

การสร้างและควบคุมขนาดของหยดอนุภาคโดยระบบไมโครฟลูอิดิก
สำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บในระดับไมโครและนาโนเมตร

SIZE-CONTROLLABLE MICRODROPLET BASED ON MICROFLUIDIC
SYSTEM FOR MICRO/NANO ENCAPSULATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIZE-CONTROLLABLE MICRODROPLET BASED ON MICROFLUIDIC
SYSTEM FOR MICRO/NANO ENCAPSULATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIALS ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017




COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการงานพิเศษ

หัวข้อโครงการงานพิเศษ การสร้างและควบคุมขนาดของหยดอนุภาคโดยระบบไมโคร-
ฟลูอิดิกสำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บในระดับไมโครและนาโนเมตร
Special Project Title Size-Controllable Microdroplet Based on Microfluidic
System for Micro/Nano Encapsulation
นักศึกษา นางสาว สกาวเพ็ญ ไตรรัตน์
รหัสประจำตัว 57110047
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สากร ระหงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

| คณะกรรมการสอบโครงการงานพิเศษ | ลายมือชื่อ |
|------------------------------|--|
| รศ.ดร.กนกพร สมพรไพลิน |  |
| ผศ.ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง |  |
| ดร.สากร ระหงษ์ |  |

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ให้โครงการงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่..... เดือน.....พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|---|
| โครงการพิเศษเรื่อง | การสร้างและควบคุมขนาดของหยดอนุภาคโดยระบบไมโครฟลูอิดิกสำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บในระดับไมโครและนาโนเมตร |
| นักศึกษา | นางสาว สกาวเพ็ญ ไตรรัตน์ |
| รหัสประจำตัว | 57110047 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมวัสดุนาโน |
| พ.ศ. | 2560 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร.สากล ระหงษ์ |

บทคัดย่อ

ไมโครและนาโนเอนแคปซูลชัน (Micro/Nano encapsulation) คือกระบวนการกักเก็บสารสำคัญไว้ภายในสารอีกชนิดหนึ่งในรูปของสารละลาย ซึ่งสารละลายทั้งสองชนิดจะต้องไม่ผสมเข้ากัน เมื่อทำการกักเก็บสำเร็จแล้วจะอยู่ในรูปของหยดอนุภาคเพื่อรักษาสมบัติของสารสำคัญภายในที่ต้องการกักเก็บ ในปัจจุบันมีการนำวิธีการกักเก็บสารสำคัญมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อาทิเช่น ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร หรืออุตสาหกรรมน้ำหอม เป็นต้น โดยวิธีทั่วไปในการกักเก็บสารสำคัญ ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของการควบคุมขนาดของหยดอนุภาคให้สม่ำเสมอกันในแต่ละหยด ซึ่งการควบคุมหยดอนุภาคให้มีขนาดสม่ำเสมอ จะสามารถควบคุมปริมาณของสารแต่ละหยดและเวลาในการปลดปล่อยสารที่ถูกกักเก็บได้อย่างแม่นยำเพื่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ โดยเฉพาะระบบนำส่งยาแบบนำวิถี โครงการนี้จะทำการสร้างหยดอนุภาคด้วยระบบไมโครฟลูอิดิก โดยจะทำการออกแบบและสร้างระบบไมโครฟลูอิดิกโดยกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างแม่พิมพ์และจึงทำการขึ้นรูประบบไมโครฟลูอิดิกโดยการหล่อแบบด้วยสารพอลิเมอร์ (Polydimethylsiloxane; PDMS) จากนั้นจึงทำการทดลองสร้างหยดอนุภาค โดยจะศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการเกิดหยดอนุภาค เช่น ลักษณะของรูปแบบชิพที่สร้างขึ้น สัดส่วนของอัตราส่วนไหลระหว่างสารสำคัญกับสารหล่อหุ้ม ขนาดของช่องทางการไหล เป็นต้น หลังจากนั้นจึงนำหยดอนุภาคไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และตรวจสอบในเชิงสถิติ จากผลการทดลอง หยดอนุภาคที่สร้างขึ้น จะมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 28 – 33 ไมครอน โดยมีค่าการกระจายตัวของขนาดเพียง 0.31 – 1.40 ไมครอน หลังจากนั้นจึงทำการนำไปทดสอบเพื่อทำการห่อหุ้มอนุภาค Polystyrene ขนาด 5 ไมครอน พบว่าสามารถห่อหุ้มได้สำเร็จแบบหนึ่งหยดต่อหนึ่งอนุภาค ดังนั้นชิพที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานสำหรับการกักเก็บสารสำคัญในระดับไมโครเมตรตามที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---------------|--|
| Thesis Title | SIZE-CONTROLLABLE MICRODROPLET BASED ON MICROFLUIDIC SYSTEM FOR MICRO/NANO ENCAPSULATION |
| Author | Miss Skawpen Trirat |
| Student ID | 57110047 |
| Degree | Bachelor of engineering |
| Major Program | Nanomaterial engineering |
| Academic Year | 2017 |
| Advisor | Dr. Sakon Rahong |

Abstract

Droplet-based microfluidic is the process to encapsulate payload materials as core solution and surrounded by coating material as small capsules in liquid phase. The core solution and surrounded solution should be immiscible fluid, which allow the forming of a tiny capsule to preserve the properties of the essential substances within the container. Nowadays, the micro and nanoencapsulation has been widely used in many applications such as the pharmaceutical, the cosmetics industry, the agrochemical industry, etc. The precisely control and release the substances in the microcapsule are the most preferable, which means the size controlling of the microcapsule with narrow size distribution are crucial. There are many conventional methods to prepare the microcapsules such as spray drying, phase separation and homogenization. However, those methods are still difficult to control the size of droplet. In this special project, the microfluidic systems are study and fabricate to generate and control the size of monodisperse microdroplets. The molds of microfluidic system are designed and fabricate by photolithography process. Then, the polydimethylsiloxane (PDMS) replica molding is employed to form the microfluidic channel. The droplets generate at the junction of microfluidic system, which is the shearing point between the dispersed solution and the continuous solution. After that, the parameters to generate and control size of the microdroplets are investigated such as flow ratio between the dispersed solution and the continuous solution, the viscosity and the shape of the microchannel. The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

microdroplets have an average diameter size between 28 – 33 μm with a narrow size distribution (0.31 – 1.40 μm). Then, 5 μm diameter size of polystyrene (PS) particles are encapsulated as one particle one capsule by the cross junction microfluidic chip which exhibited the potential to apply for micro/nano capsule encapsulation.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สากล ระหงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการดำเนินงาน และให้ความช่วยเหลือด้วยความกรุณามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. นวพันธ์ ชัยนิกิจ ที่ให้คำแนะนำในการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล ขอขอบคุณ นาย วิศรุต ศรีฟู่มไข่ และนางสาวภัทรลักษณ์ ปัดมั่ง นักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยติดต่อประสานงานเพื่อใช้เครื่องมือรวมถึงให้คำแนะนำในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป

ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณ ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง และ รศ.ดร.กนกพร สมพรไพลิน กรรมการและประธานที่ทำการสอบ ที่ให้การให้คำแนะนำ และตรวจสอบเล่มรายงานฉบับนี้ ขอขอบคุณ นาย นราธร เขมะศิริ, นายสุกฤตยะ เกษภูาลักษณ์ และนาย ประภากร รัตนวารินทร์ชัย ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ทำให้การทำงานเป็นไปด้วยความราบรื่น รวมไปถึงขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่คอยให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจอย่างดี และสุดท้ายนี้คือขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สกาเวณิ ไตรรัตน์

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|-----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | IV |
| สารบัญ | v |
| สารบัญภาพ | vii |
| สารบัญตาราง | ix |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 สมมติฐานของงานวิจัย | 2 |
| 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการในการวิจัย | |
| 2.1 ไมโครและนาโนเอนแคปซูล (Micro/Nano encapsulation) | 4 |
| 2.1.1 รูปแบบของไมโครแคปซูล | 4 |
| 2.1.2 เทคนิคที่ใช้ในการเอนแคปซูล | 5 |
| 2.1.3 การประยุกต์ใช้งานการห่อหุ้มสารระดับไมโครและนาโนเมตร | 7 |
| 2.2 ระบบไมโครฟลูอิดิก | 8 |
| 2.2.1 สมบัติของของไหล | 8 |
| 2.2.2 วิธีการสร้างระบบไมโครฟลูอิดิก | 10 |
| 2.3 หยดอนุภาค (Microdroplet) | 13 |
| 2.3.1 การเกิดหยดอนุภาคจากระบบไมโครฟลูอิดิกรูปแบบ T-junction | 13 |
| 2.3.2 การเกิดหยดอนุภาคจากระบบไมโครฟลูอิดิกรูปแบบทางแยกตัดขวาง (Cross-junction) | 15 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | |
| 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 17 |
| 3.2 การออกแบบหน้ากากกันแสง (Photomask) | 18 |

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----------|
| 3.3 การสร้างแม่พิมพ์ซิลิกอน | 19 |
| 3.4 การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป | 21 |
| 3.5 การสร้างหยดอนุภาคด้วยไมโครฟลูอิดิกชิปแบบน้ำในน้ำมัน | 24 |
| 3.6 การห่อหุ้มอนุภาคพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ไว้ในหยดอนุภาค | 26 |
| 3.7 การตรวจสอบลักษณะและการวัดขนาดของหยดอนุภาค | 27 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย | |
| 4.1 การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป | 28 |
| 4.2 การตรวจสอบลักษณะและการวัดขนาดของหยดอนุภาคจากอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก | 30 |
| 4.2.1 การสร้างหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ T-junction | 31 |
| 4.2.2 การสร้างหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction | 33 |
| 4.3 การห่อหุ้มอนุภาคพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) | 41 |
| บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ | |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 44 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ | 45 |
| บรรณานุกรม | 46 |
| ประวัติผู้เขียน | 48 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ภาพแสดงรูปแบบของไมโครแคปซูล..... | 5 |
| 2.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลด้วยเทคนิค Coacervation..... | 6 |
| 2.3 ภาพแสดงกระบวนการทำงานของการอบแห้งแบบพ่นฝอย..... | 6 |
| 2.4 ภาพแสดงกระบวนการเอนแคปซูลชั้นด้วยเทคนิคฟลูอิดไดสเบด..... | 7 |
| 2.5 แสดงหยดของเหลวที่ภาวะสมดุลเมื่อถูกดึงดูด้วยโมเลกุลใกล้เคียง..... | 8 |
| 2.6 แสดงลักษณะการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน..... | 9 |
| 2.7 แสดงผลของอัตราส่วนความกว้างและความลึกของแม่พิมพ์อันทำให้เกิด ความบกพร่องในการพิมพ์ลวดลาย..... | 12 |
| 2.8 แสดงขั้นตอนการพิมพ์ลวดลายด้วยแม่พิมพ์แบบอ่อน..... | 13 |
| 2.9 แสดงรูปแบบของหยดอนุภาค ประกอบด้วยส่วนที่ถูกห่อหุ้มและวัสดุที่ห่อหุ้ม..... | 13 |
| 2.10 แสดงการเกิดหยดอนุภาคจากโครงสร้างแบบ T-junction..... | 14 |
| 2.11 แสดงการไหลของของเหลวในโครงสร้างทางแยกตัวที่..... | 15 |
| 2.12 แสดงการเกิดหยดอนุภาคจากโครงสร้างแบบ Cross-junction..... | 16 |
| 2.13 แสดงรูปแบบการไหลของของเหลวในช่องทางการไหลแบบทางแยกตัดขวาง..... | 16 |
| 3.1 ขั้นตอนการทดลอง..... | 17 |
| 3.2 โครงสร้างของช่องทางการไหลแบบ (ก) T-junction และ (ข) Cross junction..... | 18 |
| 3.3 แสดงกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ซิลิกอนด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี..... | 20 |
| 3.4 แสดงการหล่อลวดลายด้วย PDMS..... | 21 |
| 3.5 แสดงการเจาะรูช่องขาเข้าและขาออกของสารบนชิป..... | 22 |
| 3.6 แสดงการต่อท่อซิลิโคนเข้ากับช่องทางขาเข้าและขาออกบนชิป..... | 23 |
| 3.7 แสดงลักษณะของไมโครฟลูอิดิกชิป..... | 23 |
| 3.8 แสดงการผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค..... | 24 |
| 3.9 แสดงการกรองน้ำสีผ่านตัวกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.22 μm | 25 |
| 3.10 แสดงการติดตั้งหลอดฉีดยากับปั๊มเข็มฉีดยา..... | 25 |
| 4.1 แสดงภาพของช่องทางการไหลที่ออกแบบด้วยโปรแกรม L-Edit ประกอบไปด้วย 2 รูปแบบคือ (ก) T-junction และ (ข) Cross junction..... | 28 |
| 4.2 แม่พิมพ์ซิลิกอน..... | 29 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.3 ภาพแสดงลักษณะของช่องทางการไหลประกอบไปด้วย (ก) แบบ T-junction และ (ข) แบบ cross junction | 29 |
| 4.4 แสดงอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป | 30 |
| 4.5 แสดงการเกิดหยดอนุภาคจากชิปรูปแบบ T-junction ที่อัตราส่วน (ก) 1, (ข) 0.33, (ค) 0.20, (ง) 0.14 และ (จ) 0.11..... | 31 |
| 4.6 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลแบบ T-junction..... | 32 |
| 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหล | 33 |
| 4.8 แสดงการเกิดหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหล (Q) ดังต่อไปนี้(ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1, (ง) 2 และ (จ) 3 | 34 |
| 4.9 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 | 35 |
| 4.10 แสดงการเกิดหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหล (Q) ดังต่อไปนี้ (ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1 และ (ง) 2 | 36 |
| 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 50 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนการไหลเป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2 | 37 |
| 4.12 แสดงการเกิดหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหล (Q) ดังต่อไปนี้ (ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1 และ (ง) 2 | 38 |
| 4.13 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 70 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมีค่าเป็น 1..... | 39 |
| 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดอนุภาคที่เกิดจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 , 50 และ 70 ไมครอน..... | 39 |
| 4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะของพอลิสไตรีนขนาด 5 ไมครอน | 41 |
| 4.16 แสดงการห่อหุ้มพอลิสไตรีนที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 1 | 42 |
| 4.17 แสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่ทำการห่อหุ้มพอลิสไตรีนไว้ด้วย ไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction ที่มีบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน | 42 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย..... | 3 |
| 4.1 แสดงขนาดของช่องทางการไหลบนแม่พิมพ์ซิลิกอนและหลังจากทำการหล่อ PDMS..... | 30 |
| 4.2 แสดงขนาดของหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตรากรไหลและขนาดของช่องทางการไหล.... | 40 |
| บริเวณทางแยกต่างกัน | |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร (Micro/Nano encapsulation) ได้รับความสนใจและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อรักษาสมบัติของสารสำคัญให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น รวมทั้งมีความเสถียรมากขึ้น

การกักเก็บสารสำคัญในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรคือกระบวนการห่อหุ้มสารสำคัญไว้ภายในสารอีกชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นหยดอนุภาคในรูปของเหลว โดยที่สารสำคัญและสารที่ห่อหุ้มต้องไม่ละลายเข้าหากัน เช่น น้ำกับน้ำมัน ด้วยลักษณะที่เป็นประโยชน์นี้ ได้มีการนำเทคโนโลยีการกักเก็บไปประยุกต์ใช้งาน อาทิเช่น การกักเก็บสารกันแดด หรือผลิตภัณฑ์เพิ่มความชุ่มชื้นในด้านเครื่องสำอาง การกักเก็บกลิ่นหรือรสในด้านอุตสาหกรรมอาหาร และโดยเฉพาะการกักเก็บยาเพื่อใช้ในระบบนำส่งยาแบบนำวิถี (Target drug delivery system) ซึ่งจะช่วยนำส่งตัวยาไปรักษาที่อวัยวะเป้าหมาย ซึ่งการควบคุมการปลดปล่อยตัวยา เป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

จากการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า การกักเก็บในรูปแบบของหยดอนุภาค สามารถทำได้หลายวิธียกตัวอย่างเช่น เทคนิคการพ่นแห้ง (Spray drying), การปั่นกวนของเหลวที่ผสมกัน (Homogenization method), การเคลือบแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed coating) หรือการแยกวัฏภาค (Phase separation หรือ Coacervation method) เป็นต้น¹ โดยส่วนมากหยดอนุภาคที่เตรียมด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะมีขนาดแตกต่างกันและยากต่อการควบคุมให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน (Monodisperse) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับระบบนำส่งยาแบบนำวิถี จึงทำให้เกิดคิดค้นวิธีการในการสร้างหยดอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกันและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ (Narrow size distribution) เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถควบคุมปริมาณของสารแต่ละหยดและระยะเวลาในการปลดปล่อยสารที่ถูกห่อหุ้มอยู่ได้อย่างแม่นยำ²

สำหรับงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาการออกแบบและการสร้างระบบไมโครฟลูอิดิกโดยกระบวนการสร้างในระดับไมโครเมตร เพื่อสร้างหยดอนุภาคที่สามารถควบคุมขนาดที่ใกล้เคียงกันได้ ซึ่งหยดอนุภาคจะเกิดที่บริเวณทางแยกของระบบไมโครฟลูอิดิกระหว่างสารสำคัญและสารห่อหุ้ม โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดหยดอนุภาค คือ อัตราการส่วนของอัตราการไหลของสาร รูปแบบช่องทางไหลของระบบไมโครฟลูอิดิกที่ใช้และขนาดของช่องทางไหลบริเวณทางแยก จากนั้นนำหยดอนุภาคที่ได้ไปทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ รวมทั้งตรวจสอบขนาดของหยดอนุภาคในเชิงสถิติเพื่อศึกษาถึงแนวโน้มของค่าการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่สร้างขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสร้างระบบไมโครฟลูอิดิกที่มีรูปร่างเหมาะสมสำหรับการสร้างหยดอนุภาค

1.2.2 เพื่อสร้างหยดอนุภาคที่สามารถควบคุมขนาดให้มีความใกล้เคียงกันได้

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดและขนาดของหยดอนุภาค อันประกอบไปด้วยรูปแบบของช่องทางการไหล อัตราส่วนของอัตราการไหล (Flow rate ratio; Q) และขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างระบบไมโครฟลูอิดิกเพื่อสร้างหยดอนุภาคที่สามารถควบคุมขนาดให้มีความใกล้เคียงกัน

1.3.2 สร้างหยดอนุภาคจากระบบไมโครฟลูอิดิกโดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสม

1.3.3 ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและขนาดของหยดอนุภาคทั้งในเชิงคุณภาพและในเชิงสถิติ

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

1.4.1 การสร้างหยดอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และมีค่าการกระจายตัวของขนาดที่ต่ำนั้นสามารถทำได้โดยระบบไมโครฟลูอิดิก

1.4.2 การควบคุมขนาดของหยดอนุภาคสามารถควบคุมได้โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบของช่องทางการไหล อัตราส่วนของอัตราการไหล และขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยก

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

1.5.1 ออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก

1.5.2 ทำการสร้างระบบไมโครฟลูอิดิก

1.5.3 สร้างหยดอนุภาคจากระบบไมโครฟลูอิดิก

1.5.4 วิเคราะห์ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและขนาดของหยดอนุภาค

1.5.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

| แผนการดำเนินงาน | ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| | สิงหาคม – ตุลาคม พ.ศ. 2560 | พฤศจิกายน - ธันวาคม พ.ศ. 2560 | มกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 | มีนาคม – พฤษภาคม พ.ศ. 2561 |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการในการวิจัย

2.1 ไมโครและนาโนเอนแคปซูลชัน (Micro/Nano encapsulation)

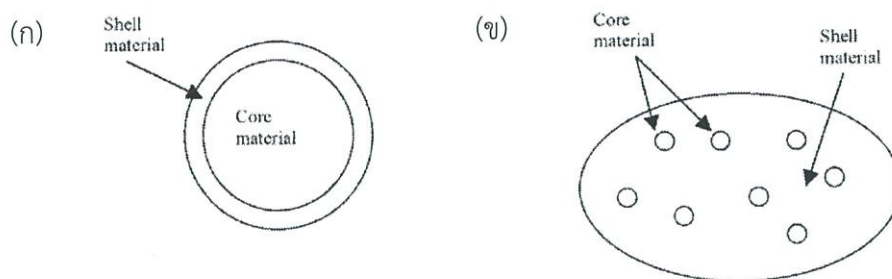
ไมโครเอนแคปซูลชัน (Microencapsulation) คือ กระบวนการห่อหุ้มสารด้วยสารอีกชนิดหนึ่งให้อยู่ในรูปของแคปซูลที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 1,000 ไมโครเมตร เรียกว่า ไมโครแคปซูล (Microcapsule) หรือหยดอนุภาค (Microdroplet) โดยส่วนมากสารที่ถูกกักเก็บหรือถูกห่อหุ้มไว้จะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเรียกว่า คอร์ (Core material) และสารที่ทำการเคลือบหรือห่อหุ้มอยู่นอกจะเรียกว่า เยื่อหุ้ม (Wall material) หรือเชลล์ (Shell material) ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีสมบัติยืดหยุ่น แข็งแรง ความหนืดต่ำและไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถูกห่อหุ้ม ในขณะที่นาโนเอนแคปซูลชันเป็นกระบวนการห่อหุ้มสารในระดับนาโนเมตร³

เทคนิคเอนแคปซูลชันเป็นกระบวนการกักเก็บสารหรืออนุภาคให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่กำหนด มีความคงตัวดี และเก็บรักษาสารได้ยาวนาน โดยทั่วไปนิยมทำการห่อหุ้มสารที่มีความไวต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ไวต่อแสง อุณหภูมิและความเป็นกรดด่าง เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวยังช่วยป้องกันสารที่ระเหยง่าย นอกจากนั้นการนำสารที่เป็นของเหลวมาอยู่ในไมโครแคปซูลมีส่วนช่วยลดการทำปฏิกิริยาของสารผสม สะดวกต่อการนำไปใช้งาน รวมทั้งสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารไปสู่บริเวณที่ต้องการในเวลาที่เหมาะสมได้ จึงมีประโยชน์ช่วยลดความเสี่ยงในการใช้สารด้วย⁴ สมบัติที่หลากหลายนี้ทำให้ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีไมโครเอนแคปซูลชันมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย

2.1.1 รูปแบบของไมโครแคปซูล

ไมโครแคปซูลแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะของสารที่เป็นคอร์และเชลล์ ดังนี้

1. คอร์ถูกห่อหุ้มด้วยสารที่เป็นเชลล์ (Core-Shell-Encapsulation)
2. คอร์กระจายตัวอยู่ในสารที่เป็นเชลล์ (Matrix-Encapsulation)



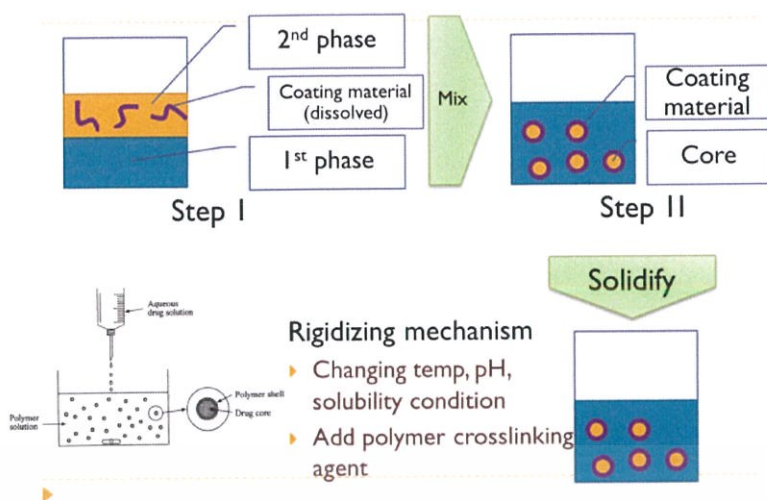
ภาพที่ 2.1 ภาพแสดงรูปแบบของไมโครแคปซูล (ก) คอร์ถูกห่อหุ้มด้วยสารที่เป็นเชลล์
(ข) คอร์ถูกห่อหุ้มด้วยสารที่เป็นเชลล์⁵

2.1.2 เทคนิคที่ใช้ในการเอนแคปซูเลชัน^{6 7}

กระบวนการเอนแคปซูเลชันสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะสามารถเตรียมหยดอนุภาคในลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น

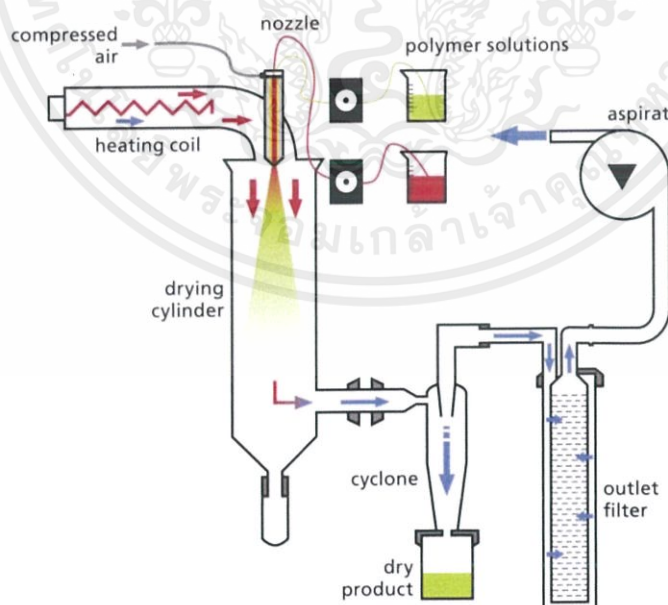
1. การแยกวัฏภาค (Phase separation หรือ Coacervation method) เป็นเทคนิคที่ใช้กระบวนการทางเคมีในการห่อหุ้มโดยจะมีระบบคอลลอยด์ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสของสารที่ไม่เกิดการละลายเข้าด้วยกัน ได้แก่ สารสำคัญที่ต้องการห่อหุ้ม สารที่เป็นตัวห่อหุ้ม และเฟสต่อเนื่อง โดยการห่อหุ้มเกิดขึ้นจากขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำให้เกิดอิมัลชันโดยการนำสารที่ต้องการห่อหุ้มหรือคอร์ไปกระจายตัวในสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวห่อหุ้มหรือเชลล์
- แยกเฟสของพอลิเมอร์ออกจากตัวทำละลาย เพื่อให้พอลิเมอร์ไปดูดซับอยู่บนผิวของสารสำคัญที่ต้องการห่อหุ้ม
- ทำให้ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบแข็งตัวและเกิดเป็นไมโครแคปซูลโดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหรือค่า pH จากนั้นจึงทำการแยกไมโครแคปซูลออกด้วยการกรองและล้างด้วยสารละลายที่เหมาะสมหรือทำให้แห้งด้วยการอบ



ภาพที่ 2.2 กระบวนการเตรียมไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคการแยกวัฏภาค

2. การอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) เป็นเทคนิคการนำสารสำคัญที่ต้องการห่อหุ้มหรือคอร์ผสมลงในสารละลายที่เป็นตัวห่อหุ้มหรือเซลล์เพื่อนำไปบรรจุในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย จากนั้นเครื่องจะทำการฉีดพ่นสารละลายออกมาผ่านหัวพ่นซึ่งตัวทำละลายจะระเหยไปกับลมร้อน ทำให้ได้อนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-150 ไมครอน วิธีนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและสารให้กลิ่นรส

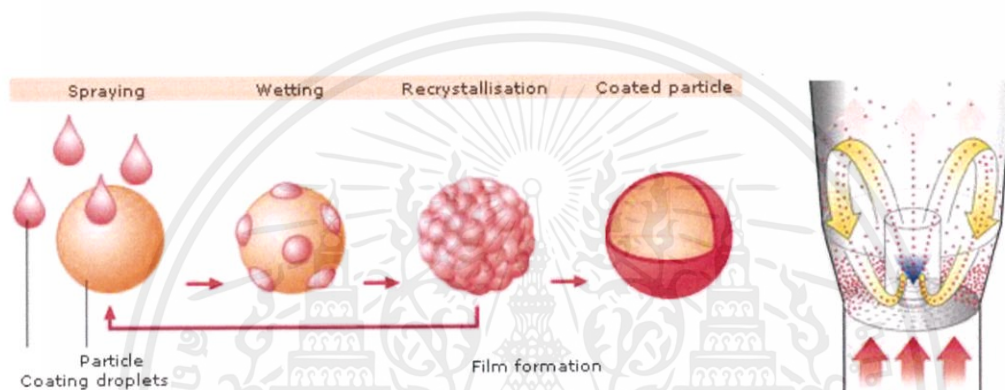


ภาพที่ 2.3 กระบวนการทำงานของวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย⁸

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เทคนิคฟลูอิดไดสเบด (Fluidized bed coating หรือ Air suspension-coating) คือการเตรียมไมโครแคปซูลด้วยการเริ่มต้นจากการกระจายอนุภาคของแข็งหรือสารสำคัญที่ต้องการห่อหุ้มในอากาศโดยอาศัยแรงดันอากาศที่พัดอยู่ภายในของถังเคลือบ (Coating chamber) จากนั้นตัวเครื่องจะฉีดพ่นสารที่เป็นตัวห่อหุ้มไปทำการเคลือบบริเวณพื้นผิวของสารสำคัญที่ต้องการห่อหุ้มทำให้เกิดการห่อหุ้มขึ้น จากนั้นสารเคลือบจะเกิดการแข็งตัวเนื่องจากสารละลายเกิดการระเหยออกไป ทำให้เกิดเป็นไมโครแคปซูล

การหมุนวนของอากาศซึ่งโดยส่วนมากเป็นลมร้อนนั้น จะทำให้อนุภาคเกิดการเคลือบซ้ำๆ ส่งผลให้สามารถกำหนดความหนาของสารเคลือบได้จากระยะเวลาในการพ่นเคลือบ ซึ่งไมโครแคปซูลที่เตรียมได้จากวิธีนี้จะมีขนาดประมาณ 50-500 ไมครอน



ภาพที่ 2.4 ภาพแสดงกระบวนการห่อหุ้มด้วยเทคนิคฟลูอิดไดสเบด⁹

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานการห่อหุ้มสารระดับไมโครและนาโนเมตร

เนื่องจากสมบัติและข้อดีที่หลากหลายของเทคโนโลยีการกักเก็บทำให้มีการนำกระบวนการห่อหุ้มสารนี้ไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน ดังนี้¹

1. ด้านการแพทย์ มีการนำเทคนิคเอนแคปซูลขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการบรรจุตัวยาเข้าไปในหยดอนุภาคเพื่อใช้เป็นตัวพาหะนำส่งยาไปสู่อวัยวะเป้าหมายในระบบการนำส่งยา (Drug delivery) มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยของยาออกจากแคปซูลเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสภาวะแวดล้อมที่กำหนด ทำให้มีจำนวนครั้งในการให้ยาลดลง ลดการเกิดอาการข้างเคียงจากยา และยังสามารถช่วยควบคุมปริมาณยาที่อยู่ในร่างกายให้เหมาะสมและคงที่เพื่อประสิทธิภาพในการรักษาที่ดี

2. ด้านการเกษตร มีการผลิตไมโครแคปซูลที่บรรจุยาฆ่าแมลง ในการใช้งานจะเกิดการปลดปล่อยยาครั้งละน้อยๆอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาานาน จึงสามารถช่วยให้เกษตรกรไม่ต้องฉีดพ่นยาฆ่าแมลงบ่อยครั้ง ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายและไม่เกิดการทำลายสภาพแวดล้อมอันเกิดจากสารพิษที่ตกค้างอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุตสาหกรรมอาหาร มีการนำเทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชันมาใช้ในอาหารหลายชนิด เนื่องจากสารให้กลิ่นรสมีการระเหยได้ง่ายและอาจสูญเสียสมบัติในระหว่างกระบวนการผลิต รวมไปถึงวิตามินที่มีความไวต่อออกซิเจนและแสงสว่างทำให้เกิดการสูญเสียไปในระหว่างการปรุงหรือถนอมอาหาร ตัวอย่างเช่น หมากฝรั่ง เพื่อเพิ่มรสชาติให้อยู่ยาวนานขึ้นขณะเคี้ยว

4. อุตสาหกรรมน้ำหอม มีการใช้เทคนิคเอนไมโครแคปซูเลชันเพื่อแก้ปัญหาความไม่คงตัวขององค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของน้ำมันหอมระเหยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและกลิ่น

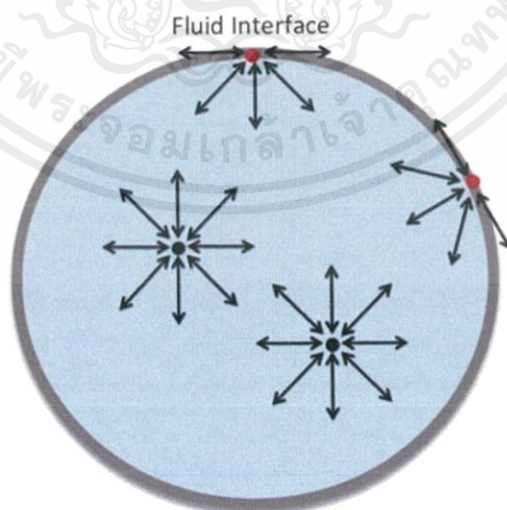
2.2 ระบบไมโครฟลูอิดิก

ระบบไมโครฟลูอิดิก (Microfluidics) คือ วิธีการศึกษาพฤติกรรมของของไหล เช่น ของเหลวหรือแก๊ส ในช่องทางไหล (micro-channel) ที่มีความกว้างในขนาดไมโครเมตร ปริมาณสารที่ใช้ในการศึกษาและตรวจสอบอยู่ในระดับไมโครลิตร นอกจากนี้ระบบไมโครฟลูอิดิกในแง่ของเทคโนโลยี ยังเป็นการสร้างอุปกรณ์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์ Lap-on-a-chip เป็นต้น วัตถุประสงค์ในการใช้ระบบไมโครฟลูอิดิก คือ สามารถตรวจจับโมเลกุลทางชีววิทยา การส่งผ่านผสม และคัดแยก เป็นต้น

2.2.1 สมบัติของของไหล

1. แรงตึงผิว (Surface Tension)

แรงตึงผิวแรงตึงผิว คือ พฤติกรรมของหยดของเหลวที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของหยดของเหลวนั้นถูกดึงดูดด้วยโมเลกุลใกล้เคียงเพื่อให้หยดของเหลวนั้นอยู่ได้อย่างสมดุล



ภาพที่ 2.5 แสดงหยดของเหลวที่ภาวะสมดุลเมื่อถูกดึงดูดด้วยโมเลกุลใกล้เคียง¹⁰

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

เลขเรย์โนลด์ เป็นตัวเลขที่ใช้แสดงพฤติกรรมการไหลของของไหล¹¹ จำนวนเลขเรย์โนลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

เมื่อ $Re =$ จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

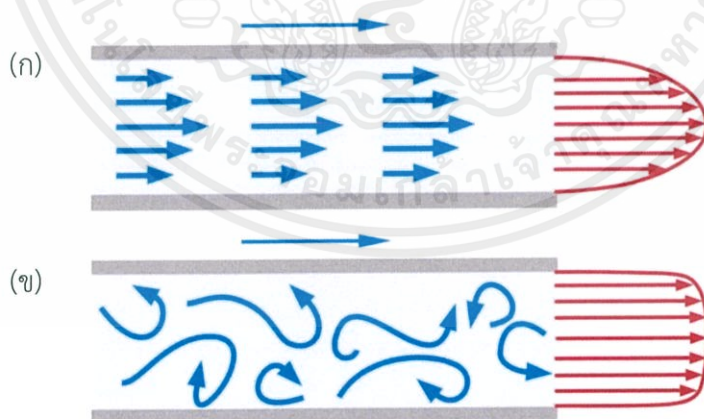
$V =$ ความเร็วการไหล (m/s)

$D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

$\rho =$ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

$\mu =$ ความหนืดของของไหล (kg/m s)

เลขเรย์โนลด์ เป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย สามารถใช้ในการบ่งชี้รูปแบบการไหลของของไหลได้คือ เลขเรย์โนลด์ที่อยู่ในช่วง 0 – 2000 จะมีสภาพการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ช่วง 2001 - 4000 สภาพการไหลเป็นแบบผสม (Transition Zone) คือ มีการไหล 2 แบบทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในขณะที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 4000 จะมีสภาพการไหลเป็นแบบปั่นป่วน



ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะการไหล คือ (ก) การไหลแบบราบเรียบและ (ข) แบบปั่นป่วน¹²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลขคาปิลลารี (Capillary Number)

เลขคาปิลลารี คือ เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงตึงผิว (Surface-tension forces) กับแรงหนืด (Viscous forces) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ca = \frac{\mu V}{\sigma} \quad (2.2)$$

เมื่อ μ = ความหนืด (kg/m s)

V = ความเร็วการไหล (m/s)

σ = แรงตึงผิว

2.2.2 วิธีการสร้างระบบไมโครฟลูอิดิก

อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกถูกสร้างขึ้นจากวัสดุฐานรองเช่น ซิลิกอน และแก้ว ด้วยวิธีการสร้างลายวงจรด้วยแสง (Photolithography) และแกะสลัก (Etching) ซึ่งดัดแปลงมาจากอุตสาหกรรมการออกแบบวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microelectronic industry) แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตมีค่าใช้จ่ายสูงและไม่ยืดหยุ่นจึงทำให้ปัจจุบันมีการศึกษาการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกในรูปแบบของพอลิเมอร์แทน เนื่องจากมีข้อดีคือมีความเป็นพิษต่ำ ใช้เวลาในการผลิตไม่มาก มีคุณสมบัติ Biocompatibility รวมทั้งมีราคาถูกทำให้สามารถใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งได้ เทคโนโลยีซอฟลิโทกราฟี (Soft lithography) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพิมพ์แบบ (Printing) และหล่อแบบ (Molding) จากแม่แบบต่างๆ โดยที่แม่แบบสามารถสร้างได้จากเทคนิคต่างๆ นอกเหนือจากเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี เช่น Electron beam lithography, X-ray lithography หรือ Ion beam lithography เป็นต้น

1. องค์ประกอบของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- หน้ากากกันแสง (Photomask) มี 2 ประเภทแบ่งตามวัสดุที่ใช้สร้าง ชนิดแรกคือแบบพลาสติก มีลักษณะเป็นฟิล์มบางโปร่งแสงประกอบไปด้วยสวดลายหรือบริเวณที่ทึบแสงอีกชนิดคือแบบแก้วควอทซ์ (Quartz glass) ประกอบไปด้วยสวดลายที่โปร่งแสงและพื้นที่ทึบแสงที่เคลือบด้วยฟิล์มบางโครเมียม โดยรูปแบบของสวดลายจะสามารถออกแบบเป็นรูปทรงเรขาคณิตด้วยโปรแกรมออกแบบสวดลายวงจร¹³

- แหล่งกำเนิดแสง (Light source) โดยทั่วไปจะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่อยู่ในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) เป็นแบบหลอดอาร์กปรอท (Mercury arc lamp) ด้านในบรรจุแก๊สเฉื่อยและ ไอปรอท โดยมีสเปกตรัมที่ใช้งานคือ g-line (435.8 nm), h-line (404.7 nm) และ i-line (365.0 nm) ในการใช้งานจะเริ่มจากการวัดกำลังของแหล่งกำเนิดแสงเพื่อคำนวณเวลาในการฉายแสงที่จะให้ได้ค่าพลังงานที่เหมาะสมในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- น้ำยาไวแสง (Photoresist) เป็นสารเคมีที่ไวต่อแสงเฉพาะความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง โดยมีส่วนประกอบหลักคือ เรซิน (Resin) ตัวทำละลาย (Solvent) สารไวแสง (Sensitizers) และสารเติมแต่ง (Additives) น้ำยาไวแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist) ส่วนที่ถูกฉายแสงจะละลายไปกับน้ำยาล้างลาย (Developer) ในขณะที่ส่วนที่ไม่โดนแสงจะไม่ละลายไปกับน้ำยาล้างลายและคงเหลือเป็นลวดลายอยู่บนผิวของฐานรองรับ อีกประเภทหนึ่งคือ น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photoresist) จะกลับกันคือ ส่วนที่ถูกฉายแสงจะเกิดการแข็งตัวและส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและถูกชะล้างออกไป

2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นการถ่ายแบบลวดลายจากหน้ากากกันแสงหรือกระจกต้นแบบลงบนฐานรองรับ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

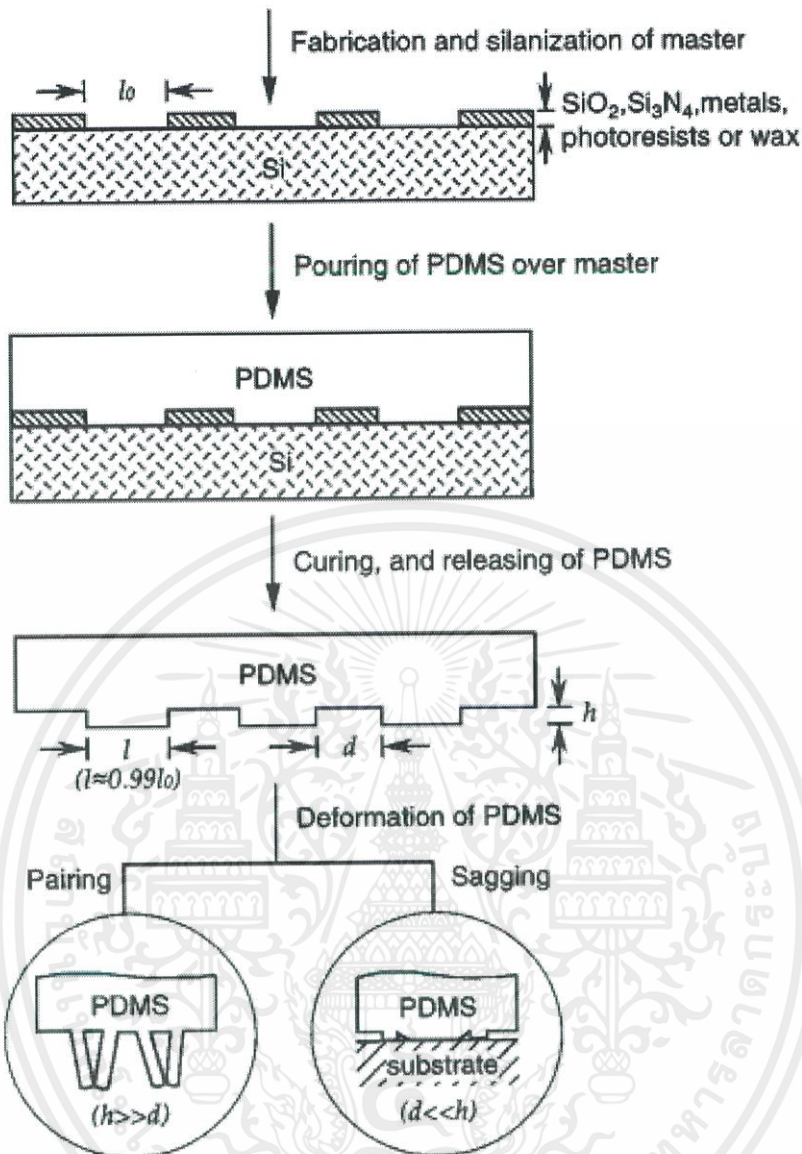
- การเตรียมฟิล์มไวแสง เริ่มจากนำแผ่นฐานรองรับไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 200°C จากนั้นจึงอบ HMDS (Hexamethyldisiloxane) ซึ่งจะช่วยให้พื้นผิวมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) สุดท้ายนำไปเคลือบน้ำยาไวแสงโดยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) เพื่อให้ได้ฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงบนแผ่นฐานรองรับ

- การฉายแสง (Exposure) ด้วยแหล่งกำเนิดแสง มีหลักการคือ จัดวางชิ้นงานให้ด้านฟิล์มไวแสงหันหาหน้ากากกันแสงด้านที่มีลวดลาย จากนั้นจึงคำนวณปริมาณพลังงาน (Dose, mJ/cm^2) ซึ่งจะขึ้นกับความหนาและชนิดของฟิล์มไวแสง คือ ฟิล์มไวแสงชนิดบวก เมื่อถูกแสงจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemistry) โครงสร้างทางเคมีของสารไวแสงจะเปลี่ยนไป ทำให้เรซินบริเวณที่โดนแสงละลายออกไปเมื่อทำการล้างด้วยน้ำยาล้างลาย (Developer) ส่วนฟิล์มไวแสงชนิดลบ เมื่อถูกแสงจะทำให้สารไวแสงเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล (Cross-link) และเรซินบริเวณที่ไม่โดนแสงจะละลายออกไปเมื่อทำการล้างลวดลาย

3. กระบวนการพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์แบบอ่อน (Soft Lithography)

การพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์แบบอ่อน เป็นการพิมพ์และหล่อรูปแบบของลวดลายจากแม่พิมพ์ต้นแบบไปยังฐานรองรับ โดยส่วนมากนิยมใช้ซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) เป็นวัสดุในการหล่อแบบและลอกลายเนื่องจากมีสมบัติคือ สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่าย มีความยืดหยุ่นสูง (Young's Modulus = 1 MPa) และมีความโปร่งใส ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้

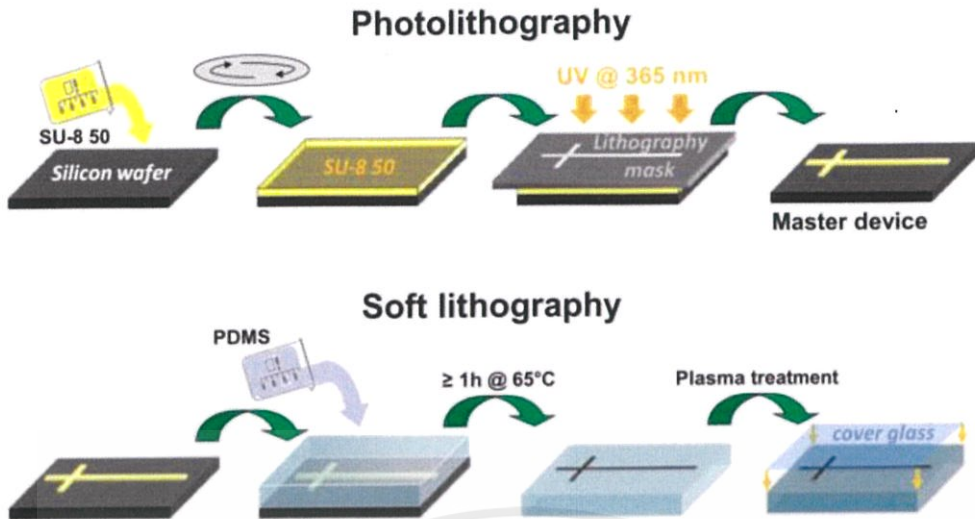
- การสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบ (Master mold) สามารถทำได้ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยส่วนใหญ่แม่พิมพ์จะถูกสร้างโดยน้ำยาไวแสงชนิดลบ ในการออกแบบแม่พิมพ์ต้นแบบ ควรคำนึงถึงอัตราส่วนความสัมพันธ์ของความกว้าง และความลึกของแม่พิมพ์ โดยจะต้องมีค่าไม่เกิน 10 ($0.1 \leq h/d \leq 10$) เพื่อป้องกันความบกพร่องในการพิมพ์ลวดลายวงจร



ภาพที่ 2.7 แสดงผลของอัตราส่วนความกว้างและความลึกของแม่พิมพ์อันทำให้เกิดความบกพร่องในการพิมพ์ลวดลาย¹⁴

- การสร้างแม่พิมพ์แบบอ่อนจากแม่พิมพ์ต้นแบบ คือการหล่อแม่พิมพ์ต้นแบบด้วยพอลิเมอร์ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) ซึ่งจะถูกเทลงบนแม่พิมพ์ต้นแบบ และนำไปให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการแข็งตัว จากนั้นจึงลอกออกจากแม่พิมพ์กลายเป็นแม่พิมพ์แบบอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

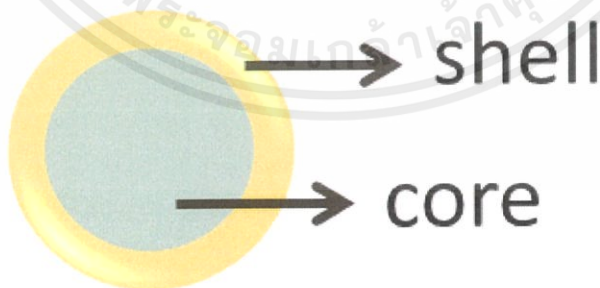


ภาพที่ 2.8 แสดงขั้นตอนการพิมพ์ลวดลายด้วยแม่พิมพ์แบบอ่อน¹⁵

2.3 หยดอนุภาค (Microdroplet)

2.3.1 การเกิดหยดอนุภาคจากระบบไมโครฟลูอิดิกแบบ T-junction¹⁶

หยดอนุภาค (Microdroplet) คือ หยดของเหลวขนาดเล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยของเหลวต่างชนิดกัน ซึ่งของเหลวทั้งสองชนิดนั้นไม่สามารถผสมเข้ากันได้ เช่น หยดของน้ำในน้ำมัน (Water in oil; W/O) หรือหยดของน้ำมันในน้ำ (Oil in water; O/W) เป็นต้น หยดอนุภาคจะประกอบด้วยสารสำคัญที่ต้องการกักเก็บหรือคอร์ซึ่งอยู่บริเวณด้านในและสารที่ห่อหุ้มอยู่บริเวณด้านนอก เรียกว่า เยื่อหุ้ม (Membrane) หรือเชลล์ (Shell)

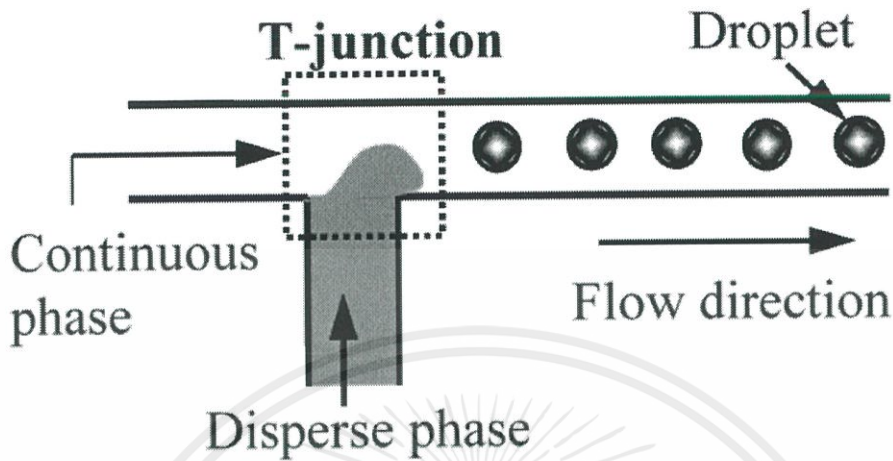


ภาพที่ 2.9 แสดงรูปแบบของหยดอนุภาคประกอบด้วยส่วนที่ถูกห่อหุ้มและวัสดุที่ห่อหุ้ม

การสร้างหยดอนุภาคด้วยไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีลักษณะของช่องทางการไหลแบบรูปตัวที (T) เริ่มต้นจากการกำหนดให้สารที่เป็นตัวห่อหุ้มหรือเชลล์นั้นเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยให้สารผ่านช่องทางไหลหลัก (Main channel) และกำหนดสารสำคัญที่ต้องการห่อหุ้มหรือคอร์เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ที่ให้ไหลผ่านช่องทางไหลรองดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แสดงการเกิดหยดอนุภาคจากโครงสร้างแบบ T-junction¹⁷

อัตราส่วนของอัตราการไหล (Flow rate ratio; Q) เป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการเกิดหยดอนุภาค อัตราส่วนของอัตราการไหลที่เหมาะสมจะทำให้ของเหลวที่ไหลมาสัมผัสกันเกิดแรงเฉือนขึ้น ทำให้เกิดการก่อตัวของหยดอนุภาคและไหลไปตามท่อ รวมไปถึงบ่งบอกถึงพฤติกรรมของการเกิดหยด อัตราส่วนของอัตราการไหลมีความสัมพันธ์ดังนี้

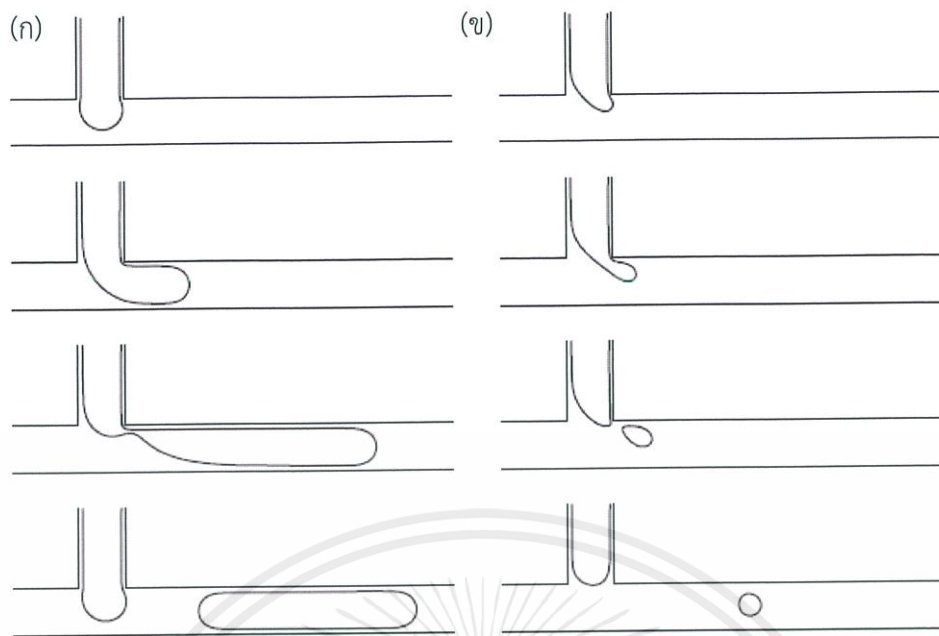
$$Q = Q_d / Q_c \quad (2.3)$$

Q_d = อัตราการไหลของเฟสกระจาย (Dispersed phase)

Q_c = อัตราการไหลของเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase)

เมื่ออัตราส่วนของอัตราการไหลมาก แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย ทำให้หยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ เกิดเป็นหยดอนุภาคแบบสควิชซึ่งดังภาพที่ 2.11(ก) ในขณะเดียวกันที่อัตราส่วนของอัตราการไหลน้อยลง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดหยดอนุภาคแบบหยดที่มีขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2.11(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

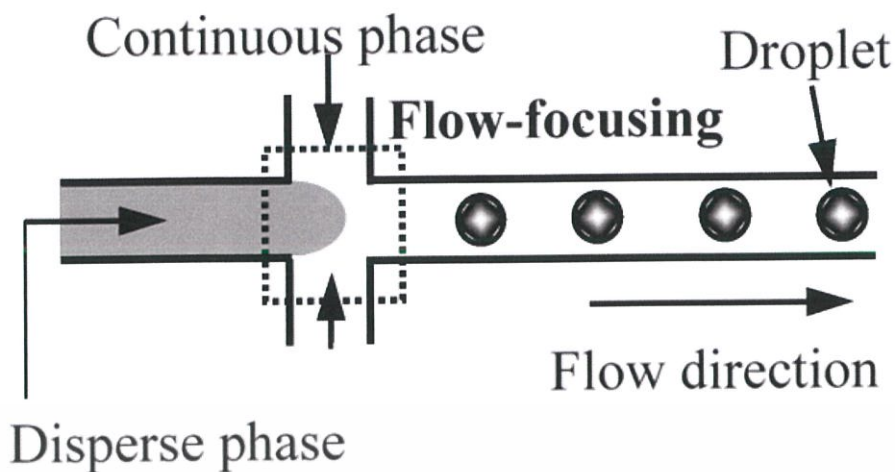


ภาพที่ 2.11 แสดงการไหลของของเหลวในโครงสร้างรูปแบบ T-junction คือ
(ก) แบบสควิชซิ่ง(Squeezing) และ (ข) แบบหยด (Dripping)¹⁰

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลในการเกิดหยดอนุภาคนั้นยังรวมถึงแรงตึงผิว ลักษณะของช่องทางการไหล สมบัติของของไหล ความหนืดของสาร และสมบัติความชอบน้ำของพื้นผิวช่องทางการไหลภายในที่สัมผัสกับสารนั้นซึ่งจะมีผลต่อชนิดของหยดอนุภาคที่จะทำการสร้าง ยกตัวอย่างเช่น หยดอนุภาคแบบของน้ำมันในน้ำ ผิวของช่องทางไหลควรมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophillic) และหยดอนุภาคแบบของน้ำในน้ำมัน ผิวของช่องทางไหลควรมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นต้น เพื่อป้องกันภาวะที่ไม่เหมาะสมในการเกิดหยดอนุภาค

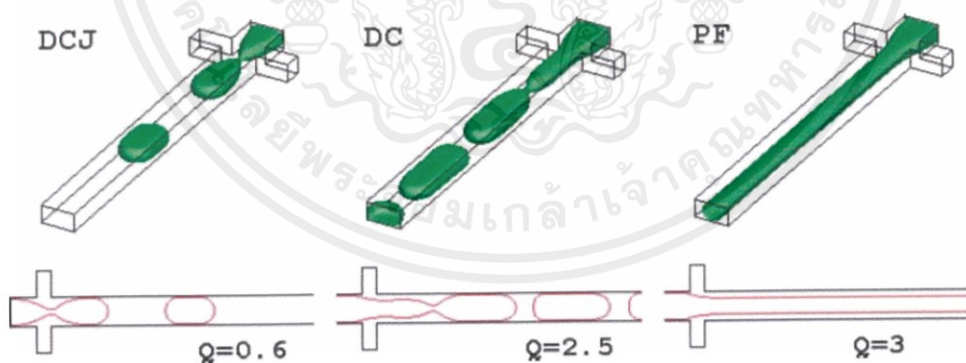
2.3.2 การเกิดหยดอนุภาคจากระบบไมโครฟลูอิดิกรูปแบบทางแยกตัดขวาง (Cross-junction)¹⁰

การสร้างหยดอนุภาคด้วยไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีลักษณะของช่องทางการไหลแบบตัดขวางกัน เริ่มต้นจากการกำหนดให้สารที่ต้องการกักเก็บหรือคอร์ไหลผ่านช่องทางไหลหลัก (Main channel) และกำหนดสารที่ทำการห่อหุ้มหรือเชลล์เป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยให้ไหลผ่านช่องทางไหลรองดัง ภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงการเกิดหยดอนุภาคจากโครงสร้างแบบ Cross-junction¹⁷

ปัจจัยที่ทำให้เกิดหยดอนุภาคในช่องทางการไหลแบบทางแยกตัดขวางนี้จะเหมือนกับแบบตัวที ซึ่งรูปแบบของการไหลในช่องทางการไหลแบบทางแยกตัดขวางจะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การเกิดหยดที่บริเวณทางแยก (Droplets are formed at the cross-junction; DCJ) การเกิดหยดที่ปลายสายของไหล (Downstream of the cross-junction; DC) และการไหลแบบขนานไปเป็นสายซึ่งไม่เกิดหยด (Parallel flows) ดังภาพที่ 2.13



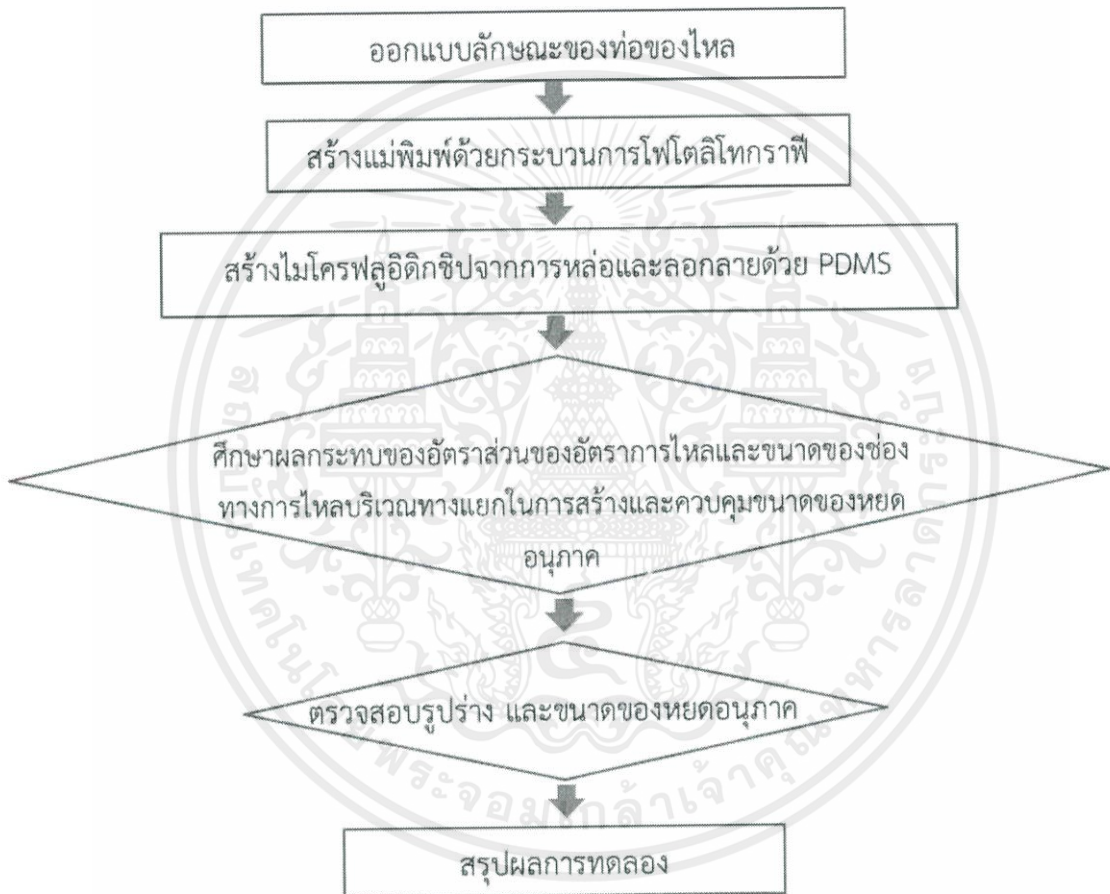
ภาพที่ 2.13 แสดงรูปแบบการไหลของของไหลในช่องทางการไหลแบบทางแยกตัดขวาง¹⁰

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงขั้นตอนในการสร้างหยดอนุภาคโดยเริ่มต้นจากการเตรียมแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการสร้างไมโครฟลูอิดิกชิป จากนั้นจึงนำชิปที่ได้ไปทำการสร้างหยดอนุภาคที่เงื่อนไขต่างๆ



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. หลอดฉีดยา (Syringe) ขนาด 1 มิลลิลิตร ของบริษัท Nipro
2. ปั๊มเข็มฉีดยา (Syringe Pump) รุ่น NE-1000 และ NE-300 ของบริษัท New Era Pump

system เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

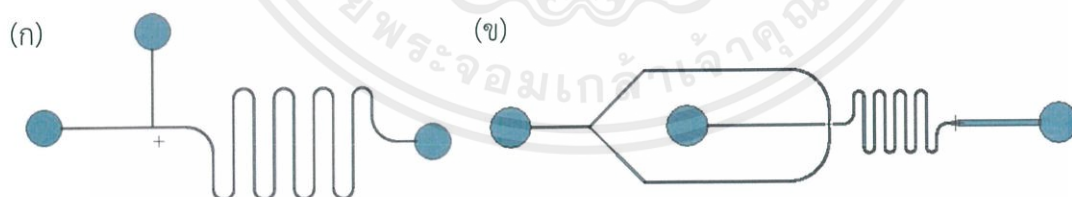
3. ตัวกรองสำหรับหลอดฉีดยา (Nylon Syringe Filters) ขนาด 0.22 ไมครอน ของบริษัท ANPEL Laboratory Technologies (Shanghai)

4. ท่อซิลิโคน (Silicone tube)
5. Vacuum chamber
6. เครื่องซั่งสาร
7. เตาดอบ
8. เครื่องทำความสะอาดแบบพลาสมา (Plasma Cleaner)
9. ที่เจาะรู
10. เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer)
11. กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS)
2. Curing agent
3. น้ำมันแร่ (Mineral oil)
4. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิด SPAN 80
5. สีส้มอาหาร
6. น้ำไร้ประจุ (DI water)
7. พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ขนาด 5 ไมครอน ของบริษัท Duke Scientific

3.2 การออกแบบหน้ากากกันแสง (Photomask)



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของช่องทางการไหลแบบ (ก) T-junction และ (ข) Cross junction

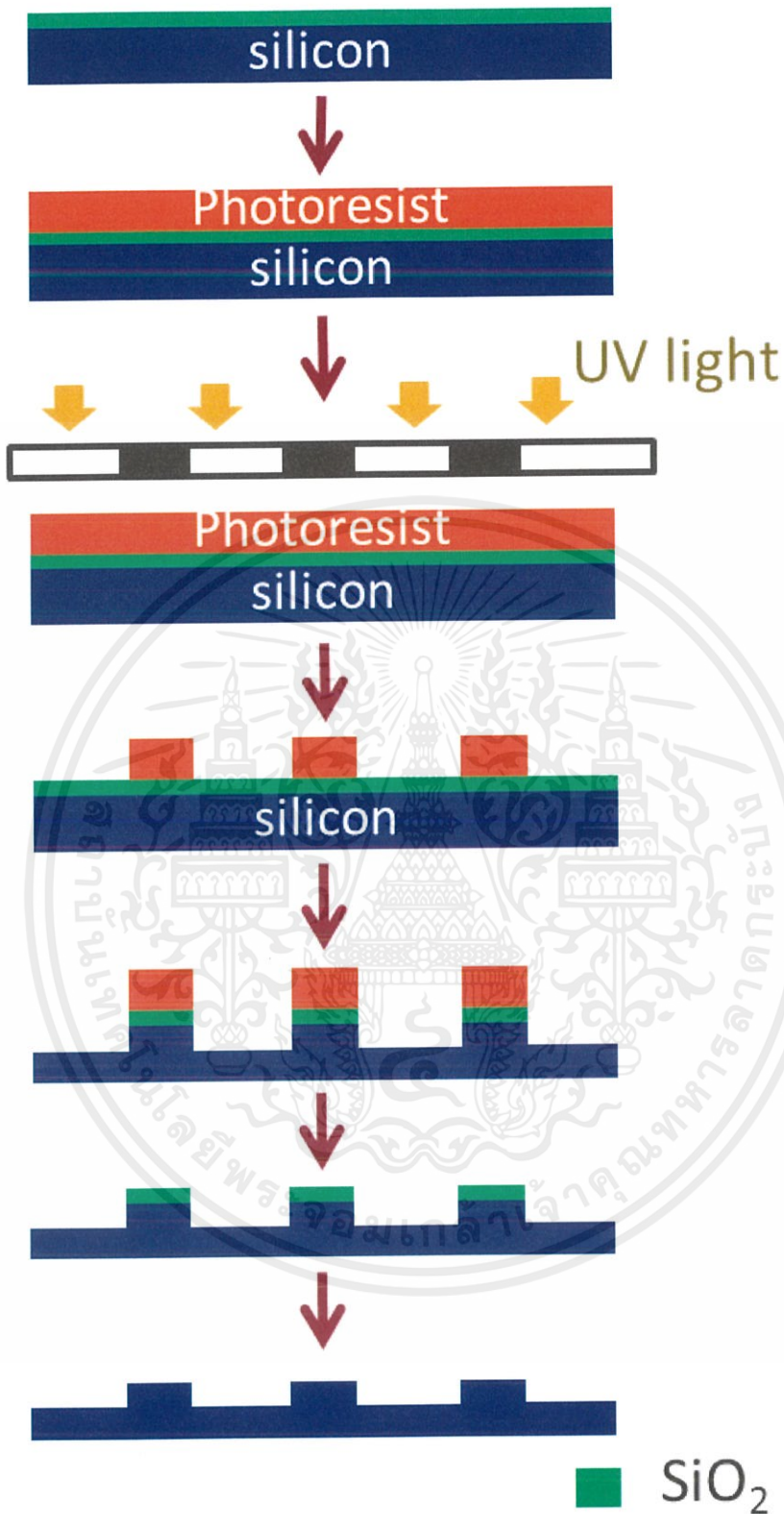
ออกแบบหน้ากากกันแสงด้วยโปรแกรม L-Edit โดยทั่วไปการหล่อหุ้มอนุภาคจำเป็นต้องมีโครงสร้างที่ทำให้เกิดแรงเฉือนได้ดี ซึ่งถือเป็นหนึ่งในสมบัติที่จะทำให้เกิดอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดสม่ำเสมอ จึงทำการวาดรูปแบบของช่องทางการไหลเป็นแบบ T-junction และ Cross junction ดังภาพที่ 3.2 โดยที่ช่องทางการไหลหลัก (Main channel) มีขนาดเป็น 100 ไมครอน และเนื่องจาก

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของขนาดทางแยกต่อการเกิดหยดอนุภาคจึงทำการออกแบบบริเวณทางแยกของรูปแบบ Cross junction ให้มีขนาดเป็น 30 50 และ 70 ไมครอน

3.3 การสร้างแม่พิมพ์ซิลิกอน

1. จัดวางหน้ากากกันแสงติดกับแผ่นกระจกด้วยแคปตอนเทปให้ตึง
2. ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเพื่อกำจัดคราบฝุ่นและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นจึงทำการสร้างฟิล์มฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์
3. เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spin coater) ความหนา 2 ไมโครเมตร
4. อบเพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นรอให้ชั้นงานอุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิห้อง
5. ทำการฉายแสง (ความยาวคลื่น 365 nm) ลงบนแผ่นซิลิกอนที่เคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง
6. ล้างน้ำยาไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างลาย (Developer) ตามด้วยน้ำปอดประจุ (DI water)
7. ทำการอบ (Hard bake) เพื่อให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแข็งแรงก่อนจะนำไปทำการกัด
8. ตรวจสอบความสมบูรณ์และขนาดของท่อของไหลด้วยกล้องจุลทรรศน์
9. กัดฟิล์มออกไซด์บริเวณที่ไม่มีน้ำยาไวแสงออกด้วยกระบวนการกัดขั้นรอยด้วยไอออนแบบรีแอคทีฟ (Reactive Ion Etching; RIE) จากนั้นจึงเริ่มทำการกัดแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างลวดลายด้วยเครื่อง Deep Reactive Ion Etching; DRIE
10. ทำการล้างน้ำยาไวแสงออกจากชิ้นงานด้วย Piranha เป็นเวลา 15 นาที โดยที่ Piranha มีส่วนประกอบของ H_2SO_4 และ H_2O_2 เป็นปริมาตร 6800 มิลลิลิตรและ 1700 มิลลิลิตรตามลำดับ (อัตราส่วน 4 ต่อ 1) และทำการล้างด้วยน้ำปอดประจุโดยให้น้ำผ่านชิ้นงานเป็นเวลา 10 นาที
11. ทำการล้างออกไซด์ออกจากแผ่นซิลิกอนด้วย BOE ซึ่งประกอบไปด้วย HF 49% และ NH_4F เป็นปริมาตร 620 มิลลิลิตร และ 4340 มิลลิลิตร ตามลำดับ (อัตราส่วน 1 ต่อ 7) โดยที่เวลาที่ใช้ในการล้างออกจนหมดเป็น 22 นาที
12. ตรวจสอบลวดลายบนแม่พิมพ์ซิลิกอนที่ได้และทำการวัดขนาดของช่องทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 แสดงกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ซิลิกอนด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป

ในกระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกชิปมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การหล่อแบบ PDMS

- ชั่ง PDMS ผสมกับ Curing agent ในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นใช้ช้อนคนให้เข้ากัน และนำไปใส่ฟองอากาศออกจนหมด

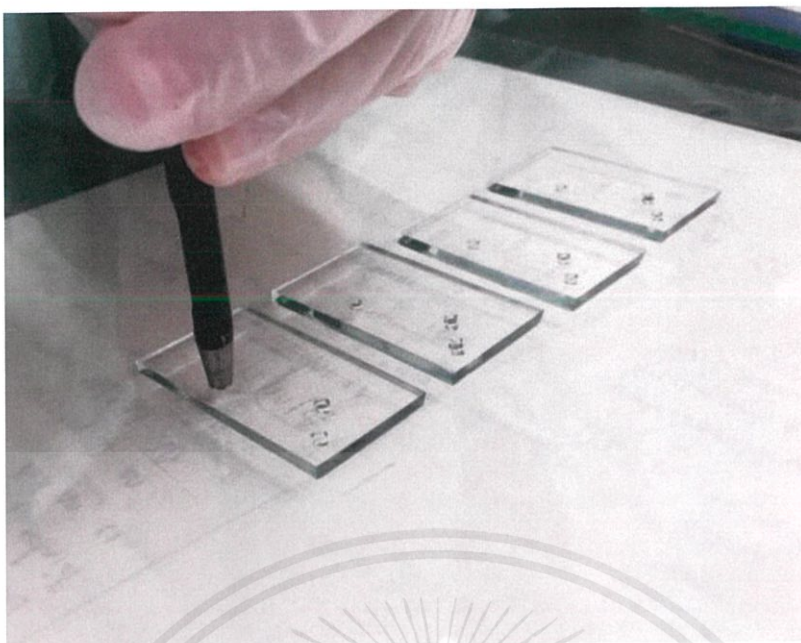
- เท PDMS ลงบนแม่พิมพ์ซิลิกอน และนำไปเข้าเตาอบเพื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.4 แสดงการหล่อสวดลายด้วย PDMS

- ลอกแผ่น PDMS ออกจากแม่พิมพ์ ตัดแบ่งออกเป็นชิ้น และนำไปทำการเจาะรูทางเข้าออกของสาร

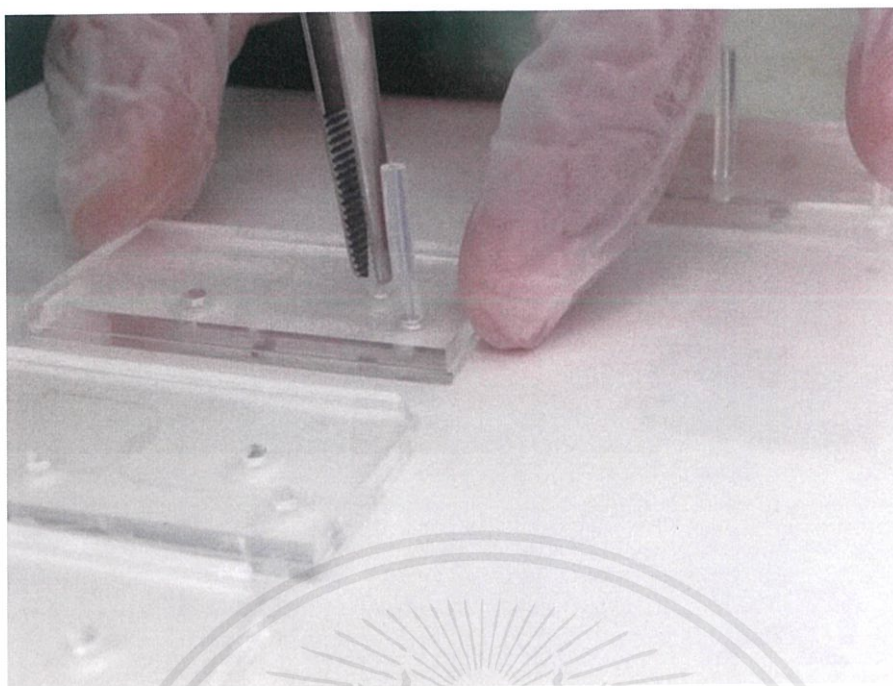
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แสดงการเจาะรูช่องขาเข้าและขาออกของสารบนชิป

3.4.2 การประกบ PDMS โดยใช้กระบวนการออกซิเจนพลาสมา (Oxygen plasma)

- นำแผ่น PDMS แบบผิวเรียบ และแผ่น PDMS ที่มีลวดลายเข้าเครื่องทำความสะอาดแบบพลาสมา (Plasma etching) โดยหงายด้านมีลวดลายขึ้น เวลาที่ใช้ในการพลาสมาด้วยออกซิเจนคือ 30 วินาที
- นำแผ่น PDMS แบบผิวเรียบประกบกับแผ่น PDMS ที่มีลวดลาย จากนั้นใช้คัตเตอร์กรีดบริเวณขอบให้เรียบสม่ำเสมอและนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ตัดท่อซิลิโคน (Silicone tube) ความยาว 2 เซนติเมตร ทำการต่อเข้ากับช่องทางเข้าออกของสารบนชิป นำ PDMS มายาบบริเวณรอบท่อ และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 3.6 แสดงการต่อท่อซิลิโคนเข้ากับช่องทางขาเข้าและขาออกบนชิป

3.4.3 ทำการทดสอบการอุดตันและการรั่วไหลของชิป



ภาพที่ 3.7 แสดงลักษณะของไมโครฟลูอิดิกชิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสร้างหยดอนุภาคด้วยไมโครฟลูอิดิกชิปแบบน้ำในน้ำมัน

ระบบไมโครฟลูอิดิกสามารถสร้างหยดอนุภาคได้ด้วยการให้สารสองชนิดที่ไม่สามารถผสมกันได้ ผ่านไปตามท่อช่องทางไหลทั้งสองทางเพื่อให้สารทั้งสองชนิดไหลไปสัมผัสกันภายใต้แรงดันที่กำหนด ทำให้เกิดเป็นหยดอนุภาคขึ้นบริเวณที่สารไหลมาสัมผัสกัน

3.5.1 การเตรียมสารบรรจุในหลอดฉีดยา

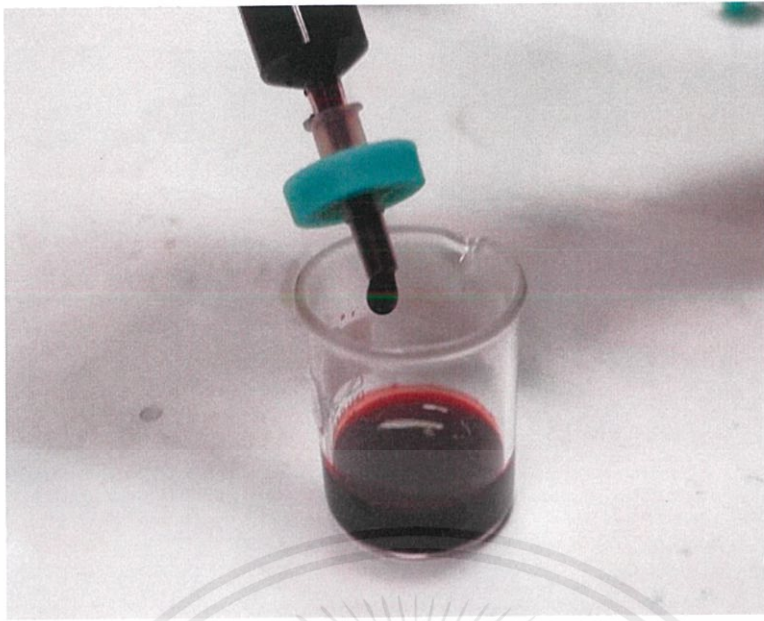
สารที่เป็น Continuous phase เตรียมน้ำมันแร่ (Mineral oil) ปริมาตร 4000 μL ด้วยไมโครปิเปต จากนั้นใส่สารลดแรงตึงผิว SPAN80 ลงไป 2 % โดยน้ำหนักของน้ำมันแร่ จากนั้นนำสารที่เตรียมได้ไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex mixer) และเครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) อย่างละ 5 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 3.8 แสดงการผสมสารให้เข้ากันด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก

- สารที่เป็น Dispersed phase เตรียมน้ำไร่ประจุด้วยผสมเข้ากับสัผสมอาหาร จากนั้นนำไปกรองผ่านตัวกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.22 μm เพื่อป้องกันตะกอนหรือผงอันจะทำให้เกิดการอุดตันในช่องทางไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 แสดงการกรองน้ำสีผ่านตัวกรองที่มีขนาดรูพรุน $0.22 \mu\text{m}$

3.5.2 เตรียมระบบการสร้างหยดอนุภาคโดยไมโครฟลูอิดิก

- ติดตั้งหลอดฉีดยากับปั๊มเข็มฉีดยา ทำการตั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดฉีดยาและกำหนดอัตราการไหลของของเหลวที่จะทำการทดลอง



ภาพที่ 3.10 แสดงการติดตั้งหลอดฉีดยากับปั๊มเข็มฉีดยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต่อท่อซิลิโคนเข้ากับเข็มฉีดยา เพื่อเชื่อมต่อหลอดฉีดยาที่บรรจุสารเข้ากับช่องทางขาเข้าของไมโครฟลูอิดิกชิป โดยต่อหลอดฉีดยาที่บรรจุน้ำมันเข้ากับช่องทางขาเข้าของ Continuous phase และต่อหลอดฉีดยาที่บรรจุน้ำสีเข้ากับช่องทางขาเข้าของ Disperse phase บนชิป
- จัดเตรียมไมโครฟลูอิดิกชิปกับกล้องจุลทรรศน์
- ทำการปล่อยสารผ่านเข้าไปในชิปโดยบีบเข็มฉีดยา

3.5.3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราการไหลเพื่อศึกษาลักษณะของหยดอนุภาคเมื่อมีอัตราส่วนของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป

- ชิปรูปแบบ T-junction กำหนดให้อัตราการไหลของ Disperse phase มีค่าคงที่เป็น 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ Continuous phase เป็น 1, 3, 5, 7 และ 9 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมีค่าเป็น 1, 0.33, 0.20, 0.14 และ 0.11 ตามลำดับ

- ชิปรูปแบบ Cross junction ความกว้างบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน กำหนดอัตราการไหลของ Continuous phase มีค่าคงที่เป็น 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ Disperse phase เป็น 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมีค่าเป็น 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

- ชิปรูปแบบ Cross junction ความกว้างบริเวณทางแยกเป็น 50 ไมครอน กำหนดอัตราการไหลของ Continuous phase มีค่าคงที่เป็น 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ Disperse phase เป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมีค่าเป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ

- ชิปรูปแบบ Cross junction ความกว้างบริเวณทางแยกเป็น 70 ไมครอน กำหนดอัตราการไหลของ Continuous phase มีค่าคงที่เป็น 1 $\mu\text{L}/\text{min}$ และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ Disperse phase เป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2 $\mu\text{L}/\text{min}$ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมีค่าเป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ

3.6 การห่อหุ้มอนุภาคพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ไว้ในหยดอนุภาคแบบน้ำในน้ำมัน (W/O)

ทำการห่อหุ้มอนุภาคพอลิสไตรีนซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำไว้ประจุด้วยน้ำมันแร่ ดังนั้นการเตรียมระบบเพื่อสร้างหยดอนุภาค จะทำการเชื่อมต่อหลอดฉีดยาที่บรรจุน้ำมันเข้ากับช่องทางขาเข้าของ Continuous phase และทำการเชื่อมต่อหลอดฉีดยาที่บรรจุน้ำกับพอลิสไตรีนเข้ากับช่องทางขาเข้าของ Disperse phase บนชิป

3.6.1 การเตรียมสารบรรจุในหลอดฉีดยา

- สารที่เป็น Continuous phase เตรียมน้ำมันแร่ปริมาตร 4000 μL ด้วยไมโครปิเปต จากนั้นใส่สารลดแรงตึงผิว SPAN80 ลงไป 2 % โดยน้ำหนักของน้ำมันแร่ จากนั้นนำสารที่เตรียมได้ไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารและเครื่องล้างอัลตราโซนิคอย่างละ 5 นาที ตามลำดับ

- การเตรียมสารที่เป็น Dispersed phase เตรียมพอลิสไตรีนผสมกับน้ำไร้ประจุที่นำไปกรองผ่านตัวกรองขนาดรูพรุน 0.22 μm แล้ว เป็นอัตราส่วน 1 : 10 สารที่เตรียมได้ไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร

3.7 การตรวจสอบลักษณะและการวัดขนาดของหยดอนุภาค

1. บันทึกภาพจากกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope)
2. วัดขนาดของหยดอนุภาคด้วยโปรแกรม ImageJ

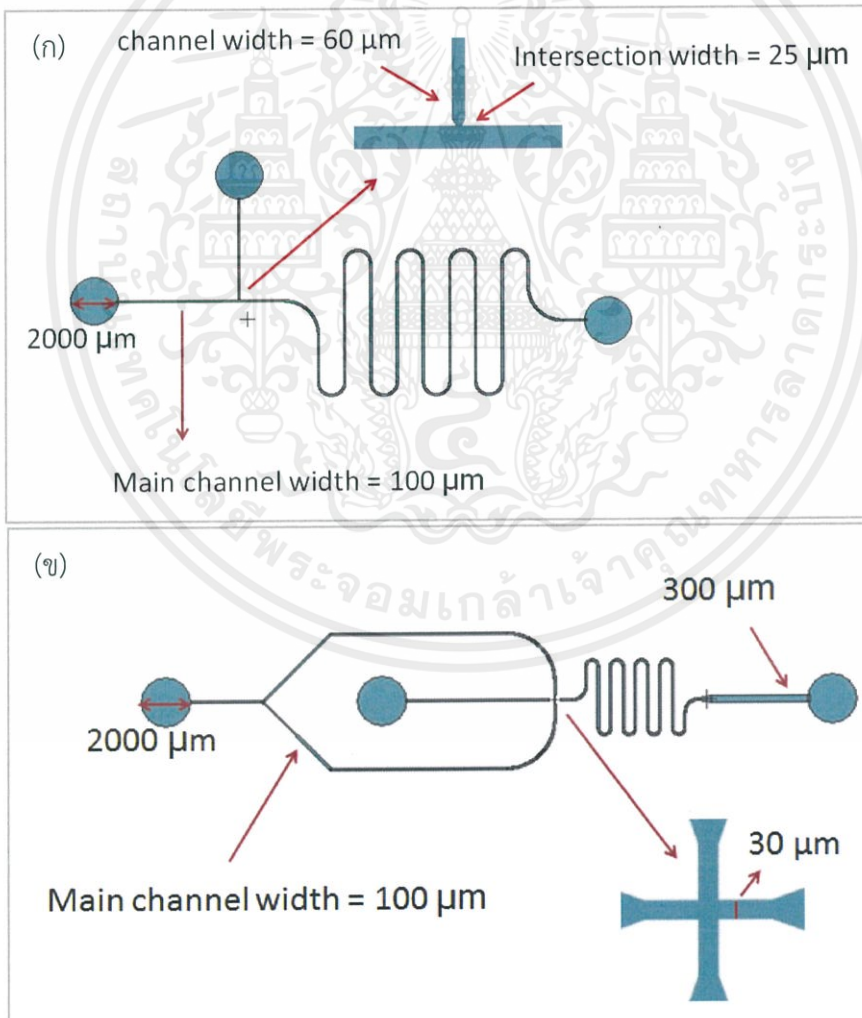


บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

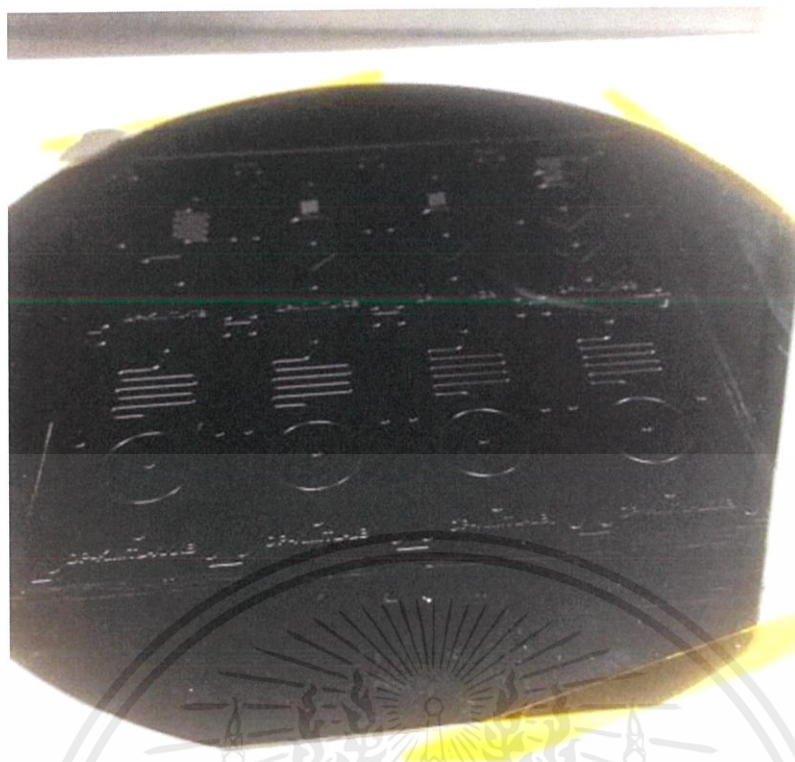
4.1 การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป

สร้างแม่พิมพ์ซิลิกอนด้วยหน้ากากกันแสงที่ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม L-Edit เป็นรูปแบบ T-junction และ Cross junction ซึ่งกำหนดให้มีความกว้างของช่องทางการไหลดังภาพที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) ตามลำดับ โดยเริ่มต้นจากการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิกอนและฉายแสงผ่านหน้ากากกันแสง จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำยาล้างลายจะทำให้ได้แม่พิมพ์ซิลิกอนที่มีลวดลายตามที่ออกแบบไว้ ดังภาพที่ 4.2



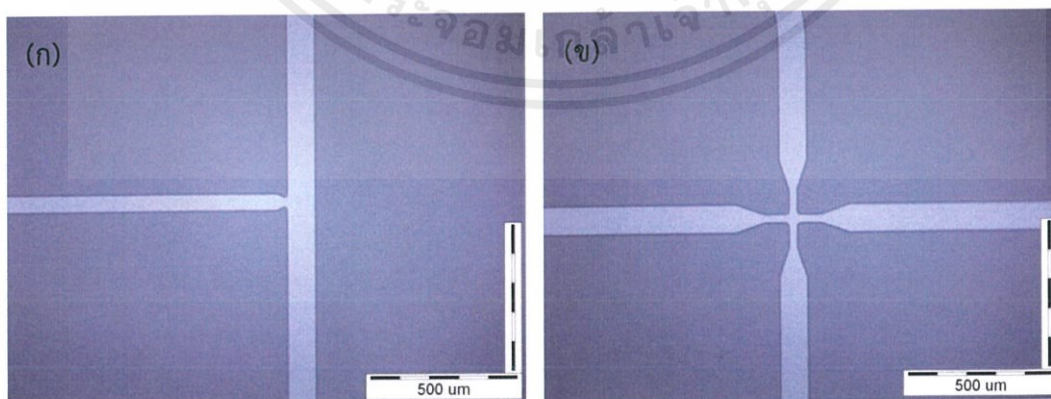
ภาพที่ 4.1 แสดงภาพของช่องทางการไหลที่ออกแบบด้วยโปรแกรม L-Edit

ประกอบไปด้วย 2 รูปแบบคือ (ก) T-junction และ (ข) Cross junction เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แม่พิมพ์ซิลิกอน

สร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิปโดยนำแม่พิมพ์ซิลิกอนที่ได้ไปทำการหล่อ PDMS เพื่อประกบกับฐานรองรับจะได้ไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีลักษณะของช่องทางการไหลดังภาพที่ 4.3 ซึ่งเมื่อทำการวัดขนาดของลวดลายแล้วพบว่า ขนาดของช่องทางการไหลบนแม่พิมพ์และขนาดของช่องทางการไหลบน PDMS มีขนาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.1 หลังจากนั้นจึงทำการต่อท่อซิลิโคนกับช่องทางขาเข้าและขาออกของสารจะทำให้ได้อุปกรณ์ ดังภาพที่ 4.4



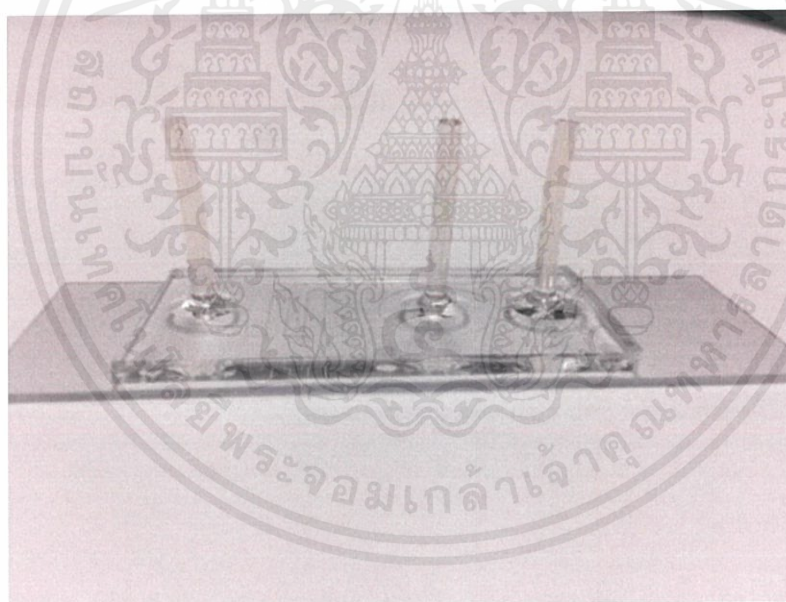
ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงลักษณะของช่องทางการไหล ประกอบไปด้วย

(ก) แบบ T-junction และ (ข) แบบ cross junction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของช่องทางการไหลบนแม่พิมพ์ซิลิกอนและหลังจากทำการหล่อ PDMS

| รูปแบบ | ตำแหน่ง | ขนาดช่องทางการไหล (μm) | | |
|----------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|
| | | ออกแบบด้วยโปรแกรม | บนแม่พิมพ์ซิลิกอน | หลังจากหล่อ PDMS |
| T-junction | Main channel | 100 | 101.45 | 98.60 ± 0.26 |
| | Junction | 25 | 36.23 | 34.25 ± 0.79 |
| | Disperse channel | 60 | 59.78 | 58.05 ± 0.79 |
| Cross junction | Main channel | 100 | 100.41 | 95.79 ± 2.68 |
| | Junction | 30 | 30.67 | 27.85 ± 1.72 |
| | Outlet channel | 300 | 295.68 | 292.75 |



ภาพที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิป

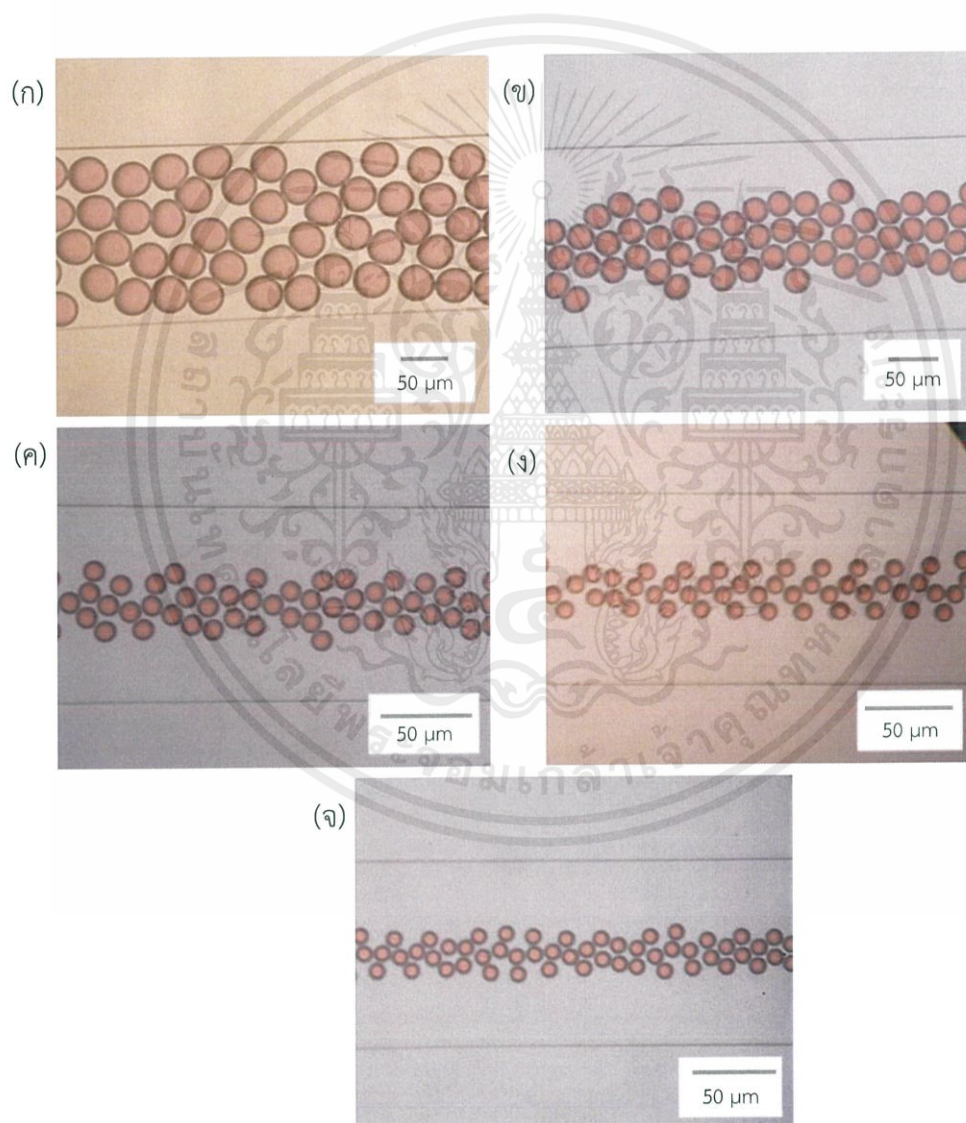
4.2 การตรวจสอบลักษณะและการวัดขนาดของหยดอนุภาคจากอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก

เมื่อทำการปล่อยให้ น้ำมันและน้ำสีไหลเข้าไปในไมโครฟลูอิดิกชิปผ่านช่องทางการไหลขาเข้าของ Continuous phase และ Disperse phase ตามลำดับ อัตราส่วนของอัตราการไหลที่เหมาะสมจะทำให้เกิดหยดอนุภาคขึ้น โดยมีรูปแบบคือน้ำมันเป็นตัวห่อหุ้มน้ำสีไว้ด้านใน ทำการสังเกตและบันทึกรูปภาพผ่านทางกล้องจุลทรรศน์ ได้ผลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

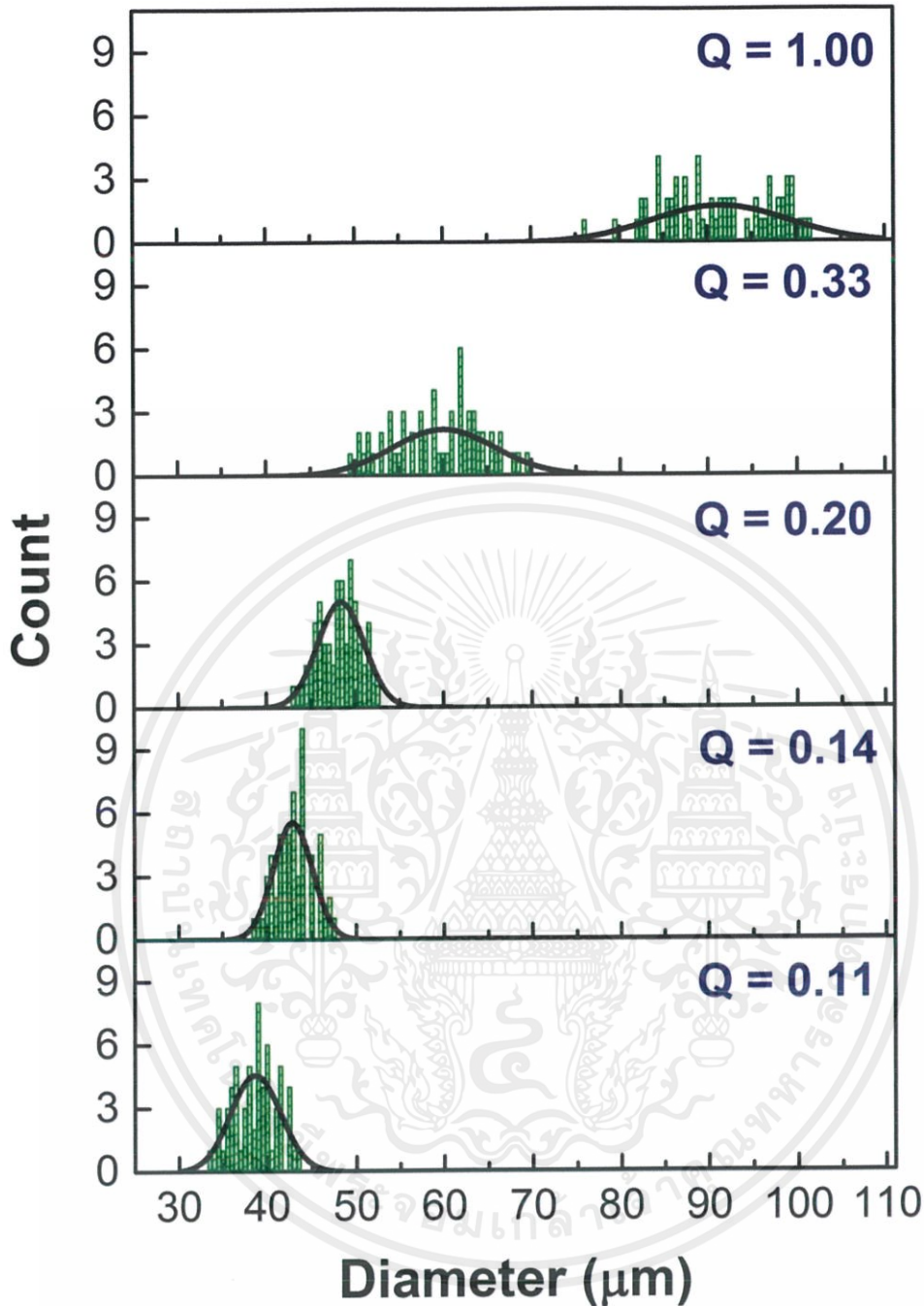
4.2.1 การสร้างหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ T-junction

เมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำสีและน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปเป็น 1, 0.33, 0.20, 0.14 และ 0.11 พบว่าเกิดหยดอนุภาคลักษณะเป็นทรงกลมดังภาพที่ 4.5 ซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวที่แตกต่างกันตามอัตราส่วนการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปดังภาพที่ 4.6 เมื่อทำการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดอนุภาคที่ได้จากอัตราส่วนของอัตราการไหลดังกล่าวพบว่า หยดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 90.981 ± 5.26 , 59.255 ± 4.68 , 47.918 ± 1.08 , 42.750 ± 0.19 และ 38.453 ± 2.31 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลมีผลต่อขนาดของหยดอนุภาค คือเมื่ออัตราการไหลลดลงจะส่งผลให้ขนาดของหยดอนุภาคเล็กลงตามไปด้วย ดังจะเห็นถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากภาพที่ 4.7



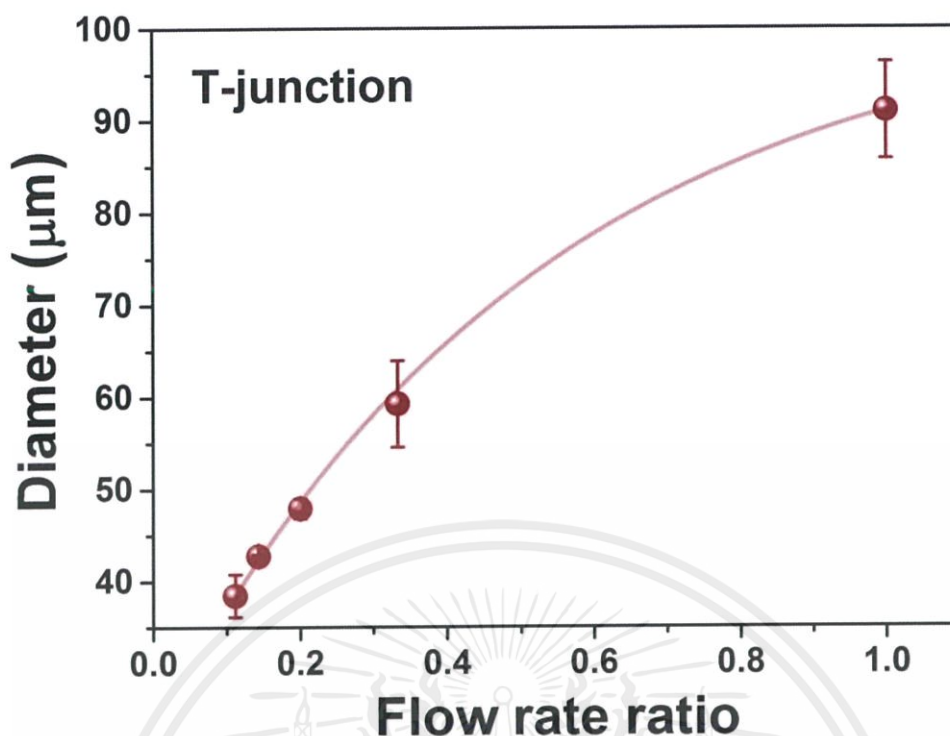
ภาพที่ 4.5 แสดงการเกิดหยดอนุภาคจากชิปรูปแบบ T-junction ที่อัตราส่วน (ก) 1, (ข) 0.33, (ค) 0.20, (ง) 0.14 และ (จ) 0.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลแบบ T-junction เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 1, 0.33, 0.20, 0.14 และ 0.11 (N=90)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหล และขนาดของหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ T-junction

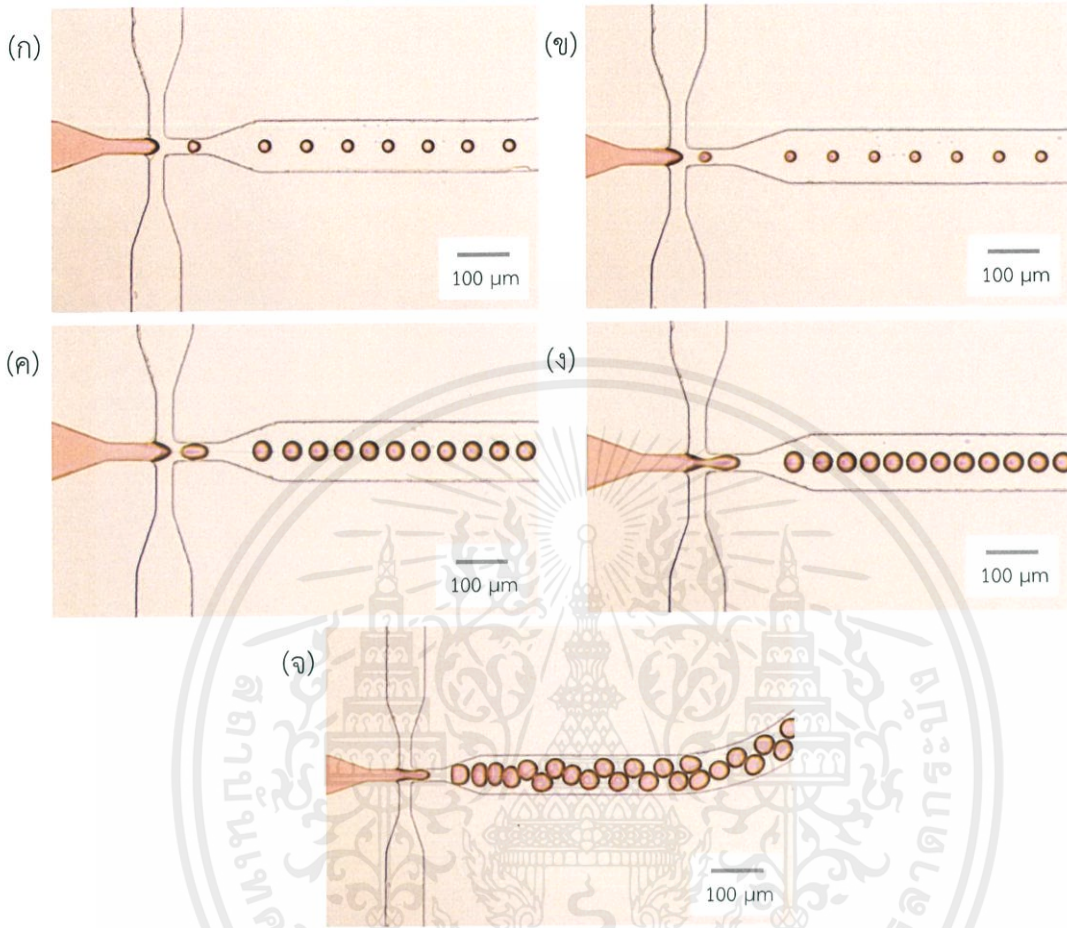
4.2.2 การสร้างหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction

1. ผลของอัตราส่วนของอัตราการไหล (Flow rate ratio; Q) ต่อลักษณะการเกิดหยดอนุภาคบนไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน

ลักษณะการเกิดหยดอนุภาคของไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction ที่มีขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 μm เป็นดังภาพที่ 4.8 คือ เมื่อกำหนดให้น้ำสีและน้ำมันมีอัตราส่วนของอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.25 – 3 $\mu\text{L}/\text{min}$ จะส่งผลให้เกิดหยดอนุภาคขึ้นบริเวณที่น้ำมันและน้ำสีไหลมาสัมผัสกัน โดยขนาดของหยดอนุภาคจะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของอัตราการไหลที่มากขึ้น ในช่วงอัตราส่วนของอัตราการไหลดังกล่าว จะสังเกตเห็นได้ว่า ในช่วงแรก ($Q = 0.25-1$) หยดอนุภาคจะเกิดขึ้นที่บริเวณทางแยกพอดีและมีขนาดสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.8 (ก, ข, ค) จากนั้นเมื่อให้อัตราส่วนของอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นเป็น 2 บริเวณที่เกิดหยดอนุภาคจะเคลื่อนที่ถัดไปจากทางแยก และขนาดของหยดอนุภาคจะเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 4.8 (ง) จนกระทั่งเพิ่มอัตราส่วนของอัตราการไหลให้เป็น 3 หยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจะเริ่มมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.8 (จ) และหากให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมากเกินไปช่วงนี้หยดอนุภาคจะเริ่มไม่เป็นทรงกลม และเกิดเป็นลักษณะของน้ำสีไหลสลับกับน้ำมันเป็นผลเนื่องมาจากอัตราการไหลของน้ำมันที่น้อยกว่าน้ำสีมาก ทำให้ไม่เกิดแรงเฉือนที่จะทำให้เกิดการสร้างหยดอนุภาคขึ้น ในขณะที่เดียวกันหากให้อัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

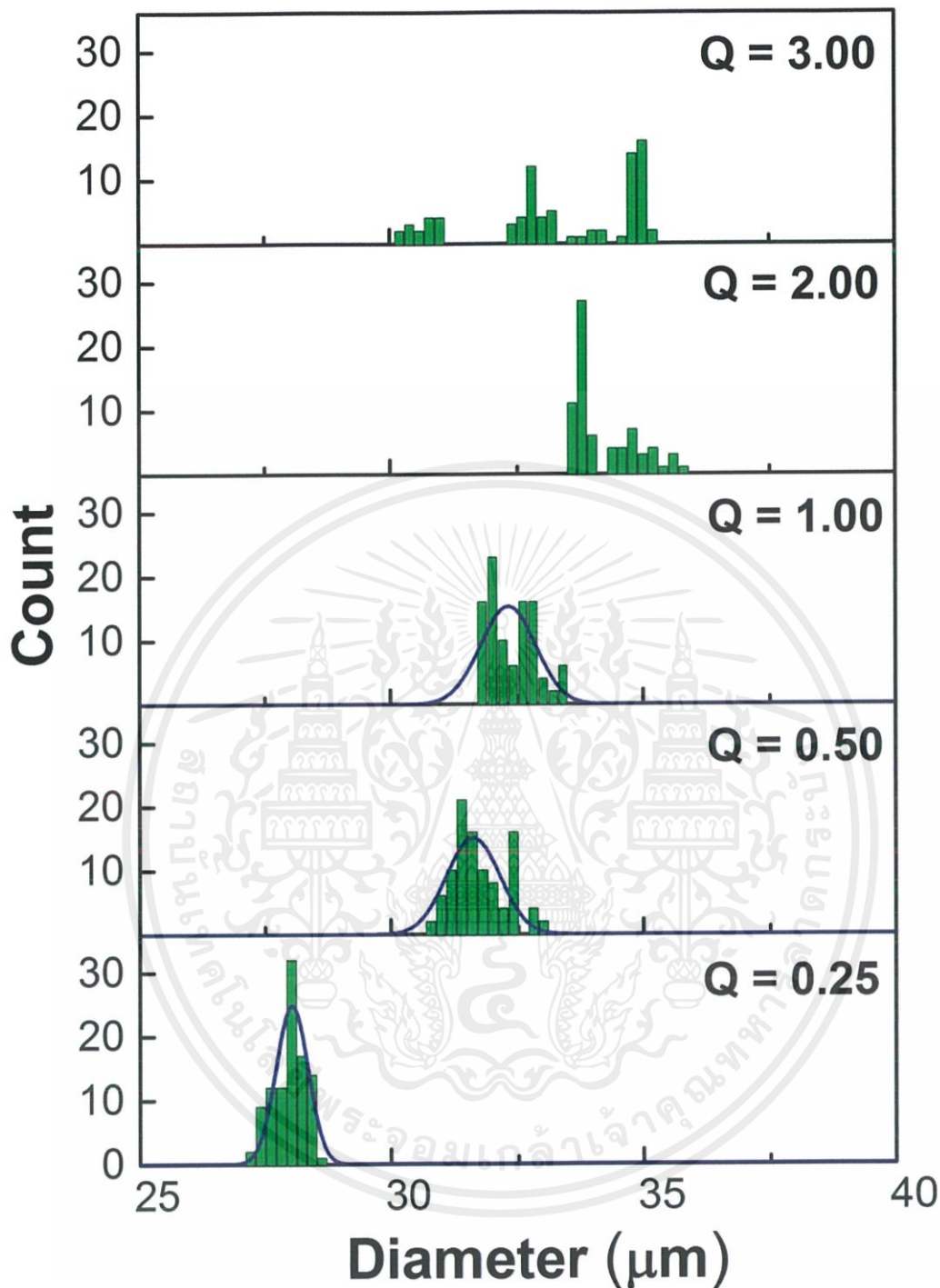
ของอัตราการไหลน้อยกว่า 0.25 น้ำมันซึ่งมีอัตราการไหลมากกว่าจะดันเข้าไปในช่องทางการไหลของน้ำสีซึ่งมีอัตราการไหลที่น้อยกว่าทำให้ไม่เกิดหยดอนุภาคขึ้น



ภาพที่ 4.8 แสดงการเกิดหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหล (Q) ดังต่อไปนี้
(ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1, (ง) 2 และ (จ) 3

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ของหยดอนุภาค สามารถคำนวณได้จากการวัดพื้นที่ของหยดอนุภาคผ่านโปรแกรม ImageJ เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลของน้ำสีและน้ำมันเป็น 0.25, 0.5, 1, 2, และ 3 หยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีความกว้างของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน จะมีขนาดดังนี้ คือ 27.85 ± 0.31 , 31.64 ± 0.51 , 32.29 ± 0.46 , 34.12 ± 0.64 และ 33.08 ± 1.40 ไมครอน ตามลำดับ ดังจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎีคือ อัตราส่วนของอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น หยดอนุภาคที่ได้มีขนาดที่ใกล้เคียงกันและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ อันจะเห็นได้จากค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวนการทดลองซ้ำสามครั้งที่ค่อนข้างต่ำ และสามารถดูการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคได้จากการนำข้อมูลมาพลอตเป็นฮิสโตแกรม (Histogram) ซึ่งจะได้ผลดังภาพที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

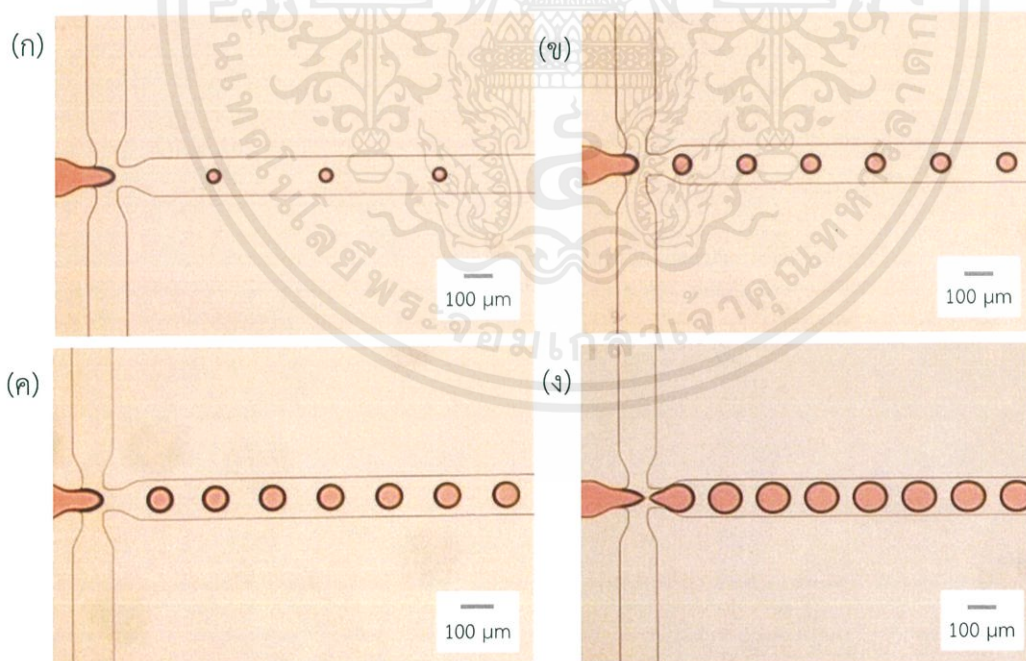


ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 (N=80)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลของอัตราส่วนของอัตราการไหล (Flow rate ratio; Q) ต่อลักษณะการเกิดหยดอนุภาคบนไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 50 ไมครอน

ลักษณะการเกิดหยดอนุภาคของไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction ที่มีขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 50 μm เป็นดังภาพที่ 4.10 คือ เมื่อกำหนดให้น้ำสีและน้ำมันมีอัตราส่วนของอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.25 – 2 $\mu\text{L}/\text{min}$ จะส่งผลให้เกิดหยดอนุภาคขึ้นบริเวณที่น้ำมันและน้ำสีไหลมาสัมผัสกัน โดยขนาดของหยดอนุภาคจะใหญ่ขึ้นตามอัตราส่วนของอัตราการไหลที่เพิ่มมากขึ้น ในช่วงอัตราส่วนของอัตราการไหลดังกล่าว จะสังเกตเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 0.25, 0.5 และ 1 หยดอนุภาคจะเกิดขึ้นที่บริเวณทางแยกและมีขนาดสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.10 (ก, ข, ค) จากนั้นเมื่อให้อัตราส่วนของอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นเป็น 2 บริเวณที่เกิดหยดอนุภาคจะเคลื่อนที่ถัดไปจากทางแยก โดยส่วนมากขนาดของหยดอนุภาคมีความสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอบ้างบางช่วง ดังภาพที่ 4.10 (ง) หากให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมากเกินไปหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เริ่มไม่เป็นทรงกลม และน้ำสีจะมีลักษณะการไหลเป็นสายแบบไม่เกิดหยดอนุภาคในที่สุด เป็นผลเนื่องมาจากอัตราการไหลของน้ำมันที่น้อยกว่าน้ำสีมาก ทำให้ไม่เกิดแรงเฉือนที่จะทำให้เกิดการสร้างหยดอนุภาคขึ้น ในขณะเดียวกันหากให้อัตราส่วนของอัตราการไหลน้อยกว่า 0.25 จะทำให้ไม่เกิดหยดอนุภาคขึ้นเนื่องจากน้ำมันซึ่งมีอัตราการไหลมากกว่าจะดันเข้าไปในช่องทางการไหลของน้ำสีซึ่งมีอัตราการไหลที่น้อยกว่า

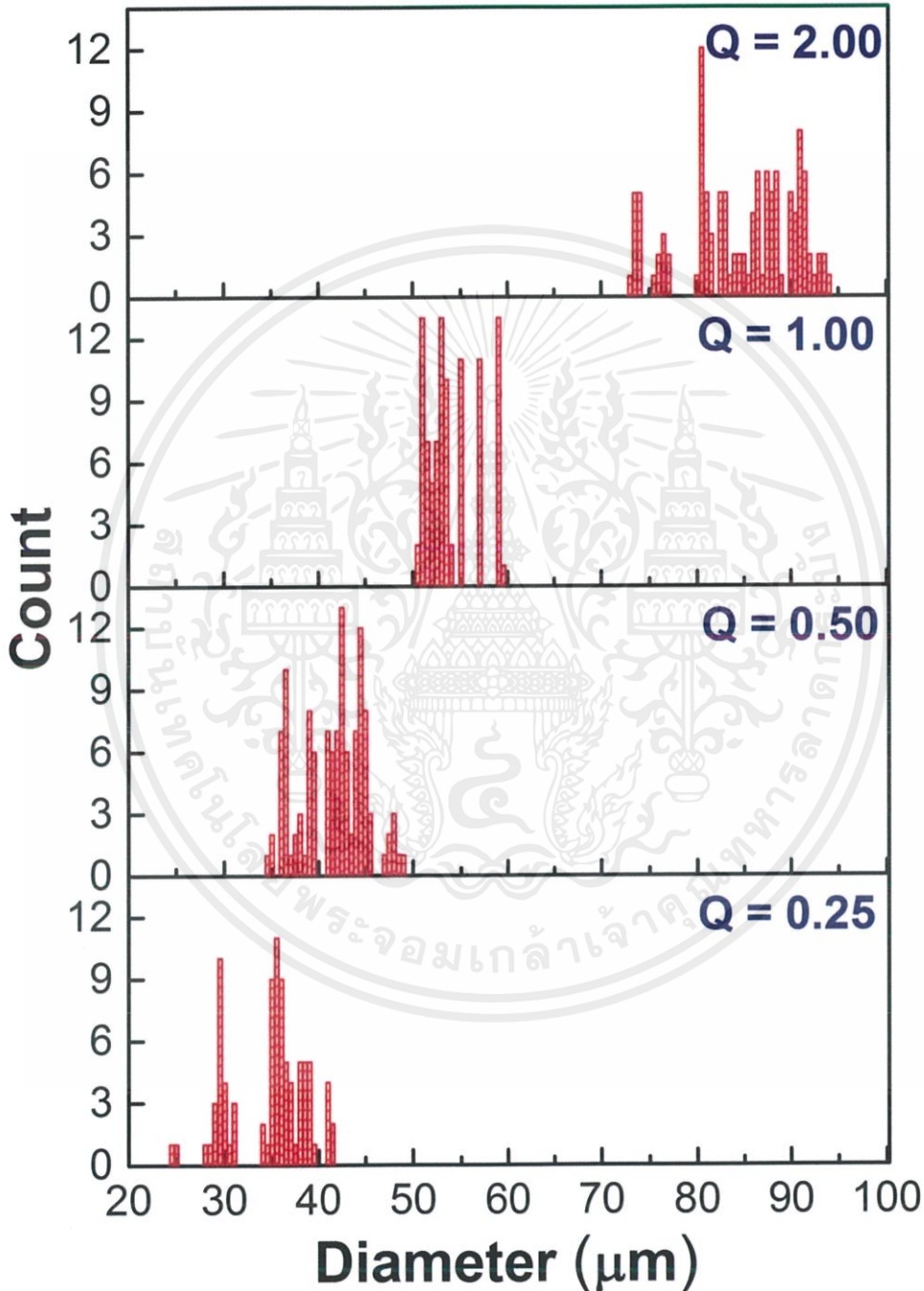


ภาพที่ 4.10 แสดงการเกิดหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหล (Q) ดังต่อไปนี้

(ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1 และ (ง) 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีความกว้างของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 50 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราการส่วนการไหลระหว่างน้ำสีและน้ำมันเป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2 มีขนาดดังนี้ คือ 34.53 ± 3.97 , 41.28 ± 2.10 , 53.89 ± 2.73 และ 85.39 ± 5.78 ไมครอน ตามลำดับ และมีการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคค่อนข้างมากดังภาพที่ 4.11



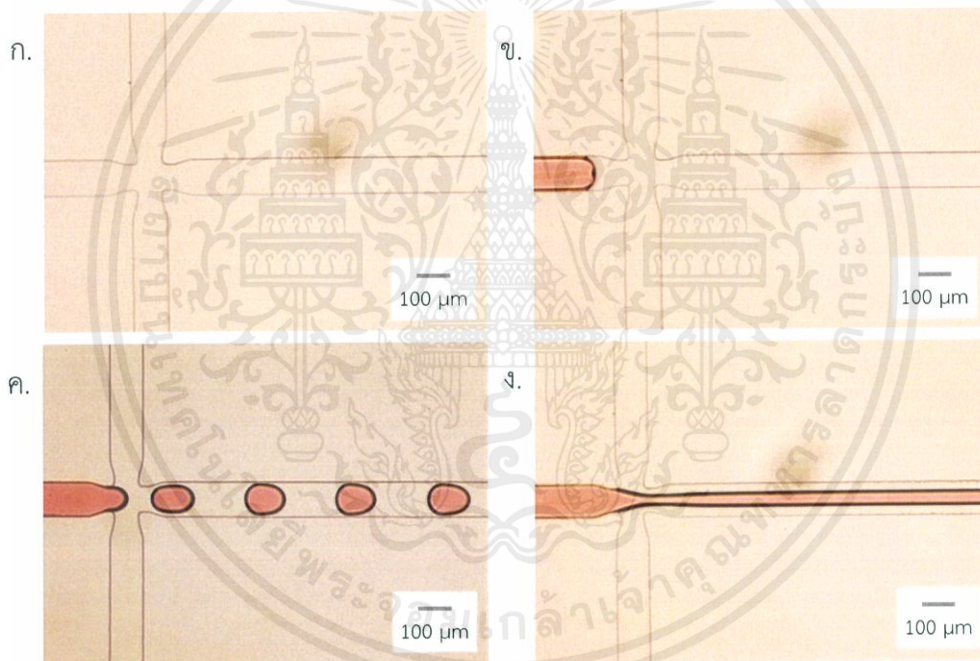
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 50 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนการไหลเป็น 0.25, 0.5, 1 และ 2

(N=100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลของอัตราส่วนของอัตราการไหล (Flow rate ratio; Q) ต่อลักษณะการเกิดหยดอนุภาคบนไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 70 ไมครอน

เมื่อทำการปล่อยให้สารไหลผ่านเข้าไปในไมโครฟลูอิดิกชิปด้วยอัตราส่วนของอัตราการไหลเดิมคือ 0.25 , 0.5 , 1 และ 2 พบว่า ที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 0.25 และ 0.5 น้ำมันจะดันเข้าไปในช่องทางการไหลของน้ำสีทำให้ไม่เกิดการสร้างหยดอนุภาคขึ้น ดังภาพที่ 4.12 (ก) และ 4.12 (ข) ตามลำดับ และจะเกิดหยดอนุภาคเมื่อให้อัตราส่วนไหลของน้ำสีและน้ำมันเป็น 1 โดยลักษณะการเกิดหยดอนุภาคจะเกิดบริเวณทางแยกพอดี และหยดอนุภาคมีขนาดสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.12 (ค) จากนั้นทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 2 ปรากฏว่า ไม่เกิดหยดอนุภาค เนื่องจากน้ำสีและน้ำมันไหลมาเจอกันที่ทางแยกและไม่เกิดการทอหุ้มซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่น้ำสีมีอัตราการไหลมากกว่าน้ำมันมาก และบริเวณทางแยกมีขนาดกว้างทำให้ที่อัตราส่วนของอัตราการไหลนี้น้ำมันเกิดแรงเฉือนไม่เพียงพอต่อการจะทำให้เกิดหยดอนุภาค

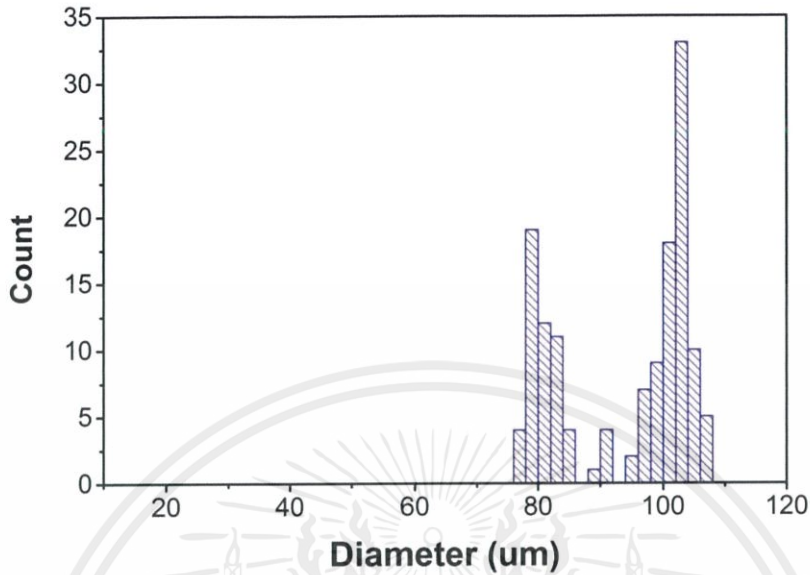


ภาพที่ 4.12 แสดงการเกิดหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหล (Q) ดังต่อไปนี้
(ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1 และ (ง) 2

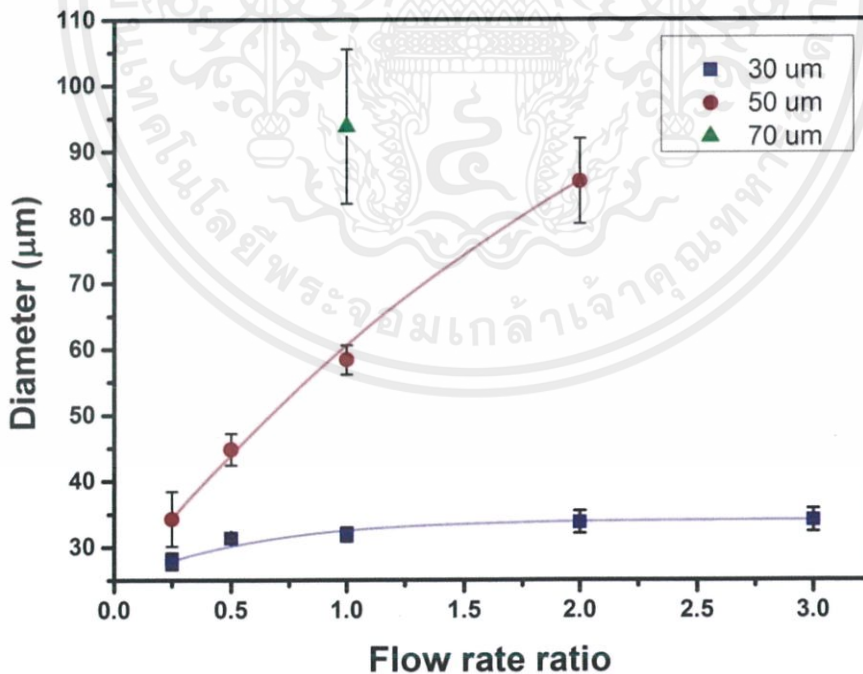
หยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีความกว้างของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 70 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลระหว่างน้ำสีและน้ำมันเป็น 1 จะมีขนาดเป็น 93.79 ± 11.71 ไมครอน สังเกตจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากจำนวนการทดลองซ้ำสามครั้งมีค่าค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นว่าขนาดหยดอนุภาคที่ได้มีการกระจายตัวสูง ไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีความกว้างของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 70 ไมครอนนี้อาจไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะงานทางด้านที่ต้องการลักษณะของหยดอนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอ สันเกตได้จากกราฟแสดงความถี่ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดอนุภาค ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 70 ไมครอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลมีค่าเป็น 1 (N=100)



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอัตราการไหลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดอนุภาคที่เกิดจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่มีช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 , 50 และ 70 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของหยดอนุภาคที่เกิดขึ้นจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่ขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกแตกต่างกัน ดังภาพที่ 4.14 พบว่า หยดอนุภาคที่เกิดจากไมโครฟลูอิดิกชิปที่ขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 , 50 และ 70 ไมครอน จะมีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เพิ่มสูงขึ้นตามขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกกว้างขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของหยดอนุภาคที่อัตราส่วนของอัตราการไหลและขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกต่างกัน

| ขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยก (μm) | อัตราส่วนของอัตราการไหล | ขนาดของหยดอนุภาค (μm) |
|--|-------------------------|------------------------------------|
| 30 | 0.25 | 27.85 \pm 0.31 |
| | 0.5 | 31.64 \pm 0.51 |
| | 1.0 | 32.29 \pm 0.46 |
| | 2.0 | 34.12 \pm 0.64 |
| | 3.0 | 33.08 \pm 1.40 |
| 50 | 0.25 | 33.08 \pm 1.40 |
| | 0.5 | 41.28 \pm 2.10 |
| | 1.0 | 53.89 \pm 2.73 |
| | 2.0 | 85.39 \pm 5.78 |
| | 3.0 | - |
| 70 | 0.25 | - |
| | 0.5 | - |
| | 1.0 | 93.79 \pm 11.71 |
| | 2.0 | - |
| | 3.0 | - |

จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของ Junction channel กับ Main channel มีผลต่อการเกิดหยดอนุภาค ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วน 30 : 100 จะสามารถสร้างหยดอนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอกว่า ที่อัตราส่วน 50 : 100 และ 70 : 100 เนื่องจากที่อัตราส่วน 30 : 100 เป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดแรงเฉือนได้ดี ในขณะที่อัตราส่วน 70 : 100 เป็นโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมต่อการสร้างหยดอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

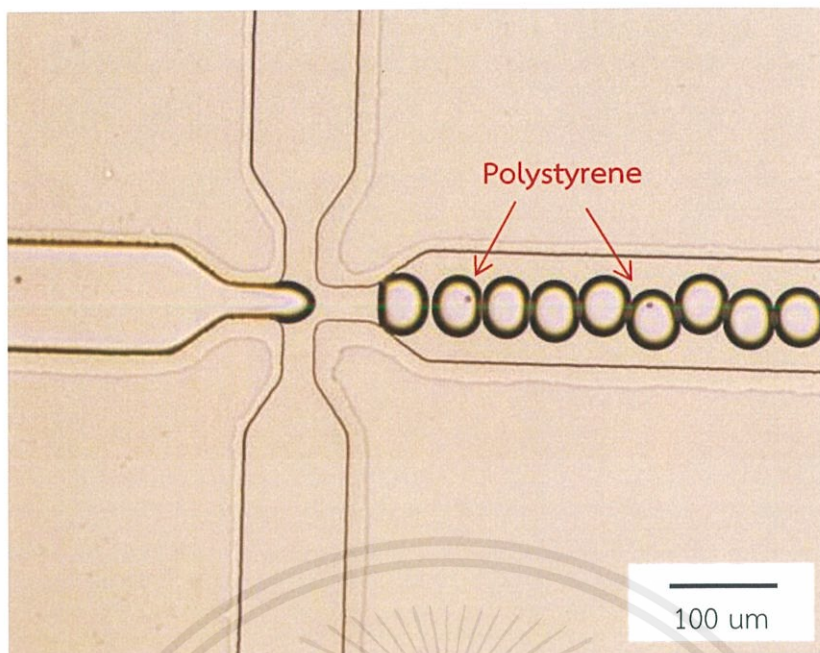
4.3 การห่อหุ้มอนุภาคพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS)

เมื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของพอลิสไตรีนผ่านทางกล้องจุลทรรศน์พบว่า เป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมดังภาพที่ 4.15



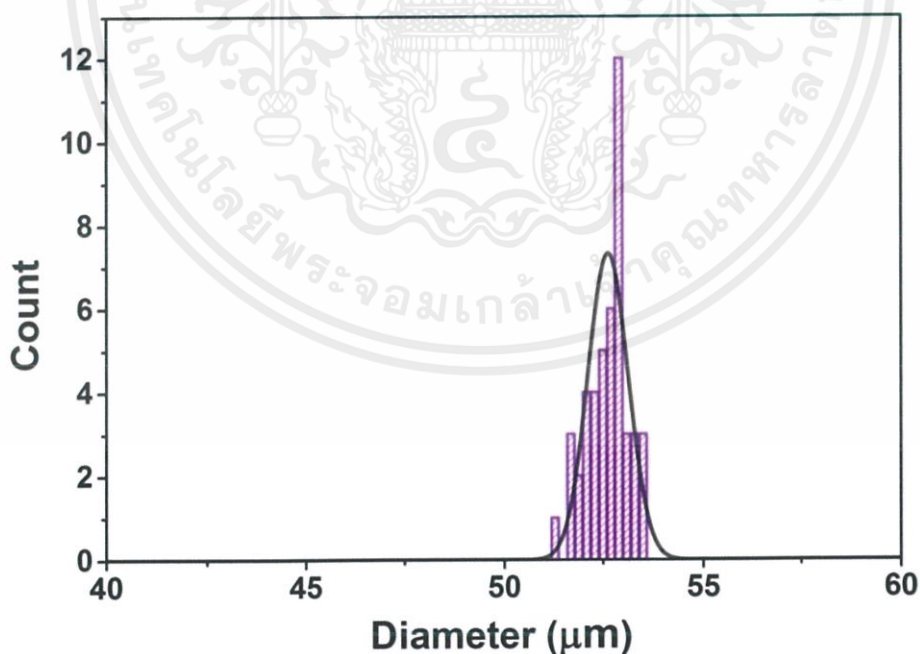
ภาพที่ 4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะของพอลิสไตรีนขนาด 5 ไมครอน (กำลังขยาย 20 เท่า)

หลังจากปล่อยให้พอลิสไตรีนที่กระจายอยู่ในน้ำไร้ประจุ (1: 10) ผ่านเข้าไปในไมโครฟลูอิดิกชิป กำหนดให้อัตราส่วนของอัตราการไหลของพอลิสไตรีนกับน้ำมันเป็น 1 เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเกิดหยดอนุภาคได้สม่ำเสมอ พบว่า น้ำมันสามารถห่อหุ้มน้ำที่ผสมพอลิสไตรีนได้ ดังภาพที่ 4.16 จะเห็นอนุภาคของพอลิสไตรีนอยู่ในหยดอนุภาคที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 4.16 แสดงการห่อหุ้มพอลิสไตรีนที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 1

เมื่อทำการวัดขนาดของหยดอนุภาคที่ห่อหุ้มพอลิสไตรีน พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 52.63 ± 0.5 ไมครอน และมีค่าการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของขนาดหยดอนุภาคที่ทำการห่อหุ้มพอลิสไตรีนไว้ด้วยไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction ที่มีช่องทางการไหล

บริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน (N=50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองเมื่อให้สารไหลผ่านชิปรูปแบบ Cross junction ที่มีความกว้างของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30 ไมครอน โดยที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเป็น 1 พบว่าหยดอนุภาคที่ห่อหุ้มพอลิस्टรีนจะมีขนาดใหญ่กว่าหยดอนุภาคที่ไม่ได้ทำการห่อหุ้มอนุภาคซึ่งเป็นผลมาจาก

1. พอลิस्टรีนที่นำมาผสมกับ Disperse phase มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้อนุภาคของพอลิस्टรีนไม่เกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้แรงตึงผิวระหว่าง Disperse phase และ Continuous phase เปลี่ยนแปลงไป

2. การเปลี่ยนฐานรองรับที่ใช้ประกบกับ PDMS ที่มีลวดลายของช่องทางการไหลจาก PDMS เป็นกระจก ทำให้ผิวสัมผัสของสารในช่องทางการไหลเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก กระจกมีสมบัติความชอบน้ำแตกต่างจาก PDMS ส่งผลต่อขนาดของหยดอนุภาคที่เกิดขึ้น



สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยการสร้างและควบคุมขนาดของหยดอนุภาคโดยระบบไมโครฟลูอิดิกสำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บในระดับไมโครและนาโนเมตร เริ่มต้นจากการเตรียมอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกขึ้นและนำมาสร้างหยดอนุภาคในรูปแบบน้ำในน้ำมัน (Water in Oil; W/O) ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ รูปแบบโครงสร้างของช่องทางการไหล ได้แก่ แบบ T-junction และแบบ Cross junction, ขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยก ได้แก่ 30, 50 และ 70 ไมครอน รวมไปถึงอัตราส่วนของอัตราการไหลระหว่างน้ำและน้ำมัน สามารถสรุปผลที่ได้เป็นดังนี้

การสร้างหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ T-junction ที่บริเวณทางแยกมีขนาดเป็น 25 ไมครอน หยดอนุภาคที่สามารถสร้างได้จะมีขนาดอยู่ในช่วง 38.45 ± 2.31 ถึง 90.98 ± 5.26 ไมครอน โดยขนาดของหยดอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของอัตราการไหลและมีขนาดของหยดอนุภาคสม่ำเสมอ

การสร้างหยดอนุภาคจากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction โดยเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องทางการไหลบริเวณทางแยกเป็น 30, 50 และ 70 ไมครอน พบว่าช่องทางการไหลบริเวณทางแยกที่กว้างขึ้นจะส่งผลต่อการกระจายตัวของหยดอนุภาค กล่าวคือรูปแบบช่องทางการไหลบริเวณทางแยกกว้าง 30 ไมครอนจะสามารถสร้างหยดอนุภาคที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ ในขณะที่รูปแบบช่องทางการไหลบริเวณทางแยกกว้าง 50 ไมครอน จะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่รองลงมาและที่รูปแบบช่องทางการไหลบริเวณทางแยกกว้าง 70 ไมครอนจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนของความกว้างที่บริเวณ Junction channel กับ Main channel โดยที่อัตราส่วน 3:10 เกิดหยดอนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอและที่อัตราส่วนเป็น 7:10 เกิดหยดอนุภาคที่มีค่าการกระจายตัวของขนาดที่กว้างและไม่สามารถควบคุมขนาดได้ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการสร้างหยดอนุภาค

ขนาดของหยดอนุภาคที่สามารถสร้างได้จากไมโครฟลูอิดิกชิปรูปแบบ Cross junction บริเวณทางแยกกว้าง 30, 50 และ 70 ไมครอน จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอัตราส่วนของอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น และที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเดียวกันชิปรูปแบบบริเวณทางแยกกว้าง 30, 50 และ 70 ไมครอน จะสามารถสร้างหยดอนุภาคที่มีขนาดจากเล็กไปใหญ่ตามลำดับ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการกักเก็บกำลังเป็นที่สนใจ เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถห่อหุ้มสารสำคัญไว้ในหยดอนุภาคเพื่อเก็บรักษาและป้องกันการเสื่อมสลายของสมบัติได้โดยง่าย ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างแพร่หลาย โครงการพิเศษจึงทำการศึกษาระบวนการสร้างหยดอนุภาคด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไมโครฟลูอิดิก เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะการเกิดและขนาดของหยดอนุภาค จึงเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้งานและศึกษาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ

- 5.2.1 ศึกษาผลของความหนืดที่มีต่อการสร้างและควบคุมขนาดหยดอนุภาค
- 5.2.2 การห่อหุ้มหยดอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร
- 5.2.3 ศึกษาการสร้างหยดอนุภาคแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in water; O/W)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] เอกลักษณ์ ทวีโรจนกุล. Microencapsulation: เทคโนโลยีชีว แต่แจ้ว. *Technol. Promot. Mag.* 36, 39–42 (2009).
- [2] Yang, X. L. *et al.* Core-Shell Chitosan Microcapsules for Programmed Sequential Drug Release. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8, 10524–10534 (2016).
- [3]. Suganya, V. & Anuradha, V. Microencapsulation and Nanoencapsulation: A Review. *Int. J. Pharm. Clin. Res.* 9, 233–239 (2017).
- [4] Promraksa, B. Microencapsulation Techniques and its Role in Medicine. (2017). Available : http://www.smj.ejnal.com/e-journal/showdetail/?show_detail=T&art_id=1845.
- [5] Wilson, N. & Shah, N. P. Microencapsulation of vitamins. *Int. Food Res. J.* 14, 1–14 (2007).
- [6] ภญ.ธนิกานต์ แสงน้อม. Microencapsulation in Pharmaceutical Sciences. 1–9
- [7] Ramkhamhaeng University. Encapsulation and Control Release of Food Flavoring.
- [8] Dr. rer. nat. Claudia Vorbeck. 2017. Spray drying : Perfect dosing thanks to drug capsules. [Online]. Available : <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2017/september/spray-drying--perfect-dosing-thanks-to-drug-capsules.html>
- [9] JIANGYIN DRY EQUIPMENT MANUFACTURE. 2013. Fluid Bed Coating [Online]. Available : http://www.jiangshen.com/gjy05_en.html
- [10] Philip, D., Yonghao, Z. & Manz, A. 2012. Microdroplet Technology. Springer Science+Business Media.
- [11] เทอดศักดิ์ ยุทธเสรี. 2013. เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number). [Online]. Available : <http://industrialpumps-tsy.blogspot.com/2013/08/reynolds-number.html>
- [12] EQUIPMENT FOR ENGINEERING EDUCATION [Online]. Available : http://www.usdidactic.com/teaching-lab-equipment/i4320_Zeichnung_Einzelheit_1.htm
- [13] Paper, C. *et al.* The Effects of Transparency Film Mask to Microstructure Pattern Quality The Effects of Transparency Film Mask to Microstructure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern Quality. (2008).

- [14] Xia, Y. & Whitesides, G. M. **Soft lithography.** *Annu. Rev. Mater. Sci.* **28**, 153–184 (1998).
- [15] Ma, Y., Thiele, J., Abdelmohsen, L., Xu, J. & Huck, W. T. S. **Biocompatible macro-initiators controlling radical retention in microfluidic on-chip photo-polymerization of water-in-oil emulsions.** *Chem. Commun.* **50**, 112–114 (2014).
- [16] Garstecki, P., Fuerstman, M. J., Stone, H. A. & Whitesides, G. M. **Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up.** *Lab Chip* **6**, 437 (2006).
- [17] Wei-Lung Chou, Lee, P.-Y., Yang, C.-L., Huang, W.-Y. & Lin, Y.-S. **Recent Advances in Applications of Droplet Microfluidics.** *Micromachines* **2015** 1249–1271 (2015). Available at: <http://www.mdpi.com/2072-666X/6/9/1249/htm>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | สกาเวญ ไตรรัตน์ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 2 กันยายน 2538 |
| ที่อยู่ | 549 ถนนสุขประยูร ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000 |
| ประวัติการศึกษา | - ระดับประถมศึกษา โรงเรียนวัดดอนทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา - ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเบญจมาชรังษย์ จังหวัดฉะเชิงเทรา - ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร |
| ติดต่อ | fskawpen@gmail.com |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้