

การพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุ  
ของวงจร RC  
DEVELOPMENT OF RC CHARGE-DISCHARGE  
EXPERIMENT SET



ณัฐกานต์ วงศ์วิสิทธิ์ตระกูล  
พรรณนิภา พงษ์สวัสดิ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2559

DEVELOPMENT OF RC CHARGE-DISCHARGE  
EXPERIMENT SET



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจรรวม RC  
Development of RC Charge-Discharge Experiment Set

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐกานต์ วงศ์วิสิฐตระกูล รหัสนักศึกษา 56051133  
นางสาวพรรณนิภา พงษ์สวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 56051174

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดตา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลติลก ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก กรรมการ	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดตา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐกานต์ วงศ์วิสิฐตระกูล	รหัสนักศึกษา 56051133
	นางสาวพรรณนิภา พงษ์สวัสดิ์	รหัสนักศึกษา 56051174
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC ชุดทดลองประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับตัวต้านทานอย่างอนุกรม การประจุและการคายประจุถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino Uno โปรแกรม LabVIEW ถูกใช้เพื่อสร้าง Windows User Interface สำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผลการวัดผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ในขั้นตอนการประจุ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งสับสวิทช์ให้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง +5 V ต่อเข้ากับวงจรอนุกรม RC จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านค่าโวลเตจตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นตามเวลาและส่งผลการวัดผ่านทางพอร์ต USB ไปแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโวลเตจและเวลา เมื่อตัวเก็บประจุถูกประจุจนเต็ม ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งสับสวิทช์ให้วงจร RC ต่อลงกราวด์เพื่อให้เกิดการคายประจุและส่งผลการวัดค่าโวลเตจตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ลดลงตามเวลาไปยังคอมพิวเตอร์ จากนั้นคอมพิวเตอร์จะคำนวณค่าคงตัวเวลาของวงจร RC จากกราฟการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเอกโพเนนเชียล จากผลการวัดค่าคงตัวเวลาพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนจากการคำนวณทางทฤษฎีน้อยกว่า 2%

คำสำคัญ : ค่าคงที่เวลา การประจุ การคายประจุ Arduino LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Development of RC Charge-Discharge Experiment Set		
<b>Student</b>	Miss Nattakan Wongwisittrakul	Student ID 56051133	
	Miss Pannipa Pongsawat	Student ID 56051174	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)		
<b>Department</b>	Physics		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)		
<b>Academic</b>	2016		
<b>Adviser</b>	Assoc. Prof. Dr. Warawoot Thowladda		
<b>Co-adviser</b>	Dr. S. Tipawan Khlayboonme		

### Abstact

This special project proposes the development of RC charge- discharge experiment set. The experiment set consists of series Resistor-Capacitor circuits. Charge and discharge behavior of the circuit are controlled by an Arduino Uno controller board. LabVIEW software is used to create a windows user interface. The purpose of the created windows user interface is to control a function of the controller board and to show the measurement result on the computer display. For the charging step, the controller connects a +5 V DC power supply to the RC circuit. The capacitor will be charged up through the resistor until the voltage across it reaches the supply voltage (+5 V). The voltage across the capacitor which increases with time will be read by an analog port of the microcontroller and sent to computer via USB port. The computer displays a RC charging curve on the display screen. When the capacitor is charged fully, the discharge step was performed by the controlled. In this step, the RC circuit was connected to ground. The decreasing voltage across the capacitor will be read and sent to computer. The computer calculates a time constant of the RC circuit from the exponential charge- discharge curve. The developed experiment set is tested by measuring a time constant of a RC circuit with different values of R and C. The experimental results show an error with less than 2% compared to the theoretical

**Keywords** : time constant, charging, discharging, Arduino, LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์อย่างสูงจาก รศ.ดร.วราวุฒิ เถาวัลดีดา ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์ ขอขอบคุณดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อย่างสูงที่ได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ต่อการนำมาพัฒนาโครงการพิเศษนี้ ทั้งยังคอยกระตุ้น ให้กำลังใจในการทำงาน อีกทั้งยังคอยให้ความรู้ทางด้านวิชาการในเรื่องใหม่ๆ ให้กับลูกศิษย์ ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

นอกจากอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ต้องขอขอบคุณ คุณวีระพงษ์ วิริยประสิทธิ์ชัย และคุณธิดิกานต์ โชติกลาง ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมซึ่งได้ประโยชน์เป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณอาจารย์ รุ่งพี รุ่งน่องภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ได้คำปรึกษา คำแนะนำ ทั้งยังเป็นกำลังใจให้โครงการพิเศษนี้ผ่านไปได้ด้วยดี โดยเฉพาะเพื่อนๆห้องปฏิบัติการ Laser & Surface physics ที่คอยให้กำลังใจกันตลอดมา

และสุดท้ายขอกราบขอพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวของพวกเราที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจพวกเราเสมอมา และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จ ลุล่วงมาได้เป็นอย่างดี

ณัฐกานต์ วงศ์วิสิฐตระกูล  
พรณิภา พงษ์สวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ(ต่อ)	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญรูป (ต่อ)	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1 ตัวต้านทาน	2
2.2 ตัวเก็บประจุ	3
2.3 ความต้านทาน(resistance)	4
2.4 การต่อตัวต้านทานหาค่าความต้านทานสมมูล	4
2.5 ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance)	5
2.6 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Rules)	6
2.7 วงจร RC (RC Circuit)	6
2.8 Charging Process	7
2.9 Discharging Process	9
2.10 ค่าคงตัวเวลาของวงจร RC	10
2.11 Arduino Uno microcontroller	12
2.12 LabVIEW Programming	14
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>16</b>
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17
3.2 ขั้นตอนการต่อวงจร RC	18
3.3 ขั้นตอนการเชื่อม Arduino Uno microcontroller board กับวงจร RC	18
3.4 ขั้นตอนการเชื่อม Arduino Uno microcontroller board กับคอมพิวเตอร์	19
3.5 ขั้นตอนหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจร RC โดยการเขียนโปรแกรม	19

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุม Arduino (LIFA)	21
3.7 เขียน block diagram เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ด้วยโปรแกรมLabVIEW	23
3.8 หน้า front panel และวิธีการใช้โปรแกรม	25
3.9 ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม RC CHARGE-DISCHARE EXPERIMET SET	26
3.9.1 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building	26
3.9.2 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine	31
3.10 ขั้นตอนประกอบกล่องชุดการทดลอง	33
3.11 วิธีการหาค่า time constant จากชุดการทดลอง	34
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>35</b>
4.1 ผลการทดลอง	35
4.2 การอภิปรายผล	39
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>40</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>42</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>43</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่ $R = 10 \text{ k}\Omega$	35
4.2 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่ $R = 12 \text{ k}\Omega$	36
4.3 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่ $R = 15 \text{ k}\Omega$	37
4.4 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่ $R = 20 \text{ k}\Omega$	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์และชนิดตัวต้านทาน	2
2.2 สัญลักษณ์และโครงสร้างของตัวเก็บประจุ	3
2.3 ลวดตัวนำที่มีความยาว L และพื้นที่ตัดขวาง A	4
2.4 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (direct current circuit or DC circuit)	5
2.5 การต่อตัวต้านทานทั้งสองแบบคือแบบอนุกรม (series) และแบบขนาน (parallel)	5
2.6 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า	6
2.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในวงจรสอง loop	6
2.8 RC circuit	6
2.9 ค่าประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุที่เวลา t ใดๆ ขณะทำการอัดประจุ	8
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (a) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (b) กับเวลา(t)	8
2.11 ค่าประจุไฟฟ้า (a) ความต่างศักย์ (b) และกระแสไฟฟ้า(c) ของตัวเก็บประจุที่เวลา t ใดๆ ขณะคายประจุ	10
2.12 กราฟระหว่างความต่างศักย์กับเวลาขณะอัดและขณะคายประจุโดยมี RC เป็นค่าคงที่เวลา	11
2.13 สัญลักษณ์โปรแกรม Arduino	12
2.14 Arduino Board	13
2.15 ตัวอย่างหน้าจอของโปรแกรม Arduino IDE	13
2.16 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)	14
2.17 สัญลักษณ์ของโปรแกรม LABVIEW	15
3.1 แผนภาพชุดการทดลองการประจุและคายประจุของวงจร RC	16
3.2 ส่วนประกอบของวงจร	16
3.3 5V Relay Module Arduino	17
3.4 ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ใช้การทดลอง	17
3.5 วงจร RC เชื่อม Arduino Uno microcontroller board	18
3.6 วงจร RC เชื่อม Arduino Uno microcontroller board ในการทดลองจริง	18
3.7 การเชื่อม Arduino Uno microcontroller board กับคอมพิวเตอร์ด้วย USB port	19
3.8 แสดงการเลือก USB port ในโปรแกรม Arduino IDE	19
3.9 ไดอะแกรมการเขียนโปรแกรมใน Arduino IDE	20
3.10 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แสดงใน serial monitor ในโปรแกรม	21
3.11 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในที่วัดได้แสดงใน serial plotter ในโปรแกรม	21
3.12 โปรแกรม NI VISA	22
3.13 โปรแกรม VI Package Manager	22
3.14 ติดตั้ง LabVIEW Interface for Arduino	22

เอกสาร 3.15 อัฟโพลต์ LIFA\_Base ลง Arduino Board ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 23 ารค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 block diagram ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW	24
3.17 block diagram ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW	24
3.18 หน้าจอแสดงผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม LabVIEW	25
3.19 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	26
3.20 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	27
3.21 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	27
3.22 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	28
3.23 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	28
3.24 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	29
3.25 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	29
3.26 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	30
3.27 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW application building	30
3.28 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine	31
3.29 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine	31
3.30 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine	32
3.31 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine	32
3.32 ไฟล์จอร์ที่ใช้ลงในกล่องชุดการทดลอง	33
3.33 กล่องชุดการทดลอง RC Charge-Discharge Experiment Set	33
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่ R=10 k $\Omega$	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่ R=12 k $\Omega$	37
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่ R=15 k $\Omega$	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่ R=20 k $\Omega$	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	พื้นที่ภาคตัดขวาง
A0	AnalogRead ของบอร์ด Arduino ขา 0
C	ตัวเก็บประจุ
D0	DigitalWrite ของบอร์ด Arduino ขา 0
F (farad)	F (farad) = หน่วยของตัวเก็บประจุ ( ฟารัด )
i	กระแสไฟฟ้า
L	ความยาว
NC	Normally Close
NO	Normally Open
Q	ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น คูลอมป์
R	ตัวต้านทาน
$V_{in}$	แรงดันไฟฟ้าส่วนอินพุท
$V_{out}$	แรงดันไฟฟ้าส่วนเอาต์พุท
$V_o$	ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟตรง
$\Omega$ (ohm)	หน่วยของตัวต้านทาน (โอห์ม)
$\rho$	สภาพต้านทานไฟฟ้า
E	แบตเตอรี่/แหล่งจ่ายไฟ
$\tau$	ค่าคงที่เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากเรื่องการประจุและการคายประจุของวงจร RC เป็นเนื้อหาในหลักสูตรของรายวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน 1 และฟิสิกส์พื้นฐาน 2 จึงพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC โดยปกติแล้วชุดทดลองนี้จะมีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการทำการทดลองจะใช้โวลต์มิเตอร์ในการวัดค่าความต่างศักย์ของวงจรโดยตรงแล้วจึงนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าปริมาณของประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนไปกับเวลา ทำให้มีข้อเสียในการทดลองคือค่าความผิดพลาดในการทดลองสูง เนื่องจากต้องป้อนค่าความต่างศักย์แก่วงจรเพิ่มขึ้นทีละน้อย จึงจะทำให้เห็นค่าความเปลี่ยนแปลงของกราฟเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างชัดเจน โครงการนี้เป็นการพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการเก็บข้อมูลของการทดลอง โดยแสดงค่าผลที่ได้จากการทดลองบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC โดยใช้คอมพิวเตอร์
2. เพื่อใช้ในการศึกษาการทดลองการเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการเขียนโปรแกรม LabVIEW
2. ทดลองการใช้ชุดทดลองในการเก็บและวิเคราะห์ผลการทดลอง
3. เขียนคู่มือการใช้และทฤษฎีของชุดทดลอง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ชุดทดลองนี้สามารถใช้ในการศึกษาในระดับมหาวิทยาลัย
2. ชุดทดลองสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำน่าเชื่อถือได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายในวงจร ได้ขนาดตามที่ต้องการ เนื่องจากอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวถูกออกแบบให้ใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวต้านทานจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทและใช้กันมากในงานด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วิทยุ, โทรทัศน์, คอมพิวเตอร์, เครื่องขยายเสียง ตลอดจนเครื่องใช้ทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ เป็นต้น [1] สัญลักษณ์ของตัวต้านทาน ที่ใช้ในการเขียนวงจรมีอยู่หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์และชนิดของตัวต้านทาน

สามารถแบ่งตัวต้านทานออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำตัวต้านทานและแบ่งตามชนิดการใช้งานของตัวต้านทาน

#### แบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำตัวต้านทาน

ตัวต้านทานที่แบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำนั้น มี 2 ชนิด คือ วัสดุประเภทโลหะ (Metallic) และวัสดุประเภทอโลหะ (No Metallic)

#### วัสดุประเภทโลหะ

ที่ใช้ทำตัวต้านทานนี้ส่วนมากจะใช้เส้นลวดเล็ก ๆ หรือแถบลวด (Ribbon) พันบนฉนวนที่เป็นแกนของตัวต้านทาน และที่ปลายทั้งสองข้างของขดลวดจะต่อขาออกมาใช้งาน แล้วเคลือบด้วยฉนวน ตัวต้านทานที่ใช้เส้นลวดพันให้เกิดค่าความต้านทานนี้ส่วนมากจะเป็นพวกไวร์วาวด์รีซิสเตอร์ (Wire Wound Resistors) ตัวต้านทานชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานที่แน่นอนและค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่เป็นตัวต้านทานที่มีขนาดใหญ่ และอัตราทนกำลังไฟฟ้า(วัตต์)สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัสดุประเภทโลหะ

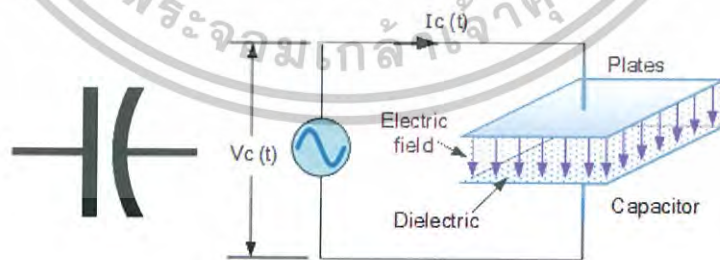
ที่ใช้ทำตัวต้านทานนี้ ได้แก่ ผงคาร์บอน (Carbon) หรือผงกราไฟต์ (Graphite) ที่อัดตัวกันแน่นเป็นแท่ง และใช้ฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันความชื้น แล้วต่อขาออกมาใช้งาน จากคุณสมบัติเฉพาะตัวของผงคาร์บอนและกราไฟต์ที่มีค่าความต้านทานสูงมากๆ จึงสามารถนำมาใช้ทำเป็นตัวต้านทานที่มีค่าสูงๆได้ แต่จะมีขนาดเล็กลง ตัวต้านทานประเภทนี้ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานมาก และอัตราทนกำลังไฟฟ้าได้ไม่สูงมาก

## แบ่งตามชนิดการใช้งานของตัวต้านทาน

ตัวต้านทานในการใช้งานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ (Fixed Resistors), ตัวความต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistors) ตัวต้านทานชนิดปรับแต่งค่าได้ (Adjustable Resistors), ตัวต้านทาน ชนิดแบ่งค่าได้ (Tapped Resistors), ตัวต้านทานชนิดพิเศษ (Special Resistors) [2]

## 2.2 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเก็บประจุได้ ใช้สัญลักษณ์ย่อว่า C (Capacitor) มีหน่วยเป็น ฟารัด (F) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติในการทำงาน เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าไว้ในตัวได้ โดยอาศัยคุณสมบัติของประจุไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ว่าศักย์ไฟฟ้าต่างกันจะดึงดูดกัน เมื่อนำแผ่นโลหะบาง 2 แผ่นมาวางใกล้กันพร้อมกับจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้งสองต่างศักย์กัน เกิดเส้นแรงไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าทั้ง 2 แผ่นโลหะดึงดูดกัน การดึงดูดของศักย์ไฟฟ้าจากแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นยังคงมีต่อเนื่อง ถึงแม้จะจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นแล้วก็ตาม คุณสมบัติดังกล่าวเรียกรวมแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นที่อยู่ใกล้กันนี้ว่าตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นโลหะบาง 2 แผ่น อาจเรียกว่าแผ่นตัวนำ (Conductive Plate) วางขนานชิดกัน มีฉนวนไฟฟ้าที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) วางคั่นกลางแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่น ที่แผ่นโลหะทั้ง 2 มีลวดตัวนำติดไว้แผ่นละเส้นใช้เป็นขั้วต่อใช้งาน [3] ลักษณะโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์และโครงสร้างของตัวเก็บประจุ

ชนิดของตัวเก็บประจุสามารถแบ่งตามลักษณะทางโครงสร้างหรือตามสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริก การแบ่งโดยใช้สารไดอิเล็กตริกเป็นวิธีการที่ละเอียด เพราะค่าไดอิเล็กตริกเป็นตัวกำหนดค่าตัวเก็บประจุนั้นๆว่าจะนำไปใช้งานในลักษณะใด ทนแรงดันไฟฟ้าเท่าใด แต่หากแบ่งตามระบบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

เก่าที่เคยแบ่งกันมาจะสามารถแบ่งตัวเก็บประจุได้เป็น 3 ชนิดด้วยกัน คือ ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor) ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor) [4]

### 2.3 ความต้านทาน (resistance)

นิยามของความต้านทานทางไฟฟ้า คือ สัดส่วนระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสองจุดนั้น

$$R = \frac{V}{I} \quad \dots\dots\dots(1)$$

หน่วยของความต้านทานคือ V/A (volt/ampere) หรือ โอห์ม (ohm)

ตัวนำไฟฟ้าที่ใช้มากในวงจรไฟฟ้า คือ ลวดตัวนำที่ทำจากโลหะ (หรือสายไฟฟ้า) การคำนวณค่าความต้านทานของลวดตัวนำไฟฟ้าโลหะสามารถทำได้ดังนี้ ถ้าพิจารณา ลวดตัวนำที่มีความยาว  $L$  และพื้นที่ตัดขวาง (cross sectional area) ลวดตัวนำที่มีความยาว  $L$  และพื้นที่ตัดขวาง  $A$

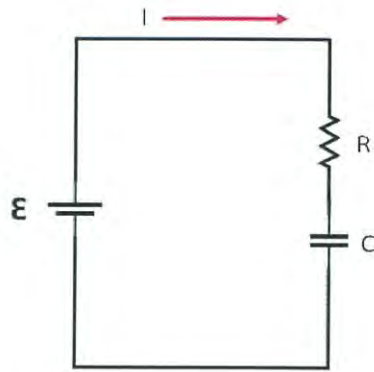


รูปที่ 2.3 ลวดตัวนำที่มีความยาว  $L$  และพื้นที่ตัดขวาง  $A$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \dots\dots\dots(2)$$

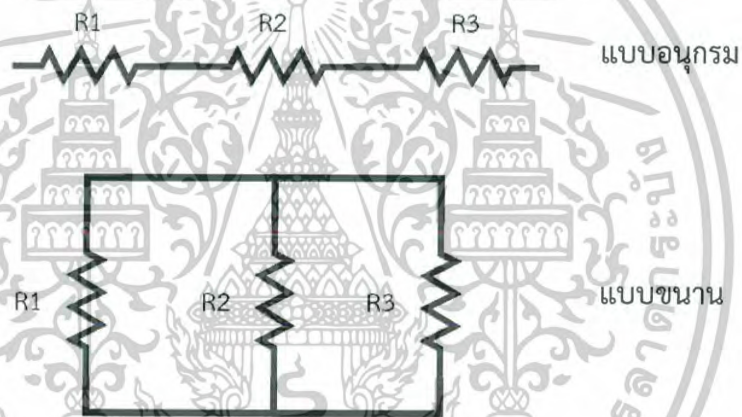
### 2.4 การต่อตัวต้านทานและคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล (equivalent resistance)

เป็นวงจรไฟฟ้าแบบที่ง่ายที่สุด ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับตัวต้านทาน แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามารถใช้ถ่านไฟฉายหรือแบตเตอรี่ วงจรไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจะเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (direct current circuit or DC circuit)



รูปที่ 2.4 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (direct current circuit or DC circuit)

กรณีที่มีการต่อตัวต้านทานมากกว่าหนึ่งตัว สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล ซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนกับวงจรดั้งเดิม การต่อตัวต้านทานสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบอนุกรม (series) และแบบขนาน (parallel)



รูปที่ 2.5 การต่อตัวต้านทานทั้งสองแบบ คือ แบบอนุกรม (series) และแบบขนาน (parallel)

## 2.5 ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance)

ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าที่กักเก็บไว้ (ในแต่ละแผ่น)  $Q$  กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุ  $V$  เป็นไปดังสมการ

$$C = \frac{Q}{V} \quad \dots\dots\dots(3)$$

เรียกสัดส่วนระหว่าง  $Q$  กับ  $V$  ว่าความจุไฟฟ้า  $C$  (capacitance) และมีหน่วยเป็น coulomb/volt หรือ Farad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

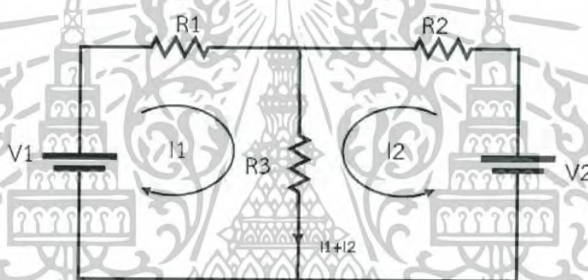
## 2.6 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Rules)

คือการประยุกต์ใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) หรือหลักการอนุรักษ์ประจุ (conservation of charge) ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า Junction Rule หรือ current law ที่จุดใดๆ ในวงจร ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่จุดนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ (กระแสไหลเข้าเป็นบวก กระแสไหลออกเป็นลบ)



รูปที่ 2.6 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

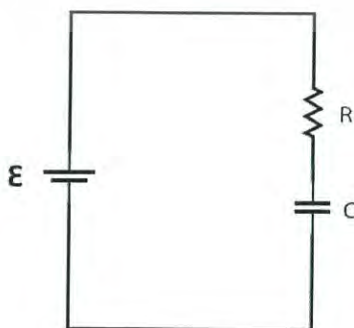
Loop Rule หรือ voltage law ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าครบรอบจะต้องมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในวงจรสอง loop

## 2.7 วงจร RC (RC Circuit)

วงจร RC เป็นวงจรที่นำ ตัวเก็บประจุมาต่อกับตัวต้านทานและแบตเตอรี่ การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ Charge และ Discharge ตัวเก็บประจุ สามารถวิเคราะห์วงจรนี้ในเชิงปริมาณได้ โดยเริ่มต้นที่การประยุกต์ใช้ loop rule ของ Kirchhoff จะได้ว่าเมื่อพิจารณาวงจรปิดครบรอบ ความต่างศักย์ของวงจรต้องเป็นศูนย์ [5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.8 RC circuit  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 Charging Process

เมื่อนำตัวต้านทาน  $R$  และตัวเก็บประจุ  $C$  มาต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 2.8 โดยเมื่อเริ่มต้นตัวเก็บประจุ  $C$  ไม่มีประจุสะสมอยู่เลย ( $q=0$ ) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจร จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหล และเกิดการอัดประจุ (charge) เข้าที่ตัวเก็บประจุ  $C$  โดยประจุที่สะสมที่ตัว  $C$  จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก Kirchhoff's law จะได้สมการ

$$\varepsilon - \frac{q}{C} - IR = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

แก้สมการการอนุพันธ์ โดยที่  $I = \frac{dq}{dt}$  จะได้



$$\varepsilon - \frac{q}{C} - \frac{dq}{dt} R = 0$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{R} (\varepsilon - \frac{q}{C})$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{(q - C\varepsilon)}{RC}$$

$$\frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\frac{1}{RC} dt$$

$$\int_0^q \frac{dq}{q - C\varepsilon} = -\int_0^t \frac{1}{RC} dt$$

$$\ln(q - C\varepsilon) = -\frac{t}{RC}$$

$$q - C\varepsilon = e^{-t/RC}$$

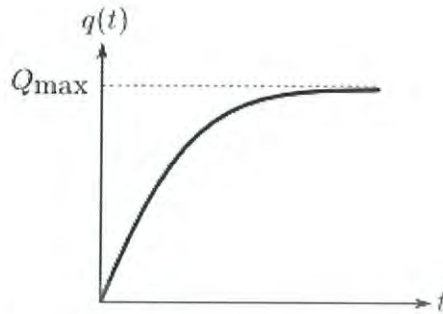
$$q = C\varepsilon(1 - e^{-t/RC})$$

เมื่อแก้สมการอนุพันธ์แล้วจากสมการที่ (3) จะได้

$$q = Q(1 - e^{-t/RC}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับค่าคงที่ของเวลา  $\tau = RC = t$  ประจุไฟฟ้าจะมีค่าเป็น 63% ของค่าสูงสุด แต่  
 ไม้วอร์จคือ ดังนั้น อีกทั้งหมดเป็นอีกครึ่งหนึ่งของตนเองเองจึงถึงเลขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 กระแสจะเป็น 37% ของค่าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ตามสมการที่(6)

$$q(t) = Q_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \dots\dots\dots(6)$$



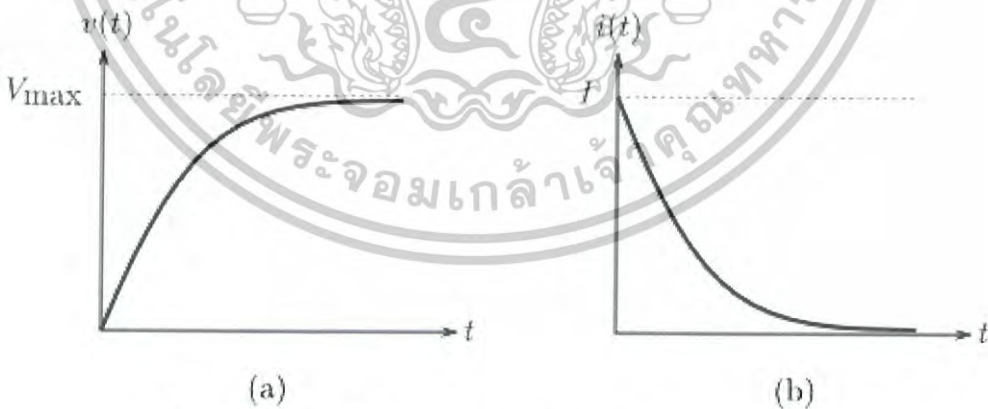
รูปที่ 2.9 ค่าประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุที่เวลา t ใดๆ ขณะทำการประจุ

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (v) ต่อกคร่อมตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในลักษณะเดียวกันกับ q(t) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(a) โดยความต่างศักย์ต่อกคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลา t ใดๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$v(t) = V_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ในขณะที่กระแสไฟฟ้า (i) ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุนั้นจะลดลงเรื่อยๆ จากเมื่อเริ่มต้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ

$$I = \frac{E}{R} \quad \dots\dots\dots(8)$$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ต่อกคร่อมตัวเก็บประจุ (a) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (b) กับเวลา (t)

สาเหตุที่กระแสไฟฟ้าลดลง คือ ประจุไฟฟ้าที่เข้าไฟฟ้าสะสมบนตัวเก็บประจุสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นมา และแรงผลักระจุไฟฟ้าที่ถูกส่งเข้าไปเพิ่ม ความเข้มของสนามไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกประจุเข้าไป จนในที่สุดสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายก็ไม่สามารถผลักประจุให้เข้าไปเก็บที่ตัวเก็บประจุได้อีก เนื่องจากแรงผลักระจุไฟฟ้าโดยสนามของแหล่งจ่ายมีขนาดเท่ากันกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่สามารถนำเนื้อหาไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
 ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้ในการโฆษณาหรือการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

แรงผลักประจุไฟฟ้าโดยสนามของกลุ่มประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ก่อนแล้ว ด้วยเหตุนี้เมื่อจำนวนประจุไฟฟ้า Q ที่ถูกประจุเข้าไปลดจำนวนลง อัตราการไหลเข้าของประจุไฟฟ้าซึ่งก็คือ กระแสไฟฟ้าจึงมีค่าลดลง ดังความสัมพันธ์

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \dots\dots\dots(9)$$

แต่ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟก็สามารถประจุตัวเก็บประจุได้เพิ่มขึ้น

2.9 Discharging Process

เมื่อประจุเต็มแล้ว จากนั้นทำการ short circuit (จากรูปที่2.8) ทำให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ไหลผ่านตัวต้านทาน R ประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุจะลดลงจาก Kirchhoff's law จะได้สมการที่ (9)

$$-\frac{q}{C} - IR = 0 \dots\dots\dots(9)$$

แก้สมการการอนุพันธ์ โดยที่  $I = \frac{dq}{dt}$  จะได้

$$-\frac{dq}{dt} R = \frac{q}{C}$$

$$\int \frac{dq}{q} = -\int \frac{1}{RC} dt$$

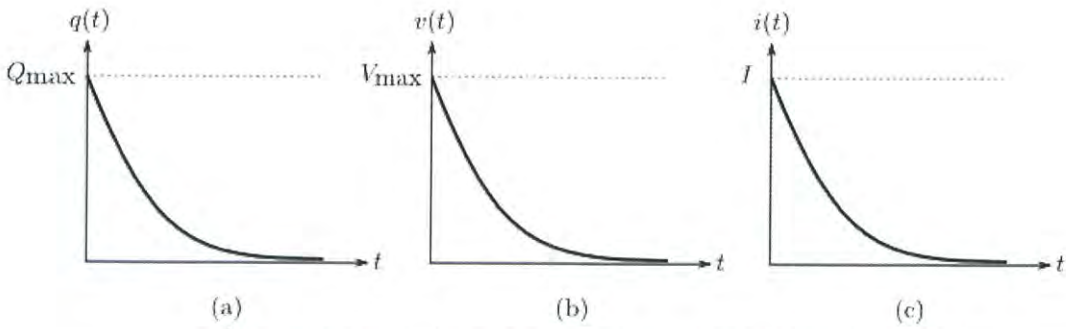
$$\ln\left(\frac{q}{Q}\right) = -\frac{t}{RC}$$

จากสมการที่ (9) เมื่อแก้สมการอนุพันธ์แล้วจะได้

$$q = Qe^{-t/RC} \dots\dots\dots(10)$$

ตามสมการ  $q(t) = Q_{max} e^{-t/RC}$  โดยแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2.11(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ค่าประจุไฟฟ้า (a) ความต่างศักย์ (b) และกระแสไฟฟ้า(c) ของตัวเก็บประจุที่เวลา t ใดๆ ขณะคายประจุ

สำหรับความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะลดลง ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(b) และ 2.11(c) โดยความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองกับเวลา t เป็นดังนี้ [6]

$$v(t) = V_{max} e^{-t/RC} \dots\dots\dots(11)$$

และ

$$i(t) = I e^{-t/RC} \dots\dots\dots(12)$$

**2.10 ค่าคงตัวเวลาของวงจร RC**

ในวงจร RC ค่าคงตัวเวลา (T) ของวงจร หาได้จาก

$$\tau = RC \dots\dots\dots(12)$$

โดยมีหน่วยเป็นวินาที ค่า  $\tau$  แสดงให้เห็นว่า การประจุจนเต็มหรือคายประจุจนหมดของตัวเก็บประจุในวงจรเกิดขึ้นช้าหรือเร็วเพียงใด

เมื่อตัวเก็บประจุต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงจะถูกชาร์จประจุผ่านความต้านทาน จากรูปที่ 2.8 เมื่อ short circuit ประจุในตัวเก็บประจุและความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นกับเวลา ความต่างศักย์ขณะประจุ (charging voltage) เป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลา t ตามสมการ

$$V = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \dots\dots\dots(13)$$

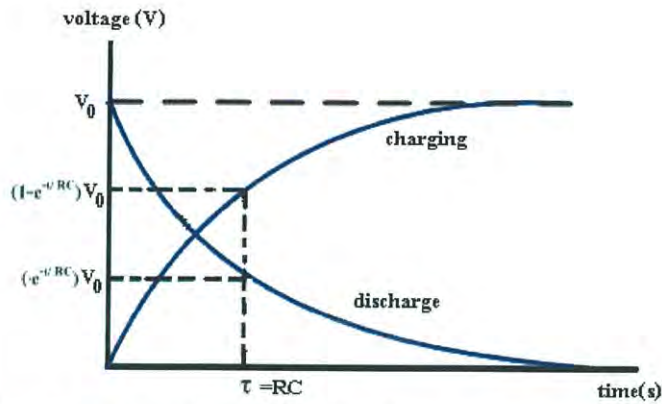
โดยที่ e = 2.718 คือ ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm)

$V_0$  คือ ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟตรง

$\tau = RC$  คือ ค่าคงที่เวลาของวงจร

เส้นโค้งแสดงการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นกับเวลาขณะประจุและคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กราฟระหว่างความต่างศักย์กับเวลาขณะและขณะคายประจุ โดยมี RC เป็นค่าคงที่เวลา

ขณะประจุเมื่อเวลาผ่านไป  $t = \tau = RC$  ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น

$$V = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = V_0(1 - e^{-1}) \approx 0.63V_0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

หรือคิดเป็นประมาณ 63% ของค่าสูงสุดที่จะประจุได้ เมื่อตัวเก็บประจุถูกประจุเต็มแล้ว เมื่อทำการ short circuit ดังรูปที่ 2.8 ตัวเก็บประจุจะคายประจุ ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงขึ้นกับเวลา ความต่างศักย์ขณะคายประจุ (discharging voltage) มีค่าตามสมการ

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

การลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลของความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นกับเวลา จากกราฟในรูปที่ 2.12 เมื่อเวลาผ่านไป  $t = \tau = RC$  ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงเป็น

$$V = V_0 e^{-1} \approx 0.37V_0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

หรือประมาณ 37 % ของค่าสูงสุด

ในการวิเคราะห์ความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งขึ้นกับเวลาจะสะดวกขึ้น ถ้าจัดสมการ (13) และ (15) ในรูปแบบสมการเส้นตรง จากสมการ (13) จะได้

$$V - V_0 = -V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \dots\dots\dots(17)$$

หรือ

$$V_0 - V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \dots\dots\dots(18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ดึงนความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะประจุในรูปปลอกการิทึม จะได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln(V_0 - V) = -\frac{t}{RC} + \ln V_0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

และในทำนองเดียวกัน จากสมการ (15) จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะคายประจุ

$$\ln V = -\frac{t}{RC} + \ln V_0 \quad \dots\dots\dots(20)$$

ทั้งสมการ (19) และ (20) อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรง  $y = mx+c$  โดยทั้งคู่มีความชัน (slope) เป็นลบ มีขนาด  $\frac{1}{RC}$  ดังนั้นสามารถหาค่าคงที่เวลา (RC) ของวงจรจากความชันของกราฟในสมการ (19) หรือ (20) ได้ [7]

## 2.11 Arduino Uno microcontroller

Arduino คือ แพลตฟอร์ม open-source ซึ่งมีส่วนที่เป็นทั้ง Software (Arduino Board) และ Hardware (Arduino-IDE) สำหรับการสร้าง Prototype หรืออุปกรณ์ต้นแบบของโปรเจกต์ที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์และ Embedded System โดย Arduino นั้นออกแบบมาเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน เหมาะกับผู้เริ่มต้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้พัฒนาต่อยอดได้หลากหลาย

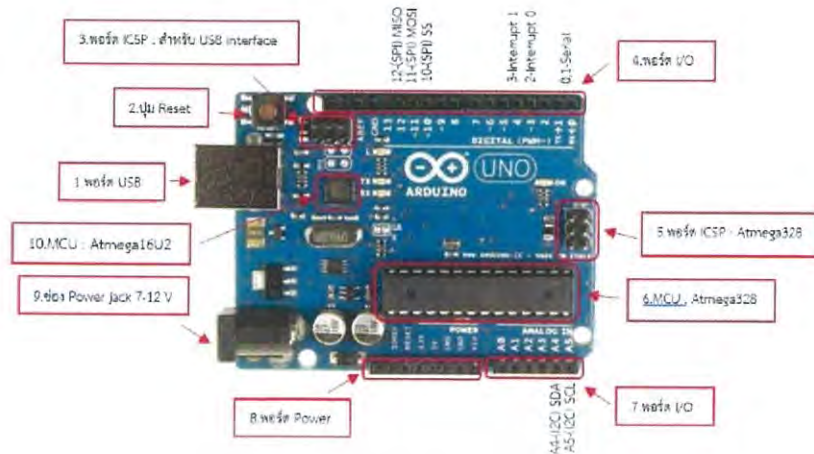


รูปที่ 2.13 สัญลักษณ์โปรแกรม Arduino

Arduino Board คือ บอร์ด PCB (Printed Circuit Board) ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยมีชิป Microcontroller สำหรับใช้ในการควบคุมหรือรับค่าจากอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านพอร์ต Input และ Output ตัวอย่างการรับค่า Input เช่น การอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ การตรวจจับการกดปุ่ม หรือ การรับสัญญาณ Analog ต่างๆ เป็นต้น ส่วนการส่งงาน Output นั้นก็สามารถทำได้ เช่น การส่ง Pulse ไปควบคุมมอเตอร์ หรือ การเปิด-ปิดหลอดไฟ LED เป็นต้น นอกจากนี้บอร์ด Arduino ยังสามารถเชื่อมต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆจากภายนอกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.16 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)

ส่วนประกอบต่างๆของ Arduino Board (Model: Arduino UNO R3) ประกอบไปด้วยดังนี้

1. USB Port : ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button : เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port : Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx , Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port : Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Boot loader
6. MCU : Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port : ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port : ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, Vin
9. Power Jack : รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2 [9]

## 2.12 LabVIEW Programming

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมที่ใช้พัฒนา Application โดยหลักการคล้ายกับ Visual Basic ต่างกันเพียงด้านที่เขียนโปรแกรม ใช้การเขียนโปรแกรมแบบ Graphic โดย Function ที่ใช้งานมีลักษณะเป็น Module ความสัมพันธ์ระหว่างใช้การ Wiring สายต่อกันเหมือนกับการต่อวงจรไฟฟ้า ซึ่งทำให้สามารถเขียนโปรแกรมได้อย่างรวดเร็ว เป็นโปรแกรมที่ใช้ติดต่อกับสื่อสารกับเครื่องมือต่างๆที่อยู่ภายนอกผ่านบอร์ด Data Acquisition ใช้งานเป็น monitoring หรือในการควบคุมการวัดค่าต่างๆ เช่น strain อุณหภูมิ หรือสัญญาณอื่นๆ โดยมีตัวเซนเซอร์รับสัญญาณเข้ามา โดยเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เหล่านี้มีค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าซึ่ง LabVIEW สามารถอ่านค่าที่ผ่านเข้ามาทาง DAQ Card แล้วบันทึกค่าเป็นไฟล์ข้อมูลได้ ดังนั้นการนำ LabVIEW ไปใช้ต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์และ application ที่ไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะใช้ว่ามี input เป็นอะไร และต้องการ output อะไร จากนั้นจึงทำการเลือก hardware ให้ตรงตามต้องการ[10]



รูปที่ 2.17 สัญลักษณ์ของโปรแกรม LABVIEW

โปรแกรม LabVIEW มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. Front panel เป็นส่วนตั้งค่าการวัดและอ่านค่าตัวเลขหรือกราฟที่ออกมาจากblock diagram จึงทำหน้าที่เสมือนเครื่องมือวัดจริงโดย inputที่ป้อนเข้าไปจะเป็นตัวควบคุม ส่วน output ที่ออกมาจะเป็นตัวแสดงผล
2. Block diagram ทำหน้าที่เสมือนเป็น Source code โดยใช้โปรแกรมภาษากราฟฟิคองค์ประกอบของ block diagram นี้จะแทนโปรแกรม Node เช่น for loop, caseและฟังก์ชันทาคณิตศาสตร์
3. Icon/Connector ภายใน Front panel ประกอบด้วย icon ต่างๆและมีสายเชื่อมต่อถึงกันในแต่ละ icon [11]

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.13.1 Measurement of Time Constant of RC Circuits

บทคัดย่อ

วงจร RC เป็นวงจรที่นิยมใช้ในหลายๆงานอิเล็กทรอนิกส์ ค่า time constant ของวงจร RC มีความสำคัญมากสำหรับกรวิเคราะห์ระยะเวลาและลักษณะของวงจร ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดค่า time constant ของวงจร RC โดยที่ข้อมูลจะถูกเก็บรวบรวมใน Arduino Uno และนำมาวิเคราะห์โดยใช้ MATLAB ด้วยกระบวนการ curve fitting พบว่าผลจากการวัดค่า time constant เป็นไปในทิศทางที่ดีตรงกับที่ได้คาดการณ์ไว้ในทฤษฎี ทั้งในกระบวนการชาร์จประจุและคายประจุ[12]

### 2.13.2 The RC time “constant” at a disk electrode

บทคัดย่อ

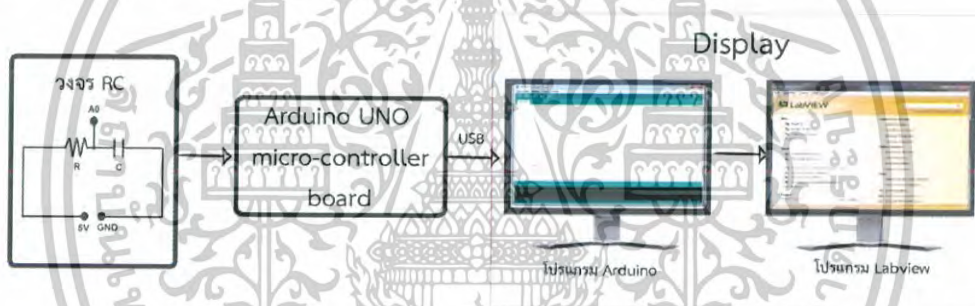
ความหนาแน่นของกระแสที่ฝั่งตัวใน electrode disk มีความไม่สม่ำเสมอ นำไปสู่การแพร่กระจายเชิงพื้นที่ของค่า time constant ซึ่งมีค่าในช่วง 0-2RC โดยที่ R และ C เป็นค่าความต้านทานและค่าความจุโดยรวม ผลที่ได้จากการกระจายตัวนี้ยากที่จะนำมาประเมิน แม้จะอยู่ในกรณีที่ไม่มีการกระบวนการ faradaic process แต่ถ้ากระทำในระยะเวลาสั้น จะเห็นได้ว่าผลกระทบบางครั้งก็มีความสำคัญ[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

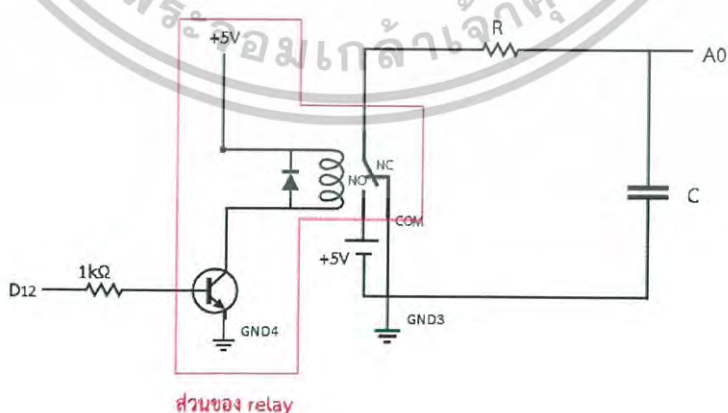
### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาชุดทดลองการประจุและคายประจุของวงจร RC นั้นเพื่อต้องการให้การนำไปใช้งานมีความสะดวกและมีประสิทธิภาพความแม่นยำที่ได้จากการวัดมีความเชื่อถือได้ โดยในการพัฒนาชุดการทดลองนี้จะใช้การเขียนโปรแกรมเข้ามาช่วยในการควบคุมการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจร RC ซึ่งจะเขียนภาษา C ลงใน Arduino Uno microcontroller board เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและใช้โปรแกรม LabView ในส่วนของจอแสดงผลเพื่อแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัด จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงระบบการทำงานของชุดการทดลองการประจุและคายประจุของวงจร RC ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยในส่วนของวงจร RC จะใช้ relay มาช่วยในการประจุและคายประจุในวงจร อีกส่วนหนึ่งของชุดการทดลอง คือ ส่วนของ Arduino Uno microcontroller board และโปรแกรมในการเก็บข้อมูล ในส่วนของ display จะใช้โปรแกรม LabView มาแสดงผลค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนภาพชุดทดลองการประจุและคายประจุของวงจร RC



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวเก็บประจุ
2. ตัวต้านทาน
3. multimeter
4. Arduino Uno microcontroller board
5. สาย USB สำหรับเชื่อม port ของ Arduino Uno microcontroller board กับคอมพิวเตอร์
6. คอมพิวเตอร์
7. protoboard และสายไฟ
8. Relay module 5V
9. แหล่งจ่ายไฟ 5V



รูปที่ 3.3 5V Relay Module Arduino

รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการต่อวงจร RC

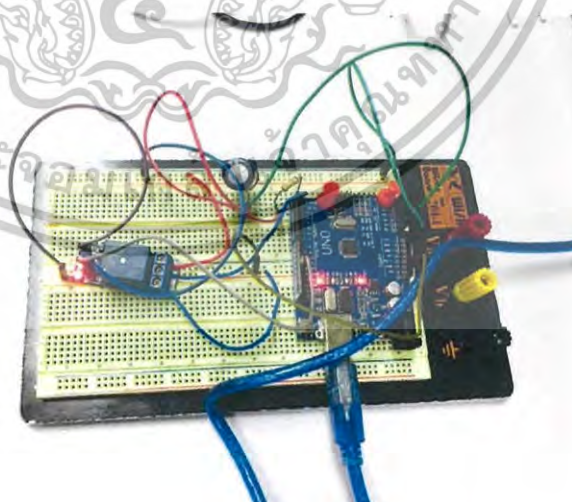
ในการต่อวงจร RC จะต่อวงจรดังรูปที่ 3.2 จะใช้ไฟเลี้ยง 5 volt จากแหล่งจ่ายไฟ 5 volt ภายในวงจรจะใช้รีเลย์เชื่อมกับบอร์ด Arduino ทำหน้าที่เป็นเหมือนสวิตช์ เมื่อป้อนไฟเลี้ยงให้กับรีเลย์ หน้าสัมผัสของรีเลย์จากปกติเป็นแบบ Normally Closed (NC) จะเปลี่ยนเป็น Normally Open (NO) ทำให้วงจรทำงานกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปสะสมในตัวเก็บประจุ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในตัวเก็บประจุจนเต็ม รีเลย์จะทำหน้าที่สับสวิตช์จากจาก NO เปลี่ยนมาเป็น NC ตัวเก็บประจุเกิดการคายประจุ

### 3.3 ขั้นตอนการเชื่อม Arduino Uno microcontroller board กับวงจร RC

ในการเชื่อม Arduino Uno microcontroller board กับวงจร RC นำไฟเลี้ยงจาก power supply ซึ่งมีไฟเลี้ยง 5 โวลต์มาใช้ในวงจร และ  $V_{out}$  ของวงจร จะต่อกับบอร์ด Arduino ใน I/O port ซึ่งเป็นช่องรับสัญญาณอนาล็อกที่ Port A0 ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 วงจร RC เชื่อม Arduino Uno microcontroller board

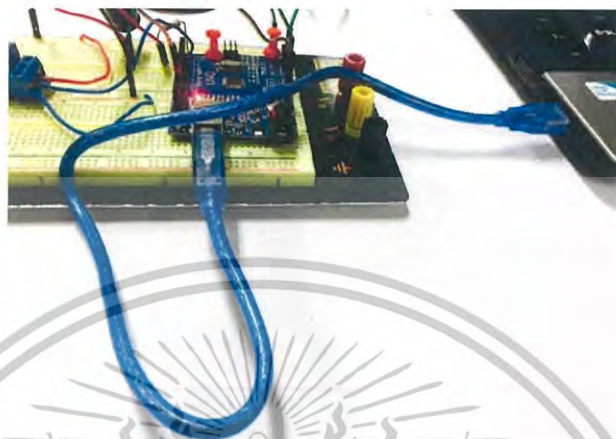


รูปที่ 3.6 วงจร RC เชื่อม Arduino Uno microcontroller board ในการทดลอง

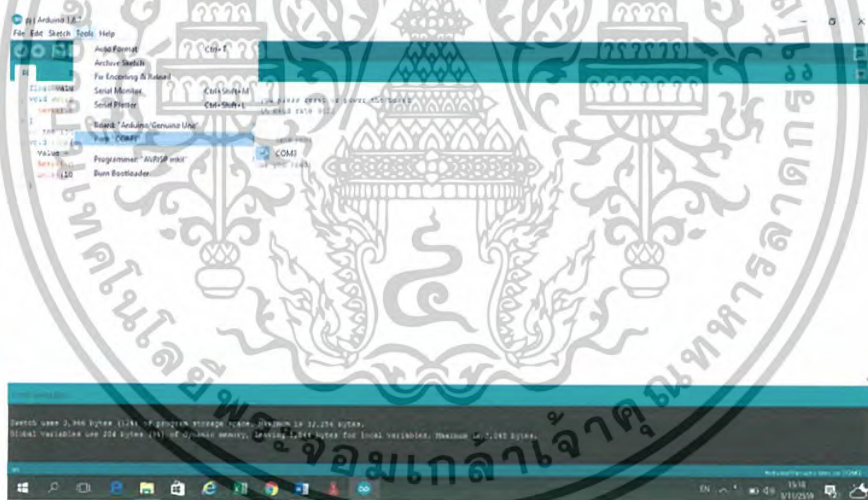
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการเชื่อมต่อ Arduino Uno microcontroller board กับคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการเชื่อมต่อ Arduino Uno microcontroller board กับคอมพิวเตอร์จะใช้สาย USB ในการเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 3.6 เมื่อเข้าโปรแกรม Arduino IDE ต้องทำการเลือก Port ในโปรแกรม เพื่อให้ Port ที่ใช้ตรงกัน โดยไปที่ Tool > Port > Serial Port ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อ Arduino Uno microcontroller board กับคอมพิวเตอร์ด้วย USB port



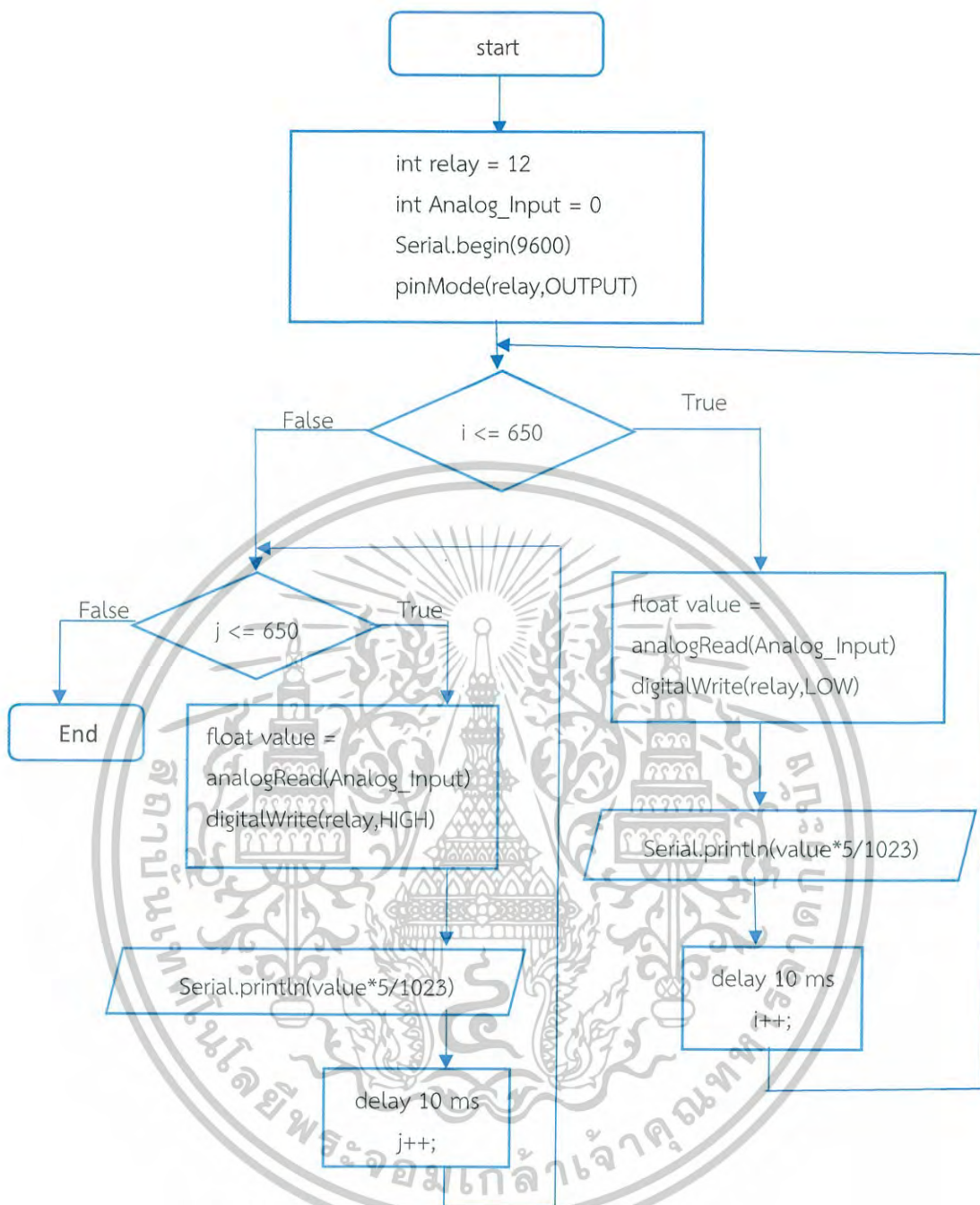
รูปที่ 3.8 การเลือก USB port ในโปรแกรม Arduino IDE

### 3.5 ขั้นตอนหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจร RC โดยการเขียนโปรแกรมลง Arduino Uno microcontroller board

ในการเขียนโปรแกรมจะเขียนภาษา C ลงในโปรแกรม Arduino เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจร RC โดยวัดค่าจาก  $V_{out}$  ที่เชื่อมต่ออยู่ที่ Port A0 ของ Arduino Uno micro controller board โดยในโปรแกรมจะใช้คำสั่ง analog Read ในการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจร RC ดังรูปที่ 3.8 และค่าที่ได้จากการวัดจะแสดงเป็นตัวเลขใน serial monitor ดังรูปที่ 3.9 และสามารถแสดงเป็นกราฟได้โดยใช้ serial plotter ในโปรแกรมดังรูปที่ 3.10

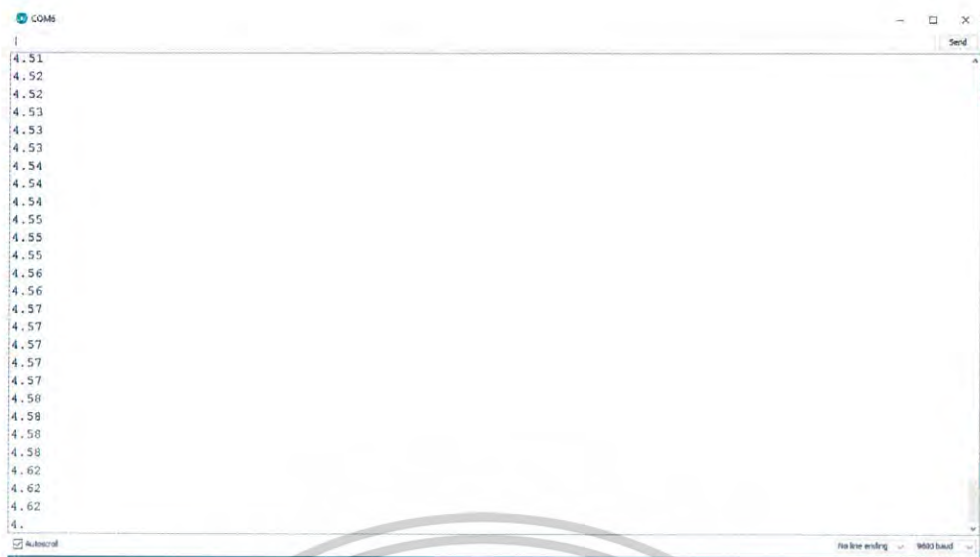
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดหากไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นกราฟได้โดยใช้ serial plotter ในโปรแกรมดังรูปที่ 3.10

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการเขียนโปรแกรมใน Arduino IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แสดงใน serial monitor ในโปรแกรม



รูปที่ 3.11 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในที่วัดได้แสดงใน serial plotter ในโปรแกรม

### 3.6 ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุม Arduino (LabVIEW Interface for Arduino (LIFA) Toolkit)

เนื่องจากการต่อวงจรระหว่าง LabVIEW กับ Arduino ในการทำโครงการพิเศษนี้มีการเขียนโปรแกรมใน 2 ส่วน คือ LabVIEW และ Arduino จึงต้องใช้ LabVIEW Interface for Arduino (LIFA) Toolkit มาเชื่อมต่อทั้ง 2 โปรแกรมเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันได้ ขั้นตอนการติดตั้งมีดังนี้

#### 3.6.1 ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW

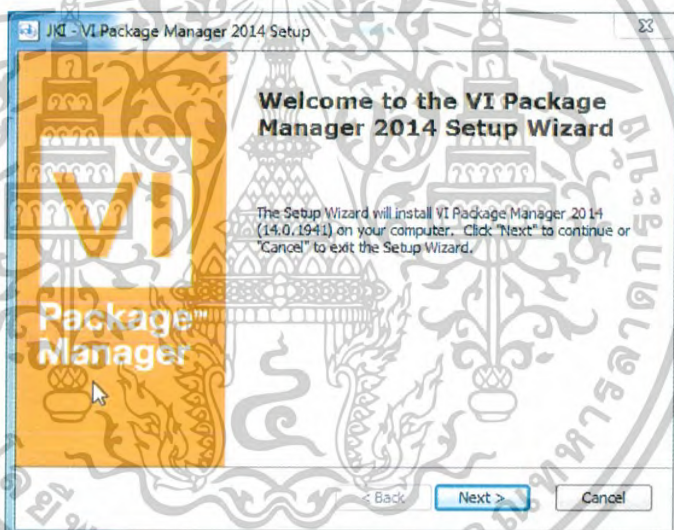
#### 3.6.2 ติดตั้ง NI-VISA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โปรแกรม NI VISA

### 3.6.3 ติดตั้ง JKI VI Package Manager (VIPM) Community Edition



รูปที่ 3.13 โปรแกรม VI Package Manager

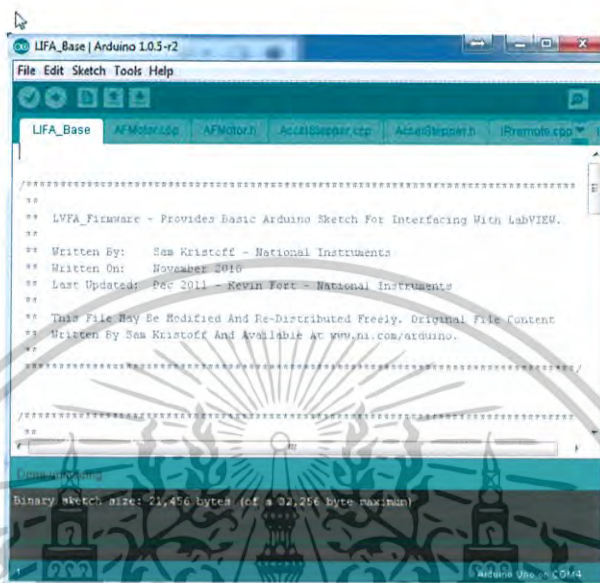
### 3.6.4 ติดตั้ง LabVIEW Interface for Arduino ในโปรแกรม JKI VI Package Manager (ค้นหาคำว่า Arduino) คลิกติดตั้ง

Name \ /	Version	Repository	Company
LabVIEW Interface for Arduino	2.2.0.79	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments

รูปที่ 3.14 ติดตั้ง LabVIEW Interface for Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 ติดตั้ง โปรแกรม Arduino โหลด LabVIEW Interface for Arduino Firmware ลง ใน Arduino Board โดยเข้าไปดาวน์โหลดใน C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 2013\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Firmware\LIFA\_Base แล้วอัปโหลดลง Arduino Board



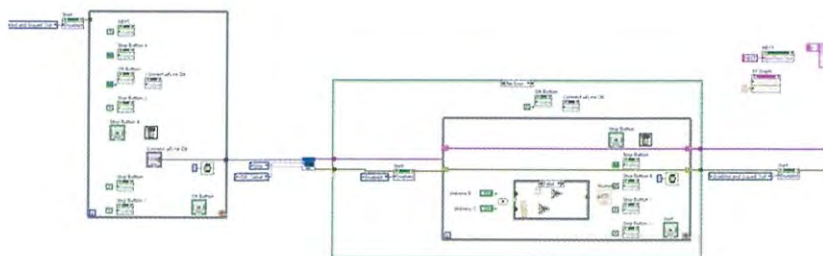
รูปที่ 3.15 อัปโหลด LIFA\_Base ลง Arduino Board

3.6.6 เขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

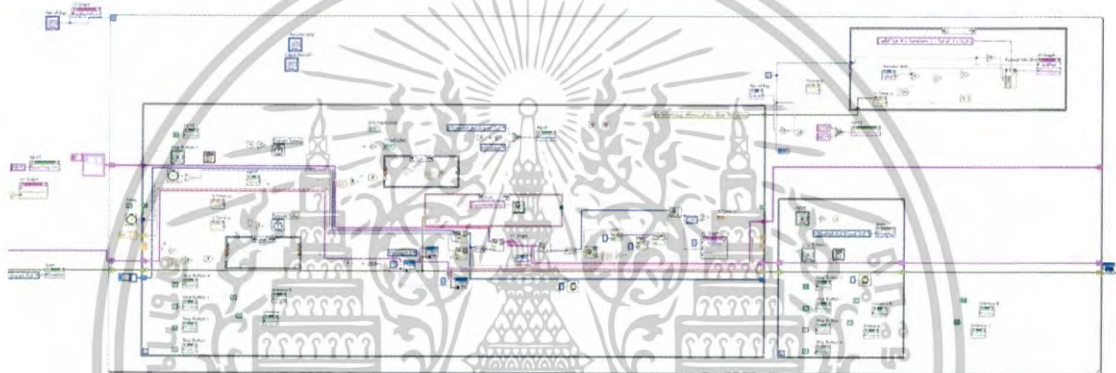
### 3.7 เขียน block diagram เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยโปรแกรม LabVIEW

โปรแกรม LabVIEW มีส่วนประกอบของโปรแกรม 2 ส่วน คือส่วนของ block diagram และ ส่วนของ front panel ซึ่งส่วนของ block diagram เป็นส่วนสำคัญของโปรแกรม เนื่องจากต้องเขียนโปรแกรมต่างๆ เพื่อควบคุมการทำงานของระบบลงในส่วนนี้ โดยการเขียนโปรแกรม LabVIEW จะแตกต่างไปจากการเขียนโปรแกรมอื่นๆ เนื่องจากใช้สัญลักษณ์รูปภาพในการเขียนโปรแกรม แต่เนื่องด้วยโครงงานพิเศษนี้ ใช้ Arduino board เป็นส่วนของฮาร์ดแวร์ ในการเก็บข้อมูลที่วัดได้จากวงจร ดังนั้นการเขียน block diagram จึงต้องติดตั้ง LabVIEW Interface for Arduino (LIFA) Toolkit ในการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับ Arduino board

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 block diagram ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW

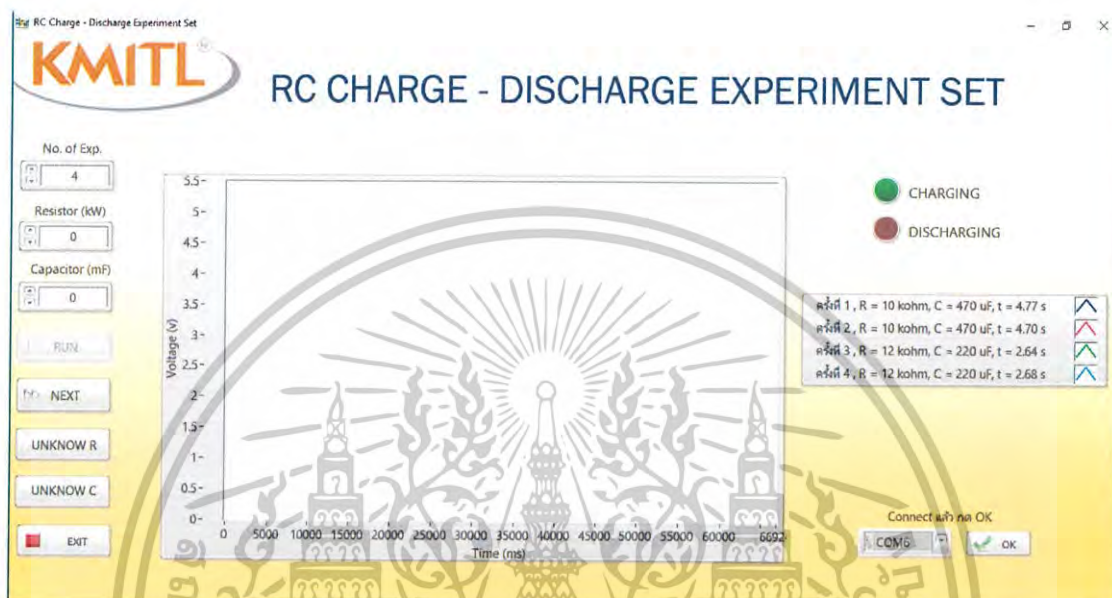


รูปที่ 3.17 block diagram ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 หน้า front panelและวิธีการใช้โปรแกรม

ในส่วนของ front panel ซึ่งเป็นส่วนของหน้าจอแสดงผลของโปรแกรม คือส่วนที่ใช้เชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน ใช้สำหรับใส่ค่า (input) และแสดงผล (output) ของตัวโปรแกรมที่สร้างขึ้นมา ผู้ใช้งานสามารถดูผลการทดลอง กราฟที่ได้จากการทดลอง และวิเคราะห์ค่าผลการทดลองจาก front panel ได้



รูปที่ 3.18 หน้าจอแสดงผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม LabVIEW

หน้าที่การทำงานของส่วนต่างๆของโปรแกรม

VISA resource สำหรับเลือก port เพื่อเชื่อมต่อกับ Arduino uno

No. of Exp. สำหรับใส่จำนวนครั้งที่ต้องการวัด

Resistor ใส่ค่าตัวต้านทานที่ต้องการวัด

Capacitor ใส่ค่าตัวเก็บประจุที่ต้องการวัด

RUN ปุ่มสำหรับสั่งให้โปรแกรมทำการวัดค่า time constant

NEXT ปุ่มสำหรับสั่งให้โปรแกรมทำการวัดค่าถัดไป

UNKNOWN R ปุ่มกดกรณีไม่ทราบค่าตัวต้านทานที่นำมาวัด

UNKNOWN C ปุ่มกดกรณีไม่ทราบค่าตัวเก็บประจุที่นำมาวัด

Exit ปุ่มสำหรับออกจากโปรแกรม

CHARGING ไฟแสดงสถานะขณะที่วงจรอยู่ในการชาร์จประจุ

DISCHARGE ไฟแสดงสถานะขณะที่วงจรอยู่ในการคายประจุ

แถบแสดงครั้งที่ สำหรับแสดงครั้งที่ในการวัดและอ่านค่า time constant

กราฟ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกรวมตัวเก็บประจุเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

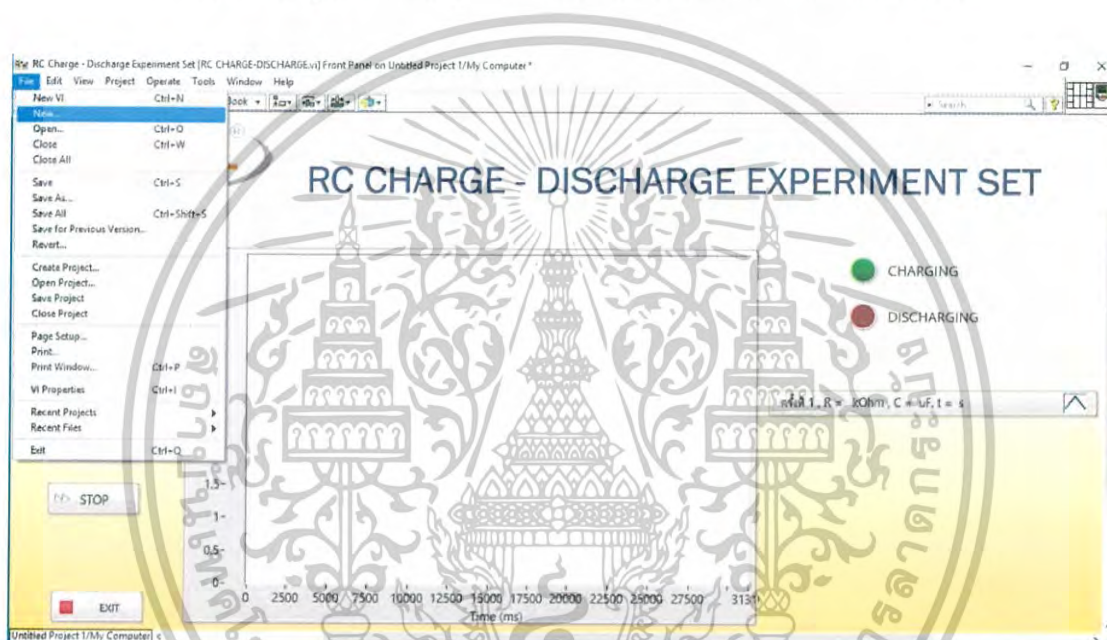
### 3.9 ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม RC CHARGE-DISCHARGE EXPERIMENT SET

เมื่อเขียนโปรแกรม LabVIEW เสร็จเรียบร้อยแล้ว ต้องทำ LabVIEW application โดยใช้เครื่องมือใน LabVIEW ก็คือ Runtime Engine เนื่องจากเมื่อติดตั้งนั้นจะสามารถนำไป RUN ในคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆได้โดยไม่ต้องลงโปรแกรม Install LabVIEW ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้เขียนโปรแกรม LabVIEW แบบนามสกุล .exe

#### 3.9.1 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

เนื่องจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเป็น file.vi ต้องทำการ build application ให้เป็นสกุล .exe เพราะผู้ที่นำโปรแกรมไปใช้งานจะไม่สามารถเห็น block diagram ต่างๆที่เขียนอีกทั้งยังสามารถนำไปติดตั้งกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆได้ โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรม LabVIEW

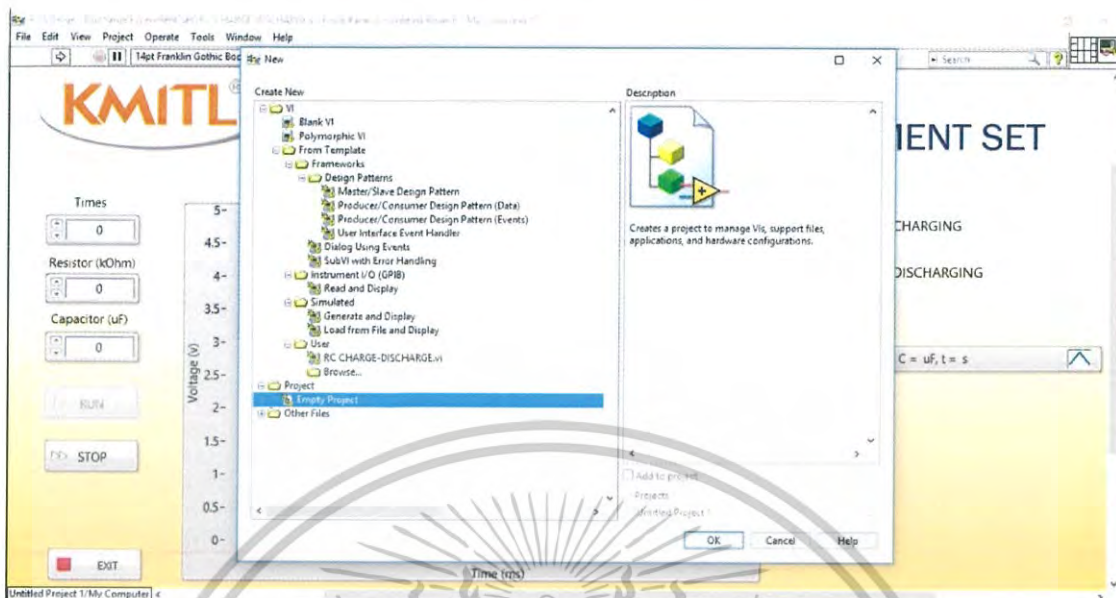
##### 3.9.1.1 เข้าสู่หน้า front panel ของโปรแกรมที่ต้องการใช้ คลิกที่ New



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการติดตั้ง LabVIEW application building

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9.1.2 เลือก project > empty project จากนั้นกด OK



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

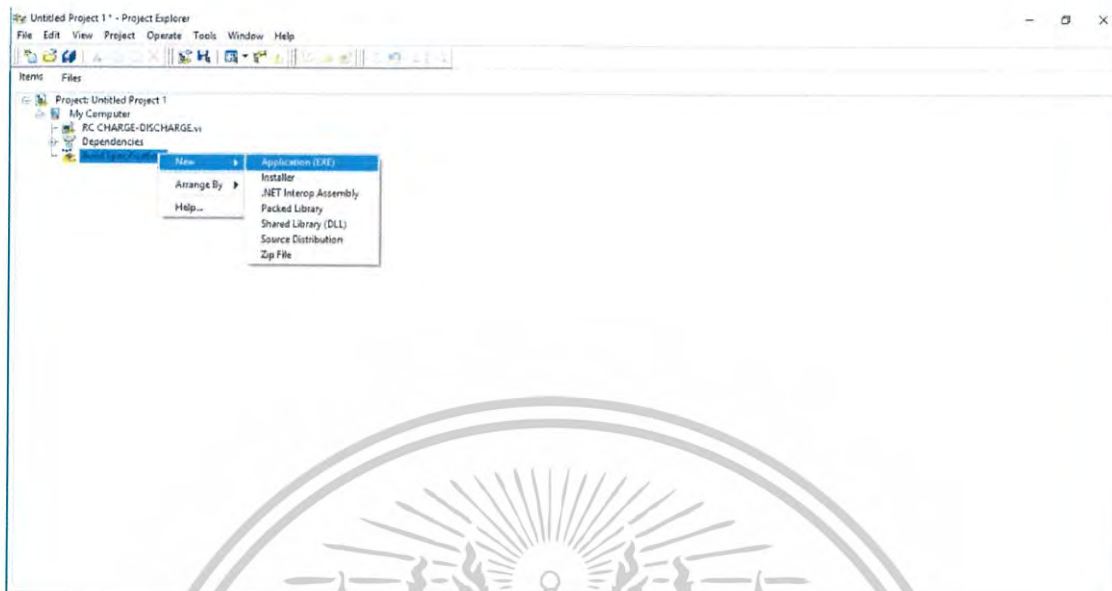
### 3.9.1.3 คลิกขวาที่ Build Specifications



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

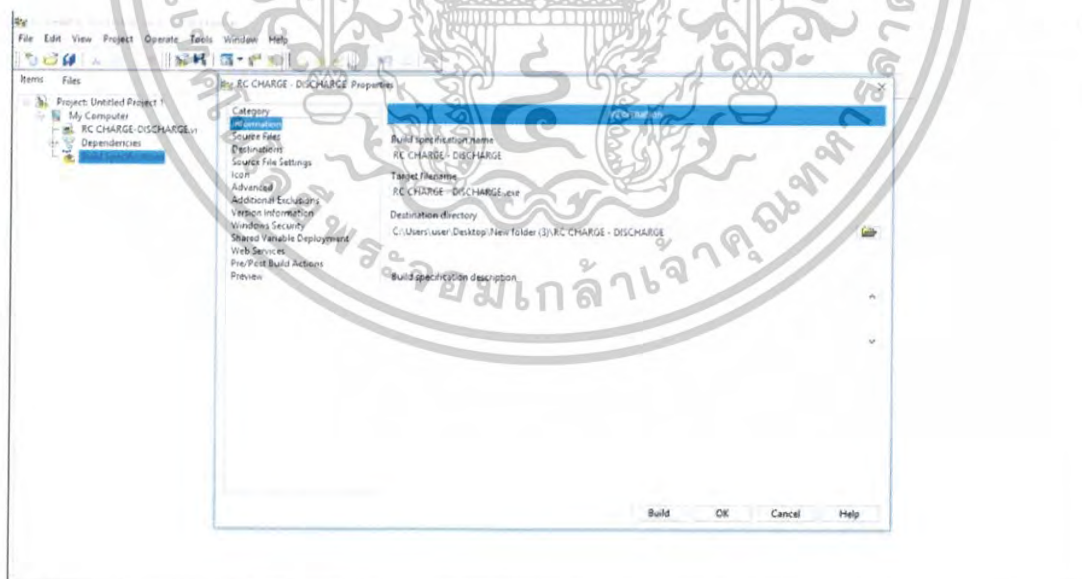
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9.1.4 จากนั้นเลือก New > Application(EXE)



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

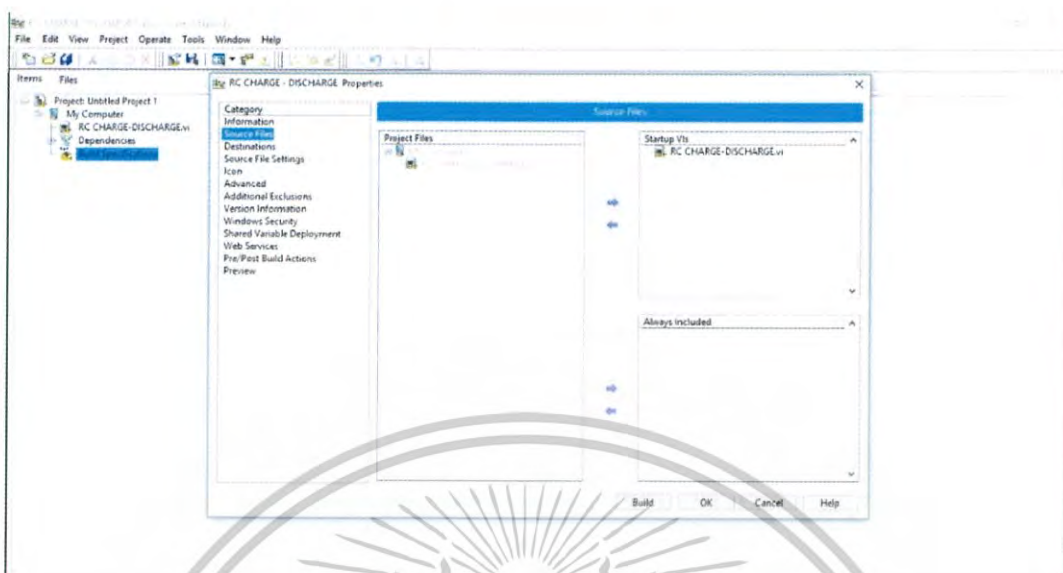
3.9.1.5 เลือก Information ตั้งชื่อโปรแกรมเป็นชื่อที่ต้องการที่ช่อง Build specification name เปลี่ยนสกุลไฟล์ที่ช่อง Target filename และเลือกแฟ้มที่ต้องการจะเก็บโปรแกรม จากนั้นกด Build ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

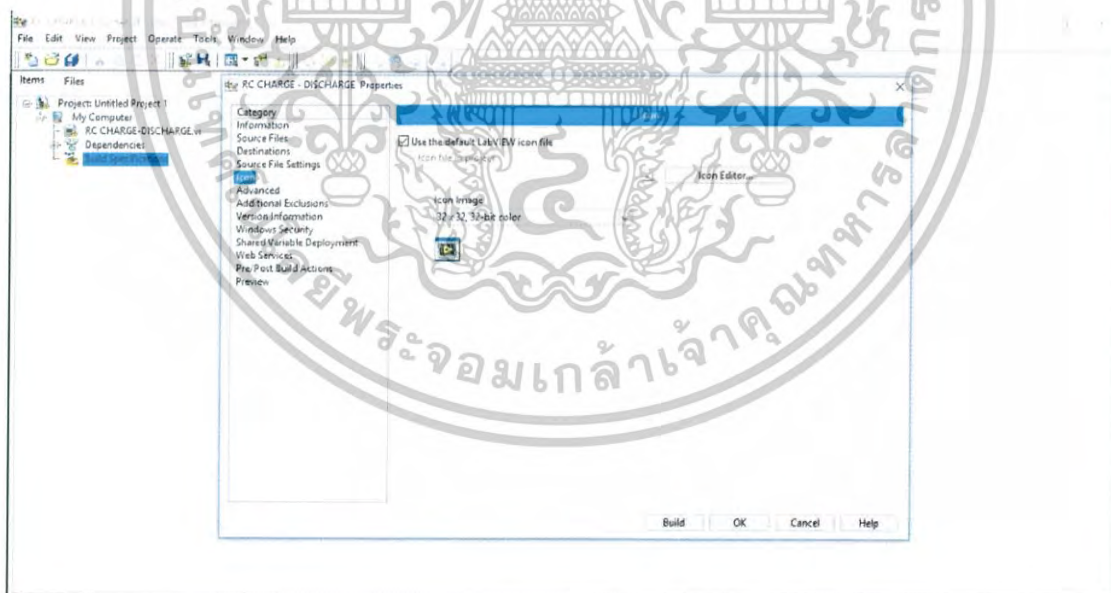
### 3.9.1.6 ถัดมาเลือกที่ Source Files ตั้งรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

### 3.9.1.7 ปรับแต่งไอคอนของโปรแกรมโดยเลือกที่ Icon เลือกแบบ icon ที่จะใช้แล้วกด

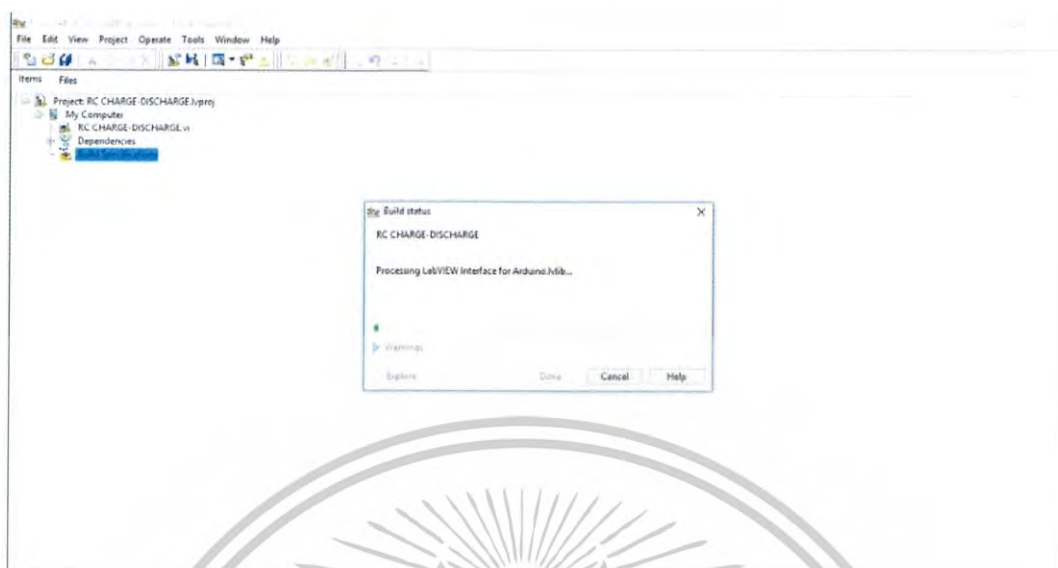
Build



รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9.1.8 ดับเบิลคลิกที่ Build Specification เพื่อทำการ Build status



รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

### 3.9.1.9 เมื่อทำการ Build status เสร็จเรียบร้อย กด Done ดังรูป



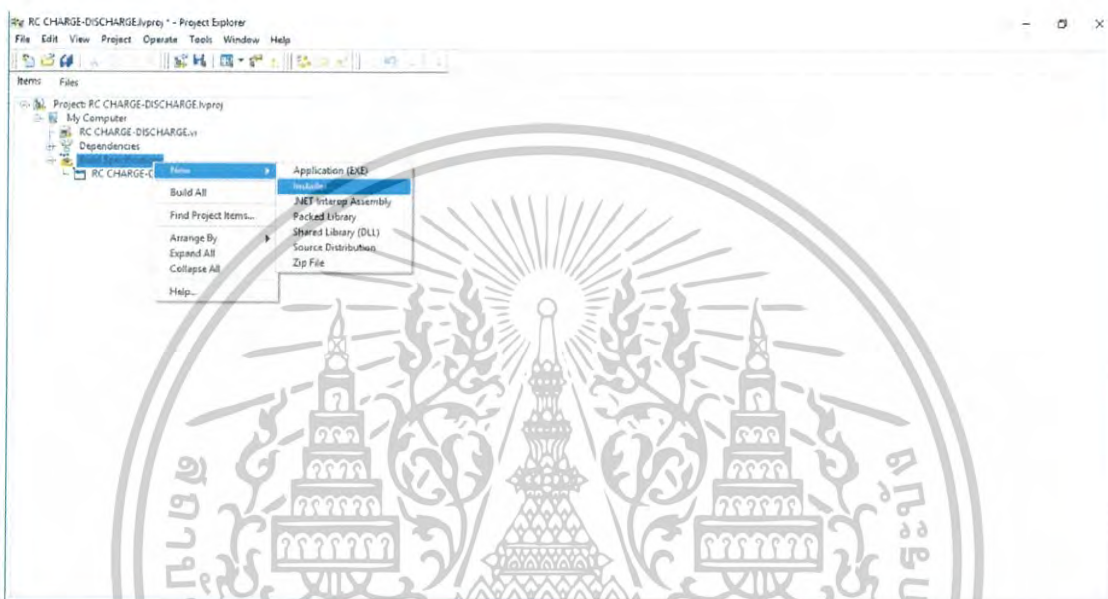
รูปที่ 3.27 ขั้นตอนการทำ LabVIEW application building

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9.2 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine

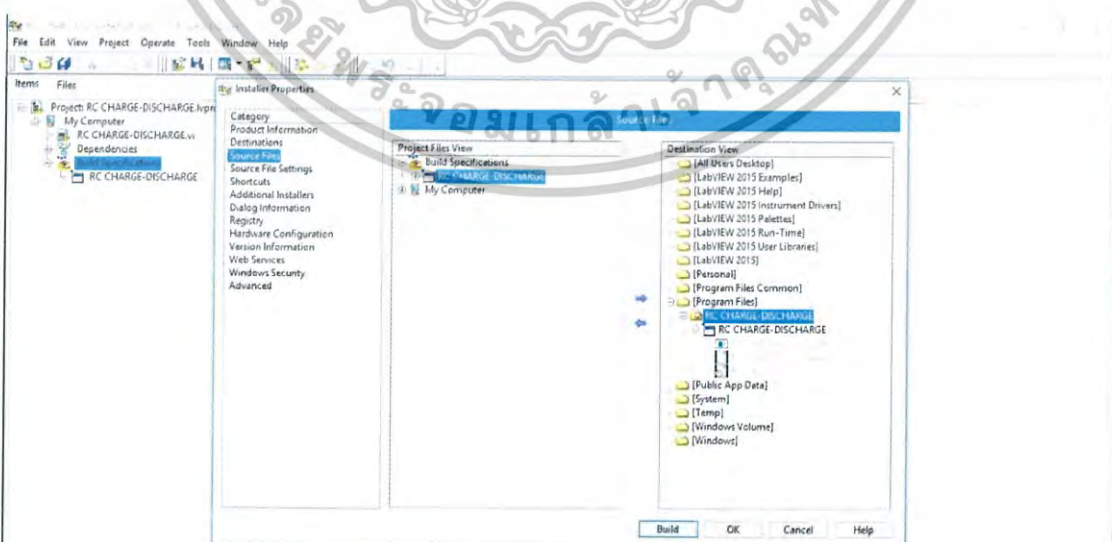
เนื่องจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นมานั้นไม่สามารถนำไปใช้กับคอมพิวเตอร์เครื่องที่ไม่ได้ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW ไว้ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการ Build Application ขึ้นมา ขั้นตอนของการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine คือ การสร้าง file install เพื่อที่จะสามารถนำไปติดตั้งกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆ ที่ไม่ได้ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW ไว้ได้

3.9.2.1 เข้าหน้าโปรแกรม ทำตามขั้นตอนที่ 3.9.1.1 ถึงขั้นตอนที่ 3.9.1.3 จากนั้นคลิกขวาที่ Build Specification > New > Installer



รูปที่ 3.28 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine

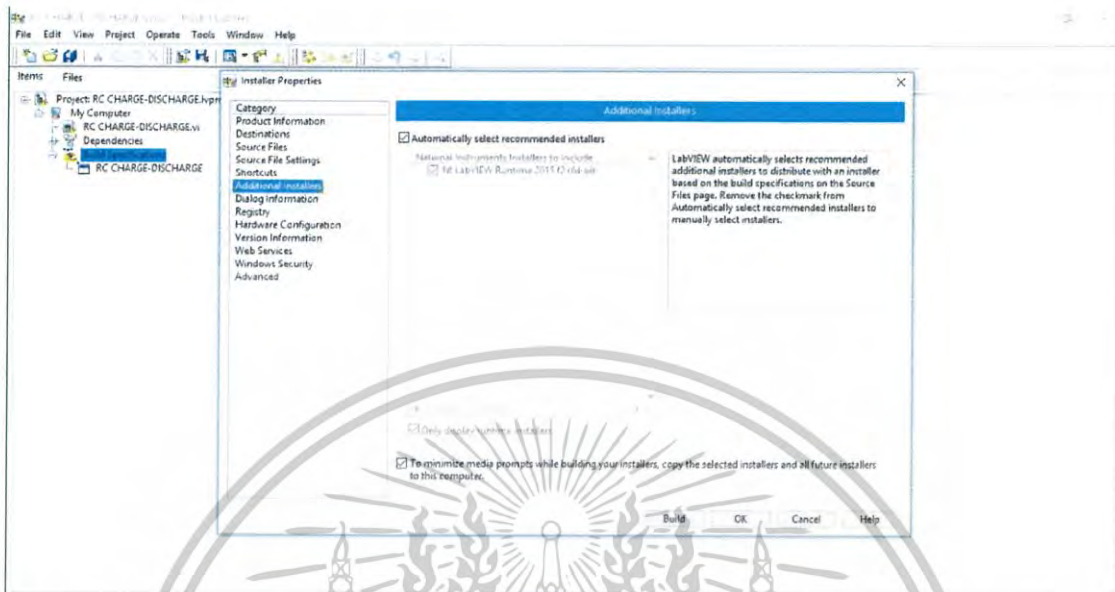
3.9.2.2 ไปที่ Source files จากนั้นเลือกโปรแกรมที่ต้องการ Install จากนั้นกด Build



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

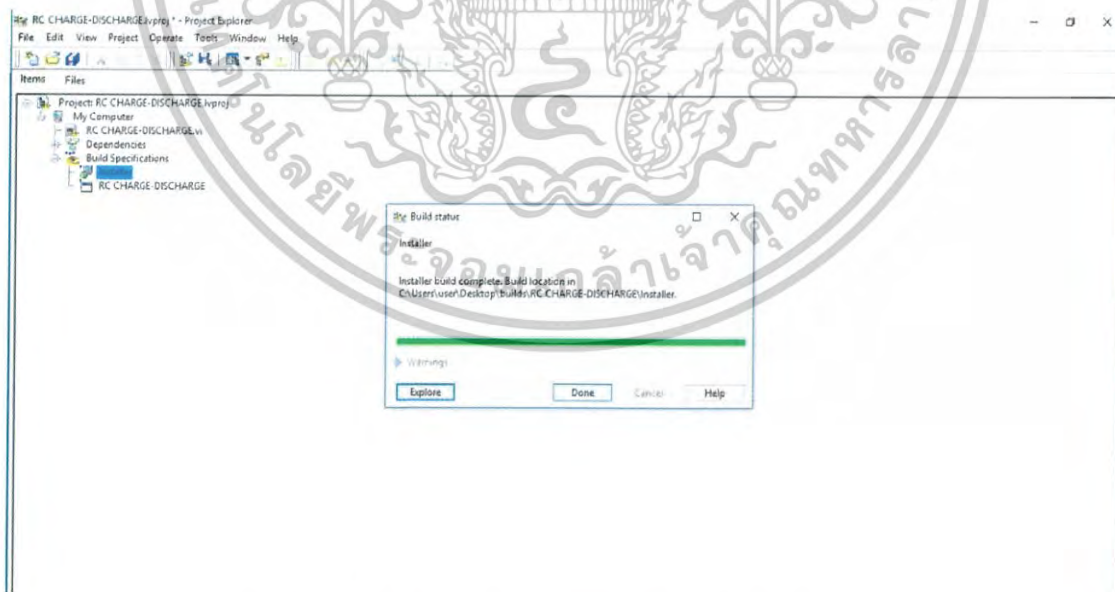
รูปที่ 3.29 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.2.3 จากนั้นเลือก Additional Installers เลือก NI Visa เนื่องจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นนั้นต้องใช้ NI-Visa เมื่อเลือกแล้ว Build โปรแกรมได้เลย



รูปที่ 3.30 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine

3.9.2.4 เมื่อทำการ build เสร็จเรียบร้อยกด Done หลังจากนั้นก็จะได้ file install มาหนึ่งไฟล์สามารถนำโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาไปติดตั้งกับคอมพิวเตอร์ตัวอื่นๆได้

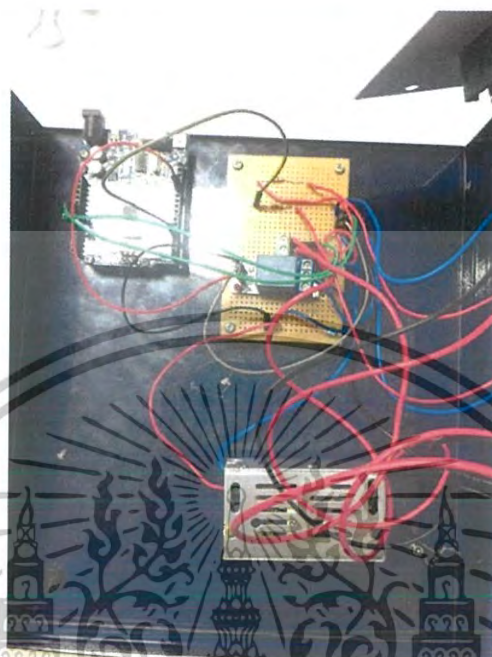


รูปที่ 3.31 ขั้นตอนการสร้าง LabVIEW Run-Time Engine

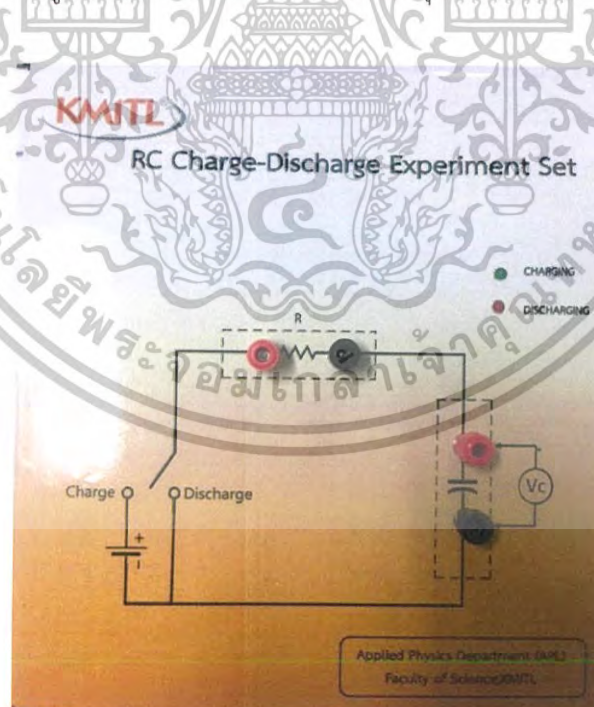
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10 ขั้นตอนประกอบกล่องชุดการทดลอง

หลังจากที่เขียนโปรแกรมควบคุมการวัดค่า time constant ของวงจร RC แล้ว นำวงจรที่ใส่ใส่กล่องชุดการทดลองที่จัดทำขึ้น เพื่อความสะดวกในการใช้งานและการเคลื่อนย้าย



รูปที่ 3.28 ใส่วงจรที่ใส่ลงในกล่องชุดการทดลอง



รูปที่ 3.29 กล่องชุดการทดลอง RC Charge-Discharge Experiment Set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.11 วิธีการหาค่า time constant จากชุดทดลอง RC charge – Discharge Experiment Set

โดยขั้นตอนในการใช้โปรแกรมสำหรับวัดค่า time constant มีดังนี้

1. เปิดเครื่องชุดทดลอง Charge – Discharge Experiment Set
2. เชื่อมชุดทดลองเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB port
3. นำตัวต้านทานและตัวเก็บประจุใส่ในชุดทดลอง ตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางบันทึกผลการทดลอง
4. เปิดโปรแกรมสำหรับการวัด Time constant ของวงจร RC
5. กำหนดจำนวนค่าที่ต้องการวัด โดยเลือกที่ช่อง No. of Exp.
6. กำหนดค่าตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุลงในโปรแกรม  
กรณี ไม่ทราบค่าตัวต้านทานให้กดปุ่ม UNKNOW R  
กรณี ไม่ทราบค่าตัวเก็บประจุให้กดปุ่ม UNKNOW C  
กรณี ไม่ทราบค่าทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต้องกดทั้ง UNKNOW R และ UNKNOW C
7. คลิก OK ที่ช่อง port เมื่อทำการ connect port USB ระหว่างชุดทดลองกับโปรแกรมแล้ว
8. กด RUN โปรแกรมจะทำการวัดค่า time constant ของวงจรจากกราฟที่วัดได้
9. เมื่อโปรแกรมทำการวัดเสร็จแล้ว เปลี่ยนค่าตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางบันทึกผลการทดลอง จากนั้น กด NEXT โปรแกรมจะเริ่มทำการวัดอีกครั้ง
10. เมื่อโปรแกรมทำการวัดครบจำนวนครั้งที่ต้องการวัด บันทึกค่า time constant ที่วัดได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง โดยดูจากค่า  $\tau$  ที่แถบแสดงครั้งที่ในการวัด
11. บันทึกกราฟที่วัดได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

สำหรับโครงการพิเศษการพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC โดยใช้การเขียนโปรแกรมเพื่อวัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และหาค่า time constant ของวงจร RC จากกราฟที่วัดได้ ซึ่งค่า time constant ที่วัดได้จากชุดทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับค่า time constant ที่มาจากทฤษฎีโดยคำนวณได้จากสูตร  $\tau = RC$

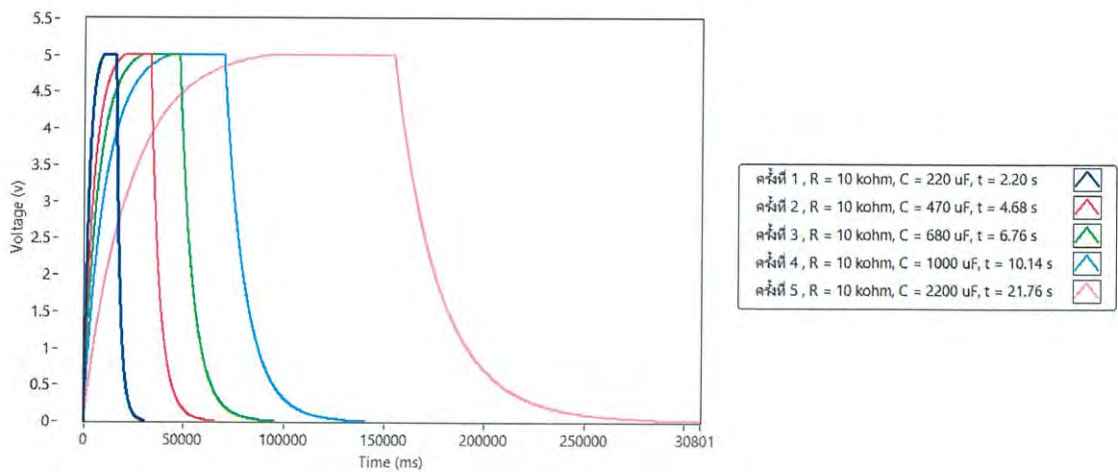
#### 4.1 ผลการทดลอง

บันทึกค่า time constant ที่วัดได้จากกราฟที่ได้จากการทดลอง โดยได้ชาร์จประจุให้แก่ตัวเก็บประจุจำนวน 5 ค่า ที่ตัวต้านทานค่าต่างๆจำนวน 4 ค่า ดังแสดงในตารางบันทึกผลการทดลองต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆที่  $R = 10\text{ k}\Omega$

C ( $\mu\text{F}$ )	time constant (s)				$\tau$ จากทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220	2.21	2.19	2.20	2.20	2.20	0.00
470	4.65	4.65	4.67	4.66	4.70	0.92
680	6.74	6.72	6.75	6.74	6.80	0.93
1000	9.97	10.07	10.14	10.06	10.00	0.60
2200	21.84	21.82	21.67	21.78	22.00	1.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

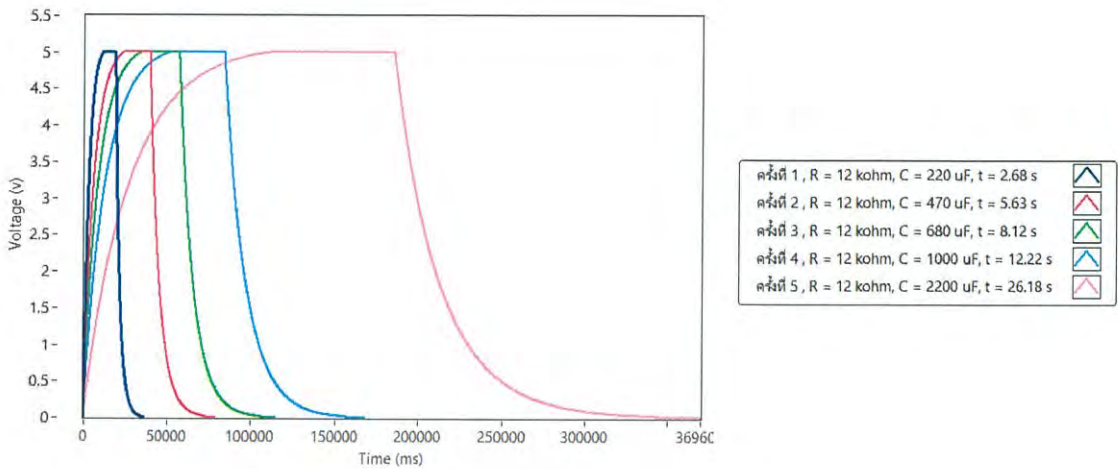


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่  $R=10\text{ k}\Omega$

ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆที่  $R = 12\text{ k}\Omega$

C ( $\mu\text{F}$ )	time constant (s)				$\tau$ จากทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220	2.65	2.64	2.65	2.65	2.64	0.25
470	5.64	5.59	5.61	5.61	5.64	0.47
680	8.13	8.09	8.10	8.11	8.16	0.65
1000	12.24	12.16	12.18	12.18	12.00	1.61
2200	25.93	25.89	25.91	25.91	26.40	1.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

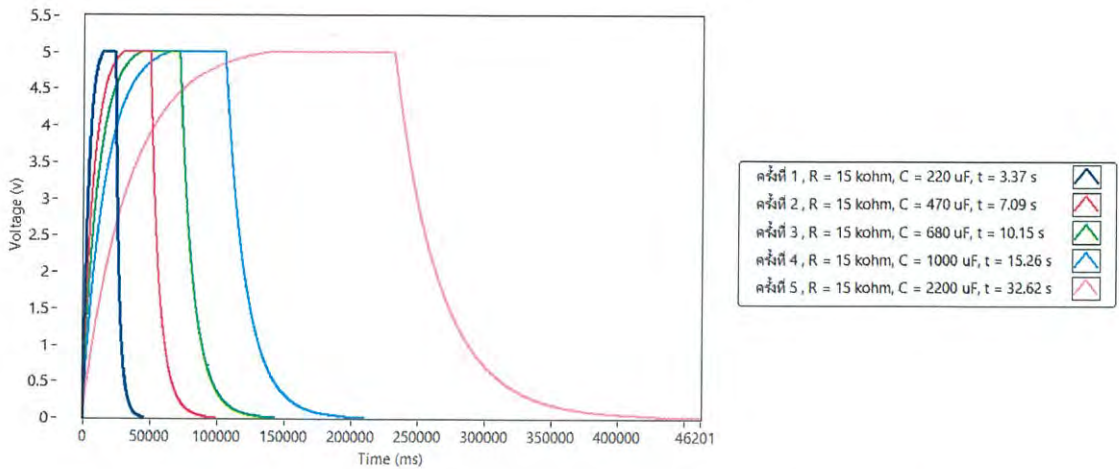


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่ R=12 k $\Omega$

ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆที่ R = 15 k $\Omega$

C ( $\mu$ F)	time constant (s)				$\tau$ จากทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220	3.26	3.29	3.29	3.28	3.30	0.61
470	7.02	7.01	6.98	7.00	7.05	0.66
680	10.08	10.05	10.12	10.08	10.20	1.14
1000	15.32	15.28	15.23	15.28	15.00	1.84
2200	32.58	32.66	32.53	32.59	33.00	1.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

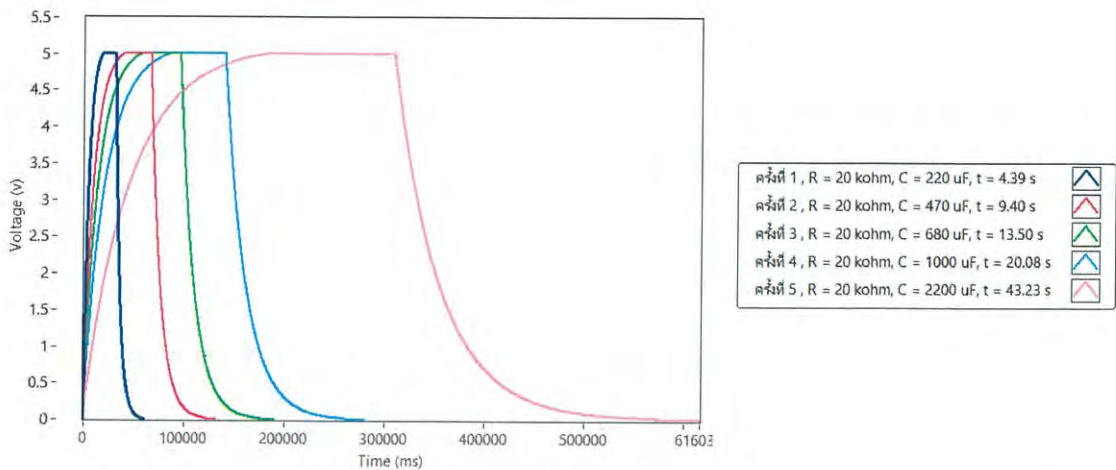


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่ R=15 k $\Omega$

ตารางที่ 4.4 ผลจากการวัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆที่ R = 20 k $\Omega$

C ( $\mu$ F)	time constant (s)				$\tau$ จากทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220	4.41	4.37	4.32	4.37	4.40	0.76
470	9.28	9.30	9.29	9.29	9.40	1.17
680	13.35	13.37	13.41	13.38	13.60	1.64
1000	20.23	20.07	20.25	20.18	20.00	0.92
2200	43.28	43.22	43.09	43.20	44.00	1.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V) กับเวลา (ms) ที่  $R=20\text{ k}\Omega$

## 4.2 การอภิปรายผล

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดเพื่อหาค่า Time constant จากชุดทดลอง RC Charge – Discharge Experiment set ที่ได้จัดทำขึ้นมานั้น พบว่าผลการทดลองที่วัดค่าได้มีค่าตรงตามที่ทฤษฎีได้กล่าวไว้ โดยได้ทำการบันทึกค่า Time constant ของค่าตัวเก็บประจุค่าต่างๆ จำนวน 5 ค่าที่ค่าตัวต้านทานเดียวกัน ตามผลการทดลองที่ได้ ที่ค่าตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อย จะสามารถเก็บประจุได้เร็วกว่าค่าตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก ณ ที่ค่าตัวต้านทานเดียวกัน อีกทั้งค่า time constant ที่วัดได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี ซึ่งคำนวณได้จากสูตร  $\tau = RC$  โดยค่าที่ทดลองได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาการเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล และทำขึ้นเพื่อพัฒนาชุดทดลองการประจุและการคายประจุของวงจร RC โดยใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งในโครงการพิเศษเล่มนี้ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการควบคุม โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานี้จะสามารถใช้วัดค่าความต่างศักย์โดยไม่ต้องใช้โวลต์มิเตอร์และจะแสดงการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าปริมาณในตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจร RC ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของเวลาได้จากกราฟด้วยหน้าต่างโปรแกรมการทำงานที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน ได้ผลการทดลองดังนี้

ค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ที่ค่าตัวเก็บประจุต่างกันมี 5 กรณี ดังนี้  
220 ไมโครฟารัด , 470 ไมโครฟารัด, 680 ไมโครฟารัด, 1000 ไมโครฟารัด และ 2200 ไมโครฟารัด  
ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นวัดค่าคงที่ของเวลา (time constant) โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย จะได้ค่าคงที่ของเวลา ตามลำดับดังนี้ 2.20 วินาที, 4.66 วินาที, 6.74 วินาที, 10.06 วินาที และ 21.78 วินาที ซึ่งผลการทดลองที่ได้ค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี และให้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า 2%

ค่าความต้านทาน 12 กิโลโอห์ม ที่ค่าความจุต่างกันมี 5 กรณี ดังนี้  
220 ไมโครฟารัด , 470 ไมโครฟารัด, 680 ไมโครฟารัด, 1000 ไมโครฟารัด และ 2200 ไมโครฟารัด  
ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นวัดค่าคงที่ของเวลา (time constant) โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย จะได้ค่าคงที่ของเวลา ตามลำดับดังนี้ 2.65 วินาที, 5.61 วินาที, 8.11 วินาที, 12.18 วินาที และ 25.91 วินาที ซึ่งผลการทดลองที่ได้ค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี และให้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า 2%

ค่าความต้านทาน 15 กิโลโอห์ม ที่ค่าความจุต่างกันมี 5 กรณี ดังนี้  
220 ไมโครฟารัด , 470 ไมโครฟารัด, 680 ไมโครฟารัด, 1000 ไมโครฟารัด และ 2200 ไมโครฟารัด  
ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นวัดค่าคงที่ของเวลา (time constant) โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย จะได้ค่าคงที่ของเวลา ตามลำดับดังนี้ 3.28 วินาที, 7.00 วินาที, 10.08 วินาที, 15.28 วินาที 32.59 วินาที ซึ่งผลการทดลองที่ได้ค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี และให้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า 2%

ค่าความต้านทาน 20 กิโลโอห์ม ที่ค่าความจุต่างกันมี 5 กรณี ดังนี้  
220 ไมโครฟารัด , 470 ไมโครฟารัด, 680 ไมโครฟารัด, 1000 ไมโครฟารัด และ 2200 ไมโครฟารัด  
ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นวัดค่าคงที่ของเวลา (time constant) โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย จะได้ค่าคงที่ของเวลา ตามลำดับดังนี้ 4.37 วินาที, 9.29 วินาที, 13.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินาที, 20.18 วินาที และ 43.20 วินาที ซึ่งผลการทดลองที่ได้ค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี และให้ได้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า 2%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีความจุไม่น้อยเกินไป เพราะหากว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อย อาจจะทำให้ค่าคงที่ของเวลาที่วัดได้มีความผิดพลาดสูง
2. ควรตรวจสอบค่าของตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากที่ได้ทำการทดลองนั้น ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่กำหนดมานั้นไม่ตรงกับค่าที่วัดได้จริง ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองมีความผิดพลาดสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 2559. หน่วยที่ 2 ตัวต้านทาน (Resistor). [Online]. Available: <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-02.html>
- [2] 2559. ตัวต้านทาน. [Online]. Available: <https://www.basiclite.com/web/index.php?topic=414.0;wap2>
- [3] 2559. ตัวเก็บประจุ. [Online]. Available: <http://www.chontech.ac.th/electric.html>
- [4] 2559 ชนิดของตัวเก็บประจุ. [Online]. Available: [https://www.mwit.ac.th/~ponchai/webCapacitor/WBTPI\\_Model/.../capacitor3.html](https://www.mwit.ac.th/~ponchai/webCapacitor/WBTPI_Model/.../capacitor3.html)
- [5] 2005 ไฟฟ้าและความต้านทาน. [Online]. Available: <http://einstein.sc.mahidol.ac.th/~withoon/SCPY154/SCPY154.htm>
- [6] 2559. วงจร RC กระแสตรง. [Online]. Available: <http://www.chirawat.rmutk.ac.th/page002.html>
- [7] 2559 วงจร RC. [Online]. Available: <http://www.oocities.org/vpras1/rc.doc>
- [8] 2559. Basic Arduino. [Online]. Available: [http://www.sat2you.com/site/?p=27026\\*](http://www.sat2you.com/site/?p=27026*)
- [9] Prapadsorn Thada. 2559. Arduino คืออะไร?. [Online]. Available: <http://prapadsorn.blogspot.com/2016/06/arduino.html>
- [10] กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี. 2554. LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [11] Kong Pitoon. 2011. LabVIEW คือ?. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/notes/kong-pitoon/labview>
- [12] Mehmet Can Karaman. 2016. Measurement of Time Constant of RC Circuits. [Online]. Available: [https://www.acadwmia.edu/16200456/Measurement\\_of\\_Time\\_Constant\\_of\\_RC\\_Circuits](https://www.acadwmia.edu/16200456/Measurement_of_Time_Constant_of_RC_Circuits)
- [13] KB Oldham. 2004. The RC time “constant” at a disk electrode. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138824810300331X>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Measurement of Time Constant of RC Circuits

Mehmet Can Karaman<sup>1</sup>

## Abstract

RC circuits are commonly used in many electronics applications. Determination of the time constant of such circuits are very important for timing analysis and characteristics of the circuits. In this study, we propose a method for the measurement of the time constant of an RC circuit. The data is collected by an Arduino Uno circuit and it is analyzed by MATLAB via curve fitting tool. It is found that the time constant measurement results are in good agreement with the theoretical predictions for both charging and discharging circuits.

## 1. Theory

A circuit containing a series combination of a resistor and a capacitor is known as an RC circuit. It can be used for electronic filtering and blocking DC signals in circuits. There are two types of RC circuits called charging and discharging. Figure 1 shows a simple RC circuit for charging case. Initially the switch S is open and the capacitor, C is uncharged. After closing the switch at time  $t = 0$ , we can write a Kirchoff's voltage rule as follows:



Figure 1: Simple RC circuit with Capacitor and Resistor

$$V_0 - IR - Q/C = 0 \quad (1)$$

Charge,  $Q$ , begins to flow in the resistor,  $R$ , and a time dependent current passing through the circuit is  $I = dQ/dt$ . Substituting the current into Equation 1 yields:

$$V_0 - \frac{dQ}{dt}R - Q/C = 0 \quad (2)$$

Solution of this differential equation is given by:

$$Q(t) = CV(1 - e^{-t/RC}) \quad (3)$$

The product  $\tau = RC$  is called the time constant of the circuit since its dimension is in time. The potential across the capacitor,  $V_c = Q/C$ , as a function of time is shown in Figure 2.

In the discharging case the capacitor is initially charged and the battery is removed from the circuit. Therefore, the Equation 4 becomes:

$$-\frac{dQ}{dt}R - Q/C = 0 \quad (4)$$

Solution of the this equation is as follows:

$$Q(t) = CVe^{-t/RC} \quad (5)$$

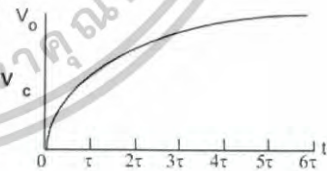


Figure 2: Voltage on the capacitor in charging case.

For both charging and discharging stages, the magnitude of the current in the circuit can be obtained from:

$$i(t) = dQ/dt = V/Re^{-t/RC} \quad (6)$$

$\tau$  is the time that take for charging (discharging) voltage capacitor increase (drop) to 63% (37%) of original value. As indicated in Figure 2 and 3, however, one can assume that the capacitor can be assumed to be totally charged or discharged after  $t > 5\tau$ .

Email address: can.karaman@metu.edu.tr (Mehmet Can Karaman)

Preprint submitted to Physics Dept. September 26, 2015

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

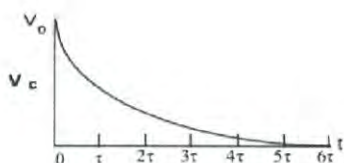


Figure 3: Voltage on the capacitor in discharging case.

### 3. Procedure

1. Set up the circuit and connect it to Arduino as shown in Figure 6.
2. Write c++ code as in Appendix A and sent it to Arduino via upload command.
3. Write a MATLAB script as in Appendix B and run it in command window and acquire the time vs potential difference data from the USB port of a computer and save them to arrays.
4. Obtain the time constant from the values stored in arrays via MATLAB curve fitting tool.

## 2. Experiment

In this experiment, we will use

- three capacitors (220  $\mu$ F, 35  $\mu$ F, 22  $\mu$ F)
- two resistors (4.7 k $\Omega$ , 33 k $\Omega$ )
- an electronic breadboard and a piece of wires
- Arduino Uno micro-controller board
- MATLAB 2013b

**Capacitor** is a electric component used for storing the electric charge. Capacitor usually made of two conductors plate that are separated by nonconducting dielectric material because this material increase the capacitor's charge capacity. Capacitance is defined as a ratio of electric charge and potential differences

$$C = \frac{Q}{V} \quad (7)$$

The SI unit of it is Farad(F)[1].

**Resistor** is electric component used for reduce current flow or limit the current flow and electric signal level. The resistance is defined as a ratio of electric potential to current and its measured in of ohm ( $\Omega$ ).[2]

$$R = \frac{V}{I} \quad (8)$$

**Arduino** is a single-board micro controller its have Atmel-Avr micro controle. Arduino system provide set of digital and analog I/Q pins. Arduino use the serial communication interface, also some models have usb for loading programs from the computer. Arduino have open source software. It written in Java but users use the C++ codes to write a program on arduino.[3]

**MATLAB** is a numerical computing envirimoment generation forth programing language. Developed by MathWorks, MATLAB allows matrix manipulations, plotting of functions and data, implementation of algorithms, creation of user interfaces, and interfacing with programs written in other languages, including C, C++, Java, Fortran and Python. MATLAB is user-friendly because its have easy to use interface.[4]

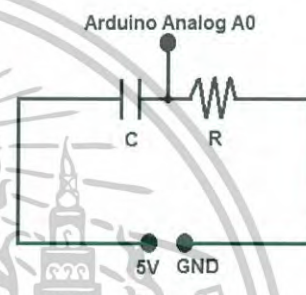


Figure 4: Voltage on the capacitor in discharging case.

## 4. Analysis

In this experiment, calculation of the time constant is found by using Least Square Fitting (LSF) method. The device production tolerances for the resistors and capacitors are 10% and 20% respectively.[5][6] We collect the data by using Arduino and analyze it in MATLAB software tools.

The merit functions used in this study for charging and discharging cases are respectively defined as follows:

$$S_c = \sum_i (V_i - [1 - V_0 e^{-t_i/\tau}])^2 \quad (9)$$

$$S_d = \sum_i (V_i - V_0 e^{-t_i/\tau})^2 \quad (10)$$

where  $V_0$  is a constant and has the value of 5.0 V supplied by Arduino Board. The data pairs ( $t_i$ ,  $V_i$ ) are the array of values representing time in seconds and potential difference in Volts across the capacitor respectively. By minimizing the function  $S_c$  and  $S_d$ , one can find the value of the free parameter  $\tau$ . The minimizations are performed by the MATLAB curve fitting tool.[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1. Charging study for $R = 33k\Omega$ , $C = 220\mu F$

Figure 8 shows the aquired data points and corresponding fit function. The fitting toolbox in MATLAB results in  $\tau = 6.17 \pm 0.09$  s. On the other hand,

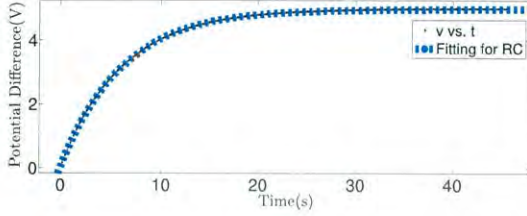


Figure 5: Charging case for  $R=33\text{ k}\Omega, C=220\text{ }\mu\text{F}$

Table 1: Expected and measurement results for different capacitors and resistors. First two lines represent charging case while the last line represents discharging case. Last colloum is obtained by dividing expected value and measured value.

R(k $\Omega$ )	C( $\mu$ F)	Expected $\tau$ (s)	Measured $\tau$ (s)	Ratio
$33 \pm 3.3$	$220 \pm 44$	$7.26 \pm 1.62$	$6.17 \pm 0.09$	$1.18 \pm 0.26$
$4.7 \pm 0.47$	$1500 \pm 300$	$7.05 \pm 1.58$	$6.10 \pm 0.04$	$1.15 \pm 0.30$
$4.7 \pm 0.47$	$220 \pm 44$	$1.05 \pm 0.23$	$0.84 \pm 0.05$	$1.24 \pm 0.35$

the *expected* value of  $\tau$  has an associated error,  $\sigma_\tau$ , because of resistor's and capacitor's production uncertainty, namely:

$$\tau = RC \pm \sigma_\tau \quad (11)$$

Accordingly, the values of the resistor and capacitors are taken as  $R = (33 \pm 3.3) \times 10^3 \Omega$  and  $C \cong (220 \pm 44) \times 10^{-6} F$ . From the error propagation formula, the error in the time constant is given by:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\left(\frac{d\tau}{dR}\right)^2 \sigma_R^2 + \left(\frac{d\tau}{dC}\right)^2 \sigma_C^2} \quad (12)$$

Substituting numerical values results in:

$$\begin{aligned} \sigma_\tau &= \sqrt{(220 \times 10^{-6})^2 (33 \times 10^3)^2} \\ &+ \sqrt{(33 \times 10^3)^2 (44 \times 10^{-6})^2} \\ &= 1.62\text{ s} \end{aligned} \quad (13)$$

Hence the time constant and its error can be written as  $\tau = 7.26 \pm 1.62$  s.

In order to compare the fitting and expected results we can compute their ratio as follows:

$$r = \frac{7.26 \pm 1.62\text{ s}}{6.17 \pm 0.09\text{ s}} = 1.18 \pm 0.26$$

The measurement is in good agreement with the expected value since ratio very close the one within one error bar.

Similar studies are repeated for different resistors and capacitors. The results are given in Table 1.

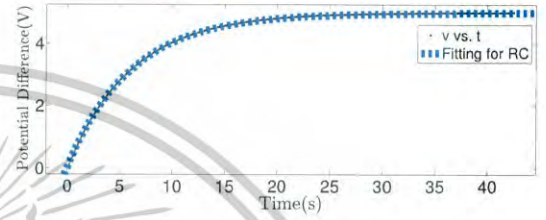


Figure 6: Charging case for  $R=4.7\text{ k}\Omega, C=1500\text{ }\mu\text{F}$

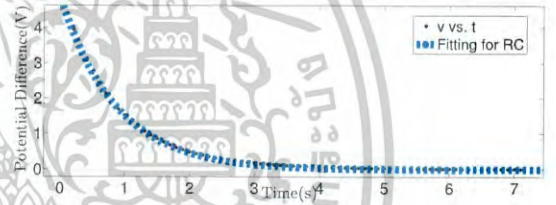


Figure 7: Charging case for  $R=4.7\text{ k}\Omega, C=220\text{ }\mu\text{F}$

## 5. Conclusion

In this project, we have analyzed the charging and discharging RC circuits. We collect data by using Arduino and analyze these data by using MATLAB. We have big errors originating from capacitor and resistor production tolerances. Our experimental errors are mostly effected by these errors. The time constant is extracted from a fitting procedure of our data points via Equations 9 and 10. After all, the experimental results are in good agreement with expected results since their ratio are close to one within one error bar. Time constant measurements of RC circuits can be used for determining the value of unknown resistor for a given value of the capacitor or vice versa. The method proposed here can easily be utilized in such measurements.

## Appendix A. Arduino Codes

```

#if defined(__AVR_ATmega1280__)
#if defined(__AVR_ATmega2560__)
#define INTERNAL INTERNAL1V1
#endif
void setup() {
  /* initialize serial
  Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  static int s = -1;
  static int pin = 13;

  int val = 0;
  int agv = 0;
  int dgv = 0;
  if (Serial.available() >0) {
    val = Serial.read();
    switch (s) {
      case -1:
        if (val>47 && val<90) {
          s=10*(val-48);
        }
        if ((s>40 && s<90) || (s>90 && s!=340 && s!=400)) {
          s=-1;
        }
      case 0:
        if (val>98 && val<167) {
          pin=val-97;
          s=1;
        }
        else {
          s=-1;
        }
        break;
      case 1:
        if (val>47 && val<50) {
          if (val==48) {
            pinMode(pin,INPUT);
          }
          else {
            pinMode(pin,OUTPUT);
          }
        }
        s=-1;
        break;
      case 10:
        if (val>98 && val<167) {
          pin=val-97;
          dgv=digitalRead(pin);

```

```

          Serial.println(dgv);
        }
        s=-1;
        break;
      case 20:
        if (val>98 && val<167) {
          pin=val-97;
          s=21;
        }
        else {s=-1;}
        break;
      case 21:
        if (val>47 && val<50) {
          dgv=val-48;
          digitalWrite(pin,dgv);
        }
        s=-1;
        break;
      case 30:
        if (val>96 && val<113) {
          pin=val-97;
          agv=analogRead(pin);
          Serial.println(agv);
        }
        s=-1;
        break;
      case 40:
        if (val>98 && val<167) {
          pin=val-97;
          s=41;
        }
        else {
          s=-1;
        }
        break;
      case 41:
        analogWrite(pin, val);
        s=-1;
        break;
      case 90:
        if (val==57) {
          Serial.println(0);
        }
        s=-1;
        break;
      case 340:
        #if defined(__AVR__)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        || defined(__PIC32MX__)
switch (val) {
    case 48:
        analogReference(DEFAULT);
        break;
    case 49:
        analogReference(INTERNAL);
        break;
    case 50:
        analogReference(EXTERNAL);
        break;
    default:
        break;
}
#endif
s=-1;
break;
case 400:
Serial.println(val);
s=-1;
break;
default:
s=-1;
}
}
}

```

## Appendix B. Matlab Codes

```

v = 0;
t = 0;
k = 1;
while 1
    val=a.analogRead(0);
    val=val*5/1023;
    disp(val)
    if (val <4.75)
        v(k)=val;
        t(k) = k*0.1;
        k=k+1;
    end
    if (val==0)
        break;
    end
    pause(0.1);
end
plot(t,v);
header1='Volt';
header2='Time';
(fid=fopen('text.txt','w'));
fprintf(fid, [header2 '\n' header1 '\n']);
fprintf(fid, '%f\n',t);
fprintf(fid, '%f\n',v);
fclose(fid);

% --- fit ---
Smin = 1e40;
for i=0:1000000
    A = 5*rand;
    B = 1*rand;
    S = sum( v-(A*(exp(-t/B))).^2 ) ;
    if S<Smin
        Smin=S;
        Amin=A;
        Bmin=B;
    end
end
Amin
Bmin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 5  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## References

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Resistor>
- [3] <http://www.arduino.cc>
- [4] <http://www.mathworks.com/products/matlab>
- [5] <http://www.parts-express.com>
- [6] <http://www.component.supply>
- [7] <http://www.mathworks.com/products/curvefitting>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The $RC$ time “constant” at a disk electrode

Keith B. Oldham \*

Department of Chemistry, Trent University, Peterborough, ON, Canada K9J 7B8

Received 25 November 2003; received in revised form 2 December 2003; accepted 2 December 2003

Published online: 19 December 2003

## Abstract

The nonuniformity of current density at inlaid disk electrodes leads to a spatial dispersion of the charging time “constant”, which ranges from zero to  $2RC$  where  $R$  and  $C$  are the overall resistance and capacitance. The consequences of this dispersion are difficult to evaluate exactly, even in the absence of faradaic processes, but a short-time treatment suggests that the effect may sometimes be important.

© 2003 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:** Capacitance; Charging current; Double layer; Inlaid disk;  $RC$  dispersion; Time constant

## 1. Introduction

Over recent decades, the electrodes favoured by electrochemists have evolved from large platinum sheets and mercury spheres to small inlaid disks of such materials as gold and glassy carbon. Though there are good reasons for these changed preferences, the paradigms used to analyze electrochemical experiments have not always kept pace with experimental developments. One concept that may often have been taken over uncritically is that of the “ $RC$  time constant”. It appears to be generally assumed [1–4] that the characteristic time that governs the charging of double layers at disk, and similarly nonuniformly accessible, electrodes is a constant, though some authors [5,6] have considered the system in greater detail.

Among the several timescales, including those arising from transport and kinetic processes, that must be considered in designing or analyzing an electrochemical experiment, is that associated with the charging of the double layer at the electrode surface through the uncompensated resistance of the cell. The timescale of this charging process is usually characterized by a parameter called the “ $RC$  time constant”. This name recognizes that the charging process is generally modelled on the

basis of a resistor and a capacitor in series, the product of the magnitudes of these two electrical components having the dimensions of time.  $RC$  time constants are also crucial in the design of electrochemical instrumentation and in the interplay of this equipment with the cell, but these aspects will not be of concern here.

## 2. The charging process

In the complete absence of faradaic processes, the response of a planar electrode to a potential step of magnitude  $\Delta E$  is given by the equation

$$I(t) = \frac{\Delta E}{R} \exp\left\{-\frac{t}{RC}\right\}, \quad (2.1)$$

when the resistor+capacitor model is obeyed or assumed. This equation is the solution to the simple differential equation  $(1/C)(dI/dt) + RI = \Delta E$ , which recognizes that the same current flows through both the double layer and the solution. When the logarithm of the current is plotted versus time, the slope and intercept of the straight line can yield values of  $RC$  and  $R$ , respectively, and this approach is commonly used to analyze the charging process. The same exponential function appears in the formula

$$I(t) = vC \left[1 - \exp\left\{-\frac{t}{RC}\right\}\right], \quad (2.2)$$

\* Tel.: +1-705-748-1011; fax: +1-705-748-1625.

E-mail address: [KOldham@TrentU.CA](mailto:KOldham@TrentU.CA) (K.B. Oldham).

for the response to the applied ramped voltage  $\Delta E = E_0 + vt$  if the preexisting potential difference was constant and equal to  $E_0$ . Double-layer capacitance is often measured by this route.

For a planar macroelectrode, the  $RC$  constant is independent of the electrode area  $A$  because this term cancels when the capacitance, equal to  $\gamma A$ , is multiplied by the resistance, equal to  $L/\kappa A$ . In these formulas  $\gamma$  is the “capacitivity” or “specific capacitance” of the double layer,  $\kappa$  is the conductivity of the solution and  $L$  is the distance separating the working electrode from the reference. Such cancellation does not always occur for other geometries. A hemispherical microelectrode, for example, has an  $RC$  time constant of  $(\gamma/\kappa)\sqrt{A/2\pi}$ , decreasing on miniaturization.

Implicit in Eqs. (2.1) and (2.2), and indeed in the very concept of a “time constant”, is the treatment of the current density as uniform. The inlaid-disk electrode supports a current density that is markedly nonuniform; in fact the current density is infinite at the disk’s perimeter. This nonuniformity implies that a different  $RC$  product applies at each radial site on the surface of the disk. In effect, there is a spectrum of resistor + capacitor pairs in parallel, through which the cell current passes. This article attempts to address some of the difficulties presented by time-constant dispersion in a disk-electrode-equipped cell, derives the initial current response to a step or ramp, and exemplifies the error likely to be incurred by ignoring the dispersion effect.

### 3. Potential and current distributions

To question how an inlaid disk electrode responds to a potential step or a voltage ramp, one may first discuss the instantaneous relationship between potential and current in the space surrounding the disk, immediately following the imposition of a potential signal. The geometry under discussion is that of a disk-shaped working electrode, of radius  $a$ , centred at the  $r = z = 0$  origin of a cylindrical coordinate system. The remainder,  $r > a$ , of the  $z = 0$  plane is an impermeable insulating surface, coplanar with the electrode. The entire half-space  $z > 0$  is filled with a conductor of uniform conductivity  $\kappa$ . The second electrode is large and “remote”—that is, so far away from the disk that it is effectively at infinity. Prior to the signal being applied, the working electrode was at equilibrium at a potential  $E_0$ .

The fundamental relationships describing the distributions of potential and current density are Laplace’s equation and Ohm’s law. With  $\varphi$ , a function of  $r$  and  $z$ , denoting the local potential in solution, the system is governed by Laplace’s equation

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \nabla^2 \varphi = 0, \quad r \geq 0, \quad z > 0, \quad (3.1)$$

subject to the following boundary conditions:

$$\varphi \rightarrow 0, \quad \sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow \infty, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad r > a, \quad z = 0, \quad (3.3)$$

and, in the case of a potential-step experiment taking the electrode potential from  $E_0$  to  $E_0 + \Delta E$ ,

$$\varphi = \Delta E, \quad r < a, \quad z = 0. \quad (3.4)$$

Our interest is less in the global solution than in the state of affairs close to the disk. Specifically, we need a value of the potential gradient at the disk’s surface, for substitution into Ohm’s law which, for the present purpose, takes the form

$$i(r) = -\kappa \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad z = 0, \quad 0 < r < a. \quad (3.5)$$

Here  $i(r)$  denotes the current density at a point on the disk distant  $r$  from its centre.

In fact, the solution to the equation set (3.1)–(3.4), though complicated, is well known in electrostatics, being most readily derived after first redrafting the problem in oblate spheroidal coordinates [7]. The solution, applied to Eq. (3.5), gives

$$i(r) = \frac{-2\kappa\Delta E}{\pi\sqrt{a^2 - r^2}}. \quad (3.6)$$

The negative sign, which will henceforth be ignored as is usual in discussions of Ohm’s law, reflects the fact that current flow is opposite to the direction of the  $z$  coordinate, i.e., down the potential gradient. Eq. (3.6) agrees with the formula of Fletcher and Horne [6].

### 4. Overall versus local time constants

It is the integration of Eq. (3.6) that leads to the known [8] expression for the resistance of the inlaid disk electrode:

$$R = \frac{\Delta E}{I} = \frac{\Delta E}{\int_0^a 2\pi r i(r) dr} = \frac{1}{4\kappa \int_0^a \frac{r dr}{\sqrt{a^2 - r^2}}} = \frac{1}{4\kappa a}. \quad (4.1)$$

The capacitance of the disk is  $\gamma A$  or  $\pi\gamma a^2$  and therefore the  $RC$  product for the disk is

$$RC = \frac{\pi\gamma a}{4\kappa} \quad (4.2)$$

or  $(\gamma/4\kappa)\sqrt{\pi A}$ , a formula very similar to that for the hemispherical electrode, but of a magnitude greater by 11% for electrodes of the same area.

However, is it appropriate to associate the product of the total resistance with the total capacitance with the time constant for the disk? From Eq. (3.6) one learns that the current density at the centre of the disk is only one-half of the overall value, whereas it increases without limit as one approaches the disk’s perimeter, suggesting that the time constant takes values in the range

$RC \pm RC$ , depending on location. Can we ascribe a “local time constant”  $\tau(r)$  to each location on the disk? Consider the annulus bounded by circles of radii  $r$  and  $r + dr$ . The capacitance attributable to this annulus is  $2\pi r\gamma dr$ . The corresponding resistance is  $\Delta E/[2\pi ri(r) dr]$ , which Eq. (3.6) shows to be equal to  $\sqrt{a^2 - r^2}/(4\kappa r dr)$ . Accordingly

$$\begin{aligned} \tau(r) &= (\text{local resistance}) \times (\text{local capacitance}) \\ &= \frac{\pi\gamma}{2\kappa} \sqrt{a^2 - r^2} = 2 \frac{\sqrt{a^2 - r^2}}{a} RC. \end{aligned} \quad (4.3)$$

The area-weighted average value of  $\tau$  is

$$\frac{\int_0^a 2\pi r \tau(r) dr}{\int_0^a 2\pi r dr} = \frac{\pi\gamma}{2\kappa} \frac{\int_0^a r \sqrt{a^2 - r^2} dr}{\int_0^a r dr} = \frac{\pi\gamma a}{3\kappa} = \frac{4}{3} RC. \quad (4.4)$$

But area weighting can be considered “unfair” because current flows predominantly through the perimetric regions of the disk. This is taken care of by current weighting

$$\frac{\int_0^a 2\pi ri(r)\tau(r) dr}{\int_0^a 2\pi i(r)r dr} = \frac{2\pi\gamma\Delta E \int_0^a r dr}{I} = \frac{\pi\gamma a}{4\kappa} = RC, \quad (4.5)$$

which supports the validity of the “local time constant” concept by showing that  $RC$  is simply the suitably averaged value of this local property.

Notice that charging-time-constant dispersion is a fundamental property of the inlaid disk geometry and is unaffected by the disk’s size. The local time constant is always  $2RC$  at the disk’s centre and always zero at the perimeter, no matter how large or small the disk, provided that the second electrode can still be regarded as remote. However, Eq. (4.2) shows that  $RC$  scales with the disk’s radius, so that the magnitude of  $RC$  is small for nanosized disk electrodes, a property well known to electrochemists seeking to study very fast electrode reactions [9–11], or when fast scans are employed [12,13].

## 5. Response to a step or ramp

We can consider the initial current in response to the imposition of a potential step of magnitude  $\Delta E$  on a disk electrode to be the sum (or integral) of the responses due to a number (or an infinity) of small (or infinitesimal) annuli. Each annulus obeys an equation resembling (2.1). Hence,

$$\begin{aligned} I(t) &= \int_{r=0}^{r=a} \frac{\Delta E \exp\{-t/\tau(r)\}}{(\text{local resistance})} = 2\pi \int_0^a ri(r) \exp\left\{\frac{-t}{\tau(r)}\right\} dr \\ &= 4\kappa\Delta E \int_0^a \frac{r}{\sqrt{a^2 - r^2}} \exp\left\{\frac{-2\kappa t}{\pi\gamma\sqrt{a^2 - r^2}}\right\} dr, \end{aligned} \quad (5.1)$$

in which the second and third steps made use of Eqs. (3.6) and (4.3). The substitution  $r^2 = a^2 - (2\kappa/\pi\gamma\lambda)^2$  converts the integral to a standard form, namely

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{8\kappa^2\Delta E}{\pi\gamma} \int_{2\kappa/\pi\gamma a}^{\infty} \frac{\exp\{-t\lambda\}}{\lambda^2} d\lambda \\ &= 4\kappa a\Delta E \left[ \exp\left\{\frac{-2\kappa t}{\pi\gamma a}\right\} + \frac{2\kappa t}{\pi\gamma a} \text{Ei}\left\{\frac{-2\kappa t}{\pi\gamma a}\right\} \right]. \end{aligned} \quad (5.2)$$

$\text{Ei}\{\}$  being the exponential integral function. Expressed in terms of the overall resistance and capacitance, the expression for the initial response of the disk electrode to a potential step is

$$I(t) = \frac{\Delta E}{R} \left[ \exp\left\{\frac{-t}{2RC}\right\} + \frac{t}{2RC} \text{Ei}\left\{\frac{-t}{2RC}\right\} \right]. \quad (5.3)$$

The predictions of Eqs. (2.1) and (5.3) are significantly different. Both foretell an initial current of  $\Delta E/R$ , followed by a decline. Eq. (2.1) predicts that the current declines with a slope that is initially  $(dI/dt) = -\Delta E/R^2C$ . On the other hand, Eq. (5.3) predicts an initially precipitous decline in current,  $(dI/dt) \rightarrow -\infty$  as  $0 \leftarrow t$ . However, this dramatic behaviour is short lived, as Table 1 shows. The tabulated currents according to Eq. (5.3) are seen to be smaller than those predicted by Eq. (2.1), though to fall off in a comparable fashion. Of course, since the total electricity passed is the same,  $\gamma a\Delta E$ , in both cases, the charging current eventually exceeds the simple exponential prediction to compensate for the initial shortfall. For reasons that will be explained later, we have no confidence that Eq. (5.3) even comes close to being correct at longer times, and therefore Table 1 is restricted to small  $t/RC$  values.

The initial current in response to the imposition of a potential ramp of rate  $v$  can be found by a procedure that mirrors that used in the previous paragraph. We consider the current to result from an array of annular units, each obeying Eq. (2.2). Analogous to Eq. (5.1) is the result

Table 1

Initial response to a potential step when (column 2) the current density is uniform and when (column 3) the current-density dispersion is that of an inlaid disk electrode

$t/RC$	$I(t)/I(0)$	
	Eq. (2.1)	Eq. (5.3)
0	1	1
0.001	0.99900	0.99599
0.002	0.99800	0.99267
0.005	0.99501	0.98396
0.01	0.99005	0.97138
0.02	0.98020	0.94967
0.05	0.95123	0.89690
0.1	0.90484	0.82783
0.2	0.81873	0.72255

Data in the third column were computed using the very convergent expansion:  $\exp\{-x\} + x\text{Ei}\{-x\} = 1 + x\ln\{0.65522x\} - x^2/2 + x^3/12 - x^4/72 + x^5/480 - x^6/3600 + \dots$

Table 2

Initial response to a potential ramp when (column 2) the current density is uniform and when (column 3) the current–density dispersion is that of an inlaid disk electrode

$t/RC$	$I(t)/vC$	
	Eq. (2.2)	Eq. (5.6)
0	0	0
0.001	0.000999	0.000998
0.002	0.001998	0.001992
0.005	0.004988	0.004957
0.01	0.009950	0.009844
0.02	0.019801	0.019447
0.05	0.048771	0.047115
0.1	0.095163	0.090183
0.2	0.181269	0.167583

With  $x = t/RC$ , the series  $2x + x^2 \ln\{0.397411x\} - x^3/6 + x^4/24 - x^5/180 + x^6/1120 - \dots$ , was used to calculate the third column.

$$I(t) = v \int_{r=0}^{r=a} (\text{local capacitance}) \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-t}{\tau(r)} \right\} \right] \\ = 2\pi v \gamma \int_0^a r \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-2\kappa t}{\pi \gamma \sqrt{a^2 - r^2}} \right\} \right] dr, \quad (5.4)$$

The substitution  $\lambda = 2\kappa/\left[\pi\gamma\sqrt{a^2 - r^2}\right]$  is again a useful prelude to integration, leading to

$$I(t) = \frac{8\kappa^2 v}{\pi \gamma} \int_{2\kappa/\pi \gamma}^{\infty} \frac{1 - \exp\{-t\lambda\}}{\lambda^3} d\lambda \\ = \pi \gamma v a^2 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2\kappa t}{\pi \gamma a} \right) \exp\left\{ \frac{-2\kappa t}{\pi \gamma a} \right\} \right. \\ \left. + \left( \frac{2\kappa t}{\pi \gamma a} \right)^2 \text{Ei}\left\{ \frac{-2\kappa t}{\pi \gamma a} \right\} \right], \quad (5.5)$$

or, in terms of the overall resistance and capacitance

$$I(t) = vC \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{2RC} \right) \exp\left\{ \frac{-t}{2RC} \right\} \right. \\ \left. + \left( \frac{t}{2RC} \right)^2 \text{Ei}\left\{ \frac{-t}{2RC} \right\} \right]. \quad (5.6)$$

Table 2 compares the predictions of this equation with those of Eq. (2.2). In this case the same initial response, a ramped current with slope  $v/R$ , is predicted by both equations, but Eq. (5.6) predicts a more rapid subsequent decline than the exponential falloff in Eq. (2.2). The paper by Fletcher and Horne [6] relates to linear-scan charging in the context of combined non-faradaic and faradaic pathways.

## 6. Magnitude of the effect

Tables 1 and 2 reveal no very large effect of charging time dispersion and, for some purposes, the discrepancy

could perhaps be ignored with impunity. How seriously the effect will affect experimental conclusions depends on the nature of the experiment and the purpose for which it was conducted. A single instance will be analyzed.

One commercial instrument [14] incorporates a useful facility for measuring uncompensated resistance. The equipment imposes a 50 mV potential step and measures the ensuing transient current at times of 54 and 72  $\mu\text{s}$  after the step. A consequence of Eq. (2.1) is that

$$R = \frac{50 \text{ mV} [I(72 \mu\text{s})]^3}{[I(56 \mu\text{s})]^4}, \quad (6.1)$$

and the instrument evaluates this expression, reporting it as the uncompensated resistance. Imagine that a microdisk electrode with a capacitance of 1.00  $\mu\text{F}$  is present in a cell with a resistance of 100  $\Omega$ . Then, according to Eq. (5.3), the currents at times of 54 and 72  $\mu\text{s}$  after application of a 50 mV potential step will be 250.8 and 210.2  $\mu\text{A}$ , respectively. On the basis of formula (6.1), the instrument would incorrectly report an uncompensated resistance of 117  $\Omega$ . Whether this represents a serious, or a tolerable, error would depend on the circumstances.

## 7. Longer times

In the foregoing it has been repeatedly stressed that the analysis incorporated into Eqs. (5.3) and (5.6) relate to times soon after the experiment commences. The predictions become increasingly suspect as time ensues. The reason for this suspicion goes back to Eq. (3.4) in the original derivation, which strictly is correct only at  $t = 0$ .

It must be recognized that a distinction should be made between the plane at the surface of the electronic conductor, and the plane representing the outer limit of the double layer, even though the separation may be atomically small. As the double-layer capacitor charges, the potential difference across it increases. This increase lies at the heart of the charging process and has, of course, been recognized in the derivation here. What has *not* been recognized is that the charging occurs differentially: depending on their radial coordinate, some locations charge more quickly than others. Thus, to solve the double-layer charging process exactly, this feature must be incorporated into the solution of Laplace's equation; it is not a feature that can added post facto. Eq. (3.4) should be replaced, for the potential-step problem, by

$$\varphi(r, t) = \Delta E - \frac{1}{\gamma} \int_0^t i(r, t) dt \quad z = 0, \quad 0 < r < a, \quad (7.1)$$

so that the boundary condition is no longer uniform, not only in space, but also in time.

Moreover, there is another complication. The differential charging process means that, from the viewpoint of the electrolyte solution, the disk is no longer an equipotential surface. Hence the lines of force do not meet the disk perpendicularly, rather they are normal to the prevailing equipotential surfaces in the neighbourhood of the electrode, which are themselves changing in shape with time. No longer is the Laplace equation amenable to solution in oblate spheroidal coordinates. The problem could doubtless be solved numerically, and work is in progress in that direction, but it is unlikely to yield an easily parameterized solution.

### Acknowledgements

Sixuan Guo and Jan Myland have helped this study in different ways. The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada provided financial support.

### References

- [1] C.S. Henry, I. Fritsch, *Anal. Chem.* 71 (1999) 550.
- [2] R. Antano-Lopez, M. Keddad, H. Takenouti, *Electrochim. Acta* 46 (2001) 3611.
- [3] N. Tantavichet, M.D. Pritzker, *J. Electrochem. Soc.* 149 (2002) C289.
- [4] R. de Levie, *J. Electroanal. Chem.* 552 (2003) 223.
- [5] L.K. Safford, M.J. Weaver, *J. Electroanal. Chem.* 312 (1991) 69.
- [6] S. Fletcher, M.D. Horne, *Electrochem. Com.* 1 (1999) 502.
- [7] K.B. Oldham, *J. Electroanal. Chem.* 260 (1989) 461.
- [8] J. Newman, *J. Electrochem. Soc.* 24 (1966) 501.
- [9] R.S. Robinson, R.L. McCreery, *J. Electroanal. Chem.* 182 (1985) 61.
- [10] J.-M. Saveant, in: M.I. Montenegro, M.A. Queiros, J.L. Daschbach (Eds.), *Microelectrodes: Theory and Applications*, Kluwer, Dordrecht, 1991.
- [11] M.V. Mirkin, T.C. Richards, A.J. Bard, *J. Phys. Chem.* 97 (1993) 7672.
- [12] D.K.Y. Wong, L.Y.F. Xu, *Anal. Chem.* 67 (1995) 4086.
- [13] R.J. Tait, A.M. Bond, B.C. Finnin, B.L. Reed, *Collect. Czech. Chem. Commun.* 56 (1991) 192.
- [14] BAS Workstation 100B, Bioanalytical Instruments, West Lafayette, Indiana, USA.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เรื่อง ค่าคงที่เวลาของวงจร RC (THE RC TIME CONSTANT)

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่าคงที่เวลาของวงจร RC
2. ศึกษาลักษณะของตัวเก็บประจุขณะประจุ (charging) และคายประจุ (discharging)

## ทฤษฎี

ตัวเก็บประจุเมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงหรือแบตเตอรี่ ประจุจะสะสมบนแผ่นประจุและความต่างศักย์ระหว่างแผ่นของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายไฟในเวลาใดๆ ประจุ  $Q$  ของตัวเก็บประจุจะมีค่า  $Q = CV$  โดยที่  $C$  คือ ความจุ (capacitance) ของตัวเก็บประจุ หน่วย farads (F)

อัตราการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ขึ้นอยู่กับความจุของตัวเก็บประจุและความต้านทานของวงจร ลักษณะคล้ายกันตอนที่ตัวเก็บประจุปล่อยประจุอัตราการลดลงของความต่างศักย์ขึ้นกับพารามิเตอร์แบบเดียวกัน

เมื่อตัวเก็บประจุต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงจะถูกอัดประจุผ่านความต้านทาน ดังรูปที่ 1 เมื่อสวิตช์  $S$  อยู่ในตำแหน่ง  $a$  ประจุในตัวเก็บประจุและความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นกับเวลา ความต่างศักย์ขณะอัดประจุ (charging voltage) เป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลา  $t$  ตามสมการ

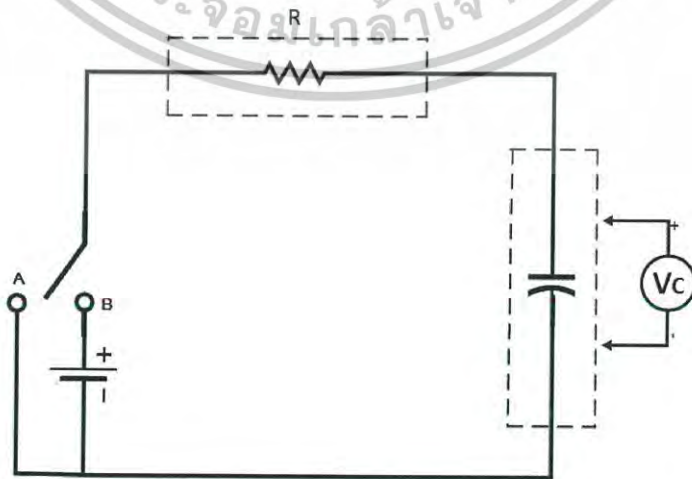
$$V = V_0(1 - e^{-t/RC}) = V_0(1 - e^{-t/\tau}) \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่

$e = 2.718$  คือ ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm)

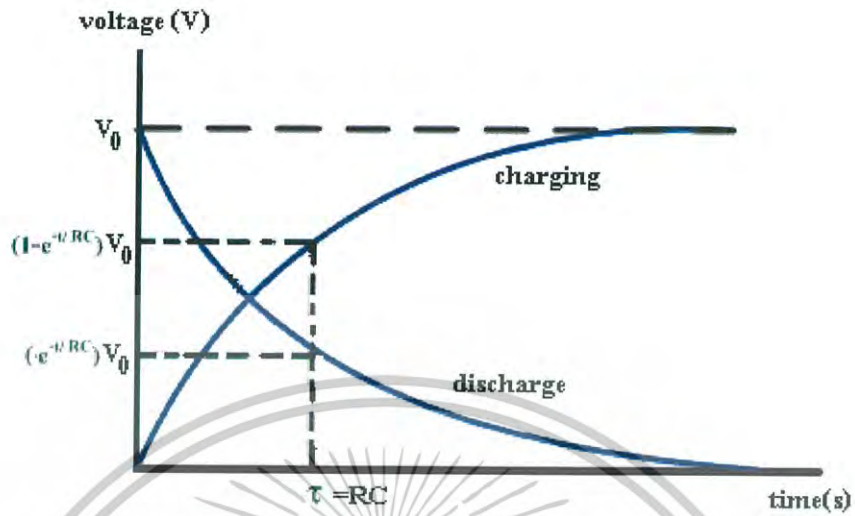
$V_0$  คือ ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟตรง

$\tau = RC$  คือ ค่าคงที่เวลาของวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 1 วงจร RC โดยที่ขณะคายประจุสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง A และขณะประจุสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง B  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นโค้งแสดงการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ของความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ขณะประจุแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟระหว่างความต่างศักย์กับเวลาขณะประจุและขณะคายประจุ

ขณะประจุเมื่อเวลาผ่านไป  $t = \tau = RC$  ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น

$$V = V_0(1 - e^{-t/RC}) = V_0(1 - e^{-1}) \approx 0.63V_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

หรือคิดเป็นประมาณ 63% ของค่าสูงสุดที่จะอัดได้

เมื่อตัวเก็บประจุถูกประจุเต็มแล้ว เมื่อเราสับสวิตช์ S มาตำแหน่ง A ใน

รูปที่ 1 ตัวเก็บประจุคายประจุ ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงกับเวลา ความต่างศักย์ขณะคายประจุ (discharging voltage) มีค่าตามสมการ

$$V = V_0 e^{-t/RC} \quad \dots\dots\dots(3)$$

การลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลของความต่างศักย์ขึ้นกับเวลา ดูกราฟในรูปที่ 2 เมื่อเวลาผ่านไป  $t = \tau = RC$  ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงเป็น

$$V = V_0 e^{-1} \approx 0.37V_0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

หรือเหลือประมาณ 37 % ของค่าสูงสุด

ในการวิเคราะห์ความต่างศักย์ซึ่งขึ้นกับเวลาจะสะดวกขึ้น ถ้าจัดสมการ (1) และ (3) ในรูปแบบสมการเส้นตรง จากสมการ (1) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้  $V - V_0 = -V_0 e^{-t/RC}$  หรือ  $V_0 - V = V_0 e^{-t/RC}$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ (4) ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความต่างศักย์ขณะประจุในรูปลอการิทึม

$$\ln(V_0 - V) = \frac{t}{RC} + \ln V_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

และในทำนองเดียวกัน จากสมการ (2) จะได้ความต่างศักย์ขณะปล่อยประจุ

$$\ln V = -\frac{t}{RC} + \ln V_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ทั้งสมการ (5) และ (6) อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรง  $y = mx + c$  โดยทั้งคู่มีความชัน (slope) เป็นลบ มีขนาด  $\frac{1}{RC}$  ดังนั้นสามารถหาค่าคงที่เวลา (RC) ของวงจรจากความชันของกราฟในสมการ (5) หรือ (6) ได้

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดการทดลอง Charge – Discharge Experiment Set
2. ตัวต้านทาน
3. ตัวเก็บประจุ
4. โปรแกรมสำหรับการวัด Time constant ของวงจร RC
5. สาย USB

### วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องชุดทดลอง Charge – Discharge Experiment Set
2. นำตัวต้านทานและตัวเก็บประจุใส่ในชุดทดลอง ตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางบันทึกผลการทดลอง
3. เชื่อมชุดทดลองเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB port
4. เปิดโปรแกรมสำหรับการวัด Time constant ของวงจร RC
5. กำหนดจำนวนค่า time constant ที่ต้องการจะวัด โดยเลือกที่ช่อง No. of Exp.
6. กำหนดค่าตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุลงในโปรแกรม  
กรณี ไม่ทราบค่าตัวต้านทานให้กดปุ่ม UNKNOW R  
กรณี ไม่ทราบค่าตัวเก็บประจุให้กดปุ่ม UNKNOW C  
กรณี ไม่ทราบค่าทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต้องกดทั้ง UNKNOW R และ UNKNOW C
7. คลิก OK ที่ช่อง port เมื่อทำการ connect port USB ระหว่างชุดทดลองกับโปรแกรมแล้ว
8. กด RUN โปรแกรมจะทำการวัดค่า time constant ของวงจรจากกราฟที่วัดได้
9. เมื่อโปรแกรมทำการวัดเสร็จแล้ว เปลี่ยนค่าตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางบันทึกผลการทดลอง จากนั้น กด NEXT โปรแกรมจะเริ่มทำการวัดอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เมื่อโปรแกรมทำการวัดครบจำนวนครั้งที่ต้องการวัด บันทึกค่า time constant ที่วัดได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง โดยดูจากค่า T ที่แถบแสดงครั้งที่ในการวัด
11. บันทึกกราฟที่วัดได้จากการทดลอง

### ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 วัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่  $R = 10 \text{ k}\Omega$

C ( $\mu\text{F}$ )	time constant (s)				จาก ทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220						
470						
680						
1000						
2200						

ตอนที่ 2 วัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่  $R = 12 \text{ k}\Omega$

C ( $\mu\text{F}$ )	time constant (s)				จาก ทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220						
470						
680						
1000						
2200						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 วัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่  $R = 15 \text{ k}\Omega$

C ( $\mu\text{F}$ )	time constant (s)				จาก ทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220						
470						
680						
1000						
2200						

ตอนที่ 4 วัดค่า time constant ของตัวเก็บประจุค่าต่างๆ ที่  $R = 20 \text{ k}\Omega$

C ( $\mu\text{F}$ )	time constant (s)				จาก ทฤษฎี (s)	%error
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
220						
470						
680						
1000						
2200						

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ส่วนของ Block Diagram ของโปรแกรม RC Charge – Discharge Experiment Set

