

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

นายนิสรุต พันธุ์ศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

STUDY ON THE MOVEMENT OF CONDUCTING PARTICLES UNDER
NONUNIFORM ELECTRIC FIELD

Mr. Nisarut Phansiri

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้า
ไม่สม่ำเสมอ

โดย

นายนิศรุต พันธุ์ศิริ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. ญัฐพงศ์ ตันฑนุช)

นิศรุต พันธุ์ศิริ : การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.
(STUDY ON THE MOVEMENT OF CONDUCTING PARTICLES UNDER
NONUNIFORM ELECTRIC FIELD) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
รศ.ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ, 88 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ โดยใช้การจำลองเชิงเลขและการทดลองในระบบอิเล็กทรอนิกส์. เป้าหมายของการศึกษาคือ วิเคราะห์แรงที่กระทำต่ออนุภาค ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค และการพัฒนาวิธียึดจับอนุภาคโดยใช้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ. การเคลื่อนที่ของอนุภาคคำนวณได้จากสมการของแรงकुलอมบ์ แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า แรงโน้มถ่วง และแรงหนีศูนย์กลาง. ผลการศึกษาแสดงว่า เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ อนุภาคจะเกิดการยกตัวขึ้นจากระนาบกราวนด์ เมื่อแรงकुलอมบ์มีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วง. ในกรณีที่อนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้สองลักษณะคือ การเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์ และการยกตัวขึ้นจากระนาบกราวนด์. ผลการจำลองการเคลื่อนที่สำหรับการยกตัวขึ้นของอนุภาคแสดงว่า แรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบระหว่างอนุภาคกับอิเล็กทรอนิกส์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีค่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ซึ่งพฤติกรรมของอนุภาคสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้. การยึดจับอนุภาคทำโดยใช้ผลของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ด้วยการแทรกชั้นฉนวนในระบบอิเล็กทรอนิกส์. ผลการทดลองจับอนุภาคแสดงว่า อนุภาคจะถูกยึดจับที่รอยต่อของฉนวนและอากาศ และที่ระยะแถบของอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ำที่สุดของระบบอิเล็กทรอนิกส์. ความสามารถของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถยึดจับอนุภาคได้จะขึ้นกับพลังงานจลน์ของอนุภาค. ตัวอย่างเช่น กรณีการทดลองจับอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm มีตำแหน่งเริ่มต้นที่ระยะ $z_0 = 5$ และ 6 mm ระบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถยึดจับอนุภาคได้ 100 และ 14.2 % ตามลำดับ.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2555.....

5370269721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : NONUNIFORM ELECTRIC FIELD, CONDUCTING PARTICLE, GAS INSULATED SWITCHGEARS

NISARUT PHANSIRI : STUDY ON THE MOVEMENT OF CONDUCTING PARTICLES UNDER NONUNIFORM ELECTRIC FIELD.

ADVISOR : ASSOC. PROF. BOONCHAI TECHAUMNAT, Ph.D., 88 pp.

This thesis presents the study on the movement of spherical conducting particle under uniform and nonuniform electric field by using numerical calculation and experiment in the electrode system. The objectives are to analyze the forces acting on the particle and the trajectory of the particle and to develop the method for trapping particle by using nonuniform electric field. The movement of the particle is calculated by using the equations of Coulomb force, electrical gradient force, gravitational force and viscous force. The results show that when particle is located under uniform electric field, the particle is lifted from grounded electrode if the Coulomb force is greater than the gravitational force. When particle is located under nonuniform electric field, the particle behavior can be classified into 2 cases: (1) moving along grounded electrode and (2) lifting from grounded electrode. The results of the numerical simulation of particle levitation show that the electrical forces and the impact between the particle and the electrodes take the particle to the region of lower electric field. These results are verified by experiment. The particle trap is made by using the electrical gradient force created by inserting the insulator in the electrode system having nonuniform electric field. The experimental results show that the particle can be trapped at two regions. The former region is at the boundary between the insulator and air. The latter is at the gap minimum of the electrode system. The capability of particle trap depends on the kinetic energy of the particle. For example, in the experiment by using aluminum particle of 0.403 mm radius, the particles initially at $z_0 = 5$ and 6 mm are trapped successfully by 100 and 14.2 %, respectively.

Department : Electrical Engineering Student's Signature.....
 Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature.....
 Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมการค้นคว้าวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันมีค่า ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย. ขอขอบคุณทุนวิจัยจาก “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต” บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนสนิททั้งสี่คนที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบคุณทุกท่านที่ได้กล่าวนามไว้ในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาค้นคว้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | ท |
| บทที่ | |
| 1. บทนำและที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.1 บทนำ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... | 7 |
| 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์..... | 7 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... | 7 |
| 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ..... | 7 |
| 2. การคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ..... | 8 |
| 2.1 ประจุเหนี่ยวนำ..... | 9 |
| 2.2 แรงคูลอมบ์..... | 10 |
| 2.3 แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า..... | 11 |
| 2.4 แรงทางกลอื่นๆ..... | 12 |
| 2.4.1 แรงโน้มถ่วง..... | 12 |
| 2.4.2 แรงเสียดทาน..... | 12 |
| 2.4.3 แรงหนืด..... | 12 |
| 2.5 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำ..... | 12 |
| 2.5.1 การยกตัวของอนุภาคตามระนาบกราวนด์..... | 12 |
| 2.5.2 การเริ่มเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์..... | 13 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.6 | เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอนุภาคฉนวน..... | 16 |
| 3. | การทดลอง..... | 18 |
| 3.1 | อนุภาค..... | 18 |
| 3.2 | ระบบอิเล็กทรอนิกส์และวงจรทดลอง..... | 19 |
| 3.3 | การเตรียมแผ่นฉนวน..... | 22 |
| 3.4 | การทดลองสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต..... | 24 |
| 3.5 | การทดลองสัมประสิทธิ์การกระทบระหว่างอนุภาคกับอิเล็กทรอนิกส์..... | 26 |
| 4. | การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... | 30 |
| 4.1 | วิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... | 30 |
| 4.2 | ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... | 39 |
| 5. | ผลการทดลอง..... | 43 |
| 5.1 | ผลจากมุมของระนาบอิเล็กทรอนิกส์..... | 43 |
| 5.2 | การยกตัวขึ้นจากอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ..... | 49 |
| 5.3 | การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่วางตัวบนระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอ..... | 54 |
| 5.3.1 | การยกตัวขึ้นจากอิเล็กทรอนิกส์..... | 55 |
| 5.3.2 | การเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์..... | 58 |
| 5.4 | การเคลื่อนที่บนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ..... | 60 |
| 5.4.1 | ระบบอิเล็กทรอนิกส์เมื่อมีกาแทรกชั้นฉนวน..... | 61 |
| 5.4.2 | ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น..... | 64 |
| 5.5 | การยึดจับอนุภาคโดยใช้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ..... | 66 |
| 6. | สรุปผล..... | 76 |
| | รายการอ้างอิง..... | 78 |
| | ภาคผนวก..... | 80 |
| | ภาคผนวก ก. | 81 |
| | ภาคผนวก ข. | 83 |
| | ภาคผนวก ค. | 85 |
| | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 88 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 คุณสมบัติบัติเฉพาะทางไฟฟ้าและความหนาของฉนวน..... | 23 |
| 3.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของอนุภาคบนวัสดุที่ใช้ทดลอง..... | 25 |
| 3.3 คุณสมบัติเฉพาะของอนุภาค..... | 29 |
| 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ..... | 37 |
| 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการคำนวณ เมื่ออิเล็กโตรดกราวนด์ ทำมุมกับระนาบระดับ..... | 49 |
| 5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของ V_L เมื่อเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา T ของแรงดัน..... | 51 |
| 5.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณ เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ..... | 53 |
| 5.4 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะกระจัดของอนุภาค เมื่อกระทบอิเล็กโตรดกราวนด์ครั้งที่ 2..... | 58 |
| 5.5 ร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาคออลูมิเนียม เมื่อ $z_{\parallel} = 5.3$ mm เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง..... | 63 |
| 5.6 ร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาคออลูมิเนียม เมื่อ $z_{\parallel} = 4.3$ mm เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากชนิค 2 ขั้ว..... | 64 |
| 5.7 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนฉนวนที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับกรคำนวณ..... | 66 |
| 5.8 ความสามารถของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าที่ยึดจับอนุภาค..... | 72 |
| ค.1 ระยะ h_1 h_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากของอนุภาคออลูมิเนียม.... | 85 |
| ค.2 ระยะ h_1 h_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากของอนุภาคสแตนเลส..... | 85 |
| ค.3 ระยะ h_1 h_2 s_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนานและตั้งฉากของอนุภาคออลูมิเนียม เมื่อ $\theta = 22^\circ$ | 86 |
| ค.4 ระยะ h_1 h_2 s_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนานและตั้งฉากของอนุภาคออลูมิเนียม เมื่อ $\theta = 29^\circ$ | 86 |
| ค.5 ระยะ h_1 h_2 s_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนานและตั้งฉากของอนุภาคสแตนเลส เมื่อ $\theta = 30^\circ$ | 87 |

สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ[1] | 1 |
| 1.2 โครงสร้างหลักของสวิตช์เกียร์..... | 2 |
| 1.3 รูปแบบการจัดเรียงของตัวนำไฟฟ้าแรงสูงในระบบสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ ณ ตำแหน่งต่างๆ..... | 3 |
| 1.4 อนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า..... | 4 |
| 1.5 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบง่ายที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาค..... | 4 |
| 2.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์และอนุภาคที่ใช้พิจารณา..... | 8 |
| 2.2 อนุภาคอยู่บนระนาบกราวนด์ภายใต้สนามไฟฟ้า..... | 9 |
| 2.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในแนวแกนตั้ง..... | 13 |
| 2.4 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในระนาบกราวนด์..... | 14 |
| 2.5 V_L และ V_H ของอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$.. | 15 |
| 2.6 V_L และ V_H ของอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 10^\circ$. | 15 |
| 2.7 V_L และ V_H ของอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 15^\circ$.. | 15 |
| 2.8 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในระนาบกราวนด์บนฉนวน..... | 16 |
| 2.9 V_H ของอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ, 10^\circ$ และ 15° | 17 |
| 3.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง..... | 20 |
| 3.2 แผนภาพเค้าร่างระบบทดลอง..... | 20 |
| 3.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์..... | 21 |
| 3.4 คอมพิวเตอร์ เครื่องกำเนิดสัญญาณและออสซิลอสโคป..... | 21 |
| 3.5 เครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า..... | 21 |
| 3.6 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบคู่ขนาน..... | 22 |
| 3.7 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบคู่ขนาน..... | 22 |
| 3.8 ภาพถ่ายฉนวนสองชนิดที่นำมาใช้ในการทดลอง..... | 23 |
| 3.9 ฉนวนแบบที่ 1..... | 23 |
| 3.10 ฉนวนแบบที่ 2..... | 24 |
| 3.11 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต..... | 25 |

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.12 ภาพถ่ายจากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตบนวัสดุทดลอง..... | 25 |
| 3.13 การหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก..... | 26 |
| 3.14 ภาพถ่ายที่ได้จากการหา k_{\perp} | 27 |
| 3.15 การหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนาน..... | 28 |
| 3.16 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองหา k_{\perp} และ $k_{//}$ โดยใช้ระนาบเอียง..... | 28 |
| 4.1 ทิศทางของแรงคูลอมบ์ในทิศตั้งฉากกับเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหรือใน แนวแกน x และ z | 31 |
| 4.2 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในเหตุการณ์ที่ 1..... | 31 |
| 4.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในเหตุการณ์ที่ 2..... | 32 |
| 4.4 การกระทบระหว่างอนุภาคและอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง..... | 34 |
| 4.5 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในเหตุการณ์ที่ 4..... | 35 |
| 4.6 แผนภูมิการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... | 38 |
| 4.7 การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคอคูมิเนียม โดย $V = 4.0$ kV และ $\theta_0 = 3^\circ$ | 39 |
| 4.8 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอคูมิเนียม โดย $V = 3.01, 4.0$ และ 5.5 kV และ $\theta_0 = 3^\circ$ | 40 |
| 4.9 ระยะกระจัดของอนุภาคในแนวระดับเทียบกับเวลา โดย $V = 3.01, 4.0$ และ 5.5 kV และ $\theta_0 = 3^\circ$ | 40 |
| 4.10 ระยะกระจัดของอนุภาคอคูมิเนียมในแนวระดับจากตำแหน่งเริ่มต้น เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ, 6^\circ$ และ 9° โดย $V = 4.0$ kV..... | 41 |
| 4.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอคูมิเนียมและสแตนเลส โดย $V = 8.0$ kV และ $\theta_0 = 3^\circ$ | 41 |
| 5.1 ระบบอิเล็กโตรด..... | 44 |
| 5.2 รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดลอง..... | 44 |
| 5.3 ภาพถ่ายการยกตัวของอนุภาคจากระนาบกราวนด์..... | 44 |
| 5.4 ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์..... | 45 |
| 5.5 ภาพเค้าร่างแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... | 45 |
| 5.6 แนวผิวของระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์..... | 46 |
| 5.7 แรงที่กระทำต่ออนุภาคที่วางตัวบนอิเล็กโตรดกราวนด์ เมื่ออิเล็กโตรดกราวนด์ ทำมุม θ_g กับระนาบแนวระดับ..... | 47 |

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.8 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า V_L V_{H1} และ V_{H2} | 48 |
| 5.9 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L และ V_H | 49 |
| 5.10 การทดลองหาแรงดันไฟฟ้าที่อนุภาคยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ..... | 50 |
| 5.11 ค่าทางทฤษฎีแรงดันไฟฟ้า V_L ที่ทำให้อนุภาคยกตัวกับระยะแกป d | 50 |
| 5.12 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม เวลา 250 ms ที่ใช้ในการทดลองหา V_L ที่ระยะแกปต่างๆ..... | 52 |
| 5.13 การทดลองที่ระยะแกป 2 mm..... | 52 |
| 5.14 การทดลองที่ระยะแกป 4 mm..... | 52 |
| 5.15 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคอลูมิเนียมยกตัว..... | 53 |
| 5.16 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคสแตนเลสยกตัว..... | 53 |
| 5.17 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L และ V_H ทางทฤษฎีเป็นฟังก์ชันของ z_u ในแนวตั้งเมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ | 54 |
| 5.18 รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการสังเกตการณ์ยกตัวของอนุภาคในระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบเอียง..... | 55 |
| 5.19 ตำแหน่งของอนุภาคอลูมิเนียมและแนวการเคลื่อนที่ในระบบอิเล็กโตรด..... | 56 |
| 5.20 การกระดอนของอนุภาค เนื่องจากกระทบขอบของ PDMS เมื่อใช้ PDMS หนา 1 mm..... | 57 |
| 5.21 การหาระยะกระจัดของอนุภาค Δx_p จากตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค..... | 58 |
| 5.22 รูปคลื่นแรงดันแบบลาดชัน เวลา 400 ms..... | 59 |
| 5.23 ตำแหน่งของอนุภาคอลูมิเนียม เมื่อเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์..... | 59 |
| 5.24 ตำแหน่งของอนุภาคสแตนเลสตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์ตามลำดับเวลา..... | 60 |
| 5.25 ขนาดของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าของอนุภาคตัวนำรัศมี 0.403 mm เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ 10° และ 15° และ $V = 7.2$ kV..... | 61 |
| 5.26 ระบบอิเล็กโตรดและฉนวน..... | 62 |
| 5.27 V_H ของอนุภาคอลูมิเนียม (Al) และสแตนเลส (St) เมื่อ $\theta_0 = 15^\circ$ | 62 |
| 5.28 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดลองจากออสซิลอสโคป (10 ms/Div)... | 64 |
| 5.29 ภาพถ่ายของอนุภาคที่เคลื่อนที่บนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ..... | 65 |
| 5.30 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคอลูมิเนียมเคลื่อนที่ตามแนวระนาบบนฉนวน..... | 65 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.31 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคสแตตินเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ บนฉนวน..... | 65 |
| 5.32 แผนภาพเค้าร่างที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าทั้งสองบริเวณ..... | 67 |
| 5.33 ขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวเส้น x ของการจัดเรียงตามภาพที่ 5.32..... | 68 |
| 5.34 อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังสองของสนามไฟฟ้าตามแนวเส้น x ของการ จัดเรียงตามภาพที่ 5.32..... | 68 |
| 5.35 แผนภาพเค้าร่างตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ของอนุภาคบน ฉนวนแบบที่ 1..... | 69 |
| 5.36 ภาพจากการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 1..... | 69 |
| 5.37 รูปแบบการจัดเรียงระบบอิเล็กโตรดเพื่อให้อิเล็กตรอนอนุภาค..... | 70 |
| 5.38 แผนภาพเค้าร่างการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 2..... | 71 |
| 5.39 ภาพจากการทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 2..... | 72 |
| 5.40 แผนภาพเค้าร่างการหาความเร็วของอนุภาค..... | 73 |
| 5.41 ตัวอย่างภาพการหาความเร็วของอนุภาค ขณะที่เข้าสู่บริเวณกัก..... | 73 |
| 5.42 ความเร็วของอนุภาคโดยประมาณ ณ บริเวณรอยต่อกับตำแหน่งเริ่มต้น z_u | 74 |
| 5.43 ความเร็วของอนุภาคโดยประมาณ ณ บริเวณรอยต่อกับตำแหน่งเริ่มต้น V_H | 74 |
| ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดอนุภาค..... | 81 |
| ก.2 เครื่องอัลตราโซนิก..... | 82 |
| ก.3 ตู้อบชนิดลมร้อนที่ใช้อบอนุภาค..... | 82 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

| | |
|-----------------|--|
| D_1 | ความยาวเส้นโค้งจากตำแหน่ง x_p บนแนวเส้น X ถึงแนวอิเล็กโตรดบน |
| D_2 | ความยาวเส้นโค้งจากตำแหน่ง x_p บนแนวเส้น X ถึงแนวอิเล็กโตรดล่าง |
| E_H | สนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวระดับ |
| E_L | สนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากกระนาบกราวด์ |
| F_{fric} | แรงเสียดทาน |
| F_g | แรงโน้มถ่วง |
| F_{gd} | แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า |
| F_q | แรงคูลอมบ์ |
| F_v | แรงหนืด |
| K_{CM} | ตัวประกอบ Clausius-Mossotti |
| N | ผลรวมของแรงในแนวแกนตั้ง |
| R | จำนวนครั้งการกระทบอิเล็กโตรดกราวด์ของอนุภาค |
| T | เวลาการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ระบบอิเล็กโตรด |
| V | แรงดันไฟฟ้า |
| V_H | แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวระดับ |
| V_L | แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากกระนาบกราวด์ |
| X | แนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวน |
| a | รัศมีของอนุภาค |
| a_x, a_z | ความเร่งของอนุภาคในแนวแกน x และ z |
| d | ความหนาของฉนวน, ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน |
| g | ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง |
| h_1 | ระยะทางในแนวแกนตั้ง เมื่ออนุภาคถูกปล่อยและตกบนแท่นทดลอง |
| h_2 | ระยะทางในแนวแกนตั้ง เมื่ออนุภาคกระดอนขึ้นจากแท่นทดลอง |
| i | ลำดับการคำนวณ |
| k_{\perp} | สัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรด |
| k_{\parallel} | สัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนานระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรด |
| m | มวลอนุภาค |

| | |
|------------------------------------|--|
| p_{ind} | ไดโพลเหนี่ยวนำสมมูล |
| q_{ind} | ประจุเหนี่ยวนำ |
| r_p | ระยะที่วัดจากจุดกำเนิดจนถึงจุดกึ่งกลางของอนุภาค ณ ตำแหน่งใดๆ ในระบบ อเล็กโตรด |
| s_2 | ระยะทางในแนวระดับ เมื่ออนุภาคกระดอนจากแท่นทดลอง |
| Δt | ช่วงเวลาการคำนวณ |
| u_x, u_z | ความเร็วต้นของอนุภาคตามแนวแกน x และ z |
| v_x, v_z | ความเร็วปลายของอนุภาคตามแนวแกน x และ z |
| v_1, v_2 | ความเร็วของอนุภาคก่อน และหลังกระทบอเล็กโตรด |
| $v_{\perp,1}, v_{\perp,2}$ | ความเร็วของอนุภาคในแนวตั้งฉากก่อน และหลังกระทบอเล็กโตรด |
| $v_{\parallel,1}, v_{\parallel,2}$ | ความเร็วของอนุภาคในแนวขนานก่อน และหลังกระทบอเล็กโตรด |
| x_p | ตำแหน่งอนุภาคตามแนวแกน x |
| Δx_p | ระยะกระจัดของอนุภาคตามแนวแกน x |
| z_p | ตำแหน่งอนุภาคตามแนวแกน z |
| z_u | ความสูง ณ ตำแหน่งอนุภาคของอเล็กโตรดบน |
| θ | มุมของแท่นทดลอง |
| θ_g | มุมของระนาบอเล็กโตรดกราวด์กับแนวระดับ |
| θ_p | มุมที่วัดจากระนาบอเล็กโตรดกราวด์จนถึงแนวเส้น r_p |
| θ_0 | มุมระหว่างอเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง และอเล็กโตรดกราวด์ |
| ε_p | ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอนุภาค |
| ε_s | ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่รอบอนุภาค |
| ε_0 | สภาพยอมของสุญญากาศ |
| ε_1 | ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวน PDMS |
| ρ_p | ความหนาแน่นของอนุภาค |
| ρ_s | ความหนาแน่นของตัวกลางรอบอนุภาค |
| μ | สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต |
| β | แนวการกระดอนของอนุภาคที่ทำมุมกับระนาบระดับของแท่นทดลอง |
| η | สัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวกลาง |

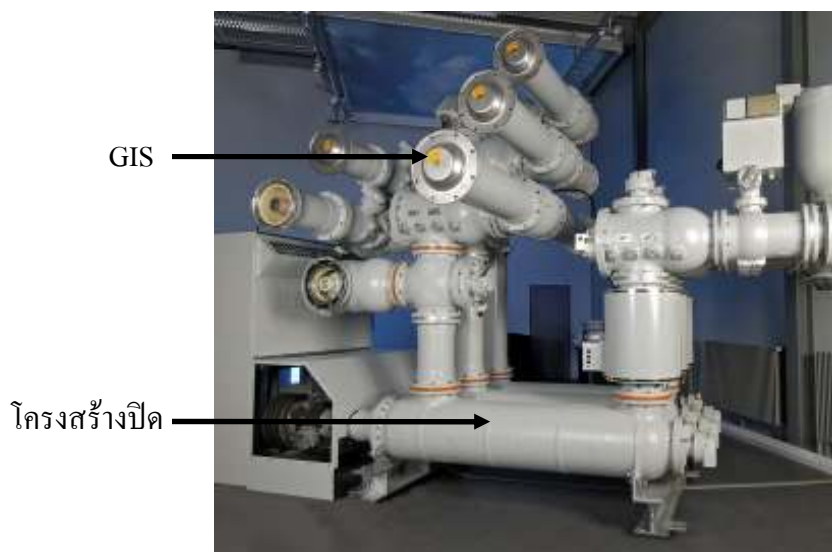
บทที่ 1

บทนำและที่มาของปัญหา

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากความจำเป็นในการใช้ประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในภาคอุตสาหกรรมการผลิต การขนส่ง การจำหน่าย และในชีวิตประจำวัน. ในอดีต โดยทั่วไปเราจะพบเห็นสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ (Air insulated Substation หรือ AIS) แต่ปัญหาประการหนึ่งที่พบคือ เมื่อมีการเพิ่มหรือขยายสถานีไฟฟ้าทำได้ยาก เนื่องจากปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจ เพราะ AIS ต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้งสถานี โดยเฉพาะในเขตชุมชน ที่ดินจะมีราคาสูงมาก และเมื่อคำนึงถึงความปลอดภัยยังทำให้การขยายหรือการสร้างสถานีไฟฟ้า AIS เป็นไปได้ยากมากยิ่งขึ้น.

เมื่อเทคโนโลยีในการออกแบบอุปกรณ์สวิตช์เกียร์สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงมีการพัฒนาดีขึ้น จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบให้บรรจุอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ในโครงสร้างปิดและบรรจุวัสดุฉนวน เช่น ก๊าซสุญญากาศ หรือน้ำมันฉนวน ไว้ภายใน ตัวอย่างเช่น สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ (Gas Insulated Switchgears หรือ GIS) ที่รู้จักกันในปัจจุบันดังแสดงในภาพที่ 1.1. โครงสร้างหลักของระบบสวิตช์เกียร์แบบปิดประกอบไปด้วย ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง ตัวถังโลหะ และฉนวนก๊าซ แสดงในภาพที่ 1.2.



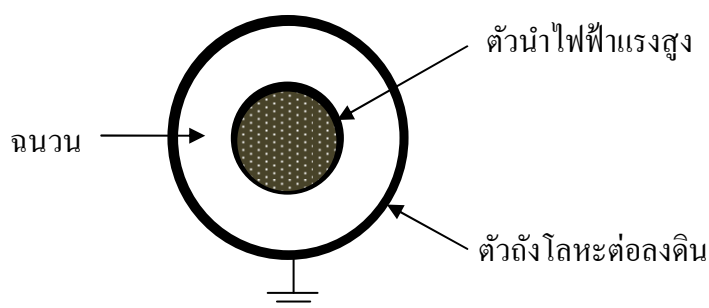
ภาพที่ 1.1 สวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ [1]

โครงสร้างหลักของสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซแสดงในภาพที่ 1.2 ประกอบด้วย

-ตัวนำไฟฟ้าแรงสูง (Bus-Bar) โดยทั่วไปทำจากอลูมิเนียมหรือทองแดง. ตัวนำไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีขนาดตามพิกัดกระแสต่อเนื่อง (Rated Continuous Current)

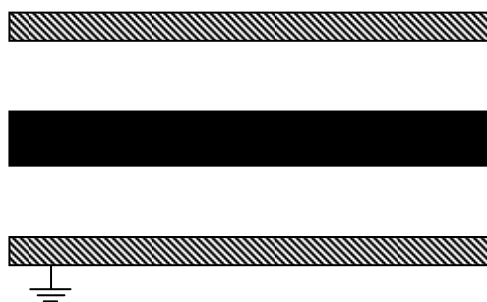
-ตัวถังโลหะ (Enclosure) โดยทั่วไปทำจากอลูมิเนียมผสมหรือเหล็ก. ตัวถังโลหะทำหน้าที่ห่อหุ้มระบบ. ตัวถังโลหะในระบบจะต้องต่อถึงกันทั้งหมดและต่อลงดิน.

-ฉนวนก๊าซ (Gas insulator) โดยทั่วไปจะใช้ก๊าซ SF₆ เนื่องจากสามารถทนค่าความเครียดสนามไฟฟ้าได้มากกว่าอากาศประมาณ 3 เท่า. ความดันของก๊าซที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน ลักษณะของท่อโลหะ และอุปกรณ์แต่ละชนิด.

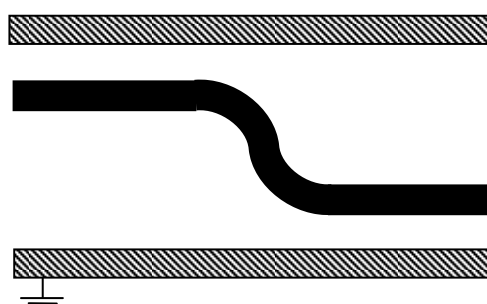


ภาพที่ 1.2 โครงสร้างหลักของสวิตช์เกียร์

นอกเหนือจากโครงสร้างหลักที่กล่าวมา ในระบบ GIS มีอุปกรณ์อื่นที่บรรจุไว้ภายในอีก เช่น สเปเซอร์ (Spacer), อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure relief device) และเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว มีผลต่อรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าใน GIS ด้วยเช่นกัน. จากภาพที่ 1.3 แสดงภาพตัดขวางตามทางยาวของรูปแบบการจัดเรียงตัวนำไฟฟ้าแรงสูงในระบบสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ ณ ตำแหน่งต่างๆ เราสามารถเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าในระบบ GIS โดยส่วนมากเป็นการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอในแก๊สระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงสูงกับกราวด์ โดยมีค่าสูงที่ตัวนำด้านใน.



(ก) แบบทรงกระบอกร่วมกัน



(ข) จุดเปลี่ยนตำแหน่ง

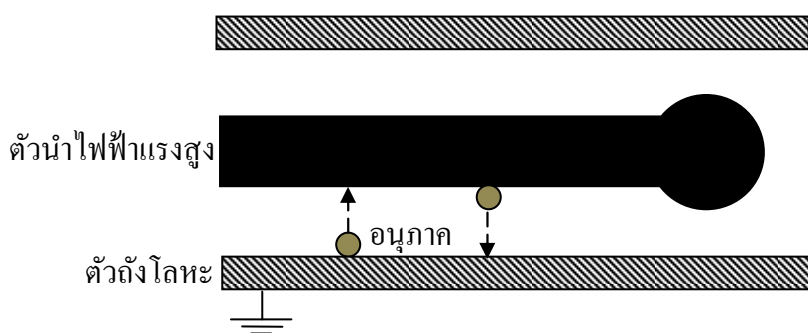


(ค) จุดปลายของตัวนำไฟฟ้าแรงสูง

ภาพที่ 1.3 รูปแบบการจัดเรียงของตัวนำไฟฟ้าแรงสูงในระบบสวิตช์เกียร์แบบฉนวนก๊าซ ณ ตำแหน่งต่างๆ

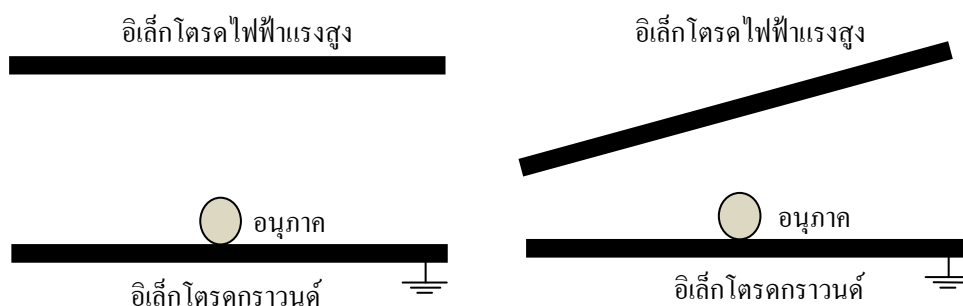
เป็นที่ทราบกันดีว่า อนุภาคตัวนำอิสระในระบบฉนวน ซึ่งอาจเกิดจากการบำรุงรักษาระบบปะปนมากับก๊าซฉนวน หรือเกิดจากการชำรุดของส่วนประกอบที่เป็นโลหะ ทำให้ความสามารถในการฉนวนของก๊าซลดลง. ทั้งนี้อนุภาคทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงสูงและกราวด์เพิ่มขึ้นเฉพาะที่ จึงอาจนำไปสู่การเกิดดีสชาร์จบางส่วน หรือเกิดการเบรกดาวน์ในระบบ [1, 2] ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้. สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำไฟฟ้าแรงสูงและตัวถังโลหะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของอนุภาคตัวนำ และทำให้เกิดแรงไฟฟ้ากระทำกับ

อนุภาคขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างประจุเหนี่ยวนำกับสนามไฟฟ้า. เมื่อแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอนุภาคมีผลเหนือกว่าแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานอื่นๆ อนุภาคตัวนำอิสระก็สามารถเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าไปในทิศทางต่างๆได้. เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปในบริเวณใดๆ จะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นมีค่าสูงขึ้นมากกว่าสนามไฟฟ้าค่าปกติ และทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดดิสชาร์จบางส่วน หรือเกิดเบรกควาน์ขึ้นได้. เนื่องจากลักษณะของสนามไฟฟ้าในระบบมีความแตกต่าง ทำให้พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อยู่ในระบบจึงมีความแตกต่างด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 1.4. ดังนั้นการศึกษาลักษณะสมบัติทางกลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อการพัฒนาระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง.



ภาพที่ 1.4 อนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า

จากโครงสร้างของระบบ GIS จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคใน GIS โดยใช้ระบบอิเล็กโตรดในภาพที่ 1.5 ซึ่งระบบประกอบด้วยอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง อิเล็กโตรดกราวด์ และอนุภาค โดยในภาพที่ 1.5ก เป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และภาพที่ 1.5ข เป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ.



(ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

(ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

ภาพที่ 1.5 ระบบอิเล็กโตรดแบบง่ายที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาค

ระบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถที่จะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ เพื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า สนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่สามารถทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ และทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งนำไปสู่สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาขึ้นในระบบ GIS และทำให้เราทราบพื้นฐานในการออกแบบระบบเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้น. ผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว.

Sakai, Tsuru, Abella และ Hara ได้แสดงพฤติกรรมของอนุภาคทรงกลมที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ และเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างอิเล็กโตรดแบบระนาบในลักษณะตามภาพที่ 1.5ข[2]. อนุภาคที่ใช้ศึกษาทำจากสแตนเลสรัศมี 1 มิลลิเมตร. อิเล็กโตรดทั้งสองทำมุม 3.5 องศาซึ่งกันและกัน. การทดลองในงานวิจัยนี้กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคบนระนาบอิเล็กโตรดกราวด์ที่แตกต่างกัน โดยมีค่า 150 ถึง 200 มิลลิเมตร (วัดจากจุดที่อิเล็กโตรดทั้งสองตัดกัน). การทดลองพบว่าที่ตำแหน่งเริ่มต้น 150 มิลลิเมตร อนุภาคจะถูกยกขึ้นทันที ที่แรงดันไฟฟ้า 14 kV และที่ตำแหน่งเริ่มต้น 180 มิลลิเมตร อนุภาคจะเคลื่อนที่ตามแนวระนาบอิเล็กโตรดกราวด์ จนถึงตำแหน่ง 155 มิลลิเมตร จากนั้นอนุภาคจะถูกยกขึ้น. ที่ตำแหน่งเริ่มต้น 200 มิลลิเมตร อนุภาคทำให้เกิดการเบรกดาวน์ที่ตำแหน่ง 150 มิลลิเมตร.

Sakai, Abella, Khan, Suehiro และ Hara ได้แสดงพฤติกรรมของอนุภาคแบบลวดภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอในลักษณะตามภาพที่ 1.5ค โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ[3]. อนุภาคที่ใช้ศึกษาทำจากสแตนเลส หรืออลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร และความยาว 2 มิลลิเมตร. พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบลวดจะเหมือนกับอนุภาคทรงกลม โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคบนอิเล็กโตรดกราวด์. ผลของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าและแรงคูลอมบ์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนอิเล็กโตรดกราวด์. เราสามารถวิเคราะห์แรงไฟฟ้าทั้งสองได้จากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคถูกยกขึ้นได้เช่นเดียวกัน.

Marcos, Zhang, Gubanski และ Srivastava ได้กล่าวถึงการพัฒนาของค่าความเป็นฉนวนในระบบ GIS ด้วยการฉนวนหรือการเคลือบด้วยสารที่มีคุณสมบัติฉนวน[4] มีความจำเป็นต่อระบบคือ 1) การเคลือบ (Coating) ที่ตัวนำไฟฟ้าแรงสูงช่วยลดความขรุขระบนผิวของตัวนำ มีผลทำให้ลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการดีสชาร์จ. 2) ความต้านทานทางไฟฟ้าของฉนวนที่นำมาเคลือบ จะช่วยต้านการเกิดดีสชาร์จในก๊าซ ซึ่งเป็นผลทำให้แรงดันเบรกดาวน์มีค่าสูงขึ้น. 3) การเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำที่ปะปนมาในระบบจะต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น เมื่อมีการเคลือบที่ตัวนำหรือกราวด์ด้วยฉนวน. 4) ผลของความดันก๊าซในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน เมื่อทดสอบด้วยอนุภาคแบบลวด

พบว่าที่ความดันก๊าซ 3-6 atm แรงดันไฟฟ้า 300 kV peak 50 Hz ความดันก๊าซดังกล่าวไม่มีผลต่อระยะการยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์. ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความดันก๊าซสูงขึ้นทำให้ความหนืดมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน. ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคยกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ค่าความหนา ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และค่าความต้านทานไฟฟ้าของฉนวนที่นำมาเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น. การเพิ่มขึ้นของค่าใดค่าหนึ่งเหล่านี้ ทำให้ลดการเหนี่ยวนำประจุที่ผิวของอนุภาค จึงส่งผลทำให้ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นเพื่อจะยกอนุภาค.

Hornfeldt ได้ศึกษาแรงที่สามารถยกอนุภาคได้ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการฉนวนด้วยแผ่นไมลาร์ (Mylar foil) บนระบบอิเล็กโตรดกราวนด์ในลักษณะตามภาพที่ 1.5ก [5]. อนุภาคที่ใช้ศึกษาทำจากอลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร. ระบบอิเล็กโตรดอัดด้วยก๊าซ SF₆. แกะระหว่างอิเล็กโตรด 10 มิลลิเมตร. การศึกษาพบว่า แผ่นไมลาร์ที่มีความหนา 18 ไมโครเมตรช่วยลดการเหนี่ยวนำประจุบนอนุภาค แต่ก็ยังมีประจุบางส่วนเกิดขึ้นเนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนระหว่างอนุภาคและแผ่นไมลาร์. อนุภาคจะถูกยกขึ้นเมื่อค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.88 MV/m ในขณะที่ไม่มีการฉนวน อนุภาคจะถูกยกขึ้นที่ 0.90 MV/m.

Sakai, Abella, Khan, Suehiro และ Hara ได้ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคในระบบอิเล็กโตรดในลักษณะตามภาพที่ 1.5ข ที่มีการฉนวนอิเล็กโตรดกราวนด์ด้วยแผ่น PET (Polyethylene Terephthalate) [6]. โดยอนุภาคที่ใช้ศึกษาทำจากสแตนเลสสตีล 1 มิลลิเมตร อิเล็กโตรดทั้งสองทำมุม 3.5 องศาซึ่งกันและกัน. แผ่น PET มีความหนา 50 ไมโครเมตร. ผลการทดลองเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าอนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์ไปทางด้านที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่าตำแหน่งปัจจุบัน. เมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณดังกล่าวทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้สองลักษณะคือ 1) อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงและเกิดการเบรกดาวน์โดยที่อนุภาคไม่ยกตัวขึ้นจากแนวระดับ 2) อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงและยกตัว หลังจากนั้นจึงเกิดการเบรกดาวน์. สาเหตุที่อนุภาคมีการยกตัว เนื่องจากอนุภาคถูกอัดประจุทำให้เกิดแรงคูลอมบ์ต่ออนุภาค แต่มีประจุอยู่ที่ประมาณ 40 % เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่อนุภาคอยู่บนอิเล็กโตรดที่ไม่มีการฉนวน.

งานวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยจะทำการวิเคราะห์ และทดลองหาความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น ที่กระตุ้นให้อนุภาคเคลื่อนที่. หลังจากนั้น จะศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ปรับรูปแบบของการกระจาย (สนามไฟฟ้า) ด้วยการจัดเรียงอิเล็กโตรด หรือด้วยการใช้ชิ้นตัวกลางฉนวนประกอบเข้าในระบบ. ผู้ศึกษาจะเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ กับผลการศึกษาเชิงวิเคราะห์เพื่อให้ได้องค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญ สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ GIS ต่อไป. นอกจากนี้

ผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ จะมีประโยชน์อย่างยิ่ง ต่อการจัดการอนุภาคอิสระในระบบฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลว โดยทั่วไป.

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมในระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและผลทดลองการสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อยืนยันผลการจำลองที่ได้. การศึกษามีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้เข้าใจถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคและผลของระดับความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค.

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยมีดังนี้

1.3.1 วิทยานิพนธ์นี้จำกัดการศึกษาเฉพาะกับอนุภาคทรงกลม

1.3.2 พิจารณาสถานการณ์ไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับความถี่กำลังเป็นหลัก

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า

1.4.2 ออกแบบอุปกรณ์ และระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่จะใช้ในการทดลอง

1.4.3 ทดลองและเปรียบเทียบผลกับทฤษฎี วิเคราะห์สาเหตุค่าความคลาดเคลื่อน

1.4.4 วิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค และหาวิธีหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอนุภาค

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

1.5.2 ได้แนวทางการควบคุมอนุภาคตัวนำอิสระ สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

บทที่ 2

การคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

หัวข้อนี้อธิบายพื้นฐานของแรงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ. ระบบอิเล็กโตรดและอนุภาคที่พิจารณาแสดงในภาพที่ 2.1. อิเล็กโตรดเป็นแบบระนาบ 2 มิติ ซึ่งทำมุมกันเท่ากับ θ_0 โดยที่ระนาบอิเล็กโตรดด้านล่างต่อกราวด์ และระนาบอิเล็กโตรดบนได้รับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย. ในการอ้างอิงตำแหน่งในระบบอิเล็กโตรดนี้. เราจะใช้ระบบพิกัดเชิงขั้ว (r, θ) หรือระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (x, z) ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดตัดระหว่างแนวระนาบอิเล็กโตรดทั้งสอง คือ

$$x = r \cos \theta \quad (2.1)$$

$$z = r \sin \theta \quad (2.2)$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของพิกัดทั้งสองสัมพันธ์กันดังนี้

$$\bar{a}_r = \frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}} \bar{a}_x + \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \bar{a}_z$$

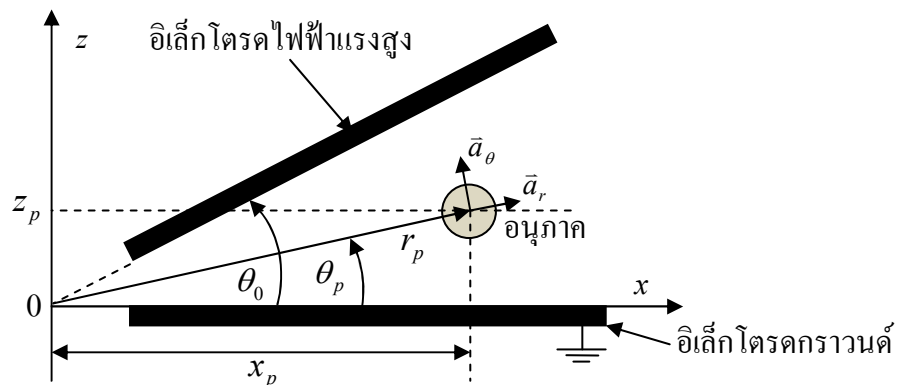
$$\bar{a}_\theta = -\frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \bar{a}_x + \frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}} \bar{a}_z$$

เมื่อเราใช้พิกัดดังกล่าวอ้างอิงตำแหน่งของอนุภาคในระบบอิเล็กโตรดนี้ จะใช้ดัชนีล่าง p กำกับไว้ คือ x_p คือ ตำแหน่งอนุภาคตามแนวแกน x

z_p คือ ตำแหน่งอนุภาคตามแนวแกน z

r_p คือ ระยะที่วัดจากจุดกำเนิดจนถึงจุดกึ่งกลางของอนุภาค ณ ตำแหน่งใดๆ ในระบบอิเล็กโตรด

θ_p คือ มุมที่วัดจากระนาบอิเล็กโตรดกราวด์จนถึงแนวเส้น r_p



ภาพที่ 2.1 ระบบอิเล็กโตรดและอนุภาคที่ใช้พิจารณา

สนามไฟฟ้าในระบบอเล็กโตรดที่ใช้พิจารณาเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ เราสามารถหาขนาดและทิศทางสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง (r, θ) ได้จาก

$$\vec{E}(r, \theta) = \frac{V}{r\theta_0} \vec{a}_\theta \quad (2.3)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบอเล็กโตรด. เมื่อพิจารณาทิศทางของสนามไฟฟ้า (ในสถานะที่ปราศจากอนุภาค) จะเห็นได้ว่า สนามไฟฟ้าในทิศ \vec{a}_r จะเท่ากับศูนย์ จะมีเพียงสนามไฟฟ้าในทิศ \vec{a}_θ เท่านั้น.

2.1 ประจุเหนี่ยวนำ

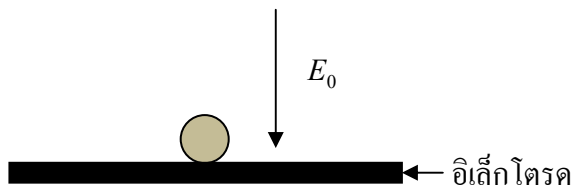
อนุภาคตัวนำที่วางอยู่บนระนาบอเล็กโตรดภายใต้สนามภายนอก E_0 จะเกิดประจุเหนี่ยวนำ q_{ind} ขึ้น. ถ้าพิจารณาอนุภาครัศมี a บนระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า E_0 ทิศทางพุ่งลงดังภาพที่ 2.2 จะได้ว่า [7]

$$q_{ind} = -\frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s E_0 a^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_s คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่รอบอนุภาคซึ่งเท่ากับ 1.0 สำหรับอากาศ

E_0 คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)



ภาพที่ 2.2 อนุภาคอยู่บนระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้า

สังเกตว่า ถ้าสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางอ้างอิงในภาพที่ 2.2 ประจุไฟฟ้าบวกจะถูกเหนี่ยวนำบนอนุภาคแทน.

สำหรับอนุภาคในภาพที่ 2.1 เมื่ออนุภาคอยู่ ณ ตำแหน่งพิกัดเชิงขั้ว (r_p, θ_p) บนระนาบอเล็กโตรด จากสมการที่ (2.3) ในกรณีทีละเลขขนาดรัศมีของอนุภาค เราจะได้ขนาดของประจุที่ถูกเหนี่ยวนำบนอนุภาค

$$q_{ind} = -\frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s a^2 \frac{V}{r_p \theta_0} \quad (2.5)$$

2.2 แรงคูลอมบ์

ประจุเหนี่ยวนำบนอนุภาคตัวนำ ซึ่งวางตัวอยู่บนระนาบอิเล็กโตรดในหัวข้อที่ผ่านมา จะเกิดแรงคูลอมบ์ F_q กระทำเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก E_0 .

เมื่ออ้างอิงแรง F_q ในทิศทาง $+z$ ขึ้นออกจากอิเล็กโตรด ขนาดของแรงเป็นไปตามสมการ [6]

$$F_q = 0.832|q_{ind}|E_0 \quad (2.6)$$

หรือ

$$F_q = (0.832)\frac{2}{3}\pi^3\epsilon_0\epsilon_s a^2 E_0^2 \quad (2.7)$$

แรงคูลอมบ์จะมีทิศทางดึงอนุภาคออกจากระนาบอิเล็กโตรดเสมอ ไม่ว่าสนามไฟฟ้าภายนอกจะมีทิศทางพุ่งลง ($V > 0$) หรือพุ่งขึ้น ($V < 0$).

เมื่อแทนค่าสนามไฟฟ้า E_0 จากสมการที่ (2.3) และ q_{ind} จากสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.6) เราจะได้ขนาดของแรงคูลอมบ์ที่กระทำกับอนุภาค ในขณะที่อนุภาควางอยู่บนอิเล็กโตรดเป็น

$$F_q = 0.555\frac{\pi^3\epsilon_0\epsilon_s a^2 V^2}{r_p^2\theta_0^2} \quad (2.8)$$

เมื่ออนุภาคตัวนำยกตัวออกจากระนาบอิเล็กโตรด ไม่สัมผัสกับระนาบอิเล็กโตรด แรงคูลอมบ์ที่กระทำกับอนุภาคสามารถประมาณได้เป็น

$$F_q = q_{ind}E_0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นในกรณีทั่วไป เมื่ออนุภาคอยู่ในแถบระหว่างระนาบอิเล็กโตรดทั้งสองในภาพที่ 2.1 โดยไม่ได้สัมผัสกับอิเล็กโตรดใด

$$\vec{F}_q = \pm\frac{2\pi^3\epsilon_0\epsilon_s a^2}{3}\frac{V^2}{r_p^2\theta_0^2}\vec{a}_\theta \quad (2.10)$$

ในสมการที่ (2.10) เครื่องหมายลบจะใช้เมื่ออนุภาคที่เคลื่อนที่ออกจากระนาบอิเล็กโตรดบน หลังจากได้รับประจุเหนี่ยวนำจากการกระทบอิเล็กโตรดบนแล้ว.

กล่าวโดยสรุปจะได้ว่า เมื่ออนุภาคอยู่บนหรือเคลื่อนที่ออกจากระนาบกราวด์ F_q จะมีทิศทางตามแนว \vec{a}_θ และเมื่ออนุภาคอยู่บนหรือเคลื่อนที่ออกจากอิเล็กโตรดด้านบน F_q จะมีทิศทางตามแนว $-\vec{a}_\theta$ โดยมีขนาดของแรงตามสมการ (2.8) หรือ (2.10)

2.3 แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า

แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าเป็นแรงที่กระทำกับอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ. พื้นฐานของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ามาจากปฏิกิริยาระหว่างสนามไฟฟ้ากับประจุเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนอนุภาค. โดยธรรมชาติของอนุภาค เมื่ออยู่ใต้สนามไฟฟ้าภายนอก จะเกิดประจุเหนี่ยวนำขึ้นที่ผิวของอนุภาค ซึ่งประจุเหนี่ยวนำนี้อาจเกิดจากโพลาริเซชัน หรือเกิดจากประจุจริงก็ได้. เราสามารถประมาณผลของประจุเหนี่ยวนำนี้ด้วยไดโพลที่จุดศูนย์กลางของอนุภาคโดยเรียกว่าเป็น ไดโพลเหนี่ยวนำสมมูล.

พิจารณาอนุภาครัศมี a ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก E_0 เราสามารถเขียนไดโพลเหนี่ยวนำสมมูล \vec{p}_{ind} ของอนุภาคได้เป็น [8]

$$\vec{p}_{ind} = 4\pi\epsilon_0 K_{CM} a^3 \vec{E}_0 \quad (2.11)$$

เมื่อ K_{CM} คือตัวประกอบ Clausius-Mossotti มีค่าเท่ากับ

$$K_{CM} = \frac{\epsilon_p - \epsilon_s}{\epsilon_p + 2\epsilon_s} \quad (2.12)$$

โดยที่ ϵ_p คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอนุภาค. ในกรณีอนุภาคตัวนำ K_{CM} จะเท่ากับ 1 เนื่องจาก ϵ_p มีค่าอนันต์.

แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า \vec{F}_{gd} คือแรงที่กระทำกับไดโพลเหนี่ยวนำสมมูลนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้า E_0 [8]

$$\vec{F}_{gd} = (\vec{p}_{ind} \cdot \nabla) \vec{E}_0 \quad (2.13)$$

$$= 4\pi\epsilon_0 a^3 \vec{E}_0 \cdot \nabla \vec{E}_0 \quad (2.14)$$

$$= 2\pi\epsilon_0 a^3 \nabla E_0^2 \quad (2.15)$$

เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า E_0 เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งพิกัด.

สำหรับระบบขั้วเล็กโดรดที่พิจารณา $E_0 = \frac{V}{r\theta_0}$. เมื่อแทนลงในสมการที่ (2.14) เราจะได้ว่า [6, 8]

$$\vec{F}_{gd} = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon_s a^3 V^2}{r^3 \theta_0^2} \vec{a}_r \quad (2.16)$$

หรือ

$$\vec{F}_{gd} = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon_s a^3 E_0^2}{r} \vec{a}_r \quad (2.17)$$

สังเกตว่า แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า มีทิศทางที่จะเคลื่อนอนุภาคตัวนำไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่าตำแหน่งปัจจุบัน.

2.4 แรงทางกลอื่นๆ

แรงทางกลอื่นๆ ที่กระทำกับอนุภาค ซึ่งพิจารณาในงานวิจัยนี้ได้แก่ แรงโน้มถ่วง \vec{F}_g แรงเสียดทาน \vec{F}_{fric} และแรงหนืด \vec{F}_v .

2.4.1 แรงโน้มถ่วง

แรงโน้มถ่วงที่กระทำกับอนุภาคในภาพที่ 2.1 มีทิศทาง $-z$ และคำนวณได้จาก

$$\vec{F}_g = -\frac{4}{3}\pi a^3 g(\rho_p - \rho_s)\vec{a}_z \quad (2.18)$$

โดยที่

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.8 m/s^2

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค. $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$ สำหรับอลูมิเนียม.

ρ_s คือ ความหนาแน่นของตัวกลางโดยรอบ. $\rho_s = 1.184 \text{ kg/m}^3$ สำหรับอากาศ.

2.4.2 แรงเสียดทาน

แรงเสียดทานเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคอยู่บนระนาบอิเล็กโตรดหรือฉนวน โดยมีทิศทางต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาค. ในสภาวะที่อนุภาคหยุดนิ่ง ขนาดของแรงเสียดทานสูงสุด F_{fric} มีค่าเป็น

$$F_{fric} = \mu N \quad (2.19)$$

เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างอนุภาคและพื้นผิว และ N คือแรงลัพธ์ที่อนุภาคกระทำกับอิเล็กโตรด. สังเกตว่า N เป็นผลรวมของแรงโน้มถ่วงและแรงไฟฟ้าในแนวตั้ง. ในการวิจัยนี้ผู้เขียนได้ทดลองหา μ ของอนุภาคและพื้นผิวจริงที่พิจารณา.

2.4.3 แรงหนืด

แรงหนืดมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค. สำหรับอนุภาคทรงกลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ภายในตัวกลางที่มีความหนืด [9]

$$\vec{F}_v = -6\pi\eta a\vec{v} \quad (2.20)$$

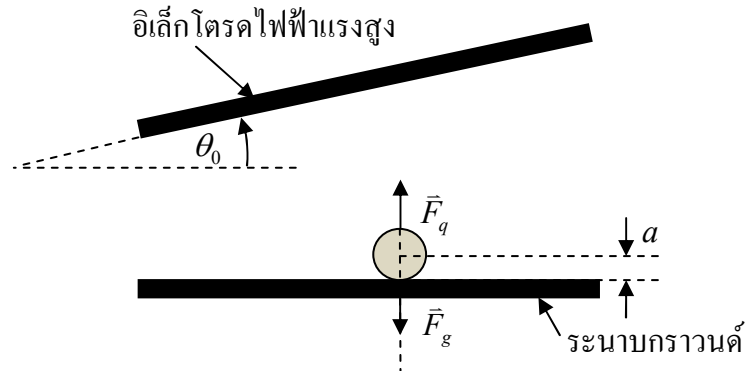
เมื่อ η คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเท่ากับ $18.2 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$ สำหรับอากาศ.

2.5 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนตัวนำ

2.5.1 การยกตัวของอนุภาคจากระนาบกราวนด์

สมมติให้อนุภาควางตัวอยู่บนระนาบกราวนด์ในการจัดเรียงตามภาพที่ 2.3 โดยมีจุดศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ที่พิกัด (x_p, a) . ดังนั้นพิกัดเชิงขั้วของจุดศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าเป็น

$$r_p = \sqrt{x_p^2 + a^2} \text{ และ } \theta_p = \tan^{-1}(a/x_p)$$



ภาพที่ 2.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในแนวแกนตั้ง

จากสมการที่ (2.7) และ (2.18) แรง \vec{F}_z ในแนวแกนตั้งที่เกิดกับอนุภาค เมื่อละเลยผลของมุม θ_p มีค่าเป็น

$$\vec{F}_z \approx \vec{F}_q - \vec{F}_g \quad (2.21)$$

อนุภาคถูกยกขึ้นจากระนาบกราวนด์เมื่อ $F_z = 0$ นั่นคือ

$$(0.832) \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_s a^2 E_0^2 = \frac{4}{3} \pi a^3 g (\rho_p - \rho_s) \quad (2.22)$$

ซึ่งได้สนามไฟฟ้าเริ่มต้น E_L ในการยกอนุภาคเป็น

$$E_L = 0.5 \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s)a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (2.23)$$

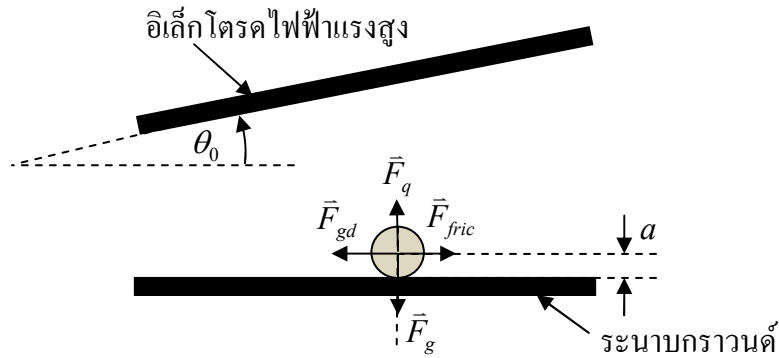
จาก $V = r_p \theta_0 E$ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L ที่ยกอนุภาคขึ้นจากระนาบกราวนด์คำนวณได้จาก

$$V_L = 0.5 r_p \theta_0 \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s)a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (2.24)$$

2.5.2 การเริ่มเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์

พิจารณาอนุภาคในภาพที่ 2.4. ถ้าเราละเลยผลของมุม θ_p เช่นเดียวกับในกรณีที่ผ่านมา แรงในแนวระดับที่กระทำกับอนุภาคได้แก่ แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า \vec{F}_{gd} และแรงเสียดทาน F_{fric} . ดังนั้นเงื่อนไขในการเริ่มเคลื่อนที่ตามแนวระดับบนระนาบกราวนด์คือ

$$\|\vec{F}_{gd}\| = F_{fric} \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2.4 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในระนาบกราวนด์

จากสมการที่ (2.7) (2.17) และ (2.18) จะได้ว่า

$$F_{gd} = \mu(F_g - F_q) \quad (2.26)$$

$$\frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_s a^3 E_0^2}{r_p} = \mu \left[\frac{4}{3}\pi a^3 g(\rho_p - \rho_s) - (0.832)\frac{2}{3}\pi^3 \epsilon_0\epsilon_s a^2 E_0^2 \right] \quad (2.27)$$

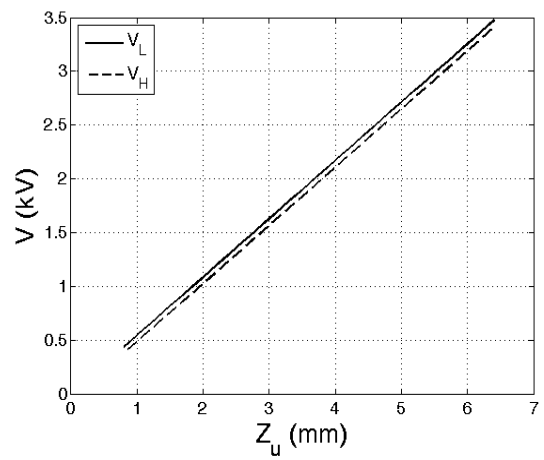
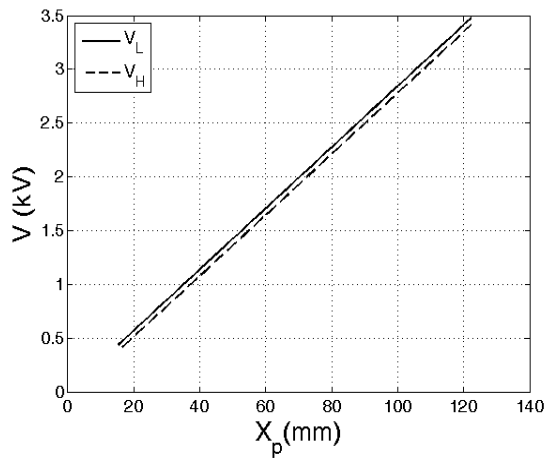
สนามไฟฟ้า E_H ที่เริ่มทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ จึงหาได้จาก

$$E_H = \sqrt{\frac{2g\mu(\rho_p - \rho_s)ar_p}{\epsilon_0\epsilon_s [6a + 0.832\mu\pi^2 r_p]}} \quad (2.28)$$

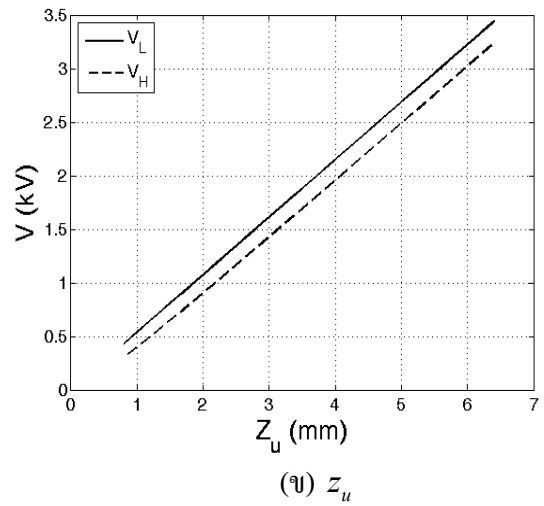
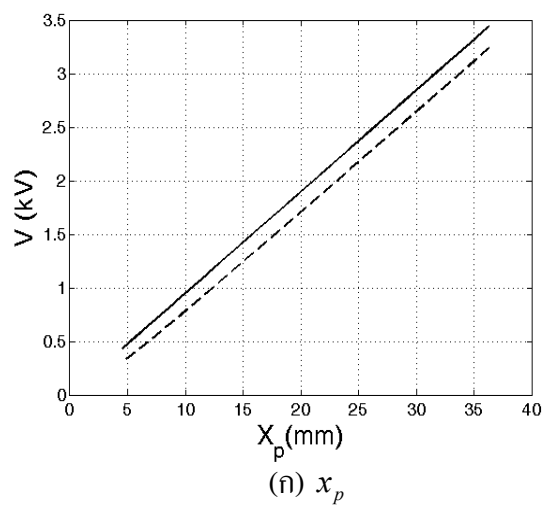
แรงดันไฟฟ้าที่ V_H ที่ระนาบอเล็กโตรดบนจึงมีค่าเป็น

$$V_H = r_p \theta_0 \sqrt{\frac{2g\mu(\rho_p - \rho_s)ar_p}{\epsilon_0\epsilon_s [6a + 0.832\mu\pi^2 r_p]}} \quad (2.29)$$

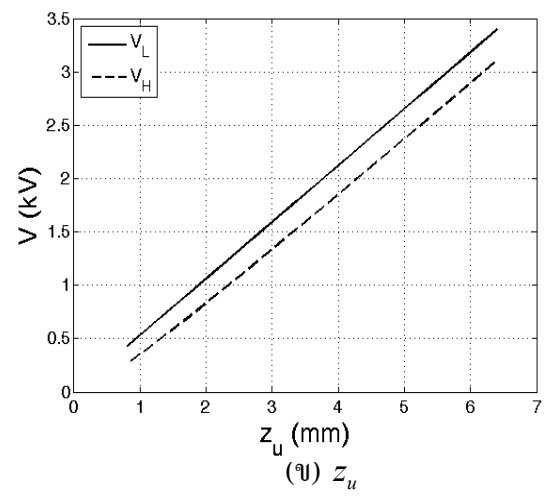
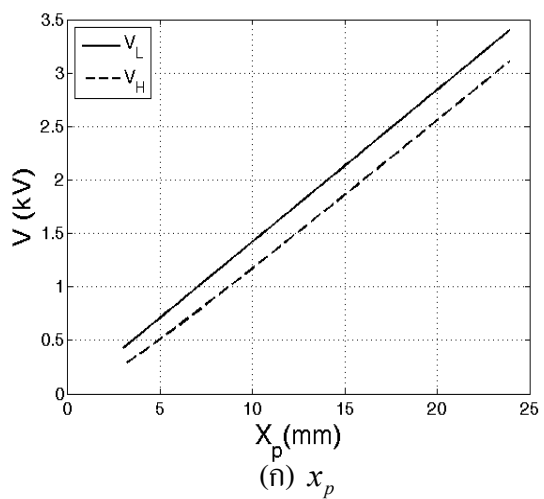
ภาพที่ 2.5 ถึงภาพที่ 2.7 เปรียบเทียบค่า V_L และ V_H ของอนุภาคออลูมิเนียมขนาดรัศมีเท่ากับ 0.403 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ เมื่อมุม θ_0 ระหว่างอเล็กโตรดเท่ากับ 3, 10 และ 15 องศา. แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นทั้งสองถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของ x_p หรือ z_u เมื่อ z_u คือความสูง ณ ตำแหน่งอนุภาคของอเล็กโตรดบนในช่วง $2a$ ถึง $16a$ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างอนุภาคกับอเล็กโตรดเท่ากับ $\mu = 0.063$ (อ้างอิงจากผลการวัดที่ได้).



ภาพที่ 2.5 V_L และ V_H ของอนุภาคคอลลูมิเนียม รัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$



ภาพที่ 2.6 V_L และ V_H ของอนุภาคคอลลูมิเนียม รัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 10^\circ$

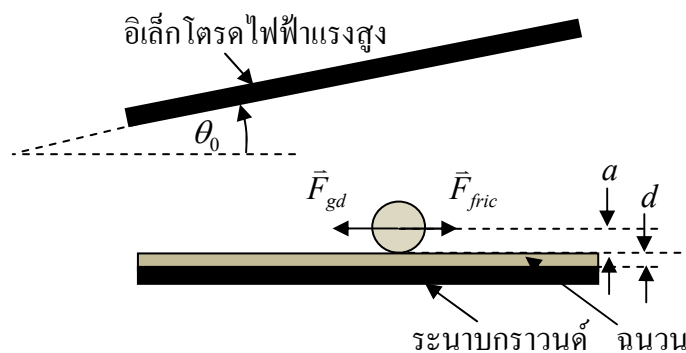


ภาพที่ 2.7 V_L และ V_H ของอนุภาคคอลลูมิเนียม รัศมี 0.403 mm $\mu=0.063$ เมื่อ $\theta_0 = 15^\circ$

จากภาพที่ 2.5 ถึงภาพที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L มีค่าสูงกว่า V_H ทุกมุม θ_0 ณ ตำแหน่ง x_p หรือ z_u ใดๆ แต่สังเกตเห็นว่า V_L และ V_H ทุกมุม θ_0 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะเมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ มี V_L กับ V_H ที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด และในทางตรงข้ามเมื่อ $\theta_0 = 15^\circ$ มี V_L กับ V_H ที่แตกต่างกันมากที่สุด. ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า เมื่อเราพิจารณาภาพ (ข) ของภาพที่ 2.5 ถึงภาพที่ 2.7 และพิจารณาแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าตามสมการที่ (2.17) เป็นฟังก์ชันของ $F_{gd} = f(E_0^2 / r_p)$. เมื่อพิจารณาที่ z_u เดียวกัน r_p ของ $\theta_0 = 15^\circ$ มีค่าน้อยที่สุด ทำให้แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด หรือกล่าวได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_H ของมุม $\theta_0 = 15^\circ$ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ มุม $\theta_0 = 3^\circ$ และ 10° ทั้งนี้จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ V_L และ V_H ของ $\theta_0 = 15^\circ$ มีค่าแตกต่างกันมากที่สุด. ทั้งนี้การเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาคตามระนาบกราวนด์เกิดขึ้นเมื่อ แรงคูลอมบ์หักล้างกับแรงโน้มถ่วง ทำให้อัตราของแรงเสียดทานมีค่าน้อย. อนุภาคจึงพร้อมที่จะเคลื่อนในแนวระดับ. (อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เราอาจไม่เห็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวระดับก่อนการยกตัวขึ้นจากระนาบอิเล็กโตรด เนื่องจากมีแรงพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ขึ้นกับขนาดของ N ด้วย.)

2.6 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวน

สมมติให้อนุภาคอยู่บนฉนวน ซึ่งฉนวนอยู่บนระนาบกราวนด์ในการจัดเรียงตามภาพที่ 2.8 อนุภาคจะไม่เกิดประจุเหนี่ยวนำ นั่นคือจะไม่มีแรงคูลอมบ์กระทำกับอนุภาค แต่จะมีเพียงแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ากระทำ. เราจะละเลยผลของมุม θ_p และความหนาของฉนวน d เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาสนามไฟฟ้าในระบบอิเล็กโตรด.



ภาพที่ 2.8 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในระนาบกราวนด์บนฉนวน

จากสมการที่ (2.25) เราสามารถเขียนสมการใหม่เป็น

$$F_{gd} = \mu F_g \quad (2.30)$$

$$\frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_s a^3 E_0^2}{r_p} = \mu \left[\frac{4}{3} \pi a^3 g (\rho_p - \rho_s) \right] \quad (2.31)$$

สนามไฟฟ้าที่เริ่มทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนฉนวน E_H หาได้จาก

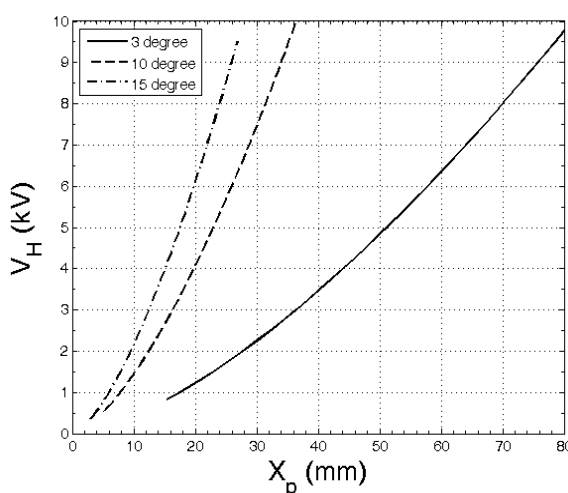
$$E_H = \sqrt{\frac{\mu g (\rho_p - \rho_s) r_p}{3\epsilon_0\epsilon_s}} \quad (2.32)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ V_H ที่ระนาบอิเล็กโทรดบนจึงมีค่าเป็น

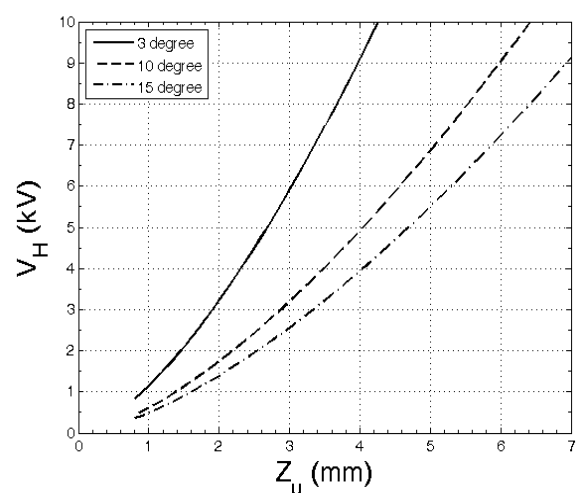
$$V_H = \theta_0 r_p^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{\mu g (\rho_p - \rho_s) r_p}{3\epsilon_0\epsilon_s}} \quad (2.33)$$

ภาพที่ 2.9 เปรียบเทียบค่า V_H ของอนุภาคเหมือนหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อมุม θ_0 ระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 3, 10 และ 15 องศา แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของ x_p และ z_u ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต μ ระหว่างอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm กับฉนวนเท่ากับ 0.068.

จากภาพที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์ในหัวข้อที่ 2.5.2 และ 2.6 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ในกรณีที่อยู่บนฉนวนมีค่ามากกว่าในกรณีที่อยู่บนตัวนำ ที่ $\theta_0 = 3^\circ, 10^\circ$ และ 15° เมื่ออนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน. ตัวอย่างเช่น เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ ที่ $z_u = 4$ mm เมื่ออนุภาคอยู่บนอิเล็กโทรด $V_H = 2.1$ kV ในขณะที่เมื่ออนุภาคอยู่บนฉนวน $V_H = 9$ kV.



(ก) x_p



(ข) z_u

ภาพที่ 2.9 V_H ของอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm $\mu = 0.068$ เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ, 10^\circ$ และ 15°

บทที่ 3

การทดลอง

ในงานงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ ทั้งในกรณีของการยกตัวขึ้นจากระนาบอิเล็กโทรดในแนวแกนตั้ง และการเคลื่อนที่ในแนวระดับตามผิวอิเล็กโทรด (ภายใต้สนามไฟฟ้า). นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอนุภาคกับระนาบอิเล็กโทรด และของอนุภาคกับพอลิอิมิด เพื่อนำไปใช้ประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่อนุภาคเริ่มต้นเคลื่อนที่ทางทฤษฎี.

การเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอิเล็กโทรดแบบระนาบเอียงที่ศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การกระทบระหว่างอนุภาคกับระนาบอิเล็กโทรด. ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์การกระทบ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคก่อน-หลังกระทบกับอิเล็กโทรด. จากค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว เราสามารถจำลองทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้อย่างสมจริงมากขึ้น.

ในบทที่ 3 นี้แสดงรายละเอียดของวัสดุ อุปกรณ์ และการจัดเตรียมการทดลอง รวมถึงการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางกลต่างๆ.

3.1 อนุภาค

อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นทรงกลมอลูมิเนียมและสแตนเลส (Micro Surface Engineering) รัศมี 0.403 mm เนื่องจากสภาวะของผิวอนุภาคมีผลอย่างมากต่อแรงยึดระหว่างอนุภาคกับตัวกลางอื่น จึงต้องมีการเตรียมทำความสะอาดอนุภาคด้วยแอซีโตน (Acetone) โดยใช้เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner, Sturdy Industrial). หลังจากนั้นนำอนุภาคไปอบในตู้อบระบบลมร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงขึ้นไป. (รายละเอียดการทำมาสะอาดอนุภาคแสดงในภาคผนวก ก)

3.2 ระบบอิเล็กทรอนิกส์และวงจรทดลอง

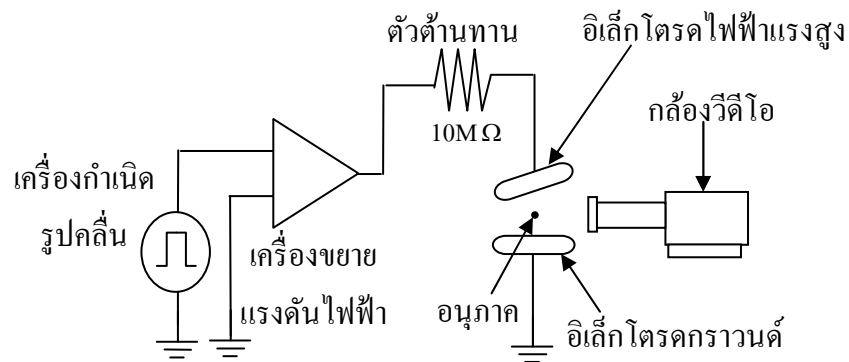
ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในกาทดลองนี้ ถูกออกแบบให้ง่ายต่อการปรับมุมและระยะระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสอง. อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ที่สำคัญในการทดลองนี้ประกอบด้วย

1. อิเล็กทรอนิกส์ทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 27 และสูง 15 mm. อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้มีการตัดให้เป็น Rogowski Profile ที่ขอบเพื่อหลีกเลี่ยงค่าสนามไฟฟ้าสูงที่ขอบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอาจทำให้เกิดประจุค้างในระบบอิเล็กทรอนิกส์ได้.
2. แท่นทดลองปรับตำแหน่งแนวแกน X-Y-Z (รุ่น XYZLNG60, Mizumi) มีช่วงตามแนว X, Y, Z เท่ากับ ± 9 , ± 10 และ ± 26 mm. ตามลำดับ โดยอิเล็กทรอนิกส์ถูกติดตั้งบนแท่นทดลองนี้.
3. แท่นทดลองปรับมุม (รุ่น GFG40, Mizumi) ปรับมุมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 15 องศา โดยอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูงถูกติดตั้งบนแท่นทดลองนี้.
4. แท่นทดลองปรับตำแหน่งแนวแกน Z (รุ่น ZSCGB80, Mizumi) จำนวน 2 ชั้น มีช่วงตามแนวแกน Z เท่ากับ 65 mm. อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูงถูกติดตั้งบนแท่นทดลองนี้ เพื่อใช้ปรับตำแหน่งแนวแกน Z ของอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูง. และอีกหนึ่งชั้นใช้เป็นแท่นเพื่อติดตั้งกล่องวิดีโอ เพื่อใช้ปรับตำแหน่งแนวแกน Z ของกล่องวิดีโอด้วยเช่นเดียวกัน.
5. กล่องวิดีโอ CCD (WAT-902H Ultimate หรือ WAT-902H Supreme, Watec)
7. ตัวต้านทานจำกัดกระแสขนาด 10 M Ω (MOX-9-10, OHMITE)
8. แผ่นทองแดง
9. เครื่องกำเนิดสัญญาณ Signal Generator (รุ่น AFG 3021B, Tektronix) แรงดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ทั้ง DC และ AC รายละเอียดครบคลื่นแรงดันไฟฟ้า ผู้วิจัยได้กล่าวไว้ในบทที่ 5.
10. เครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า Amplifier (รุ่น 610E, Trek) ขยายแรงดันได้สูงสุด 10 kV.
11. ออสซิลโลสโคป Oscilloscope (รุ่น DS1022C, RIGOL)
12. เครื่องคอมพิวเตอร์ ระบบปฏิบัติการ Windows 7

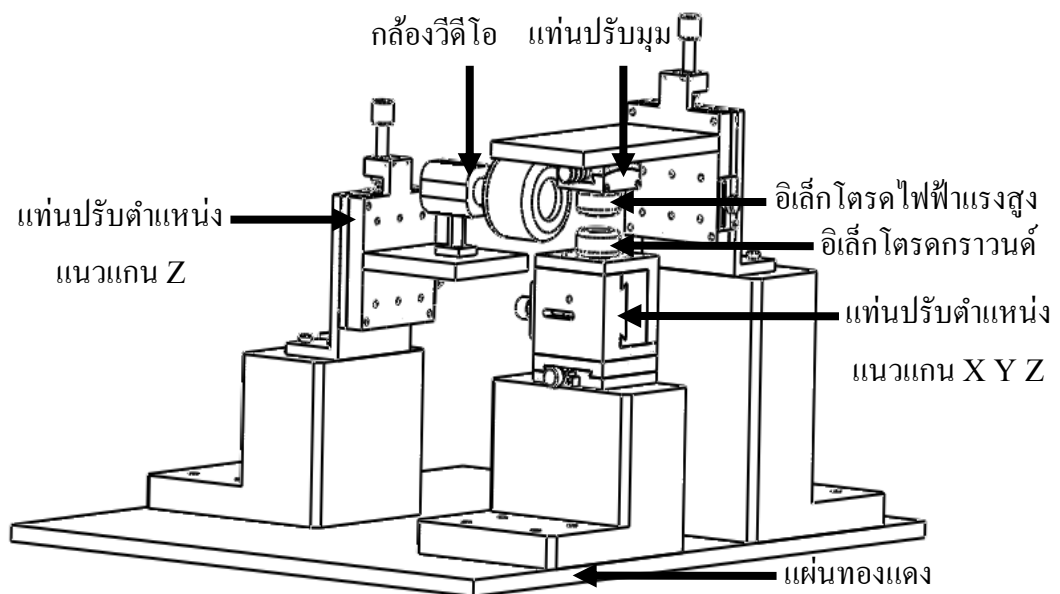
วงจรทดลองที่ใช้ในการสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคแสดงในภาพที่ 3.1 อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูงได้รับแรงดันจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (รุ่น AFG 3021B, Tektronix) และเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า (รุ่น 610E, Trek) (ผู้วิจัยใช้ออสซิลโลสโคปต่อกับเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้าเพื่อยืนยันสัญญาณแรงดันไฟฟ้า โดยสัญญาณที่แสดงบนออสซิลโลสโคปถูกลดทอนด้วยอัตราส่วน 1000:1). สัญญาณขาออกจากเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแส 10 M Ω เพื่อป้องกันระบบในกรณีเมื่อเกิดการดีสชาร์จก่อนที่จะจ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูง. พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น บันทึกด้วยกล่องวิดีโอ CCD (WAT-902H

Ultimate, Watec) ซึ่งต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์. ในภาพที่ 3.2 แสดงแผนภาพเค้าร่าง (Schematic diagram) การติดตั้งระบบทดลอง. ภาพที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายระบบอิเล็กทรอนิกส์. เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องกำเนิดสัญญาณ และออสซิลอโคป และเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ. การจัดเรียงระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบคู่ขนานและระนาบเอียงแสดงในภาพที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ.

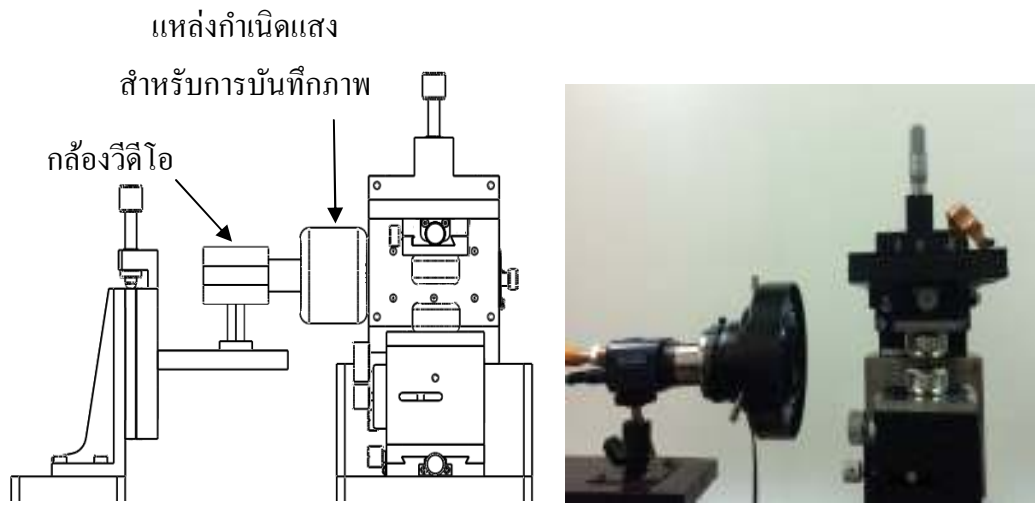
การสังเกตพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคสังเกตจากเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Ulead Videostudio 11 สามารถบันทึกภาพได้ 30 ภาพต่อวินาที (30 frames/sec). ส่วนโปรแกรมที่ใช้ในการวัดระยะเวลาเคลื่อนที่ของอนุภาค ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Auto CAD 2010.



ภาพที่ 3.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.2 แผนภาพเค้าร่างระบบทดลอง



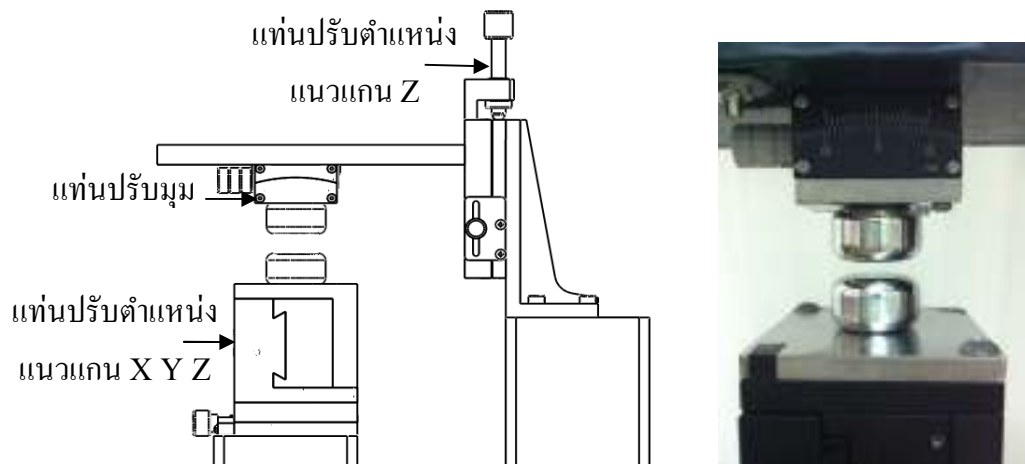
ภาพที่ 3.3 ระบบอเล็กโตรด



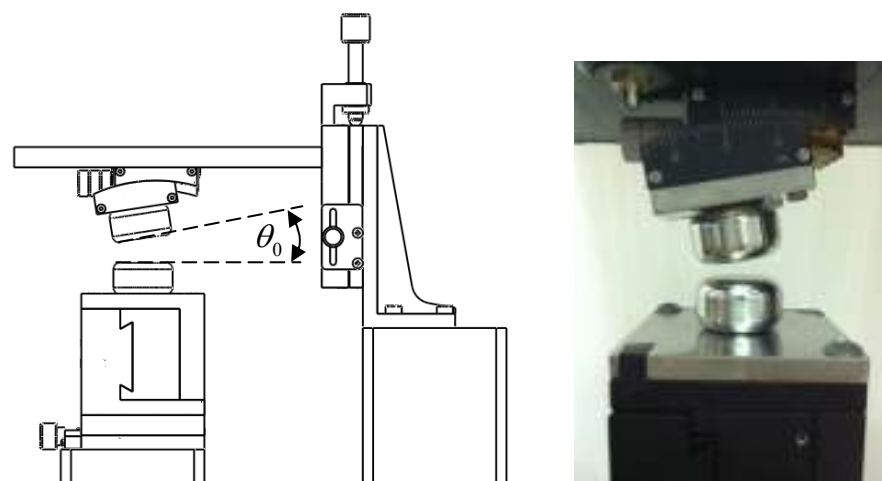
ภาพที่ 3.4 คอมพิวเตอร์ เครื่องกำเนิดสัญญาณ และออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 3.5 เครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 3.6 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบคู่ขนาน



ภาพที่ 3.7 ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบเอียง

3.3 การเตรียมแผ่นฉนวน

งานวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้แผ่นฉนวนวางบนระนาบอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ เพื่อป้องกันการอัดประจุของอนุภาค และควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค. แผ่นฉนวนที่ใช้ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ Polydimethylsiloxane หรือที่เรียกสั้นๆว่า PDMS (KE106, Shin Etsu) และพอลิอิมิด (Polyimide) ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ KAPTON (3M). ในการศึกษา PDMS จะเป็นฉนวนหลักในการศึกษาเพราะสามารถปรับความหนาได้ตามความต้องการ ส่วน KAPTON จะถูกติดบน PDMS ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวระดับได้. คุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า

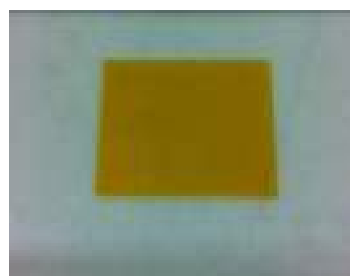
และความหนาของฉนวนทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 3.1. ลักษณะ PDMS และ KAPTON แสดงในภาพที่ 3.8ก และ 3.8ข ตามลำดับ.

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าและความหนาของฉนวน

| วัสดุ | PDMS | KAPTON |
|------------------------------|----------|--------|
| แรงดันเบรกดาวน์ (kV/mm) | 23 | 295 |
| ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก | 3.1 | 3.5 |
| ความหนาที่ใช้ในการทดลอง (mm) | 0.6, 1.0 | 0.076 |



(ก) PDMS

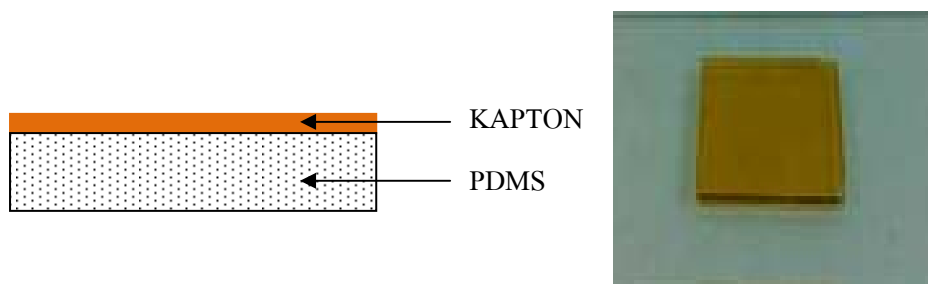


(ข) KAPTON

ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายของฉนวนสองชนิดที่นำมาใช้ในการทดลอง

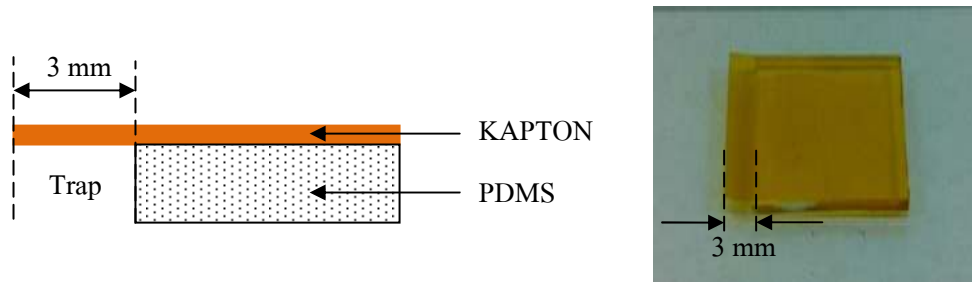
ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ใช้ในการทดลองมี 2 ลักษณะคือ

1. ฟิล์ม KAPTON ถูกติดบนแผ่น PDMS โดยให้มีความยาวเท่ากัน แสดงในภาพที่ 3.9.



ภาพที่ 3.9 ฉนวนลักษณะที่ 1

2. ฟิ์มล์ KAPTON ถูกติดบนแผ่น PDMS โดยให้ฟิ์มล์ KAPTON มีความยาวมากกว่า PDMS ประมาณ 3 mm. ผู้วิจัยเรียกกระยะที่ไม่มี PDMS อยู่ด้านล่าง KAPTON ว่า “ระยะจับยึด” (Trap) ดังแสดงในภาพที่ 3.10.



ภาพที่ 3.10 ฉนวนลักษณะที่ 2

รายละเอียดการผลิตฉนวนแสดงในภาคผนวก ข และผู้วิจัยขอกล่าวการใช้ฉนวนทั้งสองลักษณะในบทที่ 5 ต่อไป.

3.4 การทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต

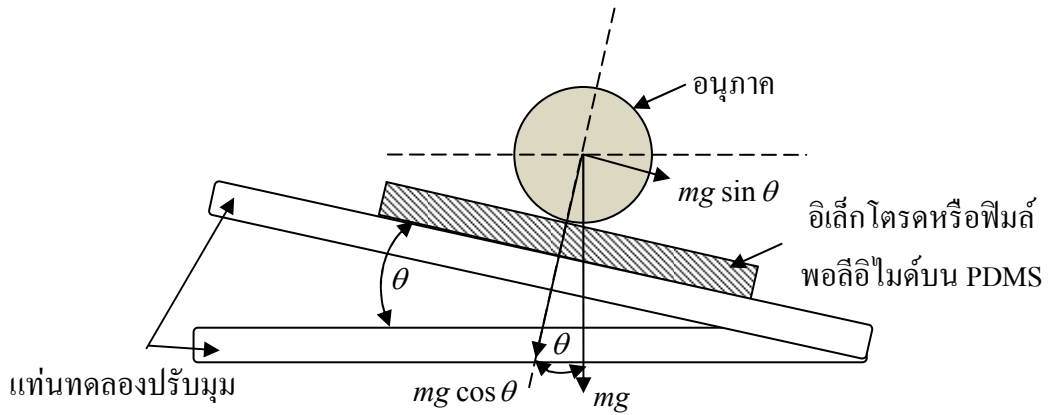
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต μ ระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรดและระหว่างอนุภาคกับฟิ์มล์พอลิอีไมด์ทำได้จากการทดลอง ซึ่งมีแผนภาพเค้าร่าง (Schematic diagram) ดังภาพที่ 3.11. ในภาพที่ 3.11 อนุภาคถูกวางอยู่บนแท่นทดลองปรับมุมได้ ซึ่งถูกปรับมุม θ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งอนุภาคเคลื่อนที่ลงตามแนวแท่นทดลอง. ภาพที่ 3.12ก และ 3.12ข แสดงภาพถ่ายของอนุภาคบนแท่นทดลองเมื่ออนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เมื่อแท่นทดลองถูกปรับเป็นมุม θ ตามลำดับ. ก่อนการทดลองผู้วิจัยเช็ดอิเล็กโตรดและ KAPTON ด้วย ethanol เพื่อทำความสะอาดพื้นผิว.

จากความสัมพันธ์ของแรง เราได้ว่า

$$mg \sin \theta = \mu mg \cos \theta \quad (3.1)$$

$$\mu = \tan \theta \quad (3.2)$$

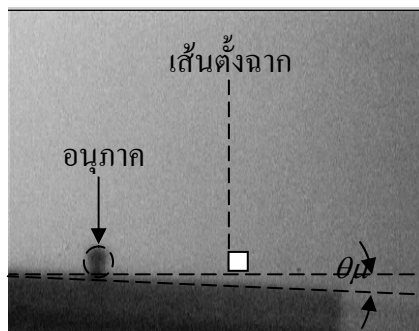
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 10 ครั้งของอนุภาค. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส รัศมี 0.403 mm มีค่าแสดงในตารางที่ 3.2.



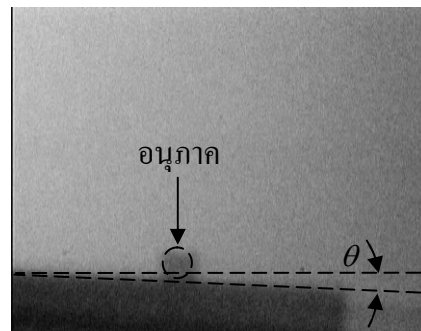
ภาพที่ 3.11 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต

ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต μ ของอนุภาคบนวัสดุที่ใช้ทดลอง

| ชนิดอนุภาค | วัสดุของแท่นทดลอง | มุม θ ที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ (องศา) | μ |
|------------|--------------------------|--|-------|
| อลูมิเนียม | อิเล็กโตรดสแตนเลส | 3.65 | 0.063 |
| | ฟิล์ม KAPTON บนแผ่น PDMS | 3.90 | 0.068 |
| สแตนเลส | อิเล็กโตรดสแตนเลส | 1.75 | 0.030 |
| | ฟิล์ม KAPTON บนแผ่น PDMS | 1.35 | 0.023 |



(ก) อนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น



(ข) อนุภาคเคลื่อนที่

ภาพที่ 3.12 ภาพถ่ายจากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานบนวัสดุทดลอง

3.5 การทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระทบระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรด

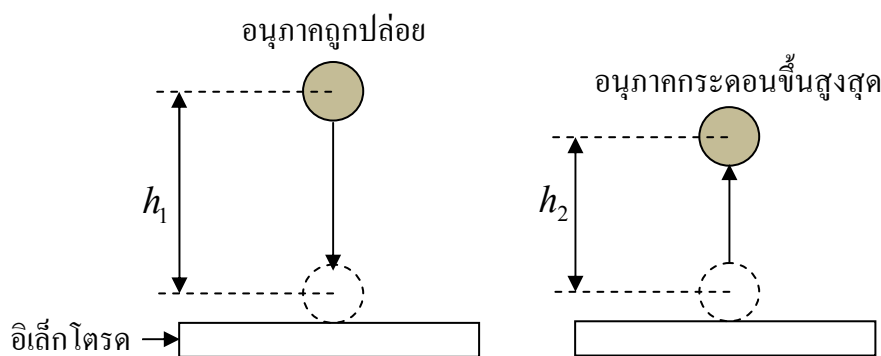
ในระหว่างที่อนุภาคเคลื่อนที่ในระบบอิเล็กโตรด เมื่ออนุภาคกระทบอิเล็กโตรด ความเร็วของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง. สัมประสิทธิ์การกระทบระหว่างอนุภาคและอิเล็กโตรดจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบที่ศึกษา เมื่อไม่มีชั้นฉนวนอยู่บนอิเล็กโตรดกราวด์. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคก่อนกระทบ v_1 และหลังกระทบอิเล็กโตรด v_2 แสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$v_{\perp,2} = -k_{\perp} v_{\perp,1} \quad (3.3)$$

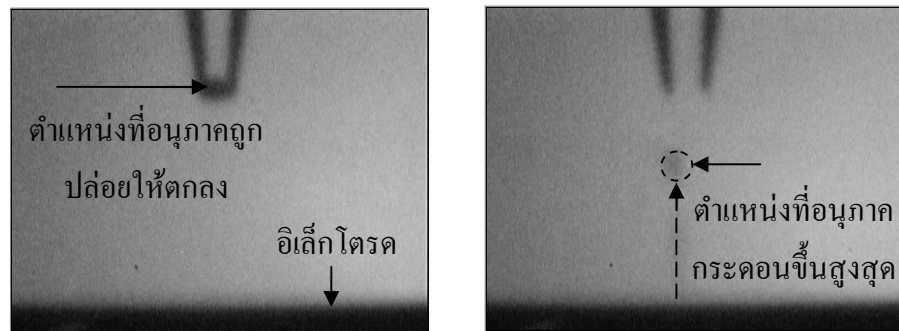
$$v_{\parallel,2} = k_{\parallel} v_{\parallel,1} \quad (3.4)$$

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์การกระทบ. ดัชนีตั้ง \perp และ \parallel ในสมการทั้งสองระบุค่าของสัมประสิทธิ์และความเร็วในแนวตั้งฉากและขนานกับระนาบอิเล็กโตรดตามลำดับ. ตัวอย่างเช่น เอกสารอ้างอิง [2] ใช้สัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก $k_{\perp} = 0.47$ และขนาน $k_{\parallel} = 0.8$ สำหรับอนุภาคสแตนเลส รัศมี 1 mm ที่ตกกระทบอิเล็กโตรดสแตนเลส.

การหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก ใช้กฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยทดลองปล่อยอนุภาคที่ความสูง h_1 เมื่ออนุภาคกระทบกับระนาบอิเล็กโตรดจะกระดอนขึ้นสูงสุดที่ความสูง h_2 ดังแสดงในภาพที่ 3.13. ภาพที่ 3.14ก และ 3.14ข แสดงภาพถ่ายจากการทดลองเมื่ออนุภาคถูกปล่อยและกระดอนขึ้นสูงสุด ตามลำดับ.



ภาพที่ 3.13 การหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก



(ก) ตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค (ข) ตำแหน่งที่อนุภาคกระดอนขึ้นสูงสุด

ภาพที่ 3.14 ภาพถ่ายที่ได้จากการหา k_{\perp}

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อละเลยแรงหนืดของอากาศ เราได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (3.5)$$

ดังนั้นก่อนกระทบ

$$v_{1,\perp}^2 = 2gh_1$$

และหลังกระทบ

$$v_{2,\perp}^2 = 2gh_2$$

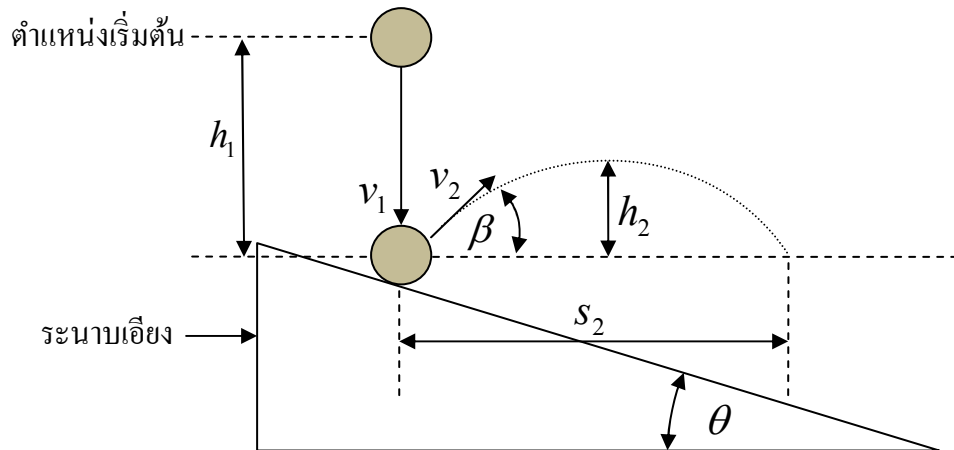
ดังนั้น

$$k_{\perp} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (3.6)$$

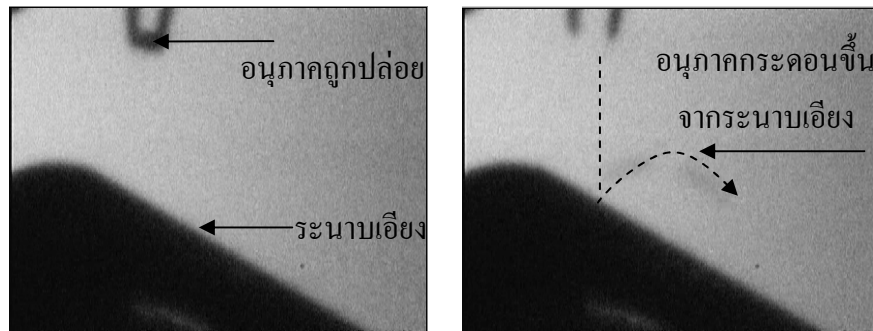
การทดลองใช้ความสูง h_1 ประมาณ 6-7 mm. และหาค่าสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก จากการเฉลี่ยผลการทดลอง 10 ครั้งของอนุภาคอูมิเนียม รัศมี 0.403 mm ได้

$$k_{\perp} = 0.6 \quad (3.7)$$

การหาสัมประสิทธิ์ในแนวนอนหาได้จากการทดลองปล่อยอนุภาคให้กระทบบนระนาบเอียง. ดังแสดงในภาพที่ 3.15. รูปถ่ายจากการทดลองเมื่ออนุภาคถูกปล่อยและกระดอนขึ้นจากระนาบเอียง แสดงในภาพที่ 3.16ก และ 3.16ข ตามลำดับ.



ภาพที่ 3.15 การหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนาน



(ก) ตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค

(ข) แนวการกระดอนของอนุภาค

ภาพที่ 3.16 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองหา k_{\perp} และ k_{\parallel} โดยใช้ระนาบเอียง

จากสมการที่ (3.5) ความเร็วที่อนุภาคกระทบกับระนาบคือ

$$v_1 = \sqrt{2gh_1} \quad (3.8)$$

ซึ่งมีองค์ประกอบในแนวตั้งฉากและขนานกับอเล็กโตรดเป็น

$$v_{1,\perp} = v_1 \cos \theta \quad (3.9)$$

$$v_{1,\parallel} = v_1 \sin \theta \quad (3.10)$$

ถ้าหลังจากการกระทบความเร็วของอนุภาคเท่ากับ v_2 ทำมุม β กับแนวระดับเราจะได้ระยะ s_2 ในภาพที่ 3.15 เป็น

$$s_2 = \frac{2v_2^2 \cos \beta \sin \beta}{g} \quad (3.11)$$

และความสูง h_2 เป็น

$$h_2 = \frac{v_2^2 \sin^2 \beta}{2g} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.11) และ (3.12) นั้นเราสามารถคำนวณมุม β ได้จาก

$$\tan \beta = \frac{4h_2}{s_2} \quad (3.13)$$

ความเร็วของอนุภาคหลังการกระทบในแนวตั้งฉาก $v_{2,\perp}$ และขนาน $v_{2,\parallel}$

$$v_{2,\perp} = v_2 \sin(\theta + \beta) \quad (3.14)$$

$$v_{2,\parallel} = v_2 \cos(\theta + \beta) \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.9) (3.10) (3.14) และ (3.15) เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนานได้

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ใช้มุม $\theta = 22, 29$ และ 30 องศา เพื่อหาสัมประสิทธิ์การกระทบทั้งสอง. สำหรับอนุภาคอลูมิเนียมรัศมี 0.403 mm. และระนาบอิเล็กโตรดสแตนเลส ผลการทดลองได้ สัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉาก $k_{\perp} = 0.6$ และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวขนาน $k_{\parallel} = 0.7$ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองกับระนาบที่อยู่ในแนวระดับ. ตารางคุณสมบัติเฉพาะต่างๆ ของอนุภาคที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3 และรายละเอียดของผลการทดลองแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติเฉพาะของอนุภาค

| วัสดุอนุภาค | อลูมิเนียม | สแตนเลส |
|--|-----------------------|-----------------------|
| รัศมี (mm) | 0.403 | 0.403 |
| ความหนาแน่น (kg/m^3) | 2700 | 7850 |
| มวล (kg) | 7.44×10^{-7} | 2.16×10^{-6} |
| สัมประสิทธิ์การกระทบ ($k_{\perp} / k_{\parallel}$) | 0.6/0.7 | 0.76/0.54 |
| μ (electrode/KAPTON) | 0.063/0.068 | 0.030/0.023 |

บทที่ 4

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

เมื่ออนุภาคตัวนำอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอในระบบอเล็กโตรด จะเกิดแรงทางไฟฟ้ากระทำต่ออนุภาคทำให้อนุภาคถูกยกขึ้นหรือเคลื่อนที่ตามแนวอเล็กโตรดกราวด์. ในกรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่ามากพอและมีระยะเวลาจนทำให้อนุภาคถูกยกขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปกระทบกับอเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงหลังจากนั้น อนุภาคจะกระดอนกลับมายังอเล็กโตรดกราวด์ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นไปในลักษณะนี้จนกว่าสนามไฟฟ้าจะหมดลง. การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สภาวะดังกล่าวอย่างถูกต้องเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาค.

4.1 วิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอเล็กโตรด ใช้วิธีการคำนวณการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติ บนพิกัด (x, z) . แรงทั้งหมดที่กระทำกับอนุภาคจะถูกแยกองค์ประกอบในแกน x และ z . ตัวอย่างเช่น เช่น กรณีของแรงคูลอมบ์ F_q ที่แสดงในภาพที่ 4.1 จะแยกเป็น \vec{F}_{qx} และ \vec{F}_{qz} โดยที่

$$F_{qx} = -F_q \sin \theta_p \quad (4.1)$$

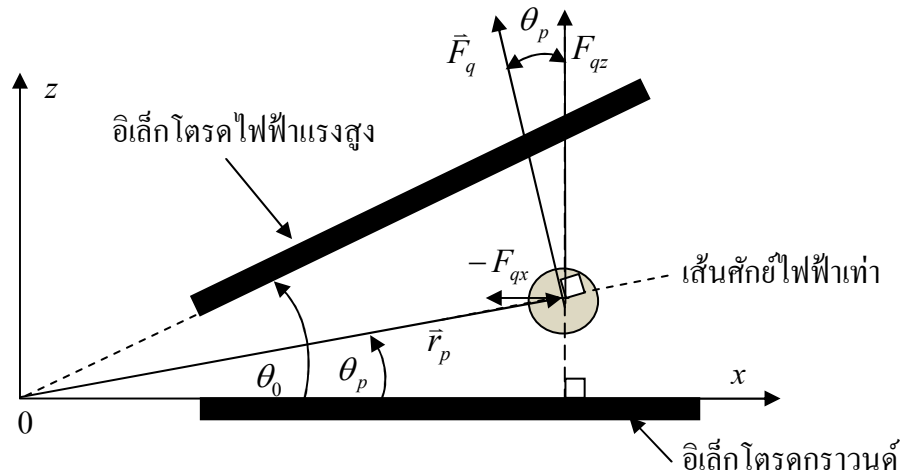
$$F_{qz} = F_q \cos \theta_p \quad (4.2)$$

ดัชนีล่าง x และ z แทนทิศทางของแรงที่กระทำต่ออนุภาคในแนวนอนและตั้งฉากกับระนาบกราวด์ตามลำดับ.

เพื่อให้ง่ายต่อการจำลอง ผู้วิจัยได้แบ่งเหตุการณ์ในการคำนวณเป็น 5 เหตุการณ์ ประกอบด้วย

1. อนุภาคถูกวางบนระนาบอเล็กโตรดกราวด์
2. อนุภาคเคลื่อนที่จากระนาบกราวด์ไปยังอเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง
3. อนุภาคกระทบกับอเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง
4. อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่อเล็กโตรดกราวด์
5. อนุภาคกระทบกับอเล็กโตรดกราวด์

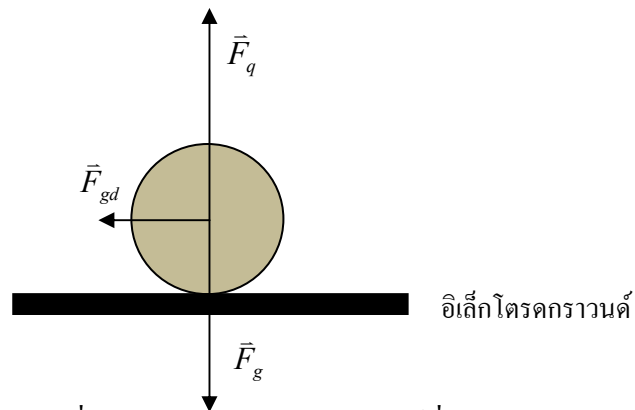
ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ผู้วิจัยสมมติให้อนุภาคมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระบบอเล็กโตรด. อนุภาคเปรียบเสมือนจุด ทำให้สามารถละเลยรัศมีของอนุภาคเมื่อเกิดการกระทบระหว่างอนุภาคและอเล็กโตรด. การคำนวณแรงต่างๆจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวในบทที่ 2.



ภาพที่ 4.1 ทิศทางของแรงคูลอมบ์ในทิศตั้งฉากกับเส้นสัคยไฟฟ้าเท่า หรือในแนวแกน x และ z

เหตุการณ์ที่ 1 อนุภาคถูกวางบนระนาบอิลีคโตรดกราวนด์

อนุภาคมวล m ที่พิกัด $(x_p(i), z_p(i))$ โดย i แทนด้วยตัวเลข 1, 2, 3, ... แสดงลำดับการคำนวณ. อนุภาคดังกล่าวอยู่บนอิลีคโตรดกราวนด์ ภายใต้สนามไฟฟ้า E_L เกิดประจุเหนี่ยวนำ q_{ind} บนอนุภาค. อนุภาคจะเริ่มยกตัวขึ้น. การคำนวณในเหตุการณ์นี้ เราละเลยผลของมุม θ_p ดังแสดงในภาพที่ 4.2.



ภาพที่ 4.2 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในเหตุการณ์ที่ 1

ผลรวมของแรง F_x และ F_z ที่กระทำต่ออนุภาคในแนวแกน x และ z

$$F_x(1) = -F_{gd}(1) = ma_x(1) \tag{4.3}$$

$$F_z(1) = F_q(1) - F_g = ma_z(1) \tag{4.4}$$

เมื่อ $\ddot{a}_x(1)$ และ $\ddot{a}_z(1)$ คือ ความเร่งในแนวแกน z และ x ตามลำดับ.

ในเหตุการณ์ที่ 1 นี้จะไม่คิดแรงหนีคของอากาศ เนื่องจากความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์และละเลยแรงเสียดทาน เนื่องจาก $F_q > F_g$. เมื่อได้ $\vec{a}_x(1)$ และ $\vec{a}_z(1)$ แล้วเราสามารถคำนวณตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ในแนวแกน z และ x จากสมการต่อไปนี้.

$$x_p(2) = \frac{1}{2} a_x(1) \Delta t^2 \quad (4.5)$$

$$z_p(2) = \frac{1}{2} a_z(1) \Delta t^2 \quad (4.6)$$

Δt คือ ขั้นตอนเวลา (Time step) ที่ใช้ในการคำนวณ.

จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) เราจะได้ความเร่ง $\vec{a}_x(1)$ และ $\vec{a}_z(1)$ เพื่อคำนวณความเร็วปลายของอนุภาคที่มาจากตำแหน่ง $x_p(1)$ และ $z_p(1)$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นความเร็วต้นของตำแหน่ง $x_p(2)$ และ $z_p(2)$ จากสมการ.

$$u_x(2) = u_x(1) + a_x(1) \Delta t \quad (4.7)$$

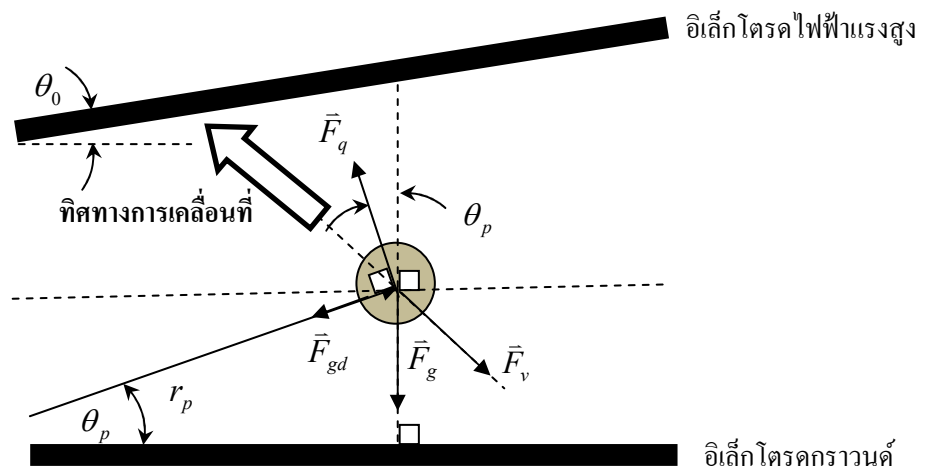
$$u_z(2) = u_z(1) + a_z(1) \Delta t \quad (4.8)$$

เมื่อ $u_x(1)$ และ $u_z(1)$ คือ ความเร็วต้นตามแนวแกนทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์.

จากสมการที่ (4.5) ถึง (4.8) เราทราบตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปภายใต้สนามไฟฟ้า และเข้าสู่เหตุการณ์ที่ 2.

เหตุการณ์ที่ 2 อนุภาคเคลื่อนที่จากระนาบกราวด์ไปยังอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง

ในเหตุการณ์นี้ อนุภาคถูกยกขึ้นด้วยแรงทางไฟฟ้า และเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดขั้วตรงข้าม. แรงคูลอมบ์และแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า จะมีขนาดของแรงสัมพันธ์กับ θ_p และ r_p ของอนุภาค และมีแรงหนีคของอากาศ \vec{F}_v กระทำต่ออนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 4.3.



ภาพที่ 4.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในเหตุการณ์ที่ 2

เมื่อได้ $x_p(2)$ และ $z_p(2)$ จากเหตุการณ์ที่ 1 เราสามารถคำนวณ $r_p(2)$ $\theta_p(2)$ และ $E_\theta(2)$. ความเร่ง $a_x(i)$ และ $a_z(i)$ เนื่องจากผลรวมของแรงที่ขึ้นเวลา i คำนวณได้จาก

$$-F_q(i) \sin \theta_p(i) - F_{gd}(i) \cos \theta_p(i) + F_{vx}(i) = ma_x(i) \quad (4.9)$$

$$F_q(i) \cos \theta_p(i) - F_{gd}(i) \sin \theta_p(i) - F_g - F_{vz}(i) = ma_z(i) \quad (4.10)$$

เมื่อ

$$F_{vx}(i) = -6\pi\eta a u_x(i) \quad (4.11)$$

$$F_{vz}(i) = -6\pi\eta a u_z(i) \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) เครื่องหมายที่อยู่ด้านหน้าพจน์แรงหนืด มีหมายความว่า มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค.

สำหรับความเร็วและตำแหน่งของอนุภาค ณ สภาวะถดถอยคำนวณได้จาก

$$u_x(i+1) = u_x(i) + a_x(i)\Delta t \quad (4.13)$$

$$u_z(i+1) = u_z(i) + a_z(i)\Delta t \quad (4.14)$$

$$x_p(i+1) = u_x(i)\Delta t + \frac{1}{2} a_x(i)\Delta t^2 \quad (4.15)$$

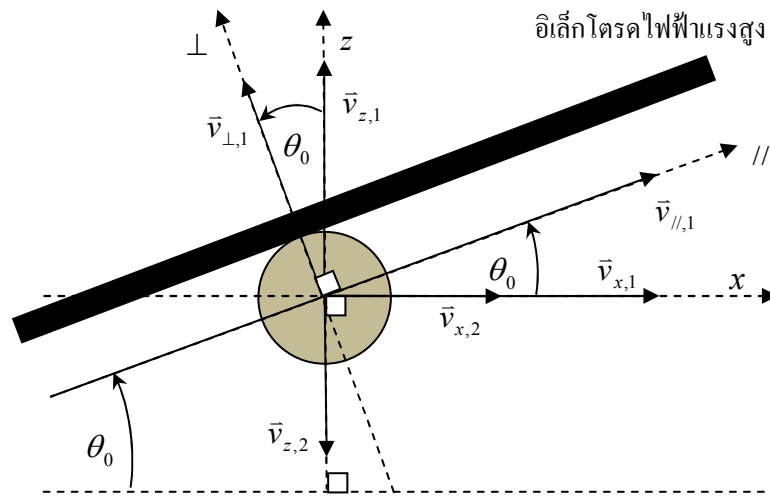
$$z_p(i+1) = u_z(i)\Delta t + \frac{1}{2} a_z(i)\Delta t^2 \quad (4.16)$$

เมื่อ i เป็นขั้นตอนปัจจุบัน.

คำนวณเช่นนี้เรื่อยไป สำหรับเหตุการณ์ที่ 2 โดย $i = 2, 3, 4, \dots$ จนกระทั่งอนุภาคชนอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงภายใต้เงื่อนไข $\theta_p(i) = \theta_0$.

เหตุการณ์ที่ 3 อนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง

เมื่อ $\theta_p = \theta_0$ อนุภาคกระทบอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุและความเร็วของอนุภาค. จากความเร็ว $v_{x,1}$ และ $v_{z,1}$ ก่อนชน เราสามารถเปลี่ยนความเร็วในแนวแกน x และ z ให้เป็นความเร็ว $v_{\perp,1}$ ในแนวตั้งฉากก่อนชน และความเร็ว $v_{\parallel,1}$ ในแนวขนานกับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงได้. ในการคำนวณนั้น เนื่องจากระบบที่เราใช้พิจารณาคือ x และ z ในกรณีการกระทบนั้น เราต้องใช้การคำนวณในแนวตั้งฉากและขนาน เพื่อไม่ให้เกิดความสับสน เราจึงต้องการหาความสัมพันธ์ของความเร็วก่อนกระทบ $\vec{v}_{z,1}$ และ $\vec{v}_{x,1}$ กับความเร็วหลังกระทบ $\vec{v}_{z,2}$ และ $\vec{v}_{x,2}$ ดังแสดงในภาพที่ 4.4.



ภาพที่ 4.4 การกระทบระหว่างอนุภาคและอิเล็กตรอนไฟฟ้าแรงสูง

จากภาพที่ 4.4 เราสร้างแกนตั้งฉาก \perp และขนาน \parallel กับอิเล็กตรอนไฟฟ้าแรงสูง และแยกองค์ประกอบของความเร็ว $\vec{v}_{z,1}$ และ $\vec{v}_{x,1}$ ให้อยู่ในแกนตั้งฉากและขนาน โดยใช้ความสัมพันธ์

$$v_{\perp} = v_z \cos \theta_0 - v_x \sin \theta_0 \quad (4.17)$$

$$v_{\parallel} = v_z \sin \theta_0 + v_x \cos \theta_0 \quad (4.18)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ สมการที่ (4.17) และ (4.18) ในรูปของเมตริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} v_{\perp} \\ v_{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_z \\ v_x \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

เมื่อเราใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (4.19) เปลี่ยนจากความเร็วในแนวตั้งฉากและขนาน ให้อยู่ในแนวแกน x และ z จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} v_z \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\perp} \\ v_{\parallel} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

หรือเขียนในรูปของสมการได้เป็น

$$v_z = v_{\perp} \cos \theta_0 + v_{\parallel} \sin \theta_0 \quad (4.21)$$

$$v_x = -v_{\perp} \sin \theta_0 + v_{\parallel} \cos \theta_0 \quad (4.22)$$

เมื่อเราได้ความสัมพันธ์ของความเร็วทั้งสองระบบ x กับ z และ \perp กับ \parallel เราจะพิจารณาความสัมพันธ์ที่สำคัญของการกระทบ คือ ความเร็วก่อนกระทบ $v_{\perp,1}$ และ $v_{\parallel,1}$ กับ ความเร็วหลังกระทบ $v_{\perp,2}$ และ $v_{\parallel,2}$ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_{\perp,2} = -k_{\perp} v_{\perp,1} \quad (4.23)$$

$$v_{\parallel,2} = k_{\parallel} v_{\parallel,1} \quad (4.24)$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} v_{\perp,2} \\ v_{\parallel,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{\perp} \cos \theta_0 & k_{\perp} \sin \theta_0 \\ k_{\parallel} \sin \theta_0 & k_{\parallel} \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{z,1} \\ v_{x,1} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในแนวแกน x กับ z ก่อนและหลังกระทบเป็น

$$\begin{bmatrix} v_{z,2} \\ v_{x,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -k_{\perp} \cos \theta_0 & k_{\perp} \sin \theta_0 \\ k_{\parallel} \sin \theta_0 & k_{\parallel} \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{z,1} \\ v_{x,1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{z,2} \\ v_{x,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\parallel} \sin^2 \theta_0 - k_{\perp} \cos^2 \theta_0 & (k_{\perp} + k_{\parallel}) \sin \theta_0 \cos \theta_0 \\ (k_{\perp} + k_{\parallel}) \sin \theta_0 \cos \theta_0 & k_{\parallel} \cos^2 \theta_0 - k_{\perp} \sin^2 \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{z,1} \\ v_{x,1} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

หรือ

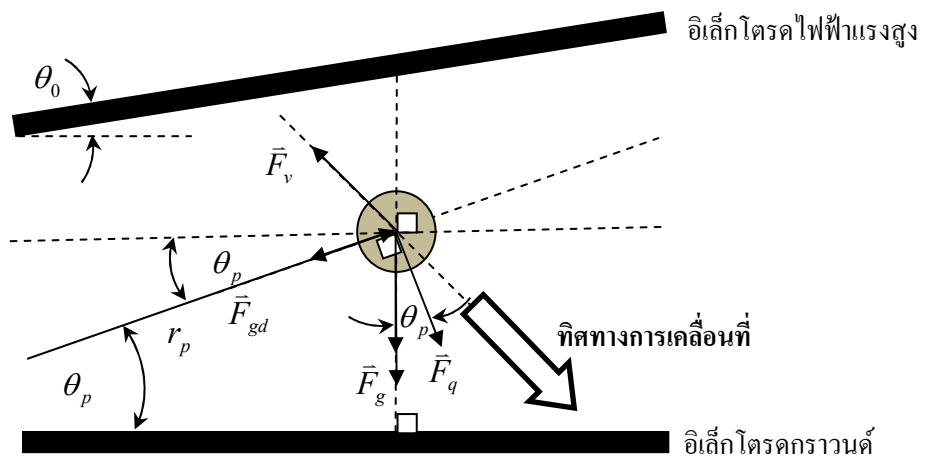
$$\bar{v}_{z,2} = (k_{\parallel} \sin^2 \theta_0 - k_{\perp} \cos^2 \theta_0) \bar{v}_{z,1} + (k_{\perp} + k_{\parallel}) \sin \theta_0 \cos \theta_0 \bar{v}_{x,1} \quad (4.27)$$

$$\bar{v}_{x,2} = (k_{\perp} + k_{\parallel}) \sin \theta_0 \cos \theta_0 \bar{v}_{z,1} + (k_{\parallel} \cos^2 \theta_0 - k_{\perp} \sin^2 \theta_0) \bar{v}_{x,1} \quad (4.28)$$

เมื่ออนุภาคกระทบอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงจะเกิดการเหนี่ยวนำประจุชนิดตรงข้าม. การคำนวณแรงที่กระทำกับอนุภาคจะใช้หลักการเกี่ยวกับการคำนวณในเหตุการณ์ที่ 1. อนุภาคจะกระดอนออกจากอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง และเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดกราวนด์. การเปลี่ยนแปลงขั้วของประจุเหนี่ยวนำทำให้ทิศทางของแรงคูลอมบ์เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะกล่าวในเหตุการณ์ที่ 4 ต่อไป.

เหตุการณ์ที่ 4 อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดกราวนด์

อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโตรดกราวนด์ จนกระทั่งเกิดการกระทบระหว่างอนุภาคและอิเล็กโตรดกราวนด์ภายใต้เงื่อนไข $\theta_p = 0^\circ$ ดังแสดงในภาพที่ 4.5.



ภาพที่ 4.5 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในเหตุการณ์ที่ 4

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับผลรวมของแรงในเหตุการณ์นี้ได้เป็น

$$F_q(i) \sin \theta_p(i) - F_{gd}(i) \cos \theta_p(i) - F_{vx}(i) = ma_x(i) \quad (4.29)$$

$$-F_q(i) \cos \theta_p(i) - F_g - F_{gd}(i) \sin \theta_p(i) + F_{vz}(i) = ma_z(i) \quad (4.30)$$

การคำนวณในเหตุการณ์นี้ใช้หลักการคำนวณเหมือนกับในเหตุการณ์ที่ 2.

เหตุการณ์ที่ 5 อนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดกราวด์

ในเหตุการณ์นี้ อนุภาคกระทบกับอิเล็กโตรดกราวด์ เนื่องจากการชนระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรดกราวด์จะไม่มี ความซับซ้อนเหมือนกับการชนกับอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง. เราสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก่อนกระทบ $v_{z,1}$ และ $v_{x,1}$ กับความเร็วหลังกระทบ $v_{z,2}$ และ $v_{x,2}$ อยู่ในรูปของ

$$v_{z,2} = -k_{\perp} v_{z,1} \quad (4.31)$$

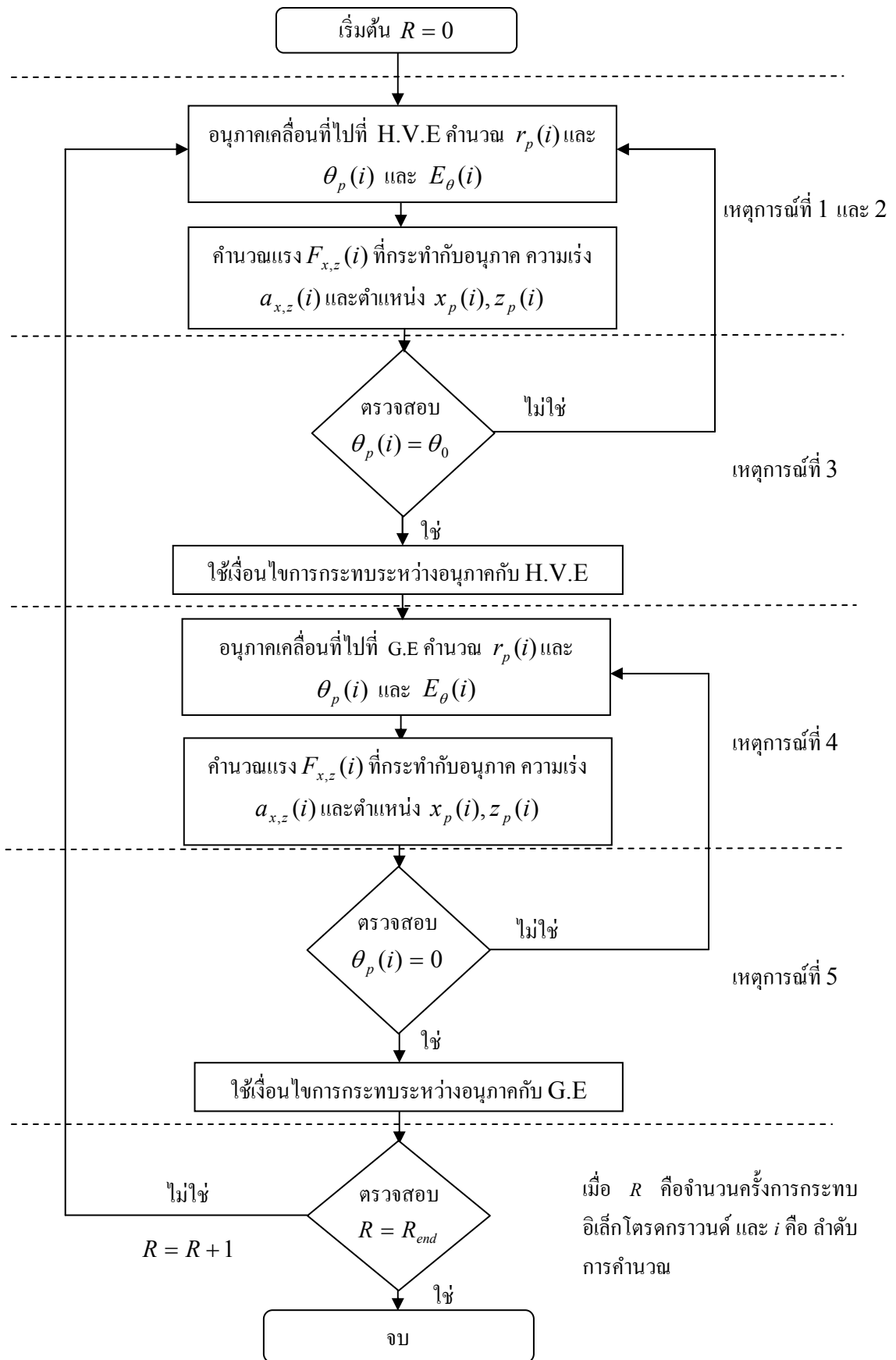
$$v_{x,2} = k_{\parallel} v_{x,1} \quad (4.32)$$

เมื่ออนุภาคชนกับอิเล็กโตรดกราวด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุและความเร็วของอนุภาคเช่นเดียวกันกับเหตุการณ์ที่ 3.

เมื่อการคำนวณทั้ง 5 เหตุการณ์จบลง ก็จะเริ่มการคำนวณในเหตุการณ์ที่ 2 ใหม่อีกครั้ง และจะเป็นเช่นนี้เรื่อยไปตามจำนวนขั้นเวลาที่ต้องการ. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และแผนภูมิการคำนวณแสดงในภาพที่ 4.6.

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

| พารามิเตอร์ | ตัวแปร | ค่าที่ใช้ | หน่วย |
|---|-----------------|-------------------------------------|-------------------|
| ความหนาแน่นอนุภาค | ρ_p | 2700 (อลูมิเนียม) 7850 (สแตนเลส) | kg/m ³ |
| สัมประสิทธิ์การกระทบแนวตั้งฉาก | k_{\perp} | 0.60 (อลูมิเนียม) 0.76 (สแตนเลส) | - |
| สัมประสิทธิ์การกระทบแนวขนาน | k_{\parallel} | 0.70 (อลูมิเนียม) 0.54 (สแตนเลส) | - |
| รัศมีอนุภาค | a | 0.403 | mm |
| สภาพยอมของสุญญากาศ | ϵ_0 | 8.854×10^{-12} | F/m |
| ความหนาแน่นอากาศ | ρ_s | 1.184 | kg/m ³ |
| ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศ | ϵ_s | 1 | - |
| สัมประสิทธิ์แรงหนืดของอากาศ | η | 18.2×10^{-6} | Pa s |
| เวลาที่ใช้จากลำดับปัจจุบันไปยังลำดับถัดไป | Δt | 0.00001 | s |

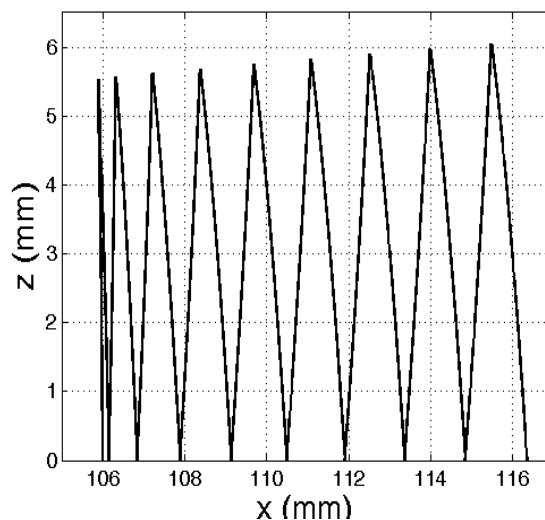


ภาพที่ 4.6 แผนภูมิการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาค

4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

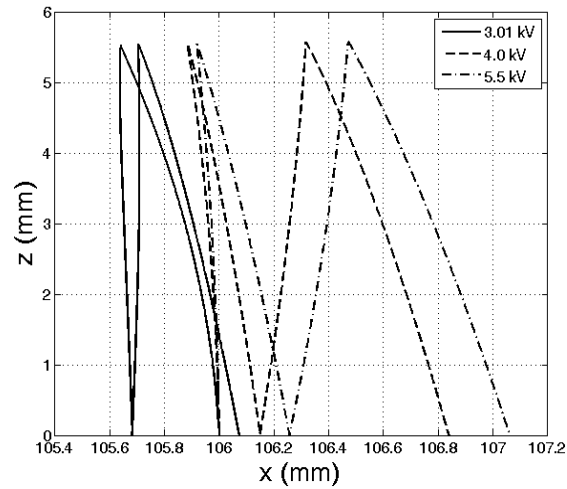
หัวข้อนี้แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้า มุมระหว่างอิเล็กโตรด สัมประสิทธิ์การกระทบและความหนาแน่นของอนุภาคตัวนำ.

ในการศึกษาขั้นต้น ผู้วิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยจำลองอนุภาคอลูมิเนียมถูกวางที่ตำแหน่งเริ่มต้น $x_p = 106$ mm และมุมระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง $\theta_0 = 3^\circ$ และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 4.0 kV. ภาพที่ 4.7 แสดงผลการจำลองที่ได้ ผู้วิจัยพบว่าเมื่ออนุภาคถูกยกขึ้นจนกระทบกับอิเล็กโตรดบนและกระดอนกลับลงมากระทบอิเล็กโตรดล่าง ผลของแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า และใช้เวลาการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.24 วินาที เมื่ออนุภาคกระทบอิเล็กโตรดกราวด์เป็นครั้งที่ 9.

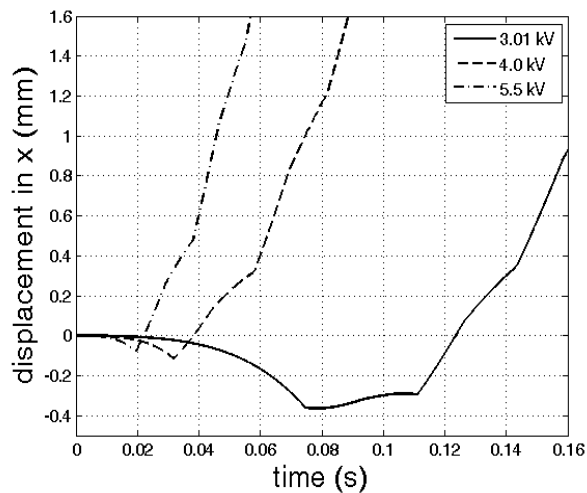


ภาพที่ 4.7 การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคอลูมิเนียม โดย $V = 4.0$ kV และ $\theta_0 = 3^\circ$

จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้แสดงในภาพที่ 4.7 ทำให้เราเข้าใจพฤติกรรมของอนุภาคในระบบอิเล็กโตรดนี้. ผลของแรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นหรือลดลง จะมีผลต่อระยะกระจัดของอนุภาคด้วยเช่นกัน. ผู้วิจัยเปรียบเทียบผลที่ได้ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3.01, 4.0 และ 5.5 kV ให้กับระบบอิเล็กโตรดนี้. ในแต่ละแรงดันไฟฟ้า อนุภาคอลูมิเนียมถูกวางที่ตำแหน่งเริ่มต้น $x_p = 106$ mm และมุมระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง $\theta_0 = 3^\circ$ และสังเกตผลการจำลอง. ผู้วิจัยพบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้อนุภาค มีระยะกระจัดในแนวระนาบเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่ออนุภาคกระทบอิเล็กโตรดกราวด์เป็นครั้งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.8. ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบระยะกระจัดในแนวแกน x กับเวลาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่อิเล็กโตรด.

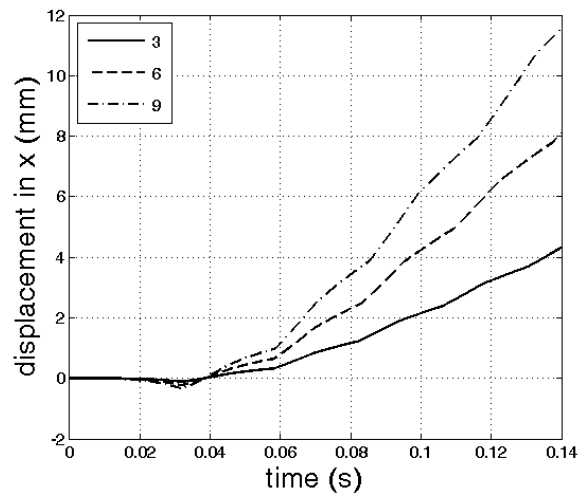


ภาพที่ 4.8 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอูมิเนียม โดย $V = 3.01, 4.0$ และ 5.5 kV และ $\theta_0 = 3^\circ$



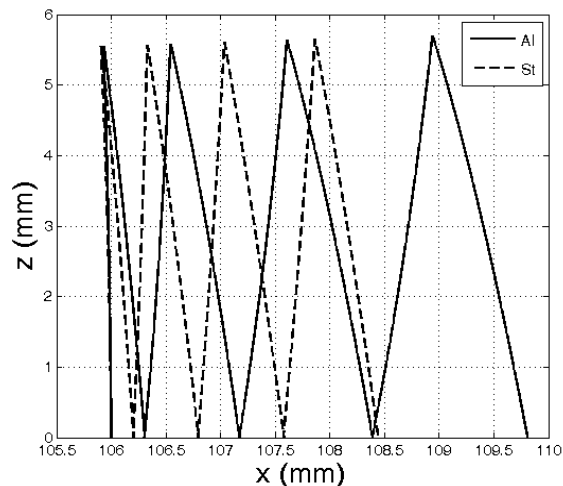
ภาพที่ 4.9 ระยะกระจัดของอนุภาคในแนวระดับเทียบกับเวลา โดย $V = 3.01, 4.0$ และ 5.5 kV และ $\theta_0 = 3^\circ$

ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของมุม θ_0 ระหว่างอิเล็กโตรด โดยให้อนุภาคอูมิเนียมมีตำแหน่งเริ่มต้นที่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากัน (0.72 kV/mm) โดยที่ θ_0 เท่ากับ $3, 6$ และ 9 องศา. ระยะกระจัดในแนวแกน x ที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ เทียบกับเวลาของการเคลื่อนที่แสดงในภาพที่ 4.10. ผู้วิจัยพบว่าเมื่อมุมระหว่างอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้นทำให้ระยะกระจัดในแนวระนาบของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน.



ภาพที่ 4.10 ระยะกระจัดของอนุภาคอลูมิเนียมในแนวระดับจากตำแหน่งเริ่มต้น เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ, 6^\circ$ และ 9° โดย $V = 4.0$ kV

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างชนิดกัน คือ อลูมิเนียม(Al) และ สแตนเลส(St) เมื่อมีรัศมีเท่ากัน แต่ความหนาแน่นของอนุภาคสแตนเลสมากกว่าอนุภาคอลูมิเนียมประมาณ 3 เท่า. ผู้วิจัยจำลองอนุภาคทั้งสองให้ถูกวางที่ $x_p = 106$ mm มุมระหว่างอิเล็กโตรด $\theta_0 = 3^\circ$ และแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 8 kV ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคทั้งสองชนิดยกตัวจากระนาบได้. ภาพที่ 4.11 แสดงผลการจำลองที่ได้. จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอนุภาคอลูมิเนียมมีระยะกระจัดในแนวระนาบมากกว่า เมื่ออนุภาคทั้งสองเคลื่อนที่ข้ามแถบ 4 รอบ.



ภาพที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส โดย $V = 8.0$ kV และ $\theta_0 = 3^\circ$

จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งหมดที่ผ่านมา ทำให้เราทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งได้แก่ แรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้า มุมระหว่างอิเล็กโตรด สัมประสิทธิ์การกระทบและความหนาแน่นของอนุภาคตัวนำ. ปัจจัยดังกล่าวทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะที่แตกต่างกัน. ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ผู้วิจัยสรุปได้ว่า

1. ผลของแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า.
2. ผลของแรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น อนุภาคจะมีระยะกระจัดที่มากขึ้นและใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าน้อยกว่า (เมื่ออ้างอิงตำแหน่งสุดท้ายเดียวกัน).
3. ผลของมุมระหว่างอิเล็กโตรดที่มากขึ้น อนุภาคจะมีระยะกระจัดที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน.
4. ผลของความหนาแน่นของอนุภาคที่มากขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคยกตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาครัศมีเท่ากัน แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่า.
5. ระยะกระจัดของอนุภาคจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากและขนานด้วยเช่นกัน.

บทที่ 5

ผลการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยแรงทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ แรงคูลอมบ์และแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า. อนุภาคที่ใช้ในการทดลองมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยมีขนาดรัศมีเท่ากับ 0.403 mm. ทั้งนี้มีการทดลองใช้อนุภาคสแตนเลสขนาดรัศมี 0.203 mm ในการทดลองบางครั้งเพื่อสังเกตความแตกต่างเนื่องจากขนาดของอนุภาคด้วย.

การทดลองที่ได้ดำเนินการในวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

1. ผลจากมุมของระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์ θ_g
2. การยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวนด์ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
3. การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่วางตัวบนระนาบกราวนด์ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
4. การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
5. การยึดจับอนุภาคโดยใช้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

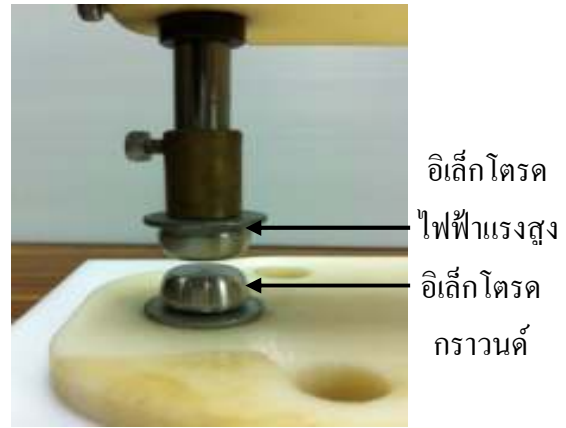
5.1 ผลจากมุมของระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์ θ_g

หัวข้อนี้เสนอผลจากมุมของระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์ θ_g . การศึกษานี้ ผู้วิจัยใช้ระบบอิเล็กโตรดในภาพที่ 5.1. เมื่อพิจารณาระบบอิเล็กโตรดเป็นแบบระนาบคู่ขนาน และใช้อนุภาคอลูมิเนียมในการทดลอง. ในการทดลอง แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบอิเล็กโตรดเป็นชนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เป็นเวลา T ในช่วง 150-400 ms ดังแสดงในภาพที่ 5.2. ผู้วิจัยพบลักษณะการเคลื่อนที่สองแบบจากการทดลองคือ

1. การยกตัวของอนุภาค เนื่องจากแรงคูลอมบ์ มีทิศทางที่ไม่ตั้งฉากกับแนวระดับ
2. มีการเคลื่อนที่ตามระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์เกิดขึ้น.

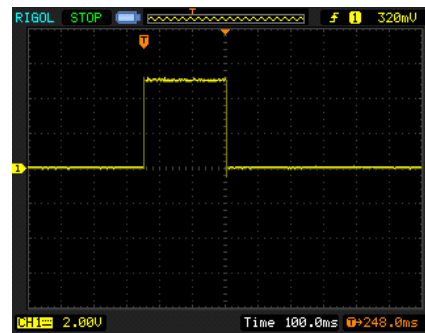
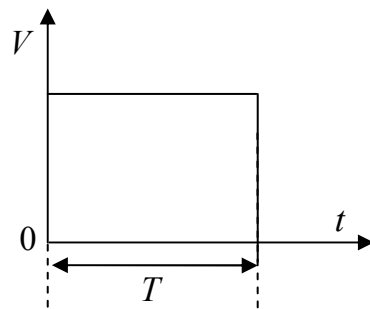
ภาพที่ 5.3 และ 5.4 แสดงภาพถ่ายจากการทดลอง ที่ระยะแกป 2 mm. ภาพที่ 5.3ก แสดงตำแหน่งเริ่มต้นก่อนการยกตัวของอนุภาค และภาพที่ 5.3ข แสดงการยกตัวของอนุภาค และภาพที่ 5.4ก แสดงตำแหน่งเริ่มต้นก่อนการเคลื่อนที่ตามระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์ และภาพที่ 5.4ข แสดงการเคลื่อนที่ตามระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์. เราสามารถเขียนแผนภาพเค้าร่างแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค. ภาพที่ 5.5ก สำหรับการยกตัวของอนุภาค และภาพที่ 5.5ข สำหรับการเคลื่อนที่ตามระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์. พฤติกรรมของอนุภาคดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์อาจ

มีการลาดเอียงจากระนาบปกติเป็นมุม θ_g ทำให้อนุภาคมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากพฤติกรรมในระบบอิเล็กโตรดที่เป็นแบบระนาบคู่ขนานในแนวระดับที่มีระยะแคบ d ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2.



(ก) โครงสร้างของระบบ (ข) อิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงและอิเล็กโตรดกราวนด์

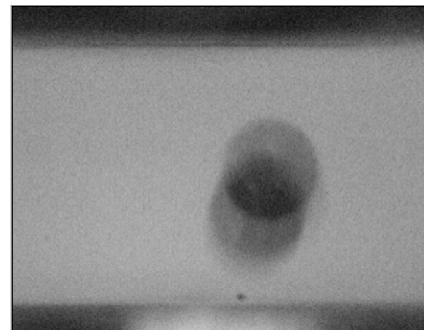
ภาพที่ 5.1 ระบบอิเล็กโตรด



(ก) ลักษณะรูปคลื่น

(ข) สัญญาณจากออสซิลอสโคป

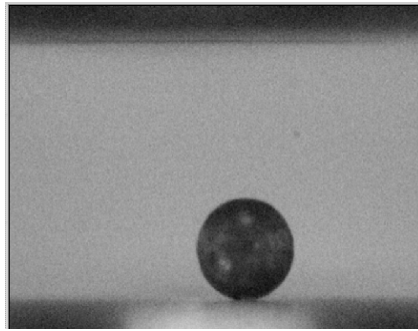
ภาพที่ 5.2 รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดลอง



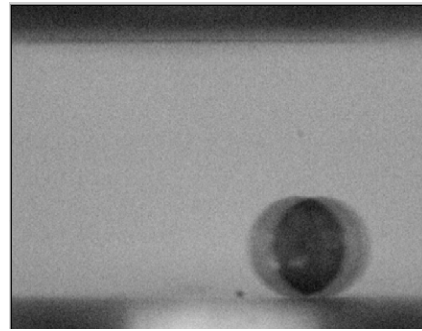
(ก) ตำแหน่งเริ่มต้น

(ข) ขณะยกตัว

ภาพที่ 5.3 ภาพถ่ายการยกตัวของอนุภาคจากระนาบกราวนด์

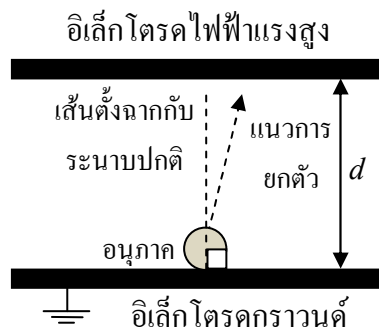


(ก) ตำแหน่งเริ่มต้น

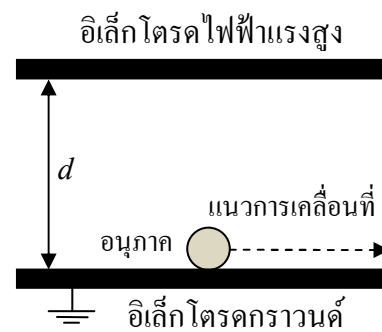


(ข) อนุภาคเคลื่อนที่ตามระนาบอเล็กโตรดกราวนด์

ภาพที่ 5.4 ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามระนาบอเล็กโตรดกราวนด์



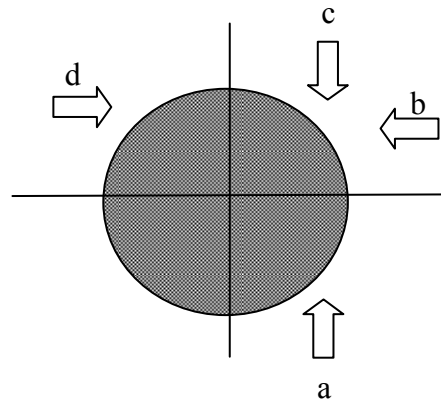
(ก) การยกตัว



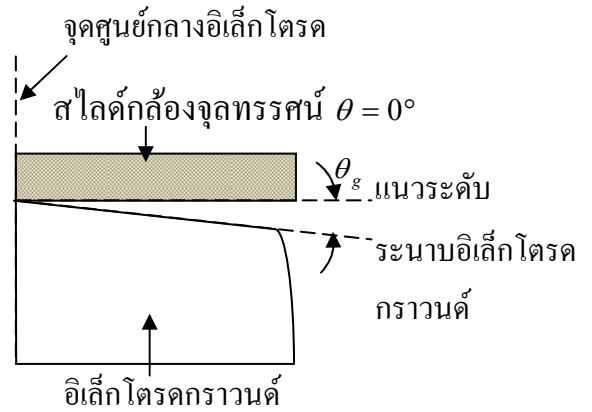
(ข) การเคลื่อนที่ตามระนาบอเล็กโตรดกราวนด์

ภาพที่ 5.5 ภาพเค้าร่างแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค

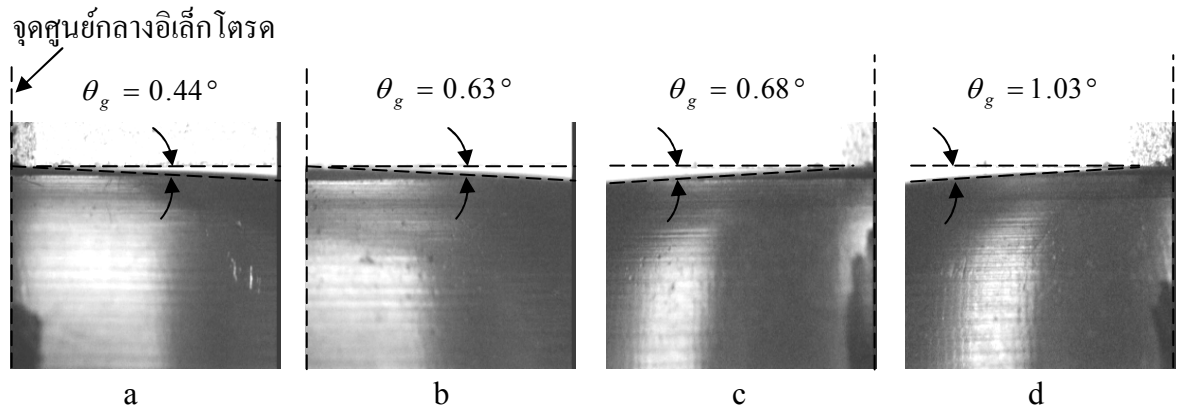
ผู้วิจัยจึงทำการวัดมุม θ_g ของระนาบอเล็กโตรดกราวนด์เทียบกับระนาบอ้างอิงในแนวระดับ โดยทำการวัด 4 ด้านของอเล็กโตรด. ภาพที่ 5.6 แสดงมุมมองของระนาบอเล็กโตรดกราวนด์ โดยภาพที่ 5.6ก แสดงมุมมองด้านบนของแนวทางการวัด ซึ่ง a, b, c และ d คือ มุมมองด้านข้างของอเล็กโตรดที่จะทำการวัด. ภาพที่ 5.6ข แสดงแผนภาพเค้าร่างการวัด θ_g เมื่อใช้มุมมองด้านข้างตามภาพที่ 5.6ก. ในภาพที่ 5.6ข ระนาบอ้างอิงที่นำมาใช้เป็นแผ่นสไลด์กล้องจุลทรรศน์. ภาพที่ 5.6ค เป็นผลการวัดมุม θ_g ที่ได้จากมุมมอง a ถึง d.



(ก) มุมมองด้านบนของแนวการวัด

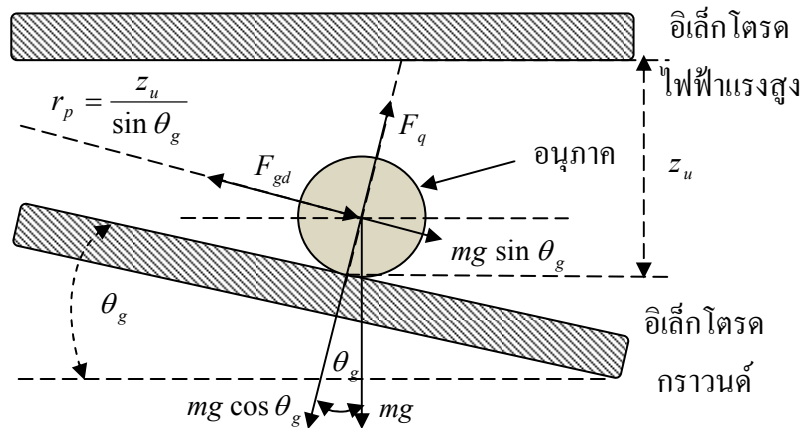


(ข) ลักษณะเค้าร่างของภาพที่ได้



(ค) มุม θ_g ของระนาบอเล็กโตรดกราวด์ที่ a, b, c และ d ตามลำดับ ภาพที่ 5.6 แนวผิวของระนาบอเล็กโตรดกราวด์

ผู้วิจัยนำค่า θ_g ทั้งสี่ด้านมาคำนวณค่าเฉลี่ยได้ $\theta_g = 0.69^\circ$ จากนั้นผู้วิจัยทำการวิเคราะห์และคำนวณการยกตัวและเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์ เมื่ออเล็กโตรดกราวด์ทำมุม θ_g กับระนาบปกติ โดยอ้างอิงทิศทางของแรงตามภาพที่ 5.7



ภาพที่ 5.7 แรงที่กระทำต่ออนุภาคที่วางตัวบนอิเล็กโตรดกราวนด์ เมื่ออิเล็กโตรดกราวนด์ทำมุม θ_g กับระนาบแนวระดับ

อนุภาคคอลลูมิเนียสมจะวางอยู่บนอิเล็กโตรดกราวนด์ได้ภายใต้เงื่อนไข

$$mg \sin \theta_g \leq \mu mg \cos \theta_g \quad (5.1)$$

เมื่อ $\mu = 0.063$, $\theta_g = 0.69^\circ$ ถ้า $\theta_g > 3.6^\circ$ อนุภาคจะไม่สามารถวางอยู่บนอิเล็กโตรดกราวนด์ได้.

เมื่ออนุภาคคอลลูมิเนียมวางตัวบนระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์ที่ทำมุม θ_g กับระนาบปกติ. เราสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าเริ่มต้น E_L ในการยกอนุภาคเป็น

$$F_q = mg \cos \theta_g$$

$$E_L = \sqrt{\frac{2ga(\rho_p - \rho_s) \cos \theta_g}{0.832\pi^2 \epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (5.2)$$

จาก $V = r_p \theta_g E$ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L ที่ยกอนุภาคขึ้นจากระนาบกราวนด์คำนวณได้จาก

$$V_L = r_p \theta_g \sqrt{\frac{2ga(\rho_p - \rho_s) \cos \theta_g}{0.832\pi^2 \epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (5.3)$$

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์ มีสองลักษณะคือ เคลื่อนที่ด้วยทิศของแรง $mg \sin \theta_g$ หรือ F_{gd} ซึ่งแรงทั้งสองมีทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นเราจึงต้องวิเคราะห์ แรงทั้งสองจากเงื่อนไขที่เป็นไปได้ 2 เงื่อนไขคือ

$$1. mg \sin \theta_g - F_{gd} \geq \mu(mg \cos \theta_g - F_q) \text{ เคลื่อนที่ด้วยทิศของแรง } mg \sin \theta_g$$

$$2. F_{gd} - mg \sin \theta_g \geq \mu(mg \cos \theta_g - F_q) \text{ เคลื่อนที่ด้วยทิศของแรง } F_{gd}$$

เงื่อนไขที่ 1 กำหนดสนามไฟฟ้า E_{H1} โดย

$$mg \sin \theta_g - F_{gd} \geq \mu(mg \cos \theta_g - F_q)$$

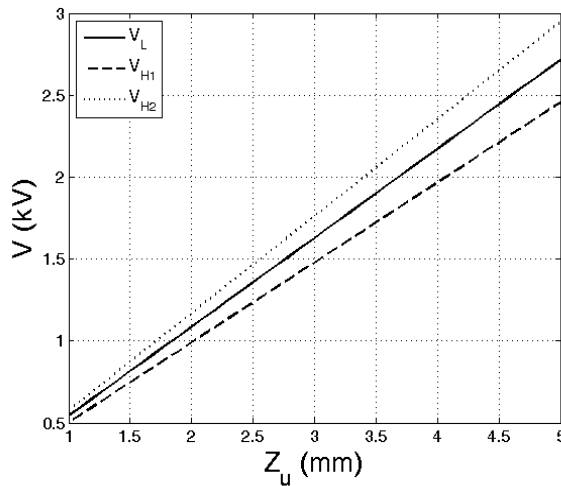
$$E_{H1} \geq \sqrt{\frac{\frac{4}{3}ga(\rho_p - \rho_s)(\mu \cos \theta_g - \sin \theta_g)}{\varepsilon_0 \varepsilon_s (\mu 0.832 \frac{2}{3} \pi^2 - \frac{4a}{z_u} \sin \theta_g)}} \quad (5.4)$$

เงื่อนไขที่ 2 คำนวณสนามไฟฟ้า E_{H2} โดย

$$F_{gd} - mg \sin \theta_g \geq \mu(mg \cos \theta_g - F_q)$$

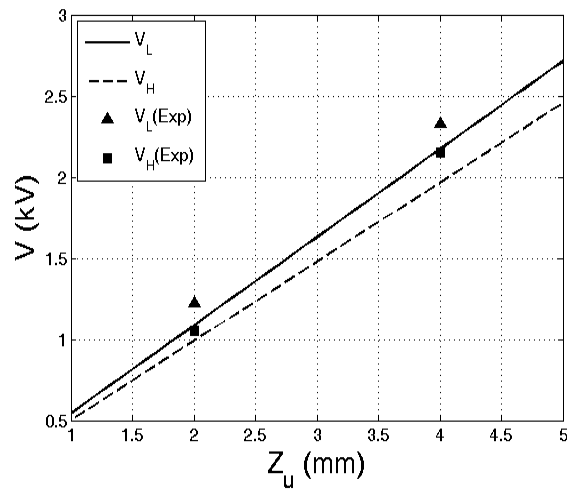
$$E_{H2} \geq \sqrt{\frac{\frac{4}{3}ga(\rho_p - \rho_s)(\mu \cos \theta_g + \sin \theta_g)}{\varepsilon_0 \varepsilon_s (\mu 0.832 \frac{2}{3} \pi^2 + \frac{4a}{z_u} \sin \theta_g)}} \quad (5.5)$$

การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า V_L V_{H1} และ V_{H2} กับ z_u ที่คำนวณจากสมการ (5.3) (5.4) และ (5.5) แสดงในภาพที่ 5.8



ภาพที่ 5.8 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า V_L V_{H1} และ V_{H2}

จากภาพที่ 5.8 สรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้า $V_{H1} < V_L < V_{H2}$ ทำให้การเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์ของอนุภาคจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ 1 เท่านั้น เพราะเมื่อใช้ V_{H2} อนุภาคจะยกตัวขึ้นจากระนาบกราวนด์ก่อนแล้ว. เราสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคจะเคลื่อนที่ตามแนวระนาบไปในทิศทาง $mg \sin \theta_g$ เสมอ เมื่อ $E_{H1} < E_0 < E_L$. ภาพที่ 5.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L และ V_H . ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองและการคำนวณ. ผลการทดลอง พบว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคอูมิเนียมยกตัวจากอิเล็กทรอนิกส์โรดกราวนด์และเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์ที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน.



ภาพที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L และ V_H

ตารางที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ เมื่อใช้เล็กโตรดกราวนด์ทำมุมกับระนาบแนวระดับ

| แรงดัน | ความคลาดเคลื่อนที่ระยะ z_u จากค่าเฉลี่ย (%) | |
|--------|---|--------------|
| | $z_u = 2$ mm | $z_u = 4$ mm |
| V_L | 16 | 8.4 |
| V_H | 6 | 9.7 |

5.2 การยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวนด์ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ที่จะเปรียบเทียบการยกตัวของอนุภาคระหว่างการคำนวณและการทดลอง. รูปแบบการจัดเรียงที่ใช้ทดลองหาแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์เป็นระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนาน แสดงในภาพที่ 5.10 โดยมีระยะแยก d เท่ากับ 2 และ 4 mm. การทดลองตั้งแต่หัวข้อนี้ใช้ระบบอิเล็กโตรดที่ได้แสดงในบทที่ 3 ซึ่งมีอิเล็กโตรดกราวนด์อยู่ในระนาบแนวระดับ $\theta_g \approx 0^\circ$.

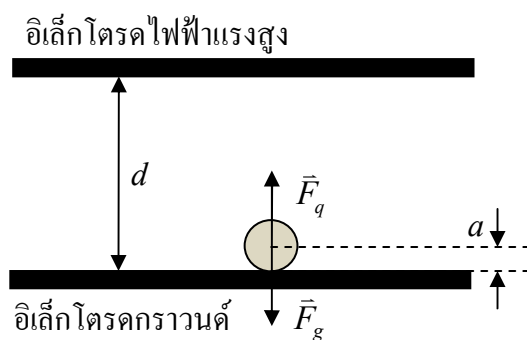
เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แรงที่กระทำต่ออนุภาคมี 2 ชนิด คือ แรงโน้มถ่วง และแรงคูลอมบ์. สำหรับอนุภาคที่วางบนระนาบอิเล็กโตรดกราวนด์ ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E_0 จากสมการที่ (2.23) ในบทที่ 2 สนามไฟฟ้า E_L ที่ทำให้อนุภาคยกตัวคือ

$$E_L = 0.5 \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s)a}{\epsilon_0 \epsilon_s}}$$

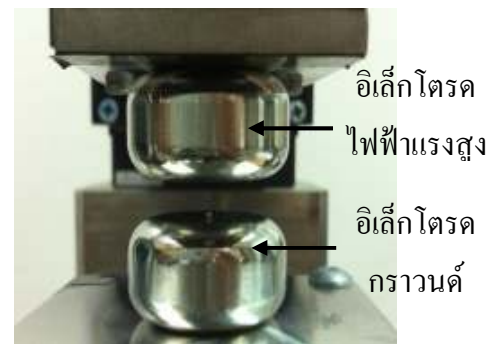
แรงดันไฟฟ้า V_L มีค่าเป็น

$$V_L = 0.5d \sqrt{\frac{g(\rho_p - \rho_s)a}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \quad (5.6)$$

สนามไฟฟ้า E_L แปรผันตามรากที่สองของความหนาแน่นของอนุภาคโดยประมาณ. ดังนั้น ที่ระยะแยกเดียวกัน แรงดันไฟฟ้า V_L ที่ทำให้อนุภาคสแตนด์เล็ยตัวขึ้นจะเป็น 1.7 เท่าของ V_L สำหรับอนุภาคอลูมิเนียม. แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L ทางทฤษฎีกับระยะแยกของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนด์เล็ยแสดงในภาพที่ 5.12.

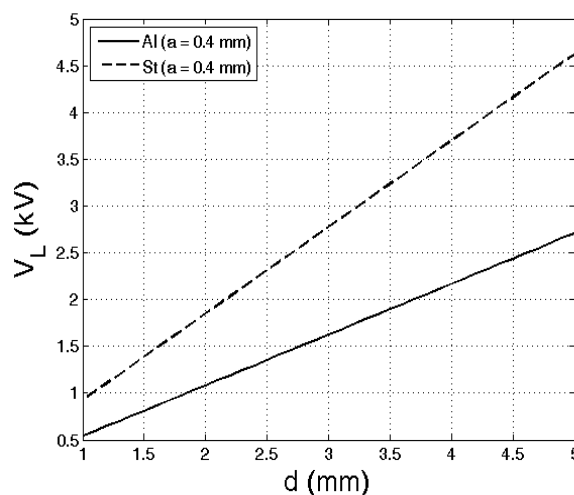


(ก) แผนภาพเค้าร่าง



(ข) อิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 5.10 การทดลองหาแรงดันไฟฟ้าที่อนุภาคยกตัวจากอิเล็กโตรดกราวนด์ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ



ภาพที่ 5.11 ค่าทางทฤษฎี แรงดันไฟฟ้า V_L ที่ทำให้อนุภาคยกตัวกับระยะแยก d

ผู้วิจัยได้ทดลองแรงดันไฟฟ้า V_L กับอนุภาคอลูมิเนียมที่ป้อนเป็นเวลาต่างๆ ที่ระยะแกป 2 mm โดยใช้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในภาพที่ 5.2. ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่ได้.

ตารางที่ 5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของ V_L เมื่อเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา T ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

| | | | | | | | |
|-------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|
| T (ms) | 12.5 | 25 | 50 | 150 | 250 | 400 | 500 |
| V_L | 1.36 | 1.3 | 1.25 | 1.22 | 1.23 | 1.21 | 1.23 |
| ความคลาด เคลื่อน (%) | 25.4 | 20 | 16 | 13 | 14 | 12 | 14 |

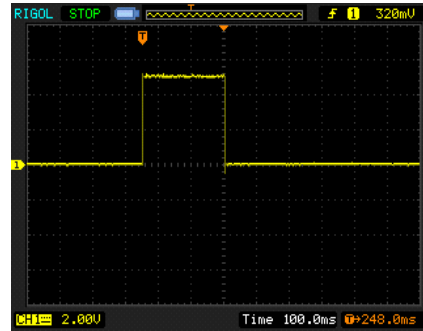
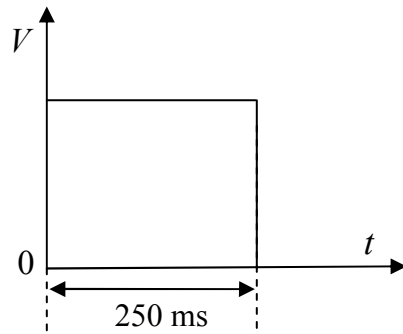
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 12.5-50 ms V_L มีค่ามากกว่าค่าที่ได้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 150-500 ms. ทั้งนี้ เนื่องมาจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีเวลาสั้นเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการยกตัวหรือทำให้เกิดการยกตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น. เราจึงต้องใช้ V_L ที่มีค่าเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าใช้ $V_L = 1.23$ kV เป็นเวลา 12.5 ms จะไม่พบการยกตัวหรืออาจพบได้แต่สังเกตได้ยาก แต่ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลา 500 ms จะเห็นการยกตัวชัดเจน. ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยจึงใช้เวลาในการป้อนแรงดันไฟฟ้าในช่วง 150-500 ms เพราะเวลาดังกล่าวจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของการยกตัวของอนุภาคแล้ว.

ในการทดลองเพื่อหาค่าของ V_L ที่ระยะแกปต่างๆ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นชนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เป็นเวลา 250 ms. ดังภาพที่ 5.12 อุณหภูมิและความชื้นขณะทดลองเท่ากับ 32 °C และ 50 % ตามลำดับ.

ขั้นตอนการทดลองทำโดย วางอนุภาคบนระนาบกราวนด์ ป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า V_L ที่ได้จากการคำนวณที่ระยะแกปนั้นประมาณ 2 kV เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นละ 0.05 kV จนกระทั่งอนุภาคยกตัวขึ้นจากอิเล็กทรอนิกส์. ทั้งนี้ทำการทดลอง 10 ครั้งต่อ 1 ระยะแกป สำหรับอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส. ภาพถ่ายจากการทดลองที่ระยะแกป 2 และ 4 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ.

แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลสยกตัวจากอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณด้วยสมการที่ (5.6) แสดงในภาพที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ. ในภาพที่ 5.15 และ 5.16 “Max”, “Avg” และ “Min” หมายถึง แรงดันไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ที่ได้จากการทดลองที่ระยะแกปนั้นๆ ตามลำดับ. ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า V_L ที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับ การคำนวณ แสดงในตารางที่ 5.3. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคทั้งสองชนิดยก

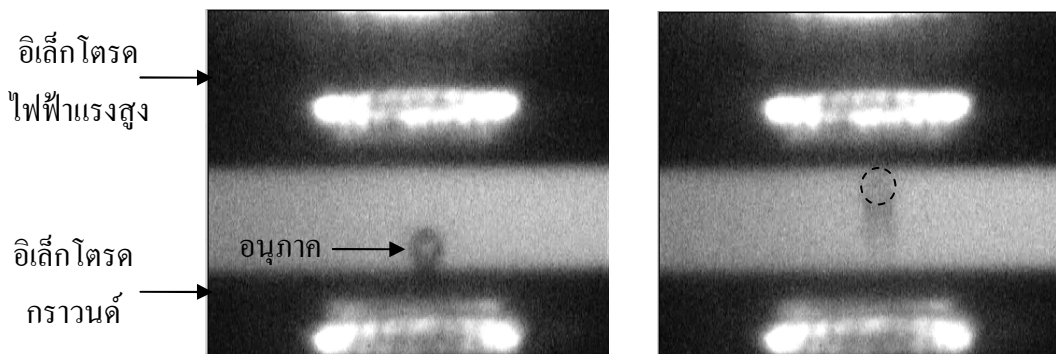
ตัวจากจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานด์มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ. ผลการทดลองกับอนุภาคสแตนเลสมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ระยะแกปทั้งสองน้อยกว่าการทดลองกับอนุภาคอลูมิเนียม.



(ก) ลักษณะรูปคลื่น

(ข) สัญญาณจากออสซิลอโคป

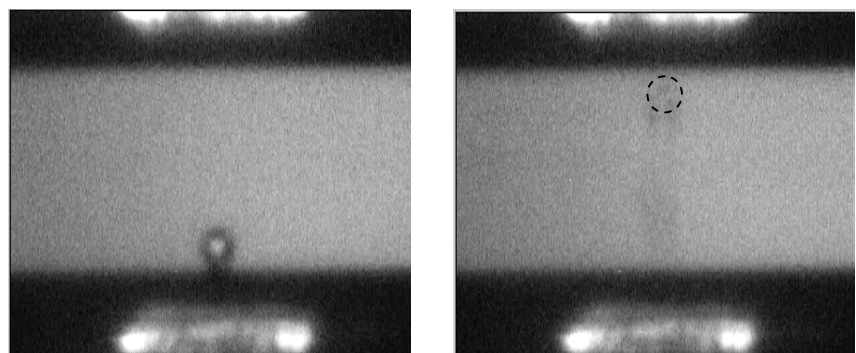
ภาพที่ 5.12 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม เวลา 250 ms ที่ใช้ในการทดลองหาค่า V_L ที่ระยะแกปต่างๆ



(ก) อนุภาควางบนระนาบกราวด์

(ข) อนุภาคยกตัว

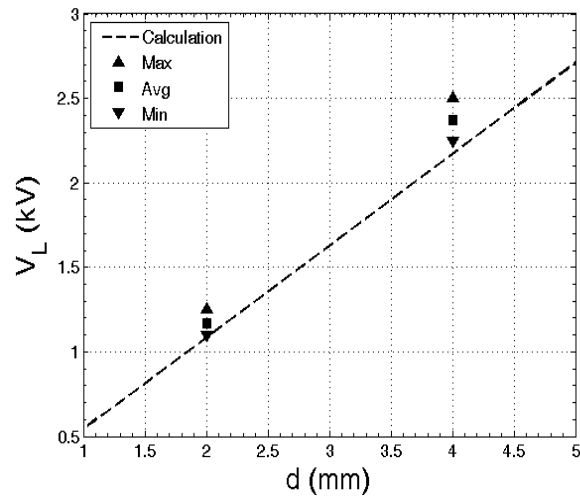
ภาพที่ 5.13 การทดลองที่ระยะแกป 2 mm



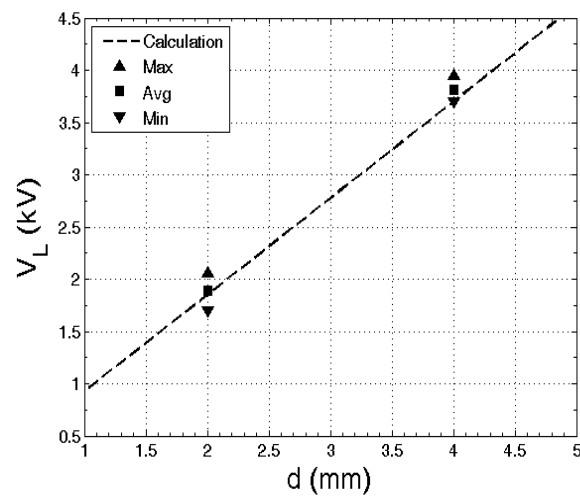
(ก) อนุภาควางบนระนาบกราวด์

(ข) อนุภาคยกตัว

ภาพที่ 5.14 การทดลองที่ระยะแกป 4 mm



ภาพที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคอลูมิเนียมยกตัว



ภาพที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคสแตนเลสยกตัว

ตารางที่ 5.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการคำนวณ เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

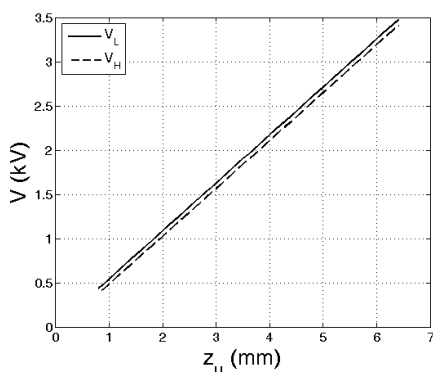
| อนุภาค | ค่าเฉลี่ย (%) ความคลาดเคลื่อนที่ระยะแกป d | |
|------------|---|--------------------|
| | $d = 2 \text{ mm}$ | $d = 4 \text{ mm}$ |
| อลูมิเนียม | 8.3 | 9.7 |
| สแตนเลส | 2.7 | 3.2 |

5.3 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่วางตัวบนตามระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

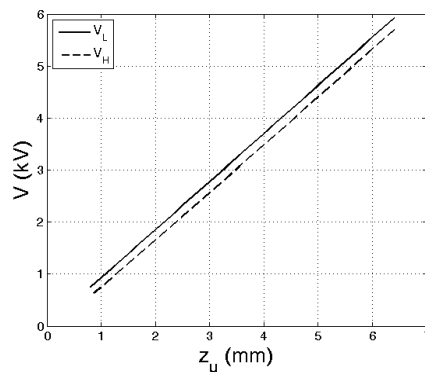
หัวข้อนี้นำเสนอการทดลองในกรณีที่อนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคอยู่สองลักษณะคือ

1. การยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวด์
2. การเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์.

การศึกษาการเคลื่อนที่ทั้งสองลักษณะนั้น มีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและเวลาของการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการสังเกตพฤติกรรมทั้งสองที่แตกต่างกัน. ภาพที่ 5.17 แสดงแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_L และ V_H ทางทฤษฎีที่ระยะแก๊ป z_u ในแนวตั้ง ณ ตำแหน่งอนุภาค และมุมระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง $\theta_0 = 3^\circ$ ภาพที่ 5.17ก และ 5.17ข เป็นของอนุภาคอลูมิเนียมและอนุภาคสแตนเลส ตามลำดับ. เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.17 จะเห็นได้ว่า V_L และ V_H ที่ระยะ z_u ใดๆ มีความใกล้เคียงกันมาก. ดังนั้น การใช้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมจึงไม่เหมาะสมกับการสังเกตการเคลื่อนที่ตามแนวระนาบกราวด์ของอนุภาค เพราะการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในแต่ละขั้นในการทดลองเพื่อสังเกต เราจะต้องเพิ่มทีละน้อยเพื่อไม่ให้แรงดันไฟฟ้าถึงค่า V_L ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นค่อนข้างที่จะทำได้ยาก. เมื่อพิจารณา V_L และ V_H ในภาพที่ 5.17ก ของอนุภาคอลูมิเนียมที่ z_u ใดๆ มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าของอนุภาคสแตนเลสในภาพที่ 5.17ข เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาคอลูมิเนียมกับอิเล็กโตรดมีค่ามากกว่า. ในกรณีนี้ ถ้าเราใช้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสี่เหลี่ยม จะทำให้การสังเกตการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์ของอนุภาคยังเป็นไปได้ยากมากยิ่งขึ้น. ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นลาดชัน (ramp wave) เนื่องจากทำให้แรงดันไฟฟ้าค่อยๆเพิ่มจนถึงค่ายอด และถ้าเราต้องการสังเกตการยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดกราวด์ เราควรใช้ลักษณะรูปคลื่นที่มีแรงดันคงที่ และมีเวลาในการป้อนแรงดันไฟฟ้ามากพอที่สามารถสังเกตทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ชัดเจน.



(ก) อนุภาคอลูมิเนียม



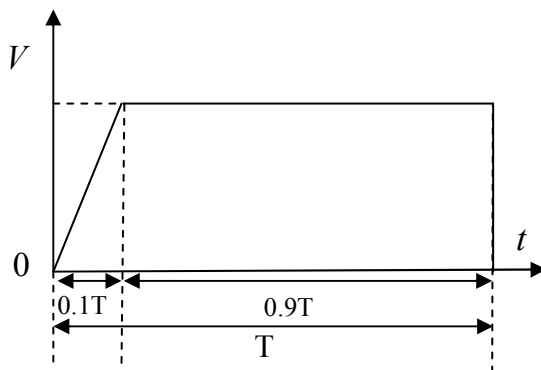
(ข) อนุภาคสแตนเลส

ภาพที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้า V_L และ V_H ทางทฤษฎีเป็นฟังก์ชันของระยะ z_u ในแนวตั้ง เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$.

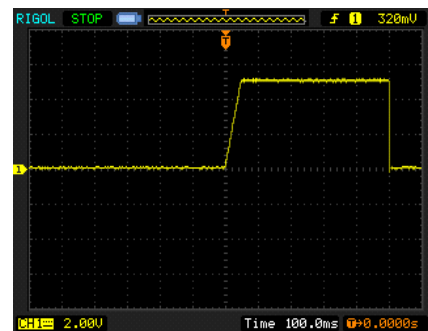
5.3.1 การยกตัวขึ้นจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์

ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบทที่ 4 ทำให้เราทราบถึงพฤติกรรมของอนุภาคภายใต้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ศึกษาว่า เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า จะถูกยกขึ้นทันทีและกระทบอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าแรงสูงและกระดอนกลับลงมากระทบอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์. ผลของแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า. เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคจริงเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ผู้วิจัยจึงเลือกค่าพารามิเตอร์ในการทดลองให้เหมือนกับการจำลองคือ ผู้วิจัยใช้อุณหภูมิของอนุภาคคือ $x_p = 106 \text{ mm}$ หรือ $z_u = 5.5 \text{ mm}$ และมุมระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสอง $\theta_0 = 3^\circ$.

การทดลองขั้นต้น ผู้วิจัยทำการสังเกตพฤติกรรมของอนุภาค โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นดังแสดงในภาพที่ 5.18. โดย 10 % ของคาบเวลาของสัญญาณเป็นแบบแรมป์ (ramp wave) และ 90 % ที่เหลือเป็นแบบแรงดันคงที่ สาเหตุที่เลือกใช้รูปคลื่นลักษณะนี้ เนื่องจากในช่วงเวลา 50 ms แรกที่รูปคลื่นเป็นแบบแรมป์ ผู้วิจัยจะสามารถสังเกตแนวโน้มการเคลื่อนที่ตามระนาบทรานส์ด้วยเช่นกัน. จากการทดลอง ที่คาบเวลา $T = 50, 100, 300$ และ 500 ms ของแรงดันไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าในกรณี $T = 50$ และ 100 ms สนามไฟฟ้ามีเวลาสั้นเกินไปทำให้เห็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคไม่ชัดเจน. เมื่อเวลา T มากกว่า 300 ms เราสามารถสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ชัดเจนมากกว่า.



(ก) ลักษณะรูปคลื่น

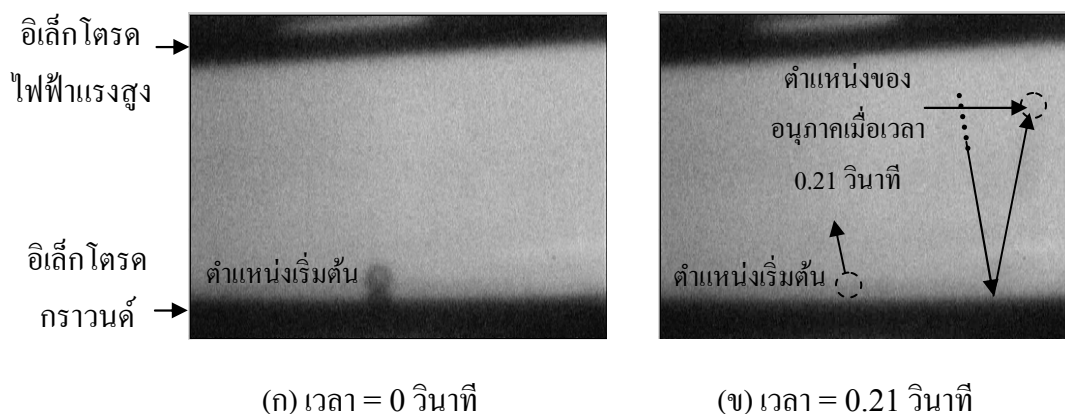


(ข) สัญญาณจากออสซิลโลสโคป

ภาพที่ 5.18 รูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการสังเกตการยกตัวของอนุภาคในระบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์

การทดลองกับอนุภาคอุณหภูมิเย็น โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า 5.5 kV (1.8 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้า V_L) ให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าอนุภาคอุณหภูมิเย็นมีพฤติกรรมเหมือนกับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบทที่ 4 นั่นคือ เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า จะถูกยกขึ้นทันทีและ

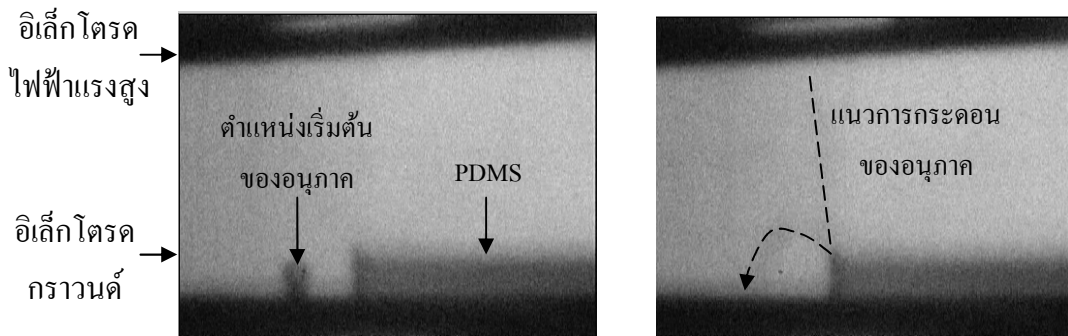
กระทบบีเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงและกระดอนกลับลงมากระทบบีเล็กโตรดกราวนด์. ผลของแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบบีทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า. ภาพที่ 5.19ก แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคคูลูมิเนียม และภาพที่ 5.19ข แสดงแนวการเคลื่อนที่และตำแหน่งของอนุภาคเมื่อเวลาผ่านไป 0.21 วินาที.



ภาพที่ 5.19 ตำแหน่งของอนุภาคคูลูมิเนียมและแนวการเคลื่อนที่ในระบบอีเล็กโตรดระนาบเอียง

เมื่อทดลองกับอนุภาคสแตนเลส โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า 8 kV (1.6 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้า V_L) ให้กับระบบอีเล็กโตรด ผลการทดลองแสดงว่าอนุภาคสแตนเลสมีพฤติกรรมเหมือนกับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในบทที่ 4 เช่นเดียวกัน.

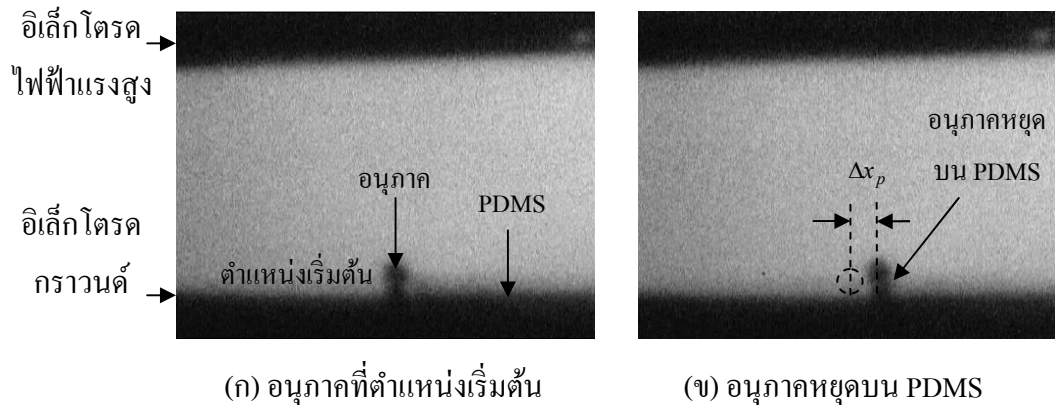
นอกจากการสังเกตการยกตัวของอนุภาคจากอีเล็กโตรดกราวนด์แล้ว ผู้วิจัยได้ทดลองวัดระยะกระจัดและการเคลื่อนที่ที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ในแนวระนาบ ในกรณีที่อนุภาคถูกยกขึ้นด้วยแรงทางไฟฟ้า และกระดอนขึ้นลงระหว่างอีเล็กโตรดทั้งสองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงเลข. ในการทดลองใช้ฉนวนพอลิเมอร์ Polydimethylsiloxane (PDMS) หนา 30 μm วางบนอีเล็กโตรดกราวนด์ด้านสนามไฟฟ้าต่ำกว่าตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค เพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาค. ในการทดลองสาเหตุที่ใช้ฉนวน PDMS ที่มีความหนาเพียง 30 μm เป็นเพราะว่า ถ้าใช้ PDMS ที่มีความหนามากๆ หรือประมาณ 1 mm ส่งผลทำให้ เมื่ออนุภาคเกิดการยกตัวและกระดอนขึ้นลงระหว่างอีเล็กโตรดทั้งสอง อนุภาคอาจเกิดการชนที่ขอบของ PDMS และทำให้กระดอนไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงได้. ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยจึงใช้ฉนวนที่มีความหนาน้อย ในการหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาค. ภาพที่ 5.20 แสดงแนวการกระดอนของอนุภาค เมื่อใช้ฉนวน PDMS ที่หนา 1 mm. ภาพที่ 5.20ก แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค และภาพ 5.20ข แสดงแนวการกระดอนหลังจากชนขอบ PDMS.



(ก) อนุภาคที่ตำแหน่งเริ่มต้น (ข) แนวการกระดอนของอนุภาคหลังจากชนขอบ PDMS

ภาพที่ 5.20 การกระดอนของอนุภาค เนื่องจากกระทบกับขอบของ PDMS เมื่อใช้ PDMS หนา 1 mm

การทดลองใช้ PDMS หนา $30 \mu\text{m}$ วางบนอิเล็กโตรดกราวนด์ด้านสนามไฟฟ้าต่ำกว่าตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค. อนุภาคถูกวางที่ตำแหน่งเริ่มต้น $x_p = 106 \text{ mm}$ และ $\theta_0 = 3^\circ$ ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามภาพที่ 5.18. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดลองเท่ากับ 4 kV (1.3 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้า V_L) และ 5.5 kV (1.8 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้า V_L) สำหรับอนุภาคอลูมิเนียม และ 8 kV (1.6 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้า V_L) สำหรับอนุภาคสแตนเลส. ผู้วิจัยทำการทดลอง 5 ครั้งในแต่ละกรณี. ภาพจากวิดีโอที่บันทึกได้พบว่า อนุภาคถูกยกขึ้นจนกระทบอิเล็กโตรดบนและกระดอนลงมากกระทบอิเล็กโตรดล่าง และถูกยกขึ้นอีกครั้ง เป็นเช่นนี้จนกระทั่งอนุภาคหยุดบน PDMS ซึ่งเป็นการกระทบอิเล็กโตรดกราวนด์เป็นครั้งที่ 2. ตำแหน่งของอนุภาคจากวิดีโอที่บันทึกแสดงในภาพที่ 5.21. ผู้วิจัยได้ระยะกระจัด Δx_p ในแนวระนาบจากตำแหน่งเริ่มต้นในภาพที่ 5.21ก ถึงตำแหน่งที่อนุภาคกระทบอิเล็กโตรดกราวนด์เป็นครั้งที่สองและหยุดในภาพที่ 5.21ข. ค่าความคลาดเคลื่อนระยะกระจัดของอนุภาคอลูมิเนียมและอนุภาคสแตนเลสแสดงในตารางที่ 5.4. จากผลการทดลองระยะกระจัดของการกระทบอิเล็กโตรดกราวนด์ครั้งที่สอง พบว่าอนุภาคอลูมิเนียมมีระยะกระจัดมากขึ้น เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 1.3 และ 1.8 เท่าของ V_L ซึ่งมีร้อยละความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเช่นเดียวกัน. ส่วนในกรณีของอนุภาคสแตนเลสที่แรงดันไฟฟ้า 1.6 เท่าของ V_L มีร้อยละความคลาดเคลื่อนถึง 38 % ทั้งนี้ร้อยละความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากความขรุขระของผิวอนุภาคที่สัมผัสอิเล็กโตรดทั้งสอง ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยเช่นกัน.



ภาพที่ 5.21 การหาระยะกระจัดของอนุภาค Δx_p จากตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค

ตารางที่ 5.4 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะกระจัดของอนุภาค เมื่อกระทบอิเล็กโตรดกราวนด์ครั้งที่ 2

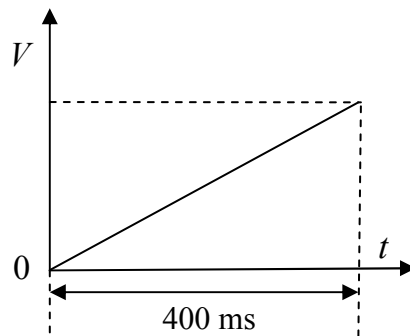
| แรงดันไฟฟ้า (kV) | อนุภาค | ระยะกระจัด Δx_p (mm) | | ความคลาดเคลื่อน (%) |
|------------------|------------|------------------------------|----------|---------------------|
| | | การคำนวณ | การทดลอง | |
| 4 | อลูมิเนียม | 0.83 | 0.75 | +9.6 |
| 5.5 | อลูมิเนียม | 1.06 | 0.79 | +25.4 |
| 8 | สแตนเลส | 0.80 | 1.11 | -38 |

5.3.2 การเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์

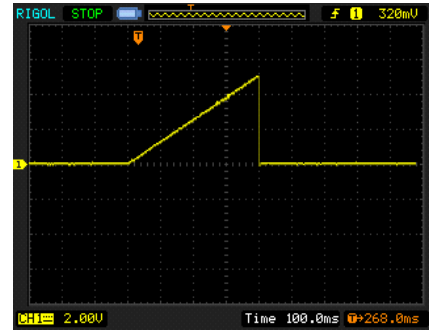
จากการทดลองโดยใช้รูปคลื่นในภาพที่ 5.18 ผู้วิจัยเห็นการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์ของอนุภาคสแตนเลสเท่านั้น. ในกรณีของอนุภาคอลูมิเนียมอาจมีแรงพื้นผิวอื่นๆ หรือเนื่องจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของอนุภาคอลูมิเนียมกับอิเล็กโตรดมีค่ามากกว่าอนุภาคสแตนเลสกับอิเล็กโตรดทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์ได้. เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมีค่ามาก จะทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่าง V_L และ V_H มีค่าใกล้เคียงกันมากเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.17. ผู้วิจัยจึงได้เปลี่ยนแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอิเล็กโตรดเป็นรูปคลื่นแบบลาดชัน ในภาพที่ 5.22 โดยมีช่วงเวลาเป็น 400 ms เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามระนาบกราวนด์.

ผู้วิจัยทำการวางอนุภาคอลูมิเนียมที่ตำแหน่งเริ่มต้น $x_p = 26$ mm และมุมระหว่างอิเล็กโตรด $\theta_0 = 3^\circ$. เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า พบว่าอนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.9 kV โดยที่การคำนวณเท่ากับ 0.74 kV. ทั้งนี้ จากการทดลอง 3 ครั้ง ผู้วิจัยสังเกตเห็นการเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์เพียง 1 ครั้งเท่านั้น ส่วนอีก 2 ครั้งอนุภาคจะถูกยกขึ้นจากอิเล็กโตรดแทน. ภาพที่ 5.23 แสดงตำแหน่งของอนุภาคอลูมิเนียมเมื่อได้รับ

สนามไฟฟ้า โดยภาพที่ 5.23ก แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค และในภาพที่ 5.23ข และ 5.23ค แสดงตำแหน่งของอนุภาคเมื่อเวลาผ่านไป 0.19 และ 0.33 วินาที ตามลำดับ.

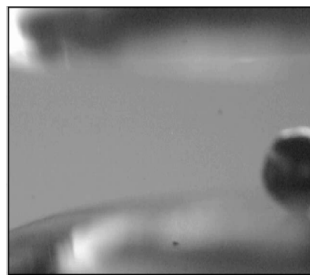


(ก) ลักษณะรูปคลื่น

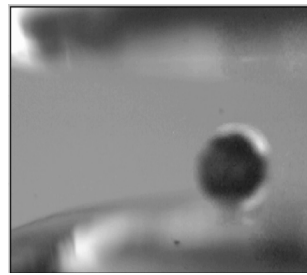


(ข) สัญญาณจากออสซิลโลสโคป

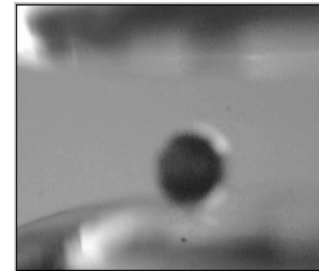
ภาพที่ 5.22 รูปคลื่นแรงดันแบบลาดชัน เวลา 400 ms



(ก) เวลา = 0 วินาที



(ข) เวลา = 0.19 วินาที



(ค) เวลา = 0.33 วินาที

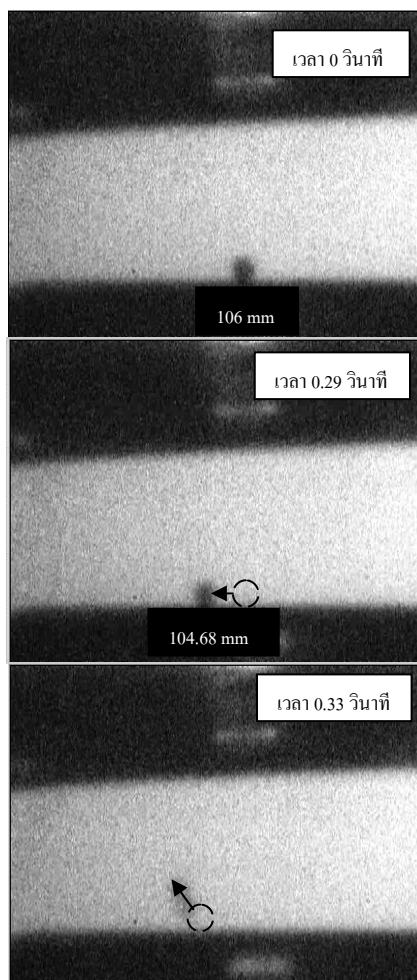
ภาพที่ 5.23 ตำแหน่งของอนุภาคอณูมิเนียม เมื่อเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์

ในกรณีของอนุภาคสแตนเลส ผู้วิจัยใช้รูปคลื่นในภาพที่ 5.18 ในการสังเกตการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์และการยกตัวจากระนาบกราวนด์ด้วยเช่นเดียวกัน. ผู้วิจัยทำการวางอนุภาคสแตนเลสที่ตำแหน่งเริ่มต้น $x_p = 106$ mm และมุมระหว่างอิเล็กโตรด $\theta_0 = 3^\circ$. เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5.02 kV (โดยที่การคำนวณเท่ากับ 4.7 kV) ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์เป็นระยะทาง 1.32 mm โดยใช้เวลา 0.29 วินาที ก่อนที่จะเริ่มถูกยกด้วยแรงทางไฟฟ้าในเวลาต่อมา. ภาพที่ 5.24 แสดงตำแหน่งของอนุภาคสแตนเลสเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า โดยแสดงตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งของอนุภาคเมื่อเวลาผ่านไป 0.29 และ 0.33 วินาที ตามลำดับ.

การศึกษาในหัวข้อนี้ทำให้เราสามารถยืนยันลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ว่า อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ลักษณะจริง ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2. อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตพฤติกรรมของอนุภาคโดยส่วนมากนั้น อนุภาคจะถูกยกด้วยแรงทางไฟฟ้า ไม่ว่าจะพยายามควบคุมอนุภาคด้วยลักษณะรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรือเวลาในการป้อน

แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามระนาบกราวนด์. ผลการทดลองดังกล่าว ทำให้เราทราบว่า ระบบอิเล็กทรอนิกส์นี้ เราจะไม่สามารถควบคุมอนุภาคไปยังบริเวณที่เราต้องการได้.

หัวข้อต่อไปกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวน ซึ่งเป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การควบคุมและหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าต่อไป.



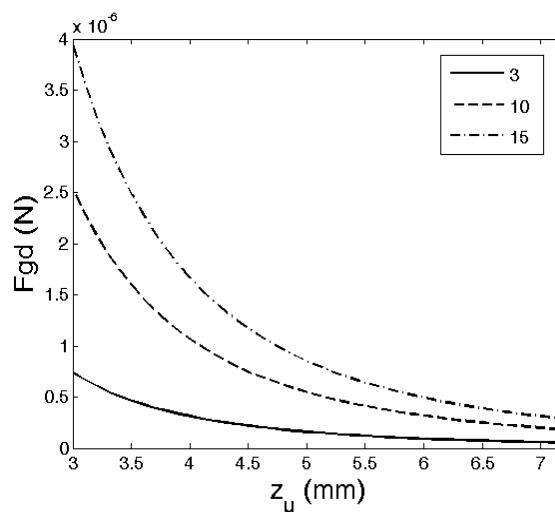
ภาพที่ 5.24 ตำแหน่งของอนุภาคสแตนเลสตามแนวอิเล็กโตรดกราวนด์ตามลำดับเวลา

5.4 การเคลื่อนที่บนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

หัวข้อนี้แสดงผลการทดลอง ในกรณีที่อนุภาควางตัวบนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ. ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 เมื่ออนุภาคอยู่บนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่า E_H อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าตำแหน่งปัจจุบัน. หัวข้อนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนฉนวน ในขั้นแรกผู้วิจัยจึงขอกล่าวถึงพารามิเตอร์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์และพฤติกรรมของอนุภาคที่พบในการทดลองก่อนที่จะเข้าสู่หัวข้อผลการทดลอง.

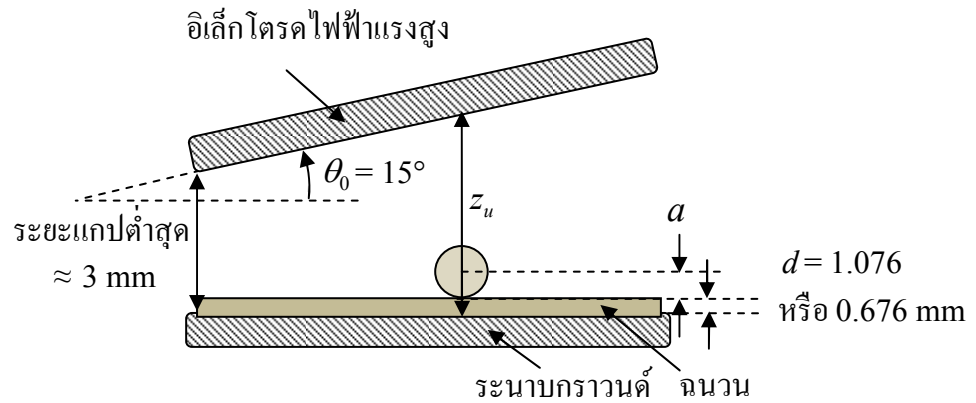
5.4.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อมีการแทรกชั้นฉนวน

ผู้วิจัยใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบเอียง และวางฉนวนบนระนาบอิเล็กทรอนิกส์กราวนด์. การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวน แรงทางไฟฟ้าที่เราพิจารณาจะมีเพียงแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า. สำหรับแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้านั้น ขนาดของแรงจะขึ้นอยู่กับระยะ r_p ซึ่งขึ้นกับมุม θ_0 ด้วยเช่นกัน. ดังนั้นในการทดลอง เนื่องจากแท่นปรับมุมสามารถปรับมุมได้มากที่สุด $\theta_0 = 15^\circ$ ผู้วิจัยจึงเปรียบเทียบขนาดของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ากับมุม θ_0 เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ 10° และ 15° โดยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ในระบบสามารถป้อนให้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์ได้คือ 10 kV. แต่เนื่องจากผู้วิจัยได้จัดเรียงระยะ z_u ที่ต่ำที่สุดของระบบอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 3 mm เมื่อคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าเบรกควาน์ของอากาศที่ 2.4 kV/mm เราจึงสามารถป้อนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 7.2 kV โดยประมาณ. ภาพที่ 5.25 แสดงขนาดแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าของอนุภาคตัวนำรัศมี 0.403 mm กับระยะ z_u เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ 10° และ 15° และป้อนแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 7.2 kV ซึ่งจะเห็นได้ว่า $\theta_0 = 15^\circ$ จะให้แรงแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าสูงสุดที่ z_u เดียวกัน ด้วยเหตุผลนี้ ผู้วิจัยจึงเลือก $\theta_0 = 15^\circ$ ในการทดลอง.



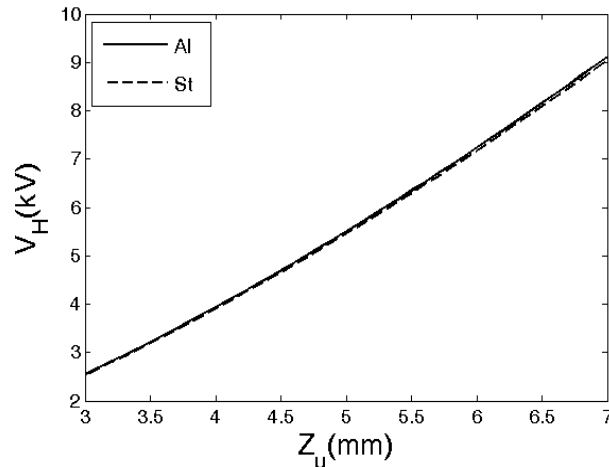
ภาพที่ 5.25 ขนาดของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าของอนุภาคตัวนำรัศมี 0.403 mm เมื่อ $\theta_0 = 3^\circ$ 10° และ 15° และ $V = 7.2$ kV

ในการทดลองใช้อุณหภูมิของอลูมิเนียม (Al) และสแตนเลส (St) ในการศึกษา. ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงในภาพที่ 5.26 โดยมีมุม $\theta_0 = 15^\circ$ และความหนา d ของฉนวนเท่ากับ 1.076 หรือ 0.676 mm (ความหนา PDMS รวมกับความหนาของพอลิเอไมด์) ซึ่งรายละเอียดของฉนวนได้กล่าวไว้ในบทที่ 3.



ภาพที่ 5.26 ระบบอิเล็กโทรดและจนวน

แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของอนุภาคอะลูมิเนียมและสแตนเลสที่ทำให้อนุภาคทั้งสองสามารถเคลื่อนที่บนจนวน V_H ที่คำนวณจากสมการที่ (2.33) เมื่อ $\theta_0 = 15^\circ$ แสดงในภาพที่ 5.27. ภาพที่ 5.27 แสดงให้เห็นว่า V_H ของอนุภาคทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน. ทั้งนี้ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของอนุภาค สแตนเลสสูงกว่าอนุภาคอะลูมิเนียมประมาณ 3 เท่า แต่ในทางตรงข้ามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตที่วัดได้ของอนุภาคสแตนเลส $\mu(\text{St})$ น้อยกว่าอนุภาคอะลูมิเนียม $\mu(\text{Al})$ ประมาณ 3 เท่าเช่นเดียวกัน.



ภาพที่ 5.27 V_H ของอนุภาคอะลูมิเนียม (Al) และสแตนเลส (St) เมื่อ $\theta_0 = 15^\circ$

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคอะลูมิเนียม โดยวางอนุภาคที่ $z_u = 5.3$ mm การทดลองนี้ใช้จนวนแบบที่ 1 (ความยาวของโพลีโอไมด์เท่ากับ ความยาวของ PDMS) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3. การทดลองนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนจนวน. ขั้นตอนการทดลองทำโดย วางอนุภาคบนจนวน โดยใช้ที่จับชิ้นงานชนิดพลาสติก และป้อนแรงดันไฟฟ้าตามภาพที่ 5.18. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าครั้งละ 0.05 kV จนกระทั่งอนุภาคเคลื่อนที่ตาม

ระนาบขนาน. ผลการทดลองในตารางที่ 5.5 แสดงร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีลักษณะพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่ต่างกันคือ

- A. อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่าตำแหน่งปัจจุบัน
- B. อนุภาคยกตัวขึ้นจากระนาบกราวด์
- C. ไม่เกิดการเคลื่อนที่ใดๆ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าถึง 8.5 kV

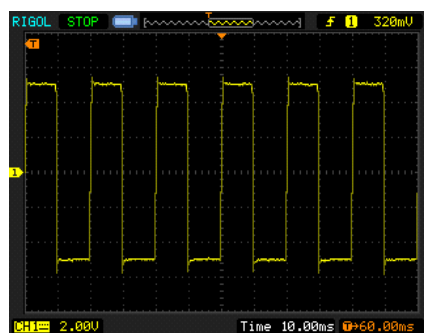
ตารางที่ 5.5 ร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาคอลูมิเนียม เมื่อ $z_u = 5.3$ mm เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

| ความหนาของ ฉนวน (mm) | จำนวนครั้งที่ทดลอง | ร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาค | | |
|-------------------------|--------------------|------------------------------|------|------|
| | | A | B | C |
| 0.676 | 17 | 17.5 | 11.8 | 70.5 |
| 1.076 | 28 | 53.5 | 21.5 | 25 |

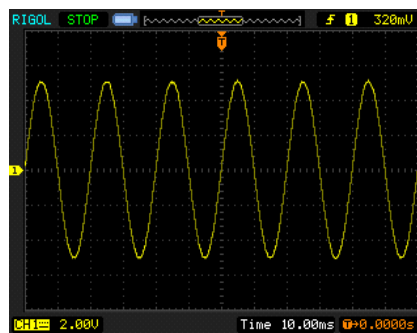
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เกิดการเคลื่อนที่แบบ A ซึ่งคิดเป็นร้อยละเพียง 17.5 และ 53.5 เท่านั้น. และมีโอกาสที่อนุภาคไม่เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งแรงพื้นผิวอื่นๆที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคกับฉนวนอาจเป็นสาเหตุในการทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ได้. ในขณะที่การยกตัวของอนุภาคแสดงให้เห็นว่าอนุภาคได้รับการอัดประจุก่อนที่จะนำมาทดลอง.

ในขั้นตอนต่อไป ผู้วิจัยได้เปลี่ยนแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นเอง (Arbitrary square wave, ASW) และรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal wave, Sin) ดังแสดงในภาพที่ 5.28ก และ 5.28ข ตามลำดับ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าชนิด 2 ขั้วที่มีความถี่กำลัง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เปลี่ยนที่จับชิ้นงานชนิดพลาสติกมาเป็นชนิดโลหะ และต่อกับระบบกราวด์ของอาคาร เพื่อลดหรือกำจัดประจุคงค้างบนผิวอนุภาคและก่อนการทดลองอนุภาค 1 ลูก ใช้ ethanol เช็ดฉนวนทุกครั้ง และป้อนสัญญาณไซน์ ความถี่ 50 Hz แรงดันไฟฟ้าประมาณ 3-4 kVpeak ก่อนการทดลองทุกครั้ง เพื่อลดปัญหาประจุคงค้างบนฉนวน.

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคอลูมิเนียม โดยวางที่ $z_u = 4.3$ mm. และขั้นตอนในการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา. ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.6 โดยตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บหลังแบบรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า Sin หรือ ASW แสดงจำนวนลูกคลื่นและคาบเวลาในหน่วย ms ตามลำดับ.



(ก) Arbitrary square wave



(ข) Sinusoidal wave

ภาพที่ 5.28 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการทดลองจากออสซิลโลสโคป (10 ms/Div)

ตารางที่ 5.6 ร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลิมิเนียม เมื่อ $z_u = 4.3$ mm เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าชนิด 2 ขั้ว

| ความหนาของฉนวน (mm) | รูปคลื่นแรงดัน | ร้อยละการเคลื่อนที่ของอนุภาค | | | จำนวนครั้งที่ทดลอง |
|------------------------|----------------|------------------------------|---|----|--------------------|
| | | A | B | C | |
| 1.076 | Sin (100, 20) | 90 | 0 | 10 | 10 |
| 0.676 | Sin (20, 20) | 91 | 0 | 9 | 12 |
| 0.676 | ASW (20, 20) | 91 | 0 | 9 | 12 |

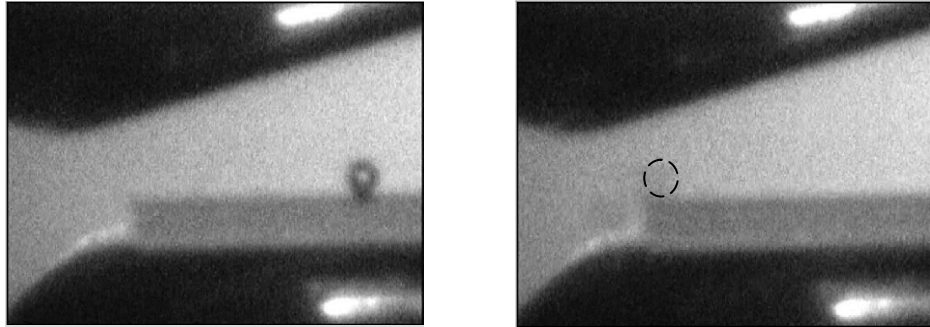
ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงตามระนาบฉนวนได้ถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป. ในหัวข้อต่อไปผู้วิจัยจะกล่าวถึงค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนฉนวน เมื่อทำการทดลองโดยใช้รูปคลื่นแรงดันดังกล่าว.

5.4.2 ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น

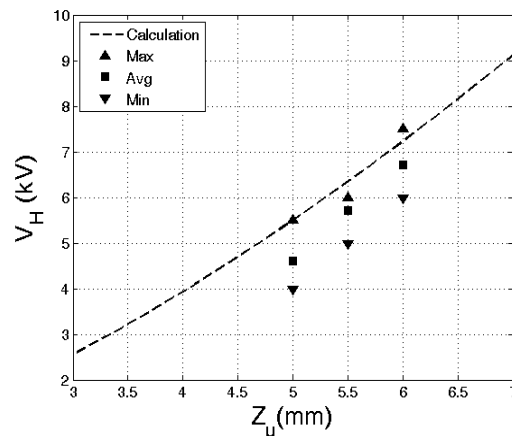
หัวข้อนี้แสดงผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวระนาบบนผิวฉนวน. ผู้วิจัยทดลองกับอนุภาคคอลลิมิเนียมและสแตนเลส โดยใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์แบบแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง ความถี่ 50 Hz ดังภาพที่ 5.28ข ความหนาฉนวนเท่ากับ 1.076 mm และมุมระหว่างอิเล็กโทรด $\theta_0 = 15^\circ$. ขณะทดลองมีอุณหภูมิและความชื้นเท่ากับ 32°C และ 52% ตามลำดับ.

สำหรับอนุภาคคอลลิมิเนียม ผู้วิจัยทดลองที่ระยะ $z_u = 5, 5.5$ และ 6 mm และสำหรับอนุภาคสแตนเลสผู้วิจัยทดลองที่ระยะ $z_u = 4.5, 5$ และ 5.5 mm. (ทำการทดลอง 5-7 ครั้งต่อ 1 ระยะ z_u). ภาพที่ 5.29 แสดงตำแหน่งของอนุภาคก่อนหลังจากการป้อนแรงดันไฟฟ้า ในภาพที่ 5.29ก แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาค และภาพที่ 5.29ข แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ขยับเข้า

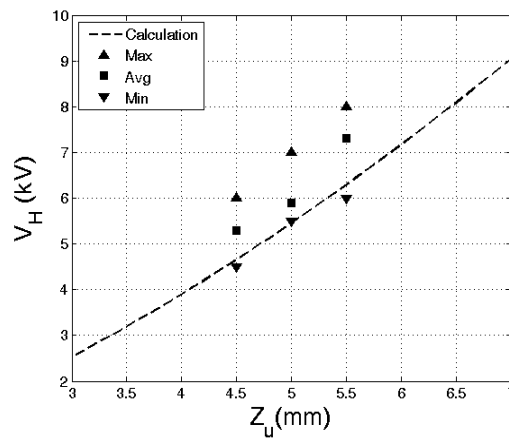
คู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง. ผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวระนาบบนฉนวนของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส แสดงในภาพที่ 5.30 และ 5.31 ตามลำดับ.



(ก) ตำแหน่งเริ่มต้น (จ) ตำแหน่งของอนุภาคเมื่อเวลาผ่านไป 0.12 วินาที
ภาพที่ 5.29 ภาพถ่ายของอนุภาคที่เคลื่อนที่บนฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 5.30 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคอลูมิเนียมเคลื่อนที่ตามแนวระนาบบนฉนวน



ภาพที่ 5.31 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคสแตนเลสเคลื่อนที่ตามแนวระนาบบนฉนวน

ในภาพที่ 5.30 และ 5.31 “Max”, “Avg” และ “Min” หมายถึง แรงดันไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ตามลำดับ ที่ได้จากการทดลองที่ระยะ z_u ณ ตำแหน่ง เริ่มต้นของอนุภาคนั้นๆ. ความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บน จนวนที่ได้จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ แสดงในตารางที่ 5.7. ผลการทดลอง พบว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนจนวนที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับ การคำนวณของอนุภาคทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงประมาณ 9-16% เป็นส่วนใหญ่.

ตารางที่ 5.7 แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนจนวนที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ

| อนุภาค | ค่าเฉลี่ย (%) ความคลาดเคลื่อนที่ระยะ z_u | | | |
|------------|--|--------------|----------------|--------------|
| | $z_u = 4.5$ mm | $z_u = 5$ mm | $z_u = 5.5$ mm | $z_u = 6$ mm |
| อลูมิเนียม | - | 16 | 10 | 7 |
| สแตนเลส | 15 | 9 | 16 | - |

5.5 การยึดจับอนุภาคโดยใช้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

หัวข้อนี้กล่าวถึงการทดลองยึดจับอนุภาค ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยใช้คุณสมบัติ ของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าที่ว่า อนุภาคตัวนำเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และมีค่า สนามไฟฟ้ามากกว่า E_H อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่า ณ ตำแหน่ง ปัจจุบัน. ผู้วิจัยจึงทำการจัดเรียงบริเวณของสนามไฟฟ้าภายในระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสองบริเวณ โดย ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของจนวนในการทดลองที่ผ่านมา โดยให้ขอบของจนวนที่อยู่ทางด้าน สนามไฟฟ้าสูงอยู่ห่างจากขอบของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองทางด้านสนามไฟฟ้าสูงเป็นระยะประมาณ 1 mm. ดังแสดงในภาพที่ 5.32. การทดลองนี้ยังคงใช้จนวนแบบที่ 1 เช่นเดิม.

ผู้วิจัยทำการคำนวณ โดยการประมาณสนามไฟฟ้าตามแนวเส้น X ซึ่งคือแนวการเคลื่อนที่ ของอนุภาค. ผู้วิจัยให้บริเวณที่มีจนวนอยู่เป็นบริเวณที่ 1 ซึ่งผู้วิจัยละเลยความหนาของพอลิอิมัล เพราะมีความหนาน้อยมาก และให้บริเวณที่ไม่มีจนวนเป็นบริเวณที่ 2. สนามไฟฟ้าบริเวณที่ 1 E_1 ตามแนวเส้น X คำนวณจาก [10]

$$E_1 = \frac{(\epsilon_1 / \epsilon_s)(V_0 / (D1 + D2))}{1 + [(\epsilon_1 / \epsilon_s) - 1](D2 / (D1 + D2))} \quad (5.7)$$

เมื่อ ϵ_1 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของจนวน PDMS ซึ่งเท่ากับ 3.1

ϵ_s คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศซึ่งเท่ากับ 1.0

V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าซึ่งเท่ากับ 7.2 kV

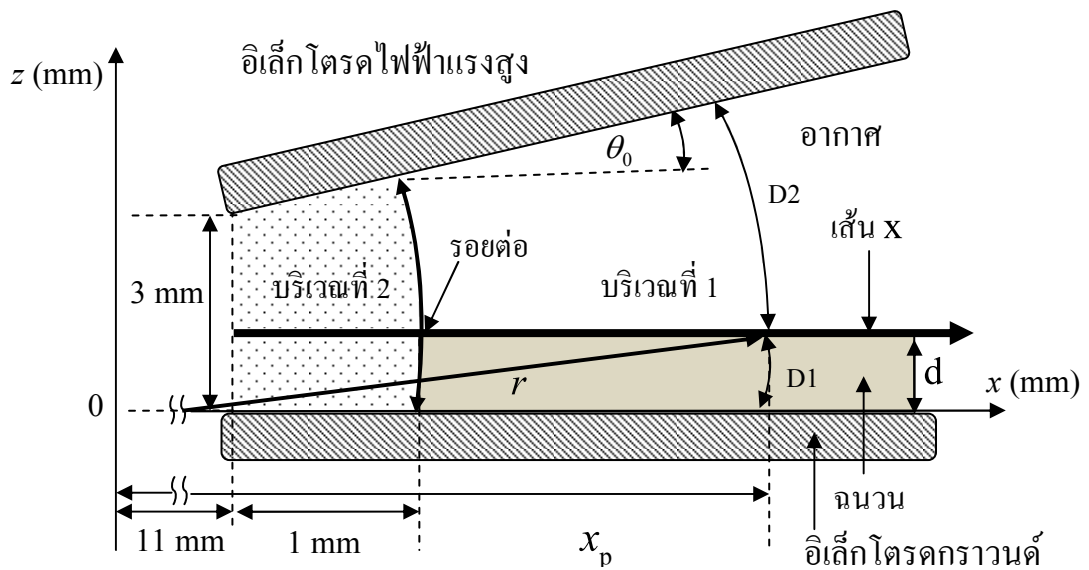
D_1 คือ ความยาวเส้นโค้งจากตำแหน่ง x_p บนแนวเส้น X ถึงแนวอเล็กโตรดอน

D_2 คือ ความยาวเส้นโค้งจากตำแหน่ง x_p บนแนวเส้น X ถึงแนวอเล็กโตรดล่าง.

สนามไฟฟ้าบริเวณที่ 2 E_2 ตามแนวเส้น X ประมาณอย่างง่ายด้วยสมการ

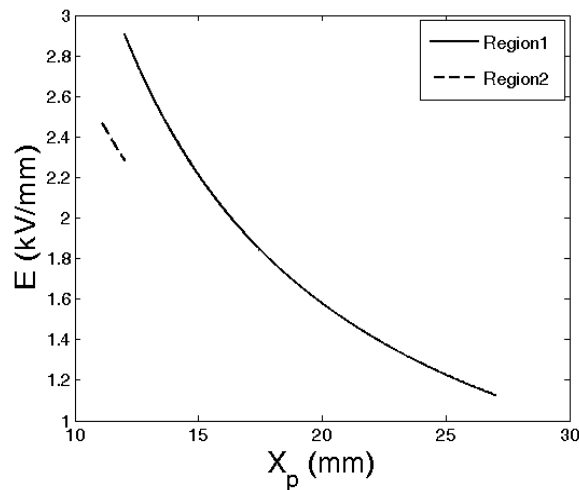
$$E_2 = \frac{V_0}{r\theta_0} \quad (5.8)$$

เมื่อ r คือ ความยาวเส้นตรงจากจุดกำเนิดพิกัดถึงตำแหน่ง x_p บนเส้น X

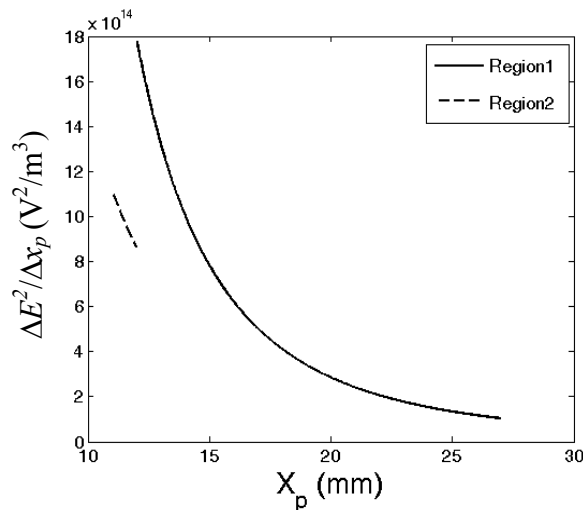


ภาพที่ 5.32 แผนภาพเค้าร่างที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าทั้งสองบริเวณ

ภาพที่ 5.33 แสดงขนาดสนามไฟฟ้าทั้งตามแนวเส้น X สังเกตว่าสนามไฟฟ้าจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางระหว่างจนวนและอากาศ และภาพที่ 5.34 แสดงค่าของอัตราการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าต่อระยะทาง $\frac{\Delta E^2}{\Delta x_p}$. จากสมการที่ (5.7) และ (5.8) และลักษณะของสนามไฟฟ้าทำให้เราเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคจะต้องเคลื่อนที่มาบริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง.



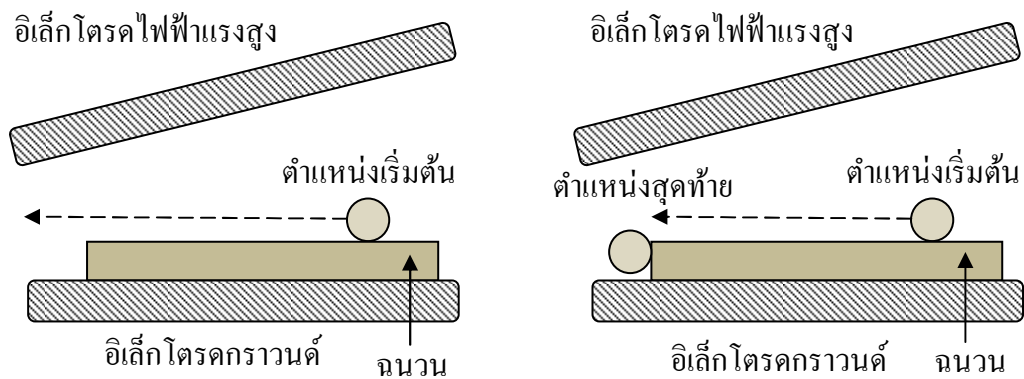
ภาพที่ 5.33 ขนาดสนามไฟฟ้าของการจัดเรียงในภาพที่ 5.32 ตามแนวเส้น X



ภาพที่ 5.34 อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังสองของสนามไฟฟ้าตามแนวเส้น X ของการจัดเรียงตามภาพที่ 5.32

จากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ในการทดลองต่อไป เรา จะสังเกตพฤติกรรมของอนุภาคที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง. การทดลองวางอนุภาคที่ ตำแหน่งเริ่มต้น $z_u = 4 \text{ mm}$ และป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์แบบแรงดันต่อเนื่อง ความถี่ 50 Hz (ภาพที่ 5.28ข) ใช้ฉนวนหนา 1.076 mm. ทำการทดลอง 7 โดยใช้เฉพาะอนุภาคอลูมิเนียม. จากการทดลองจำนวน 7 ครั้งพบว่า มีการทดลอง 3 ครั้งที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังบริเวณที่สนามไฟฟ้าสูง และเคลื่อนที่ออกนอกระบบอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนอีก 4 ครั้งอนุภาคติดอยู่ที่ขอบของฉนวน PDMS. ทั้งนี้การที่อนุภาคติดอยู่ที่ขอบของ PDMS เป็นเพราะว่า ในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้ามีผลทำให้อนุภาคพยายามที่จะเคลื่อนที่กลับมายัง

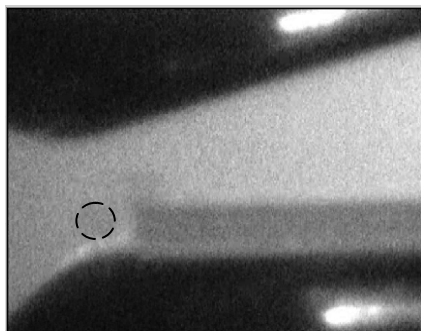
บริเวณรอยต่ออีกครั้ง เพราะเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงกว่า. ในกรณีที่อนุภาคเคลื่อนที่หลุดจากระบบอิเล็กโตรดอาจเป็นเพราะว่าอนุภาคมีความเร็วสูงมากเกินไป แรงเกรเดียนต์จึงไม่สามารถยึดจับอนุภาคไว้ได้. แผนภาพเค้าร่างของการเคลื่อนที่ที่แสดงในรูปที่ 5.35 และภาพจากวิดีโอที่บันทึกจากการทดลองแสดงในภาพที่ 5.36.



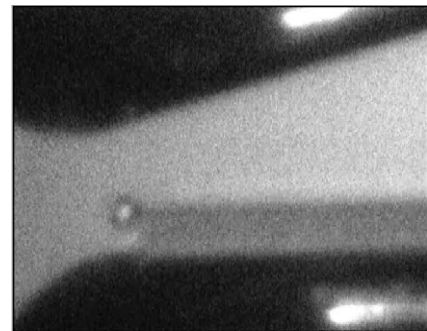
(ก) อนุภาคเคลื่อนที่หลุดจากระบบอิเล็กโตรด (ข) อนุภาคเคลื่อนที่ถูกยึดด้วยแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า
ภาพที่ 5.35 แผนภาพเค้าร่างตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 1



(ก) อนุภาค ณ ตำแหน่งเริ่มต้น



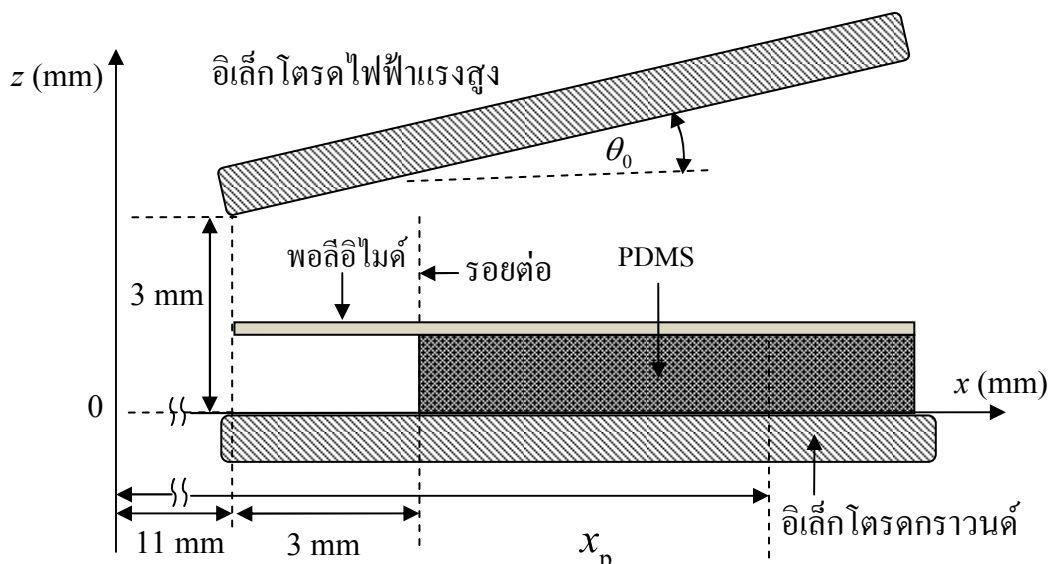
(ข) อนุภาคเคลื่อนที่หลุดจากระบบอิเล็กโตรด



(ค) อนุภาคถูกยึดด้วยแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า

ภาพที่ 5.36 ภาพจากการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 1

เมื่อเราทราบถึงพฤติกรรมของอนุภาคบริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองแล้ว ในการทดลองต่อไปมีจุดประสงค์ที่จะปรับปรุงความสามารถในการยึดจับอนุภาคด้วยสนามไฟฟ้า ผู้วิจัยได้เปลี่ยนรูปแบบจนวนจากแบบที่ 1 เป็นแบบที่ 2 ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3. พิมล์พอลิอิมัลมีความยาวมากกว่าแผ่น PDMS 3 mm โดยเริ่มต้นที่ขอบของระบบอเล็กโตรดและส่วนที่เป็น PDMS จะเริ่มต้นที่ระยะ x เท่ากับ 14 mm ดังแสดงในภาพที่ 5.37. ผู้วิจัยทดลองที่ระยะ $z_u = 5, 5.5$ และ 6 mm สำหรับอนุภาคคอลลอยด์และสำหรับอนุภาคสแตนเลสผู้วิจัยทดลองที่ระยะ $z_u = 4.5, 5$ และ 5.5 mm. ทั้งนี้ ได้ทำการทดลอง 5-7 ครั้งต่อ 1 ระยะ z_u โดยใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์แบบแรงดันต่อเนื่อง ความถี่ 50 Hz ดังภาพที่ 5.28ข. จนวนมีความหนารวม 1.076 mm.

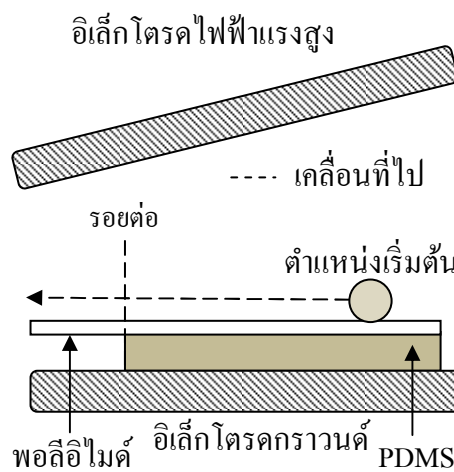


ภาพที่ 5.37 รูปแบบการจัดเรียงระบบอเล็กโตรดเพื่อใช้ยึดจับอนุภาค

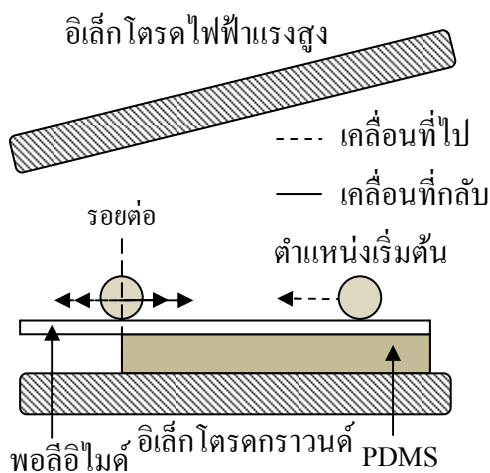
จากการทดลองผู้วิจัยพบว่าอนุภาคคอลลอยด์และสแตนเลสมีพฤติกรรมเหมือนกัน. ผู้วิจัยแบ่งพฤติกรรมของอนุภาคได้เป็น 3 แบบ. พฤติกรรมแบบที่ 1 คือ อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงและหลุดจากระบบอเล็กโตรด. พฤติกรรมแบบที่ 2 คือ อนุภาคถูกยึดจับด้วยแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า ณ บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง พฤติกรรมแบบที่ 3 คือ อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อจนกระทั่งถึงขอบของระบบอเล็กโตรดเป็นบริเวณที่มีระยะแคบต่ำที่สุด. อนุภาคจะเคลื่อนที่กลับมาขอรอยต่ออีกครั้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าของระบบอเล็กโตรดมีค่าต่ำกว่าในระบบ จึงทำให้มีผลของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้น ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่กลับมาบริเวณดังกล่าว. สำหรับพฤติกรรมของอนุภาคที่บริเวณรอยต่อนั้น อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ไปกลับอยู่ตลอดไปจนกระทั่งหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้า หรือมีการเคลื่อนที่ไปกลับชั่วขณะหนึ่งและหยุดการ

เคลื่อนที่ เพราะเนื่องจากจุดนั้นเป็นจุดที่เกิดสมดุลของแรงในแนวแกน x . แผนภาพเค้าร่างการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 2 แสดงรูปที่ 5.38 โดยแสดงพฤติกรรมแบบที่ 1, 2 และ 3 ในภาพที่ 5.38ก 5.38ข และ 5.38ค ตามลำดับ. ภาพที่ 5.39 แสดงตัวอย่างของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้จากวิดีโอที่บันทึกในการทดลอง.

ตารางที่ 5.8 แสดงความสามารถของแรงแรงแย่งไฟฟ้าที่ยึดจับอนุภาคได้ โดยแสดงค่าร้อยละของแรงแรงแย่งไฟฟ้าที่ยึดจับอนุภาคได้ที่ทดลอง ณ ตำแหน่ง z_0 ของอนุภาคในขณะเริ่มต้นต่างๆ สำหรับอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส.

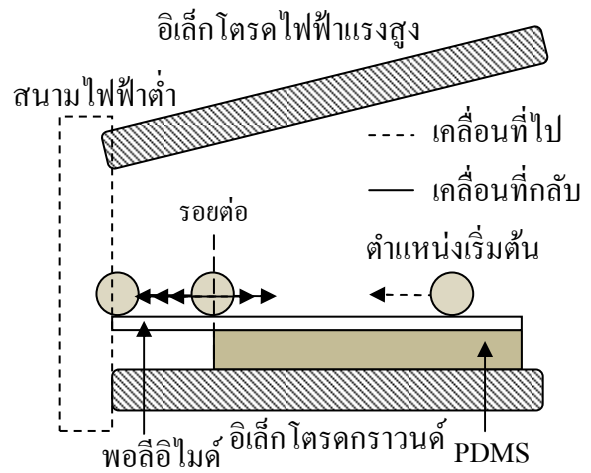


(ก) พฤติกรรมแบบที่ 1 อนุภาคเคลื่อนที่หลุดจากระบบอิเล็กโตรด



(ข) พฤติกรรมแบบที่ 2

อนุภาคถูกยึดที่รอยต่อของตัวกลาง



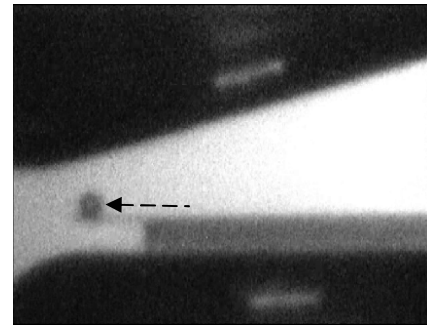
(ค) พฤติกรรมแบบที่ 3

อนุภาคถูกยึดที่ขอบของระบบอิเล็กโตรด

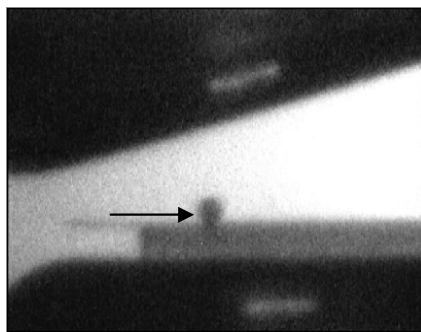
ภาพที่ 5.38 แผนภาพเค้าร่างการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 2



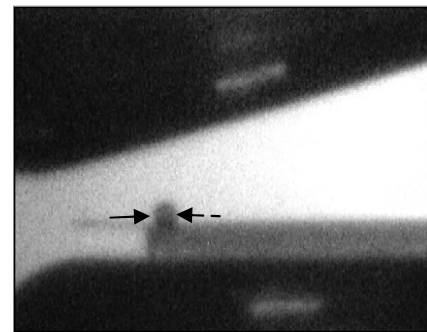
(ก) ตำแหน่งเริ่มต้น



(ข) อนุภาคถูกยึดที่ขอบของระบบอิเล็กทรอนิกส์



(ค) อนุภาคเคลื่อนที่กลับผ่านบริเวณรอยต่อ (ง) อนุภาคเคลื่อนที่ไปกลับและหยุดเคลื่อนที่



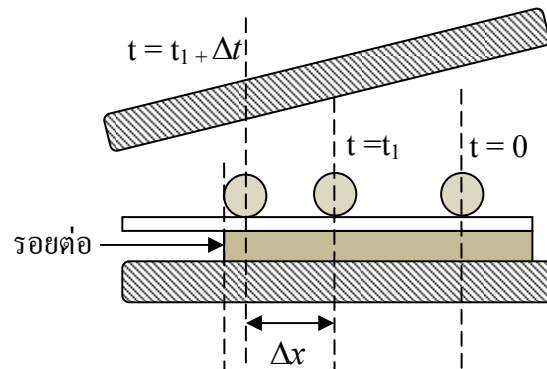
ภาพที่ 5.39 ภาพจากการทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนฉนวนแบบที่ 2

ตารางที่ 5.8 ความสามารถของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าที่ยึดจับอนุภาค

| อนุภาค | ระยะ z_u (mm) | จำนวนครั้งที่ทดลอง | ร้อยละของอนุภาคที่ถูกยึดจับ |
|------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|
| อลูมิเนียม | 5 | 5 | 100 |
| | 5.5 | 7 | 57.1 |
| | 6 | 7 | 14.2 |
| สแตนเลส | 4.5 | 5 | 100 |
| | 5 | 5 | 100 |
| | 5.5 | 5 | 60 |

จากผลการทดลองที่ผ่านมา เราพบว่ายังคงมีอนุภาคที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อและพ้นออกจากระบบอิเล็กทรอนิกส์ได้. ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของอนุภาคเหล่านั้นมีความเร็วที่มากกว่าอนุภาคที่ถูกยึดจับที่รอยต่อของตัวกลางและที่ขอบของอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสอง. ผู้วิจัยจึงทำการประมาณความเร็วของอนุภาคทั้งหมด ณ บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ทั้งในกรณีที่อนุภาคถูกยึดจับได้และไม่ถูกยึดจับ โดยใช้ภาพที่บันทึกจากกล้องวิดีโอ. การประมาณใช้ 2 ภาพสุดท้ายก่อนที่อนุภาค

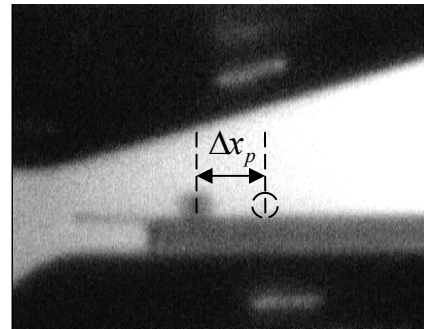
จะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณรอยต่อของตัวกลาง. ภาพที่ 5.40 แสดงแผนภาพเค้าร่างการหาความเร็วของอนุภาค โดยทำการหาระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ Δx_p และเวลาการเคลื่อนที่ Δt ของการเคลื่อนที่ดังกล่าวเพื่อคำนวณความเร็วของอนุภาค. ภาพที่ 5.41 แสดงตัวอย่างภาพที่ใช้ในการหาความเร็วของอนุภาคที่บันทึกจากกล้องวิดีโอ.



ภาพที่ 5.40 แผนภาพเค้าร่างการหาความเร็วของอนุภาค



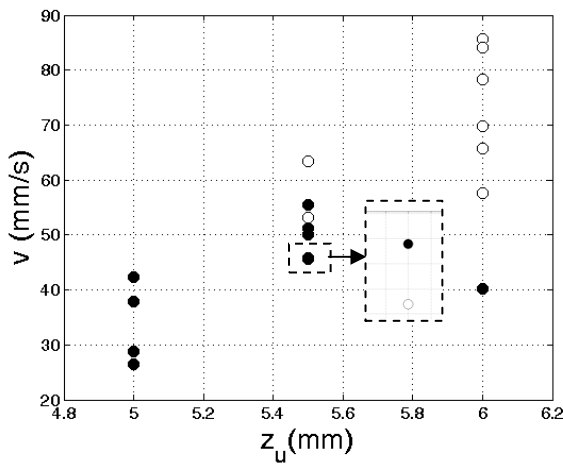
(ก) อนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น



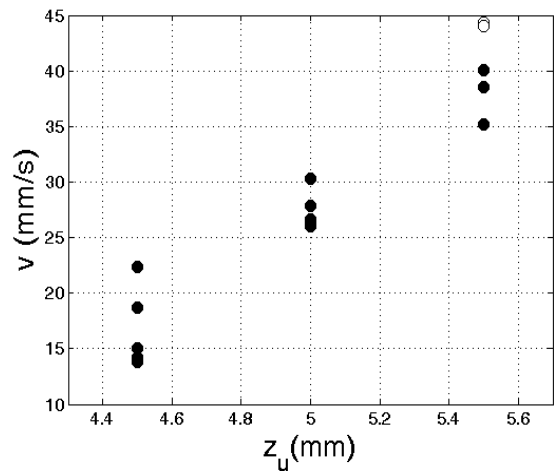
(ข) อนุภาคเคลื่อนที่เป็นระยะ Δx_p

ภาพที่ 5.41 ตัวอย่างภาพการหาความเร็วของอนุภาคขณะที่เข้าสู่บริเวณกั้นคัก

ภาพที่ 5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโดยประมาณของอนุภาค ณ บริเวณรอยต่อกับตำแหน่งเริ่มต้น z_0 โดยภาพที่ 5.42ก และ 5.42ข เป็นของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส ตามลำดับ. ในภาพที่ 5.42 สัญลักษณ์วงกลมสีดำ คือความเร็วของอนุภาคถูกยึดจับ และสัญลักษณ์วงกลมสีขาว คือความเร็วของอนุภาคไม่ถูกยึดจับ.

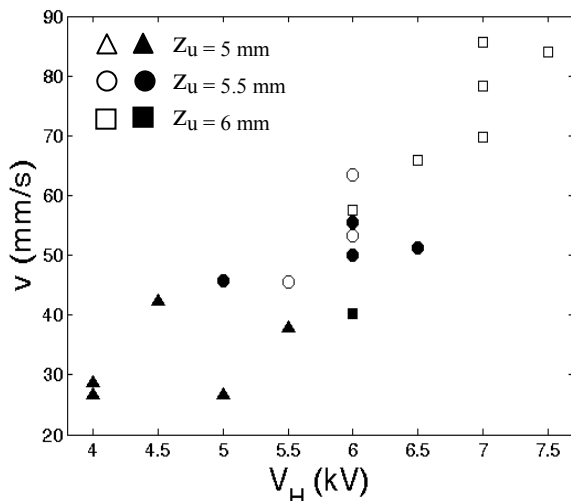


(ก) อนุภาคอลูมิเนียม

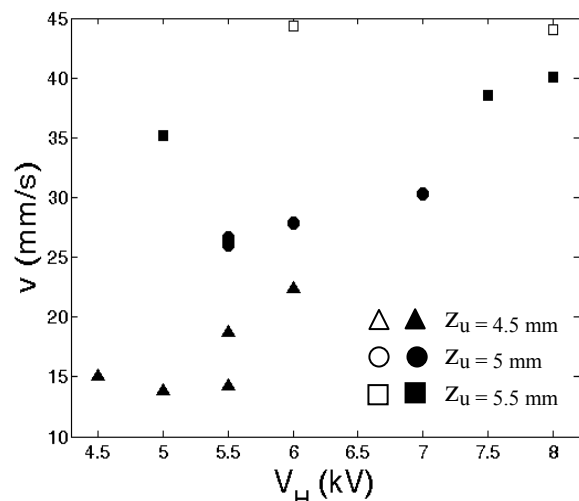


(ข) อนุภาคสแตนเลส

ภาพที่ 5.42 ความเร็วโดยประมาณของอนุภาค ณ บริเวณรอยต่อกับตำแหน่งเริ่มต้น z_u



(ก) อนุภาคอลูมิเนียม



(ข) อนุภาคสแตนเลส

ภาพที่ 5.43 ความเร็วโดยประมาณของอนุภาค ณ บริเวณรอยต่อกับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_H

ภาพที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโดยประมาณของอนุภาค ณ บริเวณรอยต่อกับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_H โดยภาพที่ 5.43ก และ 5.43ข เป็นของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส ตามลำดับ. ในภาพที่ 5.43 สัญลักษณ์สีดำและสีขาว แทนความเร็วของอนุภาคที่ถูกยึดจับและไม่ถูกยึดจับ ตามลำดับ. ส่วนสัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม วงกลม และสี่เหลี่ยม แทนตำแหน่งเริ่มต้น z_u ของอนุภาค โดยสำหรับอนุภาคอลูมิเนียมเป็น 5, 5.5 และ 6 mm ตามลำดับ. สำหรับอนุภาคสแตนเลสเป็น 4.5, 5 และ 5.5 mm ตามลำดับ.

ผลการประมาณความเร็วของอนุภาคทั้งสองชนิด แสดงว่าการที่อนุภาคถูกยึดจับนั้น ไม่ได้ขึ้นกับความเร็วของอนุภาคเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า ณ ขณะนั้นด้วย. เนื่องจากถึงแม้ว่าการที่อนุภาคชนิดเดียวกัน สองอนุภาคมีความเร็วเท่ากันในขณะกำลังเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณรอยต่อของตัวกลาง แต่สนามไฟฟ้าหรือค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าไม่เท่ากัน อนุภาคที่มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่มากกว่าอาจจะถูกยึดจับได้ แต่ในกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่น้อยกว่าอาจจะไม่ถูกยึดจับ. ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า พลังงานหรือแรงที่เกิดจากแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า ณ บริเวณรอยต่อของตัวกลางและขอบของอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่าขึ้นกับสนามไฟฟ้าในระบบอิเล็กโทรด ณ ขณะนั้น. ดังนั้น ถ้าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่มีค่ามากกว่าพลังงานที่ใช้ดึงอนุภาคกลับมายังระบบอิเล็กโทรด อนุภาคก็จะสามารถเคลื่อนที่พ้นจากระบบอิเล็กโทรด. สำหรับอนุภาคออลูมิเนียมจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ $z_0 = 6 \text{ mm}$ และอนุภาคสแตนเลสที่ $z_0 = 5.5 \text{ mm}$ ความสามารถของระบบอิเล็กโทรดที่สามารถยึดจับอนุภาคทั้งสองชนิด คืออนุภาคต้องมีความเร็วต่ำกว่า 57 และ 44 mm/s โดยประมาณตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำให้แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าที่ยึดจับอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นการเพิ่มความเร็วของอนุภาคก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณรอยต่อของตัวกลางด้วยเช่นเดียวกัน.

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลของความเร็วอนุภาค ที่มีผลกับพฤติกรรมแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นพบว่า ถ้าอนุภาคออลูมิเนียมและสแตนเลสที่มีความเร็วต่ำกว่า 29 และ 26 mm/s ตามลำดับ จะถูกยึดจับที่รอยต่อของตัวกลาง. แต่ถ้าอนุภาคออลูมิเนียมที่มีความเร็วในช่วง 29-57 mm/s จะถูกยึดจับที่ขอบของอิเล็กโทรด และอนุภาคสแตนเลสที่มีความเร็วในช่วง 26-44 mm/s จะถูกยึดจับที่ขอบของอิเล็กโทรดเช่นเดียวกัน.

ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่บนฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน เช่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต หรือแรงพื้นผิวอื่นๆ ดังนั้น การที่เราจะควบคุมความเร็วของอนุภาคได้ เราจะต้องให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังบริเวณรอยต่อของตัวกลางให้มีระยะสั้นๆ เพื่อไม่ให้อนุภาคมีพื้นที่ในการเพิ่มความเร็ว. อย่างไรก็ตาม การยึดจับอนุภาคโดยใช้ระบบอิเล็กโทรดโดยการแทรกชั้นฉนวนและใช้การจัดเรียงรูปแบบของสนามไฟฟ้างดังที่ได้กล่าวมา เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้จัดการกับอนุภาคตัวนำอิสระที่อยู่ในระบบไฟฟ้าแรงสูงต่อไป.

บทที่ 6

สรุปผล

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวนำทรงกลมภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอในอากาศ โดยใช้ระบบอเล็กโตรดแบบระนาบคู่ขนานและแบบระนาบเอียง ตามลำดับ. การศึกษาใช้การคำนวณเชิงเลขและการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลที่ได้จากการทดลองจริง. แรงที่กระทำต่ออนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าประกอบด้วย แรงทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงคูลอมบ์และแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้า และแรงทางกล ได้แก่ แรงโน้มถ่วงและแรงหนีตที่เกิดจากตัวกลาง. การศึกษาผลของแรงดังกล่าวที่กระทำต่ออนุภาคทำให้เราทราบถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาค และใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า. การทดลองหาคุณสมบัติเฉพาะทางกลของอนุภาคที่ใช้ในการศึกษา คือ สัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากและขนานระหว่างอนุภาคกับอเล็กโตรด และสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวที่ใช้ในการศึกษา. พารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้เราสามารถประมาณแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในลักษณะต่างๆ ทั้งในระบบอเล็กโตรดที่มีและไม่มีการแทรกชั้นฉนวน และทำให้การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าได้ถูกต้องมากขึ้น.

กรณีการศึกษาการยกตัวของอนุภาคจากระนาบกราวด์ภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยมีระยะแกป 2 และ 4 mm สำหรับอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส. พบว่ามีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคทั้งสองยกตัวจากระนาบกราวด์จากการคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน. นอกจากนี้ เมื่อระนาบอเล็กโตรดกราวด์ที่ทำมุมกับแนวระดับ $\theta_g = 0.69^\circ$. ในกรณีการยกตัวของอนุภาคอลูมิเนียม พบว่าอนุภาคมีแนวการยกตัวที่ไม่ตั้งฉากกับระนาบกราวด์. ในกรณีการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์ อนุภาคถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ตามทิศของแรง $mg \sin \theta_g$ เท่านั้น เมื่อ $\theta_g = 0.69^\circ$.

ผลการจำลองเชิงเลข ในกรณีอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยไม่มีการแทรกชั้นฉนวนแสดงว่า เมื่ออนุภาควางตัวบนระนาบกราวด์และได้รับแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่า V_L อนุภาคจะถูกยกขึ้นจากอเล็กโตรดกราวด์ และเกิดการกระดอนขึ้นลงระหว่างอเล็กโตรดทั้งสอง. ผลของแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าต่ำ. ผลของแรงดันไฟฟ้าหรือมุมระหว่างอเล็กโตรดทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคมีระยะกระจัดในแนวระดับเพิ่มขึ้นเช่นกัน.

กรณีการศึกษาทดลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคอูมิเนียมและสแตนเลสภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยใช้ระบบอิเล็กโตรดแบบระนาบเอียง เมื่อมุมระหว่างอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูงและอิเล็กโตรดกราวด์ $\theta_0 = 3^\circ$. อนุภาคทั้งสองเกิดการเคลื่อนที่สองลักษณะคือ การยกตัวจากระนาบกราวด์ และการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์. การยกตัวขึ้นจากระนาบกราวด์ อนุภาคทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมที่เหมือนกันคือ เมื่ออนุภาคถูกยกขึ้นด้วยแรงทางไฟฟ้า ผลของแรงทางไฟฟ้าและคุณสมบัติการกระทบทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าต่ำ ซึ่งเหมือนกับการจำลองเชิงเลขที่ได้. ในกรณีการเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์ อนุภาคทั้งสองชนิดสามารถเคลื่อนที่ตามระนาบกราวด์ได้ แต่พบได้น้อยครั้ง เนื่องจากมีผลของแรงพื้นผิวอื่นๆ หรือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตที่มีค่ามากทำให้ค่า V_L และ V_H ที่ระยะ z_u ใดๆมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน. การศึกษาระบบอิเล็กโตรดที่ประกอบด้วยอิเล็กโตรดไฟฟ้าแรงสูง และอิเล็กโตรดกราวด์แสดงว่า เราจะไม่สามารถควบคุมอนุภาคไปยังบริเวณที่เราต้องการได้.

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบอิเล็กโตรดที่มีการแทรกชั้นฉนวนด้วย PDMS และพอลิอีไมด์ และมุมระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสอง $\theta_0 = 15^\circ$ พบว่า เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงได้เพียงร้อยละ 53. ส่วนในกรณีใช้แรงดันไฟฟ้าชนิดสองขั้วทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงได้ถึงร้อยละ 90. ทั้งนี้ผลการทดลอง เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าชนิดสองขั้วพบว่า แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคทั้งสองชนิดเคลื่อนที่ตามระนาบฉนวนที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน.

การยึดจับอนุภาคโดยการใช้ผลของแรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และการแทรกชั้นฉนวน. เราสามารถทำได้โดยการจัดเรียงบริเวณของสนามไฟฟ้าในระบบอิเล็กโตรดเป็นสองบริเวณ โดยให้ส่วนที่มี PDMS เป็นบริเวณที่ 1 และส่วนที่มีพอลิอีไมด์ แต่ไม่มี PDMS เป็นส่วนที่ 2. การจัดเรียงระบบอิเล็กโตรดดังกล่าวสามารถยึดจับอนุภาคได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องพลังงานจลน์ของอนุภาค เพราะ เมื่ออนุภาคได้รับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น V_H อนุภาคที่มีระยะทางจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงรอยต่อของตัวกลางมากขึ้นทำให้อนุภาคมีพื้นที่ในการเพิ่มความเร็ว ซึ่งส่งผลให้พลังงานจลน์มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน. แรงเกรเดียนต์ไฟฟ้าจึงไม่สามารถยึดจับอนุภาคไว้ได้. ในกรณีที่อนุภาคทั้งสองชนิดถูกยึดจับ อนุภาคจะถูกยึดจับได้สองบริเวณคือ ฉนวนรอยต่อของตัวกลาง และบริเวณขอบของระบบอิเล็กโตรด ซึ่งขึ้นกับความเร็วของอนุภาคนั้นๆ. สำหรับอนุภาคอูมิเนียมจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ $z_u = 6$ mm และอนุภาคสแตนเลสที่ $z_u = 5.5$ mm ความสามารถของระบบอิเล็กโตรดที่สามารถยึดจับอนุภาคทั้งสองชนิด คืออนุภาคต้องมีความเร็วต่ำกว่า 57 และ 44 mm/s ตามลำดับ.

รายการอ้างอิง

- [1] บริษัท ABB. GIS ELK-14 - The modular system for gas-insulated switchgear up to 300kV. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/9af6bccabda35c6bc1257956003aaf12/\\$file/ELK-14_300_1HC0008262AKEn.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/9af6bccabda35c6bc1257956003aaf12/$file/ELK-14_300_1HC0008262AKEn.pdf)[10 กันยายน 2554]
- [2] Sakai, K., Tsuru, S., Abella, D.L., and Hara, M. Conducting particle motion and particle-initial breakdown in dc electric field between diverging conducting plates in atmosphere air. IEEE Trans. Electrical Insulation 6 (1999): 122-130.
- [3] Sakai, K., Tsuru, S., Abella, D.L., and Hara, M. Experiment studies of free conducting wire particle behavior between non-parallel plane electrodes with ac voltage in air. IEEE Trans. Electrical Insulation 10 (2003): 418-424.
- [4] Morcos, M.M., and et al. Performance of particle contaminated GIS with dielectric coated electrode. Industry applications conference, 2000. conference record of the 2000 IEEE 2 (2000): 725-731.
- [5] Hornfeldt, Sven P. Lifting force on metallic particle in GIS system. IEEE Trans. Electrical Insulation 13 (2006): 838-840.
- [6] Sakai, K., Abella, D.L., Suehiro, J., and Hara, M. Charging and behavior of a spherically conducting particle on a dielectrically coated electrode in the presence of electrical gradient force in atmospheric air. IEEE Trans. Electrical Insulation 9 (2002): 577-587.
- [7] Hara, M., and Akazaki, M. A method for prediction of gaseous discharge threshold voltage in the presence of conducting particle. J. Electrical. 2 (1977): 223-239.
- [8] Jones, Thomas B. Electromechanics of particle. NY : Cambridge University Press, 2003.

- [9] White, Frank M. Viscous Fluid Flow (Third Edition). USA : McGraw-Hill Mechanical Engineering, 2005.
- [10] Crowley, Joseph M. Fundamentals of applied electrostatics. USA : John Wiley & Sons Inc, 1985.

ภาคผนวก

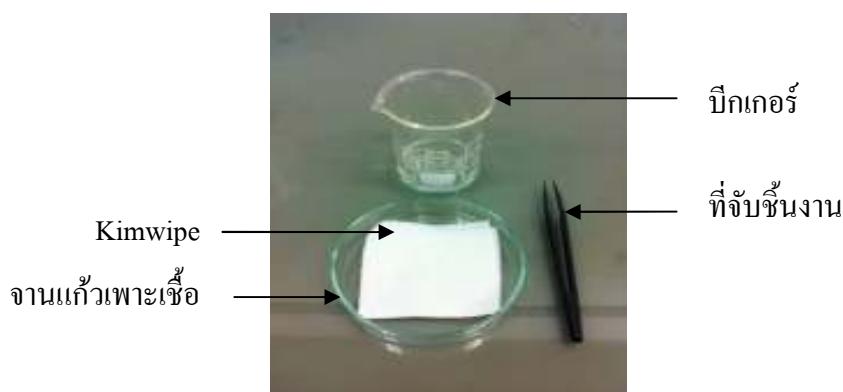
ภาคผนวก ก

การทำความสะอาดอนุภาค

ขั้นตอนการทำความสะอาดอนุภาค

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดอนุภาค ประกอบด้วย

1. ที่จับชิ้นงาน (Tweezers) โลหะหรือพลาสติก
2. บีกเกอร์
3. จานแก้วเพาะเชื้อ
4. Kimwipes
5. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)
6. ตู้อบระบบลมร้อน (Convection Oven)
7. อลูมิเนียมฟอยล์
8. สารแอซิโตน (Acetone)
9. น้ำปราศจากประจุ (Deionized water)

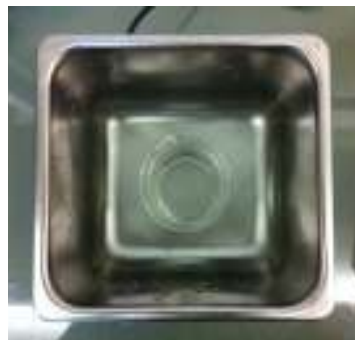


ภาพที่ ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดอนุภาค

ขั้นตอนที่ 1 เทสารแอซิโตน ลงในบีกเกอร์ที่จัดเตรียมไว้ ประมาณ 20 มิลลิลิตร. และนำอนุภาคใส่ลงในบีกเกอร์นี้ โดยปกติแล้วใส่อนุภาคประมาณ 15-20 อนุภาค ต่อการล้างหนึ่งครั้ง.

ขั้นตอนที่ 2 นำอนุภาคที่จัดเตรียมไว้ ไปใส่ในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมเครื่องอัลตราโซนิก ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัลตราโซนิกจากผู้ผลิต Sturdy Industrial หลังจากนั้นเทน้ำ DI ลงในเครื่องอัลตราโซนิกให้ได้ระดับประมาณสารแอซิโตนในบีกเกอร์. หลังจากนั้นนำบีกเกอร์ในขั้นตอนที่ 2 มาใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก และตั้งเวลาประมาณ 20-30 นาที.



(ก) เครื่องอัลตราโซนิก (ข) บีกเกอร์ในเครื่องอัลตราโซนิก
ภาพที่ ก.2 เครื่องอัลตราโซนิก

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อครบเวลาที่กำหนดในขั้นตอนที่ 3 นำบีกเกอร์ออกจากเครื่องอัลตราโซนิก และนำอนุภาคออกจากบีกเกอร์ โดยนำมาวางไว้ที่กระดาษที่จัดเตรียมไว้ รอให้แห้งประมาณ 5-10 นาที. จากนั้นนำอนุภาคมาใส่ในอลูมิเนียมฟอยล์ที่ตัดเป็นกล่อง เพื่อใส่อนุภาคก่อนนำไปอบ.

ขั้นตอนที่ 5 นำกล่องอลูมิเนียมฟอยล์ที่ใส่อนุภาคในขั้นตอนที่ 4 นำไปอบในตู้อบที่เตรียมไว้ ตั้งอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 80-120 องศาเซลเซียส อบอย่างน้อย 1-2 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดลอง.



ภาพที่ ก.3 ตู้อบที่ใช้อบอนุภาค

ภาคผนวก ข

การเตรียมแผ่นฉนวน

การเตรียมแผ่นฉนวน

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ ประกอบด้วย

1. ซิลิโคนเหลว (KE 106, Shin-Etsu)
2. เทปพอลิอิไมด์หนา 0.076 mm (KAPTON, 3M)
3. สารเร่งปฏิกิริยา (CAT-RG, Shin-Etsu)
4. สารโทลูอิน (Toluene)
5. IPA (Isopropyl alcohol)
6. สารเคลือบผิวต้นแบบ (Barrier Coat No.6, Shin-Etsu)
7. แผ่นซิลิโคนแผ่นความหนา 1 mm
8. ปิเปต
9. หลอดขนาด 15 มิลลิลิตร
10. แผ่นสไลด์กล้องจุลทรรศน์ ความหนา 1-1.2 mm.
11. ถ้วยพลาสติก
12. คลิปหนีบกระดาษ
13. เครื่องชั่งสารเคมี
14. เครื่องผสมสารเคมี
15. โถแก้วดูดความชื้น (Dessicator)
16. เครื่องปั่นเคลือบสารด้วยการหมุน (รุ่น KW-4A, Chemat Technology)
17. ตู้อบ

ขั้นตอนที่ 1 ผสมซิลิโคนเหลว และสารเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วนมวลเท่ากับ 10:1 ในถ้วยพลาสติก

ขั้นตอนที่ 2 ผสมสารแอซิโตนและสารเคลือบผิวต้นแบบ ในอัตราส่วนมวลเท่ากับ 10:1 ในหลอดทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 นำสารผสมมาทำให้เข้ากันโดยใช้เครื่องผสมสาร ประมาณ 10-15 นาที

ขั้นตอนที่ 4 นำสารในขั้นตอนที่ 2 มาไล่อากาศโดยโถแก้วดูดความชื้นที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ ใช้เวลาประมาณ 25-30 นาที ทำ 2 ครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 ตัดแผ่นซิลิโคนให้เท่ากับขนาดแผ่นสไลด์ และตัดให้เป็นรูตรงกลางตามขนาด PDMS ที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 6 ใช้สารที่ผสมในขั้นตอนที่ 2 มาฉีดโดยใช้ปริปรตลงบนแผ่นสไลด์ 2 แผ่น.

ขั้นตอนที่ 7 นำซิลิโคนแผ่นที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 5 มาวางบนแผ่นสไลด์ 1 แผ่น ในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 8 นำสารในขั้นตอนที่ 4 มาเทลงในช่องว่างของซิลิโคนในขั้นตอนที่ 7 และปิดด้านบนโดยใช้สไลด์ในขั้นตอนที่ 6 ที่เหลืออีกหนึ่งแผ่น และใช้คลิปหนีบกระดาษหนีบทั้งสองข้างให้เรียบร้อย

ขั้นตอนที่ 9 นำสารผสมในขั้นตอนที่ 8 มาอบในตู้อบที่เตรียมไว้ ตั้งอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 80-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง เพื่อให้ PDMS แข็งตัว

ขั้นตอนที่ 10 หลังจากครบเวลาในขั้นตอนที่ 9 ก็นำ PDMS ออกจากตู้อบ เอาสไลด์ที่ประกบอยู่ ออก และนำ PDMS มาตัดไปใช้ตามขนาดที่ต้องการ. ในกรณีที่ต้องการ PDMS ที่มีความหนาน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร สามารถใช้วัสดุอื่นแทนแผ่นซิลิโคนได้ แต่ต้องสามารถทนความร้อนในขั้นตอนที่ 10 ได้. ถ้าต้องการความหนาที่น้อยมากหรือน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร สามารถใช้เครื่องเครื่องปั่นเคลือบสารด้วยการหมุน แทนได้โดย

1. นำสไลด์ในขั้นตอนที่ 6 หนึ่งแผ่นมาวางในเครื่องเครื่องปั่นเคลือบสารด้วยการหมุน
2. นำสารในขั้นตอนที่ 4 มาเทลงบนสไลด์
3. ตั้งความเร็วการหมุนของเครื่องตามความต้องการในเรื่องของความหนา ในงานวิจัยนี้ใช้ความหนาน้อยที่สุดคือ 0.03 มิลลิเมตร โดยตั้งความเร็วที่ 1 เท่ากับ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที และความเร็วที่ 2 เท่ากับ 1200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาที.

ภาคผนวก ค

ตารางผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากและขนาน
ของอนุภาคอลูมิเนียมและสแตนเลส

ตารางที่ ค.1 ระยะ h_1 h_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากของอนุภาคอลูมิเนียม

| การ ทดลอง ครั้งที่ | $h_1(\text{mm})$ | $h_2(\text{mm})$ | k_{\perp} |
|--------------------------|------------------|------------------|-------------|
| 1 | 6.27 | 2.71 | 0.65 |
| 2 | 7.01 | 2.18 | 0.55 |
| 3 | 6.45 | 2.42 | 0.61 |
| 4 | 6.34 | 2.01 | 0.56 |
| 5 | 6.45 | 1.70 | 0.51 |
| 6 | 6.21 | 1.65 | 0.51 |
| 7 | 6.57 | 2.46 | 0.63 |
| 8 | 6.52 | 2.63 | 0.63 |
| 9 | 6.50 | 2.66 | 0.63 |
| 10 | 5.55 | 2.08 | 0.61 |
| | | เฉลี่ย | 0.58 |

ตารางที่ ค.2 ระยะ h_1 h_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวตั้งฉากของอนุภาคสแตนเลส

| การ ทดลอง ครั้งที่ | $h_1(\text{mm})$ | $h_2(\text{mm})$ | k_{\perp} |
|--------------------------|------------------|------------------|-------------|
| 1 | 5.75 | 4.20 | 0.85 |
| 2 | 5.92 | 3.44 | 0.76 |
| 3 | 6.52 | 4.23 | 0.80 |
| 4 | 5.70 | 4.43 | 0.88 |
| 5 | 6.38 | 4.26 | 0.81 |
| 6 | 6.72 | 4.17 | 0.78 |
| 7 | 6.18 | 4.77 | 0.87 |
| 8 | 5.83 | 3.40 | 0.76 |
| 9 | 5.80 | 3.72 | 0.80 |
| 10 | 6.06 | 4.13 | 0.82 |
| 11 | 6.67 | 4.74 | 0.84 |
| 12 | 6.07 | 4.68 | 0.87 |
| | | เฉลี่ย | 0.82 |

ตารางที่ ค.3 ระยะ h_1 h_2 s_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวนอนและตั้งฉากของอนุภาค
อลูมิเนียม เมื่อ $\theta = 22^\circ$

| การทดลอง ครั้งที่ | h_1 (mm) | h_2 (mm) | S_2 (mm) | $k_{//}$ | k_{\perp} |
|----------------------|------------|------------|------------|----------|-------------|
| 1 | 6.62 | 1.53 | 5.80 | 0.64 | 0.66 |
| 2 | 8.27 | 1.36 | 6.04 | 0.70 | 0.58 |
| 3 | 6.98 | 1.24 | 5.20 | 0.69 | 0.60 |
| 4 | 6.95 | 1.74 | 6.64 | 0.67 | 0.69 |
| 5 | 6.80 | 1.53 | 6.26 | 0.72 | 0.66 |
| 6 | 8.01 | 1.32 | 5.69 | 0.67 | 0.58 |
| 7 | 7.59 | 1.34 | 5.92 | 0.72 | 0.60 |
| 8 | 7.18 | 1.43 | 5.69 | 0.64 | 0.62 |
| 9 | 7.19 | 1.47 | 6.40 | 0.76 | 0.65 |
| 10 | 7.50 | 1.46 | 5.96 | 0.66 | 0.63 |
| 11 | 7.62 | 1.19 | 5.20 | 0.68 | 0.57 |
| 12 | 8.01 | 1.40 | 6.21 | 0.72 | 0.60 |
| 13 | 7.52 | 1.53 | 6.49 | 0.73 | 0.64 |
| 14 | 7.89 | 1.48 | 6.28 | 0.70 | 0.61 |
| | | | เฉลี่ย | 0.69 | 0.62 |

ตารางที่ ค.4 ระยะ h_1 h_2 s_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวนอนและตั้งฉากของอนุภาค
อลูมิเนียม เมื่อ $\theta = 29^\circ$

| การทดลอง ครั้งที่ | h_1 (mm) | h_2 (mm) | S_2 (mm) | $k_{//}$ | k_{\perp} |
|----------------------|------------|------------|------------|----------|-------------|
| 1 | 6.90 | 0.71 | 5.16 | 0.72 | 0.64 |
| 2 | 6.83 | 0.67 | 5.00 | 0.73 | 0.63 |
| 3 | 6.69 | 0.57 | 4.66 | 0.77 | 0.62 |
| 4 | 6.40 | 0.66 | 4.66 | 0.70 | 0.63 |
| 5 | 6.62 | 0.59 | 4.34 | 0.68 | 0.60 |
| 6 | 7.30 | 0.80 | 5.63 | 0.71 | 0.65 |
| 7 | 7.60 | 0.85 | 6.04 | 0.73 | 0.66 |
| 8 | 6.70 | 0.81 | 5.64 | 0.72 | 0.67 |
| | | | เฉลี่ย | 0.72 | 0.63 |

ตารางที่ ค.5 ระยะ h_1 h_2 s_2 และสัมประสิทธิ์การกระทบในแนวนอนและตั้งฉากของอนุภาคสตันเลส เมื่อ $\theta = 30^\circ$

| การทดลอง ครั้งที่ | $h_1(\text{mm})$ | $h_2(\text{mm})$ | $S_2(\text{mm})$ | $k_{//}$ | k_{\perp} |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|----------|-------------|
| 1 | 4.77 | 0.80 | 4.76 | 0.63 | 0.76 |
| 2 | 4.59 | 0.85 | 3.97 | 0.43 | 0.72 |
| 3 | 4.92 | 0.65 | 3.61 | 0.55 | 0.67 |
| 4 | 4.36 | 0.59 | 4.16 | 0.74 | 0.74 |
| 5 | 5.19 | 0.78 | 4.75 | 0.62 | 0.72 |
| 6 | 5.00 | 0.74 | 3.55 | 0.41 | 0.65 |
| 7 | 5.38 | 0.67 | 3.82 | 0.51 | 0.64 |
| 8 | 5.33 | 0.62 | 4.41 | 0.70 | 0.69 |
| 9 | 3.96 | 0.72 | 3.39 | 0.44 | 0.71 |
| 10 | 4.07 | 0.77 | 3.44 | 0.40 | 0.71 |
| | | | เฉลี่ย | 0.54 | 0.70 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิสรุต พันธุ์ศิริ เกิดที่จังหวัดอุบลราชธานี เมื่อวันที่ 8 มิถุนายน 2528. จบการศึกษาปริญญาบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปี 2551.