การทดลองเรื่องมอเตอร์ฟิล์มของเหลว

พศิน แย้มสงวนศักดิ์* และตุลา จูฑะรสก

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

*E-mail: phasin29628@gmail.com

รับบทความ: 1 พฤศจิกายน 2559 ยอมรับตีพิมพ์: 20 ตุลาคม 2560

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการทดลองเพื่อแก้ไขโจทย์ปัญหาในหัวข้อเรื่อง "A Liquid Film Motor" ที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกในฟิล์มของเหลว โดยการจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มของเหลว โดยชุดทดลองประกอบด้วย 1) ฟิล์มบางของเหลวที่เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำและกลีเซอรอล 2) แหล่งจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และ 3) แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) เพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า (J_{el}) ให้กับฟิล์มบางของเหลว โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ตอน ได้แก่ 1) การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มสารละลายกลีเซอรอล 2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอกกับความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะที่ฟิล์มเริ่มหมุน และ 3) การศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอกและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์มของเหลว (ω) จากการทดลองพบว่า 1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มของเหลว (J_{el}) มีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) 2) ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ฟิล์มสารละลายเริ่มเกิดการหมุนเป็นไปตามกฎการยกกำลัง และ 3) ความเร็วและทิศทางในการหมุนของฟิล์มสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับฟิล์มของเหลว (V_{el}) คาดว่าผลการวิจัยชุดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนฟิสิกส์หรือเป็นแนวทางในการฝึกแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์สำหรับนักเรียนได้

คำสำคัญ: ค่าเริ่มต้น ปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิก ฟิล์มของเหลว มอเตอร์ฟิล์มของเหลว

An Experiment on Liquid Film Motor

Phasin Yaemsanguansak* and Tula Jutarosaga

Department of Physics, Faculty of Science,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand
*E-mail: phasin29628@gmail.com

Received: 1 November 2016 Accepted: 20 October 2017

Abstract

The article suggested an experimental setup for solving a problem of "a Liquid Film Motor" with the principle of electrodynamics by applying the external electric field perpendicular to the current through the liquid film. The experimental kit consists of 1) liquid film of glycerol and water solution, 2) a voltage generator for creating external electric field (E_{ext}) and 3) a voltage generator (V_{el}) for supplying current (J_{el}) through the liquid. The experiment is divided into 3 sections: 1) a study of electrical properties of glycerol solution, 2) a study of the relationship between the external electric filed and the voltage when the liquid films start to rotate and 3) an influence of external electric field and voltage on the angular velocity of the liquid film (ω). From the study, 1) the current flows through the liquid (J_{el}) and the voltage (V_{el}) are in agreement with Ohm's law, 2) the relationship between the external electric field and voltage when the film starts to rotate follows the power law, and 3) velocity and direction of the rotation can be controlled by controlling the external electric field (E_{ext}) and voltage (V_{el}). This experimental setup can be applied for the teaching and learning in Physics or used as a guideline for practicing problem solving in science for students.

Keywords: Threshold, Electrohydrodynamics, Liquid film, Liquid film motor

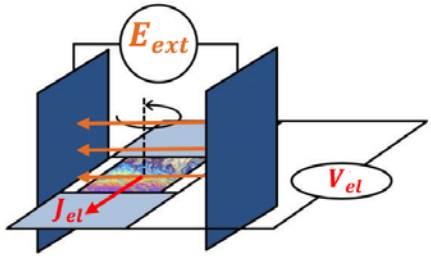
บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบชุดทดลองเรื่องมอเตอร์ฟิล์มของเหลว เพื่อศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิก (Electrohydro dynamics) ที่เกิดขึ้นในฟิล์มบางของเหลว และเสนอแนวทางการทดลองเพื่อแก้โจทย์ฟิสิกส์สัประยุทธ์ (Martchenko, 2014) อย่างเป็นระบบ เพื่อส่งเสริมให้นักเรียนมีทักษะการแก้ปัญหาปลายเปิดที่มีความซับซ้อนทางวิทยาศาสตร์ ผ่านกระบวนการคิดวิเคราะห์และการออกแบบการ

ทดลอง ซึ่งตรงกับหลักการสะเต็มศึกษา (STEM education) ที่เป็นแนวทางการศึกษาที่ได้บูรณาการความรู้ระหว่างศาสตร์วิชาต่าง ๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และคณิตศาสตร์เข้าด้วยกัน (Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology, 2016) จากหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 ผู้ทดลองสามารถนำความรู้ความเข้าใจที่ได้จากการศึกษามอเตอร์ฟิล์มของเหลวไปประยุกต์ใช้ในสาระการเรียนรู้ที่ 4 แรงและการเคลื่อนที่ ตามมาตรฐานตัวชี้วัดของนักเรียนในระดับชั้นมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 4 ถึง 6 เรื่อง “การทดลองและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า และนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้”

ภาพจำลองของชุดอุปกรณ์ “มอเตอร์ฟิล์มของเหลว” ด้วยปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิก (ภาพที่ 1) ประกอบด้วย 1) แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) 2) แหล่ง กำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) สำหรับสร้างกระแสไฟฟ้าให้กับฟิล์มของเหลว (J_{el}) โดยทิศทางของกระแสไฟฟ้ามีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งฟิล์มของเหลวจะเริ่มต้นหมุนขึ้นเป็นไปตามปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิก เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าและกระแส ไฟฟ้ามีค่าถึงค่าเริ่มต้น (threshold) และสามารถควบคุมทิศทางและความเร็วการหมุนได้ โดยควบคุมการจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกและกระแสไฟฟ้าที่ให้กับฟิล์มของเหลว ซึ่งเกิดได้ดีกับน้ำบริสุทธิ์และของเหลวชนิดที่มีขั้วทางไฟฟ้า (Amjadi, 2009)

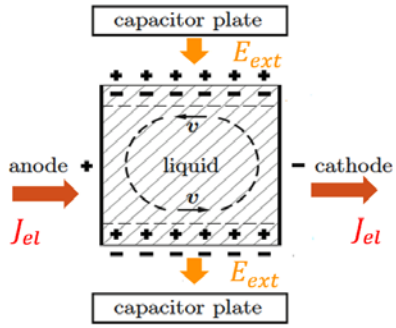
Leaky dielectric model (ภาพที่ 2) เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้เพื่ออธิบายการหมุนของฟิล์มของเหลวที่เกิดจากปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดร



ภาพที่ 1 ภาพจำลองอุปกรณ์มอเตอร์ฟิล์มของเหลว (Martchenko, 2014)

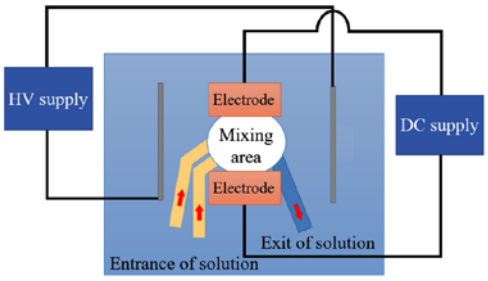
ไดนามิก เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าภายในฟิล์มของเหลว โดยสามารถอธิบายเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) ให้กับฟิล์มของเหลว เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าบริเวณขอบภายในเนื้อฟิล์มของเหลว โดยประจุบวกจะไปสะสมอยู่บริเวณฝั่งแผ่นตัวเก็บประจุที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ และประจุลบจะไปสะสมอยู่บริเวณฝั่งแผ่นตัวเก็บประจุที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก และ 2) ประจุที่สะสมอยู่ที่ขอบของเนื้อฟิล์มของเหลวเหล่านั้นจะถูกแรงทางไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรด (V_{el}) กระทำ ส่งผลให้ประจุเกิดการเคลื่อนที่ของประจุ โดยประจุบวกจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และประจุลบจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุทั้ง 2 ชนิดนี้ทำให้เกิดเป็นแรงเฉือน (shear force) ในทิศตรงข้ามบริเวณขอบบนและขอบล่างของฟิล์มของเหลว เป็นเหตุให้ฟิล์มของเหลวเกิดการหมุน (Zhenyan, 2016)

ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้หลักการอิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกมาประยุกต์ใช้ในการผสมของเหลวในห้องปฏิบัติการบนชิพ (lab-on-chip) (ภาพที่ 3; Zhenyan, 2016) โดยการทำงานได้จากการเติมสารละลายที่ต้องการผสม 2 ชนิดที่ทางเข้า



ภาพที่ 2 ปรากฏการณ์ Leaky dielectric model (Shiryaeva, 2009)

(entrance channel) สู่บริเวณพื้นที่ผสม (mixing area) แล้วจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (HV supply) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้า และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply) เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าให้แก่สารละลาย สารละลายจะผสมกันอย่างอัตโนมัติที่บริเวณพื้นที่ผสม แล้วสารละลายที่ผสมกันเรียบร้อยผ่านออกจากพื้นที่ผสมบริเวณทางออก (exit channel) นอกจากการศึกษาระบบการผสมของเหลวในระดับไมโครเมตรแล้ว ปรากฏการณ์อิเล็กโทรไฮโดรไดนามิกยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการแยกชนิดของของเหลวหรือการแยกอนุภาคในระบบอนุภาคระดับไมโครเมตรได้ด้วย (Amjadi, 2009)



ภาพที่ 3 ห้องปฏิบัติการบนชิพ (Zhenyan, 2016)

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 5 ส่วน ดังนี้

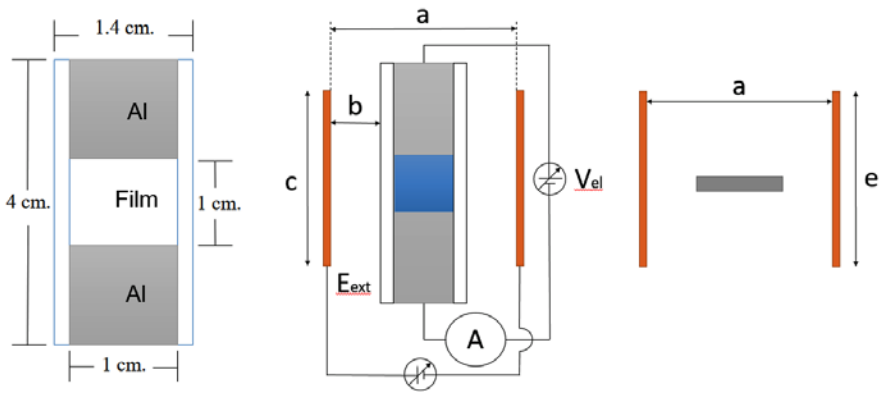
1. *การเตรียมสารละลายฟิล์มของเหลว*

สารละลายของฟิล์มของเหลวสามารถเตรียมได้โดยผสมน้ำและกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการทดลองนี้เตรียมสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 10%V 30%V 50%V 70%V และ 90%V แต่เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลน้อยกว่า 50%V จะส่งผลให้ฟิล์มของเหลวสลายตัวเร็ว ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ความเข้มข้นเฉพาะที่ 50%V 70%V และ 90%V

2. *การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด แหล่งกำเนิดไฟฟ้า และการประกอบชุดทดลอง*

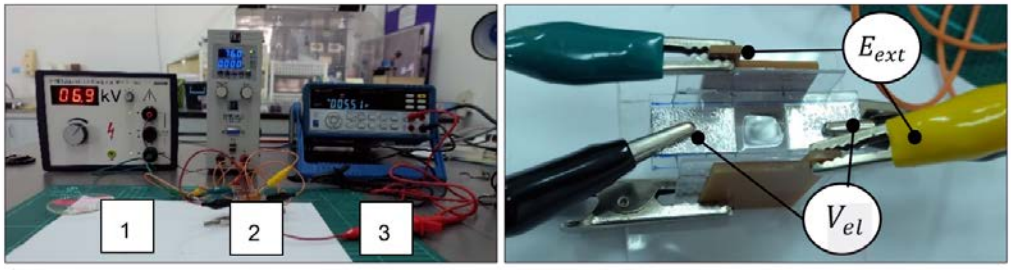
แผนภาพจำลองชุดอุปกรณ์แสดงในภาพที่ 4 โดยภาพที่ 4(ก) แสดงขนาดของแผ่นอะคริลิกที่ติดเทปอะลูมิเนียม (Al) เพื่อใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยบริเวณช่องเปิดตรงกลางจะใช้ในการยึดเกาะฟิล์มของเหลว ภาพที่ 4(ข) แสดงภาพจากมุมบนของแผ่นอะคริลิกซึ่งวางอยู่ระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุที่ต่อแหล่งจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) กับแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) และภาพที่ 4(ค) แสดงภาพตัดขวางของชุดการทดลอง โดยที่ a = 1.6 cm, b = 0.1 cm, c = 2 cm และ e = 3 cm

ชุดอุปกรณ์ทดลองแสดงในภาพที่ 5(ก) ประกอบด้วย 1) แหล่งจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) จ่ายสนามไฟฟ้าได้ระหว่าง 0 – 10 $kV \cdot m^{-1}$ 2) แหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่าง 0 – 160 V และ 3) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า ภาพที่ 5(ข) แสดงการจ่ายไฟฟ้าให้กับฟิล์มของเหลว โดยต่อแหล่งจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกให้แก่แผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และต่อแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวมีอุปกรณ์บางชิ้นที่มีความซับซ้อนในเรื่องการใช้งานและการทดลอง นอกจากนี้ยังมีราคาสูง ซึ่งไม่เหมาะ-



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 4 แผนภาพจำลอง (ก) แผ่นอะคริลิกติดด้วยเทปอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรด (ข) ภาพมุมบนของแบบจำลองชุดอุปกรณ์การทดลอง และ (ค) ภาพตัดขวางของแบบจำลองชุดอุปกรณ์การทดลอง



(ก) (ข)

ภาพที่ 5 ชุดอุปกรณ์การทดลอง (ก) การจัดชุดอุปกรณ์การทดลอง และ (ข) การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับฟิล์มของเหลว

สมต่อการใช้งานในระดับมัธยมศึกษา เช่น แหล่งจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก เพื่อความสะดวกในการทดลองผู้ทดลองสามารถปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ชิ้นนี้เป็นอุปกรณ์จ่ายสนามไฟฟ้าคงที่อย่างง่ายซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไป เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าในระดับไมโครแอมป์ ถ้าต้องการศึกษาลักษณะการหมุนของฟิล์มโดยไม่ศึกษากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์ม สามารถตัดอุปกรณ์ในส่วนนี้ออก เพื่อความสะดวกและประหยัดค่าใช้ง่ายในการทดลอง

3. *การดำเนินการทดลอง*

3.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มสารละลายกลีเซอรอล

กรณีที่ 1 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มสารละลายที่ E_{ext} เท่ากับ 0 เริ่มต้นด้วยการนำกรอบอะคริลิกไปจุ่มในสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 50 %V เพื่อให้เกิดฟิล์มของเหลวที่บริเวณช่องเปิด โดยเช็ดพื้นที่รอบ ๆ บนแผ่นอะคริลิกให้แห้งเหลือไว้เฉพาะฟิล์มของเหลวในบริเวณช่องเปิด จากนั้นนำกรอบอะคริลิกนี้ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าบริเวณขั้วอะลูมิเนียมดังภาพที่ 5(ข)

จากนั้นเริ่มจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ให้กับฟิล์มสารละลายกลีเซอรอล 10 V และวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มของเหลวด้วยไมโครแอมป์มิเตอร์ จากนั้นเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรดครั้งละ 5 V จดบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า จนถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 100 V จากนั้นเช็ดกรอบอะคริลิกให้แห้ง และเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลจาก 50%V เป็น 70%V และ 90%V ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์บริเวณขั้วอิเล็กโทรด กับกระแสไฟฟ้า เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้า และสภาพต้านทานไฟฟ้า

กรณีที่ 2 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มสารละลายที่ E_{ext} ไม่เท่ากับ 0 เริ่มต้นด้วยการติดตั้งอุปกรณ์เหมือนกับกรณีที่ 1 เพียงแต่เพิ่มสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า (I_{el}) โดยค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบจะเป็นค่าสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุน

การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยการหาค่าความชันระหว่างความสัมพันธ์ของค่ากระแส (I_{el}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฟิล์มของเหลว (V_{el}) สำหรับค่าสภาพนำไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{l}{A \cdot R} = \frac{D \cdot l^2}{m \cdot R} \quad \text{- - - (1)}$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ω) σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) l คือ ความยาวของฟิล์มของเหลว (m) หรือมีค่าเท่ากับขนาดของความสูงของช่องเปิดที่แผ่นอะคริลิกคือ 1 cm A คือ พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (m^2) D คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของสารละลายกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ($kg \cdot m^{-3}$) และ m คือ มวลของของสารละลายที่วัดได้ (kg)

3.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุน

เริ่มจากการนำกรอบอะคริลิกไปจุ่มสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 50%V และจัดชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) จากนั้นตั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ไว้ที่ 10 V จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) ขึ้นโดยปรับแหล่งจ่ายความต่างศักย์ที่ต่ออยู่กับแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุสังเกตการหมุนของฟิล์มสารละลาย โดยทันทีที่ฟิล์มเริ่มหมุนให้บันทึกค่าสนามไฟฟ้าภายนอกไว้ จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยการเพิ่ม V_{el} ครั้งละ 5V จนกระทั่ง V_{el} มีค่าเท่ากับ 100V โดยข้อควรระวังคือควรเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุกครั้ง เนื่องจากการระเหยของสารละลายส่งผลต่อค่าที่บันทึกได้ จากนั้นทำการทดลองซ้ำที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ 70%V และ 90%V ตามลำดับ เขียนความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรด (V_{el}) ที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุน โดยที่ความต่างศักย์ (V_{el}) ใด ๆ จะมีค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) ค่าหนึ่งที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุนซึ่งเราจะให้นิยามค่านี้ว่าเป็นค่าสนามไฟฟ้าภายนอกเริ่มต้น (threshold) ที่ทำให้ฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนพอดี

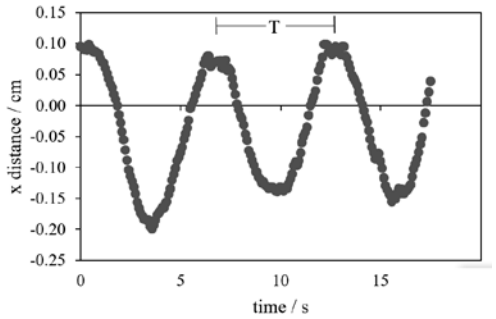
3.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่ส่งผลต่อความค่าความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์ม (ω)

กรณีที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) กับค่าความเร็วเชิงมุมของการหมุนของฟิล์ม (ω) ที่ความต่างศักย์ (V_{el}) คงที่เท่ากับ 60V โดยเริ่มจากนำกรอบอะคริลิกไปจุ่มสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 70%V และจัดชุดอุปกรณ์การทดลองดังในภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) โดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ (V_{el}) เริ่มต้นมีค่าคงที่ที่ 60V นำเศษกระดาษที่มีขนาดเล็กไว้บนผิวของฟิล์มของเหลว เพื่อใช้เป็นจุดที่ใช้พิจารณาหาค่าความเร็วเชิงมุม จากนั้นปรับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) จาก 0 ถึง 10 kV·m^{-1} ทีละ 1 kV·m^{-1} และบันทึกวิดีโอเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุมด้วยโปรแกรม TRACKER จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) กับความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์ม (ω)

กรณีที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) กับค่าความเร็วเชิงมุมของการหมุนของฟิล์ม (ω) ที่สนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) คงที่เท่ากับ 3 kV·m^{-1} โดยเริ่มจากนำกรอบอะคริลิกไปจุ่มสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 70%V และจัดชุดอุปกรณ์การทดลองดังในภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) โดยกำหนดให้ค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) คงที่ที่ 3 kV·m^{-1} และปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (V_{el}) ให้กับขั้วอิเล็กโทรดครั้งละ 10V จาก 0 ถึง 100V บันทึกวีดิโอและคำนวณความเร็วเชิงมุมเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์บริเวณขั้วอิเล็กโทรดกับความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์ม

อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถหาค่าความเร็วเชิงมุมได้อย่างถูกต้อง ผู้บันทึกผลการทดลองสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างของการกระจัดของการเคลื่อนที่ของฟิล์ม (กระดาษแผ่นเล็ก ๆ ที่วางลงไปบนฟิล์มเพื่อเป็นจุดสังเกต) ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น การทดลองนี้วัดการกระจัดของฟิล์มในแนวแกน x และเขียนกราฟเทียบกับเวลา (ภาพที่ 6) พบว่า การเคลื่อนที่ในแนวแกน x มีการเคลื่อนที่เป็นลักษณะของคาบเวลา นักเรียนผู้ทำการทดลองสามารถอ่านคาบเวลาได้โดยตรงจากกราฟนี้



ภาพที่ 6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับระยะทางในแนวแกน x ของการหมุนของฟิล์ม

ผลการทดลอง

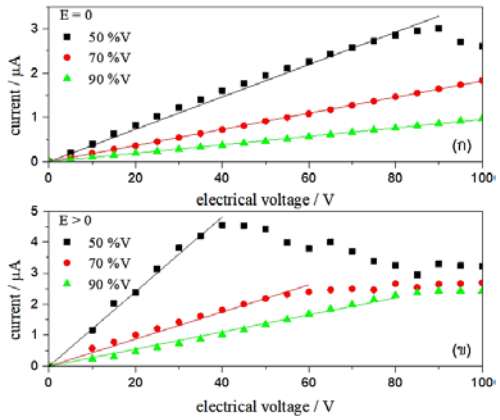
1. *สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มสารละลายกลีเซอรอล*

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (J_{el}) เมื่อสนามไฟฟ้าให้ฟิล์มของเหลวมีค่าเท่ากับศูนย์ (E_{ext} = 0) ดังในภาพที่ 7(ก) พบว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามค่าความต่างศักย์ (V_{el}) เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) อย่างไรก็ตาม ในช่วงต่อมาค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง แม้ว่าค่าความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นที่สารละลายกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50%V ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของฟิล์มของเหลวอาจมีค่าไม่คงที่ เพราะความเข้มข้นของกลีเซอรอลน้อย ไม่สามารถรักษาสภาพความหนาของเนื้อฟิล์มให้คงที่ได้และการระเหยของน้ำที่ผสมอยู่ในเนื้อฟิล์ม ทำให้ความ

หนาของฟิล์มมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (J_{el}) เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) ให้ฟิล์มของเหลวที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุนพอดี ดังในภาพที่ 7(ข) พบว่า ฟิล์มของสารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 50%V ในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่มีค่าน้อยกว่าประมาณ 40 V ค่ากระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์ หรือค่าความชันของเส้นตรงมีค่าคงที่ แต่เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความต่างศักย์ อาจเป็นผลเนื่องจากการลดลงของความหนาของฟิล์มเนื่องจากการระเหยของสารละลาย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก พบว่าความต่างศักย์ที่จุดความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงจาก 75V เป็น 40V เนื่องจากเมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกให้กับฟิล์มของสารละลายส่งผลฟิล์มเกิดการหมุนทำให้ฟิล์มมีการระเหยสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงเร็วกว่าเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก ส่งผลค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้น กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันมีค่าลดลงด้วย

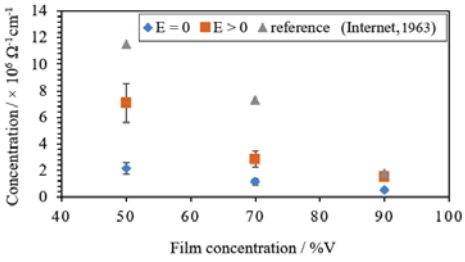
อย่างไรก็ตามพบว่าจุดเปลี่ยนความชันของกราฟเมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกทำให้ฟิล์มหมุนทุกความเข้มข้น โดยฟิล์มที่ความเข้มข้น 50%V 70%V 90%V มีจุดเปลี่ยนความชันที่ความต่างศักย์ประมาณ 40V 60V และ 80V ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมของสารละลายภายในฟิล์มเกิดการระเหย ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลมีค่าสูงขึ้น และทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนเนื้อฟิล์มของเหลวจะถูกแรงเฉือน (shear force) กระทำส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าลดลง และมีผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านฟิล์มได้ลดลง



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (ก) เมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกมีค่าเท่ากับ 0 (ข) เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุน

ผลการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 50%V 70%V และ 90%V เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้าภายนอก (ภาพที่ 8) พบว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สามารถคำนวณได้จากงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของสารละลายกลีเซอรอล (Glycerine Producers' Association, 1963) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าที่คำนวณได้อยู่ในย่านเดียวกันกับค่าจากเอกสารอ้างอิง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น แต่ค่าสภาพนำไฟฟ้ายังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าจากเอกสาร

อ้างอิง เช่น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้น 50%V ค่าสภาพนำไฟฟ้าจากการทดลองของสารละลายเมื่อมีสนามไฟฟ้าและไม่มีสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $(2.15 \pm 0.44) \times 10^6\ \Omega^{-1}cm^{-1}$ และ $(7.08 \pm 1.47) \times 10^6\ \Omega^{-1}cm^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายกลีเซอรอลจากเอกสารอ้างอิงที่ความเข้มข้นเดียวกัน มีค่าเท่ากับ $11.50 \times 10^6\ \Omega^{-1}cm^{-1}$ ความแตกต่างนี้อาจเนื่องมาจากการประมาณรูปทรงของฟิล์มของเหลวที่มีพื้นที่ หน้าตัดคงที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือผลคูณของความหนาของฟิล์มกับความกว้างของช่องเปิดที่มีค่าคงที่ ในขณะที่ความหนาของฟิล์มอาจไม่สม่ำเสมอจากขอบของช่องเปิดด้านหนึ่งไปยังขอบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนขึ้น



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟิล์มของเหลวกับสภาพนำไฟฟ้า

ภาพที่ 8 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายขณะที่มีสนามไฟฟ้าภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกที่ทุกความเข้มข้น อาจมาจากเมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก ฟิล์มของเหลวมีการหมุน ดังที่กล่าวแล้วข้างต้นว่า ฟิล์มของของเหลวอาจมีความหนาลดลง เนื่องมาจากการระเหยของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มวลของของเหลวมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) อาจเป็นไปได้ว่า มวล (m) และความหนาแน่นของฟิล์ม (D) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป การที่ความหนาลดลงจากการระเหย มวลจะมีค่าลดลงด้วยพร้อม ๆ กับการระเหยของน้ำในฟิล์มที่มีจุดเดือดต่ำกว่ากลีเซอรอล มีผลให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และค่าสภาพความนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

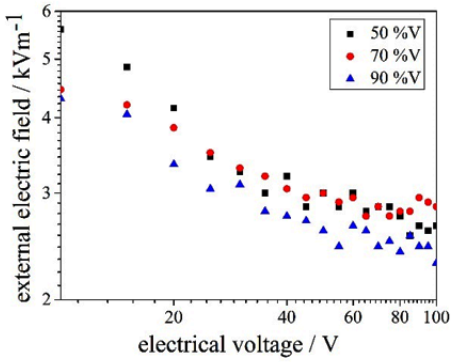
2. *ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่ทำให้ฟิล์มเริ่มหมุน*

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรด (V_{el}) ในภาพที่ 9(ก) พบว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าภายนอกเริ่มต้น (threshold) ที่ใช้เพื่อทำให้ฟิล์มเริ่มหมุนจะมีค่าลดลง โดยที่สนามไฟฟ้าภายนอกเริ่มต้นของสารละลายเข้มข้น 90%V มีค่าน้อยที่สุดที่ทุกค่าความต่างศักย์ที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 70%V และ 50%V ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฟิล์ม (V_{el}) เป็นไปดังสมการที่ (2)

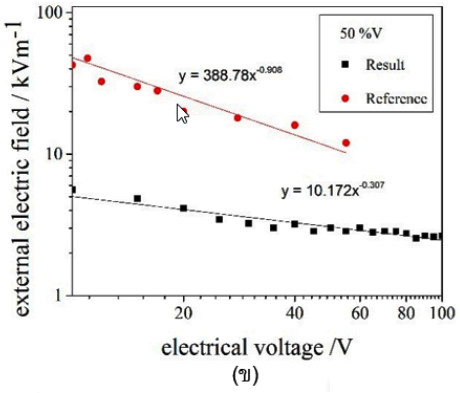
$$E_{ext} \propto \left(\frac{1}{V_{el}}\right)^n \text{ - - - (2)}$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ของ E_{ext} และ V_{el} ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลที่ 50%V เปรียบเทียบกับการทดลองจากเอกสารอ้างอิง (Amjadi, 2009) ดังในภาพที่ 9(ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยที่ค่า n ที่คำนวณได้จากการทดลองครั้งนี้มีค่าประมาณ 0.31

เมื่อพิจารณาจุดที่ทำให้ฟิล์มของเหลวเริ่มหมุน ในภาพที่ 9(ข) พบว่า สนามไฟฟ้าภายนอกที่จ่ายให้ฟิล์มสารละลายความเข้มข้น 50%V จากผลการทดลองมีค่าน้อยกว่าผลการทดลองที่



(ก)



(ข)

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับสนามไฟฟ้าภายนอก (ก) เมื่อฟิล์มสารละลายเข้มข้น 50%V 70%V และ 90%V เริ่มหมุน และ (ข) เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าภายนอกกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผลการทดลองและแหล่งอ้างอิง เมื่อฟิล์มของเหลวความเข้มข้น 50%V เริ่มหมุน (Amjadi, 2009)

ได้จากงานวิจัยเรื่องมอเตอร์ฟิล์มของเหลว (Glycerine Producers' Association, 1963) อาจเป็นผลเนื่องมาจากขนาดของหน้าตัดที่ใช้ยึดเกาะฟิล์มสารละลายมีขนาดแตกต่างกัน กล่าวคือ ภายในงานวิจัยเรื่องมอเตอร์ฟิล์มของเหลวนั้นใช้แผ่นปริ๊นท์ (print circuit board) เพื่อเป็นวัสดุที่ยึดเกาะฟิล์มสารละลาย ซึ่งมีความแตกต่างจากการทดลองที่ใช้แผ่นอะคริลิกมาทำเป็นวัสดุที่ใช้ในการยึดเกาะฟิล์มสารละลาย โดยที่แผ่นปริ๊นท์มีความหนามากกว่าแผ่นอะคริลิก เมื่อทำเป็นวัสดุในการยึดเกาะฟิล์มสารละลายส่งผลให้ฟิล์มสารละลายมีความหนามากกว่าแผ่นฟิล์มสารละลายที่ยึดเกาะกับแผ่นอะคริลิก เป็นผลให้ใช้ค่าสนามไฟฟ้าภายนอกน้อยกว่าและทำให้ฟิล์มหมุน เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่าเท่ากัน

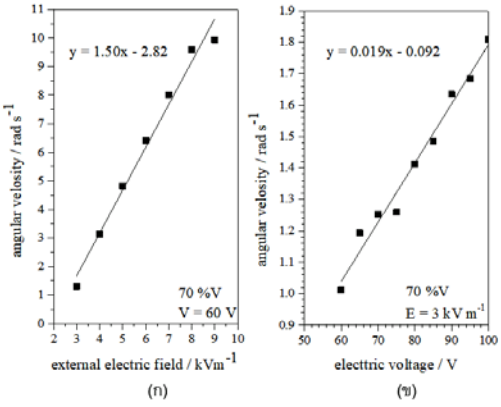
3. *ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่ส่งผลต่อค่าความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์ม (ω)*

จากการทดลองการวัดค่าความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์มของสารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 70%V ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดมีค่าคงที่ 60 V ในภาพที่ 10(ก) พบว่า ความเร็วในการหมุนของฟิล์มของเหลวแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) จากสมการที่ (3) ไอสไตน์–เนิส์ต (WIKIPEDIA, the Free Encyclopedia, 2016) อธิบายว่า ทอร์กหรือแรงที่ทำให้ฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนแปรผันตรงกับผลคูณ (cross product) ของค่าของสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็นตามกฎมือขวา ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการหมุนของฟิล์มของเหลวได้ โดยการควบคุมทิศของสนามไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เมื่อค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าทอร์กที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าบนฟิล์มของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากการทดลองมีค่าเพิ่มตามค่าสนามไฟฟ้า (E_{ext}) ที่เพิ่มขึ้น

$$\tau \propto E \times J \text{ - - - - (3)}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของฟิล์มของเหลวที่มีค่าความเข้มข้นของกลี-

เซอรอล 70%V เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) คงที่ให้กับฟิล์มสารละลายที่ 3 kV·m^{-1} ในภาพที่ 10(ข) พบว่า ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์มของเหลวสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) เช่นเดียวกับการเพิ่มสนามไฟฟ้าภายนอก การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) เป็นการเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J_{el}) ส่งผลให้ค่าทอร์กที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าบนฟิล์มของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el})



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอกกับความเร็วเชิงมุมในการหมุนของสารละลายกลีเซอรอล 70%V (ก) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 60V (ข) เมื่อจ่ายค่าสนามไฟฟ้าภายนอกคงที่ 3 kV·m^{-1}

สรุปผลการทดลอง

1. การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มสารละลายกลีเซอรอล เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มสารละลายกลีเซอรอลกับความต่างศักย์ไฟฟ้า มีความสัมพันธ์ตามกฎของโอห์ม เมื่อนำค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้า พบว่า สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ (2.15 ± 0.44) × 10^{6} Ω^{-1}cm^{-1} (1.14 ± 0.24) × 10^{6} Ω^{-1}cm^{-1} และ (0.53 ± 0.10) × 10^{6} Ω^{-1}cm^{-1} เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายกลีเซอรอลจาก 50%V เป็น 70%V และ 90%V เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกให้กับฟิล์มสารละลายกลีเซอรอลในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันตามกฎของโอห์มในช่วงแรก และพบจุดเปลี่ยนความชันภายในกราฟ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจนกระทั่งฟิล์มของเหลวเกิดการสลายตัว เมื่อนำความสัมพันธ์ในช่วงแรกมาคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้า พบว่า สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ (7.08 ± 1.47) ×10^{6} Ω^{-1}cm^{-1} (2.85 ± 0.59) × 10^{6} Ω^{-1}cm^{-1} และ (1.53 ± 0.32) × 10^{6} Ω^{-1}cm^{-1}

นอกจากนี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกของฟิล์มสารละลายเข้มข้น 50%V มีค่าเท่ากับ 90V โดยที่ฟิล์มสารละลายความเข้มข้น 70%V และ 90 %V ยังไม่พบจุดเปลี่ยนความชัน แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอก พบว่า ฟิล์มสารละลายมีจุดเปลี่ยนความชันที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณเท่ากับ 40V 60V และ 80V ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการระเหยของสารละลาย ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น และกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนเนื้อฟิล์มของเหลวจะถูกแรงเฉือนกระทำส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าลดลง และกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

จุดเปลี่ยนความชันนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคงสภาพของฟิล์มสารละลาย ซึ่งจะเห็นว่าก่อนจ่ายสนามไฟฟ้าจะพบจุดเปลี่ยน

ความชันที่ฟิล์มสารละลายความเข้มข้นเพียง 50 %V แต่เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับฟิล์มสารละลายจะพบจุดเปลี่ยนความชันที่ทั้ง 3 ความเข้มข้นของฟิล์มสารละลาย ซึ่งถ้าผสมสารละลายให้มีความเข้มข้นมาก ฟิล์มสารละลายจะรักษาสภาพพฤติกรรมเป็นฟิล์มได้ดีกว่าและสลายตัวได้ยากกว่าฟิล์มสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อย

จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายเมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกในทุกความเข้มข้น อาจมาจากฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนดังกล่าวข้างต้น ว่า ฟิล์มสารละลายอาจมีความหนาลดลง เนื่องจากการระเหยของสารละลาย ส่งผลให้มวลของของเหลวมีค่าลดลงพร้อม ๆ กับการระเหยของน้ำในฟิล์มที่มีจุดเดือดต่ำกว่ากลีเซอรอล อาจส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนไป

2. ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอกกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จากการทดลองค่าทั้ง 2 ที่กล่าวมาต้องมีค่าถึงค่าเริ่มต้น จึงทำให้ฟิล์มของเหลวเริ่มเกิดการหมุน โดยความสัมพันธ์เป็นไปตามกฎยกกำลัง กล่าวคือเมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกในปริมาณมาก ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เพื่อทำให้ฟิล์มสารละลายเกิดการหมุนจะมีค่าน้อย ในทางตรงข้าม เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอกในปริมาณน้อย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้เพื่อทำให้ฟิล์มของเหลวเกิดการหมุนจะมีค่าสูง โดยที่สามารถควบคุมทิศทางการหมุนของฟิล์มของเหลวได้ ผ่านการความคุมทิศทางการจ่ายสนามไฟฟ้าภายนอก และความต่างศักย์ไฟฟ้า จากการผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่ 100V ค่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่ต้องใช้เพื่อให้ฟิล์มเริ่มหมุนของฟิล์มที่ความเข้มข้น 50%V 70%V และ 90%V มีค่าเท่ากับ 2.65 2.85 และ 2.30 $kV \cdot m^{-1}$ ตามลำดับ และเมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10V สนามไฟฟ้าภายนอกที่ต้องใช้เพื่อให้ฟิล์มเริ่มเกิดการหมุนของฟิล์มความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ 5.60 4.45 และ 4.30 $kV \cdot m^{-1}$ ตามลำดับ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_{ext}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{el}) ที่ส่งผลต่อค่าความเร็วเชิงมุมในการหมุนของฟิล์ม (ω) จากการทดลองสามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของฟิล์มของเหลว โดยควบคุมความเข้มของสนามไฟฟ้าภายนอกและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฟิล์มของเหลว ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามสมการ $\tau \propto E \times J$ โดยที่ E คือ ค่าสนามไฟฟ้าภายนอก และ J คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีค่าใดค่าหนึ่งเพิ่มขึ้น ค่าทอร์กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มของเหลวมีความเร็วเชิงมุมในการหมุนเพิ่มขึ้น จากการทดลองเมื่อจ่ายค่าสนามไฟฟ้าภายนอกคงที่ให้กับฟิล์มที่ 3 $kV \cdot m^{-1}$ ค่าความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงจากความต่างศักย์ไฟฟ้า 60V ถึง 100V จะมีค่าเท่ากับ 1.01 ถึง 1.81 $rad \cdot s^{-1}$ และเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 60V ค่าความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงจากสนามไฟฟ้า 1 ถึง 9 $kV \cdot m^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 1.3 ถึง 9.94 $rad \cdot s^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งจากผลที่ได้จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่จ่ายให้แก่ฟิล์มสารละลายเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วเชิงมุมในการหมุนได้ดีกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ เครื่องมือสำหรับปฏิบัติการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Amjadi, A., Shirsavar, R., Radja, N. H., and Ejtehadi, M. R. (2009). A liquid film motor. **Microfluid Nanofluid** 6: 711–715.

Glycerine Producers' Association. (1963). Physical Properties of Glycerine and Its Solutions. Retrieved from http://www.aciscience.org/docs/physical_properties_of_glycerine_and_its_solutions.pdf, November 1, 2016.

Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology. **STEM Education Thailand.** Retrieved from http://www.stemedthailand.org, November 1, 2016.

Martchenko, L., Klishin, A., Namin, R. M., Swidwinski, S., Mamoika, A., and Piatrusa, S. (2015). **Preparation to the Young Physicists' Tournaments' 2015.** Retrieved from http://kit.ilyam.org/FDD_2015_IYPT_Reference_kit.pdf, July 11, 2014

Shirsavar, R., Amjadi, A., Tonddast-Navaei, A., and Ejtehadi, M. R. (2011). Electrically rotating suspended films of polar liquids. **Experiments in Fluids** 50: 419–428.

Shiryaeva, E. V., Vladimirov, V. A., and Zhukov, M. Y. (2009). Theory of rotating electrohydrodynamics flows in a liquid film. **Physical Review E** 80: 041603-1–041603-15.

Wikipedia, the Free Encyclopedia. (n.d.). **Nernst equation.** Retrieved from http://th.wikipedia.org/wiki/Nernst_equation, May 17, 2016.

Zhenyan, G. (2015). **Experiment and Simulation on Liquid Film Motor and Its Application.** Retrieved from http://msc.tsinghua.edu.cn:8090/lunwen/2015/8.pdf, November 1, 2016