

การศึกษากลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมและการควบคุมอนุภาค



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study on the Electromechanics of Prolate Spheroidal Particles and the Particle
Control

Mr. Tatchawin Sangsri



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาทฤษฎีไฟฟ้าของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลม และการควบคุมอนุภาค
โดย	นายพัชรวิมล แสงศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระพันธ์ รัสสีวิจิตรประภา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีรฤดี ยุทธโกวิท)

พัฐชวิน แสงศรี : การศึกษากลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมและการควบคุมอนุภาค (Study on the Electromechanics of Prolate Spheroidal Particles and the Particle Control) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ, 64 หน้า.

การศึกษากลศาสตร์ทางไฟฟ้าของอนุภาคตัวนำเป็นหนทางหนึ่งในการควบคุมอนุภาคและการพัฒนาสมรรถนะของระบบฉนวนก๊าซให้ดีขึ้น. วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างภายใต้สนามไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวแทนของรูปร่างที่เบี่ยงเบนไปจากทรงกลม. การทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแสดงให้เห็นว่า อนุภาคเคลื่อนที่ 2 แบบ. แบบที่หนึ่ง อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่จากการหมุนรอบจุดสัมผัส หลังจากนั้นยกตัวออกจากอิเล็กโทรด. แบบที่สอง อนุภาคยกตัวขนานออกจากอิเล็กโทรดกราวด์. การเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของอนุภาคที่สัมผัสกับอิเล็กโทรดกราวด์และจัดวางโดยแกนเอกอยู่ในแนวการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนกับการเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่การหมุนรอบจุดสัมผัสของอนุภาคส่วนใหญ่เริ่มยกตัวจากปลายด้านในขึ้นก่อน. อนุภาคที่จัดวางโดยให้สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกสามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีระยะแกปแคบกว่า นอกเหนือจากการหมุนรอบจุดสัมผัสและการยกตัวขนาน. เมื่ออนุภาคอยู่บนฉนวนและมีสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก อนุภาคจะหมุนในแนวระดับหรือกลิ้งไปยังบริเวณที่มีระยะแกปแคบกว่า. อนุภาคไม่สามารถกลิ้งได้เมื่อจัดวางโดยให้แกนเอกอยู่ในแนวการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า เนื่องจากแรงเสียดทานที่มากเกินไป. การทดสอบการดักจับอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออาศัยสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของอิเล็กโทรดและฉนวน. อัตราในการจับยึดอนุภาคค่อนข้างต่ำและอนุภาคส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่. การเพิ่มประสิทธิภาพในการจับยึดอนุภาคทำได้โดยการเพิ่มระยะแกป เพื่อลดโอกาสเกิดดีสชาร์จระหว่างอิเล็กโทรด.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570543821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GAS INSULATION SYSTEM / PARTICLE ELECTROMECHANICS /
ELECTROSTATIC FORCE / PROLATE SPHEROIDAL PARTICLE

TATCHAWIN SANGSRI: Study on the Electromechanics of Prolate Spheroidal
Particles and the Particle Control. ADVISOR: PROF. BOONCHAI TECHAUMNAT,
Ph.D., 64 pp.

The study on electromechanics of conducting particles is a basic for
controlling particles and improving the performance of gas insulation systems. This
thesis studies the movement of the prolate spheroidal particles under electric field for
representing the shape that delivates from spherical one. The experiments under
uniform electric field show that there are two patterns of the particle movement. For
the first pattern, the parrticle rotates about the contact point and then lifts from the
electrode. For the second pattern, the particle lifts parallel with the grounded
electrode. The movement under non-uniform field of particles that are in contact with
the grounded electrode and aligned parallel to the field gradient is similar to that
under the uniform field, but the particle mostly lifts from the inner end. The particle
placed with constant electric field on the major axis can move to the higher field
region, in addition to the rotation and the parallel lift. When the particle is on a
dielectric and subjected to constant electric field on the major axis, it rotates vertically
or rolls to the higher field region. The particle does not move when its major axis is
parallel with the field gradient because of too high friction force. The experiments on
the particle deactivation under the non-uniform field utilizes the field on electrode
and PDMS edges. The rate of successful particle deactivation is quite low, and particles
often do not move. This deactivation efficiency can be improved by increasing the
gap to lower the discharge occurence between electrodes.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) และ Prof. Kunihiko Hidaka (University of Tokyo) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการปรับปรุงอุปกรณ์และตัวอย่างอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง ตามลำดับ. ขอขอบคุณบุคลากรห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ให้ความรู้และฝึกการใช้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญในการทำวิทยานิพนธ์นี้. สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวและมิตรสหายที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้านการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์.



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม	2
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์	6
2.2 สนามไฟฟ้ายกตัว	6
2.3 แรงบนอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า.....	8
2.4 กลศาสตร์ไฟฟ้าของทรงคล้ายทรงกลม.....	10
2.5 การควบคุมอนุภาคด้วยแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส.....	11
บทที่ 3 การเตรียมการทดลอง.....	15
3.1 อนุภาค	15
3.2 อุปกรณ์.....	16
3.3 วิธีและเงื่อนไขการทดลอง	20
บทที่ 4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	24

4.1 รูปแบบการยกตัวของอนุภาคจากอิเล็กโทรด.....	24
4.2 สนามไฟฟ้าเริ่มหมุนของอนุภาค.....	25
4.3 การยกตัวของอนุภาคภายใต้แรงดันคงที่	26
4.4 พฤติกรรมหลังเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรด	27
บทที่ 5 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ	28
5.1 อนุภาคสัมผัสกับอิเล็กโทรดกราวนด์	28
5.2 อนุภาคถูกฉนวนจากอิเล็กโทรด	38
บทที่ 6 การดักจับอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	42
6.1 สนามไฟฟ้าบริเวณกับดักอนุภาค.....	42
6.2 ผลการทดลองดักจับอนุภาค.....	45
บทที่ 7 สรุป.....	50
รายการอ้างอิง	52
ภาคผนวก.....	54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานีไฟฟ้ามีหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม. สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ (Air insulated substation) ใช้อากาศที่สภาวะบรรยากาศเป็นฉนวนไฟฟ้าหลัก. สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศต้องอาศัยพื้นที่ที่กว้าง เพื่อให้อากาศสามารถทนต่อแรงดันของระบบได้. ดังนั้น ในบริเวณที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ของการติดตั้ง โดยเฉพาะชุมชนเมือง การสร้างสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศจึงอาจทำได้ หรือไม่เหมาะสม. สวิตช์เกียร์ไฟฟ้าแรงสูงต่าง ๆ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน สวิตช์ต่อลงดิน และอื่น ๆ เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญในสถานีไฟฟ้า โดยมีหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้า และป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ จากการเกิดกระแสเกินหรือแรงดันเกิน [1]. สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ (Gas insulated switchgear, GIS) ใช้ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) หรือก๊าซฉนวนอื่น ๆ ที่ระดับความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลักระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรไฟฟ้าแรงสูง และระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โทรไฟฟ้าแรงสูงกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์. ข้อดีของ GIS เมื่อเปรียบเทียบกับระบบฉนวนอากาศก็คือ ขนาดของสวิตช์เกียร์ที่เล็กลง และความต้องการการซ่อมบำรุงมีความถี่ต่ำ เนื่องจากเป็นระบบที่อยู่ในโครงสร้างปิด.

ระบบฉนวนก๊าซที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง คือ ระบบสายส่งแบบฉนวนก๊าซ (Gas insulated transmission line, GITL). GITL มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแกนเดียว หรือแบบหลายแกน โดยมีตัวนำไฟฟ้าแรงสูงอยู่ด้านใน และตัวนำด้านนอกต่อลงดิน. ฉนวนก๊าซระหว่างตัวนำอาจเป็นก๊าซไนโตรเจนกับ SF_6 [2]. เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นตัวนำสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ผลกระทบทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบ GITL เมื่อเปรียบเทียบกับระบบสายส่งแบบเคเบิลและแบบขึงในอากาศ จึงต่ำกว่ามาก [3]. ดังนั้น GITL สามารถติดตั้งในบริเวณที่ต้องการลดผลกระทบที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เช่น โรงพยาบาล ที่อยู่อาศัย และบริเวณสังเกตการณ์การบิน เป็นต้น.

ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซไฟฟ้าลบ (Electronegative gas) ซึ่งมีความคงทนได้อิเล็กทริกสูงในสภาวะที่สมบูรณ์ แต่ความสามารถการฉนวนของก๊าซลดลงได้อย่างมาก ในสภาวะที่มีการปนเปื้อนของอนุภาค โดยเฉพาะอนุภาคตัวนำไฟฟ้า. การปนเปื้อนของอนุภาคอาจเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการผลิต การขนส่ง การประกอบ และการซ่อมบำรุง. นอกจากนี้ อนุภาคตัวนำอาจเกิดขึ้นจากการทำงานของส่วนที่เคลื่อนที่ภายในสวิตช์เกียร์ เช่น หน้าสัมผัสต่าง ๆ. อนุภาคตัวนำสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่ออยู่

ภายใต้สนามไฟฟ้า. สำหรับสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซที่พบปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของอนุภาค อนุภาคเป็นต้นเหตุให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเฉพาะที่ ก่อให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) และ อาจทำให้เกิดการเบรกดาว์นภายในระบบฉนวนก๊าซ [4]. นอกจากนี้ ยังพบการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกิดจากอนุภาคภายในระบบสายส่งฉนวนก๊าซ SF₆ อีกด้วย [5].

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าเป็นหนทางหนึ่งเพื่อให้เข้าใจถึง ปัญหาและการสร้างระบบควบคุมอนุภาคให้มีประสิทธิภาพ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาค แตกต่างกันไปตามลักษณะรูปร่างของอนุภาค. งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาอนุภาค ทรงกระบอกหรืออนุภาคทรงกลม. อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่เกิดขึ้นจริงในระบบฉนวนอาจไม่มีลักษณะ เป็นทรงกลมสมบูรณ์ และการพิจารณาอนุภาคเป็นทรงกระบอกไม่ได้รวมผลของปลายอนุภาคที่อาจ ละเลยไม่ได้. งานวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง (Prolate spheroidal particle) ภายใต้สนามไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวแทนในกรณีที่อนุภาคมีรูปร่างเบี่ยงเบนไปจาก ทรงกลม. หากเข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังกล่าว จะทำให้การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างปิดและการควบคุมอนุภาคนี้เป็นไปได้ดียิ่งขึ้น.

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยสำคัญเกี่ยวกับอนุภาคในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่เกี่ยวข้องกับการวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

K. Sakai และคณะ ได้สังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และการเบรกดาว์นที่เกิดจากอนุภาค [6]. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นอนุภาคสแตนเลสโดยมีรัศมี 1 mm. สนามไฟฟ้าถูกสร้างจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นที่ไม่ หนาแน่น. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อนุภาค เคลื่อนที่มายังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง เนื่องจากผลของแรงคูลอมบ์และแรงแรงแม่เหล็กไฟฟ้า. นอกจากนี้ อนุภาคเหล่านี้ยังทำให้แรงดันเบรกดาว์นมีค่าต่ำลง เนื่องจากไม่เกิดดิสชาร์จที่เกิดขึ้น ระหว่างอนุภาคและอิเล็กโทรด.

K. Sakai และคณะ ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกระบอกภายใต้สนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอ [7]. อนุภาคที่ใช้ทดลองเป็นอนุภาคอะลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm และยาว 3 mm. แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกและขั้วลบถูกป้อนให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นที่ไม่หนาแน่น เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ. งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อปลายอนุภาคเกิดโคโรนา ดิสชาร์จ อนุภาคมีแนวโน้มตั้งตัวบนอิเล็กโทรดขั้วลบ. สำหรับกรณีที่อนุภาคตั้งบนอิเล็กโทรด อนุภาค สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง ด้วยแรงแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถกระตุ้นให้เกิด เบรกดาว์นได้ในที่สุด.

V.Q. Huynh และคณะ ได้ศึกษากลศาสตร์ไฟฟ้าทางทฤษฎีเมื่ออนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [8]. ผลการศึกษาทำให้สามารถทำนายสนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ โดยพิจารณาเงื่อนไขของมุมระหว่างแกนเอกของอนุภาคกับระนาบอเล็กโตรดกราวนด์ด้วย. นอกจากนี้ งานวิจัยนี้วิเคราะห์รูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคว่า ที่มุมสัมผัสใด ๆ การยกตัวต้องใช้สนามไฟฟ้า (สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคยกตัวจากอเล็กโตรดกราวนด์) มากกว่าการเริ่มหมุน (สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคกับอเล็กโตรดกราวนด์). รายละเอียดของงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงอีกครั้งในในหัวข้อ 2.3.

เมื่ออนุภาคตัวนำถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่มีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอเล็กโตรด. ดังนั้นจึงมีการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ (Impulse voltage) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [9].

M.M. Morcos และคณะ ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 mm และยาว 6.4 mm ในระบบอเล็กโตรดแบบซ้อนแกนร่วม [10]. แรงดันที่ป้อนให้กับระบบอเล็กโตรดเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ. กลุ่มวิจัยนี้ได้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคไว้ว่า ประจุของอนุภาคตอบสนองกับขนาดและขั้วของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงในขณะนั้น. หากแรงดันมีค่าต่ำจนไม่สามารถยกอนุภาคให้ลอยขึ้นได้ ประจุของอนุภาคก็จะลดลงตามรูปคลื่นแรงดัน. แต่ถ้าหากแรงดันที่ป้อนให้มีความสูงและมีขั้วตรงข้ามกับที่ป้อนไปในครั้งก่อน อนุภาคอาจจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าและสามารถยกตัวขึ้นได้.

A. Diessner และ J.G. Trump ได้ทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจำนวนมากในระบบอเล็กโตรดแบบซ้อนแกนร่วม [11]. แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกป้อนให้กับระบบอเล็กโตรด. อนุภาคที่นำมาทดลองเป็นผงโลหะ เช่น คาร์บอน ตะกั่ว อะลูมิเนียม เป็นต้น โดยอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดมีขนาด 0.7 mm. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อนุภาคเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างอเล็กโตรดหลายครั้ง และมีบางครั้งที่อนุภาคลอยอยู่กลางอากาศ ณ บริเวณอเล็กโตรดขั้วลบ. ลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวถูกเรียกว่า ไฟเออร์ฟลายส์ (Fireflies). นอกจากนี้ อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างอเล็กโตรดได้หลายครั้งตามระยะเวลาที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า และความเร็วของอนุภาคก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากอนุภาคเคลื่อนที่ไปชนกับอเล็กโตรดด้านตรงข้าม.

M.M. Morcos และคณะ ได้จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมอะลูมิเนียมภายใต้สนามไฟฟ้าที่สร้างจากแรงดันอิมพัลส์ [9]. ระบบอเล็กโตรดที่ใช้เป็นระบบอเล็กโตรดแบบซ้อนแกนร่วมที่มีการเคลื่อนที่ของอเล็กโตรด. ผลจำลองแสดงให้เห็นว่า อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่าง

อิเล็กทรอนิกส์ได้. หากระดับของแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงพอ เบรกควานมีโอกาที่จะเกิดขึ้นได้. นอกจากนี้แรงดันหน้าคลื่นและแรงดันหลังคลื่นมีอิทธิพลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ โดยแรงดันหน้าคลื่นมีผลน้อยกว่าแรงดันหางคลื่น. หากแรงดันหางคลื่นเพิ่มขึ้นจาก 3,000 ถึง 15,000 μs แรงดันที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์มีโอกาสที่จะลดลงถึง 70%.

ระบบฉนวนก๊าซทั้งสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซและสายส่งแบบฉนวนก๊าซต้องทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีอนุภาคที่ปนเปื้อนอยู่ในระบบ. การควบคุมอนุภาคปนเปื้อนในระบบฉนวนก๊าซจึงเป็นสิ่งสำคัญ. การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการสร้างกับดักอนุภาคและการเคลือบฉนวนบนผิวของอิเล็กทรอนิกส์.

S.J. Dale และ M.D. Hopkins ได้ศึกษาการดักจับกลุ่มของอนุภาคที่อยู่ในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบซ้อนกันร่วม [5]. อนุภาคที่ใช้ศึกษาเป็นอนุภาคอะลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 mm และมีความยาวตั้งแต่ 0.5 mm ถึง 6.4 mm. แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV rms ถูกป้อนให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์. กับดักอนุภาคมีลักษณะเป็นช่องขนาด 5 mm จำนวน 15 ช่อง. กับดักอนุภาคถูกติดตั้งบริเวณแกนกลางของระบบอิเล็กทรอนิกส์และเว้นระยะห่างไว้ 10 mm. ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า กับดักอนุภาคสามารถดักอนุภาคไว้ได้ทั้งหมด. นอกจากนี้ ระดับของแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ดักจับอนุภาค. หากป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้ายกตัวของอนุภาคประมาณ 50% อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลและเร็วขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาในกับดักและลดเวลาในการจับอนุภาค.

M.M. Morcos และคณะ ได้วิเคราะห์ผลของการเคลือบฉนวนบนผิวของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกระบอก [10]. ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเคลือบฉนวนสามารถลดประจุที่สะสมบนอนุภาค ส่งผลให้สนามไฟฟ้ายกตัวมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย. กลุ่มวิจัยดังกล่าวเสนอว่า ควรเคลือบฉนวนหนา 200 μm โดยค่าความหนานี้ได้จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ายกตัวกับความหนาของการเคลือบฉนวน. นอกจากนี้ สำหรับระบบสายส่งแบบฉนวนก๊าซบริเวณที่ต้องเคลือบฉนวน คือ บริเวณขายึดตัวนำไฟฟ้าแรงสูงกับตัวนำด้านนอกและบริเวณกับดักอนุภาค เพื่อป้องกันการดิสชาร์จตามผิวและป้องกันไม่ให้อนุภาคเล็ดลอดออกมาจากบริเวณกับดักอนุภาค ตามลำดับ.

1.3 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาค
- 2) ศึกษาอิทธิพลของชนิดและสภาพผิวของแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาค

3) สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมหายใต้สนามไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) พิจารณาอนุภาคทรงกลมหายแบบแบนข้างเป็นหลัก โดยมีอนุภาคทรงกระบอกเป็นส่วนเสริม

2) แรงดันของระบบที่พิจารณาเป็นแรงดันกระแสตรง หรือแรงดันกระแสสลับความถี่กำลัง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) ศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูง และเทคนิคการผลิตชิ้นงาน

3) ทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยแปรค่า

3.1) ความดันอากาศ

3.2) ขั้วของแรงดันไฟฟ้า

4) ทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

4.1) สังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

4.2) หาวิธีควบคุมอนุภาคด้วยสนามไฟฟ้า

5) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เข้าใจการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมหายแบนข้างภายใต้สนามไฟฟ้า

2) เข้าใจอิทธิพลของฉนวนที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมหายแบนข้างภายใต้สนามไฟฟ้า

3) เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาและการควบคุมอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพได้

บทที่ 2

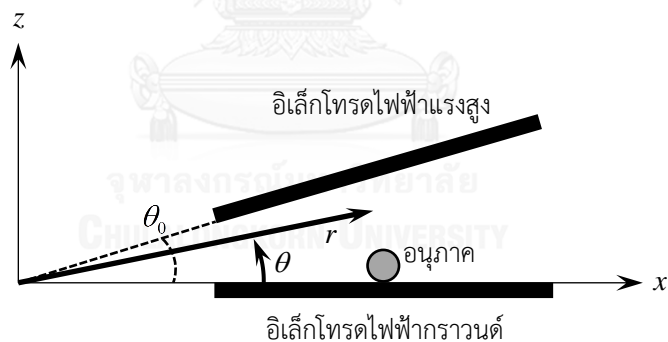
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบอิเล็กโทรด

ระบบอิเล็กโทรดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 แบบ คือ (1) ระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบขนาน และ (2) ระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียง. สำหรับระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียง พิกัดคาร์ทีเซียนและพิกัดเชิงขั้วถูกใช้ในการหาสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด. พิจารณารูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงพิกัดเชิงขั้วที่จะใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้า [7]. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอถูกสร้างจากการป้อนแรงดัน V_0 ให้กับระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียง. การหาสนามไฟฟ้าอาศัยระบบพิกัดเชิงขั้ว (r, θ) โดยที่ r คือ ระยะจากจุดกำเนิดจนถึงจุดที่สนใจ และ θ เป็นมุมระหว่าง r กับ x . สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งอนุภาค เท่ากับ

$$\vec{E}_0 = \frac{V_0}{r\theta_0} \hat{a}_\theta \quad (2.1)$$

โดยที่ θ_0 คือ มุมระหว่างอิเล็กโทรด และ \hat{a}_θ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศ θ .



รูปที่ 2.1 พิกัดคาร์ทีเซียนและพิกัดเชิงขั้วของระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียง [7]

2.2 สนามไฟฟ้ายกตัว

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับอนุภาคตัวนำที่อยู่บนอิเล็กโทรดกราวด์ของระบบอิเล็กโทรดแบบคู่ขนานหรือแบบระนาบเอียง อนุภาคสามารถยกตัวจากอิเล็กโทรดกราวด์ได้ เมื่อแรงคูลอมบ์ F_E ที่กระทำกับอนุภาคมีขนาดมากกว่าแรงโน้มถ่วง F_g . แรงคูลอมบ์จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอกและรูปทรงของอนุภาค. สำหรับอนุภาคทรงกลมที่มีรัศมี R ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก \vec{E}_0 สนามไฟฟ้ายกตัว $E_{L,SPH}$ หาได้จาก [12]

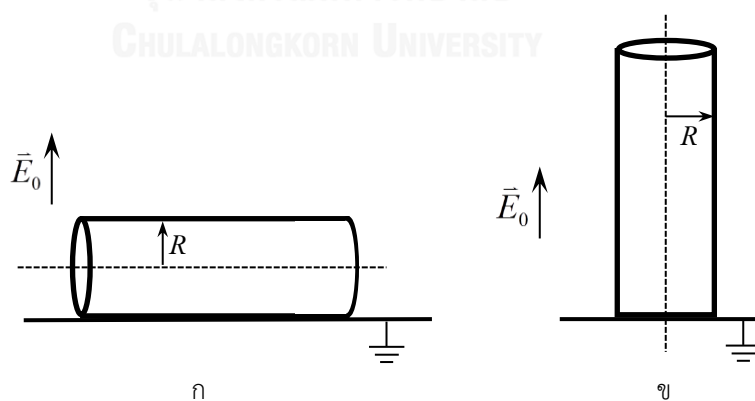
$$E_{L,SPH} = \sqrt{\frac{g\rho R}{4.107\varepsilon_0}} \approx 5.19 \times 10^5 \sqrt{\rho R} \quad (2.2)$$

โดยที่ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ρ คือ ความหนาแน่นของอนุภาค และ ε_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศซึ่งมีค่า 8.854×10^{-12} F/m. สนามไฟฟ้ายกตัวขึ้นอยู่กักรากที่ 2 ของความหนาแน่นและขนาดของอนุภาค. สำหรับอนุภาคทรงกระบอกที่มีรัศมี R และยาว L เราพิจารณาสนามไฟฟ้ายกตัวออกเป็น 2 กรณี คือ อนุภาควางตัวในแนวตั้งและวางตัวในแนวนอนกับอิเล็กโทรดกราวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2ก และ 2.2ข ตามลำดับ. สมการของสนามไฟฟ้ายกตัวของอนุภาคทรงกระบอกคือ [12]

$$E_{L,CYL} = \sqrt{\frac{g\rho R}{1.43\varepsilon_0}} \approx 8.8 \times 10^5 \sqrt{\rho R} \quad \text{เมื่ออนุภาควางตัวในแนวนอน} \quad (2.3ก)$$

$$E_{L,CYL} = \left[\ln\left(\frac{2L}{R}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{g\rho R^2}{\varepsilon_0 \left[\ln\left(\frac{2L}{R}\right) - 0.5 \right]}} \quad \text{เมื่ออนุภาควางตัวในแนวตั้ง} \quad (2.3ข)$$

สนามไฟฟ้ายกตัวของอนุภาคที่วางตัวในแนวนอนขึ้นอยู่กักรากที่ 2 ของความหนาแน่นและขนาดของอนุภาค ซึ่งแตกต่างจากสนามไฟฟ้ายกตัวของการจัดวางในแนวตั้งอย่างชัดเจน. สำหรับอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง แรงคูลอมบ์ขึ้นอยู่กัขนาดของรัศมีในแนวแกนเอกและแกนโทของอนุภาคและการวางตัวบนระนาบกราวนด์. เราสามารถหาแรงคูลอมบ์ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ โดยจะอธิบายในหัวข้อ 2.3 ต่อไป.



รูปที่ 2.2 อนุภาคทรงกระบอกวางตัว (ก) ในแนวนอนและ (ข) ในแนวตั้งบนระนาบกราวนด์

2.3 แรงบนอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า

รูปแบบการจัดวางทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเป็นไปตามรูปที่ 2.3 โดยทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด o สัมผัสกับระนาบกราวด์ที่จุด p เป็นมุมเอียง α กับระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า \vec{E}_0 และตัวกลางโดยรอบมีสภาพยอม ϵ_E . ทรงคล้ายทรงกลมนี้มีรัศมีในแนวแกนเอกและแกนโทขนาด c และ b ตามลำดับ. พื้นที่ผิว S และปริมาตร V ของทรงคล้ายทรงกลมดังกล่าวมีค่าดังสมการ [12]

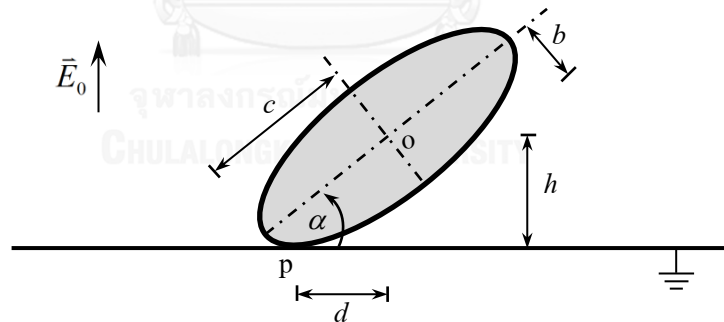
$$S = 2\pi b^2 \left[1 + \frac{c \arccos(b/c)}{b \sqrt{1-(b/c)^2}} \right] \quad (2.4)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi c b^2 \quad (2.5)$$

ระยะระหว่างจุดสัมผัสกับจุดศูนย์กลางทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างในแนวนอน d และแนวตั้ง h สามารถหาได้จาก [12]

$$d = \frac{(c^2 - b^2) \sin \alpha}{\sqrt{b^2 + c^2 \tan^2 \alpha}} \quad (2.6)$$

$$h = \sqrt{b^2 + c^2 \tan^2 \alpha} \cos \alpha \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่

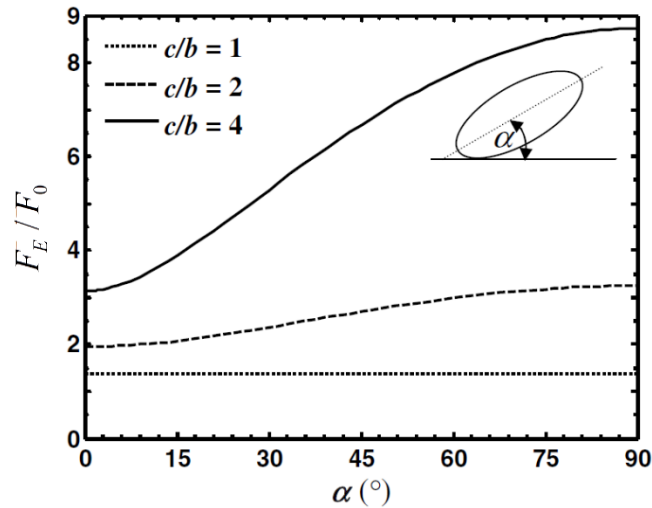
แรงकुलอมบ์ \vec{F}_E ที่ทำกับตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างสามารถหาได้จาก [12]

$$\vec{F}_E = \frac{\epsilon_E}{2} \iint_S E^2 \vec{a}_n dS \quad (2.8)$$

โดยที่ \vec{a}_n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยทิศพุ่งออกจากผิวในแนวตั้งฉาก. แรงकुลอมบ์ที่กระทำบนอนุภาคทำให้เกิดแรงบิดรอบจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคกับระนาบกราวด์. รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์

แรงคูลอมบ์ที่กระทำบนอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมกับมุม α โดยที่ c/b แตกต่างกันไป (b เท่ากัน). แรงคูลอมบ์ทำให้เป็นบรรทัดฐานด้วยแรง $F_0 = \epsilon_E S E_0^2$. กราฟนี้แสดงให้เห็นว่า

- 1) แรงคูลอมบ์เพิ่มขึ้นตาม α โดยมีค่าน้อยที่สุดที่ $\alpha = 0^\circ$ และมีค่ามากที่สุดที่ $\alpha = 90^\circ$
- 2) ที่มุม α ใด ๆ แรงคูลอมบ์เพิ่มขึ้นเมื่อ c/b เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 แรงคูลอมบ์ที่กระทำบนทรงคล้ายทรงกลมกับมุม α ที่ c/b ต่าง ๆ [12]

แรงบิดไฟฟ้าสถิต T_E รอบจุดสัมผัส p ของทรงกลมคล้ายทรงกลมในทิศ $+\alpha$ สามารถหาได้จากสมการ [12]

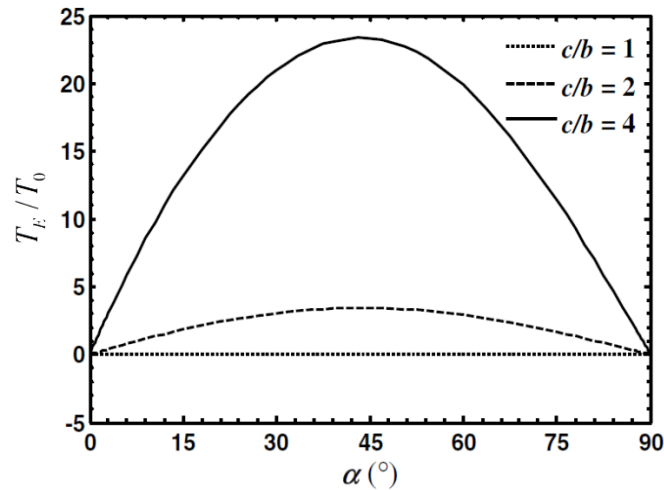
$$T_E = \iint_S (-vf_x + uf_z) dS \quad (2.9)$$

โดยที่ f_x และ f_z คือ ความเค้นของแมกเวลล์ในแนวแกน x และแกน z ตามลำดับ. u และ v คือ ระยะตามแกน x และ z ตามลำดับ จากจุดสัมผัสจนถึงผิวของทรงคล้ายทรงกลมที่ f_x และ f_z กระทำ. ผลการคำนวณแรงบิดแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่า แรงบิดไฟฟ้าสถิตเป็นศูนย์ที่ $\alpha = 0^\circ$ และ 90° มีค่าเป็นบวกที่ $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ และมีขนาดสูงสุดที่ $\alpha = 45^\circ$. นอกจากนี้ ที่ค่า α ค่าหนึ่ง แรงบิดไฟฟ้าสถิตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ c/b เพิ่มขึ้น. เมื่อพิจารณาผลของแรงโน้มถ่วง จะมีแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง T_g รอบจุดสัมผัสเกิดขึ้นกับอนุภาคด้วย โดยมีทิศตรงข้ามกับแรงบิดไฟฟ้าสถิต T_E และมีค่าดังสมการ [12]

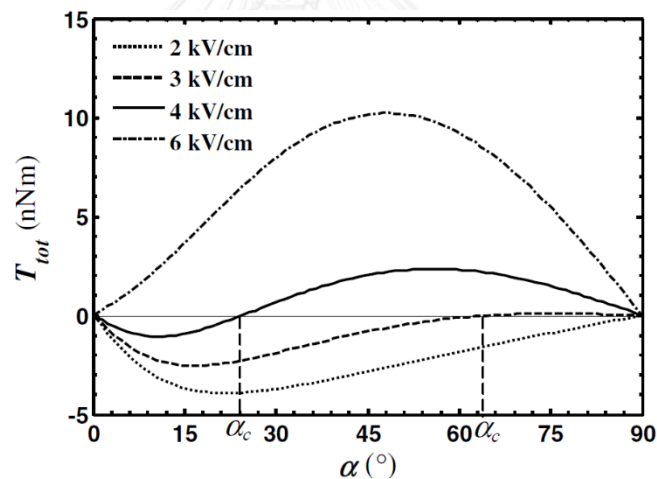
$$T_g = -F_g d \quad (2.10)$$

ดังนั้น แรงบิดรวม T_{tot} มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงบิดไฟฟ้าสถิต T_E กับแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง T_g โดยผลการคำนวณมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6. กราฟนี้แสดงให้เห็นว่า มุม α และสนามไฟฟ้า E_0

มีผลต่อแรงบิดรวมที่กระทำกับอนุภาค. สำหรับกรณีที่มี $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ แรงบิดรวมเป็นบวก ที่ $E_0 = 6 \text{ kV/cm}$.



รูปที่ 2.5 แรงบิดไฟฟ้าสถิตที่กระทำกับทรงคล้ายทรงกลมกับมุม α ที่ c/b ต่าง ๆ [12]

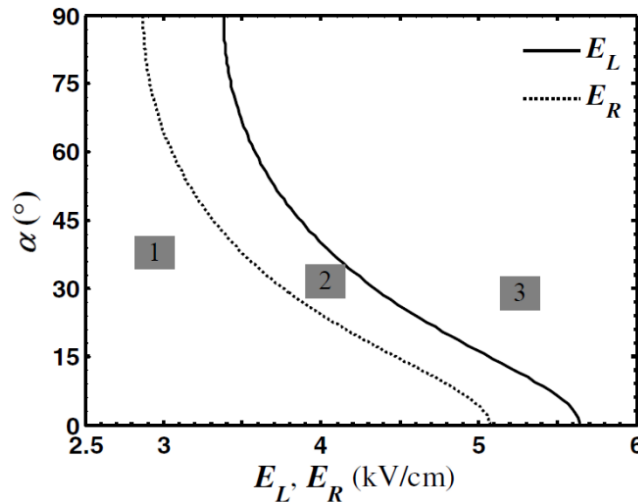


รูปที่ 2.6 แรงบิดรวมที่กระทำกับอนุภาคทรงคล้ายทรงกลม $b = 0.25 \text{ mm}$ และ $c = 1 \text{ mm}$ [12]

2.4 กลศาสตร์ไฟฟ้าของทรงคล้ายทรงกลม

V.Q Huynh และคณะ ได้วิเคราะห์กลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคอะลูมิเนียมเยื้องขนาด $b = 0.25 \text{ mm}$ และ $c = 1 \text{ mm}$ ภายใต้สนามไฟฟ้า [12]. ผลการวิเคราะห์แสดงลักษณะสำคัญดังกล่าวในรูปที่ 2.7. กราฟนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าเริ่มหมุน E_R และสนามไฟฟ้ายกตัว E_L กับมุม α ในการแบ่ง. สำหรับกรณีที่อนุภาควางตัวในแนวอนบนระนาบกราวนด์ ($\alpha = 0^\circ$) หากอนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า 5.1 kV/cm อนุภาคสามารถหมุนรอบจุดสัมผัสได้. หลังจากนั้น อนุภาคมีโอกาที่จะยกตัวออกจากอิเล็กทรอนิกส์ทรดกราวนด์ได้เมื่อ $\alpha = 15^\circ$.

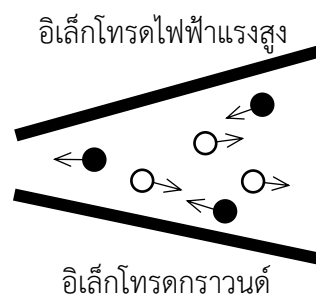
นอกจากนี้ หากอนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า 5.7 kV/cm อนุภาคสามารถยกตัวออกจากอิเล็กโทรดได้เลยโดยไม่ได้หมุนรอบจุดสัมผัสมาก่อน.



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ที่มุม α ใด ๆ [12]

2.5 การควบคุมอนุภาคด้วยแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส

ไดอิเล็กโตรโฟรีซิสเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ [13]. แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส F_{DEP} (หรือแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า) ที่กระทำบนอนุภาคขึ้นอยู่กับสภาพยอมของอนุภาคและตัวกลาง โดยสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ F_{DEP} แบบบวกและ F_{DEP} แบบลบ. F_{DEP} แบบบวกเกิดขึ้นเมื่อสภาพยอม ϵ_p ของอนุภาคมากกว่าสภาพยอม ϵ_m ของตัวกลาง. F_{DEP} แบบบวกดึงดูดอนุภาคไปยังบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงและถูกผลักออกจากบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ. ในทางกลับกัน หาก $\epsilon_p < \epsilon_m$ จะเกิด F_{DEP} แบบลบและส่งผลให้เกิดผลตรงกันข้ามกับ F_{DEP} แบบบวก. รูปที่ 2.8 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมที่แสดงผลของ F_{DEP} แบบบวก (●) และแบบลบ (○) เมื่อทิศทางของแรงตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า.



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ [13]

พิจารณาตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างที่มีสภาพนำ σ_p โดยอยู่ในตัวกลางที่มีสภาพนำ σ_m และอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก \vec{E}_0 ดังรูปที่ 2.9. สนามไฟฟ้าภายนอก \vec{E}_0 สามารถแยกองค์ประกอบได้เป็น

$$\vec{E}_0 = E_{0,x}\hat{a}_x + E_{0,y}\hat{a}_y + E_{0,z}\hat{a}_z \quad (2.11)$$

ไดโพลสมมูลของตัวนำดังกล่าวเท่ากับ

$$(\vec{p}_{eff})_a = 4\pi\epsilon_m cb^2 K_a E_{0,a} \quad (2.12)$$

เมื่อ a คือ x , y หรือ z . ตัวประกอบคลอเซียสมอสสอดติของตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างมีค่าเป็น

$$K_a = \frac{\sigma_p - \sigma_m}{3[\sigma_m + (\sigma_p - \sigma_m)L_a]} \quad (2.13)$$

หากพิจารณาตัวนำสมบูรณ์ $\sigma_p/\sigma_m \rightarrow \infty$ แล้ว

$$K_a = \frac{1}{3L_a} \quad (2.14)$$

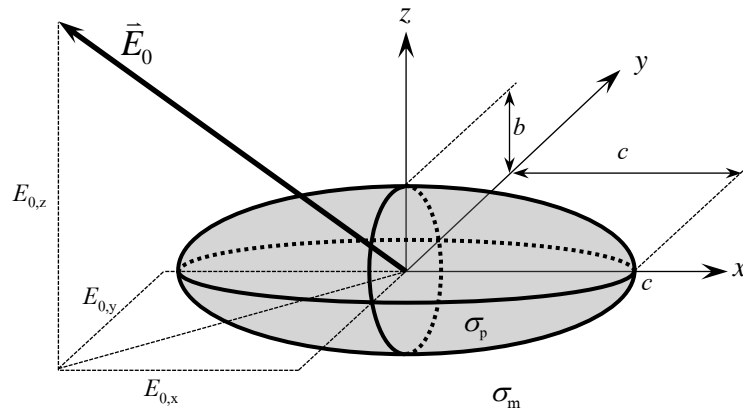
L_a คือ เซตของตัวประกอบเชิงปริพันธ์ที่เกิดจากการดีโพลไรซ์ (Depolarization). L_a จึงขึ้นอยู่กับขนาดและการจัดวางของตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง โดยที่

$$L_c = \frac{cb^2}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+c^2)\sqrt{(s+c^2)(s+b^2)^2}} \quad (2.15ก)$$

$$L_b = \frac{cb^2}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+b^2)\sqrt{(s+c^2)(s+b^2)^2}} \quad (2.15ข)$$

ดังนั้น

$$\vec{p}_{eff} = \frac{4}{3}\pi\epsilon_m cb^2 \left(\frac{E_{0,x}}{L_x}\hat{a}_x + \frac{E_{0,y}}{L_y}\hat{a}_y + \frac{E_{0,z}}{L_z}\hat{a}_z \right) \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.9 ตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างในศูนย์กลางที่มีสภาพนำ σ_m และอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวประกอบเชิงปริพันธ์ของอนุภาคแต่ละขนาด. ตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อให้ $R = c = b$ และ $L_a = 1/3$ แล้ว ไดโพลสมมูลของตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างจะมีค่าเท่ากับไดโพลสมมูลของตัวนำทรงกลมซึ่งมีค่าเท่ากับ $p_{eff} = 4\pi\epsilon_m R^3 E_0$ (ภาคผนวก ก).

พิจารณาตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างถูกวางในระบบขั้วเล็กโทรดแบบระนาบไม่สมมาตรดังรูปที่ 2.1. เนื่องจากมุม θ ระหว่างระนาบกราวด์กับจุดกึ่งกลางของอนุภาคมีค่าน้อยมาก หรือ $\cos\theta \cong 1$ ดังนั้นเราสามารถประมาณได้ว่า $x \cong r$. สนามไฟฟ้าภายนอกจึงมีค่าเป็น

$$E_{0,z} \cong E_{0,\theta} = \frac{V_0}{r\theta_0} \quad (2.17)$$

$E_{0,y} = 0$ เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางดังกล่าว. จาก (2.16) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\vec{p}_{eff} = \frac{4}{3} \frac{\pi\epsilon_m cb^2}{L_z} (E_{0,\theta}) \hat{a}_\theta = \frac{4}{3} \frac{\pi\epsilon_m cb^2}{L_z} \vec{E}_0 \quad (2.18)$$

จาก (2.18) เราสามารถหาแรงไดโพลเล็กโทรโฟรีซิส \vec{F}_{DEP} โดยมีค่าเท่ากับ

$$\vec{F}_{DEP} = (\vec{p}_{eff} \cdot \nabla) \vec{E}_0 = \frac{2}{3} \frac{\pi\epsilon_m cb^2}{L_z} \nabla E_0^2 = -\frac{4}{3} \frac{\pi\epsilon_m cb^2}{L_z} \frac{E_0^2}{r} \hat{r} \quad (2.19)$$

ตารางที่ 2.1 ตัวประกอบเชิงปริพันธ์ของอนุภาคตัวนำ

c (mm)	b (mm)	L_x	L_y	L_z
2	0.5	0.0754	0.4623	0.4623
2	1	0.1736	0.4132	0.4132
2	2	0.3333	0.3333	0.3333



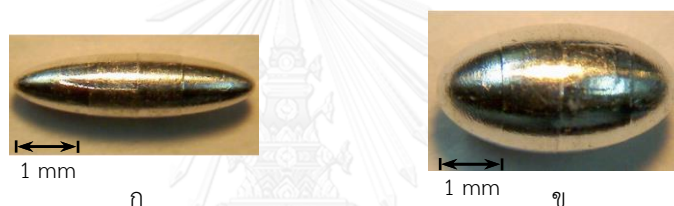
บทที่ 3

การเตรียมการทดลอง

3.1 อนุภาค

3.1.1 อนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง

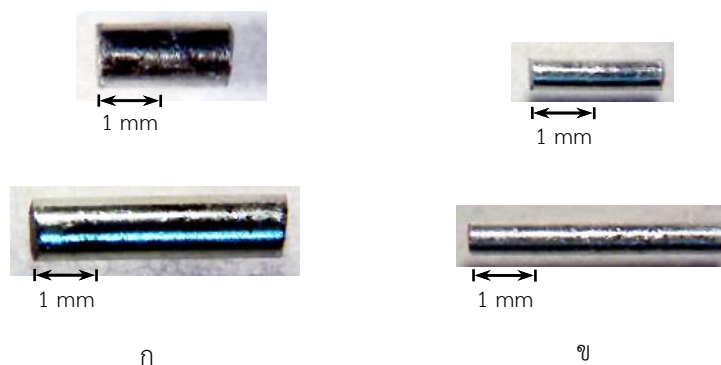
อนุภาคตัวนำที่ใช้ในการทดลองทำมาจากอะลูมิเนียม. ความหนาแน่น 2700 kg/m^3 . ตัวอย่างอนุภาคมี 2 ขนาด คือ อนุภาคตัวนำขนาดเล็ก (Small spheroid, SS) และขนาดใหญ่ (Large spheroid, LS) โดยแต่ละขนาดมี 3 ตัวอย่าง. รัศมีในแนวแกนเอกของอนุภาคทั้งสองขนาดยาว 2 mm เท่ากัน. รัศมีในแนวแกนโทของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่นำยาว 0.5 และ 1 mm ตามลำดับ. รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง.



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง (ก) ขนาดเล็กและ (ข) ขนาดใหญ่

3.1.2 อนุภาคตัวนำทรงกระบอก

อนุภาคตัวนำทรงกระบอกตัดจากลวดอะลูมิเนียม (Nilaco). อนุภาคมี 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 0.5 และ 1 mm โดยมีความยาว คือ 2 และ 4 mm. อนุภาคแต่ละขนาดมี 3 ตัวอย่าง. รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างอนุภาคตัวนำทรงกระบอก.

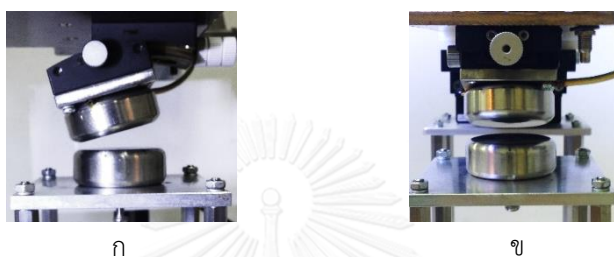


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างอนุภาคตัวนำทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) 0.5 mm และ (ข) 1 mm

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ

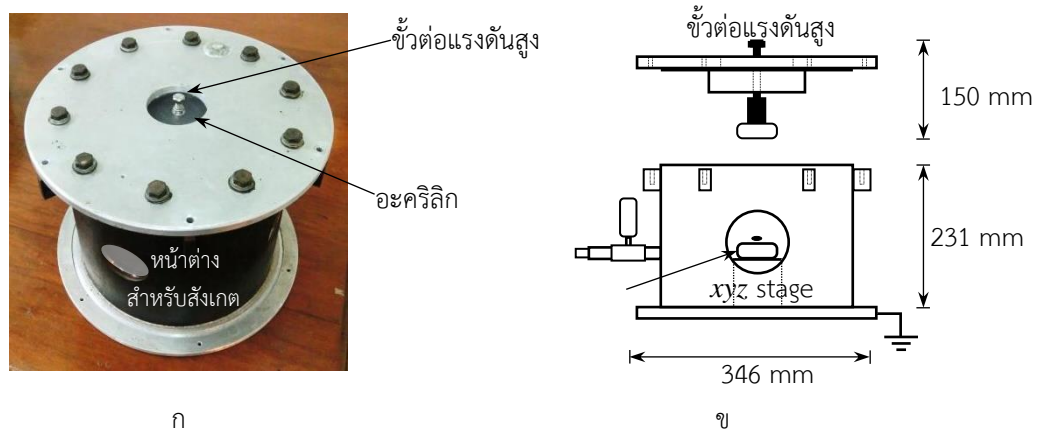
ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบประกอบด้วยจานอิเล็กทรอนิกส์ 2 ชั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm และหนา 15 mm. อิเล็กทรอนิกส์ด้านบนสามารถติดเข้ากับฐานรองที่มุมเอียงได้ (GFG40-60, Misumi). ระยะแกบระหว่างอิเล็กทรอนิกส์สามารถปรับได้โดยมีความละเอียด 0.01 mm. รูปที่ 3.3 แสดงระบบอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ด้านบนทำมุม 15° กับอิเล็กทรอนิกส์ด้านล่าง.



รูปที่ 3.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อ (ก) มองจากด้านหน้า และ (ข) มองจากด้านข้าง

3.2.2 ภาชนะอัดอากาศ

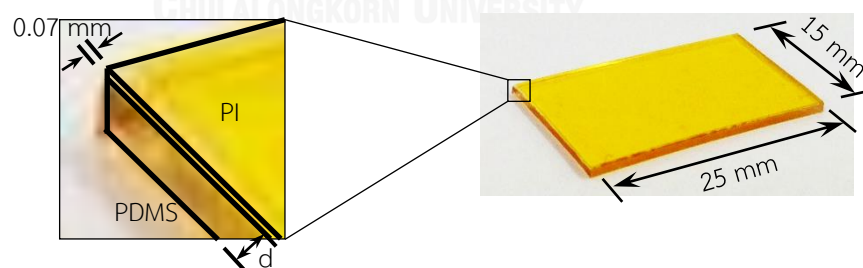
ภาชนะอัดอากาศใช้สำหรับทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้เงื่อนไขความดันอากาศ. ลักษณะภายนอกและแผนภาพการติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ภายในภาชนะอัดอากาศแสดงไว้ในรูปที่ 3.4. อิเล็กทรอนิกส์ด้านล่างติดเข้ากับฐานรองที่สามารถปรับระยะ xyz ได้ (XYZLNG60, Misumi). ภาชนะนี้มีขั้วด้านบนเชื่อมติดกับอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูง ในขณะที่ ส่วนที่เหลือของฝาปิดด้านบนผนังด้านข้าง และด้านล่างต่อลงกราวนด์. ยางซิลิโคนและอะคริลิกถูกใช้เป็นฉนวนและเป็นตัวป้องกันการรั่วซึมของอากาศ. ภาชนะอัดอากาศมีหน้าต่างอยู่สองด้าน เพื่อการสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค. ภาชนะอัดอากาศสามารถอัดอากาศได้สูงสุด 3 bar และสามารถรักษาความดันดังกล่าวได้ไม่ต่ำกว่า 10 นาที.



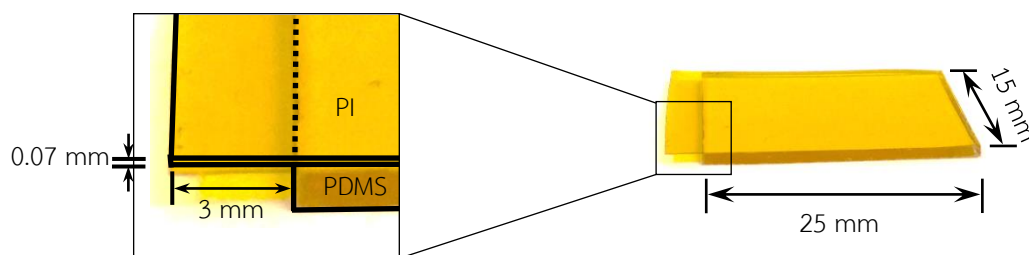
รูปที่ 3.4 ภาพขณะอัดอากาศ (ก) ภาพภายนอก และ (ข) แผนภาพการติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์

3.2.3 ฉนวนกันระหว่างอนุภาคกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์

ฉนวนกันระหว่างอนุภาคกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ถูกใช้ในการทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอโดยมี 2 แบบ. แบบที่ 1 ใช้เป็นฉนวนกันที่ประกอบด้วยฟิล์มพอลิไอมิด (Polyimide, PI) ที่มีความหนา 67 μm บน Polydimethylsiloxane (PDMS) โดยขอบของฉนวนทั้งสองชนิดเสมอกัน ดังรูปที่ 3.5. ภาคผนวก ข อธิบายการเตรียมชิ้นงาน PDMS (KE-106, Shin-Etsu). การทดลองการดักจับอนุภาคที่เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าใช้ฉนวนแบบที่ 2 ซึ่งเป็นฟิล์มพอลิไอมิดบน PDMS ที่มีความหนา 1.1 mm. ฟิล์มพอลิไอมิดยื่นออกมาจากปลายของ PDMS 3 mm ดังรูปที่ 3.6.



รูปที่ 3.5 ฉนวนที่ใช้กันระหว่างอนุภาคและอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ที่ขอบของฉนวนทั้งสองเรียบเสมอกัน



รูปที่ 3.6 ฉนวนที่ใช้กันระหว่างอนุภาคและอิเล็กโทรดกราวด์สำหรับการดักจับอนุภาค

3.2.4 กล้องบันทึกวิดีโอ

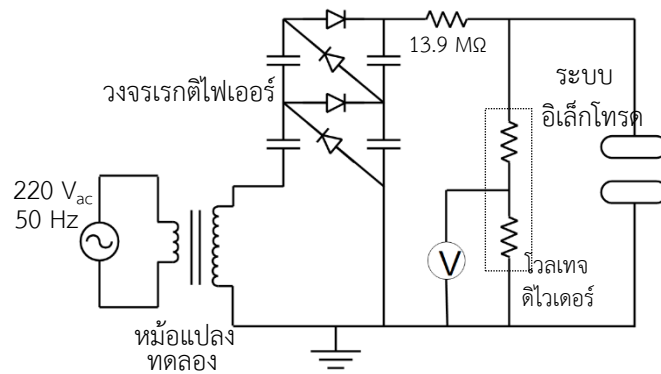
การเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD (EX-ZR200, CASIO) ที่อัตราเฟรม 1000 fps. ขนาดของเฟรมเท่ากับ 224 pixel \times 64 pixel. รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างเฟรมที่บันทึกได้ของการทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยอนุภาคถูกวางตรงกลางอิเล็กโทรดกราวด์และระยะโฟกัสที่ใช้เท่ากับ 47 mm.



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างขนาดเฟรม 224 pixel \times 64 pixel

3.2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

แหล่งกำเนิดแรงดันสูงสร้างจากหม้อแปลงทดลองและวงจรเรียงกระแสตรงแบบ 2 ชั้น ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9. วงจรนี้สร้างแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 200 kV. แรงดันไฟฟ้าถูกวัดผ่านโวลเทจดิไวเดอร์โดยมีอัตราส่วน 1:1180. ตัวต้านทาน 13.9 M Ω ต่ออนุกรมกับระบบอิเล็กโทรดเพื่อลดกระแสไฟฟ้าในกรณีที่เกิดเบรกดาวน. ในกรณีที่ต้องการป้อนแรงดันที่เพิ่มขึ้นโดยฉับพลัน วิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่องสร้างรูปคลื่นแรงดัน (AFG3012, Tektronik) ต่อกับเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า (610E, Trek) ที่สร้างแรงดันสูงสุดได้ 10 kV เทียบกับกราวด์. แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในกรณีนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.10 โดยมีเวลาคงอยู่ 300 ms และหน้าคลื่น 30 ms. อนุภาคที่แกนเอกอยู่ในแนวสนามไฟฟ้าคงที่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแสดงการเคลื่อนที่ไม่ชัดเจน เนื่องจากเวลาคงอยู่ของแรงดันน้อยเกินไป. การทดลองดังกล่าวจึงทดลองเพิ่มเติมด้วยแรงดันที่มีเวลาคงอยู่เป็น 3 s โดยมีเวลาหน้าคลื่น 300 ms เพื่อให้สังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ชัดเจนขึ้น.



รูปที่ 3.8 แผนภูมิวงจรสมมูลที่ใช้สร้างแรงดันสูง

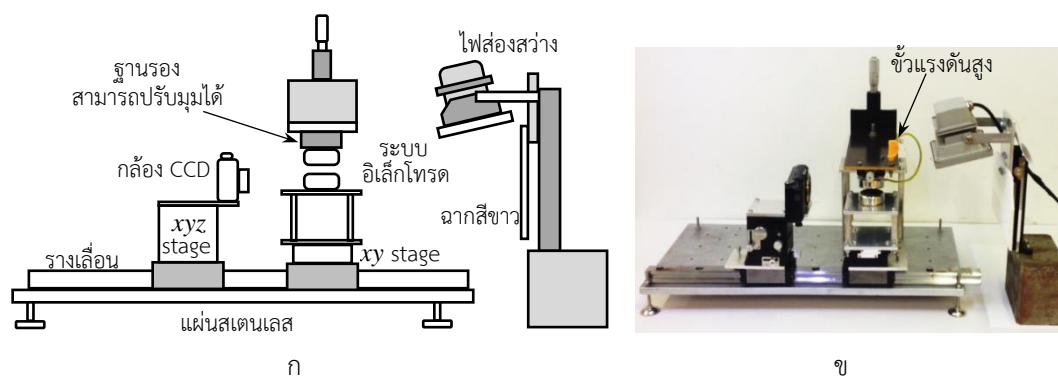


รูปที่ 3.9 ภาพถ่าย (ก) หม้อแปลงทดลองและ (ข) วงจรเรียงกระแสตรง



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (ก) ขั้วบวกและ (ข) ขั้วลบ

รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างการติดตั้งระบบอิเล็กโทรดเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค. อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงติดเข้ากับฐานรองที่สามารถปรับเอียงได้ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสม่ำเสมอ. กล้อง CCD ถูกติดตั้งบนฐานรองที่สามารถปรับในแนวแกน xyz ได้. ฐานรองอิเล็กโทรดกราวนด์และกล้อง CCD ถูกติดตั้งบนรางเลื่อนที่อยู่ในระดับเดียวกัน. สายไฟแรงดันสูงสามารถต่อได้ทางขั้วแรงดันที่เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง. อิเล็กโทรดกราวนด์ ฐานรองอิเล็กโทรดกราวนด์ (อะลูมิเนียม) และแผ่นสแตนเลสด้านล่างถูกต่อลงกราวนด์.



รูปที่ 3.11 การติดตั้งระบบอเล็กโทรด (ก) แผนภาพและ (ข) ภาพถ่าย

3.3 วิธีและเงื่อนไขการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการวางอนุภาคบนอเล็กโทรดกราวนด์. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอเล็กโทรดแรงสูง แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาค. การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD. ก่อนการทดลองแต่ละครั้ง อนุภาคตัวนำถูกทำความสะอาดและขจัดประจุด้วยเอทานอล. สำหรับแต่ละขนาดอนุภาค การทดลองใช้ 3 ตัวอย่างอนุภาค และทำซ้ำ 10 ครั้งต่อตัวอย่างอนุภาค.

3.3.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

เงื่อนไขของการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1. อนุภาคถูกวางบริเวณกลางอเล็กโทรดกราวนด์ที่ขนานกับอเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง. การทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะแกปและความดันอากาศใช้แรงดันไฟฟ้าที่สร้างจากหม้อแปลงทดลองและวงจรเรกติไฟเออร์. การทดลองเพื่อศึกษาผลของการเพิ่มแรงดันใช้แรงดันไฟฟ้าที่สร้างจากเครื่องและขยายแรงดันไฟฟ้า. ระบบอเล็กโทรดในการทดลองผลของระยะแกปและการเพิ่มแรงดันถูกติดตั้งบนฐานรองสแตนเลส. ระบบอเล็กโทรดจะถูกติดตั้งในภาชนะอัดอากาศเฉพาะการทดลองผลของความดันอากาศ (รูปที่ 3.4).

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของการทดลองภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การทดลอง	ระยะแกป	ความดันอากาศ	การป้อนแรงดันไฟฟ้า
ผลของระยะแกปที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค	1) 9 mm 2) 18 mm	ความดันบรรยากาศ	เพิ่มแรงดันทีละขั้น
ผลของความดันอากาศที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค	10 mm	1) 1 bar 2) 2 bar 3) 3 bar	เพิ่มแรงดันทีละขั้น
ผลของการเพิ่มแรงดันที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค	8 mm	ความดันบรรยากาศ	1) เพิ่มแรงดันทีละขั้น 2) เพิ่มแรงดันที่ค่าคงที่

3.3.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

การทดลองแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 อนุภาคสัมผัสกับอิเล็กโทรดกราวด์

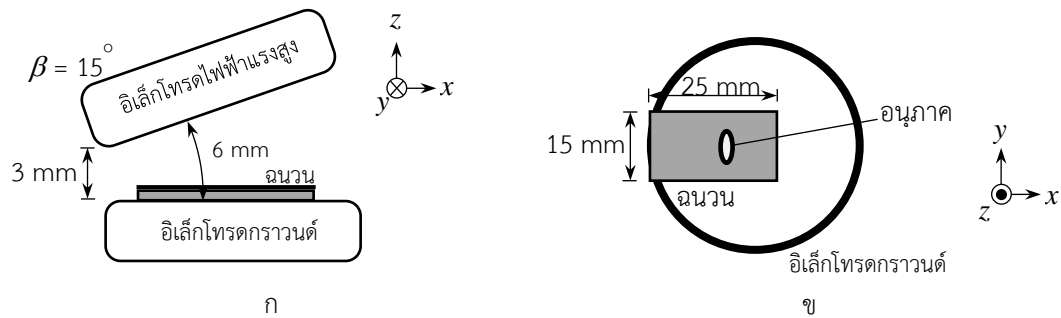
อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงทำมุม 4° , 8° และ 12° กับอิเล็กโทรดกราวด์ โดยระยะแกปที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 6.6, 5.2 และ 3.8 mm ตามลำดับ. ใช้อนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง. ระยะแกปมีขนาด 7.9 mm. รูปที่ 3.12 แสดงการจัดวางอนุภาคในระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียง. อนุภาคถูกจัดวาง 2 แบบ. แบบที่ 1 แกนเอกของอนุภาคอยู่ในแนวเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.12ก. แบบที่ 2 แกนเอกอยู่ในแนวสนามไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 3.12ข. แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้สร้างจากเครื่องสร้างและขยายแรงดันไฟฟ้า. ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันเป็นดังรูปที่ 3.10. การทดลองในกรณีนี้ที่แกนเอกอยู่ในแนวสนามไฟฟ้าคงที่ที่ใช้แรงดันที่มีคาบ 3 s เนื่องจากในการทดลองด้วยแรงดัน 300 ms ไม่สามารถแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ชัดเจน.



รูปที่ 3.12 การจัดวางอนุภาค (ก) แบบที่ 1 และ (ข) แบบที่ 2.

รูปแบบที่ 2 อนุภาคถูกฉนวนจากอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงทำมุม β กับอิเล็กโทรดกราวด์ 15° . การทดลองใช้อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดเล็กและอนุภาคทรงกระบอก. ฉนวนกั้นระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโทรดกราวด์มีลักษณะดังรูปที่ 3.5 โดย PDMS หนา 1.1 mm. ตำแหน่งที่วางอนุภาคมีระยะแกประหว่างอิเล็กโทรด 6.0 mm. ระยะแกประหว่างอิเล็กโทรดต่ำที่สุดเท่ากับ 3 mm. รูปที่ 3.13 แสดงการวางอนุภาคบนฉนวนในระบบอิเล็กโทรด. ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ให้กับระบบอิเล็กโทรด (เนื่องจากอนุภาคไม่เคลื่อนที่เมื่อทดลองด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง). ลักษณะการป้อนแรงดันมี 2 แบบ. ในแบบแรก ขนาดแรงดันค่อย ๆ เพิ่มจาก 1.5 kV ขึ้นละ 0.05 kV. แบบที่สอง ป้อนแรงดันขนาดคงที่เท่ากับ 7.5 kV ($E_0 = 14.4$ kV/cm) สำหรับอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง และ 9 kV ($E_0 = 17.3$ kV/cm) สำหรับอนุภาคทรงกระบอก.



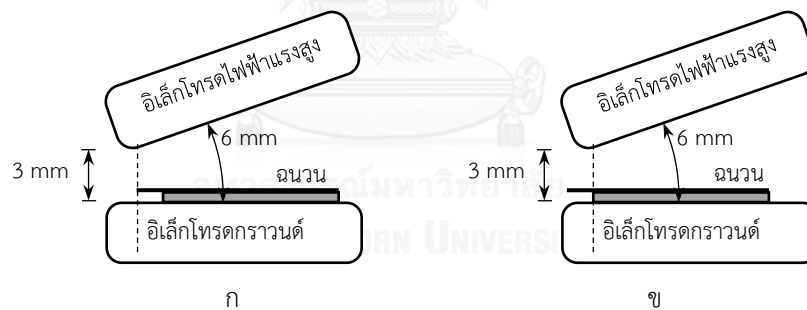
รูปที่ 3.13 การจัดวางอนุภาคบนฉนวน (ก) เมื่อมองจากด้านหน้าและ (ข) เมื่อมองจากบน

3.3.3 การดักจับอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

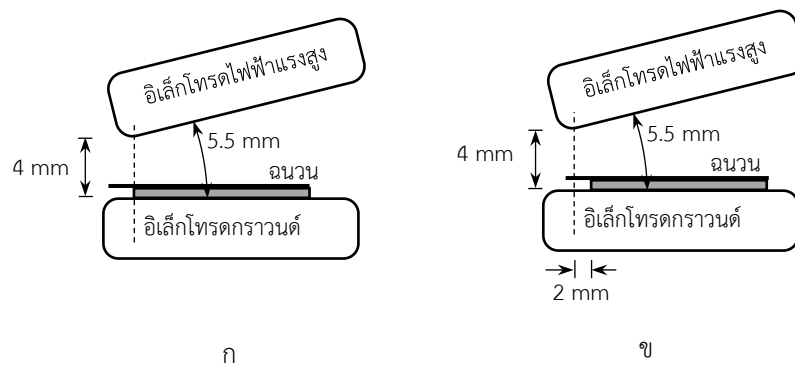
ผู้วิจัยลองใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ในการทดลองการดักจับอนุภาค ดังแสดงในตารางที่ 3.2. การทดลองใช้อนุภาค 2 ชนิด คือ อนุภาคทรงกระบอกและอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดใหญ่. ตารางที่ 3.2 เรียกชื่อของอนุภาคทรงกระบอกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว เช่น D0.5-L2 คือ อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.5 mm และยาว (L) 2 mm, D1-L4 คือ อนุภาคที่ $D = 1$ mm และ $L = 4$ mm เป็นต้น. การทดลองใช้มุมเอียง $\beta = 10^\circ$ และ 15° . ผู้ทดลองเริ่มทดลองจาก $\beta = 15^\circ$ แล้วพบว่า การทดลองส่วนใหญ่เกิดการเบรกดาวน เมื่ออนุภาคอยู่บนพอลิไอไมด์ที่ยื่นออกมา. ดังนั้น ผู้ทดลองปรับมุม β เป็น 10° เพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขอบของอิเล็กโทรดกราวด์กับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง.

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดลองดักจับอนุภาค

β ($^{\circ}$)	z_{\min} (mm)	d (mm)	V_0 (kV)	E_0 (kV/cm)	อนุภาค	ขนาด	จำนวน ในการทดลอง (ครั้ง/อนุภาค)	รูปแบบ
15	3.0	6.0	8.3	16.9	ทรงกระบอก	D1-L2, D1-L4	10	รูปที่ 3.14ก
						รูปที่ 3.14ข		
10	4.0	5.5	6.0	12.9	ทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง ขนาดใหญ่		5	รูปที่ 3.15ก
			9.0	19.3	ทรงกระบอก	D0.5-L2, D0.5-L4	5	
			9.0	19.3	ทรงกระบอก	D1-L2, D1-L4	10	
			9.0	19.3	ทรงกระบอก	D1-L2, D1-L4	3	รูปที่ 3.15ข



รูปที่ 3.14 การจัดวางในการทดลองที่ $\beta = 15^{\circ}$



รูปที่ 3.15 การจัดวางในการทดลองที่ $\beta = 10^{\circ}$

บทที่ 4

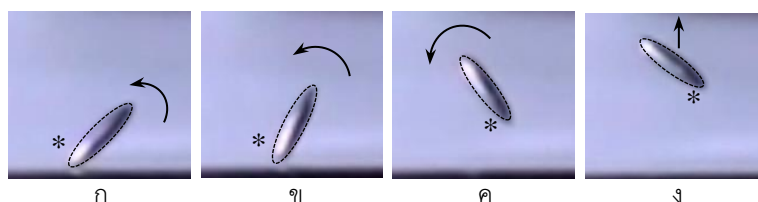
การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ถูกทดลองในระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบขนาน ภายใต้เงื่อนไขของระยะแกปและความดันอากาศ (p) ดังตารางที่ 3.1. ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกและขั้วลบแบบเพิ่มทีละขั้น. สำหรับการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าคงที่ สนามไฟฟ้าถูกป้อนที่ค่า 8.1, 8.8, 9.4 และ 10.0 kV/cm สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก และ 10.0, 10.6 และ 11.3 kV/cm สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่.

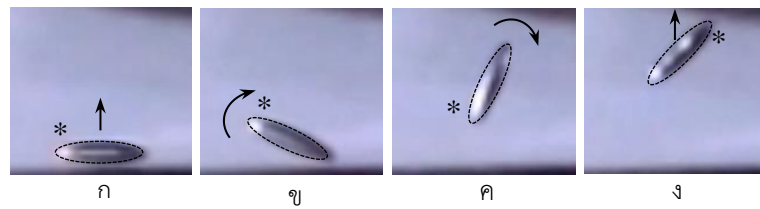
4.1 รูปแบบการยกตัวของอนุภาคจากอิเล็กโตรด

อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ 2 แบบ. แบบที่ 1 ปลายด้านหนึ่งของอนุภาคถูกยกให้สูงขึ้น ทำให้อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสและเกิดมุมระหว่างแกนเอกของอนุภาคกับระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์. หลังจากนั้น อนุภาคยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวนด์ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง. แบบที่ 2 ปลายทั้งสองของอนุภาคยกตัวขึ้นพร้อมกัน (ยกตัวขนาน). หลังจากลอยตัวขึ้น อนุภาคหมุนพร้อมกับเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง. รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบที่ 1 และ 2 ของอนุภาค ตามลำดับ โดยแสดงตามลำดับเวลาจาก ก ถึง ง (เครื่องหมาย * บ่งชี้ปลายด้านเดียวกันของอนุภาค).

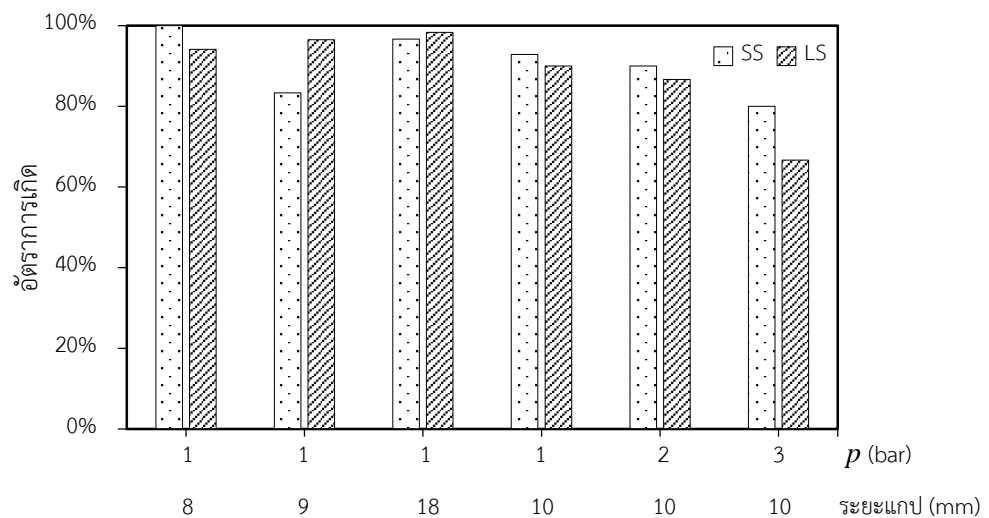
อัตราการเกิดของการหมุนรอบจุดสัมผัสที่ระยะแกปและความดันต่าง ๆ ของอนุภาคขนาดเล็ก (SS) และขนาดใหญ่ (LS) แสดงในรูปที่ 4.3. อัตราการเกิดของการหมุนรอบจุดสัมผัสเกิดขึ้นมากกว่าการยกตัวขนาน เนื่องจากการป้อนแรงดันแบบเพิ่มขึ้นทีละขั้นและ $E_R < E_L$ เมื่อ $\alpha = 0$. ที่ $p = 1$ bar การหมุนรอบจุดสัมผัสเกิดขึ้นมากกว่า 80% ของการทดลองทั้งหมด. นอกจากนี้ อัตราการเกิดการหมุนรอบจุดสัมผัสลดลง เมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น.



รูปที่ 4.1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบที่ 1



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบที่ 2



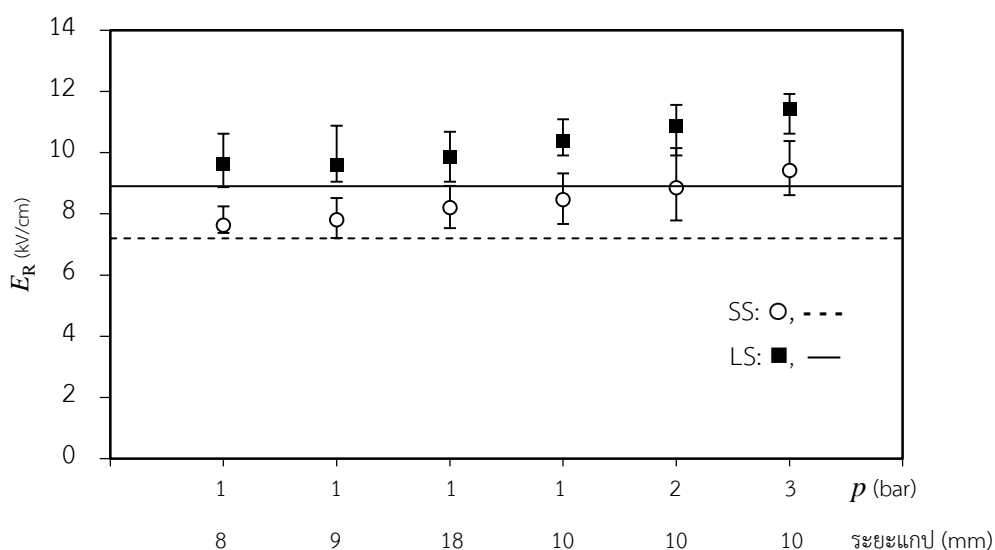
รูปที่ 4.3 อัตราการเกิดการหมุนรอบจุดสัมผัส

4.2 สนามไฟฟ้าเริ่มหมุนของอนุภาค

สนามไฟฟ้าเริ่มหมุน E_R ของอนุภาคสามารถหาได้จากแรงดันไฟฟ้า (ในการทดลอง) ที่อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสด้วยระยะแกป. ตารางที่ 4.1 แสดง E_R ภายใต้ความดันบรรยากาศ. E_R ทางทฤษฎีของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เท่ากับ 7.2 และ 8.9 kV/cm ตามลำดับ. E_R ที่ได้รับการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎี. ค่าทางทฤษฎีละเลยการพิจารณาผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโทรดกราวด์ซึ่งหวังไม่ให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้น. หากพิจารณาแรงนี้ด้วย E_0 ที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นจะมีค่ามากขึ้น. รูปที่ 4.4 แสดงกราฟของ E_R ที่ได้จากการทดลองรวมทั้งกรณีที่มีความดันต่าง ๆ. ค่าเฉลี่ยของ E_R ถูกแสดงพร้อมกับค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด. --- และ — บนกราฟแสดงถึงค่า E_R ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ตามลำดับ. กราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า E_R ของอนุภาคทั้งสองขนาดจากการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม p .

ตารางที่ 4.1 E_R ที่ได้จากการทดลอง ภายใต้เงื่อนไขความดันบรรยากาศ

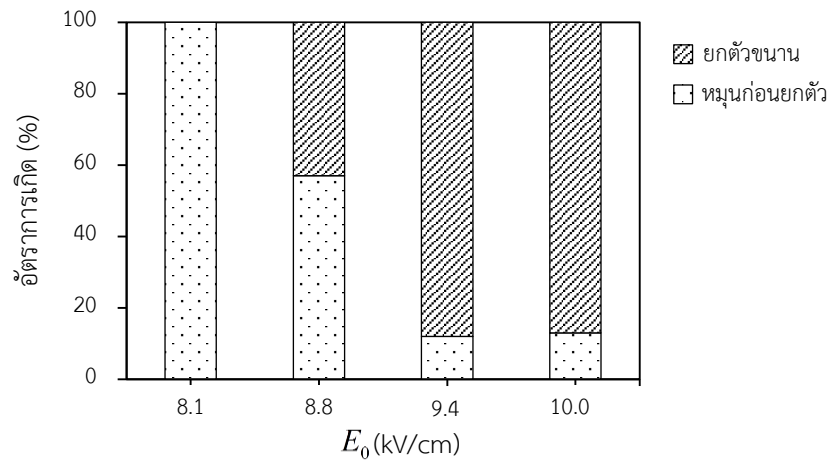
อนุภาค	อนุภาคขนาดเล็ก				อนุภาคขนาดใหญ่			
ระยะแกป (mm)	8	9	10	18	8	9	10	18
ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง (kV/cm)	7.6	7.8	8.5	8.2	9.6	9.6	10.4	9.8
ความแตกต่างจากการคำนวณทางทฤษฎี	6%	8%	18%	14%	8%	8%	17%	11%



รูปที่ 4.4 E_R ที่ได้จากการทดลองของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่

4.3 การยกตัวของอนุภาคภายใต้แรงดันคงที่

รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการเกิดการเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กทั้งสองแบบเมื่อป้อนแรงดันคงที่ค่าต่าง ๆ (การเคลื่อนที่เหมือนกับหัวข้อ 4.1) อัตราการเกิดการยกตัวขนานกับอิเล็กโทรดกราวนด์เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนให้เพิ่มขึ้น. ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อ E_0 มากกว่า E_L (ซึ่งเท่ากับ 8.0 kV/cm ในทางทฤษฎี) อนุภาคสามารถยกตัวขึ้นได้โดยไม่ต้องหมุนรอบจุดสัมผัส. ในทางกลับกันอนุภาคขนาดใหญ่ยกตัวขนานกับอิเล็กโทรดกราวนด์ 2/3 ของการทดลองทั้งหมด. ในการป้อน $E_0 = 10.0$ kV/cm อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสทั้งหมด. ในการป้อน $E_0 = 10.6$ kV/cm อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัส 2 ครั้ง. E_L ทางทฤษฎีของอนุภาคขนาดใหญ่จากซึ่งเท่ากับ 10.1 kV/cm. ดังนั้นเมื่อป้อน E_0 มากกว่า E_L ทางทฤษฎี โอกาสที่อนุภาคยกตัวขนานเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน.



รูปที่ 4.5 อัตราการเกิดการเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กเมื่อป้อนแรงดันที่ค่าคงที่

4.4 พฤติกรรมหลังเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรด

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการทดลองที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกแบบคงที่. ในบางครั้ง อนุภาคตกกลับลงยังอิเล็กโทรดกราวด์ทันที หลังจากที่ถูกอนุภาคเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโทรด. การตกกลับลงมายังอิเล็กโทรดทันทีบางครั้งก็เกิดเบรกดาวนร่วมด้วย. ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนครั้งที่อนุภาคตกกลับสู่อิเล็กโทรด. อนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่เกิดพฤติกรรมดังกล่าวในอัตรา 4.6% และ 1.1% ตามลำดับ. พฤติกรรมการยกตัวขึ้นแล้วตกลงมาทันทีอาจเกิดจากโคโรนาบริเวณปลายของอนุภาค. การทดลองนี้อาจช่วยยืนยันการเกิดโคโรนาบริเวณปลายของอนุภาคได้โดยการเปรียบเทียบขั้วแรงดันไฟฟ้าและลักษณะปลายของอนุภาค. อนุภาคขนาดเล็กมีอัตราการเกิดพฤติกรรมยกตัวขึ้นแล้วตกลงมาทันทีสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่. นอกจากนี้ พฤติกรรมนี้พบเฉพาะการทดลองการป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก. แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดช้าลงต่ำกว่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดขั้วบวก. ดังนั้นอนุภาคที่ถูกวางบนอิเล็กโทรดช้าลง (ป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก) เกิดโคโรนาได้ง่ายกว่า.

ตารางที่ 4.2 จำนวนครั้งที่อนุภาคตกกลับสู่อิเล็กโทรดกราวด์

อนุภาค	อนุภาคขนาดเล็ก				อนุภาคขนาดใหญ่			
	E_0 (kV/cm)	8.1	8.8	9.4	10.0	10.0	10.6	11.3
จำนวนครั้งที่อนุภาคตกกลับสู่อิเล็กโทรดช้าลง		2	4	1	1	0	0	2

บทที่ 5

การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

5.1 อนุภาคสัมผัสกับอิเล็กโทรดกราวนด์

5.1.1 สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ทางทฤษฎี

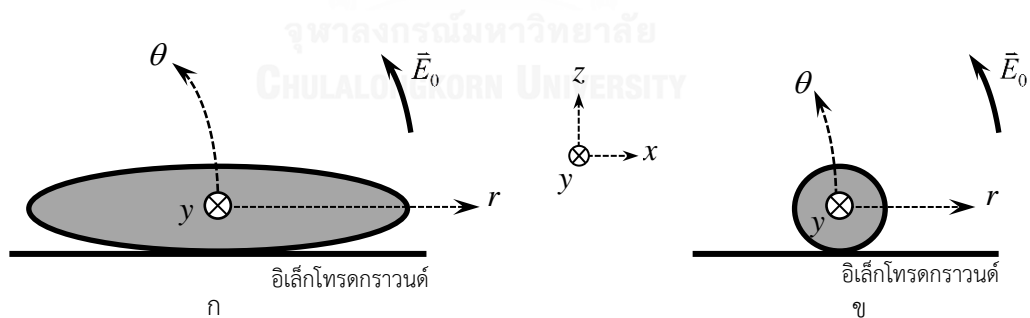
พิจารณาอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างตามการจัดวาง 2 รูปแบบ คือ (1) แบบสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอก และ (2) แบบสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกของอนุภาค. รูปที่ 5.1 แสดงการจัดวางอนุภาคและระบบพิกัดที่ใช้พิจารณาการเคลื่อนที่. แรงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่คือ แรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส \vec{F}_{DEP} , แรงคูลอมบ์ \vec{F}_E , แรงโน้มถ่วง \vec{F}_g และแรงเสียดทาน f_s โดยมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\vec{F}_{DEP} = -\frac{4\pi\epsilon_m cb^2 E_0^2}{3 L_b r_p} \hat{a}_r \quad (5.1)$$

$$\vec{F}_E = 1.9554(4\pi\epsilon_m b^2 E_0^2) \hat{a}_\theta \quad \text{สำหรับ } c/b = 2 \quad (5.2)$$

$$\vec{F}_E = 3.1366(4\pi\epsilon_m b^2 E_0^2) \hat{a}_\theta \quad \text{สำหรับ } c/b = 4 \quad (5.3)$$

โดยที่ r_p คือ ระยะจากจุดกำเนิดของอนุภาค (ภาคผนวก ค).



รูปที่ 5.1 การจัดวางอนุภาค (ก) แบบสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอก และ (ข) แบบสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก

การจัดวางแบบที่ 1 สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอกของอนุภาค

การทดลองการหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานพบว่า f_s มีค่ามากทำให้อนุภาคไม่สามารถกลิ้งได้ตามแนว r . สำหรับแรงในทิศ θ เมื่อพิจารณาให้อนุภาคเริ่มยกตัวพอดี จะได้ว่า

$$\vec{F}_E + \vec{F}_g = 0 \quad (5.4)$$

สนามไฟฟ้ายกตัว E_L เท่ากับ 8.0 และ 10.1 kV/cm สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ($b = 0.5$ mm, $c = 2$ mm) และขนาดใหญ่ ($b = 1$ mm, $c = 2$ mm) ตามลำดับ.

การจัดวางแบบที่ 2 สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกของอนุภาค

การคำนวณแรงในทิศ θ เหมือนกับกรณีของการจัดวางแบบแรก. พิจารณาแรงทิศ r . อนุภาคเริ่มกลิ้งเมื่อ F_{DEP} มากกว่า f_s หรืออาจเขียนได้ว่า

$$F_{DEP} = f_s \quad (5.5)$$

สามารถหาได้จาก

$$f_s = \mu_s (F_g - F_E) \quad (5.6)$$

สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก สนามไฟฟ้า E_{roll} ที่ทำให้อนุภาคกลิ้ง คือ

$$E_{roll} = \sqrt{\frac{\mu_s mg}{4\pi\epsilon_m b^2 \left(\frac{c}{3r_p L_b} + 3.1366\mu_s \right)}} \quad (5.7)$$

อนุภาคขนาดเล็กมีมวล 5.7 mg อยู่ภายใต้อิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงที่ทำมุม $\beta = 4^\circ$ กับอิเล็กโตรดกราวด์. สัมประสิทธิ์เสียดทานสถิตจากการทดลอง μ_s เท่ากับ 0.0578 และ r_p เท่ากับ 114 mm. E_{roll} เท่ากับ 7.7 kV/cm. ตารางที่ 5.1 แสดง E_{roll} ที่คำนวณได้เมื่อ β เท่ากับ 4° , 8° และ 12° โดยที่อนุภาคขนาดใหญ่มีมวล 22.7 mg และ $\mu_s = 0.0398$ (ได้จากการทดลอง).

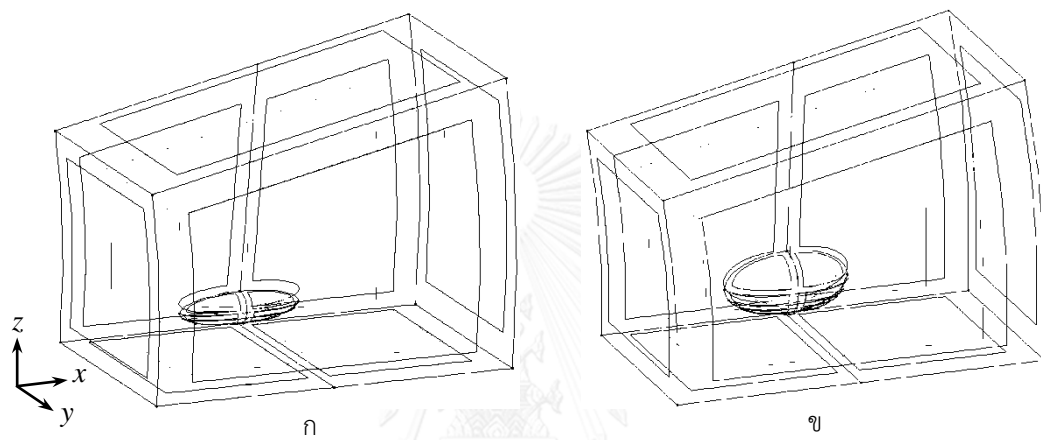
ตารางที่ 5.1 ปริมาณที่ใช้ในการคำนวณและสนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มกลิ้ง

β ($^\circ$)	4	8	12
r_p (mm)	114	56.9	37.6
E_{roll} สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก (kV/cm)	7.7	7.5	7.3
E_{roll} สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ (kV/cm)	9.3	8.6	8.1

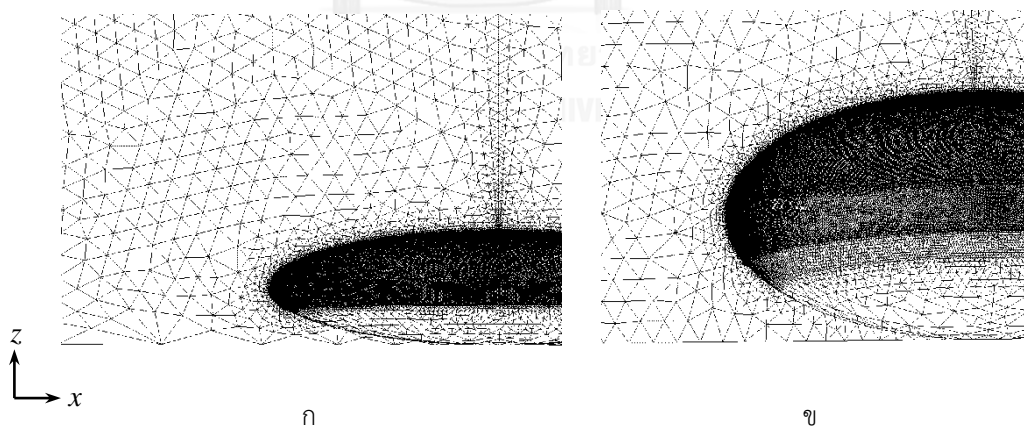
5.1.2 การกระจายของแรงคูลอมบ์บนผิวอนุภาค

การคำนวณสนามไฟฟ้าเชิงเลขถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบแรงคูลอมบ์ระหว่างปลายอนุภาคทั้งสองด้าน. พิจารณากรณีที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอกในรูปที่ 5.1 (ก). ระยะแถบ d ระหว่าง

อิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 8 mm. แบ่งเอลิเมนต์บนอนุภาคด้วยระนาบ xy ออกเป็น 2 ส่วน. ปลายด้านในและปลายด้านนอกอยู่ในบริเวณซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าและต่ำกว่า ตามลำดับ. รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างของการสร้างเมชของอนุภาค. โครงสร้างดังกล่าวถูกสร้างในโปรแกรม GiD และสร้างเป็นเมชดังรูปที่ 5.3 เพื่อนำไปคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Elmer. การคำนวณใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอันดับหนึ่ง. ผลการคำนวณได้สนามไฟฟ้าบนโหนดในแต่ละเอลิเมนต์. เงื่อนไขค่าขอบคือ ศักย์ไฟฟ้า $V = 1$ kV บนอิเล็กโทรดไฟฟ้าสูง และ $V = 0$ บนอิเล็กโทรดกราวด์และอนุภาค. สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับพื้นที่ปิดด้านข้างเท่ากับ 0.



รูปที่ 5.2 โครงสร้างที่ใช้ในการสร้างเมชของ (ก) อนุภาคขนาดเล็ก และ (ข) อนุภาคขนาดใหญ่



รูปที่ 5.3 เมชที่ใช้จำลอง (ก) อนุภาคขนาดเล็กและ (ข) อนุภาคขนาดใหญ่

แรงคูลอมบ์ \vec{F}_E สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{F}_E = \frac{\epsilon_E}{2} \oint_S E_n^2 \hat{a}_n ds \quad (5.8)$$

โดยที่ E_n คือ สนามไฟฟ้าที่ติดตั้งฉากกับผิวของอนุภาคที่ได้จากการจำลอง \hat{a}_n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ติดตั้งฉากกับผิวของอนุภาค และ S คือ พื้นที่ผิวของอนุภาค. รูปที่ 5.4 แสดงเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณแรงคูลอมบ์. พื้นที่ S และสนามไฟฟ้า E_n บนอนุภาคมีค่าเท่ากับ

$$S = \frac{1}{2} \|\vec{R}_{12} \times \vec{R}_{13}\| \quad (5.9)$$

$$\vec{E}_n = E_x \hat{a}_x + E_y \hat{a}_y + E_z \hat{a}_z \quad (5.10)$$

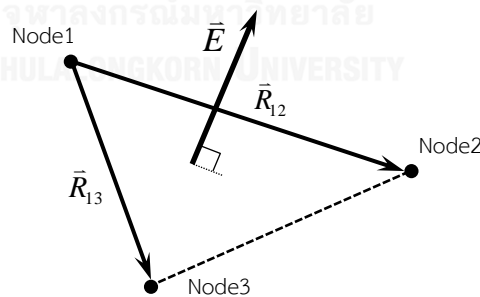
โดยที่ \vec{R}_{ij} คือ เวกเตอร์จากโหนดที่ i ไปโหนดที่ j . E_x , E_y และ E_z คือขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x , y และ z . \hat{a}_x , \hat{a}_y และ \hat{a}_z คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย. ขนาดสนามไฟฟ้า E_x ได้จากการเฉลี่ยสนามไฟฟ้าที่โหนดที่ 1, 2 และ 3. องค์ประกอบในแนวแกน x ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ติดตั้งฉากกับผิวของเอลิเมนต์หาได้จาก

$$a_{n,x} = \frac{(\vec{R}_{12} \times \vec{R}_{13})_x}{\|\vec{R}_{12} \times \vec{R}_{13}\|} \quad (5.11)$$

ดังนั้น แรงคูลอมบ์ในแนวแกน x มีค่าเท่ากับ

$$F_{E,x} = \frac{\epsilon_E}{2} \oint (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) a_{n,x} ds \quad (5.12)$$

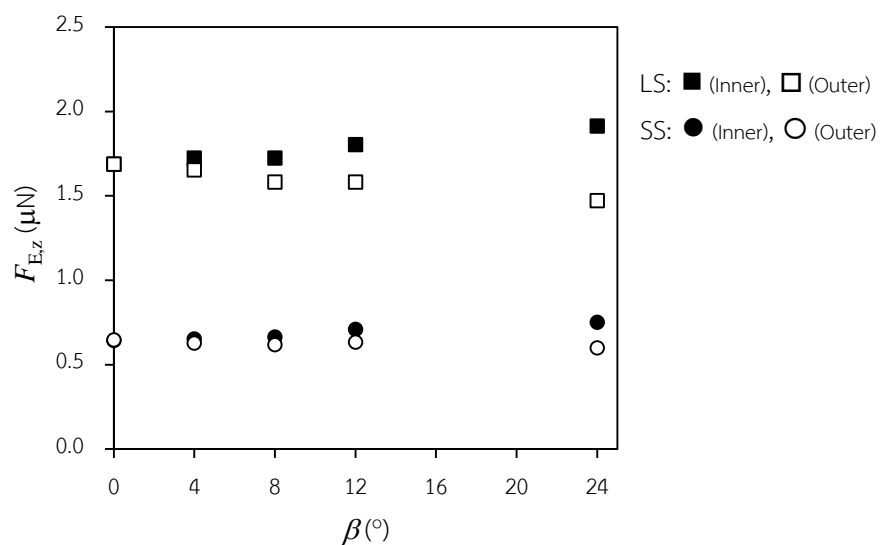
การคำนวณ $F_{E,y}$ และ $F_{E,z}$ ใช้วิธีในทำนองเดียวกัน.



รูปที่ 5.4 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับหนึ่ง

ผลการคำนวณแรงคูลอมบ์บนอนุภาคที่ $\beta = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ และ 24° แสดงในรูปที่ 5.5. พื้นที่ที่คำนวณได้ของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.3% โดยค่าทางทฤษฎีเท่ากับ 10.118 และ 21.468 mm² ตามลำดับ. Inner และ Outer แสดงถึงครึ่งของทรงคล้ายทรงกลมที่อยู่ด้านในและด้านนอก ตามลำดับ. แรง $F_{E,z}$ บนปลายด้านในมากกว่าบนปลายด้านนอก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามมุม β . แรง $F_{E,z}$ บนปลายทั้งสองด้านของอนุภาคขนาดใหญ่มีความ

แตกต่างกันสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก. แรง $F_{E,z}$ บนปลายด้านในของอนุภาคใหญ่ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อ β เพิ่มขึ้นจาก 4° เป็น 8° . นอกจากนี้ ขนาดของ $F_{E,x}$ ถือว่ามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $F_{E,z}$. พิจารณาอนุภาคที่สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก (รูปที่ 5.1ข). แรงคูลอมบ์บนอนุภาคที่ $\beta = 4^\circ, 8^\circ$ และ 12° ถูกคำนวณเชิงเลขโดยใช้วิธีเดียวกัน. พื้นที่ผิวที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนจากค่าทฤษฎี 0.08%. ผลการคำนวณ $F_{E,z}$ บนอนุภาคที่จัดวางทั้งสองแบบแสดงในตารางที่ 5.2 เมื่อ $E_0 = 1 \text{ kV/cm}$. $F_{E,z}$ บนอนุภาคที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอกไม่คงที่. ในทางตรงกันข้าม $F_{E,z}$ บนอนุภาคที่สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกค่อนข้างคงที่.



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของ $F_{E,z}$ บนปลายของอนุภาคกับมุม β เมื่อ $E_0 = 1 \text{ kV/cm}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณ $F_{E,z}$ บนอนุภาคที่มุม $\beta = 4^\circ, 8^\circ$ และ 12° เมื่อ $E_0 = 1 \text{ kV/cm}$

β ($^\circ$)	$F_{E,z}$ (μN)			
	สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอก		สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก	
	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่	อนุภาคขนาดเล็ก	อนุภาคขนาดใหญ่
4	1.282	3.380	1.265	3.309
8	1.283	3.307	1.257	3.306
12	1.344	3.386	1.263	3.307

สนามไฟฟ้ายกตัว E_L คำนวณได้จาก (5.4). V.Q. Huynh ได้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่ทำให้ตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างหมุนรอบจุดสัมผัสและยกตัวจากอิเล็กโทรด โดยอยู่ในรูปอัตราส่วน E_R/E_L ที่ $\alpha = 0$ [12]. ความสัมพันธ์ของ E_R/E_L กับ c/b ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง. อัตราส่วน E_R/E_L ที่ $\alpha = 0$ เท่ากับ 0.90 และ 0.88 สำหรับอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ตามลำดับ. ผลการคำนวณ E_L และ E_R ของอนุภาคที่จัดวางทั้งสองแบบแสดงในตารางที่ 5.3 และ 5.4. สำหรับอนุภาคที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอก ผลการคำนวณ E_L และ E_R ที่ β ต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างน้อย (ต่ำกว่า 5% เทียบกับค่าที่น้อยที่สุด). สำหรับอนุภาคที่สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก ผลการคำนวณ E_L และ E_R คงข้างคงที่ไม่ขึ้นกับ β .

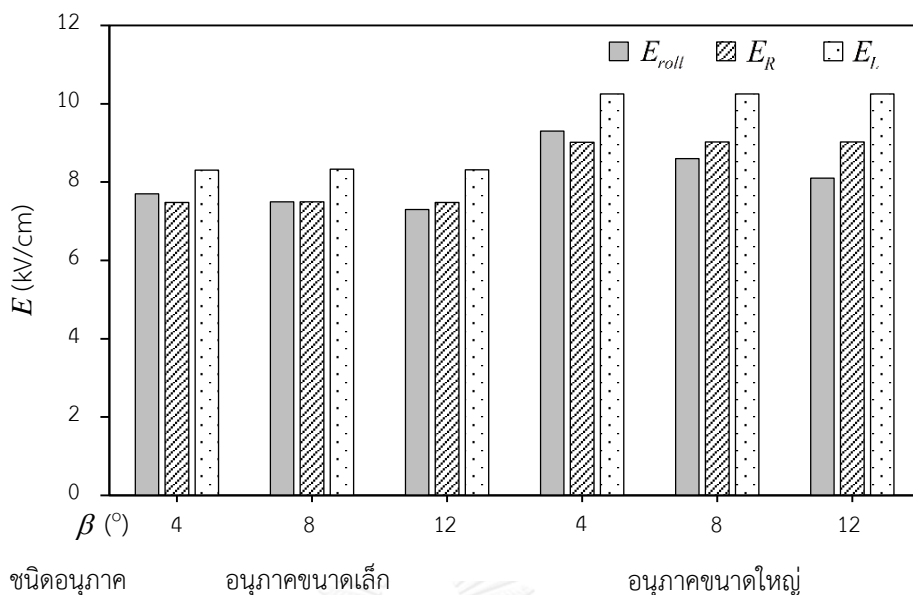
ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณ E_R และ E_L ของอนุภาคที่สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอก

β (°)	อนุภาคขนาดเล็ก		อนุภาคขนาดใหญ่	
	E_L (kV/cm)	E_R (kV/cm)	E_L (kV/cm)	E_R (kV/cm)
4	8.25	7.43	10.14	8.92
8	8.25	7.42	10.25	9.02
12	8.06	7.25	10.13	8.92

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณ E_R และ E_L ของอนุภาคที่สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก

β (°)	อนุภาคขนาดเล็ก		อนุภาคขนาดใหญ่	
	E_L (kV/cm)	E_R (kV/cm)	E_L (kV/cm)	E_R (kV/cm)
4	8.31	7.48	10.25	9.02
8	8.33	7.50	10.25	9.02
12	8.31	7.48	10.25	9.02

รูปที่ 5.6 แสดงผลการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก. E_{roll} ของอนุภาคมีค่าลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น. E_R และ E_L ของอนุภาคคงที่ไม่ขึ้นกับ β . สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก E_{roll} เท่ากับ E_R ที่ $\beta = 8^\circ$ และ $E_{roll} < E_R < E_L$ ที่ $\beta = 12^\circ$. สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ $E_{roll} < E_R < E_L$ ที่ $\beta = 8^\circ$ และ 12° .



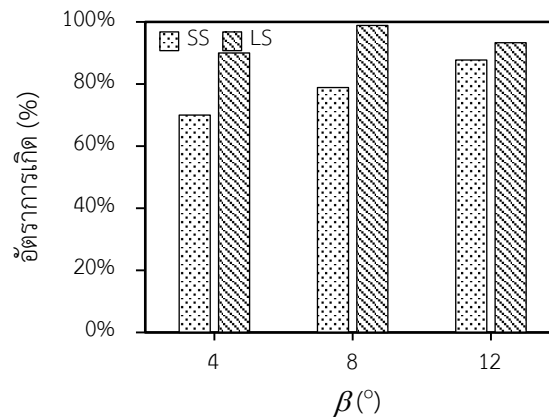
รูปที่ 5.6 ผลการคำนวณ E_{roll} , E_R และ E_L ของอนุภาค

5.1.3 ผลการทดลองเมื่อแกนเอกของอนุภาคอยู่ในแนวการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า

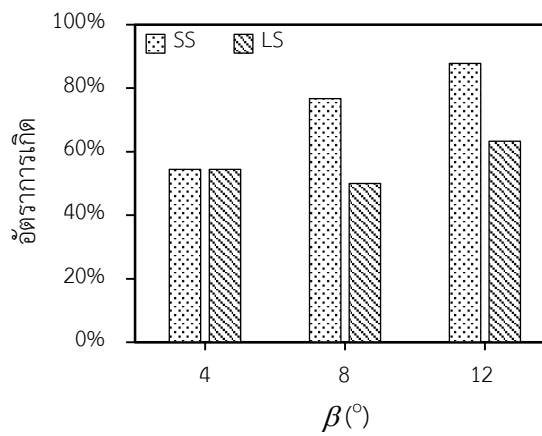
ก) รูปแบบการเคลื่อนที่

อนุภาคมีการเคลื่อนที่ 2 แบบ คือ การหมุนรอบจุดสัมผัส และการยกตัวขนาน. การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบจุดสัมผัสเริ่มจากปลายด้านหนึ่งของอนุภาคถูกยกให้สูงขึ้น ทำให้อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัส หลังจากนั้น จึงยกตัวขึ้นไปยังอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง. การยกตัวขนานเริ่มจากปลายทั้งสองของอนุภาคยกตัวขึ้นพร้อมกัน. หลังจากยกตัว อนุภาคหมุนพร้อมกับเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง. สังเกตว่า การทดลองนี้ไม่พบกรณีที่อนุภาคยกตัวออกจากอิเล็กโทรดกราวนด์แล้วตกลงมาทันที.

การหมุนรอบจุดสัมผัสมีอัตราการเกิดสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การยกตัวขนาน. อัตราการเกิดของการหมุนรอบจุดสัมผัสแสดงในรูปที่ 5.7. อนุภาคขนาดเล็กมีอัตราการเกิดของการหมุนรอบจุดสัมผัสเพิ่มขึ้นตามมุม β . อนุภาคขนาดใหญ่เริ่มเคลื่อนที่จากการหมุนรอบจุดสัมผัสด้วยอัตราการเกิดที่มากกว่า 90%. เนื่องจากปลายทั้งด้านของอนุภาคได้รับสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน ผู้ทดลองจึงพิจารณาการหมุนรอบจุดสัมผัสโดยเริ่มจากการยกตัวจากปลายด้านในเพิ่มเติมด้วย. อัตราการเกิดการเคลื่อนที่ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.8. อนุภาคขนาดเล็กเริ่มหมุนจากปลายด้านใน โดยมีอัตราเพิ่มขึ้นตามมุม β . นั่นคือ เมื่อมุม β มากขึ้น อนุภาคมีโอกาสที่จะเริ่มหมุนจากปลายด้านในสูงขึ้น เนื่องจาก $F_{E,z}$ ของครึ่งอนุภาคที่อยู่ด้านในมากกว่าครึ่งด้านนอกดังรูปที่ 5.5. อนุภาคขนาดใหญ่มีอัตราการเริ่มยกตัวจากปลายด้านในที่ $\beta = 4^\circ$ ใกล้เคียงกับ $\beta = 8^\circ$. $F_{E,z}$ ของครึ่งด้านในที่ $\beta = 4^\circ$ เท่ากับที่ $\beta = 8^\circ$ ดังรูปที่ 5.5. โอกาสที่อนุภาคจะเริ่มยกตัวจากปลายด้านในจึงควรจะเท่ากันด้วย.



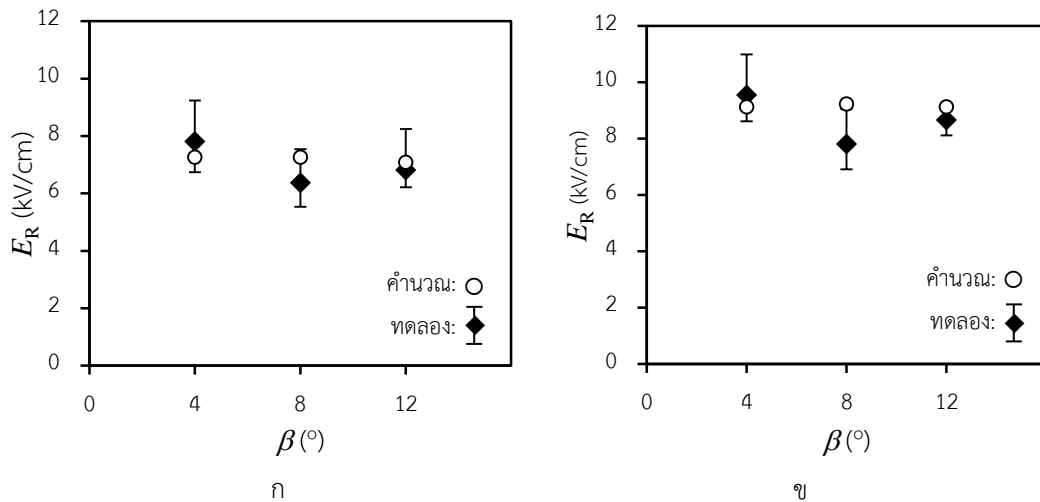
รูปที่ 5.7 อัตราการเกิดของการหมุนรอบจุดสัมผัส



รูปที่ 5.8 อัตราการเกิดของการเริ่มยกตัวจากปลายด้านใน

ข) สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่

สนามไฟฟ้าที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่จำแนกออกเป็น สนามไฟฟ้าเริ่มหมุน E_R และสนามไฟฟ้ายกตัว E_L . E_R แสดงไว้ในรูปที่ 5.9. ค่าที่ได้จากการคำนวณบนกราฟได้จากตารางที่ 5.3. การทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของ E_R มีค่าสูงที่สุดที่ $\beta = 4^\circ$ และต่ำที่สุดที่ $\beta = 8^\circ$. E_R ที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับการประมาณทางทฤษฎี.

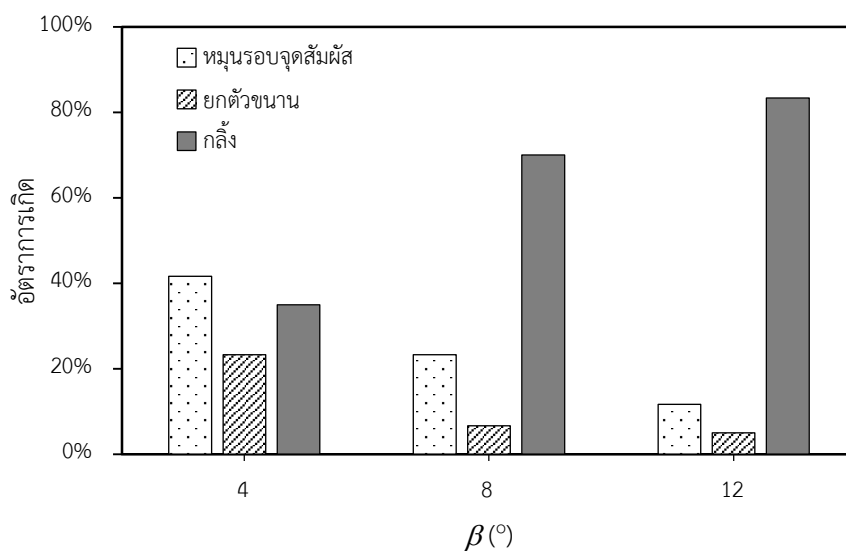


รูปที่ 5.9 E_R จากการทดลองของ (ก) อนุภาคขนาดเล็ก และ (ข) ขนาดใหญ่

5.1.4 ผลการทดลองเมื่อสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกของอนุภาค

ก) รูปแบบการเคลื่อนที่

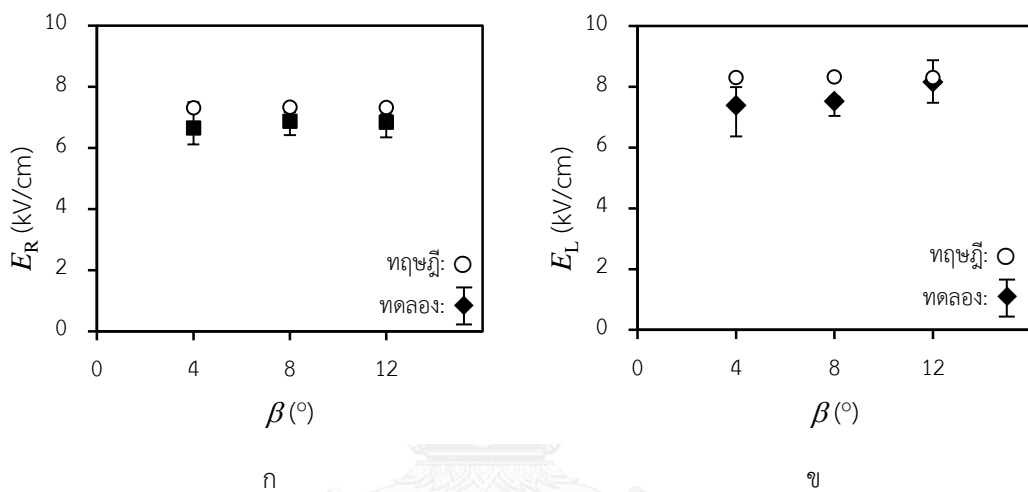
อนุภาคขนาดใหญ่เริ่มเคลื่อนที่ด้วยการกลิ้งไปยังบริเวณที่แคบแคบกว่าในทุกการทดลอง. อนุภาคขนาดเล็กเริ่มเคลื่อนที่ด้วยการหมุนรอบจุดสัมผัสก่อนยกตัว การยกตัวขนาน หรือการกลิ้งไปยังบริเวณที่แคบแคบกว่า. อัตราการเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กแสดงไว้ในรูปที่ 5.10. เมื่อมุมเอียง β เพิ่มขึ้น อัตราที่อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสและยกตัวขนานลดลง ในขณะที่อัตราการกลิ้งเพิ่มขึ้น. ผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎี. โอกาสที่อนุภาคจะเริ่มเคลื่อนที่ด้วยการกลิ้งมีค่าสูงเนื่องจากการเพิ่มแรงดันที่ละชั้นและ E_{roll} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.6.



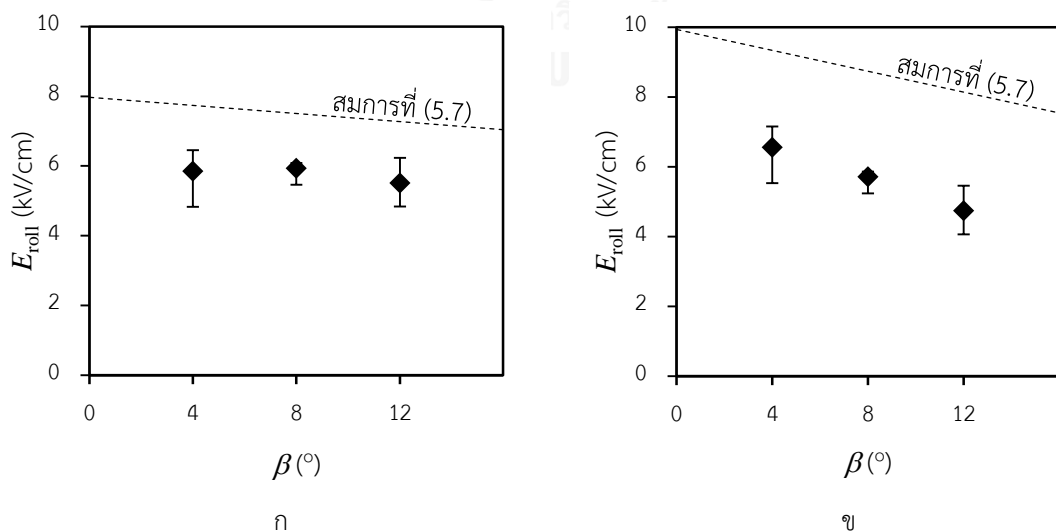
รูปที่ 5.10 อัตราการเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก

ข) สนามไฟฟ้าที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่

E_R และ E_L ของอนุภาคขนาดเล็กจากการทดลองแสดงในรูปที่ 5.11. ค่าที่ได้จากการคำนวณบนกราฟได้จากตารางที่ 5.4. E_R ที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี. E_L ที่ได้จากการทดลองแตกต่างกับค่าทางทฤษฎี โดยค่าเฉลี่ยของ E_L ที่ $\beta = 8^\circ$ มีความแตกต่างมากที่สุด (หรือประมาณ 10%). รูปที่ 5.12 แสดง E_{roll} ของอนุภาคขนาดเล็กและอนุภาคขนาดใหญ่. E_{roll} ในทางทฤษฎีสามารถหาได้จาก (5.7). E_{roll} มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี โดยเฉลี่ยประมาณ 23% และ 35% สำหรับอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ตามลำดับ.



รูปที่ 5.11 สนามไฟฟ้า (ก) E_R และ (ข) E_L ของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก



รูปที่ 5.12 สนามไฟฟ้า E_{roll} ของ (ก) อนุภาคขนาดเล็กและ (ข) อนุภาคขนาดใหญ่

5.2 อนุภาคถูกฉนวนจากอิเล็กโทรด

5.2.1 สนามไฟฟ้าบนอนุภาค

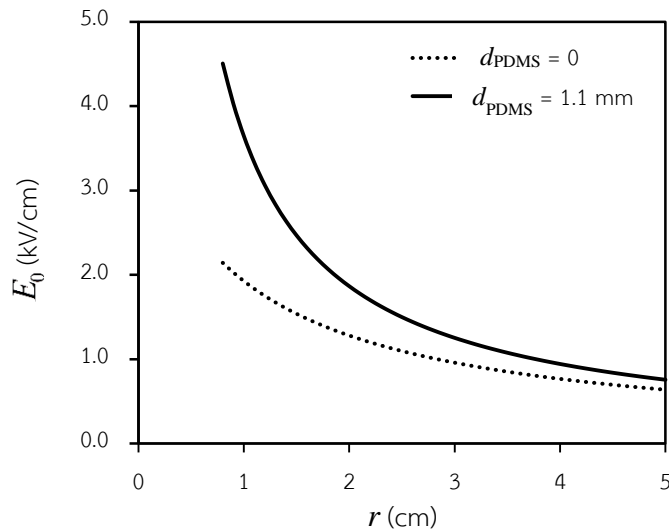
พิจารณาการวางฉนวนบนอิเล็กโทรดกราวนด์ดังรูปที่ 5.13. สนามไฟฟ้าภายนอก E_0 ในตัวกลางอากาศ สามารถประมาณได้จาก

$$E_0 = \frac{V_0}{d_{air} + \frac{d_{PI}}{\epsilon_{r,PI}} + \frac{d_{PDMS}}{\epsilon_{r,PDMS}}} \quad (5.13)$$

โดยที่ V_0 คือ แรงดันที่อิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง, d_{air} , d_{PI} และ d_{PDMS} คือ ระยะแกบในอากาศ, พอลิไอมิด และ PDMS ตามลำดับ. ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของฉนวน โดยที่ ϵ_r ของพอลิไอมิด และ PDMS เท่ากับ 3.5 และ 3.1 ตามลำดับ. การคำนวณสนามไฟฟ้า E_0 สามารถหาค่า d_{PI} ได้ เนื่องจาก $d_{PI} = 76 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ d_{air} และ d_{PDMS} . รูปที่ 5.14 แสดงค่า E_0 ของการจัดวางตามรูปที่ 5.13 โดยป้อนแรงดัน $V_0 = 1 \text{ kV}$ ให้กับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงที่ $\beta = 15^\circ$ ในกรณีที่ไม่มี PDMS และมี PDMS หนา 1.1 mm. กราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สนามไฟฟ้า E_0 เพิ่มขึ้น เมื่อ r น้อยลง (ระยะแกบลดลง).



รูปที่ 5.13 ระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียงที่มีฉนวนพอลิไอมิดและ PDMS



รูปที่ 5.14 สนามไฟฟ้า E_0 บนฉนวนเมื่อ $\beta = 15^\circ$ และ $V_0 = 1$ kV

เมื่ออนุภาคอยู่บนฉนวนพอลิเอไมด์ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ แรงคูลอมบ์ F_E ตาม (5.6) เท่ากับศูนย์เนื่องจากอนุภาคไม่มีประจุลัพท์. แรง F_{DEP} จะทำให้อนุภาคสามารถกลิ้งไปยังบริเวณที่ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงได้ ถ้าหาก F_{DEP} มีค่ามากกว่าแรงเสียดทาน. พจน์ของแรงเสียดทานละลายแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคกับฉนวน จึงประมาณให้เท่ากับ μF_g .

$$F_{DEP} = \mu_s F_g \quad (5.14)$$

$$\frac{4}{3} \pi \epsilon_m \frac{cb^2}{rL_z} E_0^2 = \mu_s mg \quad (5.15)$$

ดังนั้น สนามไฟฟ้าภายนอกที่ทำให้อนุภาคเริ่มกลิ้งสามารถหาได้จาก

$$E_{roll} = \sqrt{\frac{\mu_s mg}{\frac{4}{3} \pi \epsilon_m \frac{cb^2}{r_p L_z}}} \quad (5.16)$$

สำหรับอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดเล็กที่วางบนฉนวน ณ ตำแหน่งที่มี $d = 8$ mm ($r = 30.5$ mm) E_{roll} สามารถคำนวณได้จาก (5.13) และ (5.16) โดยมีค่าเท่ากับ 12.9 kV/cm.

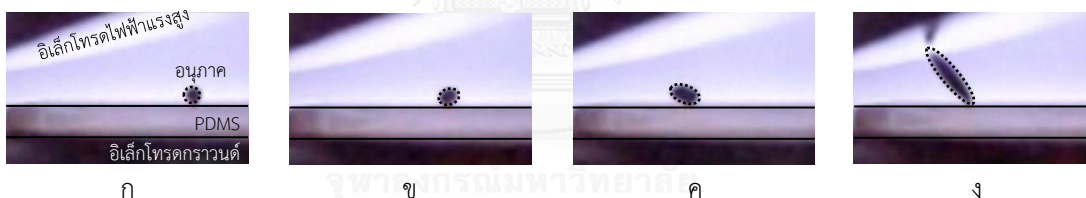
5.2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อสนามไฟฟ้าคางที่บนแกนเอก

การทดลองใช้อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดเล็กและอนุภาคทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 1 mm และยาว (L) 4 mm. ฉนวนกั้นระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโทรดกราวด์เป็นฟิล์มพอลิเอไมด์บน PDMS ที่มีความหนา 1.1 mm. แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดแตกต่างจากการ

ทดลองที่ผ่านมา โดยเป็นแรงดันกระแสสลับ 50 Hz แบบต่อเนื่อง. ลักษณะการป้อนแรงดันมี 2 แบบ. แบบที่ 1 แรงดันเริ่มป้อนตั้งแต่ 1.5 kV และเพิ่มขนาดแรงดันขึ้นขั้นละ 0.05 kV. แบบที่ 2 ป้อนแรงดันเพียงครั้งเดียวที่ค่า 7.5 kV ($E_0 = 14.4$ kV/cm) สำหรับอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง และ 9 kV ($E_0 = 17.3$ kV/cm) สำหรับอนุภาคทรงกระบอก. ขนาดสนามไฟฟ้างกล่าวเท่ากับ 110% ของค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า E_{roll} ที่ได้จากการทดลองการเพิ่มแรงดันแบบทีละขั้น.

ก) รูปแบบการเคลื่อนที่

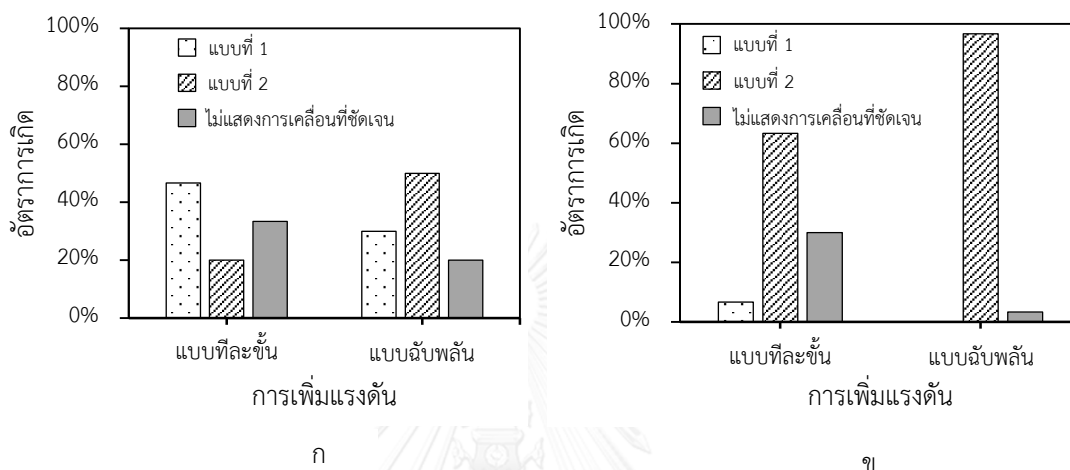
อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเคลื่อนที่ 2 แบบ. แบบที่ 1 อนุภาคหมุนในแนวระดับจนเรียงตัวขนานกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า. แบบที่ 2 อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่าด้วยการกลิ้งและการหมุนในแนวระดับ. รูปที่ 5.15 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบที่ 2 ตามลำดับเวลา ก ถึง ง. อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเริ่มจากการกลิ้งไปยังบริเวณที่ระยะแกปแคบกว่าพร้อมกับการขยับปลายขึ้นลง. หลังจากที่ถูกกลิ้งได้ระยะทางประมาณ 5 mm อนุภาคเริ่มหมุนในแนวระดับและยกปลายด้านในสูงขึ้น. อนุภาคทรงกระบอกเคลื่อนที่ 2 แบบ. แบบที่ 1 อนุภาคหมุนในแนวระดับ. แบบที่ 2 อนุภาคกลิ้งไปยังบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงกว่า.



รูปที่ 5.15 การเคลื่อนที่แบบที่ 2 ของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง

รูปที่ 5.16 แสดงอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง. ในการป้อนแรงดันทีละขั้น อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเคลื่อนที่แบบที่ 1 และ 2 คิดเป็น 47% และ 20% ของการทดลอง ตามลำดับ. ในการป้อนแรงดันเพียงครั้งเดียว อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเคลื่อนที่แบบที่ 1 และ 2 คิดเป็น 30% และ 50% ของการทดลอง ตามลำดับ. อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเคลื่อนที่ในอัตราที่เพิ่มขึ้นจาก 67% ในการป้อนแรงดันทีละขั้นเป็น 80% ในการป้อนแรงดันเพียงครั้งเดียว. รูปที่ 5.16ข แสดงอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกระบอก. ในการป้อนแรงดันแบบทีละขั้น อนุภาคทรงกระบอกเคลื่อนที่แบบที่ 1 และ 2 คิดเป็น 7% และ 63% ของการทดลอง ตามลำดับ. ในการป้อนแรงดันเพียงครั้งเดียว อนุภาคทรงกระบอกเคลื่อนที่แบบที่ 1 คิดเป็น 97% ของการทดลอง. การป้อนแรงดันเพียงครั้งเดียวทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ในอัตราที่สูงกว่าการป้อนแรงดันแบบทีละขั้นอย่างเห็นได้ชัด. อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างกลิ้งได้ยากกว่าอนุภาค

ทรงกระบอก โดยมักจะหมุนในแนวระดับก่อนที่จะกลิ้ง ถ้าหากปลายของอนุภาคแต่ละด้านได้รับสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน. ปลายด้านที่ได้รับสนามไฟฟ้ามากกว่าจะหันเข้ามาด้านใน ทำให้อนุภาคหมุนในแนวระดับ. การหมุนในแนวระดับพบในอนุภาคทรงกระบอกด้วย แต่มีอัตราการเกิดน้อยมาก. เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของอนุภาคทรงกระบอกกับฉนวนมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้เป็นอุปสรรคในการหมุนในแนวระดับ.



รูปที่ 5.16 อัตราการเกิดการเคลื่อนที่ของ (ก) อนุภาคขนาดเล็กและ (ข) อนุภาคทรงกระบอก

ข) สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่

ในการเพิ่มแรงดันทีละชั้น สนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคทรงกลายทรงกลมแบนข้างเคลื่อนที่แบบที่ 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.1 และ 11.6 kV/cm. สำหรับอนุภาคทรงกลายทรงกลมแบนข้างเฉพาะในกรณีที่กำลังไปยังบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่า (4 ครั้งจากการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง) ค่าเฉลี่ยของ $E_{roll} = 12.1$ kV/cm ซึ่งแตกต่างจากการคำนวณประมาณ 6.4%. ค่าเฉลี่ย E_{roll} ของอนุภาคทรงกระบอกที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 12.2 kV/cm ซึ่งมีค่า สูงกว่า E_{roll} ของอนุภาคขนาดเล็ก 8%.

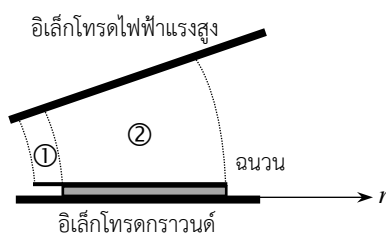
บทที่ 6

การดักจับอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

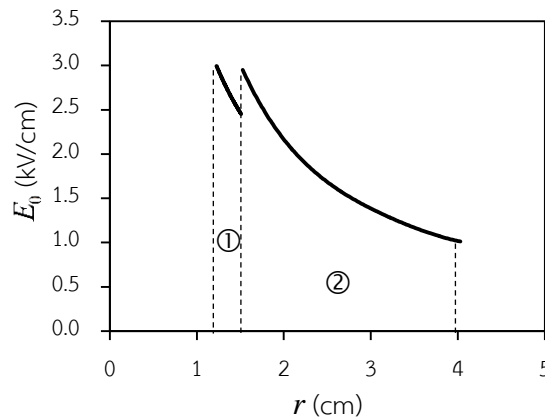
อนุภาคที่อยู่บนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกสามารถลัดไปยังบริเวณที่มีระยะแกปแคบกว่าได้. ผู้วิจัยจึงทดลองใช้รูปแบบนี้ในการจับยึดอนุภาค. สนามไฟฟ้าในอากาศที่อนุภาคจะได้รับถูกคำนวณโดยวิธีเชิงเลข. การทดลองใช้อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดใหญ่ และอนุภาคทรงกระบอกขนาดต่าง ๆ.

6.1 สนามไฟฟ้าบริเวณกับดักอนุภาค

ฉนวนพอลิเอไมด์ถูกติดบนฉนวน PDMS โดยให้ฉนวนพอลิเอไมด์ยื่นออกมา 3 mm (รูปที่ 3.6). สนามไฟฟ้าในอากาศบนฉนวนดังกล่าว E_0 ถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ. บริเวณที่ 1 คือ บริเวณที่พอลิเอไมด์ยื่นออกมาจากขอบ PDMS และบริเวณที่ 2 คือ บริเวณฉนวนพอลิเอไมด์บน PDMS ดังรูปที่ 6.1. พิจารณาการป้อนแรงดัน $V_0 = 1$ kV ให้กับอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงที่ $\beta = 15^\circ$. สนามไฟฟ้า E_0 คำนวณโดยอาศัย (5.13). ผลการคำนวณมีลักษณะดังรูปที่ 6.2. กราฟนี้แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้า E_0 ในบริเวณที่ 1 และ 2 ลดลงตามระยะ r โดยที่สนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันบริเวณรอยต่อของบริเวณที่ 1 กับ 2. ในบทที่ผ่านมา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่าด้วยแรง F_{DEP} . ดังนั้น หากอนุภาคที่กลิ้งมายังรอยต่อที่อยู่ทางซ้ายมือมีโอกาสที่จะหยุดการเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้า E_0 ที่รอยต่อ 2 ไป 1 ลดลงอย่างกะทันหัน.

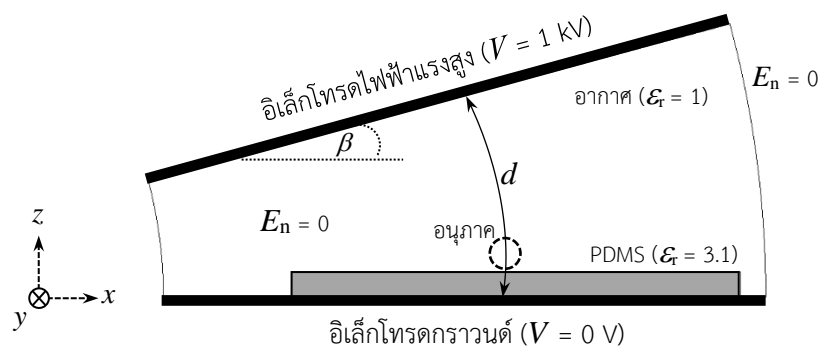


รูปที่ 6.1 การจัดวางฉนวนและระบบอิเล็กโทรดที่ใช้ทดลองการดักจับอนุภาค

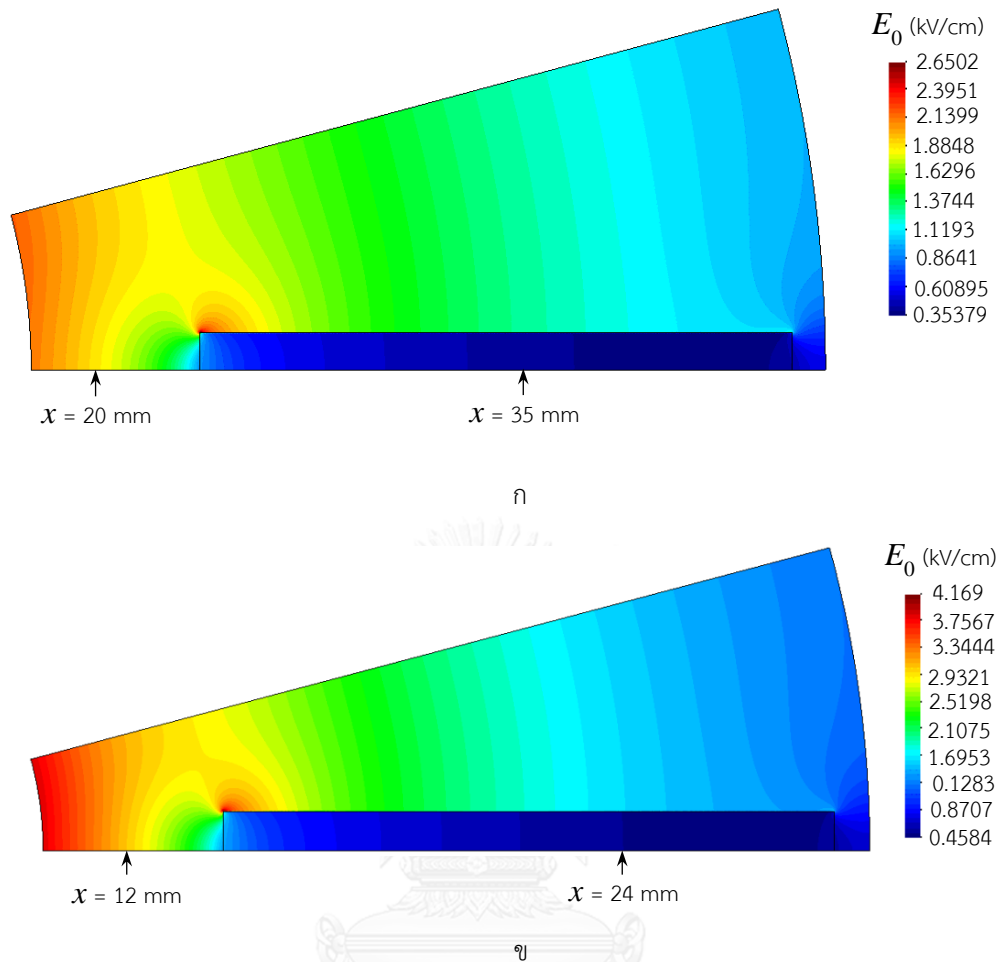


รูปที่ 6.2 สนามไฟฟ้า E_0 บนฉนวนที่ใช้ดักจับอนุภาค เมื่อ $\beta = 15^\circ$

การคำนวณสนามไฟฟ้าเชิงเลขาคัยโปรแกรม GiD และ Elmer เพื่อเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าและแรง $F_{DEP,x}$ ระหว่างกรณี $\beta = 10^\circ$ กับ 15° . รูปที่ 6.3 แสดงรูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ในการจำลองเมื่อ $\beta = 10^\circ$. ฉนวน PDMS หนา 1 mm และอนุภาคจะถูกวางที่ตำแหน่ง $x_p = 31.2$ mm ซึ่งมีระยะแกป d ระหว่างอิเล็กโทรด เท่ากับ 5.5 mm ($x_p = 22.9$ mm และ $d = 6$ mm สำหรับ $\beta = 15^\circ$). รูปที่ 6.4 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง. สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงที่สุดที่ขอบของ PDMS. ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดในกรณีที่ $\beta = 15^\circ$ สูงกว่า $\beta = 10^\circ$. พิจารณาตามเส้นทางการกลิ้งของอนุภาค จากทางด้านซ้ายมือไปยังบริเวณขอบของ PDMS ($\beta = 10^\circ$: จากตำแหน่ง $x_p = 31.2$ mm ไปจนถึง $x = 20$ mm และ $\beta = 15^\circ$: จากตำแหน่ง $x_p = 22.9$ mm ไปจนถึง $x = 12$ mm) สนามไฟฟ้าจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเส้นทางการกลิ้ง.



รูปที่ 6.3 โครงร่างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของระบบอิเล็กโทรด



รูปที่ 6.4 การกระจายของสนามไฟฟ้า เมื่อ (ก) $\beta = 10^\circ$ และ (ข) $\beta = 15^\circ$

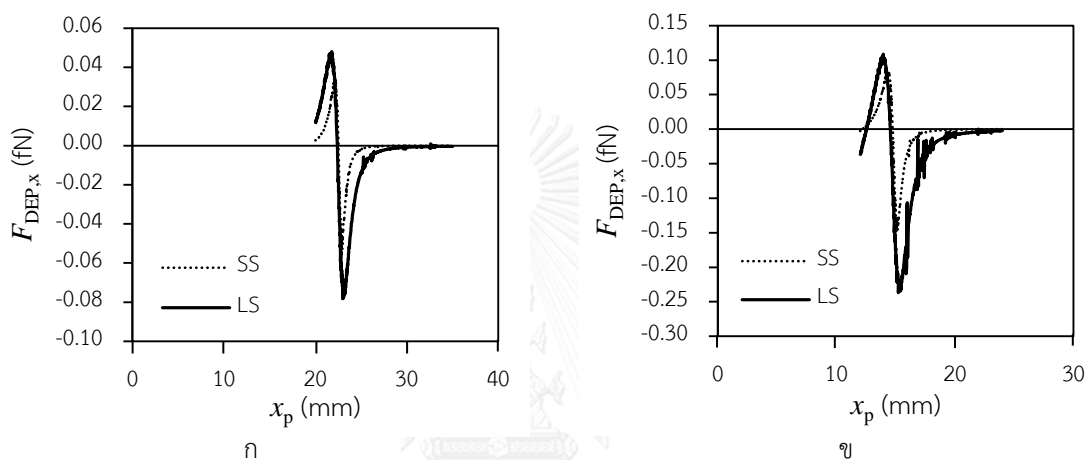
พิจารณา E_0 ที่ $z = 1.6$ mm สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก และ $z = 2.1$ mm สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ตามเส้นทางการกลิ้งของอนุภาค ($\beta = 10^\circ$: $20 < x < 35$ mm และ $\beta = 15^\circ$: $12 < x < 24$ mm). $F_{DEP,x}$ ของอนุภาคที่อยู่บนฉนวนสามารถคำนวณได้จาก p_{eff} ดัง (2.16) โดยมีค่าเท่ากับ

$$F_{DEP,x} = p_{eff,x} \frac{\partial E_{0,x}}{\partial x} + p_{eff,z} \frac{\partial E_{0,x}}{\partial z} \quad (6.1)$$

พจน์ที่สองมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก (ภาคผนวก จ) และสามารถละเลยได้ในการคำนวณ $F_{DEP,x}$ ได้. ดังนั้น

$$F_{DEP,x} = \frac{4}{3} \pi \epsilon_m c b^2 \frac{E_{0,x}}{L_x} \frac{\partial E_{0,x}}{\partial x} \quad (6.2)$$

ผลการคำนวณ $F_{DEP,x}$ ของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างแสดงในรูปที่ 6.5. $F_{DEP,x}$ ที่ตำแหน่งเริ่มต้น ($x = 35$ mm สำหรับ $\beta = 10^\circ$ และ $x = 24$ mm สำหรับ $\beta = 15^\circ$) มีค่าเป็นลบและมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงบริเวณขอบของ PDMS ($x = 22.7$ mm สำหรับ $\beta = 10^\circ$ และ $x = 14.9$ mm สำหรับ $\beta = 15^\circ$). $F_{DEP,x}$ ในช่วงนี้ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่มายังบริเวณที่แคบแคบกว่า. หลังจากนั้น $F_{DEP,x}$ ลดลงอย่างกะทันหันและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในทิศตรงกันข้าม ทำให้อนุภาคหยุดการเคลื่อนที่ได้หากอนุภาคอยู่ในบริเวณนี้. $F_{DEP,x}$ ที่กระทำกับอนุภาคขนาดใหญ่ตามเส้นทางการเคลื่อนที่มีแนวโน้มเหมือนกันกับอนุภาคขนาดเล็ก แต่มีขนาดมากกว่า ทั้งในกรณี $\beta = 10^\circ$ และ $\beta = 15^\circ$.



รูปที่ 6.5 แรง F_{DEP} ของอนุภาคที่อยู่บนฉนวน: (ก) $\beta = 10^\circ$ และ (ข) $\beta = 15^\circ$

6.2 ผลการทดลองดักจับอนุภาค

เงื่อนไขการทดลองดักจับอนุภาคแสดงในตารางที่ 3.2. อนุภาคที่ใช้ทดลอง คือ อนุภาคทรงกระบอกและอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดใหญ่. ทดลองที่ $\beta = 10^\circ$ และ $\beta = 15^\circ$.

6.2.1 การทดลองที่ $\beta = 15^\circ$

ตำแหน่งขอบของ PDMS ที่ใช้มี 2 ลักษณะ คือ อยู่ภายในแกปอิเล็กโทรดเอียง (รูปที่ 3.14ก) และเสมอกับขอบของอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง (รูปที่ 3.14ข). พฤติกรรมของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ระยะแกปแคบกว่าทางด้านซ้ายมือ สามารถแยกได้เป็น 3 แบบ คือ

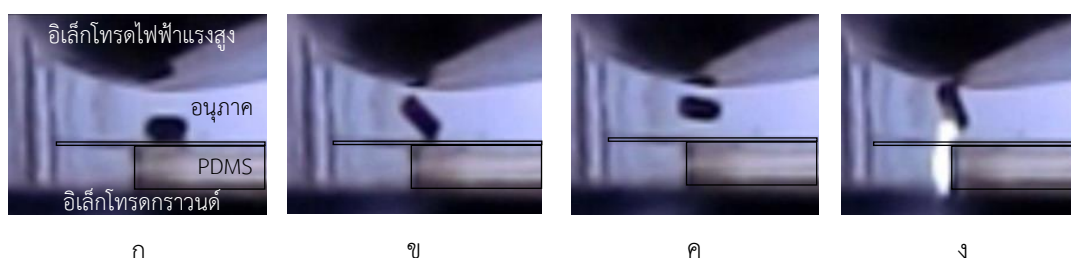
- (1) อนุภาคเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือและถูกจับยึดที่บริเวณขอบของ PDMS. รูปที่ 6.6 แสดงการเคลื่อนที่ดังกล่าวตามลำดับเวลา (ก-ง).
- (2) อนุภาคที่เคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือผ่านขอบ PDMS และพอลิไอไมด์ โดยไม่ถูกจับยึด.
- (3) อนุภาคเคลื่อนที่มายังบริเวณขอบ PDMS แล้วยกตัวขึ้นจากฉนวน. ทั้งนี้ จากการทดลอง ยังพบว่าบางครั้งเกิดเบรกดาวนผ่านอนุภาค หลังจากทีอนุภาคบนพอลิไอไมด์ที่ยื่นออกมา. รูปที่ 6.7

แสดงการเคลื่อนที่ดังกล่าวตามลำดับเวลา (ก-ง). สนามไฟฟ้าระหว่างแกปมีความเข้มสูงเมื่ออนุภาคกำลังมาบริเวณดังกล่าว ทำให้การเบรกดาวนเกิดขึ้นผ่านอนุภาค.

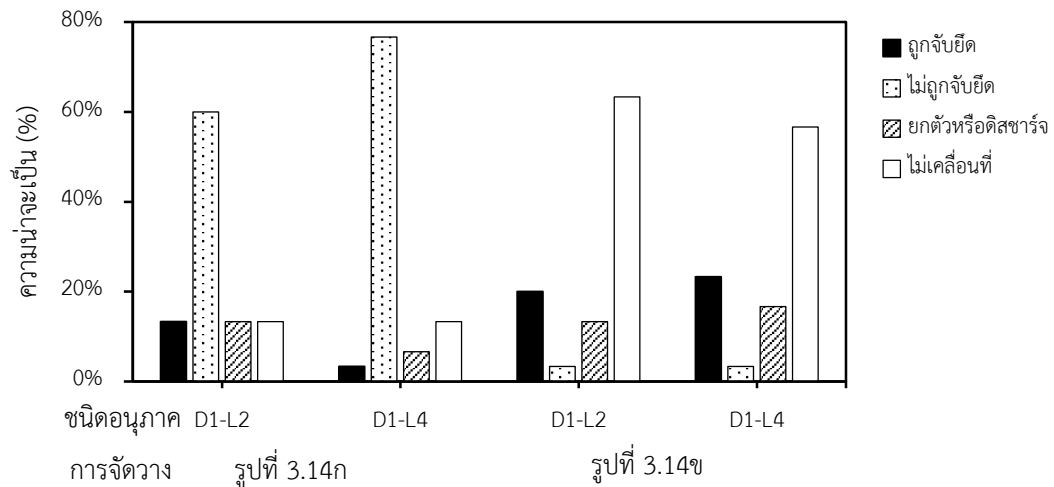
รูปที่ 6.8 แสดงพฤติกรรมของอนุภาค โดยแบ่งตามการจัดวางและขนาดของอนุภาคทรงกระบอก. อัตราที่อนุภาคถูกจับยึดต่ำกว่า 25% ของการทดลองทั้งหมด. ในกรณีที่ขอบของ PDMS อยู่ภายในแกปอิเล็กโทรดเอียง (รูปที่ 3.14ก) อนุภาคส่วนใหญ่เคลื่อนที่ผ่านขอบของ PDMS โดยไม่ถูกจับยึด ประมาณ 70% ของการทดลองทั้งหมด. ในกรณีที่ขอบของ PDMS เสมอกับขอบของอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูง (รูปที่ 3.14ข) อนุภาคไม่เคลื่อนที่เกือบ 60% ของการทดลองทั้งหมด. ระยะแกประหว่างอิเล็กโทรดแคบเกินไปอาจทำให้อนุภาคเกิดดิสชาร์จ. ประจุที่เกิดขึ้นจากการดิสชาร์จทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น. อัตราที่อนุภาคถูกจับยึดในกรณีการจัดวางตามรูปที่ 3.14ข สูงกว่า 3.14ก ประมาณ 10%. นอกจากนี้ อัตราการจับยึดไม่ขึ้นกับความยาวของอนุภาคทรงกระบอก เนื่องจากอัตราการจับยึดอนุภาคทรงกระบอกที่ $L = 2 \text{ mm}$ และ 4 mm แตกต่างกันไม่มาก.



รูปที่ 6.6 อนุภาคที่ถูกจับยึดบริเวณขอบของ PDMS



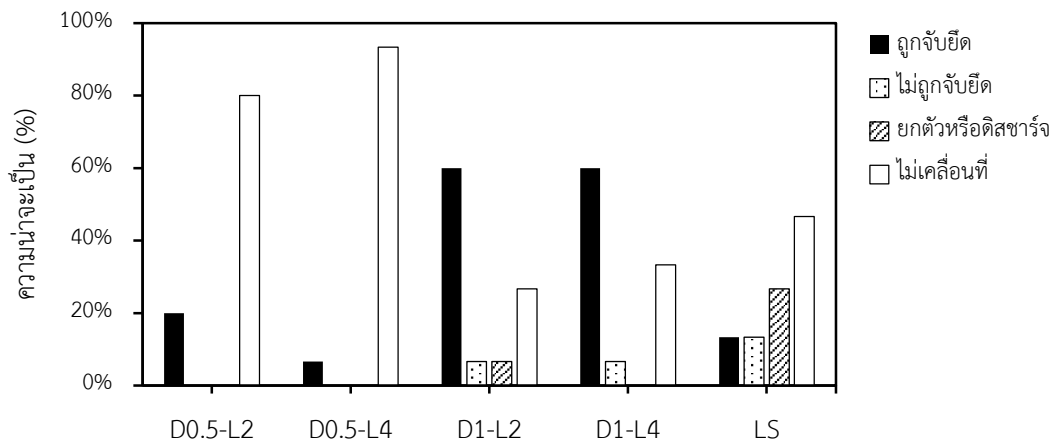
รูปที่ 6.7 ตัวอย่างการยกตัวและเกิดเบรกดาวนผ่านอนุภาคทรงกระบอก D1-L2



รูปที่ 6.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ $\beta = 15^\circ$

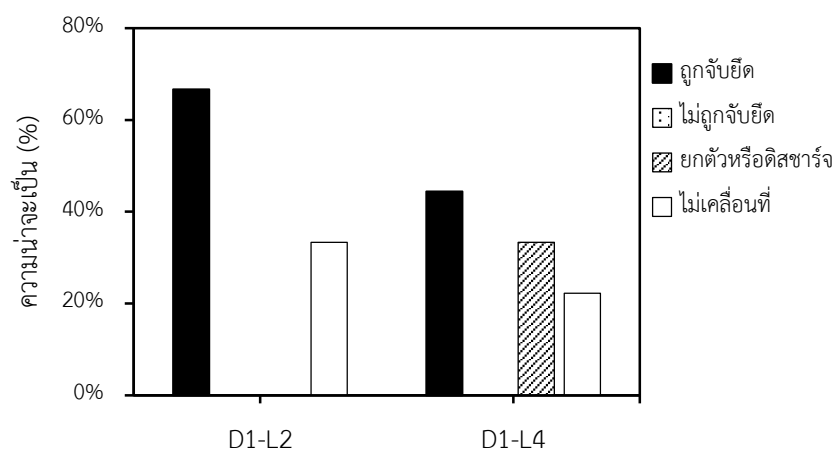
6.2.2 การทดลองที่ $\beta = 10^\circ$

อนุภาคที่เคลื่อนที่มายังขั้วมีมือมีพฤติกรรมตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.2.1. รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่จัดวางดังรูปที่ 3.15ก. อนุภาคทรงกระบอกที่มี $D = 0.5 \text{ mm}$ มีอัตราการไม่เคลื่อนที่สูงมาก ประมาณ 80% ของการทดลองทั้งหมด. แต่ถ้าหากอนุภาคนี้อ่อนนุ่มที่มายังขอบของ PDMS ก็จะถูกจับยึดได้ทั้งหมด. อนุภาคที่มี $D = 1 \text{ mm}$ มีอัตราการถูกจับยึดเพิ่มขึ้นจากกรณี $\beta = 15^\circ$ โดยมีค่าประมาณ 60% ของการทดลองทั้งหมด. อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมเกิดเบรกดาวนซ์ขึ้น 4 ครั้ง หรือคิดเป็น 27% จากการทดลองทั้งหมด เนื่องจากกลิ้งมาทางขั้วมือจะยกปลายด้านหนึ่งขึ้น ทำให้ระยะแกปในอากาศลดลงและมีโอกาสเกิดเบรกดาวนซ์สูง. ในส่วนที่เหลืออนุภาคถูกจับ 2 ครั้งและกลิ้งผ่านกับดักโดยไม่ถูกจับ 2 ครั้ง โดยคิดเป็นอย่างละ 13% ของการทดลองทั้งหมด. ในกรณีที่อนุภาคกลิ้งผ่านกับดักโดยไม่โดนจับ อนุภาคกลิ้งมาทางขั้วมือโดยไม่ยกปลายด้านใดด้านหนึ่งสูงขึ้น แรง F_{DEP} บนอนุภาคจึงไม่สูญเสียไปกับการยกปลายขึ้นและทำให้อนุภาคสามารถกลิ้งด้วยความเร็วที่มากกว่าอนุภาคที่ยกปลายขึ้น. อนุภาคที่กลิ้งด้วยความเร็วสูงจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณกับดักไปได้โดยไม่ถูกจับ.



รูปที่ 6.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ $\beta = 10^\circ$ เมื่อจัดวางดังรูปที่ 3.15ก

รูปที่ 6.10 แสดงผลการทดลองการดักจับอนุภาคทรงกระบอก $D = 1$ mm ที่ $\beta = 10^\circ$ เมื่อจัดวางดังรูปที่ 3.15ข. อนุภาคมีอัตราการถูกจับยึดสูง. อนุภาค $L = 2$ mm ที่กึ่งมายังบริเวณขอบขอบ PDMS ถูกจับยึดได้ทั้งหมด. อนุภาค $L = 2$ mm มีอัตราการถูกจับยึด 67% ของการทดลองและสูงกว่าอนุภาค $L = 4$ mm (44% ของการทดลอง). อนุภาค $L = 2$ mm ไม่มีการเกิดเบรกดาวน. อนุภาค $L = 4$ mm มีอัตราการเกิดเบรกดาวน ประมาณ 33% ของการทดลองทั้งหมด. อนุภาค $L = 4$ mm ยกปลายด้านหนึ่งสูงขึ้น เมื่ออยู่บริเวณขอบของ PDMS. เมื่อระยะแกบในอากาศลดลง การเบรกดาวนจึงเกิดขึ้นผ่านอนุภาคได้ง่ายกว่าในกรณีอนุภาค $L = 2$ mm. แต่อย่างไรก็ตาม อนุภาค $D = 1$ mm มีอัตราการถูกจับยึดต่ำกว่าเล็กน้อยและเกิดเบรกดาวนสูงกว่า เมื่อเทียบกับการทดลองที่จัดวางดังรูปที่ 3.15ก.



รูปที่ 6.10 ผลการดักจับอนุภาคที่ $\beta = 10^\circ$ เมื่อจัดวางตามรูปที่ 3.15ข

การทดลองดักจับอนุภาคมีอัตราการจัดยึดค่อนข้างต่ำและอนุภาคส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่เนื่องจากแรง F_{DEP} ตามเส้นทางการเคลื่อนที่มีค่าสูงและระยะแกปน้อยเกินไป. หากแรง F_{DEP} สูงอนุภาคสามารถกลิ้งผ่านบริเวณขอบของ PDMS โดยไม่ถูกจับยึด. การเปลี่ยนตำแหน่งของขอบ PDMS ให้เสมอกับขอบของระบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดและการลด β จะช่วยให้แรง F_{DEP} น้อยลง. นอกจากนี้การเพิ่มระยะแกปจะช่วยลดการเกิดดิสชาร์จผ่านอนุภาค โดยจะช่วยลดการสะสมของประจุบนผิวของพอลิไอไมด์.



บทที่ 7

สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษากลศาสตร์ทางไฟฟ้าของอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมเพื่อเป็นพื้นฐานของการควบคุมอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า. การทดลองทำภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสม่ำเสมอที่สร้างจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบ. อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ อนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างเป็นหลัก. แรงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือ แรงโน้มถ่วง แรงคูลอมบ์ และแรงไดโพลโทรโพริซิส. แรงคูลอมบ์จะกระทำกับอนุภาคที่สัมผัสกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์. แรงไดโพลโทรโพริซิสกระทำกับอนุภาค โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางและสนามไฟฟ้าบนแกนเอก.

อนุภาคที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเคลื่อนที่ 2 รูปแบบ. แบบที่หนึ่ง อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสแล้วยกตัวออกจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์. แบบที่สอง อนุภาคยกตัวขนานกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์. อัตราที่อนุภาคหมุนรอบจุดสัมผัสมีค่าสูง เนื่องจากการป้อนแรงดันแบบเพิ่มขึ้นทีละขั้น และสนามไฟฟ้า $E_R < E_L$ ที่ $\alpha = 0$. สนามไฟฟ้า E_R เพิ่มขึ้นตามความดันก๊าซ.

อนุภาคที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอถูกทดลองด้วย 2 กรณี. ในกรณีที่หนึ่ง อนุภาคสัมผัสกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์. ในกรณีที่สอง อนุภาคถูกฉนวนจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์. การทดลองแสดงว่าอนุภาคที่สัมผัสกับอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เคลื่อนที่แตกต่างกันไปตามรูปแบบการจัดวาง. อนุภาคที่จัดวางโดยให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอกเคลื่อนที่โดยเริ่มจากการหมุนรอบจุดสัมผัสและการยกตัวขนาน เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ. ในกรณีที่อนุภาคเริ่มหมุนรอบจุดสัมผัส อนุภาคส่วนใหญ่เริ่มยกตัวจากปลายด้านใน เนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณปลายด้านในมีค่าสูงกว่าปลายด้านนอก. อนุภาคที่จัดวางโดยให้สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอกสามารถเคลื่อนที่ด้วยการกลิ้งไปยังบริเวณที่มีระยะแกบแคบกว่า นอกเหนือจากการหมุนรอบจุดสัมผัสและการยกตัวขนาน. ในกรณีที่อนุภาคอยู่บนฉนวน อนุภาคที่จัดวางโดยให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงบนแกนเอกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของฉนวนกับอนุภาคมีค่ามากเกินไป. สำหรับการจัดวางโดยให้สนามไฟฟ้าคงที่บนแกนเอก อนุภาคเคลื่อนที่ 2 แบบ คือ การหมุนในแนวระดับ และการกลิ้งไปยังบริเวณที่มีระยะแกบแคบกว่า. อัตราการกลิ้งในอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมขนาดเล็กต่ำกว่าอนุภาคทรงกระบอก เนื่องจากอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมขนาดเล็กส่วนใหญ่หมุนในแนวระดับ.

การดักจับอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออาศัยการเคลื่อนที่บนฉนวนของอนุภาคและสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของฉนวน. ฉนวนที่ใช้มีฉนวนพอลิไอไมด์ยื่นออกมาจากขอบของ PDMS. อนุภาคกลิ้งมายังบริเวณที่แกบแคบกว่าและถูกจับยึดบริเวณขอบของ PDMS. การทดลองแสดงให้เห็น

ว่า อัตราที่อนุภาคถูกจับยึดค่อนข้างต่ำและอัตราที่อนุภาคไม่เคลื่อนที่ค่อนข้างสูง. การเพิ่มประสิทธิภาพในการจับยึดทำได้โดยการเพิ่มระยะแกป เพื่อลดโอกาสเกิดตีสหาร์ระหว่างอิเล็กโทรด.



รายการอ้างอิง

1. Meinecke, H., *An overview of High voltage gas insulated switchgear*, in *IEE Colloquium on Gas-Insulated Switchgear (GIS) at transmission and distribution levels*. 1995, IEE, Savoy Place, London WCPR OBL. UK.: Nottingham. p. 3/1 - 3/8.
2. Schoffner, G., D. Kunze, and I. Smith. *Gas insulated transmission lines- successful underground bulk power transmission for more than 30 years*. in *AC and DC Power Transmission, 2006. ACDC 2006. The 8th IEE International Conference on*. 2006.
3. *Gas-insulated transmission lines (GIL)*. 2012, Siemens AG: Erlangen, Germany. p. 7.
4. Boggs, S.A., *Electromagnetic Techniques for Fault and Partial Discharge Location in Gas-Insulated Cables and Substations*. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1982. **PAS-101**(7): p. 1935-1941.
5. Dale, S.J. and M.D. Hopkins, *Methods of Particle Control in SF6 Insulated CGIT Systems*. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1982. **PAS-101**(6): p. 1654-1663.
6. Sakai, K., et al., *Conducting particle motion and particle-initiated breakdown in dc electric field between diverging conducting plates in atmospheric air*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1999. **6**(1): p. 122-130.
7. Sakai, K.I., et al. *Lateral motion of wire particles toward decreasing electrode gap regions in atmospheric air*. in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on*. 2000.
8. Techaumnat, B., H. Viet Quoc, and K. Hidaka, *Three-dimensional electromechanical analysis of a conducting prolate spheroid on a grounded plane*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2014. **21**(1): p. 80-87.

9. Morcos, M.M., et al., *Insulation integrity of GIS/GITL systems and management of particle contamination*. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2000. **16**(5): p. 25-37.
10. Morcos, M.M., et al., *Dynamics of metallic particle contaminants in GIS with dielectric-coated electrodes*. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2000. **15**(2): p. 455-460.
11. Diessner, A. and J.G. Trump, *Free Conducting Particles in a Coaxial Compressed-Gas-Insulated System*. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1970. **PAS-89**(8): p. 1970-1978.
12. Viet Quoc, H., *Study on the electromechanics of non-spherical particles under electric field in dielectric system*, in *Electrical Engineering*. 2013, Chulalongkorn University. p. 138.
13. Jones, T.B. and T.B. Jones, *Electromechanics of particles*. 2005: Cambridge University Press.
14. Griffiths, D.J., *Introduction to Electrodynamics*. 2014: Pearson Education.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ตัวนำทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้า

แรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นบนตัวนำทรงกลมที่อยู่บนระนาบกราวนด์ [6]

$$F_E = 0.832|q_{ind}|E_0 \quad (ก1)$$

โดยที่ q_{ind} คือ ประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำบนตัวนำทรงกลม ซึ่ง

$$q_{ind} = \frac{2}{3}\pi^3\epsilon_m R^2 E_0 \quad (ก2)$$

แรงคูลอมบ์อยู่ในทิศพุ่งขึ้นจากระนาบกราวนด์ โดยขนาดของแรงคูลอมบ์จะแปรผันตามกำลังสองของรัศมีของทรงกลมและสนามไฟฟ้าภายนอก. ประจุของตัวนำทรงกลมจะขึ้นอยู่กับรัศมีของทรงกลมกำลังสองและสนามไฟฟ้าภายนอก. หากสนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศพุ่งออกจากระนาบกราวนด์ ตัวนำที่อยู่บนระนาบกราวนด์จะมีประจุรวมเป็นบวก. ในทางกลับกัน หากสนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศเข้าสู่ระนาบ ตัวนำที่อยู่บนระนาบกราวนด์จะมีประจุรวมเป็นลบ. ตารางที่ ก1 แสดงขนาดของประจุเหนี่ยวนำและแรงคูลอมบ์บนตัวนำทรงกลม โดยให้ขนาดของสนามไฟฟ้า $E_0 = 1 \text{ kV/mm}$.

แรงไดโพลเล็กโพลาไรเซชันของตัวนำทรงกลมเริ่มคำนวณจากการหาไดโพลสมมูลของตัวนำทรงกลม. พิจารณาฉนวนทรงกลมที่มีรัศมี R ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก E_0 อยู่ในตัวกลางที่มีสภาพยอม ϵ_m ดังรูปที่ ก1. ไดโพลสมมูลที่เกิดขึ้นบนฉนวนทรงกลมนี้ เท่ากับ [13]

$$p_{eff} = 4\pi\epsilon_m KR^3 E_0 \quad (ก3)$$

โดยที่ K คือ ตัวประกอบคลอเซียส-มอสสอตติ (Clausius-Mossotti factor) โดย

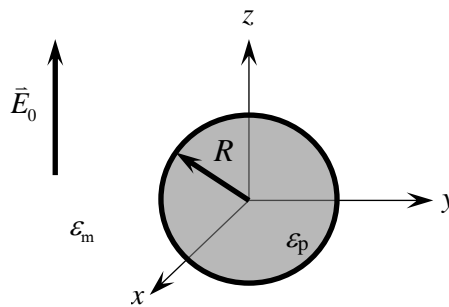
$$K = \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (ก4)$$

ในกรณีของทรงกลมที่นำไฟฟ้า

$$K = \frac{\sigma_p - \sigma_m}{\sigma_p + 2\sigma_m} \quad (ก5)$$

ตารางที่ ก1 ขนาดของประจุเหนี่ยวนำและแรงคูลอมบ์บนตัวนำทรงกลม

R (mm)	q_{ind} (C)	F_E (N)
1	1.832×10^{-10}	1.525×10^{-4}
2	7.330×10^{-10}	6.098×10^{-4}
4	2.932×10^{-9}	2.439×10^{-3}



รูปที่ ก1 ฉนวนทรงกลมที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก

โดยที่ σ_p และ σ_m คือ สภาพนำของตัวนำทรงกลมและตัวกลางที่ล้อมรอบตัวนำทรงกลม ตามลำดับ. หากพิจารณาตัวนำสมบูรณ์ (perfect conductor) $\sigma_p/\sigma_m \rightarrow \infty$. ดังนั้น เราสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\lim_{\sigma_p/\sigma_m \rightarrow \infty} K = \lim_{\sigma_p/\sigma_m \rightarrow \infty} \frac{\sigma_p - \sigma_m}{\sigma_p + 2\sigma_m} = 1 \quad (\text{ก6})$$

ไดโพลสมมูลของตัวนำทรงกลมจึงมีค่าเท่ากับ

$$p_{\text{eff}} = 4\pi\epsilon_m R^3 E_0 \quad (\text{ก7})$$

โดยไดโพลสมมูลที่เกิดขึ้นจะมีทิศขนานกับสนามไฟฟ้าภายนอก.

พิจารณาระบบพิกัดเชิงขั้ว (r, θ, ϕ) ของจุด P ดังรูปที่ ก2 โดยที่ r, θ และ ϕ คือ ระยะจากจุดกำเนิด มุมเชิงขั้วและมุมอะซิมุท. ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y, z) กับพิกัดเชิงขั้ว (r, θ, ϕ) [14]

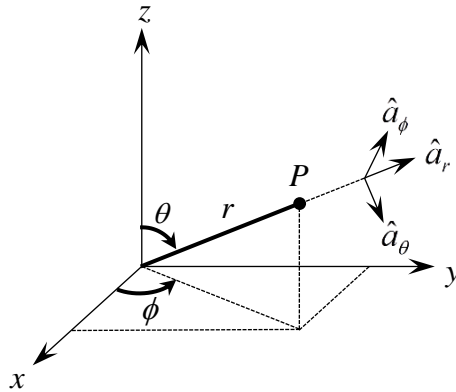
$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi \\ y &= r \sin \theta \sin \phi \\ z &= r \cos \theta \end{aligned} \quad (\text{ก8})$$

ตัวนำทรงกลมรัศมี R อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ. สนามไฟฟ้าจะผลักให้ประจุบวกไปบริเวณผิวด้านบนและให้ประจุลบไปอยู่บริเวณผิวด้านล่าง ดังรูปที่ ก2. เงื่อนไขค่าขอบ คือ

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad V &= 0 \text{ เมื่อ } r = R \\ \text{(ii)} \quad V &\rightarrow E_0 r \cos \theta \text{ สำหรับ } r \gg R \end{aligned} \quad (\text{ก9})$$

จากผลเฉลยทั่วไปของสมการศักย์ไฟฟ้า เราจะได้ว่า

$$V(r, \theta) = -E_0 \left(r - \frac{R^3}{r^2} \right) \cos \theta \quad (\text{ก10})$$

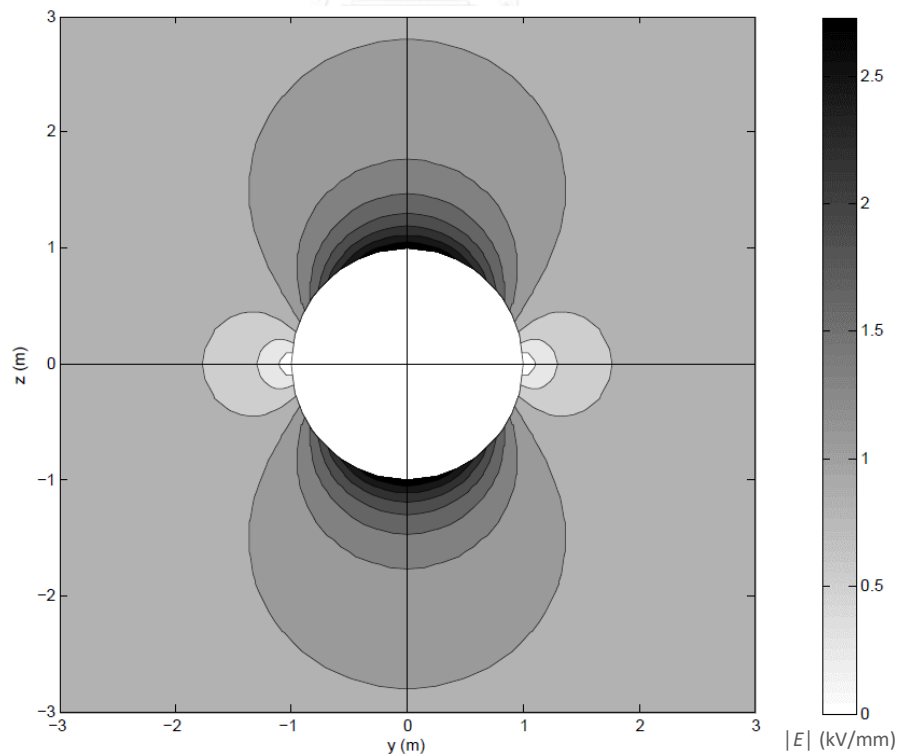


รูปที่ ก2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว

สนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็น

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial r} \hat{a}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \hat{a}_\theta\right) = E_0 \left(1 + \frac{2R^3}{r^3}\right) \cos\theta \hat{a}_r - E_0 \left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right) \sin\theta \hat{a}_\theta \quad (\text{ก11})$$

ดังนั้น ตำแหน่งที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุด คือ $(r, \theta) = (R, 0)$ กับ $(r, \theta) = (R, \pi)$ และตำแหน่งที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ $(r, \theta) = (R, \pi/2)$ กับ $(r, \theta) = (R, 3\pi/2)$ ดังแสดงในรูปที่ 3ก.



รูปที่ ก3 ผลการจำลองความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณตัวนำทรงกลม

แรงไดโพลีโทรโพเรซิสบนตัวนำทรงกลมสามารถหาได้จาก

$$\vec{F}_{DEP} = (\vec{p}_{eff} \cdot \nabla) \vec{E}_0 \quad (ก12)$$

จาก (1) และ (6) จะได้ว่า

$$\vec{F}_{DEP} = (4\pi\epsilon_m R^3 \vec{E}_0 \cdot \nabla) \vec{E}_0 = 2\pi\epsilon_m R^3 \nabla E_0^2 \quad (ก13)$$

จากความสัมพันธ์

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{a}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{a}_\theta \quad (ก14)$$

จะได้ว่า

$$\vec{F}_{DEP} = 2\pi\epsilon_m R^3 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V^2}{r^2 \theta^2} \right) \hat{a}_r = -4\pi\epsilon_m R^3 \frac{E_0^2}{r} \hat{a}_r \quad (ก15)$$

สมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแรงไดโพลีโทรโพเรซิสทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศ $-\hat{r}$ และขนาดของแรงไดโพลีโทรโพเรซิสขึ้นอยู่กับรัศมีของทรงกลมกำลังสาม สนามไฟฟ้าภายนอกกำลังสองและระยะจากจุดกำเนิด.

ภาคผนวก ข การเตรียมฉนวน PDMS

1. การทำความสะอาดแก้วสไลด์

- 1) เรียงแก้วสไลด์ (Microscope slides No. 7101, Sail brand) ในสล็อตแล้วใส่ในบิกเกอร์
- 2) เติม Isopropyl alcohol (IPA) ให้ท่วมสล็อตของแก้วสไลด์
- 3) ทำความสะอาดแก้วสไลด์ด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิกนาน 20 นาที
- 4) ล้างแก้วสไลด์ด้วยน้ำ Deionized (DI) แล้วห่อด้วยฟอยล์อะลูมิเนียม
- 5) อบแก้วสไลด์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°C นาน 20 ชั่วโมง



ก



ข



ค

รูปที่ ค1 ภาพถ่าย (ก) สล็อตของแก้วสไลด์ (ข) บิกเกอร์ที่บรรจุ IPA จนท่วมแก้วสไลด์ และ (ค) สล็อตของแก้วสไลด์ที่ถูกห่อด้วยฟอยล์อะลูมิเนียม

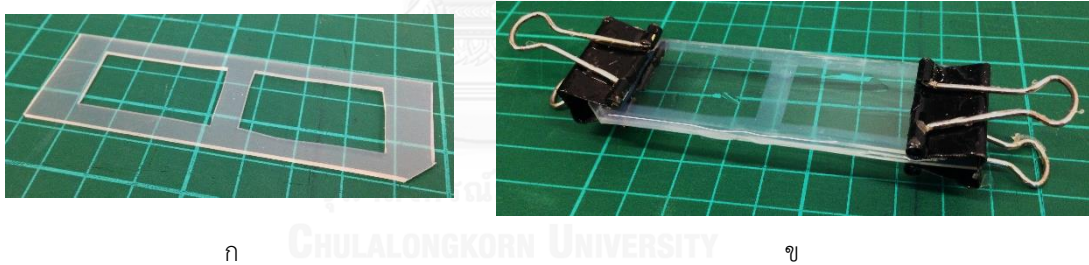
2. การเตรียมชิ้นงาน PDMS

- 1) ผสม PDMS (KE-106, Shin-Estu) กับสารเร่งปฏิกิริยา (CAT-RG, Shin-Estu) ในอัตราส่วน 10:1 โดยมวล
- 2) ไล่ฟองอากาศในสารละลาย PDMS ด้วยปั๊มสุญญากาศ
- 3) ผสมสารเคลือบผิว (Barrier coat No.6, Shin-Estu) กับ Toluene ในอัตราส่วน 1:10 โดยปริมาตร
- 4) ตัดซิลิโคนแข็งเพื่อใช้เป็นแบบหล่อด้วยโดยเลือกขนาดและความหนาตามที่ต้องการ
- 5) เคลือบสารเคลือบผิวบนแผ่นแก้วสไลด์
- 6) วางแบบหล่อบนแผ่นแก้วสไลด์แล้วเทสารละลาย PDMS
- 7) ปิดแบบหล่อแผ่นแก้วสไลด์แล้วอบนาน 20 ชั่วโมง
- 8) นำแบบหล่อออกจากตู้อบแล้วแกะแผ่นสไลด์ออก
- 9) ตัด PDMS ออกจากแบบหล่อตามขนาดที่ต้องการ

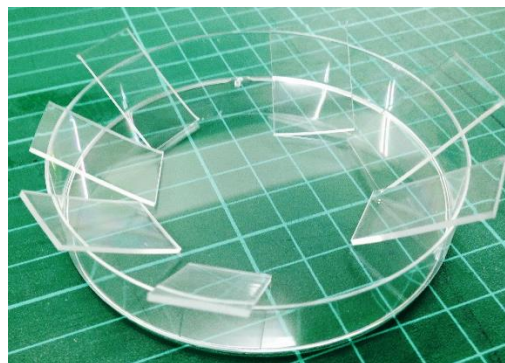
- 10) ล้างชิ้นงาน PDMS ด้วย Toluene นาน 3 นาทีด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิค
- 11) ล้างชิ้นงาน PDMS ด้วย IPA นาน 3 นาทีด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิคแล้วเป่าให้แห้ง
- 12) ทิ้งชิ้นงาน PDMS ไว้นาน 1 วัน



รูปที่ ๒2 ภาพถ่าย (ก) สารเร่งปฏิกิริยากับ PDMS (ข) การผสมสารละลาย PDMS และ (ค) สารเคลือบผิวและสารละลายของสารเคลือบผิว



รูปที่ ๒3 ภาพถ่าย (ก) แบบหล่อซิลิโคนแข็งและ (ข) ชิ้นงาน PDMS ก่อนเข้าไปอบ



รูปที่ ๒๔ ภาพถ่ายชิ้นงาน PDMS ที่มีความหนา 1.1 mm

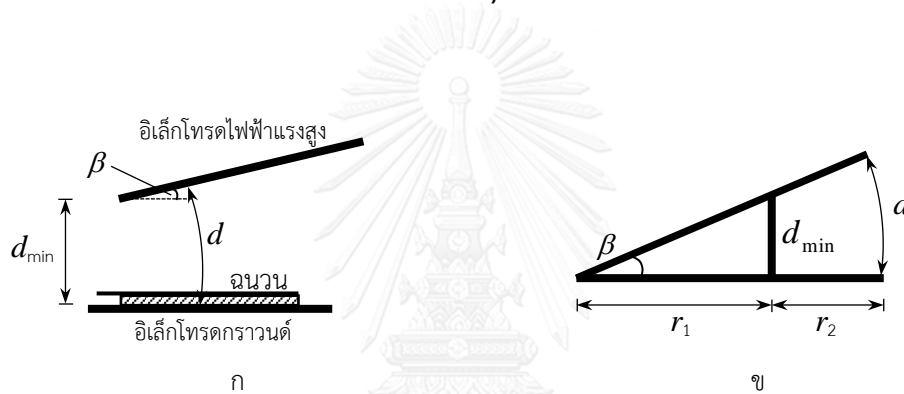
ภาคผนวก ค การคำนวณระยะแกปในระบบอเล็กโทรดแบบระนาบเอียง

พิจารณารูปที่ ค1. อเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงเอียงทำมุม β กับอเล็กโทรดกราวนด์ โดยระยะแกปที่แคบที่สุดเท่ากับ d_{\min} . ระยะแกประหว่างอเล็กโทรด ณ ตำแหน่งที่วางอนุภาค เท่ากับ

$$d = \frac{2\pi\beta}{360}(r_1 + r_2) \quad (\text{ค1})$$

โดยที่ $r_1 + r_2$ คือ ระยะจากจุดกำเนิด. r_1 คือ ระยะในแนวระดับจากจุดกำเนิดถึงขอบของอเล็กโทรด ซึ่งคำนวณได้จาก

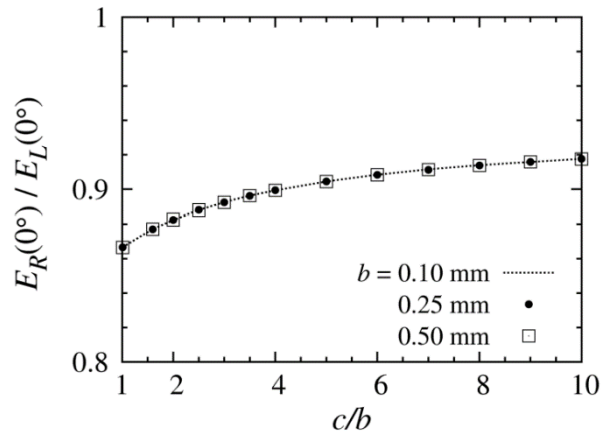
$$r_1 = \frac{d_{\min}}{\tan \beta} \quad (\text{ค2})$$



รูปที่ ค1 แผนภาพการคำนวณระยะแกป: (ก) ระบบอเล็กโทรด และ (ข) โครงร่างเรขาคณิต

ภาคผนวก ง อัตราส่วนของ E_R/E_L ที่ $\alpha = 0$

วิทยานิพนธ์ของ V.Q. Huynh พิจารณาอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างที่ทำมาจาก อะลูมิเนียมภายใต้สนามไฟฟ้า [12]. ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้แสดงอัตราส่วนของ E_R/E_L ที่ $\alpha = 0$ โดยมีลักษณะตามรูปที่ ง1.



รูปที่ ง1 อัตราส่วนของ E_R/E_L ที่ $\alpha = 0$ ของอนุภาคอะลูมิเนียมที่มี b ต่างกัน [12]

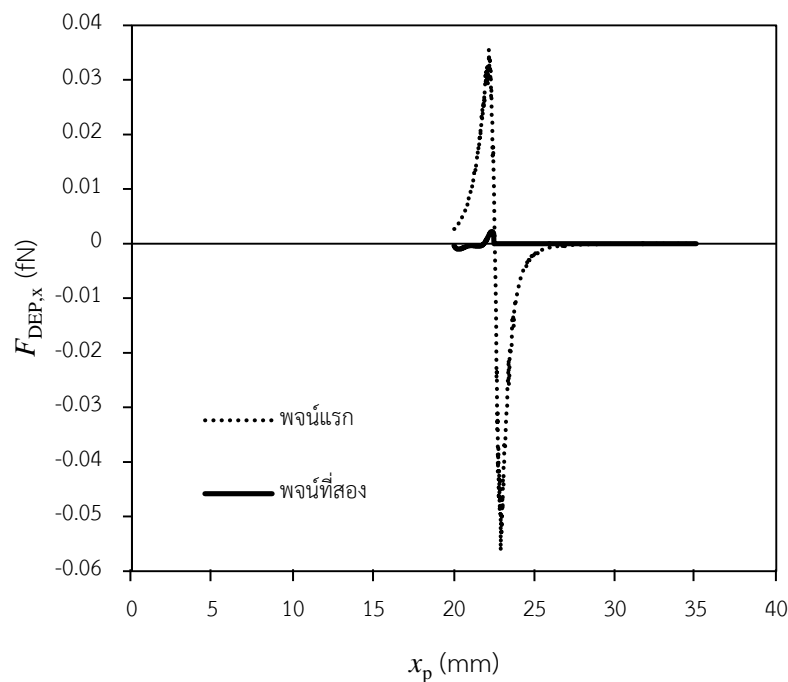


ภาคผนวก จ การคำนวณแรงไดโพลีโทรโพเรซิสของอนุภาคในการทดลองดักจับอนุภาค

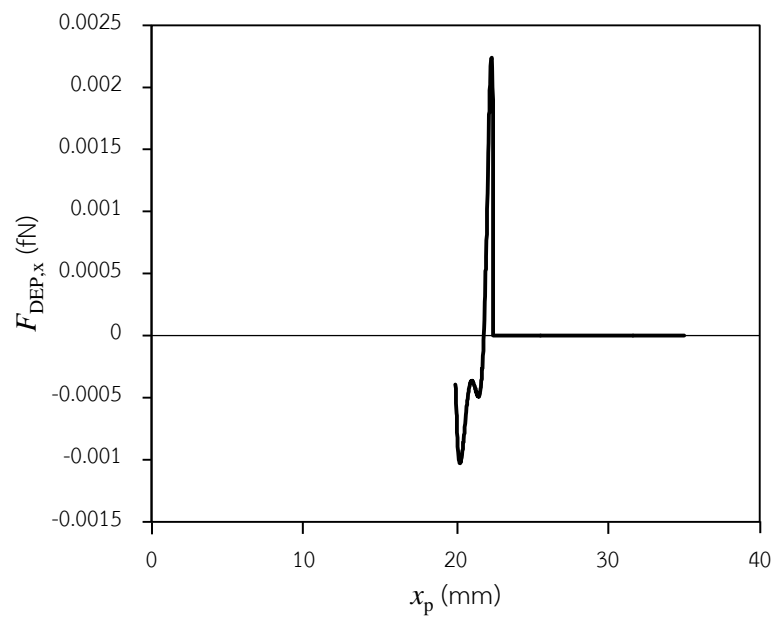
พิจารณาอนุภาคตัวนำทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างขนาดเล็กบนฉนวนในกรณี $\beta = 10^\circ$. อนุภาคจะกลิ้งตามเส้นทางที่ $20 < x < 35$ mm. $F_{DEP,x}$ ของอนุภาคที่อยู่บนฉนวนสามารถคำนวณได้จาก p_{eff} ดัง (2.16) โดยมีค่าเท่ากับ

$$F_{DEP,x} = p_{eff,x} \frac{\partial E_{0,x}}{\partial x} + p_{eff,z} \frac{\partial E_{0,x}}{\partial z} \quad (จ1)$$

ผลการคำนวณพจน์แรกกับพจน์ที่สองแสดงดังรูปที่ จ1. พจน์ที่สองมีค่าต่ำกว่าพจน์แรกมาก และสามารถละเลยจากการคำนวณแรง $F_{DEP,x}$ ได้. รูปที่ จ2 แสดงพจน์ที่สองของคำนวณแรง $F_{DEP,x}$. ขนาดสูงสุดของพจน์ที่สองต่ำกว่า 0.0025 fN ซึ่งถ้าเทียบขนาดของพจน์แรกที่ x เดียวกัน (≈ 0.035 fN) มีค่าต่ำกว่า โดยคิดเป็น $\approx 7\%$ ของพจน์แรก.



รูปที่ จ1 แรง $F_{DEP,x}$ บนอนุภาคโดยแยกเป็นพจน์แรกและพจน์ที่สอง



รูปที่ จ2 พจน์ที่สองของแรง $F_{DEP,x}$ บนอนุภาค



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐชิน แสงศรี เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2533. จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตในสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2555. บทความที่ได้เผยแพร่ มีดังนี้

1) "การเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37), pp. 97-100, 2014.

2) "Experimental Study on the Movement of Conducting Spheroidal Particles under Electric Field in Air," Applied Mechanics and Materials, Vol. 781. pp. 351-354, 2015.

