การพัฒนาห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิปสำหรับผสมหยดของเหลวขนาดเล็ก โดยใช้อุปกรณ์ EWOD

ชาญชัย วิรุณฤทธิชัย[1], สมบัติ หิรัญวรรณพงษ์[2], สุพจน์ สุดกรยุทธ์[3], รัตนะ เลหวนิช[4], อรรถพร สกุลสม[5],พรหมพักตร์ บุญรักษา[6], กรีฑา สุขทั่ง[7*]

[1,2,3,4,5] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

[6,7]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

Email: kreeta.suk@rmutsb.ac.th[7]

Received: Mar 12,2024
Revised: Mar 28, 2024
Accepted: Apr 03, 2024

บทคัดย่อ

การควบคุมหยดของเหลวขนาดเล็กถือเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิป (Lab on a chip) ซึ่งเป็นการย่อส่วนห้องปฏิบัติการ และกระบวนการทดสอบต่างๆ ให้มาอยู่บนแผ่นชิปขนาดเล็ก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาแพลตฟอร์มสำหรับการผสมหยดของเหลวในระดับไมโครลิตรสำหรับกระบวนการวัดค่าไฟฟ้าเคมี โดยใช้อุปกรณ์ Electro-wetting on dielectric (EWOD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวในระดับไมโครลิตรถึงระดับนาโนลิตรโดยใช้สนามไฟฟ้า ความแม่นยำในการควบคุมของเหลวของอุปกรณ์ EWOD ขึ้นอยู่กับรูปแบบขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งหมายถึงการออกแบบขั้วไฟฟ้าทั้งขนาด และรูปร่างจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยในกระบวนการวิจัยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอุปกรณ์ EWOD โดยใช้ค่าความต่างศักย์ระหว่าง 300 – 700 โวลต์ ค่าความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ เพื่อหาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหยดของน้ำปริมาตร 8 ไมโครลิตร ด้วยอุปกรณ์ EWOD จากการวิจัยพบว่าการแยกของเหลวออกจากแหล่งจ่ายต้องใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 3 ขั้ว และการผสมหยดของเหลวต้องใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว ผลของการทดสอบอุปกรณ์ทำให้ทราบถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดที่เริ่มทำให้อุปกรณ์ใช้งานได้มีค่าเท่ากับ 300 โวลต์ ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่สามารถจ่ายให้กับอุปกรณ์คือ 700 โวลต์ โดยส่งผลให้หยดของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมของอุปกรณ์

คำสำคัญ : Electro-wetting on dielectric (EWOD), การควบคุมหยดของเหลว, หยดของเหลวขนาดเล็ก, การผสมหยดของเหลว

Development of Lab on a Chip for Microdroplets Mixing Using EWOD Device

Chanchai Wiroonritichai[1], Sombat Herunwannapong[2], Supoch Sudkornrayuth[3], Rattana Lehavanich[4], Atthaphorn Sakulsom[5], Promphak Boonraksa[6], Kreeta Sukthang[7*]

[1,2,3,4,5] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siam university
[6,7] Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Nonthaburi Campus
Email: kreeta.suk@rmutsb.ac.th[7]

Received: Mar 12,2024
Revised: Mar 28, 2024
Accepted: Apr 03, 2024

Abstract

Manipulating microdroplets is essential to increasing the efficiency of chip processing laboratories. It incorporated various laboratory functions while minimizing laboratory processes to the micro-scale. Therefore, in this research, a platform for mixing liquid droplets was developed at the microliter level for an electrochemistry measurement process using an Electro-wetting on dielectric (EWOD), a device that can manipulate the movement of liquid droplets on a microliter to a nanoliter scale using an electric field. The ability of the EWOD device to precisely control the liquid droplet depends on the electrode pattern, which means that proper electrode size and electrode pattern is therefore extremely important. During the research process, the researchers tested the EWOD device using voltages ranging from 300 to 700 volts and a frequency of 1,000 Hz to determine the optimal voltage for controlling the movement of 8 microliter of water droplets with the EWOD device. The research showed that the separation of liquid substances from the reservoir required at least three electrodes, and mixing liquid droplets requires at least two electrodes. From the test results of the device, it was found that the minimum voltage required by the device to start its work was 300 volts. The maximum voltage that could be applied to the device was 700 volts which caused the liquid droplet to move at an average speed 10 mm/s.

Keywords : Electro-wetting on dielectric (EWOD), Droplet Manipulation, Microdroplets, Droplet Mixing

บทนำ

เทคโนโลยีห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิป หมายถึง การนำเอาห้องปฏิบัติทั้งหมดหรือบางส่วนของการกระบวนการวิจัยและทดลองทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีของสารต่าง ๆ ให้มาอยู่บนแผ่นชิพขนาดเล็ก การลดขนาดนี้ไม่เพียงทำให้ระบบทดสอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ยังช่วยลดต้นทุน การใช้เวลา และทรัพยากรต่างๆที่ใช้ในการทำการทดสอบ [1] โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิป ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากความสามารถในการยกระดับห้องปฏิบัติการให้เป็นแบบห้องปฏิบัติการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งส่งผลดีต่อการวินิจฉัยโรคติดต่อได้โดยไม่ต้องมีการนำเชื้อออกนอกจากพื้นที่แพร่ระบาดเป็นต้น [2]

อุปกรณ์ EWOD เป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบเป็นชั้นวัสดุบางวางตัวซ้อนกัน [3] จากสมบัติของวัสดุต่างๆทำให้อุปกรณ์ EWOD สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวขนาดเล็กระดับไมโครลิตรได้ [4] ด้วยการใช้แรงจากสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากการจ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าคู่ขนานของอุปกรณ์ไปรบกวนสมดุลของหยดของเหลวทำให้ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ของหยดของเหลวเปลี่ยนไปและส่งผลให้ของเหลวเกิดการเคลื่อนที่ไปตามแนวขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ [5] อีกทั้งยังสามารถควบคุมของเหลวได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การจ่ายหยดของเหลวจากแหล่งจ่าย [6] การแบ่งตัวของหยด [7] การรวมตัวของหยด [8] โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะของขั้วไฟฟ้า

ดังนั้นการออกแบบขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ EWOD จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมการเคลื่อนที่หยดของเหลวให้เป็นไปตามขั้นตอนที่ห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิปต้องการ ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปในเรื่องของการออกแบบขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ EWOD เพื่อสร้างห้องปฏิบัติการผสมหยดของเหลว เพื่อส่งต่อไปในกระบวนการวัดค่าไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Analysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถตรวจสอบสารเคมีในตัวอย่างต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ เช่น การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย, การประเมินความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสารเคมี [9] เป็นต้น

วัตถุประสงค์งานวิจัย

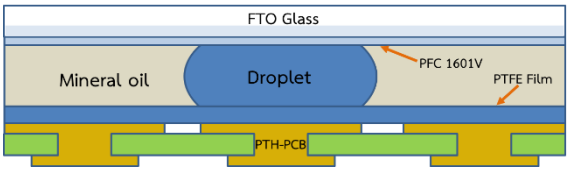
1. เพื่อออกแบบขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ EWOD สำหรับห้องปฏิบัติการผสมสาร 2 ชนิด
2. เพื่อทดสอบค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวด้วยอุปกรณ์ EWOD

ระเบียบวิธีวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัย และทดลอง ตามขั้นตอนดังนี้

1. ส่วนประกอบของอุปกรณ์ EWOD

อุปกรณ์ EWOD ประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุต่าง ๆ วางเรียงตัวกันทั้งหมด 5 ชั้นดังรูปที่ 1 โดยวัสดุแต่ละชั้นจะต้องมีคุณสมบัติการใช้งานที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ EWOD ดังนี้



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ EWOD

ชั้นที่ 1 แผ่น PTH-PCB ทำหน้าที่ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเส้นใยแก้ว (Fiberglass) ทำหน้าที่เป็นแผ่นรองด้านล่าง มีคุณสมบัติของวัสดุคือ มีความแข็ง ทนต่อความร้อนได้ดี ไม่นำไฟฟ้า และส่วนชั้นทองแดงทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่าง มีคุณสมบัติของวัสดุคือ มีผิวหน้าเรียบ และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง โดยค่าการนำไฟฟ้ายิ่งสูงก็จะส่งผลให้อุปกรณ์ EWOD มีประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของของเหลวได้ดี

ชั้นที่ 2 แผ่น PTEF Film ทำหน้าที่ 2 ส่วน คือ เป็นทั้งชั้นฉนวนด้านล่างและเป็นชั้นไฮโดรโฟบิก

ด้านล่าง โดยมีคุณสมบัติคือเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ความเป็นฉนวน (Dielectric Constant) สูงเพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ ส่วนผิวมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ทำให้หยดของเหลวมีค่ามุมสัมผัสสูง เพื่อทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวได้ง่าย [10]

ชั้นที่ 3 Mineral Oil เป็นชั้นตัวกลาง เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างแผ่นด้านบนกับแผ่นด้านล่างต้องมีสมบัติคือไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

ชั้นที่ 4 สาร PFC 1601V เป็นชั้นไฮโดรโฟบิกด้านบนของอุปกรณ์ต้องมีสมบัติคือมีความทนทานต่อสารเคมี ส่วนผิวมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกทำให้หยดของเหลวมีค่ามุมสัมผัสสูง เช่นเดียวกับส่วนด้านล่าง

ชั้นที่ 5 คือแผ่น กระจกนำไฟฟ้า FTO เป็นชั้นขั้วไฟฟ้าด้านบนและแผ่นปิดด้านบน ซึ่งมีสมบัติคือเป็นวัสดุที่มีความแข็ง มีความใส และสามารถนำไฟฟ้าได้

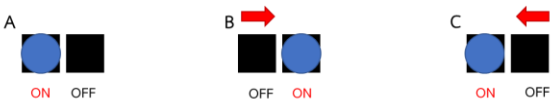
2. การออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าและการสร้างอุปกรณ์ EWOD

เพื่อทำให้อุปกรณ์ EWOD ให้มีความสามารถในการควบคุมหยดของเหลวได้ทุกฟังก์ชันที่ห้องปฏิบัติการผสมสารต้องการ เช่น การแยกหยดของเหลวจากแหล่งจ่าย และการผสมหยดของเหลว การออกแบบขั้วไฟฟ้านั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการควบคุมที่ต่างกัน จึงจำเป็นต้องใช้รูปแบบของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกันในการควบคุมหยดของเหลว [11] โดยรูปที่ 2 แสดงการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าให้สามารถผสมสาร 2 สารให้เข้ากัน (Mixing) โดยการควบคุมให้หยดของเหลวเคลื่อนไหวกลับไปกลับมาซึ่งจำเป็นต้องใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว และรูปที่ 3 แสดงการแบ่งหยดของเหลวออกจากแหล่งจ่าย (Dispensing) โดยการใช้ขั้วไฟฟ้าด้านนอกแหล่งจ่ายดึงของเหลวออกมาก่อนจำนวน 3 ขั้ว แล้วทำการตัดด้วยขั้วที่ 2 ในขั้นตอนสุดท้าย จากการศึกษาวิจัยผู้วิจัยจึงได้ออกแบบขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยรูปแบบขั้วไฟฟ้าสำหรับ การแบ่งหยดของเหลว การผสมหยดของเหลว และการส่งหยดของเหลวไปยังจุดทดสอบ เพื่อให้อุปกรณ์สามารถเตรียมสาร 2 สารโดยการผสม แล้วส่งต่อไปยังจุดที่ใช้ในการวัดค่าเคมีไฟฟ้าจำนวน 4 จุด

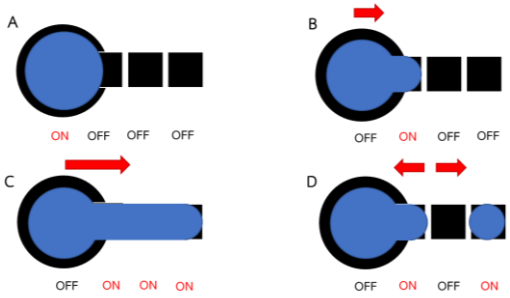
การออกแบบขนาดของขั้วไฟฟ้าด้านล่างของอุปกรณ์ EWOD แบบปิดจาก PTH-PCB สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ฐานกับปริมาตรของรูปทรงกลมตัดหัวท้ายดังสมการที่ 1 [12] และเมื่อนำสมการมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหยดกับขนาดของขั้วไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าปริมาตรของหยดของเหลวรูปทรงกลมตัดจะเปลี่ยนไปตามขนาดของขั้วไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างแผ่นด้านบนและด้านล่าง ดังนั้นเพื่อให้อุปกรณ์ EWOD สามารถรวมหรือแยกหยดของเหลวได้อย่างเหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นบนและแผ่นล่างเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ขนาดขั้วไฟฟ้าสำหรับการควบคุมหยดของเหลวคือ 2x2 มิลลิเมตร และ 3x3 มิลลิเมตร ซึ่งการเลือกใช้ขนาดดังกล่าวจะทำให้อุปกรณ์ EWOD สามารถควบคุมหยดของเหลวปริมาตรประมาณ 4 ไมโครลิตร และ 8 ไมโครลิตร ได้ตามลำดับ

$$V = \frac{2L}{3}\pi\left(3w^2 + 2L^2\right) \quad (1)$$

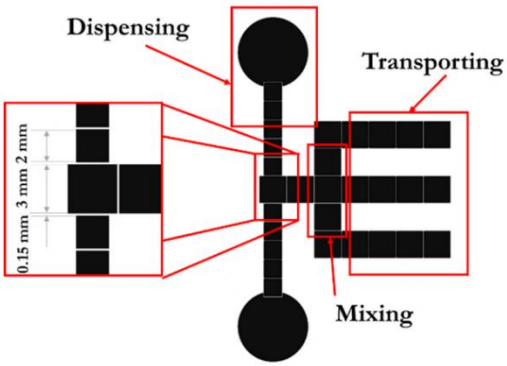
โดยที่ V คือปริมาตรของหยดของเหลว [m^3]
w คือครึ่งหนึ่งขนาดขั้วไฟฟ้า [m].
L คือครึ่งหนึ่งของระยะห่างแผ่น [m]



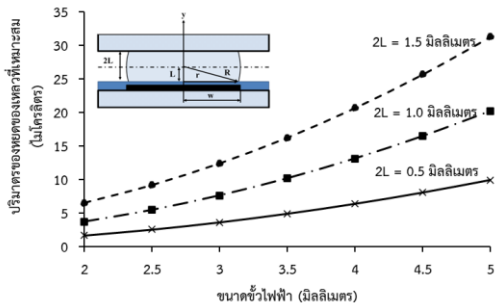
รูปที่ 2 การผสมสารด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว



รูปที่ 3 การแบ่งหยดของเหลวจากแหล่งจ่ายด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว

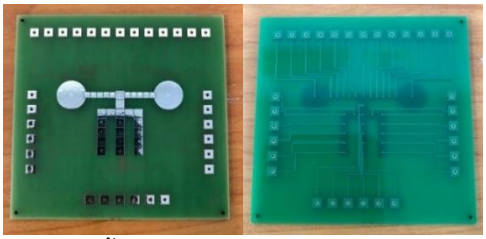


รูปที่ 4 รูปแบบขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ EWOD สำหรับห้องปฏิบัติการผสมสาร

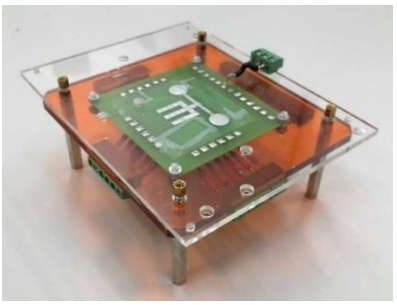


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดขั้วไฟฟ้า (2w) ปริมาตรของหยดของเหลวที่เหมาะสมในอุปกรณ์ EWOD กับ ระยะห่างระหว่างแผ่นด้านบนและแผ่นด้านล่าง (2L)

หลังจากออกแบบเรียบร้อยแล้วจึงทำการสร้างแผ่นPTH-PCB ดังรูปที่ 6 จากนั้นนำวัสดุแต่ละชั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากการนำ PTFE Film วางบน PTH-PCB จากนั้นเติม Mineral oil แล้วนำกระจก FTO ซึ่งเคลือบด้วยสาร FluoroPel® PFC 1601V โดยเครื่อง Spin Coating มาวางปิด ก็จะได้อุปกรณ์ EWOD ซึ่งพร้อมที่จะทำการทดสอบต่อไป ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ขั้วไฟฟ้าอุปกรณ์ EWOD บนแผ่น PCB แบบ PTH



รูปที่ 7 อุปกรณ์ EWOD สำหรับห้องปฏิบัติการผสมสาร

3. การทดสอบอุปกรณ์ EWOD

การทดสอบอุปกรณ์ EWOD จะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ ดังนี้

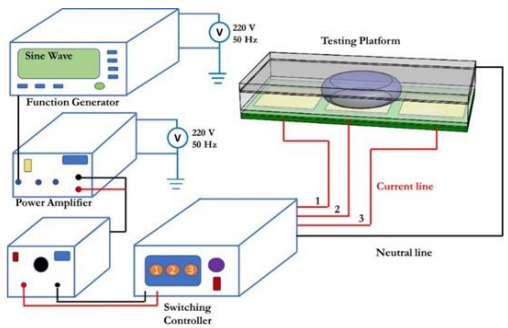
3.1การทดสอบค่าความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้กับอุปกรณ์ (Apply Voltage)

สำหรับการทดสอบค่าความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้กับอุปกรณ์ ผู้วิจัยจะได้ทำการทดสอบเฉพาะขั้วไฟฟ้าขนาด 3x3 มิลลิเมตร เท่านั้น เนื่องจากในส่วนของขั้วไฟฟ้าขนาด 2x2 มิลลิเมตร มีหน้าที่ดึงสารแต่ะชนิดออกจากแหล่งจ่ายแล้วส่งไปยังส่วนผสมหยดของเหลวของอุปกรณ์ซึ่งมีขนาดขั้วไฟฟ้า 3x3 มิลลิเมตร ดังนั้นการทดสอบนี้จึงได้ใช้หยดน้ำปริมาตร 8 ไมโครลิตร ในการทดสอบเพื่อให้

เหมาะสมกับขนาดของขั้วไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ โดยเริ่มจากการนำอุปกรณ์ เครื่องสร้างสัญญาณไฟฟ้า (KEYSIGHT 33500B Series), เครื่องขยายกำลังไฟฟ้า (KROHN- HITE Corporation Medel 7602M) , หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (ย่านขยายแรงดัน 220-1,000 โวลต์), อุปกรณ์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า (Switching controller) และ อุปกรณ์ EWOD แบบปิด มาต่อเข้าด้วยกันดังรูปที่ 8 จากนั้น ทำการปรับค่าของสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ EWOD โดยทำการทดสอบอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์ของสัญญาณไฟฟ้าในช่วง 300 - 700 โวลต์ และใช้ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า 1,000 เฮิรตซ์ เพื่อหาค่าความเร็วเฉลี่ยของหยดของเหลวที่สามารถเคลื่อนที่ได้บนอุปกรณ์ EWOD

3.2 การทดสอบความสามารถในการควบคุมหยดของเหลว

สำหรับการทดสอบความสามารถในการควบคุมหยดของเหลวบนอุปกรณ์ EWOD ใช้ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากการทดสอบก่อนหน้าเพื่อมาควบคุมกระบวนการผสมหยดของเหลว โดยเริ่มจากการแยกหยดของเหลว ซึ่งในการทดสอบนี้ผู้วิจัยใช้เป็นหยดน้ำผสมสีเพื่อให้สามารถแยกแยะได้ 2 สี คือ สีน้ำเงิน และสีแดงออกจากแหล่งจ่าย จากนั้นจึงควบคุมหยดของเหลวทั้งสอง 2 สีมาผสมกันเพื่อให้ได้สีม่วงที่บริเวณ Mixing area สุดท้ายจึงควบคุมหยดของเหลวสีม่วงให้ไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการจำนวน 4 หยด

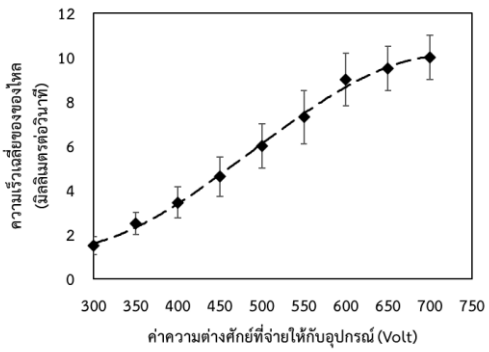


รูปที่ 8 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทดสอบอุปกรณ์ EWOD

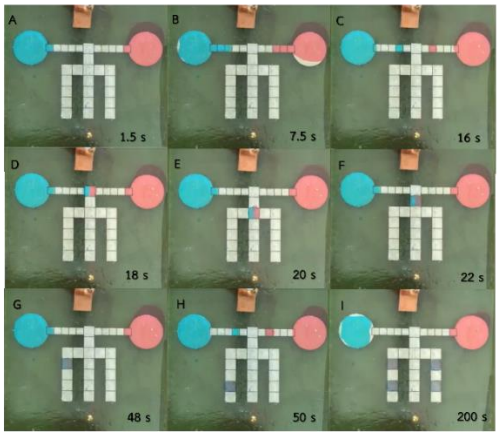
ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบอุปกรณ์ EWOD ในงานวิจัยนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้กับอุปกรณ์กับค่าความเร็วเฉลี่ยของหยดของเหลวปริมาตร 8 ไมโครลิตร พบว่าเป็นไปตามรูปที่ 9 คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์มีผลต่อค่าความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของหยดของเหลว ซึ่งค่าความเร็วของหยดของเหลวที่อุปกรณ์ EWOD แบบปิดนี้ทำได้สูงที่สุดคือ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

การทดสอบความสามารถในการควบคุมหยดของเหลวพบว่าอุปกรณ์ EWOD สามารถทำงานได้ตามความต้องการของห้องปฏิบัติการผสมสาร ดังรูปที่ 10 โดยอุปกรณ์สามารถผสมสาร 2 ชนิดได้จำนวน 4 หยด ใช้เวลาในการผสม 3 นาที 20 วินาที แบ่งเป็นการแยกหยดของเหลวออกจากแหล่งจ่ายใช้เวลา 15 วินาที การผสมหยดของเหลวใช้เวลา 25 วินาที ซึ่งเวลาในการผสมนี้นอกจะขึ้นอยู่กับระดับของค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับอุปกรณ์แล้วยังขึ้นอยู่กับโปรแกรมการควบคุมเวลาให้เปลี่ยนลำดับการจ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าอีกด้วย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้กับอุปกรณ์กับค่าความเร็วเฉลี่ยของหยดของเหลวปริมาตร 8 ไมโครลิตร



รูปที่ 10 ผลการทดสอบสามารถในการควบคุมหยดของเหลวบนอุปกรณ์ EWOD

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างห้องปฏิบัติการบนแผ่นชิปเพื่อใช้ในการผสมสารในรูปหยดของเหลวสำหรับเตรียมการทดสอบทางไฟฟ้าเคมี ด้วยอุปกรณ์ EWOD จากผลการทดสอบพบว่าการออกแบบขั้วไฟฟ้ามีผลกับความสามารถในการควบคุมหยดของเหลว โดยในการแยกสารออกจากแหล่งจ่ายต้องใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 3 ขั้ว การผสมสารต้องใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว ซึ่งการออกแบบให้ขั้วไฟฟ้ามีขนาดที่สอดคล้องกับพื้นที่ฐานของหยดของเหลวจะมีผลต่อความต่อเนื่องในการควบคุมหยดของเหลว โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 2x2 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมหยดของเหลวปริมาตร 4 ไมโครลิตร และขั้วไฟฟ้าขนาด 3x3 มิลลิเมตร ควบคุมหยดของเหลวปริมาตร 8 ไมโครลิตร ซึ่งการออกแบบขั้วไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมหยดของเหลวจำนวน 4 หยด ได้ในระยะเวลา 3.20 นาที และจากการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้กับอุปกรณ์กับค่าความเร็วเฉลี่ยของหยดของเหลวปริมาตร 8 ไมโครลิตร พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของหยดของเหลวมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อจ่ายค่าความต่างศักย์ให้สูงถึงค่าที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดของเหลวอิ่มตัว ค่าความเร็วของหยดของเหลวจะมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสที่เปลี่ยนไปของหยดของเหลวจะเกิดการอิ่มตัวหรือหมายถึงการที่ค่ามุมสัมผัสไม่สามารถลดลงได้อีกเมื่อได้รับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง[13] โดยที่การจ่ายค่าความต่างศักย์สูงสุดให้กับอุปกรณ์ที่ค่า 700 โวลต์ และค่าความถี่ของไฟฟ้า 1,000 เฮิรตซ์ จะสามารถทำให้หยดของเหลวเคลื่อนที่ในทางตรงด้วยค่าความเร็วเฉลี่ย 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งได้มีการใช้แผ่น PCB แบบด้านเดียวมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า [14] และยังพบอีกว่าอุปกรณ์มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ (Dielectric Breakdown) เท่ากับ 800 โวลต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ MMED ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือทดสอบ และสถานที่ทดสอบให้กับงานวิจัยในครั้งนี้

References

[1] H. Sedgwick, F. Caron, P. B. Monaghan, W. Kolch, and J. M. Cooper, “Lab-on-a-chip technologies for proteomic analysis from isolated cells,” *Journal of the Royal Society*, vol. 5 no. 2, pp. 123–130, Jun. 2008.

[2] C. D. Chin, V. Linder and S. K. Sia, “Commercialization of microfluidic point-of-care diagnostic devices,” *Lab on a chip,* vol. 12, no. 12, pp. 2118–2134, Jun. 2012.

[3] O. C.-Pérez, J. C.-Terré, and M. B. Roncero, “Materials and Manufacturing Methods for EWOD Devices: Current Status and Sustainability Challenges,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 308, pp. 1-18, Sep. 2022.

[4] W. Jia, P. H. Chao, S. Hanet and R. M. van Dam. "Performing multi-step chemical reactions in microliter-sized droplets by leveraging a simple passive transport mechanism," *Lab on a chip*, vol. 17(24), pp. 4342–4355, Dec. 2017.

[5] M.F. Samad, A.Z. Kouzani, M.M. Rahman, K. Magniez and A. Kaynak, "Design and Fabrication of an Electrode for Low-actuation-Voltage Electrowetting-on-Dielectric Devices," *Procedia Technology,* vol. 20, pp. 20-25, July. 2015.

[6] W. Wei, Q. Cai, S. Xu and X. Chen, "Transitional Electrodes in Electrowetting-Based Droplet Dispensing," *Biosensors*, vol. 14, no. 1, pp. 1-9, Jan. 2024.

[7] N. Sagar, S. Bansal and P. Sen, "Open-Chip Droplet Splitting in Electrowetting," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 9, pp 1-10, Sep. 2022.

[8] H. Geng, J. Feng, L. M. Stabrylac and S. K. Cho, "Dielectrowetting manipulation for digital microfluidics: creating, transporting, splitting, and merging of droplets," *Lab on a Chip*, vol. 17, pp. 1060-1068, Feb. 2017.

[9] B. M. C. Costa, S. Griveau, F. d'Orlye, F. Bedioui, J. A. Fracassi da Silva and A. Varenne, "Microchip electrophoresis and electrochemical detection: A review on a growing synergistic implementation," *Electrochimica Acta*, vol. 391, Jul. 2021.

[10] A. T. Giannitsis, "Microfabrication of biomedical lab-on-chip devices. A review," *Estonian Journal of Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 109–139, Apr. 2011.

[11] W. Wang, "Precise Droplet Dispensing in Digital Microfluidics with Dumbbell-Shaped Electrodes," *Micromachines*, vol. 13, no. 3, pp. 484, Mar. 2022.

[12] K. Sukthang, E. Pengwang, W. Wechsatol and A. Tuantranont, "Rapid Fabrication of Close-Typed Electrowetting on Dielectric Devices," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 886, pp. 1-9, Jul. 2020.

[13] E.Oliveira, C. Doering and H. Fouckhardt, "Optimizing contact angle changes for droplet actuation by optoelectrowetting (OEW): A numerical multi-parameter analysis," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 365, Nov 2023.

[14] S.N.I.S. Zulkepli, N.H. Hamid; V. Shukla, "Droplet Velocity Measurement Based on Dielectric Layer Thickness Variation Using Digital Microfluidic Devices," *Biosensors*, vol. 8, no. 45, pp. 1-12, May. 2018.