

การทดลองตรวจวัดเวลาครึ่งชีวิตของวงจรอาร์ซี

โดยอาศัยโปรแกรม TINKERCAD

AN EXPERIMENT TO MEASURE THE HALF-LIFE OF RC CIRCUIT USING TINKERCAD PROGRAM

อนุชา แก้วพูลสุข¹ ณรงค์ฤทธิ์ มณีจิระปรการ² และ พงษ์ศักดิ์ โชขุนทด^{1*}

Anucha Kaewpoonsuk¹, Narongrit Maneejiraprakarn², and Pongsak Khokhuntod^{1*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²วิทยาลัยเพื่อการค้นคว้าระดับรากฐาน มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University

²The Institute for Fundamental Study, Naresuan University

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

(Received: 21 September 2023; Revised: 13 December 2023; Accepted: 22 December 2023)

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรม Tinkercad (โปรแกรมย่อยส่วน Circuits) สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติการทำงานของวงจรอาร์ซี (RC-Circuit) ทั้งนี้ได้มุ่งความสนใจที่ผลตอบสนองภาวะชั่วคราวของวงจรโดยอาศัยเวลาอ้างอิงภายในโปรแกรมสำหรับการจับเวลาในการทดลอง ภายในบทความได้แบ่งการทดลองออกเป็นสามตอน โดยการทดลองตอนที่ 1 เป็นการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเปรียบเทียบกับค่าเวลาและค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ การทดลองตอนที่ 2 เป็นการตรวจวัดค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจรเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อเป็นการยืนยันว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวเก็บประจุไม่มีผลต่อค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจร และการทดลองตอนที่ 3 เป็นการตรวจวัดค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจรเพื่อวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้า ทั้งนี้อาศัยการแปรค่าความต้านทานในวงจร ตามด้วยการนำค่าความชันของเส้นกราฟระหว่างค่าเวลาครึ่งชีวิตกับค่าความต้านทานมาใช้คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองทั้งสามตอนสอดคล้องกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยที่ผลการทดลองตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า พบว่า มีค่าผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 1% ทั้งนี้แนวทางการใช้ประโยชน์จากงานวิจัย ได้แก่ การนำรูปแบบการทดลองและเทคนิคการต่อวงจรไปใช้สำหรับการเรียนการสอนหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับวงจรอาร์ซี นอกจากนี้

ยังสามารถนำไปใช้ดัดแปลงสำหรับการสร้างระบบตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดค่าความจุไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: วงจรอาร์ซี โปรแกรม Tinkercad เวลาครึ่งชีวิต การตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า ผลตอบสนองธรรมชาติ

Abstract

The research article presents the application of the Tinkercad program, specifically its Circuits sub-program, for examining the operational characteristics of RC circuits. This work focuses on the circuit's transient response, utilizing a time reference within the program for timekeeping in the experiments. The experiment outlined in the article is divided into three parts. The first part of the experiment aimed to measure the voltage across the capacitor in relation to time and the used capacitance. This part confirms the property of changing the exponential function of the voltage across the capacitor. The second part of the experiment focused on measuring the half-life of the circuit in comparison to the supply voltage and the used capacitance. The results of this experiment confirm that the initial voltage value of the capacitor does not affect the circuit's half-life time. For the third part of the experiment, we measured the circuit's half-life time to analyze its electrical capacity by varying the resistance in the circuit. From the electrical capacity measurement experiment results, we found that the maximum error was equal to 1%. Guidelines for using the research include experimental models and circuit-building techniques for teaching topics related to RC circuits. It can also be modified to create a capacitance measurement system for capacitance sensors.

Keywords: RC circuit, Tinkercad program, Half-life, Capacitance measurement, Natural response

บทนำ

วงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ต่อรวมกันซึ่งนิยมเรียกทับศัพท์ว่า วงจรอาร์ซี (RC Circuits) เป็นหัวข้อเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าพื้นฐานที่มีการเรียนการสอนในรายวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน และรายวิชาด้านไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ระดับมหาวิทยาลัย การแก้สมการเพื่อการวิเคราะห์ หรือเพื่อการอธิบายคุณสมบัติการทำงานของวงจรจะอาศัยคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์เป็นเครื่องมือที่สำคัญ โดยที่ทั้งประเด็นการเป็นวงจรไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ และความจำเป็นต้องอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ในการวิเคราะห์ทำให้ผู้เรียน

ส่วนใหญ่จะมีความรู้สึกว่าการหัดข่อดังกล่าวนี้นี้มีความยากในการทำ ความเข้าใจ อย่างไรก็ตามองค์ความรู้เกี่ยวกับวงจรอาร์ซีพื้นฐานถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาออกแบบระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลายประเภท เช่น ตัวหน่วงเวลาและลดการกระเพื่อมของสัญญาณตัวจ่ายกระแสค่าสูงช่วงเวลาสั้น และตัวกำเนิดสัญญาณไฟกระพริบแบบง่าย (Alexander & Sadiku, 2009) นอกจากนี้ยังได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการอ่านข้อมูลค่าความต้านทานจากเซนเซอร์ (Hidalgo-López et al., 2019; Hidalgo-López et al., 2020; Hidalgo-López et al., 2021; López-Lapeña, Serrano-Finetti & Casas, 2016; Reverter, 2012; Sifuentes et al., 2008; Simić, 2022) หรือการอ่านค่าความจุไฟฟ้า (Czaja, 2020; Kaewpoonsuk & Poonart, 2011) เป็นต้น

ในการเรียนการสอนหัวข้อวงจรอาร์ซีนั้น บ่อยครั้งที่ผู้สอนจำเป็นต้องอาศัยชุดสาธิตการทำงานของวงจร หรือการออกแบบกิจกรรมเพื่อให้ผู้เรียนได้ฝึกทำปฏิบัติการทดลองเพื่อให้ผู้เรียนได้เห็นถึงพฤติกรรมการทำงาน (การตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต) ของวงจร ทั้งนี้ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุดอุปกรณ์ กิจกรรม หรือสื่อการเรียนการสอนที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุและวงจรอาร์ซีอย่างต่อเนื่อง (Davis et al., 2019; Erol & Önder, 2021; Galeriu, Letson & Esper, 2015; Ganci, 2013; Groff, 2019; Kezerashvili, 2012; Lima, 2015; Moya, 2017; Mungan, 2021; Oliveira & Paixão, 2019; Pili, Violanda & Pili, 2019; Rosanti, Sudjito & Rondonuwu, 2019; Sanjaya, 2018; Schiavon et al., 2022; Syed & Lovatt, 2020) สำหรับกรณีที่ชั่วโมงการจัดการสอนมีช่วงเวลาจำกัด หรือในช่วงเริ่มต้นของการเริ่มเรียนรู้ทางด้านการต่อวงจรของผู้เรียน เพื่อเป็นการลดเวลาและหลีกเลี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับทั้งตัวอุปกรณ์และผู้ใช้งาน การประยุกต์ใช้โปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของวงจรเป็นทางเลือกหนึ่งของการดำเนินการที่นิยมมาใช้โปรแกรม Tinkercad (Tinkercad, n.d.) เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะการต่อวงจรคล้ายกับการต่อวงจรบนบอร์ดทดลองหรือมีลักษณะเป็นการทดลองเสมือนจริง โดยที่การตรวจวัดค่ากระแส ความต้านทาน และค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์เตจ; Voltage) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงจรนั้น ผู้ใช้จะต้องต่อเครื่องมือวัดตามหลักการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องมือวัดนั้นๆ เช่น การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจะต้องต่อโพรบของมิเตอร์คร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัด การตรวจวัดกระแสจะต้องต่อโพรบของมิเตอร์อนุกรมกับอุปกรณ์นั้นๆ ในขณะที่การตรวจวัดค่าความต้านทานจำเป็นจะต้องตัดผลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกจากวงจรก่อนเพื่อป้องกันอันตรายและความเสียหายที่จะเกิดกับมิเตอร์ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวนี้เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบวงจรในลักษณะเวลาจริง (Real time) ทั้งนี้ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรม Tinkercad สำหรับการทำกิจกรรมการทดลอง เช่น ปฏิบัติการการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ (Katman, Sisuk & Kaewpoonsuk, 2022) การประยุกต์ใช้วงจรตรวจวัดความชื้นที่มีการออกแบบไว้ในโปรแกรม Tinkercad สำหรับการออกแบบระบบควบคุมน้ำหยดเพื่อการปลูก

ฟิช (Chen, 2022) การออกแบบและทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เพื่อการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ (Patel et al., 2020) การประยุกต์สำหรับการเรียนการสอนเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครโปรเซสเซอร์ และหุ่นยนต์ (Juanda & Khairullah, 2020); Luchaninov et al., 2021) การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Eryilmaz & Deniz, 2021) อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) (Husin, Ramli & Alwi, 2022) ทรานซิสเตอร์ (Laudek & Nawi, 2023) และการเรียนการสอนไมโครคอนโทรลเลอร์ในช่วงสถานการณ์โควิด (Erdogan et al., 2023) เป็นต้น

ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบการทดลองวงจรอาร์ซีโดยอาศัยโปรแกรม Tinkercad เป็นเครื่องมือสำหรับการทดลอง ทั้งนี้เทคนิคสำคัญที่นำมาใช้คือการอาศัยตัวจับเวลาของโปรแกรมเป็นตัวจับเวลาครึ่งชีวิตของวงจรอาร์ซี เทคนิคการออกแบบตัวแสดงผลเพื่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าในวงจร และเทคนิคการใช้สมาร์ตโฟนบันทึกภาพวิดีโอสำหรับการบันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเทียบเวลา ซึ่งปฏิบัติการทดลองดังกล่าวนี้สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนหัวข้อวงจรอาร์ซีต่อไปได้

เมื่อมีการป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดให้กับวงจรอาร์ซีอย่างง่าย (วงจรอาร์ซีอันดับที่ 1; The 1st Order RC-Circuit) การตอบสนองของวงจรจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาแรกหรือเริ่มต้นแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏที่ตัวเก็บประจุจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้น (ค่าเดิม) เข้าสู่ค่าใหม่ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) ซึ่งผลการทำงานในช่วงเวลาดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่า ผลตอบสนองธรรมชาติ (Natural response) หรือผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) สำหรับช่วงเวลาต่อมา แรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าคงที่ (กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์) ซึ่งการทำงานในช่วงเวลานี้จะถูกระบุเรียกว่า ผลตอบสนองบังคับ (Forced response) หรือผลตอบสนองคงตัว (Steady-state response)

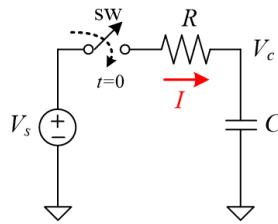
ตามภาพที่ 1 วงจรอาร์ซีอย่างง่ายถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า V_s เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า (V_c) ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีค่าเป็น $V_{(0)}$ หลังจากสับสวิตช์ (sw) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_c กับค่าเวลา (t) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1

$$RC \frac{dV_c}{dt} + V_c - V_s = 0 \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) เมื่อทำการแก้สมการเพื่อวิเคราะห์หาค่า V_c พร้อมทั้งเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไป จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2

$$V_c = V_{(\infty)} + (V_{(0)} - V_{(\infty)}) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (2)$$

เมื่อ $\tau = RC$ ถูกเรียกว่า ค่าคงที่เวลา (time constant) ของวงจร $V_{(0)}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น ($t = 0$) ของตัวเก็บประจุ และ $V_{(\infty)}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายหรือค่าแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว ($t = \infty$) ของตัวเก็บประจุ โดยที่ค่า $V_{(0)}$ นั้นจะมีหลักในการพิจารณาหาค่า คือ ให้ถือว่าก่อนที่จะถึงเวลา $t = 0$ นั้น (ก่อนที่จะสวิตช์จะปิดวงจร) เวลาได้ผ่านมานานมากจนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกันสำหรับ $V_{(\infty)}$ นั้น เริ่มพิจารณาหลังจากสวิตช์จะปิดวงจรจนกระทั่ง $t = \infty$ ให้ถือว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 1 วงจรอาร์ซีอย่างง่าย

พิจารณาคณสมบัติการอัดประจุและการคายประจุของวงจรอาร์ซี ดังภาพที่ 2 โดยในภาพที่ 2(ก) เป็นภาวะเริ่มต้นของวงจร ภาพที่ 2(ข) เป็นการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ ซึ่งหลังจากกดสวิตช์ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เมื่ออาศัยสมการในรูปทั่วไปตามสมการที่ (2) มาช่วยวิเคราะห์จะสามารถพิจารณาได้ดังนี้ แรงดันไฟฟ้า $V_{(\infty)}$ มีค่าเท่ากับ V_s แรงดันไฟฟ้า $V_{(0)}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และ $R = R_{sw}$ เมื่อ R_{sw} คือ ค่าความต้านทานแฝงของสวิตช์ sw ซึ่งจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 3

$$V_c = V_s + (0 - V_s) \exp\left(\frac{-t}{R_{sw}C_x}\right) = V_s - V_s \exp\left(\frac{-t}{R_{sw}C_x}\right) \quad (3)$$

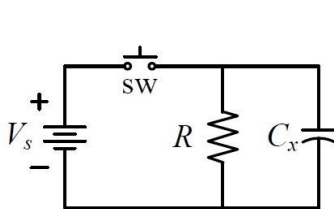
จากสมการที่ (3) เมื่อถือว่า R_{sw} มีค่าต่ำมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ดังนั้น V_c ก็จะมีค่าลู่เข้าหา V_s อย่างรวดเร็ว เมื่อกดสวิตช์ค้างไว้แรงดันไฟฟ้า V_c จะยังคงมีค่าเท่ากับ V_s ต่อไป ดังแสดงตามภาพที่ 2(ง) ลำดับต่อมาหากมีการปล่อยมือจากสวิตช์ตามภาพที่ 2(ค) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_c = V_s$ นี้จะถือว่าเป็นค่าเริ่มต้นของช่วงเวลาใหม่ที่กำลังเริ่มพิจารณา นั่นคือค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{(0)}$ ของช่วงเวลาใหม่ก็จะมีค่าเท่ากับ V_s (ขณะที่ปล่อยสวิตช์ $V_{(0)} = V_s$) โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{(\infty)}$ ของช่วงเวลาใหม่นี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($V_{(\infty)} = 0$) เนื่องจากที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวเก็บประจุถูกต่อไว้ที่กราวด์ของวงจร ทั้งนี้เมื่ออาศัยสมการที่ 2 มาช่วยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4

$$V_c = 0 + (V_s - 0) \exp\left(\frac{-t}{RC_x}\right) = V_s \exp\left(\frac{-t}{RC_x}\right) \quad (4)$$

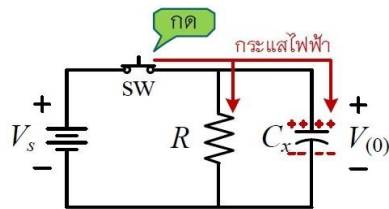
เมื่อ t คือ ค่าเวลาที่พิจารณา (หลังจากปล่อยมือจากสวิตช์) V_s คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ ณ ภาวะเริ่มต้น ($t=0$)

จากสมการที่ 4 จัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ 5

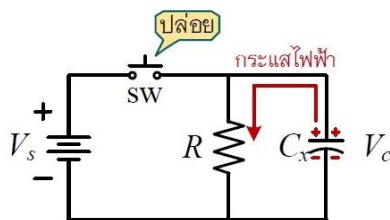
$$t = -(RC_x) \ln(V_C / V_s) \quad (5)$$



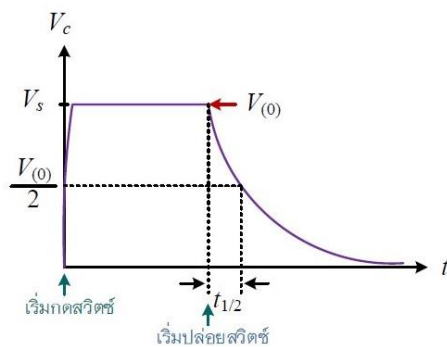
(ก) ภาวะปกติ



(ข) การอัดประจุ



(ค) การคายประจุ



(ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) กับค่าแรงดันไฟฟ้า V_C

ภาพที่ 2 วงจรอาร์ซีที่ใช้ในการทดลอง (ก) ภาวะปกติ (ข) การอัดประจุ (ค) การคายประจุ และ (ง) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) กับค่าแรงดันไฟฟ้า V_C

จากสมการที่ 5 เมื่อกำหนดให้ $t_{1/2}$ คือ ค่าเวลาหลังจากปล่อยมือจากสวิตช์จนกระทั่ง แรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 0.5 เท่าของค่าเริ่มต้น ($V_c = V_s / 2$) โดยจะเรียกค่าเวลานี้ว่า เวลาครึ่งชีวิต (Half-life) ของวงจร โดยจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 6

$$t_{1/2} = -\ln(0.5)RC_x = 0.693RC_x \quad (6)$$

จากสมการที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่า $t_{1/2}$ นั้นจะแปรผันตรงกับค่า R โดยมีพจน์ $0.693C_x$ เป็นค่าความชันของสมการ

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังภาพที่ 3(ก)-(ค) โดยแต่ละตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c) เปรียบเทียบกับค่าเวลา (t) และค่าความจุไฟฟ้า (C_x)

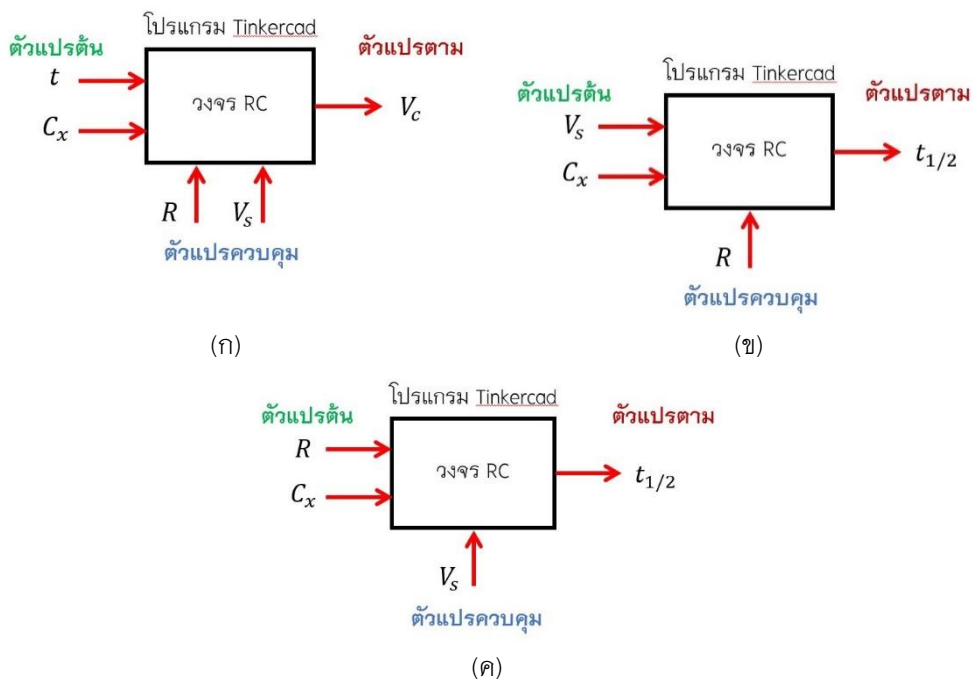
แผนภาพลักษณะการทดลองตอนที่ 1 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3(ก) เป็นซึ่งเป็นการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า V_c ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (t) โดยใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้า (C_x) สี่ค่า ได้แก่ 100 μF 200 μF 300 μF และ 400 μF (ใช้ $V_s = 5 \text{ V}$ และ $R = 100 \text{ k}\Omega$ เป็นตัวแปรควบคุม) โดยที่วิธีการต่อวงจรนั้นเริ่มต้นจากการนำแผงวงจรจากแถบอุปกรณ์ด้านขวามือของโปรแกรมมาวางในส่วนพื้นที่ต่อวงจร ตามด้วยการนำอุปกรณ์อื่นๆ ที่เหลือ ได้แก่ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_s) ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C_x) สวิตช์กด (sw) และ มัลติมิเตอร์ปรับโหมดเป็นโวลต์มิเตอร์มาจัดวางบนแผงต่อวงจร ต่อจากนั้นเชื่อมต่ออุปกรณ์แต่ละตัวด้วยสายไฟ และเมื่อทำการรัน (Run) โปรแกรม ตัวโปรแกรมจะแสดงผลการทำงานดังภาพที่ 4 ทั้งนี้ผู้ทดลองสามารถสังเกตค่าเวลา (t) ในการทำงานได้จากแถบด้านบน (ขวามือ) ของหน้าต่างโปรแกรมประกอบกับการสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า V_c จากมัลติมิเตอร์ (โหมดโวลต์มิเตอร์)

2. การตรวจวัดค่าเวลาครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของวงจรเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (V_s) และค่าความจุไฟฟ้า (C_x)

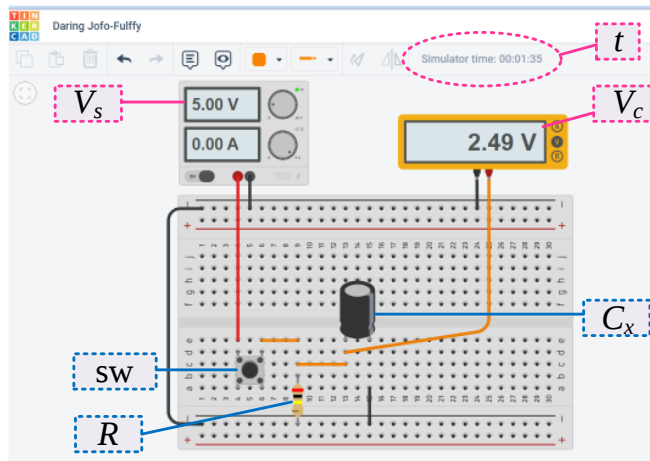
ภาพที่ 3(ข) แสดงแผนภาพลักษณะการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองแปรค่าแรงดันไฟฟ้า V_s จำนวนสี่ค่า ได้แก่ 1.25 V 2.5 V 3.75 V และ 5 V ร่วมกับการทดลองโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้า C_x สี่ค่า คือ 100 μF 200 μF 300 μF และ 400 μF ทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า V_c เพื่อการพิจารณาหาค่าเวลา $t_{1/2}$ ของวงจร โดยที่ตัวแปรควบคุมของการทดลองส่วนนี้ คือ ค่าความต้านทาน R ที่ใช้ในวงจร ทั้งนี้ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 $\text{k}\Omega$

3. การตรวจวัดค่าเวลาครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้า (C_x)

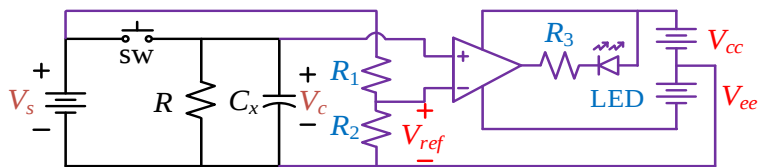
แผนภาพลักษณะการทดลองตอนที่ 3 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3(ค) โดยเป็นการทดลองตรวจวัดค่า $t_{1/2}$ ของวงจร เมื่อใช้ค่าความต้านทาน R และค่าความจุไฟฟ้า C_x ค่าต่างๆ โดยที่ตัวแปรควบคุมของการทดลองในครั้งนี้ได้แก่ขนาดของค่าแรงดันไฟฟ้า V_s (5 V) ทั้งนี้ค่า $t_{1/2}$ ที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้า C_x เปรียบเทียบกับค่า C_x ที่ต่ออยู่ในวงจร และเพื่อความสะดวกในการสังเกตสถานะที่ $V_c = V_s/2$ (จังหวะเวลาที่ $t = t_{1/2}$) ภายในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการต่อวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ออปแอมป์ LM393 และใช้ตัวต้านทานขนาด 1 k Ω จำนวน 2 ตัว (R_1 และ R_2) ต่อร่วมกันในลักษณะเป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 5 เพื่อใช้เตรียมแรงดันไฟฟ้าขนาด $V_{ref} = V_s/2$ สำหรับเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้กับขาอินพุตลบ (Inverting) ของออปแอมป์ โดยเมื่อ V_c (แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_x ซึ่งต่อเข้ากับขาอินพุตบวก (Non-inverting) ของออปแอมป์) มีค่าต่ำกว่า $V_s/2$ หลอด LED ที่ต่ออยู่ที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ก็จะสว่างขึ้น ทำให้ผู้ทดลองสามารถสังเกตได้โดยง่าย (ใช้ตัวต้านทาน R_3 สำหรับจำกัดขนาดกระแสที่ไหลผ่าน LED ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{cc} และ V_{ee} ขนาด +5 V และ -5 V สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงวงจรด้านบวกและด้านลบให้กับออปแอมป์ ตามลำดับ)



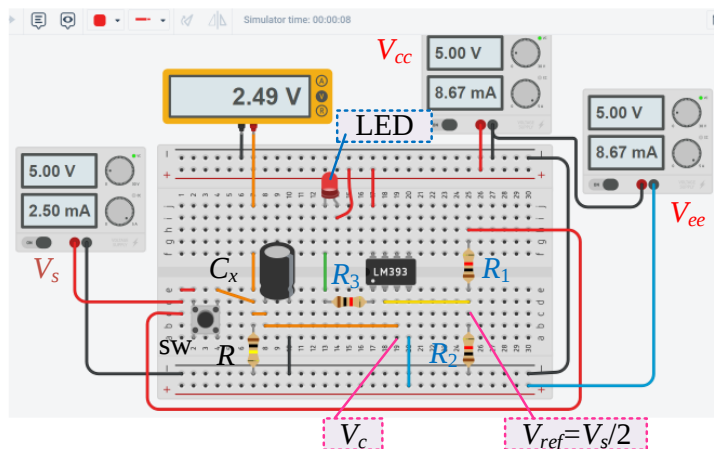
ภาพที่ 3 แผนผังแสดงลักษณะการทดสอบการทำงานของวงจร (ก) การทดลองตอนที่ 1 (ข) การทดลองตอนที่ 2 และ (ค) การทดลองตอนที่ 3



ภาพที่ 4 การต่อวงจรอาร์ซีดังภาพที่ 2 บนโปรแกรม Tinkercad และตำแหน่งแสดงเวลาการทำงานของวงจร (t) ขณะรัน (Run) โปรแกรม



(ก) แผนผังวงจร



(ข) การต่อวงจรบนโปรแกรม Tinkercad

ภาพที่ 5 การต่อวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้สังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า V_c (ทั้งนี้เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_c มีค่าต่ำกว่า 2.5 V หลอด LED ก็จะไม่สว่างขึ้น)



ภาพที่ 6 การบันทึกวิดีโอขณะทำการทดลอง

แม้ว่าตัวโปรแกรม Tinkercad จะมีออสซิลโลสโคปสำหรับการตรวจวัดรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้ใช้ แต่เนื่องจากความละเอียดของสเกล (Scale) ที่แสดงค่อนข้างหยาบ จอภาพมีขนาดเล็ก และการแสดงผลเป็นแบบอัตโนมัติ ทำให้ผู้ทดลองไม่สามารถทำการปรับภาพหรือกำหนดช่วงเวลาแสดงผลได้ตามต้องการ ดังนั้นในการทดลองนี้จะมีการใช้สมาร์ทโฟน (Samsung Galaxy A51) บันทึกภาพวิดีโอ ดังภาพที่ 6

ผลการวิจัย

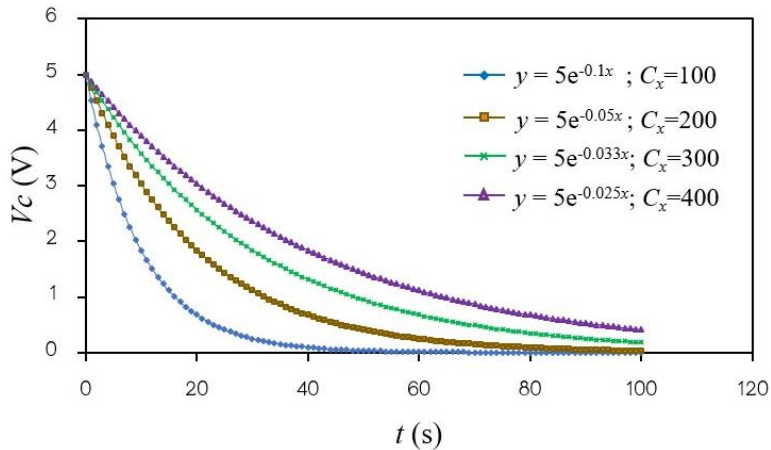
1. ผลการศึกษาการตรวจวัดค่า V_c เปรียบเทียบกับ t และค่า C_x

ภาพที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_c กับค่าเวลา t และผลการเลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้า C_x ค่า $100\ \mu\text{F}$ $200\ \mu\text{F}$ $300\ \mu\text{F}$ และ $400\ \mu\text{F}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าที่เวลาเริ่มต้น $t=0$ เส้นกราฟของแรงดันไฟฟ้า V_c จะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $5\ \text{V}$ ทุกเส้น เมื่อเวลามีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้า V_c จะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (ลู่เข้าสู่ $0\ \text{V}$) สอดคล้องกับสมการที่ 4 โดยที่ C_x ที่มีค่า $100\ \mu\text{F}$ แรงดันไฟฟ้า V_c จะลดลงเร็วที่สุด ในขณะที่ C_x ค่า $400\ \mu\text{F}$ แรงดันไฟฟ้า V_c จะลดลงช้าที่สุด

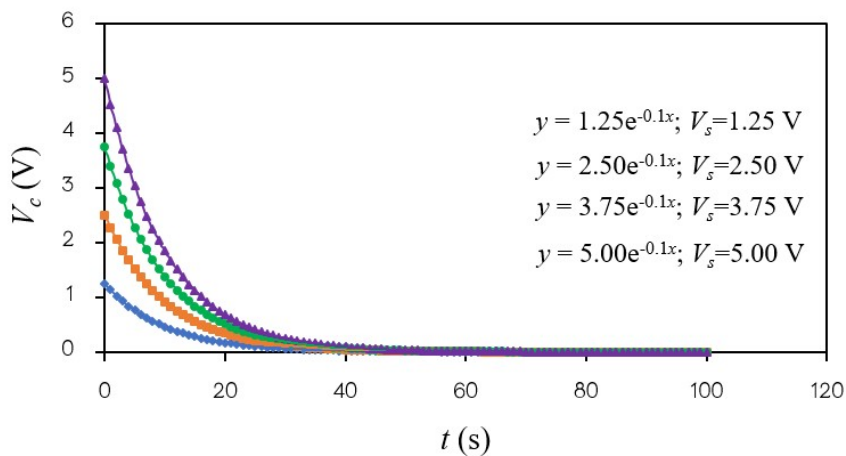
2. ผลการศึกษาการตรวจวัดค่า $t_{1/2}$ ของวงจรเปรียบเทียบกับค่า V_s และค่า C_x

ภาพที่ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_c กับค่าเวลา t กรณีเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า V_s ที่มีค่าเป็น $1.25\ \text{V}$ $2.5\ \text{V}$ $3.75\ \text{V}$ และ $5\ \text{V}$ (C_x ค่าเท่ากับ $100\ \mu\text{F}$) จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าที่เวลาเริ่มต้น $t=0$ เส้นกราฟของแรงดันไฟฟ้า V_c จะมีค่าเริ่มต้นเป็น $1.25\ \text{V}$ $2.5\ \text{V}$ $3.75\ \text{V}$ และ $5\ \text{V}$ ตามลำดับ เมื่อเวลามีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้า V_c

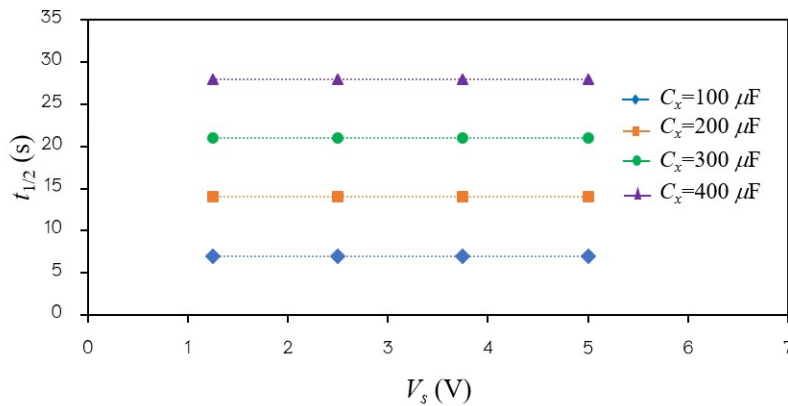
จะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (ลู่เข้าสู่ 0 V) เช่นเดียวกันกับการทดลองตอนที่ 1 โดยเมื่อใช้ C_x มีค่าเท่ากัน และใช้ V_s มีค่าสูง อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า V_c เทียบเวลา t ก็จะติดลบสูง ผลที่ตามมา คือ จะได้ค่า $t_{1/2}$ มีค่าเท่ากัน โดยไม่ขึ้นกับค่า V_s ที่ใช้ ดังภาพที่ 9 แสดงผลการตรวจวัดค่า $t_{1/2}$ เมื่อใช้ค่า C_x แตกต่างกัน โดยที่ V_s ที่มีค่าเป็น 1.25 V 2.5 V 3.75 V และ 5 V ทั้งนี้เมื่อนำ $t_{1/2}$ เหลือ (จากการใช้ V_s ค่าต่างๆ) มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่า C_x จะได้กราฟ ดังภาพที่ 10 โดยจะเห็นได้ว่าค่า $t_{1/2}$ นั้นแปรผันตรงกับค่า C_x



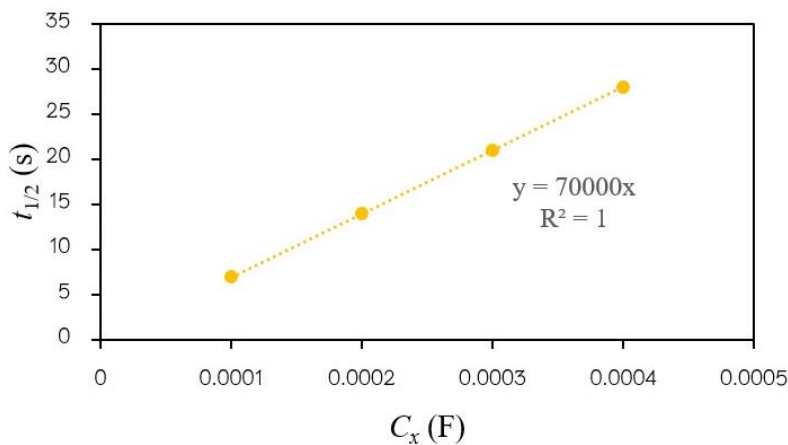
ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_c กับค่าเวลา t



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า V_c กับค่าเวลา t กรณีเลือกใช้แรงดันไฟฟ้า V_s ค่าต่างๆ



ภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $t_{1/2}$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า V_s กรณีเลือกใช้ C_x ค่าต่างๆ

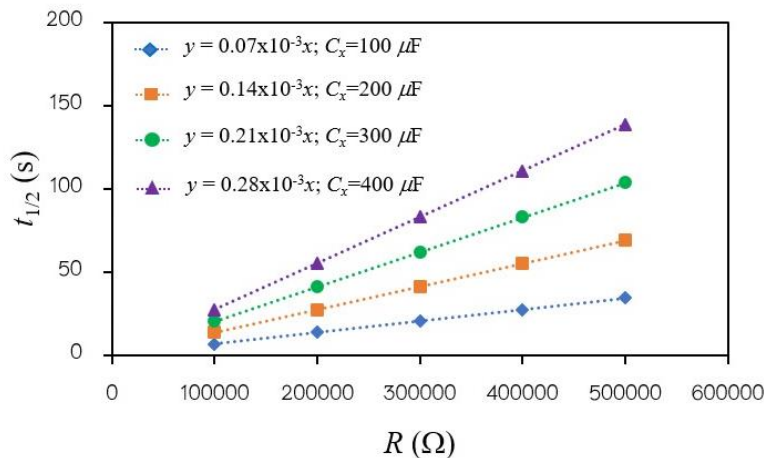


ภาพที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $t_{1/2}$ กับค่าความจุไฟฟ้า C_x

3. ผลการศึกษาการตรวจวัดค่า $t_{1/2}$ สำหรับการวิเคราะห์หาค่า C_x

ภาพที่ 11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $t_{1/2}$ กับค่าความต้านทานไฟฟ้า R กรณีเลือกใช้ความจุไฟฟ้า C_x มีค่าเป็น 100 μF 200 μF 300 μF และ 400 μF โดยจะเห็นได้ว่าค่า $t_{1/2}$ นั้นแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า R ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 6 ทั้งนี้เมื่อนำกราฟแต่ละเส้นมาวิเคราะห์หาค่าความชันของเส้นกราฟ และนำค่าความชันที่ได้หารด้วยค่า 0.693 จะมีผลทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเป็น 101 μF 202 μF 303 μF และ 404 μF ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีค่าผิดพลาดสูงสุดคิดเป็น 1% ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าวนี้มีสาเหตุมาจากปัจจัย เช่น ความละเอียดที่จำกัดของนาฬิกาจับเวลาและความละเอียดของมัลติมิเตอร์ภายในโปรแกรม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 วินาที และ 0.01 โวลต์ตามลำดับ และอาจรวมถึงค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดลอง สำหรับวิธีการลดค่าความผิดพลาดเบื้องต้น

สามารถทำได้โดยใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าสูงเพียงพอเพื่อให้ผู้ทำการทดลองสามารถจับเวลาได้ทัน รวมถึงการที่เวลาที่ใช้มีค่าสูงกว่าความละเอียดของตัวจับเวลา ก็จะส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการจับเวลามีค่าลดลง

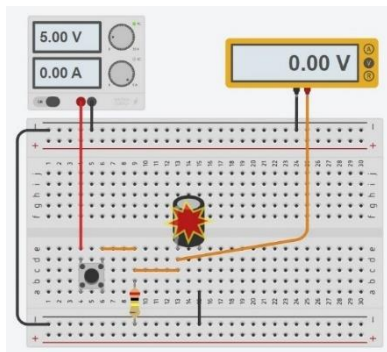


ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $t_{1/2}$ กับค่าความต้านทานไฟฟ้า R กรณีเลือกใช้ C_x ค่าต่างๆ

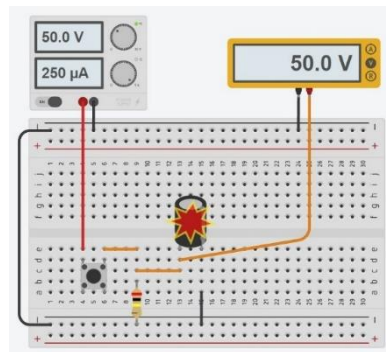
อภิปรายผล

โปรแกรม Tinkercad (โปรแกรมย่อยส่วน Circuits) เป็นโปรแกรมที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับใช้สาธิต ใช้ตรวจสอบแนวคิดการต่อวงจร หรือใช้สำหรับการออกแบบเป็นปฏิบัติการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการจัดการเรียนการสอนในชั่วโมงต้นๆ ซึ่งมีเวลาและอุปกรณ์การทดลองจริงจำกัด และเป็นการลดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นสำหรับผู้ที่ไม่มีความชำนาญในการต่อวงจร โดยที่การต่อวงจรบนโปรแกรมจะมีลักษณะหรือรูปแบบใกล้เคียงกับการต่อวงจรบนบอร์ดทดลองจริง ซึ่งแม้แต่การต่อขาของตัวเก็บประจุผิดด้านหรือการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงเกินกว่าที่ตัวเก็บประจุจะสามารถทนได้ ตัวโปรแกรมก็จะแสดงสัญลักษณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุให้ผู้ทดลองเห็นโดยไม่เกิดอันตรายจริงกับผู้ทดลอง ดังภาพที่ 12 ทั้งนี้การจำลองการต่อวงจรอาร์ซีโดยใช้โปรแกรม Tinkercad นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับการต่อวงจรบนบอร์ดทดลองจริงมากกว่าโปรแกรมอื่นๆ เช่น โปรแกรม Orcad (OrCAD, n.d.) หรือโปรแกรม EasyEDA (EasyEDA, n.d.) ผลจากการจำลองการทำงานของวงจรอาร์ซีทั้ง 3 ตอน แสดงให้เห็นว่าเวลาในการทำงานของวงจรที่แสดงไว้บนหน้าตาโปรแกรมมีความสอดคล้องกับค่าเวลาที่ใช้ในการพิจารณาการทำงานของวงจรอาร์ซีตามทฤษฎี หรือสามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (V_C) ที่ตกคร่อมตัว

เก็บประจุจะแปรผันกับเวลาในการทำงานของโปรแกรมอย่างเป็นอุดมคติ ทำให้ผลการจับเวลาครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของวงจรตรงกับผลจากการต่อวงจรบนบอร์ดทดลองและการจับเวลาจริง



(ก) การต่อตัวเก็บประจุสลับขั้ว



(ข) การใช้แรงดันไฟฟ้าเกินกำหนด

ภาพที่ 12 การแสดงสัญลักษณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการต่อวงจรผิดพลาด

ผลการทดลองตอนที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลของค่าแรงดันไฟฟ้า V_C จากการทดลองโดยใช้โปรแกรม Tinkercad ซึ่งสอดคล้องกับค่าตามทฤษฎีและผลการทดลองจากการทดลองจริงที่ได้มีการนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ (Davis et al., 2019; Erol & Önder, 2021; Galeriu, Letson & Esper, 2015; Ganci, 2013; Groff, 2019; Kezerashvili, 2012; Lima, 2015; Moya, 2017; Mungan, 2021; Oliveira & Paixão, 2019; Pili, Violanda & Pili, 2019; Rosanti, Sudjito & Rondonuwu, 2019; Sanjaya, 2018; Schiavon et al., 2022; Syed & Lovatt, 2020) ผลการทดลองตอนที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าเวลาครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของวงจรไม่ขึ้นกับขนาดของค่าแรงดันไฟฟ้า V_s แต่จะขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า C_x (กำหนดให้ความต้านทาน R เป็นค่าคงที่) และผลการทดลองตอนที่ 3 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดการประยุกต์ใช้หลักการของวงจรอาร์ซี สำหรับการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าไม่ทราบค่า (กำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าดังกล่าว คือ C_x) ผลการทดลองแปรค่าความต้านทาน R และทำการตรวจวัดค่า $t_{1/2}$ ของวงจร เมื่อนำความชันของเส้นกราฟมาใช้ในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า พบว่า ได้ผลการวิเคราะห์ตรงกับค่าความจุไฟฟ้า C_x ที่ต่ออยู่ในวงจร

การเปรียบเทียบการออกแบบปฏิบัติการทดลอง การตรวจสอบ และวิธีการวิเคราะห์ผลระหว่างปฏิบัติการที่ได้นำเสนอนี้กับงานที่ได้มีการนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ที่สำคัญ เช่น ปี ค.ศ. 2015 (Lima, 2015) เป็นการนำเสนอเกณฑ์ในการพิจารณาเวลาในการตอบสนองการทำงานของวงจร โดยพิจารณาจากการจับเวลาค่าคงตัวเวลาของวงจรอาร์ซี (RC time constant; τ) ซึ่งที่เวลาดังกล่าวนี้อ่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงเหลือประมาณเท่ากับ 0.37 เท่า

ของค่าเริ่มต้น ในขณะที่บทความนี้อาศัยการจับเวลาครึ่งชีวิตของวงจร ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 0.5 เท่าของค่าเริ่มต้น ปี ค.ศ. 2017 (Moya, 2017) เป็นการนำเสนอปฏิบัติการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function generator) เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมเพื่อกระตุ้นวงจรอาร์ซี และใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) สำหรับการตรวจจับรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ข้อดีของการใช้ออสซิลโลสโคปตรวจวัดวงจรคือผู้ทดลองสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณที่เวลาต่างๆ ได้โดยง่าย แต่เนื่องจากออสซิลโลสโคปภายในโปรแกรม Tinkercad นั้นมีการปรับหน้าจอแสดงผลแบบอัตโนมัติทำให้ผู้ทดลองไม่สามารถเลือกช่วงเวลาที่ต้องการพิจารณาได้อย่างสะดวก โดยในที่นี้จึงได้ใช้สมาร์ตโฟนของผู้ทดลองบันทึกภาพตัวเลขเวลาและค่าแรงดันไฟฟ้าแทน ซึ่งสามารถใช้ตรวจวัดผลการทดลองได้สอดคล้องกับทฤษฎี การต่อวงจรอาร์ซี ภายนอกการรวมกับการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการแสดงผล ได้ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2015 (Galeriu, Letson & Esper, 2015) และปี ค.ศ. 2018 (Sanjaya et al., 2018) โดยผลงานแรกนั้นอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดูโน (Arduino microcontroller) เป็นตัวประมวลผล ผลงานที่สองอาศัยไมโครโปรเซสเซอร์ราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi Microprocessor) เป็นตัวประมวลผล โดยทั้งสองผลงานอาศัยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบสองทางสำหรับควบคุมจังหวะการอัดและการคายประจุของตัวเก็บประจุ ในขณะที่ปฏิบัติการทดลองในบทความนี้อาศัยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบกดติด/ปล่อยดับ ต่อมาในปี ค.ศ. 2019 (Groff, 2019) ซึ่งได้มีการนำเสนอการประยุกต์ใช้ลำโพงแบบบัสเซอร์ (Buzzer) ร่วมกับสมาร์ตโฟนสำหรับการแสดงผลการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าของวงจรอาร์ซี ทั้งนี้เป็นการอาศัยสัญญาณเสียงจากลำโพงที่อยู่กับวงจรอาร์ซี เพื่อส่งผ่านไปยังสมาร์ตโฟน ความเข้มเสียงที่ตรวจวัดได้จากสมาร์ตโฟนจะถูกนำมาสอบเทียบกับขนาดของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งแม้ว่าวงจรที่ใช้จะค่อนข้างเรียบง่ายแต่การใช้สัญญาณเสียงในการทดลองจำเป็นจะต้องใช้พื้นที่ทำการทดลองค่อนข้างกว้างเพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนนักศึกษาที่ทำการปฏิบัติการทดลองในห้องเรียนเดียวกัน บทความวิจัยที่ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2019 (Davis et al., 2019) อีกหนึ่งผลงานที่มีลักษณะการต่อวงจรใกล้เคียงกับวงจรในบทความวิจัยนี้ ได้แก่ การใช้ตัวต้านทานจำนวนสองตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบกดติด/ปล่อยดับ และถ่ายโอนสัญญาณกราฟที่นำเสนอผลการทดลอง นอกจากจะมีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเทียบกับเวลาแล้ว ยังได้มีการนำค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวมาใส่ฟังก์ชันลอการิธึมธรรมชาติ (Natural Log) ซึ่งจะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นกับเวลา ข้อดีอีกประการหนึ่งของปฏิบัติการทดลองที่มีการใช้ถ่านไฟฉายคือความปลอดภัยของผู้ทดลองและตัววงจรอาร์ซี เนื่องจากหากมีการต่อวงจรผิดพลาด กระแสที่ไหลในวงจรก็จะมีค่าต่ำไม่เหมือนกับการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220V อย่างไรก็ตามหากใช้สำหรับการเรียน

การสอนจำนวนหลายกลุ่มต่อเนื่องในแต่ละปีการศึกษาก็จะมีผลทำให้เสียค่าใช้จ่ายอย่างต่อเนื่องตามมา ทั้งนี้ในบทความนี้เป็นการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองการทำงานของวงจรทำให้ผู้ควบคุมการทดลองไม่จำเป็นต้องเตรียมถ่านไฟฉาย ในปี ค.ศ. 2020 (Syed & Lovatt, 2020) ได้มีการนำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์ผลการทดลองวงจรอาร์ซี โดยอาศัยการใส่ฟังก์ชันลอการิธึมชาติให้กับค่าเวลาที่อยู่ในแกน x ของรูปกราฟ ซึ่งพบว่า ที่เวลา $t = \tau$ จะเป็นตำแหน่งที่เส้นกราฟมีค่าความชันต่ำที่สุด แต่สำหรับบทความนี้มุ่งความสนใจที่ค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจรซึ่งมีความคล้ายคลึงกันกับค่าครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี และสุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม Tinkercad ที่ได้เคยมีการนำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 2022 (Katman, Sisuk & Kaewpoonsuk, 2022) จะมีความแตกต่างกัน โดยที่ในงานดังกล่าวเป็นการตรวจวัดค่าความต้านทานภายในของมัลติมิเตอร์ที่ทีมผู้พัฒนาโปรแกรมใส่ไว้ โดยไม่ได้สนใจประเด็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ในขณะที่บทความนี้ให้ความสนใจกับผลตอบสนองของตัวครุฑของระบบ และการประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งได้อาศัยการนำค่าเวลาในการทำงานของโปรแกรมมาใช้สำหรับการวิเคราะห์

สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้โปรแกรม Tinkercad (โปรแกรมส่วนย่อย Circuits) สำหรับการทดลองเกี่ยวกับการตรวจวัดค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจรอาร์ซี ภายในบทความนี้ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับทฤษฎี โดยที่ผลการทดลองตอนที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเทียบกับเวลา ผลการทดลองตอนที่ 2 เป็นการยืนยันว่าขนาดของค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายในวงจรไม่มีผลต่อค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจรอาร์ซี และผลการทดลองตอนที่ 3 เป็นการยืนยันว่าค่าเวลาครึ่งชีวิตของวงจรอาร์ซีนั้น จะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออยู่ภายในวงจร ซึ่งเมื่อแปรค่าความต้านทานจะมีผลทำให้ได้ค่าความชันของเส้นกราฟขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า การนำค่าความชันที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าที่ได้พบว่ามีความสอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในวงจร โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ $\pm 1\%$ ทั้งนี้การนำรูปแบบการทดลองและเทคนิคการต่อวงจรไปใช้สำหรับการเรียนการสอนนั้น สามารถทำได้ทั้งในรูปแบบการต่อวงจรจริงในห้องทดลองหรือการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Tinkercad นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอยังสามารถนำไปบูรณาการร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมจังหวะการทำงานของสวิตช์และการจับเวลา เพื่อต่อยอดเป็นอุปกรณ์เครื่องมือวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะผู้พัฒนาโปรแกรม Tinkercad ซึ่งเป็นโปรแกรมที่น่าเชื่อถือและมีประโยชน์สำหรับวงการศึกษาและการพัฒนางานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Alexander, C.K., & Sadiku, M.N.O. (2009). **Fundamentals of electric circuits**. (4th Edition). The McGraw-Hill Companies Inc.
- Chen, R. (2022). Research on Drip Irrigation System Based on Self-Controlled System. **IOP Conf. Series: Journal of Physics**, **2386**, 012046, 1–10.
- Czaja, Z. (2020). A measurement method for capacitive sensors based on a versatile direct sensor-to-microcontroller interface circuit. **Measurement**, **155**, 107547, 1–11.
- Davis, C.E., Piffer, J.L., Cohen, M.D., & Polley, J.P. (2019). Applying Thévenin's Theorem and Kirchhoff's Junction Rule to a Common RC Circuit. **The Physics Teacher**, **57**(4), 242–243.
- EasyEDA. (n.d.). **EasyEDA Program**. Retrieved September, 21, 2023, from www.easyeda.com
- Erdogan, R., Saglam, Z., Cetintav, G., & Yilmaz, F.G.K. (2023). Examination of the usability of Tinkercad application in educational robotics teaching by eye tracking technique. **Smart Learning Environments**, **10**(27), 1–23.
- Erol, M., & Önder, E.B. (2021). Conceptual framework on teaching capacitors and inductors. **Momentum: Physics Education Journal**, **5**(2), 182–193.
- Eryilmaz, S., & Deniz, G. (2021). Effect of Tinkercad on Students' Computational Thinking Skills and Perceptions: A Case of Ankara Province. **Turkish Online Journal of Educational Technology–TOJET**, **20**(1), 25–38.
- Galeriu, C., Letson, C., & Esper, G. (2015). An Arduino Investigation of the RC Circuit. **The Physics Teacher**, **53**(5), 285–288.
- Ganci, S. (2013). The RC circuit experiment. **Physics Education**, **29**(3), 1–5.
- Groff, J.R. (2019). Estimating RC Time Constants Using Sound. **The Physics Teacher**, **57**(6), 393–396.
- Hidalgo-López, J.A., Botín-Córdoba, J.A., Sánchez-Durán, J.A., & Oballe-Peinado, Ó. (2019). Fast Calibration Methods for Resistive Sensor Readout Based on Direct Interface Circuitsscar. **Sensors**, **19**(18), 1–19.
- Hidalgo-López, J.A., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J., & Sánchez-Durán, J.A. (2021). Two-Capacitor Direct Interface Circuit for Resistive Sensor Measurements. **Sensors**, **21**(4), 1–17.
- Hidalgo-López, J.A., Sánchez-Durán, J.A., & Oballe-Peinado, Ó. (2020). Reducing Measurement Time in Direct Interface Circuits for Resistive Sensor Readout. **Sensors**, **20**(9), 1–13.

- Husin, N.A., Ramli, M., & Alwi, D.M. (2022). Tinkercad simulation software to optimize online teaching and learning in embedded internet of things. **Journal of Counseling and Educational Technology**, 5(2), 49–57.
- Juanda, E.A., & Khairullah, F. (2020). Tinkercad Application Software to Optimize Teaching and Learning Process in Electronics and Microprocessors Subject. **Proceedings of the 6th UPI International Conference on TVET 2020 (TVET 2020)**, 520, 1–5.
- Kaewpoonsuk, A. & Poonart, K. (2011). A Low-Cost Interfacing Circuit for Capacitance Measurement. **NU Science Journal**, 8(2), 87–96.
- Katman, R., Sisuk, N., & Kaewpoonsuk, A. (2022). An experiment to measure the internal resistance of a multimeter on the Tinkercad program. **PSRU Journal of Science and Technology**, 7(1), 100–116.
- Kezerashvili, R.Y. (2012). Teaching RC and RL Circuits using Computer-supported Experiments. **IERI Procedia**, 2, 609–615.
- Laudek, N.H., & Nawli, M.N.M. (2023). Development and Usability of Transistor Module using Tinkercad among UPSI Physics Trainee Teachers. **Asian Journal of Education and Social Studies**, 49(1), 136–141.
- Lima, F.M.S. (2015). A Better Criterion for the Discharging Time in an RC Circuit. **The Physics Teacher**, 53(1), 44–45.
- López-Lapeña, O., Serrano-Finetti, E., & Casas, O. (2016). Low-Power Direct Resistive Sensor-to-Microcontroller Interfaces. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, 65(1), 222–230.
- Luchaninov, D., Bazhenov, R., Sabirova, V., Mamyrova, M., & Zholdosheva, A. (2021). Online Training of Students of Applied Physics in the Field of Circuitry. **IOP Conf. Series: Journal of Physics**, 1889, 022030, 1–6.
- Moya, A.A. (2017). Connecting Time and Frequency in the RC Circuit. **The Physics Teacher**, 55(4), 228–230.
- Mungan, C.E. (2021). A gentle introduction to RC and LR circuits. **Lat. Am. J. Phys. Educ.**, 15(3), 1–3.
- Oliveira, F., & Paixão, J.A. (2019). The RC circuit with an Olympic twist. **Physics Education**, 54(3), 035002, 1–9.
- OrCAD. (n.d.). **OrCAD Program**. Retrieved September, 21, 2023, from www.orcad.com
- Patel, K., Borole, S., Ramaneti, K., Hejib, A., & Raja Singh, 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.
- Pili, U., Violanda, R., & Pili, J. (2019). Using a digital voltmeter and a smartphone camera to investigate the RC circuit. **Physics Education**, 54(3), 033004, 1–4.
- Reverter, F. (2012). The Art of Directly Interfacing Sensors to Microcontrollers. **J. Low Power Electron.**, 2(4), 265–281.

- Rosanti, Y.P., Sudjito, D.N., & Rondonuwu, F.S. (2019). The elaboration of understanding by design in a physics learning about capacitor circuits. **Indonesian Journal of Science and Education**, **3**(2), 66–75.
- Sanjaya, W.S.M, Anggraeni, D., Sambas, A., & Denya, R. (2018). Numerical Method and Laboratory Experiment of RC Circuit using Raspberry Pi Microprocessor and Python Interface. **IOP Conf. Series: Journal of Physics**, **1090**, 012015, 1–7.
- Schiavon, G.J., Santos, O.R., Batista, M.C., Braga, W.S., & Bratti, V.M. (2022). Experimental Didactic Kit for teaching resistors, capacitors and RC timing circuits. **Physics Education**, **57**(5), 055019.
- Sifuentes, E., Casas, O., Reverter, F., & Pallas-Areny, R. (2008). Direct interface circuit to linearise resistive sensor bridges. **Sensors and Actuators A**, **147**(1), 210–215.
- Simić, M. (2022). Microcontroller-based Readout of Resistive Sensors. **IFAC PapersOnLine**, **55–4**, 242–247.
- Syed, M.Q., & Lovatt, I. (2020). Seeing Is Believing: Demonstrating the RC Time Constant Visually. **The Physics Teacher**, **58**(6), 402–404.
- Tinkercad. (n.d.). **Tinkercad Program**. Retrieved September, 21, 2023, from <https://www.tinkercad.com>