

การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าสถิตและจลนศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY ON THE ELECTROSTATIC AND ELECTROKINETIC CHARACTERISTICS OF  
PARTICLES IN AN INSULATING OIL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าสถิตและจลนศาสตร์ ไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวน
โดย	น.ส.พนิตตา โรจนธนวนิชย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

พนิตตา โรจน์ธนวิชัย : การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าสถิตและจลนศาสตร์ไฟฟ้า  
ของอนุภาคในน้ำมันฉนวน. ( STUDY ON THE ELECTROSTATIC AND  
ELECTROKINETIC CHARACTERISTICS OF PARTICLES IN AN INSULATING OIL)  
อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ

การศึกษากลศาสตร์ทางไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าเป็นหนทางหนึ่งในการศึกษาลักษณะเชิงปริมาณของประจุบนอนุภาคในน้ำมันฉนวน. วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมการรับและคายประจุของอนุภาคตัวนำและอนุภาคฉนวน ในน้ำมันฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้า. วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือ การสังเกตพฤติกรรมทางจลนศาสตร์ทางไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวน เพื่อดูความสัมพันธ์ของประจุกับการเคลื่อนที่. การศึกษาทำโดยการวัดประจุบนอนุภาคทั้งในสภาวะสถิตและในระหว่างการเคลื่อนที่. ระบบวัดประจุที่ใช้ประกอบด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและวงจรวัดประจุ. ความเร็วของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการแรงคูลอมบ์ แรงโน้มถ่วง และแรงต้านความหนืดของตัวกลาง. การทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบขนานและแบบทรงกลมกับระนาบ แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพิ่มขึ้นตามขนาดแรงดันที่เพิ่มขึ้น. การวัดประจุบนอนุภาคทำได้โดยใช้ถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกับวงจรวัดประจุและถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กทรอนิกส์. ใช้เวลาในการอัดประจุ 15 s ถึง 240 s. การทดลองพบว่าค่าประจุที่วัดได้จากอุปกรณ์ถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกับวงจรวัดประจุสอดคล้องกันเป็นส่วนใหญ่กับผลการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กทรอนิกส์ แต่ค่าที่ได้มีขนาดต่ำกว่า. ขนาดของอิเล็กโทรดมีผลต่อการวัดประจุด้วยวงจรวัดประจุ. อิเล็กโทรดที่มีขนาดกว้างให้ค่าผลการวัดสูงกว่าอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็ก. สำหรับการสูญเสียประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวน อิเล็กโทรดที่ใช้ในการวัดประจุมีสองตำแหน่งคือ A และ B ซึ่ง A ห่างจาก B เป็นระยะ 2 cm โดยที่อนุภาคเคลื่อนที่ถึงตำแหน่ง B มีค่ามากกว่าตำแหน่ง A. เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จะมีการสูญเสียประจุเกิดขึ้น ส่งผลให้ประจุที่วัดได้จากตำแหน่ง B มีค่าน้อยกว่าตำแหน่ง A.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970258321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Charge measurement, Particles, Faraday cups

Panitta Rojthanawanit : STUDY ON THE ELECTROSTATIC AND ELECTROKINETIC CHARACTERISTICS OF PARTICLES IN AN INSULATING OIL. Advisor: Prof. Boonchai Techaumnat, Ph.D.

The study of electromechanics of particles in an insulating oil under an electric field is a mean for quantitatively studying charges on particles in the insulating oil. This thesis studied the charging and discharging behavior of conductor particles and insulating particles in an insulating oil under an electric field. The main objective is to observe the electrokinetic behavior of particles in an insulating oil to get the relationship between charges and particle motion. The study was done by measuring charges on particles both in static and in dynamic conditions. The charge measurement system consisted of a passing-through Faraday cup and a charge measuring circuit. Velocities of the particles were calculated from the relation between the Coulomb force, the gravity, and the viscous force of the medium. An experiment to measure the particles velocity using parallel-plate and sphere-plate electrodes showed that the velocity of the particles increased with increasing voltage. Measurement of charges on particles was done by using (1) a passing-through Faraday cup charge measurement circuit and (2) a Faraday cup with an electrometer for 15 s to 240 s charging time. The experiment showed that the charge values from the former device were mostly consistent with the results from the electrometer, but the charge values from the former device were less than the results from electrometer. The size of the electrode affected the measurement of charges by the measuring circuit. Wider electrode was able to give higher measured values. For the loss of charges on particles in the insulating oil, the electrode used to measure charge had two positions that are A and B, where A is 2 cm away from B, the particles reached position B after passing position A. When the particle moved, charge loss occurred, making the measured charges from position B less than those from position A.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล และ รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์. ขอขอบคุณบริษัท พูจิ ทัสโก้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หมอบน้ำมัน ฉนวนสำหรับการทดลอง. สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวและมิตรสหายที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา.

พนิตตา โรจน์ธนวิชัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ .....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 การอัดประจุ .....	7
2.1.1 การอัดประจุโดยใช้สนามไฟฟ้า .....	7
2.1.2 การอัดประจุด้วยการเสียดสี.....	7
2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว .....	8
2.2.1 สนามไฟฟ้ายกตัว .....	8
2.2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว.....	8
2.3 การวัดประจุ.....	12
2.3.1 การวัดประจุโดยใช้ถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์ .....	12
2.3.2 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน .....	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และวัสดุการทดลอง.....	19
3.1 อนุภาค.....	19

3.2 อุปกรณ์ในการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว .....	20
3.3 การอัดประจุด้วยการเสียดสี.....	22
3.4 อุปกรณ์ในการวัดประจุบนอนุภาค.....	23
3.5 วงจรวัดประจุ.....	26
บทที่ 4 การทดลอง .....	29
4.1 การเตรียมตัวอย่างและวัสดุ .....	29
4.1.1 อนุภาค.....	29
4.1.2 น้ำมันฉนวน.....	29
4.2 การทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค .....	30
4.3 การทดลองวัดประจุบนอนุภาค.....	34
4.3.1 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์ .....	34
4.3.2 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน .....	35
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	37
5.1 ผลการทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	37
5.2 ผลการทดลองวัดประจุบนอนุภาคที่ได้จากวงจรวัดประจุและอิเล็กโตรมิเตอร์.....	39
5.2.1 ผลการวัดของวงจรวัดประจุ.....	39
5.2.2 ผลการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์และการเปรียบเทียบ .....	42
5.3 ผลของขนาดอิเล็กโตรดที่มีต่อค่าที่ได้จากวงจรวัดประจุ.....	44
5.4 การสูญเสียประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวน .....	50
บทที่ 6 สรุปผล.....	52
บรรณานุกรม.....	54
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันฉนวน.....	57
ภาคผนวก ข ผลการทดลองของระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบ.....	59



ภาคผนวก ค ผลการทดลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมกับระนาบ .....	65
ภาคผนวก ง ผลการทดลองของการวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและ ถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กทรอนิกส์ไมโครเมตร .....	70
ประวัติผู้เขียน .....	83



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าคืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงความถี่ อาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้อยู่ทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ หม้อแปลงแบบน้ำมันและหม้อแปลงแบบแห้ง. หม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมใช้คือหม้อแปลงแบบน้ำมัน เพราะสามารถระบายความร้อนได้ดี. น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ราคาถูก และการบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก. น้ำมันหม้อแปลงที่นิยมใช้คือน้ำมันแร่ (Mineral oil). การนำน้ำมันฉนวนมาใช้งานอย่างปลอดภัยและก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ผู้ใช้งานต้องศึกษาและเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการนำไฟฟ้า การเกิดเบรกดาวน์และลักษณะความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง.

สาเหตุของความล้มเหลวของระบบฉนวนที่สำคัญประการหนึ่งคือ การมีอนุภาคอิสระอยู่ในของเหลว. อนุภาคอิสระสามารถสร้างสนามไฟฟ้าสูงขึ้นในบริเวณรอบ ๆ อนุภาค. อนุภาคที่ถูกอัดประจุจะเคลื่อนที่เข้าใกล้เล็กโทรดที่มีขั้วตรงกันข้าม ทำให้สนามไฟฟ้ามีขนาดสูงยิ่งขึ้นไป. สาเหตุที่สำคัญของการปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงเกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอายุการใช้งานมาก ทำให้เกิดอนุภาคขนาดต่าง ๆ ออกมาส่งผลให้มีการปนเปื้อนในน้ำมันเกิดขึ้น [1]. อนุภาคที่มีอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงมีลักษณะของ ขนาด รูปร่าง จำนวน และพื้นผิวของอนุภาคที่แตกต่างกันออกไป [2, 3]. การวัดประจุไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่สำคัญประการหนึ่ง ในการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอนุภาค. ทั้งนี้ การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขั้วและขนาดของอนุภาค. เราสามารถแยกอนุภาค (หรือสสาร) ที่ต่างชนิดกันด้วยสนามไฟฟ้า โดยอาศัยลักษณะสมบัติการอัดประจุของอนุภาค.

งานวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมมารับและการคายประจุของอนุภาคตัวนำและอนุภาคฉนวน ในน้ำมันฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้า. การศึกษาทำโดยการวัดประจุบนอนุภาคทั้งในสภาวะสถิตและในระหว่างการเคลื่อนที่ ซึ่งใช้ระบบวัดประจุที่ประกอบด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกับวงจรรขยายสัญญาณ. ข้อดีของระบบวัดชนิดนี้คือ มีศักยภาพที่สามารถอินทิเกรตเข้ากับระบบ

ฉนวนน้ำมันในการทดลองต่าง ๆ ได้ โดยไม่ต้องนำอนุภาคออกจากระบบฉนวน. ผลการศึกษาทางการทดลองได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี เพื่อพิจารณาความสอดคล้องและหาปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อการอัดคายประจุและการเคลื่อนที่ของอนุภาค.

## 1.2 ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งเกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์ดังนี้

K. Sakai และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคแบบลวดภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ [4]. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคืออนุภาคสแตนเลสและอนุภาคอลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ยาว 2 mm. ผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบลวดเหมือนกับอนุภาคทรงกลม และขึ้นอยู่กับตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค. อนุภาคแบบลวดสามารถเคลื่อนตัวไปยังบริเวณสนามไฟฟ้าสูงได้ง่ายกว่าภายใต้ความถี่สูงของแรงดันกระแสสลับทั้ง ๆ ที่มีโคโรนาดีสชาร์จมากกว่าอนุภาคทรงกลม. การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบลวดเป็นผลมาจากแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าและแรงคูโลมบ์.

K. Sakai และคณะได้ศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและการเกิดเบรกดาวนจากอนุภาคโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง [5]. อนุภาคที่ใช้คือสแตนเลสรัศมี 1 mm และอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบที่ไม่ขนานกัน. การวิเคราะห์ถูกพิจารณาด้วยการทดลองและการแก้สมการของการเคลื่อนที่ของอนุภาค. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการถูกป้อนแรงดันและอนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงคูโลมบ์และแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า. อนุภาคเหล่านี้ยังส่งผลให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าต่ำลง เนื่องจากการเกิดไมโครดีสชาร์จระหว่างอนุภาคและอิเล็กทรอนิกส์.

K. Sakai และคณะศึกษาในด้านทฤษฎีและทดลองของพฤติกรรมอนุภาคทรงกลมระหว่างอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่ขนานกันโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีหลากหลายความถี่อยู่ในช่วง 0 ถึง 500 Hz [6]. การทดลองระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูงและอิเล็กทรอนิกส์กราวด์ทำมุมกัน  $3.5^\circ$ . อนุภาคที่ใช้คือสแตนเลสรัศมี 0.25, 0.5 และ 1 mm. ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีแรงคูโลมบ์เกิดขึ้น อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง ๆ เป็นช่วงหนึ่ง ๆ ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ. แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ามีผลทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ช่องว่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ลดลงทั้งสนามไฟฟ้าสูงขึ้น.

K. Sakai และคณะได้ศึกษาการอัดประจุและพฤติกรรมของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ [7]. การทดลองใช้อิเล็กโทรดที่ทำมุม  $3.5^\circ$  ซึ่งกันและกัน. อิเล็กโทรดกราวด์ถูกฉนวนด้วย PET (Polyethylene Terephthalate) หนา  $50 \mu\text{m}$ . อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคืออนุภาคสแตนเลสสตีล  $1 \text{ mm}$ . แรงดันที่ใช้คือแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบของไฟฟ้ากระแสตรง หรือแรงดันกระแสสลับความถี่  $60 \text{ Hz}$ . ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคสามารถถูกอัดประจุผ่านการดิสชาร์จบางส่วนระหว่างอนุภาคและอิเล็กโทรดกราวด์ที่ฉนวนด้วย PET อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโทรดกราวด์ไปในด้านที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่าตำแหน่งปัจจุบัน และเกิดการยกตัว หลังจากนั้นจึงเกิดการเบรกดาวน. อนุภาคเกิดการยกตัวเนื่องจากอนุภาคถูกอัดประจุทำให้เกิดแรงคูลอมบ์ต่ออนุภาค.

N. Phansiri ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [8]. การทดลองใช้ระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียง อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวด์ทำมุมกัน  $3^\circ$  และ  $15^\circ$ . อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคืออนุภาคทรงกลมอลูมิเนียมและสแตนเลสสตีล  $0.4 \text{ mm}$ . แผ่นฉนวนถูกวางบนอิเล็กโทรดกราวด์มีสองส่วนดังนี้ ส่วนบนคือพอลิอิมิด (Polyimide) และส่วนล่างคือ PDMS (Polydimethylsiloxane). การทดลองในกรณีที่ไม่มีการฉนวนอยู่ที่อิเล็กโทรดกราวด์พบว่า อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าต่ำ. กรณีที่มีฉนวนอยู่ที่อิเล็กโทรดกราวด์อนุภาคเคลื่อนที่ไปบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงเนื่องจากผลของแรงไดอิเล็กโตรโฟรีติก.

อนุภาคถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่แตกต่างกันไปเมื่อผ่านตัวกลางที่ต่างกัน. การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำมันฉนวน ซึ่งเป็นฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้.

S. Birlasekaran ศึกษาการวัดประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวน [2]. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ สแตนเลสสตีล  $0.5$  ถึง  $1.6 \text{ mm}$  และอิเล็กโทรดที่ใช้มีระยะห่างตั้งแต่  $8$  ถึง  $12 \text{ mm}$ . ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือเริ่มต้นอนุภาคอยู่ที่ขั้วบวก แรงสถิตทางไฟฟ้าเป็นเหตุทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปบริเวณขั้วลบ. กระแสบอกถึงความเร็วที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้น. อนุภาคเคลื่อนที่มาถึงขั้วลบ. อนุภาคเกิดการถ่ายเทประจุและได้รับประจุขั้วลบ. ระบบจะกลับมาเริ่มต้นใหม่โดยที่อนุภาคจะเริ่มต้นอยู่ที่ขั้วลบ.

S. Birlasekaran ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำในน้ำมันฉนวน [3]. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือสแตนเลสสตีล  $0.5 \text{ mm}$  และอิเล็กโทรดที่ใช้มีระยะห่าง  $8 \text{ mm}$ . ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลและความหนืดคำนวณได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบอนุภาคเดี่ยว. อนุภาค

จำนวน 2 หรือ 3 อนุภาคบ่งบอกถึงความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของจำนวนที่อนุภาคเคลื่อนที่ ระยะห่างและตำแหน่งระหว่างอนุภาค.

งานวิจัยที่สำคัญเกี่ยวกับการศึกษาการวัดประจุบนอนุภาคในขณะเคลื่อนที่ มีดังนี้.

H. Watanabe และคณะได้ศึกษาการวัดการถ่ายโอนของประจุเนื่องจากอนุภาคตกกระทบลงบนแผ่นเป้าหมาย [9]. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับเภสัชภัณฑ์ คือ  $\alpha$ -lactose monohydrate, แอสไพริน (Aspirin), ซูโครส (Sucrose) และเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose) ที่มีขนาด 500 ถึง 600  $\mu\text{m}$ . แผ่นเป้าหมายที่ใช้ในการทดลองคือสแตนเลส. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประจุของอนุภาคที่ตกกระทบลงบนแผ่นเป้าหมายจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของอนุภาคที่ตกกระทบเพิ่มขึ้น. ประจุของ  $\alpha$ -lactose monohydrate, แอสไพริน และซูโครสที่ตกกระทบบนแผ่นเป้าหมายเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนตามแนวตั้งฉากของความเร็วในการตกกระทบ. กรณียของเอทิลเซลลูโลสในการเพิ่มขึ้นตามแนวสัมผัสของความเร็วในการตกกระทบทำให้ประจุของเอทิลเซลลูโลสที่ตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด.

H. Watanabe และคณะได้ประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับการวัดประจุไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการตกกระทบของอนุภาค [10]. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือน้ำตาลทรายป่น (Sugar granules) และเม็ดแก้ว (Glass beads). แผ่นเป้าหมายที่ใช้ในการทดลองคือสแตนเลส. อุปกรณ์ของการทดลองการวัดประจุประกอบด้วยระบบทดสอบการตกกระทบ กรงฟาราเดย์และวงจรรขยายสัญญาณ. อุปกรณ์มีความละเอียดประมาณ 1 และ 10 fC สำหรับการวัดประจุของอนุภาคก่อนและหลังการตกกระทบ. อุปกรณ์สามารถวัดประจุของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100  $\mu\text{m}$ . อุปกรณ์สามารถบอกปริมาณการถ่ายเทประจุของอนุภาคที่ตกกระทบ ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วและมุมที่ตกกระทบ รวมทั้งบอกประจุเริ่มต้นก่อนการตกกระทบของอนุภาค.

งานวิจัยที่สำคัญเกี่ยวกับการศึกษาการอัดประจุให้กับอนุภาค มีดังนี้.

B.A. Kwetkus ศึกษากระบวนการเสียดสีของวัสดุอนุภาคตัวนำและอนุภาคฉนวนกับการใช้งานในกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าสถิต [11]. วิธีที่ง่ายสำหรับการให้ประจุกับอนุภาคในกระบวนการแยกวัสดุด้วยไฟฟ้าสถิตคือ การอัดประจุให้กับอนุภาคด้วยการเสียดสี. เมื่อมีวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดสัมผัสกัน และภายหลังแยกตัวออกจากกัน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า. ความแตกต่างของอิเล็กตรอนฟังก์ชันงาน (Work function) ของวัสดุ ทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อนอิเล็กตรอนจาก

พื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่ง. พื้นฐานของการเกิดไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นได้กับวัสดุหลายชนิดดังนี้เช่น วัสดุตัวนำ, วัสดุฉนวนในสุญญากาศ และวัสดุฉนวนในบรรยากาศที่เป็นก๊าซ. การเกิดไฟฟ้าสถิตของวัสดุตัวนำ เกิดจากการสัมผัสกันของโลหะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้น. การเกิดไฟฟ้าสถิตของวัสดุฉนวนในสุญญากาศ วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเทฟลอนและแผ่นทองคำ และประจุเริ่มต้นเพิ่มขึ้นแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียลภายใต้เงื่อนไขสถานะสุญญากาศ. การเกิดไฟฟ้าสถิตของวัสดุฉนวนในบรรยากาศที่เป็นก๊าซ พิจารณาปฏิกิริยาของพื้นผิวสัมผัสกับก๊าซที่ล้อมรอบ. ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของของแข็งมีค่าสูงพอที่จะเริ่มต้นการเกิดก๊าซเบรกดาวน์ เมื่อวัสดุที่สัมผัสกันถูกแยกออกจากกัน. ข้อดีของการเกิดกระบวนการเสียดสีของวัสดุคือ ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีการถ่ายภาพเอกซเรย์, การเคลือบผง, เทคโนโลยีการแยกแรงแพทสเซียม และอุตสาหกรรมเทคโนโลยีการแยกด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้การเสียดสีของอนุภาค เป็นต้น. ข้อเสียของการเสียดสีของวัสดุคือ การทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ การลุกไหม้หรือระเบิดในระหว่างการขนส่ง และการจัดเก็บของวัสดุ.

S. Matsusaka และคณะได้ศึกษาการอัดประจุด้วยการเสียดสีของผงอนุภาค [12]. การอัดประจุด้วยการเสียดสีสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อมีการถ่ายโอนของอิเล็กตรอน, การถ่ายโอนของไอออน และการถ่ายโอนของโลหะ. การถ่ายโอนของอิเล็กตรอนเป็นพื้นฐานของการถ่ายโอนประจุ. ความแตกต่างของฟังก์ชันงานของโลหะเป็นสาเหตุการถ่ายโอนของประจุ. เงื่อนไขของสภาพแวดล้อม อย่างเช่น อุณหภูมิ และความดัน เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการถ่ายโอนประจุ. การวัดประจุบนอนุภาค ด้วยวิธีกรงฟาราเดย์มีหลายรูปแบบซึ่งใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ต่างกันไป. การอัดประจุด้วยการเสียดสีของอนุภาคสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การแยกแบบไฟฟ้าสถิต, การเคลือบผงแห้ง และอิเล็กโตรโฟโตกราฟี (Electrophotography) เป็นต้น.

งานวิจัยที่ทบทวนในเบื้องต้นได้ศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนอากาศ ทั้งระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบและแบบไม่ระนาบ การวัดประจุในน้ำมันฉนวนแบบอนุภาคเคลื่อนที่ตกกระทบลงบนเป้าหมายตามแนวตั้ง การอัดประจุให้กับอนุภาคด้วยการเสียดสี. งานวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำมันฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้า เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างประจุและการเคลื่อนที่ และวัดประจุบนอนุภาคทั้งในสถานะสถิตและในระหว่างการเคลื่อนที่ ที่ใช้ระบบวัดประจุที่ประกอบด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกับวงจรรขยายสัญญาณ.

ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และนำมาใช้พิจารณาพฤติกรรมการอัดและการคายประจุของอนุภาค.

### 1.3 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ การสังเกตพฤติกรรมทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคในฉนวนเหลว เพื่อความสัมพันธ์ของประจุกับการเคลื่อนที่ และทดลองการวัดประจุของอนุภาคในสภาวะการเคลื่อนที่ เพื่อให้เห็นความเป็นได้ต่อการประยุกต์ใช้วิเคราะห์การอัดและการคายประจุของอนุภาค.

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากวิทยานิพนธ์เป็นพื้นฐานในการวัดประจุบนอนุภาคในระบบฉนวนเหลว ณ สถานที่เดิม และทำให้เข้าใจถึงลักษณะสมบัติของการอัดและการคายประจุของอนุภาค เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ผลของอนุภาคที่มีต่อระบบฉนวนต่อไป.



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การอัดประจุ

##### 2.1.1 การอัดประจุโดยใช้สนามไฟฟ้า

อนุภาคทรงกลมรัศมี  $r$  วางอยู่บนอิเล็กโทรดภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก  $E_0$ . สนามไฟฟ้าภายนอกทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำ  $q$  ขึ้น. เมื่อ  $\epsilon_0$  คือสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m และ  $\epsilon_s$  คือสภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง. ประจุ  $q$  สัมพันธ์กับ  $E_0$  โดย [5]

$$q = \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s E_0 r^2 \quad (1)$$

##### 2.1.2 การอัดประจุด้วยการเสียดสี

ในระบบไฟฟ้าสถิต การอัดประจุให้กับอนุภาคด้วยการเสียดสีสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการถ่ายโอนของอิเล็กตรอน, ไอออน หรือโลหะ. เมื่อมีวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดสัมผัสกัน และภายหลังแยกตัวออกจากกัน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า. ความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (Work function) ของวัสดุ ทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อนอิเล็กตรอนจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่ง. ตัวอย่างข้อมูลของฟังก์ชันงานแสดงดังตารางที่ 2.1. วัสดุที่ไม่สมดุลโดยมีอิเล็กตรอนขาดหายไปจะแสดงคุณสมบัติเป็นประจุบวก และวัสดุที่ได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจะแสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบ. ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและส่งผลต่อการถ่ายโอนประจุคือ เงื่อนไขของสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ และความดัน เป็นต้น [11, 12].

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลฟังก์ชันงาน (Work function) ของวัสดุ [13, 14]

วัสดุ	ฟังก์ชันงานอิเล็กตรอน (eV)
อลูมิเนียม	3.38
อะคริลิก	4.30
เหล็ก	4.40
ซิลิคอน	4.20



## 2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว

### 2.2.1 สนามไฟฟ้ายกตัว

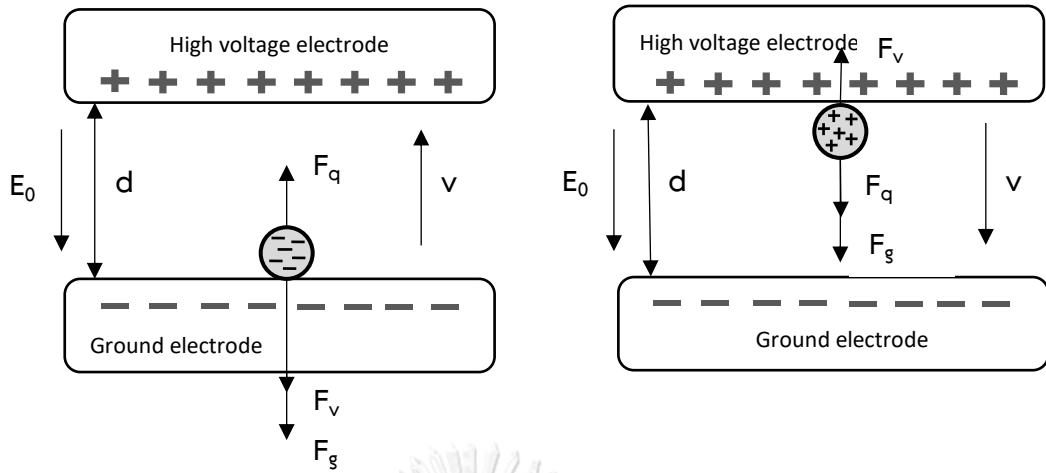
สนามไฟฟ้าถูกป้อนให้กับอนุภาคที่อยู่บนอิเล็กโทรดกราวนด์ของระบบอิเล็กโทรด. หากละลายแรงยึดระหว่างพื้นผิวสัมผัสของอนุภาคกับอิเล็กโทรดแล้ว อนุภาคสามารถยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวนด์ได้ เมื่อแรงคูลอมบ์  $F_q$  ที่กระทำกับอนุภาคมีขนาดมากกว่าแรงโน้มถ่วง  $F_g$ . อนุภาคทรงกลมที่มีรัศมี  $r$  ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก สนามไฟฟ้ายกตัว  $E_L$  หาได้จาก [5]

$$E_L = \sqrt{\frac{2.404gr(\rho_p - \rho_s)}{\pi\epsilon_0\epsilon_s}} \quad (2)$$

เมื่อ  $\rho_p$  คือความหนาแน่นของอนุภาค และ  $\rho_s$  คือความหนาแน่นของตัวกลาง.

### 2.2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว

พิจารณาระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบขนาน และอิเล็กโทรดแบบทรงกลมขนานกับระนาบ. อิเล็กโทรดด้านบนเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าแรงสูง. อิเล็กโทรดด้านล่างต่อลงดิน. อนุภาควางอยู่ที่อิเล็กโทรดด้านล่างภายใต้สนามไฟฟ้า. อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากอิเล็กโทรดด้านล่างมีขั้วประจุตรงกันข้ามกับอิเล็กโทรดด้านบนตัวอย่างเช่น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกให้กับอิเล็กโทรดด้านบน อนุภาคถูกวางไว้ที่อิเล็กโทรดด้านล่างทำให้อนุภาคมีประจุเป็นขั้วลบ แสดงดังรูปที่ 2.1 (ก). แรงคูลอมบ์  $F_q$  ที่เกิดขึ้นบนอนุภาคมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วง  $F_g$  รวมกับแรงต้านจากความหนืด  $F_v$  ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นไปสัมผัสกับอิเล็กโทรดด้านบนและเกิดการถ่ายเทประจุ. หลังจากนั้น อนุภาคเคลื่อนที่ลงเนื่องจากอนุภาคถูกอัดประจุขั้วบวก. แรงคูลอมบ์  $F_q$  ที่เกิดขึ้นบนอนุภาครวมกับแรงโน้มถ่วง  $F_g$  เมื่อหักล้างกับแรงต้านจากความหนืด  $F_v$  ส่งผลให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข).



(ก) การเคลื่อนที่ขึ้น

(ข) การเคลื่อนที่ลง

รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.

แรงโน้มถ่วง  $F_g$  กระทำต่ออนุภาคในทิศพุ่งลง คำนวณได้จาก

$$F_g = \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_p - \rho_s) \quad (3)$$

เมื่อ  $r$  คือรัศมีของอนุภาค และ  $g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง. แรงคูลอมบ์  $F_q$  เกิดขึ้นจากประจุ  $q$  บนตัวอนุภาคในสนามไฟฟ้า  $E_0$ . เมื่อละลายผลของอิเล็กโทรต และสมมติให้ประจุกระจายอย่างสม่ำเสมอบนอนุภาค เราคำนวณแรงคูลอมบ์ได้จาก

$$F_q = qE_0 \quad (4)$$

แรงต้านจากความหนืด  $F_v$  มีทิศตรงข้ามกับทิศของการเคลื่อนที่ของอนุภาค. พิจารณาอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  และ  $\eta$  คือสัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวกลาง ( $N.s/m^2$ ). แรงความหนืดสำหรับอนุภาคทรงกลมคำนวณได้จาก

$$F_v = 6\pi\eta r v \quad (5)$$

ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาค สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้.

ในการเคลื่อนที่ขึ้น :

$$F_v = F_q - F_g \quad (6)$$

$$v = \frac{1}{3\eta} \left[ \frac{qE_0}{2\pi r} - \frac{2}{3} r^2 g (\rho_p - \rho_s) \right] \quad (7)$$

ในการเคลื่อนที่ลง :

$$F_v = F_q + F_g \quad (8)$$

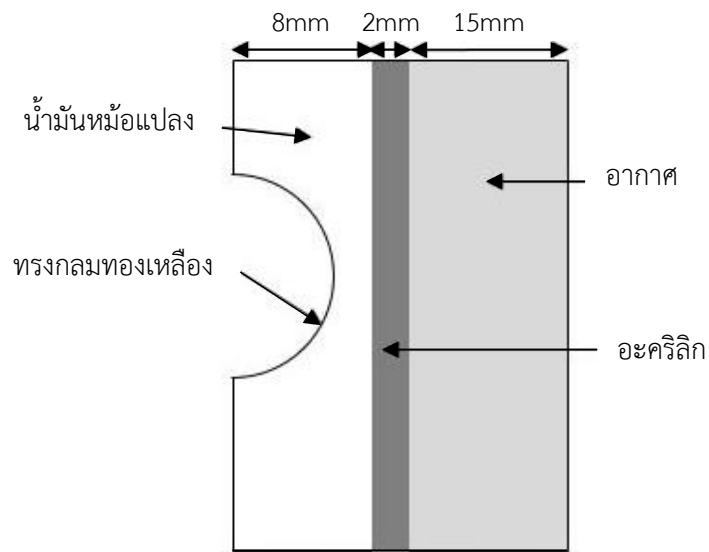
$$v = \frac{1}{3\eta} \left[ \frac{qE_0}{2\pi r} + \frac{2}{3} r^2 g (\rho_p - \rho_s) \right] \quad (9)$$

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสำหรับวิทยานิพนธ์มีค่าดังนี้. สัมประสิทธิ์ความหนืด  $\eta$  มีค่าเท่ากับ 8.759 m Ns/m<sup>2</sup> สภาพยอมสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  ของน้ำมันฉนวนมีค่าเท่ากับ 2.35. ความหนาแน่นของอนุภาคคอลลูมิเนียนและน้ำมันฉนวน มีค่าเท่ากับ 2700 และ 819.6 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ. ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคในระบบบิเล็กโทรดแบบระนาบ สามารถคำนวณได้จากสมการข้างต้น. ระดับแรงดันที่เลือกใช้คือ 7-9 kV. ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2.2.

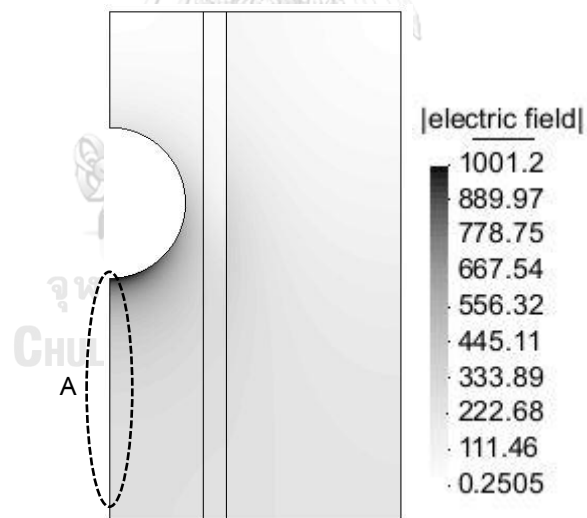
ตารางที่ 2.2 ความเร็วอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของระบบบิเล็กโทรดแบบระนาบ

แรงดัน (kV)	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค	
	การเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)	การเคลื่อนที่ลง (m/s)
7	0.0528	0.2025
8	0.0919	0.2415
9	0.1362	0.2858

สำหรับระบบบิเล็กโทรดแบบทรงกลมกับระนาบ สนามไฟฟ้าซึ่งกระจายแบบไม่สม่ำเสมอถูกคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม GID ในการสร้างแบบจำลอง และโปรแกรม Elmer ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า. แบบจำลองมีลักษณะเป็นแบบสมมาตร. บิเล็กโทรดทรงกลมรัศมี 6.5 mm. ระยะห่างระหว่างทรงกลมกับบิเล็กโทรดระนาบคือ 20 mm. ด้านซ้ายของแบบจำลองคือน้ำมันฉนวนตรงกลางคืออะคริลิก และด้านขวาคืออากาศ มีระยะห่าง 8 mm, 2 mm และ 15 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2. การคำนวณสนามไฟฟ้าของโปรแกรม Elmer ทำโดยป้อนแรงดัน 8-10 kV และรูปที่ 2.3 แสดงผลการคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Elmer ที่ระดับแรงดัน 8 kV.



รูปที่ 2.2 แบบจำลองใน GiD ที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.



รูปที่ 2.3 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 8 kV.

ค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเส้นทาง A ถูกนำมาใช้คำนวณหาความเร็วของอนุภาค และเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ ทำให้ได้ความเร็วเฉลี่ยดังตารางที่ 2.3. ระดับแรงดันที่เลือกใช้คือ 8-10 kV.

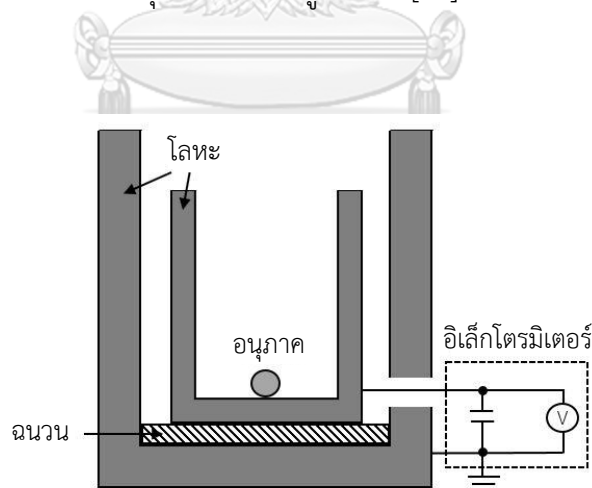
ตารางที่ 2.3 ความเร็วจากการคำนวณของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมขนานกับระนาบ

แรงดัน (kV)	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค	
	การเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)	การเคลื่อนที่ลง (m/s)
8	0.0157	0.1734
9	0.0445	0.1997
10	0.0748	0.2291

## 2.3 การวัดประจุ

### 2.3.1 การวัดประจุโดยใช้ถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กทรอนิกส์มิเตอร์

ถ้วยฟาราเดย์เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับประจุของอนุภาค. ถ้วยฟาราเดย์ทำมาจากโลหะที่เป็นตัวนำที่มีลักษณะเป็นถ้วยทรงระบอกล้อมรอบแกน มีกราวนด์อยู่ด้านนอก. ช่องว่างระหว่างภายในและภายนอกของถ้วยฟาราเดย์เปรียบเสมือนตัวเก็บประจุ. อนุภาคที่กระทบกับตัวนำด้านในของถ้วยฟาราเดย์ ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไปที่ถ้วยฟาราเดย์. ประจุดังกล่าวเหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทประจุที่ตัวนำด้านนอกเช่นเดียวกันในลักษณะของตัวเก็บประจุ. อิเล็กทรอนิกส์มิเตอร์ที่ถูกเชื่อมต่อกับถ้วยฟาราเดย์สามารถวัดค่าประจุออกมาได้ ดังรูปที่ 2.4 [15].



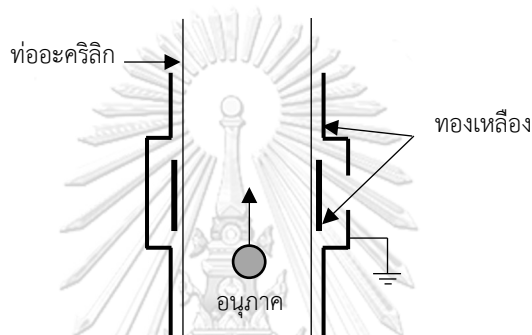
รูปที่ 2.4 ถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กทรอนิกส์มิเตอร์ [12].

### 2.3.2 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน

ปรากฏการณ์อัดและคายประจุของอนุภาคในฉนวนเหนี่ยวนำมีความซับซ้อนมากกว่าในอากาศ. อนุภาคอาจสูญเสียประจุให้กับฉนวนเหนี่ยวนำเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน. ดังนั้น การวัดประจุใน

ระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญ ซึ่งทำให้เราเข้าใจถึงสถานะประจุของอนุภาคในระหว่างการเคลื่อนที่ และทำให้สามารถวิเคราะห์พลศาสตร์ของอนุภาคได้อย่างถูกต้องต่อไป.

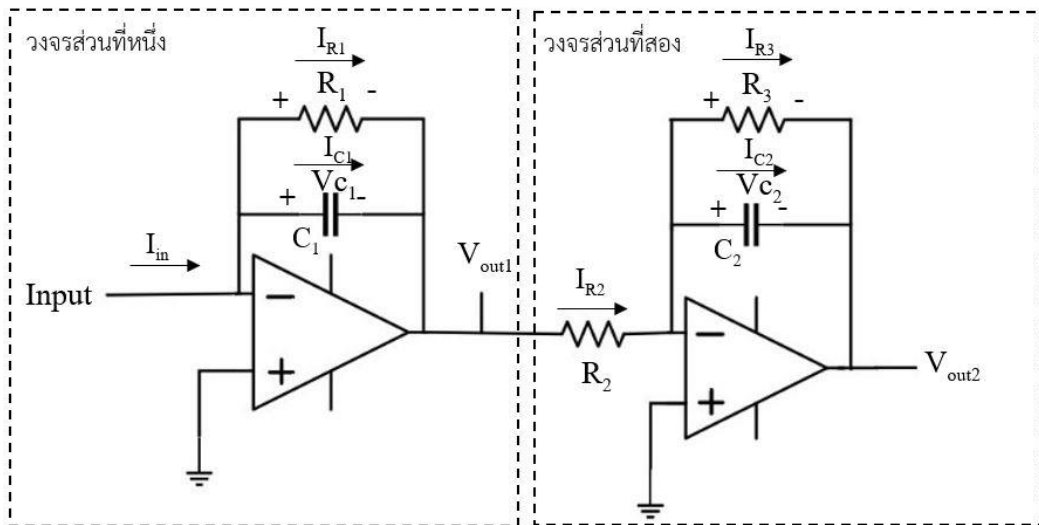
รูปที่ 2.5 อธิบายถึงการทำงานและส่วนประกอบของการวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่. อนุภาคที่ใช้มีการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง ภายในท่อที่ใช้ทำการทดลอง. การวัดประจุขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ใช้ถ้วยฟาราเดย์และวงจรวัดประจุติดกับท่อที่ใช้ทำการทดลองและแสดงผลออกมาเป็นค่าแรงดันที่ออสซิลอสโคป. ถ้วยฟาราเดย์ทำจากทรงกระบอกทองเหลืองด้านในต่อเข้ากับวงจรรขยายและด้านนอกต่อเข้ากับกราวนด์.



รูปที่ 2.5 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน.

วงจรวัดประจุประกอบด้วย ออปแอมป์ที่ต่อเป็นแบบวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ (Op-Amp Integrator circuit) และวงจรรขยายสัญญาณต่ออนุกรมกัน. วงจรรวมอินทิเกรเตอร์ส่วนหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง (รูปที่ 2.6) ทำหน้าที่รับค่าประจุจากความสัมพันธ์ของกระแสและเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่เข้ามาในวงจร. ผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรรวมอินทิเกรเตอร์คือแรงดันขาออก ( $V_{out}$ ). เราสามารถคำนวณประจุได้จาก

$$Q = -\int Idt \quad (10)$$



รูปที่ 2.6 วงจรออปแอมป์แบบอินทิเกรเตอร์ส่วนที่หนึ่งและวงจรขยายส่วนที่สอง.

การคำนวณเราอาจให้กระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของประจุเป็น 2 รูปแบบได้แก่ กระแสพัลส์ และ กระแสเพิ่มขึ้นตามเวลา และวิเคราะห์ว่ากระแสทั้งสองไหลผ่านเข้าวงจรออปแอมป์แล้วแรงดันขาออก  $V_{out1}$  ที่ได้จะเป็นอย่างไร. สมการแรงดันขาออก  $V_{out1}$  สัมพันธ์กับแรงดันของตัวเก็บประจุ  $V_{C1}$  ดังนี้

$$V_{out1} = -V_{C1} \quad (11)$$

(ก) กระแสเริ่มต้นคือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (pulse)

ความสัมพันธ์ของกระแสในวงจรส่วนที่หนึ่งจะได้

$$I_{in} = I_{C1} + I_{R1} \quad ; \quad I_{in} = I_1 \quad (12)$$

$$I_1 = C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} + \frac{V_{C1}}{R_1}$$

$$-\frac{1}{R_1 C_1} (V_{C1} - I_1 R_1) = \frac{dV_{C1}}{dt}$$

$$\int_{V_{C1}(0)}^{V_{C1}(t)} \left( \frac{1}{V_{C1} - I_1 R_1} \right) dV_{C1} = -\int_0^t \frac{1}{R_1 C_1} dt$$

$$\ln(V_{C1} - I_1 R_1) \Big|_{t=0}^{t=t} = -\frac{1}{R_1 C_1} \left[ \int_0^t 1 dt \right]$$

$$\ln \frac{[V_{C1}(t) - I_1 R_1]}{[V_{C1}(0) - I_1 R_1]} = -\frac{t}{R_1 C_1}$$

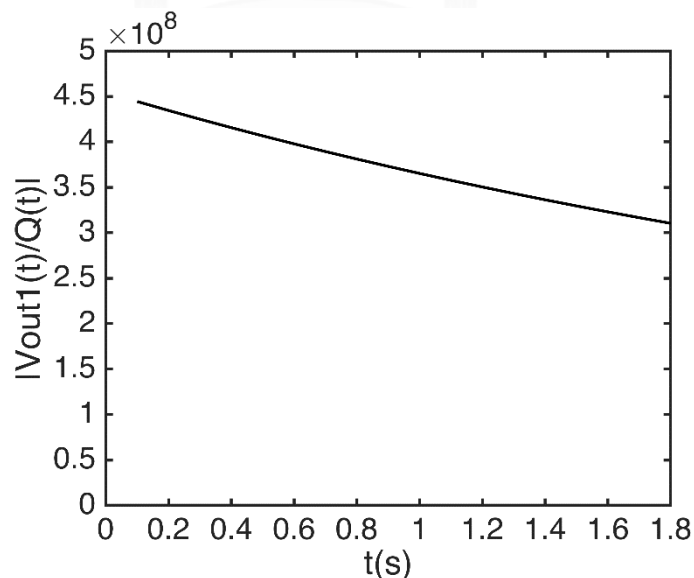
$$\frac{[V_{C1}(t) - I_1 R_1]}{[V_{C1}(0) - I_1 R_1]} = e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}$$

$$V_{C1}(t) = I_1 R_1 + [V_{C1}(0) - I_1 R_1] e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \quad (13)$$

เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะได้ว่า  $V_{C1}(0) = 0$  จะได้ว่า

$$V_{out1} = -V_{C1}(t) = -I_1 R_1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \right) \quad (14)$$

เมื่อแทนค่า  $R_1$  และ  $C_1$  ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ  $1 \text{ G}\Omega$  และ  $2200 \text{ pF}$  และกำหนดให้ค่า  $I_1$  และ  $t_1$  เท่ากับ  $1 \text{ A}$  และ  $1.8 \text{ s}$  ลงในสมการที่ (14). ค่าประจุสามารถหาได้จาก  $Q(t) = It$  จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดัน  $V_{out1}$  ต่อประจุกับเวลา แสดงดังรูปที่ 2.7. เวลา  $t = 0 \text{ s}$  ค่าแรงดัน  $V_{out1}$  และค่าประจุ  $Q$  จะมีค่าเป็น 0. เวลา  $t = 0.1-1.8 \text{ s}$  ขนาดของแรงดัน  $V_{out1}$  ต่อประจุ  $Q$  มีค่า  $4.444 \times 10^8 \text{ V/C}$  และลดลงเรื่อยๆจนถึงค่า  $3.104 \times 10^8 \text{ V/C}$ .



รูปที่ 2.7 แรงดัน  $V_{out1}$  ต่อประจุเทียบกับเวลาเวลาเมื่อกระแสเริ่มต้นคือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม.



(ข) กระแสเริ่มต้นเป็นแบบเพิ่มขึ้นตามเวลา

ความสัมพันธ์ของกระแสในวงจรส่วนที่หนึ่งจะได้

$$I_{C1} + I_{R1} = I_{in} \quad ; \quad I_{in} = \frac{I_1}{t_1} t$$

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} + \frac{V_{C1}}{R_1} = i(t)$$

เมื่อเราใช้แปลงลาปลาซ จะได้

$$[sV_{C1}(s) - V_{C1}(0)] + \frac{V_{C1}}{R_1 C_1} = \left( \frac{I_1}{C_1 t_1} \right) \frac{1}{s^2}; \quad V_{C1}(0) = 0, \quad I(s) = \left( \frac{I_1}{t_1} \right) \frac{1}{s^2}$$

$$V_{C1}(s) = \left( \frac{I_1}{C_1 t_1} \right) \frac{1}{s^2} \left( \frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} \right) \quad (15)$$

คำนวณด้วยวิธีแปลงลาปลาซผกผัน (Inverse Laplace) โดยใช้วิธีการแยกเศษส่วนย่อย ได้ดังนี้

$$\left( \frac{1}{s^2} \right) \left( \frac{1}{s + (R_1 C_1)^{-1}} \right) = \frac{A_1}{s + (R_1 C_1)^{-1}} + \frac{A_2}{s} + \frac{A_3}{s^2} \quad (16)$$

$$1 = A_1 (s^2) + A_2 (s) \left( s + \frac{1}{R_1 C_1} \right) + A_3 \left( s + \frac{1}{R_1 C_1} \right) \quad (17)$$

เมื่อแทนค่า  $s = 0$  ในสมการที่ (17) จะได้

$$1 = A_3 \left( \frac{1}{R_1 C_1} \right) \quad \Rightarrow \quad A_3 = R_1 C_1$$

แทนค่า  $s = -1/RC$  ในสมการที่ (17) จะได้

$$1 = A_1 - \left( \frac{1}{R_1 C_1} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad A_1 = (R_1 C_1)^2$$

เทียบสัมประสิทธิ์ของ  $s^2$  ในสมการที่ (17)

$$0 = A_1 + A_2$$

$$A_2 = -(R_1 C_1)^2$$

แทนค่า  $A_1$ ,  $A_2$  และ  $A_3$  ในสมการที่ (16) จะได้

$$\left(\frac{1}{s^2}\right) \left(\frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}}\right) = (R_1 C_1^2) \frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} - (R_1 C_1^2) \frac{1}{s} + (R_1 C_1) \frac{1}{s^2}$$

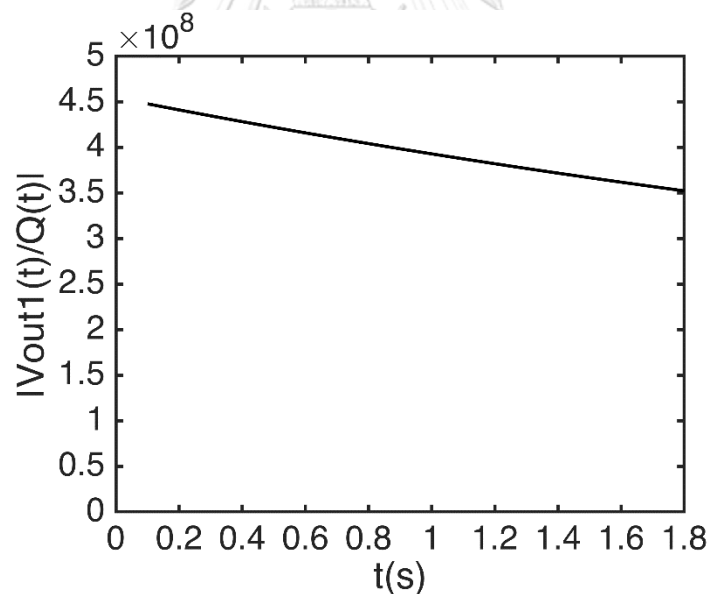
จากสมการที่ (15)

$$V_{C1}(t) = L^{-1}\{V_{C1}(S)\}$$

$$= \left[ \frac{I_1}{C_1 t_1} \right] \left[ (R_1 C_1)^2 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - (R_1 C_1)^2 + (R_1 C_1) t \right]$$

ดังนั้นเราสามารถเขียน  $V_{out1}$  ได้เป็น

$$V_{out1} = -\frac{I_1 R_1}{t_1} \left( t + R_1 C_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - R_1 C_1 \right) \quad (18)$$



**รูปที่ 2.8** แรงดัน  $V_{out1}$  ต่อประจุเทียบกับเวลาเวลาเมื่อกระแสเริ่มต้นเป็นแบบเพิ่มขึ้นตามเวลา.

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน  $V_{out1}$  ต่อประจุกับเวลา เมื่อแทนค่า  $R_1$  และ  $C_1$  ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 1 GΩ และ 2200 pF และกำหนดให้ค่า  $I_1$  และ  $t_1$  เท่ากับ 1 A และ 1.8 s ลงในสมการที่ (18). ค่าประจุสามารถหาได้จาก  $Q(t) = \int_0^t i(t) dt$ . เวลา  $t = 0$  s ค่าแรงดัน  $V_{out1}$  และค่า

ประจุ  $Q$  จะมีค่าเป็น 0. เวลา  $t = 0.1-1.8$  s ขนาดของแรงดัน  $V_{out1}$  ต่อประจุ  $Q$  มีค่า  $4.477 \times 10^8$  V/C และลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่า  $3.523 \times 10^8$  V/C.

ลักษณะการทำงานของวงจรถือ ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ในฉนวนน้ำมันผ่านโพรบ (Probe). กระแสของวงจรถือในช่วงเริ่มต้นจะไหลมาที่ตัวเก็บประจุ เนื่องจากตัวเก็บประจุยังไม่อัดประจุ แรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าเป็น 0. เวลาผ่านไปนานขึ้นกระแสไหลผ่านตัวต้านทานเพราะว่าแรงดันของตัวเก็บประจุได้อัดประจุไว้เต็มแล้ว. แรงดันขาออก ( $V_{out1}$ ) ต้องอยู่ในฟังก์ชันของประจุ. กระแสจึงถูกบังคับให้ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียวด้วยวิธีการปรับค่าคงที่เวลา (Time constant) ให้มีค่ามากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดลอง. ค่าคงที่เวลาถูกปรับได้โดยการปรับค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ใช้. ผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรถือคือแรงดันขาออก  $V_{out1}$  ซึ่งเท่ากับส่วนกลับของแรงดันของตัวเก็บประจุ  $-V_C$ .

สัญญาณเริ่มต้นที่เข้าในวงจรรอบแอมป์ส่วนที่สองคือแรงดันขาออก  $V_{out1}$  ของวงจรถือแรก. แรงดัน  $V_{out1}$  ไหลผ่านไปที่ตัวต้านทาน  $R_2$  และ  $R_3$  ตามลำดับ. ตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะต้องมีค่าน้อยมาก เพราะต้องการขยายแรงดันขาออก  $V_{out1}$  ที่มีค่าน้อยมาก. สัญญาณที่ไหลออกจากตัวต้านทานคือสัญญาณแรงดันขาออก  $V_{out2}$ . วงจรถือสองทำหน้าที่ขยายแรงดันขาออก  $V_{out1}$  แบบกลับขั้วให้มีค่าเพิ่มขึ้น  $-\frac{R_3}{R_2}$  เท่า.

สำหรับการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างของวงจรถืออินทิเกรเตอร์และวงจรถือขยาย ทำโดยการคำนวณเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านในระยะ 2 mm เวลาที่ได้เท่ากับ 0.18 วินาที ตัวต้านทาน  $R_1$  ต้องเลือกให้มีค่ามาก เพื่อที่จะบังคับกระแสให้ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  และค่าคงที่เวลาจะต้องเลือกให้มีค่ามากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดลองเพื่อที่จะให้สัญญาณอยู่ในภาวะชั่วคราว. อัตราขยายพิจารณาจากแรงดันขาออก  $V_{out1}$  และแรงดันที่ต้องการที่ออสซิลอสโคป. ตัวต้านทาน  $R_2$  จะต้องเลือกให้มีค่าน้อย เพราะต้องการบังคับให้กระแสไหลผ่านที่ตัวต้านทาน  $R_2$ . จากการวิเคราะห์ที่ได้เลือกพารามิเตอร์ของวงจรถือส่วนที่หนึ่ง ตัวต้านทาน  $R_1$  และ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ให้มีค่าเท่ากับ 1 G $\Omega$  และ 2200 pF ค่าคงที่เวลามีค่าเท่ากับ 2.2. วงจรถือสองมีอัตราขยาย -100 เท่า ตัวต้านทาน  $R_2$  และ  $R_3$  มีค่าเท่ากับ 1 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ  $C_2$  คือ 100 pF ค่าคงที่เวลามีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-5}$  s.

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวัสดุการทดลอง

#### 3.1 อนุภาค

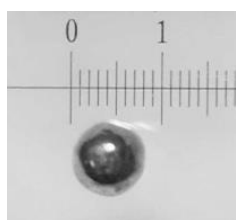
อนุภาคที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- 1) การทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว อนุภาคที่ใช้คือ อนุภาคอลูมิเนียม เกรด 200 ขนาดรัศมี 0.4  $\mu\text{m}$  (Micro surface engineering) แสดงดังรูปที่ 3.1.

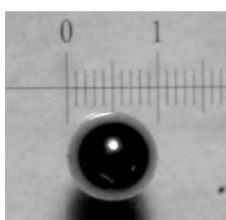


รูปที่ 3.1 อนุภาคอลูมิเนียม.

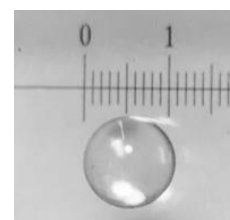
- 2) การทดลองการอัดประจุด้วยการเสียดสี อนุภาคที่ใช้คือ อนุภาคอลูมิเนียม อนุภาคเหล็ก และ อนุภาคแก้ว รัศมี 0.4  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$  และ 0.5  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.2.



(ก) อนุภาคอลูมิเนียม



(ข) อนุภาคเหล็ก



(ค) อนุภาคแก้ว

รูปที่ 3.2 อนุภาคตัวนำและฉนวน.

### 3.2 อุปกรณ์ในการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฉนวนเหลว มีดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องกำเนิดสัญญาณ Tektronix (รุ่น AFG3021B) 250MS/s, 25 MHz แอมพลิจูดสูงสุดถึง  $20 V_{p-p}$
- 2) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง (Trek, รุ่น 610E) สามารถจ่ายแรงดันได้ตั้งแต่ 0 ถึง  $\pm 10 \text{ kV}$  และจ่ายกระแสตั้งแต่ 0 ถึง  $\pm 2000 \mu\text{A}$  แสดงดังรูปที่ 3.3.

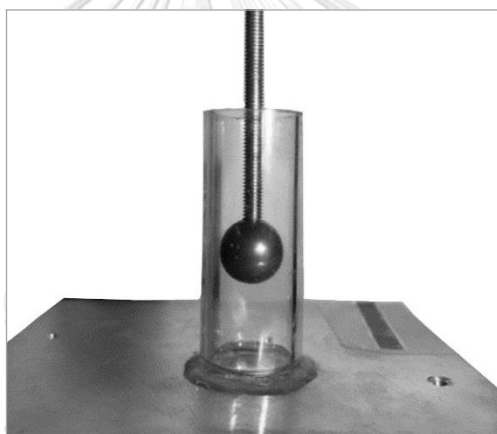


รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.

- 3) ออสซิลโลสโคป (Rigol, รุ่น DS1022C ) 400 MSa/s, 25 MHz.
- 4) ระบบอิเล็กทรอนิกส์มี 2 แบบดังนี้
  - 5.1) ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบคู่ขนาน อิเล็กทรอนิกส์ออลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 cm แสดงดังรูปที่ 3.4.
  - 5.2) ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมทองเหลืองกับระนาบ อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 cm แสดงดังรูปที่ 3.5.
- 5) ภาชนะบรรจุน้ำมันฉนวนซึ่งเป็น โถแก้วทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 7.8 cm ยาว 9.5 cm และสูง 5.8 cm และท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.6 cm สูง 5 cm.



รูปที่ 3.4 การจัดวางระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบขนานกันในโถแก้วทรงสี่เหลี่ยม.



รูปที่ 3.5 การจัดวางระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมทองเหลืองกับระนาบภายในท่ออะคริลิก.

- 6) กล้องดิจิทัล (Casio รุ่น EX-ZR1200) ซึ่งถูกใช้บันทึกภาพที่อัตราเฟรม 240 fps. ขนาดของเฟรมเท่ากับ 512 x 384 pixel.
- 7) ไฟส่องสว่าง แอลอีดี (10 W).
- 8) น้ำมันฉนวน หม้อแปลง ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 3.1.

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของน้ำมันฉนวน

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	ค่าทั่วไป
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C (kg/dm <sup>3</sup> )	ISO 3675	0.875 – 0.88
จุดวาบไฟ (°C)	ISO 2719	145
จุดไหลเท (°C)	ISO 3016	-50
ค่าความเป็นกรด (mgKOH/s)	ISO 62021-1	<0.01

### 3.3 การอัดประจุด้วยการเสียดสี

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการอัดประจุให้กับอนุภาคด้วยการเสียดสี มีดังต่อไปนี้

- 1) ท่ออะคริลิกกลวงถูกใช้กับอนุภาคอลูมิเนียมและอนุภาคเหล็ก. ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.6 cm สูง 2 cm. ท่อสแตนเลสกลวงถูกใช้กับอนุภาคแก้ว. ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.7 cm สูง 2 cm แสดงดังรูปที่ 3.6.



(ก) ท่ออะคริลิก

(ข) ท่อสแตนเลส

รูปที่ 3.6 ท่อกลวงสำหรับอัดประจุ.

- 2) พาราฟิล์ม (Bemis, รุ่น PM-996)
- 3) เครื่องเขย่าสาร (Scientific Industries, Vortex genie 2, รุ่น G560) แสดงดังรูปที่ 3.7.



รูปที่ 3.7 เครื่องเขย่าสาร.

### 3.4 อุปกรณ์ในการวัดประจุบนอนุภาค

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดประจุของอนุภาคด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์ มีดังต่อไปนี้แสดงดังรูปที่ 13.

- 1) ถ้วยฟาราเดย์ทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยด้านนอกเท่ากับ 12 cm สูง 12 cm. เส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยด้านในเท่ากับ 7 cm สูง 6.5 cm. ฉนวนหนา 1.5 cm แสดงดังรูปที่ 3.8.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ถ้วยฟาราเดย์.



- 2) เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ (KEITHLEY, Model 617) แสดงดังรูปที่ 3.9. Range สำหรับการวัดประจุคือ 200 pC. สัญญาณอนาล็อกขาออก เท่ากับ 1.25 V.



รูปที่ 3.9 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์.

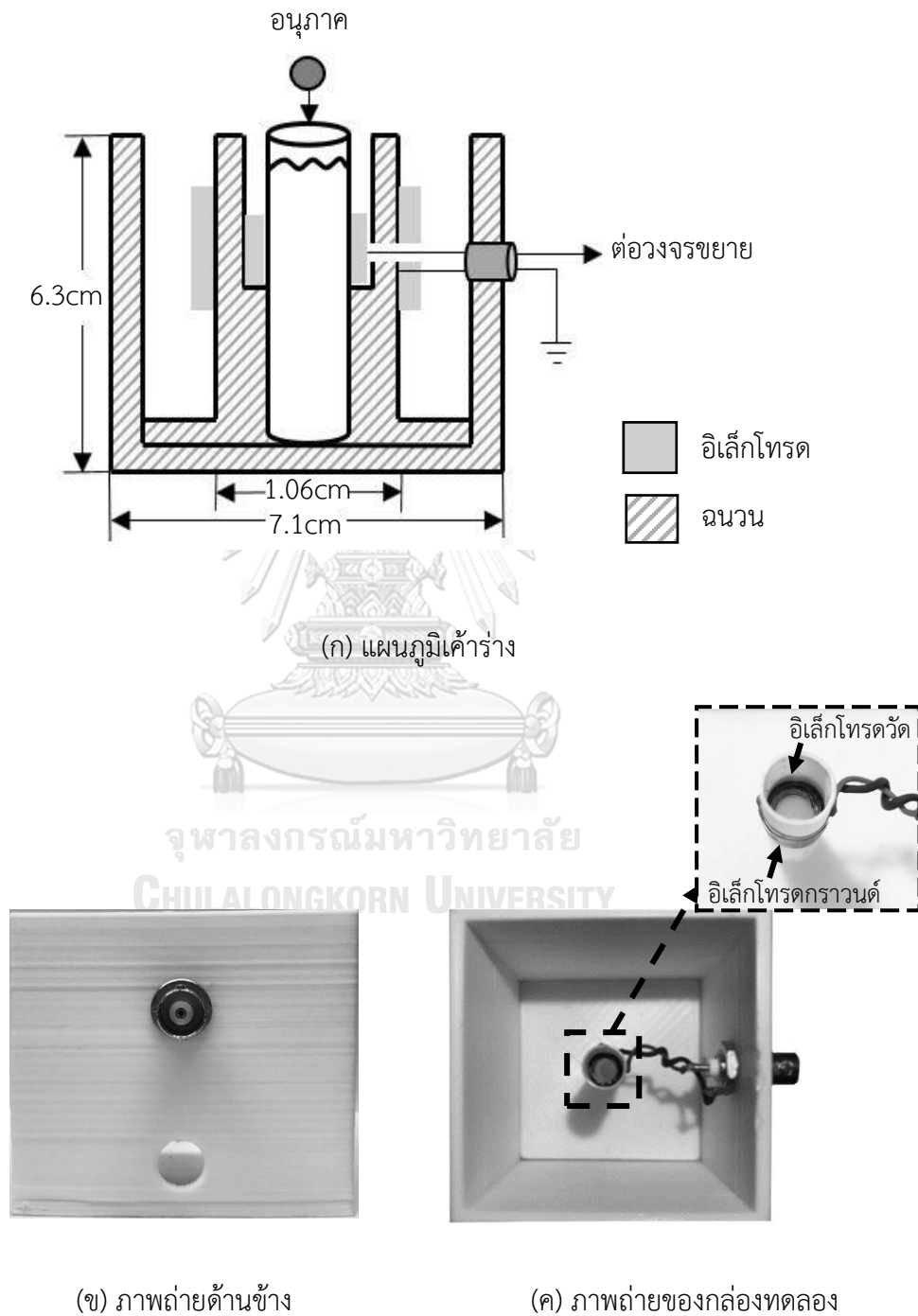
- 3) DAQ (National Instrument, NI cDAQ - 9174) Module NI 9215 Analog input ( $\pm 10$  V) ใช้สำหรับรับค่าสัญญาณอนาล็อกขาออกจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์.
- 4) ครอบทดลองพลาสติกใส สำหรับใส่น้ำมันฉนวนเพื่อปล่อยอนุภาคและวัดประจุ แสดงดังรูปที่ 3.10. ครอบทดลองพลาสติกใสมี 2 ขนาดดังนี้. ขนาดแรกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 mm สูง 6 cm และขนาดที่สองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 mm สูง 5 cm.



(ก) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 mm      (ข) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 mm

รูปที่ 3.10 ครอบทดลองพลาสติกใส.

- 5) กล่องทดลอง สำหรับวางกระบอกทดลองพลาสติกใส และอิเล็กโทรดวัดกับอิเล็กโทรดกราวนด์ เพื่อเชื่อมต่อกับวงจรวัดประจุ. กล่องทดลองมีขนาดกว้าง 7.1 cm สูง 6.3 cm แสดงดังรูปที่ 3.11.



รูปที่ 3.11 กล่องวางกระบอกทดลอง.

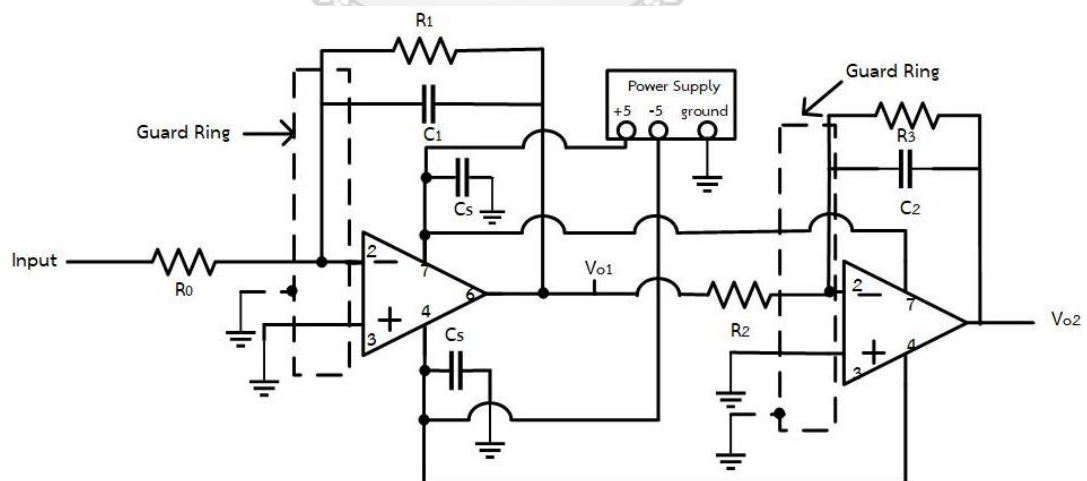
6) วงจรวัดประจุ (ดูคำอธิบายในหัวข้อ 3.5)

7) ออสซิลโลสโคป (Tektronix, รุ่น TBS 1202B-EDU ) มีพิกัด 2 GS/s, 200MHz, ช่วงความไวของขาเข้า 2 mV – 5 V/div, แรงดันขาเข้าสูงสุด 300 V<sub>RMS</sub>.

### 3.5 วงจรวัดประจุ

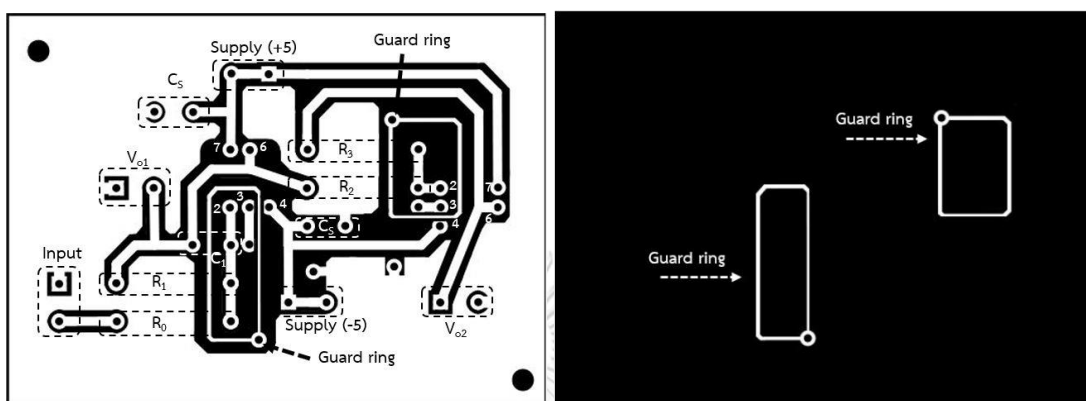
วิธีการออกแบบแผ่นวงจรวัดประจุและประกอบกล่องวงจรวัดประจุ มีรายละเอียดดังนี้.

- 1) ลายของวงจรวัดประจุที่ต้องการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.12. วงจรวัดประจุประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ (Op-Amp Integrator circuit) และวงจรขยายสัญญาณต่ออนุกรมกัน. ตัวต้านทาน  $R_0$  ต่อเข้ากับ Input ของวงจรอินทิเกรเตอร์เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของวงจรก่อนที่จะนำแผ่นวงจรไปใช้ทดลองวัดประจุจริง. การป้องกันวงจรถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกกระทำโดยใช้ Guard Ring ล้อมรอบ Input ที่จะเชื่อมต่อกับ Input ของออปแอมป์. ตัวเก็บประจุ  $C_s$  ถูกต่อเข้ากับไฟเลี้ยง  $\pm$  ของออปแอมป์และ  $C_s$  มีค่าเท่ากับ 0.1  $\mu$ F เพื่อกรองสัญญาณความถี่สูง. พารามิเตอร์ของวงจรอินทิเกรเตอร์คือ  $R_1 = 1 \text{ G}\Omega$ ,  $C_1 = 2200 \text{ pF}$  วงจรขยายมีค่า  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $C_2 = 100 \text{ pF}$ .



รูปที่ 3.12 วงจรวัดประจุที่ใช้ออกแบบแผ่น PCB.

- 2) ออกแบบลายวงจรวัดประจุด้วยโปรแกรม Fritzing. กำหนดส่วนที่ต้องการให้เป็นทองแดงด้วยสีขาว และส่วนที่ต้องการให้น้ำยากัดทองแดงออกเป็นสีดำด้วยโปรแกรม Inkscape แสดงดังรูปที่ 3.13.



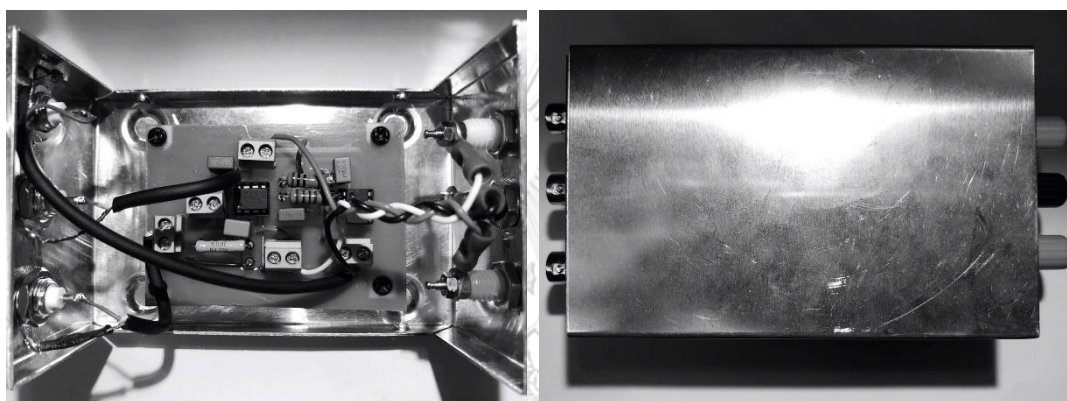
(ก) ลายวงจรด้านบน

(ข) ลายวงจรด้านล่าง

รูปที่ 3.13 ลายวงจรวัดประจุ.

- 3) นำฟิล์มไวแสงที่มีความหนา 15  $\mu\text{m}$  ติดลงแผ่นทองแดง PCB (ทั้งสองด้านเป็นทองแดง) ทั้งสองด้าน.
- 4) นำแผ่นทองแดง PCB ที่ติดฟิล์มเรียบร้อยแล้วเข้าเครื่องรีดความร้อน รีดซ้ำ 4-5 ครั้ง เพื่อให้แผ่นฟิล์มติดเรียบสนิท และนำเข้าอบความร้อนด้วยเครื่อง Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศา 15 นาที (ลอกแผ่นพลาสติกออกก่อนนำเข้าเครื่อง Hot plate).
- 5) นำลายวงจรที่ออกแบบไว้ในข้อ 2) วางลงบนแผ่นทองแดง PCB และนำไปฉายแสงหลอด UV เวลา 6 วินาที. ต่อมานำแผ่นทองแดง PCB เข้าอบความร้อน ที่อุณหภูมิ 90 องศา 15 นาที.
- 6) แผ่นทองแดงถูกล้างด้วยสารละลาย Sodium Carbonate (อัตราส่วน Sodium Carbonate 1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร) เป็นเวลา 35 วินาที และล้างออกด้วยน้ำ DI. แผ่นทองแดงถูกเป่าให้แห้ง และนำไปอบความร้อนรอบแรกที่อุณหภูมิ 65 องศา 5 นาที รอบที่สองอุณหภูมิ 90 องศา 5 นาที.

- 7) แผ่นทองแดงถูกแช่ด้วยน้ำยากัดทองแดง (อัตราส่วนน้ำยากัดทองแดง 100 มิลลิลิตร ต่อ น้ำ 400 มิลลิลิตร) แช่จนกว่าจะเห็นลายทองแดงชัดเจนและล้างออกด้วยน้ำสะอาด.
- 8) เจาะรูและบัดกรีแผ่นทองแดงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทาน้ำยาเคลือบที่ด้านทองแดง แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง.
- 9) นำแผ่นวงจรที่ต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้ว ประกอบลงในกล่องอลูมิเนียมเย็บที่ ติดตั้ง Connector เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน แสดงดังรูปที่ 3.14.



(ก) ด้านในกล่องวัดประจุ

(ข) ด้านนอกกล่องวัดประจุ

รูปที่ 3.14 กล่องวงจรวัดประจุและการเชื่อมต่อ.

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 การเตรียมตัวอย่างและวัสดุ

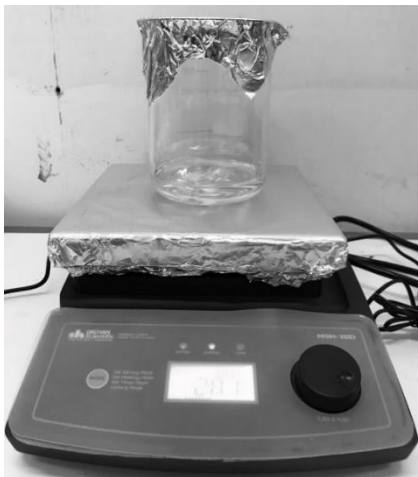
##### 4.1.1 อนุภาค

อนุภาคที่ใช้ทดลองมี 3 ชนิด คืออนุภาคอลูมิเนียม อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว ซึ่งมีรัศมี 0.4 mm, 0.5 mm และ 0.5 mm ตามลำดับ. อนุภาคทั้งสามมีลักษณะทรงกลม ผิวเรียบ. สภาพของผิวอนุภาคมีผลอย่างมากต่อการทดลองอัดประจุและวัดประจุ จึงต้องมีการเตรียมทำความสะอาดอนุภาคด้วย แอซิโตน สำหรับอนุภาคตัวนำ หรือเอทานอล สำหรับอนุภาคฉนวน ประมาณ 20 ml ในบีกเกอร์ที่จัดเตรียมไว้. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner) ใช้สำหรับการทำความสะอาดเป็นเวลา 30 นาที. หลังจากนั้นนำอนุภาคออกจากบีกเกอร์ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียมฟอยล์ และทำให้แห้งโดยวางบนแผ่นความร้อน (Hotplate) ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 10 นาที. หลังจากทำความสะอาดแล้ว อนุภาคถูกเก็บในตู้ดูดความชื้นก่อนนำมาใช้ในการทดลอง.

##### 4.1.2 น้ำมันฉนวน

เพื่อให้ น้ำมันฉนวนมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันในระหว่างการทดลอง จึงมีการจัดการน้ำมันฉนวนก่อนนำไปใช้ทดลองดังนี้

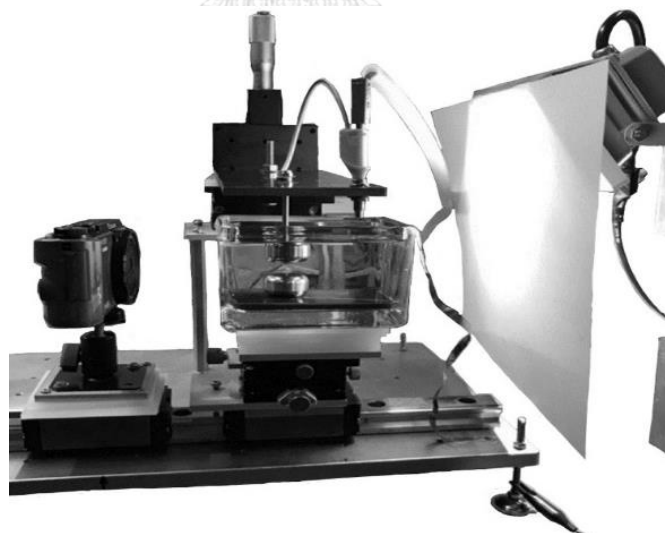
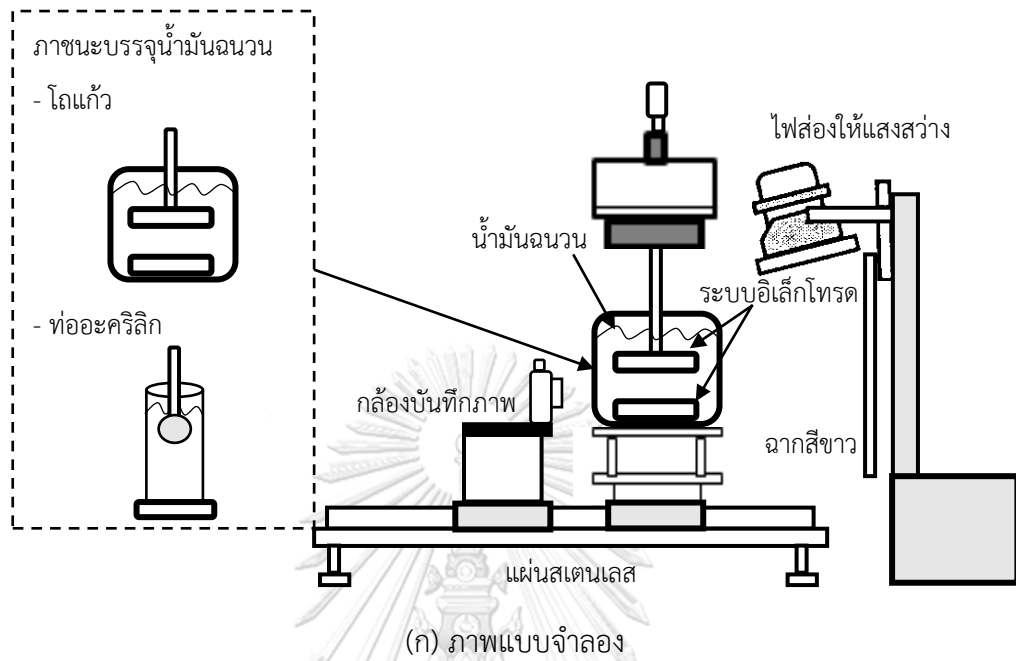
- 1) เทน้ำมันฉนวน 150-300 ml ลงในบีกเกอร์ วางบนเครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C 700 rpm เป็นเวลา 20 นาที แสดงดังรูปที่ 4.1.
- 2) หลังจากนั้น นำน้ำมันฉนวนในบีกเกอร์ใส่ลงในโถดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 15 นาที และขจัดความชื้นด้วยปั๊มสุญญากาศ.
- 3) เมื่ออุณหภูมิน้ำมันลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงนำไปใช้ในการทดลอง.



รูปที่ 4.1 การอุ่นและกวนน้ำมันฉนวน.

#### 4.2 การทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค

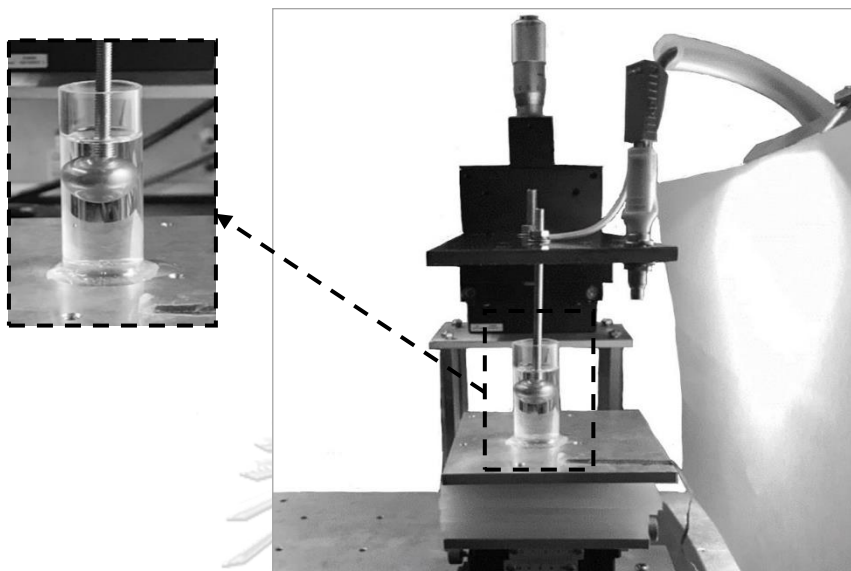
อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูงได้รับแรงดันจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า. ผู้ทดลองใช้ออสซิลโลสโคปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เพื่อยืนยันสัญญาณแรงดันไฟฟ้าก่อนทำการทดลอง โดยสัญญาณที่แสดงบนออสซิลโลสโคปถูกลดทอนลงด้วยอัตราส่วน 1000:1 . ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบถูกใช้กับโถแก้วสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.2 และระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมกับระนาบถูกใช้กับท่ออะคริลิกแสดงดังรูปที่ 4.3. น้ำมันฉนวนถูกใส่เข้าไปในภาชนะที่ใช้ทดลอง. พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกบันทึกวีดิโอด้วยกล้องดิจิทัล ซึ่งตั้งค่าการบันทึก 240 เฟรมต่อวินาที. ไฟฟลัดไลท์ถูกส่องสะท้อนจากฉากสีขาวไปที่การทดลองเพื่อช่วยให้กล้องวีดิโอสามารถบันทึกภาพได้ชัดเจนขึ้น.



(ข) ภาพถ่ายจริง

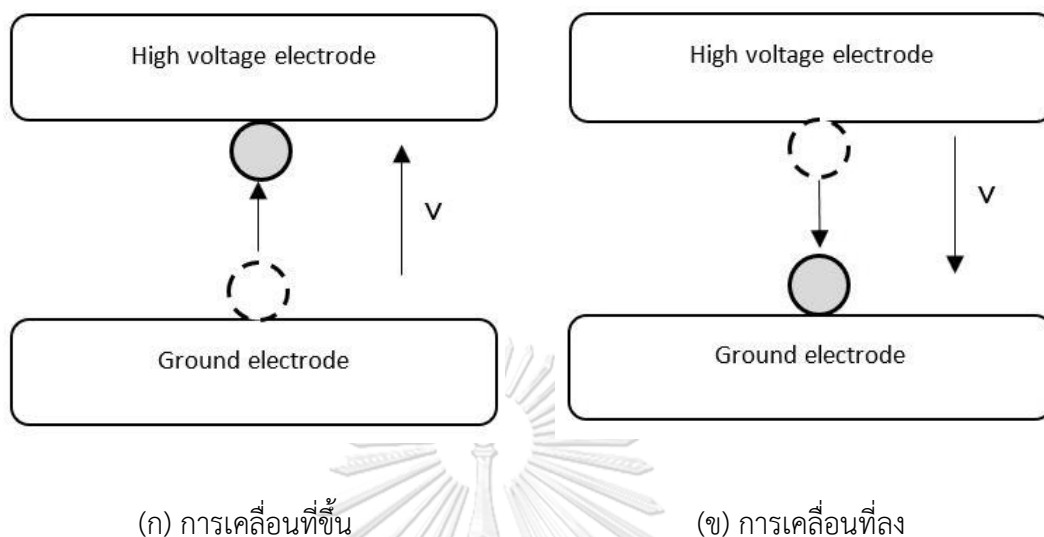
รูปที่ 4.2 ระบบทดลองสำหรับอเล็กโทรอดแบบระนาบ.





รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจริงของระบบอิเล็กโทรดแบบทรงกลมกับระนาบ.

การทดลองของระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบ ทำโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซั้วบวก 7-9 kV เป็นเวลา 10 s. ระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้งสองคือ 20 mm. อนุภาคถูกวางบนตำแหน่งกึ่งกลางของอิเล็กโทรดกราวนด์ และเริ่มป้อนแรงดันพร้อมบันทึกภาพสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค. เมื่อป้อนแรงดัน 7-9 kV ทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 อนุภาค, 5 อนุภาค และ 5 อนุภาค ตามลำดับ. การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคอ้างอิงจากบทที่ 2. ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นของอนุภาค สังเกตจากอนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นจากอิเล็กโทรดกราวนด์ และเคลื่อนตัวไปสัมผัสกับอิเล็กโทรดด้านบนดังรูปที่ 4.4 (ก). ความเร็วในการเคลื่อนที่ลงของอนุภาค สังเกตจากอนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรดด้านบน และเคลื่อนตัวลงมาสัมผัสกับอิเล็กโทรดกราวนด์ดังรูปที่ 4.4 (ข).



รูปที่ 4.4 การสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค.

จำนวนเฟรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่บันทึกจากวิดีโอ ถูกเปลี่ยนเป็นอัตราของ 240 เฟรม. ความเร็วในการเคลื่อนที่หาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะทางการเคลื่อนที่ต่อเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่. อนุภาค 1 ลูก มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงหลายรอบ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่ป้อน. ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นลง หากจากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกับอนุภาคตามจำนวนที่กล่าวไว้ในข้างต้น.

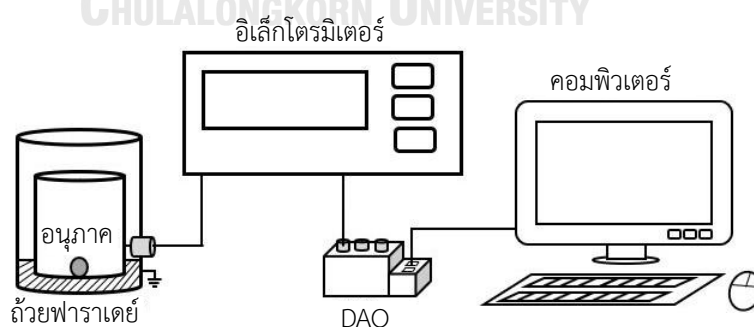
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมกับระนาบ ทำโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ขั้วบวก 8-10 kV เป็นเวลา 10 s. ระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้งสองคือ 20 mm. ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 อนุภาคในทุกระดับแรงดัน. อนุภาคถูกวางบนตำแหน่งกึ่งกลางของอิเล็กโทรดกราวนด์ และเริ่มป้อนแรงดันพร้อมบันทึกภาพสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค. วิธีการสังเกตการณ์เคลื่อนที่ขึ้นลง และหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค หาได้โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการทดลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ.

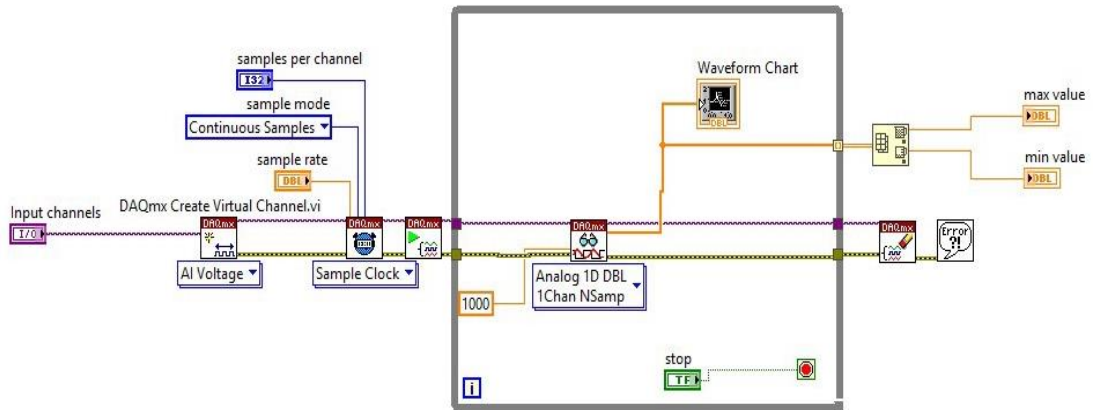
### 4.3 การทดลองวัดประจุบนอนุภาค

#### 4.3.1 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์

การทดลองเริ่มจากป้อนประจุให้กับอนุภาค. อนุภาคอลูมิเนียมและอนุภาคเหล็กถูกนำไปใส่ในท่ออะคริลิกใส ในขณะที่อนุภาคแก้วถูกนำไปใส่ในท่อสแตนเลสปิดสนิทด้วยพาราฟิล์มทั้งสองด้าน. นำอนุภาคไปป้อนประจุด้วยการเสียดสีจากเครื่องเขย่าสาร เป็นเวลา 15 s, 30 s, 60 s, 120 s และ 240 s ตามลำดับ. อนุภาคที่ได้รับการป้อนประจุถูกปล่อยลงในถ้วยฟาราเดย์ ซึ่งต่อกับเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.7. อนุภาคอลูมิเนียมถูกอัดประจุจำนวน 60 s ทำการทดลองซ้ำจำนวน 18 อนุภาค. อนุภาคเหล็กถูกอัดประจุจำนวน 15 s, 30 s, 60 s, 120 s และ 240 s ทำการทดลองซ้ำจำนวน 15, 15, 19, 16 และ 13 อนุภาคตามลำดับ. อนุภาคแก้วถูกอัดประจุจำนวน 15 s, 30 s, 60 s, 120 s และ 240 s ทำการทดลองซ้ำจำนวน 10, 10, 14, 10 และ 10 อนุภาคตามลำดับ. ค่าที่วัดได้จากอิเล็กโตรมิเตอร์ถูกส่งไปที่คอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อนำไปหาค่าประจุต่อไป. อิเล็กโตรมิเตอร์ส่งสัญญาณออกเป็นสัญญาณอนาล็อกไปยัง DAQ ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์. การทำงานคือเมื่อรับสัญญาณอนาล็อกจากอิเล็กโตรมิเตอร์เข้ามา โปรแกรม LabVIEW จะแสดงภาพสัญญาณที่วัดได้ในขณะนั้น การทำงานของโปรแกรม LabVIEW แสดงดังรูปที่ 4.8. โปรแกรม LabVIEW จะบันทึกค่าของแรงดันกับเวลาในรูปแบบของไฟล์ Microsoft Excel. ค่าจากสัญญาณอนาล็อกขาออกของอิเล็กโตรมิเตอร์แสดงออกที่โปรแกรม LabVIEW จะอยู่ในช่วง 0–2 V. ในการทดลองเลือก range 200 pC ถ้าอิเล็กโตรมิเตอร์วัดประจุได้ 125 pC. ตัวอย่างเช่น ค่าแรงดันที่จะแสดงออกที่โปรแกรม LabVIEW คือ 1.25 V.



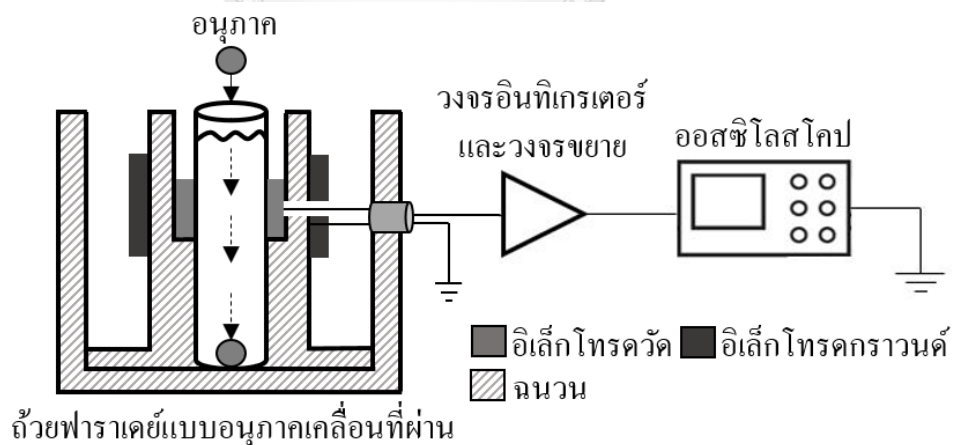
รูปที่ 4.7 การต่ออุปกรณ์ของการวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์.



รูปที่ 4.8 VI ของโปรแกรม LabVIEW สำหรับอ่านค่าจากอิเล็กทรอนิกส์ไมโครคอนโทรลเลอร์.

4.3.2 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน

การทดลองเริ่มจากป้อนประจุให้กับอนุภาคในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 4.3.1. อนุภาคที่ได้รับ การป้อนประจุจะถูกปล่อยลงให้เคลื่อนที่ผ่านน้ำมันในกระบอกทดลอง ซึ่งต่อกับวงจรออปแอมป์แบบ อินทิเกรเตอร์ทั้งสองส่วนและออสซิลอสโคปแสดงดังรูปที่ 4.9. ทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 อนุภาค.



รูปที่ 4.9 การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบเคลื่อนที่ผ่าน.

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากออสซิลอโคปมีสัญญาณรบกวนปนอยู่ด้วย ผู้ทดลองจึงกำจัดสัญญาณรบกวนออกก่อนที่จะนำสัญญาณไปวิเคราะห์ผล. สัญญาณที่ได้ออกมานั้นถูกนำไปจัดการด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ด้วยโปรแกรม MATLAB คำสั่งที่ใช้คือ Lowpass(x, fpass,fs, 'ImpulseResponse', 'fir', 'Steepness',s). เมื่อ x เป็นข้อมูลที่ต้องการกรอง, fs เป็น sampling rate ค่าที่ใช้คือ 1000 Hz, fir เป็นการกรองแบบไม่เรียกซ้ำโดย output ได้จากค่า input ที่ป้อนไปทั้งหมดเพียงครั้งเดียว และ s เป็นค่า steepness โดยมีค่าอยู่ระหว่าง [0.5,1) ค่าความชันที่ใช้คือ 0.95.



## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 5.1 ผลการทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค

การคำนวณทางทฤษฎีหาความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาค โดยใช้ความสัมพันธ์ของแรงโน้มถ่วง  $F_g$ , แรงคูลอมบ์  $F_q$  และ แรงต้านจากความหนืด  $F_v$ . สมการที่ใช้ในการคำนวณความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคอ้างอิงจาก บทที่ 2 หัวข้อ 2.2 ซึ่งมีผลของการคำนวณแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3.

การทดลองใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบขนาน ระยะห่าง 20 mm. อนุภาคคอลลอยด์มีรัศมี 0.4 mm ถูกลำแสงอินฟราเรดกราวด์. การทดลองป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซั้วบวก 7-9 kV เป็นเวลา 10 s. ผลการทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคแสดงในตารางที่ 5.1.

**ตารางที่ 5.1** การเปรียบเทียบความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบ

แรงดัน (kV)	ความเร็วของอนุภาค (m/s)				ความแตกต่างของ ความเร็ว (%)	
	การคำนวณ		การทดลอง		เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง
	เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง	เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง		
7	0.0528	0.2025	0.0199	0.1066	62.428	47.324
8	0.0919	0.2415	0.0374	0.1250	59.264	48.238
9	0.1362	0.2858	0.0530	0.1432	61.076	49.884

สำหรับระบบอิเล็กโทรดแบบทรงกลมกับระนาบ อนุภาคคอลลอยด์มีรัศมี 0.4 mm ถูกลำแสงอินฟราเรดกราวด์ ระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้งสองคือ 20 mm. การทดลองป้อนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซั้วบวก 8-10 kV เป็นเวลา 10 s. ผลการทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคแสดงในตารางที่ 5.2.

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอิเล็กโทรดแบบทรงกลม  
กับระนาบ

แรงดัน (kV)	ความเร็วของอนุภาค (m/s)				ความแตกต่างของ ความเร็ว (%)	
	การคำนวณ		การทดลอง		เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง
	เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง	เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง		
8	0.0157	0.1734	0.0281	0.1762	79.223	1.592
9	0.0445	0.1997	0.0414	0.2092	7.127	4.760
10	0.0748	0.2291	0.0521	0.2355	30.327	2.784

ผลการทดลองวัดความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาค เมื่อใช้อิเล็กโทรดแบบ  
ระนาบขนานและแบบทรงกลมกับระนาบ พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาค  
เพิ่มขึ้นตามขนาดแรงดันที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ. ในตารางที่ 5.1 ความแตกต่างของความเร็วทั้งในการ  
เคลื่อนที่ขึ้นและลงมีค่าสูงมากทุกระดับแรงดัน. ในตารางที่ 5.2 ความแตกต่างของความเร็วทั้งในการ  
เคลื่อนที่ลงมีค่าไม่เกิน 10 % ทุกระดับแรงดัน. อย่างไรก็ตามยังคงมีความแตกต่างของความเร็วในการ  
เคลื่อนที่ขึ้นสูงมากอยู่.

ความแตกต่างระหว่างการคำนวณและผลการทดลองอาจมาจากสาเหตุสองกรณี. กรณีแรก  
เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันที่ใช้ในการคำนวณตามทฤษฎีที่ใช้ในหัวข้อ 2.2 อาจไม่ถูกต้อง.  
ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันที่ใช้ในการคำนวณ หาได้จากการใช้เครื่องวัดความหนืด (ขั้นตอน  
วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันสามารถดูได้จากภาคผนวก ก ). เมื่อนำค่าความเร็วใน  
การเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคจากการทดลอง คำนวณย้อนกลับเพื่อหาสัมประสิทธิ์ความหนืด  
พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ได้มีค่าไม่ตรงกับค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ใช้ในการคำนวณทาง  
ทฤษฎีแสดงดังตารางที่ 5.3. ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่ใช้ในการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ  
 $8.759 \text{ m N.s/m}^2$ . ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในตารางที่ 5.3 นั้นควรค่าใกล้เคียงกันเพราะเป็นน้ำมัน  
ชนิดเดียวกัน. กรณีที่สองอาจเป็นจำนวนข้อมูลในการทดลองที่ยังไม่เพียงพอ เนื่องจากในการทดลอง  
ได้ทำการทดลองซ้ำไม่เกินจำนวน 10 อนุภาค.

**ตารางที่ 5.3** สัมประสิทธิ์ความหนืดจากการใช้ความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของอนุภาคในการทดลองคำนวณหาย้อนกลับ

ระบบอิเล็กโทรทรานาบ			ระบบอิเล็กโทรทรานาบ		
แรงดัน	สัมประสิทธิ์ความหนืด ( $m \cdot N \cdot s/m^2$ )		แรงดัน	สัมประสิทธิ์ความหนืด ( $m \cdot N \cdot s/m^2$ )	
(kV)	เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง	(kV)	เคลื่อนที่ขึ้น	เคลื่อนที่ลง
7	23.258	16.635	8	15.007	9.835
8	21.527	16.924	9	17.115	9.647
9	22.509	17.482	10	19.723	9.930

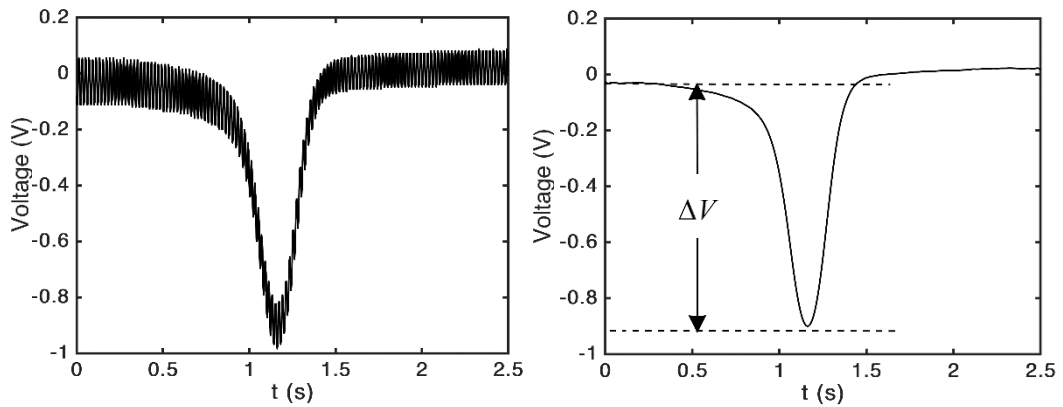
## 5.2 ผลการทดลองวัดประจุบนอนุภาคที่ได้จากวงจรวัดประจุและอิเล็กโตรมิเตอร์

### 5.2.1 ผลการวัดของวงจรวัดประจุ

การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน ใช้อุณหภูมิในการทดลอง 3 ชนิด คือ อนุภาคอลูมิเนียม, อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว. รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันขาออก  $V_{out2}$  ที่ได้จากการวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน ในกรณีของอนุภาคอลูมิเนียม ที่ผ่านการอัดประจุเป็นเวลา 15 s และแรงดันที่ได้หลังจากใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแล้ว. เราสามารถหาประจุจากขนาดแรงดันที่ได้เมื่อผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้ความแตกต่างของค่ายอด ( $\Delta V$ ) ของ  $V_{out2}$  ที่วัดได้เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรวัด. รูปที่ 5.2 แสดงแรงดันที่ได้หลังผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและ  $\Delta V$  ในกรณีของอนุภาคอลูมิเนียม, อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว โดยเวลาที่ใช้ในการอัดประจุเท่ากับ 15 s.

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 เราเห็นได้ว่า เมื่อแรงดันขาออกผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ผลลัพธ์ของแรงดันที่ได้มีความเรียบและไม่มีสัญญาณรบกวน. ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านแถบอิเล็กโทรวัดใช้เวลา 0.1913 s, 0.0479 s และ 0.1621 s สำหรับอนุภาคอลูมิเนียม, อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว ตามลำดับ. เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ถึงแถบอิเล็กโทรวัด วงจรอินทิเกรเตอร์วัดค่าประจุเกิดจากการอัดประจุ. แรงดันขาออกจึงมีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามขั้วประจุที่วัดได้. เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ออกจากแถบทองแดงการคายประจุจากอิเล็กโทรวัดทำให้ แรงดันขาออกเข้าสู่ 0 หรือตำแหน่งเดิมก่อนการวัด.

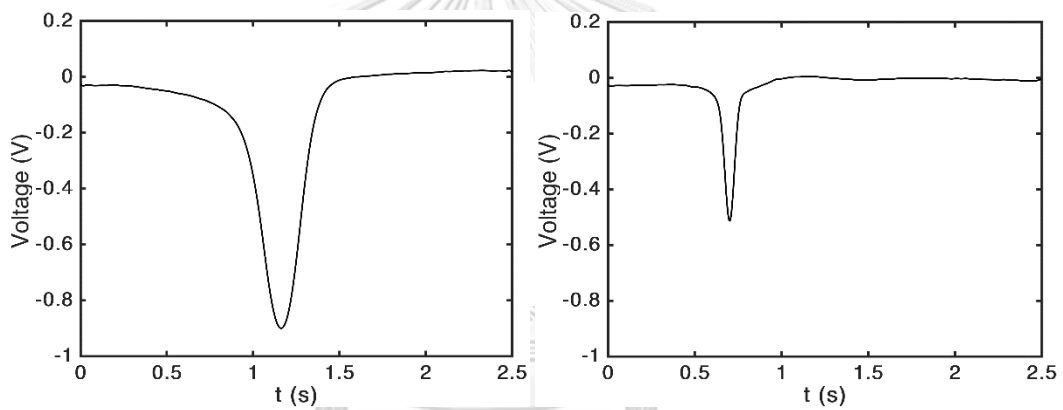




(ก) แรงดันขาออก  $V_{out2}$

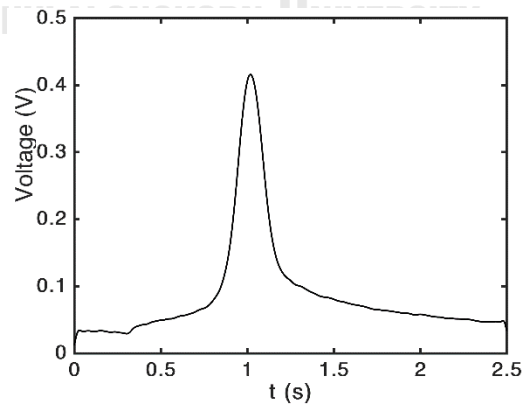
(ข) แรงดันที่ได้เมื่อผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันขาออกก่อนและหลังประมวลสัญญาณ.



(ก) อนุภาคคอลลูมิเนียม

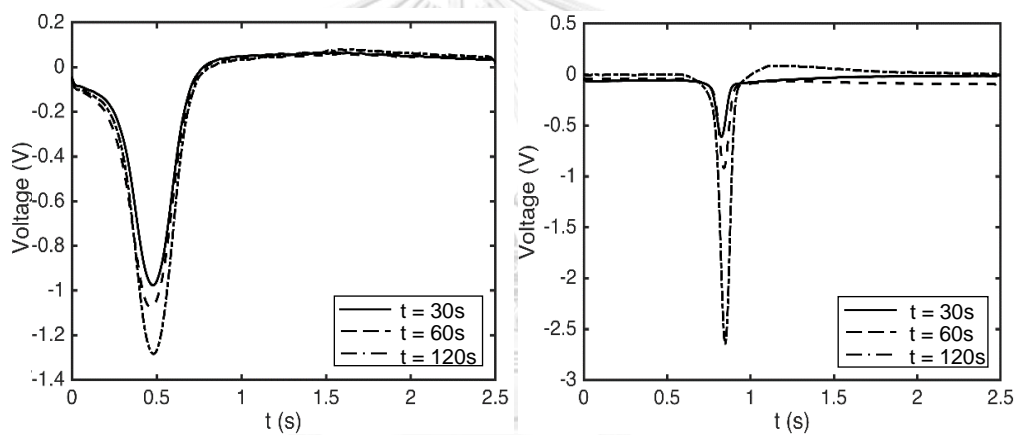
(ข) อนุภาคเหล็ก



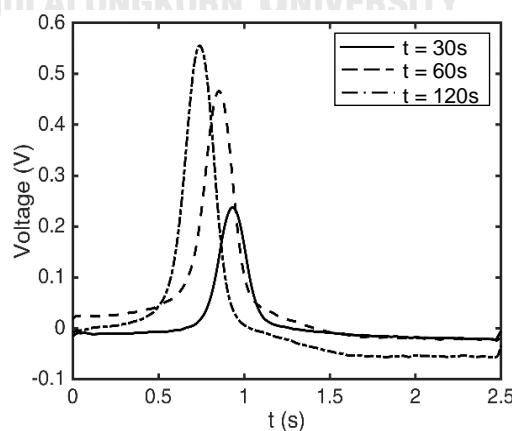
(ค) อนุภาคแก้ว

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันขาออกหลังประมวลสัญญาณ เมื่อเวลาในการอัดประจุคือ 15 s.

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้ของอนุภาคอลูมิเนียม, อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว ที่ได้รับการอัดประจุเป็นเวลาที่แตกต่างกันเป็นเวลา 30 s, 60 s และ 120 s. รูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัดประจุ 30 s, 60 s และ 120 s ค่าแรงดันที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ. เมื่อนำแรงดันที่ได้ไปคำนวณหาขนาดประจุบนอนุภาค เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับเวลาที่ใช้อัดประจุดังรูปที่ 5.4. ในรูปที่ 5.4 ช่วงของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงด้วยแถบเส้นแนวตั้งบนกราฟ. อนุภาคอลูมิเนียมมีค่าเฉลี่ยของประจุอนุภาคเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่อนุภาคเหล็กมีค่าเฉลี่ยของประจุเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุที่นานขึ้น และมีการกระจายตัวของข้อมูลมาก. สำหรับอนุภาคแก้วเวลาที่ใช้ในการอัดประจุตั้งแต่ 15 s ถึง 60 s มีค่าเฉลี่ยของประจุเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาขึ้นจาก 60 s ค่าเฉลี่ยของประจุลดลง.

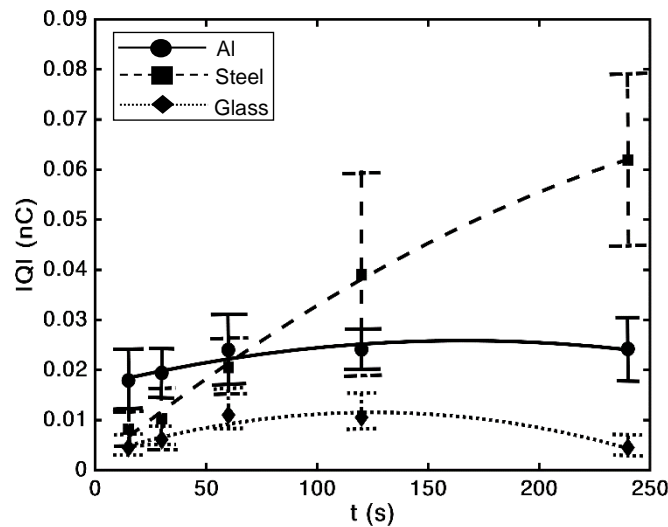


(ก) อนุภาคอลูมิเนียม (ข) อนุภาคเหล็ก



(ค) อนุภาคแก้ว

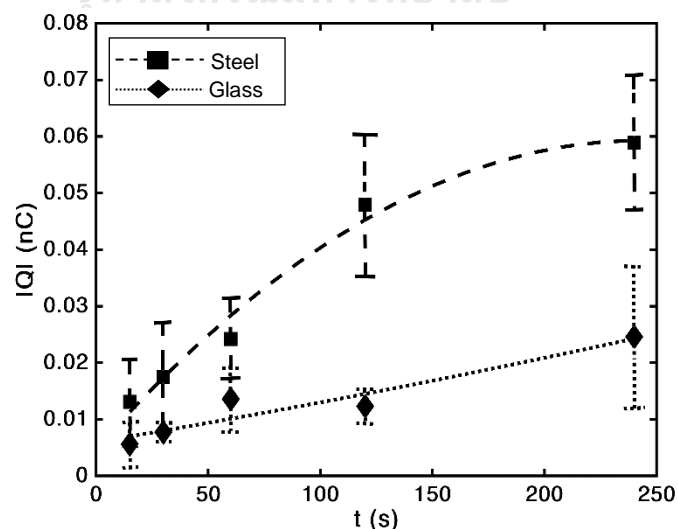
รูปที่ 5.3 แรงดันขาออกของอนุภาคที่ถูกอัดประจุด้วยเวลาที่แตกต่างกัน.



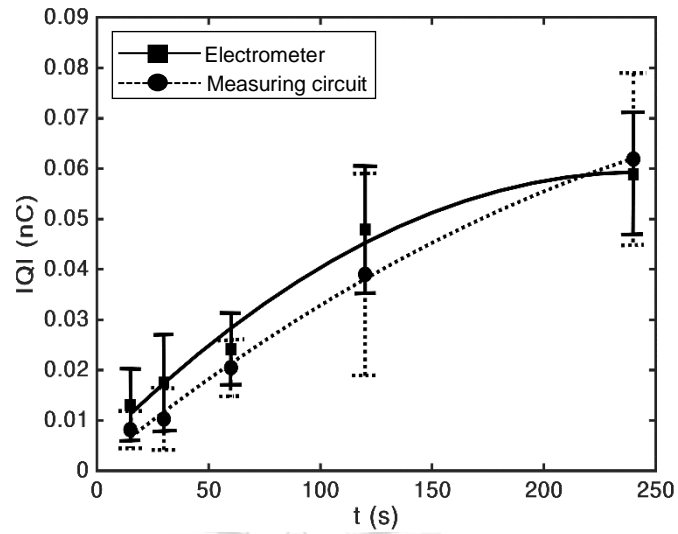
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาคชนิดต่าง ๆ เมื่อวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน.

#### 5.2.2 ผลการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์และการเปรียบเทียบ

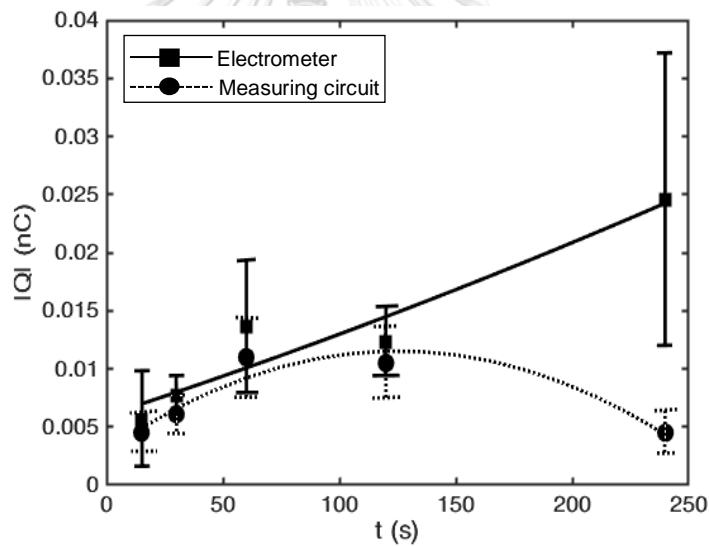
การวัดประจุด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์ ใช้อนุภาคในการทดลอง 2 ชนิด คือ อนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้ว. การวัดประจุแต่ละครั้งมีการเว้นช่วงเวลาไม่ต่ำกว่า 5 นาที เพื่อให้ค่าพื้นหลังของประจุที่วัดได้มีค่าค่อนข้างคงตัว. ขนาดประจุหาจากความแตกต่างของค่ายอดที่วัดได้หลังปล่อยอนุภาคลงในถ้วยฟาราเดย์. ผลการวัดด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์แสดงในรูปที่ 5.5 โดยเป็นค่าเฉลี่ยของประจุที่ได้จากการทดลองอย่างน้อย 10 ครั้ง สำหรับกรณีอนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้ว. เส้นแนวตั้งของแต่ละจุดข้อมูลบนกราฟแสดงช่วงของค่าเฉลี่ย  $\pm$  ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาคชนิดต่าง ๆ เมื่อวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์.



(ก) อนุภาคเหล็ก



(ข) อนุภาคแก้ว

**รูปที่ 5.6** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาคชนิดต่างๆ เมื่อวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กโตรมิเตอร์.

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้ว เมื่อวัดด้วยวงจรรินทิจเรเตอร์และอิเล็กโตรมิเตอร์. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประจุของอนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้ว จากการวัดด้วยวงจรรินทิจเรเตอร์และอิเล็กโตรมิเตอร์ ที่อัด

ประจุให้กันอนุภาคที่เวลาเดียวกัน. พบว่าค่าเฉลี่ยของประจุที่ถูกวัดด้วยเครื่องมือวัดทั้งสองชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นกรณีของอนุภาคแก้วที่ได้รับการอัดประจุ 240 s มีความแตกต่างกันมาก. ค่าประจุที่ได้จากอุปกรณ์ถ้วยฟาราเดย์แบบเคลื่อนที่ผ่านมีขนาดต่ำกว่าการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้วที่ได้รับการอัดประจุ 60 s. ความแตกต่างของประจุที่วัดได้อยู่ที่ 16.55% และ 21.14% ตามลำดับ.

### 5.3 ผลของขนาดอิเล็กโทรดที่มีต่อค่าที่ได้จากวงจรวัดประจุ

อนุภาคที่ใช้ในการทดลองส่วนนี้เป็นอนุภาคเหล็ก เนื่องจากอนุภาคเหล็กสามารถอัดประจุให้ได้ดีกว่าอนุภาคอีกสองชนิด. เวลาที่ใช้ในการอัดประจุ 15 s, 30 s, 60 s, 120 s และ 240 s. อิเล็กโทรดที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลงมิติจากอิเล็กโทรดที่ใช้วัดในหัวข้อที่ 5.2 ดังนี้. (1) เปลี่ยนแปลงขนาดของอิเล็กโทรดกราวนด์. (2) เปลี่ยนแปลงขนาดของอิเล็กโทรดวัด. (3) เปลี่ยนแปลงขนาดของกระบอกทดลอง. รายละเอียดขนาดมิติของกระบอกทดลองและอิเล็กโทรดที่ใช้ แสดงสรุปในตารางที่ 5.4. ผลการทดลองที่ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.2.

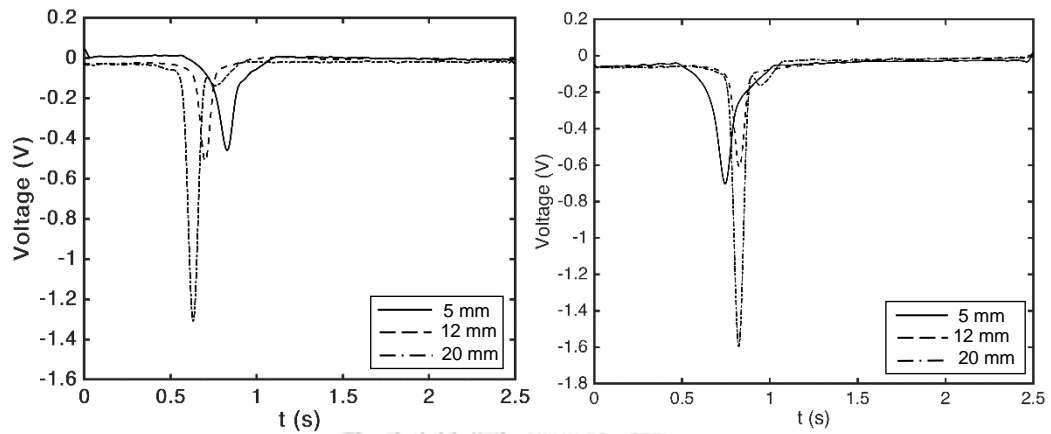
ตารางที่ 5.4 ขนาดมิติของกระบอกทดลองและอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง

เส้นผ่านศูนย์กลางของ กระบอกทดลอง (mm)	ความกว้างของอิเล็กโทรด (mm)	
	อิเล็กโทรดวัด	อิเล็กโทรดกราวนด์
5	5	5, 12, 20
5	5, 12	12
5, 10	5	12

#### (1) ขนาดของอิเล็กโทรดกราวนด์

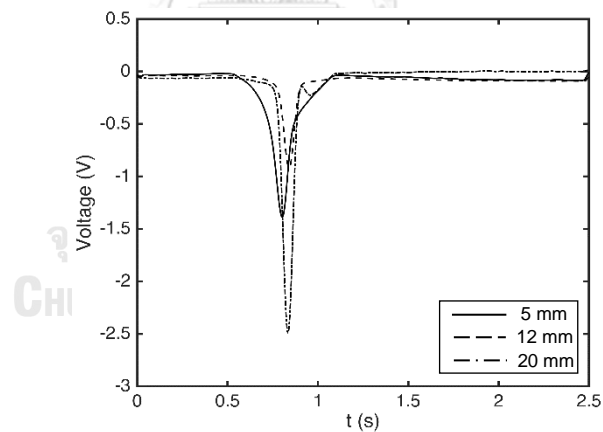
รูปที่ 5.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้ของอนุภาคเหล็กที่ได้รับการอัดประจุ 15 s, 30 s และ 60 s เมื่อขนาดอิเล็กโทรดกราวนด์ต่างกัน. ค่าเฉลี่ยของประจุจากการที่ใช้อิเล็กโทรดกราวนด์ต่างกันในการวัดประจุและเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ ถูกนำเสนอเป็นกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้คำสั่ง Polyfit และ Poltval แสดงดังรูปที่ 5.8. ค่าเฉลี่ยของประจุทั้ง 3 กรณีมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุที่มากขึ้น. กรณีอิเล็กโทรดกราวนด์คือ 12 mm ค่าเฉลี่ยของประจุมีค่าน้อยกว่าอีก 2 กรณี. ค่าเฉลี่ยของประจุมีค่ามากที่สุดคือค่าเฉลี่ยของประจุกรณี

อิเล็กโทรดกราวนด์คือ 20 mm. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประจุของอิเล็กโทรดกราวนด์ทั้ง 3 กรณี พบว่าค่าเฉลี่ยของประจุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน.



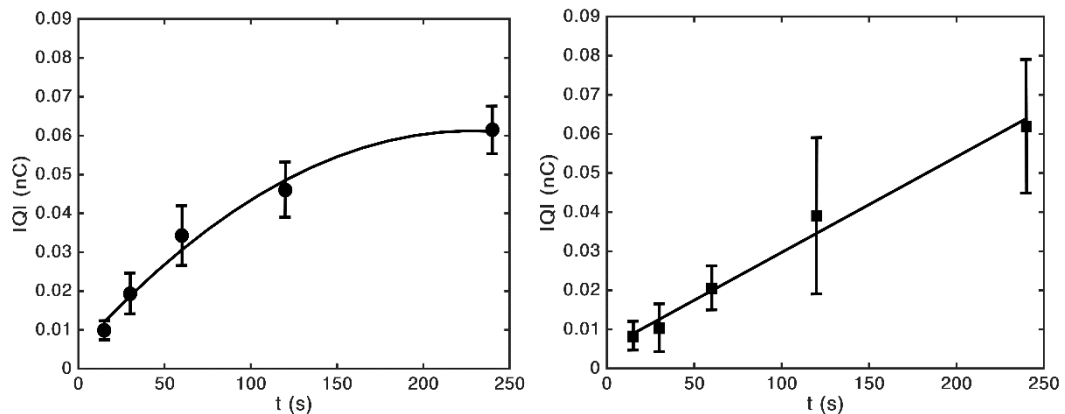
(ก)  $t = 15$  s

(ข)  $t = 30$  s



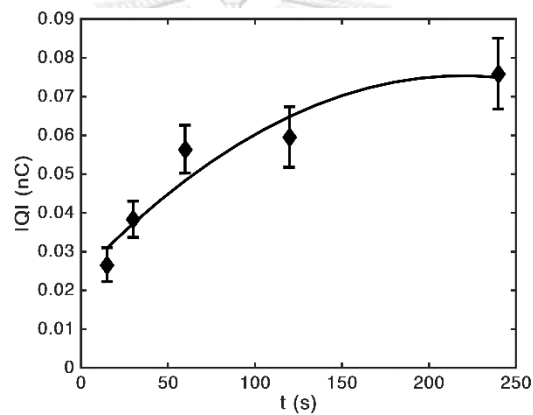
(ค)  $t = 60$  s

รูปที่ 5.7 แรงดันขาออกของอนุภาคที่ใช้อิเล็กโทรดกราวนด์กว้าง 5 mm, 12 mm และ 20 mm เมื่อเวลาอัดประจุต่างกัน.



(ก) 5 mm

(ข) 12 mm

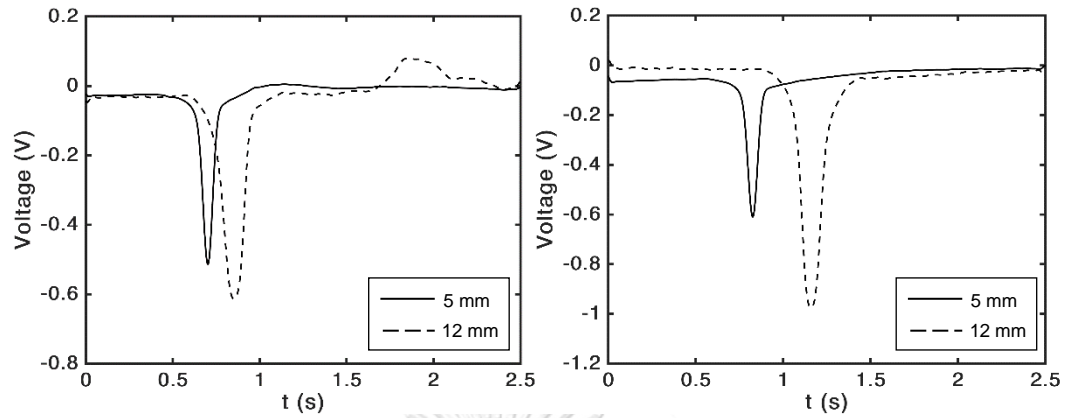
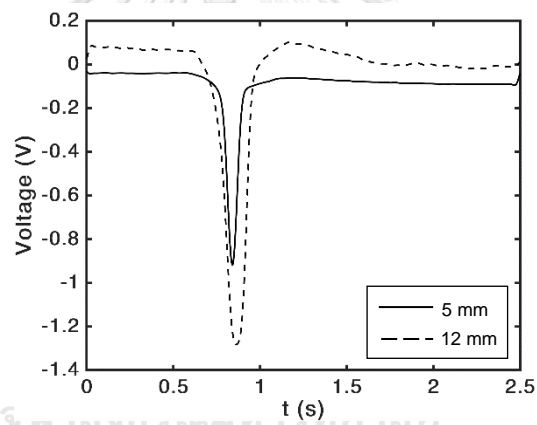


(ค) 20 mm

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาค เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของอิเล็กโทรดกราวนด์.

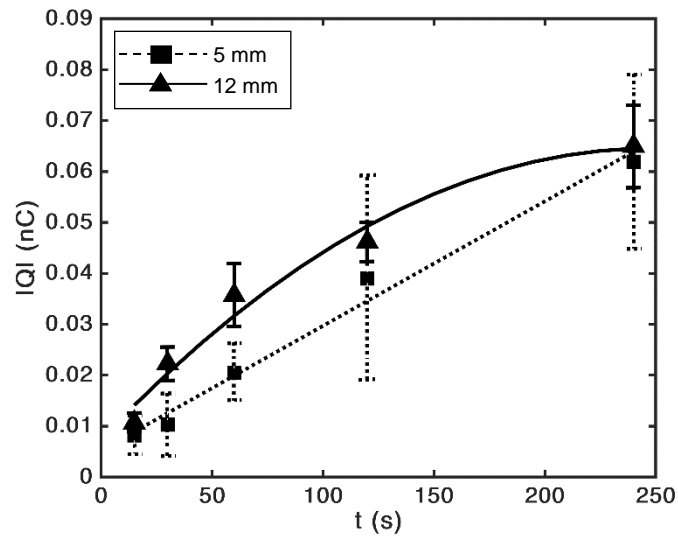
## (2) ขนาดของอิเล็กโทรด

ขนาดของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาด คือ 5 mm และ 12 mm. รูปที่ 5.9 แสดงรูปคลื่นแรงดันขาออกที่ได้ของอนุภาคที่รับการอัดประจุ 15 s, 30 s และ 60 s เมื่อขนาดอิเล็กโทรดต่างกัน ซึ่งแรงดันที่ใช้อิเล็กโทรด 12 mm มีค่ามากกว่า อิเล็กโทรด 5 mm. รูปที่ 5.10 แสดงค่าเฉลี่ยของประจุจากการที่ใช้อิเล็กโทรดต่างกันในการวัดประจุ. ค่าเฉลี่ยของประจุจากการใช้อิเล็กโทรดต่างกัน มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งคู่ตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุที่มากขึ้น.

(ก)  $t = 15$  s(ข)  $t = 30$  s(ค)  $t = 60$  s

รูปที่ 5.9 แรงดันขาออกของอนุภาคที่ใช้อิเล็กโทรดวัดกว้าง 5 mm และ 12 mm เมื่อเวลาอัดประจุต่างกัน.

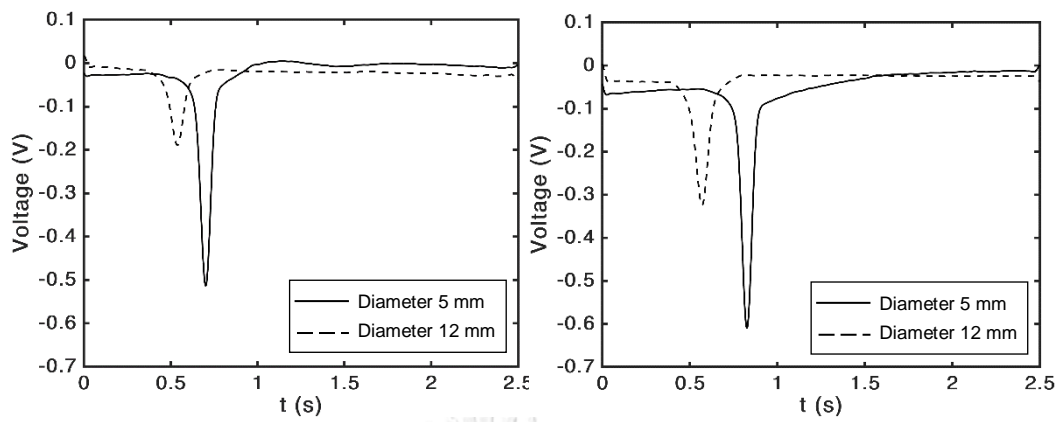
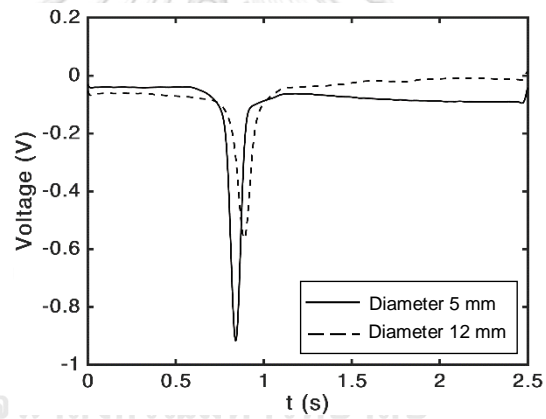




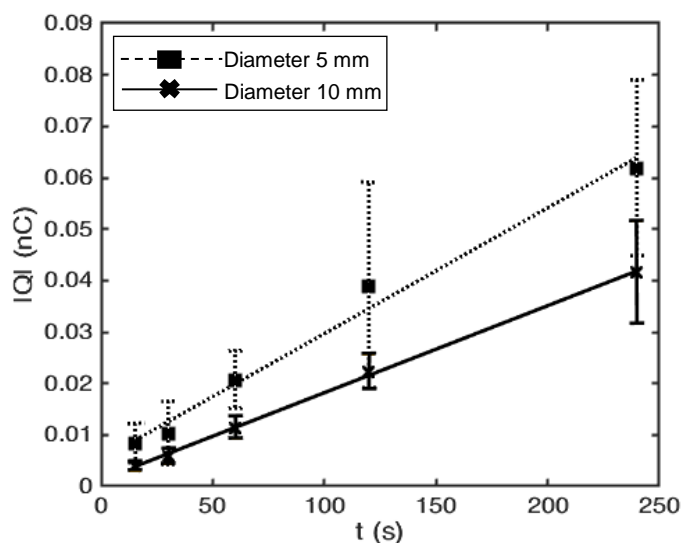
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาค เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของอิเล็กโทรดวัต.

(3) ขนาดของกระบอกทดลอง

รูปที่ 5.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันขาออกของอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุ 15 s, 30 s และ 60 s เมื่อขนาดกระบอกทดลองต่างกัน. ค่าแรงดันที่ได้จากการวัดเมื่อใช้ขนาดกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm มีค่ามากกว่าค่าในกรณีของขนาดกระบอกทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm. รูปที่ 5.12 แสดงค่าเฉลี่ยของประจุจากการที่ใช้กระบอกทดลองที่มีขนาดต่างกัน. ค่าเฉลี่ยของประจุจากการใช้กระบอกทดลองขนาดต่างกัน มีค่าเพิ่มขึ้นในแนวเส้นตรงทั้งคู่ตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุที่มากขึ้น. ค่าเฉลี่ยของประจุที่ใช้กระบอกทดลองขนาด 5 mm มีค่ามากกว่าขนาด 10 mm.

(ก)  $t = 15$  s(ข)  $t = 30$  s(ค)  $t = 60$  s

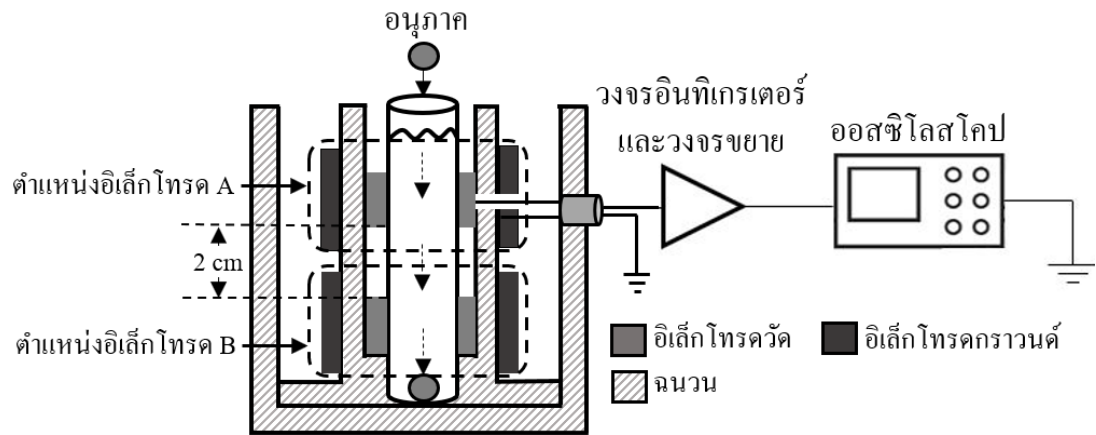
รูปที่ 5.11 แรงดันขาออกของอนุภาคที่ใช้กระบอกทดลองขนาด 5 mm และ 10 mm เมื่อเวลาอัด  
ประจุต่างกัน.



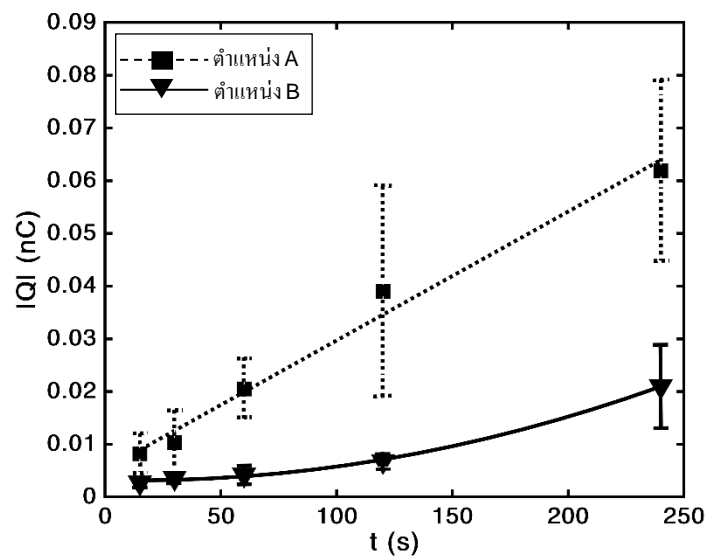
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาค เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของกระบอกทดลอง.

#### 5.4 การสูญเสียประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวน

การตรวจสอบการสูญเสียประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวน ใช้อิเล็กโตรดวัดขนาดเท่ากับ 5 mm. อิเล็กโตรดกราวด์ขนาดเท่ากับ 12 mm. ตำแหน่งอิเล็กโตรดวัดและอิเล็กโตรดกราวด์ของการวัดประจุแสดงดังรูปที่ 5.13. ตำแหน่ง B มีระยะห่างจากตำแหน่ง A ที่ใช้ในการวัดในหัวข้อที่ผ่านมา 2 cm. กระบอกทดลองที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 mm. รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประจุที่วัดได้ เมื่อตำแหน่งอิเล็กโตรดวัดและอิเล็กโตรดกราวด์ต่างกัน. โดยค่าเฉลี่ยของประจุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการอัดประจุที่มากขึ้น. ค่าเฉลี่ยของประจุที่ใช้ตำแหน่งอิเล็กโตรด B มีค่าน้อยกว่า ตำแหน่งอิเล็กโตรด A อย่างชัดเจน. เวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งอิเล็กโตรด B มีค่ามากกว่าตำแหน่งอิเล็กโตรด A เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มีการสูญเสียประจุเกิดขึ้น ค่าเฉลี่ยประจุที่วัดได้ของตำแหน่ง B จะมีค่าน้อยกว่าตำแหน่ง A.



รูปที่ 5.13 ตำแหน่งของอิเล็กโทรดวัดและอิเล็กโทรดกราวนด์.



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุของอนุภาค เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งอิเล็กโทรดวัด.

## บทที่ 6

### สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการสังเกตพฤติกรรมทางจลนศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคในน้ำมันฉนวน และทดลองการวัดประจุของอนุภาค เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างประจุกับการเคลื่อนที่ และเห็นความเป็นไปได้ต่อการประยุกต์ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการอัดและการคายประจุของอนุภาค. การทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำมันฉนวนกระทำภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ ที่สร้างจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบบรรณาบและแบบทรงกลมกับบรรณาบ. การทดลองการวัดประจุของอนุภาค ทำการวัดประจุทั้งในสภาวะสถิตและในระหว่างการเคลื่อนที่ ใช้ระบบวัดประจุที่ประกอบด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกับวงจรขยายสัญญาณ. อนุภาคตัวนำและฉนวนที่ใช้ในการทดลองคือ อนุภาคอลูมิเนียม อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว. แรงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำมันฉนวนคือ แรงโน้มถ่วง แรงคูลอมบ์ และแรงต้านจากความหนืด.

ในกรณีศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบบรรณาบ การเปรียบเทียบความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นลงของอนุภาค ระหว่างการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองพบว่า ยังมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก. ในกรณีศึกษาในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมกับบรรณาบ การเปรียบเทียบความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองพบว่า ความแตกต่างของความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นจากการป้อนแรงดัน 8–10 kV มีค่า 7–80 %. ความแตกต่างของความเร็วในการเคลื่อนที่ลงมีค่า 1–5 %. ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าข้อมูลของการทดลองอาจไม่เพียงพอต่อการนำมาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคและค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันอาจมีความไม่ถูกต้องในการคำนวณหาความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่.

ในกรณีศึกษาการวัดประจุผู้เขียนได้ทำการทดลอง 2 กรณี. ในกรณีแรก อนุภาคที่ใช้ในการทดลองต่างชนิดกัน. การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน ใช้อนุภาคในการทดลอง 3 ชนิด คือ อนุภาคอลูมิเนียม, อนุภาคเหล็ก และอนุภาคแก้ว. ค่าเฉลี่ยของประจุของอนุภาคทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ ยกเว้นอนุภาคแก้วที่ใช้เวลาในการอัดประจุ 60 s ขึ้นไปมีค่าเฉลี่ยของประจุน้อยลง. อนุภาคเหล็กมีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่าอนุภาคอีกสองชนิด. การวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กทรอนิกส์ใช้อนุภาคในการทดลอง 2 ชนิด คือ อนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้ว. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประจุของอนุภาคเหล็กและอนุภาคแก้วจาก

การวัดประจุด้วยวิธีวัดทั้งสองวิธี พบว่าค่าเฉลี่ยของประจุมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นกรณีของอนุภาคแก้วที่ได้รับการอัดประจุ 240 s มีความแตกต่างกันมาก. ค่าประจุที่ได้จากการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านมีขนาดน้อยกว่าการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กโตรมิเตอร์.

ในกรณีที่สองใช้วิธีการวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดเดียวกัน คืออนุภาคเหล็ก และแบ่งเงื่อนไขในการทดลองเป็น 3 ชนิด. เงื่อนไขที่หนึ่งใช้ขนาดของกระบอกทดลองและอิเล็กโตรดวัดเท่ากัน แต่ใช้ขนาดของอิเล็กโตรดกราวด์ต่างกัน. ค่าเฉลี่ยประจุของอนุภาคจากการวัดโดยขนาดของอิเล็กโตรดกราวด์ที่ใช้ต่างกัน 3 ขนาด. ค่าเฉลี่ยของประจุที่อิเล็กโตรดกราวด์เท่ากับ 5 mm ที่มีค่าใกล้เคียงกับการวัดด้วยถ้วยฟาราเดย์และอิเล็กโตรมิเตอร์มากกว่าอีก 2 ชนิด. เงื่อนไขที่สองใช้ขนาดของกระบอกทดลองและอิเล็กโตรดกราวด์เท่ากัน แต่ใช้ขนาดของอิเล็กโตรดวัดต่างกัน. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประจุกับอุปกรณ์การวัดทั้ง 2 ชนิด พบว่าอิเล็กโตรดวัดขนาด 12 mm มีค่าเฉลี่ยประจุมากกว่าการวัดด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์เพียงเล็กน้อย. เงื่อนไขที่สามใช้ขนาดของอิเล็กโตรดวัดและอิเล็กโตรดกราวด์เท่ากัน แต่ใช้ขนาดของกระบอกทดลองต่างกัน. กระบอกทดลองที่มีขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ยของประจุน้อยกว่ากระบอกทดลองขนาดเล็ก. การสูญเสียประจุของอนุภาคในน้ำมันฉนวนวัดโดยใช้ถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน. กระบอกทดลอง, อิเล็กโตรดวัด และอิเล็กโตรดกราวด์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเท่ากัน แต่ต่างกันที่ตำแหน่งของอิเล็กโตรด. อิเล็กโตรดตำแหน่ง A และตำแหน่ง B ห่างจากกันเป็นระยะ 2 cm. เวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่มาถึงอิเล็กโตรดตำแหน่ง A มีค่าน้อยกว่าตำแหน่ง B. เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มีการสูญเสียประจุเกิดขึ้น ค่าเฉลี่ยประจุที่วัดได้ที่ตำแหน่ง A จะมีค่ามากกว่าตำแหน่ง B.

ผลการศึกษาในการทดลองนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและวงจรรีจิสเตอร์ในการวัดประจุไฟฟ้า. อย่างไรก็ตามยังคงต้องมีการศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบวัดต่อไป.

### บรรณานุกรม

- [1] มนตรี ระชาธิราช, "ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ," วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [2] S. Birlasekaran, "The Measurement of Charge on Single Particles in Transformer Oil," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1094-1103, 1991.
- [3] S. Birlasekaran, "The Movement of a Conducting Particle in Transformer Oil in AC Fields," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 1, pp. 9-17, 1993.
- [4] K. I. Sakai, D. L. Abella, Y. Khan, J. Suehiro, and M. Hara, "Experimental studies of free conducting wire particle behavior between nonparallel plane electrodes with AC voltages in air," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 10, no. 3, pp. 418-424, 2003.
- [5] K. Sakai, S. Tsuru, D. L. Abella, and M. Hara, "Conducting particle motion and particle-initiated breakdown in dc electric field between diverging conducting plates in atmospheric air," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 1, pp. 122-130, 1999.
- [6] K. I. Sakai, D. L. Abella, Y. Khan, J. Suehiro, and M. Hara, "Theoretical and experimental studies for spherical free-conducting particle behavior between nonparallel plane electrodes with AC voltages in air," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 10, no. 3, pp. 404-417, 2003.
- [7] K. I. Sakai, D. L. Abella, J. Suehiro, and M. Hara, "Charging and behavior of a spherically conducting particle on a dielectrically coated electrode in the presence of electrical gradient force in atmospheric air," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 9, no. 4, pp. 577-588, 2002.
- [8] N. Phansiri and B. Techaumnat, "Study on the electromechanics of a conducting particle under nonuniform electric field," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 2, pp. 488-495, 2013.
- [9] H. Watanabe, A. Samimi, Y. L. Ding, M. Ghadiri, T. Matsuyama, and K. G. Pitt, "Measurement of charge transfer due to single particle impact," *Particle &*

- Particle Systems Characterization*, vol. 23, no. 2, pp. 133-137, 2006.
- [10] H. Watanabe, M. Ghadiri, T. Matsuyama, Y. L. Ding, and K. G. Pitt, "New instrument for tribocharge measurement due to single particle impacts," (in English), *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, no. 2, pp. 024706(1) - 024706(5), 2007.
- [11] B. A. Kwetkus, "Particle triboelectrification and its use in the electrostatic separation process," *Particulate Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 55-68, 1998.
- [12] S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama, and M. Ghadiri, "Triboelectric charging of powders: A review," *Chemical Engineering Science*, vol. 65, no. 22, pp. 5781-5807, 2010.
- [13] J. Jachowicz, G. Wissurel, and M. L. Garcia, "Relationship between Triboelectric Charging and Surface Modifications of Human-Hair," *J Soc Cosmet Chem*, vol. 36, no. 3, pp. 189-212, 1985.
- [14] M. E. Van Valkenburg, *Reference data for engineers: radio, electronics, computers and communications*, Ninth ed. Elsevier, 2001, pp. 4.3 - 4.11.
- [15] H. H. Hilton and J. R. Stevens, "Faraday cup detectors," Aerospace Corp El Segundo Ca Lab Operations, 1971, vol. TR-0172 (2260-20)-3.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันฉนวน

#### 1. อุปกรณ์

- 1) น้ำมันฉนวนที่ต้องการทดสอบ
- 2) เครื่องวัดความหนืด (Fisher/Tag Saybolt Viscosimeter, รุ่น ASTM D-88) แสดงดังรูป

ที่ ก1.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ ก 1. เครื่องวัดความหนืด

- 3) ปีกเกอร์ขนาด 60 ml
- 4) นาฬิกาจับเวลาดิจิตอล

#### 2. วิธีการทดสอบ

1) เตรียมน้ำมันสำหรับการทดสอบ 2 แบบ ได้แก่ แบบ A คือน้ำมันที่ถูกอุ่นและกวนด้วยเครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer) ที่อุณหภูมิ 100 °C 350 rpm เป็นเวลา 20 นาที. แบบ B คือน้ำมันที่ไม่ได้ทำการอุ่น น้ำมันทั้งสองแบบเป็นน้ำมันชนิดเดียวกัน.

2) นำน้ำมันแบบ A ใส่ในเครื่องวัดความหนืด โดยแบ่งน้ำมันใส่ลงในเครื่องวัดความหนืดแบบ 2 ตัวอย่าง. การทำงานของเครื่องวัดความหนืดคือ เครื่องจะให้ความร้อนกับน้ำมันไฮดรอลิก และ ความร้อนของน้ำมันไฮดรอลิกจะส่งต่อมายังน้ำมันที่เราต้องการทดสอบ.

3) เมื่อน้ำมันแบบ A มีอุณหภูมิ 37.7 °C ปล่อยน้ำมันลงในบีกเกอร์ปริมาณ 60 ml. จับเวลา ของน้ำมันที่ไหลลงในบีกเกอร์ และนำไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล.

4) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1) – 3) แต่เปลี่ยนเป็นน้ำมันแบบ B. ผลการทดลองแสดงดังตาราง ที่ ก.1.

ตารางที่ ก 1 ผลการทดลองการวัดความหนืด

ชนิดของน้ำมัน		เวลา (s)	มวล (g)		
			บีกเกอร์	น้ำมัน	บีกเกอร์ + น้ำมัน
A	1	44.9832	50.2736	95.2568	95.2568
	2	52.5519	50.2164	102.7683	102.7683
B	3	49.7909	50.2422	100.0331	100.0331
	4	45.8400	50.2794	96.1194	96.1194

5) นำผลทดลองไปคำนวณตามสมการ

$$\text{Kinematic viscosity} = (0.226)\text{SUS} - \frac{195}{\text{SUS}} \quad \text{cst หรือ } \text{m}^2/\text{s} \quad (\text{ก.1})$$

$$\text{Dynamic viscosity} = \rho \times (\text{Kinematic viscosity}) \quad \text{cP หรือ } \text{m Ns}/\text{m}^2 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ SUS คือเวลาเฉลี่ยของน้ำมันที่ปล่อยลงในบีกเกอร์ (s)

- น้ำมันแบบ A

$$\begin{aligned} \text{Kinematic viscosity} &= (0.226)(60.535) - \frac{195}{(60.535)} \\ &= 10.46 \text{ cst หรือ } 10.46 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dynamic viscosity} &= \frac{\left( \frac{50.2736 + 50.2162}{2} \right)}{60} \times (10.460) \\ &= 8.759 \text{ cP หรือ } 8.759 \text{ m Ns}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

- น้ำมันแบบ B

$$\begin{aligned} \text{Kinematic viscosity} &= (0.226)(60.60) - \frac{195}{(60.60)} \\ &= 10.478 \text{ cst หรือ } 10.478 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dynamic viscosity} &= \frac{\left( \frac{50.2422 + 50.2794}{2} \right)}{60} \times (10.478) \\ &= 8.759 \text{ cP หรือ } 8.759 \text{ m Ns/m}^2 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าความหนืดของน้ำมันทั้ง 2 ตัวอย่างนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกันเพราะว่าน้ำมันทั้ง 2 ตัวอย่างนี้เป็นน้ำมันชนิดเดียวกัน. ในการทดลองเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันชนิด A เพราะว่าการทดลองใช้น้ำมันที่ผ่านการอุ่นเช่นเดียวกับน้ำมันชนิด A.

#### ภาคผนวก ข ผลการทดลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบระนาบ

1. แรงดัน 7 kV

ตารางที่ ข 1 เวลาการเคลื่อนที่ขึ้น (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 7 kV

ครั้งที่	อนุภาค									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	1.338	-	1.054	1.154	0.992	0.892	1.033	1.167	0.958
2	-	0.938	-	0.913	1.033	0.958	1.100	0.958	1.046	0.829
3	-	-	-	1.050	1.017	1.067	0.883	0.946	0.996	0.908
4	-	-	-	0.938	1.154	0.967	0.888	0.946	0.975	1.054
5	-	-	-	0.963	1.158	0.996	0.929	1.229	0.921	0.988
6	-	-	-	0.925	-	1.063	0.921	0.883	-	1.279
เฉลี่ย	-	1.138	-	0.974	1.103	0.996	0.935	0.999	1.021	1.003

ตารางที่ ข 2 เวลาการเคลื่อนที่ลง (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 7 kV

ครั้งที่	อนุภาค										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	-	0.192	-	0.200	0.242	0.196	0.204	0.204	0.188	0.217	
2		0.188		0.183	0.192	0.196	0.183	0.192	0.183	0.200	
3		-		0.179	0.188	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	
4		-		0.179	0.188	0.183	0.183	0.183	0.183	0.179	0.183
5		-		0.179	0.175	0.196	0.183	0.179	0.179	0.183	
6		-		0.179	0.179	0.179	0.179	0.175		0.183	
เฉลี่ย	-	0.190	-	0.183	0.197	0.189	0.186	0.186	0.183	0.192	

ตารางที่ ข 3 ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้น (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 7 kV

ครั้งที่	อนุภาค									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	0.015	-	0.019	0.017	0.020	0.022	0.019	0.017	0.021
2		0.021		0.022	0.019	0.021	0.018	0.021	0.019	0.024
3		-		0.019	0.020	0.019	0.023	0.021	0.020	0.022
4		-		0.021	0.017	0.021	0.023	0.021	0.021	0.019
5		-		0.021	0.017	0.020	0.022	0.016	0.022	0.020
6		-		0.022	-	0.019	0.022	0.023	-	0.016
เฉลี่ย	-	0.018	-	0.021	0.018	0.020	0.022	0.020	0.020	0.020

ตารางที่ ข 4 ความเร็วการเคลื่อนที่ลง (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 7 kV

ครั้งที่	อนุภาค									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	0.104	-	0.100	0.083	0.102	0.098	0.098	0.107	0.092
2	-	0.107	-	0.109	0.104	0.102	0.109	0.104	0.109	0.100
3	-	-	-	0.112	0.107	0.109	0.109	0.109	0.109	0.107
4	-	-	-	0.112	0.107	0.109	0.109	0.109	0.112	0.109
5	-	-	-	0.112	0.114	0.102	0.109	0.112	0.112	0.109
6	-	-	-	0.112	-	0.112	0.112	0.114	-	0.109
เฉลี่ย	-	0.106	-	0.109	0.103	0.106	0.108	0.108	0.110	0.104

2. แรงดัน 8 kV

ตารางที่ ข 5 เวลาการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 8 kV

ครั้งที่	เวลาการเคลื่อนที่ขึ้น (s)					เวลาการเคลื่อนที่ลง (s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.596	0.550	0.525	0.633	0.571	0.200	0.171	0.175	0.204	0.179
2	0.458	0.521	0.508	0.475	0.458	0.188	0.171	0.175	0.175	0.179
3	0.513	0.488	0.483	0.533	0.504	0.163	0.167	0.163	0.171	0.171
4	0.571	0.579	0.517	0.546	0.492	0.163	0.163	0.158	0.171	0.163
5	0.588	0.521	0.600	0.600	0.550	0.154	0.158	0.150	0.154	0.163
6	0.600	0.529	0.554	0.579	0.504	0.154	0.158	0.158	0.154	0.154
7	0.554	0.550	0.554	0.538	0.654	0.154	0.154	0.150	0.154	0.154
8	0.538	0.542	0.533	0.546	0.546	0.163	0.154	0.150	0.154	0.158
9	0.529	0.546	0.508	0.525	0.558	0.154	0.154	0.150	0.154	0.154
10	0.529	0.554	0.496	0.525	0.525	0.154	0.154	0.150	0.154	0.154
11	0.533	0.538	0.488	0.513	0.529	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
12	0.508	0.533	0.500	0.504	0.521	0.150	0.150	0.150	0.150	0.154
13	0.500	0.675	0.525	0.517	-	0.146	0.158	0.146	0.283	-
เฉลี่ย	0.540	0.548	0.522	0.541	0.534	0.161	0.159	0.156	0.171	0.161

ตารางที่ ข 6 ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 8 kV

ครั้งที่	ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)					ความเร็วการเคลื่อนที่ลง (m/s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.034	0.036	0.038	0.032	0.035	0.100	0.117	0.114	0.098	0.112
2	0.044	0.038	0.039	0.042	0.044	0.107	0.117	0.114	0.114	0.112
3	0.039	0.041	0.041	0.038	0.040	0.123	0.120	0.123	0.117	0.117
4	0.035	0.035	0.039	0.037	0.041	0.123	0.123	0.126	0.117	0.123
5	0.034	0.038	0.033	0.033	0.036	0.130	0.126	0.133	0.130	0.123
6	0.033	0.038	0.036	0.035	0.040	0.130	0.126	0.126	0.130	0.130
7	0.036	0.036	0.036	0.037	0.031	0.130	0.130	0.133	0.130	0.130
8	0.037	0.037	0.038	0.037	0.037	0.123	0.130	0.133	0.130	0.126
9	0.038	0.037	0.039	0.038	0.036	0.130	0.130	0.133	0.130	0.130
10	0.038	0.036	0.040	0.038	0.038	0.130	0.130	0.133	0.130	0.130
11	0.038	0.037	0.041	0.039	0.038	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133
12	0.039	0.038	0.040	0.040	0.038	0.133	0.133	0.133	0.133	0.130
13	0.040	0.030	0.038	0.039	-	0.137	0.126	0.137	0.071	-
เฉลี่ย	0.037	0.037	0.038	0.037	0.038	0.125	0.126	0.129	0.120	0.125

## 3. แรงดัน 9 kV

ตารางที่ ข 7 เวลาการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 9 kV

ครั้งที่	เวลาการเคลื่อนที่ขึ้น (s)					เวลาการเคลื่อนที่ลง (s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.392	0.421	0.358	0.400	0.404	0.146	0.154	0.150	0.158	0.142
2	0.363	0.342	0.363	0.342	0.404	0.150	0.154	0.163	0.163	0.142
3	0.342	0.342	0.342	0.342	0.383	0.146	0.154	0.146	0.146	0.146
4	0.346	0.442	0.363	0.388	0.371	0.142	0.150	0.142	0.138	0.146
5	0.354	0.438	0.371	0.413	0.358	0.142	0.154	0.142	0.133	0.154
6	0.363	0.388	0.392	0.442	0.363	0.142	0.138	0.142	0.138	0.142
7	0.413	0.388	0.375	0.438	0.363	0.142	0.138	0.133	0.133	0.142
8	0.367	0.413	0.379	0.408	0.367	0.138	0.142	0.133	0.146	0.142
9	0.371	0.404	0.375	0.396	0.371	0.138	0.138	0.138	0.138	0.138
10	0.367	0.379	0.371	0.392	0.358	0.133	0.138	0.133	0.133	0.138
11	0.379	0.392	0.388	0.396	0.371	0.133	0.138	0.133	0.138	0.133
12	0.367	0.371	0.383	0.388	0.367	0.142	0.138	0.129	0.138	0.138
13	0.429	0.371	0.388	0.375	0.367	0.133	0.138	0.121	0.138	0.138
14	0.375	0.358	0.383	0.408	0.367	0.129	0.129	0.133	0.133	0.133
15	0.367	0.358	0.375	0.371	0.358	0.129	0.138	0.133	0.133	0.133
16	0.396	0.400	0.375	0.371	0.413	0.129	0.133	0.129	0.133	0.129
17	0.363	0.408	0.379	0.375	0.279	0.125	0.521	0.129	0.133	0.129
18	-	-	-	-	0.363	-	-	-	-	0.133
เฉลี่ย	0.374	0.389	0.374	0.391	0.368	0.138	0.164	0.137	0.139	0.139



ตารางที่ ข 8 ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 9 kV

ครึ่ง ที่	ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)					ความเร็วการเคลื่อนที่ลง (m/s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.051	0.048	0.056	0.050	0.049	0.137	0.130	0.133	0.126	0.141
2	0.055	0.059	0.055	0.059	0.049	0.133	0.130	0.123	0.123	0.141
3	0.059	0.059	0.059	0.059	0.052	0.137	0.130	0.137	0.137	0.137
4	0.058	0.045	0.055	0.052	0.054	0.141	0.133	0.141	0.145	0.137
5	0.056	0.046	0.054	0.048	0.056	0.141	0.130	0.141	0.150	0.130
6	0.055	0.052	0.051	0.045	0.055	0.141	0.145	0.141	0.145	0.141
7	0.048	0.052	0.053	0.046	0.055	0.141	0.145	0.150	0.150	0.141
8	0.055	0.048	0.053	0.049	0.055	0.145	0.141	0.150	0.137	0.141
9	0.054	0.049	0.053	0.051	0.054	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145
10	0.055	0.053	0.054	0.051	0.056	0.150	0.145	0.150	0.150	0.145
11	0.053	0.051	0.052	0.051	0.054	0.150	0.145	0.150	0.145	0.150
12	0.055	0.054	0.052	0.052	0.055	0.141	0.145	0.155	0.145	0.145
13	0.047	0.054	0.052	0.053	0.055	0.150	0.145	0.166	0.145	0.145
14	0.053	0.056	0.052	0.049	0.055	0.155	0.155	0.150	0.150	0.150
15	0.055	0.056	0.053	0.054	0.056	0.155	0.145	0.150	0.150	0.150
16	0.051	0.050	0.053	0.054	0.048	0.155	0.150	0.155	0.150	0.155
17	0.055	0.049	0.053	0.053	0.072	0.160	0.038	0.155	0.150	0.155
18	-	-	-	-	0.055	-	-	-	-	0.150
เฉลี่ย	0.054	0.052	0.054	0.051	0.055	0.146	0.135	0.147	0.144	0.145

ภาคผนวก ค ผลการทดลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกลมกับระนาบ

1. แรงดัน 8 kV

ตารางที่ ค 1 เวลาการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 8 kV

ครั้งที่	เวลาการเคลื่อนที่ขึ้น (s)					เวลาการเคลื่อนที่ลง (s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1.463	1.396	1.108	0.863	4.279	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
2	0.975	0.725	0.713	0.479	0.700	0.113	0.117	0.113	0.113	0.108
3	0.771	0.746	0.617	0.588	0.729	0.113	0.117	0.113	0.113	0.113
4	0.692	0.608	0.583	-	0.563	0.117	0.113	0.113	-	0.113
5	0.629	0.575	-	-	0.542	0.133	0.117	-	-	0.113
6	0.625	-	-	-	-	0.113	-	-	-	-
เฉลี่ย	0.859	0.810	0.755	0.643	1.363	0.117	0.115	0.113	0.113	0.112

ตารางที่ ค 2 ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 8 kV

ครั้งที่	ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)					ความเร็วการเคลื่อนที่ลง (m/s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.014	0.014	0.018	0.023	0.005	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178
2	0.021	0.028	0.028	0.042	0.029	0.178	0.171	0.178	0.178	0.185
3	0.026	0.027	0.032	0.034	0.027	0.178	0.171	0.178	0.178	0.178
4	0.029	0.033	0.034	-	0.036	0.171	0.178	0.178	-	0.178
5	0.032	0.035	-	-	0.037	0.150	0.171	-	-	0.178
6	0.032	-	-	-	-	0.178	-	-	-	-
เฉลี่ย	0.025	0.027	0.028	0.033	0.027	0.172	0.174	0.178	0.178	0.179

## 2. แรงดัน 9 kV

ตารางที่ ค 3 เวลาการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 9 kV

ครึ่ง ที่	เวลาการเคลื่อนที่ขึ้น (s)					เวลาการเคลื่อนที่ลง (s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1.417	1.142	0.621	0.892	0.658	0.096	0.092	0.100	0.092	0.092
2	0.867	0.675	0.583	0.679	0.571	0.096	0.096	0.092	0.092	0.092
3	0.688	0.604	0.508	0.571	0.713	0.096	0.096	0.096	0.092	0.092
4	0.613	0.571	0.450	0.567	0.517	0.096	0.096	0.096	0.092	0.092
5	0.563	0.508	0.433	0.521	0.571	0.096	0.100	0.096	0.096	0.096
6	0.517	0.471	0.408	0.471	0.738	0.096	0.096	0.096	0.096	0.092
7	0.500	0.438	0.400	0.429	0.483	0.096	0.096	0.100	0.096	0.092
8	0.471	0.425	0.371	0.421	0.417	0.100	0.096	0.096	0.096	0.096
9	0.442	0.421	0.367	0.396	0.408	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096
10	0.429	0.400	-	0.383	0.400	0.096	0.100	-	0.096	0.096
11	0.425	-	-	0.375	0.367	0.096	-	-	0.100	0.096
12	0.417	-	-	0.367	0.367	0.100	-	-	0.096	0.096
13	-	-	-	0.375	0.346	-	-	-	0.096	0.096
14	-	-	-	0.358	-	-	-	-	0.100	-
เฉลี่ย	0.612	0.565	0.460	0.486	0.504	0.097	0.096	0.096	0.095	0.094

ตารางที่ ค 4 ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 9 kV

ครึ่ง ที่	ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)					ความเร็วการเคลื่อนที่ลง (m/s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.014	0.018	0.032	0.022	0.030	0.209	0.218	0.200	0.218	0.218
2	0.023	0.030	0.034	0.029	0.035	0.209	0.209	0.218	0.218	0.218
3	0.029	0.033	0.039	0.035	0.028	0.209	0.209	0.209	0.218	0.218
4	0.033	0.035	0.044	0.035	0.039	0.209	0.209	0.209	0.218	0.218
5	0.036	0.039	0.046	0.038	0.035	0.209	0.200	0.209	0.209	0.209
6	0.039	0.042	0.049	0.042	0.027	0.209	0.209	0.209	0.209	0.218
7	0.040	0.046	0.050	0.047	0.041	0.209	0.209	0.200	0.209	0.218
8	0.042	0.047	0.054	0.048	0.048	0.200	0.209	0.209	0.209	0.209
9	0.045	0.048	0.055	0.051	0.049	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209
10	0.047	0.050	-	0.052	0.050	0.209	0.200	-	0.209	0.209
11	0.047	-	-	0.053	0.055	0.209	-	-	0.200	0.209
12	0.048	-	-	0.055	0.055	0.200	-	-	0.209	0.209
13	-	-	-	0.053	0.058	-	-	-	0.209	0.209
14	-	-	-	0.056	-	-	-	-	0.200	-
เฉลี่ย	0.037	0.039	0.045	0.044	0.042	0.207	0.208	0.208	0.210	0.213

## 3. แรงดัน 10 kV

ตารางที่ ค 5 เวลาการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 10 kV

ครึ่ง ที่	เวลาการเคลื่อนที่ขึ้น (s)					เวลาการเคลื่อนที่ลง (s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1.242	0.646	0.883	0.704	0.833	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079
2	0.742	0.646	0.596	0.671	0.658	0.083	0.079	0.079	0.079	0.083
3	0.554	0.567	0.517	0.621	0.592	0.083	0.079	0.079	0.079	0.083
4	0.508	0.496	0.471	0.492	0.529	0.083	0.083	0.079	0.079	0.083
5	0.492	0.471	0.433	0.467	0.463	0.083	0.079	0.083	0.083	0.083
6	0.417	0.425	0.417	0.458	0.404	0.088	0.083	0.079	0.083	0.083
7	0.400	0.404	0.392	0.425	0.404	0.083	0.083	0.083	0.088	0.083
8	0.379	0.429	0.392	0.479	0.371	0.088	0.088	0.083	0.083	0.083
9	0.371	0.358	0.358	0.354	0.346	0.088	0.088	0.083	0.083	0.083
10	0.350	0.338	0.346	0.346	0.333	0.083	0.088	0.083	0.088	0.088
11	0.350	0.338	0.338	0.325	0.354	0.083	0.083	0.088	0.083	0.083
12	0.329	0.325	0.325	0.338	0.321	0.092	0.083	0.088	0.083	0.088
13	0.317	0.329	0.317	0.329	0.300	0.088	0.088	0.083	0.083	0.088
14	0.313	0.333	0.325	0.300	0.304	0.083	0.088	0.088	0.083	0.083
15	0.304	0.838	0.300	0.296	0.292	0.083	0.088	0.083	0.083	0.083
16	0.292	0.300	0.292	0.279	0.283	0.088	0.088	0.088	0.088	0.083
17	-	-	0.288	0.279	0.279	-	-	0.092	0.088	0.088
18	-	-	0.288	0.304	0.275	-	-	0.083	0.092	0.088
19	-	-	0.275	-	0.275	-	-	0.504	-	0.104
เฉลี่ย	0.460	0.453	0.397	0.415	0.401	0.085	0.084	0.106	0.084	0.085

ตารางที่ ค 6 ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นและลง (m/s) ของอนุภาคที่ระดับแรงดัน 10 kV

ครึ่ง ที่	ความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้น (m/s)					ความเร็วการเคลื่อนที่ลง (m/s)				
	อนุภาค					อนุภาค				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.016	0.031	0.023	0.028	0.024	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253
2	0.027	0.031	0.034	0.030	0.030	0.240	0.253	0.253	0.253	0.240
3	0.036	0.035	0.039	0.032	0.034	0.240	0.253	0.253	0.253	0.240
4	0.039	0.040	0.042	0.041	0.038	0.240	0.240	0.253	0.253	0.240
5	0.041	0.042	0.046	0.043	0.043	0.240	0.253	0.240	0.240	0.240
6	0.048	0.047	0.048	0.044	0.049	0.229	0.240	0.253	0.240	0.240
7	0.050	0.049	0.051	0.047	0.049	0.240	0.240	0.240	0.229	0.240
8	0.053	0.047	0.051	0.042	0.054	0.229	0.229	0.240	0.240	0.240
9	0.054	0.056	0.056	0.056	0.058	0.229	0.229	0.240	0.240	0.240
10	0.057	0.059	0.058	0.058	0.060	0.240	0.229	0.240	0.229	0.229
11	0.057	0.059	0.059	0.062	0.056	0.240	0.240	0.229	0.240	0.240
12	0.061	0.062	0.062	0.059	0.062	0.218	0.240	0.229	0.240	0.229
13	0.063	0.061	0.063	0.061	0.067	0.229	0.229	0.240	0.240	0.229
14	0.064	0.060	0.062	0.067	0.066	0.240	0.229	0.229	0.240	0.240
15	0.066	0.024	0.067	0.068	0.069	0.240	0.229	0.240	0.240	0.240
16	0.069	0.067	0.069	0.072	0.071	0.229	0.229	0.229	0.229	0.240
17	-	-	0.070	0.072	0.072	-	-	0.218	0.229	0.229
18	-	-	0.070	0.066	0.073	-	-	0.240	0.218	0.229
19	-	-	0.073	-	0.073	-	-	0.040	-	0.192
เฉลี่ย	0.050	0.048	0.055	0.053	0.055	0.236	0.238	0.229	0.239	0.235

ภาคผนวก ง ผลการทดลองของการวัดประจุด้วยถ้วยฟาราเดย์แบบอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านและถ้วยฟาราเดย์กับอิเล็กทรอนิกส์

1. ผลการทดลองวัดประจุบนอนุภาคที่ได้จากวงจรวัดประจุและอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ ง 1 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) ของอนุภาคอลูมิเนียมหลังผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อวัดด้วยวงจรวัดประจุ

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.923	1.067	1.604	0.726	1.575
2	1.063	1.042	0.983	1.024	1.444
3	1.234	0.775	1.544	1.018	1.016
4	0.699	0.545	1.135	0.979	0.667
5	0.973	0.669	0.711	1.363	1.389
6	0.147	1.243	0.685	1.080	1.005
7	0.667	0.717	0.795	1.238	0.806
8	0.751	0.725	1.053	1.134	0.872
9	0.697	0.864	0.946	1.024	0.948
10	0.999	1.177	1.434	1.360	1.264
เฉลี่ย	0.815	0.883	1.089	1.094	1.099

ตารางที่ ง 2 ประจุ (nC) ของอนุภาคคอลลอยด์เหนียวหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อวัดด้วยวงจรวัดประจุ

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.020	0.024	0.035	0.016	0.035
2	0.023	0.023	0.022	0.023	0.032
3	0.027	0.017	0.034	0.022	0.022
4	0.015	0.012	0.025	0.022	0.015
5	0.021	0.015	0.016	0.030	0.031
6	0.003	0.027	0.015	0.024	0.022
7	0.015	0.016	0.017	0.027	0.012
8	0.017	0.016	0.023	0.025	0.019
9	0.015	0.019	0.021	0.023	0.021
10	0.022	0.026	0.032	0.030	0.028
เฉลี่ย	0.018	0.019	0.024	0.024	0.024

ตารางที่ ง 3 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) ของอนุภาคเหล็กหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อวัดด้วยวงจรวัดประจุ

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.550	0.400	0.769	0.895	3.118
2	0.134	0.174	1.048	1.555	4.115
3	0.152	0.377	0.990	0.880	3.421
4	0.367	0.392	0.707	1.299	2.992
5	0.580	0.971	0.653	2.471	1.344
6	0.248	0.352	0.886	3.224	2.406
7	0.556	0.611	1.520	0.727	3.259
8	0.519	0.156	0.902	2.728	3.316
9	0.184	0.978	1.180	2.908	1.957
10	0.421	0.295	0.662	1.062	2.211
เฉลี่ย	0.371	0.470	0.932	1.775	2.814



ตารางที่ ง 4 ประจุ (nC) ของอนุภาคเหล็กหลังผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อวัดด้วยวงจรวัดประจุ

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.012	0.009	0.017	0.020	0.069
2	0.003	0.004	0.023	0.034	0.091
3	0.003	0.008	0.022	0.019	0.075
4	0.008	0.009	0.016	0.029	0.066
5	0.013	0.021	0.014	0.054	0.030
6	0.005	0.008	0.020	0.071	0.053
7	0.012	0.013	0.033	0.016	0.072
8	0.011	0.003	0.020	0.060	0.073
9	0.004	0.022	0.026	0.064	0.043
10	0.009	0.006	0.015	0.023	0.049
เฉลี่ย	0.008	0.010	0.020	0.039	0.062

ตารางที่ ง 5 แรงดัน  $V_{o2}$  (V) ของอนุภาคแก้วหลังผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อวัดด้วยวงจรวัดประจุ

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.230	0.132	0.642	0.612	0.269
2	0.242	0.303	0.432	0.475	0.126
3	0.149	0.260	0.334	0.459	0.138
4	0.184	0.196	0.669	0.485	0.299
5	0.404	0.362	0.490	0.326	0.287
6	0.180	0.355	0.655	0.794	0.115
7	0.189	0.331	0.719	0.547	-
8	0.203	0.345	0.453	0.308	-
9	0.144	0.208	0.339	0.414	-
10	0.102	0.272	0.270	0.343	-
เฉลี่ย	0.203	0.276	0.500	0.476	0.206

ตารางที่ ง 6 ประจุ (nC) ของอนุภาคแก้ว หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อวัดด้วยวงจรวัดประจุ

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.005	0.003	0.014	0.014	0.006
2	0.005	0.007	0.010	0.010	0.003
3	0.003	0.006	0.007	0.010	0.003
4	0.004	0.004	0.015	0.011	0.007
5	0.009	0.008	0.011	0.007	0.006
6	0.004	0.008	0.014	0.018	0.003
7	0.004	0.007	0.016	0.012	-
8	0.004	0.008	0.010	0.007	-
9	0.003	0.005	0.007	0.009	-
10	0.002	0.006	0.006	0.008	-
เฉลี่ย	0.004	0.006	0.011	0.011	0.005

ตารางที่ ง 7 ประจุ (nC) ของอนุภาคเหล็ก เมื่อวัดด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.010	0.006	0.021	0.050	0.050
2	0.036	0.003	0.033	0.064	0.041
3	0.018	0.013	0.020	0.034	0.071
4	0.005	0.017	0.018	0.081	0.051
5	0.013	0.014	0.019	0.062	0.050
6	0.009	0.020	0.022	0.050	0.049
7	0.007	0.013	0.035	0.029	0.072
8	0.015	0.014	0.020	0.041	0.084
9	0.018	0.026	0.011	0.048	0.071
10	0.006	0.019	0.016	0.050	0.064
11	0.014	0.039	0.030	0.039	0.052
12	0.009	0.036	0.032	0.032	0.061
13	0.010	0.009	0.023	0.053	0.050
14	0.011	0.015	0.018	0.047	-
15	0.015	0.019	0.021	0.041	-
16	-	-	0.029	0.046	-
17	-	-	0.035	-	-
18	-	-	0.035	-	-
19	-	-	0.022	-	-
เฉลี่ย	0.013	0.018	0.024	0.048	0.059

ตารางที่ 8 ประจุ (nC) ของอนุภาคแก้ว เมื่อวัดด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.004	0.006	0.024	0.009	0.038
2	0.007	0.007	0.009	0.013	0.046
3	0.003	0.006	0.016	0.011	0.037
4	0.004	0.007	0.012	0.010	0.021
5	0.004	0.006	0.013	0.019	0.011
6	0.005	0.012	0.025	0.009	0.029
7	0.003	0.007	0.022	0.011	0.017
8	0.004	0.009	0.013	0.011	0.026
9	0.004	0.008	0.011	0.016	0.017
10	0.018	0.008	0.012	0.013	0.003
11	-	-	0.007	-	-
12	-	-	0.006	-	-
13	-	-	0.012	-	-
14	-	-	0.009	-	-
เฉลี่ย	0.006	0.008	0.014	0.012	0.025

2. ผลการทดลองของขนาดอิเล็กโทรดที่มีต่อค่าที่ได้จากวงจรวัดประจุ

ตารางที่ ง 9 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวนด์ขนาด 5 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.503	0.589	1.843	2.293	2.948
2	0.385	0.883	0.678	2.179	2.598
3	0.305	1.199	1.614	2.269	2.726
4	0.629	0.705	1.942	1.198	3.024
5	0.282	1.211	1.811	2.374	2.363
6	0.526	0.625	1.874	2.172	3.297
7	0.522	0.861	1.578	2.069	2.806
8	0.375	0.741	1.370	2.071	3.080
9	0.589	0.721	1.380	1.943	2.441
10	0.390	1.229	1.509	2.325	2.690
เฉลี่ย	0.451	0.877	1.560	2.089	2.797

ตารางที่ ง 10 ประจุ (nC) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 5 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.011	0.013	0.041	0.050	0.065
2	0.008	0.194	0.015	0.048	0.057
3	0.007	0.026	0.035	0.050	0.060
4	0.014	0.016	0.043	0.026	0.067
5	0.006	0.027	0.040	0.052	0.052
6	0.012	0.014	0.041	0.048	0.073
7	0.011	0.019	0.035	0.046	0.062
8	0.008	0.016	0.030	0.046	0.068
9	0.013	0.016	0.030	0.043	0.054
10	0.009	0.027	0.033	0.051	0.059
เฉลี่ย	0.010	0.019	0.034	0.046	0.062

ตารางที่ ง 11 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 12 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.550	0.400	0.769	0.895	3.118
2	0.134	0.174	1.048	1.555	4.115
3	0.152	0.377	0.990	0.880	3.421
4	0.367	0.392	0.707	1.299	2.992
5	0.580	0.971	0.653	2.471	1.344
6	0.248	0.352	0.886	3.224	2.406
7	0.556	0.611	1.520	0.727	3.259
8	0.519	0.156	0.902	2.728	3.316
9	0.184	0.978	1.180	2.908	1.957
10	0.421	0.295	0.662	1.062	2.211
เฉลี่ย	0.371	0.470	0.932	1.775	2.814

ตารางที่ ง 12 ประจุ (nC) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 12 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.012	0.009	0.017	0.020	0.069
2	0.003	0.004	0.023	0.034	0.091
3	0.003	0.008	0.022	0.019	0.075
4	0.008	0.009	0.016	0.029	0.066
5	0.013	0.021	0.014	0.054	0.030
6	0.005	0.008	0.020	0.071	0.053
7	0.012	0.013	0.033	0.016	0.072
8	0.011	0.003	0.020	0.060	0.073
9	0.004	0.022	0.026	0.064	0.043
10	0.009	0.006	0.015	0.023	0.049
เฉลี่ย	0.008	0.010	0.020	0.039	0.062

ตารางที่ ง 13 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 20 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	1.020	1.685	2.540	3.010	2.864
2	1.221	1.823	2.660	3.178	3.831
3	1.490	1.315	2.895	2.812	3.057
4	1.312	1.963	2.740	2.884	4.194
5	1.006	1.823	2.504	2.870	3.894
6	1.206	1.871	2.728	1.850	3.147
7	1.432	1.607	2.350	2.647	3.341
8	1.416	2.113	1.834	2.589	3.727
9	0.850	1.627	2.609	2.811	3.090
10	1.112	1.584	2.722	2.391	3.288
เฉลี่ย	1.207	1.741	2.558	2.704	3.443

ตารางที่ ง 14 ประจุ (nC) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 20 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.022	0.037	0.056	0.066	0.063
2	0.027	0.040	0.059	0.070	0.084
3	0.033	0.029	0.064	0.062	0.067
4	0.029	0.043	0.060	0.063	0.092
5	0.022	0.040	0.055	0.063	0.086
6	0.027	0.041	0.060	0.041	0.069
7	0.032	0.035	0.052	0.058	0.074
8	0.031	0.046	0.040	0.057	0.082
9	0.019	0.036	0.057	0.062	0.068
10	0.024	0.035	0.060	0.053	0.072
เฉลี่ย	0.027	0.038	0.056	0.059	0.076

ตารางที่ ง 15 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 12 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 12 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.404	0.846	2.228	2.333	3.537
2	0.517	0.998	1.727	1.886	3.168
3	0.485	1.055	1.190	1.871	2.833
4	0.483	0.875	1.702	1.930	2.454
5	0.425	0.840	1.454	1.895	2.756
6	0.333	0.914	1.349	2.144	2.326
7	0.574	1.289	1.318	2.339	3.283
8	0.580	0.961	1.756	2.218	3.169
9	0.637	1.145	1.694	2.238	2.787
10	0.434	1.222	1.795	2.149	3.225
เฉลี่ย	0.487	1.014	1.621	2.100	2.954



ตารางที่ ง 16 ประจุ (nC) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 12 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 12 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.009	0.019	0.049	0.051	0.078
2	0.011	0.022	0.038	0.041	0.070
3	0.011	0.023	0.026	0.041	0.062
4	0.011	0.019	0.037	0.042	0.054
5	0.009	0.018	0.032	0.042	0.061
6	0.007	0.020	0.030	0.047	0.051
7	0.013	0.028	0.029	0.051	0.072
8	0.013	0.021	0.039	0.049	0.070
9	0.014	0.025	0.037	0.049	0.061
10	0.010	0.027	0.039	0.047	0.071
เฉลี่ย	0.011	0.022	0.036	0.046	0.065

ตารางที่ ง 17 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 12 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.231	0.180	0.502	0.898	1.571
2	0.179	0.180	0.566	0.817	1.795
3	0.141	0.291	0.452	0.826	1.670
4	0.218	0.215	0.552	0.820	1.596
5	0.171	0.300	0.363	1.010	2.645
6	0.170	0.219	0.468	1.089	2.902
7	0.171	0.202	0.670	1.147	1.642
8	0.094	0.385	0.718	1.122	1.642
9	0.176	0.329	0.412	1.140	1.778
10	0.278	0.325	0.497	1.249	1.662
เฉลี่ย	0.183	0.263	0.520	1.012	1.890

ตารางที่ ง 18 ประจุ (nC) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กโทรดวัดขนาด 5 mm  
อิเล็กโทรดกราวด์ขนาด 12 mm และกระบอกทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10mm

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.005	0.004	0.011	0.020	0.035
2	0.004	0.004	0.012	0.018	0.039
3	0.003	0.006	0.010	0.018	0.037
4	0.005	0.005	0.012	0.018	0.035
5	0.004	0.007	0.008	0.022	0.058
6	0.004	0.005	0.010	0.024	0.064
7	0.004	0.004	0.015	0.025	0.036
8	0.002	0.008	0.016	0.025	0.036
9	0.004	0.007	0.009	0.025	0.039
10	0.006	0.007	0.011	0.027	0.037
เฉลี่ย	0.004	0.006	0.011	0.022	0.042

ตารางที่ 19 แรงดัน  $V_{O_2}$  (V) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์ตำแหน่ง B

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.128	0.146	0.150	0.233	0.819
2	0.109	0.122	0.122	0.329	0.966
3	0.157	0.145	0.163	0.375	1.033
4	0.102	0.102	0.135	0.309	0.609
5	0.194	0.129	0.149	0.368	0.512
6	0.092	0.187	0.224	0.331	1.584
7	0.128	0.173	0.198	0.237	0.765
8	0.040	0.185	0.120	0.270	0.716
9	0.147	0.189	0.324	0.273	1.613
10	0.113	0.241	0.335	0.369	0.945
เฉลี่ย	0.121	0.162	0.192	0.309	0.956

ตารางที่ 20 ประจุ (nC) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์ตำแหน่ง B

ครั้งที่	เวลา (s)				
	15	30	60	120	240
1	0.003	0.003	0.003	0.005	0.018
2	0.002	0.003	0.003	0.007	0.021
3	0.003	0.003	0.004	0.008	0.023
4	0.002	0.002	0.003	0.007	0.013
5	0.004	0.003	0.003	0.008	0.011
6	0.002	0.004	0.005	0.007	0.035
7	0.003	0.004	0.004	0.005	0.017
8	0.001	0.004	0.003	0.006	0.016
9	0.003	0.004	0.007	0.001	0.035
10	0.002	0.005	0.007	0.008	0.021
เฉลี่ย	0.003	0.004	0.004	0.007	0.021

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาว พนิดตา โจรจน์ธนวิชย์
วัน เดือน ปี เกิด	3 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาบัณฑิต สาขาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2558
ผลงานตีพิมพ์	"การวัดประจุบนอนุภาคตัวนำและฉนวนด้วยถ้วยฟาราเดย์,"การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON-42),pp. 93-96, 2019



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY