

การศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY ON ELECTRODYNAMICS OF AQUEOUS DROP IN A LIQUID DIELECTRIC UNDER
ELECTRIC FIELD



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้า
โดย	น.ส.วิกานดา นันทนาวุฒิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ รั้งสีวิจิตรประภา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

วิกานดา นันทนาวุฒิ : การศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้า. (STUDY ON ELECTRODYNAMICS OF AQUEOUS DROP IN A LIQUID DIELECTRIC UNDER ELECTRIC FIELD) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำที่อยู่ในฉนวนเหลว ได้แก่ การเสีयरูปร่าง การเคลื่อนที่ การรวมตัว และการแยกตัว ด้วยการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำ. รูปแบบแรกที่ศึกษา คือ หยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรดโดยมีตัวกลางเป็นน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวัน. ผลการทดลองพบว่าการเสีयरูปร่างของหยดน้ำเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้า. การเสีयरูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันทานตะวันมีค่าสูงกว่าเนื่องจากคุณสมบัติสภาพยอมสัมพัทธ์ที่สูงและความตึงผิวที่ต่ำของน้ำมัน. เมื่อสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤต การแยกตัวเกิดขึ้นที่บริเวณปลายแหลมของหยด. การจำลองสามารถแสดงการเสีयरูปร่างของหยดน้ำได้แม่นยำและทำนายค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตได้. รูปแบบที่สอง คือ การรวมตัวของหยดในน้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคนกับผิวน้ำด้านล่าง. ผลการทดลองพบว่าประจุเพิ่มแรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำ ช่วยให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมรวมเพิ่มขึ้นในแง่ของเวลา. อย่างไรก็ตาม หยดน้ำที่มีประจุรวมตัวเพียงบางส่วนที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีประจุ. เมื่อสนามไฟฟ้าสูง หยดน้ำที่มีประจุในน้ำมันแร่ไม่รวมตัวกับผิวน้ำ หรือแตกตัวในระหว่างการเคลื่อนที่. พฤติกรรมดังกล่าวไม่เกิดขึ้นในน้ำมันซิลิโคน เนื่องจากความตึงผิวของน้ำมันมีค่าสูง ช่วยให้หยดน้ำรวมตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ. การจำลองสามารถแสดงการเสีयरูปร่างของหยดน้ำที่มีและไม่มีประจุก่อนการรวมตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง รวมทั้งแสดงการรวมตัวรูปแบบสมบูรณ์ของหยดน้ำได้. แม้ว่าการจำลองไม่สามารถแสดงพฤติกรรมอื่นเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูง เช่น การแยกตัวของหยดน้ำทุติยภูมิ การไม่รวมตัว หรือ การแตกตัว แต่ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนมีเสถียรภาพดีกว่า ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการทดลอง.

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5971442621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: electrodynamics, electrocoalescence, aqueous drop, liquid
dielectric, electric field, finite element method

Wikanda Nantanawut : STUDY ON ELECTRODYNAMICS OF AQUEOUS DROP
IN A LIQUID DIELECTRIC UNDER ELECTRIC FIELD. Advisor: Prof. Boonchai
Techaumnat Co-advisor: Asst. Prof. Nutthaphong Tanthanuch

This thesis studies the electrodynamics of an aqueous drop in liquid dielectrics, including deformation, movement, coalescence, and disintegration. Experiments and numerical simulation are used to investigate factors that affect drop electrodynamics. The first configuration is an aqueous drop on an electrode in mineral oil and sunflower oil. The results show that drop deformation increases with electric field. The deformation in sunflower oil is higher due to high relative permittivity and low interfacial tension. At the critical electric field, disintegration occurs at the drop tip. The simulation can accurately show the deformation and predict the critical field. The second configuration is the coalescence of drop in mineral oil and silicone oil with a water plane. From the results, the charge increases the electric force, enhancing the coalescence efficiency. However, the charged drop partially merges at lower field than the uncharged drop. In the mineral oil, non-coalescence or disintegration occurs at high electric field. Such events do not occur in silicone oil due to its surface tension that allows efficient coalescence. The simulation can show the deformation of charged and uncharged drops accurately and the complete coalescence. Although the simulation does not show the secondary drop formation, the non-coalescence, or the disintegration, it predicts the better stability of drop in silicone oil, which agrees with experiment.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เลขที่สัญญา PHD/0204/2558. ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. อรรณพ ลิ้มสีมาร์ตน์ จากบริษัท พูจิ ทัสโก้ จำกัด สำหรับตัวอย่างน้ำมันแร่, ศ.ดร.อรวรรณ ชัยลภากุล จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์น้ำปราศจากไอออน และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์. ผู้วิจัยคาดหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อื่นในอนาคต.



วิกานดา นันทนาวุฒิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาและความสำคัญ.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สนามไฟฟ้าสถิต.....	5
2.1.1 ประจุไฟฟ้า.....	6
2.1.2 แรงไฟฟ้า.....	6
2.2 กลศาสตร์ของไหล	7
2.3 การคำนวณของไหลต่างเฟส	9
2.3.1 วิธีเลเวลเซต (Level set method)	9
2.3.2 การคำนวณแรงพื้นผิวที่เกี่ยวข้องเมื่อขอบเขตตัวกลางมีความหนา.....	11
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	12
2.4.1 เอลิเมนต์และฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณปริมาณบนเอลิเมนต์.....	13
2.4.2 วิธีการเศษค้ำถ่วงน้ำหนัก (Weight residual method)	16

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
2.5.1 การจำลอง.....	19
2.5.2 การทดลอง.....	26
2.6 สรุปภาพรวมของการศึกษาที่ผ่านมา.....	34
บทที่ 3 อุปกรณ์และการทดลอง	36
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	36
3.2 การทดลองการเสีรูปของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า	40
3.3 การทดลองการรวมตัวของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า	41
3.3.1 กรณีที่หยดน้ำถูกอัดประจุ	41
3.3.2 กรณีที่หยดน้ำไม่ถูกอัดประจุ	45
บทที่ 4 การจำลอง	46
4.1 การเสีรูปปร่างของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า.....	46
4.2 การรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า	49
4.3 การจำลองเพื่อหาประจุของหยดน้ำ	51
4.4 การรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า	52
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปราย	56
5.1 ผลการทดลองการเสีรูปปร่างของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า.....	56
5.2 ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า	58
5.3 ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า	63
บทที่ 6 ผลการจำลองและอภิปราย	70
6.1 ผลการจำลองการเสีรูปของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า	70
6.2 ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า	75
6.3 ผลการจำลองขนาดประจุของหยดน้ำ	81
6.4 ผลการจำลองประจุของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV.....	82

6.5 ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า	84
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย.....	87
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก ก การควบคุมการสร้างสัญญาณไฟฟ้า การทำงานของปั๊ม และการบันทึกภาพด้วยโปรแกรม MATLAB.....	94
ก.1 การควบคุมการสร้างสัญญาณไฟฟ้า	94
ก.2 การควบคุมการทำงานของปั๊มกระบอกฉีดยา	95
ก.3 การควบคุมการทำงานของกล้อง.....	96
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่	99
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบน้ำมันทานตะวันและน้ำมันซิลิโคน.....	100
ภาคผนวก ง ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันซิลิโคน	102
ภาคผนวก จ ตำแหน่งและสนามไฟฟ้าบนเงื่อนไขขอบเขตของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำอยู่ที่ปลายเข็ม ...	103
ภาคผนวก ฉ ตำแหน่งและสนามไฟฟ้าตามแนวขอบเขตแบบจำลองและผิวน้ำเมื่อหยดน้ำมีค่าศักย์ไฟฟ้า 1 kV.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	114

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

จลนศาสตร์ของของไหลภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเป็นหัวข้อที่สำคัญหัวข้อหนึ่งในการใช้งานสนามไฟฟ้า. เมื่อระบบประกอบไปด้วยของไหลมากกว่า 1 ชนิด ผลตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของระบบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแรงที่กระทำบนขอบเขตระหว่างของไหลต่างชนิด อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเรขาคณิตของรอยต่อระหว่างของไหลได้. ในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง หยดน้ำที่ปรากฏบริเวณฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยฉนวน หรือ บุชชิ่ง มีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าตัวกลางอากาศที่อยู่ล้อมรอบ ซึ่งมีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าในระบบ [1, 2]. เมื่อได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้า หยดน้ำอาจเกิดการเสียรูป เคลื่อนที่ และรวมตัวกัน. ผลที่เกิดขึ้นจากจลนศาสตร์ไฟฟ้านี้ ทำให้ระยะอาร์คของระบบสั้นลง และทำให้เกิดวาบไฟระหว่างอิเล็กโทรดไฟฟ้าแรงสูงกับกราวด์ได้ง่ายขึ้น [3, 4]. หยดน้ำที่อยู่ในระบบฉนวนเหลว เช่น หยดน้ำในน้ำมันหม้อแปลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันฉนวน. แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันลดลง เมื่อปริมาณของน้ำที่อยู่ในน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น [5, 6].

อย่างไรก็ตาม จลนศาสตร์ไฟฟ้าของของไหลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ. ตัวอย่างเช่น แรงคูลอมบ์ที่กระทำกับของไหลที่ได้รับการอัดประจุ ถูกนำมาใช้ในการพ่นสีด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic painting) การพิมพ์ด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic inkjet printing) การพ่นละอองด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spraying) และการสร้างละอองหรือละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic atomization) [7-9]. ของเหลวที่ไหลออกจากเข็มหรือหัวฉีดได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูง ส่งผลให้มีแรงไฟฟ้ากระทำที่รอยต่อระหว่างตัวกลางของของเหลวจนเกิดเปลี่ยนรูปเป็นกรวยแหลมหรือที่เรียกว่าโคนของเทย์เลอร์ (Taylor cone). ความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณโคนแหลมสูง ส่งผลให้ความเค้นทางไฟฟ้าสามารถเอาชนะแรงตึงผิว และก่อให้เกิดการแยกตัวของของเหลวได้. รูปแบบของการแตกตัวของของเหลวขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้า คุณสมบัติของของเหลว อัตราการไหลของของเหลว และรูปแบบของหัวฉีด [10, 11].

นอกจากนี้ จลนศาสตร์ไฟฟ้าของของไหลยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการช่วยแยกของเหลวต่างเฟสด้วยวิธีการเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้า (Electrocoalescence) ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมเคมี. ของเหลวต่างเฟสที่ไม่ผสมรวมกัน เช่น หยดน้ำที่ปะปนอยู่ในน้ำมัน เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า หยดน้ำเคลื่อนที่เข้าหากันด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า. เมื่อหยดน้ำเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน

มากพอ ความหนาของฟิล์มน้ำมันที่กั้นหยดน้ำเอาไว้จะลดลงจนไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้. ฟิล์มน้ำมันที่กั้นหยดน้ำเกิดการแตกออกและส่งผลให้หยดน้ำรวมตัวเข้าด้วยกัน [12].

1.2 ที่มาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมน้ำมันและโรงงาน หยดน้ำที่กระจายอยู่ในน้ำมันพบได้ทั่วไป โดยอาจปะปนมาในน้ำมันดิบที่ได้จากการขุดเจาะ หรือเกิดจากความชื้นในอากาศที่เข้าไปในถังน้ำมัน เป็นต้น. หยดน้ำที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมันเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เนื่องจากก่อให้เกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิตและเครื่องจักรภายในโรงงาน เช่น การเกิดสนิมหรือการกัดกร่อนอุปกรณ์. ดังนั้น กระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำมันจึงมีความสำคัญยิ่ง. ในปัจจุบัน วิธีการแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การเติมสารเคมีประเภทดีมัลซิไฟเออร์ (chemical demulsifier), การปรับสภาพความเป็นกรดและด่าง (pH adjustment), การใช้ความร้อน (heat treatment), การใช้แรงโน้มถ่วง (gravity) และ การปั่นเหวี่ยงน้ำมัน (centrifugation) เป็นต้น [13]. สารเคมีประเภทดีมัลซิไฟเออร์ทำให้คุณสมบัติของของเหลวเปลี่ยนแปลงและช่วยให้การรวมตัวของหยดน้ำเกิดได้ง่ายขึ้น. อย่างไรก็ตาม การแยกน้ำออกจากน้ำมันด้วยวิธีการดังกล่าวมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเคมีที่ถูกเติมเข้าไปต้องถูกแยกออกในภายหลังเพื่อให้ได้น้ำและน้ำมันที่ปราศจากการปนเปื้อนของสารเคมี. วิธีการปรับสภาพความเป็นกรดและด่างมีประสิทธิภาพในการแยกหยดน้ำมันที่ปะปนในน้ำมันมากกว่าหยดน้ำที่ปะปนอยู่ในน้ำมัน. การปั่นเหวี่ยงน้ำมันและการใช้ความร้อนมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและอุปกรณ์ที่สูง รวมทั้งสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิงเมื่อใช้ความร้อน. ในขณะที่ การใช้แรงโน้มถ่วงใช้เวลานานในกระบวนการแยก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อหยดน้ำมีขนาดเล็กอยู่ในน้ำมันที่มีความหนืดสูง. การแยกหยดน้ำออกจากน้ำมันด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Electrostatic demulsification) หรือที่เรียกว่า การเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้า (Electrocoalescence) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย. วิธีการดังกล่าวมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น คือ สามารถแยกหยดน้ำขนาดเล็ก ใช้ระยะเวลาสั้น ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี รวมทั้งมีประสิทธิภาพด้านพลังงาน [14].

ในปัจจุบัน กระบวนการเชื่อมรวมไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานจริงในอุตสาหกรรม. อุปกรณ์ที่เรียกว่า Electro-pulsed inductive coalescer (EPIC) ใช้หลักการเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้าทำให้เกิดการรวมตัวของหยดของเหลวภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์. ภายในอุปกรณ์ติดตั้งอิเล็กโทรดเคลือบด้วยฉนวนและผนังของอุปกรณ์ต่อลงกราวด์. ของไหลไหลเข้าช่องทางขาเข้าผ่านอิเล็กโทรดเพื่อทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างหยด และได้เป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไหลออกผ่านช่องทางขาออก [15]. ในอุตสาหกรรมน้ำมันดิบ Electrocoalescer แบบดั้งเดิมที่ใช้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นบริเวณบำบัดน้ำมัน (treating space) ซึ่งหยดน้ำถูกทำให้เกิดการรวมตัวเข้าหากันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

สนามไฟฟ้า และส่วนของการตกของหยดน้ำลงสู่ด้านล่าง (settling zone) เพื่อแยกน้ำออกจากน้ำมัน. การแยกน้ำออกจากน้ำมันสามารถทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากจึงไม่เหมาะกับการติดตั้งนอกชายฝั่งซึ่งมีพื้นที่จำกัด [16]. Vessel Internal Electrostatic Coalescer (VIEC™) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาและติดตั้งในท่อที่ใช้แยกของเหลวที่ส่งมาจากหลุมผลิตปิโตรเลียม. อิเล็กโทรดเคลือบด้วยฉนวนจำนวนมากถูกติดตั้งภายในท่อ โดยก่อตัวเป็นผนังหน้าตัดและเว้นห่างกันเป็นช่องทางไหลเพื่อให้หยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้าและเกิดการรวมตัวเมื่อไหลผ่าน [17].

อย่างไรก็ตาม กระบวนการเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้ามีปัจจัยหลายอย่างส่งผลให้หยดน้ำไม่เกิดการรวมตัวได้อย่างสมบูรณ์ แต่เกิดเป็นเหตุการณ์รูปแบบอื่น อาทิ หยดน้ำเคลื่อนที่มาติดกันและก่อตัวเป็นสายโซ่ (chain formation) หรือหยดน้ำเชื่อมรวมแค่เพียงบางส่วนแล้วแยกออกจากกัน (partial coalescence) เป็นต้น. นอกจากนี้ หากสนามไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการมีค่ามากเกินไป หยดน้ำอาจเสียรูปร่าง (deformation) และแตกออกจากกันก่อนที่จะเกิดการรวมตัว. ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้า. เพื่อให้สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำเมื่อได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้า รวมถึงการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำ เช่น ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า ชนิดของสนามไฟฟ้า ขนาดของหยดน้ำ คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำและน้ำมัน ฯลฯ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำเมื่อได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงการเสียรูปร่าง การเคลื่อนที่ การเชื่อมรวม และการแยกตัวของหยดน้ำที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า. ผู้วิจัยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณรูปร่างของหยดน้ำ โดยประยุกต์ใช้วิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการปัญหาค่าศักย์ไฟฟ้า ของไหล และวิธีเลเวลเซต. จากนั้น ผู้วิจัยดำเนินการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้ และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเสียรูปร่าง การเชื่อมรวม และการแยกตัวของหยดน้ำ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของหยดน้ำอย่างชัดเจนมากขึ้น. รูปแบบที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย หยดน้ำที่อยู่บนอิเล็กโทรดโดยมีตัวกลางเป็นน้ำมันภายใต้สนามไฟฟ้า และหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันรวมตัวเข้าหาผิวหน้าด้านล่างภายใต้สนามไฟฟ้า. ปัจจัยที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ สนามไฟฟ้า คุณสมบัติของของเหลว และประจุของหยดน้ำ.

1.3 วัตถุประสงค์

ศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำที่ได้รับการอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า เพื่อให้ได้องค์ความรู้ที่สำคัญต่อการจัดการหยดน้ำแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมรวม, การแยกตัว และอื่นๆ โดยใช้สนามไฟฟ้า ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับการใช้งานหยดน้ำในด้านต่างๆ.

1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1.4.1 พิจารณาหยดน้ำในฉนวนเหลวเป็นหลัก
- 1.4.2 จำลองผลกระทบทางจลนศาสตร์ของหยดน้ำที่เกิดจากสนามไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงตัวเลข
- 1.4.3 ทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการจำลองเชิงตัวเลข
- 1.4.4 พิจารณาเงื่อนไขของหยดน้ำที่ได้รับการอัดประจุสำหรับการเชื่อมรวมและการแยกตัวของหยดน้ำ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับจลนศาสตร์ของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า
- 1.5.2 ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์และกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขที่สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำที่ได้รับการอัดประจุได้อย่างถูกต้อง
- 1.5.3 สามารถเชื่อมรวมหยดน้ำในน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการทดลองและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณรูปร่างของหยดน้ำ เพื่อจำลองการเสีรรูปร่าง การเคลื่อนที่ และการเชื่อมรวมของหยดน้ำที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า. ปัญหาศักย์ไฟฟ้าและกลศาสตร์ของไหลใช้วิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาคำตอบเชิงตัวเลข. นอกจากนี้ วิธีเลเวลเซตถูกนำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อจำลองขอบเขตระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง.

2.1 สนามไฟฟ้าสถิต

สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยรอบวัตถุที่มีประจุ เมื่อนำประจุทดสอบเข้ามาในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงกระทำกับประจุ. แรงที่เกิดขึ้นระหว่างประจุทั้งสองเป็นแรงดูดหากประจุเป็นชนิดเดียวกัน และเป็นแรงผลักเมื่อประจุต่างชนิดกัน. จากกฎของคูลอมบ์ ขนาดของแรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของประจุ แต่แปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างประจุ [18].

ขนาดของสนามไฟฟ้ามักถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อปัญหาที่ทำการศึกษา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าศักย์ไฟฟ้า. การคำนวณปัญหาทางไฟฟ้าสถิตทำได้โดยการแก้สมการปัวซอง ซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ ร่วมกับการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทราบค่า. ผลเฉลยของสมการปัวซอง ซึ่งในที่นี้คือค่าศักย์ไฟฟ้า ϕ ณ ตำแหน่งต่างๆ ถูกนำไปใช้คำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าต่อไป. จากกฎของเกาส์ [19]

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร. ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า \mathbf{D} และสนามไฟฟ้า \mathbf{E} หาได้จาก

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (2.3)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.2 และ 2.3 ในสมการที่ 2.1

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \phi) = \rho \quad (2.4)$$

กฎของเกาส์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการปัวซองเพื่อใช้หาผลเฉลยค่าศักย์ไฟฟ้า

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.5)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง

ในกรณีที่ไม่มีประจุในบริเวณนั้น สมการที่ 2.5 อยู่ในรูปของสมการลาปลาซ

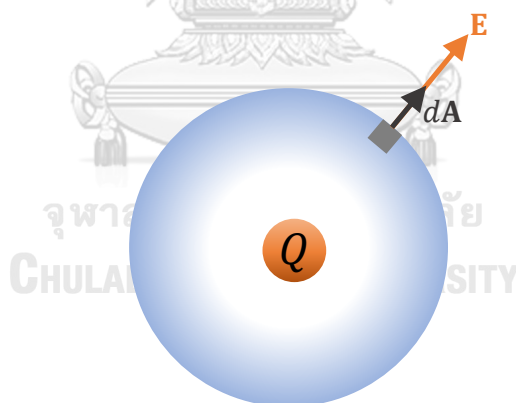
$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.6)$$

2.1.1 ประจุไฟฟ้า

กฎของเกาส์อธิบายว่าฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ออกมาจากพื้นที่ผิวปิดใดๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของประจุทั้งหมด Q ที่อยู่ภายในพื้นที่ผิวปิดนั้น ดังรูปที่ 2.1 [20]. จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในสมการที่ 2.2 ประจุทั้งหมดในบริเวณพื้นที่ปิดสามารถหาได้จาก

$$Q = \epsilon_0 \epsilon_r \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.7)$$

โดยที่ $d\mathbf{A}$ คือ พื้นที่ผิวปิดที่สนามไฟฟ้าผ่านในแนวตั้งฉาก.



รูปที่ 2.1 สนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุที่อยู่ในภายในพื้นที่ผิวปิดใดๆ

2.1.2 แรงไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าที่กระทำต่อตัวกลางใดๆ จะก่อให้เกิดแรงทางไฟฟ้าเนื่องจากความเค้นขึ้น. แรงไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร \mathbf{f}_E ที่กระทำต่อตัวกลางสามารถหาได้จากเทนเซอร์ความเค้นของแมกซ์เวลล์ (Maxwell stress tensor), \mathbf{T} ดังแสดงในสมการ [21]

$$\mathbf{f}_E = \mathbf{T} \cdot \mathbf{a}_n \quad (2.8)$$

เมื่อ \mathbf{a}_n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวตั้งฉาก และ \mathbf{T} หาได้จาก

$$\mathbf{T} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \mathbf{E}^T - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{I} \quad (2.9)$$

เมื่อ \mathbf{I} คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์. จากสมการที่ 2.9 องค์ประกอบของ \mathbf{T} ถูกเขียนให้อยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอกเพื่อใช้สำหรับการคำนวณแบบสมมาตรรอบแกนหมุน

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{\rho\rho} & T_{\rho\phi} & T_{\rho z} \\ T_{\phi\rho} & T_{\phi\phi} & T_{\phi z} \\ T_{z\rho} & T_{z\phi} & T_{zz} \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(E_\rho^2 - E_z^2) & E_\rho E_\phi & E_\rho E_z \\ E_\rho E_\phi & \frac{1}{2}(-E_\rho^2 - E_z^2) & E_\phi E_z \\ E_\rho E_z & E_\phi E_z & \frac{1}{2}(E_z^2 - E_\rho^2) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

โดยที่ E_ρ , E_ϕ และ E_z คือสนามไฟฟ้าในแนวแกน ρ , ϕ และ z ตามลำดับ และ \mathbf{a}_n สำหรับพิกัดทรงกระบอกเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$\mathbf{a}_n = A_\rho \mathbf{a}_\rho + A_z \mathbf{a}_z \quad (2.11)$$

2.2 กลศาสตร์ของไหล

ของไหล คือ สสารที่เปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนที่เมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ [22]. การจำแนกประเภทของของไหลตามความสามารถในการอัดตัวแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) และของไหลที่อัดตัวได้ (compressible fluid). สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ปริมาตรของของไหลหรือความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน. ของไหลประเภทนี้ส่วนใหญ่อยู่ในสถานะของเหลว. ในขณะที่ของไหลที่อัดตัวได้ ปริมาตรและความหนาแน่นของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามการเปลี่ยนแปลงของความดัน เช่น แก๊ส [23].

การคำนวณกลศาสตร์ของไหลสามารถกระทำโดยการแก้ปัญหาระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล. สมการนาเวียร์-สโตกส์อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่ประกอบไปด้วยสมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation) [24]. ความเร็ว ณ ตำแหน่งและเวลาที่กำหนดหาได้จากการแก้ปัญหасมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวร่วมด้วยกับการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต.

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] - \nabla \cdot \bar{\sigma} = \rho \mathbf{f} \quad (2.12)$$

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho \right] + \rho (\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อ \mathbf{u} คือ ความเร็วการไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

\mathbf{f} คือ แรงที่กระทำต่อการไหล

และ $\bar{\sigma}$ คือ เทนเซอร์ความเค้น ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\bar{\sigma} = 2\mu \bar{\epsilon} - \frac{2}{3}\mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \bar{I} - p \bar{I} \quad (2.14)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืด

$\bar{\epsilon}$ คือ เทนเซอร์อัตราการผลิตความเครียดเชิงเส้น

p คือ ความดัน

\bar{I} คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์

ในกรณีการไหลแบบไม่อัดตัว

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.15)$$

สมการที่ 2.12 – 2.15 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] - \nabla \cdot (2\mu \bar{\epsilon}) + \nabla p = \rho \mathbf{f} \quad (2.16)$$

แรง \mathbf{f} ในสมการที่ 2.16 คือแรงที่กระทำกับของไหลในหน่วย N/kg (body force) ซึ่งอาจเป็น แรงโน้มถ่วง แรงลอยตัว หรือ แรงไฟฟ้าสถิตสำหรับกรณีที่ของไหลอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า. นอกจากนี้ แรงตึงผิวเกิดขึ้นเมื่อบริเวณผิวของของเหลวสัมผัสกับตัวกลางต่างชนิด เช่น น้ำกับน้ำมัน หรือน้ำกับอากาศ เป็นต้น. แรงตึงผิวยึดเหนี่ยวโมเลกุลของของเหลวชนิดเดียวกันเอาไว้และเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของตัวกลางชนิดอื่นที่สัมผัสอยู่กับของเหลว. ลักษณะของแรงตึงผิวมีทิศทางตั้งฉากตามแนวผิวของเหลว. สำหรับกรณีตัวกลาง 2 ชนิดที่ประกอบด้วยน้ำมันและหยดน้ำซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลม. ความแตกต่างของความดัน Δp ที่ผิวของหยดน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.17)$$

เมื่อ γ คือ สัมประสิทธิ์แรงตึงผิว

r คือ รัศมีทรงกลม

โดยที่ Δp เป็นสัดส่วนระหว่างแรงตึงผิวที่กระทำต่อพื้นที่ผิวทรงกลม. ขนาดแรงตึงผิว F_γ คำนวณได้จาก

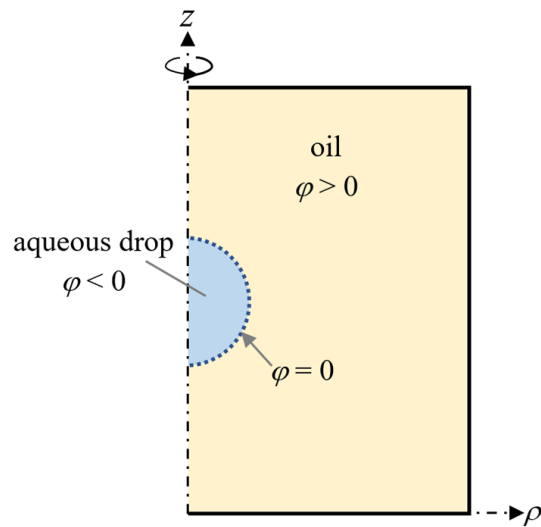
$$F_\gamma = 2\gamma\pi r \quad (2.18)$$

2.3 การคำนวณของไหลต่างเฟส

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลต่างเฟสเมื่อของไหลมีการเคลื่อนที่สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีแบบชัดแจ้ง (explicit method) และวิธีแบบปริยาย (implicit method). วิธีบาวนด์คาร์อินทิกรัล (boundary integral method) และวิธีฟรอนท์แทร็คกิ้ง (front-tracking method) เป็นวิธีการคำนวณของไหลต่างเฟสแบบชัดแจ้ง ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถคำนวณแรงตึงผิวระหว่างของไหลต่างเฟสได้ถูกต้อง. อย่างไรก็ตาม การระบุตำแหน่งขอบเขตระหว่างตัวกลางในการคำนวณด้วยวิธีข้างต้นมีความซับซ้อนเมื่อหยดน้ำเกิดการแตกตัว หรือรวมตัว [25]. การคำนวณของไหลต่างเฟสด้วยวิธีแบบปริยายสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีเฟสฟิลด์ (phase-field method), วิธีวอลุ่มออฟฟลูอิด (volume of fluid method), และวิธีเลเวลเซต (level set method). ทั้งวิธีการเฟสฟิลด์ และวอลุ่มออฟฟลูอิดมีข้อดีในด้านการอนุรักษ์มวลของของไหลได้ดี. แต่ทั้งนี้ การหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางกายภาพและวิธีเฟสฟิลด์มีความซับซ้อน [26]. ในขณะที่ ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่ได้จากวิธีวอลุ่มออฟฟลูอิดไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณ ส่งผลให้ยากที่จะคำนวณการเคลื่อนที่ของขอบเขตตัวกลางได้แม่นยำ [27]. งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการเลเวลเซต เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถคำนวณแรงตึงผิวระหว่างของไหลต่างเฟสได้แม่นยำ. รวมทั้งฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณมีความต่อเนื่อง จึงสามารถคำนวณการเคลื่อนที่และความโค้งของขอบเขตตัวกลางได้แม่นยำ [28].

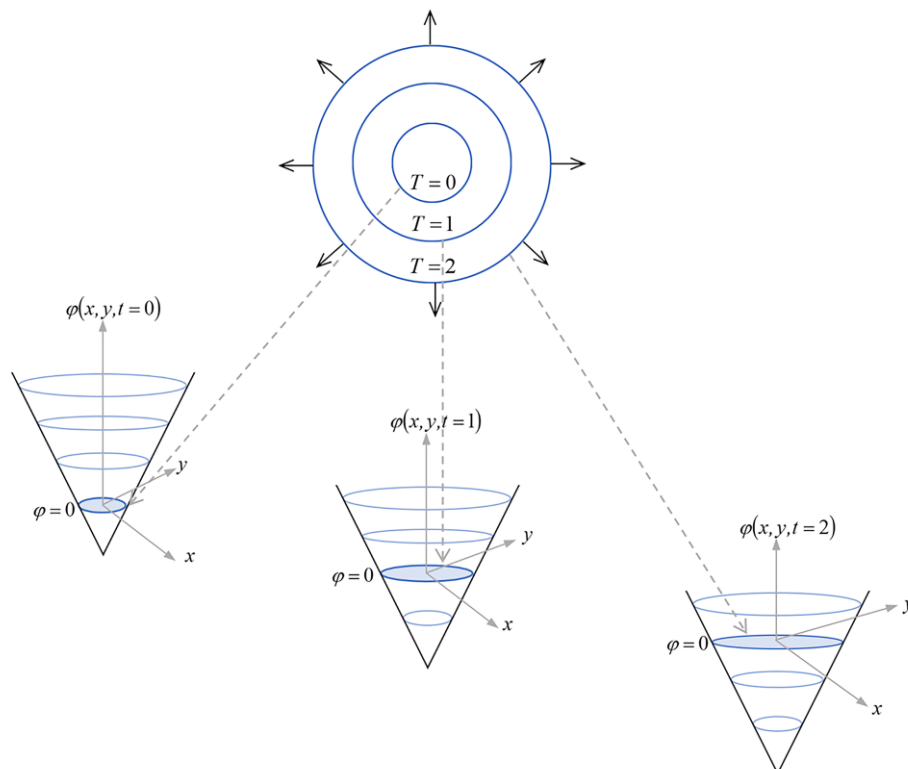
2.3.1 วิธีเลเวลเซต (Level set method)

วิธีเลเวลเซตถูกนำมาใช้ในการระบุบริเวณขอบเขตระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด เมื่อตัวกลางมีการเคลื่อนที่. ตำแหน่งของขอบเขตอยู่ในรูปตัวแปรพื้นผิว (surface variable) φ ซึ่งเป็นฟังก์ชันระยะทางแบบระบุเครื่องหมาย (signed distance function). บริเวณตัวกลางชนิดที่ 1 มีค่า $\varphi < 0$ และบริเวณที่เป็นตัวกลางชนิดที่ 2 มีค่า $\varphi > 0$. ขอบเขตระหว่างตัวกลางทั้ง 2 ชนิดกำหนดให้มีค่า $\varphi = 0$. ตัวอย่างการระบุขอบเขตระหว่างน้ำและน้ำมันด้วยวิธีการแบบเลเวลเซตซึ่งใช้สำหรับการจำลอง 2 มิติ แบบสมมาตรรอบแกนหมุนแสดงในรูปที่ 2.2.



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการระบุขอบเขตระหว่างน้ำและน้ำมันด้วยวิธีการแบบเลเวลเซต

ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของฟังก์ชัน φ ที่แต่ละช่วงเวลา t แสดงดังรูปที่ 2.3 เมื่อ T คือตำแหน่งที่ขอบเขตเคลื่อนที่ไป.



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของฟังก์ชัน φ ที่แต่ละช่วงเวลา [26]

สมการการเคลื่อนที่ของ φ เมื่อตัวกลางมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว \mathbf{u} กำหนดโดย [29]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = 0 \quad (2.19)$$

การระบุตำแหน่งของขอบเขตระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดด้วยวิธีเลเวลเซต ส่งผลให้แบบจำลองที่พิจารณาไม่มีเส้นขอบเขตระหว่างตัวกลางที่ชัดเจน. ขอบเขตของตัวกลาง φ กลายเป็นบริเวณที่มีความหนา โดยในที่นี้กำหนดให้ความหนาที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของแบนด์วิดท์ของรอยต่อระหว่างตัวกลาง. ดังนั้น เมื่อกำหนดตัวแปร P แทนคุณสมบัติตัวกลางใดๆ เช่น ความหนืด (μ), ความหนาแน่น (ρ) และสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ_r) คุณสมบัติของตัวกลางคำนวณได้จาก [30]

$$P = P_1 + (P_2 - P_1)H(\varphi) \quad (2.20)$$

เมื่อ P_1 และ P_2 คือ คุณสมบัติของตัวกลางชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ. $H(\varphi)$ คือ ฟังก์ชันเฮฟวีไซด์ (Heaviside function) ที่ถูกนิยามโดยแบนด์วิดท์ BW ของรอยต่อระหว่างตัวกลาง. งานวิจัยนี้กำหนดให้ $H(\varphi)$ หาได้จาก [29]

$$H(\varphi) = \begin{cases} 0 & ; \frac{\varphi}{BW} < -1 \\ \frac{3}{4} \left[\frac{\varphi}{BW} - \frac{1}{3} \left(\frac{\varphi}{BW} \right)^3 \right] + \frac{1}{2} & ; \left| \frac{\varphi}{BW} \right| \leq 1 \\ 1 & ; \frac{\varphi}{BW} > 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

ทั้งนี้ เพื่อรักษาความหนาของขอบเขตของตัวกลางให้คงที่ตลอดเวลาที่ขอบเขตตัวกลางมีการเคลื่อนที่ ขั้นตอนการกำหนดค่าตั้งต้นของขอบเขตตัวกลางใหม่ (re-initialization) ในระหว่างขั้นตอนการคำนวณจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง. หากไม่มีการกำหนดค่าขอบเขตตัวกลางใหม่ ความหนาของตัวกลางที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อของไหลเคลื่อนที่ส่งผลให้การคำนวณแรงที่กระทำกับของไหลผิดเพี้ยนไป. ในงานวิจัยนี้ วิธีเลเวลเซตถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์. การกำหนดค่าตั้งต้นของขอบเขตตัวกลางใหม่ทำโดยกำหนดให้ φ มีค่าเท่ากับระยะทางที่น้อยที่สุดจากจุดไหนจนถึงขอบเขตตัวกลางแบบมีเครื่องหมายตามชั้นเวลาที่กำหนดไว้.

2.3.2 การคำนวณแรงพื้นผิวที่เกี่ยวข้องเมื่อขอบเขตตัวกลางมีความหนา

ภายใต้สนามไฟฟ้า หยดน้ำเกิดการเสีรูปร่าง เคลื่อนที่ เชื่อมรวม และแยกตัวได้. พฤติกรรมดังกล่าวของหยดน้ำขึ้นอยู่กับแรงทางไฟฟ้าและแรงตึงผิวที่กระทำต่อบริเวณขอบเขตของตัวกลาง. การคำนวณแรงทางไฟฟ้าที่ขอบเขตของตัวกลางหาได้จากผลคูณจุด (dot product) ของเทนเซอร์ความเค้นของแมกซ์เวลล์กับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวตั้งฉากที่ขอบเขตของตัวกลาง. ทั้งนี้ ขอบเขต

ของตัวกลางถูกระบุตำแหน่งด้วยวิธีการเลเวลเซต ส่งผลให้ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่พิจารณามีความหนาไม่เป็นศูนย์. คุณสมบัติของตัวกลางมีการแปรค่าจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งในช่วงบริเวณขอบเขต. แรงจึงไม่สามารถอินทิเกรตความเค้นของแมกซ์เวลล์บนขอบเขตโดยตรงได้. ดังนั้นการคำนวณแรงทางไฟฟ้าต้องมีการกระจายแรงตามบริเวณช่วงความหนาของขอบเขตตัวกลาง. สมการที่นำมาใช้ในการคำนวณแรงทางไฟฟ้าและแรงตึงผิวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้.

แรงไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร \mathbf{f}_E ที่กระทำต่อบริเวณขอบเขตตัวกลางหาได้จาก [31]

$$\mathbf{f}_E = -\frac{1}{2} E^2 \epsilon_0 \nabla \epsilon_r \quad (2.22)$$

เมื่อ ϵ_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลางซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.20. อนุพันธ์ของสภาพยอมสัมพัทธ์หาได้จาก

$$\nabla \epsilon_r = (\epsilon_2 - \epsilon_1) \frac{dH(\varphi)}{d\varphi} \nabla \varphi \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 อนุพันธ์ δ ของ $H(\varphi)$ หรือฟังก์ชันไคแรกเดลต้า (Dirac delta function) หาได้จาก

$$\delta = \frac{dH(\varphi)}{d\varphi} = \begin{cases} \frac{3}{4BW} - \frac{3\varphi^2}{4(BW)^3} & ; \left| \frac{\varphi}{BW} \right| \leq 1 \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.24)$$

ในทำนองเดียวกัน แรงตึงผิวที่เกิดขึ้นถูกกระจายแรงตามบริเวณช่วงความหนาของขอบเขตตัวกลาง. แรงตึงผิวต่อหน่วยปริมาตร \mathbf{f}_γ เขียนได้ดังนี้ [32, 33]

$$\mathbf{f}_\gamma = -\gamma \kappa \delta \nabla \varphi \quad (2.25)$$

เมื่อ κ คือ ความโค้ง (curvature) หาได้จาก

$$\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \varphi}{\|\nabla \varphi\|} \right) \quad (2.26)$$

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary value problem) สามารถทำได้หลายวิธี. วิธีการเชิงตัวเลขที่นำมาใช้มาแก้ปัญหาดังกล่าว ได้แก่ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method), วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method), วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) และวิธีการจำลองแบบประจุ (charge simulation method)

เป็นต้น. ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ เนื่องจากมีความสะดวกในการจำลองตัวกลางที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำ และสามารถใช้ได้กับปัญหาการไหล ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น. ขั้นตอนการคำนวณวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังต่อไปนี้ [34].

- (1) แบ่งบริเวณที่พิจารณาออกเป็นส่วนย่อยๆ หรือ เอลิเมนต์
- (2) กำหนดฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณเอลิเมนต์
- (3) สร้างสมการในการคำนวณของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์
- (4) นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันเป็นเมทริกซ์ของระบบเอลิเมนต์ และแทนค่าเงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาผลเฉลย

2.4.1 เอลิเมนต์และฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณปริมาณบนเอลิเมนต์

ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณปริมาณต่างๆ เช่น รูปร่างของเอลิเมนต์ ศักย์ไฟฟ้า ความเร็วของของไหล ฯลฯ เป็นฟังก์ชันการประมาณแบบภายใน (interpolating function). การประมาณรูปร่างของเอลิเมนต์ที่แปลงจากพิกัดจริงไปเป็นพิกัดเฉพาะที่ (Local coordinate) สามารถเรียกฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณว่า ฟังก์ชันรูปร่าง (shape function). ความสัมพันธ์ของปริมาณที่ต้องการประมาณ ซึ่งในที่นี้คือค่า ϕ สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i \quad (2.27)$$

เมื่อ n คือ จำนวนโนดทั้งหมดของเอลิเมนต์

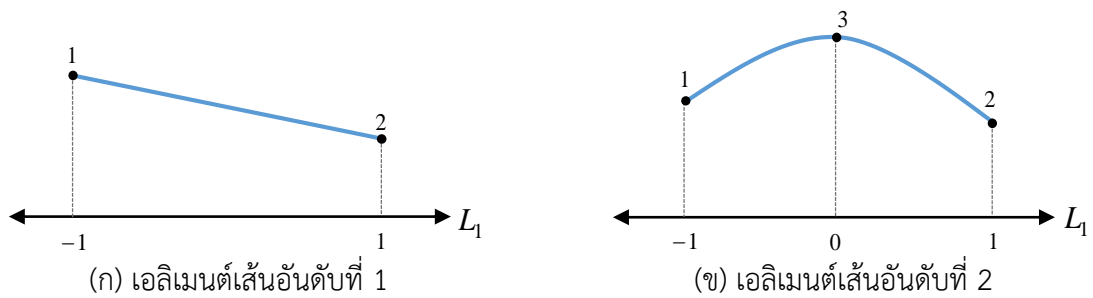
N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่างประจำโนด i

ϕ_i คือ ค่าของตัวแปรประจำโนด i

งานวิจัยนี้มีการใช้เอลิเมนต์แบบเส้น สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [35]

1) เอลิเมนต์แบบเส้น

เอลิเมนต์แบบเส้นถูกนำมาใช้ในการจำลองบริเวณสำหรับปัญหา 1 มิติ หรือการจำลองขอบเขตสำหรับปัญหาแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ แบบสมมาตรรอบแกนหมุน. เอลิเมนต์แบบเส้นอันดับที่ 1 ประกอบไปด้วย 2 จุดโนด และเอลิเมนต์แบบเส้นอันดับที่ 2 ประกอบไปด้วย 3 จุดโนด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ.

รูปที่ 2.4 เอลิเมนต์เส้นบนพิกัดเฉพาะที่ L_1

เมื่อ L_1 คือ พิกัดเฉพาะที่ซึ่งมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 . ฟังก์ชันรูปร่างประจำโหนด i สำหรับเอลิเมนต์เส้นอันดับที่ 1

$$N_1 = 0.5(1 - L_1) \quad (2.28)$$

$$N_2 = 0.5(1 + L_1)$$

สำหรับเอลิเมนต์เส้นอันดับที่ 2

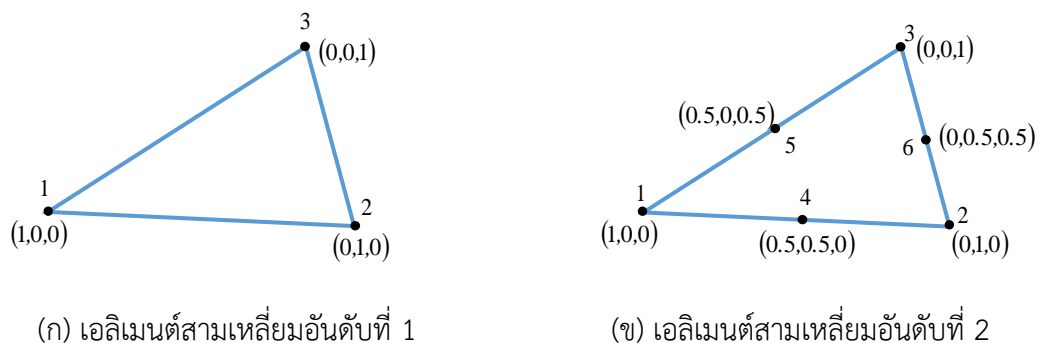
$$N_1 = 0.5(L_1 - 1)L_1$$

$$N_2 = 0.5(1 + L_1)L_1 \quad (2.29)$$

$$N_3 = (1 - L_1)(1 + L_1)$$

2) เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม

เอลิเมนต์สามเหลี่ยมถูกนำมาใช้จำลองบริเวณสำหรับปัญหาแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ แบบสมมาตรรอบแกนหมุน. เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับที่ 1 ประกอบด้วยจุดโหนดจำนวน 3 จุด และเอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับที่ 2 ประกอบด้วยจุดโหนดจำนวน 6 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ.

รูปที่ 2.5 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมบนพิกัดเฉพาะที่ (L_1, L_2, L_3)

เมื่อ L_1 , L_2 และ L_3 คือ พิกัดเฉพาะที่ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ $L_1 + L_2 + L_3 = 1$. สำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับที่ 1

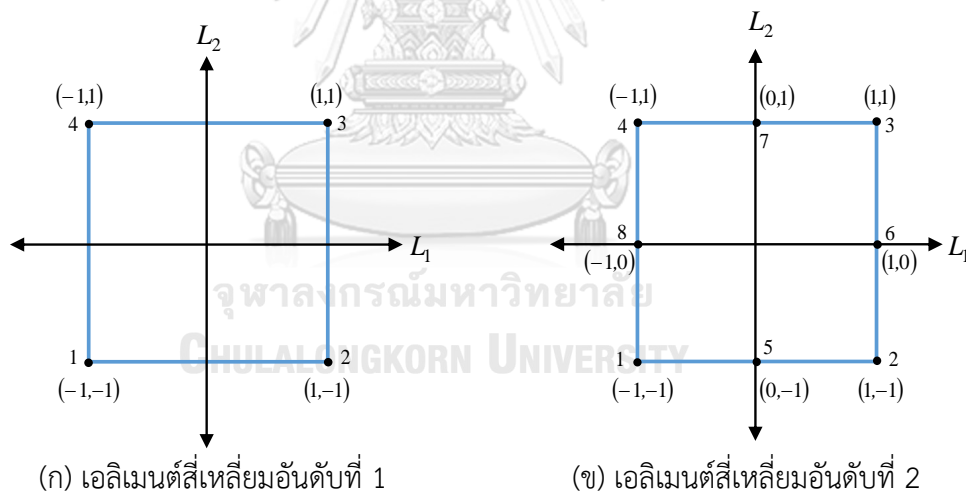
$$N_i = L_i \quad (2.30)$$

สำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับที่ 2

$$\begin{aligned} N_1 &= (2L_1 - 1)L_1 \\ N_2 &= (2L_2 - 1)L_2 \\ N_3 &= (2L_3 - 1)L_3 \\ N_4 &= 4L_1L_2 \\ N_5 &= 4L_1L_3 \\ N_6 &= 4L_2L_3 \end{aligned} \quad (2.31)$$

3) เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม

เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมถูกนำมาใช้จำลองบริเวณสำหรับปัญหาแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ แบบสมมาตรรอบแกนหมุน เช่นเดียวกับเอลิเมนต์สามเหลี่ยม. เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอันดับที่ 1 ประกอบด้วยจุดโหนดจำนวน 4 จุด และเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอันดับที่ 2 ประกอบด้วยจุดโหนดจำนวน 8 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ(ข) ตามลำดับ.



รูปที่ 2.6 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมบนพิกัดเฉพาะที่ (L_1, L_2)

เมื่อ L_1 และ L_2 คือ พิกัดเฉพาะที่ซึ่งมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 . สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอันดับที่ 1

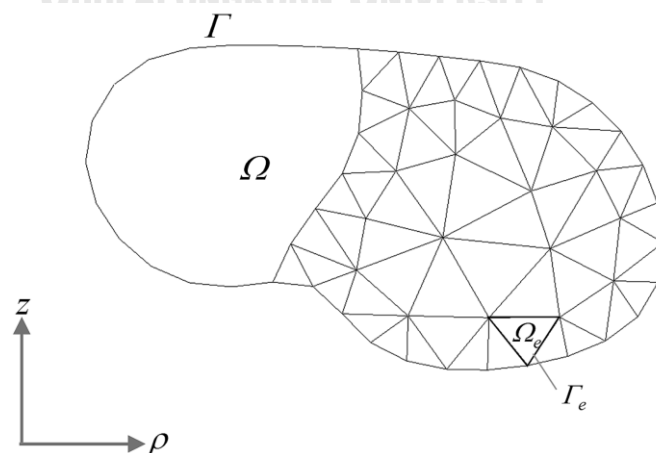
$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1 - L_1)(1 - L_2) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1 + L_1)(1 - L_2) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1 + L_1)(1 + L_2) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1 - L_1)(1 + L_2) \end{aligned} \quad (2.32)$$

สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอันดับที่ 2

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{1}{4}(1 - L_1)(1 - L_2)(-1 - L_1 - L_2) \\
 N_2 &= \frac{1}{4}(1 + L_1)(1 - L_2)(-1 + L_1 - L_2) \\
 N_3 &= \frac{1}{4}(1 + L_1)(1 + L_2)(-1 + L_1 + L_2) \\
 N_4 &= \frac{1}{4}(1 - L_1)(1 + L_2)(-1 - L_1 + L_2) \\
 N_5 &= \frac{1}{2}(1 - L_1^2)(1 - L_2) \\
 N_6 &= \frac{1}{2}(1 + L_1)(1 - L_2^2) \\
 N_7 &= \frac{1}{2}(1 - L_1^2)(1 + L_2) \\
 N_8 &= \frac{1}{2}(1 - L_1)(1 - L_2^2)
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

2.4.2 วิธีการเศษค้ำถ่วงน้ำหนัก (Weight residual method)

การสร้างระบบสมการเชิงเส้นสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ หลักการแปรผัน (Variational principle) และ วิธีการเศษค้ำถ่วงน้ำหนัก (Weight residual method). วิชยานิพนธ์นี้นำเสนอเฉพาะในส่วนของวิธีการเศษค้ำถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถใช้หาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ที่เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้. ตัวอย่างของบริเวณปัญหาที่พิจารณา คือ สมการศักย์ไฟฟ้าบนบริเวณ Ω ที่ล้อมรอบด้วยขอบเขต Γ ดังแสดงในรูปที่ 2.7. บริเวณ Ω ของปัญหาถูกแบ่งด้วยเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังที่แสดงในหัวข้อที่ผ่านมา.



รูปที่ 2.7 บริเวณและขอบเขตที่พิจารณา

สมการอนุพันธ์ที่ใช้หาผลเฉลยค่าศักย์ไฟฟ้า (ϕ) กรณีไม่มีประจุ

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (2.34)$$

ผลเฉลยโดยประมาณของ ϕ เขียนให้อยู่ในรูปของ

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i \quad (2.35)$$

เมื่อ N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่างประจำโหนด i

ϕ_i คือ ผลเฉลยค่าศักย์ไฟฟ้า ณ โหนด i

n คือ จำนวนจุดโหนดบนบริเวณที่พิจารณา

จากวิธีการของเศษค่าง่วงน้ำหนัก ผลเฉลยของสมการอนุพันธ์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์แต่เท่ากับ

R

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \phi) = R \quad (2.36)$$

เมื่อ R คือ เศษตกค้าง หรือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากผลเฉลยซึ่งควรมีค่าต่ำที่สุด. การถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างด้วยวิธีการเลอว์คินทำได้โดยการอินทิเกรตเศษตกค้างที่คูณด้วยฟังก์ชันน้ำหนักและกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ [35].

$$\int_{\Omega} W_i R \, d\Omega = 0 \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.37)$$

เมื่อ W_i คือ ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก.

ในวิธีแบบบับโนฟ-กาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin) กำหนดให้ $W_i = N_i$. เมื่อแทนค่า W_i และ R ลงในสมการ 2.37 จะได้ว่า

$$-\int_{\Omega} N_i \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \phi) \, d\Omega = 0 \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.38)$$

บริเวณของปัญหา Ω ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ จำนวน m เอลิเมนต์ ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์มีบริเวณ Ω_e ที่ล้อมรอบด้วยขอบเขตของเอลิเมนต์ Γ_e . เมื่อสมการที่ 2.38 ประยุกต์เข้ากับทฤษฎีของกรีนส์ สมการดังกล่าวของแต่ละเอลิเมนต์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \int_{\Omega_e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial \rho} \frac{\partial \phi}{\partial \rho} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) d\Omega - \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_{\Gamma_e} (\nabla \phi \cdot \mathbf{a}_n) N_i \, d\Gamma \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.39)$$

เมื่อ $E_n = -\nabla \phi \cdot \mathbf{a}_n$ และ อนุพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าหาได้จาก

$$\frac{\partial \phi}{\partial \rho} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial \rho} \phi_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \rho} & \frac{\partial N_2}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial \rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial N_i}{\partial z} \phi_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix}$$

แทนค่า E_n และ $\frac{\partial \phi}{\partial \rho}$ และ $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ ลงในสมการที่ 2.39 จะได้ว่า

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \int_{\Omega_e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial \rho} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \rho} & \frac{\partial N_2}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial \rho} \end{bmatrix} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \right) d\Omega \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_{\Gamma_e} E_n N_i d\Gamma = 0 \quad (2.41)$$

สำหรับการคำนวณปัญหาค่าศักย์ไฟฟ้า ขอบเขต Γ_e กำหนดให้ E_n มีค่าเท่ากับ 0. สมการที่ 2.41 สามารถลดรูปได้เป็น

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \int_{\Omega_e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial \rho} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \rho} & \frac{\partial N_2}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial \rho} \end{bmatrix} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \right) d\Omega \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} = 0 ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.42)$$

ผลของการอินทิเกรตของแต่ละเอลิเมนต์เขียนให้อยู่ในรูประบบเมทริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$[K][\phi] = [0] \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \dots & K_{1,n} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \dots & K_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n,1} & K_{n,2} & \dots & K_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} = [0] \quad (2.44)$$

เมื่อกำหนดให้องค์ประกอบของเมทริกซ์ $K_{i,j}$ หาได้จาก

$$K_{i,j} = \sum_{e=1}^m K_{i,j}^e ; i, j \in e \quad (2.45)$$

$$\text{เมื่อ } K_{i,j}^e = \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_{\Omega_e} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \rho} \\ \frac{\partial N_2}{\partial \rho} \\ \vdots \\ \frac{\partial N_n}{\partial \rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \rho} & \frac{\partial N_2}{\partial \rho} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial \rho} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial z} \\ \frac{\partial N_2}{\partial z} \\ \vdots \\ \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} d\Omega$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การจำลอง

M. Sussman และคณะนำเสนอการใช้วิธีเลเวลเซตในการระบุขอบเขตตัวกลางร่วมกับวิธีโพรเจกชันเพื่อคำนวณการไหลของของไหลต่างชนิด โดยที่ขอบเขตของตัวกลางเกิดการรวมตัวหรือแยกออกจากกันได้ [32]. ของไหลต่างเฟสที่ใช้ในการคำนวณ คือ แก๊สและของเหลว โดยที่บริเวณของแก๊ส $\varphi < 0$ และบริเวณของเหลว $\varphi > 0$. ขอบเขตระหว่างตัวกลางกำหนดให้ $\varphi = 0$. การเคลื่อนที่ของ φ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.19 โดยที่ฟังก์ชันเฮฟวีไซด์ $H_\varepsilon(\varphi)$ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้หาได้จาก

$$H_\varepsilon(\varphi) = \begin{cases} 0 & ; \varphi < -\varepsilon \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\varphi}{\varepsilon} - \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\varphi}{\varepsilon}\right) \right] & ; |\varphi| \leq \varepsilon \\ 1 & ; \varphi > \varepsilon \end{cases} \quad (2.46)$$

เมื่อ ε คือ ขนาดครึ่งหนึ่งของความหนาขอบเขต ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของกริด. การใช้กริดที่มีความละเอียดมากส่งผลให้ความหนาของขอบเขตระหว่างตัวกลางลดลง. การกำหนดค่าตั้งต้นของขอบเขตใหม่เพื่อให้ขอบเขตตัวกลางคงที่เมื่อเวลาผ่านไปทำได้ดังนี้

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} = \text{sign}(\varphi)(1 - |\nabla d|) \quad (2.47)$$

เมื่อ $\text{sign}(\varphi)$ มีค่าเป็น -1, 1 และ 0 เมื่อค่า φ อยู่ในบริเวณแก๊ส, ของเหลว และขอบเขตตัวกลางตามลำดับ. d คือ เป็นฟังก์ชันระยะทางในแนวตั้งฉากกับขอบเขตแบบระบุเครื่องหมาย. สมการที่ 2.47 ถูกคำนวณจนเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วแทนค่าของ φ ด้วย d ที่ได้.

วิธีการคำนวณด้วยเลเวลเซตถูกนำมาทดสอบกับกรณีปัญหาการหมุนของจานทรงกลมที่มีช่องสล็อตตรงกลางและหมุนด้วยความเร็วคงที่ (Zalesak's disk). ผลที่ได้พบว่ารูปทรงของจานที่ได้จากการคำนวณขึ้นอยู่กับความละเอียดของกริด. ค่าความคลาดเคลื่อนมวลของจานหมุนหลังจากที่หมุนจนครบรอบตามที่กำหนดมีค่าน้อยกว่า 1.3% และลดลงจนมีค่าน้อยกว่า 0.1% เมื่อกริดละเอียดมากขึ้น. นอกจากนี้ คณะผู้เขียนคำนวณการไหลแบบ 2 มิติและ 3 มิติแบบสมมาตรรอบแกนหมุนด้วยวิธีการเลเวลเซต. การคำนวณแบบ 3 มิติ พิจารณากรณีการตกของฟองอากาศ. ผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่นำมาใช้อ้างอิง โดยความเร็วและอัตราส่วนรูปร่างของฟองอากาศที่ได้จากการคำนวณเท่ากับผลการทดลอง. ในส่วนการคำนวณแบบ 2 มิติ คณะผู้เขียนคำนวณคลื่นที่มีลมพัดผ่านแล้วเกิดการแยกตัว. ผลการคำนวณถูกเปรียบเทียบกับบทความที่คณะผู้เขียนใช้อ้างอิง ซึ่งคำนวณคลื่นที่มีการไหลแบบไม่หมุนด้วยอนุกรมฟูเรียร์. ผลที่ได้พบว่า ความสูงของคลื่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการแบบเลเวลเซตสอดคล้องกับผลการคำนวณที่นำมาเปรียบเทียบ.

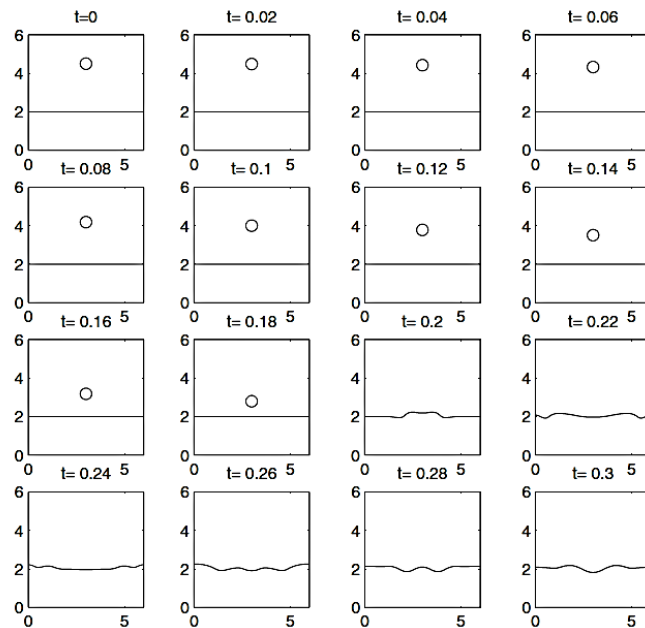
E. Olsson และ G. Kreiss เสนอการคำนวณวิธีเลเวลเซตที่ปรับปรุงให้มีความสามารถในการอนุรักษ์มวลได้ดีขึ้น [27]. วิธีการเลเวลเซตแบบมาตรฐานซึ่งกำหนดให้เป็นฟังก์ชันระยะทางมีข้อเสียคือ ไม่สามารถอนุรักษ์มวลไว้ได้เมื่อเวลาผ่านไป. มวลของของไหลจะหายไปหรือเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กายภาพของของไหลไม่ถูกต้อง. คณะผู้เขียนปรับปรุงการคำนวณโดยไม่ใช่ φ เป็นฟังก์ชันระยะทางแต่กำหนดให้ φ เปลี่ยนตามฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 1. บริเวณของไหลชนิดที่ 1 มีค่า $\varphi = 0$ และบริเวณของไหลชนิดที่ 2 มีค่า $\varphi = 1$. ขอบเขตตัวกลางระหว่างของไหล 2 ชนิด $\varphi = 0.5$. การเคลื่อนที่ของ φ คำนวณได้จากสมการที่ 2.19. ขั้นตอนการคำนวณอีกหนึ่งขั้นตอนถูกเพิ่มขึ้นมาในแต่ละขั้นเวลาเพื่อคงรูปร่างและความหนาของขอบเขตระหว่างตัวกลางให้สามารถอนุรักษ์มวลไว้ได้ดังสมการ

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{f}(\varphi) = \varepsilon \nabla \cdot (\nabla \varphi) \quad (2.48)$$

เมื่อ \mathbf{f} คือ ฟลักซ์ที่ถูกอัด (compressive flux) ซึ่งสมมติขึ้นให้กระทำในบริเวณที่ $0 < \varphi < 1$ และมีทิศทางในแนวตั้งฉาก \mathbf{n} กับรอยต่อระหว่างตัวกลาง ($\mathbf{n} = \nabla \varphi / |\nabla \varphi|$). ε คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของขอบเขต ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของกริด. \mathbf{f} สามารถคำนวณได้จาก

$$\mathbf{f} = \varphi(1 - \varphi)\mathbf{n} \quad (2.49)$$

วิธีการคำนวณถูกทดสอบกับรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 รูปแบบ. สำหรับรูปแบบที่ 1 และ 2 เป็นวงกลมหมุนด้วยความเร็วคงที่และความเร็วกระแสวน (vortex). ผลการคำนวณกรณีที่วงกลมหมุนด้วยความเร็วคงที่พบว่า พื้นที่ของวงกลมที่ถูกหมุนเมื่อเวลาผ่านไปยังคงมีขนาดใกล้เคียงกับพื้นที่ตั้งต้น. ส่วนรูปแบบที่ 2 วงกลมถูกหมุนด้วยความเร็วกระแสวนส่งผลให้เกิดการยืดออกและแยกตัวบริเวณส่วนปลายที่ยืดออกในกรณีที่กริดมีขนาดเล็ก. คณะผู้เขียนพบว่าส่วนปลายที่ขาดออกยังทำให้มวลของวงกลมหายไปน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธีเลเวลเซตแบบมาตรฐานในการคำนวณ. สิ่งนี้แสดงให้เห็นได้ว่าวิธีการคำนวณที่นำเสนอสามารถอนุรักษ์มวลได้ดีกว่า. รูปแบบที่ 3 คือการตกของฟองอากาศในน้ำ. ผลการคำนวณที่ได้พบว่าสามารถอนุรักษ์มวลของฟองอากาศได้ดีแม้แต่ในกรณีที่กริดหยาบ โดยมีคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 0.1% เท่านั้น. ในส่วนรูปแบบที่ 4 ที่คณะผู้เขียนนำเสนอคือ การตกของหยดน้ำผ่านอากาศและสัมผัสเข้ากับผิวน้ำ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของผู้เขียนวิทยานิพนธ์. ผลการคำนวณแสดงการเคลื่อนที่และการรวมกันของหยดน้ำกับผิวน้ำดังรูปที่ 2.8. หยดน้ำในอากาศยังมีลักษณะค่อนข้างกลมและผิวน้ำยังคงเป็นเส้นตรงเมื่อหยดตกลงมาใกล้. ขณะที่หยดน้ำกระทบกับผิวน้ำ ผิวน้ำเกิดคลื่นน้ำเคลื่อนที่ไปทางผนัง. สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีเลเวลเซตที่ปรับปรุงไม่มีปัญหาในการจัดการกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขอบเขตระหว่างตัวกลาง และสามารถคงความหนาของขอบเขตเอาไว้ได้แม้มีหยดน้ำมาตกกระทบพื้นผิว.



รูปที่ 2.8 ผลการคำนวณการตกของหยดน้ำจันกระทั่งกระทบกับผิวน้ำ [27]

E. Olsson และคณะนำเสนอการปรับปรุงการคำนวณวิธีเลเวลเซต เพื่อให้การคำนวณลู่เข้าสู่คำตอบได้ง่ายขึ้น [28]. จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ คณะผู้เขียนพบว่า การปรับปรุงวิธีการเลเวลเซตให้อนุรักษ์มวลได้ดีขึ้นตามสมการที่ 2.48 และ 2.49 ส่งผลให้การคำนวณลู่เข้าสู่คำตอบช้า เมื่อกริดละเอียด. ในงานนี้ สมการการกำหนดขอบเขตตัวกลางใหม่ถูกปรับปรุงในส่วนเทอมขวาของสมการ ให้มีทิศทางในแนวตั้งฉากเท่านั้น $\varepsilon \nabla \cdot [(\nabla \phi \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}]$ เพื่อให้การคำนวณลู่เข้าสู่คำตอบง่ายขึ้น. การคำนวณเชิงตัวเลขในงานนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิธีการคำนวณถูกตรวจสอบกับปัญหาการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์ต่ำในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดของเหลวที่มีขอบเขตตัวกลางรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายโค้งมนภายใต้แรงตึงผิวและแรงหนืด. การคำนวณพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถอนุรักษ์มวลได้ดีแม้กริดที่ใช้ในการคำนวณหยาบ และการคำนวณสามารถลู่เข้าสู่คำตอบได้ดีขึ้น. นอกจากนี้ คณะผู้เขียนนำเสนอการปรับเมช (adaptive mesh) เมื่อขอบเขตตัวกลางเคลื่อนที่. ฟังก์ชันที่ใช้ในการปรับเมชขึ้นอยู่กับความหนาของขอบเขตและจำนวนเอลิเมนต์ระหว่างขอบเขต. บริเวณระหว่างขอบเขตตัวกลางถูกแบ่งด้วยเอลิเมนต์แบบละเอียด. ความหนาแน่นของเอลิเมนต์ลดลงเมื่อระยะห่างจากขอบเขตเพิ่มขึ้น. ผลที่ได้พบว่าการอนุรักษ์มวลทำได้ดีเมื่อกำหนดให้ปรับเมชในระหว่างการเคลื่อนที่. การใช้เอลิเมนต์แบบหยาบให้ผลลัพธ์เทียบเท่ากับการใช้กริดแบบสม่ำเสมอจำนวนมากในการคำนวณ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณลดลงไปถึง 30%. อย่างไรก็ตาม วิธีปรับเมชที่ใช้ยังไม่เหมาะสมเมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหล.

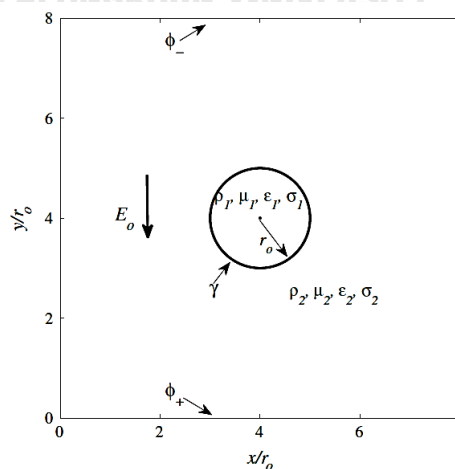
M. S. Shadloo และคณะนำเสนอการคำนวณเชิงเลขของของเหลวต่างเฟส เพื่อจำลองการเสีรูปร่างของหยดของเหลวที่ลอยอยู่ในของเหลวหนืดภายใต้สนามไฟฟ้า [36]. การคำนวณเชิงตัวเลขใช้วิธีแบบสมูทพาร์ทิเคิลไฮโดรไดนามิกส์ (smoothed particle hydrodynamics) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบที่ไม่ขึ้นกับกริด. สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้คำนวณการไหลประกอบไปด้วยสมการอนุกรมมวลและสมการอนุกรมโมเมนตัม โดยแรงที่กระทำกับของไหลประกอบไปด้วยแรงไฟฟ้าและแรงตึงผิว. เมื่อขอบเขตตัวกลางมีความหนา. แรงไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$\mathbf{f}_E = \nabla \cdot \mathbf{T} = q_v \mathbf{E} - \frac{1}{2} \mathbf{E}^2 \nabla \varepsilon \quad (2.50)$$

เมื่อ q_v คือ ความหนาแน่นประจุ. สำหรับการคำนวณแรงตึงผิวในงานวิจัยนี้ ขอบเขตตัวกลางถูกแทนด้วยบริเวณที่มีความหนาซึ่งจำกัดด้วยฟังก์ชันใดแรกเดลต้า. เนื่องจากขอบเขตตัวกลางในงานวิจัยนี้ไม่ได้เป็นฟังก์ชันของตัวแปรพื้นผิวจากวิธีเลเวลเซต แรงตึงผิวคำนวณได้จากตำแหน่งขอบเขตตัวกลางโดยตรง

$$\mathbf{f}_\gamma = -\gamma \kappa \delta \mathbf{n} \quad (2.51)$$

คณะผู้เขียนทดสอบวิธีการคำนวณ 2 กรณี. กรณีแรก คือ การเสีรูปร่างของหยดภายใต้แรงตึงผิวอย่างเดียว. ความถูกต้องของวิธีการคำนวณถูกยืนยันโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณความแตกต่างของความดันภายในและภายนอกหยดกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์. จากกฎของลาปลาซ ความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกหยดขึ้นอยู่กับความตึงผิวและแปรผันตามความโค้ง. ผลการเปรียบเทียบที่ได้พบว่าผลการคำนวณเชิงตัวเลขสอดคล้องกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์. กรณีที่ 2 คือการเสีรูปร่างของหยดภายใต้แรงตึงผิวและสนามไฟฟ้า. การจำลองพิจารณาหยดที่ลอยอยู่ตรงกลางของพื้นที่ปิดสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.9 โดยที่หยดน้ำมีรัศมี r_0 ได้รับสนามไฟฟ้า E_0 และ $\rho, \mu, \varepsilon, \sigma$ แทนความหนาแน่น ความหนืด สภาพยอมสัมพัทธ์ และความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ.



รูปที่ 2.9 แบบจำลองหยดภายใต้แรงตึงผิวและสนามไฟฟ้า [36]

คณะผู้เขียนคำนวณอัตราส่วนการเสีรูปร่างจากผลการจำลอง ซึ่งหาได้จากผลต่างความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าและแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าส่วนด้วยผลรวมของความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าและแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า. อัตราการเสีรูปร่างที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์ ซึ่งนำเสนอโดย Taylor [37] และ Feng และคณะ [38]. ผลที่ได้พบว่าผลการคำนวณสอดคล้องกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ โดยมีอัตราการเสีรูปร่างที่คำนวณได้ต่ำกว่าอยู่เล็กน้อย. ความแตกต่างเกิดขึ้นเนื่องจากวิธีการคำนวณที่นำมาเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธี สมมติให้หยดยังคงเป็นทรงกลมอยู่ ซึ่งใช้ได้กับแค่กรณีที่ยอดเสีรูปร่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น. นอกจากนี้ ผลการจำลองพบว่าการเสีรูปร่างของหยดน้ำเป็นทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง (prolate spheroid) หรือ ทรงคล้ายทรงกลมแบนขั้ว (oblate spheroid) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ϵ_1/ϵ_2 และ σ_1/σ_2 . หยดน้ำเสีรูปร่างเป็นทรงกลมแบนข้างเมื่อ $\epsilon_1/\epsilon_2 < \sigma_1/\sigma_2$ และ เป็นทรงกลมแบนขั้วเมื่อ $\epsilon_1/\epsilon_2 > \sigma_1/\sigma_2$.

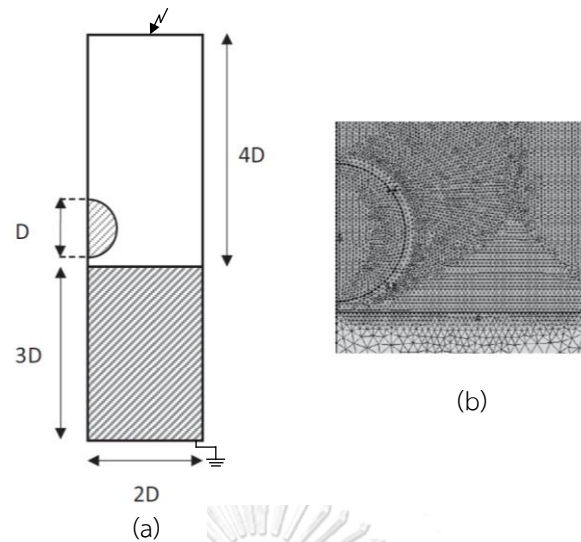
L. He และคณะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสีรูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้ากระแสตรง [39]. คณะผู้วิจัยจำลองการเสีรูปร่างของหยดน้ำด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการคำนวณเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ลักษณะของแบบจำลองมีหยดน้ำลอยอยู่ตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและกราวด์ โดยที่ตัวกลางระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเป็นน้ำมัน. สมการที่ใช้ในการคำนวณประกอบไปด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์และสมการการอนุรักษ์ประจุสำหรับปัญหาการไหลและไฟฟ้า และวิธีการเลเวลเซตสำหรับการคำนวณขอบเขตระหว่างตัวกลางน้ำและน้ำมัน. สมการการเคลื่อนที่ของขอบเขตตัวกลางที่ใช้ในงานนี้เป็นแบบที่ถูกปรับปรุงให้อนุรักษ์มวลได้ดีขึ้น คล้ายกับงานวิจัยของของ E. Olsson และ G. Kreiss. การเคลื่อนที่ของขอบเขตตัวกลาง φ ด้วยความเร็วของไหล \mathbf{u} ที่ใช้ในงานนี้หาได้จาก

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \varphi = \lambda \nabla \cdot \left(\xi \nabla \varphi - \varphi (1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \quad (2.52)$$

เมื่อ ξ คือ ความหนาของขอบเขตตัวกลาง และ λ คือ ตัวแปรที่ใช้สำหรับกำหนดค่าตั้งต้นของขอบเขตตัวกลางใหม่. แรงที่กระทำกับของไหลประกอบด้วยแรงไฟฟ้าและแรงตึงผิว. เมื่อตัวกลางมีความหนา แรงไฟฟ้าคำนวณจากสมการที่ 2.50 และแรงตึงผิวคำนวณจากสมการที่ 2.25. อัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำหาได้จากผลต่างความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าและแนวตั้งฉากส่วนด้วยผลรวมของความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าและแนวตั้งฉาก. ปัจจัยที่ถูกนำมาพิจารณาต่ออัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำ คือ ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า แรงตึงผิว ความหนืด และขนาดของหยดน้ำ. ผลการจำลองพบว่า อัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสนามไฟฟ้าและขนาดของหยดน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น. ในทางกลับกัน เมื่อแรงตึงผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำลดลง. ความหนืดของน้ำมันส่งผลต่ออัตราส่วนการเสีรูปร่างแค่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ทำให้การเสีรูปร่างใช้เวลานานมากขึ้น.

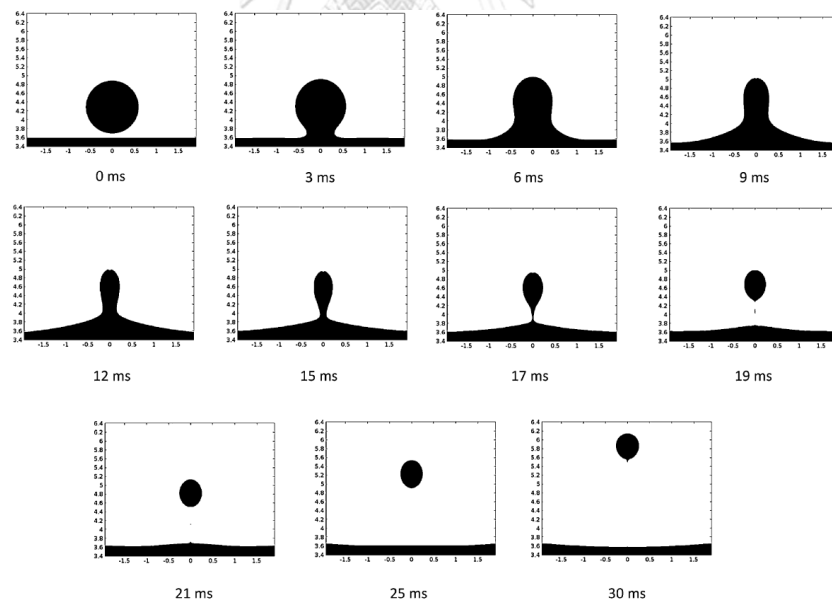
B. Li และคณะศึกษาการเสีรูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ [25]. คณะผู้วิจัยจำลองการเสีรูปร่างโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลอง. วิธีการจำลองและการคำนวณอัตราส่วนการเสีรูปร่างเหมือนกับงานวิจัยของ L. He และคณะ. ลักษณะแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบสมมาตรรอบแกนหมุน โดยที่มีหยดน้ำปราศจากไอออนลอยอยู่ในน้ำมันทานตะวัน. ขนาดของหยดน้ำที่ใช้ในการจำลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.196 mm และ 2.8 mm. สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ใช้ในการจำลองมีทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ แบบครึ่งรูปคลื่นไซน์ แบบสี่เหลี่ยม และแบบฟันเลื่อย. คณะผู้วิจัยยืนยันความถูกต้องของวิธีการคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และพบว่าสัญญาณพัลส์แบบฟันเลื่อยมีอัตราส่วนการเสีรูปร่างที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบสนามไฟฟ้าชนิดอื่น. ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและทดลองน้อยกว่า 13%. ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ส่งผลต่ออัตราส่วนการเสีรูปร่าง. ที่ความถี่ต่ำ (10 Hz) ลักษณะของอัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำเป็นไปตามรูปแบบสัญญาณของสนามไฟฟ้า. ที่ความถี่กลาง (50 Hz) ลักษณะของอัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำยังคงมีความใกล้เคียงกับรูปแบบสัญญาณของสนามไฟฟ้า แต่มีการล่าช้าหลังจากเฟสของสนามไฟฟ้า. ที่ความถี่สูง (500 Hz) ลักษณะอัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำไม่เป็นไปตามรูปแบบสัญญาณของสนามไฟฟ้า แต่จะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับไปมา. นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยพบว่าอัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำมีค่าลดลง เมื่อความถี่ของสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากขึ้น.

V. Vivacqua และคณะจำลองการเชื่อมรวมของหยดน้ำแบบเพียงบางส่วนระหว่างหยดน้ำที่อยู่ในน้ำมันกับผิวภายใต้สนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [40]. คณะผู้วิจัยพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อการจำลอง ได้แก่ ขนาดของเอลิเมนต์ ความหนาของบริเวณขอบเขต ตัวแปรที่ใช้สำหรับกำหนดค่าตั้งต้นขอบเขตตัวกลางใหม่ (re-initialization parameter) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบอุปกรณ์แยกน้ำออกจากน้ำมัน. ลักษณะแบบจำลองที่คณะผู้เขียนใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำ. น้ำและน้ำมันที่ใช้ในการจำลองคือน้ำกลั่นและน้ำมันทานตะวัน. สมการทางคณิตศาสตร์ในการจำลองเหมือนกับงานวิจัยของ L. He และคณะ. อัตราส่วนปริมาตรของหยดน้ำที่แยกออกหลังเกิดการเชื่อมรวมต่อปริมาตรของหยดน้ำตั้งต้น (V_r) ที่ได้จากจำลองถูกนำไปเทียบกับงานของ M. Mousavichoubeh และคณะซึ่งนำเสนอการทดลองการเชื่อมรวมเพียงบางส่วนระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำ [41]. กรณีที่หยดน้ำมีขนาด $D = 1.196$ mm ได้รับสนามไฟฟ้า 373 V/mm อัตราส่วน V_r ที่ได้จากจำลองมีค่าเท่ากับ 0.088. ผลการจำลองที่ได้พบว่าอัตราส่วน V_r มีค่าเท่ากับผลการทดลอง เมื่อกำหนดให้ความหนาของขอบเขต ξ และขนาดเอลิเมนต์ที่ใหญ่ที่สุดมีค่าเป็น $0.03D$. รูปที่ 2.11 แสดงผลการจำลองในกรณีดังกล่าว. ขนาดของ ξ มีผลต่อการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลอง. อัตราส่วน V_r แทบไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่ ξ มีค่าเพิ่มจาก 0.03 เป็น 0.05 เท่าของ D หากขนาดของเอลิเมนต์เล็กเพียงพอ.



รูปที่ 2.10 แบบจำลองและลักษณะการกระจายตัวของเอลิเมนต์ [40]

ตัวแปรที่ใช้กำหนดค่าตั้งต้นของขอบเขตตัวกลางใหม่ λ เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการคำนวณเช่นกัน. หาก λ มีขนาดเล็กมาก ความหนาของขอบเขตระหว่างตัวกลางไม่คงที่ ส่งผลให้ V_r มีค่าสูง. อย่างไรก็ตาม λ ที่ใหญ่เกินไปส่งผลให้การคำนวณไม่ลู่เข้า. จากกรณีในรูปที่ 2.11 V_r คงที่และใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อ $0.4 < \lambda < 1.4$ m/s.



รูปที่ 2.11 ผลการจำลองการรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำและผิวน้ำตามเวลา [40]

จากข้างต้น คณะผู้เขียนแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองและวิธีการคำนวณที่นำเสนอสามารถใช้แสดงกระบวนการเชื่อมรวมของหยดน้ำเพียงบางส่วนได้. ผลลัพธ์จากการจำลองจะสอดคล้องกับผลการทดลองเมื่อปรับตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง อาทิ ความหนาบริเวณขอบเขต ขนาดของเอลิเมนต์ และตัวแปรที่ใช้กำหนดขอบเขตตัวกลางใหม่ อย่างเหมาะสม.

B. Li และคณะจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการรวมตัวระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง [42]. แบบจำลองและวิธีการคำนวณที่ใช้เหมือนกันกับ V. Vivacqua และคณะ. ผลของความเข้มสนามไฟฟ้า ขนาดหยดน้ำ สภาพยอมสัมพัทธ์ แรงตึงผิว สภาพนำไฟฟ้า และระยะห่างของรอยต่อระหว่างตัวกลางและหยดน้ำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการรวมตัวถูกศึกษาในงานวิจัยนี้. ผลการจำลองพบว่ารูปแบบการรวมตัวที่พบมี 3 รูปแบบ คือ รูปแบบสมบูรณ์ รูปแบบเพียงบางส่วน และรูปแบบที่ไม่เกิดการรวมตัว. การรวมตัวเปลี่ยนจากรูปแบบสมบูรณ์ไปเป็นรูปแบบอื่น เมื่อสนามไฟฟ้า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมัน ความนำไฟฟ้าของหยดน้ำ ระยะทางจากหยดน้ำถึงผิวน้ำมีค่าสูงขึ้น และเลข Ohnesorge (Oh) มีค่าลดลง. ขนาดของหยดทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันบางส่วนไม่ขึ้นอยู่กับความนำไฟฟ้าของหยดน้ำ. ปริมาตรของหยดน้ำทุติยภูมิต่อปริมาตรหยดน้ำตั้งต้นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของเลข Weber (We) ส่วนด้วย Oh แบบฟังก์ชันกำลัง. นอกจากนี้ คณะผู้เขียนพบว่าการเชื่อมรวมขาดออกจากกันเมื่อความดันบริเวณส่วนเชื่อมรวมสูงกว่าความดันของหยดน้ำ.

2.5.2 การทดลอง

ในอดีตที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการแยกน้ำในน้ำมันด้วยวิธีการเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้า ประกอบไปด้วย การเสีรูปร่างของหยดน้ำเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการเชื่อมรวมของหยดน้ำ และปัจจัยที่ทำให้การเชื่อมรวมของหยดน้ำไม่สมบูรณ์. การเชื่อมรวมแบบไม่สมบูรณ์ที่นำมาศึกษามีหลายกรณี เช่น หยดน้ำเชื่อมรวมแค่เพียงบางส่วนแล้วแยกออกจากกันเกิดเป็นหยดน้ำขนาดย่อย หยดน้ำไม่รวมตัวกัน หรือ หยดน้ำเคลื่อนที่มาติดกันและก่อตัวเป็นสายโซ่ เป็นต้น. รายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้.

J. S. Eow และคณะทำการทดลองเกี่ยวกับการเสีรูปร่างและการแยกตัวของหยดน้ำในของเหลว 4 ชนิด ภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้ากระแสตรง [43]. ของเหลว 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบตบเทียบ และ η -heptane. น้ำที่ใช้ในการทดลองคือน้ำประปาที่ผสมสีย้อมเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตผลการทดลอง. หยดน้ำขนาดเท่ากับ 1.2 mm อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและอิเล็กโทรดกราวด์เท่ากับ 10 mm. อัตราส่วนการเสีรูปร่างหาได้จากอัตราส่วนของความยาวในแนวแกนเอกของหยดน้ำต่อความยาวในแนวแกนโท เมื่อหยดน้ำเสีรูปร่างเป็นทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง. คณะผู้วิจัยกำหนดเกณฑ์ให้หยดน้ำเสีเสถียรภาพเมื่อค่าอัตราส่วนการเสีรูปร่างเท่ากับ 1.9. ผลการทดลองพบว่าหยดน้ำเสีเสถียรภาพเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่า 350 – 380 kV/m. อัตราส่วนการเสีรูปร่างของหยดน้ำขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลวที่นำมาทดลอง ได้แก่ สภาพนำไฟฟ้า สภาพยอมไฟฟ้า ความหนืด

และแรงตึงผิว. ของเหลวบริเวณรอบหยดน้ำที่มีสภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมไฟฟ้าสูง ทำให้หยดน้ำเกิดการเสีรูปร่างมากกว่าของเหลวชนิดอื่น. ในขณะที่ ของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำและของเหลวชนิดนั้นสูงเกิดการเสีรูปร่างของหยดน้ำน้อย.

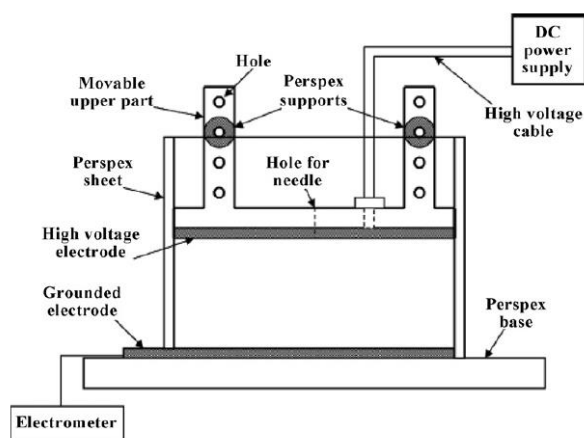
ในส่วนของการศึกษาการแยกตัวของหยดน้ำ ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าจนหยดน้ำเกิดการเสีรูปร่างสูง หยดน้ำบางส่วนแยกตัวออกที่บริเวณปลายของหยดน้ำเดิม ซึ่งในบางครั้งอาจมีจำนวนหยดน้ำที่แยกตัวออกมากกว่า 1 หยดได้. หยดน้ำที่แยกตัวออกจะเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กโทรด และเคลื่อนที่กลับไปมาระหว่างคู่อิเล็กโทรดต่อไป. คณะผู้วิจัยวัดความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของหยดน้ำเทียบกับผลการคำนวณ. ความเร็วคำนวณได้จากแรงตึงที่กระทำต่อหยดน้ำรูปทรงกลม ซึ่งในที่นี้กำหนดให้แรงตึงคือแรงทางไฟฟ้า. อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ความเร็วที่วัดได้จากการทดลองยังไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยความเร็วที่วัดได้มีค่าต่ำกว่า. ผู้เขียนอธิบายว่าความแตกต่างเกิดจากการคำนวณกำหนดให้หยดน้ำมีรูปร่างเป็นทรงกลม แต่ในการทดลอง พบว่าหยดน้ำเสีรูปร่างจากทรงกลมเป็นรูปทรงอื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กโทรด.

R. Karyappa และคณะทดลองการเสีรูปร่างและการแตกตัวของหยดน้ำในฉนวนเหลวภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง [44]. คณะผู้เขียนใช้เลข electrocapillary (Ca) เพื่อศึกษาผลของสนามไฟฟ้าและขนาดหยดน้ำที่มีต่อการเสีรูปร่างของหยดน้ำและการแตกตัวในน้ำมันมีค่าความหนืดแตกต่างกัน. หยดน้ำอยู่กึ่งกลางระหว่างอิเล็กโทรด โดยมีตัวกลางเป็นน้ำมัน. น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือน้ำปราศจากไอออนและกรีเซอร์ออลที่ผสมกับ NaCl 5 M. น้ำมัน คือ น้ำมันละหุ่ง (castor oil) และน้ำมันซิลิโคน. อัตราส่วนความหนืดของน้ำต่อน้ำมันอยู่ในช่วง 0.00126 – 2. ภายใต้สนามไฟฟ้า หยดน้ำเสีรูปร่างเป็นทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง. อัตราการเสีรูปร่างได้จากผลต่างความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าและแนวตั้งฉากส่วนด้วยผลรวมของความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าและแนวตั้งฉาก. ผลการทดลองที่ได้พบว่าอัตราการเสีรูปร่างเพิ่มขึ้นเมื่อ Ca เพิ่มขึ้น โดยไม่ขึ้นกับอัตราส่วนความหนืดของน้ำต่อน้ำมัน. เมื่อ Ca มากกว่าค่าวิกฤต หยดน้ำเสีรูปร่างจนเป็นปลายแหลมและเกิดการแตกออก. ทั้งนี้ ลักษณะการแตกตัวของหยดน้ำขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความหนืดของน้ำต่อน้ำมัน. อัตราส่วนความหนืดมีค่าสูง หยดน้ำเกิดการแตกตัวโดยที่กระจายเป็นละอองไอพ่น ซึ่งนำไปสู่ความยุ่งยากในการใช้งานกระบวนการเชื่อมรวมด้วยไฟฟ้า.

H. Yan และคณะศึกษาลักษณะการสั่นของหยดน้ำในขณะที่เสีรูปร่างก่อนที่จะเกิดการแยกตัวเมื่อหยดน้ำอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ [45]. การทดลองใช้น้ำมันขาว (white oil) และหยดน้ำกลั่นที่มีขนาดประมาณ 190 μm อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด. ลักษณะการสั่นสามารถอธิบายด้วยระดับการเสีรูปร่างของหยดน้ำ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความยาวของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้าต่อรัศมี

ตั้งต้นของหยดน้ำ. ผลการทดลองจำแนกออกเป็น 3 สถานะตามช่วงเวลา. สถานะแรก คือ ช่วงเวลาที่หยดน้ำเสีรูปร่างจากทรงกลมเป็นทรงรี. ระดับการเสีรูปร่างของหยดน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ความถี่ของการสั่นมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่สนามไฟฟ้า. สถานะที่สอง คือ ช่วงเวลาที่หยดน้ำเสีรูปร่างมีลักษณะเป็นโคนแหลมที่บริเวณปลายของหยดน้ำ. ระดับการเสีรูปร่างของหยดน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเปลี่ยนไปเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อเข้าสู่สถานะที่ 3. ในสถานะที่ 3 นี้ หยดน้ำขนาดเล็กแยกตัวออกจากปลายแหลมของหยดน้ำตั้งต้น. ผลการทดลองพบว่า ความถี่ในการสั่นของหยดน้ำในสถานะที่ 2 และ 3 มีค่าเป็นสองเท่าของความถี่สนามไฟฟ้าเช่นเดียวกัน. นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้คำนวณระดับการเสีรูปร่างของหยดน้ำและความถี่ในการสั่นเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง. ระดับการเสีรูปร่างคำนวณได้จากกฎของนิวตัน เมื่อแรงลัพธ์ที่นำมาพิจารณาประกอบด้วยแรงเนื่องจากความเค้นทางไฟฟ้า แรงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหล และแรงตึงผิว. ผลการคำนวณที่ได้ให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของระดับการเสีรูปร่างและความถี่ในการสั่นสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อน 9 %.

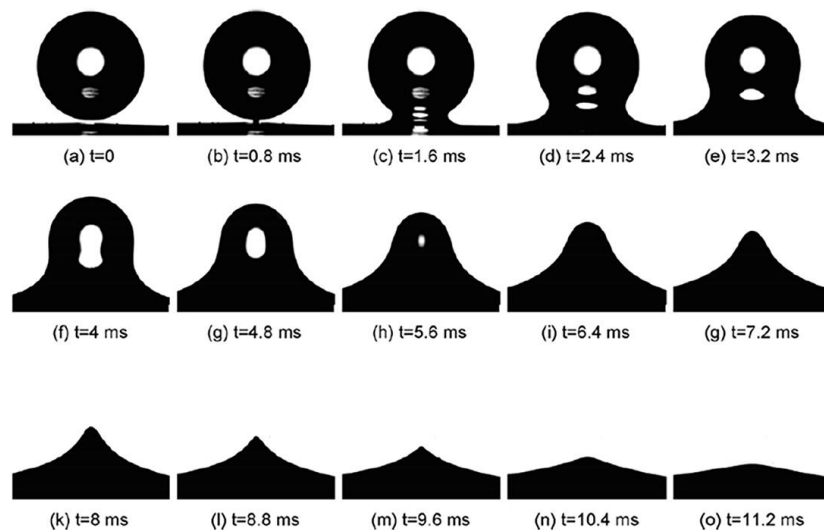
M. Mousavichoubeh และคณะทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุกับผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าเพื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดการรวมตัวเพียงบางส่วน [41]. การติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเป็น 53 mm. การทดลองใช้น้ำปราศจากไอออนและน้ำมันทานตะวัน โดยที่ขนาดของหยดน้ำและสนามไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 0.576 – 1.196 mm และ 56 – 181 V/mm ตามลำดับ. ผลของขนาดหยดน้ำตั้งต้นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีต่อกระบวนการรวมตัวเพียงบางส่วนถูกศึกษาในงานนี้.



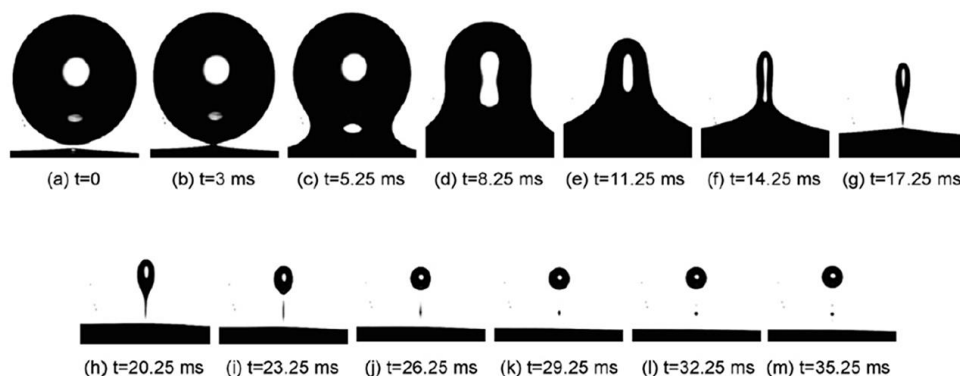
รูปที่ 2.12 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดลอง [41]

ผลการทดลองพบว่าหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าเกิดการเสีรูปร่างเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้ผิวน้ำ. ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำส่งผลให้เกิดการเชื่อมรวมหยดน้ำกับผิวน้ำเข้าด้วยกัน.

หยดน้ำที่กำลังเชื่อมรวมเข้าหาผิวหน้าได้รับประจุจากผิวหน้า ทำให้มีแรงคูลอมบ์ดึงให้หยดน้ำให้แยกตัวจากผิวหน้า. แรงคูลอมบ์ที่ดึงหยดน้ำในทิศขึ้นมีผลทำให้บริเวณเชื่อมรวมระหว่างหยดน้ำแคบขึ้นเป็นคอขวด. กระบวนการดังกล่าวเรียกกระบวนการก่อคอขวด (necking process). อย่างไรก็ตาม แรงดึงดูดผิวผลักดันในหยดให้ระบายเข้าสู่ผิวหน้าและขยายบริเวณส่วนเชื่อมรวมให้กว้างขึ้น. กระบวนการดังกล่าวเรียกว่ากระบวนการปั๊ม (pumping process). รูปแบบการรวมตัวที่พบได้จากผลการทดลองมี 2 รูปแบบคือ การรวมตัวแบบสมบูรณ์และการรวมตัวเพียงบางส่วน. การรวมตัวเกิดขึ้นในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับการแข่งขันระหว่างอัตราการทำงานของกระบวนการสูบน้ำและกระบวนการก่อคอขวด. สำหรับรูปแบบการรวมตัวแบบสมบูรณ์ อัตราการทำงานของกระบวนการสูบน้ำเร็วกว่าการก่อคอขวด. หยดน้ำจึงเกิดการรวมตัวเข้าหาผิวหน้าจนหมด. ผลการทดลองที่ได้พบว่าหยดน้ำทุกขนาดสามารถรวมตัวแบบสมบูรณ์เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า 56 V/mm. รูปที่ 2.13 แสดงการรวมตัวแบบสมบูรณ์. เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น แรงไฟฟ้าที่ดึงหยดน้ำหลังจากการถ่ายเทประจุเพิ่มขึ้น ดึงจนบริเวณเชื่อมรวมขาดออก. การรวมตัวรูปแบบดังกล่าวเรียกว่าการรวมตัวเพียงบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.14. คณะผู้เขียนวัดปริมาตรของหยดน้ำที่แยกตัวหลังจากเกิดการรวมตัวเพียงบางส่วน หรือที่เรียกว่าหยดทุติยภูมิ (secondary droplet). ผลที่ได้พบว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดหยดน้ำตั้งต้นหรือสนามไฟฟ้าส่งผลให้ปริมาตรของหยดทุติยภูมิเพิ่มขึ้น. หยดน้ำขนาดใหญ่เกิดการยึดตัวได้มากเมื่อเทียบกับหยดน้ำขนาดเล็ก ซึ่งทำให้บริเวณส่วนเชื่อมรวมมีลักษณะเป็นคอขวด. การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าช่วยเสริมการยึดตัวของหยดน้ำและการก่อคอขวดระหว่างหยดน้ำและผิวหน้า.



รูปที่ 2.13 การรวมตัวแบบสมบูรณ์เมื่อหยดน้ำขนาด 0.984 mm ได้รับสนามไฟฟ้า 56 V/mm [41]



รูปที่ 2.14 การรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำขนาด 1.196 mm ที่สนามไฟฟ้า 124 V/mm [41]

M. Mousavichoubeh และคณะทดลองเพื่อศึกษาผลของความตึงผิวและสนามไฟฟ้าที่มีต่อกระบวนการเชื่อมรวมเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่ไม่มีประจุ [46]. อุปกรณ์การติดตั้งการทดลอง น้ำ และน้ำมันที่ใช้ รวมถึงขนาดของหยดน้ำเหมือนกับบทความก่อนหน้า โดยที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกปรับเป็นขนาด 51 mm. คณะผู้ทดลองเติมสารลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน โดยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ SDS (sodium dodecyl sulfate), Tween 20 (polyoxyethylene sorbitan mono-laurate) และ Span 80. SDS หรือ Tween20 ปริมาณ 1 g ถูกเติมลงในน้ำ 1 L สำหรับการสร้างหยดน้ำ. Span 80 ถูกเติมลงในน้ำมันในอัตราส่วน 1 g ต่อ 1 L. สัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำบริสุทธิ์และน้ำมันทานตะวันบริสุทธิ์ที่วัดได้มีค่าเป็น 25 mN/m. SDS หรือ Tween20 ที่เติมลงไปให้น้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันทานตะวันที่วัดได้มีค่าเป็น 10 mN/m และ 6 mN/m ตามลำดับ. ส่วน Span 80 ที่ถูกเติมลงในน้ำมัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวมีค่าเป็น 16 mN/m. สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองสำหรับกรณี SDS และ Tween20 คือ 232 V/mm. ในขณะที่ Span 80 ใช้สนามไฟฟ้าแค่เพียง 116 V/mm เท่านั้น เนื่องการเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้สนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ลดลง. ผลการทดลองที่ได้พบว่า ปริมาตรของหยดน้ำทุติยภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว. สำหรับกรณีที่เติม Tween20 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวต่ำ หยดน้ำได้รับความเค้นทางไฟฟ้ามาก จนยึดตัวเป็นโคนแหลมแบบแทย์เลอร์ และเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยจำนวนมากที่ปลายด้านบนและด้านล่างของหยดน้ำทุติยภูมิ. ละอองฝอยที่อยู่บริเวณปลายหยดน้ำอาจนำไปสู่การลัดวงจรระหว่างคู่อิเล็กโทรด.

คณะผู้เขียนนำเลข We และ Oh มาประกอบกันเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ WO ดังสมการ

$$WO = We \times Oh = \frac{2r^{0.5} \epsilon_{oil} \epsilon_0 E^2 \mu}{\rho^{0.5} \gamma^{1.5}} \quad (2.53)$$

เมื่อ r คือรัศมีหยดน้ำ. We ถูกใช้ในการอธิบายกระบวนการก่อตัวของหยดที่สูงขึ้นตามสนามไฟฟ้า ในขณะที่ Oh ถูกใช้เพื่ออธิบายกระบวนการปั๊มจากหยดน้ำเข้าสู่ผิวหน้าในกระบวนการรวมตัว. ผลที่

ได้พบว่า *WO* สามารถแสดงแนวโน้มของอัตราส่วนปริมาตรหยดน้ำทุติยภูมิต่อหยดน้ำตั้งต้นที่เกิดจากการรวมตัวเพียงบางส่วนได้ โดยมีการเพิ่มขึ้นของปริมาตรหยดน้ำทุติยภูมิตาม *WO* เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น.

S. H. Mousavi และคณะทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปแบบพัลส์ของสนามไฟฟ้าที่ทำให้หยดน้ำที่ไม่มีประจุเชื่อมรวมกันเพียงบางส่วน [47]. การทดลองสังเกตการเชื่อมรวมทั้งในรูปแบบระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำ และหยดน้ำกับหยดน้ำ. น้ำและน้ำมันที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำปราศจากไอออนและน้ำมันดอกทานตะวันโดยที่หยดน้ำมีขนาดระหว่าง 0.576 – 1.196 mm. รูปแบบพัลส์ของสนามไฟฟ้าที่นำมาพิจารณา ได้แก่ แบบคลื่นไซน์ แบบสี่เหลี่ยม และแบบฟันเลื่อย. ผลการทดลองที่ได้พบว่า หากใช้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ความถี่ต่ำหรือสนามไฟฟ้ากระแสตรง หยดน้ำรวมตัวแบบเพียงบางส่วนและก่อให้เกิดหยดน้ำทุติยภูมิเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูง. การเพิ่มขึ้นของความถี่สนามไฟฟ้าช่วยให้หยดน้ำทุติยภูมิมีขนาดเล็กลง. เมื่อความถี่สนามไฟฟ้าสูงมากพอ หยดน้ำเกิดการรวมตัวแบบสมบูรณ์. จากสนามไฟฟ้าทั้งสามรูปแบบ สนามไฟฟ้ารูปแบบฟันเลื่อยทำให้เกิดการแยกตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าอีกสองรูปแบบ. ความถี่ที่ทำให้หยดน้ำเกิดการรวมตัวแบบสมบูรณ์ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้าและหยดน้ำ โดยจำเป็นต้องใช้ความถี่สูงขึ้นหากสนามไฟฟ้าหรือขนาดของหยดน้ำเพิ่มขึ้น.

H. Aryafar และ H. P. Kavehpour ทดลองการรวมตัวระหว่างหยดของเหลวที่ไม่มีประจุในน้ำมันซิลิโคนและผิวระนาบของของเหลวชนิดนั้นภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง [48]. ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวถูกศึกษาในงานวิจัยนี้. ของเหลว 3 สามชนิดสำหรับใช้เป็นหยดของเหลวและระนาบของเหลวคือ น้ำ กลีเซอรอล และเอทิลีนไกลคอล. น้ำมันที่ใช้คือน้ำมันซิลิโคนที่ความหนืด 1,000, 5000 และ 10,000 cSt. หยดของเหลวถูกปล่อยเหนือรอยต่อระหว่างตัวกลางของเหลวและน้ำมันซิลิโคนเป็นระยะ 1 cm และรอให้ตกลงบนระนาบของเหลวเป็นเวลา 1-15 นาที่ขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันก่อนที่จะป้อนศักย์ไฟฟ้า. ผลการทดลองพบว่าเกิดการรวมตัวเพียงบางส่วนและเกิดหยดทุติยภูมิขึ้นหลังจากการรวมตัวเมื่อสนามไฟฟ้าสูง. การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามไฟฟ้าอย่างมากในทุกกรณีก่อให้เกิดรูปแบบไอพ่น (jet formation) คือ หยดของเหลวที่เชื่อมรวมกับผิวของเหลวยึดจนมีลักษณะเป็นปลายแหลม และเกิดละอองของเหลวพุ่งกระจายออกมาจากบริเวณส่วนด้านบนของหยดและเคลื่อนไหลหายไป. คณะผู้เขียนพบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าไม่ส่งผลต่อเวลาการรวมตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกพื้นฐานที่ขับเคลื่อนการรวมตัวนั้นไม่เปลี่ยนแปลงโดยสนามไฟฟ้า แต่อาจขับเคลื่อนด้วยแรงตึงผิวและชะลอด้วยแรงหนืด. อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อเรขาคณิตของหยดของเหลว. ค่าอัตราส่วนรูปร่างของหยดหาได้จาก ระนาบจากผิวระนาบของของเหลวจนถึงจุดสูงสุดของหยดเมื่อการรวมตัวเกิดขึ้น (l) ส่วนด้วยรัศมีหยดน้ำ ณ ตำแหน่ง $l/2$. การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนรูปร่างของหยดสูงขึ้น.

นอกจากนี้ ผลของคุณสมบัติความหนืดของน้ำมันและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของหยดของเหลวต่อการรวมตัวเพียงบางส่วนถูกค้นคว้าในงานวิจัยนี้. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความหนืดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้เกิดการรวมตัวเพียงบางส่วน. ดังนั้น การเกิดหยดทุติยภูมิเป็นผลของสนามไฟฟ้าที่แข่งขันกับแรงหน่วงอื่น ๆ ซึ่งอาจเป็น แรงตึงผิว. เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดของเหลวของหยดจากน้ำเป็นกลีเซอรอลและเอทิลีนไกลคอล ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของหยดลดลงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนรูปร่างสูงสุดของหยดลดลง และสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้เกิดการรวมตัวบางส่วนสูงขึ้น.

V. Anand และคณะทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุและผิวหน้าภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง [49]. การทดลองใช้หยดน้ำขนาด $0.25 - 0.75 \mu\text{m}$ ในน้ำมันซิลิโคนที่มีค่าความหนืด $19.1 - 319 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. คณะผู้เขียนใช้เลข Ca และ Oh เพื่ออธิบายปัจจัย ได้แก่ สนามไฟฟ้า รัศมีของหยดน้ำ และความหนืดของน้ำมันที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบการรวมตัวจากสมบูรณ์เป็นเพียงบางส่วน และจากเพียงบางส่วนเป็นการไม่รวมตัว. ผลการทดลองที่ได้พบว่า การเปลี่ยนรูปแบบการรวมตัวจากสมบูรณ์ไปเป็นเพียงบางส่วนเกิดขึ้นเมื่อ $Ca = 0.055$ และไม่ขึ้นอยู่กับเลข Oh . สิ่งนี้แสดงว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้รูปแบบการรวมตัวเปลี่ยนจากสมบูรณ์ไปเป็นเพียงบางส่วนไม่ขึ้นกับความหนืด แต่ขึ้นกับขนาดหยดน้ำ. ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตลดลงเมื่อขนาดของหยดน้ำเพิ่มขึ้น. การเปลี่ยนรูปแบบจากเพียงบางส่วนไปเป็นไม่รวมตัวขึ้นอยู่กับทั้ง Ca และ Oh . คณะผู้วิจัยพบว่าการเปลี่ยนรูปแบบเกิดขึ้นเมื่อ $Ca \times Oh^{0.25} = 0.125$ ซึ่งหมายความว่าความหนืดส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปแบบเล็กน้อย. เมื่อ Oh มีค่าต่ำ หยดน้ำมีแนวโน้มที่จะไม่รวมตัวสูง.

W. D. Ristenpart และคณะทดลองเพื่อศึกษาการไม่รวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุและผิวหน้าภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่สม่ำเสมอ [50]. น้ำและน้ำมันที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำปราศจากไอออนที่มีปรับสภาพน้ำด้วยการเติม KCl และน้ำมันซิลิโคน. ภาพขณะบรรจุน้ำมันและน้ำโดยที่ด้านล่างของภาชนะต่อลงกราวด์. ลวดโลหะถูกติดตั้งด้านบนโดยจุ่มลงในน้ำมันและป้อนไฟฟ้าแรงสูง. หลังจากการป้อนสนามไฟฟ้าแล้ว หยดน้ำขนาด $2 \mu\text{L}$ ถูกปล่อยด้วยปิเปตใกล้บริเวณลวดโลหะ. หยดน้ำเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรดแรงสูงด้วยแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (dielectrophoretic force) และได้รับประจุจากการสัมผัสกับอิเล็กโทรดแรงสูง. จากนั้น หยดน้ำเคลื่อนที่เข้าหาผิวหน้าซึ่งมีประจุตรงกันข้ามภายใต้สนามไฟฟ้า. ผลการศึกษาพบว่า ที่สนามไฟฟ้าต่ำ หยดน้ำสามารถรวมตัวเข้าหาผิวหน้า. เมื่อสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าวิกฤต บริเวณส่วนปลายของหยดน้ำยึดตัวอย่างสังเกตได้ชัดเจน. หยดน้ำไม่เกิดการรวมตัวเข้าหาผิวหน้าหลังจากที่สัมผัสผิวหน้าแล้ว แต่เคลื่อนที่กลับขึ้นไปด้านบน. ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตขึ้นอยู่กับสภาพน้ำไฟฟ้าของหยดน้ำ แต่การรวมตัวเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิวหน้า. คณะผู้เขียนพบว่า หยดน้ำไม่รวมกับผิวหน้าเมื่อมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิวหน้ามากกว่า 30° ทั้งในกรณีที่น้ำถูกปรับและไม่ได้ปรับค่าสภาพน้ำไฟฟ้า.

B. S. Hamlin และคณะทดลองเพื่อศึกษาค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่มีประจุและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า [51]. รูปแบบการทดลอง น้ำและน้ำมันที่ใช้เหมือนกับงานวิจัยของ W. D. Ristenpart และคณะ โดยที่หยดน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด $1 \mu\text{L}$ และถูกปรับให้มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง $2 - 10^5 \mu\text{S}/\text{cm}$. ผลการศึกษาพบว่าที่สนามไฟฟ้าต่ำ หยดน้ำรวมตัวแบบสมบูรณ์. สนามไฟฟ้าขนาดกลาง หยดน้ำรวมตัวแบบเพียงบางส่วนและก่อให้เกิดหยดทุติยภูมิ. เมื่อสนามไฟฟ้าสูงเพียงพอ หยดน้ำไม่รวมตัวกับผิวน้ำ. หยดน้ำที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำมีแนวโน้มที่จะรวมตัวเพียงบางส่วนกับผิวน้ำ. เมื่อสภาพนำไฟฟ้าของหยดน้ำถูกเพิ่มจนเกินค่าวิกฤต หยดน้ำไม่เกิดการรวมตัวกับผิวน้ำ. ค่าสภาพนำไฟฟ้าวิกฤตขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า โดยค่าสภาพนำไฟฟ้าวิกฤตต่ำลงเมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น. ในการรวมตัวแบบเพียงบางส่วน คณะผู้เขียนพบว่าขนาดและประจุของหยดน้ำทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้า แต่ไม่ขึ้นกับสภาพนำไฟฟ้าของหยดน้ำ.

J. Holto และคณะศึกษาและทดลองการรวมตัวของหยดน้ำจำนวนหลายหยดในน้ำมัน ซึ่งมีโอกาสที่หยดน้ำก่อตัวเป็นสายโซ่ [52]. อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองถูกเคลือบด้วยฉนวนเพื่อป้องกันปัญหาการเกิดเบรกดาวน หากสายโซ่หยดน้ำเชื่อมต่อแกประหว่งอิเล็กโทรด. การทดลองใช้น้ำมันแนฟทานิก (naphthanic oil) และหยดน้ำเกลือซึ่งกระจายตัวเป็น 1.5, 3, และ 4 % ของปริมาตรทั้งหมด. การทดลองใช้แรงดันขนาด 0.4, 0.9, 1.5 kV และความถี่ 1, 100, 1,000 Hz เมื่อระยะห่างของอิเล็กโทรดมีขนาดเท่ากับ 3 mm. ผลการทดลองแสดงว่า ในกรณีที่มีปริมาณของน้ำ 1.5 % หยดน้ำเกิดการรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์และปราศจากการยึดของหยดน้ำตามแนวสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 0.4 kV และความถี่ 100 Hz. ที่ความถี่ต่ำหยดน้ำมีเวลามากพอที่จะเคลื่อนที่ไปตามแกบของอิเล็กโทรดในแต่ละช่วงครึ่งไซเคิล ส่งผลให้การเชื่อมรวมของหยดน้ำเกิดขึ้นได้ยาก. การรวมตัวของหยดน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น. การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าช่วยให้เกิดการรวมตัวมากขึ้นเช่นกัน. แต่ทั้งนี้ หยดน้ำที่รวมตัวแล้วยึดออกเป็นโคนแหลมและแตกตัวที่บริเวณส่วนปลายแหลม เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตต่ำลงเมื่อขนาดของหยดเพิ่มขึ้น. เมื่อปริมาณของน้ำสูงถึง 4 % คณะผู้วิจัยพบว่าที่แรงดัน 1.5 kV และความถี่ 1,000 Hz หยดน้ำไม่เกิดการเชื่อมรวมแต่จะก่อตัวเป็นสายโซ่แทน. การลดลงของแรงดันช่วยให้หยดน้ำในกรณีดังกล่าวรวมตัวได้. ผลการทดลองแสดงว่า การก่อตัวเป็นสายโซ่ของหยดน้ำเกิดขึ้นได้เมื่อปริมาณของน้ำในน้ำมันมีจำนวนมาก ร่วมกันกับแรงดันและความถี่มีค่าสูง.

B. Li และคณะทดลองเกี่ยวกับการเชื่อมรวมแบบไม่สมบูรณ์ของหยดน้ำ แต่ก่อตัวเป็นสายโซ่เมื่อได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้า [53]. ความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ และค่าวัฏจักรของแรงดันถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาค่าที่เหมาะสม. การทดลองใช้แรงดันตั้งแต่ 1.2 – 7.0 kV ความถี่ 1.8 – 6.3 kHz และค่าวัฏจักรของแรงดันที่ 0.1 – 0.875 เมื่อระยะระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาดเท่ากับ 11 mm. หยดน้ำกลั่นที่นำมาทดลองมีขนาดตั้งแต่ 4 – 14 μm กระจายตัวอยู่ในน้ำมันนำความร้อน (conduction oil) โดยที่ปริมาณของน้ำคิดเป็น 4% ของปริมาตรทั้งหมด. ผลการศึกษาพบว่า แรง

ดึงดูดระหว่างขั้วส่งผลต่อการรวมตัวของหยดน้ำ. เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ และค่าวัฏจักรของแรงดันมากขึ้น แรงดึงดูดระหว่างขั้วมีค่ามาก ส่งผลให้อัตราการเกิดการเชื่อมรวมของหยดน้ำ หรือการเกิดสายโซ่ของหยดน้ำมีโอกาสมากขึ้น. แต่อย่างไรก็ตาม หากความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ และค่าวัฏจักรของแรงดันมีค่ามากเกินไปจะทำให้หยดน้ำแตกตัวออกจากกัน ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเชื่อมรวมของหยดน้ำและการเกิดสายโซ่ของหยดน้ำถูกยับยั้ง. ผลการวิจัยสรุปว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า 3.8 kV/cm ความถี่ 4 kHz และค่าวัฏจักรของแรงดันเท่ากับ 0.65 มีความเหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำมัน.

2.6 สรุปภาพรวมของการศึกษาที่ผ่านมา

งานวิจัยในอดีตศึกษาพฤติกรรมของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ การเสียรูปร่างของหยดน้ำและกระบวนการเชื่อมรวมของหยดน้ำ. การศึกษาประกอบไปด้วยทั้งการทดลองและการจำลอง. สำหรับการทดลอง งานวิจัยในอดีตมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของหยดน้ำได้แก่ ความเข้มสนามไฟฟ้า ชนิดของสนามไฟฟ้า ความถี่ ค่าวัฏจักรของสนามไฟฟ้า ขนาดของหยด และคุณสมบัติของของเหลว เป็นต้น. แต่อย่างไรก็ตาม การเชื่อมรวมของหยดน้ำเป็นกระบวนการทางไฟฟ้า หยดน้ำจึงมีโอกาสได้รับประจุ โดยเฉพาะกรณีใช้อิเล็กโทรดไม่ได้ถูกเคลือบด้วยฉนวนถูกใช้งาน. แม้ว่าจะงานวิจัยในอดีตได้มีการศึกษาการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุแล้ว แต่งานวิจัยดังกล่าวพิจารณาเฉพาะขนาดสนามไฟฟ้าและคุณสมบัติสภาพนำไฟฟ้าของน้ำที่ส่งผลต่อการรวมตัวเท่านั้น. การเปรียบเทียบพฤติกรรมของหยดน้ำเมื่อมีประจุและไม่มีประจุ รวมถึงคุณสมบัติอื่นของของเหลวที่ส่งผลต่อการรวมตัวเมื่อหยดน้ำมีประจุยังขาดการศึกษา. ดังนั้น งานวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำเมื่อได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยพิจารณาผลของประจุที่ส่งผลต่อการเสียรูปร่าง การเชื่อมรวม และการแยกตัวของหยดน้ำ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของหยดน้ำได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น. พฤติกรรมของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำถูกอัดและไม่ถูกอัดประจุถูกเปรียบเทียบ. คุณสมบัติของของเหลวที่ส่งผลต่อการรวมตัวเมื่อหยดน้ำมีประจุถูกศึกษาจากการใช้น้ำมันต่างชนิดในการทดลอง.

สำหรับการจำลอง งานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าวิธีเลเวลเซตสามารถใช้จำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ การเสียรูปและการรวมตัวได้. การกำหนดขอบเขตของตัวกลางใหม่เพื่อให้ความหนาของขอบตัวกลางคงที่เมื่อของไหลเคลื่อนที่ถูกพัฒนาเพื่อให้อนุรักษ์มวลได้ดีขึ้น. วิทยานิพนธ์นี้จำลองพฤติกรรมของหยดน้ำด้วยวิธีเลเวลเซตร่วมกับปัญหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณเชิงตัวเลข. วิธีเลเวลเซตที่ใช้ในงานนี้เป็นแบบมาตรฐานคือกำหนดให้ ϕ เป็นฟังก์ชันของระยะทางแบบมีเครื่องหมายเนื่องจากการ

คำนวณง่ายต่อการรู้เข้า. การกำหนดค่าขอบเขตใหม่หาได้จากระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างจุดไหนดกับขอบเขตตัวกลางตามชั้นเวลาที่กำหนด. ผลการจำลองที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.



บทที่ 3

อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

การทดลองของหยดน้ำภายใต้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรม 2 ส่วน คือ การเสี้ยวรูปของหยดน้ำในน้ำมัน และการรวมตัวระหว่างหยดน้ำในน้ำมันกับผิวน้ำ. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

- 1) ภาชนะบรรจุของเหลวเป็นกล่องอะคริลิกขนาดกว้าง×ยาว×สูง $70 \times 90 \times 55 \text{ mm}^3$ ดังรูปที่ 3.1. บริเวณก้นกล่องถูกเจาะรูขนาด 4 mm สำหรับการติดตั้งอิเล็กโทรด.

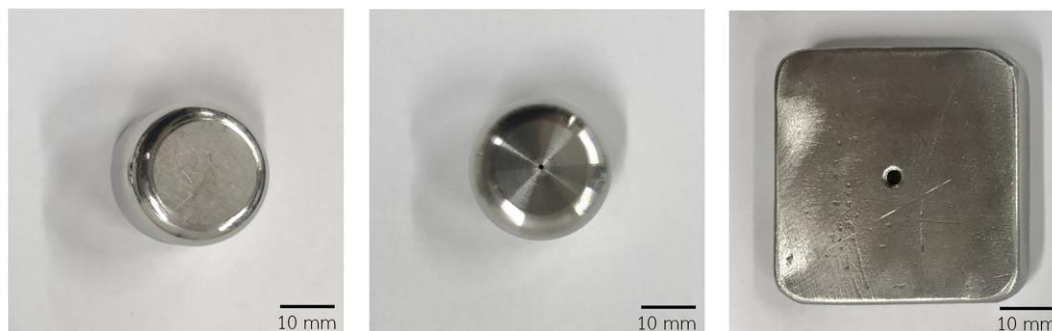


รูปที่ 3.1 กล่องอะคริลิกที่ใช้บรรจุของเหลว

- 2) อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองทำจากสแตนเลสมีทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยที่ขอบของอิเล็กโทรดทุกอันถูกทำให้โค้งมนเพื่อหลีกเลี่ยงสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณขอบ.

- (1) แบบจานหมุน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm หนา 15 mm แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก).
- (2) แบบจานหมุนเจาะรูที่จุดศูนย์กลาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm หนา 15 mm และรูขนาด 0.5 mm แสดงดังรูปที่ 3.2 (ข).
- (3) แบบแผ่นเจาะรูที่จุดศูนย์กลาง มีขนาดกว้างด้านละ 46 mm หนา 8 mm และรูขนาด 3 mm แสดงดังรูปที่ 3.2 (ค).



(ก) แบบจานหมุน

(ข) แบบจานหมุนที่มีรู

(ค) แบบแผ่นเจาะรู

รูปที่ 3.2 รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์

3) ของเหลว

ของเหลวที่ใช้ในการทดลองเป็นของเหลวต่างเฟสที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในที่นี้ได้แก่ น้ำ และน้ำมัน. น้ำ คือ น้ำปราศจากไอออน. น้ำมันที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันแร่ และน้ำมันซิลิโคน (Shin-Etsu, silicone oil KF-96-100cs). น้ำมันทานตะวัน (ตราอรุณ). ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของน้ำมัน.

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของของเหลว

ของเหลว	คุณสมบัติ			
	ความหนืด, μ (mPa·s)	ความหนาแน่น, ρ (kg/m ³)	สภาพยอมสัมพัทธ์, ϵ_r	สัมประสิทธิ์ความตึงผิวระหว่าง น้ำและน้ำมัน, γ (N/m)
น้ำปราศจากไอออน	1	997	80.1	-
น้ำมันแร่	8.161	867.3	2.17	0.046
น้ำมันซิลิโคน	96.5	965	2.74	0.051
น้ำมันทานตะวัน	46.5	922	3.1	0.026

4) อุปกรณ์สำหรับการสร้างหยดน้ำ

การสร้างหยดน้ำในการทดลองทำได้โดย 3 วิธี ดังต่อไปนี้

- (1) ปิเปต (Gilson, Classic P2) มีปริมาตรอยู่ในช่วง 0.2 – 2 μ L แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก)
- (2) กระจกฉีดยาขนาด 1 mL ต่อเข้ากับสายยางซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm และเข็มโลหะ (Nipro, 27 G \times 1") ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.4 mm แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข).
- (3) กระจกฉีดยาแบบมีปลายเข็ม (Hamilton, Model 7002) ซึ่งมีปริมาตรอยู่ในช่วง 0 – 2 μ L แสดงดังรูปที่ 3.3 (ค).



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สำหรับการสร้างหยดน้ำ

- 5) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Tektronix, AFG3021B) สามารถสร้างสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถึง 20 Vp-p และมีความถี่สูงสุด 25 MHz. การสร้างสัญญาณถูกควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB โดยที่เครื่องกำเนิดสัญญาณเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB 2.0. ทั้งนี้ เครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีการติดตั้ง Instrument Control Toolbox และ Tektronix AFG 3000 series instrument driver บนโปรแกรม MATLAB รวมทั้งติดตั้ง TekVISA Connectivity Software.
- 6) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (Trek, 610E) แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยสามารถจ่ายแรงดันได้ในช่วง 0 ถึง ± 1 kV หรือ 0 ถึง ± 10 kV และสามารถจ่ายกระแสได้ในช่วง 0 ถึง ± 200 μ A หรือ 0 ถึง ± 2000 μ A. ในงานวิจัยนี้ แหล่งจ่ายแรงดันสูงถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยทำหน้าที่ขยายขนาดของสัญญาณที่รับมาในอัตราขยาย 1,000 เท่า.
- 7) ปุ่มครอบกีดยา (Chemyx, Fusion 200) แสดงดังรูป 3.5 ถูกใช้ในการควบคุมการดันครอบกีดยาในรูปที่ 3.3 (ข). ปุ่มสามารถฉีดหรือดูดของเหลวด้วยอัตรา 0.0001 μ L/min จนถึง 84.7 mL/min. ปุ่มเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB 2.0 และการทำงานของปุ่มถูกควบคุมผ่านโปรแกรม MATLAB.



รูปที่ 3.4 แหล่งจ่ายแรงดันสูง



รูปที่ 3.5 ป้อนกระบอกฉีดยา

- 8) กล้อง CCD (Basler, acA640-750um) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 สามารถบันทึกภาพด้วยอัตราเฟรมสูงสุด 751 fps และต่อเข้ากับเลนส์แบบ telecentric (Computar, TEC-M55). กล้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB 3.0. การบันทึกไฟล์วิดีโอสามารถทำบนโปรแกรม pylon Viewer หรือโปรแกรม MATLAB ที่มีการติดตั้ง Image Acquisition Toolbox.

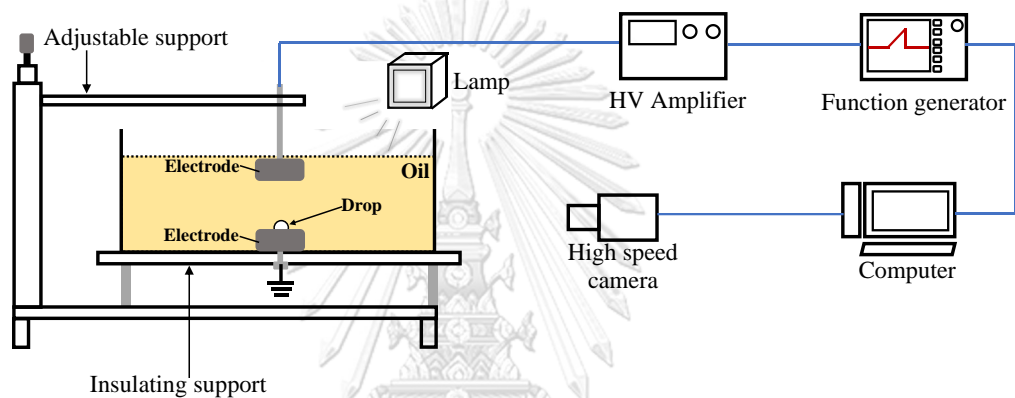


รูปที่ 3.6 กล้อง CCD

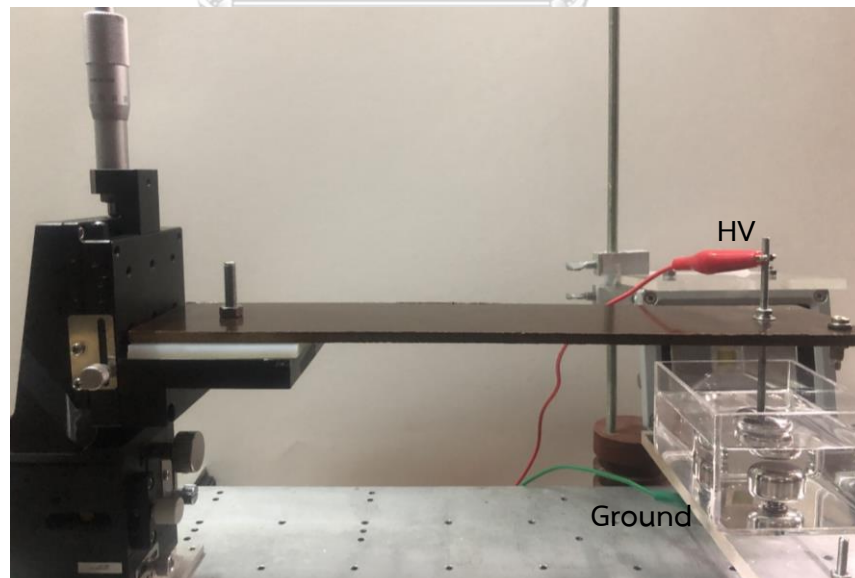
- 9) หลอดไฟ LED ขนาด 10 วัตต์ ถูกใช้เพื่อเพิ่มความสว่างให้การบันทึกผลการทดลอง.

3.2 การทดลองการเสีรูปของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

การทดลองสังเกตการยืดตัวของหยดน้ำและค่าหาสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้หยดน้ำเสียเสถียรภาพ. หยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรดและน้ำมันที่ใช้ คือ น้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวัน. รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพและภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง. อิเล็กโทรดสแตนเลสงานหมุนถูกติดตั้งที่กล่องอะคริลิกและแทนแบบปรับระดับความสูงได้ เพื่อใช้สำหรับสร้างสนามไฟฟ้า. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 5 mm สำหรับกรณีน้ำมันแร่ และมีค่าเป็น 10 mm สำหรับกรณีน้ำมันทานตะวัน. อิเล็กโทรดด้านบนต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันสูงและเครื่องกำเนิดสัญญาณ. อิเล็กโทรดด้านล่างต่อกับกราวด์. น้ำมันถูกเติมลงในกล่องอะคริลิกจนมีระดับสูงท่วมขอบของอิเล็กโทรดแรงสูง.

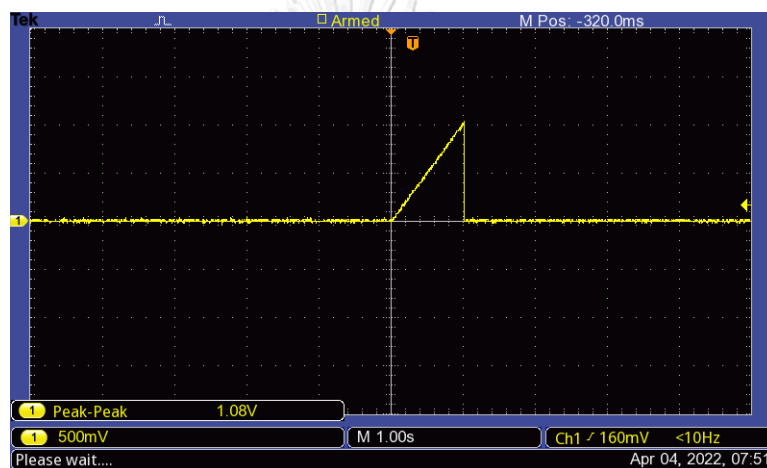


(ก) แผนภาพเค้าร่างการติดตั้งอุปกรณ์



(ข) ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์บริเวณแท่นทดลอง
รูปที่ 3.7 การทดลองการเสีรูปปร่างของหยดน้ำ

ในการทดลอง หยดน้ำถูกปล่อยจากปิเปตลงในน้ำมันให้ตกลงบนอิเล็กโทรดกราวด์. หยดน้ำที่ใช้ในกรณีน้ำมันเริ่มมีขนาดประมาณ $1 \mu\text{L}$ และในน้ำมันทานตะวันมีขนาดประมาณ $0.7 \mu\text{L}$. ความสูงเฉลี่ยของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำตกลงบนอิเล็กโทรดแล้วมีขนาด 1 mm . จากนั้น ผู้วิจัยป้อนสนามไฟฟ้าโดยใช้สัญญาณรูปแบบฟันเลื่อย 1 รูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.8. เวลาถึงค่ายอดของสัญญาณเท่ากับ 1 s . ค่ายอดของสนามไฟฟ้าที่ได้เริ่มต้นที่ 0.2 kV/mm และถูกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสังเกตเห็นการแยกตัวของหยดน้ำอย่างชัดเจน. ผลการทดลองที่ได้บันทึกด้วยกล้องที่อัตราเฟรม 125 fps . การสร้างสัญญาณไฟฟ้าและการทำงานของกล้องถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB. คำสั่งการทำงานของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.8 สัญญาณรูปแบบฟันเลื่อย

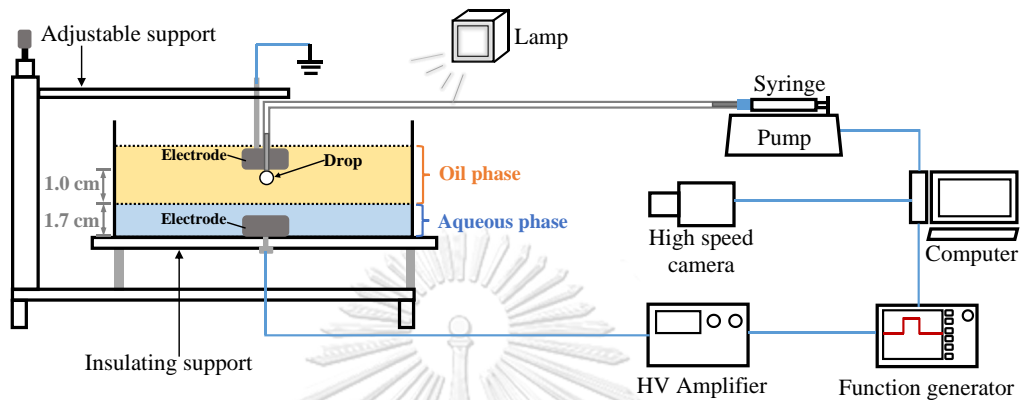
3.3 การทดลองการรวมตัวของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

ส่วนนี้เป็นการศึกษาการรวมตัวระหว่างหยดน้ำซึ่งอยู่ในน้ำมันฉนวนกับฝิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า. ผู้วิจัยสังเกตพฤติกรรมรวมตัวของหยดน้ำที่เกิดขึ้นในกรณีที่หยดน้ำถูกอัดประจุและไม่ถูกอัดประจุ. รายละเอียดการทดลองในทั้ง 2 กรณีมีดังต่อไปนี้.

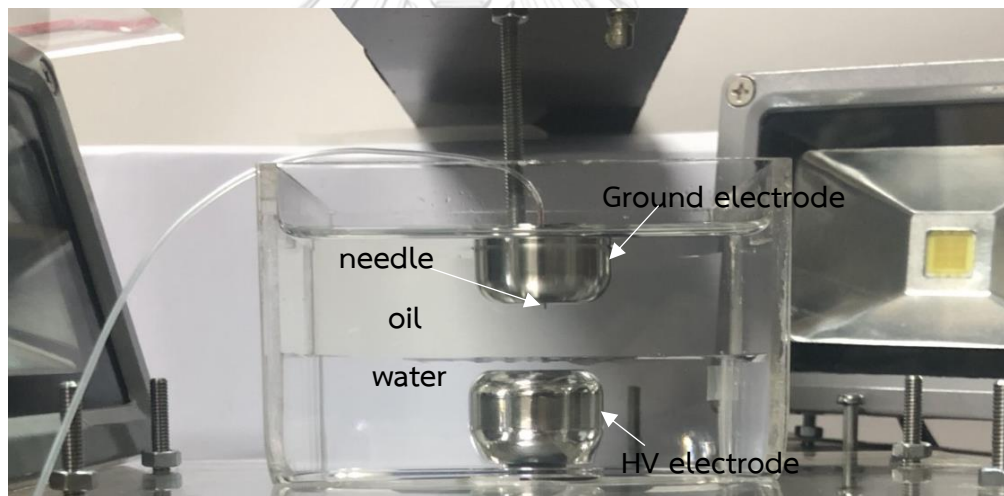
3.3.1 กรณีที่หยดน้ำถูกอัดประจุ

การทดลองในกรณีที่หยดน้ำถูกอัดประจุมีแผนภาพและรูปถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9. อิเล็กโทรดด้านล่างเป็นแบบจานหมุนถูกติดตั้งที่กล่องอะคริลิกและต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันสูง. อิเล็กโทรดจานหมุนด้านบนมีรูขนาด 0.5 mm ที่จุดศูนย์กลาง ถูกติดตั้งที่แท่นแบบปรับระดับความสูงได้และต่อลงกราวด์. กล่องอะคริลิกบรรจุน้ำและน้ำมัน ซึ่งแยกชั้นกันโดยที่น้ำอยู่ด้านล่างและน้ำมันอยู่ด้านบน. ระดับของฝิวน้ำอยู่เหนือจากขอบของอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นระยะ 2

mm และอิเล็กโทรดด้านบนอยู่สูงจากผิวหน้าเป็นระยะ 10 mm. สำหรับการสร้างหยดน้ำ เชื่อมโลหะที่ต่ออยู่กับสายยางซิลิโคนและกระบอกฉีดยาถูกสอดเข้าไปในรูของอิเล็กโทรดกราวด์ โดยให้ปลายเชื่อมยื่นออกมาจากขอบของอิเล็กโทรดเล็กน้อย. ผิวของเชื่อมโลหะสัมผัสกับอิเล็กโทรดเพื่อให้หยดน้ำได้รับการอัดประจุ.



(ก) แผนภาพเค้าร่างการติดตั้งอุปกรณ์

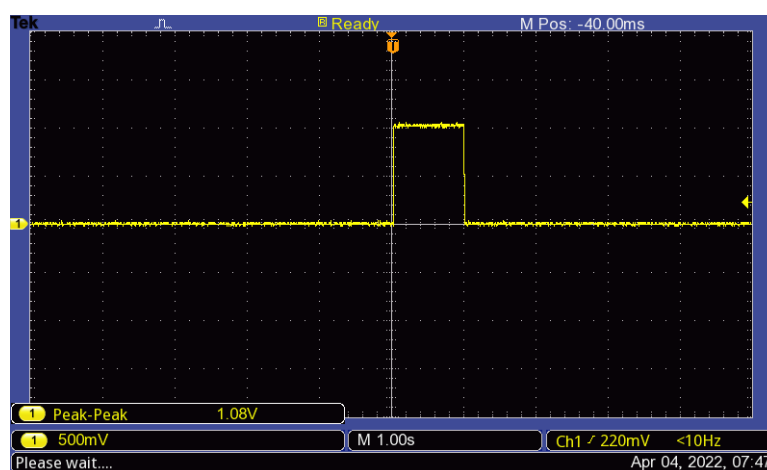


(ข) ภาพถ่ายบริเวณกล่องน้ำมัน

รูปที่ 3.9 การทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุ

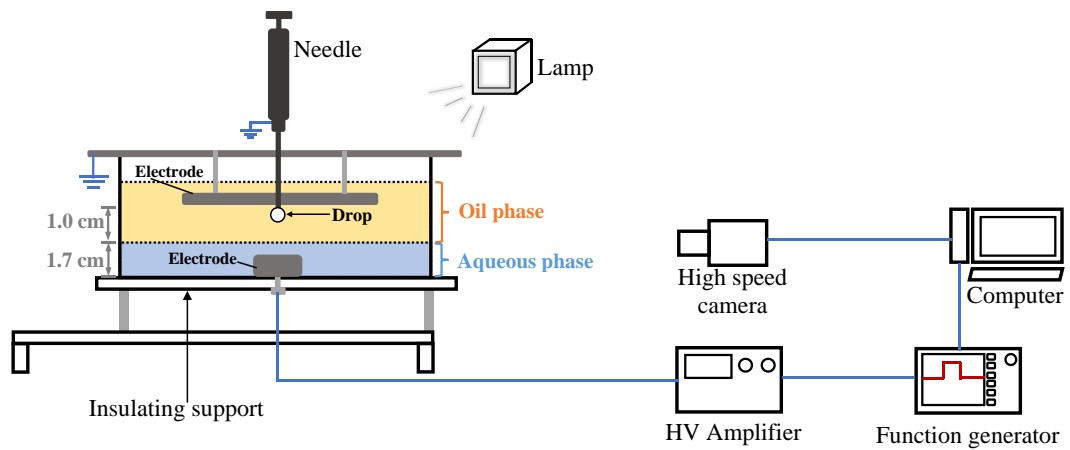
ในการทดลอง ป้อนกระบอกฉีดยาทำหน้าที่ควบคุมการฉีดน้ำที่บรรจุอยู่ในกระบอกฉีดยาไปยังปลายเข็ม โดยกำหนดให้ปริมาณน้ำขนาด $1 \mu\text{L}$. หยดน้ำที่ถูกดันออกมาจะติดอยู่ที่บริเวณปลายเข็มโลหะ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.15 mm . จากนั้น ผู้วิจัยป้อนสนามไฟฟ้าโดยใช้สัญญาณรูปแบบพัลส์สี่เหลี่ยม 1 รูปคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.10. เวลาคงอยู่ของสัญญาณเท่ากับ 0.1 s เมื่อใช้น้ำมันแร่ และ 0.2 s เมื่อใช้น้ำมันซิลิโคน. เวลาคงอยู่ของสัญญาณในน้ำมันซิลิโคนมากกว่าน้ำมันแร่ เนื่องจากน้ำมันซิลิโคนมีความหนาแน่นและความหนืดสูง. หยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนใช้เวลาในการ

เคลื่อนที่นานกว่าน้ำมันแร่. ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการป้อนแรงดันเริ่มต้นที่ 1 kV/cm และถูกเพิ่มขึ้นจนถึง 4.5 kV/cm เพื่อสังเกตพฤติกรรมของหยดน้ำเมื่อสนามไฟฟ้าสูง. ผลการทดลองที่ได้บันทึกด้วยกล้องที่อัตราเฟรม 500 fps. ในที่นี้ การทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ปุ่มกระบอกฉีดยา และกล้อง ถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม MATLAB. คำสั่งการทำงานของโปรแกรม แสดงในภาคผนวก ก.

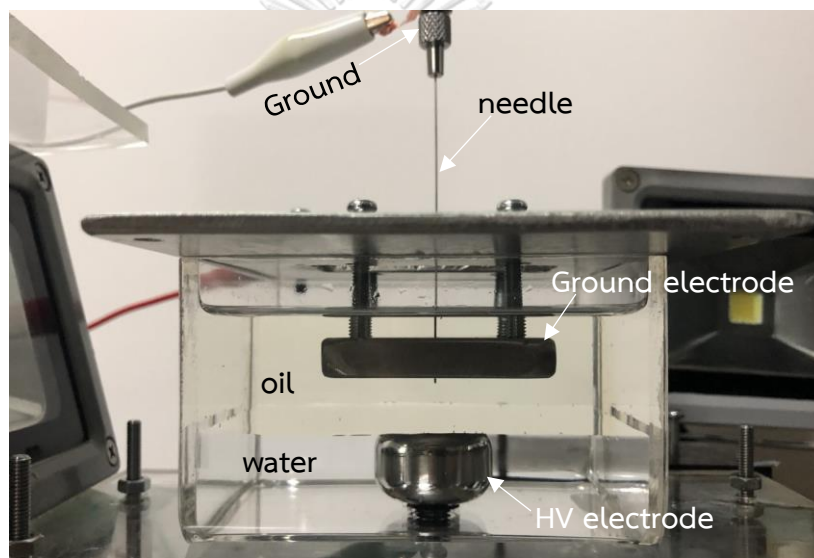


รูปที่ 3.10 สัญญาณรูปแบบพัลส์สี่เหลี่ยม

ทั้งนี้ แรงดึงผิวที่บริเวณปลายเข็มส่งผลให้หยดน้ำยังคงติดอยู่กับปลายเข็มแม้ว่าหยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้าก็ตาม. หยดน้ำถูกดึงให้หลุดออกจากปลายเข็มด้วยแรงไฟฟ้าเมื่อสนามไฟฟ้าสูงประมาณ 3 kV/cm ขึ้นไป. ดังนั้น การทดลองที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่า 3 kV/cm ผู้วิจัยจึงทำให้หยดน้ำหลุดจากปลายเข็มด้วยการขยับเข็มแทนที่ใช้สนามไฟฟ้า. การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองมีการปรับแก้ไขดังแสดงในรูปที่ 3.11. อิเล็กโทรดด้านบนถูกเปลี่ยนเป็นอิเล็กโทรดแบบแผ่นที่มีรูขนาด 3 mm ที่จุดศูนย์กลาง. อิเล็กโทรดถูกยึดเข้ากับแผ่นโลหะที่วางพาดกับกล่องอะคริลิกเพื่อแก้ปัญหการขยับของอิเล็กโทรดเมื่อขยับเข็ม. การสร้างหยดน้ำถูกปรับเป็นการใช้กระบอกฉีดยาแบบที่มีปลายเข็ม และต่อกับกราวด์. ในการทดลอง หลังจากที่ยอดน้ำถูกดันออกมายังปลายเข็ม ผู้วิจัยป้อนสนามไฟฟ้าเพื่ออัดประจุ แล้วจึงค่อยดึงเข็มออก. ตารางที่ 3.2 แสดงเวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเมื่อปรับใช้กระบอกฉีดยาแบบปลายเข็ม.



(ก) แผนภาพเค้าร่างการติดตั้งอุปกรณ์



(ข) ภาพถ่ายบริเวณกล้องน้ำมัน

รูปที่ 3.11 การทดลองการรวมตัวของหยดน้ำเมื่อปรับใช้กระบอกฉีดยาแบบปลายเข็ม

ตารางที่ 3.2 เวลาคงอยู่ของสนามที่ใช้ในการทดลองกรณีหยดน้ำถูกอัดประจุ เมื่อขนาดสนามไฟฟ้าต่ำกว่า 3 kV/cm

สนามไฟฟ้า (kV/cm)	เวลา (s)	
	น้ำมันซิลิโคน	น้ำมันแร่
1	30	5
1.5	5	4
2	2	3
2.5	0.8	2

เวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้าลดลงตามขนาดของสนามที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อสนามไฟฟ้าสูงหยดน้ำเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น. เวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ต้องนานเพียงพอจนหยดน้ำรวมตัวกับผิวหนังด้านล่างเสร็จสิ้น แต่ไม่นานเกินไปจนกระทั่งการกระเพื่อมของผิวหนังทำให้เกิดการลัดวงจรกับอิเล็กโทรดด้านบน.

3.3.2 กรณีที่หยดน้ำไม่ถูกอัดประจุ

สำหรับกรณีที่หยดน้ำไม่ถูกอัดประจุ หยดน้ำต้องถูกทำให้หลุดออกจากปลายเข็มและเคลื่อนที่ตกลงสู่ผิวหนังก่อนที่จะได้รับสนามไฟฟ้า. ดังนั้น การทดลองนี้จึงติดตั้งอุปกรณ์เหมือนกับในรูป 3.11 คือใช้กระบอกฉีดยาแบบปลายเข็ม. เข็มยังคงถูกต่อกราวด์ไว้เพื่อป้องกันไม่ให้หยดน้ำมีประจุ. ในการทดลอง เมื่อหยดน้ำหลุดจากปลายเข็มและเคลื่อนที่ลงมาแล้ว ผู้วิจัยจึงป้อนสนามไฟฟ้า. ระยะห่างของอิเล็กโทรดด้านบนจนถึงผิวหนังที่ใช้ในการทดลองถูกปรับจาก 10 mm เป็น 20 mm เพื่อให้ผู้วิจัยมีเวลาพอที่จะป้อนสนามไฟฟ้าก่อนที่หยดน้ำเคลื่อนที่ถึงผิวหนัง. แรงดันที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบพัลส์สี่เหลี่ยม โดยเวลาคงอยู่ของแรงดันนาน 1 s ในน้ำมันทั้งสองชนิด. สนามไฟฟ้ามีขนาด 1.0 – 4.5 kV/cm. ผลการทดลองที่ได้ถูกบันทึกภาพที่อัตราเฟรม 500 fps เช่นกัน.

บทที่ 4

การจำลอง

การจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณแบบสมมาตรรอบแกนหมุน. วิธีเลเวลเซตถูกใช้ในการระบุบริเวณขอบเขตระหว่างน้ำและน้ำมัน. บริเวณน้ำมีค่า $\varphi < 0$ และบริเวณน้ำมันมีค่า $\varphi > 0$. ขอบเขตระหว่างน้ำและน้ำมันมีค่า $\varphi = 0$. การคำนวณคุณสมบัติของตัวกลาง ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และสภาพยอมสัมพัทธ์ เมื่อขอบเขตตัวกลางมีความหนาแน่นได้จากสมการที่ 2.20 โดยที่แบนด์วิดท์ (BW) ที่ใช้มีขนาด 0.1 mm. คุณสมบัติของน้ำและน้ำมันที่ใช้ในการคำนวณอ้างอิงจากตารางที่ 3.1 ยกเว้นสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำ. ในการคำนวณ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 100 เท่าของน้ำมัน เพื่อให้สนามไฟฟ้าภายในหยดน้ำมีค่าเข้าใกล้ศูนย์. ทั้งนี้ หากอัตราส่วนสภาพยอมสัมพัทธ์น้ำต่อน้ำมันสูงเกินไป แรงไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากการกระจายของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์บริเวณตัวกลางที่มีความหนาแน่นด้วยวิธีการเลเวลเซต.

สมการที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองประกอบไปด้วย สมการการเคลื่อนที่ของวิธีการเลเวลเซตเพื่อหาผลเฉลยค่าตัวแปรพื้นผิว สมการปัวซองเพื่อแก้ปัญหาศักย์ไฟฟ้า และสมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับการไหลแบบไม่อัดตัวเพื่อแก้ปัญหาการไหล ซึ่งได้จากสมการที่ 2.19, 2.5 และ 2.16 ตามลำดับ. แรงที่กระทำกับของไหลที่พิจารณาในการคำนวณประกอบด้วย แรงไฟฟ้า แรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน และแรงโน้มถ่วง. แรงไฟฟ้าและแรงตึงผิวคำนวณจากสมการที่ 2.22 และ 2.25 ตามลำดับ. การคำนวณกระทำในสถานะชั่วคราว. ค่า φ ถูกกำหนดค่าขอบเขตตัวกลางใหม่ (re-initialize) ทุกๆ 5 ขั้นตอนเวลา เพื่อให้ความหนาของขอบเขตระหว่างตัวกลางคงที่เมื่อหยดน้ำเคลื่อนที่.

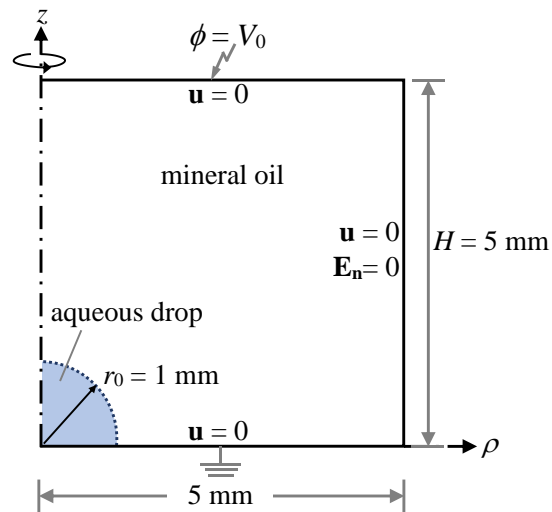
4.1 การเสีรูปร่างของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

การจำลองหยดน้ำในน้ำมันภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำเพื่อสังเกตการเสีรูปร่างของหยดน้ำและหาค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้หยดน้ำสูญเสียเสีรูปร่าง. แบบจำลองที่ใช้สำหรับกรณีน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ. รูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันแร่แตกต่างจากกรณีน้ำมันทานตะวันเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำมันส่งผลต่อมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและอิเล็กโทรด. ในน้ำมันแร่ หยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรดกราวด์ โดยมีลักษณะเป็นหนึ่งในสี่ของทรงกลมและมีรัศมี r_0 ขนาด 1 mm. ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและกราวด์ H เท่ากับ 5 mm.

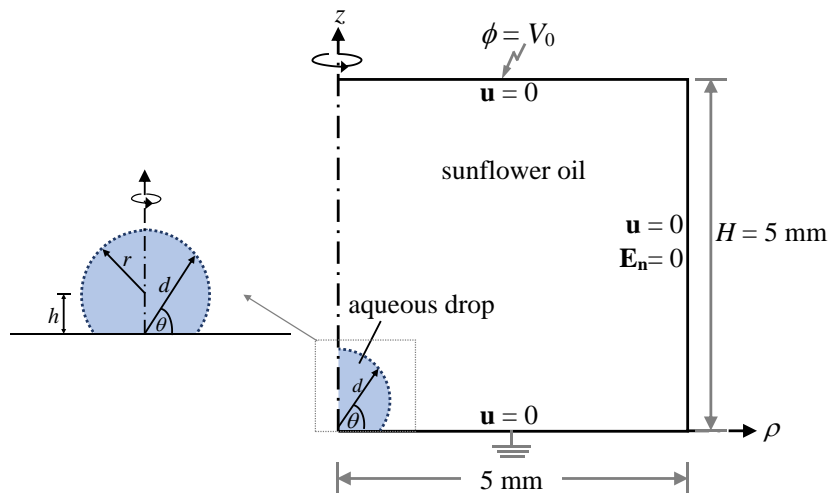
ในน้ำมันทานตะวัน หยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรดและขนาดของหยดน้ำได้จากระยะทางจากจุดกำเนิดของแบบจำลองถึงผิวหยดน้ำ d ซึ่งทำมุม θ กับอิเล็กโทรดดังสมการ

$$d = h \sin \theta + \sqrt{r^2 - (h \cos \theta)^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของหยดน้ำจากจุดศูนย์กลางของหยดซึ่งอยู่เหนือจากอิเล็กโทรดเป็นระยะ h . ค่า r และ h ที่ใช้ในการคำนวณมีค่า 0.58 และ 0.38 mm.



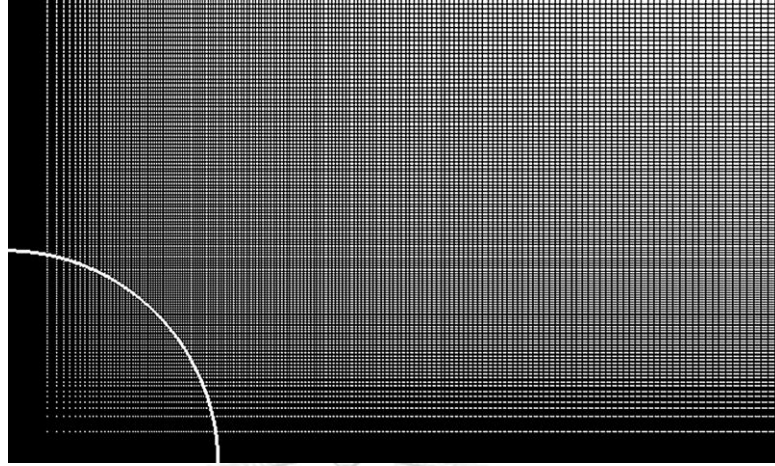
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการเสียรูปของหยดน้ำในน้ำมันแร่ภายใต้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการเสียรูปของหยดน้ำในน้ำมันทานตะวันภายใต้สนามไฟฟ้า

แบบจำลองในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมอันดับที่ 1 จำนวน 80,089 เอลิเมนต์ และมีโหนดจำนวน 80,656 โหนด. บริเวณหยดน้ำถูกกำหนดให้มีจำนวนเอลิเมนต์

มากกว่าบริเวณอื่นของแบบจำลอง. ลักษณะการกระจายตัวของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 ลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองการเสียรูปของหยดน้ำ

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองการเสียรูปร่างของหยดน้ำ

ขอบเขต	สมการ	
	ไฟฟ้า	ของไหล
บน	$\phi = V_0$	$u = 0$
ล่าง	$\phi = 0$	
ขวา	$E_n = 0$	

ในการคำนวณ ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Elmer และทำการจำลองในสภาวะชั่วคราว. ขึ้นเวลามีขนาด 10 μs . การคำนวณถูกทำซ้ำจนกระทั่งหยดน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัว. ที่สภาวะเริ่มต้น ความเร็วมีค่าเป็น 0. ค่า ϕ เริ่มต้นกรณีน้ำมันแร่หาได้จาก

$$\phi = r' - r_0 \quad (4.2)$$

เมื่อ r' คือ ระยะทางระหว่างจุดกำเนิดจนถึงจุดโหนด.

ในกรณีน้ำมันทานตะวัน ค่า ϕ เริ่มต้นหาได้จาก

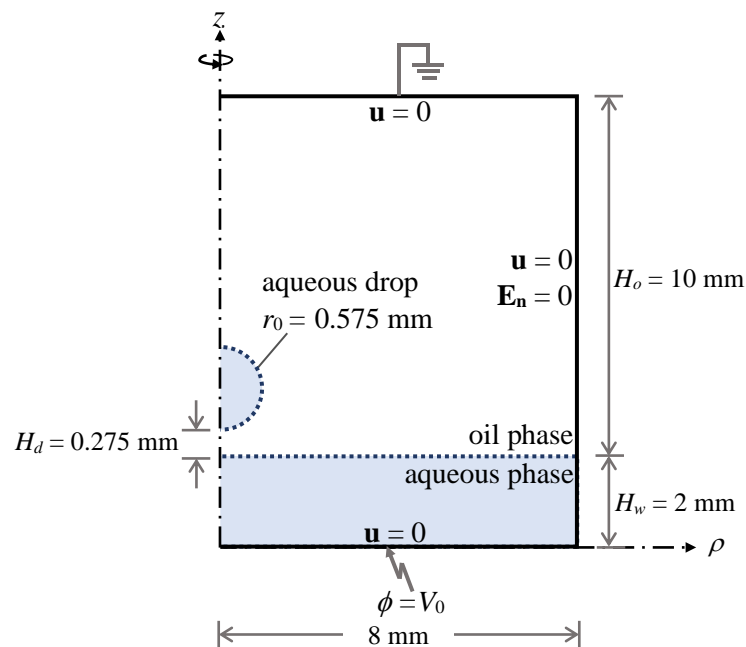
$$\phi = \text{sign} \times D \quad (4.3)$$

โดย sign มีค่าเป็น -1 และ 1 เมื่อจุดโหนดอยู่ในตัวกลางน้ำและน้ำมัน ตามลำดับ. D คือ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างจุดโหนดใดๆ ซึ่งมีพิกัดตำแหน่ง (ρ, z) และผิวหยดน้ำ หาได้จาก

$$D = \min \left\{ \sqrt{[\rho - d\cos(\theta)]^2 + [z - d\sin(\theta)]^2} \right\} \quad (4.4)$$

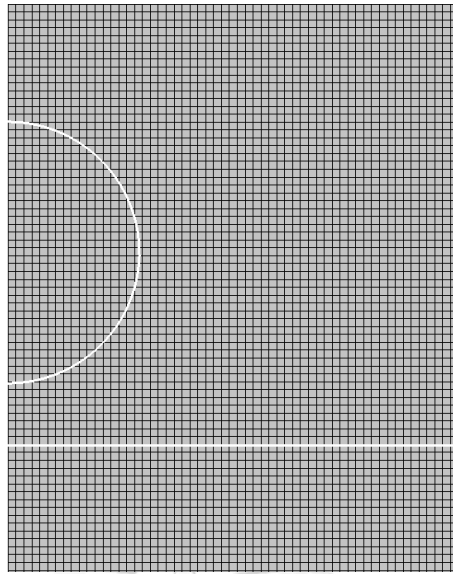
4.2 การรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า

การจำลองการรวมตัวระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าในกรณีที่หยดน้ำไม่มีประจุใช้แบบจำลองในรูปที่ 4.4. หยดน้ำมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมลอยตัวอยู่ในน้ำมัน และมีรัศมี r_0 ขนาด 0.575 mm ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่วัดได้จากการทดลอง. หยดน้ำอยู่สูงจากผิวน้ำเป็นระยะ $H_d = 0.275$ mm เพื่อลดระยะเวลาในการจำลอง. บริเวณด้านล่างของแบบจำลองเป็นน้ำ โดยมีระดับของผิวน้ำอยู่สูงจากอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นระยะ $H_w = 2$ mm. อิเล็กโทรดด้านบนอยู่เหนือจากผิวน้ำเป็นระยะ $H_o = 10$ mm และมีตัวกลางเป็นน้ำมันแร่หรือน้ำมันซิลิโคน.



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

แบบจำลองในรูปที่ 4.4 ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมอันดับที่ 1 จำนวน 80,157 เอลิเมนต์ และมีโหนดจำนวน 80,736 โหนด. การกระจายตัวเอลิเมนต์ในการจำลองกรณีนี้เป็นแบบสม่ำเสมอทั้งแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5. เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4.2.



รูปที่ 4.5 ลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำและฝิวน้ำ

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองการรวมตัวของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำไม่มีประจุ

ขอบเขต	สมการ	
	ไฟฟ้า	ของไหล
บน	$\phi = 0$	$u = 0$
ล่าง	$\phi = V_0$	
ขวา	$E_n = 0$	

ผู้วิจัยจำลองในสถานะชั่วคราว โดยขั้นเวลามีขนาด $10 \mu s$ จำนวน 2,250 ขั้น สำหรับน้ำมันแร่ และจำนวน 4,000 ขั้น สำหรับน้ำมันซิลิโคน. ขั้นเวลาของน้ำมันซิลิโคนมากกว่าเนื่องจากความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนต่ำกว่าน้ำมันแร่. ที่สถานะเริ่มต้น ความเร็วมีค่าเป็น 0. ค่า φ เริ่มต้นหาได้จากระยะทางที่น้อยที่สุดจากจุดไหนตจนถึงหยดน้ำหรือฝิวน้ำตามสมการดังต่อไปนี้

$$\varphi = \min(d_{dn}, d_{pn}) \quad (4.5)$$

โดยที่

$$d_{dn} = r' - r_0 \quad (4.6)$$

$$d_{pn} = z - H_w \quad (4.7)$$

เมื่อ r' คือ ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของหยดน้ำจนถึงจุดไหนต

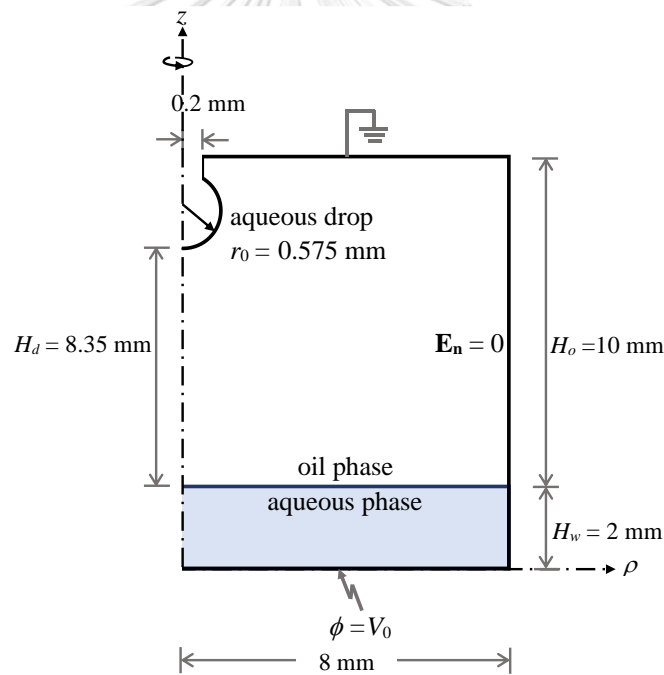
r_0 คือ รัศมีของหยดน้ำ

z คือ ตำแหน่งพิกัดในแนวแกน z ของจุดโหนด

H_w คือ ความสูงของผิวน้ำ ซึ่งมีค่า 2 mm

4.3 การจำลองเพื่อหาประจุของหยดน้ำ

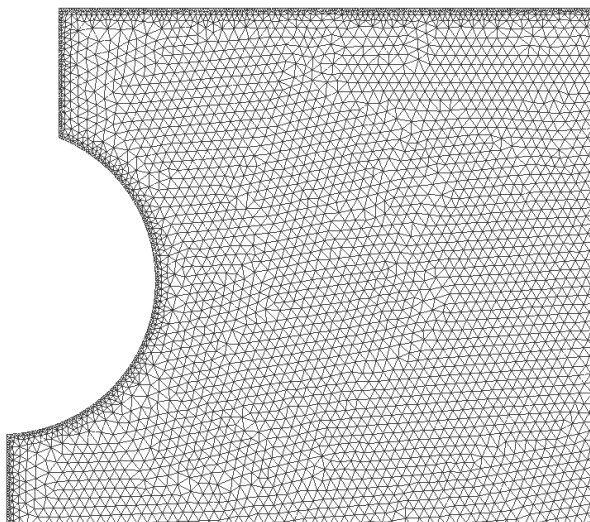
แบบจำลองที่ใช้เพื่อหาประจุของหยดน้ำแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยการจำลองพิจารณากรณีที่ยอดน้ำอยู่ในน้ำมันแร่. หยดน้ำมีขนาดรัศมี r_0 เท่ากับ 0.575 mm อยู่ติดกับปลายเข็มที่สัมผัสอยู่กับอิเล็กโทรดและมีสภาพเป็นตัวนำ. ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดให้หยดน้ำเป็นขอบเขตเดียวกับเข็มและอิเล็กโทรดกราวด์. บริเวณด้านล่างของแบบจำลองเป็นน้ำ และบริเวณส่วนที่เหลือเป็นน้ำมัน. รอยต่อระหว่างตัวกลางอยู่เหนือจากอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นระยะ 2 mm และอิเล็กโทรดด้านบนอยู่เหนือจากรอยต่อระหว่างตัวกลางเป็นระยะ 10 mm.



รูปที่ 4.6 แบบจำลองเพื่อหาประจุของหยดน้ำในขณะที่อยู่บริเวณปลายเข็มและได้รับสนามไฟฟ้า

แบบจำลองในรูปที่ 4.6 ถูกแบ่งเป็นเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมอันดับ 2 จำนวน 144,310 เอลิเมนต์และมีโหนดจำนวน 291,113 โหนด. บริเวณขอบเขตของแบบจำลองส่วนที่เป็นหยดน้ำถูกกำหนดให้มีจำนวนเอลิเมนต์มากกว่าบริเวณอื่นของแบบจำลอง. รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของเอลิเมนต์บริเวณหยดน้ำ. สมการที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองนี้มีเพียงสมการปัวซองเท่านั้น. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของสมการปัวซองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้. ขอบเขตด้านบนและด้านล่างมีค่า

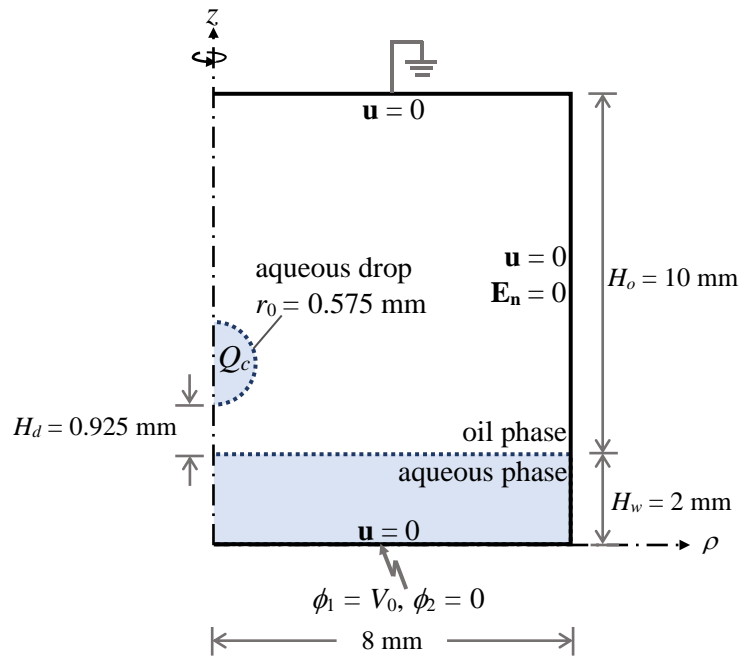
ศักย์ไฟฟ้า ϕ เป็น 0 และ V_0 ตามลำดับ. ขอบเขตด้านขวากำหนดให้ $E_n = 0$. การจำลองกระทำที่สภาวะคงตัว. ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในรูปที่ 4.6 ด้วยโปรแกรม Elmer ถูกนำไปหาค่าสนามไฟฟ้าบริเวณขอบเขตของหยดน้ำ เพื่อใช้ประกอบการคำนวณประจุของหยดน้ำ Q_c ด้วยสมการที่ 2.7.



รูปที่ 4.7 ลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อคำนวณหาประจุของหยดน้ำ

4.4 การรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า

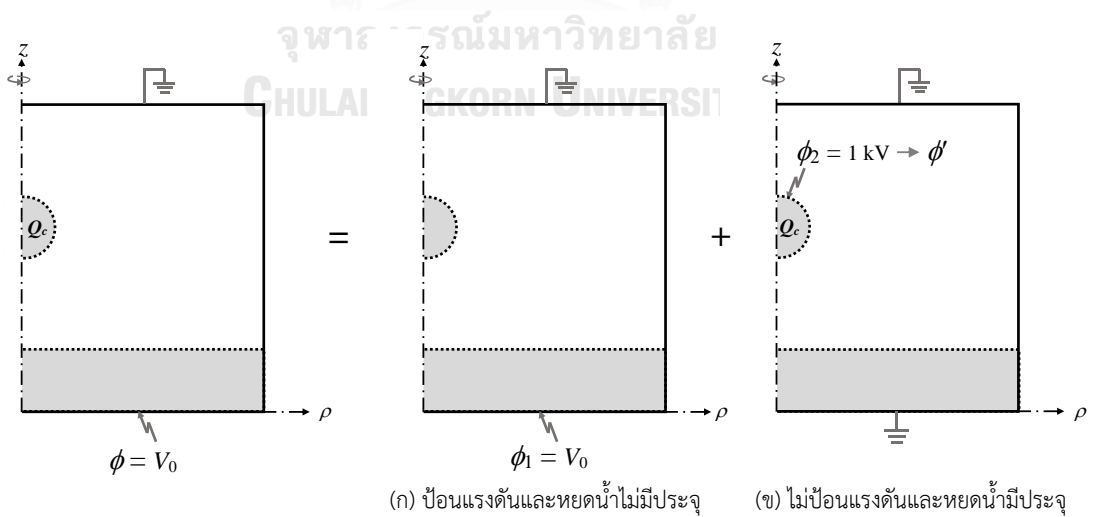
แบบจำลองที่นำมาใช้แสดงการรวมตัวของหยดน้ำในน้ำมันและผิวน้ำภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำมีประจุแสดงดังรูปที่ 4.8. หยดน้ำมีรัศมี r_0 ขนาด 0.575 mm และมีประจุ Q_c ลอยอยู่ใน้ำมัน โดยที่หยดน้ำอยู่สูงจากผิวน้ำเป็นระยะ $H_d = 0.925$ mm บริเวณด้านล่างของแบบจำลองเป็นน้ำ โดยมีระดับของผิวน้ำอยู่สูงจากอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นระยะ $H_w = 2$ mm. อิเล็กโทรดด้านบนอยู่เหนือจากผิวน้ำเป็นระยะ $H_o = 10$ mm และมีตัวกลางเป็นน้ำมันแร่. แบบจำลองถูกแบ่งด้วยเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมอันดับที่ 1 โดยมีลักษณะการกระจายตัวและจำนวนของเอลิเมนต์เหมือนกันกับในหัวข้อที่ 4.2.



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการรวมตัวของหยดน้ำในน้ำมันภายใต้สนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำมีประจุ

ในที่นี้ การพิจารณาผลของประจุของหยดน้ำใช้หลักการทับซ้อน (superposition). รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยหลักการทับซ้อน. การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าถูกแบ่งเป็น 2 กรณี ดังต่อไปนี้.

- (ก) กรณีที่ป้อนแรงดันให้กับแบบจำลองและไม่คิดประจุของหยดน้ำ (ϕ_1)
- (ข) กรณีที่ไม่ป้อนแรงดันให้กับแบบจำลองและพิจารณาหยดน้ำมีประจุ (ϕ_2)



รูปที่ 4.9 แผนภาพการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยหลักการทับซ้อน

ผลรวมของศักย์ไฟฟ้าจากทั้งสองกรณีได้เป็นศักย์ไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำมีประจุและได้รับแรงดัน. ทั้งนี้ ในกรณี (ข) ผู้วิจัยไม่ได้กำหนดประจุให้กับหยดน้ำโดยตรง แต่ใช้วิธีการกำหนดให้บริเวณหยดน้ำเป็น เงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าแทน. จากวิธีการข้างต้น สมการปัญหาศักย์ไฟฟ้าของแบบจำลองรูปที่ 4.8 ในแต่ละชั้นเวลาถูกคำนวณ 2 ครั้ง. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองรูปที่ 4.8 มี รายละเอียดดังตารางที่ 4.3.

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองการรวมตัวของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำมี ประจุ

ขอบเขต	สมการ		
	ไฟฟ้า ϕ_1	ไฟฟ้า ϕ_2	ของไหล
บน	$\phi_1 = 0$	$\phi_2 = 0$	$u = 0$
ล่าง	$\phi_1 = V_0$	$\phi_2 = 0$	
ขวา	$E_n = 0$	$E_n = 0$	
หยดน้ำ	-	$\phi_2 = 1 \text{ kV}$	-

สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้า ϕ_2 ผู้วิจัยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของหยดน้ำเป็น 1 kV. ดังนั้น ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าทุกจุดโหนดที่ได้จากกรณีที่ไม่ป้อนแรงดันให้กับแบบจำลองและ พิจารณาให้หยดน้ำมีประจุ Q_c หาได้จากการเทียบผลคำนวณศักย์ไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำเป็นเงื่อนไข ขอบเขตศักย์ 1 kV กับอัตราส่วนประจุของหยดน้ำดังสมการ

$$\phi'_2 = \phi_2 \times \frac{Q_c}{Q_{1kV}} \quad (4.8)$$

เมื่อ Q_c คือ ขนาดประจุของหยดน้ำ (C) ซึ่งได้จากหัวข้อที่ 4.3

Q_{1kV} คือ ขนาดประจุของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขต 1 kV (C)

ϕ_2 คือ ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าแต่ละจุดโหนด (V) เมื่อหยดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขตค่า ศักย์ 1 kV

ϕ'_2 คือ ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าแต่ละจุดโหนด (V) เมื่อหยดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขตค่า ศักย์ ϕ' ซึ่งทำให้หยดน้ำมีประจุ Q_c

จากหลักการทับซ้อน ศักย์ไฟฟ้าของแต่ละจุดโหนดเมื่อหยดน้ำมีประจุและได้รับแรงดัน สามารถหาได้จาก

$$\phi = \phi_1 + \phi'_2 \quad (4.9)$$

และ สนามไฟฟ้า, \mathbf{E} คำนวณได้จาก

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi = (-\nabla\phi_1) + (-\nabla\phi'_2) \quad (4.10)$$

การจำลองคำนวณในสภาวะชั่วคราว โดยกำหนดให้ชั้นเวลามีขนาด $10 \mu\text{s}$ จำนวน 3,500 ชั้น. ที่สภาวะเริ่มต้น ความเร็วมีค่าเท่ากับ 0. และค่า φ เริ่มต้นหาได้จากสมการที่ 4.5 – 4.7.

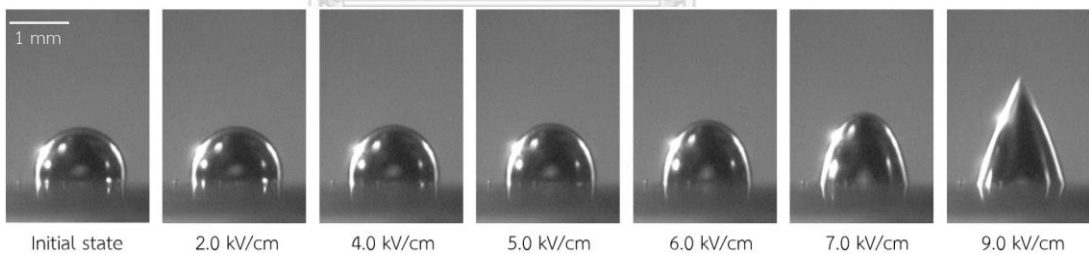


บทที่ 5

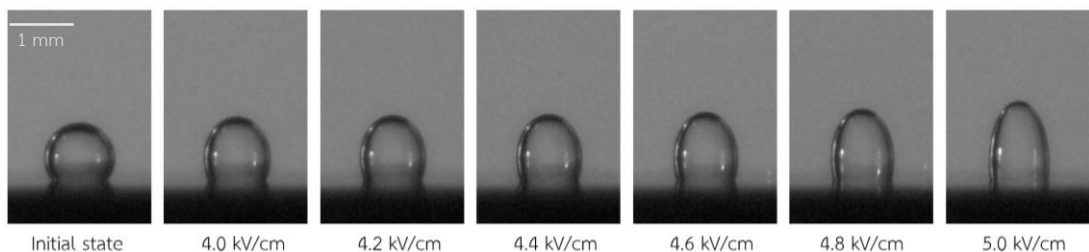
ผลการทดลองและอภิปราย

5.1 ผลการทดลองการเสียรูปร่างของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.1 แสดงการยืดตัวของหยดน้ำในน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันภายใต้สนามไฟฟ้าตามลำดับ. รูปร่างตั้งต้นของหยดน้ำในน้ำมันแร่แตกต่างจากกรณีน้ำมันทานตะวันเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำมันส่งผลต่อมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและอิเล็กโทรด. ในการทดลองผู้วิจัยกำหนดให้ความสูงของหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดมีขนาดเท่ากัน เนื่องจากแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่กระทำกับหยดน้ำที่บริเวณด้านบนของหยด. หยดน้ำปริมาตร $1 \mu\text{L}$ ในน้ำมันแร่และปริมาตร $0.7 \mu\text{L}$ ในน้ำมันทานตะวันถูกปล่อยให้ตกลงและเซ็ดตัวบนอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้ได้ความสูงเฉลี่ยของหยดน้ำอยู่ที่ 1 mm . หลังจากได้รับสนามไฟฟ้า หยดน้ำซึ่งอยู่บนอิเล็กโทรดเกิดการยืดตัวออก และจากนั้นจะหดตัวกลับสู่สภาวะตั้งต้นเมื่อสนามไฟฟ้าหมดไปเนื่องจากแรงตึงผิวของหยดน้ำ. รูปที่ 5.2 แสดงการยืดตัวออกของหยดน้ำเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าและการหดกลับคืนสู่สภาพเดิม. การยืดตัวของหยดน้ำเพิ่มขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้าเนื่องแรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำเพิ่มสูงขึ้น. นอกจากนี้ ผู้วิจัยสังเกตเห็นว่ารัศมีความโค้งของหยดน้ำที่บริเวณปลายด้านบนของหยดลดลงเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น. ที่สนามไฟฟ้าสูง บริเวณส่วนปลายของหยดน้ำถูกดึงให้ยืดออกจนมีลักษณะเป็นรูปกรวย.

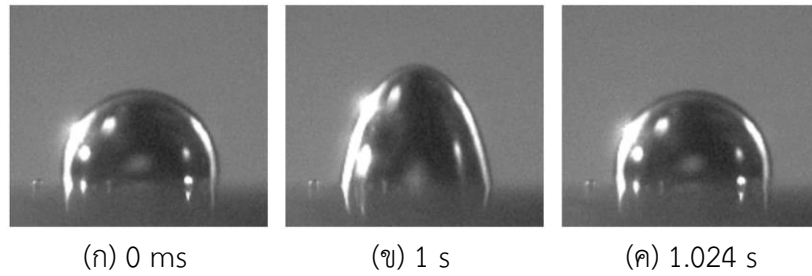


(ก) น้ำมันแร่



(ข) น้ำมันทานตะวัน

รูปที่ 5.1 การยืดตัวของหยดน้ำที่อยู่บนอิเล็กโทรดเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

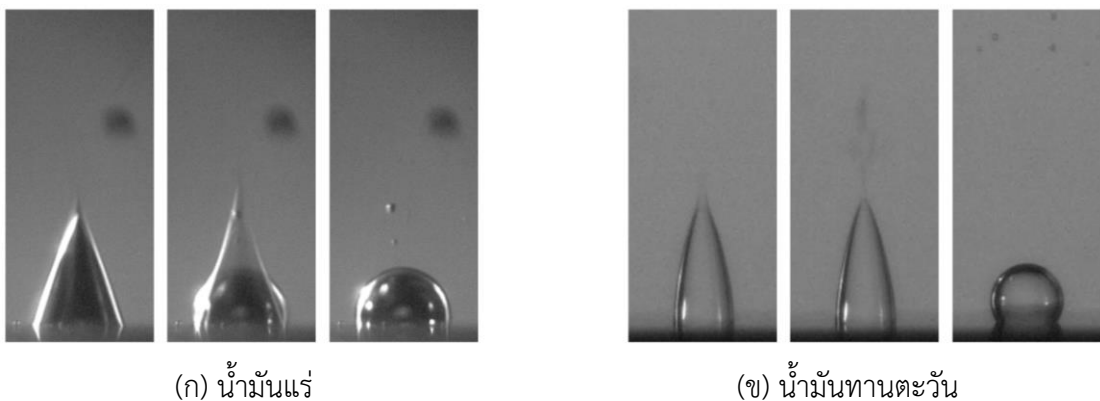


รูปที่ 5.2 การยืดและหดตัวของหยดน้ำในน้ำมันแร่ภายใต้สนามไฟฟ้า 7 kV/cm

เมื่อสนามไฟฟ้าถูกเพิ่มจนถึงค่าวิกฤต หยดน้ำเกิดการแยกตัว. รูปที่ 5.3 แสดงการแยกตัวของหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดเมื่อได้รับค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต. ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในกรณีน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันที่ได้จากการทดลองมีค่า 10.2 kV/cm และ 5.1 kV/cm ตามลำดับ. ที่สนามไฟฟ้าสูง แรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำบริเวณส่วนปลายหยดมีค่าสูง ส่งผลให้หยดน้ำถูกดึงให้ยืดจนมีลักษณะเป็นกรวยแหลม หรือที่เรียกว่าแทย์เลอร์โคน. ความเค้นทางไฟฟ้ามีอิทธิพลเหนือแรงตึงผิวของหยด ทำให้หยดเกิดการแยกตัว. เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต E_c ที่นำเสนอโดย Taylor ซึ่งคำนวณได้จาก [54]

$$E_c = 0.648 \sqrt{\frac{\gamma}{2r_0 \epsilon_r \epsilon_0}} \quad (5.1)$$

ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของหยดน้ำในน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันที่ได้จากการคำนวณมีค่าเป็น 7.1 kV/cm และ 4.5 kV/cm ตามลำดับ. แม้ว่า ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการคำนวณต่ำกว่าค่าจากการทดลอง แต่แนวโน้มของค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในน้ำมันทานตะวันมีค่าต่ำกว่าน้ำมันแร่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้. จากรูปที่ 5.3 หลังจากการแยกตัวเกิดขึ้นแล้ว หยดน้ำที่เหลืออยู่หดตัวกลับไปอยู่ในสภาวะตั้งต้น เนื่องจากเสถียรภาพของหยดน้ำสูงขึ้นเมื่อขนาดของหยดน้ำเล็กลงจากการแตกตัว.

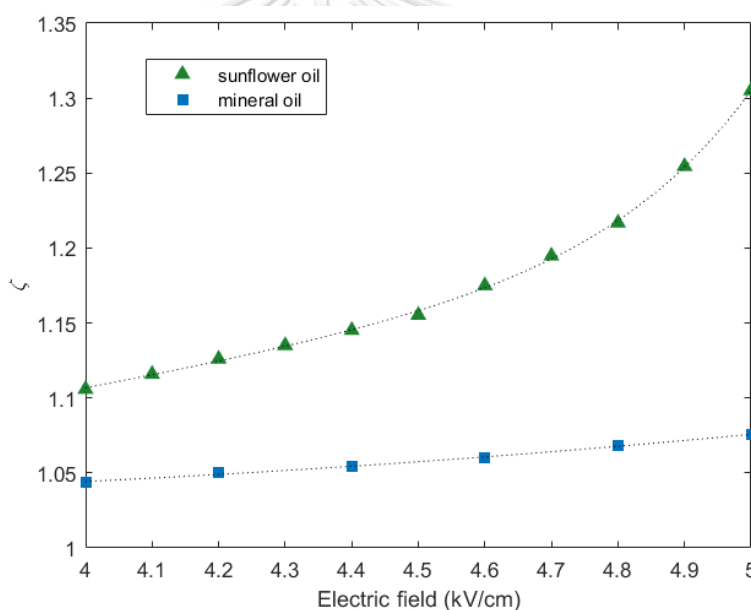


(ก) น้ำมันแร่

(ข) น้ำมันทานตะวัน

รูปที่ 5.3 การแยกตัวของหยดน้ำที่ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต

อัตราการยืดของหยดน้ำถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบการเสีรูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันภายใต้สนามไฟฟ้า. ในที่นี้ อัตราการยืด (ζ) หาได้จากอัตราส่วนของความสูงของหยดน้ำในแนวสนามไฟฟ้า ณ ตอนที่หยดน้ำยืตัวสูงสุดภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่างๆ ส่วนด้วยความสูงเริ่มต้นของหยดน้ำ. รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบอัตราการยืดของหยดน้ำในน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันในช่วงสนามไฟฟ้า 4 – 5 kV/cm. จากรูปที่ 5.4 การเพิ่มขึ้นของ ζ ตามสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ ζ ในน้ำมันทานตะวันสูงกว่าน้ำมันแร่. การเสีรูปร่างของหยดน้ำเกิดจากแรงไฟฟ้าดึงให้หยดน้ำยืตัวออก ในขณะที่แรงตึงผิวพยายามคงรูปร่างของหยดน้ำ. น้ำมันทานตะวันมีคุณสมบัติค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงกว่าน้ำมันแร่ส่งผลให้แรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำมีค่าสูงกว่า. รวมทั้ง ค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันทานตะวันมีค่าต่ำกว่า. ดังนั้น หยดน้ำในน้ำมันทานตะวันจึงมี ζ ที่มากกว่ากรณีน้ำมันแร่และเกิดการแยกตัวที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่า.

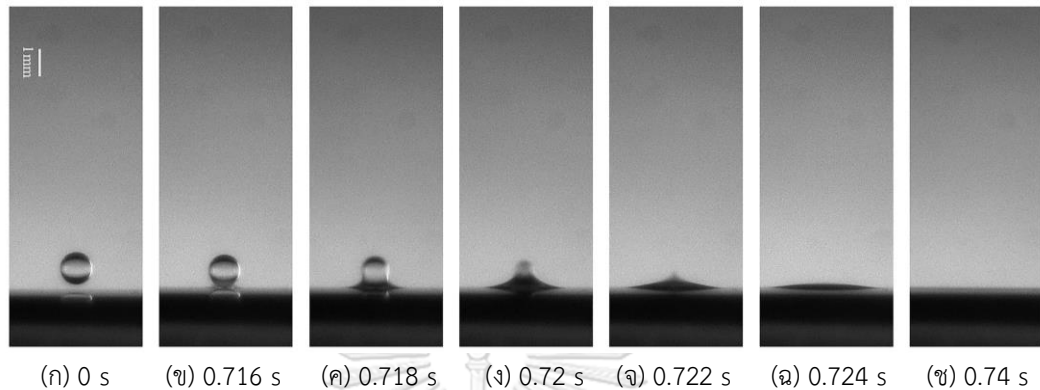


รูปที่ 5.4 อัตราการยืดของหยดน้ำที่อยู่บนอิเล็กโทรดภายใต้สนามไฟฟ้า

5.2 ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า

หยดน้ำปริมาณ 1 μL ถูกปล่อยให้หลุดออกจากปลายเข็มและเคลื่อนที่ตกลงสู่ผิวน้ำด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหยดน้ำมีขนาด 1.15 mm. สนามไฟฟ้าถูกป้อนหลังจากที่หยดน้ำเคลื่อนที่จนเข้าใกล้ผิวน้ำแล้ว. ในน้ำมันซิลิโคน ผลการทดลองพบว่าหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุเกิดการรวมตัวกับผิวน้ำแบบสมบูรณ์เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าขนาด 1.0 – 1.7 kV/cm. รูปที่ 5.5 แสดงการรวมตัวแบบสมบูรณ์ของหยดน้ำและผิวน้ำที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm. ในรูปที่ 5.5 (ก) หยดน้ำ

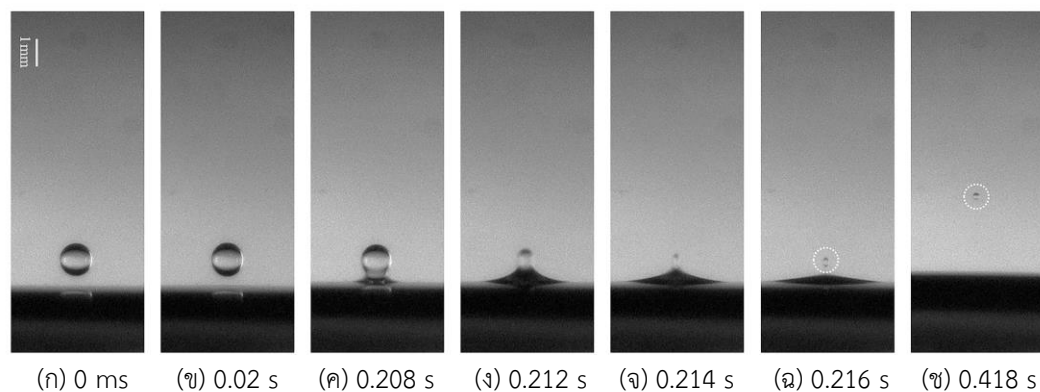
เคลื่อนที่จนเข้าใกล้ผิวน้ำและเริ่มได้รับสนามไฟฟ้า. จากนั้น หยดน้ำเคลื่อนที่เข้าหาผิวน้ำด้วยแรงไฟฟ้าจนกระทั่งสัมผัสกับผิวน้ำในรูปที่ 5.5 (ข) และเกิดการรวมตัวเข้ากับผิวน้ำในรูปที่ 5.5 (ค) – (ช). สนามไฟฟ้ายังคงมีอยู่แม้ว่าการรวมตัวระหว่างหยดน้ำกับผิวน้ำสิ้นสุดลงแล้วก็ตาม.



รูปที่ 5.5 การรวมตัวแบบสมบูรณ์ของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้าขนาด 1.0 kV/cm

การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าส่งผลให้หยดน้ำเริ่มเสียรูปก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกับผิวน้ำ. นอกจากนี้ ความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้าด้วยเช่นกัน. ทั้งนี้ เมื่อสนามไฟฟ้าสูงจนอยู่ในช่วง 1.8 – 4.5 kV/cm การรวมตัวระหว่างหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคนเกิดในรูปแบบเพียงบางส่วน. รูปที่ 5.6 แสดงการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 การรวมตัวแบบเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้าขนาด 3.0 kV/cm

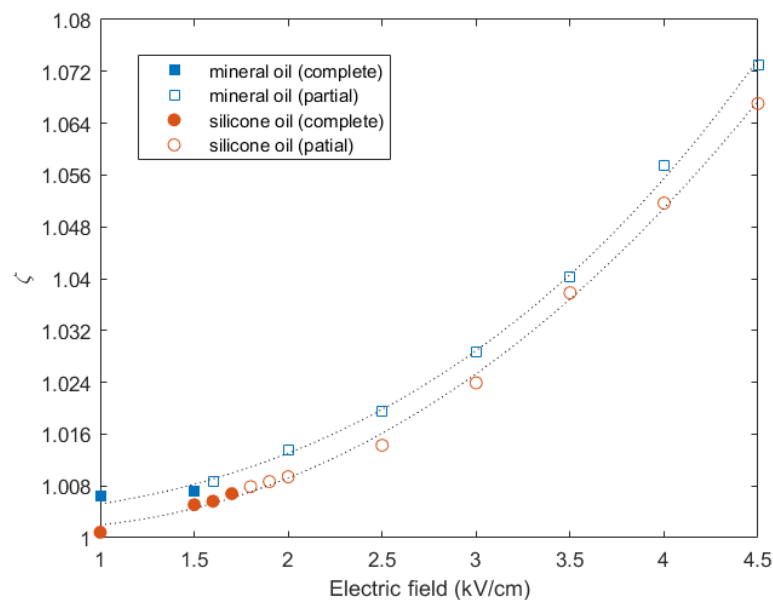
เมื่อหยดน้ำเริ่มได้รับสนามไฟฟ้าในรูปที่ 5.6 (ก) หยดน้ำยึดตัวเล็กน้อยดังรูปที่ 5.6 (ข). จากนั้น หยดน้ำที่เกิดการเสีรูปร่างเคลื่อนที่ลงและรวมตัวเข้าหาผิวน้ำ ดังรูปที่ 5.6 (ค) – (จ). หลังจากที่ยอดน้ำรวมตัวเข้าหาผิวน้ำบางส่วนแล้ว บริเวณส่วนปลายด้านบนของหยดน้ำถูกดึงให้ขาดออกจากการรวมตัว และก่อตัวเป็นหยดน้ำทุติยภูมิ ดังรูปที่ 5.6 (ฉ). จากนั้น หยดทุติยภูมิเคลื่อนที่ในทิศขึ้นเนื่องจากยังคงมีสนามไฟฟ้าอยู่ ดังรูปที่ 5.6 (ซ). การเคลื่อนที่ของหยดทุติยภูมิหยุดเมื่อสนามไฟฟ้าหมดไป.

สำหรับกรณีน้ำมันแร่ หยดน้ำใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าหาผิวน้ำน้อยกว่าน้ำมันซิลิโคนเนื่องจากความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันแร่ต่ำ. แรงหนืดและแรงลอยตัวซึ่งต้านการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมีค่าต่ำ. ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่ แสดงในภาคผนวก ข. จากผลการทดลอง การรวมตัวรูปแบบสมบูรณ่เกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้า 1.0 – 1.5 kV/cm. แม้ว่าหยดน้ำในน้ำมันแร่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าน้ำมันซิลิโคน แต่หลังจากที่หยดน้ำเริ่มสัมผัสกับผิวน้ำแล้ว เวลาที่หยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดใช้ในการรวมตัวสู่ผิวน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า. ระยะเวลาการรวมตัวระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดอยู่ที่ประมาณ 10 – 12 ms. เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 – 4.5 kV/cm หยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่เกิดการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนและก่อให้เกิดหยดน้ำทุติยภูมิ. หยดน้ำทุติยภูมิที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนที่ขึ้น โดยที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำทุติยภูมิในน้ำมันแร่สูงกว่าน้ำมันซิลิโคนเนื่องจากคุณสมบัติความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันแร่.

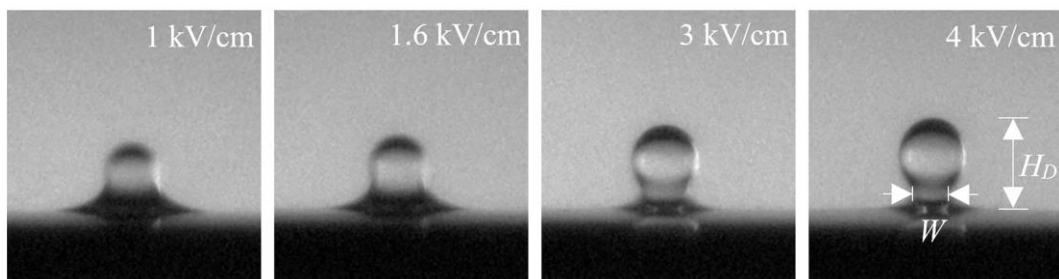
จากผลการทดลอง หยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันทั้งสองชนิดสามารถรวมตัวแบบสมบูรณ่ได้ที่สนามไฟฟ้าต่ำ. ในการทดลอง ผิวน้ำมีประจุเป็นบวกจากการป้อนแรงดันสูงขั้วบวก. ประจุลบในหยดน้ำถูกเหนี่ยวนำให้สะสมอยู่ที่บริเวณด้านล่างของหยด. หยดน้ำเคลื่อนที่ลงสู่ผิวน้ำด้วยแรงคูลอมบ์และแรงโน้มถ่วง. เมื่อหยดน้ำเคลื่อนที่เข้าใกล้ผิวน้ำ ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำมีค่าสูง ส่งผลให้ฟิล์มน้ำมันที่คั่นขาดออก. จากนั้น หยดน้ำจึงเกิดการเชื่อมรวมเข้าหาผิวน้ำ. ในกรณีที่หยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้าต่ำ บริเวณส่วนเชื่อมรวมระหว่างหยดน้ำกับผิวน้ำกว้าง [รูปที่ 5.5 (ค)] เนื่องจากหยดน้ำไม่เกิดการเสีรูปร่าง หรือเสีรูปร่างแค่เพียงเล็กน้อย. น้ำจากหยดน้ำสามารถระบายลงสู่ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ. เมื่อหยดน้ำเริ่มรวมเข้าหาผิวน้ำ ประจุระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำเกิดการถ่ายเท. หยดน้ำได้รับประจุบวก ส่งผลให้มีแรงไฟฟ้าดึงหยดน้ำในทิศขึ้นระหว่างที่หยดน้ำกำลังรวมตัว. อย่างไรก็ตาม แรงไฟฟ้ามีค่าต่ำและไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิว. ดังนั้น หยดน้ำจึงสามารถรวมตัวเข้าหาผิวน้ำได้อย่างสมบูรณ่.

การรวมตัวแบบเพียงบางส่วนเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเริ่มสูง เนื่องจากการเสีรูปร่างของหยดน้ำก่อนที่จะรวมตัวกับผิวน้ำเพิ่มขึ้น. รูปที่ 5.7 แสดงอัตราการยึดของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุตามขนาด

ของสนามไฟฟ้า. ในที่นี้ อัตราการยืดถูกวัดในตอนที่ยอดน้ำได้รับสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่จนอยู่เหนือจากผิวหน้าเป็นระยะ 0.4 mm. ความเค้นเนื่องจากแรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าสูง ส่งผลให้อัตราการยืดของหยดน้ำเพิ่มขึ้น. การเสียรูปของหยดน้ำนำไปสู่บริเวณส่วนเชื่อมรวมที่มีลักษณะแคบ ดังแสดงในรูปที่ 5.8. ความกว้างของบริเวณส่วนเชื่อมรวม (W) ลดลงเมื่อสนามไฟฟ้าสูง ในขณะที่ความสูงของหยดน้ำจากระดับผิวหน้า (H_D) เพิ่มขึ้น. ประสิทธิภาพการระบายน้ำจากหยดน้ำลงสู่ผิวหน้าลดลงเมื่อส่วนเชื่อมรวมแคบ. รวมทั้ง แรงไฟฟ้าที่ตั้งในหยดน้ำในทิศขึ้นหลังจากเกิดการถ่ายเทประจุแล้วเพิ่มขึ้นตามขนาดสนามไฟฟ้า. ดังนั้น แรงไฟฟ้าจึงสามารถเอาชนะแรงตึงผิวและดึงให้บริเวณส่วนปลายของหยดน้ำขาดออกจากการรวมตัวได้.



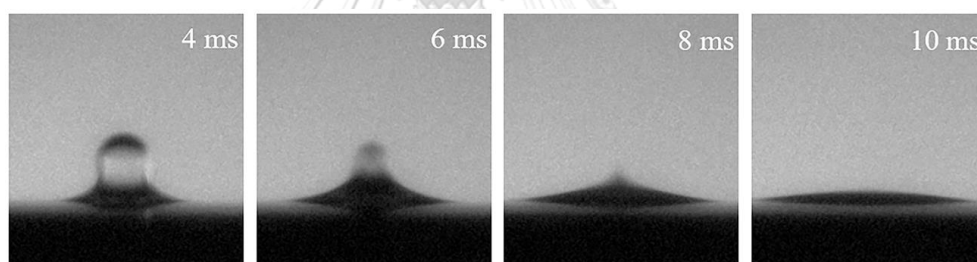
รูปที่ 5.7 อัตราการยืดของหยดน้ำก่อนที่จะรวมตัวกับผิวหน้า (กรณีหยดน้ำไม่ถูกอัดประจุ)



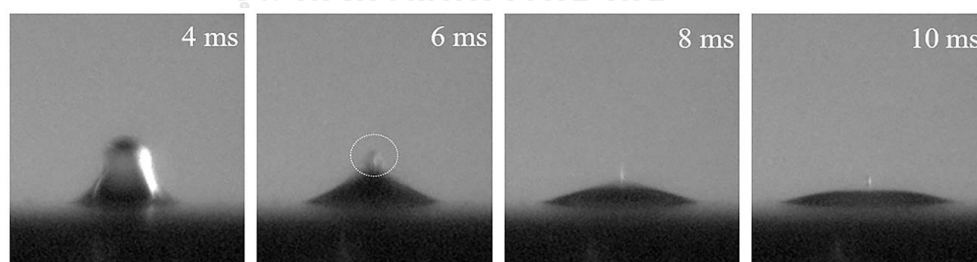
รูปที่ 5.8 ลักษณะบริเวณเชื่อมรวมของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคนตามขนาดสนามไฟฟ้า

ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้หยดน้ำเริ่มรวมตัวแบบเพียงบางส่วนในกรณีน้ำมันซิลิโคนสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีน้ำมันแร่เล็กน้อย เนื่องจากการเสียรูปของหยดน้ำและคุณสมบัติของน้ำมัน. จากรูป

ที่ 5.7 การเสีรูปของหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนก่อนที่จะเกิดการรวมตัวมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ โดยที่ความแตกต่างของอัตราการยึดในน้ำมันทั้งสองชนิดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.42%. น้ำมันซิลิโคนมีค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวสูงส่งผลให้อัตรายึดตัวของหยดน้ำมีค่าต่ำ. แม้ว่าหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนได้รับแรงไฟฟ้ามากกว่าเนื่องจากค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่สูงกว่าน้ำมันแร่ก็ตาม. สิ่งนี้บ่งชี้ว่าคุณสมบัติความตึงผิวของน้ำมันมีผลต่อเสถียรภาพของหยดน้ำที่เด่นกว่าเมื่อเทียบกับสภาพยอมสัมพัทธ์. การเสีรูปที่ต่ำส่งผลให้บริเวณส่วนเชื่อมรวมกว้างและการระบายน้ำลงสู่ผิวหน้าในกรณีน้ำมันซิลิโคนทำได้ดีกว่า. เมื่อเกิดการถ่ายเทประจุบวกจากผิวหน้า บริเวณส่วนปลายด้านบนของหยดน้ำถูกดึงขึ้นด้วยแรงไฟฟ้า. แรงตึงผิวในกรณีน้ำมันซิลิโคนมีค่าสูงเพียงพอที่จะต้านไม่ให้หยดน้ำบริเวณด้านบนถูกดึงเป็นปลายแหลม. รูป 5.9 แสดงการเปรียบเทียบการรวมตัวของหยดน้ำที่สนามไฟฟ้า 1.6 kV/cm. ดังนั้น ในกรณีน้ำมันซิลิโคน น้ำจากหยดน้ำจึงสามารถระบายเข้าสู่ผิวหน้าจนหมด เกิดเป็นการรวมตัวในรูปแบบสมบูรณ์ได้. ในขณะที่ หยดน้ำในน้ำมันแร่ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความตึงผิวต่ำถูกดึงด้วยแรงไฟฟ้าจนมีลักษณะเป็นปลายแหลม. แรงตึงผิวมีค่าต่ำ ณ บริเวณปลายแหลม. แรงไฟฟ้าจึงเพียงพอที่จะดึงให้หยดน้ำขาดออกจากการรวมตัว.



(ก) น้ำมันซิลิโคน



(ข) น้ำมันแร่

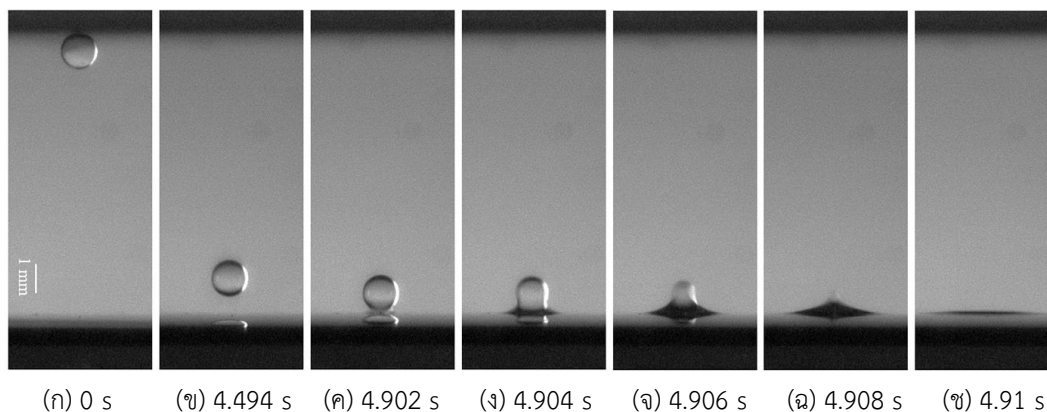
รูปที่ 5.9 ลักษณะการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุที่สนามไฟฟ้า 1.6 kV/cm

คุณสมบัติอื่นของน้ำมัน ได้แก่ ความหนืดและความหนาแน่น ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของหยดน้ำอย่างสังเกตเห็นได้ชัดเจน. ค่าความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันสูง ส่งผลให้มีแรงหนืดและแรงลอยตัวซึ่งต้านการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมากขึ้น. ดังนั้น หยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนจึงเคลื่อนที่ช้ากว่าเมื่อ

เทียบกับน้ำมันแร่. ทั้งนี้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าถูกป้อนเมื่อหยดน้ำเคลื่อนที่จนเข้าใกล้ผิวแล้ว ผลการทดลองที่บันทึกไว้ไม่สามารถนำมาวัดความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าได้. เนื่องจากหยดน้ำยืดออกและผิวน้ำยกตัวขึ้นจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ระยะเวลาเคลื่อนที่ของหยดน้ำในการทดลองสั้นเกินกว่าที่จะสามารถวัดความเร็วการเคลื่อนที่ได้. สำหรับผลของความหนาแน่นและความหนืดที่มีต่อการรวมตัวของหยดน้ำ ผู้วิจัยใช้เลข Ohnesorge ($Oh = \mu/\sqrt{\rho\gamma D}$) ในการพิจารณา โดยที่ μ คือ ความหนืด, ρ คือ ความหนาแน่น, γ คือ สัมประสิทธิ์ความตึงผิว และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหยด. ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ค่า Oh ต่ำ แสดงว่าหยดน้ำมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเพียงบางส่วน. การรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นได้เมื่อ Oh สูงเพียงพอ. ค่า Oh ในกรณีของน้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคนมีค่าเป็น 0.04 และ 0.4 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนมีแนวโน้มที่จะรวมตัวได้ดีกว่าน้ำมันแร่หากไม่มีสนามไฟฟ้า. อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดใช้เวลาในการรวมตัวเท่ากันเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า. สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมรวมหยดน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นการแข่งขันระหว่างแรงไฟฟ้าและแรงตึงผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสภาพยอมสัมพัทธ์และสัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำมันเป็นหลัก.

5.3 ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า

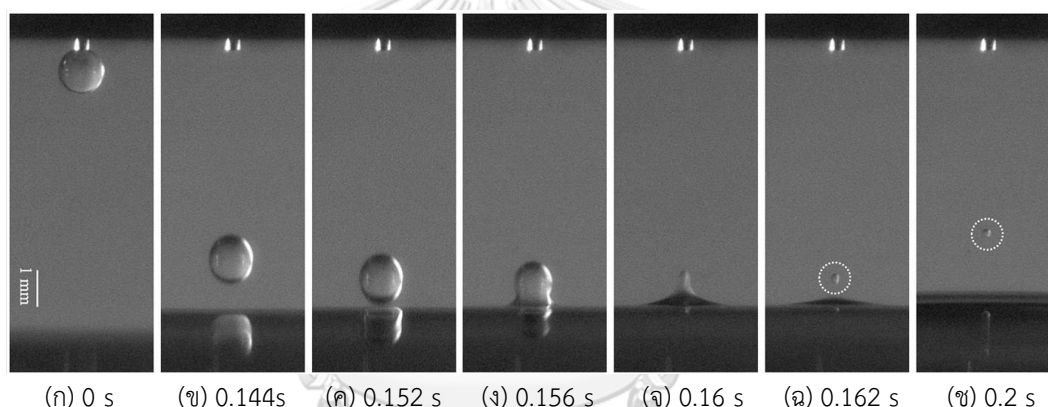
หยดน้ำปริมาณ 1 μL ในน้ำมันทั้งสองชนิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยขนาด 1.15 mm. สนามไฟฟ้าถูกป้อนตอนที่หยดน้ำอยู่ที่บริเวณปลายเข็มเพื่ออัดประจุ. หยดน้ำที่หลุดออกปลายเข็มเคลื่อนที่ด้วยแรงไฟฟ้าและแรงโน้มถ่วง. ในน้ำมันซิลิโคน หยดน้ำที่ถูกอัดประจุสามารถรวมตัวกับผิวน้ำได้อย่างสมบูรณ์ที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm. รูปที่ 5.10 แสดงการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุในน้ำมันซิลิโคนที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm.



รูปที่ 5.10 การรวมตัวแบบสมบูรณ์ของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้าขนาด 1.0 kV/cm

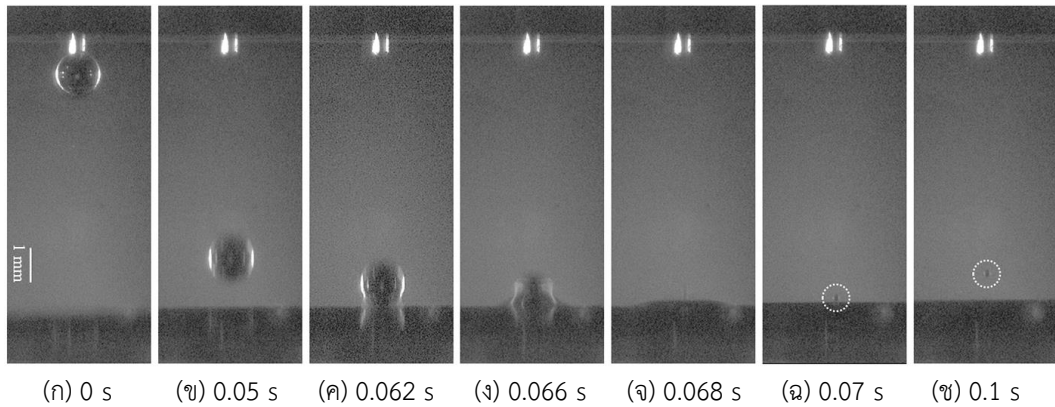
หยดน้ำที่ถูกอัดประจุหลุดออกจากปลายเข็มในรูปที่ 5.10 (ก). จากนั้น หยดน้ำเคลื่อนที่เข้าใกล้และสัมผัสกับผิวน้ำในรูปที่ 5.10 (ข) และ (ค) ตามลำดับ. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำที่ถูกอัดประจุสามารถเคลื่อนที่เข้าหาผิวน้ำได้เร็วกว่ากรณีที่ไม่ถูกอัดประจุ เนื่องจากประจุช่วยเพิ่มแรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำ. หลังจากที่ยอดน้ำสัมผัสกับผิวน้ำแล้ว หยดน้ำเกิดการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำจนหมดในรูปที่ 5.10 (ง) – (ช).

การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าส่งผลให้การยึดตัวของหยดน้ำและความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำเพิ่มขึ้น. เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มเป็น 1.1 – 4.5 kV/cm หยดน้ำเกิดการรวมตัวกับผิวน้ำในรูปแบบเพียงบางส่วน. ทั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่าระยะเวลาที่หยดน้ำใช้ในการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำน้อยกว่ากรณีไม่ถูกอัดประจุประมาณ 2 ms. รูปที่ 5.11 แสดงการรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่มีประจุในน้ำมันซิลิโคนที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm.

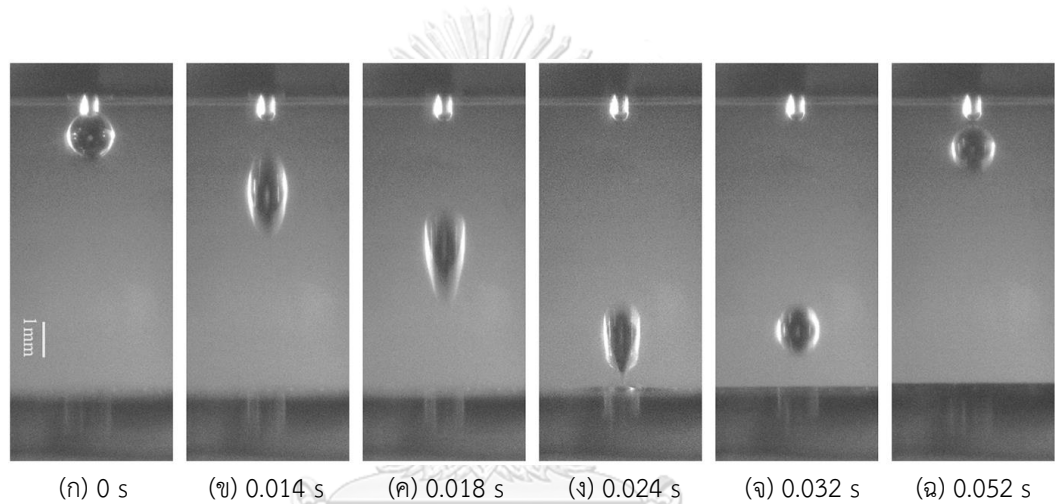


รูปที่ 5.11 การรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้าขนาด 3.0 kV/cm

ในน้ำมันแร่ หยดที่ถูกอัดประจุไม่พบการรวมตัวกันอย่างสมบูรณ์ที่สนามไฟฟ้า 1 – 4.5 kV/cm. หยดน้ำรวมตัวเข้ากับผิวน้ำในรูปแบบเพียงบางส่วนที่สนามไฟฟ้า 1.0 – 4.1 kV/cm. รูปที่ 5.12 แสดงผลการทดลองการรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำในน้ำมันแร่ที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm. เมื่อสนามไฟฟ้าถูกเพิ่มจนถึง 4.2 – 4.4 kV/cm หยดน้ำไม่เกิดการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำ. รูปที่ 5.13 แสดงกระบวนการไม่รวมตัวกันระหว่างหยดน้ำที่ถูกอัดประจุและผิวน้ำเมื่อหยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้า 4.2 kV/cm. เมื่อเริ่มป้อนสนามไฟฟ้าในรูปที่ 5.13 (ก) หยดน้ำถูกดึงให้ยืดและหลุดออกจากเข็มด้วยแรงไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.13 (ข). ในระหว่างการเคลื่อนที่ หยดน้ำเกิดการเสียรูปจนมีลักษณะเป็นทรงกรวยปลายแหลม ดังรูปที่ 5.13 (ค). หลังจากที่ยอดปลายแหลมของหยดน้ำสัมผัสกับระนาบผิวน้ำในรูปที่ 5.13 (ง) แล้ว หยดน้ำไม่รวมตัวเข้ากับผิวน้ำแต่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังปลายเข็มด้านบนดังรูปที่ 5.13 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ.

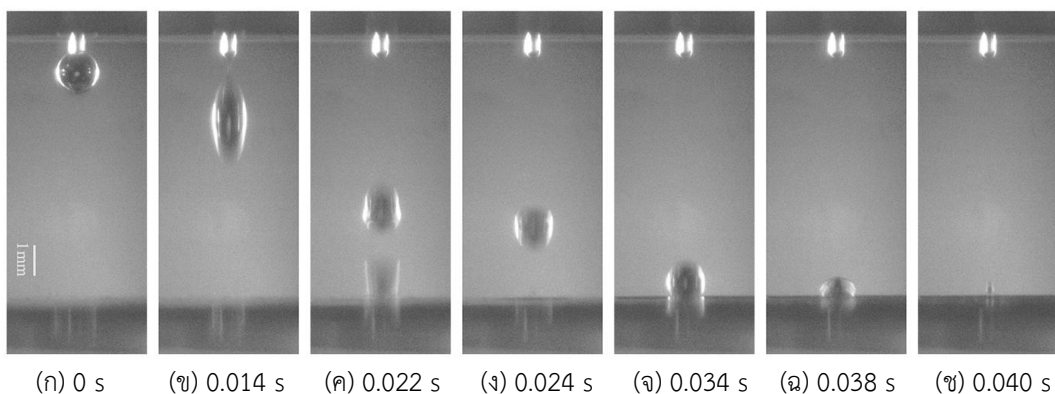


รูปที่ 5.12 การรวมตัวเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่ ที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm



รูปที่ 5.13 การไม่รวมตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่และผิวน้ำ ที่สนามไฟฟ้า 4.2 kV/cm

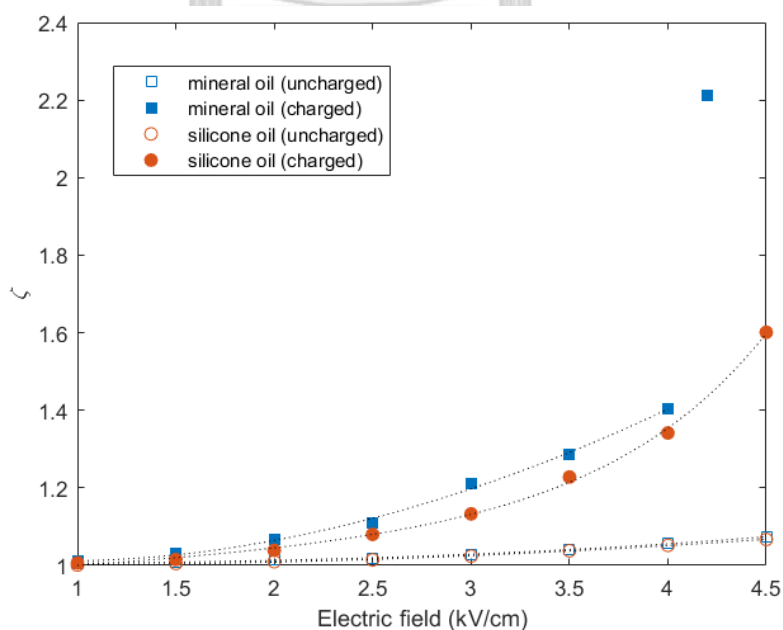
ในกรณีน้ำมันแร่ เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มจนถึง 4.5 kV/cm หยดน้ำที่ถูกอัดประจุเกิดการแตกตัวออกก่อนที่จะรวมตัวกับผิวน้ำ. ผลการทดลองในกรณีดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.14. หยดน้ำถูกดึงให้ยืดตัวออกเนื่องจากสนามไฟฟ้า และเกิดการแยกตัวออกจากบริเวณส่วนปลายของหยดน้ำระหว่างที่



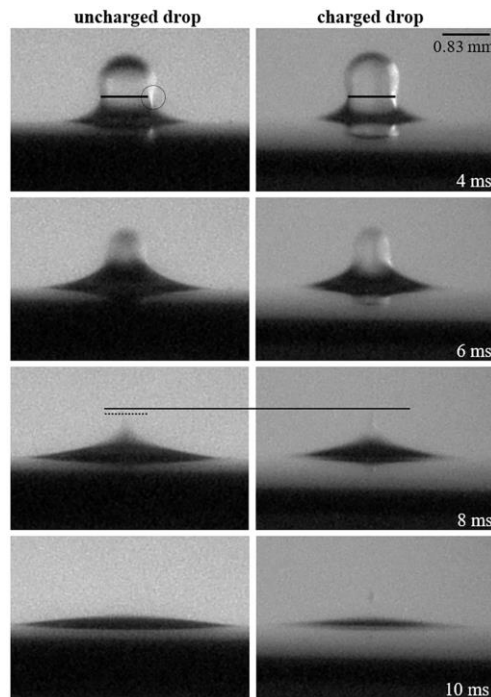
รูปที่ 5.14 การแตกตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่ ที่สนามไฟฟ้า 4.5 kV/cm

กำลังเคลื่อนที่ลง ดังรูปที่ 5.14 (ค). หยดน้ำที่แยกตัวออกมาก่อนเคลื่อนที่ลงไปและรวมตัวเข้าหาผิว น้ำในรูปที่ 5.14 (ง). จากนั้น หยดน้ำที่เหลือจากการแตกตัวเคลื่อนที่ตามลงมาและรวมตัวกับผิวน้ำใน ภายหลัง ดังรูป 5.14 (จ) – (ฉ) โดยรูปแบบการรวมตัวที่เกิดขึ้นเป็นรูปแบบเพียงบางส่วน.

จากผลการทดลองของหยดน้ำในน้ำมันทั้ง 2 ชนิด ประจุส่งผลต่ออัตราการยืดของหยดน้ำ ซึ่ง ทำให้การเปลี่ยนรูปแบบการรวมตัวจากสมบูรณ์เป็นแบบเพียงบางส่วนเกิดขึ้นที่สนามไฟฟ้าต่ำลงเมื่อ เทียบกับกรณีที่ยอดน้ำไม่ถูกอัดประจุ. รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบอัตราการยืดของหยดน้ำที่ถูกอัดและไม่ ถูกอัดประจุในช่วงสนามไฟฟ้า 1 – 4.5 kV/cm. ทั้งนี้ สำหรับกรณีน้ำมันแร่ที่สนามไฟฟ้าสูงเกิน 4 kV/cm หยดน้ำเคลื่อนที่เร็วส่งผลให้ภาพที่บันทึกไม่สามารถแสดงรูปร่างของหยดน้ำ ณ ตอนที่อยู่ เหนือจากผิวน้ำได้อย่างชัดเจน. อัตราการยืดที่วัดได้ในกรณีดังกล่าวจึงเป็นค่าโดยประมาณ. แรงไฟฟ้า ที่กระทำต่อหยดน้ำเพิ่มตามขนาดประจุไฟฟ้า ส่งผลให้อัตราการยืดของหยดน้ำในกรณีที่ถูกอัดประจุมี ค่าสูงมากกว่า และความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ถูกอัดประจุ. การ เสียรูปที่มากกว่าของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุนำไปสู่บริเวณส่วนเชื่อมรวมแคบกว่า ดังตัวอย่างรูปที่ 5.16 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการรวมตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดและไม่ถูกอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า 1.5 kV/cm. การระบายน้ำจากหยดน้ำลงสู่ผิวน้ำทำได้ลดลงเมื่อส่วนเชื่อมรวมแคบ. หลังจากรวมตัว เกิดขึ้น 8 ms บริเวณส่วนปลายด้านบนของหยดน้ำในกรณีที่ถูกอัดประจุจึงสูงกว่า และส่งผลให้ความ เข้มสนามบริเวณปลายหยดมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ถูกอัดประจุ. ดังนั้น แรงไฟฟ้าจึงเพียงพอที่จะเอาชนะ แรงตึงผิวและก่อให้เกิดการรวมตัวเพียงบางส่วน. ในขณะที่ หยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุสามารถรวมตัว แบบสมบูรณ์ได้.

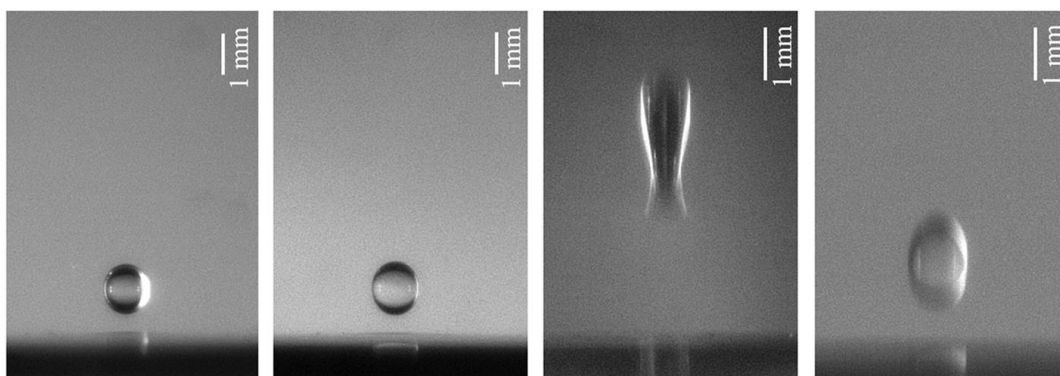


รูปที่ 5.15 อัตราการยืดของหยดน้ำที่ถูกอัดและไม่ถูกอัดประจุภายใต้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบการรวมตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดและไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้า 1.5 kV/cm

นอกจากอัตราการยึดที่เพิ่มขึ้น ประจักษ์ยังส่งผลต่อลักษณะการเสีรูปร่างของหยดน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดการไม่รวมตัวระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำ หรือการแตกตัวของหยดน้ำในระหว่างการเคลื่อนที่เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูง. รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบการเสีรูปร่างของหยดน้ำที่ถูกอัดและไม่ถูกอัดประจุเมื่อสนามไฟฟ้าสูง. สำหรับกรณีหยดน้ำไม่ถูกอัดประจุ แรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำในบริเวณด้านบนและด้านล่างมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการรวมตัวของประจุบวกที่ด้านบนและประจุลบที่ด้านล่างของหยดน้ำ. ดังนั้น หยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุจึงยึดตัวออกในด้านบนและด้านล่างอย่างใกล้เคียงกันทั้งในกรณีน้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคน ดังแสดงในรูป 5.17 (ก) และ (ข) ตามลำดับ. กรณีอัดประจุให้กับหยดน้ำซึ่งในที่นี้คือขั้วลบ ประจุลบสะสมอยู่ที่ด้านล่างของหยด ส่งผลให้แรงไฟฟ้าเกือบทั้งหมดกระทำกับหยดน้ำในบริเวณด้านล่างเท่านั้น. ดังนั้น หยดน้ำในน้ำมันแร่ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความตึงผิวต่ำจึงเกิดการยึดออกที่บริเวณส่วนล่างจนมีลักษณะเป็นกรวยแหลมเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าสูง ดังแสดงในรูปที่ 5.17 (ค). หลังจากทีบริเวณปลายแหลมสัมผัสกับระนาบน้ำ หยดน้ำได้รับการถ่ายเทประจุและมีแรงไฟฟ้าตึงหยดน้ำในทิศขึ้น. แรงตึงผิวไม่เพียงที่จะเอาชนะแรงไฟฟ้าและก่อให้เกิดการรวมตัวระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำได้. ดังนั้น หยดน้ำจึงเคลื่อนที่ย้อนกลับขึ้นไปยังด้านบนแทนที่จะรวมตัวเข้าหาผิวน้ำ. เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มยิ่งขึ้น ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณส่วนปลายแหลมของหยดน้ำเพิ่มขึ้นใน



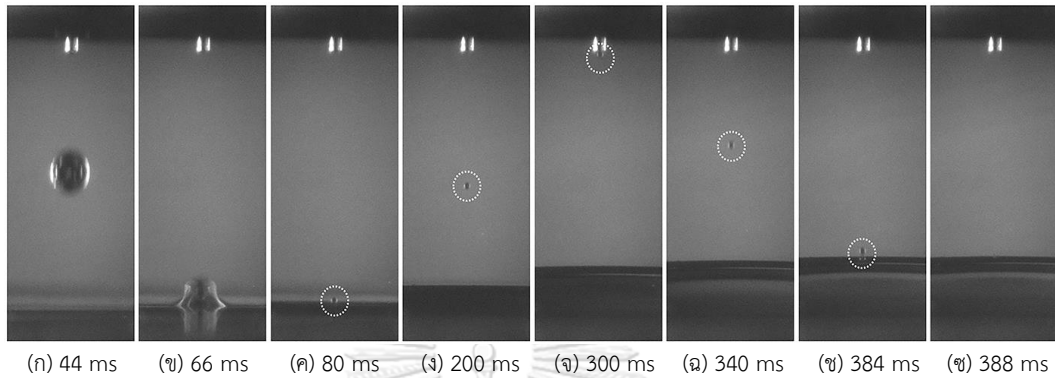
(ก) ไม่อัดประจุในน้ำมันแร่ (ข) ไม่อัดประจุในน้ำมันซิลิโคน (ค) อัดประจุในน้ำมันแร่ (ง) อัดประจุในน้ำมันซิลิโคน

รูปที่ 5.17 ลักษณะการยึดตัวของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุและไม่ถูกอัดประจุที่สนามไฟฟ้า 4.5 kV/cm

ระหว่างที่หยดน้ำกำลังเคลื่อนที่. ความเค้นทางไฟฟ้ามีอิทธิพลเหนือแรงตึงผิวของหยดน้ำ ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของหยดน้ำที่บริเวณส่วนปลาย. บริเวณส่วนปลายที่แยกตัวออกมามีประจุสะสมอยู่มาก ช่วยทำให้หยดน้ำสามารถรวมตัวกับผิวหน้าได้. หยดน้ำที่เหลือสูญเสียประจุไปและมีขนาดเล็กลง. เสถียรภาพของหยดน้ำขนาดเล็กดีกว่าเมื่อเทียบกับหยดน้ำขนาดใหญ่. การเสีรูปร่างของหยดน้ำที่เหลืออยู่มีค่าต่ำ ส่งผลให้บริเวณส่วนเชื่อมรวมกว้างเพียงพอให้หยดน้ำรวมตัวแบบเพียงบางส่วนได้. อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 5.17 (ง) การยึดตัวที่บริเวณด้านล่างของหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันซิลิโคนไม่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเหมือนในกรณีน้ำมันแร่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงตึงผิวของน้ำมันซิลิโคนมีค่าสูง. หยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนสามารถคงรูปร่างได้ดีกว่าและไม่ได้เสีรูปร่างจนเป็นมีลักษณะเป็นกรวยแหลม. ดังนั้น การไม่รวมตัวกันของหยดน้ำและการแตกตัวจึงไม่เกิดขึ้น.

เนื่องจากกระบวนการเชื่อมรวมหยดน้ำด้วยวิธีการทางไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อแยกหยดน้ำออกจากน้ำมัน หยดทุติยภูมิที่เกิดจากการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนจึงเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา. อย่างไรก็ตาม หยดน้ำในกรณีที่ถูกอัดประจุทำให้รวมตัวเข้าหาผิวหน้าในรูปแบบสมบูรณได้ยาก โดยเฉพาะในน้ำมันแร่. จากการทดลอง ผู้วิจัยพบว่าหยดทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนสามารถกำจัดได้โดยการเพิ่มเวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้าให้นานขึ้น เพื่อให้หยดน้ำทุติยภูมิเกิดการรวมตัวกับผิวหน้าด้านล่าง. ทั้งนี้ สนามไฟฟ้าต้องถูกป้อนอย่างต่อเนื่องจากตอนที่หยดน้ำหลักรวมตัวเข้าหาผิวหน้า. รูปที่ 5.18 แสดงขั้นตอนการกำจัดหยดน้ำทุติยภูมิที่เกิดจากหยดน้ำที่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า 3.2 kV/cm. เวลาของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองถูกเพิ่มจาก 0.1 s เป็น 0.5 s. หยดน้ำเคลื่อนที่ลงมาและรวมตัวกับผิวหน้าในแบบเพียงบางส่วนในรูปที่ 5.18 (ก) และ (ข) และก่อให้เกิดหยดน้ำทุติยภูมิขึ้นในรูปที่ 5.18 (ค). ภายใต้อัดประจุของสนามไฟฟ้า หยดทุติยภูมิเคลื่อนที่ขึ้นจากผิวหน้าไปยังปลายเข็มด้านบนในรูปที่ 5.18 (ง) – (จ) บ่งบอกว่าหยดน้ำทุติยภูมิมีประจุเป็นบวก. เมื่อหยดทุติยภูมิสัมผัสกับปลายเข็ม ประจุเกิดการถ่ายเทอีกครั้ง ส่งผลให้หยดน้ำทุติยภูมิมีประจุลบ

และเคลื่อนที่ย้อนกลับทิศทางลงไปยังผิวน้ำด้านล่างในรูปที่ 5.18 (ฉ) และ (ช). เนื่องจากหยดทุติยภูมิมีขนาดเล็ก เสถียรภาพของหยดน้ำสูง. หยดน้ำไม่เกิดการเสียรูปและสามารถรวมตัวกับผิวน้ำอย่างสมบูรณ์ได้ ดังรูปที่ 5.18 (ช).

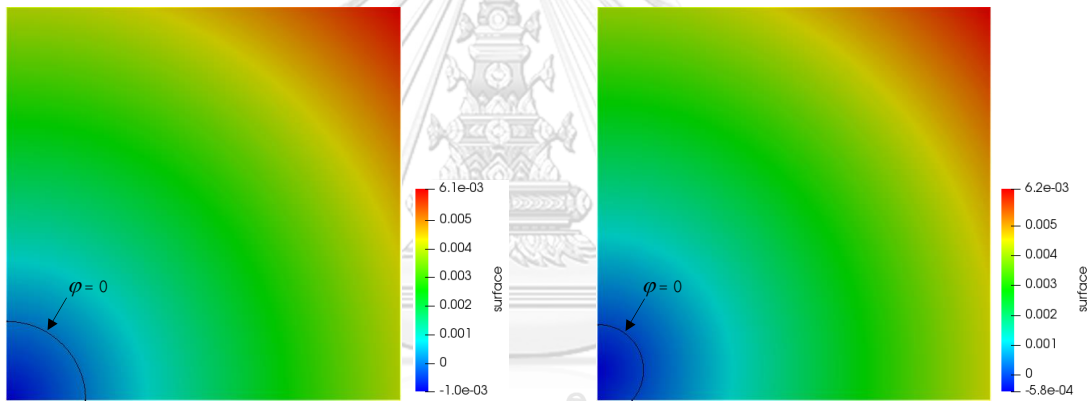


รูปที่ 5.18 การกำจัดหยดน้ำทุติยภูมิ

บทที่ 6 ผลการจำลองและอภิปราย

6.1 ผลการจำลองการเสีรูปของหยดน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

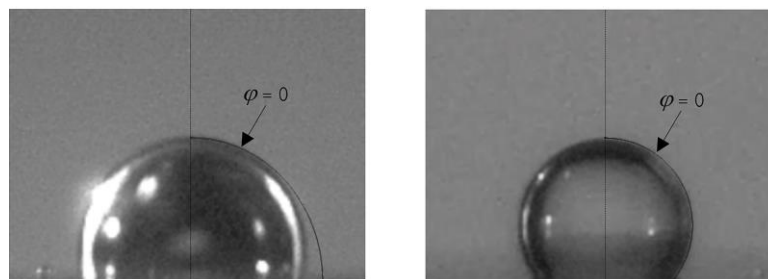
ในการจำลอง รูปร่างของหยดน้ำแสดงด้วยตัวแปรพื้นผิว φ ซึ่งเป็นฟังก์ชันตามระยะทางแบบมีเครื่องหมาย. รูปที่ 6.1 แสดงค่า φ ที่สภาวะตั้งต้นในกรณีน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวัน. บริเวณหยดน้ำ $\varphi < 0$ และ บริเวณน้ำมัน $\varphi > 0$. รูปทรงของหยดน้ำสังเกตได้จากรอยต่อระหว่างตัวกลางน้ำและน้ำมัน $\varphi = 0$. ค่า φ เพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากขอบเขตตัวกลาง. รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบขอบเขตตัวกลางระหว่างหยดน้ำและน้ำมันที่สภาวะตั้งต้นที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลอง. ลักษณะของหยดน้ำที่สภาวะตั้งต้นมีรูปร่างใกล้เคียงกับการทดลอง.



(ก) น้ำมันแร่

(ข) น้ำมันทานตะวัน

รูปที่ 6.1 ผลการจำลองตัวแปร φ ที่สภาวะตั้งต้นเมื่อหยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรด

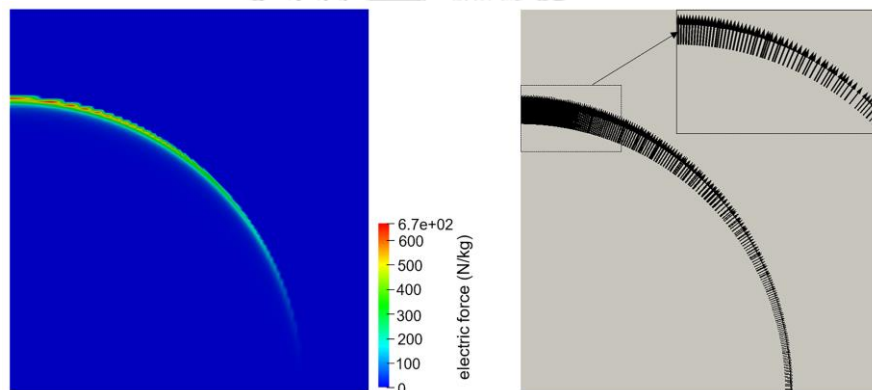


(ก) น้ำมันแร่

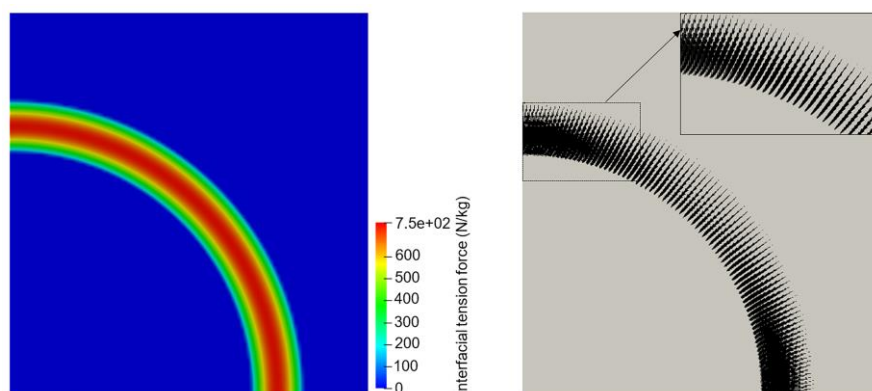
(ข) น้ำมันทานตะวัน

รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบรูปทรงของหยดน้ำซึ่งอยู่บนอิเล็กโทรดที่สภาวะตั้งต้นกับผลการทดลอง

เมื่อหยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้า แรงไฟฟ้าส่งผลให้หยดน้ำเกิดการยืดตัวออก. ในขณะที่แรงตึงผิวพยายามคงรูปร่างของหยดน้ำ. รูปที่ 6.3 แสดงขนาดและทิศทางของแรงไฟฟ้าและแรงตึงผิวที่กระทำกับหยดน้ำที่สภาวะตั้งต้น. แรงไฟฟ้ากระทำกับหยดน้ำในทิศพุ่งออกจากผิวหยด โดยมีขนาดแรงสูงสุดอยู่ที่บริเวณด้านบนของหยด ส่งผลให้หยดน้ำยืดตัวในทิศขึ้น. แรงตึงผิวมีทิศพุ่งเข้าตามแนวผิวหยดน้ำและต้านทานแรงไฟฟ้า ส่งผลให้หยดน้ำที่ยืดตัวออกเนื่องจากแรงไฟฟ้าหดตัวลง. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำตามเวลาเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 6.4. หยดน้ำที่สภาวะตั้งต้นในรูป 6.4 (ก) ยืดตัวออกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 6.4 (ข). จากนั้น หยดน้ำหดตัวลงเนื่องจากแรงตึงผิวในรูปที่ 6.4 (ค). หลังจากนั้น หยดน้ำจะยืดขึ้นและหดตัวลงสลับไปมาจนกระทั่งหยดน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัวในรูปที่ 6.4 (ง). ที่สนามไฟฟ้าต่ำ การยืดตัวของหยดน้ำเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากแรงไฟฟ้ามีค่าต่ำ. หลังจากเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว หยดน้ำมีรูปร่างเหมือนกับสภาวะตั้งต้น. เมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น แรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้หยดน้ำเกิดการเสียรูป. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำไม่ได้หดตัวจนกลับไปอยู่ในสภาพตั้งต้นหลังจากที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว แต่มี



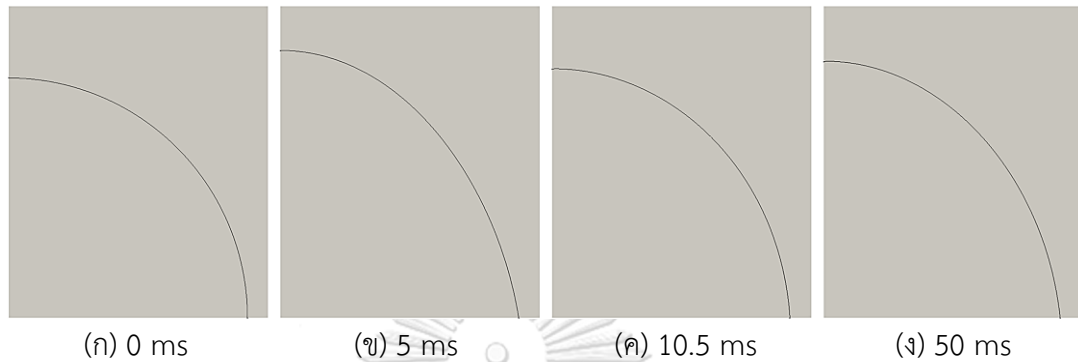
(ก) ขนาดและเวกเตอร์ของแรงไฟฟ้า



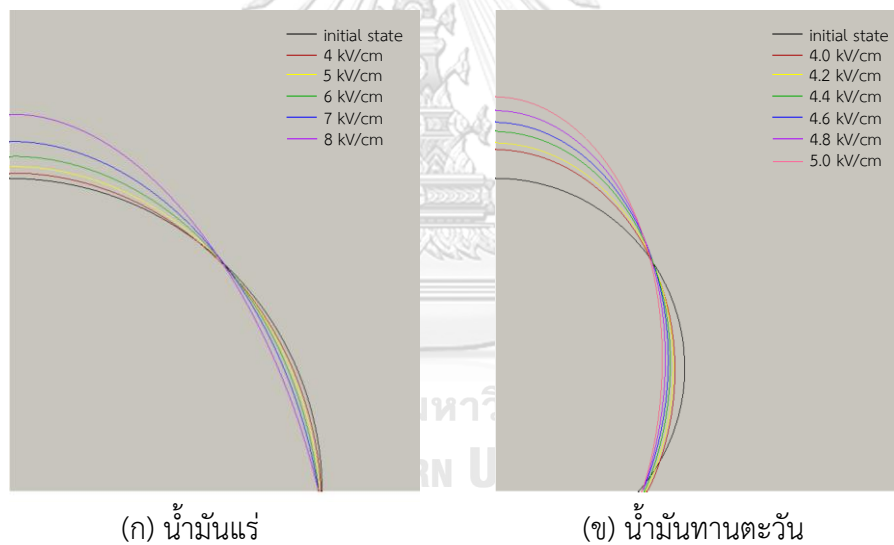
(ข) ขนาดและเวกเตอร์ของแรงตึงผิว

รูปที่ 6.3 แรงไฟฟ้าและแรงตึงผิวเมื่อหยดน้ำในน้ำมันแร่ได้รับสนามไฟฟ้า 4 kV/cm

ลักษณะที่ยืดตัวออกในแนวสนามไฟฟ้า โดยที่ความสูงของหยดมากกว่าสถานะตั้งต้น. รูปที่ 6.5 แสดงการเสีรูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันที่ได้จากการจำลอง. การเพิ่มสนามไฟฟ้าส่งผลให้การเสีรูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น.



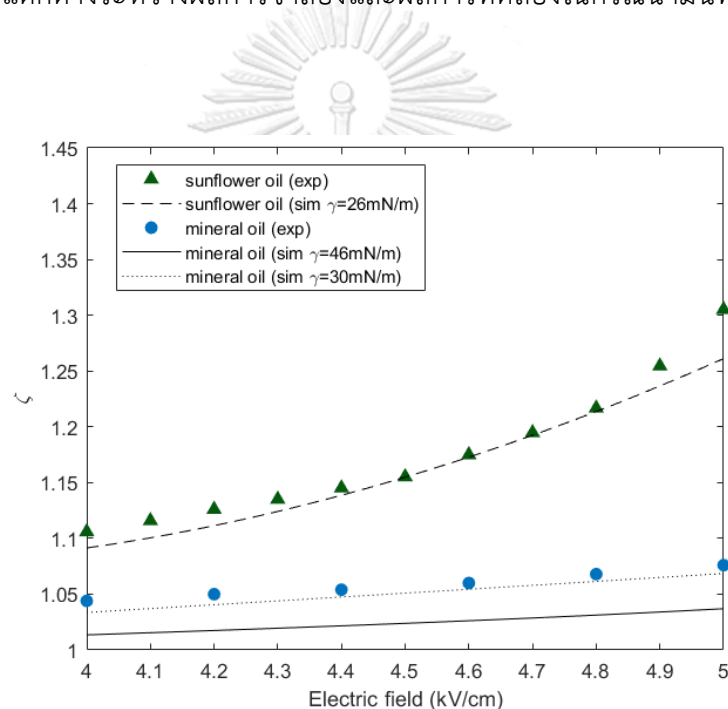
รูปที่ 6.4 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำในน้ำมันแร่ตามเวลาเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า 6 kV/cm



รูปที่ 6.5 ผลการจำลองการเสีรูปร่างของหยดน้ำตามค่าสนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรด

ผลการจำลองที่ได้ถูกนำไปหาอัตราการยืด ζ เพื่อเปรียบเทียบการเสีรูปร่างของหยดน้ำกับผลการทดลอง. รูปที่ 6.6 แสดงค่า ζ ของหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดที่ได้จากการจำลองและการทดลอง. ζ ที่ได้จากการจำลองเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับการทดลอง. สำหรับกรณีน้ำมันแร่ เมื่อใช้คุณสมบัติของน้ำมันอ้างอิงตามผู้ผลิตในการคำนวณ (46 mN/m) อัตราการยืดของหยดน้ำที่ได้จากการจำลองต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง. ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองเฉลี่ยอยู่ที่ 3.3% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของเศษหยดน้ำในน้ำมันที่เกิดขึ้นในการทดลอง. เนื่องจากปริมาณน้ำมันมีจำกัด น้ำมันแร่จึงถูกนำมาใช้ซ้ำในการทดลอง

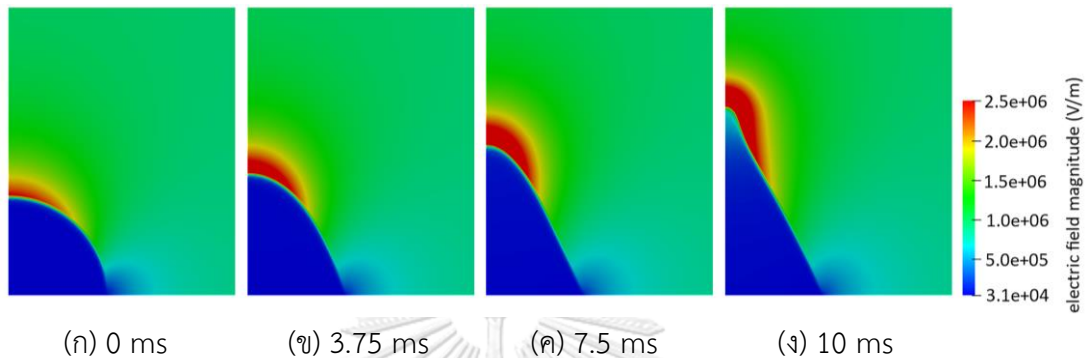
หลังจากที่หยดน้ำถูกบ่อนแรงดันจนเกิดการแยกตัวแล้ว. การปนเปื้อนในน้ำมันส่งผลให้ความตึงผิวของน้ำมันลดลง. ดังนั้น อัตราการยึดของหยดน้ำที่วัดได้จากการทดลองจึงมีค่าสูงกว่าการจำลอง. ผู้วิจัยได้ปรับลดสัมประสิทธิ์ความตึงผิวที่ใช้ในการจำลองของกรณีน้ำมันแร่ลงเหลือ 30 mN/m. ผลที่ได้พบว่าอัตราการยึดตัวของหยดน้ำที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับผลทดลอง โดยความแตกต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.7%. สำหรับกรณีน้ำมันทานตะวัน ค่าสัมประสิทธิ์ตึงผิวที่ใช้ในการจำลองเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D971-12. ผลการทดสอบน้ำมันตามมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ค. รวมทั้ง การทดลองในกรณีน้ำมันทานตะวันมีการเปลี่ยนน้ำมันใหม่ทุกครั้งหลังจากที่หยดน้ำเกิดการแยกตัวแล้ว. ผลที่ได้พบว่าการจำลองสามารถแสดงการยึดตัวของหยดน้ำได้ใกล้เคียงกับการทดลอง. ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองในกรณีน้ำมันทานตะวันมีค่าเฉลี่ย 1%.



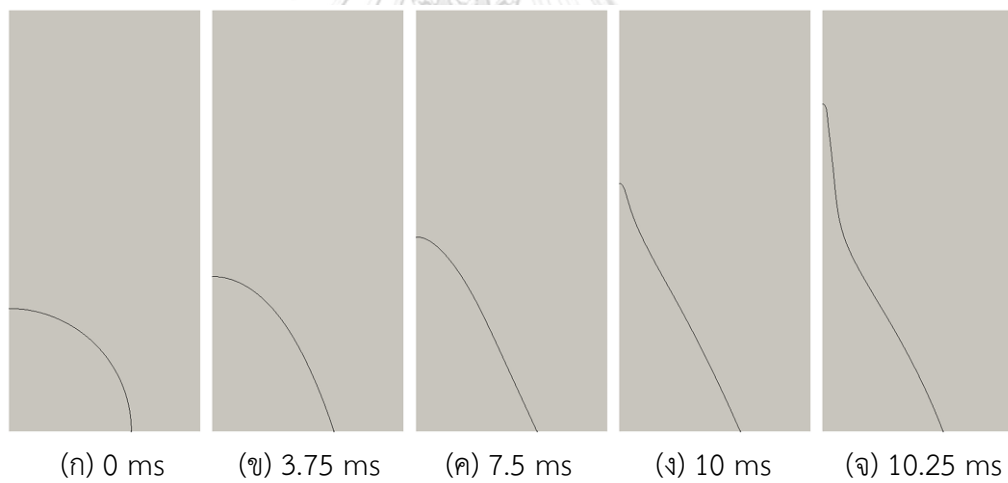
รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบอัตราการยึดที่ได้จากการจำลองและทดลองในกรณีหยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรด

เมื่อสนามไฟฟ้าถูกเพิ่มจนถึงค่าวิกฤต หยดน้ำเกิดการยึดตัวออกสูงจนมีลักษณะเป็นกรวยแหลม. ความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณส่วนปลายหยดน้ำเพิ่มขึ้นสูงขึ้น. รูปที่ 6.7 แสดงความเข้มของสนามไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยด. ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงส่งผลให้แรงไฟฟ้ามีอิทธิพลเหนือแรงตึงผิว. หยดน้ำจึงถูกดึงให้ยึดออกจนเกิดการเสถียรภาพ. ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้หยดน้ำเสถียรภาพในการจำลองกรณีน้ำมันแร่มีค่า 9 kV/cm และกรณีน้ำมันทานตะวันมีค่า 5.3 kV/cm ตามลำดับ. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำเมื่อเกิดการเสถียรภาพแสดงดังรูปที่ 6.8. หยดน้ำที่สภาวะตั้งต้นในรูป 6.8 (ก) ยึดออกหลังจากได้รับสนามไฟฟ้า. การยึดตัวของหยดน้ำเพิ่ม

สูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 6.8 (ข) และ (ค) จนกระทั่งบริเวณส่วนปลายด้านบนของหยดมีลักษณะเป็นทรงกรวยปลายแหลมในรูปที่ 6.8 (ง). หลังจากนั้น บริเวณส่วนปลายของหยดน้ำยืดออก โดยไม่มีการหดตัวกลับในรูปที่ 6.8 (จ). สภาวะดังกล่าวบ่งบอกว่าหยดน้ำเกิดการเสียเสถียรภาพ. เมื่อเวลาผ่านไป ปลายหยดน้ำจะยืดตัวจนแตะขอบเขตด้านบนของแบบจำลอง.



รูปที่ 6.7 ความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำในน้ำมันแร่ได้รับสนามไฟฟ้า 9 kV/cm



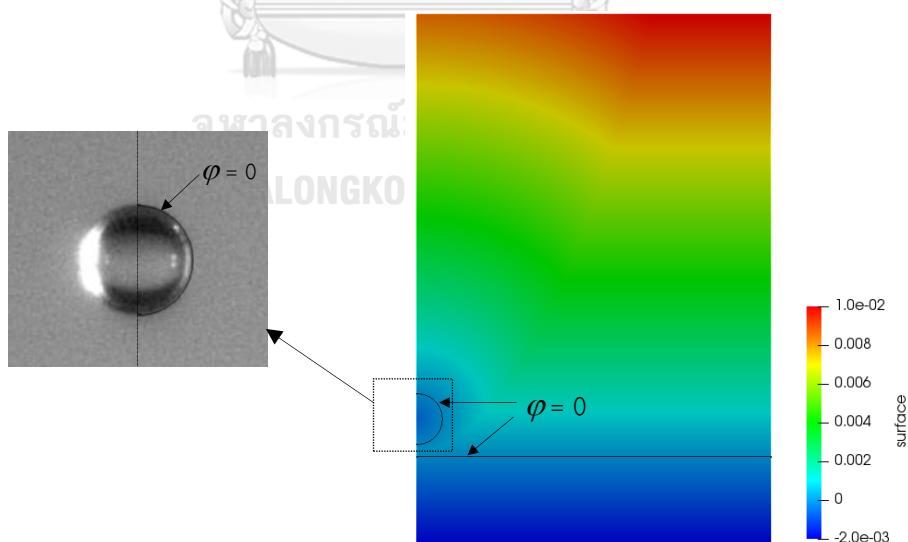
รูปที่ 6.8 การเปลี่ยนรูปร่างของหยดน้ำเมื่อเกิดการเสียเสถียรภาพ

ทั้งนี้ การจำลองไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตเหมือนกับผลการทดลอง แต่หยดน้ำกลับถูกดึงให้ยืดจนแตะอิเล็กโทรดด้านบนแทน. ข้อจำกัดที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากเอลิเมนต์ที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการคำนวณรูปร่างของหยดน้ำได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากความละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองลดลงตามระยะทางที่ห่างจากหยดน้ำในสภาวะตั้งต้นมากขึ้น. การคำนวณจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดมากเมื่อหยดน้ำเปลี่ยนรูปร่างจนมีลักษณะเป็นปลายแหลม. อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความละเอียดของเอลิเมนต์ส่งผลให้เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณนานเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากการตั้งค่าเอลิเมนต์ที่ใช้ในปัจจุบันใช้เวลาการ

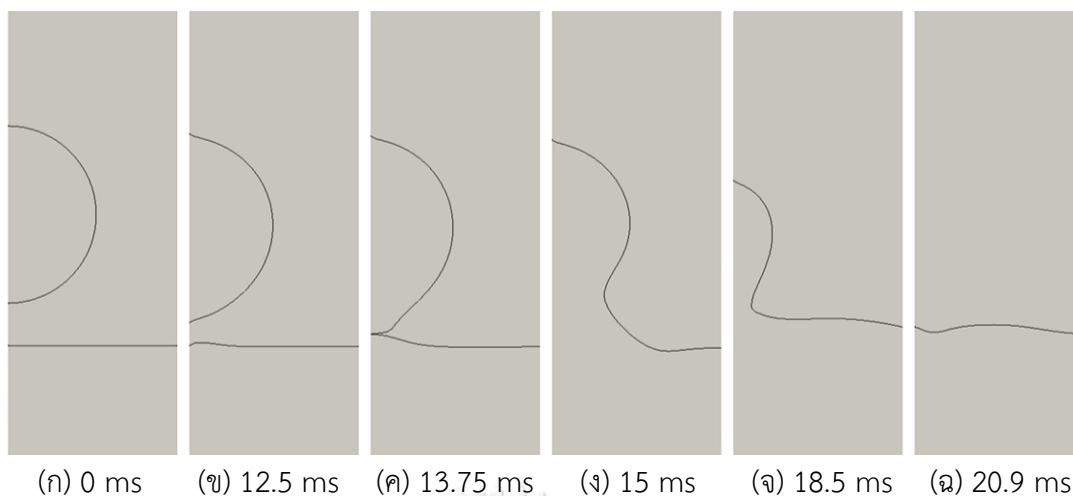
คำนวณต่อหนึ่งค่าสนามไฟฟ้านานถึง 30 ชั่วโมงแล้ว. รวมทั้ง การปรับความละเอียดของเอลิเมนต์ตามชั้นเวลาเพื่อให้สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงหยดน้ำได้แม่นยำมีความซับซ้อน. แม้ว่าผลการจำลองไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำได้ แต่การเสียเสถียรภาพของหยดน้ำที่เกิดขึ้นในการจำลองสามารถใช้ทำนายค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตได้. ความคาดเคลื่อนของค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตระหว่างการจำลองและการทดลองของน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวันมีค่า 13% และ 3.8% ตามลำดับ.

6.2 ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

รูปที่ 6.9 แสดงผลการคำนวณค่า φ ที่สภาวะตั้งต้นเมื่อหยดน้ำลอยตัวอยู่ในตัวกลางน้ำมัน และการเปรียบเทียบรูปร่างของหยดน้ำกับผลการทดลอง. บริเวณที่ $\varphi < 0$ คือหยดน้ำและผิวน้ำด้านล่าง. หยดน้ำที่สภาวะตั้งต้นที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมสามารถแสดงรูปร่างได้เหมือนผลการทดลอง. เมื่อหยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้า ผลการจำลองที่ได้พบว่าหยดน้ำสามารถเคลื่อนที่ลงมาและรวมตัวเข้าหาผิวน้ำด้านล่าง. รูปแบบการรวมตัวที่เกิดขึ้นเป็นแบบสมมาตร. รูปที่ 6.10 แสดงผลการจำลองของเส้น $\varphi = 0$ กรณีที่หยดน้ำในน้ำมันแร่ได้รับสนามไฟฟ้า 1 kV/cm. หยดน้ำที่สภาวะตั้งต้นในรูปที่ 6.10 (ก) ได้รับสนามไฟฟ้าและเกิดการยืดตัวออกเล็กน้อยในรูปที่ 6.10 (ข). จากนั้น หยดน้ำเคลื่อนที่ลงด้วยแรงไฟฟ้าจนกระทั่งสัมผัสและเกิดการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำทั้งหมดในรูปที่ 6.10 (ค) – (ฉ).



รูปที่ 6.9 ค่า φ ที่สภาวะตั้งต้นในกรณีการรวมตัวของหยดน้ำและการเปรียบเทียบรูปร่างกับผลการทดลอง



รูปที่ 6.10 ผลจำลองการรวมตัวของน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันแร่ที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm

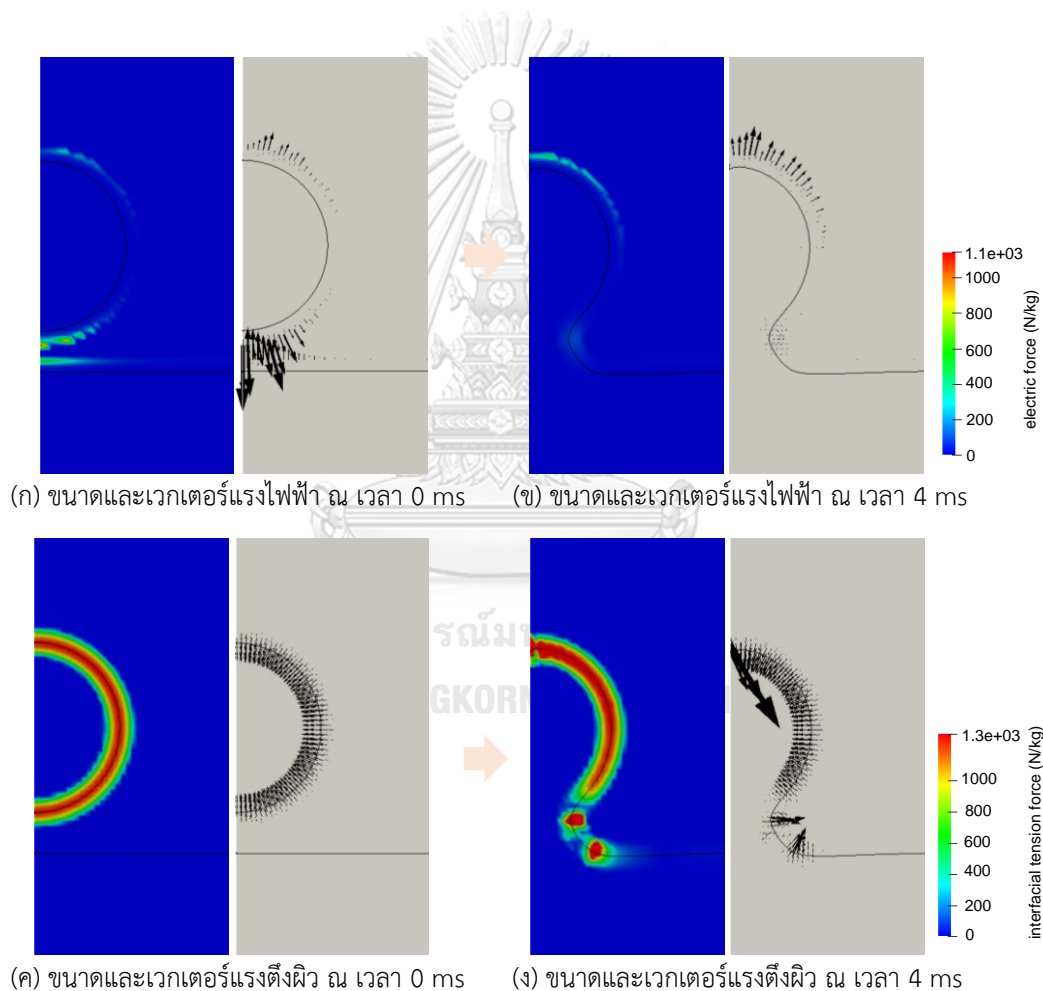
เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น หยดน้ำในน้ำมันแร่ยังคงเคลื่อนที่ลงมาและเกิดการรวมตัวกับผิวหน้า โดยที่การเสียรูปและความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำเพิ่มขึ้น. รูปที่ 6.11 แสดงการรวมตัวของหยดน้ำในน้ำมันแร่และผิวหน้าที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm. ที่สนามไฟฟ้าสูง หยดน้ำสามารถรวมตัวเข้าหาผิวน้ำได้เร็วขึ้น. อย่างไรก็ตาม รูปแบบการรวมตัวยังคงเป็นรูปแบบสมมาตร ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองที่หยดน้ำรวมตัวแบบเพียงบางส่วน. การจำลองไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำทุติยภูมิ แม้ว่าหยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้าสูงก็ตาม.



รูปที่ 6.11 ผลจำลองการรวมตัวของน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันแร่ที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm

ผลการจำลองแสดงลักษณะของแรงไฟฟ้าและแรงตึงผิวที่กระทำกับหยดน้ำเมื่อหยดน้ำเริ่มได้รับสนามไฟฟ้าและในระหว่างการรวมตัวกับผิวน้ำในรูปที่ 6.12. หยดน้ำเริ่มได้รับสนามไฟฟ้าส่งผล

ให้มีแรงไฟฟ้ากระทำกับหยดน้ำและผิวน้ำดังรูปที่ 6.12 (ก). แรงไฟฟ้าที่กระทำกับบริเวณด้านล่างของหยดน้ำมีค่าสูงและมีทิศลง ส่งผลให้หยดน้ำสามารถเคลื่อนที่ลงสู่ผิวน้ำและเกิดการเสียรูปในระหว่างการเคลื่อนที่. บริเวณผิวน้ำมีแรงไฟฟ้ากระทำในทิศขึ้นโดยที่ขนาดของแรงมีค่าต่ำ. ผิวน้ำจึงเกิดการยกตัวขึ้นเล็กน้อย. รูปที่ 6.12 (ค) แสดงให้เห็นว่าแรงดึงผิวมีทิศพุ่งเข้าตามแนวผิวของหยดน้ำเพื่อคงรูปร่างของหยด หลังจากที่ยอดน้ำเริ่มได้รับสนามไฟฟ้า. เมื่อหยดน้ำเคลื่อนที่ลงมาและเกิดการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำแล้วในรูปที่ 6.12 (ข) แรงไฟฟ้าบริเวณด้านบนของหยดมีค่าสูงและมีทิศขึ้น. ในขณะที่แรงดึงผิวบริเวณส่วนด้านบนของหยดน้ำมีทิศพุ่งเข้าและต้านแรงไฟฟ้าดังรูปที่ 6.12 (ง). แรงดึงผิวมีขนาดสูงกว่าแรงไฟฟ้าจึงส่งผลให้หยดน้ำรวมตัวเข้าหาผิวน้ำจนหมด.

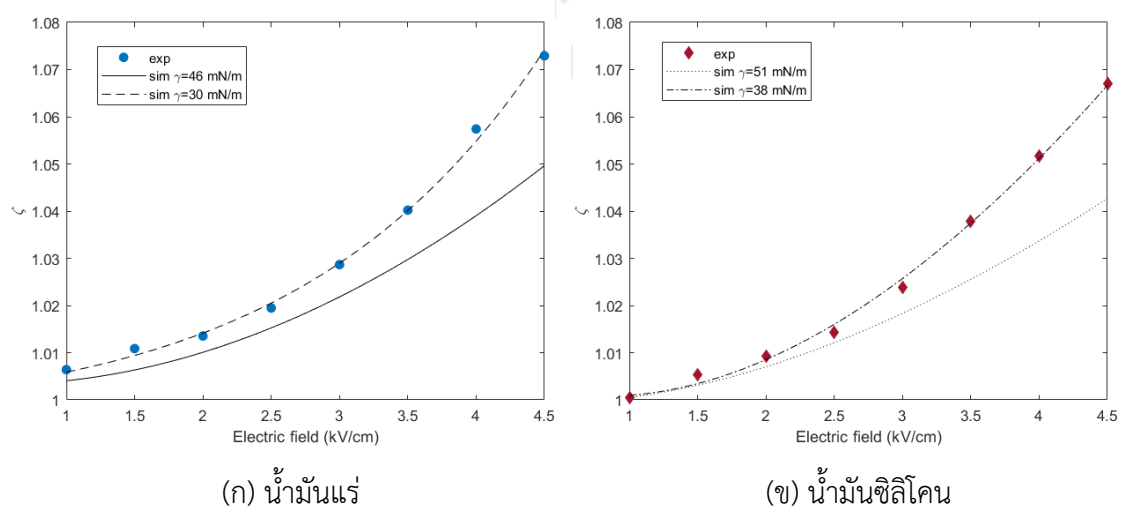


รูปที่ 6.12 ลักษณะแรงไฟฟ้าและแรงดึงผิวเมื่อหยดน้ำในน้ำมันแร่รวมตัวกับผิวน้ำที่สนามไฟฟ้าขนาด 3 kV/cm

สำหรับกรณีน้ำมันซิลิโคน หยดน้ำเกิดการรวมตัวแบบสมบูรณ์เช่นเดียวกันกับน้ำมันแร่. ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนแนบในภาคผนวก ง. จากการเปรียบเทียบผลการ

จำลองของน้ำมันทั้งสองชนิด หยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนมีความเร็วการเคลื่อนที่ต่ำกว่าน้ำมันแร่ ที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm หยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนมีความเร็วเฉลี่ย 0.01 m/s ในขณะที่หยดน้ำในน้ำมันแรมีค่าเป็น 0.02 m/s. ความหนืดและความหนาแน่นของน้ำมันซิลิโคนต้านการเคลื่อนที่ของหยดน้ำด้วยแรงไฟฟ้า ส่งผลให้หยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนเคลื่อนที่ได้ช้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง. หลังจากที่หยดน้ำสัมผัสกับผิวน้ำแล้ว หยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดใช้เวลาในการรวมตัวใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับการทดลอง.

จากทั้งผลการจำลองและผลการทดลอง การเสียรูปของหยดน้ำก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกับผิวน้ำด้านล่างถูกสังเกตเห็นได้. รูปที่ 6.13 แสดงค่าอัตราการยึดของหยดน้ำก่อนที่จะรวมตัวกับผิวน้ำที่ได้จากการจำลองเทียบกับผลการทดลอง. ในกรณีที่อ้างอิงค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวตามผู้ผลิต น้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคนมีค่า 0.046 และ 0.051 N/m ตามลำดับ. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการยึดของหยดน้ำในน้ำมันทั้งสองชนิดที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่าการทดลอง. ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองมีค่าสูงถึง 2.3% เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูง. ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวที่ใช้ในการจำลอง. กรณีน้ำมันแร่ถูกปรับลดลงให้มีค่าเป็น 0.03 N/m เช่นเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อที่ 6.1. ในขณะที่น้ำมันซิลิโคนถูกปรับลดสัมประสิทธิ์ความตึงผิวลงจนเหลือ 0.038 N/m. อัตราการยึดของหยดน้ำที่ได้จากการจำลองเมื่อสัมประสิทธิ์ความตึงผิวถูกปรับมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง. ความคลาดเคลื่อนระหว่างการจำลองและการทดลองมีค่าไม่เกิน 0.2%. ทั้งนี้ น้ำมันซิลิโคนถูกนำไปทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำและน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D971-12 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่ใช้ในการจำลอง. ผลการทดสอบตามมาตรฐานที่ได้

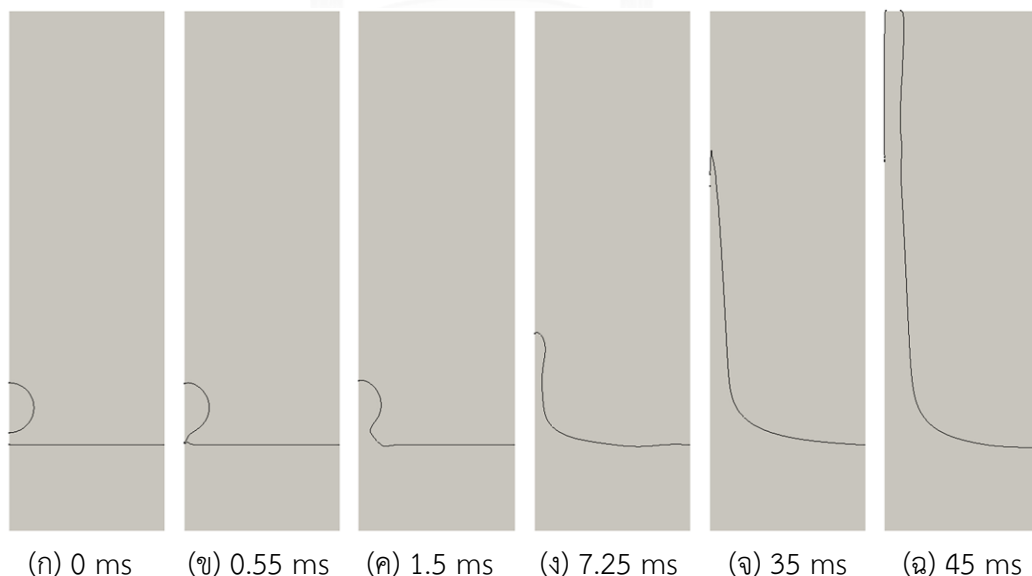


รูปที่ 6.13 อัตราการยึดของหยดน้ำที่ไม่มีประจุก่อนจะรวมตัวกับผิวน้ำที่ได้จากผลการจำลองและทดลอง

สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวที่ถูกปรับลดลงในการจำลอง. ดังนั้น ผลการจำลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการคำนวณที่ใช้ร่วมกับวิธีเลเวลเซตสามารถแสดงการเสียรูปของหยดน้ำได้ค่อนข้างแม่นยำทั้งในกรณีที่หยดน้ำลอยอยู่ในตัวกลางน้ำมันและกรณีที่หยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรด.

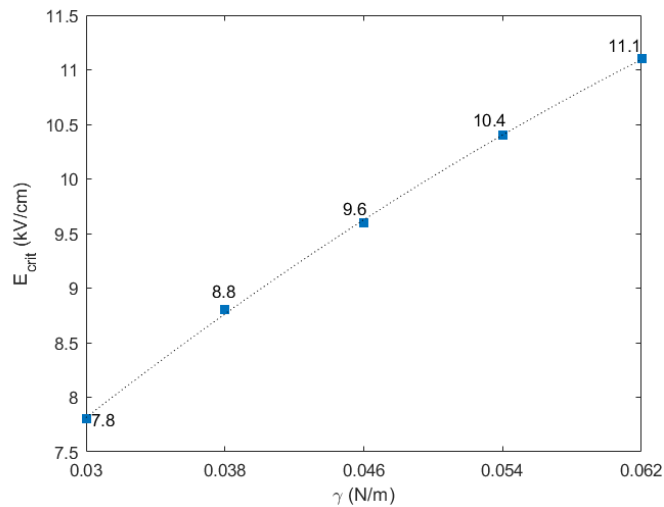
เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มจนถึงค่าวิกฤต หยดน้ำเกิดการเสียเสถียรภาพในระหว่างที่กำลังรวมตัวกับผิวน้ำ. รูปที่ 6.14 แสดงการเสียเสถียรภาพของหยดน้ำที่เกิดขึ้น. หลังจากที่หยดน้ำได้รับสนามไฟฟ้าในรูปที่ 6.14 (ก) หยดน้ำเกิดการยืดตัวออกจนบริเวณส่วนด้านล่างของหยดน้ำแตะเข้าหาผิวน้ำในรูปที่ 6.14 (ข). จากนั้น หยดน้ำเกิดการเชื่อมรวมเข้าหาผิวน้ำในรูปที่ 6.14 (ค). ในระหว่างการรวมตัว บริเวณส่วนด้านบนของหยดน้ำถูกดึงด้วยแรงไฟฟ้าในทิศขึ้น จนกระทั่งหยดน้ำยืดตัวสูงดังรูปที่ 6.14 (ง). เนื่องจากแรงไฟฟ้าเพียงพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของหยดน้ำและก่อให้เกิดการเสียเสถียรภาพ. ดังนั้น หยดน้ำจึงยืดตัวจนมีลักษณะเป็นปลายแหลมและแตกอิเล็กโทรดด้านบนในรูปที่ 6.14 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ. ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองในกรณีน้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคนมีค่า 9.6 kV/cm และ 10.4 kV/cm ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการรวมตัวของหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนดีกว่าน้ำมันแร่เนื่องจากคุณสมบัติความตึงผิวของน้ำมันซิลิโคนที่ต้านแรงไฟฟ้าได้ดีกว่า.

ค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการเสียเสถียรภาพของหยดน้ำ. รูปที่ 6.15 แสดงแนวโน้มค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของหยดน้ำในน้ำมันแร่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวถูกปรับเปลี่ยนและลดลง. เมื่อสัมประสิทธิ์ความตึงผิวเพิ่มขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตมีค่าสูงโดยมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น. อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองพบว่ารูปแบบการรวมตัวที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่าค่าวิกฤตยังคงเป็นรูปแบบสมบูรณ์แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวเปลี่ยนแปลง.



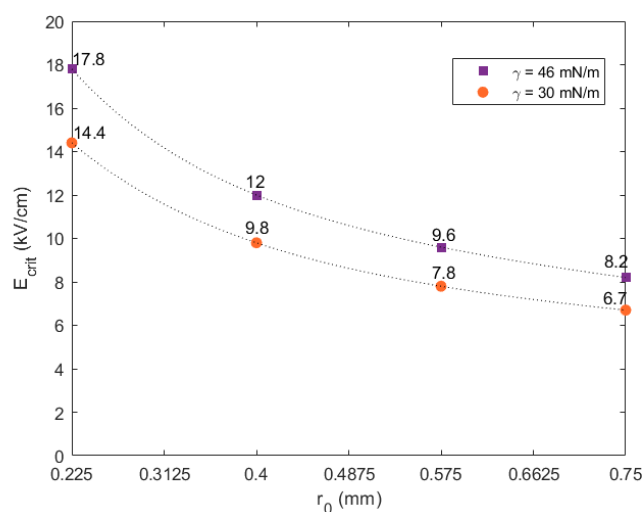
(ก) 0 ms (ข) 0.55 ms (ค) 1.5 ms (ง) 7.25 ms (จ) 35 ms (ฉ) 45 ms

รูปที่ 6.14 การเสียเสถียรภาพของหยดน้ำในน้ำมันแร่ในการจำลองระหว่างการรวมตัวที่ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความตึงผิวและค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต

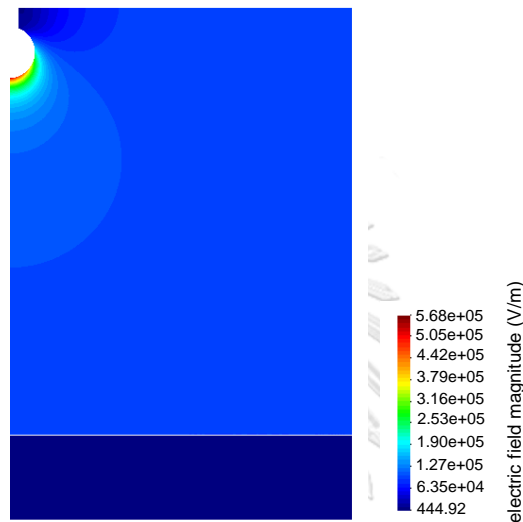
นอกจากคุณสมบัติของน้ำและน้ำมันที่มีผลต่อเสถียรภาพของหยดน้ำแล้ว ขนาดของหยดน้ำเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ. ในที่นี้ เสถียรภาพของหยดน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันแร่ โดยที่ขนาดรัศมีหยดน้ำ r_0 มีค่า 0.225 – 0.75 mm ถูกตรวจสอบ. รูปที่ 6.16 แสดงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตตามขนาดของหยดน้ำ. ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำขนาดเล็กมีเสถียรภาพที่ดีกว่า. เมื่อหยดน้ำมีขนาดเล็ก แรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำลดลง. ในขณะที่แรงตึงผิวซึ่งขึ้นกับรัศมีความโค้งหยดน้ำเพิ่มขึ้น. ดังนั้นหยดน้ำขนาดเล็กจำเป็นต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อให้แรงไฟฟ้าเพียงพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวและก่อให้เกิดการเสถียรภาพได้. ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อหยดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น. จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.3 ที่หยดน้ำเกิดการแตกตัว. หยดน้ำที่หลีกเลี่ยงการแตกตัวแทบจะไม่มีประจุและมีขนาดของหยดน้ำเล็กลง สามารถรวมตัวกับฝิวน้ำได้ บ่งบอกว่าหยดน้ำขนาดเล็กมีเสถียรภาพที่ดีกว่าหยดน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง.



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีหยดน้ำและค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต

6.3 ผลการจำลองขนาดประจุของหยดน้ำ

ในการจำลอง หยดน้ำซึ่งอยู่บริเวณปลายเข็มได้รับสนามไฟฟ้าจากการป้อนแรงดัน V_0 ที่ขอบเขตด้านล่างของแบบจำลอง. ในที่นี้ V_0 มีขนาดตั้งแต่ 1 – 4.5 kV และตัวกลางที่ใช้ในการคำนวณคือน้ำมันแร่. รูปที่ 6.17 แสดงผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำอยู่ที่บริเวณปลายเข็ม และได้รับสนามไฟฟ้าขนาด 1 kV/cm ($V_0 = 1$ kV).



รูปที่ 6.17 ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำอยู่ที่ปลายเข็มและได้รับสนามไฟฟ้า 1 kV/cm

ประจุของหยดน้ำ Q_c คำนวณได้จากปริพันธ์ของสนามไฟฟ้าในบริเวณพื้นที่ผิวปิดรอบหยดน้ำ. เนื่องจากการคำนวณสนามไฟฟ้าใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย. จากสมการที่ 2.7 Q_c สามารถหาได้จากผลรวมของประจุทุกเอลิเมนต์บนผิวหยดน้ำ โดยเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังต่อไปนี้.

$$Q_c = \sum_e \int \epsilon_0 \epsilon_r E_n dA = \sum_e \int_{-1}^1 2\pi(\epsilon_0 \epsilon_r E_n) \rho ||| dL_1 \quad (6.1)$$

โดยที่

$$||| = \left| \frac{\partial}{\partial L_1} \sum_{k=1}^3 N_k \mathbf{x}_k \right| \quad (6.2)$$

เมื่อ e คือ เอลิเมนต์บนขอบเขตหยดน้ำ

ϵ_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ตัวกลาง ซึ่งในที่นี้คือ น้ำมันแร่

E_n คือ สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิวหยดน้ำ dA ซึ่งอยู่บนเอลิเมนต์ e

\mathbf{x}_k คือ ตำแหน่งจุดโหนดซึ่งประกอบไปด้วยพิกัด ρ และ z

N_k คือ ฟังก์ชันในการประมาณ. สำหรับเอลิเมนต์แบบเส้นอันดับ 2 N_k อ้างอิงตามสมการที่ 2.29.

ตำแหน่งพิกัดและค่าสนามไฟฟ้าของจุดโหนดที่อยู่บนผิวหยดน้ำที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Elmer รวมถึงวิธีการดึงข้อมูลจากโปรแกรมแสดงในภาคผนวก จ.

คำตอบของปริพันธ์หาได้จากการประมาณด้วยวิธีเกาส์ควอดราเจอร์ (Gauss quadrature). สมการที่ 6.1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$Q_c = \sum_e \sum_{i=1}^8 w_i f(x_i) \quad (6.3)$$

โดยที่

$$f(x_i) = 2\pi(\epsilon_0 \epsilon_r E_n) \rho |J| \quad (6.4)$$

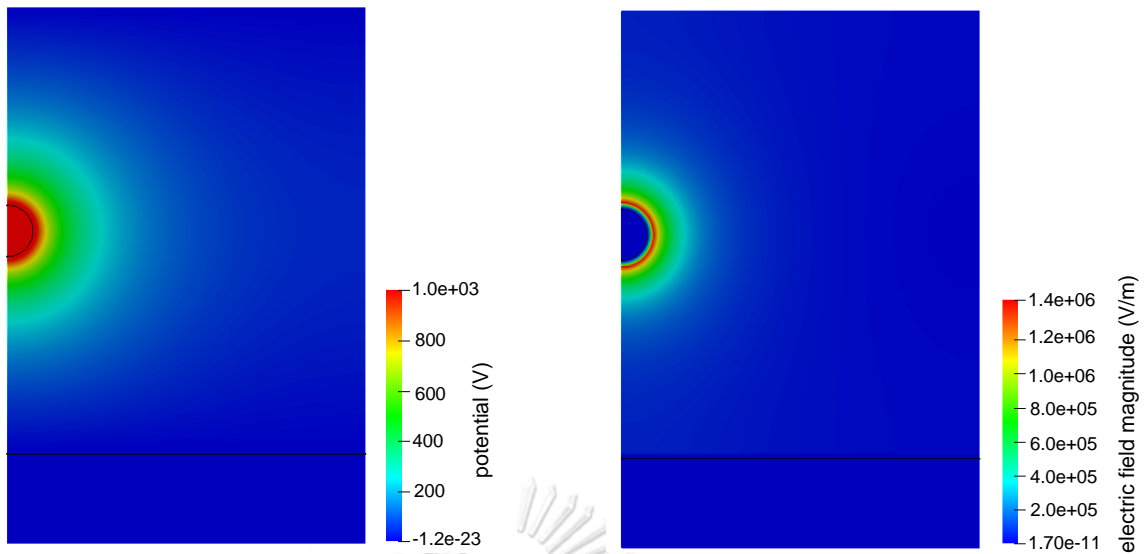
เมื่อ w_i และ x_i คือ น้ำหนักและตำแหน่งของจุดสุ่ม. $|J|$ คือ จาร์โคเบียนของพิกัดตำแหน่ง ซึ่งหาได้จากสมการที่ 6.2. ค่าของน้ำหนักและตำแหน่งจุดสุ่มแสดงในภาคผนวก จ.

ประจุ Q_c ของหยดน้ำในน้ำมันแร่ที่ได้จากการคำนวณมีขนาดเป็น 19.267 pC ต่อแรงดัน $V_0 = 1$ kV. การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ใช้ส่งผลให้ขนาดประจุของหยดน้ำสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของประจุตามแรงดันเป็นแบบเชิงเส้น.

6.4 ผลการจำลองประจุของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV

การจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุใช้หลักการทับซ้อนในการพิจารณาผลประจุของหยดน้ำ. การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าถูกแบ่งเป็นกรณีที่ป้อนแรงดันให้กับแบบจำลองและไม่คิดประจุของหยดน้ำ และกรณีที่ไม่ป้อนแรงดันให้กับแบบจำลองและพิจารณาหยดน้ำมีประจุ. ในกรณีที่ 2 หยดน้ำไม่ได้ถูกกำหนดให้มีค่าประจุโดยตรง แต่ถูกกำหนดให้มีค่าเงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า. ผลการจำลองเมื่อกำหนดให้หยดน้ำที่อยู่ในตัวกลางน้ำมันแร่เป็นเงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV แสดงในรูปที่ 6.18.

เนื่องจากการคำนวณใช้วิธีการเลเวลเซตในการระบุขอบเขตตัวกลางระหว่างน้ำและน้ำมันแบบจำลองจึงไม่มีเส้นขอบเขตของหยดน้ำ. การดึงค่าสนามไฟฟ้าแต่ละจุดโหนดบนผิวหยดน้ำเพื่อใช้ในการคำนวณประจุทำได้ยาก. ดังนั้น การคำนวณประจุในกรณีนี้จึงพิจารณาพื้นที่ปิดจากแนวขอบเขตด้านบนของแบบจำลอง ($z = 12$ mm) และแนวผิวระนาบน้ำ ($z = 2$ mm). ประจุของหยด

(ก) ค่าศักย์ไฟฟ้า ϕ_2

(ข) สนามไฟฟ้า

รูปที่ 6.18 ผลการจำลองเมื่อกำหนดให้หยดน้ำในน้ำมันแร่เป็นเงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV

น้ำเมื่อกำหนดให้หยดน้ำมีค่าศักย์ไฟฟ้า 1 kV Q_{1kV} หาได้จาก

$$Q_{1kV} = \sum_{e_1} \int \epsilon_0 \epsilon_r E_{z1} dA_1 + \sum_{e_2} \int \epsilon_0 \epsilon_r E_{z2} dA_2 \quad (6.5)$$

เมื่อ e_1 และ e_2 คือ เอลิเมนต์บนแนวขอบเขตด้านบนของแบบจำลองและระนาบน้ำ

E_{z1} และ dA_1 คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน z และพื้นที่ผิวปิดบริเวณขอบเขตด้านบนของแบบจำลอง

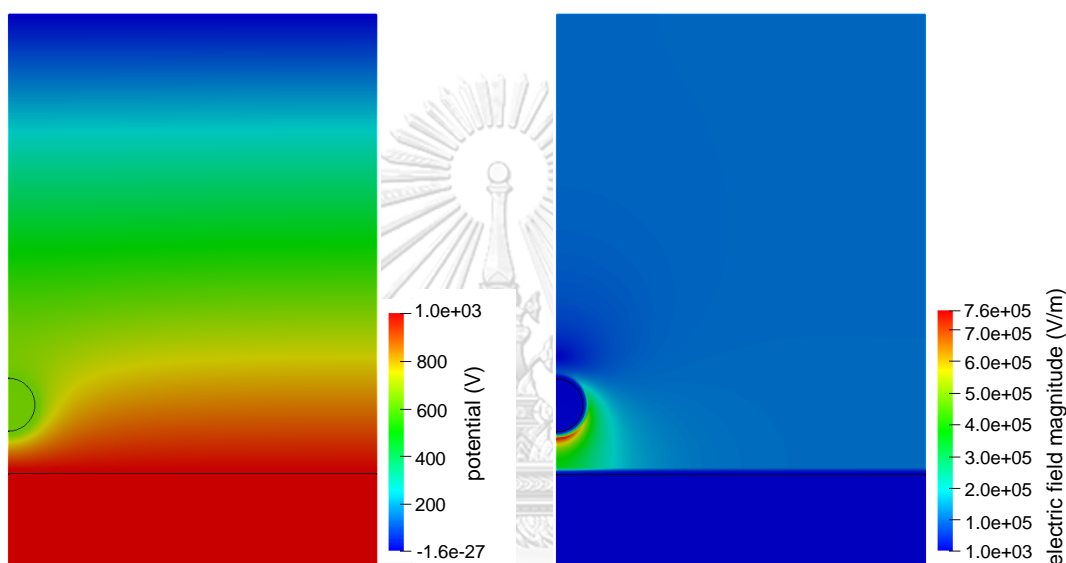
E_{z2} และ dA_2 คือ สนามไฟฟ้าในแนวแกน z และพื้นที่ผิวปิดบริเวณระนาบน้ำ

การหาผลเฉลยของปริพันธ์ใช้หลักการเหมือนกับหัวข้อที่ 6.3 โดยที่ฟังก์ชันในการประมาณ N_k ในกรณีนี้อ้างอิงจากสมการที่ 2.28 เนื่องจากแบบจำลองถูกแบ่งด้วยเอลิเมนต์อันดับ 1. ตำแหน่งพิกัดและค่าสนามไฟฟ้าของจุดโหนดที่อยู่บนแนวขอบเขตของแบบจำลองและผิวน้ำแสดงในภาคผนวก ฉ.

ผลการคำนวณที่ได้พบว่า Q_{1kV} มีขนาด 85.17 pC เมื่อกำหนดให้หยดน้ำมีค่าศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV. ทั้งนี้ การจำลองกำหนดให้หยดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขตศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV. ดังนั้น ผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าทุกจุดโหนด ϕ_2 ในแต่ละชั้นเวลาต้องถูกปรับค่าเป็น ϕ'_2 ตามสมการที่ 4.8. เมื่อหยดน้ำมีประจุ $-Q_c$ ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าทุกจุดโหนด ϕ'_2 มีค่าเป็น $-0.226\phi_2$ ต่อแรงดัน $V_0 = 1$ kV.

6.5 ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า

ด้วยหลักการทับซ้อน ค่าศักย์ไฟฟ้าของหยดน้ำหาได้จากผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าทุกจุดโหนดเมื่อหยดน้ำไม่มีประจุและป้อนแรงดันให้แบบจำลอง และค่าศักย์ไฟฟ้าทุกจุดโหนดเมื่อหยดน้ำมีค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบเท่ากับประจุของหยดน้ำ ตามสมการที่ 4.9. รูปที่ 6.19 แสดงผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่ได้เมื่อพิจารณาผลประจุของหยดน้ำในกรณีที่ป้อนแรงดัน $V_0 = 1$ kV ให้แบบจำลอง.



(ก) ค่าศักย์ไฟฟ้า

(ข) สนามไฟฟ้า

รูปที่ 6.19 ผลการจำลองเมื่อกำหนดให้หยดน้ำมีประจุและอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าขนาด 1 kV/cm

ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า หยดน้ำได้รับแรงไฟฟ้าโดยที่ขนาดของแรงสูงสุดที่อยู่บริเวณด้านล่างหยดน้ำ. แรงไฟฟ้ากระทำกับหยดน้ำในทิศลงส่งผลให้หยดน้ำเคลื่อนที่ลงสู่ผิวน้ำ. รูปที่ 6.20 แสดงผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า 1 kV/cm. หยดน้ำที่สถานะตั้งต้นในรูปที่ 6.20 (ก) เกิดการยัดตัวในระหว่างการเคลื่อนที่ลงหลังจากได้รับสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 6.20 (ข). หลังจากที่ยืดเคลื่อนที่จนสัมผัสกับผิวน้ำในรูปที่ 6.20 (ค) หยดน้ำเกิดการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำจนหมด ดังแสดงในรูปที่ 6.20 (ง) – (ฉ).

การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าส่งผลให้หยดน้ำที่มีประจุเสียรูปในระหว่างการเคลื่อนที่ รวมทั้งมีความเร็วการเคลื่อนที่ของหยดน้ำเพิ่มขึ้น. หลังจากที่ยืดเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวน้ำแล้ว หยดน้ำยังคงรวมตัวเข้าหาผิวน้ำจนหมด. รูปที่ 6.21 แสดงการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุและผิวน้ำเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า 3 kV/cm. ทั้งนี้ ผลการจำลองพบว่าหลังจากที่ยืดเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวน้ำและเกิดการเชื่อมเข้าผิวน้ำแล้ว

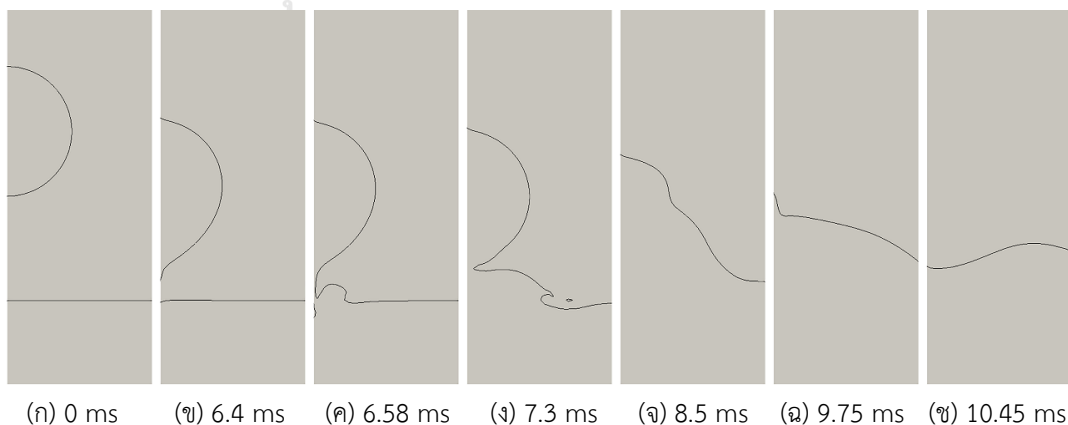
ในรูปที่ 6.21 (ค) บริเวณส่วนด้านข้างของส่วนเชื่อมรวมถูกดึงให้กว้างขึ้นจนทำให้หยดน้ำทั้งหมดรวมเข้ากับผิวหน้าและมีลักษณะคล้ายเป็นผิวหน้าที่ยกตัวสูงแทน [(รูปที่ 6.21 (จ)]. เมื่อเวลาผ่านไประดับของผิวหน้าจะค่อยๆลดลงจนกลับสู่ระดับเดิมในที่สุด ดังรูปที่ 6.21 (ฉ) และ (ช). อย่างไรก็ตามผลการจำลองที่ได้พบว่าหยดน้ำที่มีประจุยังคงรวมตัวเข้าหาผิวหน้าจนหมดเมื่อสนามไฟฟ้าถูกเพิ่มจนถึง 4.5 kV/cm. ในขณะที่ ผลการทดลองแสดงว่าหยดน้ำในน้ำมันแร่เกิดการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า 1 – 4.1 kV/cm. รวมทั้ง การไม่รวมตัวและแตกตัวระหว่างการเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงเกิน 4.2 kV/cm และ 4.5 kV/cm ตามลำดับ. วิธีการจำลองยังคงไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำได้แม้ว่าจะพิจารณาผลของประจุด้วยก็ตาม.



(ก) 0 ms (ข) 23 ms (ค) 25.8 ms (ง) 29 ms (จ) 30.5 ms (ฉ) 31.8 ms

รูปที่ 6.20 ผลจำลองการรวมตัวของน้ำที่มีประจุในน้ำมันแร่ที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm

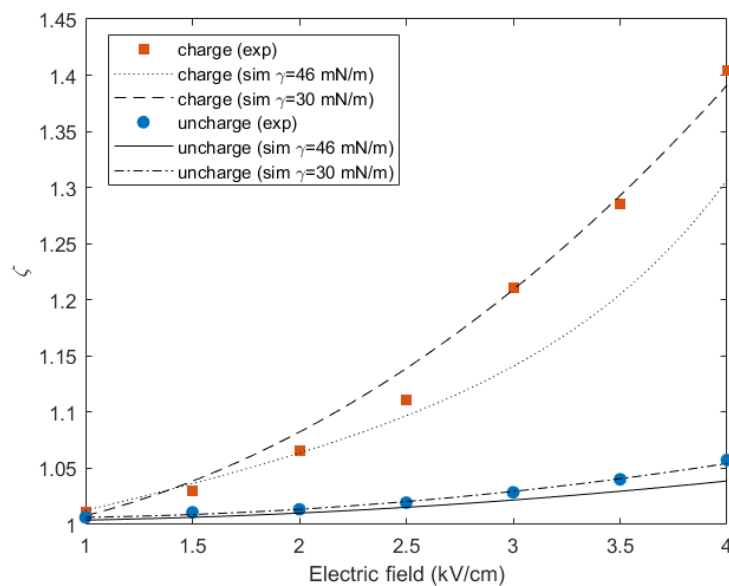
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) 0 ms (ข) 6.4 ms (ค) 6.58 ms (ง) 7.3 ms (จ) 8.5 ms (ฉ) 9.75 ms (ช) 10.45 ms

รูปที่ 6.21 ผลจำลองการรวมตัวของน้ำที่มีประจุในน้ำมันแร่ที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกรณีหยดน้ำมีประจุและไม่มีประจุ ผลที่ได้แสดงว่าหยดน้ำที่มีประจุสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่ากรณีที่ไม่มีประจุ ที่สนามไฟฟ้า 1 kV/cm ในกรณีน้ำมันแร่ หยดน้ำที่มีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเฉลี่ย 0.172 m/s ในขณะที่หยดน้ำที่ไม่มีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.02 m/s. เนื่องจากประจุของหยดน้ำส่งเสริมให้แรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำเพิ่มขึ้น หยดน้ำที่มีประจุจึงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า. นอกจากนี้แล้ว แรงไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากผลของประจุยังส่งผลให้หยดน้ำเกิดการเสีรูปร่างในระหว่างการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น. รูปที่ 6.22 แสดงผลการเปรียบเทียบการเสีรูปร่างของหยดน้ำที่มีประจุและไม่มีประจุก่อนที่จะรวมตัวเข้าหาผิวน้ำ. ที่สนามไฟฟ้าเท่ากัน หยดน้ำที่มีประจุเสีรูปร่างมากกว่ากรณีที่ไม่มีประจุ. ทั้งนี้ การเสีรูปร่างของหยดน้ำที่มีประจุและไม่มีประจุที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิว 30 mN/m ในการคำนวณกรณีน้ำมันแร่. ความแตกต่างระหว่างการเสีรูปร่างของหยดน้ำที่ได้จากผลการจำลองและการทดลองในกรณีที่มีประจุเฉลี่ยอยู่ที่ 1%.



รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบอัตราการยืดของหยดน้ำที่มีและไม่มีประจุในน้ำมันแร่ที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลอง

หลังจากที่หยดน้ำสัมผัสกับผิวน้ำแล้ว ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำทั้งในกรณีที่มีประจุและไม่มีประจุรวมตัวเข้าหาผิวน้ำจนหมดเช่นเดียวกัน. แม้ว่าผลการจำลองไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวเพียงบางส่วน การแตกตัว หรือการไม่รวมตัวกันระหว่างหยดน้ำและผิวน้ำได้ แต่ผลการจำลองที่ได้พบว่าหยดน้ำที่มีประจุใช้เวลาในการรวมตัวเข้าหาผิวน้ำน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีประจุ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง.

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ การเสียรูปร่าง การเคลื่อนที่ การรวมตัว และการแยกตัวของหยดน้ำที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า. การศึกษาประกอบไปด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำ. การจำลองใช้ระเบียบวิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการปัญหาค่าศักย์ไฟฟ้า ของไหล และเลเวเซต เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดน้ำที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้า. รูปแบบที่ใช้ในการศึกษามี 2 รูปแบบ. รูปแบบที่ 1 คือหยดน้ำในน้ำมันโดยที่หยดน้ำอยู่บนอิเล็กโทรด. รูปแบบนี้ถูกใช้เพื่อศึกษาการเสียรูปและการแยกตัวของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำอยู่ติดกับอิเล็กโทรด. รูปแบบที่ 2 คือ หยดน้ำอยู่ในน้ำมันและมีระนาบนำด้านล่าง ซึ่งถูกใช้สำหรับการศึกษาการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุและไม่มีประจุกับผิวหน้าภายใต้สนามไฟฟ้า.

รูปแบบที่ 1 น้ำปราศจากไอออนมีขนาดของหยดสูง 1 mm. น้ำมันที่ใช้คือน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวัน. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสียรูปของหยดน้ำเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้น. การเสียรูปของหยดน้ำในน้ำมันทานตะวันมีค่าสูงกว่าน้ำมันแร่ เนื่องจากสภาพยอมสัมพัทธ์ที่สูงและความตึงผิวของน้ำมันที่ต่ำ. เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มจนถึงค่าวิกฤต การแยกตัวของหยดน้ำเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนปลายหยด. การจำลองสามารถแสดงการเสียรูปร่างของหยดน้ำได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1%. แม้ว่าการจำลองไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำที่เกิดขึ้นได้ แต่ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ได้จากการจำลองสามารถใช้ทำนายการแยกตัวของหยดน้ำได้. ความแตกต่างของค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอยู่ที่ 13% และ 3.9% สำหรับกรณีน้ำมันแร่และน้ำมันทานตะวัน ตามลำดับ.

รูปแบบที่ 2 น้ำปราศจากไอออนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.15 mm ในน้ำมันแร่และน้ำมันซิลิโคน. จากการทดลอง หยดน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันทั้งสองชนิดสามารถรวมตัวแบบสมบูรณ์กับผิวน้ำได้ที่สนามไฟฟ้าต่ำ. การรวมตัวแบบเพียงบางส่วนเริ่มเกิดเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 kV/cm ในกรณีน้ำมันแร่ และ 1.8 kV/cm ในกรณีน้ำมันซิลิโคน. ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของน้ำมันที่ส่งผลต่อการเสียรูปและรูปแบบการรวมตัว คือ สภาพยอมสัมพัทธ์และความตึงผิว โดยที่ความตึงผิวมีความเด่นกว่า. น้ำมันซิลิโคนซึ่งมีค่าความตึงผิวสูงจึงเสียรูปก่อนการรวมตัวต่ำและมีประสิทธิภาพในการรวมตัวกับผิวน้ำดีกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่. คุณสมบัติอื่นของน้ำมัน ได้แก่ ความหนาแน่นและความหนืด ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของหยดน้ำแต่ไม่ส่งผลต่อกระบวนการรวมตัวทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น.

สำหรับหยดน้ำที่มีประจุในรูปแบบที่ 2 ประจุเพิ่มแรงไฟฟ้าที่กระทำกับหยดน้ำ ส่งผลให้หยดน้ำใช้เวลาในการเคลื่อนที่และรวมตัวเข้าหาผิวหน้าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีประจุ. อย่างไรก็ตาม ผลของประจุส่งผลให้หยดน้ำเสีรูปร่างมากขึ้น. การรวมตัวแบบสมบูรณไม่เกิดขึ้นในน้ำมันแร่ แม้ว่าสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ. หยดน้ำรวมตัวเข้าหาผิวหน้าในรูปแบบเพียงบางส่วน. เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงจนอยู่ในช่วง 4.2 – 4.4 kV/cm หยดน้ำในน้ำมันแร่ไม่เกิดการรวมตัวกับผิวหน้า เนื่องจากหยดน้ำเสีรูปร่างจนเป็นกรวยแหลมในระหว่างการเคลื่อนที่. แรงตึงผิวไม่เพียงที่จะก่อให้เกิดการรวมตัวของหยดน้ำ. การเพิ่มสนามไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นส่งผลให้หยดน้ำเกิดการแตกตัวในระหว่างการเคลื่อนที่. สำหรับน้ำมันซิลิโคน คุณสมบัติความตึงผิวช่วยให้หยดน้ำคงรูปร่างได้ดี. หยดน้ำสามารถรวมตัวแบบสมบูรณ์ที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่า 1 kV/cm ได้ และเกิดการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนเมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น. การไม่รวมตัวหรือการแตกตัวของหยดน้ำจึงไม่พบในกรณีน้ำมันซิลิโคน. ทั้งนี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำทุติยภูมิที่เกิดจากการรวมตัวแบบเพียงบางส่วนสามารถกำจัดได้จากการเพิ่มเวลาของสนามไฟฟ้าในกระบวนการ.

ในการจำลองการรวมตัวระหว่างหยดน้ำและผิวหน้า ผลการจำลองสามารถแสดงการเสีรูปร่างของหยดน้ำที่ไม่มีประจุก่อนที่จะเกิดการรวมตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง. หลังจากหยดน้ำสัมผัสกับผิวหน้าแล้ว รูปแบบการรวมตัวที่เกิดขึ้นในการจำลองเป็นรูปแบบสมบูรณ์. การจำลองไม่สามารถแสดงการแยกตัวของหยดน้ำทุติยภูมิจากการรวมตัวบางส่วนได้เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น. แต่อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าหยดน้ำในน้ำมันซิลิโคนมีเสีรภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับผลการทดลอง. สำหรับกรณีที่หยดน้ำมีประจุ การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยหลักการทับซ้อนร่วมกับการพิจารณาผลประจุของหยดน้ำจากการกำหนดให้หยดน้ำมีค่าศักย์ไฟฟ้าสามารถใช้คำนวณการเสีรูปร่างของหยดน้ำที่มีประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ. แม้ว่าผลการจำลองไม่สามารถแสดงการรวมตัวแบบเพียงบางส่วน การไม่รวมตัว หรือการแตกตัวของหยดน้ำได้ก็ตาม แต่ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าหยดน้ำที่มีประจุใช้เวลาเคลื่อนที่และรวมตัวเข้าหาผิวหน้าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีประจุ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง.

วิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่าประจุของหยดน้ำและคุณสมบัติของน้ำมันเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งต่อจลนศาสตร์ไฟฟ้าของหยดน้ำ. ผลการวิจัยที่ได้เป็นพื้นฐานสำหรับการจัดการหยดน้ำในน้ำมันภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ. หยดน้ำที่มีประจุช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเชื่อมรวมทางไฟฟ้าในแง่ของเวลา. อย่างไรก็ตาม การใช้หยดน้ำที่มีประจุในน้ำมันที่มีคุณสมบัติความตึงผิวที่ต่ำ ดังเช่น น้ำมันแร่ มีย่านของสนามไฟฟ้าที่ควรหลีกเลี่ยง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการไม่รวมตัวของหยดน้ำและผิวหน้าและทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง.

บรรณานุกรม

1. Joneidi I. A., A.A. Shayegani, and H. Mohseni, *Electric Field Distribution under Water Droplet and Effect of Thickness and Conductivity of Pollution Layer on Polymer Insulators Using Finite Element Method*. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2013. **5**(2): p. 266-270.
2. Challagondla, N.K. and H.H. Schramm. *Electric field behavior of water drop on composite insulator surface under DC stress*. in *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2015. Sydney, NSW, Australia.
3. Aouabed, F., A. Bayadi, and R. Boudissa, *Flashover voltage of silicone insulating surface covered by water droplets under AC voltage*. Electric Power Systems Research, 2017. **143**: p. 66-72.
4. Ndoumbe, J., A. Beroual, and A.M. Imano. *Behavior of water droplets on insulator surfaces submitted to DC voltage-coalescence*. in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2012. Montreal, QC, Canada.
5. Kohtoh, M., et al., *Transformer insulating oil characteristic changes observed using accelerated degradation in consideration of field transformer conditions*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010. **17**(3): p. 808-818.
6. Suleiman, A.A., et al., *Effect of moisture on breakdown voltage and structure of palm based insulation oils*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. **21**(5): p. 2119-2126.
7. Kang, D., et al., *Experimental Qualification of the Process of Electrostatic Spray Deposition*. Coatings, 2019. **9**(5): p. 1-19.
8. Mkhize, N. and H. Bhaskaran, *Electrohydrodynamic Jet Printing: Introductory Concepts and Considerations*. Small Science, 2022. **2**(2): p. 2100073.
9. Balachandran, W., W. Machowski, and C.N. Ahmad, *Electrostatic atomization of conducting liquids using AC superimposed on DC fields*. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994. **30**(4): p. 850-855.

10. Cloupeau, M. and B. Prunet-Foch, *Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review*. Journal of Aerosol Science, 1994. **25**(6): p. 1021-1036.
11. Xie, J., et al., *Electrohydrodynamic atomization: A two-decade effort to produce and process micro-/nanoparticulate materials*. Chemical Engineering Science, 2015. **125**: p. 32-57.
12. Mhatre, S., et al., *Electrostatic phase separation: A review*. Chemical Engineering Research and Design, 2015. **96**: p. 177-195.
13. Eow, J.S. and M. Ghadiri, *Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the technology*. Chemical Engineering Journal, 2002. **85**(2): p. 357-368.
14. Eow, J.S., et al., *Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding*. Chemical Engineering Journal, 2001. **84**(3): p. 173-192.
15. Bailes, P.J., D. Freestone, and G.W. Sams, *Pulsed d.c. fields for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions*. Chemical Engineering Journal, 1997. **644**: p. 34-39.
16. Urdahl, O., et al., *Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology*. 1 ed. Compact Electrostatic Coalescer Technology. 2001, Boca Raton: CRC Press.
17. Less, S., et al., *Electrostatic destabilization of water-in-crude oil emulsions: Application to a real case and evaluation of the Aibel VIEC technology*. Fuel, 2008. **87**(12): p. 2572-2581.
18. Cheng, D.K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*. International ed. 1993, United States of America: Addison-Wesley Publishing Company.
19. Hayt, J.A. and W.H. Buck, *Engineering Electromagnetics*. Sixth ed. 2001, United States of America: McGraw-Hill. 576.
20. Edminister, J.A., *Theory and problems of electromagnetics*. Second ed. 1993, United States of America: McGraw-Hill.
21. Griffiths, D.J., *Introduction to Electrodynamics*. Fourth ed. 2013, United States of America: Pearson Education.
22. Fox, R.W., A.T. McDonald, and P.J. Pritchard, *Introduction to Fluid Mechanics*. Sixth ed. 2004, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

23. White, F.M., *Fluid Mechanics*. Seventh ed. 2011, United States of America: McGraw-Hill.
24. Ruokolainen, J. and P. Råback, *Navier-Stokes Equation*, in *Elmer Models Manual*. 2018, CSC – IT Center for Science.
25. Li, B., et al., *Droplet deformation under pulsatile electric fields*. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017. **127**: p. 180-188.
26. Sethian, J.A., *Fast marching methods and level set methods for propagating interfaces*. *Computational Fluid Mechanics*, 1998.
27. Olsson, E. and G. Kreiss, *A conservative level set method for two phase flow*. *Journal of Computational Physics*, 2005. **210**(1): p. 225-246.
28. Olsson, E., G. Kreiss, and S. Zahedi, *A conservative level set method for two phase flow II*. *Journal of Computational Physics*, 2007. **225**(1): p. 785-807.
29. Råback, P., *Level-Set Method*, in *Elmer Models Manual*. 2018, CSC – IT Center for Science.
30. Sethian, J.A. and P. Smereka, *LEVEL SET METHODS FOR FLUID INTERFACES*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003. **35**(1): p. 341-372.
31. Lin, Y., P. Skjetne, and A. Carlson, *A phase field model for multiphase electrohydrodynamic flow*. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012. **45**: p. 1-11.
32. Sussman, M., et al., *An improved level set method for incompressible two-phase flows*. *Computers & Fluids*, 1998. **27**(5): p. 663-680.
33. Mittal, H.V.R., et al., *A coupled immersed interface and level set method for simulation of interfacial flows steered by surface tension*. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2021. **3**(1): p. 21-37.
34. เดชะอำไพ, ป., *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING)*. 2560, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
35. พงศ์ธนาพานิช, ส., *วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (FINITE ELEMENT METHODS AND MESH TRIANGULATION)*. 2560, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
36. Shadloo, M.S., A. Rahmat, and M. Yildiz, *A smoothed particle hydrodynamics study on the electrohydrodynamic deformation of a droplet suspended in a neutrally buoyant Newtonian fluid*. *Computational Mechanics*, 2013. **52**(3): p. 693-707.

37. Taylor, G.I., A.D. McEwan, and L.N.J. de Jong, *Studies in electrohydrodynamics. I. The circulation produced in a drop by an electric field*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1997. **291**(1425): p. 159-166.
38. Feng, J.Q. and T.C. Scott, *A computational analysis of electrohydrodynamics of a leaky dielectric drop in an electric field*. Journal of Fluid Mechanics, 1996. **311**: p. 289-326.
39. He, L., et al., *Numerical study on transient response of droplet deformation in a steady electric field*. Journal of Electrostatics, 2016. **82**: p. 29-37.
40. Vivacqua, V., et al., *Analysis of partial electrocoalescence by Level-Set and finite element methods*. Chemical Engineering Research and Design, 2016. **114**: p. 180-189.
41. Mousavichoubeh, M., M. Ghadiri, and M. Shariaty-Niassar, *Electro-coalescence of an aqueous droplet at an oil-water interface*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2011. **50**(3): p. 338-344.
42. Li, B., et al., *Drop-interface electrocoalescence mode transition under a direct current electric field*. Chemical Engineering Science, 2020. **213**: p. 115360.
43. Eow, J.S., M. Ghadiri, and A. Sharif, *Experimental studies of deformation and break-up of aqueous drops in high electric fields*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003. **225**(1): p. 193-210.
44. Karyappa, Rahul B., Shivraj D. Deshmukh, and Rochish M. Thaokar, *Breakup of a conducting drop in a uniform electric field*. Journal of Fluid Mechanics, 2014. **754**: p. 550-589.
45. Yan, H., et al., *Investigation on Transient Oscillation of Droplet Deformation before Conical Breakup under Alternating Current Electric Field*. Langmuir, 2015. **31**(30): p. 8275-8283.
46. Mousavichoubeh, M., M. Shariaty-Niassar, and M. Ghadiri, *The effect of interfacial tension on secondary drop formation in electro-coalescence of water droplets in oil*. Chemical Engineering Science, 2011. **66**(21): p. 5330-5337.
47. Mousavi, S.H., M. Ghadiri, and M. Buckley, *Electro-coalescence of water drops in oils under pulsatile electric fields*. Chemical Engineering Science, 2014. **120**: p.

- 130-142.
48. Aryafar, H. and H.P. Kavehpour, *Electrocoalescence: Effects of DC Electric Fields on Coalescence of Drops at Planar Interfaces*. Langmuir, 2009. **25**(21): p. 12460-12465.
 49. Anand, V., V.A. Juvekar, and R.M. Thakkar, *Coalescence, Partial Coalescence, and Noncoalescence of an Aqueous Drop at an Oil–Water Interface under an Electric Field*. Langmuir, 2020. **36**(21): p. 6051-6060.
 50. Ristenpart, W.D., et al., *Non-coalescence of oppositely charged drops*. Nature, 2009. **461**(7262): p. 377-380.
 51. Hamlin, B.S., J.C. Creasey, and W.D. Ristenpart, *Electrically Tunable Partial Coalescence of Oppositely Charged Drops*. Physical Review Letters, 2012. **109**(9): p. 094501.
 52. Holto, J., G. Berg, and L.E. Lundgaard. *Electrocoalescence of drops in a water-in-oil emulsion*. in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2009. Virginia Beach, VA, USA.
 53. Li, B., et al., *Effects of high-frequency and high-voltage pulsed electric field parameters on water chain formation*. Journal of Electrostatics, 2016. **80**: p. 22-29.
 54. Berg, G., L.E. Lundgaard, and N. Abi-Chebel, *Electrically stressed water drops in oil*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010. **49**(12): p. 1229-1240.

ภาคผนวก ก

การควบคุมการสร้างสัญญาณไฟฟ้า การทำงานของปั๊ม และการบันทึกภาพด้วยโปรแกรม MATLAB

ก.1 การควบคุมการสร้างสัญญาณไฟฟ้า

ในการควบคุมการสร้างสัญญาณไฟฟ้า เครื่องกำเนิดสัญญาณเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB. ขั้นตอนแรกให้ตั้งค่า load impedance เป็น HighZ ที่ output menu บนเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรง. จากนั้น ผู้วิจัยควบคุมการสร้างสัญญาณผ่านโปรแกรม MATLAB. คำสั่งการทำงานของโปรแกรม เมื่อสัญญาณเป็นรูปแบบพัลส์สี่เหลี่ยม 1 รูปคลื่น และมีเวลาคงอยู่ของสัญญาณนาน 1 s (ความถี่ 1 Hz) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```
%% Noted that set HighZ at function gen directly
%% set input variables
volt = 1.0;           % voltage
f     = 1.0;         % frequency

%% Connect
% Instrument Connection
% Create a VISA-USB object.
interfaceObj = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
    'USB0::0x0699::0x0346::C034489::0::INSTR', 'Tag', '');
% Create the VISA-USB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = visa('TEK', 'USB0::0x0699::0x0346::C034489::0::INSTR');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end
% Create a device object.
deviceObj = icdevice('tek_afg3000.mdd', interfaceObj);
% Connect device object to hardware.
connect(deviceObj);
% Instrument Configuration and Control

%% signal setting
% Configure property value(s).
set(deviceObj, 'TriggerSource', 'external');
set(deviceObj.Burstmode(1), 'Cycles', 1);
set(deviceObj.Burstmode(1), 'Enabled', 'on');
set(deviceObj.Waveform(1), 'Shape', 'pulse');
set(deviceObj.Voltage(1), 'Lowlevel', 0);
set(deviceObj.Voltage(1), 'Highlevel', volt);
set(deviceObj.Frequency(1), 'Frequency', f);
set(deviceObj.Pulse(1), 'DutyCycle', 'maximum');
%set(deviceObj.Burstmode(1), 'DelayTime', 0.5);

%% trigger signal
% Execute device object function(s).
invoke(deviceObj, 'trigger');
```

กำหนดค่าตัวแปรแรงดันและความถี่

การตั้งค่าสัญญาณ

```

%% Disconnect
% Disconnect and Clean Up
% Disconnect device object from hardware.
disconnect(deviceObj);

% The following code has been automatically generated to ensure that any
% object manipulated in TMT00L has been properly disposed when executed
% as part of a function or script.

% Clean up all objects.
delete([deviceObj interfaceObj]);
clear deviceObj;
clear interfaceObj;

```

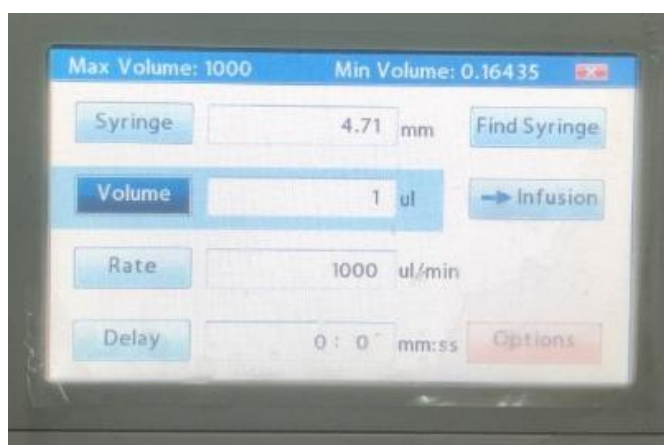
สำหรับกรณีสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย การสร้างสัญญาณสามารถทำได้โดยการแก้ไขคำสั่งการทำงานข้างต้นที่บรรทัด `set(deviceObj.Waveform(1), 'Shape', 'pulse');` โดยแก้ไขจาก 'pulse' เป็น 'ramp'. ทั้งนี้ การสร้างสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจำเป็นต้องตั้งค่าบนเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยตรงเพิ่มเติมดังต่อไปนี้.

- Ramp Parameter Menu : set to 100%
- Frequency Period/Phase Menu : 180°

สัญญาณที่ได้ต้องถูกตรวจสอบความถูกต้อง โดยการต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป ก่อนต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง.

ก.2 การควบคุมการทำงานของปั๊มกระบอกฉีดยา

ปั๊มกระบอกฉีดยาเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB. การตั้งค่าการทำงานของปั๊ม ซึ่งได้แก่ ขนาดของกระบอกฉีดยา, ปริมาตร, อัตราการไหล, การหน่วงเวลา, การฉีดหรือดูด ทำบนเครื่องปั๊มโดยตรง. รูปที่ ก.1 แสดงตัวอย่างการตั้งค่าปั๊มที่ใช้ในการทดลอง.



รูปที่ ก.1 การตั้งค่าปั๊มกระบอกฉีดยา

การควบคุมการทำงานของปั๊มผ่านโปรแกรม MATLAB โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```

%% Pump Control
COMPort = 'COM3';
baudRate = 9600;

if ~isempty(instrfind)
    fclose(instrfind);
    delete(instrfind);
end

% initialize com ports
s = serial(COMPort);
set(s, 'BaudRate', baudRate);
set(s, 'DataBits', 8); %Chemyx RS232 serial port config
set(s, 'Parity', 'none');
set(s, 'StopBits', 1);
set(s, 'FlowControl', 'none');
set(s, 'Terminator', 'CR/LF');
set(s, 'Timeout', 0.5);
fopen(s);

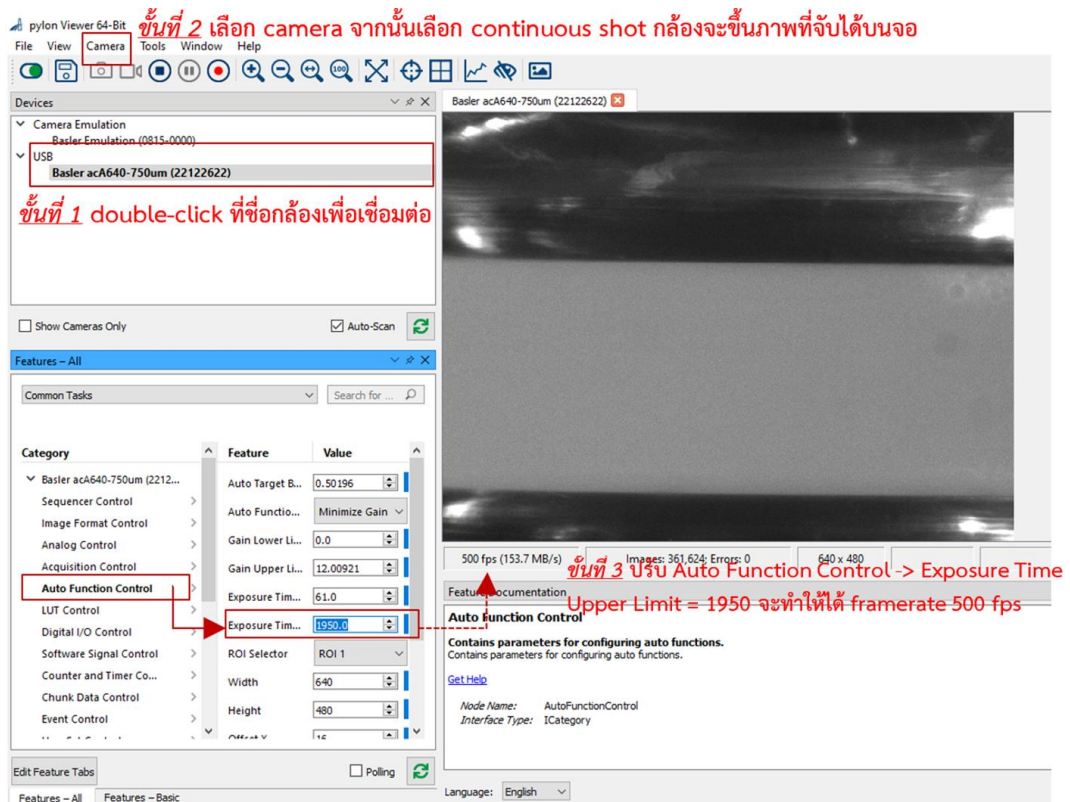
% start pump
% pump should start moving now
fprintf(s, 'start');
%out = fscanf(s);

% close com ports
fclose(s);
delete(s);

```

ก.3 การควบคุมการทำงานของกล้อง

กล้อง CCD ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB 3.0. ขั้นตอนแรกให้เชื่อมต่อกล้องและคอมพิวเตอร์ รวมถึงการตั้งค่าอัตราเฟรมของกล้องผ่านโปรแกรม pylon Viewer โดยมีวิธีการดังรูปที่ ก.2. การตั้งอัตราเฟรมของทำได้โดยการปรับค่า Exposure Time Upper Limit. ในการทดลอง เมื่อปรับลดเป็น Exposure Time Upper Limit = 1950 กล้องสามารถบันทึกได้ที่อัตราเฟรมสูงถึง 500 fps. ทั้งนี้ ความสว่างของภาพที่กล้องจับได้ลดลงเมื่ออัตราเฟรมเพิ่มขึ้น.



รูปที่ ก.2 การเชื่อมต่อและตั้งค่าอัตราเฟรมของกล้อง

โปรแกรม pylon Viewer ต้องถูกปิดหลังจากการตั้งค่าตามรูปที่ ก.2 เสร็จสิ้นแล้ว. การสั่งให้กล้องบันทึกภาพทำโดยโปรแกรม MATLAB. หากไม่ปิดโปรแกรม pylon Viewer กล้องจะไม่สามารถเชื่อมต่อกับโปรแกรม MATLAB ได้. คำสั่งการทำงานของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้.

```

%% input variables
frame_record = 1500; } กำหนดจำนวนเฟรมทั้งหมดที่ต้องการบันทึก

%% camera setting
vid = videoinput('gentl', 1, 'Mono8');
src = getselectedsource(vid);
vid.FramesPerTrigger = 1;

preview(vid);

vid.FramesPerTrigger = frame_record;
vid.LoggingMode = 'disk';

%% location file & name
diskLogger = VideoWriter('C:\Users\Administrator\Desktop\test.avi',
'Grayscale AVI');
vid.DiskLogger = diskLogger;

start(vid);

```

ตำแหน่งที่บันทึกไฟล์วิดีโอ ชื่อไฟล์

หลังจากสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำงาน หน้าต่าง Video Preview ซึ่งแสดงภาพที่กล้องจับได้จะปรากฏขึ้น ดังรูปที่ ก.3. เมื่อกำลังบันทึกภาพตามจำนวนเฟรมที่ได้ตั้งค่าเอาไว้จนครบ หน้าต่าง Video Preview จะขึ้นสถานะ Waiting for start. การบันทึกไฟล์ใหม่ทำได้โดยการปิดหน้าต่าง Video Preview ก่อนและเปลี่ยนชื่อไฟล์ที่ต้องการบันทึก จากนั้นจึงสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำงานอีกครั้ง.

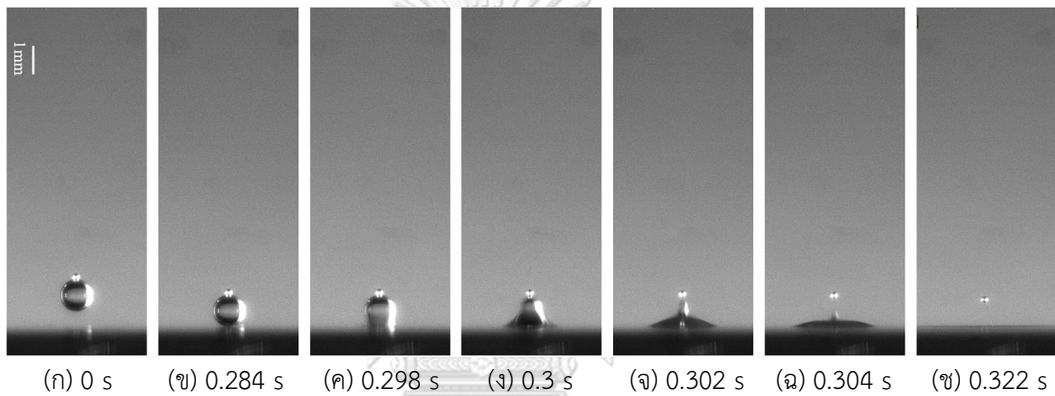


รูปที่ ก.3 หน้าต่าง Video Preview

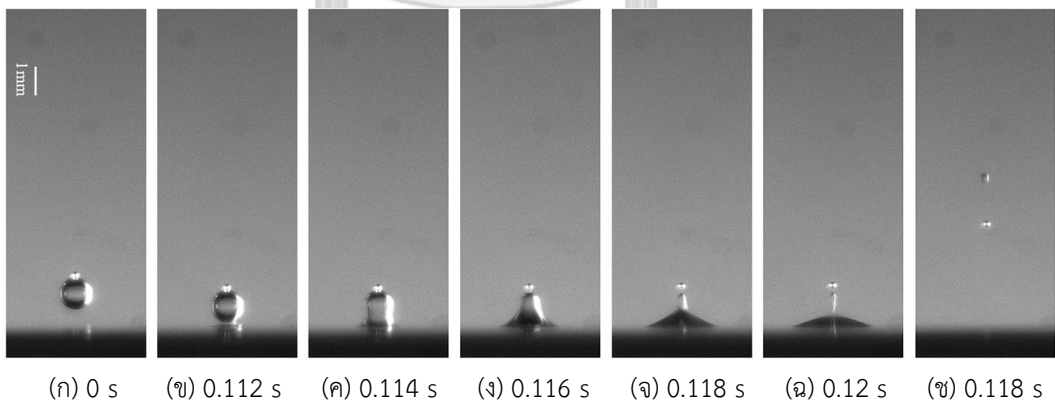
ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่

ในกรณีน้ำมันแร่ หยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุรวมตัวกับผิวน้ำอย่างสมบูรณ์ที่สนามไฟฟ้า 1 – 1.5 kV/cm. เมื่อสนามไฟฟ้าสูงจนอยู่ในช่วง 1.6 – 4.5 kV/cm หยดน้ำรวมตัวแบบเพียงบางส่วนกับผิวน้ำ. รูปที่ ข.1 และ ข.2 แสดงการรวมตัวแบบสมบูรณ์และเพียงบางส่วนของหยดน้ำในน้ำมันแร่ตามลำดับ. ทั้งนี้ หยดน้ำในน้ำมันแร่ที่หลุดจากปลายเข็มมักมีหยดน้ำขนาดเล็กติดมากับหยดหลักด้วย. ผลการทดลองพิจารณาเฉพาะพฤติกรรมของหยดน้ำหลักเท่านั้น.





รูปที่ ข.1 การรวมตัวแบบสมบูรณ์ของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่ที่ สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm




รูปที่ ข.2 การรวมตัวแบบเพียงบางส่วนของหยดน้ำที่ไม่ถูกอัดประจุในน้ำมันแร่ ที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบน้ำมันทานตะวันและน้ำมันซิลิโคน

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันตามมาตรฐานกระทำโดยแผนกทดสอบสภาพฉนวนและวิเคราะห์ กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การทดสอบประกอบไปด้วย 2 ส่วน. ส่วนแรก คือ การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำมันทานตะวันและน้ำมันซิลิโคน ด้วยมาตรฐาน ASTM D971-12. ส่วนที่สอง คือ การทดสอบค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันทานตะวันตามมาตรฐาน IEC61620-1998. ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันแสดงดังรูปที่ ค.1 และ ค.2 ตามลำดับ.

	HIGH VOLTAGE TESTING DEPARTMENT ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND 53 Moo 2 Charansanitwong Rd., Bang Krui, Nonthaburi 11130	page <u>3/5</u>								
TEST REPORT										
Sampling Date :	21 June, 2022	Receives from : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์								
Test Date :	22 June, 2022 - 23 June, 2022	Test Item : Interfacial Tension(IFT)								
Receives Date :	22 June, 2022	Test Method : ASTM D971-12 (Ring method)								
Test by :	Mr.Phothong Praneetphonkrung	Equipment Serial No : 031-00461								
Job No. :	T5220286-02									
NO.	LOCATION	NAME	SERIAL No.	kV	Density of water (g/cm3)*	Density of sample (g/cm3)*	Limit(min), (mN/m)	Results (mN/m)	Appearance	Note
1	CU_ENGINEER	SCO-KF96-100CS	SILICONE OIL		0.997	0.963		39	Clear	
2	CU_ENGINEER	SFO	SUNFLOWER OIL		0.997	0.922		26	Clear	
Limit IEEE Std C.57.106-2015 * at room temperature Uncertainty : 0.32 % * Limit: โปรดพิจารณาจาก Manufacturer manual										
						Checked by : (Mr.Sonthaya Jantanyakorn) Head, Insulation Testing & Analysis Section				
										

รูปที่ ค.1 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความตึงผิวของน้ำมันทานตะวันและน้ำมันซิลิโคน



HIGH VOLTAGE TESTING DEPARTMENT

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND

53 Moo 2 Charansanitwong Rd., Bang Kruai, Nonthaburi 11130


page 4/5


TEST REPORT

Sampling Date : 21 June, 2022 **Receives from :** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
Test Date : 22 June, 2022 - 22 June, 2022 **Test Item :** Conductivity
Receives Date : 22 June, 2022 **Test Method :** IEC61620-1998
Test by : Insulation Testing And Analysis Section
Job No. : T5220286-02

NO.	LOCATION	NAME	SERIAL No.	kV	Results(pS/m) at 20°C	Note
1	CU_ENGINEER	SFO	SUNFLOWER OIL		6.580	Relative permittivity = 3.10

- "New" unused oil (laboratory quality) ≤ 0.05 pS/m
 - "New" unused oil (industrial quality) 0.05...0.1 pS/m
 - Light used oil in good condition 0.1...1.0 pS/m
 - Middle used oil in acceptable condition 1.0...5.0 pS/m
 - Heavily used oil in bad condition > 5.0 pS/m

Checked by : 
 (Mr. Somranya Jenthrakulchai)
 Head, Insulation Testing and Analysis Section



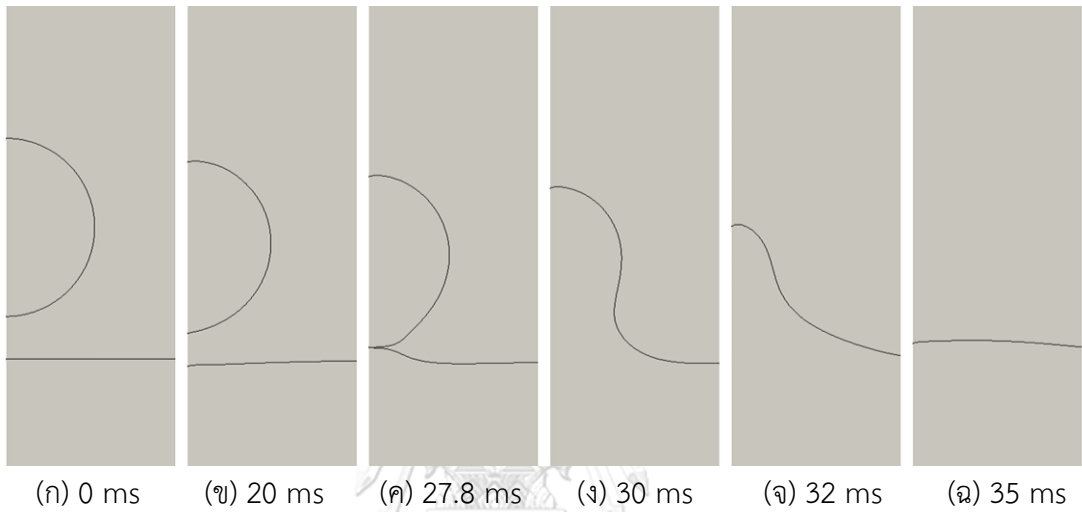
รูปที่ ค.2 ผลการทดสอบค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันทานตะวัน


 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

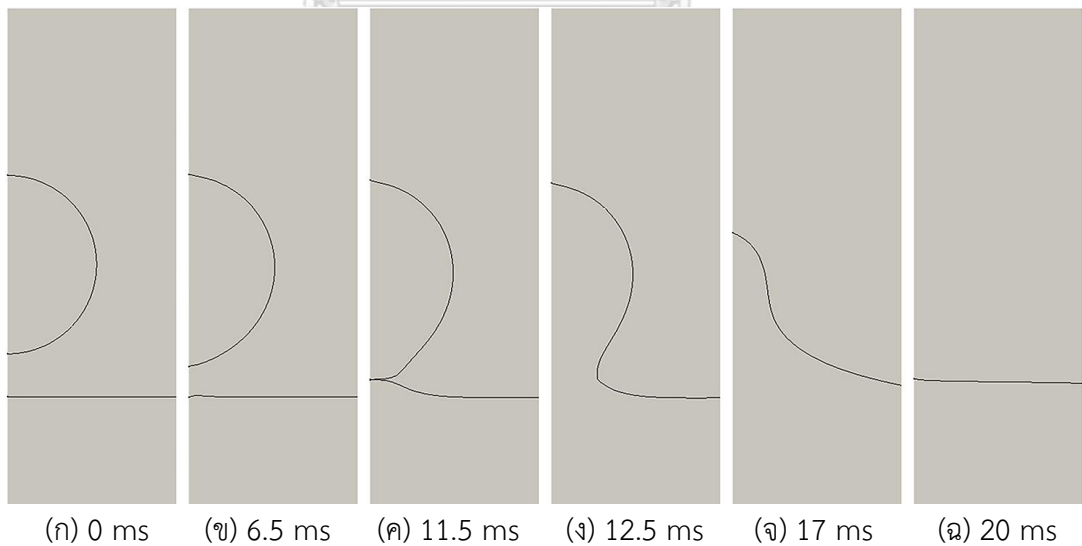
ภาคผนวก ง

ผลการจำลองการรวมตัวของหยดน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันซิลิโคน

รูปที่ ง.1 และ ง.2 แสดงผลการจำลองของหยดน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันซิลิโคนและผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้าขนาด 1.0 kV/cm และ 3.0 kV/cm ตามลำดับ.



รูปที่ ง.1 ผลจำลองการรวมตัวของน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้า 1.0 kV/cm

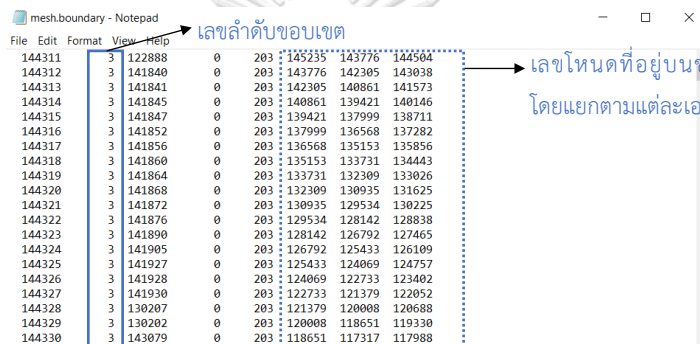


รูปที่ ง.2 ผลจำลองการรวมตัวของน้ำที่ไม่มีประจุในน้ำมันซิลิโคน ที่สนามไฟฟ้า 3.0 kV/cm

ภาคผนวก จ

ตำแหน่งและสนามไฟฟ้าบนเงื่อนไขขอบเขตของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำอยู่ที่ปลายเข็ม

ไฟล์การคำนวณจากโปรแกรม Elmer ที่ใช้ในการตั้งค่าตำแหน่งพิกัดและสนามไฟฟ้าประกอบไปด้วยไฟล์ mesh.boundary, mesh.nodes และ case.flavia.res ดังรูปที่ จ.1. ในรูปที่ จ.1 (ก) mesh.boundary สามารถใช้ตรวจสอบได้ว่ามีเลขโหนดใดบ้างอยู่บนขอบเขตของหยดน้ำ จากเลขขอบเขตที่ตั้งค่าไว้ในตอนสร้างแบบจำลอง. พิกัดของและค่าสนามไฟฟ้าแต่ละจุดโหนดหาได้จากไฟล์ mesh.nodes และ case.flavia.res ในรูปที่ จ.1 (ข) และ จ.1 (ค) ตามลำดับ. ตารางที่ จ.1 แสดงค่าตำแหน่งพิกัดและสนามไฟฟ้าของจุดโหนดที่อยู่บนขอบเขตหยดน้ำซึ่งได้จากการตั้งข้อมูล.

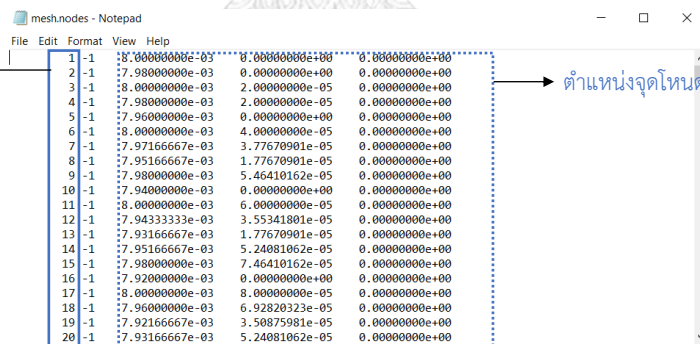


mesh.boundary - Notepad

File	Edit	Format	View	Help	เลขลำดับขอบเขต		
144311	3	122888	0	203	125235	125776	144504
144312	3	141840	0	203	143776	142305	143038
144313	3	141841	0	203	142305	140861	141573
144314	3	141845	0	203	140861	139421	140146
144315	3	141847	0	203	139421	137999	138711
144316	3	141852	0	203	137999	136568	137282
144317	3	141856	0	203	136568	135153	135856
144318	3	141860	0	203	135153	133731	134443
144319	3	141864	0	203	133731	132309	133026
144320	3	141868	0	203	132309	130935	131625
144321	3	141872	0	203	130935	129534	130225
144322	3	141876	0	203	129534	128142	128838
144323	3	141890	0	203	128142	126792	127465
144324	3	141905	0	203	126792	125433	126109
144325	3	141927	0	203	125433	124069	124757
144326	3	141928	0	203	124069	122733	123402
144327	3	141930	0	203	122733	121379	122052
144328	3	130207	0	203	121379	120008	120688
144329	3	130202	0	203	120008	118651	119330
144330	3	143079	0	203	118651	117317	117988

เลขโหนดที่อยู่บนขอบเขต โดยแยกตามแต่ละเอลิเมนต์

(ก) mesh.boundary

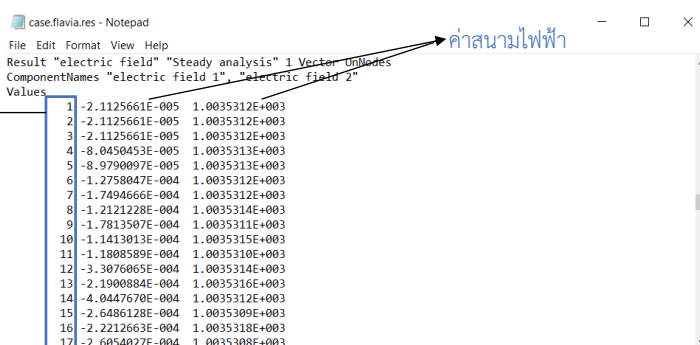


mesh.nodes - Notepad

File	Edit	Format	View	Help	เลขโหนด	ตำแหน่งจุดโหนด
1	-1	8.00000000e-03	0.00000000e+00	0.00000000e+00		
2	-1	7.98000000e-03	0.00000000e+00	0.00000000e+00		
3	-1	8.00000000e-03	2.00000000e-05	0.00000000e+00		
4	-1	7.98000000e-03	2.00000000e-05	0.00000000e+00		
5	-1	7.96000000e-03	0.00000000e+00	0.00000000e+00		
6	-1	8.00000000e-03	4.00000000e-05	0.00000000e+00		
7	-1	7.97166667e-03	3.77670901e-05	0.00000000e+00		
8	-1	7.95166667e-03	1.77670901e-05	0.00000000e+00		
9	-1	7.98000000e-03	5.46410162e-05	0.00000000e+00		
10	-1	7.94000000e-03	0.00000000e+00	0.00000000e+00		
11	-1	8.00000000e-03	6.00000000e-05	0.00000000e+00		
12	-1	7.94333333e-03	3.55241801e-05	0.00000000e+00		
13	-1	7.93166667e-03	1.77670901e-05	0.00000000e+00		
14	-1	7.95166667e-03	5.24081062e-05	0.00000000e+00		
15	-1	7.98000000e-03	7.46410162e-05	0.00000000e+00		
16	-1	7.92000000e-03	0.00000000e+00	0.00000000e+00		
17	-1	8.00000000e-03	8.00000000e-05	0.00000000e+00		
18	-1	7.96000000e-03	6.92820323e-05	0.00000000e+00		
19	-1	7.92166667e-03	3.50875981e-05	0.00000000e+00		
20	-1	7.93166667e-03	5.24081062e-05	0.00000000e+00		

ตำแหน่งจุดโหนด

(ข) mesh.nodes



case.flavia.res - Notepad

File	Edit	Format	View	Help	เลขโหนด	ค่าสนามไฟฟ้า
1	-2.1125661E-005	1.0035312E+003				
2	-2.1125661E-005	1.0035312E+003				
3	-2.1125661E-005	1.0035312E+003				
4	-8.0450453E-005	1.0035313E+003				
5	-8.9790097E-005	1.0035313E+003				
6	-1.2758047E-004	1.0035312E+003				
7	-1.7494666E-004	1.0035312E+003				
8	-1.2121228E-004	1.0035314E+003				
9	-1.7813507E-004	1.0035311E+003				
10	-1.1413013E-004	1.0035315E+003				
11	-1.1808589E-004	1.0035310E+003				
12	-3.3076065E-004	1.0035314E+003				
13	-2.1900884E-004	1.0035316E+003				
14	-4.0447670E-004	1.0035312E+003				
15	-2.6486128E-004	1.0035309E+003				
16	-2.2212663E-004	1.0035318E+003				
17	-2.6054027E-004	1.0035308E+003				

ค่าสนามไฟฟ้า

(ค) case.flavia.res

รูปที่ จ.1 ไฟล์ที่ใช้ประกอบการตั้งค่าตำแหน่งและสนามไฟฟ้าบนขอบเขตหยดน้ำ

ตารางที่ จ.1 ตำแหน่งจุดโหนดและสนามไฟฟ้าเมื่อหยดน้ำอยู่ที่ปลายเข็มและได้รับสนามไฟฟ้า 1 kV/cm

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)	ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
0.00E+00	1.04E-02	-1.82E+04	5.67E+05	1.67E-04	1.04E-02	-1.57E+05	4.75E+05
5.02E-06	1.04E-02	-1.82E+04	5.67E+05	1.72E-04	1.04E-02	-1.62E+05	4.74E+05
1.00E-05	1.04E-02	-2.31E+04	5.46E+05	1.77E-04	1.04E-02	-1.64E+05	4.70E+05
1.50E-05	1.04E-02	-2.80E+04	5.46E+05	1.82E-04	1.04E-02	-1.69E+05	4.70E+05
2.00E-05	1.04E-02	-3.32E+04	5.36E+05	1.86E-04	1.04E-02	-1.72E+05	4.66E+05
2.51E-05	1.04E-02	-3.94E+04	5.38E+05	1.91E-04	1.04E-02	-1.76E+05	4.66E+05
3.01E-05	1.04E-02	-4.36E+04	5.33E+05	1.96E-04	1.04E-02	-1.79E+05	4.60E+05
3.51E-05	1.04E-02	-4.96E+04	5.36E+05	2.00E-04	1.04E-02	-1.83E+05	4.59E+05
4.01E-05	1.04E-02	-5.35E+04	5.31E+05	2.05E-04	1.04E-02	-1.85E+05	4.55E+05
4.50E-05	1.04E-02	-5.77E+04	5.31E+05	2.10E-04	1.04E-02	-1.90E+05	4.54E+05
5.00E-05	1.04E-02	-6.18E+04	5.25E+05	2.14E-04	1.04E-02	-1.92E+05	4.50E+05
5.50E-05	1.04E-02	-6.64E+04	5.25E+05	2.19E-04	1.04E-02	-1.97E+05	4.49E+05
6.00E-05	1.04E-02	-7.01E+04	5.21E+05	2.23E-04	1.04E-02	-1.99E+05	4.44E+05
6.50E-05	1.04E-02	-7.49E+04	5.22E+05	2.28E-04	1.04E-02	-2.03E+05	4.42E+05
6.99E-05	1.04E-02	-7.88E+04	5.17E+05	2.33E-04	1.04E-02	-2.05E+05	4.38E+05
7.49E-05	1.04E-02	-8.33E+04	5.17E+05	2.37E-04	1.04E-02	-2.10E+05	4.38E+05
7.98E-05	1.04E-02	-8.70E+04	5.12E+05	2.42E-04	1.04E-02	-2.12E+05	4.33E+05
8.48E-05	1.04E-02	-9.16E+04	5.13E+05	2.46E-04	1.04E-02	-2.15E+05	4.32E+05
8.97E-05	1.04E-02	-9.53E+04	5.09E+05	2.51E-04	1.04E-02	-2.17E+05	4.27E+05
9.46E-05	1.04E-02	-1.00E+05	5.10E+05	2.55E-04	1.04E-02	-2.22E+05	4.26E+05
9.96E-05	1.04E-02	-1.04E+05	5.06E+05	2.60E-04	1.04E-02	-2.24E+05	4.21E+05
1.04E-04	1.04E-02	-1.08E+05	5.06E+05	2.64E-04	1.04E-02	-2.27E+05	4.20E+05
1.09E-04	1.04E-02	-1.11E+05	5.01E+05	2.68E-04	1.04E-02	-2.29E+05	4.15E+05
1.14E-04	1.04E-02	-1.16E+05	5.01E+05	2.73E-04	1.04E-02	-2.34E+05	4.14E+05
1.19E-04	1.04E-02	-1.19E+05	4.97E+05	2.77E-04	1.04E-02	-2.35E+05	4.10E+05
1.24E-04	1.04E-02	-1.24E+05	4.97E+05	2.81E-04	1.04E-02	-2.39E+05	4.08E+05
1.29E-04	1.04E-02	-1.27E+05	4.92E+05	2.86E-04	1.04E-02	-2.40E+05	4.03E+05
1.34E-04	1.04E-02	-1.32E+05	4.92E+05	2.90E-04	1.04E-02	-2.44E+05	4.01E+05
1.39E-04	1.04E-02	-1.35E+05	4.89E+05	2.94E-04	1.04E-02	-2.45E+05	3.97E+05
1.43E-04	1.04E-02	-1.40E+05	4.89E+05	2.99E-04	1.04E-02	-2.49E+05	3.95E+05
1.48E-04	1.04E-02	-1.43E+05	4.85E+05	3.03E-04	1.04E-02	-2.51E+05	3.90E+05
1.53E-04	1.04E-02	-1.47E+05	4.84E+05	3.07E-04	1.04E-02	-2.54E+05	3.88E+05
1.58E-04	1.04E-02	-1.50E+05	4.80E+05	3.11E-04	1.05E-02	-2.55E+05	3.83E+05
1.63E-04	1.04E-02	-1.54E+05	4.79E+05	3.15E-04	1.05E-02	-2.60E+05	3.81E+05

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
3.19E-04	1.05E-02	-2.61E+05	3.77E+05
3.24E-04	1.05E-02	-2.64E+05	3.75E+05
3.28E-04	1.05E-02	-2.65E+05	3.70E+05
3.32E-04	1.05E-02	-2.68E+05	3.67E+05
3.36E-04	1.05E-02	-2.69E+05	3.62E+05
3.40E-04	1.05E-02	-2.72E+05	3.60E+05
3.44E-04	1.05E-02	-2.73E+05	3.56E+05
3.48E-04	1.05E-02	-2.77E+05	3.53E+05
3.52E-04	1.05E-02	-2.78E+05	3.48E+05
3.56E-04	1.05E-02	-2.80E+05	3.46E+05
3.59E-04	1.05E-02	-2.81E+05	3.41E+05
3.63E-04	1.05E-02	-2.85E+05	3.39E+05
3.67E-04	1.05E-02	-2.85E+05	3.34E+05
3.71E-04	1.05E-02	-2.87E+05	3.31E+05
3.75E-04	1.05E-02	-2.88E+05	3.27E+05
3.78E-04	1.05E-02	-2.91E+05	3.24E+05
3.82E-04	1.05E-02	-2.91E+05	3.19E+05
3.86E-04	1.05E-02	-2.94E+05	3.17E+05
3.89E-04	1.05E-02	-2.94E+05	3.12E+05
3.93E-04	1.05E-02	-2.97E+05	3.10E+05
3.97E-04	1.05E-02	-2.97E+05	3.05E+05
4.00E-04	1.05E-02	-2.99E+05	3.02E+05
4.04E-04	1.05E-02	-3.00E+05	2.97E+05
4.07E-04	1.05E-02	-3.03E+05	2.94E+05
4.11E-04	1.05E-02	-3.03E+05	2.90E+05
4.14E-04	1.05E-02	-3.05E+05	2.87E+05
4.18E-04	1.05E-02	-3.04E+05	2.82E+05
4.21E-04	1.05E-02	-3.06E+05	2.79E+05
4.24E-04	1.05E-02	-3.06E+05	2.75E+05
4.28E-04	1.06E-02	-3.08E+05	2.72E+05
4.31E-04	1.06E-02	-3.08E+05	2.67E+05
4.34E-04	1.06E-02	-3.10E+05	2.64E+05
4.37E-04	1.06E-02	-3.10E+05	2.60E+05
4.41E-04	1.06E-02	-3.12E+05	2.56E+05
4.44E-04	1.06E-02	-3.12E+05	2.52E+05
4.47E-04	1.06E-02	-3.13E+05	2.49E+05

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
4.50E-04	1.06E-02	-3.12E+05	2.44E+05
4.53E-04	1.06E-02	-3.14E+05	2.41E+05
4.56E-04	1.06E-02	-3.13E+05	2.37E+05
4.59E-04	1.06E-02	-3.15E+05	2.34E+05
4.62E-04	1.06E-02	-3.14E+05	2.29E+05
4.65E-04	1.06E-02	-3.16E+05	2.26E+05
4.68E-04	1.06E-02	-3.15E+05	2.22E+05
4.71E-04	1.06E-02	-3.16E+05	2.18E+05
4.74E-04	1.06E-02	-3.15E+05	2.14E+05
4.76E-04	1.06E-02	-3.17E+05	2.11E+05
4.79E-04	1.06E-02	-3.16E+05	2.07E+05
4.82E-04	1.06E-02	-3.17E+05	2.04E+05
4.84E-04	1.06E-02	-3.15E+05	1.99E+05
4.87E-04	1.06E-02	-3.16E+05	1.96E+05
4.90E-04	1.06E-02	-3.15E+05	1.92E+05
4.92E-04	1.06E-02	-3.17E+05	1.89E+05
4.95E-04	1.06E-02	-3.15E+05	1.85E+05
4.97E-04	1.07E-02	-3.16E+05	1.81E+05
5.00E-04	1.07E-02	-3.14E+05	1.77E+05
5.02E-04	1.07E-02	-3.15E+05	1.74E+05
5.05E-04	1.07E-02	-3.13E+05	1.70E+05
5.07E-04	1.07E-02	-3.15E+05	1.67E+05
5.09E-04	1.07E-02	-3.13E+05	1.63E+05
5.12E-04	1.07E-02	-3.14E+05	1.60E+05
5.14E-04	1.07E-02	-3.11E+05	1.56E+05
5.16E-04	1.07E-02	-3.12E+05	1.52E+05
5.18E-04	1.07E-02	-3.10E+05	1.49E+05
5.20E-04	1.07E-02	-3.11E+05	1.45E+05
5.22E-04	1.07E-02	-3.09E+05	1.41E+05
5.24E-04	1.07E-02	-3.09E+05	1.38E+05
5.26E-04	1.07E-02	-3.07E+05	1.35E+05
5.28E-04	1.07E-02	-3.07E+05	1.31E+05
5.30E-04	1.07E-02	-3.05E+05	1.28E+05
5.32E-04	1.07E-02	-3.06E+05	1.24E+05
5.34E-04	1.07E-02	-3.04E+05	1.21E+05
5.36E-04	1.07E-02	-3.04E+05	1.18E+05

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
5.38E-04	1.07E-02	-3.01E+05	1.15E+05
5.39E-04	1.07E-02	-3.01E+05	1.11E+05
5.41E-04	1.07E-02	-2.99E+05	1.08E+05
5.43E-04	1.08E-02	-3.00E+05	1.05E+05
5.44E-04	1.08E-02	-2.97E+05	1.02E+05
5.46E-04	1.08E-02	-2.97E+05	9.83E+04
5.48E-04	1.08E-02	-2.94E+05	9.53E+04
5.49E-04	1.08E-02	-2.94E+05	9.20E+04
5.50E-04	1.08E-02	-2.92E+05	8.90E+04
5.52E-04	1.08E-02	-2.92E+05	8.56E+04
5.53E-04	1.08E-02	-2.89E+05	8.27E+04
5.55E-04	1.08E-02	-2.88E+05	7.98E+04
5.56E-04	1.08E-02	-2.86E+05	7.69E+04
5.57E-04	1.08E-02	-2.86E+05	7.36E+04
5.58E-04	1.08E-02	-2.83E+05	7.08E+04
5.60E-04	1.08E-02	-2.82E+05	6.80E+04
5.61E-04	1.08E-02	-2.80E+05	6.53E+04
5.62E-04	1.08E-02	-2.79E+05	6.20E+04
5.63E-04	1.08E-02	-2.76E+05	5.94E+04
5.64E-04	1.08E-02	-2.76E+05	5.67E+04
5.65E-04	1.08E-02	-2.73E+05	5.42E+04
5.66E-04	1.08E-02	-2.72E+05	5.10E+04
5.67E-04	1.08E-02	-2.70E+05	4.87E+04
5.67E-04	1.08E-02	-2.69E+05	4.60E+04
5.68E-04	1.09E-02	-2.66E+05	4.36E+04
5.69E-04	1.09E-02	-2.65E+05	4.08E+04
5.70E-04	1.09E-02	-2.62E+05	3.86E+04
5.70E-04	1.09E-02	-2.61E+05	3.56E+04
5.71E-04	1.09E-02	-2.58E+05	3.35E+04
5.72E-04	1.09E-02	-2.57E+05	3.08E+04
5.72E-04	1.09E-02	-2.54E+05	2.88E+04
5.73E-04	1.09E-02	-2.53E+05	2.58E+04
5.73E-04	1.09E-02	-2.50E+05	2.39E+04
5.73E-04	1.09E-02	-2.49E+05	2.14E+04
5.74E-04	1.09E-02	-2.46E+05	1.96E+04
5.74E-04	1.09E-02	-2.45E+05	1.66E+04

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
5.74E-04	1.09E-02	-2.42E+05	1.49E+04
5.75E-04	1.09E-02	-2.41E+05	1.26E+04
5.75E-04	1.09E-02	-2.38E+05	1.09E+04
5.75E-04	1.09E-02	-2.36E+05	8.43E+03
5.75E-04	1.09E-02	-2.34E+05	6.85E+03
5.75E-04	1.09E-02	-2.32E+05	4.18E+03
5.75E-04	1.09E-02	-2.29E+05	2.71E+03
5.75E-04	1.09E-02	-2.28E+05	4.96E+02
5.75E-04	1.10E-02	-2.25E+05	-9.55E+02
5.75E-04	1.10E-02	-2.23E+05	-3.56E+03
5.75E-04	1.10E-02	-2.21E+05	-4.87E+03
5.75E-04	1.10E-02	-2.19E+05	-7.05E+03
5.75E-04	1.10E-02	-2.16E+05	-8.25E+03
5.74E-04	1.10E-02	-2.14E+05	-1.03E+04
5.74E-04	1.10E-02	-2.11E+05	-1.14E+04
5.74E-04	1.10E-02	-2.10E+05	-1.36E+04
5.73E-04	1.10E-02	-2.07E+05	-1.46E+04
5.73E-04	1.10E-02	-2.05E+05	-1.67E+04
5.73E-04	1.10E-02	-2.02E+05	-1.78E+04
5.72E-04	1.10E-02	-2.01E+05	-2.00E+04
5.72E-04	1.10E-02	-1.98E+05	-2.09E+04
5.71E-04	1.10E-02	-1.96E+05	-2.28E+04
5.70E-04	1.10E-02	-1.93E+05	-2.35E+04
5.70E-04	1.10E-02	-1.91E+05	-2.53E+04
5.69E-04	1.10E-02	-1.88E+05	-2.60E+04
5.68E-04	1.10E-02	-1.86E+05	-2.78E+04
5.67E-04	1.10E-02	-1.83E+05	-2.84E+04
5.66E-04	1.10E-02	-1.82E+05	-3.01E+04
5.66E-04	1.11E-02	-1.79E+05	-3.08E+04
5.65E-04	1.11E-02	-1.77E+05	-3.28E+04
5.64E-04	1.11E-02	-1.74E+05	-3.33E+04
5.63E-04	1.11E-02	-1.73E+05	-3.47E+04
5.62E-04	1.11E-02	-1.70E+05	-3.52E+04
5.61E-04	1.11E-02	-1.68E+05	-3.69E+04
5.59E-04	1.11E-02	-1.65E+05	-3.74E+04
5.58E-04	1.11E-02	-1.64E+05	-3.88E+04

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
5.57E-04	1.11E-02	-1.60E+05	-3.90E+04
5.56E-04	1.11E-02	-1.59E+05	-4.02E+04
5.54E-04	1.11E-02	-1.56E+05	-4.04E+04
5.53E-04	1.11E-02	-1.54E+05	-4.18E+04
5.52E-04	1.11E-02	-1.51E+05	-4.20E+04
5.50E-04	1.11E-02	-1.49E+05	-4.35E+04
5.49E-04	1.11E-02	-1.47E+05	-4.36E+04
5.47E-04	1.11E-02	-1.45E+05	-4.46E+04
5.46E-04	1.11E-02	-1.42E+05	-4.47E+04
5.44E-04	1.11E-02	-1.40E+05	-4.60E+04
5.43E-04	1.11E-02	-1.38E+05	-4.61E+04
5.41E-04	1.11E-02	-1.36E+05	-4.71E+04
5.39E-04	1.12E-02	-1.33E+05	-4.69E+04
5.38E-04	1.12E-02	-1.32E+05	-4.78E+04
5.36E-04	1.12E-02	-1.29E+05	-4.77E+04
5.34E-04	1.12E-02	-1.27E+05	-4.88E+04
5.32E-04	1.12E-02	-1.25E+05	-4.84E+04
5.30E-04	1.12E-02	-1.23E+05	-4.91E+04
5.28E-04	1.12E-02	-1.20E+05	-4.89E+04
5.26E-04	1.12E-02	-1.19E+05	-4.99E+04
5.24E-04	1.12E-02	-1.16E+05	-4.96E+04
5.22E-04	1.12E-02	-1.14E+05	-5.04E+04
5.20E-04	1.12E-02	-1.12E+05	-5.02E+04
5.18E-04	1.12E-02	-1.10E+05	-5.10E+04
5.16E-04	1.12E-02	-1.08E+05	-5.06E+04
5.14E-04	1.12E-02	-1.06E+05	-5.11E+04
5.11E-04	1.12E-02	-1.04E+05	-5.07E+04
5.09E-04	1.12E-02	-1.02E+05	-5.15E+04
5.07E-04	1.12E-02	-1.00E+05	-5.12E+04
5.04E-04	1.12E-02	-9.85E+04	-5.17E+04
5.02E-04	1.12E-02	-9.61E+04	-5.10E+04
5.00E-04	1.12E-02	-9.44E+04	-5.14E+04
4.97E-04	1.12E-02	-9.24E+04	-5.09E+04
4.95E-04	1.12E-02	-9.07E+04	-5.15E+04
4.92E-04	1.12E-02	-8.85E+04	-5.08E+04
4.90E-04	1.13E-02	-8.69E+04	-5.11E+04

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
4.87E-04	1.13E-02	-8.50E+04	-5.06E+04
4.84E-04	1.13E-02	-8.32E+04	-5.10E+04
4.82E-04	1.13E-02	-8.13E+04	-5.03E+04
4.79E-04	1.13E-02	-7.97E+04	-5.05E+04
4.76E-04	1.13E-02	-7.79E+04	-4.99E+04
4.73E-04	1.13E-02	-7.61E+04	-5.03E+04
4.71E-04	1.13E-02	-7.45E+04	-4.97E+04
4.68E-04	1.13E-02	-7.29E+04	-4.98E+04
4.65E-04	1.13E-02	-7.11E+04	-4.90E+04
4.62E-04	1.13E-02	-6.95E+04	-4.91E+04
4.59E-04	1.13E-02	-6.79E+04	-4.84E+04
4.56E-04	1.13E-02	-6.63E+04	-4.87E+04
4.53E-04	1.13E-02	-6.46E+04	-4.78E+04
4.50E-04	1.13E-02	-6.31E+04	-4.78E+04
4.47E-04	1.13E-02	-6.16E+04	-4.71E+04
4.44E-04	1.13E-02	-6.00E+04	-4.73E+04
4.40E-04	1.13E-02	-5.85E+04	-4.64E+04
4.37E-04	1.13E-02	-5.71E+04	-4.63E+04
4.34E-04	1.13E-02	-5.57E+04	-4.56E+04
4.31E-04	1.13E-02	-5.42E+04	-4.57E+04
4.27E-04	1.13E-02	-5.28E+04	-4.49E+04
4.24E-04	1.13E-02	-5.15E+04	-4.48E+04
4.21E-04	1.13E-02	-5.01E+04	-4.39E+04
4.17E-04	1.14E-02	-4.87E+04	-4.37E+04
4.14E-04	1.14E-02	-4.75E+04	-4.30E+04
4.10E-04	1.14E-02	-4.61E+04	-4.30E+04
4.07E-04	1.14E-02	-4.48E+04	-4.19E+04
4.03E-04	1.14E-02	-4.36E+04	-4.17E+04
4.00E-04	1.14E-02	-4.25E+04	-4.09E+04
3.96E-04	1.14E-02	-4.11E+04	-4.08E+04
3.93E-04	1.14E-02	-4.00E+04	-3.99E+04
3.89E-04	1.14E-02	-3.88E+04	-3.97E+04
3.85E-04	1.14E-02	-3.77E+04	-3.89E+04
3.82E-04	1.14E-02	-3.65E+04	-3.88E+04
3.78E-04	1.14E-02	-3.54E+04	-3.78E+04
3.74E-04	1.14E-02	-3.43E+04	-3.75E+04

ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)	ρ (m)	z (m)	E_ρ (V/m)	E_z (V/m)
3.71E-04	1.14E-02	-3.33E+04	-3.67E+04	2.85E-04	1.15E-02	-1.49E+04	-2.37E+04
3.67E-04	1.14E-02	-3.21E+04	-3.65E+04	2.81E-04	1.15E-02	-1.43E+04	-2.29E+04
3.63E-04	1.14E-02	-3.11E+04	-3.56E+04	2.77E-04	1.15E-02	-1.36E+04	-2.23E+04
3.59E-04	1.14E-02	-3.01E+04	-3.53E+04	2.72E-04	1.15E-02	-1.30E+04	-2.13E+04
3.55E-04	1.14E-02	-2.92E+04	-3.44E+04	2.68E-04	1.15E-02	-1.23E+04	-2.07E+04
3.51E-04	1.14E-02	-2.81E+04	-3.41E+04	2.64E-04	1.15E-02	-1.18E+04	-1.98E+04
3.47E-04	1.14E-02	-2.73E+04	-3.34E+04	2.59E-04	1.15E-02	-1.09E+04	-1.92E+04
3.43E-04	1.14E-02	-2.63E+04	-3.31E+04	2.55E-04	1.15E-02	-1.05E+04	-1.80E+04
3.39E-04	1.14E-02	-2.54E+04	-3.21E+04	2.50E-04	1.15E-02	-9.68E+03	-1.73E+04
3.35E-04	1.14E-02	-2.45E+04	-3.17E+04	2.46E-04	1.15E-02	-9.27E+03	-1.62E+04
3.31E-04	1.14E-02	-2.37E+04	-3.08E+04	2.41E-04	1.15E-02	-8.44E+03	-1.54E+04
3.27E-04	1.14E-02	-2.27E+04	-3.04E+04	2.37E-04	1.15E-02	-8.01E+03	-1.42E+04
3.23E-04	1.14E-02	-2.20E+04	-2.96E+04	2.32E-04	1.15E-02	-7.06E+03	-1.32E+04
3.19E-04	1.14E-02	-2.10E+04	-2.92E+04	2.28E-04	1.15E-02	-6.68E+03	-1.16E+04
3.15E-04	1.14E-02	-2.03E+04	-2.83E+04	2.23E-04	1.15E-02	-5.85E+03	-1.06E+04
3.11E-04	1.14E-02	-1.95E+04	-2.78E+04	2.19E-04	1.15E-02	-5.44E+03	-8.60E+03
3.07E-04	1.14E-02	-1.88E+04	-2.70E+04	2.14E-04	1.15E-02	-4.25E+03	-7.13E+03
3.02E-04	1.14E-02	-1.78E+04	-2.65E+04	2.09E-04	1.15E-02	-3.79E+03	-5.76E+03
2.98E-04	1.14E-02	-1.72E+04	-2.56E+04	2.05E-04	1.15E-02	-3.33E+03	-4.36E+03
2.94E-04	1.15E-02	-1.64E+04	-2.51E+04	2.00E-04	1.15E-02	-4.18E+03	-2.97E+03
2.90E-04	1.15E-02	-1.58E+04	-2.42E+04				

พิกัดตำแหน่งและค่าสนามไฟฟ้าจากตารางที่ จ.1 ใช้ประกอบการคำนวณประจุของหยดน้ำ ด้วยการหาปริพันธ์ของสนามไฟฟ้าในบริเวณพื้นที่ผิวปิดรอบหยดน้ำ. ผลเฉลยของปริพันธ์ใช้การประมาณด้วยวิธีเกาส์ควอดราเจอร์ (Gauss quadrature) ซึ่งมีค่าน้ำหนักจุดสุ่ม w_i และตำแหน่งจุดสุ่ม x_i ดังตารางที่ จ.2

ตารางที่ จ.2 ตำแหน่งและน้ำหนักจุดสุ่มสำหรับการคำนวณปริพันธ์ด้วยวิธีเกาส์ควอดราเจอร์

i	x_i	w_i
1	0.960289856497538	0.101228536290376
2	-0.960289856497538	0.101228536290376
3	0.796666477413627	0.222381034453374
4	-0.796666477413627	0.222381034453374
5	0.525532409916329	0.313706645877887
6	-0.525532409916329	0.313706645877887
7	0.183434642495650	0.362683783378362
8	-0.183434642495650	0.362683783378362



ภาคผนวก ฉ

ตำแหน่งและสนามไฟฟ้าตามแนวขอบเขตแบบจำลองและผิวน้ำเมื่อหยดน้ำมีค่าศักย์ไฟฟ้า 1 kV

ในการคำนวณประจุสำหรับกรณีที่ยอดน้ำเป็นเงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 kV บริเวณพื้นที่ผิวน้ำพิจารณาจากแนวขอบเขตด้านบนของแบบจำลอง ($z = 0.012$ m) และแนวระดับผิวน้ำ ($z = 0.002$ m). ตำแหน่งพิกัดของจุดโหนดและค่าสนามไฟฟ้าที่แนวขอบเขตของแบบจำลอง และแนวระดับผิวน้ำแสดงในตารางที่ ฉ.1.

ตารางที่ ฉ.1 ตำแหน่งจุดโหนดและค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตด้านบนและผิวน้ำเมื่อหยดน้ำมีศักย์ไฟฟ้า 1 kV

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m		ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	$E_{z 1}$ (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	$E_{z 2}$ (V/m)		$E_{\rho 1}$ (V/m)	$E_{z 1}$ (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	$E_{z 2}$ (V/m)
0.00E+00	2.71E+00	5.59E+04	2.06E+00	-1.25E+03	7.97E-04	8.77E+01	5.38E+04	6.76E+01	-1.20E+03
3.46E-05	5.42E+00	5.59E+04	4.12E+00	-1.25E+03	8.31E-04	9.10E+01	5.36E+04	7.02E+01	-1.20E+03
6.93E-05	8.81E+00	5.58E+04	6.69E+00	-1.25E+03	8.66E-04	9.43E+01	5.34E+04	7.28E+01	-1.19E+03
1.04E-04	1.26E+01	5.58E+04	9.61E+00	-1.25E+03	9.00E-04	9.74E+01	5.32E+04	7.53E+01	-1.19E+03
1.39E-04	1.66E+01	5.58E+04	1.26E+01	-1.25E+03	9.35E-04	1.01E+02	5.30E+04	7.78E+01	-1.18E+03
1.73E-04	2.05E+01	5.58E+04	1.56E+01	-1.25E+03	9.70E-04	1.04E+02	5.28E+04	8.03E+01	-1.18E+03
2.08E-04	2.45E+01	5.57E+04	1.86E+01	-1.25E+03	1.00E-03	1.07E+02	5.26E+04	8.27E+01	-1.17E+03
2.42E-04	2.85E+01	5.57E+04	2.17E+01	-1.24E+03	1.04E-03	1.09E+02	5.24E+04	8.51E+01	-1.17E+03
2.77E-04	3.24E+01	5.56E+04	2.47E+01	-1.24E+03	1.07E-03	1.12E+02	5.22E+04	8.74E+01	-1.16E+03
3.12E-04	3.64E+01	5.55E+04	2.77E+01	-1.24E+03	1.11E-03	1.15E+02	5.19E+04	8.97E+01	-1.16E+03
3.46E-04	4.03E+01	5.55E+04	3.07E+01	-1.24E+03	1.14E-03	1.18E+02	5.17E+04	9.20E+01	-1.15E+03
3.81E-04	4.42E+01	5.54E+04	3.37E+01	-1.24E+03	1.18E-03	1.20E+02	5.15E+04	9.42E+01	-1.15E+03
4.16E-04	4.81E+01	5.53E+04	3.67E+01	-1.24E+03	1.21E-03	1.23E+02	5.12E+04	9.63E+01	-1.14E+03
4.50E-04	5.19E+01	5.52E+04	3.96E+01	-1.23E+03	1.25E-03	1.25E+02	5.10E+04	9.84E+01	-1.14E+03
4.85E-04	5.57E+01	5.51E+04	4.25E+01	-1.23E+03	1.28E-03	1.28E+02	5.07E+04	1.00E+02	-1.13E+03
5.19E-04	5.94E+01	5.50E+04	4.54E+01	-1.23E+03	1.32E-03	1.30E+02	5.05E+04	1.02E+02	-1.13E+03
5.54E-04	6.31E+01	5.48E+04	4.83E+01	-1.23E+03	1.35E-03	1.32E+02	5.02E+04	1.04E+02	-1.12E+03
5.89E-04	6.68E+01	5.47E+04	5.11E+01	-1.22E+03	1.39E-03	1.34E+02	4.99E+04	1.06E+02	-1.11E+03
6.23E-04	7.04E+01	5.46E+04	5.40E+01	-1.22E+03	1.42E-03	1.36E+02	4.97E+04	1.08E+02	-1.11E+03
6.58E-04	7.40E+01	5.44E+04	5.68E+01	-1.22E+03	1.45E-03	1.38E+02	4.94E+04	1.10E+02	-1.10E+03
6.93E-04	7.75E+01	5.43E+04	5.95E+01	-1.21E+03	1.49E-03	1.40E+02	4.91E+04	1.12E+02	-1.09E+03
7.27E-04	8.10E+01	5.41E+04	6.22E+01	-1.21E+03	1.52E-03	1.42E+02	4.88E+04	1.13E+02	-1.09E+03
7.62E-04	8.44E+01	5.39E+04	6.49E+01	-1.21E+03	1.56E-03	1.44E+02	4.85E+04	1.15E+02	-1.08E+03

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	E_{z1} (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	E_{z2} (V/m)
1.59E-03	1.46E+02	4.83E+04	1.17E+02	-1.08E+03
1.63E-03	1.47E+02	4.80E+04	1.18E+02	-1.07E+03
1.66E-03	1.49E+02	4.77E+04	1.20E+02	-1.06E+03
1.70E-03	1.50E+02	4.74E+04	1.21E+02	-1.05E+03
1.73E-03	1.52E+02	4.71E+04	1.22E+02	-1.05E+03
1.77E-03	1.53E+02	4.68E+04	1.24E+02	-1.04E+03
1.80E-03	1.54E+02	4.64E+04	1.25E+02	-1.03E+03
1.84E-03	1.55E+02	4.61E+04	1.26E+02	-1.03E+03
1.87E-03	1.56E+02	4.58E+04	1.27E+02	-1.02E+03
1.90E-03	1.57E+02	4.55E+04	1.29E+02	-1.01E+03
1.94E-03	1.58E+02	4.52E+04	1.30E+02	-1.01E+03
1.97E-03	1.59E+02	4.49E+04	1.31E+02	-9.98E+02
2.01E-03	1.60E+02	4.46E+04	1.32E+02	-9.91E+02
2.04E-03	1.61E+02	4.42E+04	1.33E+02	-9.84E+02
2.08E-03	1.61E+02	4.39E+04	1.33E+02	-9.77E+02
2.11E-03	1.62E+02	4.36E+04	1.34E+02	-9.69E+02
2.15E-03	1.62E+02	4.33E+04	1.35E+02	-9.62E+02
2.18E-03	1.63E+02	4.29E+04	1.36E+02	-9.54E+02
2.22E-03	1.63E+02	4.26E+04	1.36E+02	-9.47E+02
2.25E-03	1.64E+02	4.23E+04	1.37E+02	-9.40E+02
2.29E-03	1.64E+02	4.20E+04	1.38E+02	-9.32E+02
2.32E-03	1.64E+02	4.16E+04	1.38E+02	-9.25E+02
2.35E-03	1.64E+02	4.13E+04	1.39E+02	-9.17E+02
2.39E-03	1.64E+02	4.10E+04	1.39E+02	-9.10E+02
2.42E-03	1.64E+02	4.06E+04	1.39E+02	-9.02E+02
2.46E-03	1.64E+02	4.03E+04	1.40E+02	-8.95E+02
2.49E-03	1.64E+02	4.00E+04	1.40E+02	-8.88E+02
2.53E-03	1.64E+02	3.97E+04	1.40E+02	-8.80E+02
2.56E-03	1.64E+02	3.93E+04	1.40E+02	-8.73E+02
2.60E-03	1.63E+02	3.90E+04	1.41E+02	-8.65E+02
2.63E-03	1.63E+02	3.87E+04	1.41E+02	-8.58E+02
2.67E-03	1.63E+02	3.83E+04	1.41E+02	-8.51E+02
2.70E-03	1.62E+02	3.80E+04	1.41E+02	-8.43E+02
2.74E-03	1.62E+02	3.77E+04	1.41E+02	-8.36E+02
2.77E-03	1.61E+02	3.74E+04	1.41E+02	-8.29E+02
2.81E-03	1.61E+02	3.71E+04	1.41E+02	-8.21E+02

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	E_{z1} (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	E_{z2} (V/m)
2.84E-03	1.60E+02	3.67E+04	1.41E+02	-8.14E+02
2.87E-03	1.60E+02	3.64E+04	1.40E+02	-8.07E+02
2.91E-03	1.59E+02	3.61E+04	1.40E+02	-8.00E+02
2.94E-03	1.58E+02	3.58E+04	1.40E+02	-7.92E+02
2.98E-03	1.58E+02	3.55E+04	1.40E+02	-7.85E+02
3.01E-03	1.57E+02	3.51E+04	1.40E+02	-7.78E+02
3.05E-03	1.56E+02	3.48E+04	1.39E+02	-7.71E+02
3.08E-03	1.55E+02	3.45E+04	1.39E+02	-7.64E+02
3.12E-03	1.54E+02	3.42E+04	1.39E+02	-7.57E+02
3.15E-03	1.54E+02	3.39E+04	1.38E+02	-7.50E+02
3.19E-03	1.53E+02	3.36E+04	1.38E+02	-7.43E+02
3.22E-03	1.52E+02	3.33E+04	1.37E+02	-7.36E+02
3.26E-03	1.51E+02	3.30E+04	1.37E+02	-7.30E+02
3.29E-03	1.50E+02	3.27E+04	1.36E+02	-7.23E+02
3.32E-03	1.49E+02	3.24E+04	1.36E+02	-7.16E+02
3.36E-03	1.48E+02	3.21E+04	1.35E+02	-7.09E+02
3.39E-03	1.47E+02	3.18E+04	1.34E+02	-7.03E+02
3.43E-03	1.45E+02	3.15E+04	1.34E+02	-6.96E+02
3.46E-03	1.44E+02	3.12E+04	1.33E+02	-6.90E+02
3.50E-03	1.43E+02	3.09E+04	1.32E+02	-6.83E+02
3.53E-03	1.42E+02	3.06E+04	1.32E+02	-6.77E+02
3.57E-03	1.41E+02	3.04E+04	1.31E+02	-6.70E+02
3.60E-03	1.40E+02	3.01E+04	1.30E+02	-6.64E+02
3.64E-03	1.39E+02	2.98E+04	1.30E+02	-6.58E+02
3.67E-03	1.37E+02	2.95E+04	1.29E+02	-6.52E+02
3.71E-03	1.36E+02	2.92E+04	1.28E+02	-6.46E+02
3.74E-03	1.35E+02	2.90E+04	1.27E+02	-6.40E+02
3.77E-03	1.34E+02	2.87E+04	1.26E+02	-6.33E+02
3.81E-03	1.32E+02	2.84E+04	1.25E+02	-6.28E+02
3.84E-03	1.31E+02	2.82E+04	1.25E+02	-6.22E+02
3.88E-03	1.30E+02	2.79E+04	1.24E+02	-6.16E+02
3.91E-03	1.29E+02	2.77E+04	1.23E+02	-6.10E+02
3.95E-03	1.27E+02	2.74E+04	1.22E+02	-6.04E+02
3.98E-03	1.26E+02	2.71E+04	1.21E+02	-5.99E+02
4.02E-03	1.25E+02	2.69E+04	1.20E+02	-5.93E+02
4.05E-03	1.23E+02	2.66E+04	1.19E+02	-5.87E+02

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	E_{z1} (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	E_{z2} (V/m)
4.09E-03	1.22E+02	2.64E+04	1.18E+02	-5.82E+02
4.12E-03	1.21E+02	2.62E+04	1.17E+02	-5.76E+02
4.16E-03	1.19E+02	2.59E+04	1.16E+02	-5.71E+02
4.19E-03	1.18E+02	2.57E+04	1.15E+02	-5.66E+02
4.23E-03	1.17E+02	2.54E+04	1.14E+02	-5.61E+02
4.26E-03	1.15E+02	2.52E+04	1.13E+02	-5.55E+02
4.29E-03	1.14E+02	2.50E+04	1.12E+02	-5.50E+02
4.33E-03	1.13E+02	2.48E+04	1.11E+02	-5.45E+02
4.36E-03	1.11E+02	2.45E+04	1.10E+02	-5.40E+02
4.40E-03	1.10E+02	2.43E+04	1.09E+02	-5.35E+02
4.43E-03	1.09E+02	2.41E+04	1.08E+02	-5.30E+02
4.47E-03	1.07E+02	2.39E+04	1.07E+02	-5.25E+02
4.50E-03	1.06E+02	2.37E+04	1.06E+02	-5.21E+02
4.54E-03	1.05E+02	2.34E+04	1.05E+02	-5.16E+02
4.57E-03	1.03E+02	2.32E+04	1.03E+02	-5.11E+02
4.61E-03	1.02E+02	2.30E+04	1.02E+02	-5.07E+02
4.64E-03	1.01E+02	2.28E+04	1.01E+02	-5.02E+02
4.68E-03	9.93E+01	2.26E+04	1.00E+02	-4.98E+02
4.71E-03	9.79E+01	2.24E+04	9.90E+01	-4.93E+02
4.74E-03	9.66E+01	2.22E+04	9.79E+01	-4.89E+02
4.78E-03	9.53E+01	2.20E+04	9.67E+01	-4.85E+02
4.81E-03	9.40E+01	2.19E+04	9.56E+01	-4.81E+02
4.85E-03	9.27E+01	2.17E+04	9.45E+01	-4.76E+02
4.88E-03	9.14E+01	2.15E+04	9.34E+01	-4.72E+02
4.92E-03	9.01E+01	2.13E+04	9.22E+01	-4.68E+02
4.95E-03	8.88E+01	2.11E+04	9.11E+01	-4.64E+02
4.99E-03	8.75E+01	2.09E+04	9.00E+01	-4.60E+02
5.02E-03	8.62E+01	2.08E+04	8.88E+01	-4.56E+02
5.06E-03	8.49E+01	2.06E+04	8.77E+01	-4.53E+02
5.09E-03	8.36E+01	2.04E+04	8.65E+01	-4.49E+02
5.13E-03	8.24E+01	2.03E+04	8.54E+01	-4.45E+02
5.16E-03	8.11E+01	2.01E+04	8.43E+01	-4.42E+02
5.19E-03	7.98E+01	1.99E+04	8.31E+01	-4.38E+02
5.23E-03	7.86E+01	1.98E+04	8.20E+01	-4.34E+02
5.26E-03	7.74E+01	1.96E+04	8.08E+01	-4.31E+02
5.30E-03	7.61E+01	1.95E+04	7.97E+01	-4.28E+02

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	E_{z1} (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	E_{z2} (V/m)
5.33E-03	7.49E+01	1.93E+04	7.86E+01	-4.24E+02
5.37E-03	7.37E+01	1.92E+04	7.74E+01	-4.21E+02
5.40E-03	7.24E+01	1.90E+04	7.63E+01	-4.18E+02
5.44E-03	7.12E+01	1.89E+04	7.51E+01	-4.14E+02
5.47E-03	7.00E+01	1.87E+04	7.40E+01	-4.11E+02
5.51E-03	6.88E+01	1.86E+04	7.29E+01	-4.08E+02
5.54E-03	6.76E+01	1.85E+04	7.17E+01	-4.05E+02
5.58E-03	6.65E+01	1.83E+04	7.06E+01	-4.02E+02
5.61E-03	6.53E+01	1.82E+04	6.95E+01	-3.99E+02
5.65E-03	6.41E+01	1.81E+04	6.83E+01	-3.96E+02
5.68E-03	6.30E+01	1.79E+04	6.72E+01	-3.94E+02
5.71E-03	6.18E+01	1.78E+04	6.61E+01	-3.91E+02
5.75E-03	6.07E+01	1.77E+04	6.50E+01	-3.88E+02
5.78E-03	5.95E+01	1.76E+04	6.39E+01	-3.85E+02
5.82E-03	5.84E+01	1.75E+04	6.27E+01	-3.83E+02
5.85E-03	5.73E+01	1.73E+04	6.16E+01	-3.80E+02
5.89E-03	5.62E+01	1.72E+04	6.05E+01	-3.78E+02
5.92E-03	5.50E+01	1.71E+04	5.94E+01	-3.75E+02
5.96E-03	5.39E+01	1.70E+04	5.83E+01	-3.73E+02
5.99E-03	5.28E+01	1.69E+04	5.72E+01	-3.71E+02
6.03E-03	5.18E+01	1.68E+04	5.61E+01	-3.68E+02
6.06E-03	5.07E+01	1.67E+04	5.50E+01	-3.66E+02
6.10E-03	4.96E+01	1.66E+04	5.39E+01	-3.64E+02
6.13E-03	4.85E+01	1.65E+04	5.28E+01	-3.62E+02
6.16E-03	4.75E+01	1.64E+04	5.18E+01	-3.59E+02
6.20E-03	4.64E+01	1.63E+04	5.07E+01	-3.57E+02
6.23E-03	4.54E+01	1.62E+04	4.96E+01	-3.55E+02
6.27E-03	4.44E+01	1.61E+04	4.85E+01	-3.53E+02
6.30E-03	4.33E+01	1.60E+04	4.75E+01	-3.51E+02
6.34E-03	4.23E+01	1.59E+04	4.64E+01	-3.49E+02
6.37E-03	4.13E+01	1.59E+04	4.53E+01	-3.48E+02
6.41E-03	4.03E+01	1.58E+04	4.43E+01	-3.46E+02
6.44E-03	3.93E+01	1.57E+04	4.32E+01	-3.44E+02
6.48E-03	3.83E+01	1.56E+04	4.22E+01	-3.42E+02
6.51E-03	3.73E+01	1.55E+04	4.11E+01	-3.41E+02
6.55E-03	3.63E+01	1.55E+04	4.01E+01	-3.39E+02

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	E_{z1} (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	E_{z2} (V/m)
6.58E-03	3.53E+01	1.54E+04	3.90E+01	-3.37E+02
6.61E-03	3.44E+01	1.53E+04	3.80E+01	-3.36E+02
6.65E-03	3.34E+01	1.53E+04	3.70E+01	-3.34E+02
6.68E-03	3.24E+01	1.52E+04	3.60E+01	-3.33E+02
6.72E-03	3.15E+01	1.51E+04	3.49E+01	-3.31E+02
6.75E-03	3.05E+01	1.51E+04	3.39E+01	-3.30E+02
6.79E-03	2.96E+01	1.50E+04	3.29E+01	-3.29E+02
6.82E-03	2.87E+01	1.50E+04	3.19E+01	-3.27E+02
6.86E-03	2.77E+01	1.49E+04	3.09E+01	-3.26E+02
6.89E-03	2.68E+01	1.48E+04	2.99E+01	-3.25E+02
6.93E-03	2.59E+01	1.48E+04	2.89E+01	-3.24E+02
6.96E-03	2.50E+01	1.47E+04	2.79E+01	-3.23E+02
7.00E-03	2.41E+01	1.47E+04	2.69E+01	-3.22E+02
7.03E-03	2.32E+01	1.46E+04	2.59E+01	-3.21E+02
7.06E-03	2.23E+01	1.46E+04	2.49E+01	-3.20E+02
7.10E-03	2.14E+01	1.46E+04	2.40E+01	-3.19E+02
7.13E-03	2.05E+01	1.45E+04	2.30E+01	-3.18E+02
7.17E-03	1.97E+01	1.45E+04	2.20E+01	-3.17E+02
7.20E-03	1.88E+01	1.44E+04	2.11E+01	-3.16E+02
7.24E-03	1.79E+01	1.44E+04	2.01E+01	-3.15E+02
7.27E-03	1.71E+01	1.44E+04	1.91E+01	-3.14E+02

ρ (m)	$z = 0.012$ m		$z = 0.002$ m	
	$E_{\rho 1}$ (V/m)	E_{z1} (V/m)	$E_{\rho 2}$ (V/m)	E_{z2} (V/m)
7.31E-03	1.62E+01	1.43E+04	1.82E+01	-3.14E+02
7.34E-03	1.54E+01	1.43E+04	1.72E+01	-3.13E+02
7.38E-03	1.45E+01	1.43E+04	1.63E+01	-3.12E+02
7.41E-03	1.37E+01	1.42E+04	1.54E+01	-3.12E+02
7.45E-03	1.28E+01	1.42E+04	1.44E+01	-3.11E+02
7.48E-03	1.20E+01	1.42E+04	1.35E+01	-3.11E+02
7.52E-03	1.12E+01	1.42E+04	1.26E+01	-3.10E+02
7.55E-03	1.03E+01	1.41E+04	1.16E+01	-3.10E+02
7.58E-03	9.52E+00	1.41E+04	1.07E+01	-3.09E+02
7.62E-03	8.71E+00	1.41E+04	9.81E+00	-3.09E+02
7.65E-03	7.90E+00	1.41E+04	8.90E+00	-3.08E+02
7.69E-03	7.09E+00	1.41E+04	7.99E+00	-3.08E+02
7.72E-03	6.29E+00	1.41E+04	7.09E+00	-3.08E+02
7.76E-03	5.49E+00	1.40E+04	6.19E+00	-3.07E+02
7.79E-03	4.69E+00	1.40E+04	5.29E+00	-3.07E+02
7.83E-03	3.90E+00	1.40E+04	4.40E+00	-3.07E+02
7.86E-03	3.11E+00	1.40E+04	3.51E+00	-3.07E+02
7.90E-03	2.33E+00	1.40E+04	2.63E+00	-3.07E+02
7.93E-03	1.55E+00	1.40E+04	1.75E+00	-3.07E+02
7.97E-03	7.73E-01	1.40E+04	8.72E-01	-3.07E+02
8.00E-03	3.86E-01	1.40E+04	4.36E-01	-3.07E+02

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิกานดา นันทนาวุฒิ
วัน เดือน ปี เกิด	23 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	41/1 ถนน บ้านดอนตุม ตำบล ปากแรต อำเภอบ้านโป่ง จังหวัด ราชบุรี 70110
ผลงานตีพิมพ์	<ol style="list-style-type: none">1. W. Nantanawut, B. Techaumnat and N. Tanthanuch, "Numerical Simulation of the Disintegration of an Aqueous Drop Under Electric Field," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 6, art no. 7200904, pp. 1-4, June 2021.2. วิกานดา นันทนาวุฒิ, บุญชัย เตชะอำนาจ และ ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช, "การศึกษาการรวมตัวของหยดน้ำที่มีประจุในน้ำมันฉนวนกับผิวน้ำภายใต้สนามไฟฟ้า", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 44, จังหวัดน่าน, 2564, หน้า 218-221.3. W. Nantanawut, B. Techaumnat and N. Tanthanuch, "Experimental Observation of Charged Drop Coalescence Under Electric Field," TENCON 2021 - 2021 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Auckland, New Zealand, 2021, pp. 353-356.4. W. Nantanawut, B. Techaumnat and N. Tanthanuch, "Numerical Analysis of the Deformation of Aqueous Drop Under Uniform Electric Field," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 29, no. 3, pp. 1038-1044, June 2022.