



การออกแบบและพัฒนาไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่ดีที่สุดสำหรับการ รองรับอัตราการไหลที่หลากหลาย

ธัญญฐิตา อารยาธิระพุฒิธร^{1,2} ชาลิณี พิพัฒน์พิภพ^{1,2*} ธัญนันท์ ธิบัน³ สุรัชย์ ธรรมทวีธิกุล³
กอบกิจ อิศรชีวะวัฒน์³ และ ทวีชากรณ์ จอมวงศ์³

¹ สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยีพลาสมาและระบบกลไฟฟ้าจุลภาค, ศูนย์การศึกษาสหวิทยาการสาขา,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีระบบจุลภาคอัจฉริยะ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยธนบุรี วิทยาเขตภาคเหนือ จังหวัดลำพูน

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chalineem@cmu.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 29 มกราคม 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 10 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของไหลในระดับไมโครลิตรและนาโนลิตร โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงโครงสร้างช่องทางไหลให้สามารถรองรับอัตราการไหลที่หลากหลาย โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลง โดยได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีร่องเสริมโดยใช้หลักการการออกแบบและการทดลอง เพื่อหาวิธีการสร้างลวดลายที่ดีที่สุด กำหนดปัจจัยที่ส่งผลกับความคมชัดของลวดลายโครงสร้างบนสารไวแสง Photoresist ค่าพลังงาน (Dose), ระยะเวลาสูง Stage Z และเวลาในการล้างสารไวแสง (Develop) พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการสร้างโครงสร้างมากที่สุดคือ ระยะเวลาสูง Stage Z โดยมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ 99.82 % จากนั้นทำการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมของอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบเดิม โดยทำการทดลองจริงที่สามารถทำการทดสอบอัตราการไหลได้มากที่สุดที่ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยพบว่าไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพการผสมสูงสุดที่ 99.80% ที่อัตราการไหลต่ำสุด 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ โดยอัตราการไหลที่สูงขึ้นได้แก่ 10, 25 และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ จะทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในระดับสูงกว่า 80% แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ที่อัตราการไหลที่หลากหลาย ผลการศึกษานี้มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งต้องการการผสมของไหลที่รวดเร็วและแม่นยำ

คำสำคัญ: อุปกรณ์ของไหลจุลภาค; ไมโครมิกเซอร์; การออกแบบและการทดลอง

The Design and Development of the Optimal Passive Micromixer to Accommodate a Wide Range of Flow Rates

Tuntita Arrayathiraputtitorn^{1,2}, Chalinee Phiphattanaphiphop^{1,2*}, Thanyanan Tipun³
Kobkit Issarachevavat³, Surachai Tumtavitikul³ and Tavichakon Jomvong³

¹ Department of Plasma Technology and Micromechanical Engineering, Multidisciplinary Center, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

² Smart Microsystems Technology Research Center, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

³ Department of Industrial Management Technology Engineering, Thonburi University Northern Campus, Lamphun

* Corresponding author, E-mail: chalinee.m@cmu.ac.th

Received: 16 June 2025; Revised: 29 January 2026; Accepted: 10 February 2026

Online Published: 22 April 2026

Abstract: This research focuses on the design and development of a passive micromixer to enhance fluid mixing efficiency at microliter and nanoliter scales. The study aims to optimize the microchannel structure to accommodate a wide range of flow rates without compromising mixing performance. A serpentine microchannel design with grooves was fabricated using experimental design methodologies to identify the optimal parameters for achieving high-resolution patterns on photoresist. Key factors affecting pattern clarity were investigated, including UV dose, stage Z height, and development time. Results revealed that stage Z height had the most significant impact, with data reliability reaching 99.82%. The performance of the developed micromixer was then evaluated through physical experiments and compared with conventional designs at flow rates up to 50 $\mu\text{L}/\text{min}$. Experimental results demonstrated that the new micromixer achieved Maximum mixing efficiency of 99.80% at the lowest flow rate (1 $\mu\text{L}/\text{min}$). Consistently high efficiency (>80%) across higher flow rates (10, 25 and 50 $\mu\text{L}/\text{min}$), though with a slight decline compared to lower flow rates. These findings confirm the device's versatility across a broad flow rate range while maintaining robust mixing performance. The study highlights the potential for applications in chemical analysis and lab-on-a-chip systems requiring rapid and precise fluid mixing.

Keywords: Microfluidic devices; Micromixer; Design and experiments



1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา ทั้งทางด้านวิศวกรรม เคมี ชีววิทยา และการแพทย์ เนื่องจากความสามารถในการจัดการของไหลในระดับไมโครลิตรและนาโนลิตร ซึ่งช่วยลดต้นทุนและเวลาในการทดลอง อีกทั้งยังเพิ่มความแม่นยำ [1] และประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ หนึ่งในอุปกรณ์สำคัญในระบบไมโครฟลูอิดิกส์คือไมโครมิกเซอร์ (Micromixer) ซึ่งทำหน้าที่ผสมของไหลตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปให้เข้ากันอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในกระบวนการที่ต้องการการผสมอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง [2] เช่น การสังเคราะห์สารเคมี การวิเคราะห์ทางชีวภาพ และการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวินิจฉัยโรค (Lab-on-a-Chip)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการไหลของของไหลในช่องทางขนาดเล็กมักอยู่ในรูปแบบลามินาร์ (Laminar Flow) ซึ่งทำให้การผสมของไหลเป็นไปได้ยากจากของไหลเคลื่อนที่ในชั้นขนานกันโดยไม่เกิดการปะปนกันเองตามธรรมชาติ [3] ดังนั้นการออกแบบไมโครมิกเซอร์ที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นความท้าทายสำคัญสำหรับนักวิจัยในสาขานี้ ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟได้รับความนิยมมากเนื่องจากไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกและมีกระบวนการผลิตที่ง่าย [4] อย่างไรก็ตาม การออกแบบที่สามารถรองรับอัตราการไหลที่หลากหลายโดยยังคงประสิทธิภาพการผสมสูงยังเป็นปัญหาในการวิจัย ปัจจุบัน Mondal et al. (2024) ได้ออกแบบไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีคลื่นเหลี่ยมสำหรับการผสมของไหลชนิดสูง โดยมีการใส่สิ่งกีดขวางหรืออุปสรรค (Obstacles) รูปทรงต่าง ๆ ลงไป และยังคง

รักษาประสิทธิภาพได้สูงถึงประมาณ 94% [5] Hossain et al. ระบุว่าช่องทางแบบ square-wave เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ประสิทธิภาพการผสมสำหรับค่า Re สูง อย่างไรก็ตามช่องทางแบบ โค้ง (Curved) จะมีการสูญเสียแรงดัน (Pressure Drop) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมิกเซอร์รูปแบบอื่น ๆ [6] การใช้สิ่งกีดขวางในห้องผสม (Mixing Chamber) มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกระแสไหลวน ระยะทาง 15 mm สำหรับอัตราการไหลระดับ $\mu\text{L}/\text{min}$ การใช้โครงสร้างโค้งต่อเนื่องใน Spiral สามารถสร้าง Chaotic Advection ที่ช่วยให้เกิดการผสมสมบูรณ์ (Mixing Quality > 90%) ภายในระยะทางสั้น ๆ เมื่อเทียบกับช่องทางตรง เมื่อคุณเพิ่มอัตราการไหลจาก 1-30 $\mu\text{L}/\text{min}$ แรงดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามกฎของ Hagen-Poiseuille [7] Mondal et al. (2024) การใส่สิ่งกีดขวางลงในช่องทางไหลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้าง Disordered Advection ซึ่งช่วยลดระยะทางที่ใช้ในการผสมให้สั้นลงอย่างมากในตัวผสมแบบพาสซีฟ การใส่สิ่งกีดขวางรูปทรงต่าง ๆ ช่วยลดความยาวการผสมลงได้ประมาณ 29% ถึง 31% [8] Yuan, S. และคณะ (2022) ใช้การจำลอง CFD เพื่อออกแบบช่องทางแบบ zigzag ที่ปรับปรุงแล้ว สามารถรักษาประสิทธิภาพการผสม >90% ในช่วง 1-40 $\mu\text{L}/\text{min}$ [9] ไมโครมิกเซอร์แบบ hybrid passive-active ที่สามารถปรับได้ตามอัตราการไหล โดยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการทำงานที่หลากหลายสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ ช่วงอัตราการไหลต่ำมาก $\text{Re} < 10$ การผสมจะเกิดขึ้นผ่าน Molecular Diffusion เป็นหลัก [2,10]

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของไหลที่มีความหนืดสูงหรือมีอัตราการแพร่ (Diffusivity) ต่ำ ซึ่งทำให้การผสม



เป็นไปได้มากยิ่งขึ้น จึงมีได้เสนอวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในไมโครมิกเซอร์ โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ ไมโครมิกเซอร์แบบแอคทีฟ (Active Micromixer) ที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อกระตุ้นการผสม เช่น การใช้สนามแม่เหล็กหรือคลื่นเสียง และ ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ (Passive Micromixer) ที่อาศัยการออกแบบโครงสร้างช่องทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก [2,11] ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟได้รับความสนใจมากเนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและต้นทุนต่ำ

ในการศึกษางานวิจัยด้านไมโครมิกเซอร์พบว่าได้มีการออกแบบและทดสอบไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟสามรูปแบบ [4] ได้แก่ ไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางตรง (Straight Channel Micromixer) ไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยว (Serpentine Channel Micromixer) และไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีร่อง (Serpentine Channel Micromixer with Grooves) ผลการศึกษาพบว่า ไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางคดเคี้ยวที่มีร่องให้ประสิทธิภาพการผสมที่ดีที่สุดที่อัตราการไหลต่ำ ($1 \mu\text{L}/\text{min}$) โดยสามารถผสมของไหลได้อย่างสมบูรณ์ที่ระยะทางเพียง 2.5 มิลลิเมตร (mm) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของไมโครมิกเซอร์นี้คืออัตราการไหลที่ยอมให้ได้ (Permissible Flow Rate) ต่ำเพียง $10 \mu\text{L}/\text{min}$ เท่านั้น ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับบางแอปพลิเคชันที่ต้องการอัตราการไหลที่สูงขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวทางทีมวิจัยจึงได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟโดยใช้หลักการออกแบบและการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างอุปกรณ์ไมโคร-

มิกเซอร์แบบพาสซีฟ และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟโดยทำการศึกษาอัตราการไหลที่ยอมให้ผ่านได้โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลง และไม่ทำลายความแข็งแรงของการเชื่อมต่อระหว่างช่องทางไมโครมิกเซอร์กับพื้นผิวแก้ว (Bonding Stability) อีกทั้งไม่เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ โดยมีการศึกษาและทำการทดลองการสร้างโครงสร้างในช่องทางใหม่ ๆ รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดและการเชื่อมต่อเพื่อเพิ่มความทนทานของอุปกรณ์

ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถทำงานที่อัตราการไหลที่หลากหลายจะช่วยขยายขอบเขตการใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ทางชีวเคมี การตรวจวินิจฉัยโรค และการพัฒนาอุปกรณ์ชีวการแพทย์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในอนาคต

2. วิธีการ (Method)

2.1 เทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค

เทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค (Microfluidics) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเหลวในระดับไมโครลิตร โดยจะมีช่องทางไหลจุลภาค (Microchannel) ซึ่งเป็นช่องทางไหลขนาดเล็กสำหรับของเหลวหรือสารละลายประเภทต่าง ๆ ทั้งทางเข้าและทางออก ซึ่งช่องเหล่านี้สามารถมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบและการใช้งาน กระบวนการทำงานเริ่มต้นจากการนำของเหลวเข้าผ่านทางเข้าเพื่อทำปฏิกิริยาในช่องทางไหลจุลภาค (Microchannel) และระบายของเหลวส่วนเกินออกทางออก โดยถูกประยุกต์ใช้ร่วมกับห้องปฏิบัติการ



บนชิพ (Lab-on-a-chip: LOC) ซึ่งเป็นระบบวิเคราะห์รวมระดับไมโคร โดยจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ มากมาย และมีช่องทางไหลจุลภาค (Microchannel) ที่ของเหลวไหลผ่านรูที่มีขนาดตั้งแต่สิบถึงหนึ่งร้อยไมโครเมตรเป็นส่วนเชื่อมต่อให้ทั่วถึงกัน

2.1.1 ไมโครมิกเซอร์

ไมโครมิกเซอร์ (Micromixer) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ของเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการผสมของไหลตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปในระดับไมโครและนาโนลิตร โดยอาศัยหลักการทางฟิสิกส์และเคมีในการทำให้ของไหลผสมกันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากของไหลในช่องทางขนาดเล็กมักมีการไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow) ซึ่งทำให้การผสมเป็นไปได้ยาก ไมโครมิกเซอร์จึงถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มการปะปนกันของของไหลผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสหรือการสร้างกระแสปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในระดับไมโคร [1]

ของไหลในไมโครมิกเซอร์สำหรับช่องทางการไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Navier-Stokes และสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานทางกลศาสตร์ของไหล โดยสมการ Navier-Stokes อธิบายการอนุรักษ์โมเมนตัม ของของไหล โดยพิจารณาแรงที่กระทำกับของไหล เช่น แรงดัน แรงหนืด และแรงภายนอก (เช่น แรงโน้มถ่วง) ดังสมการที่ (1)

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลในสภาวะต่าง ๆ ในขณะที่สมการความต่อเนื่องอธิบายการอนุรักษ์มวลของของไหล [8] ดังสมการที่ (2)

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (1)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

\vec{v} = เวกเตอร์ความเร็ว

p = ความดัน

μ = ความหนืด (dynamic viscosity)

$\nabla^2 \vec{v}$ = ลาปลาซเซียนของความเร็ว (อธิบายการกระจายของแรงหนืด)

\vec{f} = แรงภายนอก เช่น แรงโน้มถ่วง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu) = 0 \quad (2)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

\vec{v} = เวกเตอร์ความเร็วของของไหล

t = เวลา

$\nabla \cdot (\rho \mu)$ = การลู่เข้าหรือแผ่กระจายของการไหล

2.1.2 ทฤษฎีของ Reynolds Number

Reynolds Number (Re) เป็นตัวเลขไร้มิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของของไหลในระบบไหล เช่น ท่อหรือช่องไหลขนาดเล็ก โดยค่านี้เป็นตัวบ่งชี้ว่าการไหลของของไหลเป็นแบบ ลามินาร์ (Laminar Flow) หรือ ปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผสมของไหลในไมโครฟลูอิดิกและไมโครมิกเซอร์ ค่า Reynolds Number ถูกคำนวณจากสมการที่ (3)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

โดยที่

Re = Reynolds Number (ไม่มีหน่วย)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

v = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter) ของช่องไหลหรือท่อ (m)

μ = ความหนืดจลน์ (Dynamic Viscosity) ของของไหล (Pa·s หรือ kg/m·s)

สำหรับกรณีที่เป็นช่องไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก D สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$D = \frac{4A}{P} \quad (4)$$

โดยที่

A = พื้นที่หน้าตัดของช่องไหล (m²)

P = ความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัด (m)

โดยทั่วไป ค่า Re สามารถใช้แบ่งลักษณะการไหลของของไหลออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ Laminar Flow (การไหลแบบลามินาร์) เกิดขึ้นเมื่อ $Re < 2000$ (ในท่อหรือช่องไหลทั่วไป) ของไหลไหลเป็นชั้น ไม่มีการผสมกันมากนัก แรงหนืด (Viscous Force) มีอิทธิพลมากกว่าแรงเฉื่อย (Inertial Force) พบได้บ่อยในไมโครฟลูอิดิก เนื่องจากช่องไหลมีขนาดเล็ก Transitional Flow (การไหลแบบเปลี่ยนผ่าน) เกิดขึ้นเมื่อ $2000 < Re < 4000$ ของไหลเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากลามินาร์ไปสู่ปั่นป่วน Turbulent Flow (การไหลแบบปั่นป่วน) เกิดขึ้นเมื่อ $Re > 4000$

ของไหลเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่มและมีการผสมสูงแรงเฉื่อยของของไหลมีอิทธิพลสูงกว่าความหนืด

ในระบบไมโครฟลูอิดิกและไมโครมิกเซอร์ ค่า Re มักจะอยู่ในช่วง ต่ำกว่า 100 ซึ่งหมายความว่า การไหลเป็น ลามินาร์เกือบตลอดเวลา ส่งผลให้การผสมของของไหลเกิดขึ้นได้ช้า เนื่องจากการไหลลามินาร์อาศัยเพียงการแพร่ (Diffusion) เป็นหลัก

ดังนั้น ในการออกแบบ ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ จึงต้องมีการใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การเพิ่มโครงสร้างก่อกวนในช่องไหล (Obstacles) การออกแบบช่องไหลให้มีลักษณะซิกแซก (Serpentine Channels) หรือการเพิ่มร่องภายในช่องไหล (Grooves) เพื่อช่วยสร้างการไหลแบบปั่นป่วนในระดับจุลภาค (Chaotic Advection) ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผสมของไหล [9]

2.1.3 การเชื่อมต่อไมโครมิกเซอร์กับพื้นผิวแก้ว

การเชื่อมต่อระหว่างช่องทางไมโครมิกเซอร์กับพื้นผิวแก้วเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปจะใช้เทคนิค Plasma Bonding ซึ่งมีต้นทุนสูงและต้องการสภาพแวดล้อมที่สะอาด [9,12] ได้เสนอเทคนิค Thin Film PDMS Bonding ซึ่งมีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการใช้งาน [4]

2.1.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) คือ กระบวนการสำคัญในเทคโนโลยีไมโครแฟบริเคชัน (Microfabrication) ที่ใช้ในการสร้างลวดลายขนาดเล็กบนพื้นผิววัสดุ เช่น แผ่นซิลิคอน (Silicon Wafer) หรือแผ่นแก้ว (Glass Slide) โดยอาศัยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Light) เพื่อถ่ายโอนลวดลายจาก

หน้ากาก (Photomask) ลงบนฟิล์มไวแสง (Photoresist) ที่เคลือบบนพื้นผิวนั้น

ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

1. การเตรียมพื้นผิว (Substrate Preparation)

ทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อจัดสิ่งปนเปื้อนและเพิ่มการยึดเกาะของสารไวแสง

2. การเคลือบสารไวแสง (Spin Coating) เคลือบฟิล์มสารไวแสง (Photoresist) บนพื้นผิวให้ได้ชั้นบางและสม่ำเสมอ โดยใช้เทคนิคหมุนเหวี่ยง

3. การฉายรังสี UV (UV Exposure) ฉายแสง UV ผ่านหน้ากากลวดลาย เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของสารไวแสงในบริเวณที่สัมผัสแสง โดยสามารถคำนวณค่าพลังงานแสงได้จากสมการที่ (5)

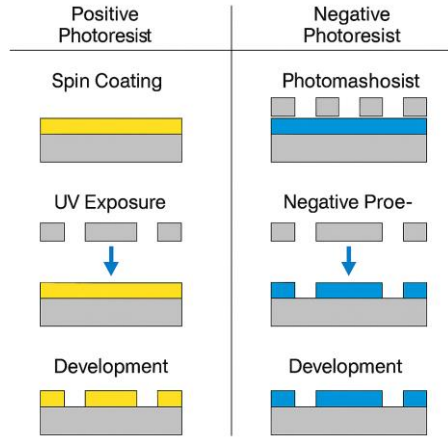
$$D = I \times T \quad (5)$$

4. กำหนดให้ D คือ พลังงานในการฉายแสง (J/cm^2) T คือ เวลาในการฉายแสง (วินาที) และ I คือ ค่ากำลังในการฉายแสง (W/cm^2)

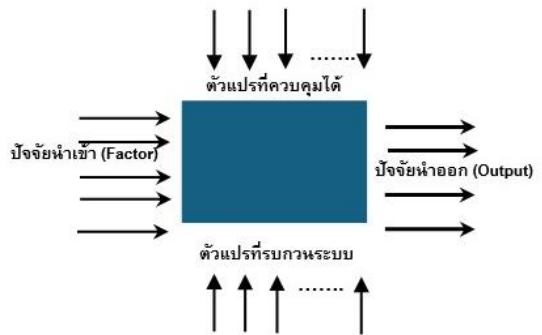
5. การล้างลวดลาย (Development) ใช้น้ำยาล้างเพื่อละลายสารไวแสงในบริเวณที่ต้องการสร้างลวดลาย [4]

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (Design of Experiment: DOE) เป็นการทดสอบครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการ หรือระบบนั้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงผลกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ



รูปที่ 2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปรที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) มีหลักสำคัญอย่างยิ่งเพื่อช่วยให้การทดลองมีความถูกต้อง เทียบตรง และแม่นยำมากขึ้น ได้แก่



1. หลักการสุ่มตัวอย่าง (Randomization) โดยจัดลำดับที่เกี่ยวข้องในการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม ซึ่งหลักการสุ่มจะช่วยสมดุลความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

2. การทดลองซ้ำ (Replication) คือการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้งเพื่อยืนยันและเพิ่มความถูกต้องของผลการทดลอง

3. การบล็อก (Blocking) คือ เทคนิคที่ใช้ในการลดหรือกำจัดความผันแปรของตัวแปรรบกวน (Noise Variables) หรือเรียกว่าปัจจัยบล็อก ซึ่งการบล็อกจะไม

สนใจศึกษาผลกระทบปัจจัยบล็อกแม้ว่าจะส่งผลต่อสิ่งที่สนใจ โดยทั่วไปคือการจัดแบ่งชุดเงื่อนไขที่เหมือนกันในการทดลอง

3. การทดลอง

3.1 การออกแบบแบบแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

การออกแบบการทดลองสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k โดยมีการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้งทำให้สามารถคำนวณความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-Run Variability) ได้ แม้จำนวนการทำซ้ำจะน้อย แต่เมื่อรวมกับ Center Point (ช่วยตรวจสอบความไม่เป็นเชิงเส้น) ก็เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติเบื้องต้น และค่ากึ่งกลาง 1 ครั้งทำการทดลองทั้งหมด 17 ครั้ง โดยมีการกำหนดให้บล็อกเท่ากับ 1 ครั้ง ดังแสดงในตารางการออกแบบค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัยในตารางที่ 1 และตารางการออกแบบการทดลองในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่นำมาทดลอง ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย (Factor)	สัญลักษณ์	ระดับ	
		ต่ำ	สูง
ค่าพลังงาน (Dose) ในการฉายแสง UV Lithography	A	18	25
ระยะเวลาสูงตำแหน่งในการวางชิ้นงานบน Stage Z ที่วางชิ้นงาน	B	11.47	13.18
เวลาในการล้างสารไวแสง (Develop)	C	35	50

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน

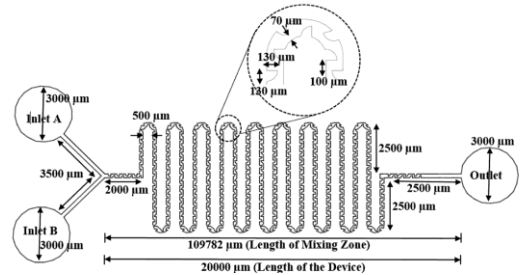
No.	Dose Time	Stage Z	Dev. Time
1	25	13.18	35
2	21.5	12.33	42.5
3	25	11.47	35
4	18	13.18	35
5	18	13.18	50
6	18	13.18	50
7	25	13.18	50
8	25	13.18	50
9	18	11.47	35
10	25	11.47	35
11	18	11.47	50
12	25	11.47	50
13	18	13.18	35
14	25	13.18	35
15	25	11.47	50
16	18	11.47	35
17	18	11.47	50



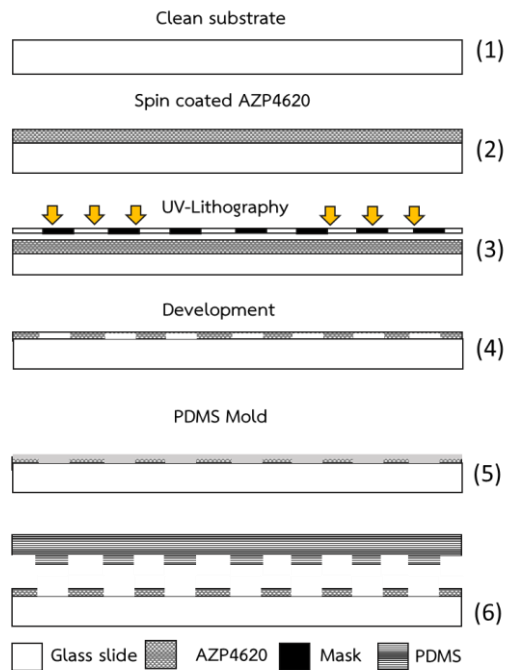
3.2 การสร้างอุปกรณ์สำหรับการไหลแบบผสม

การออกแบบและสร้างช่องทางการไหลจุลภาค (Microfluidic Channel Structure) โดยเริ่มต้นจากการออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor และนำลวดลายดังกล่าวไปพิมพ์เป็นโฟโตมาสก์ (Photomask) เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) ดังแสดงในรูปที่ 3 โครงสร้างช่องทางการไหลถูกออกแบบเป็นรูปขดช่องทางไหลแบบคดเคี้ยว เพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างสารสองสาร โดยช่องทางมีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 5,000 x 20,000 ไมโครเมตร(ไม่รวมขด) เมื่อทำการคิดความยาวทั้งหมดเมื่อรวมขดทั้งหมด โครงสร้างนี้มีความยาว 103,500 ไมโครเมตร การสร้างโครงสร้างดำเนินการด้วยเทคนิค Soft Lithography โดยเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นแก้ว (ตั้งขั้นตอนที่ 1) จากนั้นทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ AZ P4620 ด้วยการหมุนที่ความเร็วรอบครั้งที่ 1 500 rpm ใช้เวลา 5 วินาที และความเร็วรอบครั้งที่ 2 1000 rpm 30 วินาที (ตั้งขั้นตอนที่ 2) เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มหนาประมาณ 30 ไมโครเมตรจากนั้นทำการฉายแสง UV ด้วยเครื่อง Mask Aligner เป็นเวลา 35 วินาที และอบที่ 95°C (ตั้งขั้นตอนที่ 3) ก่อนนำไปล้างด้วย AZ Development โดยใช้สารละลาย Boric acid : KOH : DI water ในอัตราส่วน 2 : 4 : 200 เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ได้แม่พิมพ์โครงสร้างช่องทาง (ตั้งขั้นตอนที่ 4) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากนั้นจะดำเนินการทำสำเนาโครงสร้างช่องทางการไหลดำเนินการโดยการเท PDMS (Polydimethylsiloxane) ที่เตรียมในอัตราส่วน 10:1 ลงบนแม่พิมพ์ (ตั้งขั้นตอนที่ 5) และอบที่ 70°C เป็น

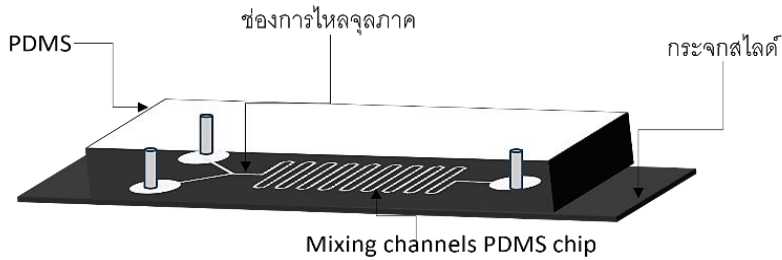


รูปที่ 3 โครงสร้างช่องทางการไหลแบบผสม

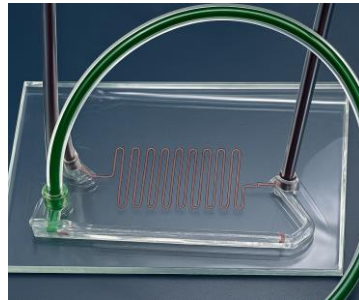


รูปที่ 4 กระบวนการลิโทกราฟี (Lithography Process) ซึ่งใช้ในการผลิตโครงสร้างไมโครชาแนล

เวลา 60 นาที จากนั้นลอกชิ้นงาน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ (ตั้งขั้นตอนที่ 6) และสุดท้ายดำเนินการเจาะรูสำหรับทางเข้า-ออก แล้วประกอบเข้ากับกระจกสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 5



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์สำหรับการไหลแบบผสม:

(ก) แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก และ (ข) แสดงอุปกรณ์จริงในการทดลอง

3.3 ศึกษา Reynolds Number และพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในช่องไหล

การศึกษา Reynolds Number และพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในช่องไหล สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพการผสม คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล โดยให้ปริมาตรของน้ำ เท่ากับ 1×10^{-6} ลูกบาศก์เมตร (m^3) และมวล (m) เท่ากับ 0.001 กิโลกรัม (kg) ดังนั้นสามารถคำนวณความหนาแน่นของของไหลได้จากสมการที่ (6)

$$\rho = \frac{m \text{ (kg)}}{V \text{ (m}^3\text{)}} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{0.001 \text{ (kg)}}{0.000001 \text{ (m}^3\text{)}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

จากสมการที่ 6 เมื่อ v คือความเร็วเชิงลักษณะของของไหล ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น 2 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ซึ่งคำนวณจากอัตราการไหลของของไหลตัวกลางผสม D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลักษณะเฉพาะของช่องทางไหล (Characteristic Device Channel Diameter) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร (mm) μ คือ ความหนืดของของไหล (Fluid Viscosity) มีค่าเท่ากับ 0.00089 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) ดังนั้นค่า Re ในสมการที่ (1) แสดงได้ดังต่อไปนี้ $Re = 8.9 \times 10^{-4}$ เนื่องจากค่า $Re < 1$ จึงสามารถใช้สมมติฐาน การไหลแบบคลีปปีงโฟลว์ (Creeping Flow Interface) ได้ กล่าวคือของไหลมีลักษณะการไหลแบบลามินาร์สูงมาก โดยอาศัย

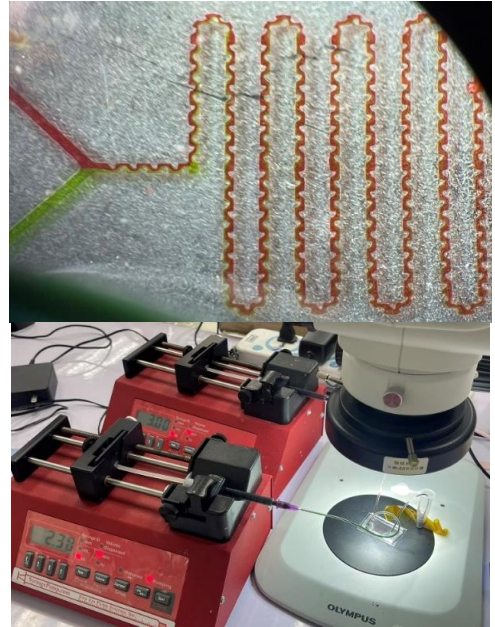


แรงเหวี่ยงเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหล ทดสอบโครงสร้างช่องไหลซิกแซกที่มีร่องเสริม เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของโครงสร้างต่อการผสมแสดงได้ดังรูปที่ 6

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ทดสอบหาการสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่เหมาะสม

ทำการทดลองการสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่เหมาะสมที่ทำให้สารตัวอย่างสองสารสามารถทำการผสมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ทำการทดลองสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่ดีที่สุด โดยการวัดผลจากความคมชัดโครงสร้างลดลาย มุม 90 องศา (Aspect Ratio) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 7 โดยพบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับค่าพลังงานในการฉายแสง UV , ระยะความสูงตำแหน่งในการวางชิ้นงานแกน Stage Z, เวลาในการล้างสารไวแสง โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นดังรูปที่ 8 และ 9 แสดงว่าค่า Residuals มีการกระจายตัวตามปกติ Versus Fits จากกราฟพบว่ากระจายตัวแบบสุ่มรอบแกนนอน (แกน Residuals) โดยไม่มีรูปแบบเฉพาะ แสดงว่าความแปรปรวนสม่ำเสมอ Histogram จากกราฟมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ แสดงว่าค่า Residuals มีการกระจายตัวใกล้เคียงปกติ จากกราฟ Residual Plots ที่ให้มา ค่า Residuals มีการกระจายตัวใกล้เคียงปกติ ความแปรปรวนสม่ำเสมอ และไม่มีรูปแบบเฉพาะในค่า Residuals ตามลำดับการทดลองแสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความเหมาะสมและเชื่อถือได้ (แสดงให้เห็นดังรูปที่ 8)

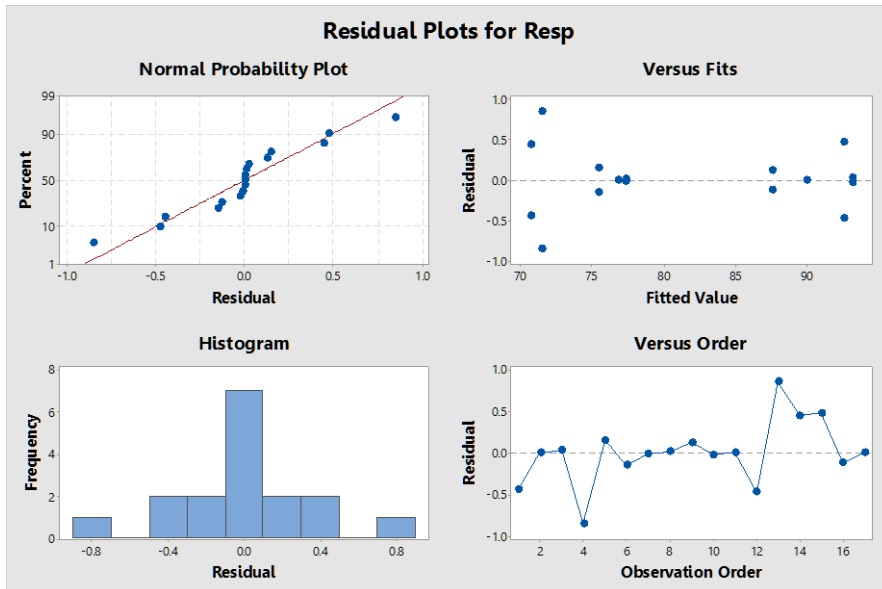


รูปที่ 6 แสดงการทดสอบโครงสร้างช่องไหลซิกแซกที่มีร่องเสริม



รูปที่ 7 แสดงความคมชัดโครงสร้างลดลายมุม 90 องศา

กราฟการกระจายตัว Residual Plots ที่แสดงในภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ Normal Probability Plot จากกราฟพบว่าจุดข้อมูลเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรง Factorial Regression



รูปที่ 8 กราฟแสดงปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองทั้งหมด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1302.17	162.77	549.44	0.000
Linear	3	1233.68	411.23	1388.11	0.000
Dose time	1	21.39	21.39	72.20	0.000
Stage Z	1	1174.78	1174.78	3965.49	0.000
Dev. time	1	37.52	37.52	126.64	0.000
2-Way Interactions	3	31.98	10.66	35.99	0.000
Dose time*Stage Z	1	12.60	12.60	42.54	0.000
Dose time*Dev. time	1	0.02	0.02	0.08	0.790
Stage Z*Dev. time	1	19.36	19.36	65.35	0.000
3-Way Interactions	1	8.27	8.27	27.90	0.001
Dose time*Stage Z*Dev. time	1	8.27	8.27	27.90	0.001
Curvature	1	28.24	28.24	95.32	0.000
Error	8	2.37	0.30		
Total	16	1304.54			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.544289	99.82%	99.64%	*

รูปที่ 9 ผลแสดงสมการถดถอยของปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง



ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองปัจจัย B (ระยะความสูงตำแหน่งวางชิ้นงานแกน Z) มีผลกระทบสูงสุดต่อความคมชัดของลวดลาย ($p < 0.05$) แสดงอิทธิพลสูงสุดต่อความคมชัดของลวดลาย เนื่องจากควบคุมระยะนาบโฟกัสของแสง UV ต่อผิวสารไวแสง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความละเอียดและความลึกของการเกิดโครงสร้างในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี การปรับตำแหน่งแกน Z ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของการเกิดลวดลาย ปัจจัย C (เวลาในการล้างสารไวแสง) มีผลกระทบเป็นอันดับสอง ($p < 0.05$) ระยะเวลาการล้างที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความคมชัดและลดการตกค้างของสาร ปัจจัย A (ค่าพลังงานในการฉายแสง UV) มีผลกระทบเป็นอันดับสาม ($p < 0.05$) พลังงาน UV สูงอาจทำให้ลวดลายชัดเจนขึ้น แต่ผลกระทบน้อยกว่าปัจจัย B และ C (แสดงให้เห็นดังรูปที่ 9) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A (Dose time) และ C (Dev. time) ให้ค่า p-value > 0.05 ซึ่งหมายความว่าปฏิสัมพันธ์นี้ ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลลัพธ์ (ความคมชัดของลวดลาย) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

โมเดล Factorial Regression ที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือสูง ($R^2 = 99.82\%$, Adjusted $R^2 = 99.75\%$) และผ่านการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติ จึงสามารถใช้ทำนายค่าพารามิเตอร์การผลิตที่เหมาะสมได้อย่างแม่นยำ

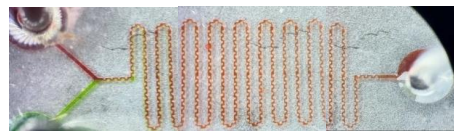
4.2 การทดสอบอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์เพื่อหาประสิทธิภาพการผสม

ในการทดสอบไมโครมิกเซอร์ ได้ใช้ Syringe Pumps เพื่อควบคุมอัตราการไหลของของไหล และใช้ Color Indicators (สารบ่งชี้สี) เพื่อประเมินประสิทธิภาพ



(a) (b) (c)

รูปที่ 10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางตรงที่อัตราการไหลต่ำ ($1 \mu\text{L}/\text{min}$) ระดับการผสมที่ความยาวต่างกัน: (a) 0.5 mm, (b) 5.0 mm และ (c) 20.0 mm



รูปที่ 11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ของไมโครมิกเซอร์แบบช่องทางตรงที่อัตราการไหลที่ $1 \mu\text{L}/\text{min}$

การผสมด้วยการสังเกตด้วยตาเปล่า โดยภาพที่ 10 (a) แสดงช่องทางการไหลขาเข้าระหว่างสารทั้ง 2 ระดับการผสมที่ความยาว 0.5 mm (b) แสดงช่องทางคดเคี้ยวที่มีความยาว 5 mm (c) แสดงช่องทางขาออกของสาร ระดับการผสมที่ความยาว 103.5 mm ทั้งนี้ประสิทธิภาพการผสม (Mixing Efficiency) ถูกวัดที่อัตราการไหลต่างๆ กัน โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหลที่ต่ำที่สุดคือ $1 \mu\text{L}/\text{min}$ ดังแสดงในรูปที่ 11 และอัตราการไหลสูงสุดที่ $50 \mu\text{L}/\text{min}$ ที่อัตราการไหลสูงกว่า $50 \mu\text{L}/\text{min}$ เกิดแรงดันภายในช่องทางที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างไมโครมิกเซอร์ไม่สามารถทนทานต่อแรงดันได้เพียงพอทำให้เกิดการรั่วไหลภายใน ถือเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งาน ไมโครมิกเซอร์แบบคดเคี้ยวที่มีร่องเสริมที่อัตราการไหลสูง สำหรับวัสดุ PDMS กับ Glass ปัญหาการรั่วมักจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันภายในสูงเกินกว่าพันธะ



เคมีจะรับไหว ซึ่งปกติแล้วขีดจำกัดสูงสุดของ PDMS-Glass bonding ที่ผ่าน Oxygen Plasma และการอบ (Baking) อย่างสมบูรณ์จะทนแรงดันได้ประมาณ 300-500 kPa (หรือประมาณ 43-72 psi) ซึ่งโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบนี้มีความดันภายในช่องมากถึง 211.6 kPa (หรือ 30.7 psi) และเมื่อรวมผลจาก Grooves และ Serpentine ซึ่งเพิ่มความต้านทาน R_H อีกประมาณ 1.5-2 เท่า ทำให้แรงดันจริงภายในชิปจะพุ่งสูงถึง 317-423 kPa ซึ่งการคำนวณค่าแรงดันภายใน (Fluid Mechanics) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ดังนี้ [13]

$$\Delta P = R_H \cdot Q \quad (7)$$

โดยที่ P คือ อัตราการไหล (Flow Rate) = 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ($\approx 8.33 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$)

R_H คือ ความต้านทานไฮดรอลิก (Hydraulic Resistance)

สำหรับช่องสัญญาณสี่เหลี่ยม ($w > h$)

$$R_H \approx \frac{12\mu L}{wh^2(1-0.63\frac{h}{w})} \quad (8)$$

$$R_H = \frac{170.5}{0.9055} = 188.3 \text{ kPa}$$

จากสมการที่ (8) μ คือความหนืดของของไหล (Fluid Viscosity) มีค่าเท่ากับ 0.00089 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) L คือความยาวของช่องทาง มีค่าเท่ากับ 103,500 ไมโครเมตร (μm) Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร ซึ่งมีค่า 50 ไมโครลิตร/นาที ($\mu\text{L}/\text{min}$) หรือเท่ากับ $8.33 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ มีความกว้างของช่องทาง 200 ไมโครเมตร (μm) และชั้นฟิล์มหนาประมาณ 30 ไมโครเมตร (μm) ดังนั้นค่า R_H ในสมการที่ (8) มีค่าแรงดันที่ 188.3 kPa จะเห็นได้ว่าเป็นแรงดัน $> 300 \text{ kPa}$ การใช้งานของชิปจึงเป็น "ขีดจำกัดสูงสุด" (Limit) ของการ Bonding ระหว่าง PDMS และ Glass โดยแสดงตารางเปรียบเทียบแรงดันที่ Flow Rate ต่างกัน ดังตารางที่ 3

จากผลการวิเคราะห์การผสมกันของช่องทางการไหลจากค่าความเข้มของสี Grayscale โดยใช้โปรแกรม ImageJ ดังแสดงในรูปที่ 12 เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ Mixing Efficiency โดยค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์ Mixing Efficiency ที่อัตราการไหล 1 $\mu\text{L}/\text{min}$, 10 $\mu\text{L}/\text{min}$, 25 $\mu\text{L}/\text{min}$ และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งพบว่าในช่วงแรก (0-5 mm) เป็นช่วงที่การผสมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากโครงสร้างร่องเสริมและช่องทางคดเคี้ยวส่งเสริมให้เกิด chaotic advection อย่างรุนแรงของไหลมีการปะทะและเปลี่ยนทิศทางบ่อยครั้ง ก่อให้เกิดการผสมแบบ Forced Mixing

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยน Flow Rate

Flow Rate ($\mu\text{L}/\text{min}$)	แรงดันทางทฤษฎี (kPa)	แรงดันจริงโดยประมาณ (รวม Grooves/Mixer)	สถานะของ Bonding
10	42.3	63-85	ปลอดภัย
30	127.0	190-254	เริ่มมีความเสี่ยง
50	211.6	317-423	รำซึม (Critical Point)
100	423.2	635-846	ล้มเหลวทันที



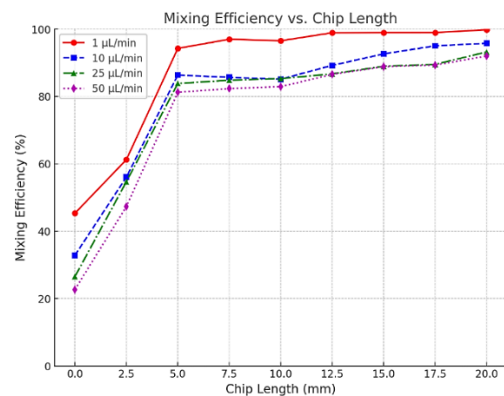
ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากการเพิ่มระยะทางเพียงเล็กน้อย โดยที่อัตราการไหล 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากประมาณ 45% เป็นกว่า 94% ภายในช่วงความยาว 5 mm นี้ หลังจากนั้นในช่วงที่สอง (5-20 mm) การผสมเข้าสู่ภาวะคงตัว เนื่องจากส่วนใหญ่เกิดขึ้นแล้ว (>90%) การเพิ่มความยาวชิปอีกให้ผลตอบแทนที่ลดลง (diminishing return) เช่น ที่อัตราการไหล 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ การเพิ่ม Chip Length จาก 5 mm เป็น 20 mm ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียง 5.53% ขณะที่ต้องใช้ระยะทางเพิ่มถึง 15 mm แสดงให้เห็นว่าการออกแบบอาจพิจารณาลดความยาวลงในช่วงหลังเพื่อประหยัดพื้นที่และวัสดุ โดยยังคงได้ประสิทธิภาพการผสมในระดับที่ยอมรับได้ และเมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mixing Efficiency และ Chip Length ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าแนวโน้มของค่า Efficiency เพิ่มขึ้นตามความยาวของชิปและลดลงตามอัตราการไหลอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ประสิทธิภาพการผสมที่ 99.80%, 95.80%, 93.20% และ 92.00% ตามลำดับ ที่บริเวณตำแหน่ง 20 mm ในไมโครมิกเซอร์แบบคดเคี้ยวมีร่อง (Serpentine Channel Micromixer) ตามอัตราการไหล 1, 10, 25 และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ตามลำดับพบว่าประสิทธิภาพการผสมในไมโครมิกเซอร์เซอร์แบบคดเคี้ยวมีร่องลดลงตามลำดับ และจะมีประสิทธิภาพการผสมสูงสุดที่ 99.80% เกิดขึ้นที่อัตราการไหลต่ำสุด 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อยในระดับเศษส่วน (Fractional Point) แต่ยังคงรักษาค่าประสิทธิภาพในระดับที่สูงกว่า 80%

ตารางที่ 4 ค่า Mixing Efficiency (%) ที่ 1 $\mu\text{L}/\text{min}$, 10 $\mu\text{L}/\text{min}$, 25 $\mu\text{L}/\text{min}$ และ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$

Chip Length (mm)	1 $\mu\text{L}/\text{min}$	10 $\mu\text{L}/\text{min}$	25 $\mu\text{L}/\text{min}$	50 $\mu\text{L}/\text{min}$
0	45.33	32.85	26.51	22.69
2.5	61.24	56.03	54.69	47.30
5	94.27	86.37	83.87	81.24
7.5	96.99	85.68	84.82	82.34
10	96.54	85.12	85.31	82.91
12.5	98.91	89.23	86.72	86.55
15	98.97	92.64	88.97	88.85
17.5	98.98	95.03	89.52	89.32
20	99.80	95.80	93.20	92.00



รูปที่ 12 แสดงค่าผลของค่าความเข้มของสี (โปรแกรม ImageJ)



รูปที่ 13 แสดงค่า Mixing Efficiency และ Chip Length



5. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่มีโครงสร้างช่องทางคดเคี้ยวเสริมร่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของไหลในย่านอัตราการไหลที่กว้าง โดยสามารถทำการทดลองจริงได้มากที่สุดที่ 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งไม่ใช่ผลจากการจำลองผลการทดลอง โดยพบว่าการสร้างอุปกรณ์ไมโครมิกเซอร์นี้สามารถทำการสร้างลวดลายที่คมชัดมากที่สุดบนสารไวแสงชนิดบวก AZ P4620 ภายใต้ปัจจัยหลัก (Main Factor) 3 ประการ ได้แก่ พลังงาน UV, ระยะเวลาสูง, เวลาล้าง และปฏิสัมพันธ์ (Interaction Factor) BC, AB มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความคมชัด ทำนายพลังงานในการฉายแสงยูวี ระยะเวลาสูงตำแหน่งในการวางชิ้นงานบนแกน Stage Z และเวลาในการล้างสารไวแสงที่ดีที่สุด เท่ากับ 18 วินาที 11.47 มิลลิเมตร และ 35 นาที ตามลำดับ พบว่าสภาวะดังกล่าวให้ ค่าความพึงพอใจสูงสุด 87.99% และ ความน่าเชื่อถือของข้อมูล 99.82% ซึ่งยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลต่ำสุด (1 $\mu\text{L}/\text{min}$) ไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพการผสมสูงสุดที่ 99.80% ซึ่งใกล้เคียงกับไมโครมิกเซอร์แบบเดิมที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 99.75% สำหรับอัตราการไหลที่สูงขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อยในช่วงยาวกว่า 10 μL คือ 95.80%, 93.20% และ 92.00% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ซึ่งช่วงอัตราการไหลที่ทดสอบได้จริง (1-50 $\mu\text{L}/\text{min}$) เท่านั้น เนื่องจากระดับอัตราการไหลที่สูงกว่า 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ถือเป็นจุด Critical Point ของโครงสร้างที่ถูกออกแบบไว้ในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อรองรับอัตราการไหลที่สูงกว่า

50 $\mu\text{L}/\text{min}$ ต้องดำเนินการดังต่อไปนี้ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ปรับใช้ในโครงสร้างในอนาคต

1. Chemical Modification (APTES) การทำ Surface Treatment ด้วยสาร Silane (เช่น APTES) ก่อนการ Bonding จะช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะได้มากกว่า Plasma ปกติถึง 2-3 เท่า ทำให้ทนแรงดันได้ถึง 600-800 kPa

2. Mechanical Clamping System: ออกแบบตัวประกบชิป (Holder) โดยใช้ CNC หรือ 3D Printing ผลิตแผ่นอะคริลิกใสมาประกบหน้า-หลังชิป วิธีนี้เป็นมาตรฐานสากลในงานวิจัย Microfluidics ที่ต้องใช้ความเร็วสูง เพื่อป้องกันไม่ให้ PDMS บวมหรือแยกออกจากกระจก

3. Optimize Channel Height: หากประสิทธิภาพการผสม (Mixing efficiency) ยังดีอยู่ สามารถทำการเพิ่มความสูง (h) เป็น 40-50 μm เพื่อให้แรงดันลดลงเหลือเพียง 1/3 ของค่าปัจจุบันทันที ซึ่งจะทำให้ระบบเสถียรขึ้นมาก

นอกจากนี้ยังพบว่าไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นยังคงมีประสิทธิภาพการผสมมากกว่า 80% ในทุกช่วงอัตราการไหลที่ทำการทดสอบจริง ที่อัตราการไหลสูง ประสิทธิภาพลดลงมากกว่าแบบเดิม เนื่องจาก การออกแบบช่องไหลยังไม่สร้างกระแสปั่นป่วนได้เต็มที่

ดังนั้นในด้านสมรรถนะของอุปกรณ์ ผลการทดลองเชิงทดลอง (Experimental results) ยืนยันว่าไมโครมิกเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถยกระดับประสิทธิภาพการผสมได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเดิม โดยสามารถทำประสิทธิภาพการผสมสูงสุดได้



ถึง 99.80% ที่อัตราการไหล ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสไหลวน (Vortex) และการแปรที่เพิ่มขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในโครงสร้างร่องเสริม แม้ว่าในเชิงทฤษฎีจะบ่งชี้ถึงขีดความสามารถในการรองรับแรงดันได้สูง แต่จากการทดสอบจริงพบว่าข้อจำกัดของอุปกรณ์อยู่ที่อัตราการไหล 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ เนื่องจากเป็นจุดวิกฤตที่เริ่มเกิดการรั่วซึมของของไหล ซึ่งแสดงว่าไมโครมิกเซอร์ที่น่าเสนอนี้มีสมรรถนะในการผสมที่ยอดเยี่ยมและใช้งานได้จริงในช่วงอัตราการไหลที่กำหนด ซึ่งผลการทดลองเชิงประจักษ์นี้ได้พิสูจน์ถึงประสิทธิภาพของรูปแบบโครงสร้างที่ออกแบบมา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ Lab-on-a-Chip สำหรับการวิเคราะห์ทางชีวการแพทย์และเคมีที่ต้องการความแม่นยำสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างช่องทางการไหลทำให้ประสิทธิภาพการผสมลดลงเล็กน้อยที่อัตราการไหลสูง โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครมิกเซอร์แบบเดิม จำเป็นต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมโดยเพิ่มองค์ประกอบที่ช่วยสร้างการไหลปั่นป่วนภายในช่อง เช่น การเพิ่มร่อง (Grooves) หรือสิ่งกีดขวาง (Obstacles) เพื่อกระตุ้นการผสมของของไหล

แนวทางการพัฒนางานวิจัยนี้เพื่อต่อยอดในอนาคต ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างช่องทางไหลโดยเพิ่มองค์ประกอบกีดขวาง เพื่อเพิ่มการไหลปั่นป่วน การปรับโครงสร้างที่สามารถทดลองที่อัตราการไหลสูงขึ้นกว่า 50 $\mu\text{L}/\text{min}$ เพื่อลดขีดจำกัดของอุปกรณ์ และการพัฒนาทางเข้าของสารจาก 2 ทาง เป็น 3 ทาง เพื่อเพิ่มความซับซ้อนของการไหลและทางเลือกการผสมสารมากกว่า 2 สารขึ้นไป อีกทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมให้ดียิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการได้รับการสนับสนุนจากทุนส่งเสริมศักยภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี 2567

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, *Nature*, 2006, 442, 368-373.
- [2] C.Y. Lee, CL. Chang, Y.N. Wang and L.M. Fu, Microfluidic mixing: A review, *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12(5), 3263-3287.
- [3] T.M. Squires and S.R. Quake, Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale, *Reviews of Modern Physics*, 77(3), 977-1026, 2005.
- [4] K. Karthikeyan and S. Sujatha, Study of permissible flow rate and mixing efficiency in serpentine channel micromixer, *International Journal of Microfluidics*, 2018, 12(3), 45–58.
- [5] M.U. Javid, T.A. Cheema and C.W. Park, Analysis of passive mixing in a serpentine microchannel with sinusoidal side walls, *Micromachines*, 2018, 9(1), 8.
- [6] P. Borgohain, D. Choudhary, A. Dalal, and G. Natarajan, Numerical investigation of mixing enhancement for multi-species flows in wavy channels, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2018, 127, 191–205.



- [7] H. Jalili, M. Raad and D. A. Fallah, Numerical study on the mixing quality of an electroosmotic micromixer under periodic potential, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234, 11, 2113-2125.
- [8] B. Mondal, P.K. Patowari and S. Pati, Numerical and experimental investigations of mixing length in square wave serpentine micromixer with obstacles, *Microsystem Technologies*, 2024, 30(2), 365–375.
- [9] B. Yuan, S. Yuan and H. Wang, Numerical and experimental investigation of mixing enhancement in a zigzag passive micromixer with D-shaped obstacles, *Micromachines*, 2021, 12(11), 1362.
- [10] C. Wu, K. Tang, B. Gu, and Z. Wu, Concentration-dependent viscous mixing in microfluidics: Modelings and experiments, *Microfluidics and Nanofluidics*, 2016, 20(6), 91.
- [11] T. Okkala, Teaching Handout, Fluid Mechanics, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, 2010. (in Thai),
- [12] J. Keawkaew, C. Phiphattanaphiphop, K. Leksakul, R. Phatthanakun and T. Khamlor, The optimal solution of microfluidic device for separating white blood cells in raw milk, *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2025, 382, 116124.
- [13] H. Bruus, *Theoretical microfluidics, Chapter 2: Hydraulic resistance*, Oxford University Press, UK, 2008, 34–36.