

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจัดการด้านพลังงานของตัวเก็บประจุความจุสูง  
ENERGY MANAGEMENT OF ULTRACAPACITOR



T104293



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 104293  
วัน,เดือน,ปี..... 30 ต.ค. 2552

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การจัดการด้านพลังงานของตัวเก็บประจุความจุสูง  
Energy Management of Ultra capacitor



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิเชิต ล้ายอง

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจัดการด้านพลังงานของตัวเก็บประจุความจุสูง

ผู้จัดทำ

1. นายจิตติวัชร ศิริอมรรรัตน์
2. นายสันต์ สิงหเดช
3. นายวิศรุต สีมั่นตะ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การจัดการด้านพลังงานของตัวเก็บประจุความสูง

นายจิตติวัชร ศิริอมรรตน์

นายวสันต์ สิงหเดช

นายวิศรุต สีมั่นตะ

รศ. พิเชิต ล้ายอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

การจัดการด้านพลังงานของตัวเก็บประจุความสูงที่นำเสนอในปฏิญานิพนธ์นี้ ซึ่งตัวเก็บประจุความสูงจะมีการเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นพลังงานสะอาดไม่ส่งผลเสียต่อธรรมชาติ ไม่มีขีดจำกัดในประจุและคายประจุจากกระแส มีความน่าเชื่อถือสูงและมีจำนวนรอบในการใช้งานยาวนาน ในปฏิญานิพนธ์นี้ หัวข้อที่ถูกนำมาพิจารณาในการศึกษาตัวเก็บประจุความสูง ประการแรก คือ จะนำเสนอการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั่วไปในโครงสร้างของตัวเก็บประจุความสูง ซึ่งประกอบด้วย พฤติกรรมของความต้านทานภายใน (Equivalent Parallel Resistance) ความต้านทานขนาน (Equivalent Parallel Resistance) โดยจะเป็นกรณีศึกษาและการวัดค่า ประการที่สอง คือ วิธีการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ประการที่สาม คือ การเปรียบเทียบการคายประจุของตัวเอง (self discharge) ระหว่างตัวเก็บประจุแบบธรรมดาและตัวเก็บประจุความสูงว่ามีการรักษาพลังงานได้นานเท่าไร ประการสุดท้าย การประยุกต์ใช้ในเครื่องจักรไฟฟ้า คือ การนำไปกระตุ้นกับตัวเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และศึกษาการนำไปประยุกต์ในด้านอื่นๆ

**ENERGY MANAGEMENT OF ULTRACAPACITOR**

Thitiwat Siriamornrat

Wasan Singhadetch

Wisaroot Simunta

Assoc.Prof. Pichit Lumyong

Advisor

Piampoom Sarikprueck

Advisor

2008

**ABSTRACT**

Energy management of ultra capacitor is proposed in the project. The ultra capacitor is a high efficient and green energy storage component that offers intensive charging and discharging current and performs a perfect reliability and cycling ability. In this paper, topics are discussed for ultra capacitor-based system research and application. First, a comparison among several parameter models of the ultra capacitor is presented. At the same time, the characteristics of ESR (Equivalent Series Resistance) and EPR (Equivalent Parallel Resistance) are described and studied. Second, the methods of capacitance measurement. Third, comparison the self discharge between normal capacitor and ultra capacitor that how long to keep the energy. Finally, An application in machine; excite inductor to build magnetic field and study other application.

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ไม่ได้มาจากความรู้ความสามารถและความตั้งใจของสมาชิกในกลุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ได้มาจากการให้ความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย จึงขออนุญาตกล่าวถึงเพื่อเป็นการขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.พิชิต ล้ายอง และ อาจารย์เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลความรู้ทางทฤษฎีของการทดสอบและทดลองเกี่ยวกับตัวเก็บประจุความจุสูง และในด้านวงจรแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการในครั้งนี้ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่เอาใจใส่ติดตามผลและให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาข้อบกพร่องตลอดระยะเวลาในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาของสมาชิกทุกคนในกลุ่มโครงการนี้ ที่มอบความรัก ความปรารถนาดี กำลังใจและให้โอกาสในการศึกษาจนมาถึงในระดับนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอน ซึ่งสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทำโครงการ

ขอบคุณเพื่อนทุกคนในกลุ่มที่มีความสามัคคีและร่วมมือกันทำงานอย่างเต็มที่ รวมไปถึงเพื่อนกลุ่มอื่นที่ให้คำแนะนำและคอยช่วยเหลือซึ่งกันและกัน สร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ คุณป้าแม่บ้าน และให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสถาบันการศึกษาแห่งนี้ ที่เพาะบ่มให้เราคณะผู้จัดทำเป็นบุคคลที่มีคุณภาพ ไม่ว่าจะด้านการศึกษา ด้านสังคมหรือประสบการณ์ชีวิตหลายๆด้าน เราคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

IV  
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
2.2 ความหมายและลักษณะของตัวเก็บประจุ.....	8
2.3 การประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ.....	11
2.4 Ultracapacitor or Supercapacitor.....	14
2.5 วงจรเบื้องต้นของ Ultracapacitor.....	16
2.6 ลักษณะโครงสร้าง.....	17
2.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน.....	19
2.8 รายละเอียดของ Ultracapacitor.....	21
2.9 Measurement Condition.....	23
2.10 ข้อดี – ข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่.....	29
2.11 ข้อดี – ข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์แบบธรรมดา.....	29
2.12 Damped Oscillator.....	30
2.13 ทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก.....	33

บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	39
4.1 Charge and Discharge (RC Time Constant).....	39
4.2 Capacitance Measurement.....	43
4.3 การวัดค่า C แบบการลดแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล.....	44
4.4 ESR Measurement.....	50
4.5 Energy and Impulse Current.....	57
4.6 Leakage Current.....	68
4.7 Self discharge.....	70
4.8 การทดลองวงจรแม่เหล็ก.....	73
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก 1 (รูปการทดลอง).....	99
ภาคผนวก 2 (ข้อมูลอ้างอิง).....	102
ประวัติผู้เขียน.....	121

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
ภาพที่ 2.1	การต่อวงจร RC เพื่อใส่ประจุให้ตัวเก็บประจุ.....	5
ภาพที่ 2.2	กราฟแสดงค่า $V_C$ กับ $t$ ในการเก็บประจุของวงจร RC .....	6
ภาพที่ 2.3	กราฟแสดงค่า $V_C$ กับ $t$ ในการคายประจุของวงจร RC .....	7
ภาพที่ 2.4	แสดงลักษณะของตัวเก็บประจุ สัญลักษณ์ และโครงสร้าง.....	8
ภาพที่ 2.5	แสดงลักษณะของโครงสร้างเพลทในตัวเก็บประจุ.....	9
ภาพที่ 2.6	แสดงการทำงานของประจุในแผ่นเพลท.....	10
ภาพที่ 2.7	โครงสร้างตัวเก็บประจุ.....	11
ภาพที่ 2.8	การเก็บประจุและคายประจุ.....	12
ภาพที่ 2.9	แสดง Ultracapacitor แบบต่างๆ.....	14
ภาพที่ 2.10	แสดง The first-order circuit model of an ultracapacitor. Each of the four circuit elements is ideal.....	16
ภาพที่ 2.11	แสดงลักษณะโครงสร้างของ Ultracapacitor.....	17
ภาพที่ 2.12	แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของ Ultracapacitor.....	18
ภาพที่ 2.13	แสดงกราฟการคายประจุ.....	24
ภาพที่ 2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอุณหภูมิของค่า capacitance และค่าความต้านทาน.....	25
ภาพที่ 2.15	แสดงได้แทนการลดความจุไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ กราฟได้แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลสำหรับทุกๆ 10 องศาเซลเซียส สามารถทำนายประสิทธิภาพในเงื่อนไขที่หลากหลาย.....	26
ภาพที่ 2.16	แสดงความสัมพันธ์ในการลดลงของความต้านทานของผลิตภัณฑ์ จากกราฟได้ แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ในการทำนายประสิทธิภาพ การอัดประจุที่เงื่อนไขที่หลากหลาย.....	27
ภาพที่ 2.17	แสดงลักษณะการ Charge และ Discharge ของ Ultracapacitor.....	28
ภาพที่ 2.18	แสดงวงจร RLC .....	30
ภาพที่ 2.19	ภาพแสดงสภาวะ Over – Damped.....	31
ภาพที่ 2.20	ภาพแสดงสภาวะ Under – Damped.....	31
ภาพที่ 2.21	ภาพแสดงสภาวะ Critically – Damped.....	31
ภาพที่ 2.22	แสดงวงจรแม่เหล็กแบบแกน E-I.....	33
ภาพที่ 3.1	แสดงวงจรการทดลอง.....	35
ภาพที่ 3.2	ลักษณะของ Ultracapacitor ที่นำมาทดลอง.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII

ภาพที่ 3.3	ภาพแสดงการทดลองจริง.....	36
ภาพที่ 3.4	วงจรพื้นฐานของวงจรทดลองการกำเนิดกระแสฮัมพัลส์.....	37
ภาพที่ 3.5	ภาพแสดงแผนผังของการเกิด Damped ในกรณีต่างๆ .....	38
ภาพที่ 4.1	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการอัดประจุ ที่ความต้านทาน 20 โอห์ม.....	39
ภาพที่ 4.2	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 20 โอห์ม.....	39
ภาพที่ 4.3	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการอัดประจุ ที่ความต้านทาน 50 โอห์ม.....	40
ภาพที่ 4.4	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 50 โอห์ม.....	40
ภาพที่ 4.5	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการอัดประจุ ที่ความต้านทาน 100 โอห์ม.....	41
ภาพที่ 4.6	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 100 โอห์ม.....	41
ภาพที่ 4.7	ภาพแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการอัดประจุ ที่ความต้านทาน 100 โอห์ม.....	43
ภาพที่ 4.8	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 513.066 Ω.....	45
ภาพที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ โดยกราฟ เป็นแบบ semi-logarithm ที่ความต้านทาน 513.066 Ω.....	45
ภาพที่ 4.10	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 400.934 Ω.....	48
ภาพที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของแรงดันกับเวลาในการคาย ประจุ โดยกราฟเป็นแบบ semi-logarithm ที่ความต้านทาน 400.934 Ω....	48
ภาพที่ 4.12	ภาพแสดงแรงดันกับเวลาในการคายประจุ และแสดงผลของความต้านทาน ภายในและความต้านทานโหลด เมื่อทำการคายประจุ.....	50
ภาพที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ(R=100 Ω)	52
ภาพที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ(R=100 Ω)	52
ภาพที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ(R=50 Ω)	53
ภาพที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ(R=50 Ω)	53
ภาพที่ 4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ(R=20 Ω)	54
ภาพที่ 4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ(R=20 Ω)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VIII

ภาพที่ 4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับเวลาในการคายประจุ	55
ภาพที่ 4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับเวลาในการคายประจุ	55
ภาพที่ 4.21	ภาพแสดงผลการทดลองของแรงดันและกระแสเมื่อเทียบกับเวลาในการ Discharge ใส่ความต้านทานโหลด = $1\text{m}\Omega$	57
ภาพที่ 4.22	ภาพขยายผลการทดลองของแรงดันและกระแสเมื่อเทียบกับเวลาในการ Discharge ใส่ความต้านทานโหลด = $1\text{m}\Omega$	57
ภาพที่ 4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการอัดประจุและคายประจุ	58
ภาพที่ 4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในการอัดประจุ	58
ภาพที่ 4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ	59
ภาพที่ 4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันหรือค่ากำลังไฟฟ้าในการอัดประจุ	59
ภาพที่ 4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันหรือค่ากำลังไฟฟ้าในการคายประจุ	60
ภาพที่ 4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการอัดประจุ	62
ภาพที่ 4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ	62
ภาพที่ 4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการอัดประจุ	63
ภาพที่ 4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ	63
ภาพที่ 4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทานโหลด $1\text{ m}\Omega$	65
ภาพที่ 4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทานโหลด $1\text{ m}\Omega$	65
ภาพที่ 4.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันหรือค่ากำลังไฟฟ้าในการคายประจุ	66
ภาพที่ 4.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลขณะอัดประจุกับเวลาที่แรงดัน $\sim 8.87\text{ V}$	68
ภาพที่ 4.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลขณะอัดประจุกับเวลาที่แรงดัน $\sim 9.87\text{ V}$	68
ภาพที่ 4.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลขณะอัดประจุกับเวลาที่แรงดัน $\sim 10.87\text{ V}$	69
ภาพที่ 4.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เหลืออยู่กับเวลาขณะ Self Discharge ในช่วงแรกประมาณ 67 นาที	70
ภาพที่ 4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลา (Self discharge)	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IX

ภาพที่ 4.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา ขณะ Self Discharge.....	71
ภาพที่ 4.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา ขณะ Self Discharge ของตัวเก็บประจุแบบธรรมดาในช่วงแรก 3 ชั่วโมง.....	71
ภาพที่ 4.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา ขณะ Self Discharge ของตัวเก็บประจุแบบธรรมดาในช่วง 50 ชั่วโมง.....	72
ภาพที่ 4.43	ภาพแสดงวงจรการทดลองวงจรแม่เหล็ก.....	73
ภาพที่ 4.44	แสดงการทดลองหาค่าความต้านทานในสาย.....	73
ภาพที่ 4.45	แสดงค่าพารามิเตอร์ของการทดลอง.....	73
ภาพที่ 4.46	แสดงวงจรแม่เหล็กแบบแกน E-I.....	75
ภาพที่ 4.47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{max}$ กับ $H_{rms}$ .....	78
ภาพที่ 4.48	กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 1.00325 A.....	79
ภาพที่ 4.49	กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน.....	79
ภาพที่ 4.50	กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 6.00481 A.....	80
ภาพที่ 4.51	กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน.....	80
ภาพที่ 4.52	กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 9.00207 A.....	81
ภาพที่ 4.53	กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน.....	81
ภาพที่ 4.54	กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 15.0335 A.....	82
ภาพที่ 4.55	กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน.....	82
ภาพที่ 4.56	กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 27.0188 A.....	83
ภาพที่ 4.57	กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน.....	83
ภาพที่ 4.58	ภาพแสดงวงจรการจำลองที่กรณี Critically Damped.....	86
ภาพที่ 4.59	ภาพแสดงผลการจำลองการ Excite ขดลวดโดยแกนนอนเป็นเวลา แกนตั้งเป็นกระแสและแรงดัน.....	86
ภาพที่ 4.60	ภาพแสดงวงจรการทดลองที่กรณี Critically – Damped.....	87
ภาพที่ 4.61	ภาพแสดงกระแสและแรงดันกับเวลาที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ขดลวด.....	87
ภาพที่ 4.62	ภาพแสดงวงจรการจำลองโปรแกรมPSpiceที่กรณี Under Damped.....	89
ภาพที่ 4.63	ภาพแสดงผลการจำลองการ Excite ขดลวดโดยแกนนอนเป็นเวลา แกนตั้งเป็นกระแสและแรงดัน.....	89
ภาพที่ 4.64	ภาพแสดงวงจรการทดลองที่กรณี Under – Damped.....	90
ภาพที่ 4.65	ภาพแสดงกระแสและแรงดันกับเวลาที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ขดลวด.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X

ภาพที่ 4.66	ภาพแสดงกระแสที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ขดลวด.....	91
ภาพที่ 4.67	ภาพแสดงวงจรการจำลองที่กรณี Over – Damped.....	93
ภาพที่ 4.68	ภาพแสดงผลการจำลองการ Excite ขดลวด โดยแกนนอนเป็นเวลา แกนตั้งเป็นกระแสและแรงดัน.....	93
ภาพที่ 4.69	ภาพแสดงวงจรการทดลองที่กรณี Over – Damped.....	94
ภาพที่ 4.70	ภาพแสดงกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ขดลวด.....	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1	10
ตารางที่ 2.2	29
ตารางที่ 3.1	36
ตารางที่ 4.1	44
ตารางที่ 4.2	44
ตารางที่ 4.3	47
ตารางที่ 4.4	47
ตารางที่ 4.5	51
ตารางที่ 4.6	51
ตารางที่ 4.7	51
ตารางที่ 4.8	69
ตารางที่ 4.9	73
ตารางที่ 4.10	74
ตารางที่ 4.11	76
ตารางที่ 4.12	77
ตารางที่ 4.13	84
ตารางที่ 4.14	88
ตารางที่ 4.15	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ เรากำลังประสบปัญหาในด้านพลังงานในครัวเรือน อุตสาหกรรม และการขนส่ง เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นต้นเหตุทำให้เกิดปัญหาในด้านราคาที่แพงขึ้น มีความต้องการมากขึ้น เหตุผลเหล่านี้จึงนำมาสู่การศึกษาคุณสมบัติของตัวคาปาซิเตอร์ความจุสูง ซึ่งเป็นเซลล์พลังงานใหม่ที่ยังไม่แพร่หลายและยังไม่ได้รับการประยุกต์เท่าที่ควร ลักษณะเด่นที่มีในตัวเก็บประจุความจุสูง คือ มีอายุการใช้งานได้นาน(Life cycle), Power Density และ Efficiency สูงกว่าแบตเตอรี่และนอกจากนี้ยังไม่มีผลของ Memory Effect และที่สำคัญคือ สามารถชาร์จและดิสชาร์จได้เร็วกว่าเซลล์เชื้อเพลิงอื่น ๆ เช่น แบตเตอรี่ ซึ่งอาจนำไปสู่การประยุกต์และเก็บพลังงานที่ดีได้ในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ได้ในด้านการขนส่ง เช่น นำไปเก็บพลังงานในขณะที่รถกำลังเบรก (regenerative) หรือในด้านการสร้างวงจรกระแสอิมพัลส์

การพัฒนาตัวเก็บประจุชนิดนี้ในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย แต่ในต่างประเทศได้มีการประยุกต์นำเอาตัวเก็บประจุความจุสูงมาใช้ในยานพาหนะต่างๆ เช่น รถบัส รถยนต์ ซึ่งนำมาใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ในการช่วยจ่ายและเก็บพลังงานขณะเบรก และในประเทศไทยยังนำตัวเก็บประจุความจุสูงนี้มาใช้ในเครื่องเสียงรถยนต์ ในการช่วยจ่ายกำลังให้เร็วและมากขึ้นในขณะที่เครื่องเสียงต้องการกำลังไฟฟ้าสูง(การขับเบส)

ดังนั้น จึงเป็นหัวข้อในการศึกษาตัวเก็บประจุความจุสูง ทั้งในด้านพารามิเตอร์พื้นฐานและวงจรสมมูล เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าด้านการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ โดยทดลองการคายประจุในตัวเอง(Self Discharge) เพื่อศึกษาระยะเวลาในการเก็บพลังงาน และในด้านการจ่ายกระแสอิมพัลส์ เพื่อนำไปประยุกต์ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก โดยการศึกษาถึงองค์ประกอบภายในของตัวเก็บประจุที่มีผลในการจ่ายกระแส เช่น ความต้านทานภายใน (ESR) และช่วงเวลาในการคายประจุ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อให้เข้าใจถึงเทคนิคการวิเคราะห์และจัดการพลังงานในตัวเก็บประจุความจุสูง
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุ (State of Charge - SOC)
3. เพื่อศึกษาการจ่ายกระแสอิมพัลส์เพื่อ excite สนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า
4. เพื่อนำคุณสมบัติต่างๆมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมต่อไป
5. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าพลังงาน
6. เพื่อศึกษาระยะเวลาในการเก็บพลังงานในตัวเอง

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้เป็นโครงการที่ศึกษาพฤติกรรมการทำงานต่างๆในตัวเก็บประจุ ความจุสูง และค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในตัวเก็บประจุ เช่น Charge and Discharge time, Power and Energy Density, Efficiency เป็นต้น แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าด้านพลังงานในตัวเก็บประจุความจุสูง เพื่อนำไป excite สนามแม่เหล็ก โดยการศึกษาถึงองค์ประกอบภายในของตัวเก็บประจุที่มีผลในการจ่ายกระแส เช่น ความต้านทานภายใน (ESR) หรือช่วงเวลาในการทำงาน นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสามารถในการเก็บพลังงานในตัวเอง โดยศึกษาการ Self Discharge ของตัวเก็บประจุความจุสูง

### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุความจุสูง
2. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวเก็บประจุความจุสูง
3. ทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวเก็บประจุความจุสูงตามทฤษฎีพื้นฐาน
4. ศึกษาการจ่ายกระแสอิมพัลส์ในตัวเก็บประจุความจุสูงว่าเป็นไปได้หรือไม่ โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานภายใน (ESR)
5. ทดลองและเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ค่าด้านพลังงานที่อยู่ในตัวเก็บประจุความจุสูง
6. นำตัวเก็บประจุความจุสูงไปประยุกต์ใช้ในเชิงเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Excite ขดลวด)

## 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

รายละเอียดการทำโครงการ	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
- หาข้อมูลอุปกรณ์ คือ ตัวเก็บประจุ ความจุสูง จากนั้นทำการศึกษา พฤติกรรมพื้นฐานของตัวเก็บ ประจุ เช่น charge discharge เป็นต้น	X							
- นำตัวเก็บประจุความจุสูงชนิด นี้มาทำการTest เพื่อหา ค่าพารามิเตอร์ภายในของตัว เก็บประจุชนิดนี้ คือ charge and discharge time, Power density, Energy density, Equivalent series resistance(ESR), leakage current		X						
- เก็บข้อมูลวิเคราะห์ผลการ ทดสอบ		X	X					
- จัดทำรายงานประเมิน ความก้าวหน้า			X					
- จัดทำรายงานโครงการ พร้อม การนำเสนอแบบPower point ของ Project 1 ในปลายภาค				X	X			
- ศึกษาการทำงานในด้านการ จ่ายกระแสแบบอิมพัลส์ในตัว เก็บประจุชนิดนี้ เพื่อนำไป excite สนามแม่เหล็กใน เครื่องจักรกลไฟฟ้า และพลังงาน ที่อยู่ในตัวเก็บประจุความจุสูง						X	X	
- จัดทำรายงานโครงการ พร้อม การนำเสนอของ Project 2 ใน ปลายภาค								X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เป็นการเรียนรู้และศึกษาเซลล์พลังงานที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาในประเทศ
2. ได้ทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวเก็บประจุความจุสูง
3. ได้ทราบถึงวิธีการทดสอบตัวเก็บประจุความจุสูง
4. ได้ทราบถึงคุณสมบัติในการจ่ายกระแสแบบอิมพัลส์ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าว่าเป็นไปได้หรือไม่
5. ได้ทราบถึงข้อดี - ข้อเสียเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่
6. สามารถนำความรู้ในเรื่องตัวเก็บประจุความจุสูง ไปประยุกต์กับงานด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าและด้านอื่นๆ ได้
7. ได้ทราบถึงวงจรสมมูลในตัวเก็บประจุความจุสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

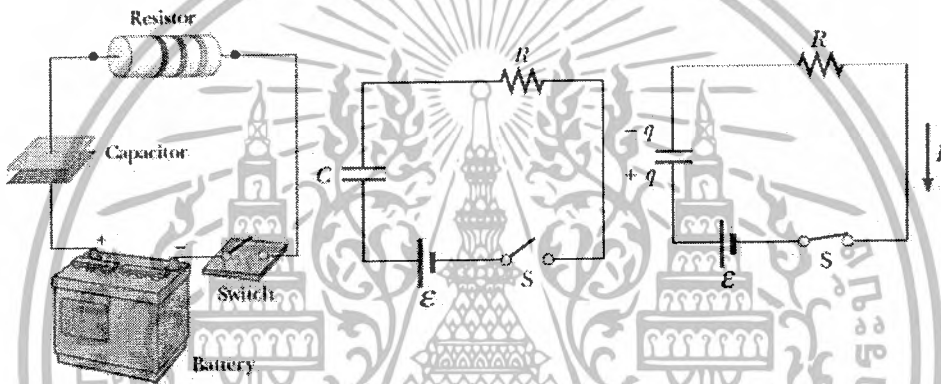
### 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

#### DC Circuit

วงจร RC เป็นวงจรที่นำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกับตัวต้านทานและแบตเตอรี่ การศึกษาแบ่งเป็น 2 กรณี คือ Charge และ Discharge ตัวเก็บประจุ

#### 2.1.1 การใส่ประจุให้ตัวเก็บประจุ (Charging a Capacitor)

เป็นการใส่ประจุให้กับตัวเก็บประจุ สามารถทำได้โดยต่อวงจรดังภาพ



ภาพที่ 2.1 ภาพแสดงการต่อวงจร RC เพื่อใส่ประจุให้ตัวเก็บประจุ

ในระหว่างการประจุ ประจุจะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามจากแผ่นหนึ่งไปยังอีกแผ่นได้ และเมื่อการใส่ประจุเต็ม กระแสในวงจรก็จะไม่ไหลอีกต่อไป ใช้ Loop Rule ของเคอร์ชอฟจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$E = V_c + IR$$

$$E = \frac{Q}{C} + R \frac{dQ}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{E - \frac{Q}{C}}{R} = \frac{(CE - Q)}{RC}$$

$$\frac{dQ}{(CE - Q)} = \frac{dt}{RC}$$

เมื่อเริ่มสับสวิตช์  $t=0$ ,  $Q=0$  เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา  $t$  วินาที ประจุที่ตัวเก็บประจุ  $C$  จะมีค่า  $Q$  ทำให้ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^Q \frac{dQ}{(CE-Q)} = \int_0^t \frac{dt}{RC}$$

$$\int_0^Q \frac{d(CE-Q)}{(CE-Q)} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

$$\int_{CE}^{CE-Q} \frac{du}{u} = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln(CE-Q) - \ln(CE) = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln\left[\frac{CE-Q}{CE}\right] = -\frac{t}{RC}$$

$$CE-Q = CEe^{-\frac{t}{RC}}$$

$$Q = CE(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$V_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2.1)$$

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-t/RC} \quad (2.2)$$

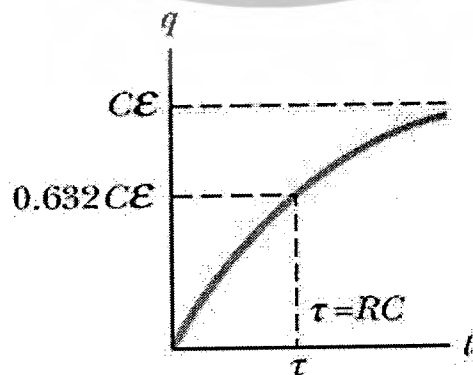
จากสมการที่(2.1) RC จะมีหน่วยในเทอมของเวลาเป็นวินาที ค่า R มีหน่วยเป็นโอห์ม ค่า C จะมีหน่วยเป็นฟารัด (Farad) เรายินยอมเขียนแทนค่า RC ด้วย  $\tau$  และเรียกว่า time constant ถ้า  $\tau = RC$  เราจะได้ว่า

$$V_C = E(1 - e^{-1})$$

$$V_C = \frac{E(e-1)}{e}$$

$$V_C = 0.632E \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) แสดงให้เห็นว่า เมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวต้านทาน R มาอยู่ในตัวเก็บประจุเป็นเวลา  $\tau = RC$  ทำให้มีความต่างศักย์คร่อม C มีค่าเป็น 0.632E



ภาพที่ 2.2 กราฟแสดงค่า  $V_C$  กับ  $t$  ในการเก็บประจุของวงจร RC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.1)

$$(E - V_C) = Ee^{-\frac{t}{RC}}$$

$$\text{Log } (E - V_C) = \text{Log } E - \left(\frac{t}{RC}\right) \text{Log } e \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟแบบ Semi-logarithm โดย  $\text{Log } (E - V_C)$  อยู่บนแกน y และค่า t อยู่บนแกน x เราจะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-\frac{\text{Log}(e)}{RC}$  หรือเท่ากับ  $-\frac{0.434}{RC}$

### 2.1.2 การคายประจุของตัวเก็บประจุ (Discharging Capacitor)

เป็นการนำตัวเก็บประจุที่มีประจุสะสมอยู่มากมายคายประจุไปในวงจรโดยใช้ Loop Rule ของเคอร์ชอฟ การคายประจุจากตัวเก็บประจุ C ผ่านตัวต้านทาน R เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า  $i = \frac{dQ}{dt}$

และความต่างศักย์คร่อม C เป็น  $\frac{Q}{C} = V_C$  เราจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\text{จาก } V_C + IR = 0$$

$$\frac{Q}{C} = -R \frac{dQ}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{RC}$$

ที่เวลา  $t=0$  วินาที ประจุที่ C มีค่า Q เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t วินาที จะมีประจุถูกเก็บไว้ที่ C เป็น Q เพราะฉะนั้นจะได้สมการซึ่งหาเช่นเดียวกับ สมการ (2.1) จะได้

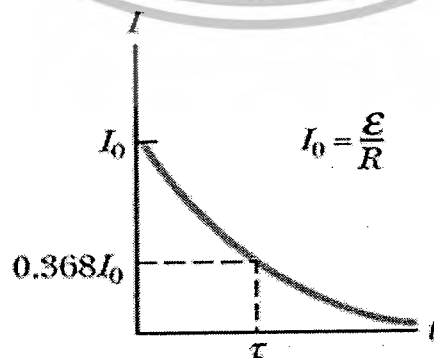
$$V_C = Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.5)$$

และที่  $t = RC = \tau$  จะได้ว่า

$$V_C = 0.368E \quad (2.6)$$

และ

$$\text{Log } V_C = \text{Log } E - \left(\frac{t}{RC}\right) \text{Log } e \quad (2.7)$$



ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงค่า  $V_C$  กับ  $t$  ในการคายประจุของวงจร RC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ความหมายและลักษณะของตัวเก็บประจุ

### 2.2.1 ตัวเก็บประจุคืออะไร

ตัวเก็บประจุ, คาปาซิเตอร์ (Capacitor) หรือ ตัว C ที่เรานิยมเรียกกัน ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า โดยจะว่าไปแล้วตัวเก็บประจุทำหน้าที่คล้ายกับแบตเตอรี่ แต่จะเก็บกระแสไฟฟ้า ได้น้อยกว่าและจะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เร็วกว่า โดยตามโครงสร้างแล้วตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นตัวนำวางประกบกันโดยเว้นระยะห่างของแผ่นตัวนำโดยภายในจะมีสารไดอิเล็กทริกอยู่ เราจึงนิยามมักเห็นตัวเก็บประจุอยู่ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เสมอ นอกจากเราจะใช้ตัวเก็บประจุ เก็บและคายประจุให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้ว เรายังใช้ตัวเก็บประจุ ในวงจรกรองความถี่ได้อีกด้วย หน่วยของตัวเก็บประจุเรียกว่า "F (ฟารัด)"  $10\mu\text{F}$  (10 ไมโครฟารัด),  $0.01\mu\text{F}$  (0.01ไมโครฟารัด) เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะของตัวเก็บประจุ สัญลักษณ์ และโครงสร้าง

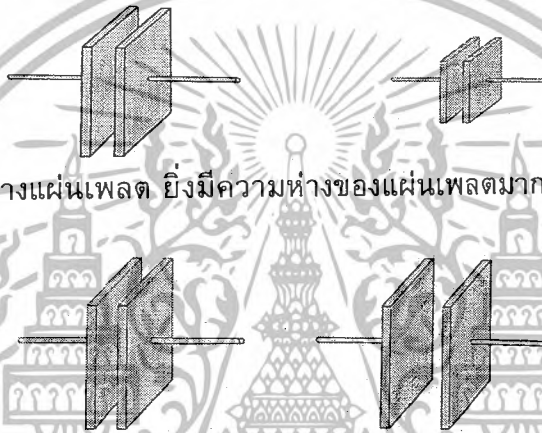
## 2.2.2 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ

พื้นฐานโครงสร้างของตัวเก็บประจุประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นซึ่งเรียกกันว่า "แผ่น 1 เพลต" และคั่นด้วย "แผ่นไดอิเล็กตริก" ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ, ไมก้า, เซรามิก หรือ อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 เรามักเรียกชื่อของตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ ตามสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กตริก เช่น ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ก็จะมีแผ่นไดอิเล็กตริกเป็นเซรามิกนั่นเอง

**ตัวแปรที่ให้ค่าของตัวเก็บประจุมากหรือน้อยมีอยู่ 3 ประการคือ**

- พื้นที่แผ่นเพลตที่วางขนานกัน ตัวเก็บประจุที่มีพื้นที่แผ่นเพลตมากก็ยังมีค่าความจุมาก แผ่นโลหะทั้งสองวางชิดกันจะมีความจุมาก และแผ่นโลหะทั้งสองวางห่างกันจะมีความจุน้อย

- ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต ยิ่งมีความห่างของแผ่นเพลตมากขึ้นค่าความจุก็ยิ่งลดลง



ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะของโครงสร้างเพลตในตัวเก็บประจุ

- ชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กตริก ค่าความจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของสารที่ใช้ทำแผ่นไดอิเล็กตริกวัสดุต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนต่อประจุไฟฟ้าแตกต่างกัน เมื่อนำมาใช้งานเป็นฉนวนคั่นกลางแผ่นโลหะย่อมมีผลต่อความจุที่เกิดขึ้นในตัวเก็บประจุแตกต่างกัน สารไดอิเล็กตริกมีคุณสมบัติเป็นฉนวน และมีผลต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลต ดังนั้น ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกจึงมีผลต่อค่าการเก็บประจุ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant,  $K$ ) เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลต สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น นั่นคือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1 สำหรับไดอิเล็กตริก ชนิดอื่นนั้นจะใช้สุญญากาศเป็นตัวอ้างอิงในการแสดงค่า ตัวอย่างเช่น ไมก้า มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 50 หมายความว่า ไมก้าสามารถทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก สามารถกักตัวได้ง่ายกว่าสุญญากาศถึง 5 เท่า และด้วยค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $K$ ) ดังนั้น ตัวเก็บประจุแบบไมก้าจึงมีค่าการเก็บประจุมากกว่าตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกถึง 5 เท่า ส่วนไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดอื่นๆ แสดงในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

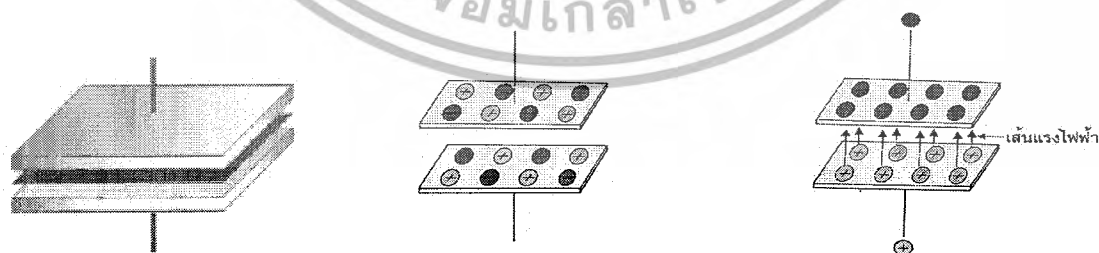
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K)
สุญญากาศ	1.0
อากาศ	1.0006
เทฟลอน	2.0
ซีผึ้ง	2.25
กระดาษ	2.5
อำพัน	2.65
ยาง	3.0
น้ำมัน	4.0
ไม้ก้ำ	5.0
เซรามิก	6.0
แบคคาไลต์	7.0
แก้ว	7.5
น้ำ	78.0

หน่วยของตัวเก็บประจุคือ “ฟารัด” (Farad) เขียนสัญลักษณ์ย่อว่า “F” ในทางปฏิบัติถือว่าหนึ่งฟารัดมีค่ามาก ส่วนใหญ่ค่าที่ใช้จะอยู่ในช่วง ไมโครฟารัดกับพิโกฟารัด หนึ่งไมโครฟารัดมีค่าเท่ากับหนึ่งในล้านของฟารัด (1 ไมโครฟารัดเท่ากับ 0.000,001 ฟารัด) ใช้สัญลักษณ์ “ $\mu F$ ” (microfarad) และ หนึ่งพิโกฟารัดมีค่าเท่ากับหนึ่งในล้านของหน่วยไมโครฟารัด (1 พิโกฟารัดเท่ากับ 0.000,001 ไมโครฟารัด) ใช้สัญลักษณ์ว่า “pF” (picofarad)

$$1\mu F = 1/1,000,000 F = 0.000001 F$$

$$1pF = 1/1,000,000 \mu F = 0.000001 \mu F$$



ภาพที่ 2.6 แสดงการทำงานของประจุในแผ่นเพลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

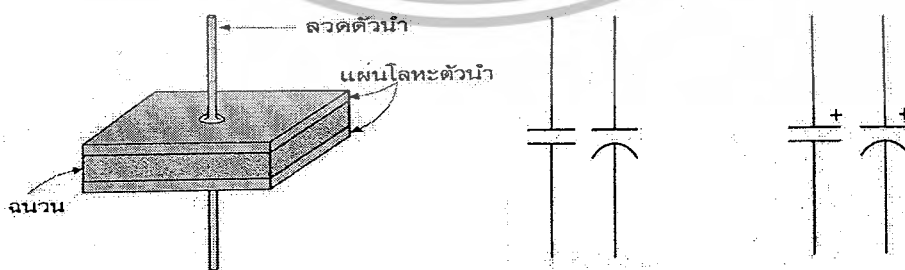
ตัวเก็บประจุ มีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้า เกิดขึ้นได้จากการนำแผ่นโลหะ หรือ แผ่นสารตัวนำสองแผ่นวางอยู่ใกล้ ๆ กันแต่ไม่แตะถึงกัน โดยมีแผ่นไดอิเล็กตริกซึ่งมีลักษณะเป็นฉนวนกั้นอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง ค่าความจุที่ได้จะขึ้นอยู่กับ พื้นที่ของแผ่นตัวนำและ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นโลหะบาง 2 แผ่น ซึ่งอาจเรียกว่าแผ่นตัวนำ ( Conductive Plate ) วางขนานชิดกัน มีฉนวนไฟฟ้าที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก( Dielectric ) วางคั่นกลางแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่น ที่แผ่นโลหะทั้ง 2 มีลวดตัวนำ ต่อติดไว้แผ่นละเส้นใช้เป็นขั้วต่อใช้งานค่าความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเรียกเป็น ฟารัด (Farad) ไมโครฟารัด (m F) นาโนฟารัด (nF) พิโกฟารัด (pF)

### 2.3.1 การเก็บประจุ (Charge) ของตัวเก็บประจุ

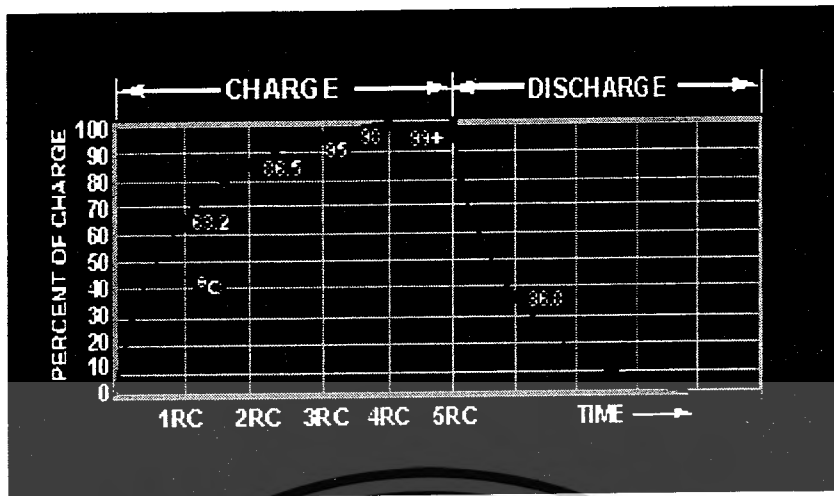
คือ การเก็บสะสมประจุไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าไว้ในตัวเก็บประจุ เก็บประจุ คือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลตของ ตัวเก็บประจุ นั่นเอง เมื่อนำแบตเตอรี่อื่น ๆ ต่อกับ ตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่ จะเข้าไปออกกันที่แผ่นเพลต ทำให้เกิด ประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไป ผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม (เหมือนกับนำแผ่นแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกัน มาใกล้กันมันก็จะผลักรัน) ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมี ประจุเป็น + และ - ประปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูก ผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงทำให้เกิดการดูดของประจุตรงข้ามมาที่แผ่นเพลต

### 2.3.2 การคายประจุ (Discharge) ของตัวเก็บประจุ

คือ การที่ตัวเก็บประจุเริ่มปล่อยให้มีการเคลื่อนที่เข้าหากันของประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน ตัวเก็บประจุ ที่ถูกประจุแล้วนั้น ถ้าเรายังไม่นำขั้ว ตัวเก็บประจุ มาต่อกัน อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจร ระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่น เพลตบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า " การคายประจุ"



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 2.8 กราฟแสดงการเก็บประจุและคายประจุ

### 2.3.3 สูตรการคำนวณหาค่าการเก็บประจุ

ด้วยปัจจัยที่กำหนดค่าการเก็บประจุ ได้แก่ พื้นที่ของแผ่นเพลต ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต และชนิดของไดอิเล็กตริก ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\text{ค่าการเก็บประจุ (C)} = \frac{Q}{V} \quad C = \frac{(8.85 \times 10^{-12}) \times K \times A}{d} \quad (2.8)$$

- C = ค่าการเก็บประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
- $8.85 \times 10^{-12}$  กำลัง -12 = ค่าความเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) มีหน่วยเป็น ฟารัด/เมตร (F/m)
- K = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
- A = พื้นที่ของแผ่นเพลตมีหน่วยเป็นตารางเมตร(m<sup>2</sup>)
- d = ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตมีหน่วยเป็นเมตร(m)

จากสมการจะเห็นว่า ค่าการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (K) และพื้นที่ของแผ่นเพลต (A) และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต (d)

### 2.3.4 การทำงานของตัวเก็บประจุ

1. การทำงานของตัวเก็บประจุกับไฟดีซี ตัวเก็บประจุจะทำการเก็บประจุและคายประจุเมื่อทำงานกับไฟดีซี การเก็บประจุ (Charge) และ การคายประจุ (Discharge)

2. การทำงานของคาปาซิเตอร์กับไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อนำคาปาซิเตอร์ไปต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีการทำงานดังนี้ในครึ่งไซเคิลแรกตัวเก็บประจุจะทำการเก็บประจุ ทำให้มีกระแสไหลจากเฟสบวกไปยังแผ่นโลหะ A ทำการเก็บประจุ ผ่านโลหะแผ่น B ไปครบวงจรที่แหล่งจ่าย ในครึ่งไซเคิลหลัง เมื่อไฟเอชีสลับเฟส ตัวเก็บประจุที่เก็บประจุไว้ก็จะ คายประจุออก แล้ว เก็บประจุใหม่ในทิศทางตรงกันข้าม การทำงานจะสลับกันไปมา ตลอดเวลาตามไซเคิลของไฟเอชี่ ลักษณะของหลอดไฟจะสว่างตลอดทั้งในครึ่งไซเคิล แรก และ ครึ่งไซเคิลหลัง ไฟเอชี่จะไหลผ่านคาปาซิเตอร์ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความถี่ของไฟเอชี่และค่าของตัวเก็บประจุ

ถ้าความถี่ของไฟเอชี่ สูง จะไหลผ่านได้มาก ความถี่ต่ำจะไหลได้น้อย  
ถ้าคาปาซิเตอร์ค่ามากการเก็บประจุและคายประจุได้มาก ไฟเอชี่ก็ผ่านได้มาก  
ถ้าคาปาซิเตอร์ค่าน้อยการเก็บประจุและคายประจุน้อย ไฟเอชี่ก็ผ่านได้น้อย

### 2.3.5 ประโยชน์ของคาปาซิเตอร์

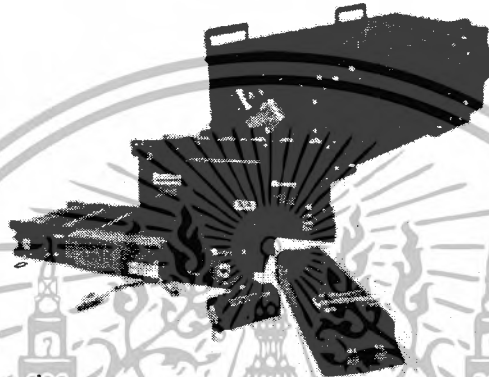
ตัวเก็บประจุ หรือ คาปาซิเตอร์ (capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานในสนามไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นระหว่างคู่ขนาน โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน แต่มีชนิดของประจุตรงข้ามกันบางครั้งเรียกตัวเก็บประจุนี้ว่าคอนเดนเซอร์(condenser)เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในงาอิเล็กทรอนิกส์ และพบได้แทบทุกวงจรการเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กทรอนิกส์ถูกผลึกออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น (เมื่อเทียบกับอีกด้าน)

จากการเก็บและคายประจุของคาปาซิเตอร์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์มากมายเช่น การกรองไฟดีซีให้เรียบ (Filter) การถ่ายทอดสัญญาณ และเชื่อมโยงระหว่างวงจร (Coupling) การกรองความถี่ (Bypass) การกั้นการไหลของกระแสไฟดีซี (Blocking) และใช้เก็บพลังงาน (Storage Energy) เป็นต้น

## 2.4 Ultra capacitor or Super capacitor

### 2.4.1 Ultra capacitor คืออะไร?

Ultra capacitor คือ ตัวเก็บประจุที่มีลักษณะพิเศษ คือ มี high power and energy density ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ Ultracapacitor มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเก็บประจุแบบธรรมดา และมีลักษณะคล้ายๆกับแบตเตอรี่ แต่ไม่มีผลของปฏิกิริยาเคมี และมีขนาดเล็กกว่า ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมาก โดยมีค่า capacitance สูงขึ้น จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์มากมาย



ภาพที่ 2.9 แสดงรูปแบบของ Ultra capacitor

### 2.4.2 How do Ultra capacitors Work?

Capacitor ที่มีอยู่ในวงจรต่าง ๆ นั้น เป็นอุปกรณ์ที่เก็บสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า โดยเกิดขึ้นได้จากแผ่นตัวนำ 2 แผ่นที่มีขั้วต่างกัน คือแผ่นหนึ่งเป็นขั้วบวก อีกแผ่นเป็นขั้วลบแผ่นทั้งสองนี้มีชื่อเรียกว่า อิเล็กโทรด แผ่นเพลทนี้จะถูกแยกโดยฉนวน ที่เรียกว่า ไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยให้คาปาซิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะวัสดุที่นำมาทำนั่นเอง

ตัวแปรต่างๆในตัวคาปาซิเตอร์

- ค่าตัวเก็บประจุ (C) หน่วย ฟารัด(F)
- อัตราส่วนของขนาดของประจุบนแผ่นตัวนำ(Q) หน่วย คูลอม(C)
- ขนาดของแรงดันระหว่างเพลท(V) หน่วย โวลต์(V)

เพราะฉะนั้น  $C = Q/V$  Farad (คูลอม/โวลต์)

ค่าตัวเก็บประจุเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ, ขนาดของสนามไฟฟ้า, และระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท และยังขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนด้วย ซึ่งฉนวนจะช่วยทำให้แผ่นเพลททั้งคู่ไม่สัมผัสกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุกับขนาดของพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ Ultracapacitor มีความแตกต่างกับคาปาซิเตอร์แบบธรรมดา โดยแผ่นเพลททั้งคู่จะไม่ถูกแบ่งแยกโดยฉนวน Ultracapacitor จึงแก้ปัญหาด้านขนาดและระยะห่างของพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลทเพื่อการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแผ่นคาร์บอน 2 แผ่นถูกกระตุ้นโดยการเติมของเหลวที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ลงไป จะทำให้เกิดประสิทธิภาพอย่างน่าทึ่ง โดยกระบวนการขั้นแรกคาร์บอนที่มีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสูงจะสร้างเม็ดเล็ก ๆ ขึ้นที่ผิวหน้า Ultracapacitor จะถูกสร้างมาจากอิเล็กโทรดแบบ metal foil 2 แผ่นมาหุ้มแล้วจุ่มลงไปในของเหลวอิเล็กโทรไลต์ แผ่นคาร์บอนจะถูกแยกออกเป็นสองแผ่น คือ แผ่นบวกกับแผ่นลบ ซึ่งแผ่นบวกจะดูดประจุลบและแผ่นลบก็จะทำตรงกันข้าม แผ่นบาง ๆ ที่ใช้คั่นแผ่นเพลททั้งคู่ไม่ให้แตะกัน และช่วยให้กระแสไหลในแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยประจุจะถูกสร้างจากแผ่นเพลททั้งสองชั้น ซึ่งทำให้เป็น ultracapacitor แตกต่างกับแบบอื่น จึงทำให้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Electric Double-Layer Capacitors (EDLC) ซึ่งแผ่นเพลททั้งสองจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหน้าให้ตัวเก็บประจุชนิดนี้ ทำให้มีค่าตัวเก็บประจุที่สูง

### 2.4.3 ทฤษฎี

Electrochemical Double Layer Capacitors (EDLCs) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Supercapacitors หรือ Ultracapacitors อุลตราคาปาซิเตอร์จะเก็บพลังงานโดยไฟฟ้าทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น และปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในตัวของมันทำให้มันสามารถที่จะเก็บพลังงานได้ กลไกพิเศษภายในของมันย้อนกลับได้ จึงทำให้น้ำไปซาร์ทและดิสซาร์ทกลับไปกลับมาได้ เป็นร้อยเป็นพันครั้งจนถึงล้านครั้งได้

อัลตราคาปาซิเตอร์จะมีลักษณะเป็นสองแผ่นเพลท "แผ่นไดอิเล็กตริก" ที่มีรูพรุนวางห่างกันอยู่ไว้ใกล้ชิดกัน แผ่นเพลทสองแผ่นที่วางเป็นสารอิเล็กโทรไลต์โดยมีแรงดันตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลท ทำให้เกิดอออนบวกดึงดูดอออนลบในอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่เกิดอออนลบดึงดูดอออนบวกในอิเล็กโทรไลต์ของอีกฝั่ง นี่จึงมีผลทำให้เกิดเป็นสองเลเยอร์บนตัวเก็บประจุ โดยมีแผ่นกั้น (Separator) กั้นระหว่างเพลทบวกกับเพลทลบ

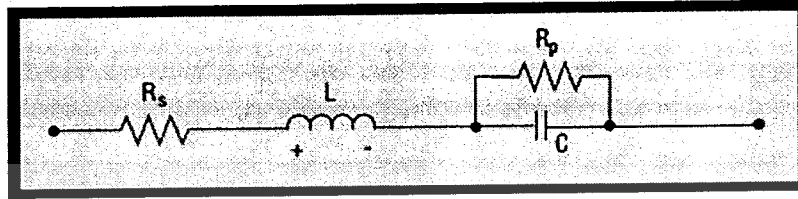
โดยปกติแล้วพื้นที่ที่เก็บประจุกำเนิดมาจากแผ่นเพลทที่ทำมาจากวัสดุตัวนำที่แบน การเก็บประจุที่สูงทำได้ด้วยการม้วนวัสดุที่มีความยาวที่มาก ความยาวที่เพิ่มขึ้นนี้จึงจัดการทำให้พื้นที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น ปกติแล้วตัวเก็บประจุจะแยกเพลทด้วยสารไดอิเล็กตริก เช่น พลาสติก กระดาษ หรือฟิล์มเซรามิก ยิ่งสารไดอิเล็กตริกบางจะเกิดพื้นที่มากขึ้นภายในค่าที่เฉพาะ และการจำกัดความหนาของสารไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ผิว

Ultracapacitors มาจากอิเล็กโทรดรูพรุนที่ทำจากคาร์บอน ซึ่งโครงสร้างนี้มีพื้นที่ผิวใกล้ 2000 ตารางเมตรต่อกรัม และมีค่ามากกว่าใช้เพลทหรือวัสดุที่ทำจากฟิล์ม ระยะห่างที่ Ultracapacitors เก็บประจุขึ้นอยู่กับขนาดของอออนในสารอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีค่าเข้าใกล้การชาร์จอิเล็กโทรด การชาร์จที่แผ่นกั้น (Separator) (มีค่าน้อยกว่า 10 อังสตรอม) ซึ่งเล็กกว่าการใช้ไดอิเล็กตริกธรรมดา

การรวมตัวของพื้นที่ผิวที่ใหญ่และการชาร์จของแผ่นกั้นที่น้อยทำให้เด่นกว่าเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุธรรมดา

## 2.5 วงจรเบื้องต้นของ Ultracapacitor

วงจรสมมูลของ **Ultracapacitor** จะมีลักษณะคล้ายกับตัวเก็บประจุทั่วไป โดยได้แสดงดังรูป เป็นแบบ first-order circuit model



ภาพที่ 2.10 แสดง The first-order circuit model of an ultracapacitor.

Each of the four circuit elements is ideal.

- C - ค่า capacitance
- L - ค่าความเหนี่ยวนำ
- R<sub>p</sub> - ค่าความต้านทานแบบขนาน (Self discharge)
- R<sub>s</sub> - ค่าความต้านทานแบบอนุกรม (ESR)

ค่า ESR จะเป็นค่าสูญเสียขณะ **Ultracapacitor** กำลังเก็บประจุและคายประจุ ส่วนค่า R<sub>p</sub> จะเป็นค่าสูญเสียเมื่อมีการ self discharge หรือ ค่าความต้านทานของ leakage current และค่า L เป็นค่าทางกายภาพของโครงสร้างของ **Ultracapacitor** ซึ่งจะมีค่าน้อยมาก แต่จะไม่สามารถละเว้นได้เมื่อใช้ในการทำงานที่ความถี่สูงหรืออุปกรณ์สวิตชิง

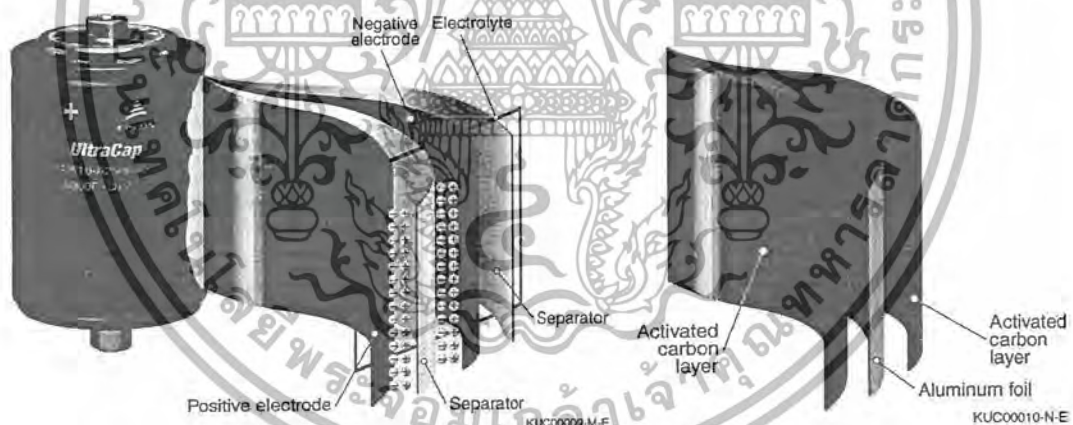
## 2.6 ลักษณะโครงสร้าง

### 2.6.1 โครงสร้าง

โครงสร้างเฉพาะของ Ultracapacitors ขึ้นอยู่กับการประยุกต์และวิธีใช้ของ Ultracapacitors วัสดุอาจจะเปลี่ยนแตกต่างกันจากผู้ผลิตหรือเนื่องจากความจำเป็นแบบเฉพาะ ปกติทั่วไป Ultracapacitors ประกอบด้วย อิเล็กโทรดขั้วบวก, อิเล็กโทรดขั้วลบ และแผ่นกั้นระหว่างสองอิเล็กโทรด และการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ในรูพรุนของอิเล็กโทรดทั้งสอง และแผ่นกั้น

ชั้นส่วนของ Ultracapacitors เปลี่ยนแปลงตามผลิตภัณฑ์ ซึ่งมันเกิดจากบางส่วนในการบรรจุเป็น Ultracapacitors สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสีหรือมีการบรรจุแบบสีเหลี่ยม โครงสร้างภายในขึ้นอยู่กับการวางชั้นส่วนประกอบภายในและการไหลมาของแต่ละชั้นส่วนของอิเล็กโทรด กระแส Collector ไหลออกมาและจะเชื่อมกับขั้วไฟฟ้าเพื่อที่ทำให้กระแสเดินทางออกมาภายนอกตัวเก็บประจุ

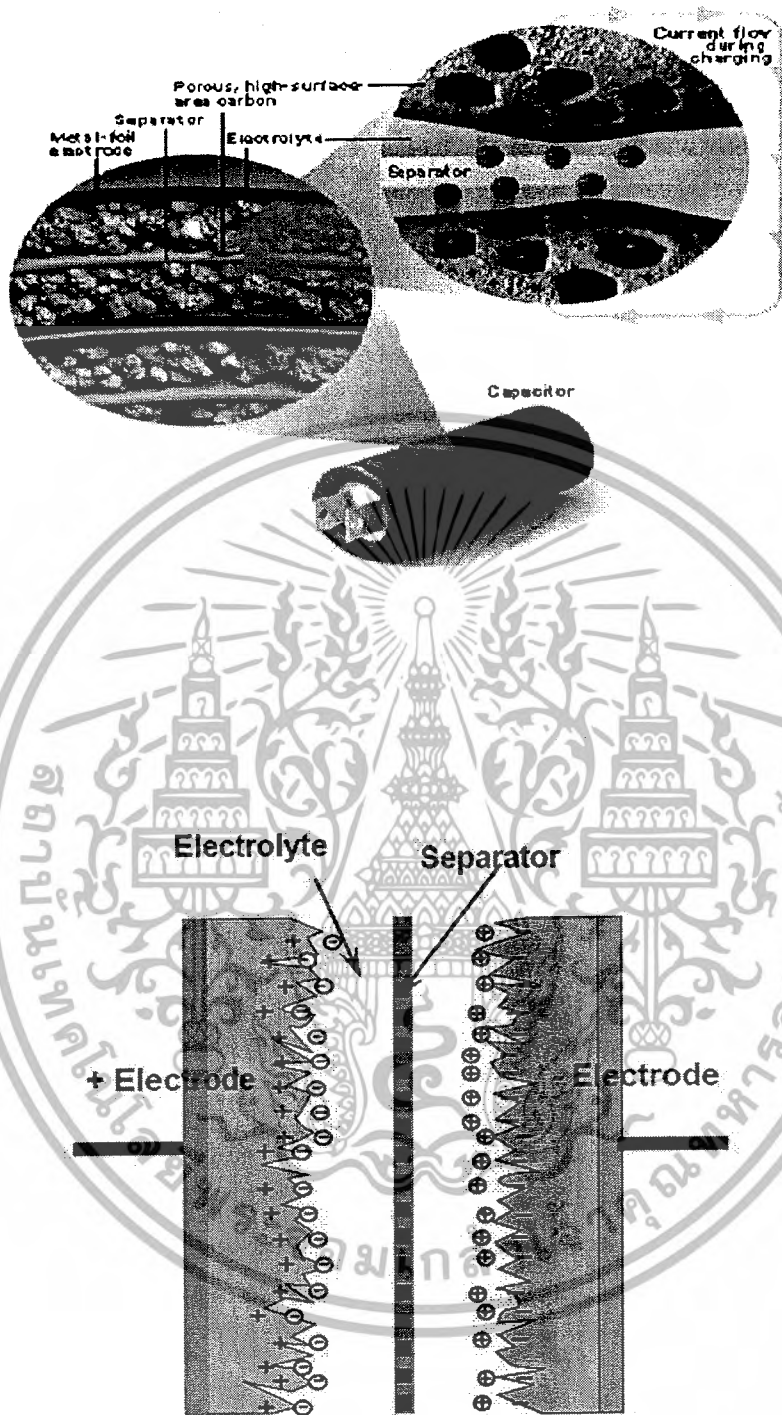
สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นวงกลมและห่อเป็นทรงกระบอก ตัวอิเล็กโทรดจะมีรูปร่างม้วนเป็นวง และจะยึดออกเพื่อที่จะเชื่อมกับขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีกระแสไหลออกมาภายนอก



ภาพที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Ultracapacitor

โครงสร้างของ Ultra capacitor จะประกอบไปด้วย แผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น คือ แผ่นอิเล็กโทรดบวก และ แผ่นอิเล็กโทรดลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของ Ultracapacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน

ผลิตภัณฑ์ Maxwell Boostcap Ultracapacitors ได้นำเสนอขนาดของตัวเก็บประจุ การใช้ประโยชน์ของ Ultracapacitors ในอุตสาหกรรมที่หลากหลายซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานมาก ช่วงกว้างนี้อยู่ระหว่าง มิลลิแอมป์หรือมิลลิวัตต์ ถึง หลายร้อยแอมป์หรือหลายร้อยกิโลวัตต์ อุตสาหกรรมที่ใช้ Ultracapacitors ประกอบไปด้วย ผู้ซื้ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, ยานยนต์ และ อุตสาหกรรมอื่น ตัวอย่างในแต่ละอุตสาหกรรมมีจำนวนมากมายดังนี้

**ผู้บริโภค(Consumer)** – กล้องดิจิทัล, แลป-ท็อป, คอมพิวเตอร์, PDA, GPS, อุปกรณ์ติดมือ ต่างๆ, ไฟฉาย, พลังงานแสงอาทิตย์, อุปกรณ์ในร้านอาหาร

**Traction** – การสตาร์ทเครื่องยนต์ดีเซล, การลาดเอียงบนรางรถไฟ, ประตุนิรภัย, Power supply ของรถราง, การชดเชยแรงดัน

**ยานยนต์(Automotive)** – ใช้แรงดัน 42 โวลต์ในระบบยานพาหนะ, ระบบนำทาง, วาล์วควบคุมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ประตูอัตโนมัติ, การเบรคของรถไฟฟ้า, รถยนต์ไฮบริด, ระบบเข็มขัดนิรภัย

**อุตสาหกรรม** – UPS, ระบบกักเก็บลม, รับพลังงานชั่วคราว, มิเตอร์อ่านอัตโนมัติ (AMR), พลังงานสำรองของระบบลิฟท์, ประตุนิรภัย, ลิฟท์, เครน, การสื่อสารอื่น ๆ

พิจารณาจากตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ยกมา และอื่นๆ ต้นแบบน่าจะมาจากการประยุกต์ใช้ Ultracapacitors อย่างเหมาะสม การประยุกต์ใช้ที่สมบูรณ์แบบและเหมาะสมกับ Ultracapacitors ประกอบด้วย Pulse power, bridge power, main power และ memory backup

### Pulse power

Ultracapacitors เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ Pulse power ถ้ากล่าวถึงในส่วนของ ทฤษฎี เนื่องจากความจริงแล้วการเก็บพลังงานไม่ได้เกิดมาจากปฏิกิริยาทางเคมี แต่พฤติกรรม การเก็บและคายประจุก็มีประสิทธิภาพ ในเมื่อ Ultracapacitors มีค่าอิมพีแดนซ์ภายในต่ำ และ ส่งกระแสสูงได้ดีและบ่อยครั้ง เมื่อถูกต่อขนานกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ในการต่อ Ultracapacitors เข้ากับ แบตเตอรี่ เพื่อให้เกิดกระแสสูงในการประยุกต์ใช้งาน วิธีนี้จะ ใช้สำหรับอุปกรณ์ เช่น กล้องดิจิทัล, ระบบรถยนต์ไฮบริด และ Regenerative Braking (สำหรับพลังงานย้อนกลับ)

### Bridge Power

Ultracapacitors ถูกใช้ประโยชน์เป็นพลังงานสำรองในหลายการประยุกต์ใช้งานซึ่ง ต้องการใช้พลังงานทันทีทันใด ประกอบไปด้วย ระบบ UPS ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเป็น พลังงานสำรองของ fuel cells ซึ่งเป็นพลังงานหลักในระบบที่ต้องเดินเครื่องอย่างรวดเร็วเมื่อ พลังงานขัดข้องชั่วคราว ขนาดของระบบ Ultracapacitors จะเป็นที่สะสมพลังงานในระยะเริ่มต้น และจ่ายพลังงานในเมื่อมีความต้องการได้

### Main Power

สำหรับการประยุกต์ที่ต้องการกำลังไฟฟ้าของคาบเวลาที่สั้น ๆ หรือการชาร์จอย่าง รวดเร็วก่อนนำไปใช้ประโยชน์ Ultracapacitors สามารถใช้เป็นพลังงานเบื้องต้น ตัวอย่างของ การนำไปใช้ประโยชน์มีดังนี้ ของเล่น, ไฟฉายฉุกเฉิน, อุปกรณ์ในร้านอาหาร, Solar Cell, พลังงานประตูดูกเงิน

### Memory Backup

แม้ว่าการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าในตัว Ultracapacitors เมื่อ ชาร์จได้อยู่ในชุดสำรองหน่วยความจำ, ระบบปฏิบัติการเมื่อหยุดเดินเครื่อง หรือแจ้งเมื่อเกิด เหตุการณ์สำคัญ Ultracapacitors เมื่อชาร์จเต็มจะรักษาสถานะของมันไว้ได้และเป็นพลังงาน สำรองเมื่อเกิดเหตุการณ์วิกฤตหรือในกรณีที่เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย ในที่มี AMR เป็นมิเตอร์ อ่านพลังงานที่ออกมา, Micro-Controller และวงจร Memory

## 2.8 รายละเอียดของ Ultracapacitor

ในส่วนนี้จะให้ความจำกัดความและวิธีการวัดค่าตามเงื่อนไข

### ประเภทของรายละเอียด

**ความจุไฟฟ้า** เป็นการวัดค่าในหน่วยฟารัด

$$C = Q \times V \quad (2.9)$$

**แรงดันไฟฟ้า** แรงดันจะให้อยู่ในรูปรายละเอียดของแรงดันสูงสุด ในการทำงานของคาปาซิเตอร์ตัวเดียว ชีตจำกัดแรงดัน คือ แรงดันในข้อมูลของสรรรภภาพที่ถูกวัด ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ที่แรงดันคาปาซิเตอร์มีค่ามากกว่าค่าขีดจำกัดของคาปาซิเตอร์ ซึ่งผลกระทบกระเทือนขึ้นอยู่กับเวลาหรืออุณหภูมิระหว่างการวัด คาปาซิเตอร์ควรถูกควบคุมแรงดันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของขีดจำกัดแรงดัน

**ความต้านทานภายใน ( กระแสตรง )** ค่าความต้านทานจะเป็นไปในทางทิศเดียวกันกับส่วนประกอบความต้านทานในอุลตราคาปาซิเตอร์ ความต้านทานรวมจะถูกวัดหลังจากเวลาผ่านไป 5 วินาที ค่าคงที่เวลาของอุลตราคาปาซิเตอร์ ไกล่เคียง 1 วินาทีจะทำประมาณ 5 ค่าคงที่เวลา ความต้านทานรวม เป็นการยอมรับของส่วนประกอบความต้านทาน ถือเอาเป็นหลักในการติดต่อ electrode electrolyte และ วัสดุความต้านทานอื่นๆ

**ความต้านทานภายใน 100-1000 เฮิร์ต** เป็นการวัดค่าความต้านทานที่ความถี่สูงและเป็นหลักในการหาค่าความต้านทานเพราะค่าคงที่เวลาของอุลตราคาปาซิเตอร์ ทำงานที่ความถี่ประสิทธิภาพต่ำการวัดถูกจัดเตรียมให้เป็นการวัดแบบไม่สลับซับซ้อน และง่ายที่จะเทียบเคียงกับความต้านทานกระแสตรง

**ความต้านทานความร้อน** ชีตจำกัดกระแสของความต้านทานความร้อนอาจนำไปใช้ในการหาค่าของการกำเนิดความร้อนในผลิตภัณฑ์ ที่ค่ากระแสไหลต และ Duty cycle การคำนวณจะนำมาเป็นพื้นฐานในการนำพาความร้อนอิสระ อิทธิพลของการนำพาความร้อนปรับปรุงค่าความต้านทานความร้อน

**ช่วงอุณหภูมิขณะทำงาน** เป็นช่วงอุณหภูมิการทำงานของอุลตราคาปาซิเตอร์ และอาจจะไม่สะท้อนถึงค่าอุณหภูมิล้อมรอบ

**Storage temperature range** เป็นการแทนค่าการเก็บอุณหภูมิต่างปลอดภัยโดยปราศจากการกระทบกระเทือนประสิทธิภาพของอุลตราคาปาซิเตอร์ เมื่อไม่มีแรงดันที่นำไปใช้ในอุลตราคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ความทนทานต่อค่าความจุไฟฟ้า** ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ถูกคาดหวังที่อุลตราคาปาซิเตอร์ ถูกจับค่าที่ขีดจำกัดโวลท์เดจ สำหรับการกำหนดรายละเอียดของเวลาและอุณหภูมิที่ถูกใช้ให้เป็นค่าทำงานที่สูงกว่าขีดจำกัด

**ความทนทานต่อความต้านทาน** ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่อุลตราคาปาซิเตอร์ ถูกจับค่าที่ขีดจำกัดโวลท์เดจ สำหรับการกำหนดรายละเอียดของเวลาและอุณหภูมิที่ถูกใช้ให้เป็นค่าทำงานที่สูงกว่าขีดจำกัด

**ค่าพลังงานสูงสุด** ค่าพลังงานสูงสุดเหมาะที่ใช้สำหรับอุลตราคาปาซิเตอร์ครั้งแรก เมื่อถูก Discharge ที่แรงดันสูงสุดไปถึง 0 โวลต์ (Discharge ถึงครึ่งแรงดัน พลังงานประมาณ 75% ของค่าสูงสุด)

**Peak power density** การวัดกำลังที่ทันใจจากอัตราแรงดันเต็ม สอดคล้องกับสมการ  $V^2/4R$  เมื่อ R คือความต้านทานกระแสลับ ซึ่งค่าไม่ได้เป็นการแทนกำลังไฟฟ้าสนับสนุน



## 2.9 Measurement Condition

2.9.1 ค่าความจุไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าจะถูกวัดระหว่างการคายพลังงานของอุลตราคาปารีเซเตอร์ด้วยการคงที่กระแส จากค่าขีดจำกัดโวลต์ ถึงค่าครึ่งหนึ่งของขีดจำกัดโวลต์ จากรูปด้านล่าง ค่าความจุไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{V_w - V_f}$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C = \int_{V_1}^{V_2} \frac{Idt}{dV} \quad (2.10)$$

2.9.2 ค่าความต้านทาน จากรูปที่ 2.11 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง หรือ ESR จะคำนวณได้จาก

$$ESR = \frac{V_f - V_{min}}{I_d}$$

$$ESR = \frac{\Delta V}{I} \text{ หรือ}$$

$$\int dQ = \int Idt$$

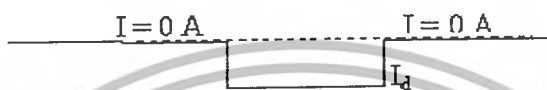
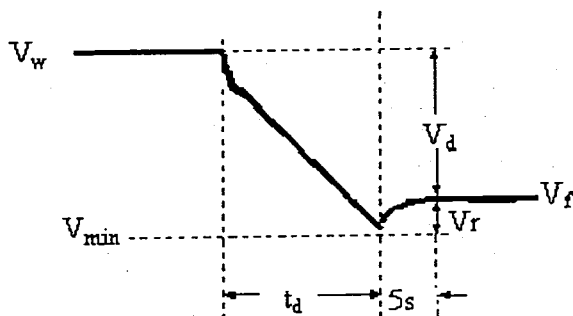
$$\int dQ = \int \frac{Vdt}{R_T}$$

$$R_T = \text{พื้นที่ใต้กราฟแรงดัน} / Q \quad (2.11)$$

### 2.9.3 Efficiency

$$\eta = \frac{W_{RL}}{W_C} = \frac{R_L}{(R_L + R_{ESR})} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.



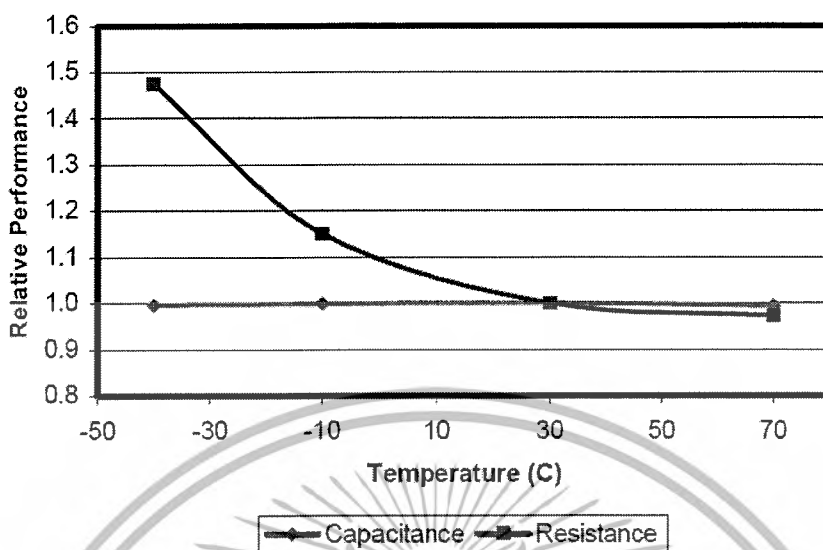
ภาพที่ 2.13 แสดงกราฟการคายประจุ

**2.9.4 กระแสรั่วไหล** กระแสรั่วไหลจะเกิดขึ้นตามผิวหน้าของแผ่นอิเล็กโทรด รวมไปถึงถึงขนาดของรูพรุนและรูปร่างของตัวมัน ตามการรายงานกระแสรั่วไหลคือการวัดขณะการอัดประจุหลังจากวัดค่าที่ขีดจำกัดแรงดันต่อเนื่อง 72 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อกระแสรั่วไหลในระหว่างการวัด

**2.9.5 Performance Characteristic** ในส่วนนี้จะอธิบายพฤติกรรมของคาปาซิเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานดังนี้ อุณหภูมิ dc cycling ความถี่ ซึ่งข้อมูลจะเปรียบเทียบกับรายละเอียดของผลิตภัณฑ์และรูปแบบการใช้

**2.9.6 Temperature effects, Initial performance** ประสิทธิภาพของอุลตราคาปาซิเตอร์ของMaxwell สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างๆเนื่องจากทั้งทางเคมีและทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ กราฟด้านล่างแสดงให้เห็นถึงผลิตภัณฑ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานในช่วงอุณหภูมิทำงานระหว่าง -40 - 65%

## Performance vs. Temperature



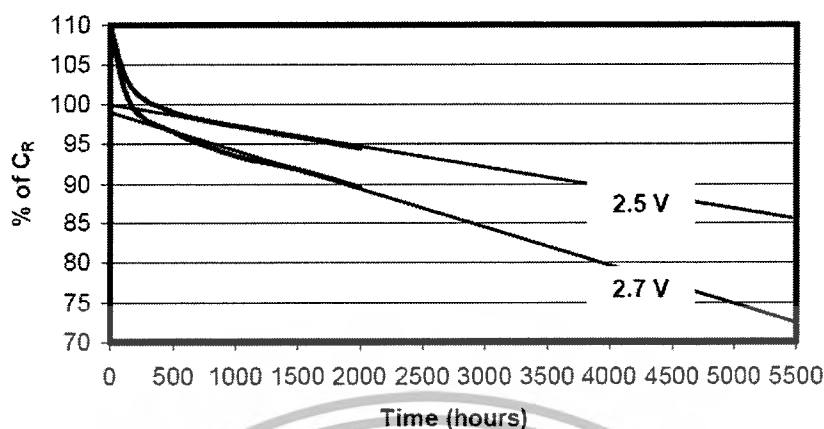
ภาพที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอุณหภูมิของค่า capacitance และค่าความต้านทาน

ผลกระทบของแรงดันและอุณหภูมิต่อการใช้งาน การใช้ประโยชน์ของอัลตราคาปาซิเตอร์โดยทั่วไปเช่น ประยุกต์ใช้ในระบบสำรองไฟฟ้า การรักษาระดับแรงดันของอัลตราคาปาซิเตอร์ที่แรงดันปกติจนกว่าจะมีความต้องการใช้งานตามภาพแสดงให้เห็นอิทธิพลของแรงดันของผลิตภัณฑ์ เมื่อวัดค่าที่ขีดจำกัดแรงดัน และแรงดันต่ำสุด ที่อุณหภูมิสูงสุดของสภาวะแวดล้อม

\*ข้อมูลอ้างอิงมาจากผลิตภัณฑ์ของ Maxwell Technology Co.Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Capacitance Life @ 65 °C



ภาพที่ 2.15 แสดงได้แทนการลดความจุไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ กราฟได้แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลสำหรับทุกๆ 10 องศาเซลเซียส สามารถทำนายประสิทธิภาพในเงื่อนไขที่หลากหลายจากกราฟ

30% reduction in rated capacitance may occur for an ultracapacitor held at 2.7 V after

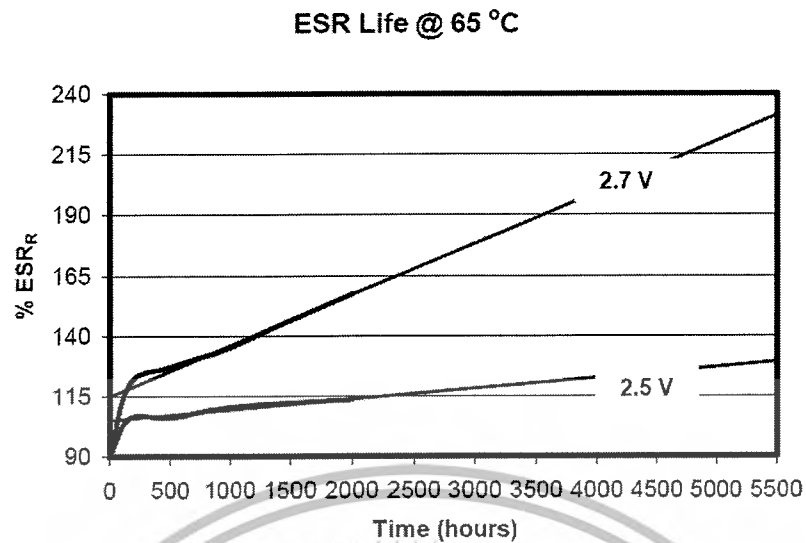
5,500 hrs @ 65 °C  
 11,000 hrs @ 55 °C  
 22,000 hrs @ 45 °C  
 44,000 hrs @ 35 °C  
 88,000 hrs @ 25 °C

15% reduction in rated capacitance may occur for an ultracapacitor held at 2.5 V after

5,500 hrs @ 65 °C  
 11,000 hrs @ 55 °C  
 22,000 hrs @ 45 °C  
 44,000 hrs @ 35 °C  
 88,000 hrs @ 25 °C

\*ข้อมูลอ้างอิงมาจากผลิตภัณฑ์ของ Maxwell Technology Co.Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาพที่ 2.16** แสดงความสัมพันธ์ในการลดลงของความต้านทานของผลิตภัณฑ์ จากกราฟได้แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิทุกๆ 10 องศาเซลเซียส ในการทำนายประสิทธิภาพการอัดประจุที่เงื่อนไขที่หลายหลาย จากกราฟ

140% increase in rated resistance may occur for an ultracapacitor held at 2.7 V after

5,500 hrs @ 65 °C  
 11,000 hrs @ 55 °C  
 22,000 hrs @ 45 °C  
 44,000 hrs @ 35 °C  
 88,000 hrs @ 25 °C

40% increase in rated resistance may occur for an ultracapacitor held at 2.5 V after

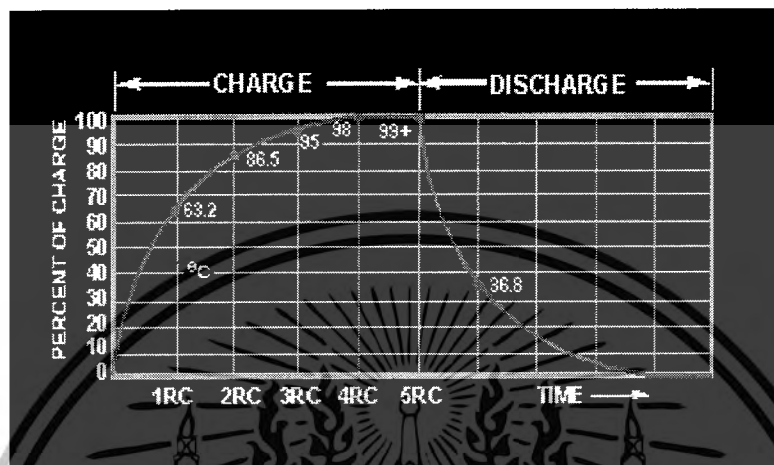
5,500 hrs @ 65 °C  
 11,000 hrs @ 55 °C  
 22,000 hrs @ 45 °C  
 44,000 hrs @ 35 °C  
 88,000 hrs @ 25 °C

\*ข้อมูลอ้างอิงมาจากผลิตภัณฑ์ของ Maxwell Technology Co.Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.7 การตอบสนองความถี่

อุลตราคาปาซิเตอร์ที่มีค่าคงที่เวลาประมาณ 1 วินาที หนึ่งค่าคงที่เวลาสะท้อนถึงเวลาที่ สำคัญในการอัดประจุคาปาซิเตอร์ 63.2% ของการอัดประจุเต็ม หรือ การคายประจุ 36.8% ของ การอัดประจุเต็ม ความสัมพันธ์จะถูกนำมาอธิบายให้เข้าใจดังรูปด้านล่าง



ภาพที่ 2.17 แสดงลักษณะการ Charge และ Discharge ของ Ultracapacitor

ค่าคงที่เวลาของคาปาซิเตอร์ควรสูงกว่า electrolytic คาปาซิเตอร์ ฉะนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะแสดงให้อุลตราคาปาซิเตอร์ที่กระแสวิกเป็ลต่อเนื่อง as overheating may result อุลตราคาปาซิเตอร์สามารถตอบสนอง short pulse power demand, แต่เนื่องจากประสิทธิภาพค่าคงที่เวลาหรือ พลังงานที่จะใช้ประโยชน์ ถูกทำให้ลดลง ดังรูปภาพได้แสดงให้รู้ถึงประสิทธิภาพของอุลตราคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ การลดลงของค่าความจุไฟฟ้าในการอัดประจุ ในระหว่างการอัดประจุและคายประจุจะมีไอออนที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของแผ่นอิเล็กโทรด ทำให้มีค่า capacitance ผลตอบสนองของเวลาที่แตกต่างกันในตัว Ultracapacitor จะทำให้ค่าความต้านทานภายในลดลง

\*ข้อมูลอ้างอิงมาจากผลิตภัณฑ์ของ Maxwell Technology Co.Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 ข้อดี – ข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่

ลักษณะการทำงานของ Ultracapacitor จะผลิตพลังงานได้สูง และสามารถเก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว ความต้านทานภายในที่น้อย(ESR) สามารถส่งและเก็บกระแสได้สูง ในขณะที่แบตเตอรี่มีค่าความต้านทานภายในสูง ปัจจุบันนี้ ultracapacitor สามารถมี power density สูงกว่า 20 kW/kg นอกจากนี้ในขณะที่แบตเตอรี่ต้องการอัดประจุเป็นเวลานาน แต่ Ultracapacitor สามารถอัดได้รวดเร็วกว่า และสามารถใช้ได้ยาวนานกว่าแบตเตอรี่อีกด้วย เมื่อนำ Ultracapacitor ไปใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ ก็จะช่วยจ่ายในสภาวะที่ต้องการพลังงานในทันทีทันใด ซึ่งแบตเตอรี่ให้ไม่ได้ และยังช่วยลดการเสื่อมของแบตเตอรี่ได้ แล้วยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 2.11 ข้อดี – ข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์แบบธรรมดา

Ultracapacitor จะมีพลังงานและกำลังไฟฟ้าสูงกว่าคาปาซิเตอร์แบบธรรมดา และยังมีขนาดใหญ่กว่า ทำให้สามารถเก็บพลังงานได้มากกว่า สิ่งหนึ่งที่แตกต่างกันคือพื้นที่ผิวหน้าของแผ่นเพลทที่มีขนาดใหญ่กว่า และทำมาจากเทคโนโลยีสมัยใหม่ คือทำมาจาก woven carbon fiber textile ซึ่งมีพื้นที่ผิวหน้าใหญ่มาก จึงทำให้ Ultracapacitor มีค่าความจุมากกว่าในหน่วยของฟารัด (F) ส่วนคาปาซิเตอร์ธรรมดามีค่าในหน่วยของไมโครฟารัด ( $\mu F$ ) ดังแสดงในตาราง

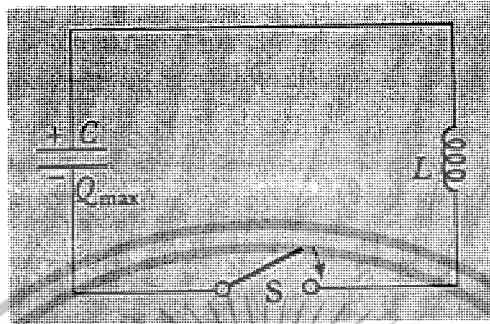
Parameters	Electrostatic Capacitor	Ultracapacitor	Battery
Discharge Time	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec	1~30 sec	0.3~3 hrs
Charge Time	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec	1~30 sec	1~5 hrs
Energy Density (Wh/kg)	< 0.1	1~10	20~100
Power Density (W/kg)	< 10,000	10,000	50~200
Charge / Discharge Efficiency	~ 1.0	~10	0.7~0.85
Cycle Life	Infinite	> 500,000	500~2,000

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อเปรียบเทียบระหว่าง Electrostatic Capacitor, Ultracapacitor และ Battery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 Damped Oscillator

การหน่วงหรือ Damped Oscillator เป็นการหน่วงโดยขึ้นอยู่กับ ค่า RLC Circuit โดยเฉพาะค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหน่วงของกระแสขณะคายประจุจากตัวเก็บประจุในวงจร



ภาพที่ 2.18 แสดงวงจร RLC

เมื่อมีวงจร RLC ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุ โดยต่อกันแบบอนุกรม และเมื่อกดสวิตช์ ที่เวลา = 0 ตัวเก็บประจุจะเป็นตัวคายประจุออกมาใส่ความต้านทานและความเหนี่ยวนำในวงจร

สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการหน่วง และลักษณะการหน่วงแบบต่างๆ มีดังนี้

$$\text{จาก } L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการ เมื่อเป็นการหน่วงแบบ Exponential ของคลื่นไซน์ จะได้สมการของแรงดันและกระแส คือ

$$I(t) = \frac{V_0}{\beta L} e^{-\alpha t} \sin \beta t \quad (2.14)$$

$$V(t) = V_0 e^{-\alpha t} \cos \beta t \quad (2.15)$$

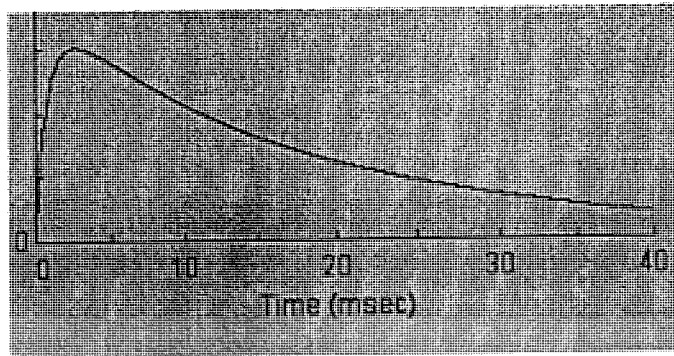
โดย

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

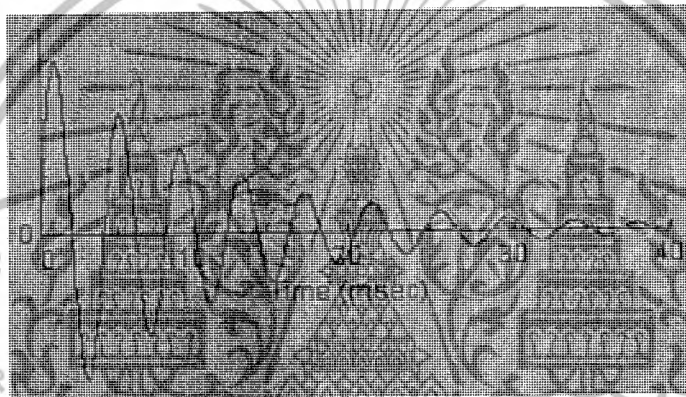
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

เมื่อ  $R^2C^2$ -4LC มีค่าเป็นบวก เรียกว่า Over – Damped



ภาพที่ 2.19 ภาพแสดงสภาวะ Over – Damped

เมื่อ  $R^2C^2$ -4LC มีค่าเป็นลบ เรียกว่า Under – Damped



ภาพที่ 2.20 ภาพแสดงสภาวะ Under – Damped

เมื่อ  $R^2C^2$ -4LC มีค่าเป็นศูนย์ เรียกว่า Critically – Damped



ภาพที่ 2.21 ภาพแสดงสภาวะ Critically – Damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.1 Resonant Frequency

สมการเหล่านี้เป็นการแสดงฟังก์ชันของเวลา และความถี่ ขณะที่ วงจร LC จะเกิดการ  
หน่วงที่ angular frequency คือ

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Radians/sec} \quad (2.16)$$

และสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นความถี่ได้ ดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Hz} \quad (2.17)$$

และสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นคาบเวลาได้ ดังนี้

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{Seconds} \quad (2.18)$$

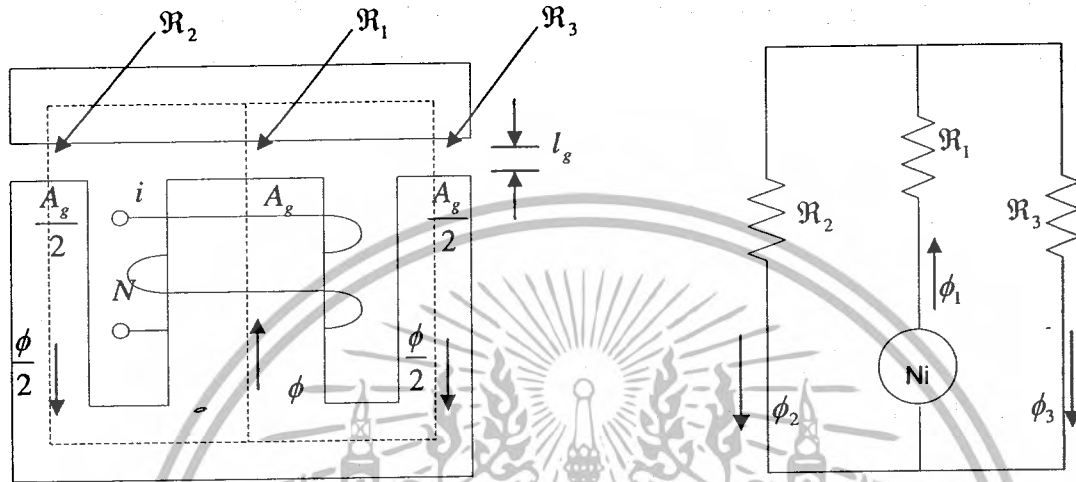


## 2.13 ทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก

### 2.13.1 Magnetic Circuit

- แบบ Parallel Circuit

เป็นวงจรที่มีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งวงจรดังแสดงดังภาพ



ภาพที่ 2.22 แสดงวงจรแม่เหล็กแบบแกน E-I

จาก Ampere's Law;

$$\begin{aligned}
 Ni &= \oint H \cdot d\vec{l} \\
 Ni &= Hl \\
 Ni &= \frac{B}{\mu_0} l \quad \left( H = \frac{B}{\mu_0} \right) \quad (2.19)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$   
 H คือ Magnetic flux density  
 l คือ Average length

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

โดยค่าความต้านทานรวม( $\mathfrak{R}_t$ )

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \mathfrak{R}$$

$$\mathfrak{R}_2 = \mathfrak{R}_3 = \frac{l_g}{\mu_0 \left( \frac{A_g}{2} \right)} = 2\mathfrak{R}$$

$$\mathfrak{R}_t = \mathfrak{R}_1 + (\mathfrak{R}_2 // \mathfrak{R}_3)$$

เพราะฉะนั้น

$$\mathfrak{R}_t = 2\mathfrak{R}$$

และ

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_t} \quad (2.20)$$

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_3 \quad (2.21)$$

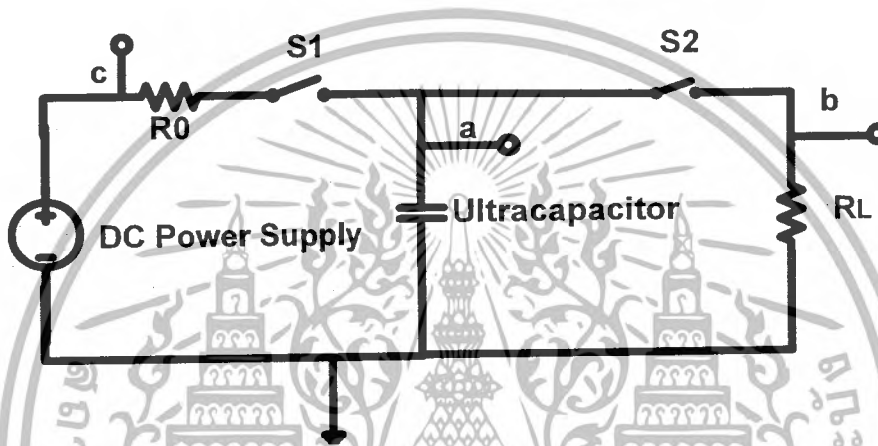
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบการทดลอง

##### 3.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุ

โดยการทดลองโดยใช้วงจร RC Time Constant ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรง ( $V_{DC}$ ), ความต้านทานลิมิตกระแส ( $R_0$ ), สวิตช์ชาร์จและดิสชาร์จ (S1, S2), ความต้านทานโหลด ( $R_L$ ) output port ต่ออยู่กับ Oscilloscope เพื่อวัดกระแสชาร์จ, ดิสชาร์จ และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 3.1 แสดงวงจรการทดลอง

เมื่อชาร์จประจุถึงพิกัด S1 เป็นตัวตัดวงจรเมื่อแรงดันถึงพิกัด และ S2 close เพื่อให้ Ultra capacitor คายประจุใส่  $R_L$  จากนั้นวัดค่าและบันทึกผล

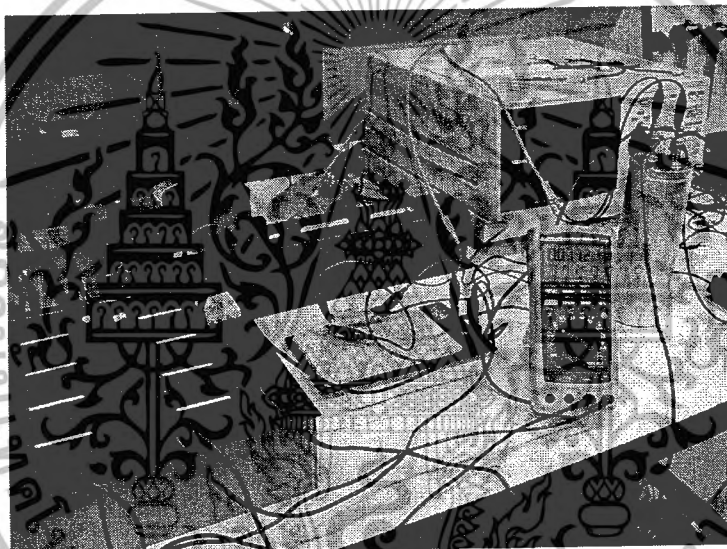


ภาพที่ 3.2 ลักษณะของ Ultra capacitor ที่นำมาทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวเก็บประจุ

Device Name : Zulex	
Device Physical Characteristic :	
Status :	Single cell
Mass (kg) :	1
Dimension (cm) :	7.5
Area ( $cm^2$ ) :	44.179
Volume ( $cm^3$ ) :	949.84
Working Voltage (V) :	18



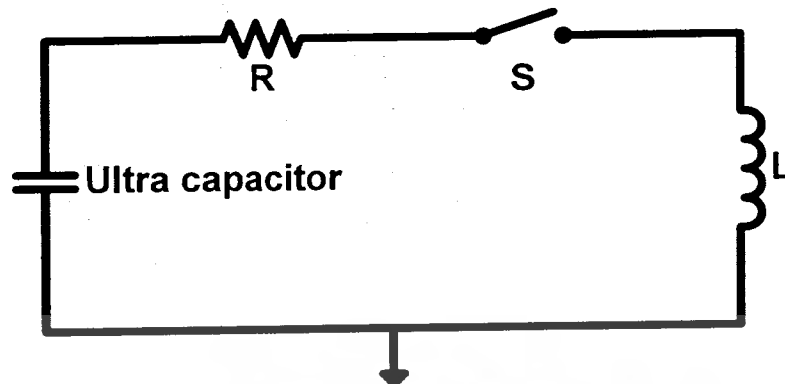
ภาพที่ 3.3 ภาพแสดงการทดลองจริง

วิธีการทดลอง

- ชาร์จประจุโดยการ Constant Voltage ที่แรงดัน 20 โวลต์โดยใช้ DC Power Supply 35V-3A
- ใช้ resistance  $R_0$  จำกัดกระแส วัดกระแสที่ไหลผ่านเข้าตัวเก็บประจุ
- วัดแรงดันที่ตัวเก็บประจุโดยใช้เครื่อง AR 1100A ซึ่งจะวัดออกมาในลักษณะกราฟและข้อมูล
- จากนั้นคายประจุใส่ความต้านทาน  $R_L$
- เก็บข้อมูลและนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วงจรการกำเนิดกระแสอิมพัลส์



ภาพที่ 3.4 วงจรพื้นฐานของวงจรทดลองการกำเนิดกระแสอิมพัลส์

การสร้างกระแสอิมพัลส์ จะอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ คือ การเก็บประจุด้วยการอัดประจุให้กับตัว Ultra capacitor ที่แรงดันทำงานของตัวมัน แล้วสับสวิตช์เพื่อ Discharge กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และความต้านทาน  $R$  ในวงจร ก็จะทำให้เกิดการหน่วงหรือออสซิลเลตชันซึ่งค่ากระแสที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทาน

### 3.2.1 การหาค่าความเหนียวหน้า

#### Critically – Damped

เมื่อ  $R^2C^2 - 4LC$  มีค่าเป็นศูนย์

$$R^2C^2 = 4LC$$

$$L = \frac{R^2C}{4} \quad H$$

#### Over – Damped

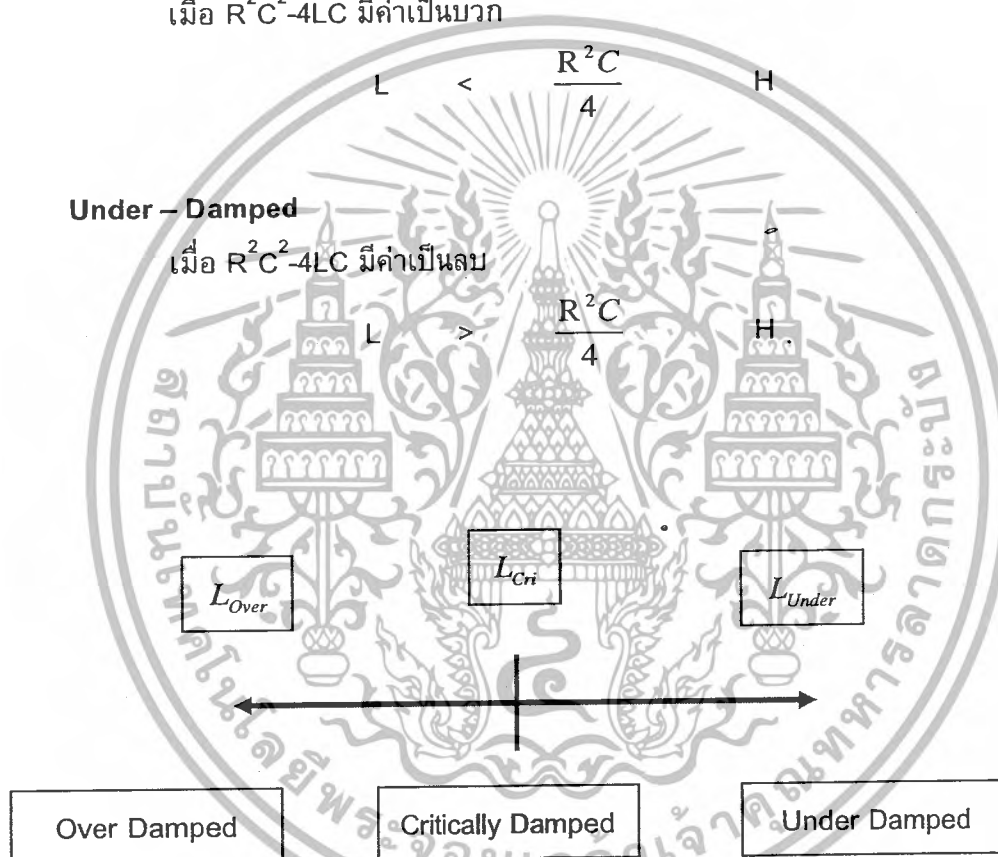
เมื่อ  $R^2C^2 - 4LC$  มีค่าเป็นบวก

$$L < \frac{R^2C}{4} \quad H$$

#### Under – Damped

เมื่อ  $R^2C^2 - 4LC$  มีค่าเป็นลบ

$$L > \frac{R^2C}{4} \quad H$$



ภาพที่ 3.5 ภาพแสดงแผนผังของการเกิด Damped ในกรณีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

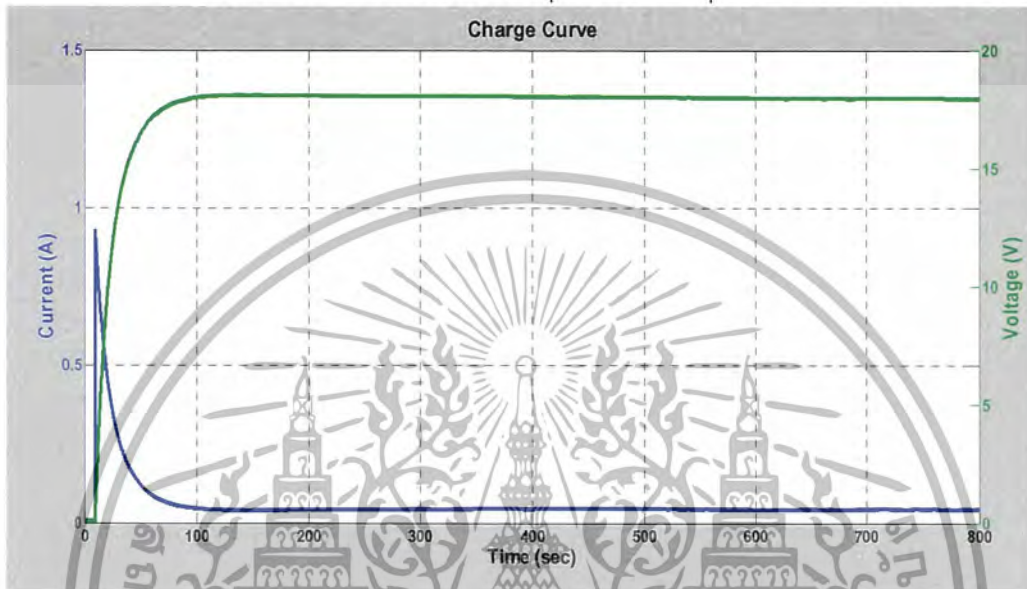
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

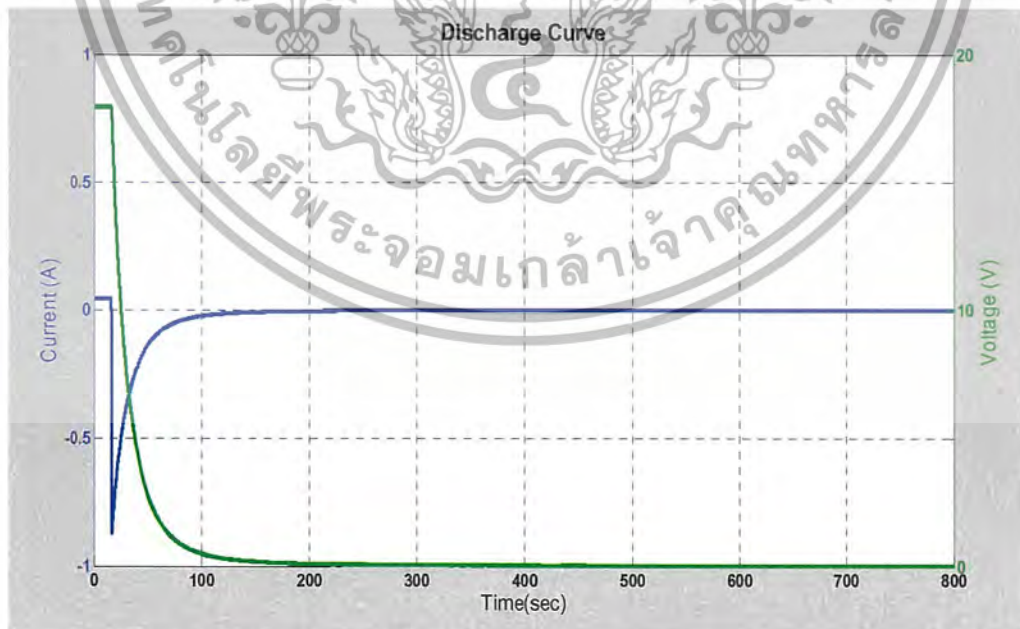
ผลการทดลองเกี่ยวกับตัวเก็บประจุความจุสูง ได้แสดงผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

#### 4.1 Charge and Discharge (RC Time Constant)

- กราฟแสดงผลการทดลองอัดประจุและคายประจุที่ความต้านทาน  $20\ \Omega$



ภาพที่ 4.1 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการอัดประจุที่ความต้านทาน  $20\ \Omega$



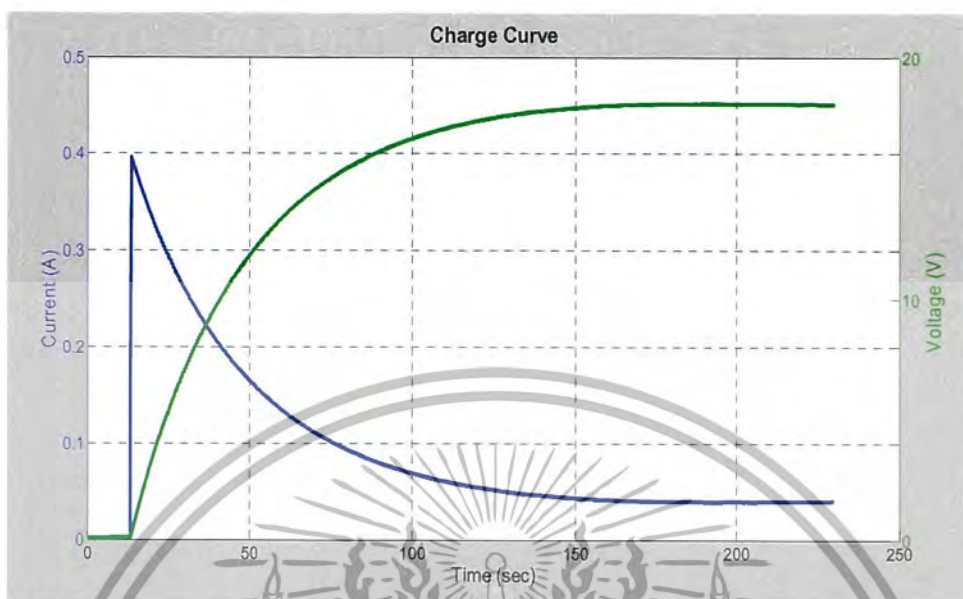
ภาพที่ 4.2 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการคายประจุที่ความต้านทาน  $20\ \Omega$

— Voltage (V)

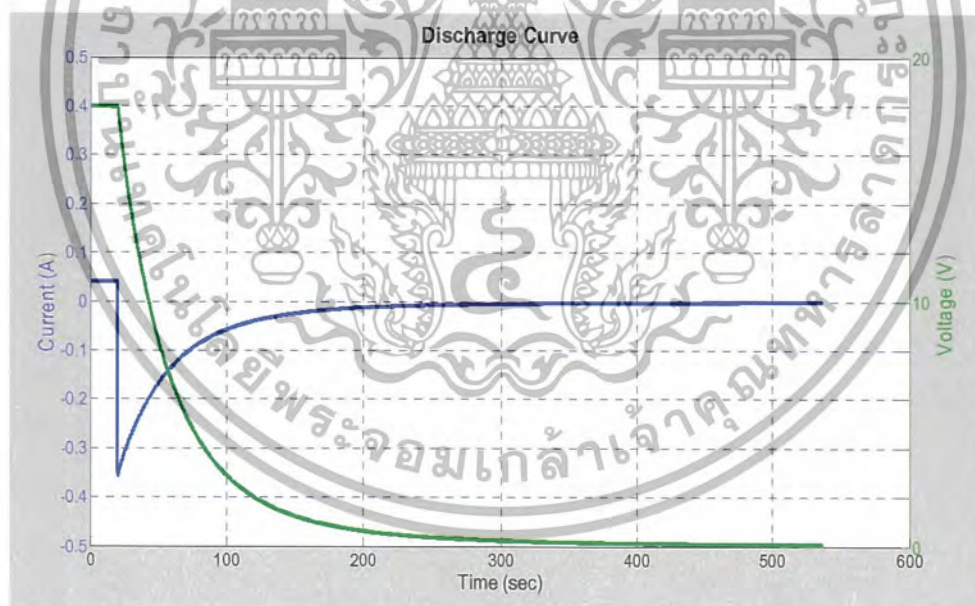
— Current (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

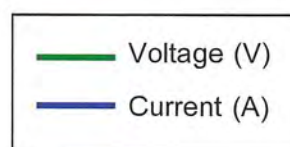
- กราฟแสดงผลการทดลองอัดประจุและคายประจุที่ความต้านทาน 50  $\Omega$



ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการอัดประจุที่ความต้านทาน 50 โอห์ม

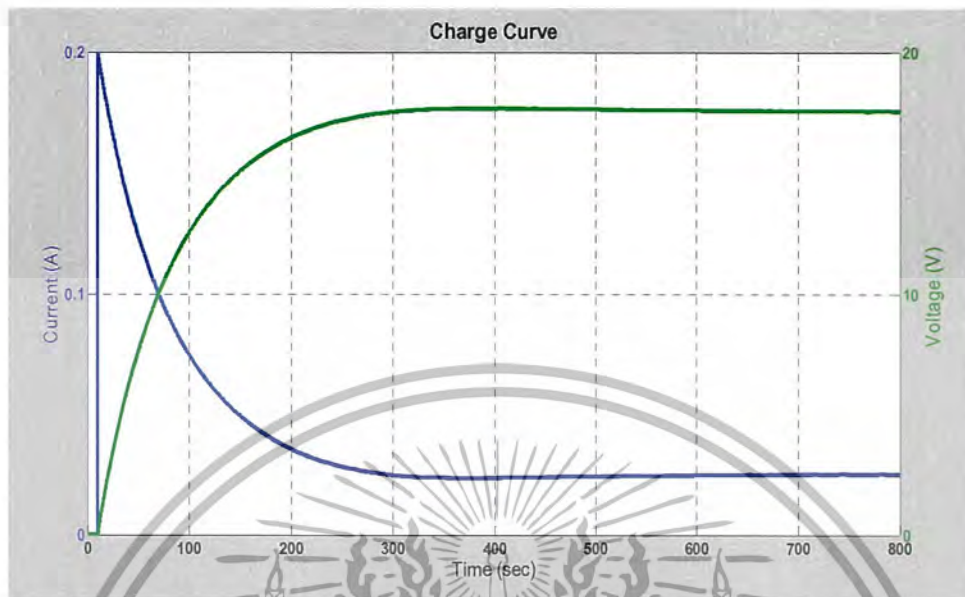


ภาพที่ 4.4 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการคายประจุที่ความต้านทาน 50 โอห์ม

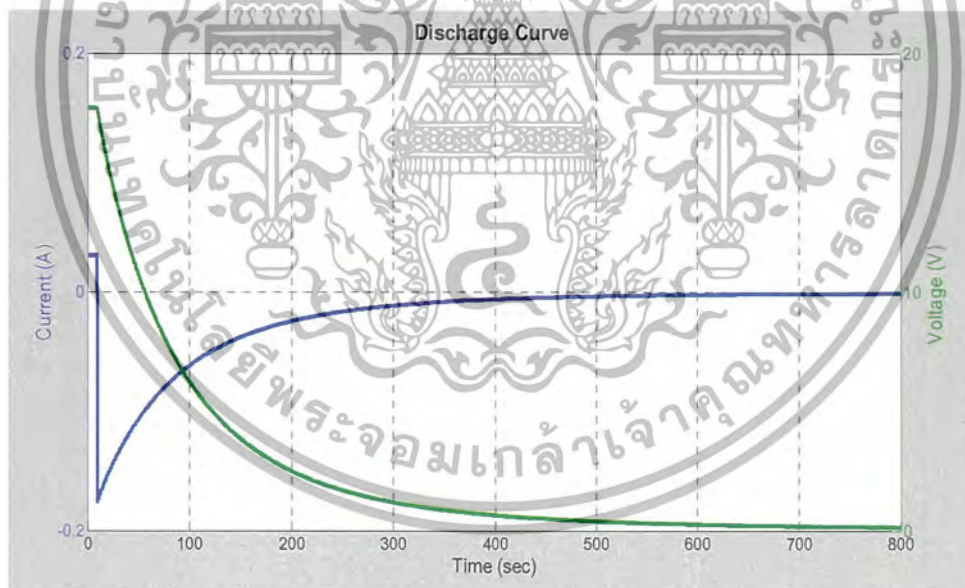


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

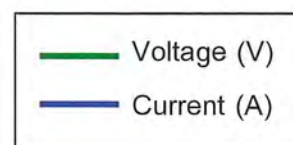
- กราฟแสดงผลการทดลองอัดประจุและคายประจุที่ความต้านทาน  $100\ \Omega$



ภาพที่ 4.5 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการอัดประจุที่ความต้านทาน  $100\ \Omega$



ภาพที่ 4.6 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกับเวลาในการคายประจุที่ความต้านทาน  $100\ \Omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองการอัดประจุ จะพบว่ากราฟแรงดันและกระแสมีลักษณะเป็นแบบการเพิ่มขึ้นแบบ Exponential โดยที่ความต้านทานจำกัดกระแสมีค่ามากจะทำให้กราฟถึงค่าคงที่หรือพิคัดช้าลงและพบว่าแรงดันทำงาน ( $V_w$ ) ของตัวเก็บประจุนี้มีค่าประมาณ 18 V

จากการทดลองการคายประจุ ลักษณะของกราฟจะมีลักษณะเป็นแบบการลดลงแบบ Exponential ตามทฤษฎีของ RC Time Constant โดยแรงดันจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาใดๆ โดยที่ที่ความต้านทานโหลดต่ำจะเกิดการคายประจุเร็วกว่าที่ความต้านทานโหลดสูง

นอกจากนี้ยังพบว่าในขณะที่ทำการอัดประจุ จะมีการเกิดกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ซึ่งอาจไหลตามผิวของขั้วของตัวเก็บประจุ



## 4.2 Capacitance Measurement

จะใช้หลักการตามทฤษฎีของ RC Time Constant และสูตรตามทฤษฎี ดังนี้

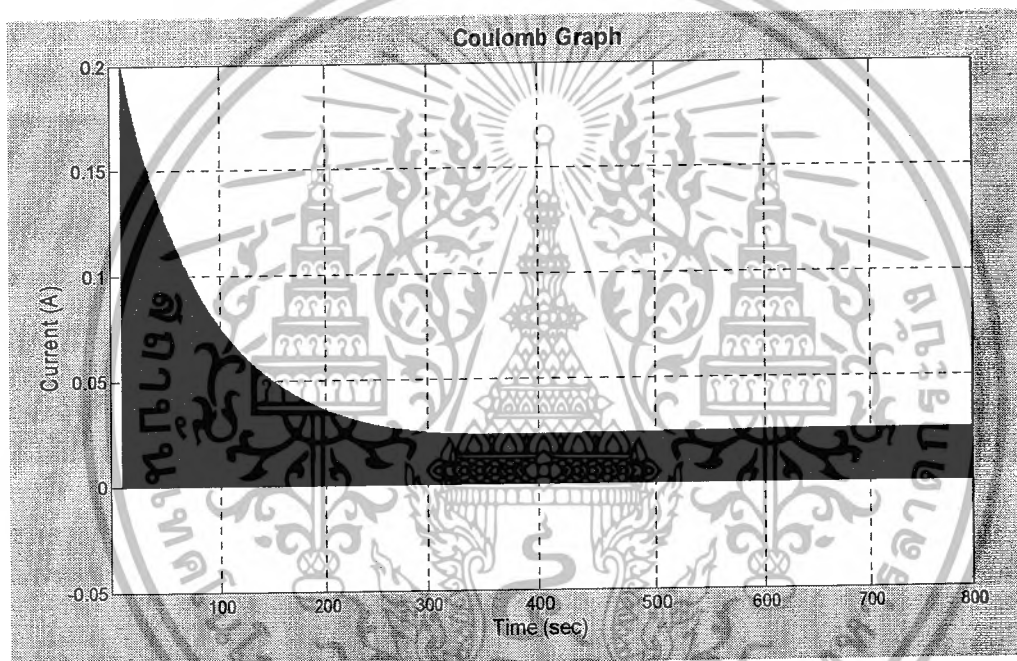
$$\text{จาก } C = \frac{Q}{V}$$

$$\therefore C = \int_{t_1}^{t_2} \frac{Idt}{dV} \quad (6)$$

C คือ ค่า Capacitance

$V_w$  คือ แรงดันทำงาน

$Idt$  คือ ค่าของพื้นที่ใต้กราฟจากช่วงเวลา  $t_1 - t_2$



ภาพที่ 4.7 ภาพแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาการอัดประจุ  
ที่ความต้านทาน 100 โอห์ม  
ซึ่งเป็นกราฟของกระแส(I) กับเวลา (t) จึงได้ Q ออกมา

$$C = \frac{24.0}{18} = 1.33$$

$$\therefore C \approx 1.33 \text{ F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวัดค่า C แบบการลดแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

เป็นการทดลองเพื่อ Re - test ในการหาค่า Capacitance แสดงผลได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงเวลาในการคายประจุของตัวเก็บประจุที่  $R = 513.066 \Omega$

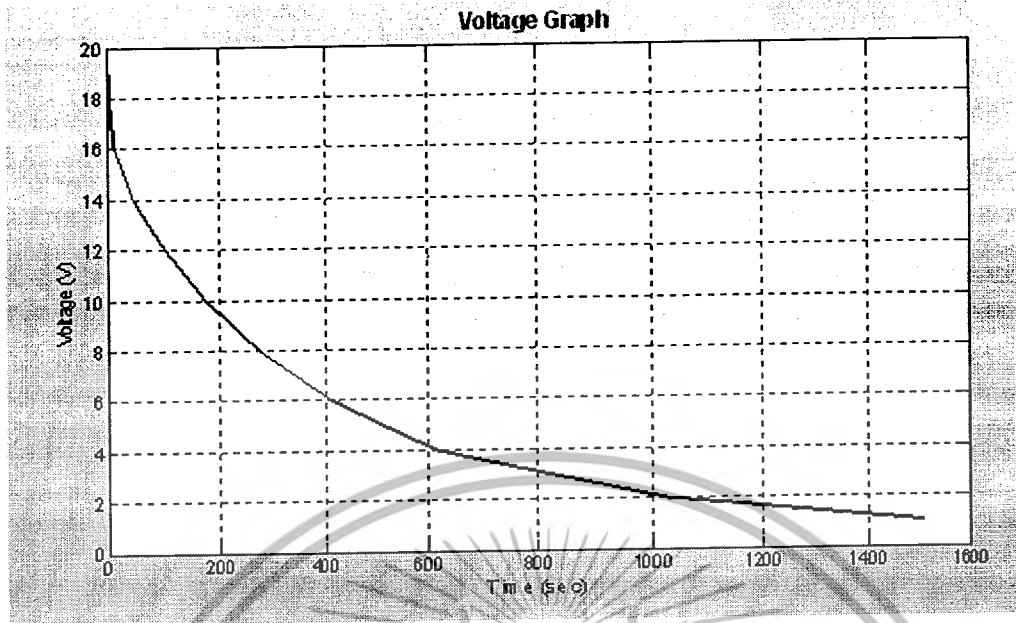
Vc (โวลต์)	เวลา (วินาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
20	0	0	0	0
18	4.1	3.2	3.1	3.467
16	18.5	14.1	12.5	15.033
14	57.8	46.2	41.5	48.500
12	117.7	102.1	95.8	105.200
10	195.1	177.7	169.9	180.900
8	294.7	277.3	268.0	280.000
6	429.9	412.5	402.0	414.800
4	634.7	618.9	606.1	619.900
2	1033.7	1022.2	1003.8	1019.900
1	1520.8	1509.8	1484.2	1504.933

ตารางที่ 4.2 การหาค่า  $R_L$  จาก VI - Method ที่อุณหภูมิห้อง  $\approx 25-27 \text{ }^\circ\text{C}$

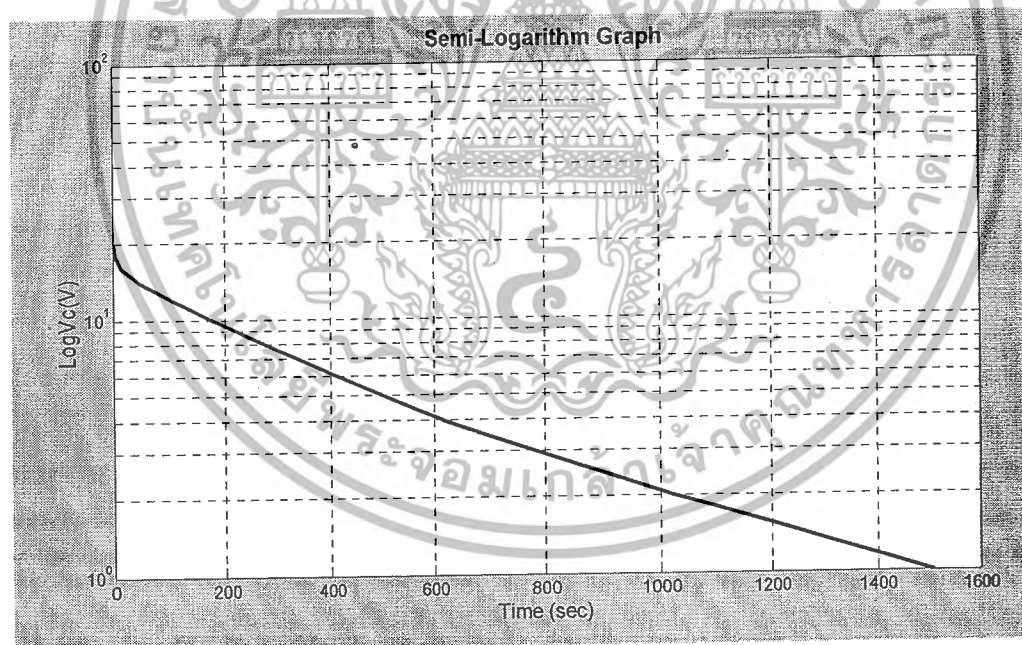
$R = 500 \Omega$  (Name plate)

แรงดันป้อนเข้า(V)	20.008	15.008	10.005	5.002
กระแส(A)	0.0395	0.0295	0.0196	0.0095
R	506.532	508.746	510.459	526.526
Rเฉลี่ย	513.066			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 513.066  $\Omega$



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ โดยกราฟเป็นแบบ semi-logarithm ที่ความต้านทาน 513.066  $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

จาก  $V_c = Ee^{-T/RC}$  (T – Times Constant, E – Voltage Source)

โดย

$$V_c = 0.368 \cdot 20 = 7.36 \text{ V}$$

$$T_{avg} = 301.28 \text{ s}$$

$$R = 513.066 \ \Omega$$

$$\therefore C = 1.353 \text{ F}$$

เมื่อ Take Log ใส่สมการข้างต้น และจากกราฟ semi-logarithm จะได้

$$\text{Slope} = \frac{-\log e}{RC} = \frac{-0.434}{RC}$$

$$\text{Slope} = \frac{\log y_1 - \log y_2}{x_2 - x_1} = -6.2973 \times 10^{-4}$$

$$\therefore C = 1.343 \text{ F}$$

ค่าเก็บประจุเฉลี่ย

$$C = 1.35 \text{ F}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{ค่า } C \text{ แบบ } RC \approx 1.35 \text{ F}$$

**Percentage difference**

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง} = \frac{2|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2}$$

$$\therefore \% \text{ diff ระหว่างแบบ } RC \text{ กับแบบการลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล} \approx 0.742\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

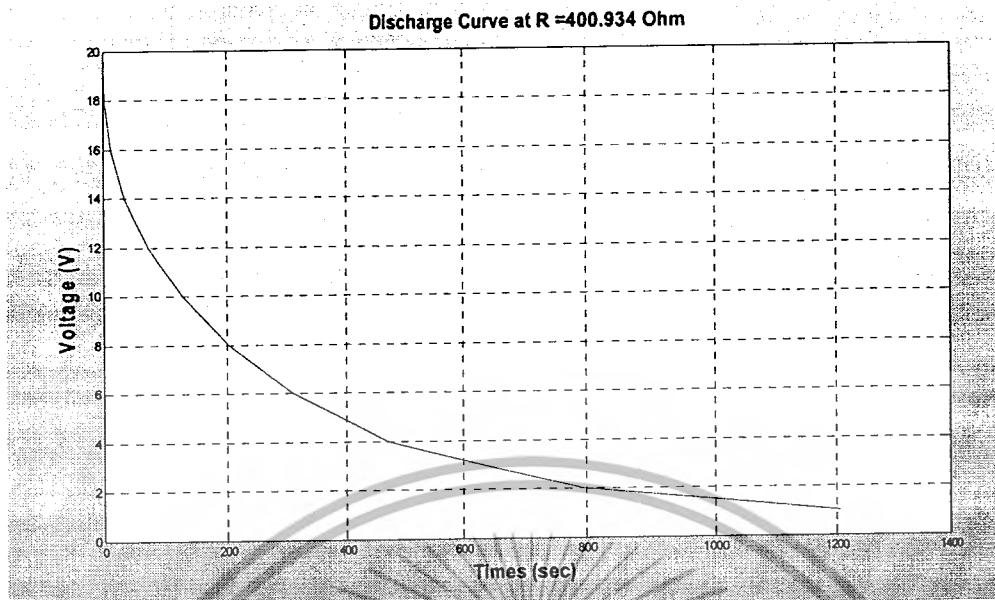
ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาการคายประจุของตัวเก็บประจุที่  $R = 400.934 \Omega$

Vc (โวลต์)	เวลา (วินาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
20	0	0	0	0
18	2.9	2.6	2.4	2.633
16	13.4	11.4	9.6	11.467
14	38.2	33.5	29.4	33.700
12	77.3	68.4	66.7	70.800
10	133.4	124.7	120.3	126.133
8	213.9	200.3	194.5	202.900
6	317.8	311.4	299.3	309.500
4	480.5	471.6	462.9	471.667
2	803.5	795.4	789.4	796.100
1	1217.4	1206.7	1191.9	1205.333

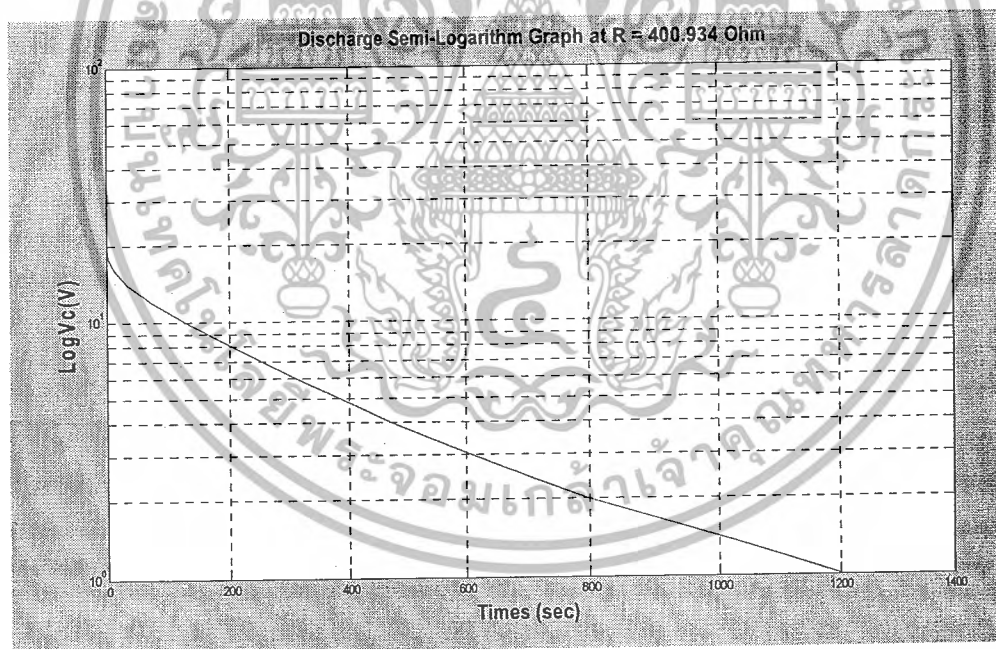
ตารางที่ 4.4 การหาค่า  $R_L$  จาก VI – Method ที่อุณหภูมิห้อง  $\approx 25-27^\circ C$   
 $R = 390 \Omega$  (Name Plate)

แรงดันป้อนเข้า(V)	20.001	15.001	10.004	5.001
กระแส(A)	0.0505	0.0379	0.0251	0.0121
R	396.059	395.805	398.566	413.306
Rเฉลี่ย	400.934			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ที่ความต้านทาน 400.934  $\Omega$



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของแรงดันกับเวลาในการคายประจุ โดยกราฟเป็นแบบ semi-logarithm ที่ความต้านทาน 400.934  $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก  $V_c = Ee^{-T/RC}$  (T – Times Constant, E – Voltage Source)

โดย

$$V_c = 0.368 \times 20 = 7.36 \text{ V}$$

$$T_{avg} = 237.012 \text{ s}$$

$$R = 400.934 \ \Omega$$

แทนค่าในสมการ

$$\text{จะได้ } \therefore C = 1.36 \text{ F}$$

เมื่อ Take Log ใส่สมการข้างต้น และจากกราฟ semi-logarithm จะได้

$$\text{Slope} = \frac{-\log e}{RC} = \frac{-0.434}{RC}$$

$$\text{Slope} = \frac{\log y_1 - \log y_2}{x_2 - x_1} = -8.2062 \times 10^{-4}$$

$$\text{จะได้ } \therefore C = 1.32 \text{ F}$$

ค่าเก็บประจุเฉลี่ย

$$C = 1.34 \text{ F}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{ค่า } C \text{ แบบ } RC \approx 1.34 \text{ F}$$

Percentage difference

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง} = \frac{2|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2}$$

$$\therefore \% \text{ diff ระหว่างแบบ } RC \text{ กับแบบการหาค่าความชัน} \approx 2.985 \%$$

ค่าเก็บประจุที่ได้จากการหาโดยวิธี RC Time Constant มีค่าประมาณ 1.35 F

$$\therefore \% \text{ diff ระหว่างแบบหาพื้นที่ใต้กราฟและแบบ } RC \approx 0.738 \%$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่าตัวเก็บประจุในตัวเก็บประจุที่ได้ศึกษา ซึ่งไม่มี Datasheet พบว่าจากการทดลองหลายๆ วิธี ค่า C ที่ได้ก็มีค่าแตกต่างกันไป ซึ่งก็แตกต่างกันไม่มากนัก เราจึงสรุปได้ว่าค่าเก็บประจุในตัวเก็บประจุนี้มีค่าประมาณ 1.35 F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ESR Measurement

การทดสอบเพื่อหาค่า ESR ในนี้เราจะใช้หลักการพื้นฐานจากการหาพื้นที่ใต้กราฟ ดังนี้

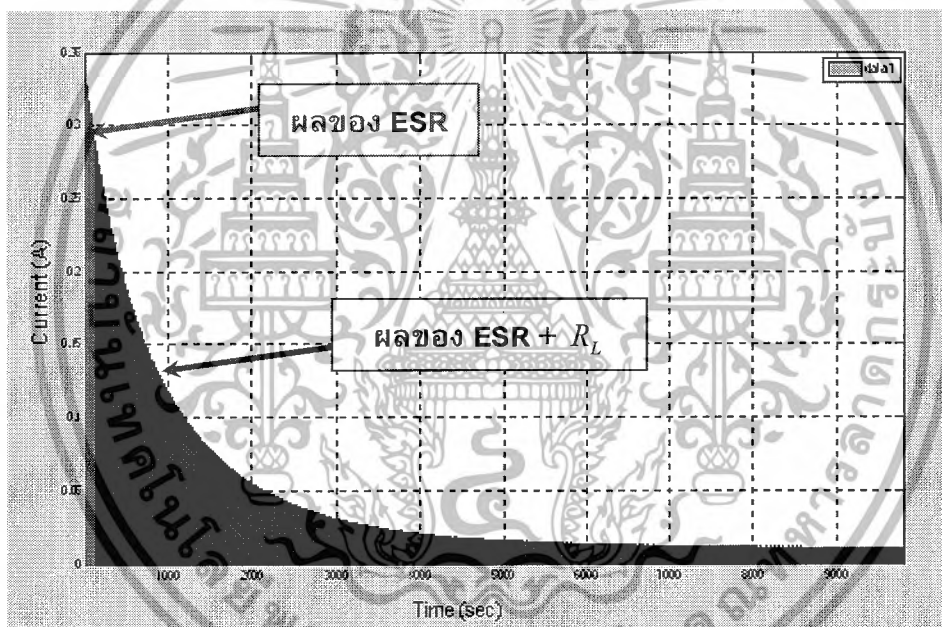
$$ESR = \frac{\Delta V}{I} \text{ หรือ}$$

$$\int dQ = \int Idt$$

$$\int dQ = \int \frac{Vdt}{R_T}$$

$$R_T = \text{พื้นที่ใต้กราฟแรงดันหลังจาก ESR drop} / Q$$

$$ESR = R_T - R_L \quad ; (R_L = \text{ความต้านทานโหลด}, R_T = \text{ความต้านทานรวม})$$



ภาพที่ 4.12 ภาพแสดงแรงดันกับเวลาในการคายประจุ และแสดงผลของความต้านทานภายในและความต้านทานโหลด เมื่อทำการคายประจุ

จากกราฟเป็นกราฟของกระแส(I) กับเวลา (t) จึงได้ค่า Q ออกมาซึ่งมีอยู่ 2 ส่วน คือจากผลของ ESR อย่างเดียว และผลจาก ESR กับ ความต้านทานโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การหาค่า  $R_L$  จาก VI – Method ที่อุณหภูมิห้อง  $\approx 24-26 \text{ }^\circ\text{C}$

R = 100  $\Omega$  (Name Plate)

แรงดันป้อนเข้า(V)	20.004	15.003	10.003	5.001
กระแส(A)	0.20668	0.15031	0.0987	0.0488
R	96.787	99.814	101.348	102.480
Rเฉลี่ย	100.10772			

ตารางที่ 4.6 การหาค่า  $R_L$  จาก VI – Method ที่อุณหภูมิห้อง  $\approx 24-26 \text{ }^\circ\text{C}$

R = 50  $\Omega$  (Name Plate)

แรงดันป้อนเข้า(V)	20.005	15.007	10.004	5.002
กระแส(A)	0.4266	0.29876	0.19871	0.09447
R	46.894	50.231	50.345	52.948
Rเฉลี่ย	50.10457			

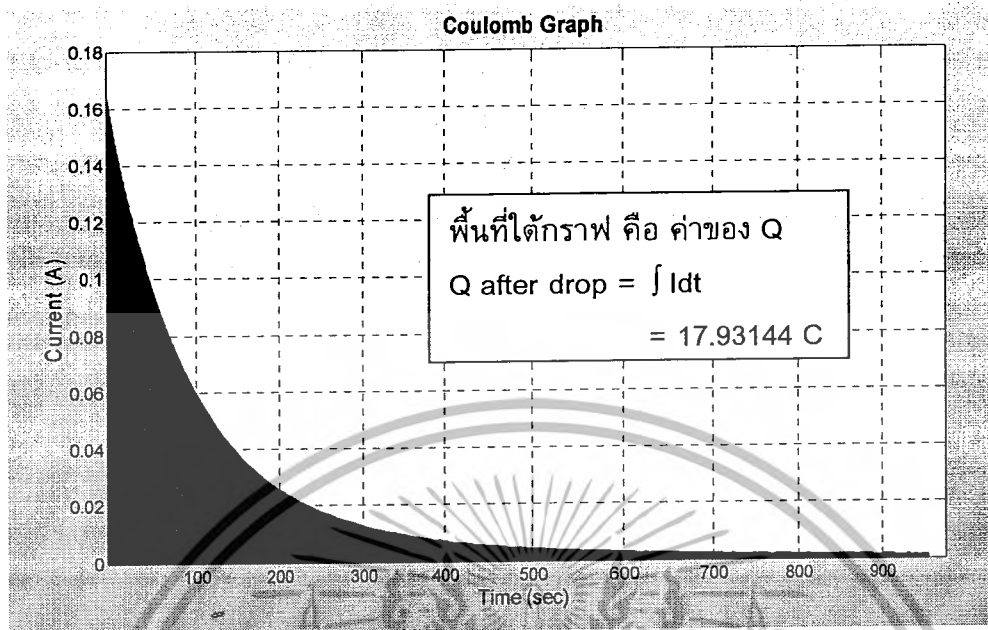
ตารางที่ 4.7 การหาค่า  $R_L$  จาก VI – Method ที่อุณหภูมิห้อง  $\approx 24-26 \text{ }^\circ\text{C}$

R = 20  $\Omega$  (Name Plate)

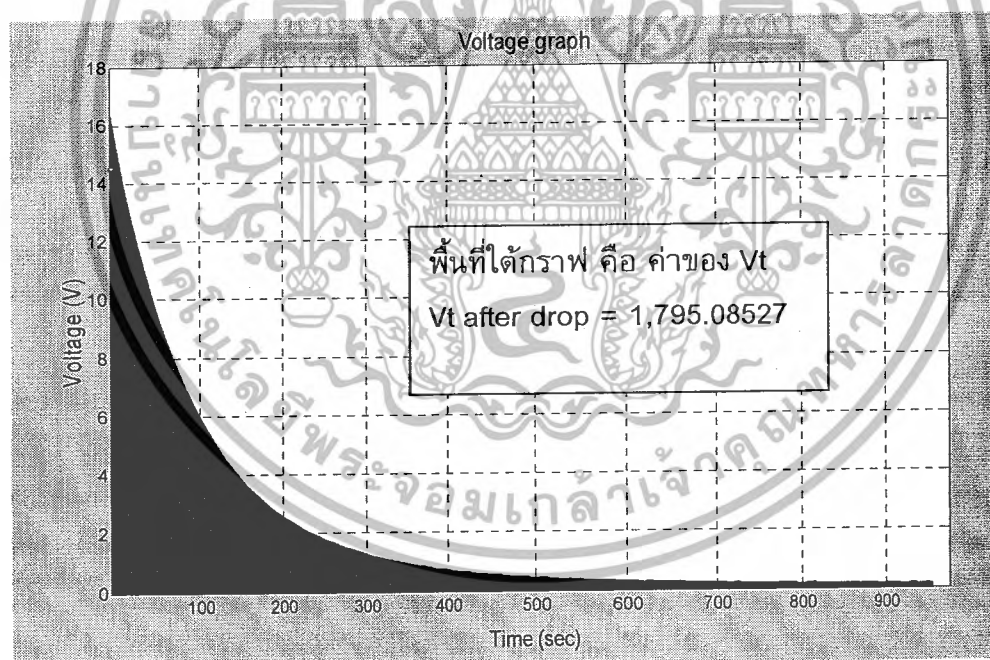
แรงดันป้อนเข้า(V)	20.008	15.007	10.002	5.006
กระแส(A)	1.10972	0.7569	0.47566	0.2329
R	18.030	19.827	21.028	21.494
Rเฉลี่ย	20.09484			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

- การทดสอบเพื่อหาค่า ESR โดยการคายประจุที่  $R=100\ \Omega$



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ ( $R=100\ \Omega$ )



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ( $R=100\ \Omega$ )

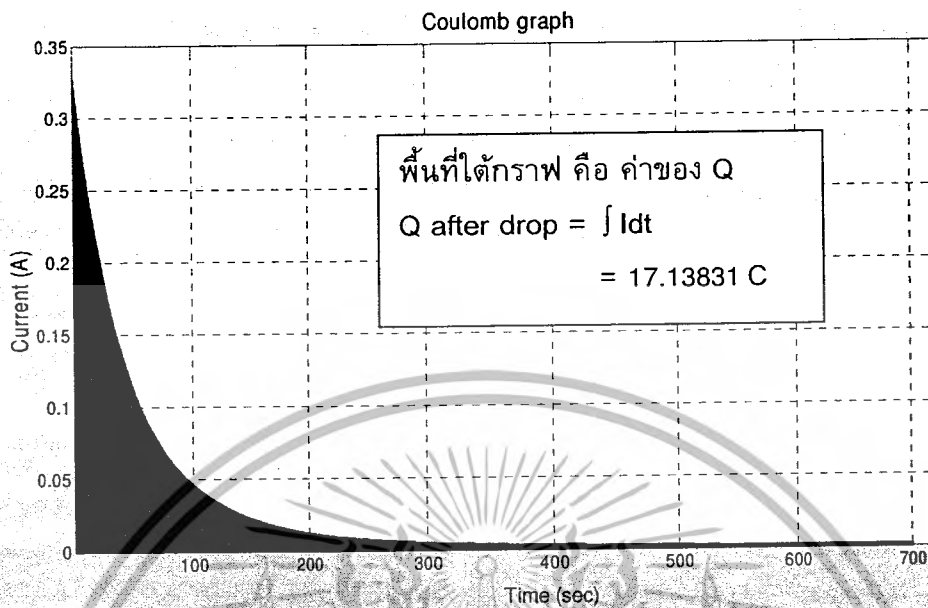
$$\begin{aligned} \text{จาก } Q &= It \\ &= V / R_T * (t) \\ &= V * t / R_T \end{aligned}$$

$$R_T = \frac{Vt}{Q} = 100.1082739 \ \Omega$$

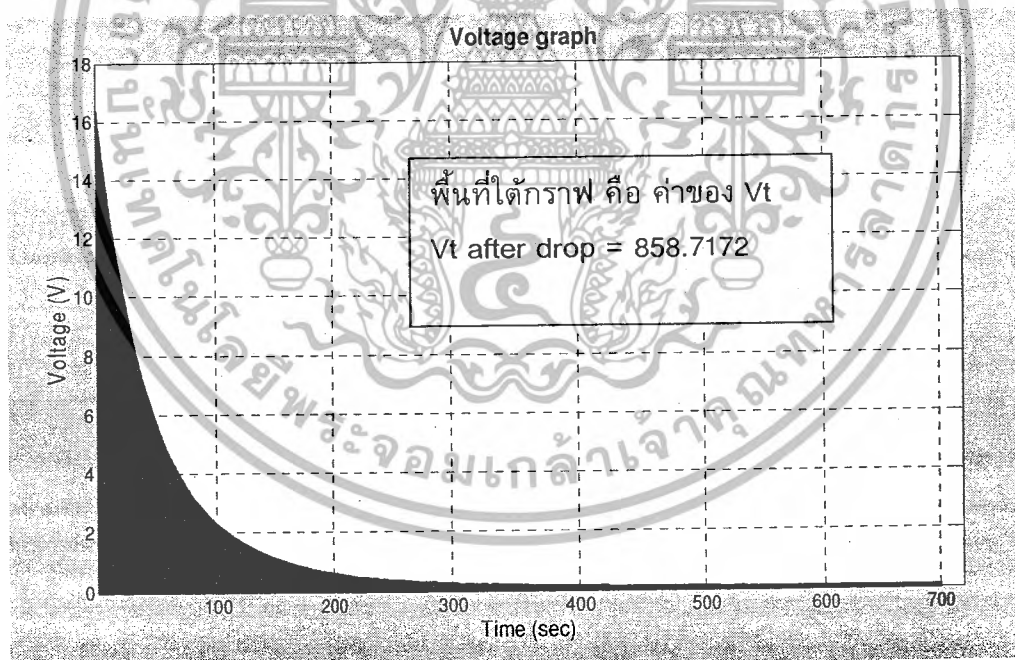
$$\begin{aligned} \text{ESR} &= R_T - R_L \\ &= 100.10827 - 100.10772 \\ &= 0.5539 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบเพื่อหาค่า ESR โดยการคายประจุที่  $R=50\ \Omega$



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ ( $R=50\ \Omega$ )



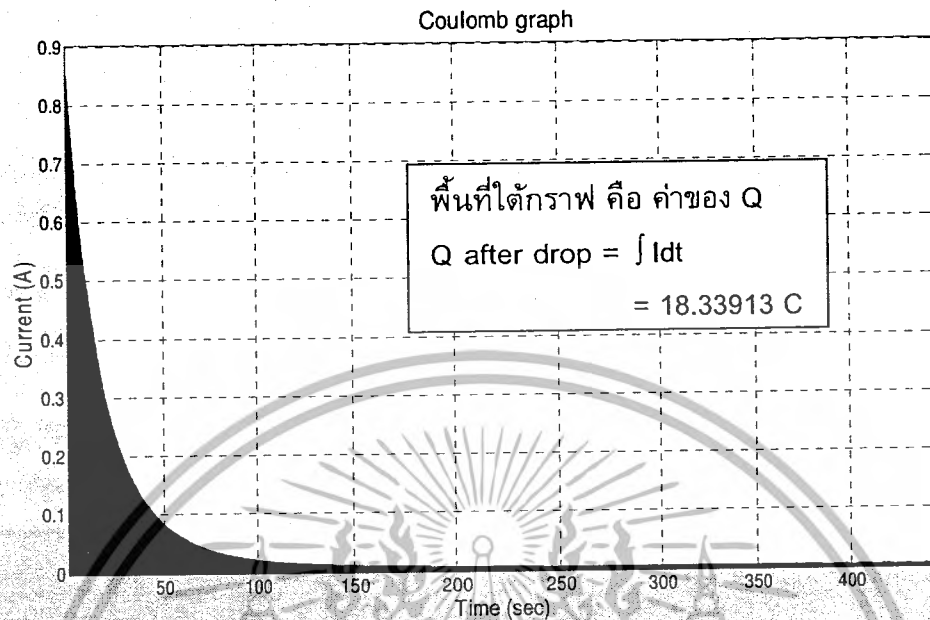
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ( $R=50\ \Omega$ )

$$R_T = \frac{V_t}{Q} = 50.10511\ \Omega$$

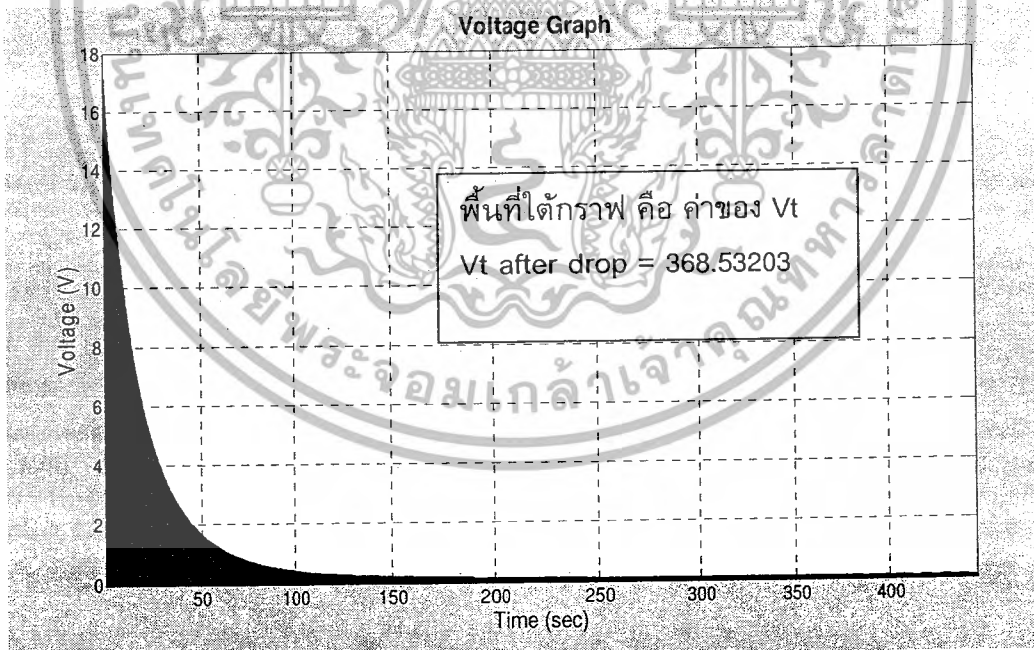
$$\begin{aligned} \text{ESR} &= R_T - R_L \\ &= 50.10511 - 50.10457 \\ &= 0.54\ \text{m}\Omega \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบเพื่อหาค่า ESR โดยการคายประจุที่  $R=20\ \Omega$



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ ( $R=20\ \Omega$ )

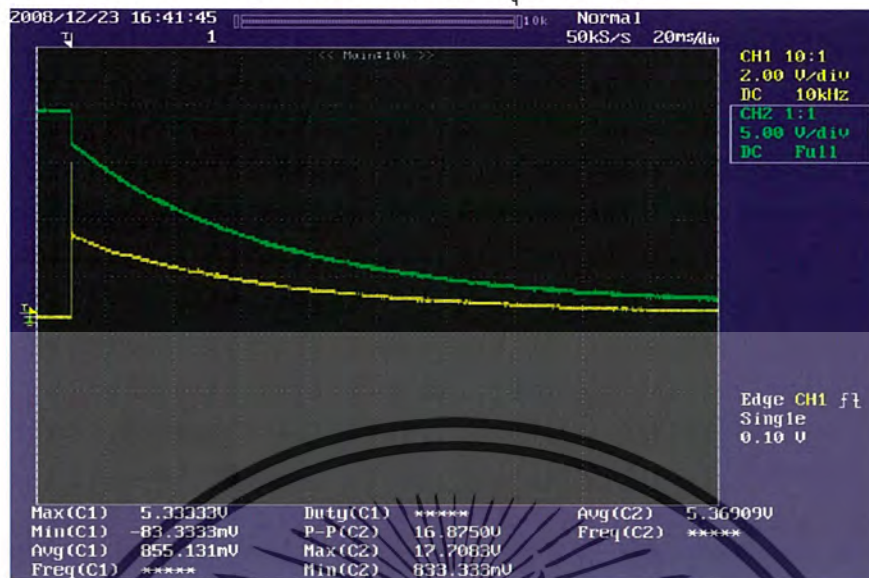


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ ( $R=20\ \Omega$ )

$$R_T = \frac{V_t}{Q} = 20.09484 \ \Omega$$

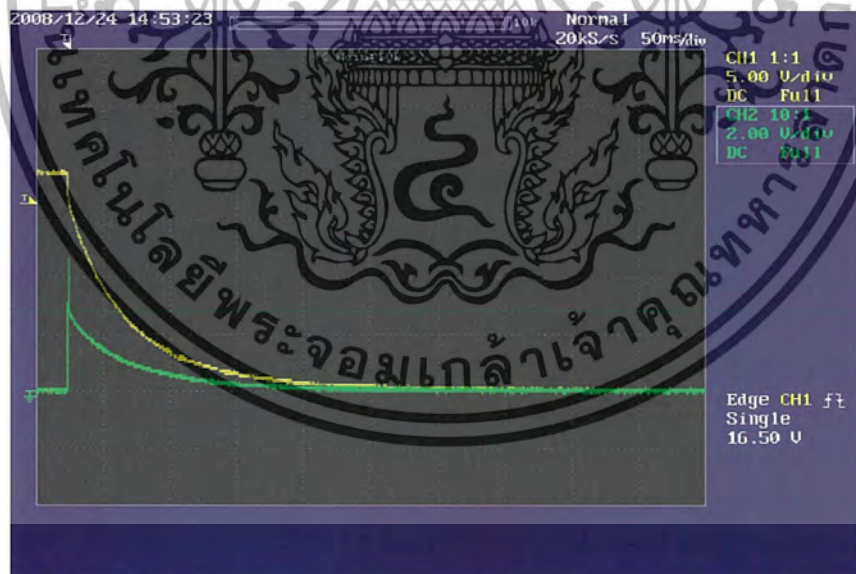
$$\begin{aligned} \text{ESR} &= R_T - R_L \\ &= 20.09540 - 20.09484 \\ &= 0.56 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

- การทดสอบเพื่อหาค่า ESR โดยการคายประจุที่  $R=1\text{ m}\Omega$



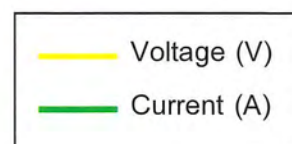
ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับเวลาในการคายประจุที่  $R = 1\text{ m}\Omega$  (ทดลองครั้งที่ 1)

$$\begin{aligned} \text{จาก } ESR &= \frac{\Delta V}{I} \\ &= \frac{17.5 - 14.4}{5330} \\ &= 0.582\text{ m}\Omega \end{aligned}$$



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับเวลาในการคายประจุที่  $R = 1\text{ m}\Omega$  (ทดลองครั้งที่ 2)

$$\begin{aligned} \text{จาก } ESR &= \frac{\Delta V}{I} \\ &= \frac{19.0 - 16.3}{4670} \\ &= 0.5782\text{ m}\Omega \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

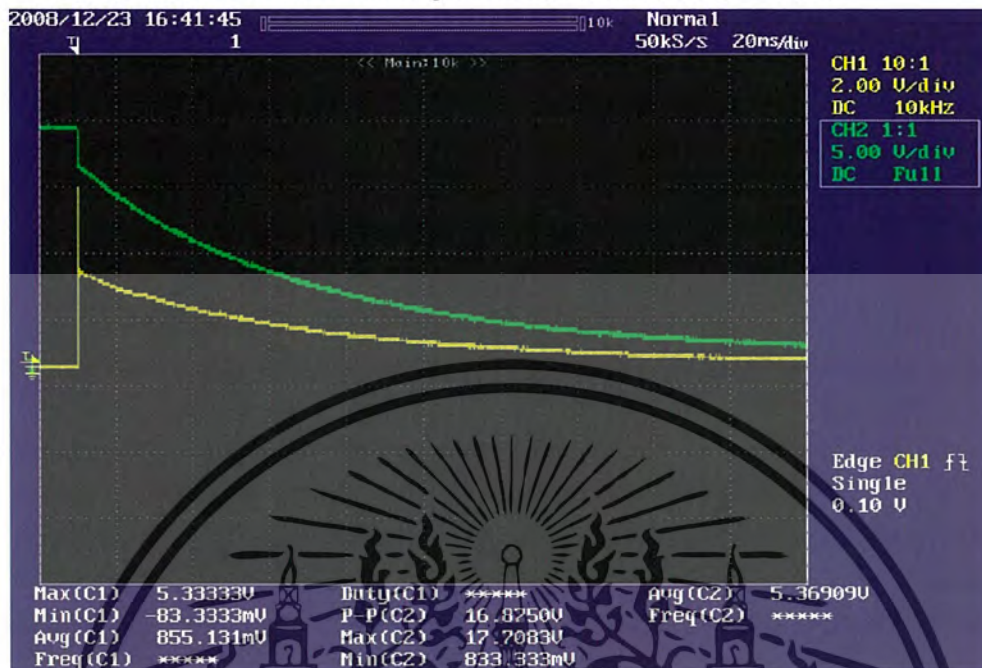
จากการทดลองพบว่า ค่า ESR ที่ทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน ที่ประมาณ  $0.55 \text{ m}\Omega$  และอัตราส่วนระหว่างค่า Q จากผลของ ESR ในขณะแรงดันตกแบบทันทีทันใดกับค่า Q จากพลังงานทั้งหมด จะมีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1:190 ซึ่งเมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะได้ค่า Q จากผลของ ESR ในขณะแรงดันตกแบบทันทีทันใด คิดเป็น 0.55% ซึ่งมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าพลังงานทั้งหมด



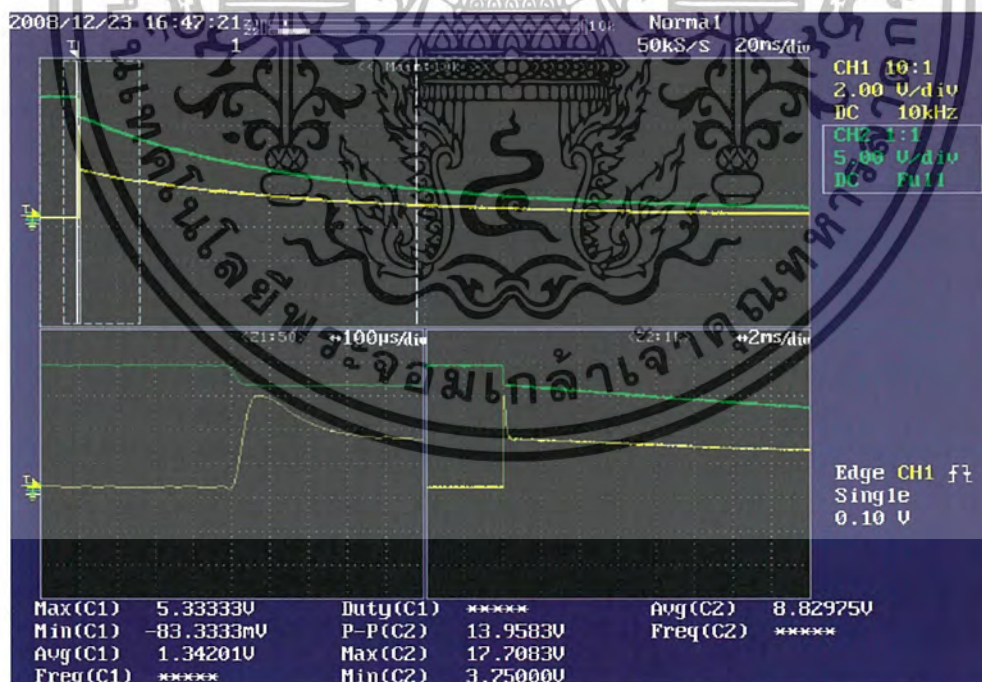
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 Energy and Impulse Current

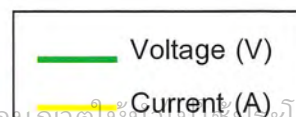
จากการทดลอง โดยการ Discharge ใส่ความต้านทานโหลด =  $1\text{m}\Omega$



ภาพที่ 4.21 ภาพแสดงผลการทดลองของแรงดันและกระแสเมื่อเทียบกับเวลาในการ Discharge ใส่ความต้านทานโหลด =  $1\text{m}\Omega$

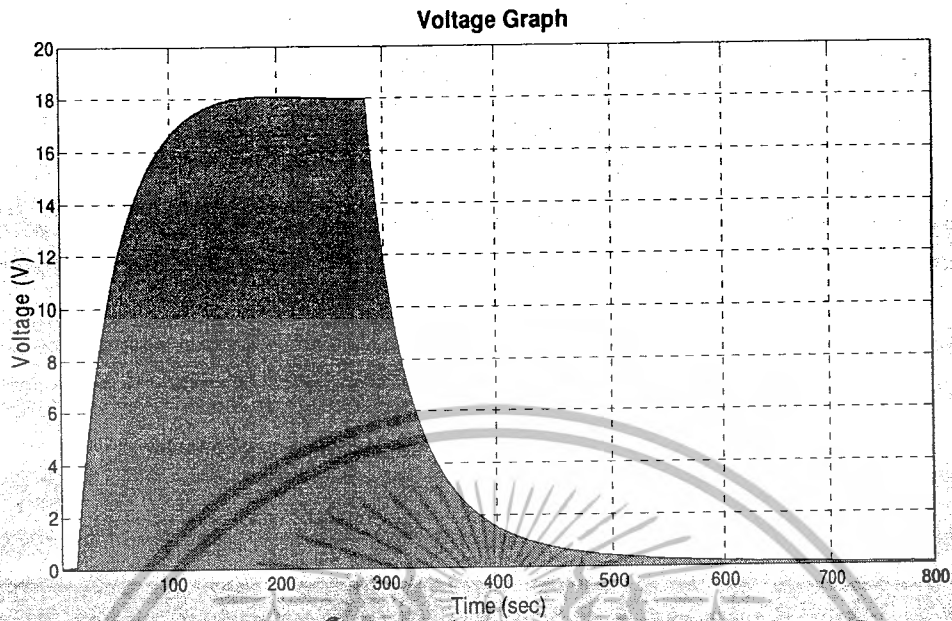


ภาพที่ 4.22 ภาพขยายผลการทดลองของแรงดันและกระแสเมื่อเทียบกับเวลาในการ Discharge ใส่ความต้านทานโหลด =  $1\text{m}\Omega$

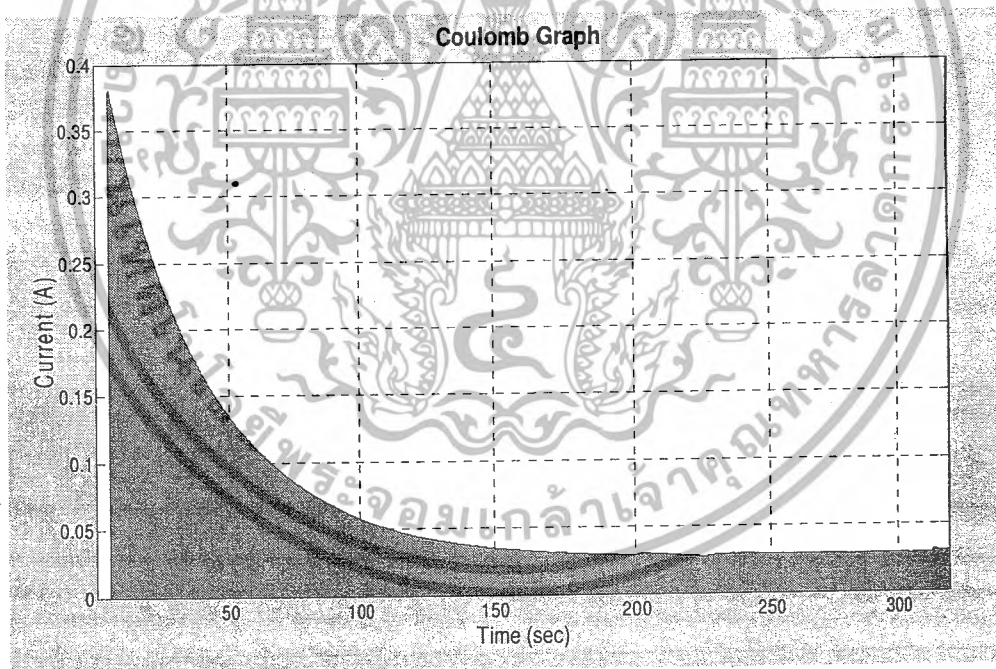


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดลองในขณะอัดประจุและคายประจุที่ความต้านทานจำกัดกระแส  $50 \Omega$

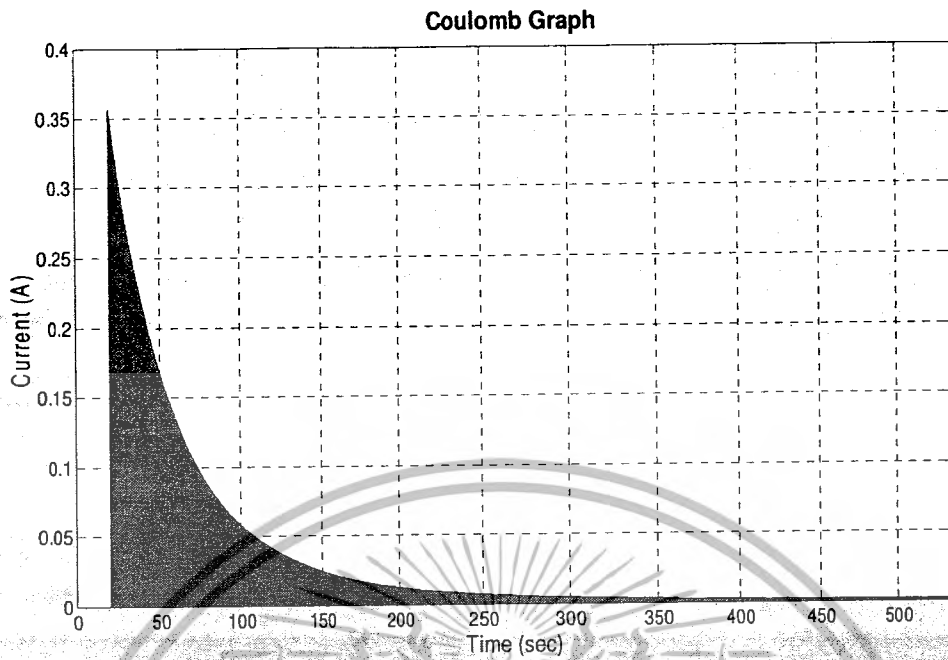


ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการอัดประจุและคายประจุ

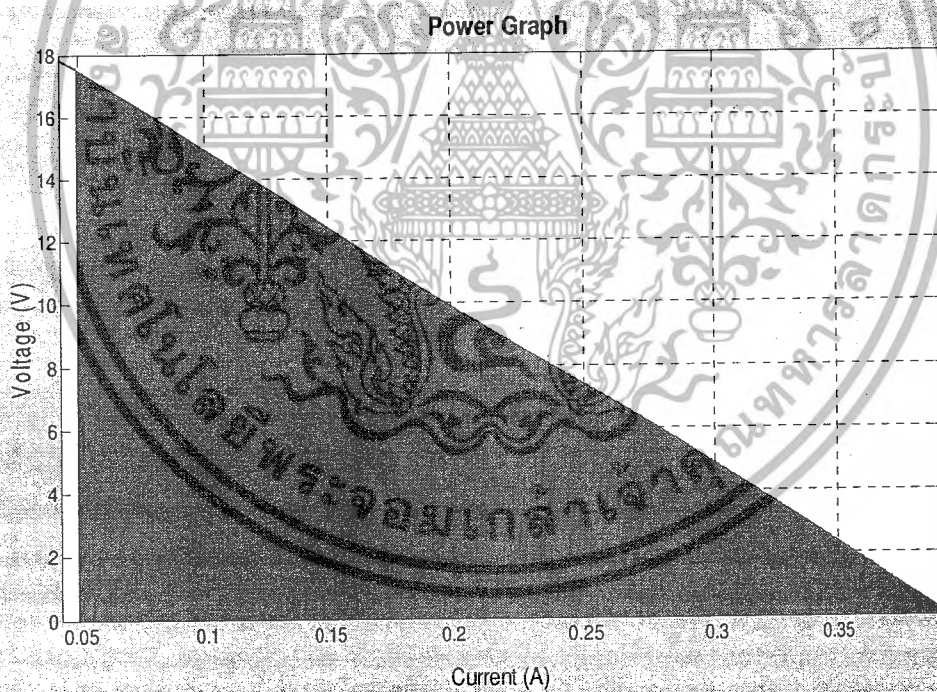


ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในการอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

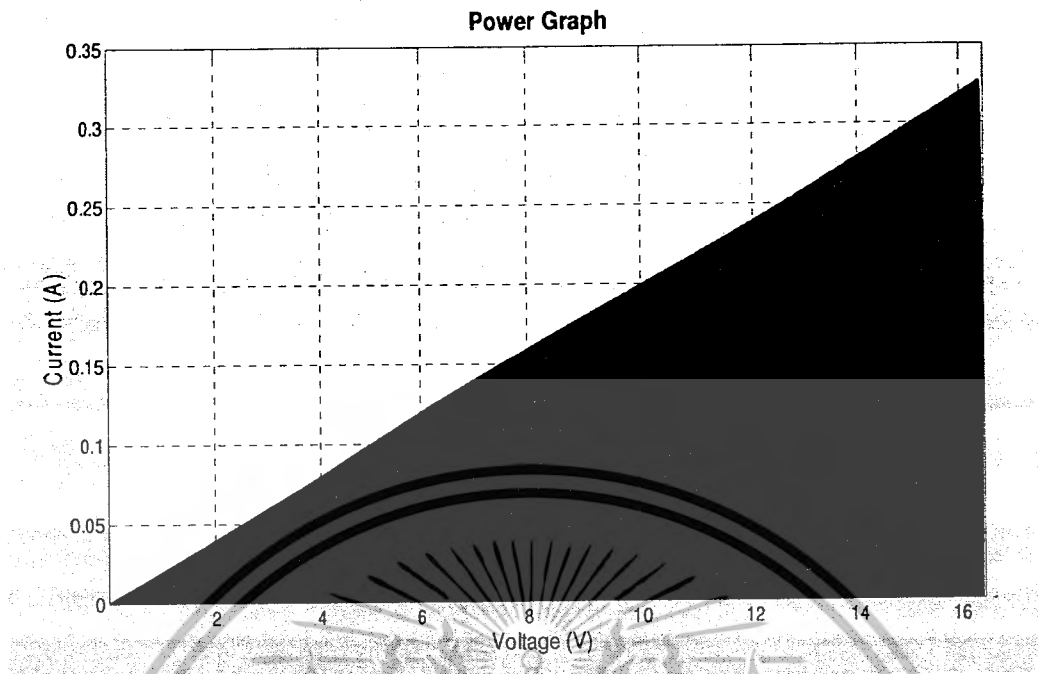


ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ



ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน  
หรือค่ากำลังไฟฟ้าในการอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน หรือค่ากำลังไฟฟ้าในการคายประจุ

#### Maximum Energy Density

จากสูตร  $E = \frac{1}{2} CV^2$  ( $V = \text{Rated Voltage}$ )

$\therefore E = \frac{1}{2} * 1.35 * 20^2 = 270 \text{ J/kg}$

#### Energy Density

จากการทดลองอัดประจุ

จาก  $E = \int_{t_1}^{t_2} P dt$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} IV dt$$

$\therefore$  จากกราฟ  $E = 267.09 \text{ J (W-s)}$

#### Power Density

$$P = 0.074 \text{ Wh/kg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Energy Density

จากการทดลองคายประจุ

$$\text{จาก } E = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} IV dt$$

∴ จากกราฟ  $E = 244.74 \text{ J (W-s)}$

### Power Density

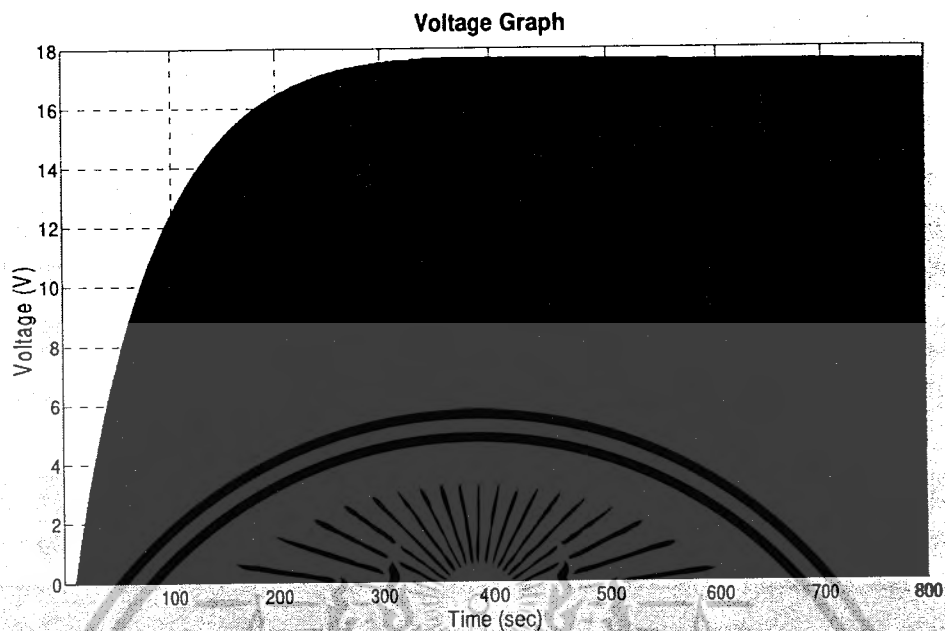
$$P = 0.07 \text{ Wh/kg}$$

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

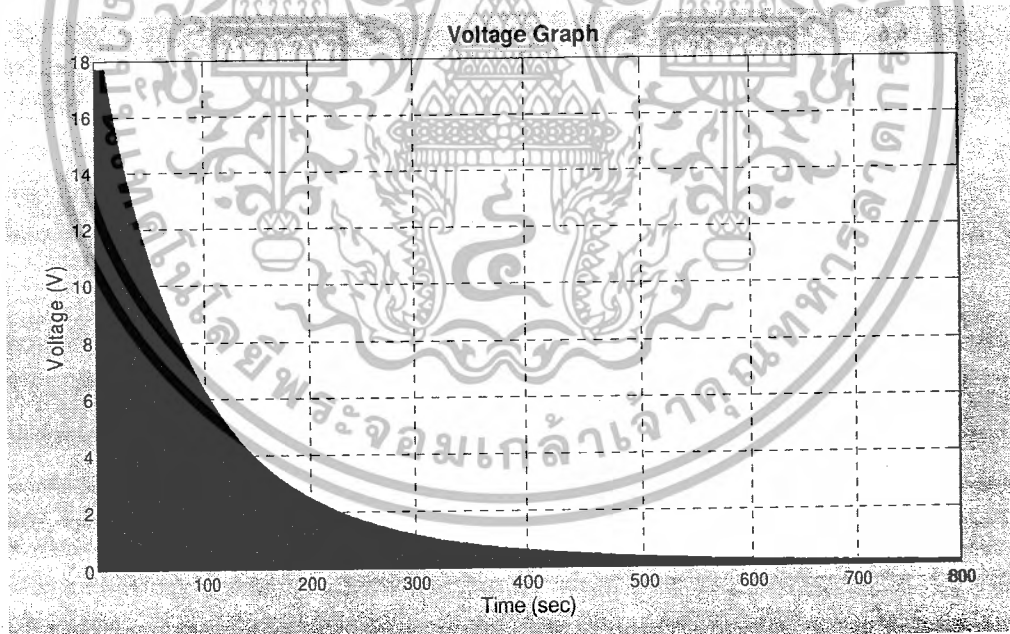
ค่าพลังงานที่ใช้ในการอัดประจุเมื่อนำมาเทียบกับพลังงานในการคายประจุที่ค่าความต้านทานประมาณ  $50 \Omega$  พบว่ามีค่าพลังงานที่ออกมาหรือที่สามารถดึงพลังงานมาใช้ได้มี

$$\text{ค่าประมาณ} = \frac{244.74}{267.09} \times 100\% = 91.63\%$$

- การทดลองในขณะอัดประจุและคายประจุที่ความต้านทานจำกัดกระแส 100  $\Omega$

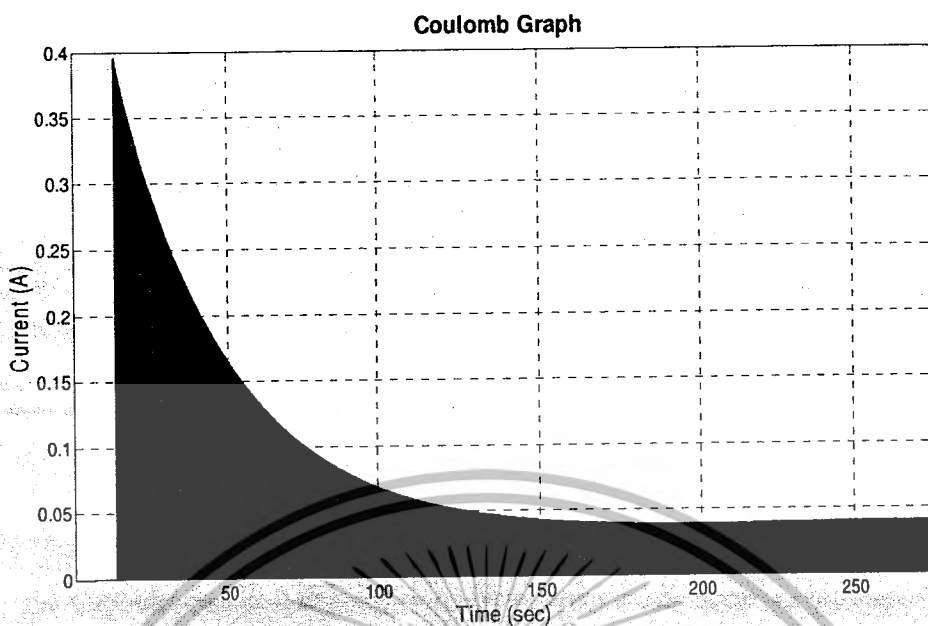


ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการอัดประจุ

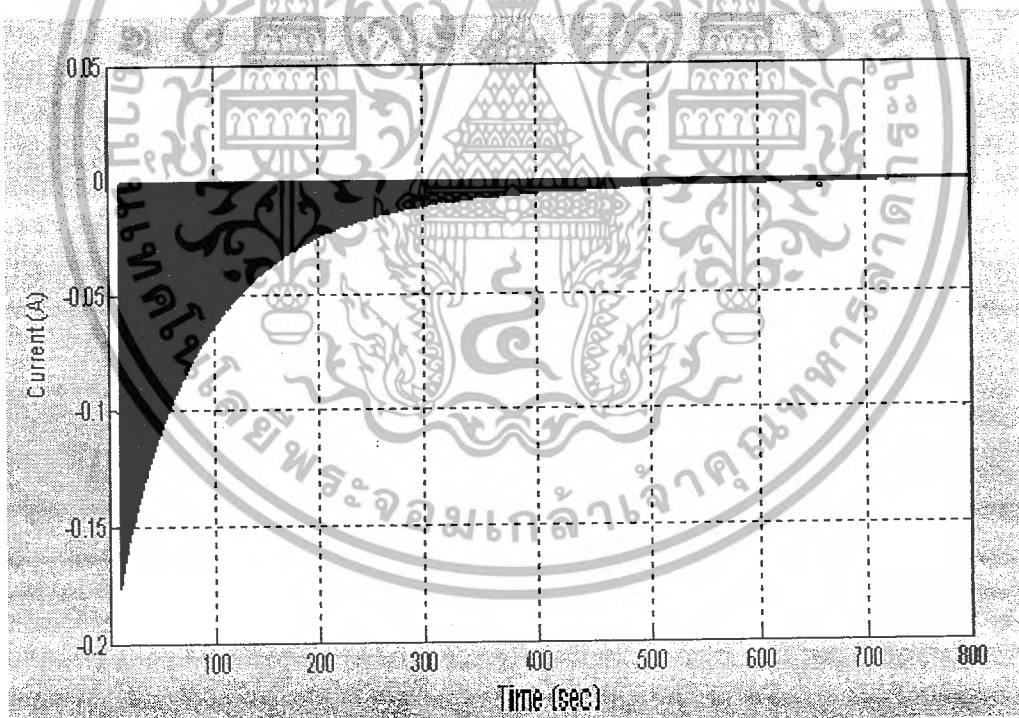


ภาพที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการอัดประจุ



ภาพที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Energy Density**

จากการทดลองอัดประจุที่ความต้านทาน  $\sim 100 \Omega$

$$\text{จาก } E = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} IV dt$$

$\therefore$  จากกราฟ  $E = 265.00 \text{ J (W-s)}$

**Power Density**

$$P = 0.073 \text{ Wh/kg}$$

**Energy Density**

จากการทดลองคายประจุที่ความต้านทาน  $\sim 100 \Omega$

$$\text{จาก } E = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} IV dt$$

$\therefore$  จากกราฟ  $E = 241.42 \text{ J (W-s)}$

**Power Density**

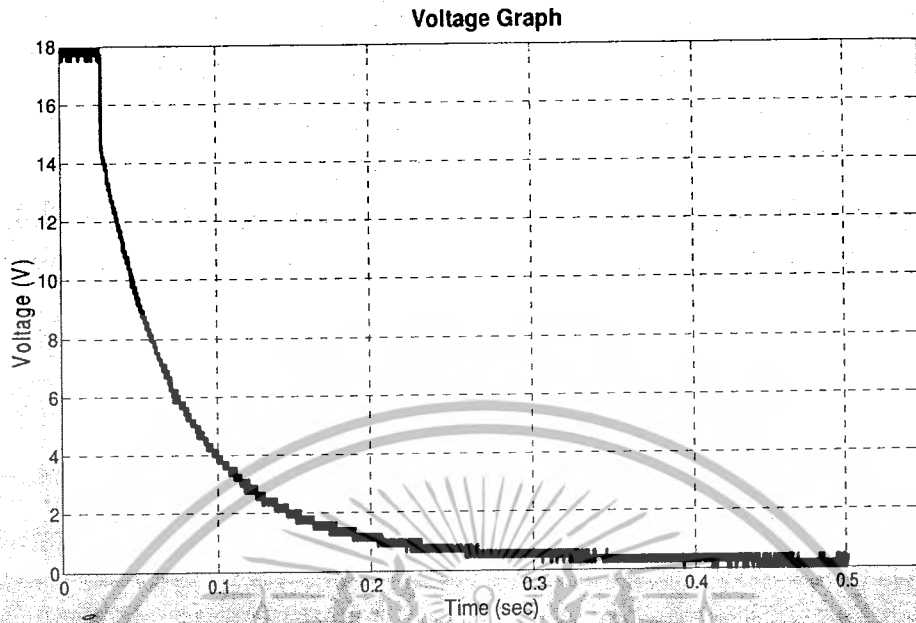
$$P = 0.07 \text{ Wh/kg}$$

**วิเคราะห์ผลการทดลอง**

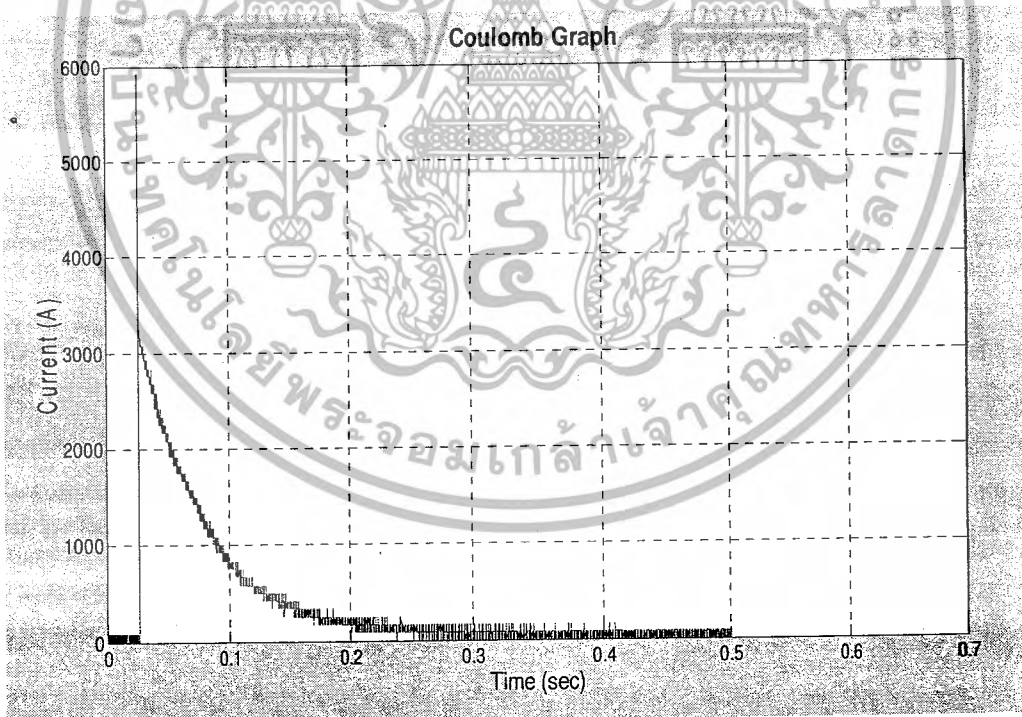
ค่าพลังงานที่ใช้ในการอัดประจุเมื่อนำมาเทียบกับพลังงานในการคายประจุที่ค่าความต้านทานประมาณ  $100 \Omega$  พบว่ามีค่าพลังงานที่ออกมาหรือที่สามารถดึงพลังงานมาใช้ได้มี

$$\text{ค่าประมาณ} = \frac{241.42}{265.00} \times 100 \% = 91.10 \%$$

- การทดลองในขณะอัดประจุและคายประจุที่ความต้านทานจำกัดกระแส  $1\text{ m}\Omega$

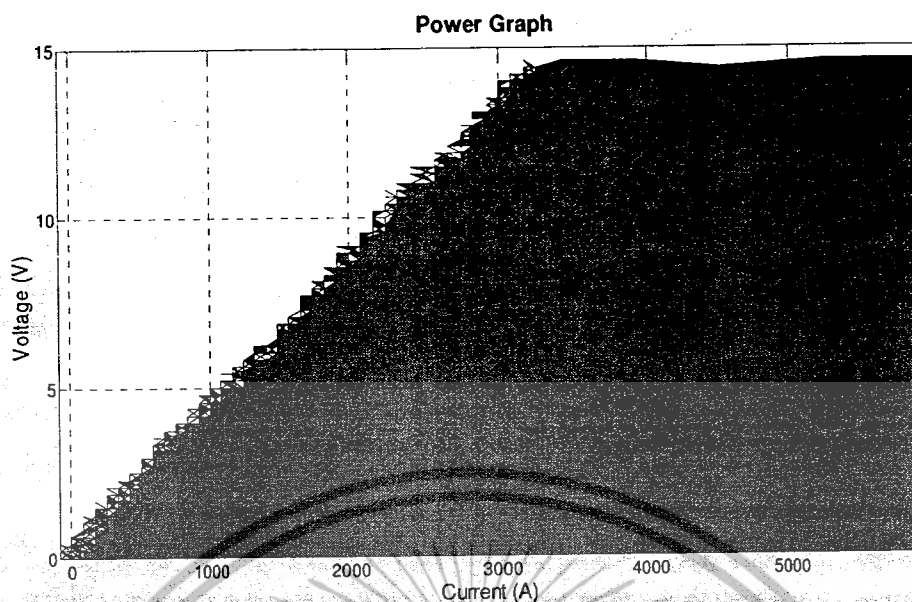


ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาในการคายประจุ  
ที่ความต้านทานโหลด  $1\text{ m}\Omega$



ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาในการคายประจุ  
ที่ความต้านทานโหลด  $1\text{ m}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน  
หรือค่ากำลังไฟฟ้าในการคายประจุ

#### Energy Density

จากการทดลองคายประจุ

จาก 
$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} IV dt$$

∴ จากกราฟ  $E = 257.22 \text{ J (W-s)}$

#### Power Density

$$P = 0.072 \text{ Wh/kg}$$

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

ค่าพลังงานที่ใช้ในการอัดประจุเมื่อนำมาเทียบกับพลังงานในการคายประจุที่ค่าความต้านทานประมาณ  $100 \text{ } \Omega$  พบว่ามีค่าพลังงานที่ออกมาหรือที่สามารถดึงพลังงานมาใช้ได้มี

$$\text{ค่าประมาณ} = \frac{257.22}{270.00} \times 100 \% = 95.27 \%$$

### สรุปผลการทดลอง

กระแสสูงสุดที่ Ultra capacitor ที่นำมาศึกษานี้ สามารถจ่ายออกมาได้ในชั่วขณะหนึ่งมีค่าประมาณ 5.3 kA ในช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นประมาณ 50  $\mu$ s และช่วงเวลาลังคลื่นประมาณ 200  $\mu$ s เมื่อนำมาคิดเป็นพลังงานเฉพาะช่วงขณะที่เกิดกระแสสูงนี้ มีค่า  $Q = 0.125$  คูลอมบ์,

เมื่อคายประจุที่ความต้านทานโหลด  $R=50 \Omega$  จะมีค่า Energy density (ขณะอัดประจุ) เท่ากับ 267.09 J , Energy density (ขณะคายประจุ) = 244.74 J ค่า Power Density (ขณะอัดประจุ) มีค่าเท่ากับ 0.074 Wh/kg , Power Density (ขณะคายประจุ) มีค่าเท่ากับ

**0.0680 Wh/kg**

เมื่อคายประจุที่ความต้านทานโหลด  $R=100 \Omega$  จะมีค่า Energy density (ขณะอัดประจุ) เท่ากับ 263.00 J, Energy density (ขณะคายประจุ) = 249.9244 J ค่า Power Density (ขณะอัดประจุ) มีค่าเท่ากับ 0.0730 Wh/kg Power Density (ขณะคายประจุ) มีค่าเท่ากับ

**0.0694 Wh/kg**

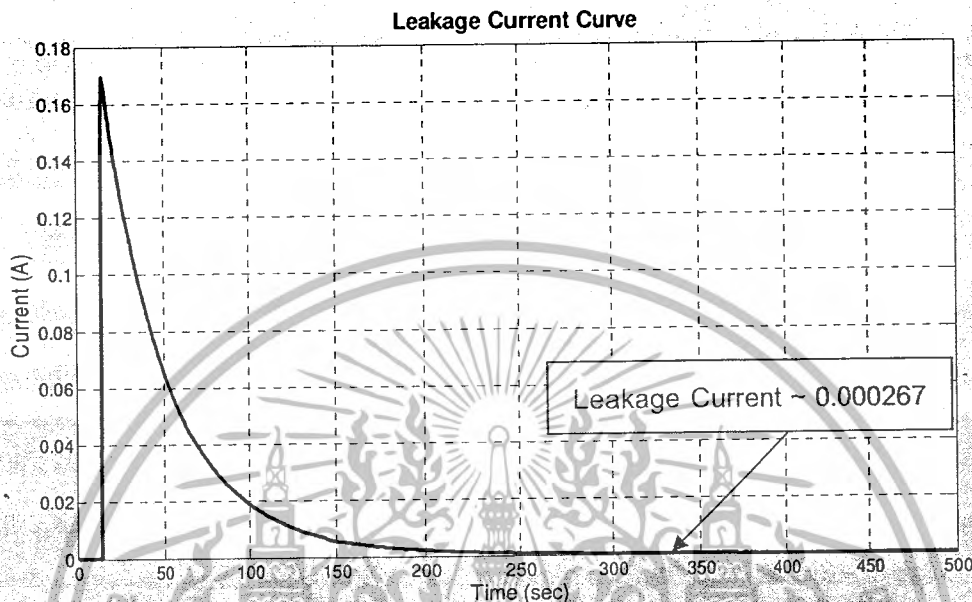
เมื่อคายประจุที่ความต้านทานโหลด  $R=1 m\Omega$  จะมีค่า Energy density (ขณะคายประจุ) เท่ากับ 257.22 J, ค่า Power Density (ขณะคายประจุ) มีค่าเท่ากับ 0.0720 Wh/kg และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายออกมาได้ มีค่าประมาณ 76.752 kW (ภายในเวลาประมาณ 50  $\mu$ s) และค่าพลังงานที่จ่ายออกมาได้นั้นใช้เวลาประมาณ 200 ms

จากการทดลองยังพบว่าเมื่อทำการคายประจุที่ความต้านทานโหลดต่ำๆ ในการทดลอง มีค่าความต้านทานโหลด 1 m $\Omega$  จะสามารถดึงพลังงานออกมาจากตัวเก็บประจุได้สูงสุด คือ ประมาณ 95.27 % และเมื่อคิดในด้านการอัดประจุพบว่าค่าความต้านทานสูง จากการทดลอง ประมาณ 100  $\Omega$  จะให้พลังงานในการเก็บประจุสูงสุด

## 4.6 Leakage Current

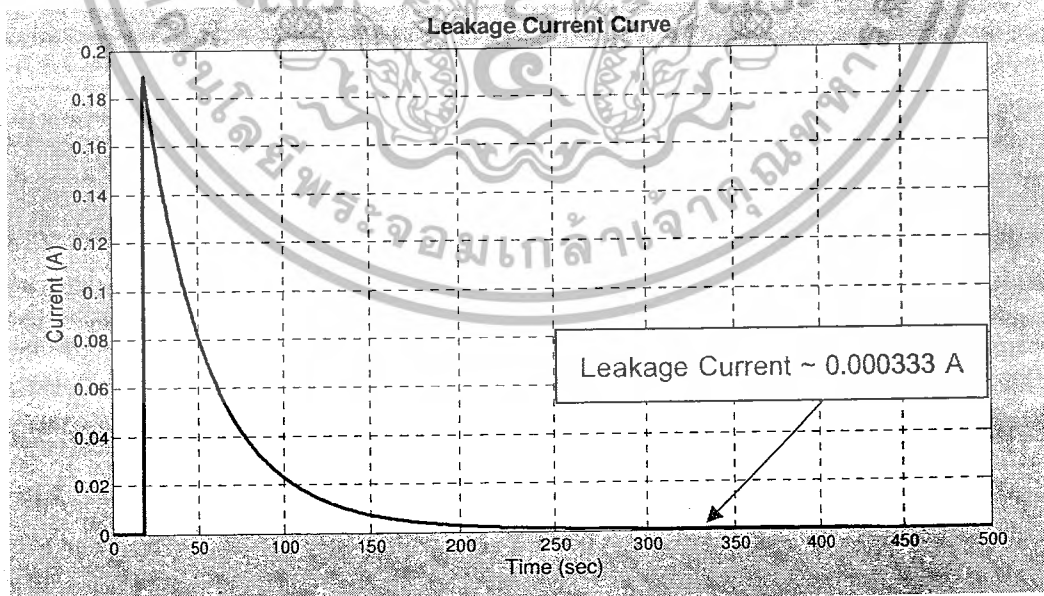
คือ กระแสที่สูญเสียไปขณะอัดประจุ ซึ่งอาจจะไหลออกตามผิวของขั้วตัวเก็บประจุหรือภายในตัวเก็บประจุ

### 4.6.1 ทดลองอัดประจุที่แรงดัน 8.87 V



ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลขณะอัดประจุกับเวลาที่แรงดัน ~8.87V

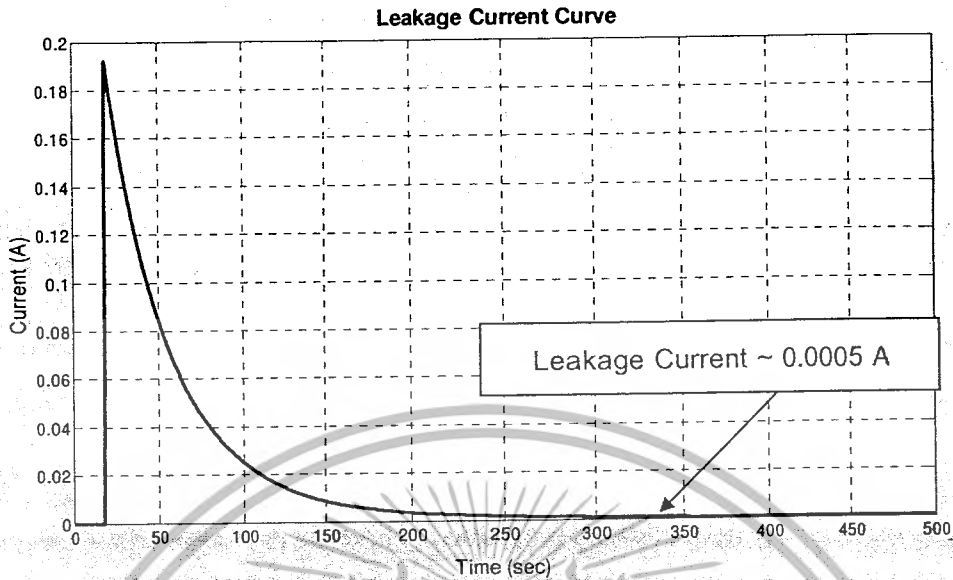
### 4.6.2 ทดลองอัดประจุที่แรงดัน 9.87 V



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลขณะอัดประจุกับเวลาที่แรงดัน ~9.87V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.6.3 ทดลองอัดประจุที่แรงดัน 10.87 V



ภาพที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลขณะอัดประจุกับเวลาที่แรงดัน ~10.87V

เมื่อพิจารณาถึงค่าความต้านทานขนา (ความต้านทานขณะ Self discharge)

$$R_p = \frac{V_w}{I_L}$$

$R_p$  – ความต้านทานขณะ self discharge

$V_w$  – Working Voltage

$I_L$  – Leakage current

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่ากระแสรั่วไหลในขณะที่ยื่นแปลงแรงดัน

แรงดันที่เปลี่ยนแปลง (V)	กระแสรั่วไหล, $I_L$ (A)	ความต้านทานself discharge, $R_p$ (k $\Omega$ )
8.87	0.000267	33.22
9.87	0.000333	29.64
10.87	0.000500	21.70
ค่ากระแสรั่วไหลเฉลี่ย	0.000367	
ความต้านทานself discharge เฉลี่ย		28.19

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟจะเห็นได้ว่าผลของกระแสที่ไม่เป็นศูนย์ขณะอัดประจุ โดยจะมีกระแสไหลออกมา โดยที่แรงดันอัดประจุที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดให้ใกล้เคียงกับค่าแรงดันคงที่ขณะ Self Discharge ที่ค่าตัวต้านทานจำกัดกระแสที่ 50  $\Omega$  และที่การทดลองจะหาค่าความต้านทาน Self Discharge เฉลี่ยที่ 28.19  $\Omega$  และค่ากระแสรั่วไหลเฉลี่ย (Average Leakage Current) มีค่าเท่ากับ 0.000367 A

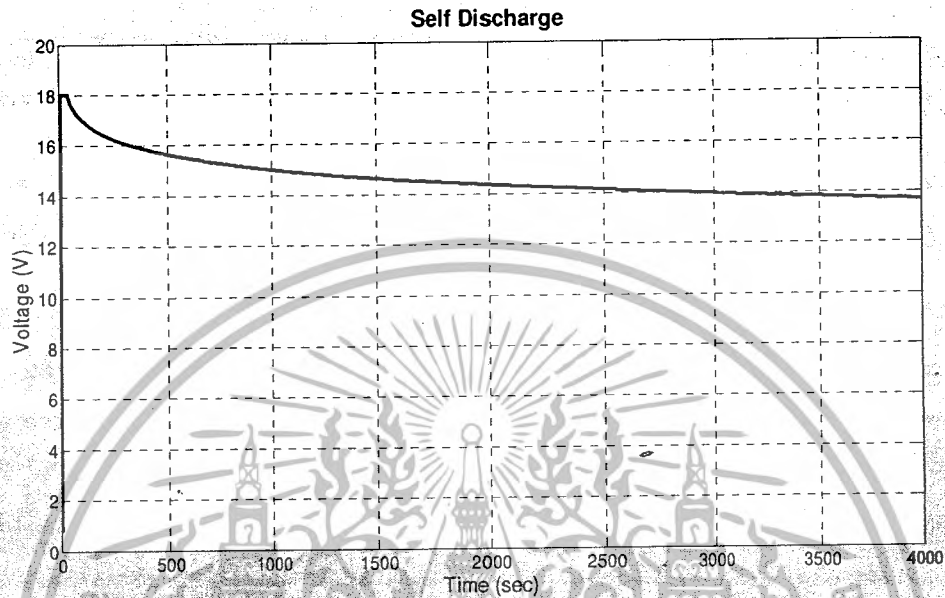
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 Self discharge

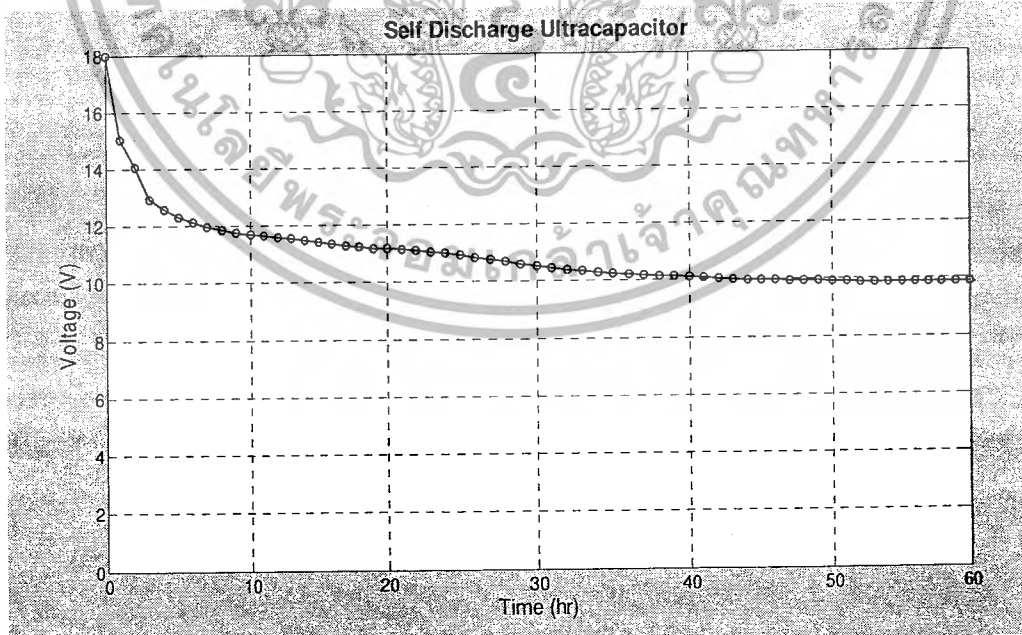
โดยเปรียบเทียบการ Self Discharge ของตัวเก็บประจุแบบธรรมดาและแบบความจุสูง

### 4.7.1 Ultracapacitor

กราฟแสดงการ Self discharge โดยการวัดที่เวลาประมาณ 60 ชั่วโมง

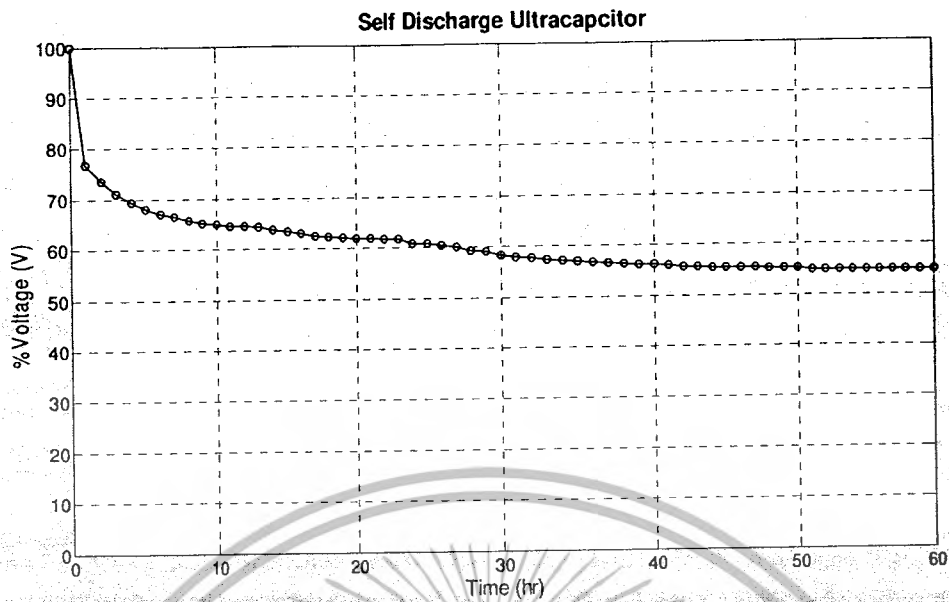


ภาพที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา ขณะ Self Discharge ในช่วงแรกประมาณ 67 นาที



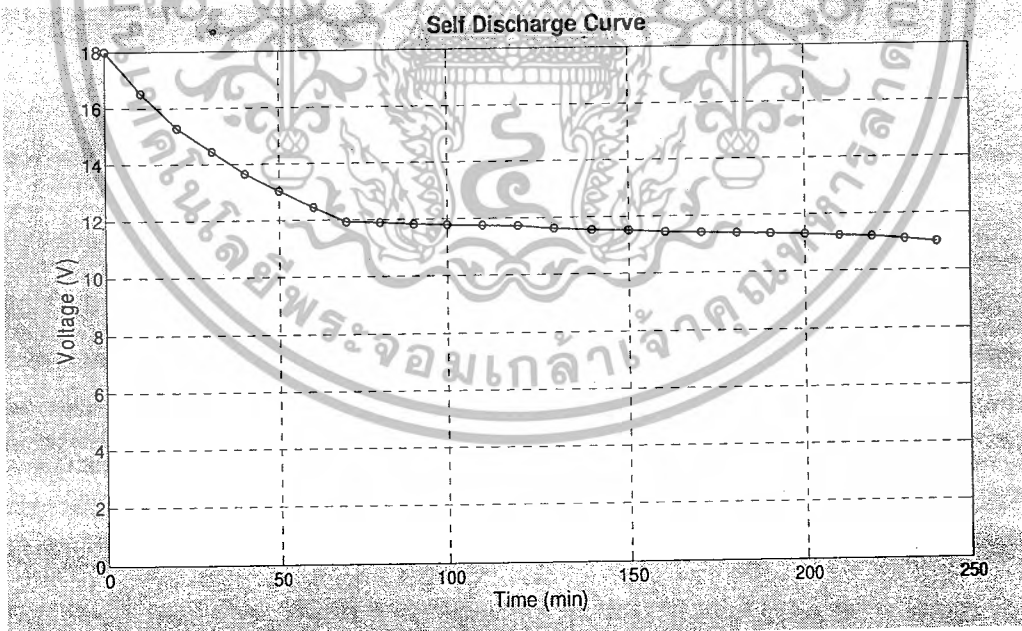
ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลา (Self discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



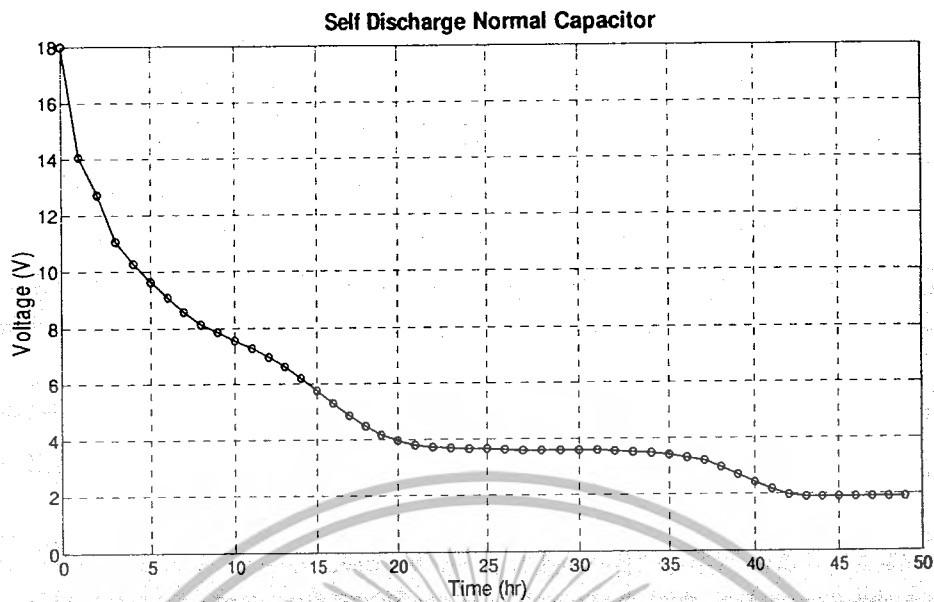
ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา  
ขณะ Self Discharge

#### 4.7.2 ตัวเก็บประจุแบบธรรมดา



ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา  
ขณะ Self Discharge ของตัวเก็บประจุแบบธรรมดาในช่วงแรก 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เหลืออยู่กับเวลา ขณะ Self Discharge ของตัวเก็บประจุแบบธรรมดาในช่วง 50 ชั่วโมง

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

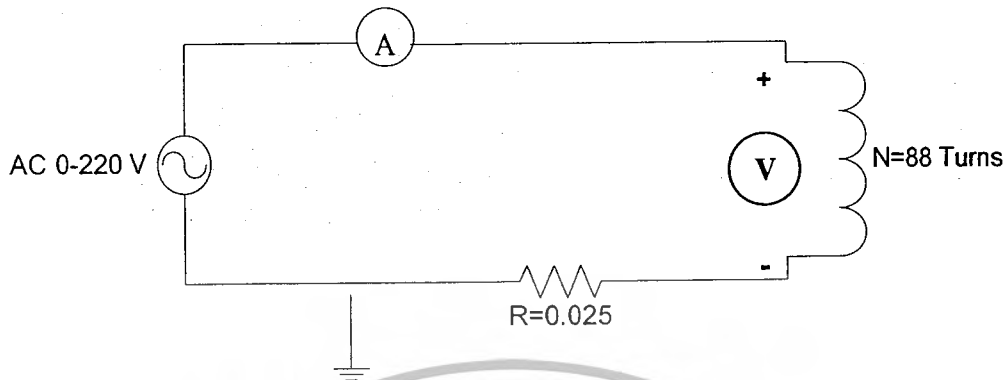
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงดันที่เหลืออยู่ขณะ Self Discharge ของ Ultracapacitor จะมีค่าประมาณ 9.87 โวลต์ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ประมาณ 54.83% ของแรงดันขณะเริ่มต้น ในเวลาประมาณ 60 ชั่วโมง

เมื่อนำมาเปรียบเทียบการ Self discharge จากตัวเก็บประจุแบบธรรมดาโดยตัวเก็บประจุแบบธรรมดาจะมีแรงดันสุดท้ายที่เหลืออยู่มีค่าประมาณ 2 volt หรือคิดเป็น 11.11% ภายในเวลาประมาณ 36 ชั่วโมง

จะพบว่าตัวเก็บประจุความจุสูงจะมีการเก็บรักษาแรงดันได้ดีกว่าตัวเก็บประจุแบบธรรมดา

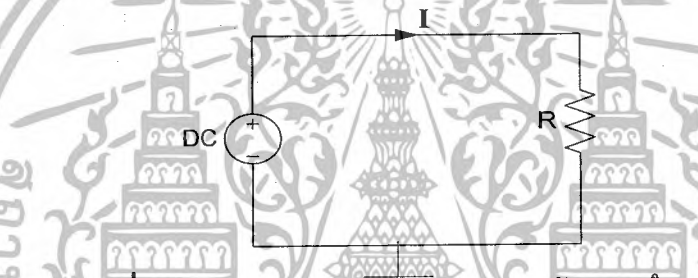
#### 4.8 การทดลองวงจรแม่เหล็ก

- วงจรการทดลอง



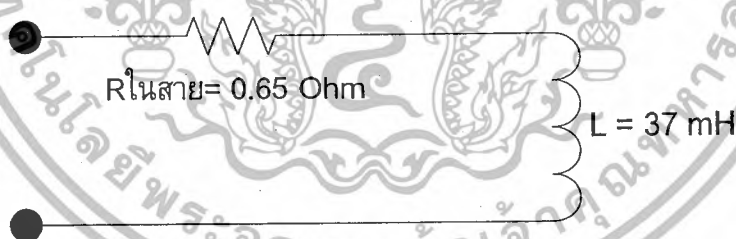
ภาพที่ 4.43 ภาพแสดงวงจรการทดลองวงจรแม่เหล็ก

- วงจรการทดลองหาค่าความต้านทานในสาย



ภาพที่ 4.44 แสดงการทดลองหาค่าความต้านทานในสาย

- Circuit Model



ภาพที่ 4.45 แสดงค่าพารามิเตอร์ของการทดลอง

#### ตารางที่ 4.9 แสดงการหาค่าความต้านทานในสาย โดย VI-Method

Voltage (V)	Current (A)	R ( $\Omega$ )
1.0400	1.6670	0.6239
1.4583	2.5000	0.5833
2.0833	2.9167	0.7143
2.5000	3.7500	0.6667
	R average	0.6470

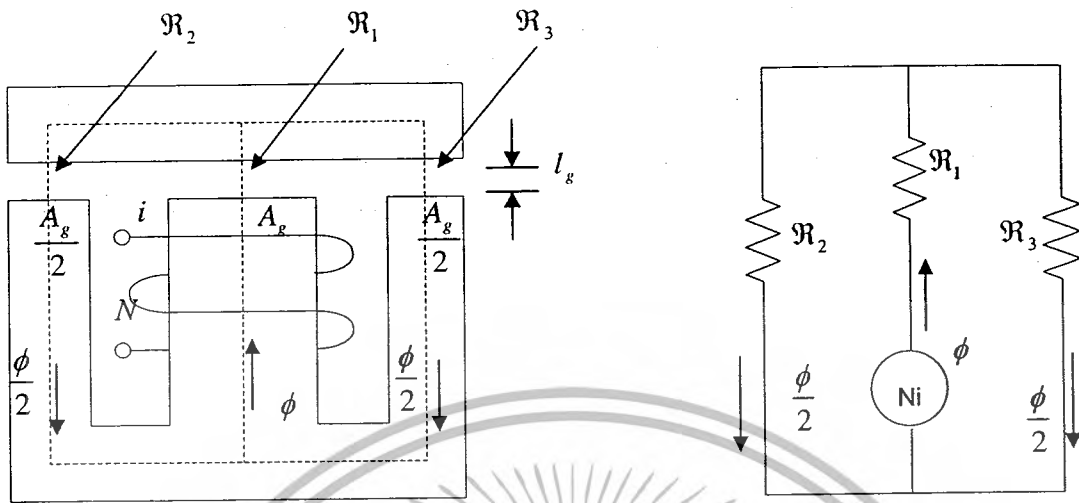
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองค่าต่างๆ ที่ช่องอากาศ 1 มม.

Current	Voltage	$\theta$	L(H)	mmf	Bmax	Hrms
1.00325	10.1599	89.19	0.03223	88.2860	0.07	114.1487
2.00018	21.4877	89.10	0.03419	176.0158	0.14	227.5782
3.00527	33.6018	89.19	0.03559	264.4638	0.22	341.9363
4.00052	45.4132	89.10	0.03613	352.0458	0.30	455.1747
4.99036	57.4942	89.10	0.03667	439.1517	0.37	567.7976
6.00481	69.5976	89.10	0.03689	528.4233	0.45	683.2206
7.00481	81.7517	89.10	0.03714	616.4233	0.53	796.9994
8.00904	93.7766	89.19	0.03727	704.7955	0.61	911.2596
9.00207	105.8350	89.10	0.03742	792.1822	0.69	1,024.24
10.0077	118.4230	89.10	0.03766	880.6776	0.77	1,138.66
11.0086	129.8790	89.10	0.03755	968.7568	0.84	1,252.54
12.0051	141.4050	87.84	0.03749	1056.4488	0.92	1,365.92
13.0056	155.2300	85.68	0.03799	1144.4928	1.01	1,479.76
14.0130	165.9750	86.94	0.03770	1233.1440	1.08	1,594.38
15.0335	177.5440	85.14	0.03759	1322.948	1.15	1,710.49
16.0189	188.7160	85.14	0.03749	1409.6632	1.23	1,822.61
17.0264	200.3400	85.32	0.03745	1498.3232	1.30	1,937.24
18.0062	210.4480	87.12	0.03720	1584.5456	1.37	2,048.72
19.0091	220.9280	86.94	0.03699	1672.8008	1.44	2,162.83
20.0009	229.2780	85.50	0.03648	1760.0792	1.49	2,275.68
21.0167	237.8700	89.82	0.03602	1849.4696	1.55	2,391.25
22.0027	245.5210	84.96	0.03551	1936.2376	1.60	2,503.44
23.0163	251.5280	85.14	0.03478	2025.4344	1.63	2,618.76
24.0015	256.8450	86.76	0.03406	2112.1320	1.67	2,730.86
25.0027	261.6110	85.14	0.03330	2200.2376	1.70	2,844.77
26.0140	265.6180	84.96	0.03250	2289.2320	1.73	2,959.84
27.0188	269.5680	86.04	0.03175	2377.6544	1.75	3,074.16
27.7078	272.1230	84.78	0.03126	2438.2864	1.77	3,152.56
		L average	0.03676			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• การหาความต้านทานแม่เหล็ก ( $\mathcal{R}$ )



ภาพที่ 4.46 แสดงวงจรแม่เหล็กแบบแกน E-I

โดย  $\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}$

$$\mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_3 = 2\mathcal{R}$$

จากการทดลอง  $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_1}$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{N^2}{L}$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{88^2}{0.0367}$$

$$\mathcal{R}_1 = 210677.03 \text{ A.t/Wb}$$

จาก  $\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g$

และ  $\mathcal{R}_g = \frac{2l_g}{\mu_0 A_g} = 202000 \text{ A.t/Wb}$

$$\mathcal{R}_c = 8677.03 \text{ A.t/Wb}$$

เพราะฉะนั้นจึงหาค่าของ  $\mu_r$  จาก  $\mu_r = \frac{l_c}{\mu_0 A_c \mathcal{R}_c}$

$$\mu_r = 9007.19$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

- Magnetic flux ( $\phi$ )

จาก 
$$\phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_r} = \frac{Ni}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g}$$

ที่  $N = 88$  turns

ตารางที่ 4.11 แสดงการหาค่า Magnetic flux

Current (A)	Flux( $\phi$ )
1.00325	0.00042
2.00018	0.00084
3.00527	0.00126
4.00052	0.00167
4.99036	0.00208
6.00481	0.00251
7.00481	0.00293
8.00904	0.00335
9.00207	0.00376
10.0077	0.00418
11.0086	0.00460
12.0051	0.00501
13.0056	0.00543
14.0130	0.00585
15.0335	0.00628
16.0189	0.00669
17.0264	0.00711
18.0062	0.00752
19.0091	0.00794
20.0009	0.00835
21.0167	0.00878
22.0027	0.00919
23.0163	0.00961
24.0015	0.01003
25.0027	0.01044
26.0140	0.01087
27.0188	0.01129
27.7078	0.01157

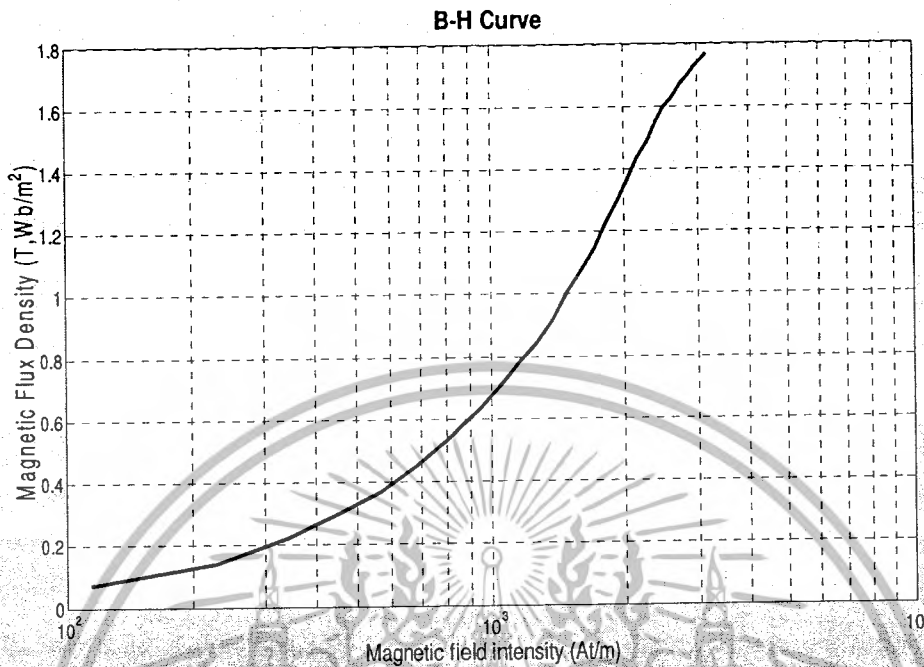
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงการหาค่าความสูญเสีย (Loss)

Current	Voltage (V)	Lossในสาย	Core Loss
1.00325	10.15990	0.6542	0.1441
2.00018	21.48770	2.6005	0.6751
3.00527	33.60180	5.8706	2.8548
4.00052	45.41320	10.4027	5.1361
4.99036	57.49420	16.1874	7.2102
6.00481	69.59760	23.4375	6.5644
7.00481	81.75170	31.8938	8.9949
8.00904	93.77660	41.6941	16.5154
9.00207	105.83500	52.6742	14.9649
10.0077	118.42300	65.1001	18.6154
11.0086	129.87900	78.7730	22.4581
12.0051	141.40500	93.6796	63.9821
13.0056	155.23000	109.9447	152.0742
14.0130	165.97500	127.6367	124.1555
15.0335	177.54400	146.9040	226.1303
16.0189	188.71600	166.7934	256.1145
17.0264	200.34000	188.4339	278.3112
18.0062	210.44800	210.7451	190.3943
19.0091	220.92800	234.8748	224.1840
20.0009	229.27800	260.0234	359.7951
21.0167	237.87000	287.1061	15.7056
22.0027	245.52100	314.6772	474.5831
23.0163	251.52800	344.3375	490.4724
24.0015	256.84500	374.4468	348.4178
25.0027	261.61100	406.3378	554.1606
26.0140	265.61800	439.8733	607.0330
27.0188	269.56800	474.5101	502.9921
27.7078	272.12300	499.0194	685.9843

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

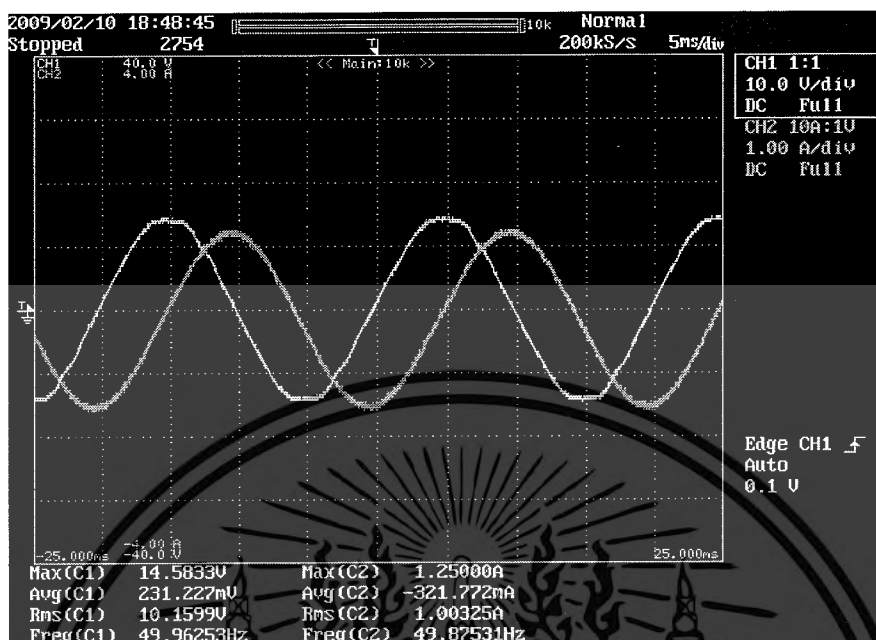
เมื่อนำค่า  $B_{max}$  และ  $H_{rms}$  มาเขียนกราฟจะได้กราฟ ดังรูป



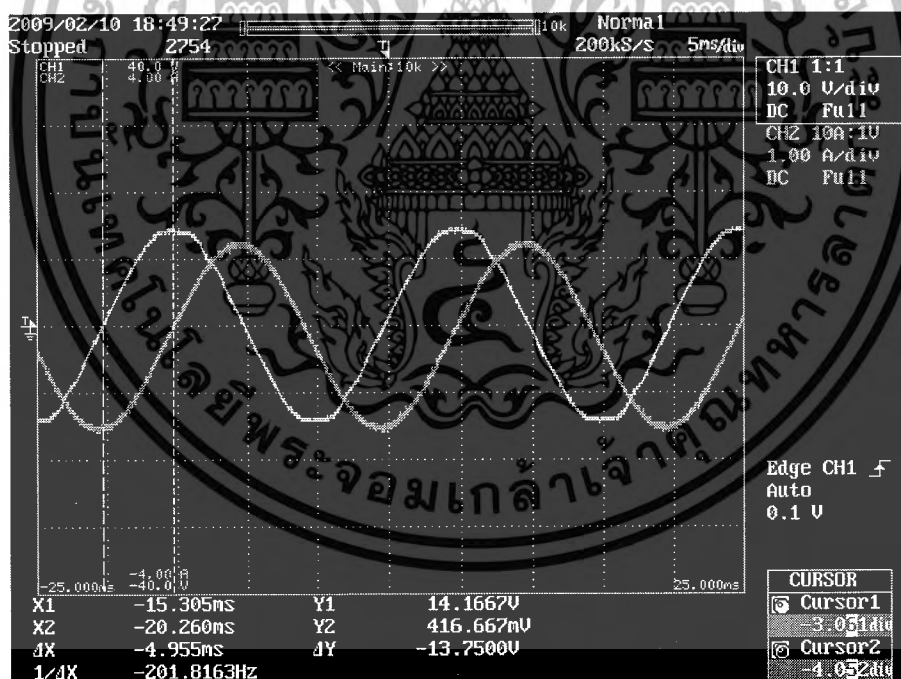
ภาพที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{max}$  กับ  $H_{rms}$

จากกราฟเป็นการพล็อตระหว่างค่า  $B_{max}$  และค่า  $H_{rms}$  ซึ่งจะเห็นว่า กราฟค่าของ  $B_{max}$  จะเริ่มโค้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเหนี่ยวนำที่นำมาทดสอบเริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว และยังมีเสียงดังและสั่นสะเทือน

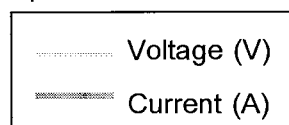
- กราฟการทดลองวงจรแม่เหล็ก



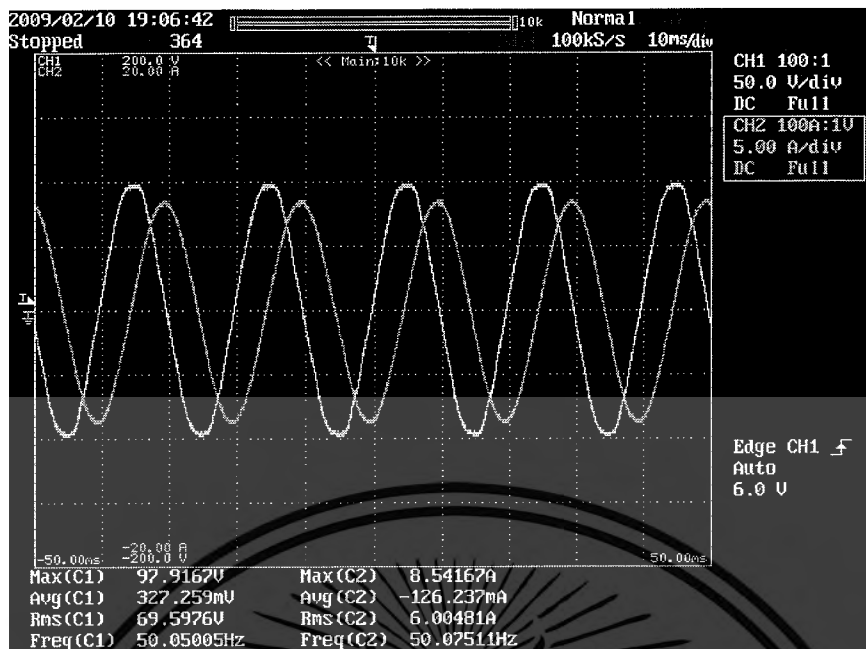
ภาพที่ 4.48 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 1.00325 A



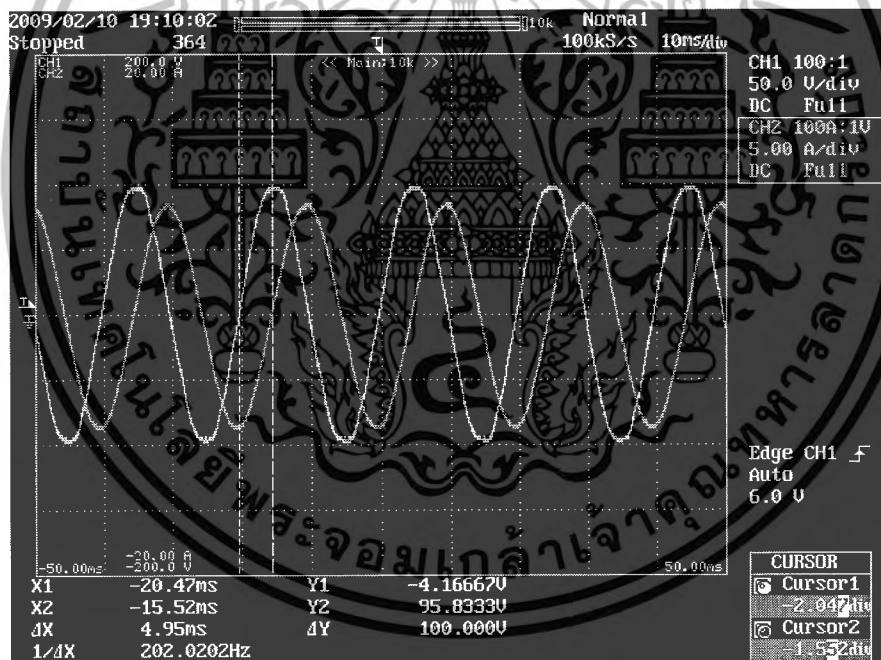
ภาพที่ 4.49 กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน



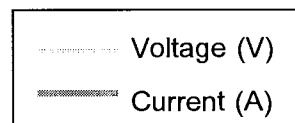
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



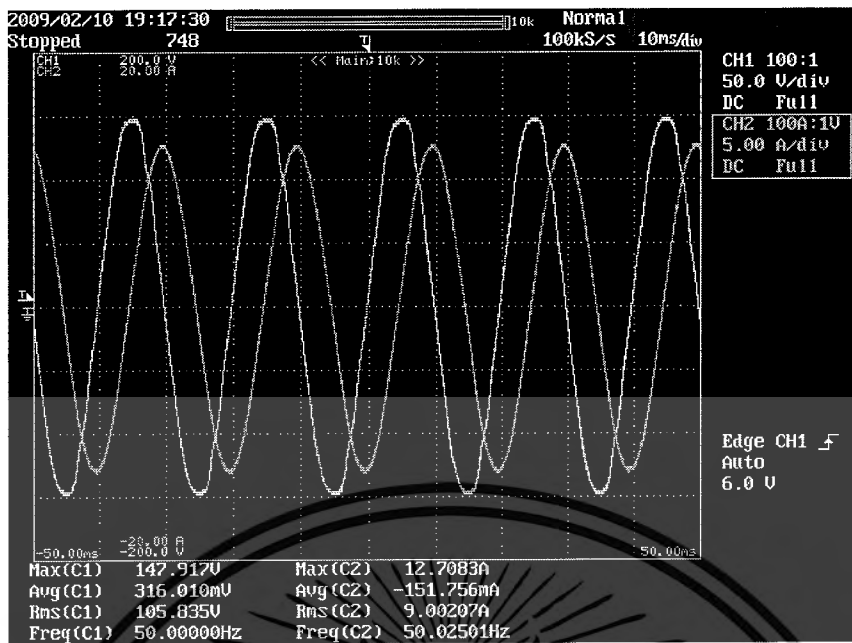
ภาพที่ 4.50 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสระดับเท่ากับ 6.00481 A



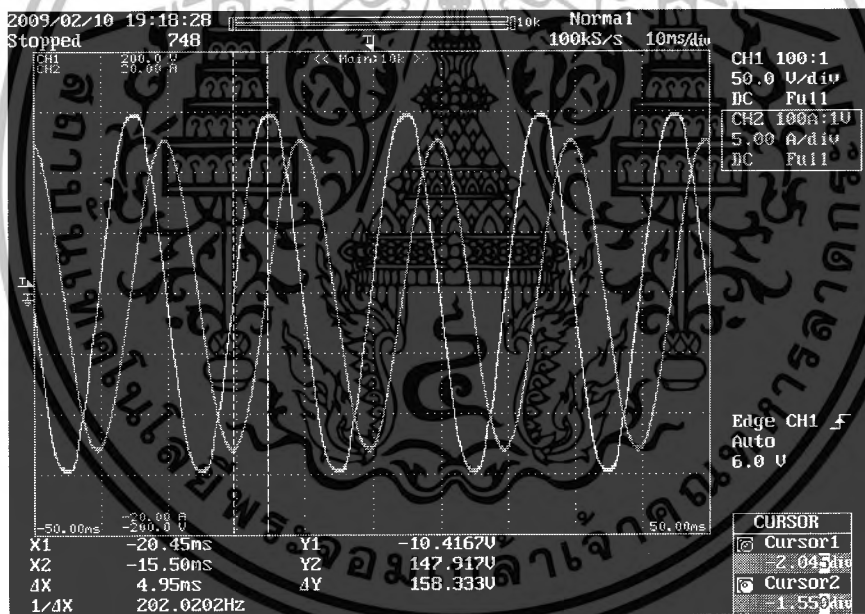
ภาพที่ 4.51 กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสระดับกับแรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



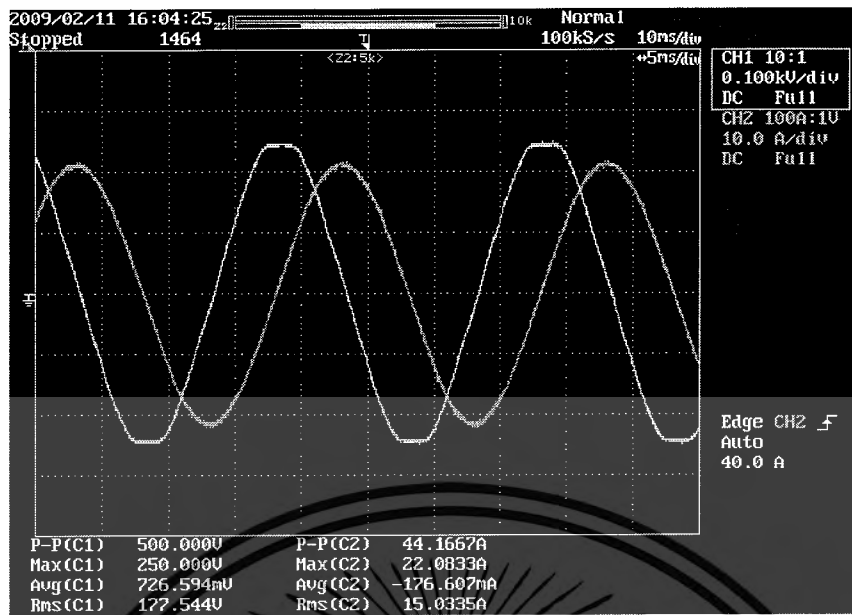
ภาพที่ 4.52 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 9.00207 A



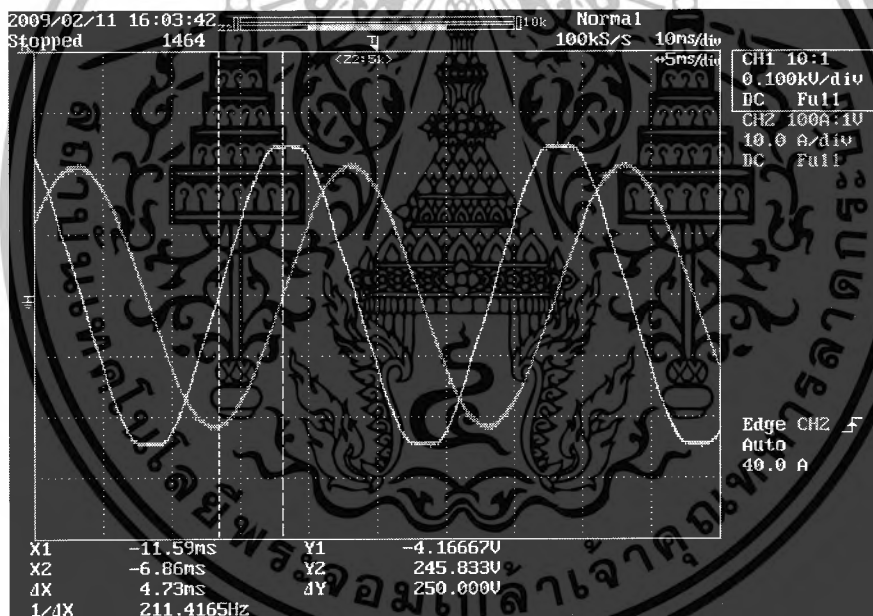
ภาพที่ 4.53 กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน

	Voltage (V)
	Current (A)

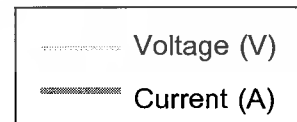
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



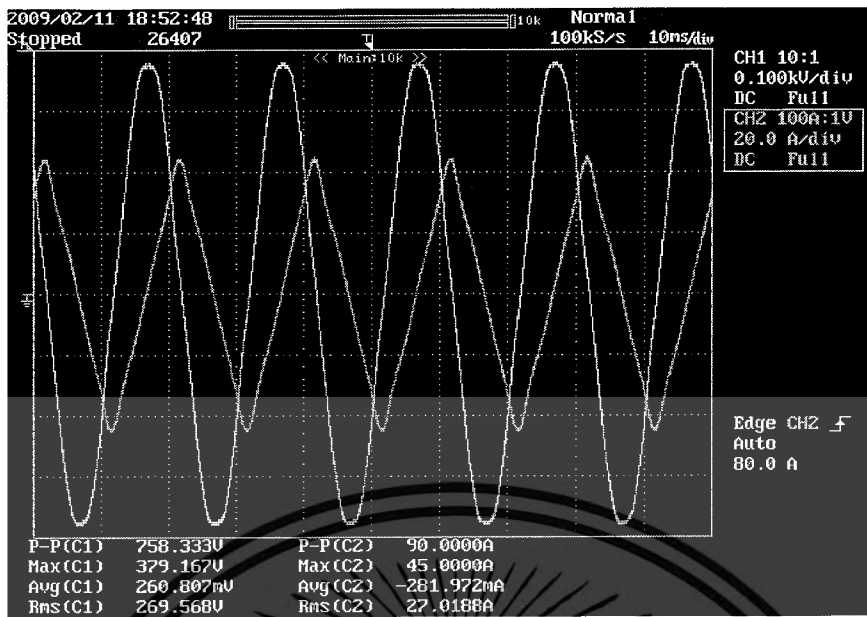
ภาพที่ 4.54 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 15.0335 A



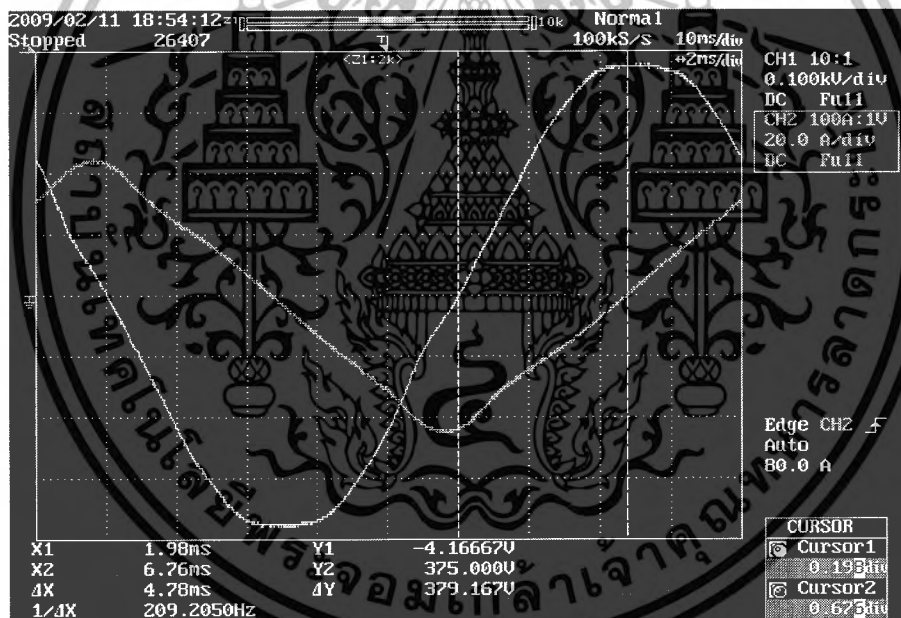
ภาพที่ 4.55 กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.56 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันที่กระแสกระตุ้นเท่ากับ 27.0188 A



ภาพที่ 4.57 กราฟแสดงมุม lagging ของกระแสกระตุ้นกับแรงดัน

-----	Voltage (V)
-----	Current (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.1 การทดลอง Damped Oscillation

- การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำในกรณี Critically – Damped

ในกรณี Critically – Damped เมื่อ  $R^2 C^2 - 4LC$  มีค่าเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น} \quad R^2 C^2 &= 4LC \\ L &= \frac{R^2 C}{4} \\ L &= \frac{0.73458^2 \times 1.35}{4} \\ L &= 186.743 \text{ mH} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่นำมา Excite ควรมีค่าประมาณ 186.743 mH และควรมีถี่เรโซแนนท์ เท่ากับ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.188083 \times 1.35}} = 0.316 \text{ Hz}$$

ตารางที่ 4.13 การทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ ที่ช่องอากาศ 0.3 mm. N=107 Turns

Current (A)	Voltage (V)	degree	L(H)	Bmax
1.0013	53.5320	81.0000	0.1681	0.3480
1.5023	87.5611	81.0000	0.1832	0.5691
2.0085	122.0340	80.4600	0.1907	0.7932
2.5059	156.9180	81.6300	0.1972	1.0200
3.0137	192.1220	82.4400	0.2012	1.2488
		<b>L average</b>	0.188083	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง  $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_l}$

$$\mathcal{R}_l = \frac{N^2}{L}$$

$$\mathcal{R}_l = \frac{107^2}{0.188083}$$

$$\mathcal{R}_l = 60872.061 \quad \text{A.t/Wb}$$

จาก  $\mathcal{R}_l = \mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g$

และ  $\mathcal{R}_g = \frac{2l_g}{\mu_0 A_g} = 60630.4545 \quad \text{A.t/Wb}$

$$\mathcal{R}_c = 241.607 \quad \text{A.t/Wb}$$

จากการคำนวณ  $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_l}$  (N=107 Turns,  $\mathcal{R}_g = 60630.4545 \text{ A.t/Wb}$ )

$$L = 0.188835 \text{ H}$$

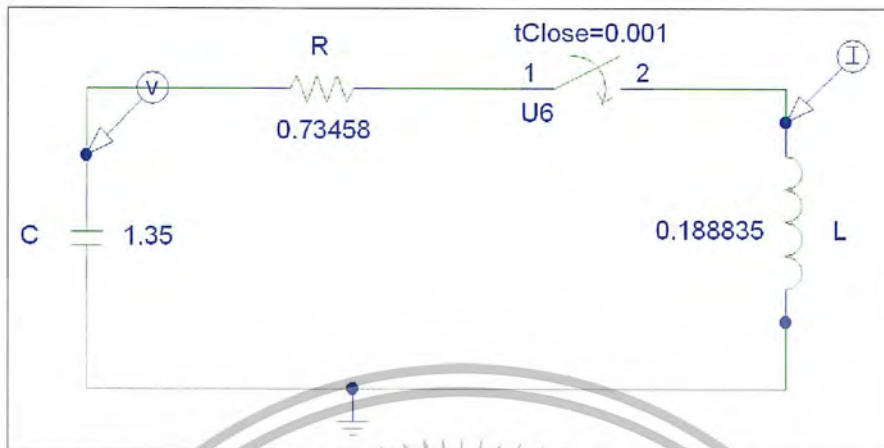
Percentage difference

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง} = \frac{2|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2}$$

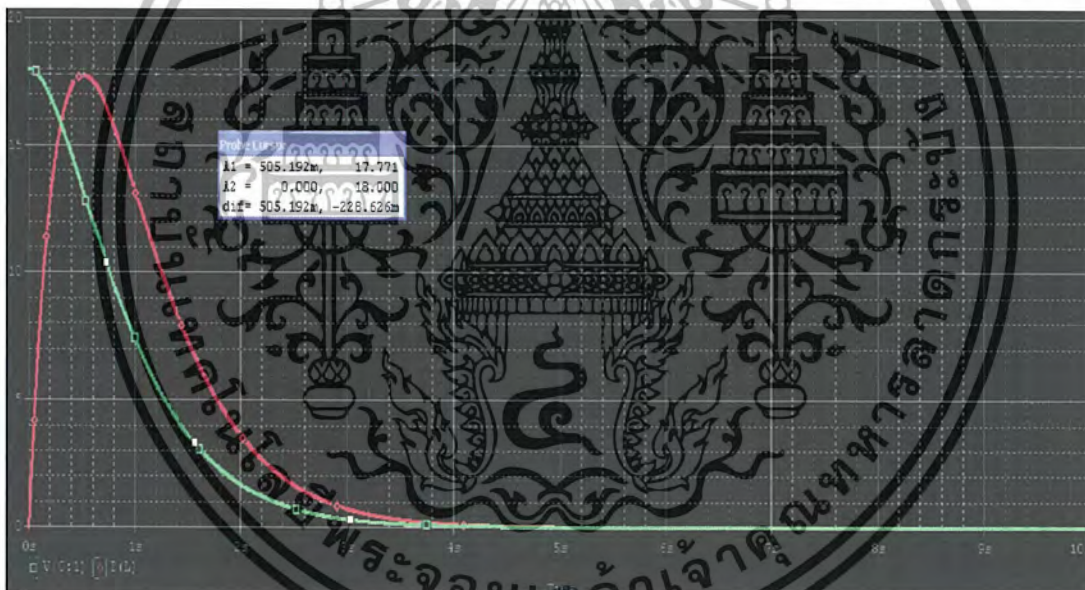
$$\therefore \% \text{ diff ระหว่างการทดลองและทางทฤษฎี} \approx 0.4 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

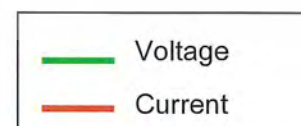
การจำลอง PSpice แบบ Critically Damped ที่ค่า  $L = 0.188835 \text{ H}$  ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.58 ภาพแสดงวงจรการจำลองที่กรณี Critically Damped



ภาพที่ 4.59 ภาพแสดงผลการจำลองการ Excite ชดลวด  
โดยแกนนอนเป็นเวลาแกนตั้งเป็นกระแสและแรงดัน

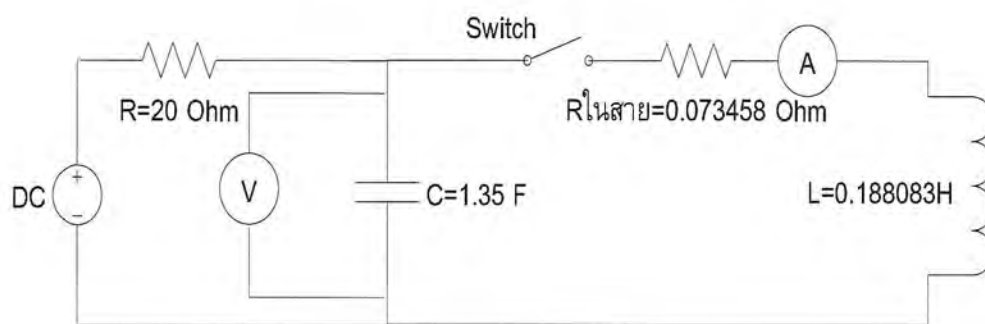


### วิเคราะห์ผล

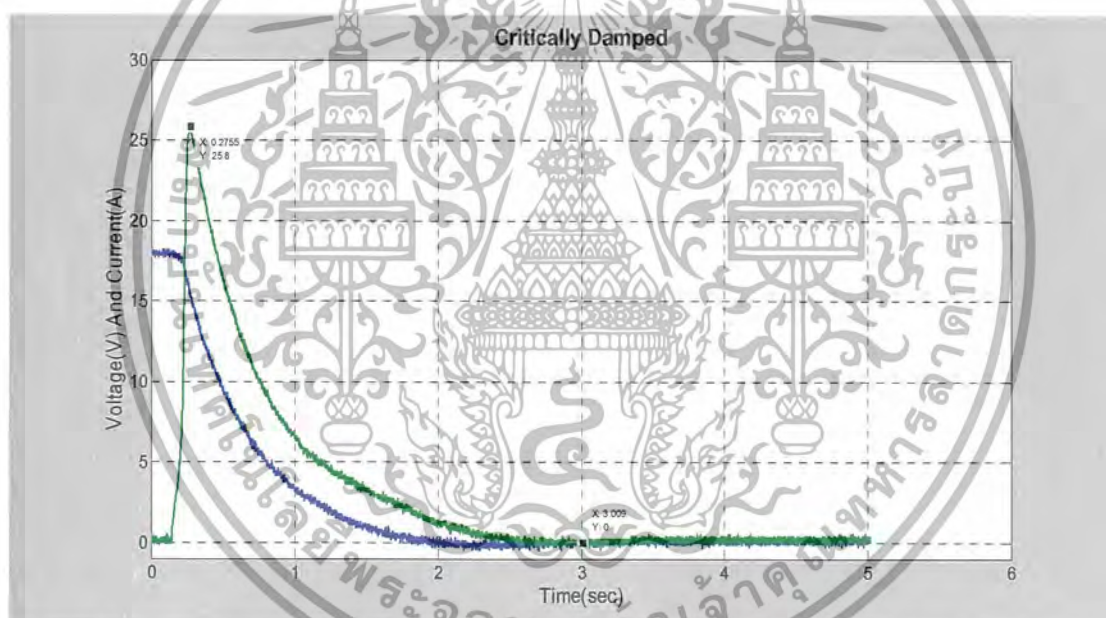
จากการจำลองพบว่าค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 17.771 A และเวลาในการคายประจุประมาณ 5 วินาที ลักษณะของกราฟจะเป็นแบบ Exponential ซึ่งตามทฤษฎีเป็นไปตามแบบ Critically – Damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง Critically Damped ที่ค่า  $L = 0.188835 \text{ H}$  ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.60 ภาพแสดงวงจรการทดลองที่กรณี Critically - Damped



ภาพที่ 4.61 ภาพแสดงกระแสและแรงดันกับเวลาที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ชดลวด

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 25.8 A และเวลาในการคายประจุประมาณ 3 วินาที ลักษณะของกราฟจะเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งตามทฤษฎีเป็นไปตามแบบ Critically - Damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำในกรณี Under – Damped

ในกรณี Under – Damped เมื่อ  $R^2 C^2 < 4LC$  มีค่าเป็นลบ

$$L \gg 186.743 \text{ mH}$$

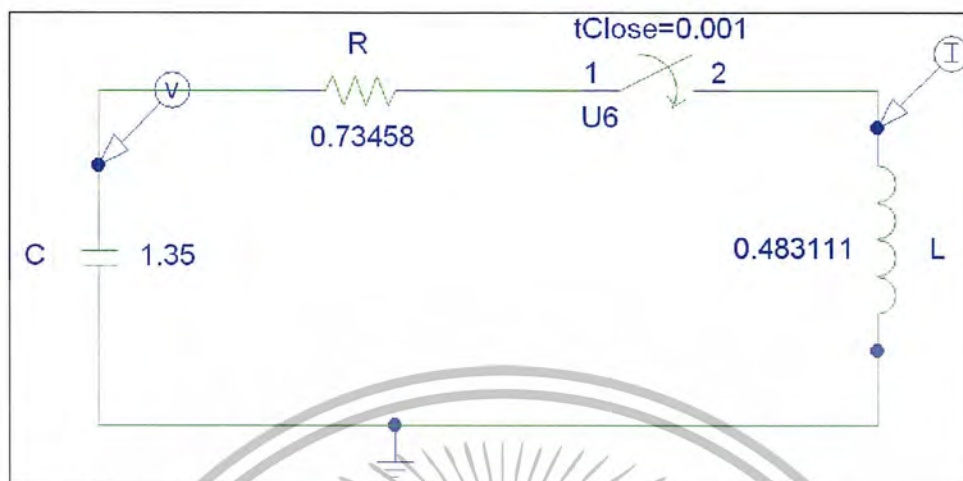
ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่นำมา Excite ควรมีค่ามากกว่า 186.743 mH และความถี่เรโซแนนท์ เท่ากับ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.48311 \times 1.35}} = 0.197 \text{ Hz}$$

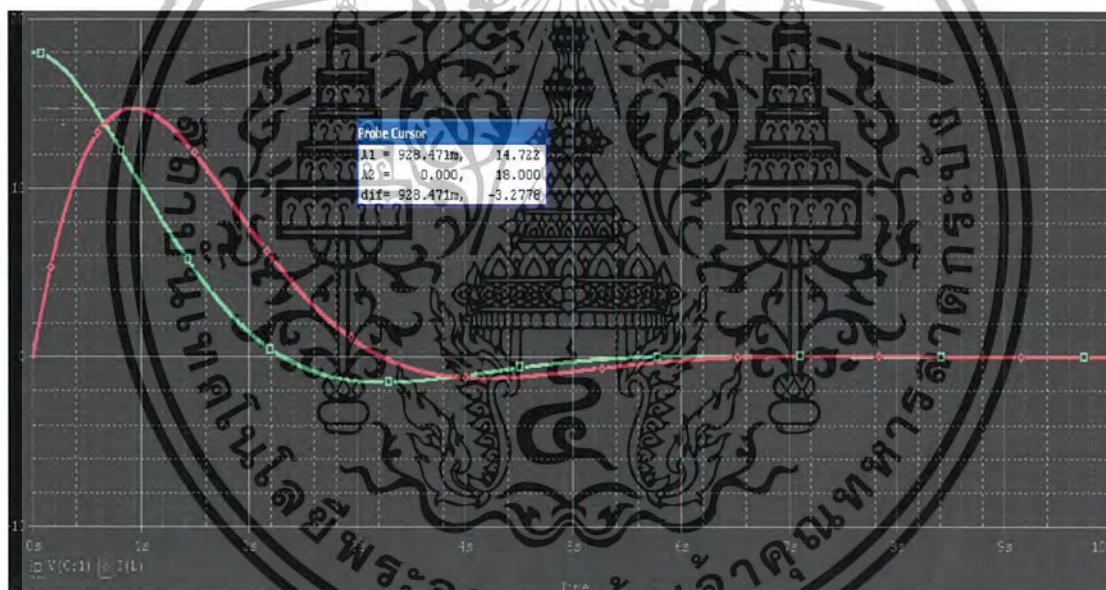
ตารางที่ 4.14 การทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ ที่ช่องอากาศ 0.3 mm. N=166 turns

Current (A)	Voltage (V)	degree	L(H)	Bmax
0.2992	35.6684	80.8200	0.3746	0.2318
0.6009	87.8128	80.6400	0.4589	0.5708
0.9004	144.4040	84.4200	0.5081	0.9386
1.2019	202.8280	80.7300	0.5302	1.3184
1.5002	258.7750	81.9900	0.5437	1.6820
L average			0.483111	

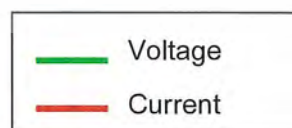
การจำลอง PSpice แบบ Under Damped ที่ค่า  $L = 0.483111$  H ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.62 ภาพแสดงวงจรการจำลองโปรแกรม PSpice ที่กรณี Under Damped



ภาพที่ 4.63 ภาพแสดงผลการจำลองการ Excite ขดลวด โดยแกนนอนเป็นเวลาแกนตั้งเป็นกระแสและแรงดัน

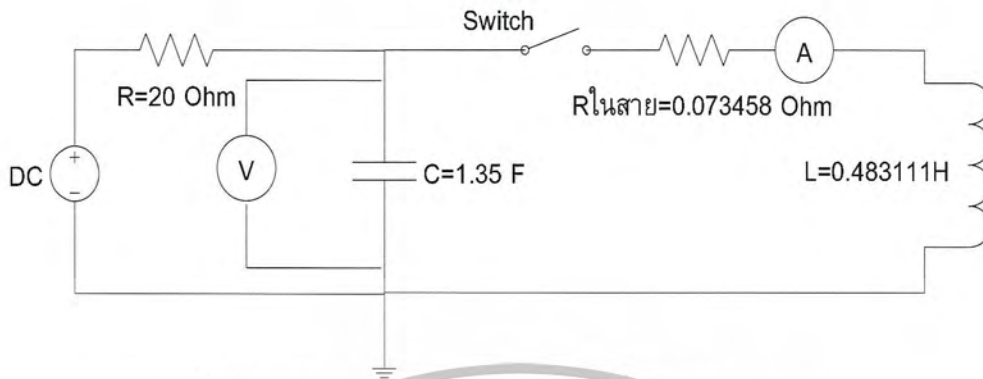


### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการจำลองพบว่าค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 14.722 A และกระแสต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่ -1.2112 A โดยลักษณะของกราฟจะเป็นแบบ under - shoot ซึ่งตามทฤษฎีเป็นไปตามแบบ Under - Damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

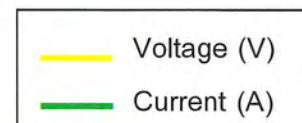
การทดลอง Under Damped ที่ค่า  $L = 0.483111 \text{ H}$  ที่ได้จากการทดลอง



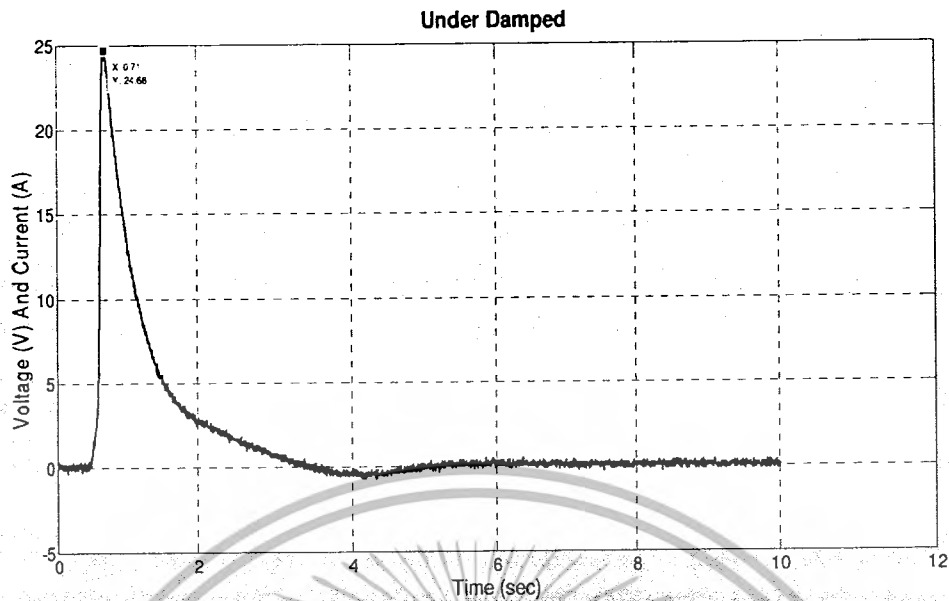
ภาพที่ 4.64 ภาพแสดงวงจรการทดลองที่กรณี Under - Damped



ภาพที่ 4.65 ภาพแสดงกระแสและแรงดันกับเวลาที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ขดลวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.66 ภาพแสดงกระแสที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ขดลวด

#### วิเคราะห์ผล

จากการทดลองพบว่าค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 24.68 A และกระแสต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่ -1.25 A โดยลักษณะของกราฟจะเป็นแบบ under - shoot ซึ่งตามทฤษฎีเป็นไปตามแบบ Under - Damped

### การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำในกรณี Over – Damped

ในกรณี Over – Damped เมื่อ  $R^2 C^2 > 4LC$  มีค่าเป็นบวก

$$L \ll 186.743 \text{ mH}$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่นำมา Excite ควรมีค่าน้อยกว่า 186.743 mH และความถี่เรโซแนนท์ เท่ากับ

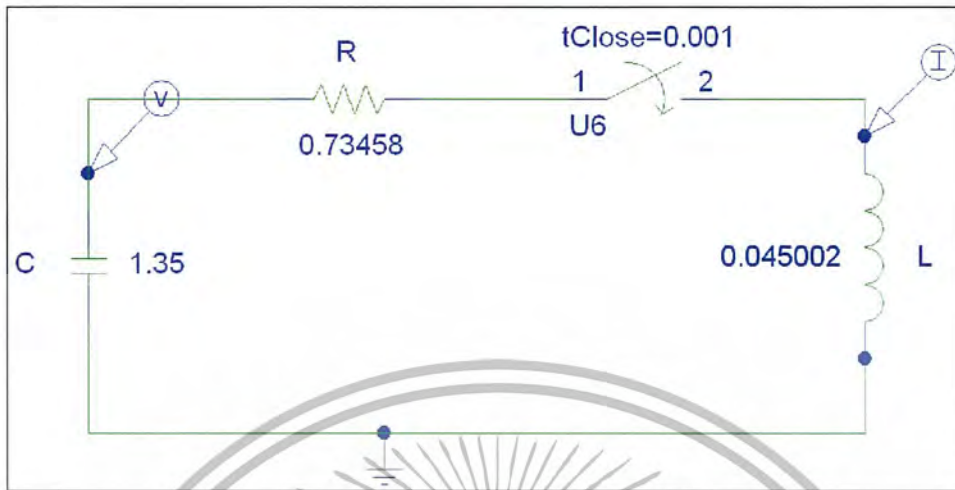
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.045002 \times 1.35}} = 0.646 \text{ Hz}$$

ตารางที่ 4.15 การทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ ที่ช่องอากาศ 1 mm. N=107 turns

Current (A)	Voltage (V)	degree	L(H)	B max
1.0035	12.6967	85.8600	0.0402	0.0825
2.0101	26.5472	86.4000	0.0420	0.1726
3.0026	40.4908	85.3200	0.0428	0.2632
4.0098	55.7572	85.3200	0.0441	0.3624
5.0062	70.4378	85.5000	0.0446	0.4578
6.0040	85.8575	86.2200	0.0454	0.5581
7.0037	100.9961	87.6600	0.0459	0.6565
8.0011	116.5750	85.8600	0.0463	0.7577
9.0066	131.4510	87.8400	0.0464	0.8544
10.0174	146.6380	87.4800	0.0466	0.9531
11.0239	162.8370	87.6600	0.0470	1.0584
12.0084	177.2290	87.4800	0.0469	1.1520
13.0187	192.1230	87.4800	0.0469	1.2488
		L average	0.045002	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

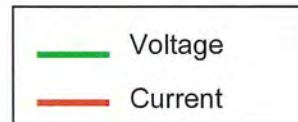
การจำลอง Over Damped ที่ค่า  $L = 0.045002 \text{ H}$  ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.67 ภาพแสดงวงจรการจำลองที่กรณี Over - Damped



ภาพที่ 4.68 ภาพแสดงผลการจำลองการ Excite ชดลวด โดยแกนนอนเป็นเวลาแกนตั้งเป็นกระแสและแรงดัน

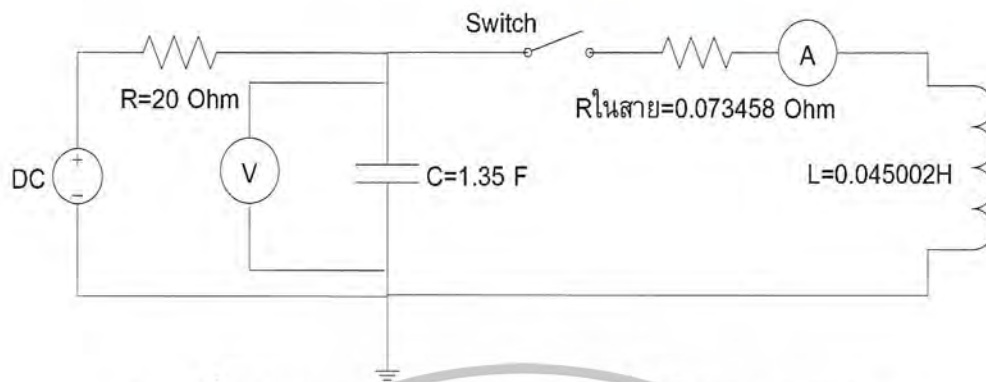


**วิเคราะห์ผล**

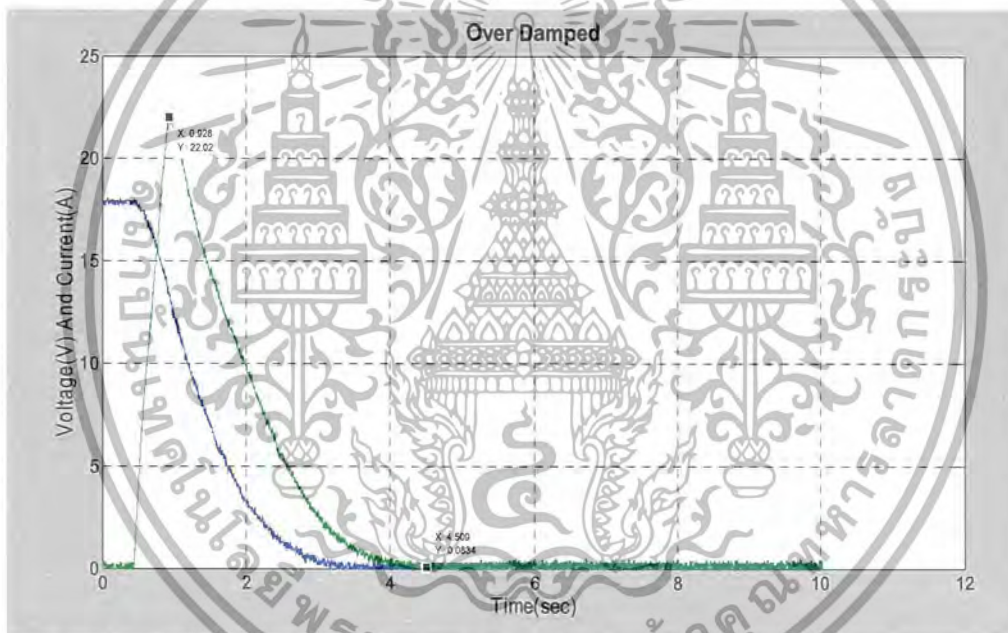
จากการจำลองพบว่าค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 21.205 A โดยจะมีเวลาทางคลื่นยาวกว่าการ Damped แบบ Critical Damped โดยลักษณะของกราฟจะเป็นแบบ Exponential ซึ่งตามทฤษฎีเป็นไปตามแบบ Over - Damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง Over Damped ที่ค่า  $L = 0.045002 \text{ H}$  ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.69 ภาพแสดงวงจรการทดลองที่กรณี Over - Damped



ภาพที่ 4.70 ภาพแสดงกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นจากการทดลอง Excite ชดลวด

### วิเคราะห์ผล

จากการทดลองพบว่าค่ากระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 22.02 A โดยลักษณะของกราฟจะเป็นแบบ Exponential โดยมีเวลาหาค้นสั้นยาวกว่าแบบ Critically - Damped โดยมีเวลาหาค้นสั้นยาวประมาณ 4.5 วินาที ซึ่งตามทฤษฎีเป็นไปตามแบบ Over - Damped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลของโครงการ

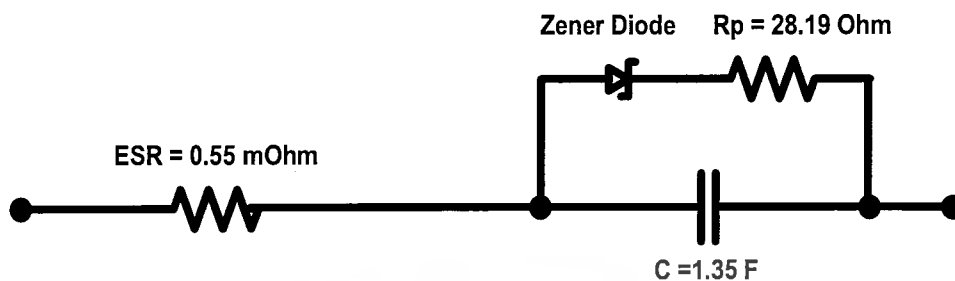
จากการทดลองเมื่อทำการทดลองในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวเก็บประจุความจุสูง โดยการทดลองตามหลักการพื้นฐาน คือ RC Time Constant และการลดลงแบบ Exponential ในการหาค่า Capacitance ที่แท้จริง ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้ไม่ตรงกับ Name plate เป็นเพราะสินค้าไม่มีการรับรองจากบริษัทและไม่มี Datasheet ใช้การคายประจุแบบทันทีทันใดและการหาพื้นที่ใต้กราฟของกระแสและแรงดันเทียบกับเวลา ในการหาค่าความต้านทานภายใน (ESR - Equivalent Series Circuit) และใช้การหาพื้นที่ใต้กราฟยังสามารถนำไปหาค่าพลังงานในตัวเก็บประจุในการเก็บประจุและคายประจุได้ด้วย ได้พบว่าการเก็บประจุโดยมีความต้านทานจำกัดกระแสสูงค่าหนึ่งหรือให้กระแสอัดประจุต่ำค่าหนึ่งจะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บค่าพลังงานได้สูงกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าสูง ส่วนด้านการคายประจุพบว่าเมื่อคายประจุใส่โหลดที่มีความต้านทานต่ำหรือจ่ายแบบทันทีทันใดจะให้ค่าพลังงานสูงกว่าจ่ายแบบช้าๆหรือจ่ายแบบกระแสต่ำๆ นอกจากนี้ยังทดลองถึงความสามารถของเวลาในการเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุความจุสูงเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบธรรมดา โดยการ Self Discharge พบว่าจะมีแรงดันเริ่มคงที่อยู่ที่ค่าๆหนึ่ง ซึ่งได้สันนิษฐานว่าน่าจะมีผลมาจากพารามิเตอร์หนึ่งในตัวเก็บประจุความจุสูงซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายซีเนอร์ไดโอด คือกระแสจะไหลผ่านตัวมันได้ต้องมีแรงดันคร่อมอยู่ตามค่าที่กำหนด จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรักษาแรงดันให้คงที่ โดยต่ออนุกรมอยู่กับความต้านทาน Self Discharge และยังพบอีกว่าตัวเก็บประจุความจุสูงจะสามารถเก็บพลังงานได้นานกว่าแบบธรรมดา เพราะมีผลของความต้านทานขณะ Self Discharge ซึ่งต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุแสดงดังวงจรสมมูล (Equivalent Circuit)

จากการทดลองนำตัวเก็บประจุความจุสูงไปประยุกต์ใช้ในด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำโดยทดลองเกี่ยวกับการหน่วง (Oscillation) ซึ่งแยกเป็น 3 กรณี คือ

1. Critically – Damped
2. Under - Damped
3. Over – Damped

โดยใช้หลักการของการเรโซแนนซ์ดังที่อธิบายไปแล้ว ส่วนผลการทดลองกับผลของการจำลองให้ลักษณะคล้ายๆกัน โดยจากการทดลองพบว่า ผลของการหน่วงในตัวเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานในสายและค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดลองตัวเก็บประจุความจุสูงพื้นฐานได้วงจรสมมูล ดังนี้



Parameter \ Type	Ultra capacitor
ESR (mΩ)	0.55
Energy Density(J/kg)	270
Power Density(Wh/kg)	0.075

### ข้อเสนอแนะ

- จากที่ได้ทดลองควรศึกษาแนวโน้มในการนำไปพัฒนาใช้งาน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด
- ควรศึกษาการนำประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น การแก้ไขปัญหาค่า Damped หรือ Overshoot ในการ Start Motor
- ศึกษาการประยุกต์ใช้งาน Ultra capacitor ร่วมกับแบตเตอรี่
- ศึกษาการประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรม เพื่อเป็นเซลล์เชื้อเพลิงใหม่ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

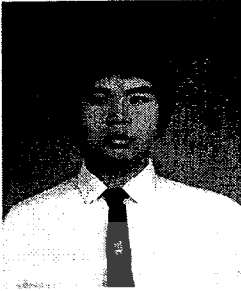
## บรรณานุกรม

- [1] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, "ปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง., 2548.
- [2] รศ.พิชิต ล้ายอง, เอกสารประกอบการสอนวิชาการแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเชิงกลและเครื่องจักรกลไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน / วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 4 มกราคม 2549
- [4] R. Kötz, M. Carlen, *Electrochemical Acta* **45**, 2483 - 2498 (2000).
- [5] M. Hahn, M. Bärtsh, B. Schnyder, R. Kötz, M. Carlen, Ch. Ohler, E. Krause, *PSI Scientific Report.1999 / Volume 5*, 79 (1999).
- [6] M. Bärtsh, A. Braun, B. Schnyder, R. Kötz, O. Haas, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* **2**, 273 (1999).
- [7] P. Dietrich, A. Amstutz, R. Schelbert, O. Garcia, F. Büchi, R. Kötz, G. G. Scherer, *PSI Scientific Report 1999 / Volume 5*, 94 (1999).
- [8] D. L. Boos, H. A. Adams, T. H. Hacha, and J. E. Metcalfe, "A 3 Cubic Inch 200,000 Microfarad Capacitor", 21st Electronic Components Conference, pp. 338-342, 1971.
- [9] Kei Sanada and Masashi Hosokawa, "Electric Double Layer Capacitor 'Super' Capacitor", *NEC Research and Development*, 55, pp. 21-28, 1979.
- [10] M. Rose, "Performance Characteristics of Large Surface Area Chemical Double Layer Capacitors", *Proc. 33rd International Power Sources Symposium*, June 13-16, 1988, Cherry Hill, NJ.
- [11] J. O'M Bockris, "Overview of the Status of Solid-Liquid Interface Science", *Materials Science and Engineering*, 53, pp. 47-64, 1982.
- [12] I. L. Cooper and J. A. Harrison, "The Role of Ion-Ion Interactions in the Electrical Double Layer: Symmetrical Electrolyte Containing Equal Size Ions", *Electrochemical Acta*, 29, #8, 1147- 1159, 1984.
- [13] G. N. Glasoe and J. V. Lebacqz ed., "Pulse Generators", *MIT Rad Lab Series #5*, McGraw-Hill Book CO, New York and London, 1948.
- [14] A. Burke and M. Miller, "Characteristics of advanced carbon-based ultracapacitors", *The 10th international seminar on double-layer capacitors*, Deerfield Beach 2000
- [15] V. Hermann, A. Schneuwly, R. Gallay, "High performance double-layer capacitor for power electronic applications", *Proceeding PCIM2001, Nürnberg, 2001*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] E. Faggioli, P. Rena, V. Danel, X. Andrieu, R. Mallant, H. Kahlen, "Supercapacitors for the energy management of electric vehicles", J. of power sources, 84, 261, 1999
- [17] Ph. Desprez et al., "Supercondensateurs: un tampon de puissance pour sources d'énergie", Colloque Piles à combustible et Interfaces pour les transports, Belfort 2000
- [18] P. Dietrich et al., "Supercapacitors for peak-power application with fuel cell system", Proceedings of the 2nd Boostcap meeting, Fribourg, Switzerland, March 29, 2001
- [19] R. Kötz et al., "Supercapacitor for peak-power demand in full-cell-driven cars", ECS Proceedings, PV 2001-21, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ
- [20] R. Schöttle, G. Threin, "Electrical power supply systems: Present and future", VDI Berichte, Nr. 1547, 2000
- [21] G. Pereira et al., "Transport urbain sans catenaire et nouvelles techniques de stockage", Colloque Piles à combustible et Interfaces pour les transports, Belfort 2000
- [22] A. Rufer, "Key developments for supercapacitive energy storage: power electronic converters, systems and control", 2nd Boostcap meeting, Fribourg, 2001.
- [23] [www.google.co.th](http://www.google.co.th)
- [24] [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com)

## ประวัติผู้เขียน



นายจิติวัชร ศรีอมรรัตน์ รหัสนักศึกษา 48010778  
 เกิดวันพุธที่ 7 พฤษภาคม 2529 ที่จังหวัดแพร่  
 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่  
 โรงเรียนพิริยาลัยจังหวัดแพร่  
 เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

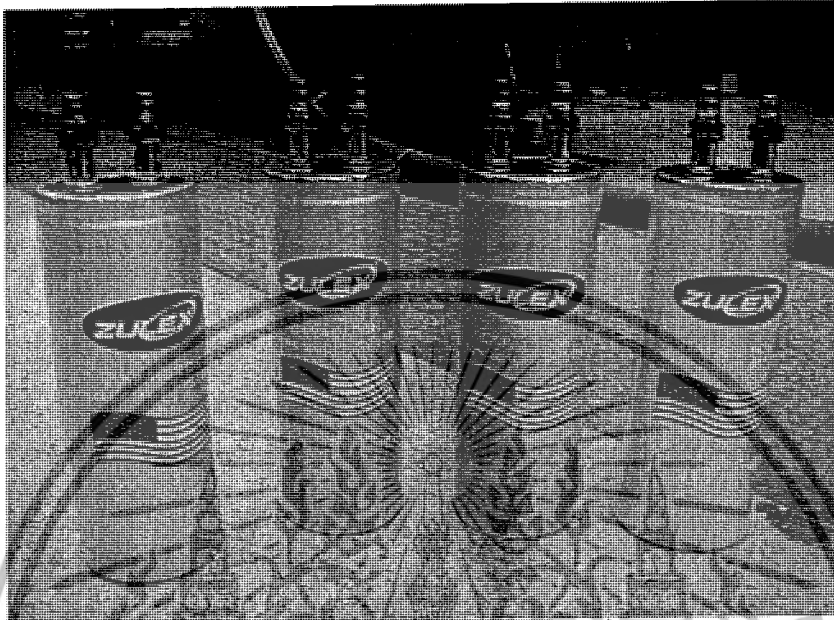


นายสันต์ สิงหนเดช รหัสนักศึกษา 48010793  
 เกิดวันพุธที่ 25 ธันวาคม 2529 ที่จังหวัดพิษณุโลก  
 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่  
 โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม  
 เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายวิศรุต สิมันตะ รหัสนักศึกษา 48010840  
 เกิดวันเสาร์ที่ 30 มีนาคม 2528 ที่จังหวัดยโสธร  
 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่  
 โรงเรียนทรายมูลวิทยา  
 เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก ก  
(รูปการทดลอง)



ภาพที่ ก.1 ภาพแสดงตัวเก็บประจุความจุสูงที่นำมาทดลอง

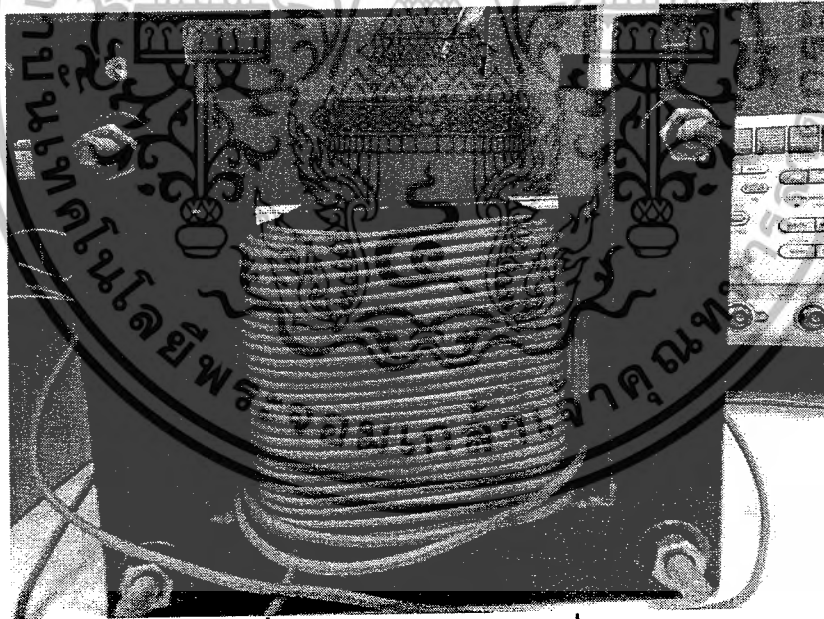


ภาพที่ ก.2 ภาพแสดงการทดลองอัดประจุและคายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

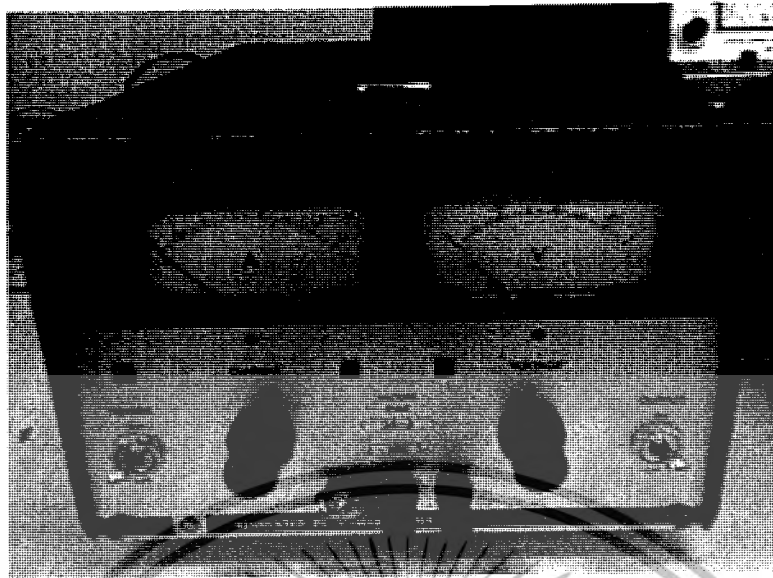


ภาพที่ ก.3 ภาพแสดงการทดลองกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ

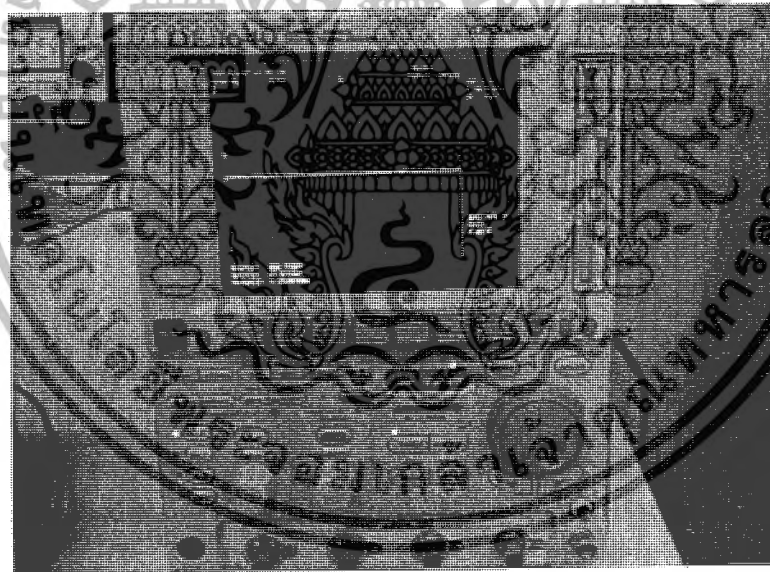


ภาพที่ ก.4 ภาพแสดงขดลวดเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

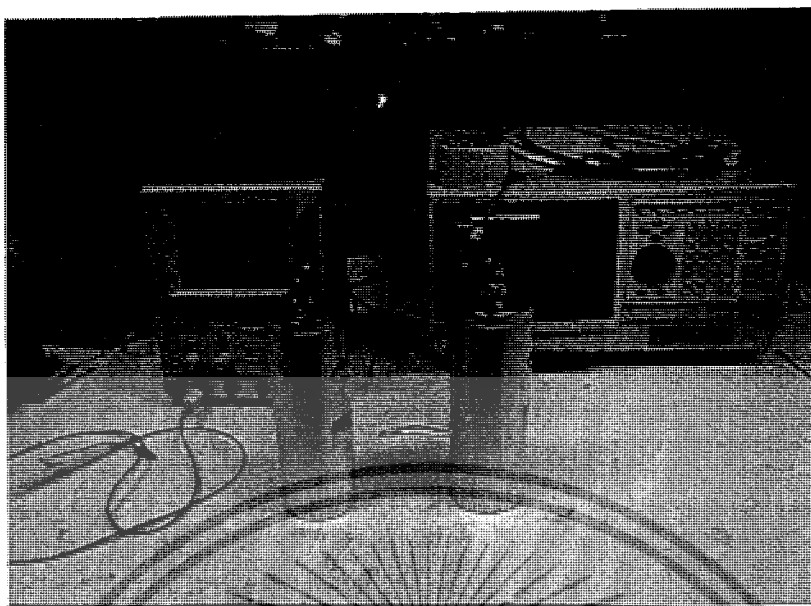


ภาพที่ ก.5 ภาพแสดง DC Power Supply



ภาพที่ ก.6 ภาพแสดง Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.



ภาพที่ ก.7 ภาพแสดง Oscilloscope และ Recorder Scope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

ภาคผนวก ข  
(ข้อมูลอ้างอิง)



WHITE PAPER

## Ultracapacitors, the New Thinking in the Automotive World

By Adrian Schneuwly, Bobby Maher, Juergen Auer  
Maxwell Technologies, Inc.

### Introduction

Due to the increasing power demand in future vehicles for comfort improvement, as well as ongoing pressures for more environmentally friendly means of transportation, automotive manufacturers are developing alternatives to existing fossil fuel-driven vehicles.

Perhaps the most promising near-term alternative to fuel-cell vehicles, which will not be ready for volume production for at least a decade, is hybrid electric vehicle (HEV) technology. While progress has been made in control, engine and motor design, they have not been successful with regard to the electric power storage systems. This is due primarily to the fact that batteries are used to provide the power peaks in most of the currently developed hybrid electric vehicles. But the deficiencies of battery storage systems are multiple and they create many design challenges for automotive engineers.

Batteries have a bad low temperature performance, a very limited lifetime under extreme conditions which results in repeated replacement throughout the life of the vehicle, and they are not designed to satisfy the most important requirements of hybrid electric vehicles power source; to provide bursts of power in the seconds range for events such as acceleration, braking and cold starting.

Recently, a very promising technology has been introduced with the potential to improve energy storage in automotive applications: double-layer capacitors. These devices, also known as ultracapacitors or supercapacitors, represent a new generation of electrochemical components with very high capacitance for energy storage.

Today, ultracapacitors are a viable component for production-intent designs. Ultracapacitors are available from major production firms in the United States, Asia, and Europe. They are available in a variety of sizes, in a variety of configurations. Ultracapacitor prices are within the cost targets of many automotive systems, and are approaching \$0.01 per farad in automotive production volumes by 2004 in millions.

When appropriately designed with a systems approach, they offer excellent performance, wide temperature range, long life, and flexible management. When used in combination with other energy storage solutions (e.g. lead-acid batteries, fuel engines, fuel cells), the complete system can meet performance and cost goals unachievable with a single energy storage device.

Ultracapacitors from Maxwell Technologies are available under the trade name of BOOSTCAP®.

Maxwell Technologies, Inc.  
9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123  
United States  
Phone: +1-858-503-3300  
Fax: +1-858-503-3301

Maxwell Technologies SA  
CH1728 Rossens  
Switzerland  
Phone: +41 (0) 26 411 85 00  
Fax: +41 (0) 26 411 85 05

© Maxwell Technologies, Inc. | [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com) | [info@maxwell.com](mailto:info@maxwell.com) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

## Ultracapacitor Technology

### Energy storage technology comparison

In terms of energy density and access time to the stored energy, double-layer capacitors are placed between large aluminum electrolytic capacitors and smaller rechargeable batteries [1]. The Ragone diagram, presented in Figure 1, shows the domain occupied by double-layer capacitors in the power and energy densities space. It can be seen that the BOOSTCAP<sup>SM</sup>s from Maxwell Technologies cover the highest part in power and energy density of double-layer capacitors.

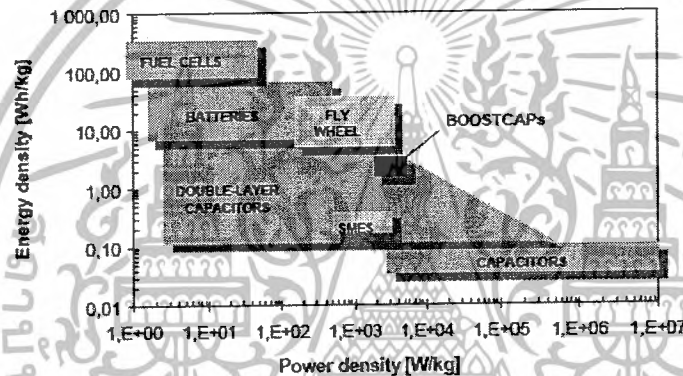


Figure 1: Ragone diagram, comparison of different energy storage and conversion devices

Peak power applications, as they occur in the transportation domain, need passive components to store the electrical energy that are as small as possible in volume and weight. The choice of the storage device type depends particularly on the speed of the storage process, or in other words on the power required by the application.

While the slower storage processes may be performed with batteries and the faster ones with capacitors, the ideal storage devices to supply bursts of power in the seconds range are double-layer capacitors.

### Double-layer Technology

Ultracapacitors consist of two activated carbon electrodes, which are immersed into an electrolyte. The two electrodes are separated by a membrane that allows the mobility of the charged ions but prevents electronic contact. The organic electrolyte supplies and conducts the ions from an electrode to the other if an electrical charge is applied to the electrodes. In the charged state, anions and cations are located close to the electrodes so that they balance the excess charge in the activated

Maxwell Technologies, Inc.  
 9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123  
 United States  
 Phone: +1-858-503-3300  
 Fax: +1-858-503-3301

Maxwell Technologies SA  
 CH1728 Rossens  
 Switzerland  
 Phone: +41 (0) 26 411 85 00  
 Fax: +41 (0) 26 411 85 05

© Maxwell Technologies, Inc. | [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com) | [info@maxwell.com](mailto:info@maxwell.com) |

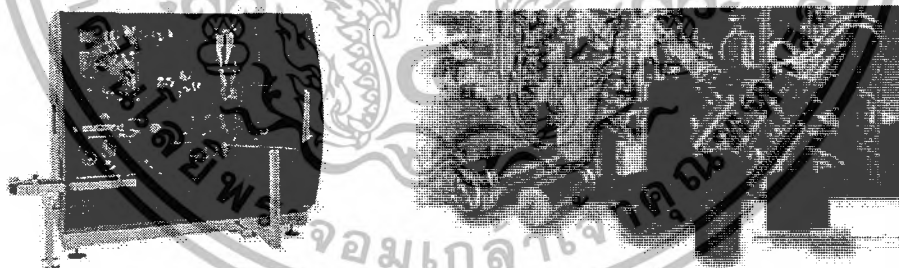
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

carbon. Thus across the boundary between carbon and electrolyte two charged layers of opposed polarity are formed. This layer, discovered in 1879 by Helmholtz, is called an electrochemical double-layer.

Ultracapacitors rely on an electrostatic effect, which is purely physical and therefore highly reversible. Charge and discharge occurs upon movement of ions within the electrolyte. This energy storage process is in contrast to all battery technologies, as they are based on chemical reactions. Consequently, there are some fundamental property differences between double-layer capacitor and battery technologies; namely long shelf life, an extended useful life and a high cycle life. These advantages result in an almost maintenance-free storage device.

### Cell Construction

Double-layer capacitors are assembled by winding or stacking in parallel electrodes, current collectors and separator foils. For the stacking processes separate electrode and collector foils are assembled in the device. In this case, it is important to have a very good mechanical contact between the electrode and the current collector. By applying a controlled high pressure on the stack, low internal resistance can be obtained. The disadvantage of



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

## BOOSTCAP® Features

### Available Products

Today, Maxwell Technologies manufactures BOOSTCAPS® based on both, stacking and winding technology. PC products are stacked devices using carbon cloth electrodes and BCAP devices are based on winding technology and use carbon powder electrodes. Ultracapacitors in 4, 10, 100, 450, 900, 1800 and 2600 Farad sizes are available, which can be combined into power modules for higher voltage.

The top of the range when it comes to power and energy density is represented by the BCAP0010 capacitor rated at 2600 F. With an internal resistance of typically 0.25 mOhm at 100 Hz this capacitor is suitable for power applications of any kind [2].

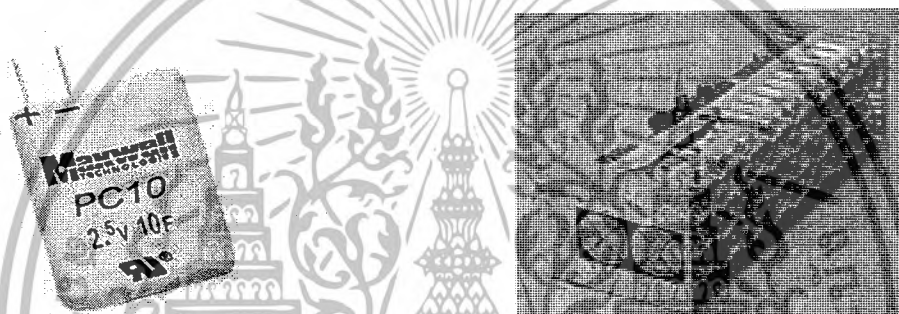


Figure 3: PC10 rated at 10 F and an integrated system built up with BCAP0010

### Future Performance Trends

The double-layer capacitor performance development goals are a longer lifetime, an increase of the rated voltage, an improvement of the operating temperature range and an increase of the energy and power densities. The rated voltage will be increased up to 3V within the next years. An increase in capacitance by 50% as well as a reduction of the ESR by a factor of two is also possible. The energy and power density for BOOSTCAP® double-layer capacitors will therefore be increased significantly. To easily access automotive applications a temperature range from -35 to 105°C will be advantageous.

What is expected from the research and development is the increase of the electrolyte decomposition voltage and ionic conductance, the increase of the electrode accessible surface, chemical and mechanical stability as well as electronic conductance and the separator electronic insulation level and ionic conductance. A primary focus is the development of new electrolytes based on the combination of novel organic solvents and improved conduction salts, permitting not only a higher rated voltage and a higher conductivity but also a larger operating temperature range.

Maxwell Technologies, Inc.  
 9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123  
 United States  
 Phone: +1-858-503-3300  
 Fax: +1-858-503-3301

Maxwell Technologies SA  
 CH1728 Rossens  
 Switzerland  
 Phone: +41 (0) 26 411 85 00  
 Fax: +41 (0) 26 411 85 05

© Maxwell Technologies, Inc. | [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com) | [info@maxwell.com](mailto:info@maxwell.com) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Automotive Applications

BOOSTCAP® ultracapacitors are ideal wherever high bursts of power are needed. Existing and new applications include automotive engineering, rail traction, telecommunication, uninterruptible power supplies, renewable energy resources, industrial electronics and medical engineering.

Numerous automotive firms are well into the production design cycle for ultracapacitor-based power trains and subsystems, recognizing the advantages and availability of the ultracapacitor to meet their business and technical requirements. Ultracapacitors are available, cost effective, and perform well in automotive systems, and today are considered a peer to other options for production energy storage system requirements.

## BOOSTCAP®s Used in EV, HEV or HEFC Vehicles

In the last few years, new propulsion hybrid drive trains have been intensively studied. An interesting concept is a fully electric hybrid drive train that consists of a primary constant power source such as a fuel cell or a battery and a secondary peak power source, e.g. double-layer capacitors [3]. The primary power source handles continuous load requirements, such as cruising and basic electric needs. The secondary power source is sized for short-duration load leveling, absorbing the kinetic energy from braking and releasing it later to accelerate the vehicle, resulting in energy savings of up to 25 % [4] and increased mileage of the vehicle. Because these short-duration events are experienced many thousands of times throughout the life of a vehicle, they are very well suited for the long life of ultracapacitors. Their cycle lives are much longer than those of batteries, so it may never be necessary to replace the energy storage medium. Therefore the life-of-system costs are reduced, and adverse environmental effects are diminished.

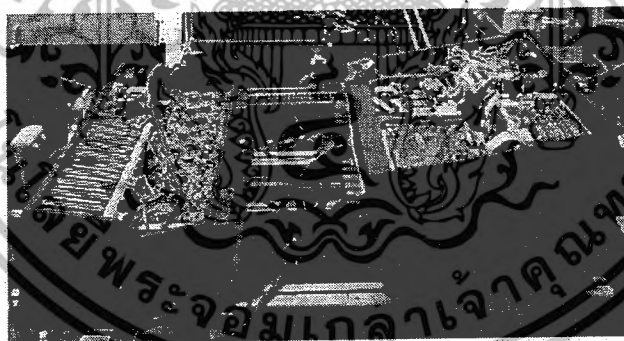


Figure 4: The fully assembled BOOSTCAP® system in its storage boxes

In collaboration with VW and other partners, a hybrid electric fuel cell (HEFC) vehicle was built up with an ultracapacitor energy storage device [5, 6]. The BOOSTCAP®

Maxwell Technologies, Inc.  
 9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123  
 United States  
 Phone: +1-858-503-3300  
 Fax: +1-858-503-3301

Maxwell Technologies SA  
 CH1728 Rossens  
 Switzerland  
 Phone: +41 (0) 26 411 85 00  
 Fax: +41 (0) 26 411 85 05

© Maxwell Technologies, Inc. | [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com) | [info@maxwell.com](mailto:info@maxwell.com) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

bank, shown in Figure 4, is capable of providing a constant power of 50 kW during 15 seconds of discharge from full to half rated voltage. This is equivalent to an energy content of 210 Wh at 50 kW.

#### 14/42 V Electrical Subsystem and Integrated Starter Generators

The development of innovative automotive systems is determined by the demand for comfort improvement, cut in fuel consumption, reduction of environmental pollution and increase in efficiency. A result is the substitution of mechanical systems by electrical systems such as electric power steering, electromagnetic valve control, electric water pump, electromechanical braking, electric air conditioning, electric door opening, catalyst preheating etc. as well as the introduction of new drive train functions like start-stop and recuperative braking. The storage of braking energy can also be usefully applied for vehicles with internal combustion engines, especially for the improved alternators used as braking generators, so-called integrated starter generators [7]. Conventional lead-acid batteries cannot furnish the energy in the seconds range because of the slow chemical processes. Double-layer capacitors work quite differently; they are designed to store the energy generated within a very short time and release the energy with high efficiency, even in cold weather. Future 42V electrical subsystems will be able to furnish the power demands in the range of 8 to 20 kW. Thanks to their long life and high cycle life BOOSTCAP<sup>®</sup>s are ideal for the variable power loading required of new subsystems.

#### Regenerative Braking

In vehicles with internal combustion engines, up to 25% of the total energy used is uselessly converted to heat during braking. This effect is even more critical in urban traffic. Therefore an obvious solution is to introduce an energy storage system that allows storage of the braking energy which can then be applied to acceleration. Such systems allow an important reduction of the fuel consumption in urban traffic where stop-and-go is very common. Regenerative braking is thus absolutely imperative to extend the range of EVs. However this method of energy saving can also be usefully applied to vehicles with internal combustion engines.

Buses are being closely watched as pioneering vehicles of environmentally friendly transportation. Until fuel cells go into volume production, combustion engine-electric drives represent the most interesting drive systems to reduce the emission levels of buses. Typically it is possible to combine a diesel engine with an electrical power train. Distinctive features of this diesel-electric drive are low fuel consumption, advantages for low-floor chassis, more flexibility for the bodywork and quiet running during starting and part load operation. Here BOOSTCAP<sup>®</sup>s have proven to be an ideal energy storage medium for regenerative braking. Conventional lead-acid batteries cannot store the braking energy in the seconds range because of the slow chemical processes underlying their operation. Ultracapacitors work quite differently; even energy that is generated within fractions of a second can be stored and released with high efficiency.

Maxwell Technologies, Inc.  
9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123  
United States  
Phone: +1-858-503-3300  
Fax: +1-858-503-3301

Maxwell Technologies SA  
CH1728 Rossens  
Switzerland  
Phone: +41 (0) 26 411 85 00  
Fax: +41 (0) 26 411 85 05

© Maxwell Technologies, Inc. | [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com) | [info@maxwell.com](mailto:info@maxwell.com) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Ultracapacitor Technology Powers Electronic Circuits

By **Youngho Kim**, Director of Product Development,  
NESSCAP Co. Ltd., Korea

As engineering innovations continue to advance ultracapacitors, their enhanced performance capabilities are expected to hasten the convergence of batteries and ultracapacitors—strengthening the combination of both specific energy storage and pulse power design in future applications.

**A**s the market strives for lighter, more compact wireless and portable devices with more ingenious features crammed into an ever-tighter space, a related quest ensues for the next power supply innovation—a powerful, compact, long-lasting, economical and safe battery. Although progressing toward this end, current battery technology often compromises the desired space and weight specifications without properly satisfying peak power requirements.

Ultracapacitors, also known as supercapacitors, offer an alternative source that promises to circumvent the battery scramble and extract greater efficiency from existing power sources. Because of high price and manufacturability is-

issues, Ultracapacitors also are free from characteristic battery problems, such as limited cycle life, cold intolerance and critical charging rates.

## Why Ultracapacitors?

Ultracapacitors are being developed as an alternative to pulse batteries. To be an attractive alternative, ultracapacitors must have at least one order of magnitude higher power and a much longer shelf and cycle life than batteries. Ultracapacitors have much lower energy density than batteries, and their low-energy density is, in most cases, the factor that determines the feasibility of their use in a particular high-power application.

Available for decades, a conventional electrolytic capacitor is an energy-storage device that can be compared to a container that gradually fills with electrical energy and then delivers it when needed in a sudden burst. Offered just recently, an ultracapacitor is a high-energy version of a conventional capacitor, holding hundreds of times more energy per unit volume or mass than the latter by using state-of-the-art materials and high-tech microscopic manufacturing processes. When fully charged, these robust devices deliver instant power in an affordable, compact package.

Long considered an enigma because of price, the advent of inexpensive, compact ultracapacitors, characterized by an exceptionally high surface area, excellent conductivity, and superior chemical and physical stability, herald a new era of practical usage.

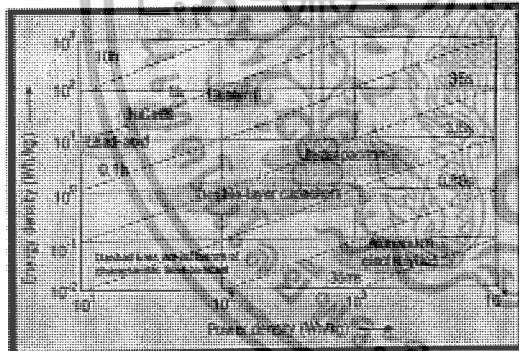


Fig. 1. Power vs. energy characteristics of energy-storage devices.

sues, this electric double layer capacitor (EDLC), also known as a pseudo capacitor, isn't popular among engineers. However, it offers boundless growth potential because it responds to key market and societal needs: It's environmentally friendly, helps conserve energy, and enhances the performance and portability of consumer de-

## Ultracapacitors as Circuit Elements

The equivalent circuit used for conventional capacitors can also be applied to ultracapacitors. The circuit schematic in Fig. 2 represents the first-order model for an ultracapacitor. It's comprised of four ideal circuit elements: a capacitance  $C$ , a series resistor  $R_s$ , a parallel resistor  $R_p$ , and a series inductor  $L$ .  $R_s$  is called the equivalent series

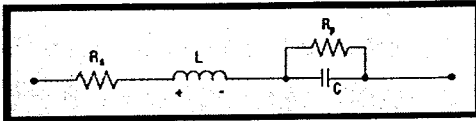


Fig. 2. The first-order circuit model of an ultracapacitor. Each of the four circuit elements is ideal.

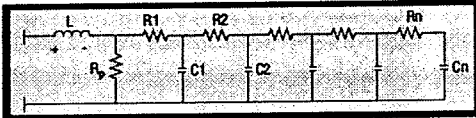


Fig. 3. The equivalent circuit of a practical ultracapacitor.

resistance (ESR) and contributes to energy loss during capacitor charging and discharging.  $R_p$  simulates energy loss due to capacitor self-discharge, and is often referred to as the leakage current resistance. Inductor  $L$  results primarily from the physical construction of the capacitor and is usually small. However, in many applications, it can't be neglected—particularly those operating at high frequencies or subjected to hard switching.

Resistor  $R_p$  is always much higher than  $R_s$  in practical capacitors. Thus, it often can be neglected, particularly in high-power applications. In that case, the impedance of the Fig. 2 circuit model is:

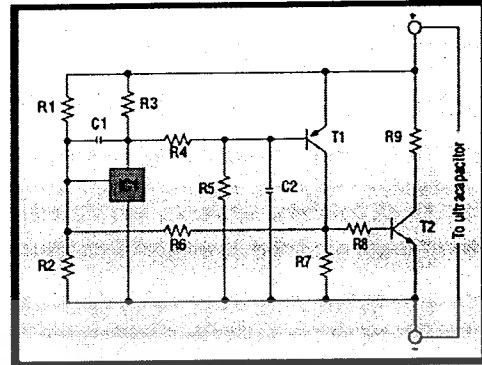
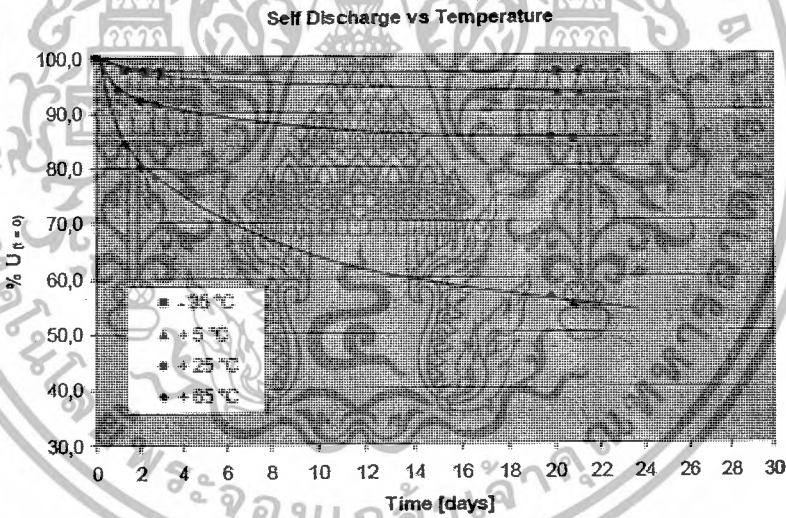


Fig. 4. Block diagram of an active balancing circuit.

$Z = R + j(2\pi fL - 1/2\pi fC)$ , where  $L$  is the inductance in [Henrys]. The impedance is purely resistive when  $2\pi fL - 1/2\pi fC = 0$ , or  $f = 1/2\pi(LC)^{1/2}$ . This particular frequency is referred to as the resonance frequency of the capacitor. Thus, the impedance of circuit is simply the resistance at self-resonance. However, ultracapacitors exhibit non-ideal behavior, which result primarily from the porous material used to form the electrodes that cause the resistance and



## BCAP Self Discharge



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1 Description of Double Layer Capacitors

### 1.1 Theory

Electrochemical double layer capacitors (EDLCs) are similarly known as supercapacitors or ultracapacitors. An ultracapacitor stores energy electrostatically by polarizing an electrolytic solution. Though it is an electrochemical device there are no chemical reactions involved in its energy storage mechanism. This mechanism is highly reversible, allowing the ultracapacitor to be charged and discharged hundreds of thousands to even millions of times.

An ultracapacitor can be viewed as two non-reactive porous plates suspended within an electrolyte with an applied voltage across the plates. The applied potential on the positive plate attracts the negative ions in the electrolyte, while the potential on the negative plate attracts the positive ions. This effectively creates two layers of capacitive storage, one where the charges are separated at the positive plate, and another at the negative plate.

Conventional electrolytic capacitors storage area is derived from thin plates of flat, conductive material. High capacitance is achieved by winding great lengths of material. Further increases are possible through texturing on its surface, increasing its surface area. A conventional capacitor separates its charged plates with a dielectric material: plastic, paper or ceramic films. The thinner the dielectric the more area can be created within a specified volume. The limitations of the thickness of the dielectric define the surface area achievable.

An ultracapacitor derives its area from a porous carbon-based electrode material. The porous structure of this material allows its surface area to approach 2000 square meters per gram, much greater than can be accomplished using flat or textured films and plates. An ultracapacitors charge separation distance is determined by the size of the ions in the electrolyte, which are attracted to the charged electrode. This charge

separation (less than 10 angstroms) is much smaller than can be accomplished using conventional dielectric materials.

The combination of enormous surface area and extremely small charge separation gives the ultracapacitor its outstanding capacitance relative to conventional capacitors.

### 1.2 Construction

The specifics of ultracapacitor construction are dependent on the application and use of the ultracapacitor. The materials may differ slightly from manufacturer or due to specific application needs. The commonality among all ultracapacitors is that they consist of a positive electrode, a negative electrode, a separator between these two electrodes, and an electrolyte filling the porosities of the two electrodes and separator.

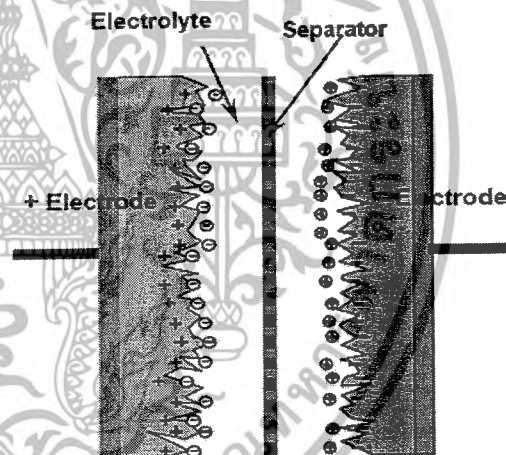


Figure 1: Ultracapacitor charge separation

The assembly of the ultracapacitors can vary from product to product. This is due in part to the geometry of the ultracapacitor packaging. For products having a prismatic or square packaging arrangement, the internal construction is based upon a stacking assembly arrangement with internal collector paddles extruding from each electrode stack. These current collector

paddles are then welded to the terminals to enable a current path outside the capacitor.

For products with round or cylindrical packaging, the electrodes are wound into a jellyroll configuration. The electrodes have foil extensions that are then welded to the terminals to enable a current path outside the capacitor.

## 2 Typical Applications

Maxwell Boostcap® ultracapacitors products are offered in a full range of sizes. This enables utilization of ultracapacitors in a variety of industries for many power requirement needs. These applications span from milliamps current or milliwatt power to several hundred amps current or several hundred kilowatts power needs. Industries employing ultracapacitors have included: consumer electronics, traction, automotive, and industrial. Examples within each industry are numerous.

**Consumer** – digital cameras, lap top computers, PDA's, GPS, hand held devices, toys, flashlights, solar accent lighting, and restaurant paging devices.

**Traction** – Diesel engine starting, train tilting, security door opening, tram power supply, voltage drop compensation.

**Automotive** – 42 V vehicle supply networks, power steering, electromagnetic valve controls, starter generators, electrical door opening, regenerative braking, hybrid electric drive, active seat belt restraints.

**Industrial** – uninterrupted power supply (UPS), wind mill pitch systems, power transient buffering, automated meter reading (AMR), elevator micro-controller power backup, security doors, forklifts, cranes, and telecommunications.

Consideration for the various industries listed, and for many others, is typically attributed to the specific needs of the application the ultracapacitor technology can satisfy. Applications ideally suited for ultracapacitors include pulse power, bridge power, main power and memory backup.

### 2.1 Pulse Power

Ultracapacitors are ideally suited for pulse power applications. As mentioned in the theory section, due to the fact the energy storage is not a chemical reaction, the charge/discharge behavior of the capacitors is efficient.

Since ultracapacitors have low internal impedance they are capable of delivering high currents and are often times placed in parallel with batteries to load level the batteries, extending battery life. The ultracapacitor buffers the battery from seeing the high peak currents experienced in the application. This methodology is employed for devices such as digital cameras, hybrid drive systems and regenerative braking (for energy recapture).

### 2.2 Bridge Power

Ultracapacitors are utilized as temporary energy sources in many applications where immediate power availability may be difficult. This includes UPS systems utilizing generators, fuel cells or flywheels as the main power backup. All of these systems require short start up times enabling momentary power interruptions. Ultracapacitor systems are sized to provide the appropriate amount of ride through time until the primary backup power source becomes available.

### 2.3 Main Power

For applications requiring power for only short periods of time or is acceptable to allow short charging time before use, ultracapacitors can be used as the primary power source. Examples of this utilization include toys, emergency flashlights, restaurant paging devices, solar charged accent lighting, and emergency door power.

### 2.4 Memory Backup

When an application has an available power source to keep the ultracapacitors trickle charged they may be suited for memory backup, system shutdown operations, or

event notification. The ultracapacitors can be maintained at its full charged state and act as a power reserve to perform critical functions in the event of power loss. This may include AMR for reporting power outage, micro-controllers and board memory.

### 3 Determining the correct Ultracapacitor for the application

Determination of the proper capacitor and number of capacitors is dependant on the intended application. For sizing the system correctly a number of factors should be known. These factors include the maximum and minimum operating voltage of the application, the average current or power, the peak current or power, the operating environment temperature, the run time required for the application, and the required life of the application. All of these issues will be covered in detail in the "Performance Characteristics" section of this guide. For now, a general approach is described.

Each of the products has a rated voltage ( $V_R$ ). Since ultracapacitors are low voltage devices, this rated voltage is generally less than the application voltage required. Knowing the maximum application voltage ( $V_{max}$ ) will determine how many capacitor cells are required to be series connected. The number of series connected cells is determined by:

$$\# \text{ series cells} = \frac{V_{max}}{V_R}$$

Next, by knowing the average current ( $I$ ) in amps, the required run time ( $dt$ ) in seconds and the minimum working voltage ( $V_{min}$ ), an approximate system capacitance can be calculated.

$$C_{sys} = I \cdot \frac{dt}{dV} = I \cdot \frac{dt}{(V_{max} - V_{min})}$$

The total system capacitance is comprised of the capacitance of all the series connected capacitors for achieving  $V_{max}$ . For capacitors connected in series the

capacitance of the individual cells is determined by:

$$\frac{1}{C_{sys}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad [3]$$

where  $n = \#$  series connected capacitors.

For  $C_1=C_2=\dots=C_n$  and rearranging equation 3, the cell capacitance ( $C$ ) is determined by:

$$C = C_{sys} \cdot n$$

This capacitance value can then be compared to the product data sheets to determine the appropriate capacitor for the application. If the capacitance calculated is not achievable by a single capacitor it will be necessary to place one or more capacitors in parallel to obtain the necessary energy. For capacitors connected in parallel the capacitance is determined by:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Therefore, take the calculated capacitance and divide by the capacitance available from the data sheet and round up to the next whole number. This will be the number of capacitors required in parallel.

There are many other items to consider for properly sizing the application. This includes the internal resistance of the capacitor to account for the instantaneous voltage drop associated with an applied current, the ambient operating temperature which affects the internal resistance and the capacitor life, and the life of the application. The ultracapacitor performance requirement at end of life of the application is necessary to ensure proper initial sizing of the system. Additional tools, application notes and white papers are available at our website to aid in the sizing process. It is recommended to contact Maxwell Technologies for assistance in sizing the application properly.

#### 4 Specifications

Product datasheets are available for each product. These datasheets are accessible at the Maxwell Technologies website, [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com). This section will provide a definition for the specifications and the methods of measuring said conditions.

##### 4.1 Specification Description

**Capacitance** – a measurement of energy storage in joules.  $C = qV$

**Voltage** – the voltage provided in the specification is the maximum operating voltage for a single capacitor. The rated voltage is the voltage in which the performance data is measured. It is possible for the capacitors to experience voltages in excess of the rated voltage. The impact is dependent on the time and temperature during this exposure. At no time should the capacitor be subjected to voltages in excess of 10% of the rated voltage.

**Internal Resistance, DC** – the resistance corresponding to all the resistive components within the ultracapacitor,  $R_{int}$ . This measurement is taken after 5 seconds. Since the time constant of the ultracapacitors is approximately 1 second, it takes approximately 5 time constants or 5 seconds to effectively remove 99.7% of the stored energy.  $R_{int}$  is comprised of resistive components attributed to contact, electrode, electrolyte, and other material resistances.

**Internal resistance, 100 hz or 1 khz** – is a measure of the high frequency resistance component and is mainly attributed to contact resistance. Because of the time constant of the ultracapacitors, operation at this frequency is highly inefficient. This measurement is provided because it is simple to measure and correlates easily with the DC resistance.

**Thermal Resistance** – rather than a rated current the thermal resistance may be used to determine the heat generation within the product at any given current load and duty

cycle. The calculation is based on free convection and would be considered worst case. Forced convection would improve the thermal resistance.

**Short Circuit Current** – momentary current possible in device if ultracapacitor is short circuited. Intended as a cautionary statement and not intended for ultracapacitor use.

**Leakage Current** – stable parasitic current expected when capacitor is held indefinitely on charge at the rated voltage. This value is voltage and temperature dependent. Data sheet measurement is at rated voltage and 25 °C.

**Operating Temperature Range** – represents the operating temperature range of the ultracapacitor and may not reflect the ambient temperature.

**Storage Temperature Range** – represents the safe storage temperature without affecting ultracapacitor performance when no voltage is applied to the ultracapacitor.

**Endurance, Capacitance** – the maximum capacitance change expected if the ultracapacitor is held at rated voltage for the specified time and temperature which is intended to be the upper operational limits.

**Endurance, Resistance** – the maximum resistance change expected if the ultracapacitor is held at rated voltage for the specified time and temperature which is intended to be the upper operational limits.

**Maximum Energy** – the maximum energy available for new ultracapacitor when discharged from maximum working voltage to zero volts (note: for discharge to half voltage the energy is approximately 75% of maximum)

**Peak Power Density** – measurement of an instantaneous power from full rated voltage according to  $V^2/4R$  where  $R = ac$  resistance. This value does not represent the sustainable power.

**Power, Pd** – gravimetric power density calculated between the ranges of a 20% to 40% voltage drop from the rated voltage.

**Life Time** – expected performance change for the ultracapacitor if held at rated voltage and 25 °C for 10 years.

**Cycle Life** – expected performance change after cycling 500k or 1M times (as specified on the data sheet) from rated voltage to half voltage. Cycling performed at a duty cycle resulting in no heating of the ultracapacitor with the ultracapacitor maintained at 25°C.

## 4.2 Measurement Conditions

The methods utilized for obtaining the data specified on the data sheets are outlined. Alternative methods are possible but may result in slightly different results.

### 4.2.1 Capacitance

Capacitance is measured during discharge of the ultracapacitor with a constant current source from its rated voltage to half its rated voltage. Referring to figure 2, capacitance is calculated from the following:

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{V_w - V_f}$$

### 4.2.2 Resistance

Referring again to figure 2 the dc resistance, or ESR, is calculated from the following:

$$ESR = \frac{V_f - V_{min}}{I_d}$$

The resistance measurement considers all resistive components over approximately five time constants of the product and is inclusive of all resistive elements. The actual resistance measured would be lower if measured over a shorter duration than the 5 seconds indicated.

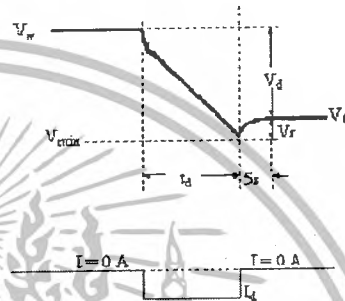


Figure 2: Testing profile

### 4.2.3 Leakage Current

Due to the extremely large surface area of the electrode the time constant of the last 0.5% of the electrode area is extremely long due to the pore size and geometry. The longer the ultracapacitor is held on charge the lower the leakage current of the device. The reported leakage current is a measurement of the charging current after holding the device at rated voltage for 72 hours continuous at room temperature. The measured leakage current will be influenced by the temperature during the measurement, the voltage in which the device is measured and the age of the product.

## 5 Performance Characteristics

This section describes the behavior of ultracapacitors under operating conditions such as temperature, dc charging, cycling and frequency. The data is represented in product specific format where applicable.

### 5.1 Temperature Effects, Initial Performance

The performance of Maxwell Technologies ultracapacitors is very stable over a wide operating temperature due to the chemistry and physical make up of the products. This behavior is common between all of the products lines due to the similar chemistry and construction. The following plot in figure 3 illustrates the relative capacitance and resistance change as a function of temperature between the operating temperature ranges of  $-40$  to  $65$  °C.

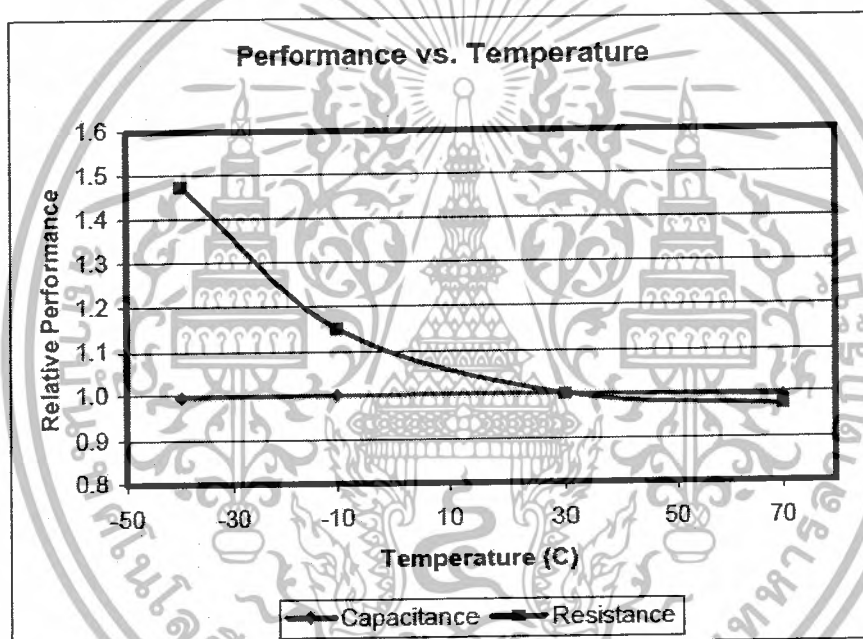


Figure 3: Relative ultracapacitor performance over operating temperature range

### 5.2 Voltage and Temperature Effects on Life

A common utilization of the ultracapacitors such as UPS applications is to maintain the ultracapacitors at working voltage until needed for the application. The following figures illustrate the influence of voltage on performance of the products when held at rated voltage and a lower voltage at its maximum rated environmental temperature. More detailed information related to product life is contained in the design section 7.3 of this manual.

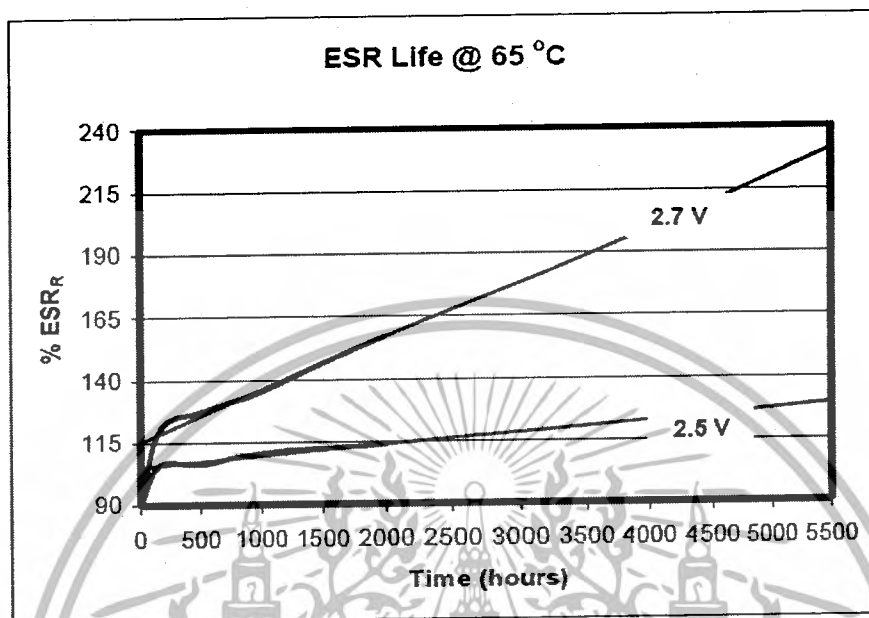


Figure 5: BCAP2600 Resistance degradation at 2.7 V and 2.5 V at 65°C

Figure 5 represents the expected resistance degradation relative to the product specification. The plot, along with the fact that the influence of temperature has a doubling effect for every 10 °C, can be used to predict the expected performance change for a variety of conditions. From this plot it is expected that a:

140% increase in rated resistance may occur for an ultracapacitor held at 2.7 V after

5,500 hrs	@ 65 °C
11,000 hrs	@ 55 °C
22,000 hrs	@ 45 °C
44,000 hrs	@ 35 °C
88,000 hrs	@ 25 °C

40% increase in rated resistance may occur for an ultracapacitor held at 2.5 V after

5,500 hrs	@ 65 °C
11,000 hrs	@ 55 °C
22,000 hrs	@ 45 °C
44,000 hrs	@ 35 °C
88,000 hrs	@ 25 °C

### 5.3 Cycling

Cycle testing is performed on the products to determine the degradation of ultracapacitor performance over cycling events. The cycle testing is performed at ambient temperature with no forced convective cooling. The cycles are performed at a continuous current as indicated on the data sheet from the rated voltage to half rated voltage. A 15 second rest is allowed between

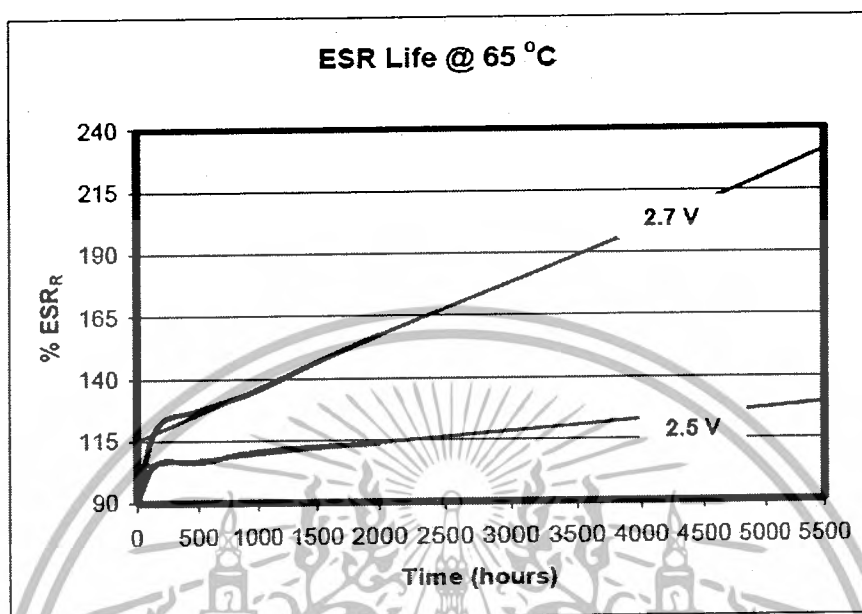


Figure 5: BCAP2600 Resistance degradation at 2.7 V and 2.5 V at 65°C

Figure 5 represents the expected resistance degradation relative to the product specification. The plot, along with the fact that the influence of temperature has a doubling effect for every 10 °C, can be used to predict the expected performance change for a variety of conditions. From this plot it is expected that a:

140% increase in rated resistance may occur for an ultracapacitor held at 2.7 V after

5,500 hrs	@ 65 °C
11,000 hrs	@ 55 °C
22,000 hrs	@ 45 °C
44,000 hrs	@ 35 °C
88,000 hrs	@ 25 °C

40% increase in rated resistance may occur for an ultracapacitor held at 2.5 V after

5,500 hrs	@ 65 °C
11,000 hrs	@ 55 °C
22,000 hrs	@ 45 °C
44,000 hrs	@ 35 °C
88,000 hrs	@ 25 °C

### 5.3 Cycling

Cycle testing is performed on the products to determine the degradation of ultracapacitor performance over cycling events. The cycle testing is performed at ambient temperature with no forced convective cooling. The cycles are performed at a continuous current as indicated on the data sheet from the rated voltage to half rated voltage. A 15 second rest is allowed between

## 5.4 Frequency Response

Ultracapacitors have a typical time constant of approximately one second. One time constant reflects the time necessary to charge a capacitor 63.2% of full charge or discharge to 36.8% of full charge. This relationship is illustrated in the following figure.

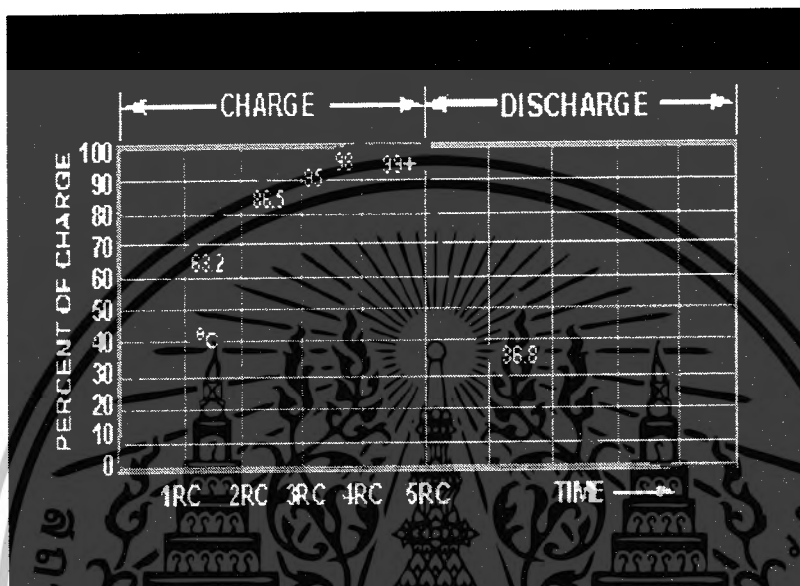


Figure 7: RC time constant relationship

The time constant of an ultracapacitor is much higher than that of an electrolytic capacitor. Therefore, it is not possible to expose ultracapacitors to a continuous ripple current as overheating may result. The ultracapacitor can respond to short pulse power demands, but due to the time constant the efficiency or available energy is reduced. The following figures illustrate the performance of the ultracapacitors at various frequencies. The drop off in capacitance is associated with response time necessary for the charged ions within the pores of the electrode to shuttle between positive and negative during charge and discharge. The drop in resistance is representative of the response time of the different resistive elements within the ultracapacitor. At low frequency all resistive elements are present where at high frequency only quick response elements such as contact resistance are present.

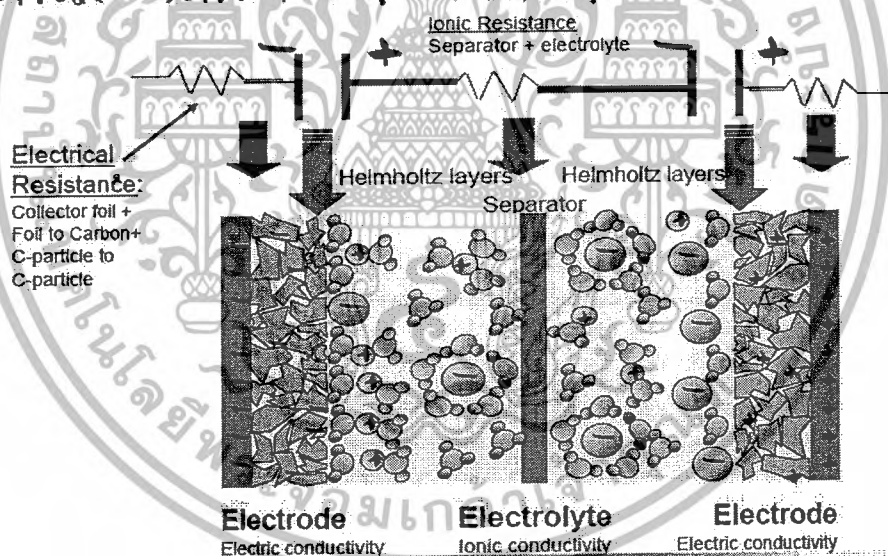
The test is typically conducted with no applied voltage. For this reason the capacitance appears to be much lower than what is stated at rated voltage as capacitance has a slight dependence on voltage.

## 8.5 Standards Testing

Products have been tested to a variety of standards to validate safety and reliability. These tests include shock, vibration, thermal cycling, thermal shock, and water resistance. A list of the products tested and the standard in which they are accepted is available in a separate document.

## Ultracapacitor Model Basics

- The ultracapacitor model commonly applied is that of the series combination of two DCLs at the electrode - solvent compact layer.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.