

การสร้างและการทดสอบประสิทธิภาพของชิพไมโครฟลูอิดิก
สำหรับเจือจางสารตัวอย่างทางชีวเคมี

FABRICATION AND PERFORMANCE TESTING OF A MICROFLUIDIC CHIP
FOR DILUTION OF BIOCHEMICAL SAMPLES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมวัสดุ
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION AND PERFORMANCE TESTING OF A MICROFLUIDIC CHIP
FOR DILUTION OF BIOCHEMICAL SAMPLES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสร้างและการทดสอบประสิทธิภาพของชิพไมโครฟลูอิดิกสำหรับเจือจางสารตัวอย่างทางชีวเคมี

Special Project Title Fabrication and performance testing of a microfluidic chip for dilution of biochemical samples

นักศึกษา นายจารุเดช ทองเดช

รหัสประจำตัว 55110010

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต


ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2558


อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง	
ดร.มยุรี พลเยี่ยม	
ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....17.....เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างและการทดสอบประสิทธิภาพของชิพไมโครฟลูอิดิกสำหรับเจือจางสารตัวอย่างทางชีวเคมี
ชื่อนักศึกษา	นายจารุเดช ทองเดช
รหัสนักศึกษา	55110010
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบที่จะใช้เจือจางสารซึ่งอยู่ในรูปแบบของชิพไมโครฟลูอิดิก โดยการทดลองส่วนแรกเกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างชิพไมโครฟลูอิดิกสำหรับเจือจางสาร และศึกษาวิธีวิเคราะห์ผลเพื่อบอกประสิทธิภาพการเจือจางสารของชิพไมโครฟลูอิดิก ซึ่งในการทดลองจะทำการเจือจางสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene Blue) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิโมลาร์ และใช้น้ำไร้ประจุ (DI Water) เป็นตัวทำละลาย โดยการฉีดสารทั้งสองชนิดเข้าไปในชิพที่มีท่อขาเข้าสองฝั่งโดยใช้เครื่อง Syringe Pump ซึ่งจะออกแบบชิพเป็นชั้นๆ เพื่อให้เกิดการเจือจางของสารในลักษณะคล้ายชั้นบันได และทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล (Flow rate) และทำการวิเคราะห์ผลการเจือจางสารเมทิลีนบลูที่ถูกเจือจางอยู่ในชิพโดยการวัดความเข้มสีจากภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Image J และสารละลายเมทิลีนบลูที่ได้จากช่องทางออกของชิพ ซึ่งถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบหาปริมาณสารเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) แต่ตัวชิพที่ออกแบบยังไม่สามารถเจือจางสารได้ในอัตราส่วนที่ต้องการ ในการทดลองส่วนที่สองจึงเป็นการศึกษาการออกแบบชิพโดยอาศัยโปรแกรมจำลองแบบ (simulation) ซึ่งรูปแบบที่ทำให้เกิดการผสมกันของสารภายในท่อได้ดีที่สุดคือ ลักษณะคล้ายกันหอยที่มีช่องทางเข้า 3 ช่องอยู่ตรงกลางและช่องทางออกอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวชิพ (Center-inlet Spiral) จากนั้นทำการทดลองทดสอบประสิทธิภาพชิพเพื่อการเจือจางสารละลายน้ำเลือด (Serum) ที่ผสมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์เป็นตัวเจือจาง โดยทำการเปรียบเทียบชิพทั้งขนาดใหญ่และขนาดย่อยส่วนซึ่งจะทดสอบอัตราการไหลของสารที่แตกต่างกัน เพื่อทำให้เกิดการเจือจางสารในอัตราส่วนที่ทำการออกแบบไว้คือ 1:8 ซึ่งจากการทดลองพบว่าไมโครฟลูอิดิกชิพที่สร้างขึ้นสามารถเจือจางสารละลายน้ำเลือดได้ประมาณ 1:6 เท่า ซึ่งคลาดเคลื่อนจากการคำนวณไปประมาณ 20.3% อย่างไรก็ตามตัวอุปกรณ์นี้ยังเป็นเพียงต้นแบบเท่านั้น ซึ่งยังต้องมีการปรับและแก้ไขตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเจือจางสารมากขึ้นและนำไปประยุกต์ใช้กับสารชนิดอื่นๆ ต่อไป

คำสำคัญ: ไมโครฟลูอิดิก, การเจือจาง, ชิพไมโครฟลูอิดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project	FABRICATION AND PERFORMANCE TESTING OF A MICROFLUIDIC CHIP FOR DILUTION OF BIOCHEMICAL SAMPLES
Student	Mr. Jarudej Thongdej
Student ID	55110010
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Dr. Nongluck Houngkamhang

ABSTRACT

This project aims to develop a prototype device for dilution of biochemical samples in microfluidic platform. The first part involved with the design and the fabrication of a dilution microfluidic chip and studies the method for performance testing of a device for dilution of sample. In this experiment, the dilution testing was done by injection of a solution of methylene blue at initial concentration of 1mM and deionized (DI) water on to the microfluidic chip. The in situ diluted samples were measured color intensity of digital image of methylene blue by using Image J program. Then compared with the diluted samples that got from the outlet of microfluidic chip which was analyzed the amount of methylene blue by using UV-vis spectrophotometer. From the results found that both two techniques can measure the concentration of diluted methylene blue but the dilution concentration that got from experiment were not concordant to the calculation. Then in the second part of this work is studying the design of microfluidic chip by simulation program. In this part the best design chip is a center-inlet spiral which has 3 inlets in the center of the chip and the other side is 1 outlet. The chip was test for dilution of serum contained 1 mM methylene blue by using PBS buffer as diluent. By comparison between the full scale chip and semi-half scale chip which different flow rate for making a dilution of sample at 1:8 ratio. The results found that this microfluidic chip can dilute the serum to 1:6 ratio which has error from the calculation about 20.3 % However, this device is just only a prototype which also need to be adapted and modified the device more effectively dilute and applied to other substances.

Keywords: Microfluidic, Dilution, Microfluidic chip

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา!!ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในโครงการวิจัยครั้งนี้จะสำเร็จไม่ได้ถ้าขาดความรู้และคำปรึกษาจาก ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง อาจารย์ประจำวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและยังคอยแก้ไขในส่วนที่ผิดพลาดในการทดลองให้มีความถูกต้องในโครงการวิจัยพิเศษครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณวิศรุต ศรีพุ่มไข่ (พี่กูก) คุณภัทรลักษณ์ ปัทมมัง (พี่ภัทร) และศูนย์เทคโนโลยี ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ TMEC สำหรับสถานที่ฝึกงาน ให้ความรู้ในการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบ อุปกรณ์ Microfluidic Dilution ในครั้งนี้ และขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่เป็นสถานที่ให้ความรู้ และยังให้สถานที่ในการทำกรวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่สาว คณาจารย์และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจขณะที่กำลังศึกษาอยู่ที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง จึงขอกราบขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายจรรุเดช ทองเดช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 แผนการดำเนินงาน	2
1.4 สมมติฐานงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการพื้นฐานไมโครฟลูอิดิก ไคลูชั่น	4
2.2 ฟิสิกส์ของไหล	5
2.2.1 ของไหล	5
2.2.2 ของไหลในอุดมคติ	5
2.2.3 การไหลภายในท่อ	6
2.2.4 ความหนืด	8
2.2.5 ความตึงผิว	9
2.3 Microfluidic Chip	11
2.3.1 การออกแบบลวดลายไมโครฟลูอิดิก	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 โปรแกรม CorelDRAW	11
2.3.3 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์	12
2.3.4 เทคนิคการกัดลายบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์	13
2.3.5 พีดีเอ็มเอส (PDMS – Polydimethylsiloxane)	17
2.4 สารละลายเมทิลีนบลู (Methylene Blue)	18
2.4.1 คุณสมบัติสารละลาย	18
2.5 Simulation	19
2.5.1 นิยามของโปรแกรม Computation Fluid Dynamic	19
2.6 หลักการของเครื่อง UV – Spectrophotometer	24
2.6.1 หลักการ UV – Spectrophotometer	24
2.6.2 ข้อมูลจำเพาะ	25
2.6.3 ความสามารถในการวัดของเครื่อง UV – Spectrophotometer	26
2.6.4 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น	26
2.6.5 การประยุกต์ใช้งาน	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1การทดลองที่ 1 Microfluidic Dilution	34
3.1.1 Chip Fabrication & Design	34
3.1.1.1 การออกแบบ	34
3.1.1.2 การสร้างแม่พิมพ์	35
3.1.1.3 การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก ไตลูชั่น	38
3.1.1.4 ขั้นตอนการทดลอง	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาVจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
1. อุปกรณ์การทดลองและการเตรียมการทดลอง	45
3.1.1.5 การเตรียมการทดลอง	47
3.1.1.6 ทดลองหาอัตราการไหล	48
การทดลองที่ 2 Micro Mixing	49
3.2 ทดสอบประสิทธิภาพชิพเจือจางน้ำเลือด (Serum)	49
3.2.1 Simulation	49
3.2.1.1 จำลองรูปแบบของท่อ Micro Mixing	49
3.2.1.2 รูปแบบของชิพ Micro Mixing	50
3.2.1.2.1 แบบเต็ม (Full)	51
3.2.1.2.2 แบบครึ่ง (Half)	51
3.2.1.3 การสร้างชิพ Micro Mixing	52
3.2.1.4 ขั้นตอนการทดลอง	53
3.2.1.5 การเตรียมการทดลอง	54
3.2.1.6 อัตราการไหลสำหรับชิพแบบเต็มและแบบครึ่ง	55
3.3 วิธีการตรวจสอบการเจือจางสาร	55
3.3.1 ใช้โปรแกรม Image J เพื่อหาค่าความเข้มสี (Intensity)	55
3.3.2 การใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	56
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของ Microfluidic Chip	59
4.1.1 ทดลองหาอัตราการไหล	59
4.1.2 ตารางผลการทดลอง Image J	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.3 กราฟความเข้มแสงที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม Image J	60
4.1.4 ทหาความเข้มข้นของ Methylene Blue ด้วยเครื่อง UV-Vis	61
4.1.4.1 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน	61
4.1.4.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ได้จากชิพ	62
4.2 การทดสอบ Micro Mixing	65
4.2.1 Simulation	65
4.2.1.1 ทารูปแบบขดท่อที่สามารถผสมสารได้ดีที่สุด	65
4.2.2 ทดสอบการทำงานของชิพ Micro Mixing ที่สร้างขึ้นจริง	68
4.2.2.1 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของเซรัมอัลบูมิน	68
4.2.2.2 ค่าการดูดกลืนแสงของ Serum ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง	69
4.2.2.2.1 ชิพแบบเต็ม (Full)	70
4.2.2.2.2 ชิพแบบครึ่ง (Half)	71
4.2.2.3 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของ Methylene Blue	73
4.2.2.4 ค่าการดูดกลืนแสงของ Methylene Blue ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง	74
4.2.2.4.1 ชิพแบบเต็ม (Full)	74
4.2.2.4.2 ชิพแบบครึ่ง (Half)	76
4.2.2.5 ภาพถ่าย Micro Mixing เทียบกับ Simulation	78
4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	79
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บรรณานุกรม
ประวัติผู้เขียน

หน้า

83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	2
2.1 แสดงสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3.1 แสดงอัตราการไหลในการทดลองส่วนที่ 1	48
3.2 อัตราการไหลชิพแบบเต็ม (Full)	55
3.3 อัตราการไหลชิพแบบครึ่ง (Half)	55
4.1 ผลการทดลองภาพถ่าย Image J ของการทดลองครั้งที่ 1	59
4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้ง 6 ตัวอย่างที่วัดได้จากเครื่อง UV-Vis	62
4.3 ตารางคำนวณความเข้มข้นจากค่าการดูดกลืนแสง	63
4.4 แสดงอัตราส่วนที่ได้จริงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่คาดว่าจะได้จาก Microfluidic Dilution	64
4.5 แสดงประสิทธิภาพในการผสมกันของสารภายในชิพ	65
4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละความเข้มข้นเซรัมที่เตรียมด้วยมือ	68
4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากชิพแบบเต็ม (Serum)	70
4.8 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง (Full)	71
4.9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากชิพแบบครึ่ง (Half)	72
4.10 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง (Half)	72
4.11 เปรียบเทียบอัตราส่วนจริงกับอัตราส่วนที่ได้จากการ Simulation (Serum)	73
4.12 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากชิพแบบเต็ม (Methylene Blue)	75
4.13 ความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการเส้นตรง (Full)	75
4.14 แสดงค่าความเข้มข้นที่ได้จากชิพแบบครึ่ง (Half)	76
4.15 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง (Half)	77
4.16 เปรียบเทียบอัตราส่วนจริงกับอัตราส่วนที่ได้จากการ Simulation (Methylene Blue)	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เทคโนโลยีของไหลแบบจุลภาค	4
2.2 การไหลแบบ Laminar และการไหลแบบ Turbulent	6
2.3 Velocity Profile ของการไหล	8
2.4 การไหลของของไหลอุดมคติ (มีความหนืดมาเกี่ยวข้อง)	9
2.5 การไหลของของไหลอุดมคติ (ไม่มีความหนืด)	9
2.6 ภาพแสดงถึงแรงตึงผิวหรือระหว่างโมเลกุล	10
2.7 ลักษณะของโปรแกรมออกแบบคอเรลตราวส์	11
2.8 ลักษณะของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์	13
2.9 แสดงลักษณะการสปินเพื่อเคลือบชั้นโพลีซิลิโคนลงบนแผ่นซิลิกอน	14
2.10 ภาพเปรียบเทียบระหว่างการใช้ resist ชนิด negative และ positive	14
2.11 ลักษณะการกัดลายโดยใช้ Mask ในการฉายแสง	15
2.12 แสดงลักษณะการกัดลวดลายแบบ Wet Etching และ Dry Etching	16
2.13 Silicone Elastomer Kit สำหรับเตรียมพีดีเอ็มเอสเพื่อขึ้นรูป	17
2.14 สูตรทางเคมีของสารละลายเมทิลีนบลู	18
2.15 สารละลายเมทิลีนบลูเมื่อละลายกับน้ำจะให้ออกมาเป็นสีฟ้า	18
2.16 รูปแบบของโปรแกรม Computational Fluid Dynamics (CFD)	20
2.17 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง UV – Spectrophotometer	25
2.18 แสงจะถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลในแต่ละชั้น	26
2.19 เปรียบเทียบแสงที่ทะลุผ่านสารความเข้มข้นมากและความเข้มข้นน้อย	27
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ %T และ absorbance	28
2.21 แสดงการสร้างกราฟมาตรฐาน	29
2.22 แสดงค่า Spectrum ที่ทำการวัดได้จากเครื่อง UV-Spectrophotometer	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.23 แสดงตัวอย่างลักษณะของไมโครฟลูอิดิกสำหรับหาเชื้อ HIV	30
2.24 แสดงตัวอย่างของไมโครฟลูอิดิกสำหรับตรวจสอบการเจือจางของสาร	31
2.25 แสดงตัวอย่างของไมโครฟลูอิดิกสำหรับตรวจสอบการเจือจางของสาร	31
3.1 แสดงลักษณะการออกแบบของไมโครฟลูอิดิก ไคลูชั่น	34
3.2 แสดงลักษณะการออกแบบและการวางตัวของชิ้นงานเพื่อให้ผลิตได้มากที่สุด	35
3.3 แสดงจุดที่ทำการมาร์คไว้เพื่อทำให้ง่ายต่อการตัดแบ่ง	36
3.4 แสดงการกำหนดขนาดท่อด้วยโปรแกรม CorelDraw	36
3.5 แสดงขั้นตอนการสร้างลวดลายบนแผ่นซิลิกอน	37
3.6 โถดูดอากาศ (Desiccator) ที่ใช้ในการอบ Hexamethyldisilazane	37
3.7 ภาพจำลองแสดงอัตราส่วนระหว่าง Base และ Agent	38
3.8 โถดูดอากาศ (Desiccator) ที่ใช้ในการไล่ฟองอากาศที่เกิดจากการคน PDMS	38
3.9 แสดงภาพจำลองการเท PDMS ลงบนแม่พิมพ์แผ่นซิลิกอน	39
3.10 ภาพจำลองการไล่ฟองอากาศด้วยถังควบคุมความดัน	39
3.11 แสดงการอบแผ่นซิลิกอนที่ทำการเท PDMS แล้ว	40
3.12 แสดงการตัดแบ่งตัวไมโครฟลูอิดิกออกเป็นชิ้น	40
3.13 แสดงบริเวณที่ทำการเจาะรูจุดที่ต้องการต่อท่อซิลิโคน	41
3.14 เครื่องออกซิเจนพลาสมา (Oxygen Plasma)	41
3.15 เตรียมทำความสะอาดกระจก (Glass slide)	42
3.16 แสดงสีของแก๊สและการวาง PDMS และกระจกในเครื่องออกซิเจนพลาสมา	42
3.17 แสดงตัวอุปกรณ์ที่ทำการประกบกันแล้ว	43
3.18 แสดงการต่อท่อเข้ากับตัวอุปกรณ์	43
3.19 ทำการอบตัวอุปกรณ์ที่ทำการต่อท่อแล้วอีกครั้งเพื่อความแข็งแรง	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.20 อุปกรณ์ที่ผ่านกระบวนการสร้างอย่างสมบูรณ์	44
3.21 เครื่อง Syringe Pump รุ่น NE-1000	45
3.22 หลอดฉีดยา ขนาด 10 มิลลิลิตร	45
3.23 กล้อง USB Microscope	46
3.24 Methylene Blue 1 mM	46
3.25 Microfluidic Dilution	47
3.26 การจัดเตรียมเครื่องมือที่ต้องการใช้ในการลอง	47
3.27 รูปแบบท่อ Micro Mixing ประเภทต่างๆ	48
3.28 รูปแบบของช่อง Inlet	50
3.29 รูปแบบ Micro Mixing แบบเต็ม	51
3.30 รูปแบบ Micro Mixing แบบครึ่ง	51
3.31 รูปแบบการวางตัวของชิพเพื่อจะให้เป็นแม่พิมพ์ซิลิกอนเวเฟอร์	52
3.32 ชิพ Micro Mixing	53
3.33 การจัดเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง	54
3.34 ค่าที่ใช้ในการ Simulation ของ Serum	57
3.35 ค่าที่ใช้ในการ Simulation ของน้ำ	57
4.1 Microfluidic Dilution รูปแบบที่ 1	58
4.2 Micro mixing สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพ Microfluidic Dilution	58
4.3 กราฟความเข้มข้นที่ได้จากอัตราการไหล 20 : 20 ไมโครลิตร/นาที	60
4.4 กราฟความเข้มข้นที่ได้จากอัตราการไหล 10 : 10 ไมโครลิตร/นาที	60
4.5 กราฟความเข้มข้นที่ได้จากอัตราการไหล 10 : 5 ไมโครลิตร/นาที	60
4.6 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน Methylene Blue (การทดลองที่ 1)	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ได้จากตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง	63
4.8 ลักษณะการผสมกันของของไหลภายในท่อที่อัตราการไหล 100 ไมโครลิตรต่อนาที	66
4.9 แสดงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้น	67
4.10 แสดงถึงอัตราส่วนที่ได้ทำการออกแบบและคำนวณจากโปรแกรม Simulation	67
4.11 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของเซรุ่ม (การทดลองที่ 2)	69
4.12 แสดงพีคของเซรุ่มที่วัดด้วยเครื่อง UV-Vis ที่ความยาวคลื่น 278.9 นาโนเมตร (Full)	70
4.13 แสดงพีคของเซรุ่มที่วัดด้วยเครื่อง UV-Vis ที่ความยาวคลื่น 278.9 นาโนเมตร (Half)	71
4.14 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของ Methylene Blue	73
4.15 แสดงพีคของ MB ที่วัดด้วยเครื่อง UV-Vis ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร (Full)	74
4.16 แสดงพีคของ MB ที่วัดด้วยเครื่อง UV-Vis ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร (Half)	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีขนาดเล็กถูกนำมาพัฒนาและต่อยอดมากขึ้น ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีขนาดเล็กนั้นก็ ได้แก่ เทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกหรือเรียกอีกแบบหนึ่งว่าเทคโนโลยีการย่อห้องปฏิบัติการให้อยู่ในรูปแบบของชิพ ซึ่งกำลังเป็นที่แพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพราะเทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกนั้นสามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ได้หลากหลายแบบ เช่น ด้านชีววิทยา ด้านวงการแพทย์ และทางด้านเคมีวิทยา ซึ่งไมโครฟลูอิดิกนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีท่อขนาดเล็กอยู่ในระดับไมโครเมตร สามารถควบคุมปริมาณของสารได้ในระดับไมโครลิตร ไมโครฟลูอิดิกจึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมปริมาณของของไหลที่มีปริมาณน้อยได้อย่างแม่นยำ และยังใช้เวลาในการทดลองสั้นเนื่องจากมีท่อขนาดเล็กทำให้สารภายในอุปกรณ์ไหลเร็ว เทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์สำหรับเจือจางสารแบบพกพา ซึ่งการเจือจางสารในปัจจุบันยังต้องเจือจางด้วยมือ ซึ่งจะใช้วิธีการและเวลานานในการเจือจางที่ค่อนข้างนาน เมื่อเทียบกับ microfluidic dilution แล้ว จะให้ความสะดวกและง่ายกว่า ไม่ต้องใช้กำลังคนในการเตรียมสาร แต่สามารถใช้อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกทำงานแทนได้ โดยการฉีดสารเข้าไปในอุปกรณ์โดยใช้ปั๊มและปล่อยให้สารเกิดการผสมและเจือจางระหว่างกันภายในตัวอุปกรณ์และไหลออกมาทางช่องทางออก (outlet) ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยลดเวลาในการทดลองได้อย่างมาก และสามารถใช้กับสารที่มีปริมาณน้อย พกพาสะดวกเพราะมีขนาดเล็กจึงสามารถนำไปใช้นอกสถานที่นอกเหนือจากห้องทดลองได้ สามารถล้างและนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง มีราคาถูก เพราะตัว Microfluidic Dilution ทำมาจาก พีดีเอ็มเอส (PDMS -Polydimethylsiloxane) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีราคาถูกมีความยืดหยุ่น ทนการกัดกร่อน และทนความร้อนสูง ทำให้ตัวอุปกรณ์นั้นสามารถใช้ได้กับสารเคมีหลายชนิด

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาและทดสอบตัวอุปกรณ์ Microfluidics Dilution ให้มีความสมบูรณ์พร้อมที่จะใช้งานในการเจือจางสารได้จริง เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การแพทย์ การเกษตร หรือชีววิทยา เป็นต้น ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการทำงานเนื่องจากให้ความสะดวกสบายมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างชิพไมโครฟลูอิดิกสำหรับเจือจางสาร

- การออกแบบ microchannel เบื้องต้น
- การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกด้วยพอลิเมอร์ (Polydimethylsiloxane ; PDMS)

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางในการทดสอบประสิทธิภาพของชิพไมโครฟลูอิดิก โดยใช้โปรแกรม Image J และเทคนิคยิวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี

1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบชิพโดยอาศัยโปรแกรมจำลองแบบ (simulation) และการประยุกต์ใช้ชิพไมโครฟลูอิดิกในงานทางด้านการแพทย์ เช่น การเจือจางน้ำเลือด (serum)

1.3 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน									
	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
1. literature review										
2. ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมและหลักการที่ใช้ในการออกแบบไมโครฟลูอิดิก										
3. สร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก										
4. ทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก										
5. ศึกษาการออกแบบชิพโดยอาศัยโปรแกรม simulation										
6. ทดสอบชิพไมโครฟลูอิดิกในการเจือจางน้ำเลือด (serum)										
7. เขียนเล่มวิทยานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

Microfluidic dilution chip จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจือจางสารที่มีปริมาณน้อย ทำให้ได้สารที่เป็นอัตราส่วนต่าง ๆ ตามที่ได้จากการคำนวณเบื้องต้น ซึ่งการใช้ PDMS (Polydimethylsiloxane) เป็นส่วนประกอบหลักในการสร้างอุปกรณ์ ประกอบเข้ากับแผ่นสไลด์แก้ว (Glass slide) โดยใช้การออกซิเจนพลาสมา (Oxygen plasma) ซึ่งสามารถทำได้ง่ายและทำให้ได้ชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพใช้งานได้จริง และสามารถพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์พกพาขนาดเล็กที่นำไปใช้งานในวงกว้างและหลากหลาย

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยการสร้างและการทดสอบประสิทธิภาพของชิพไมโครฟลูอิดิก สำหรับเจือจางสารตัวอย่างทางชีวเคมีมีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการออกแบบและสร้างชิพไมโครฟลูอิดิก รวมถึงทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น
2. ศึกษาและทดลองใช้โปรแกรมในการออกแบบตัวอุปกรณ์
3. สร้างชิพไมโครฟลูอิดิก โดยอาศัยกระบวนการ Photolithography ในการสร้างแม่แบบ และพอลิเมอร์พีดีเอ็มเอสในชิ้นรูป
4. ทดสอบประสิทธิภาพชิพไมโครฟลูอิดิกในการเจือจางสารเมทิลีนบลูโดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล (flow rate) ของสาร
5. วิเคราะห์สารตัวอย่างที่ถูกเจือจางโดยใช้โปรแกรม Image J และ เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี
6. ศึกษาการออกแบบชิพโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบ (simulation) และทดสอบประสิทธิภาพในการเจือจางน้ำเลือด (serum)

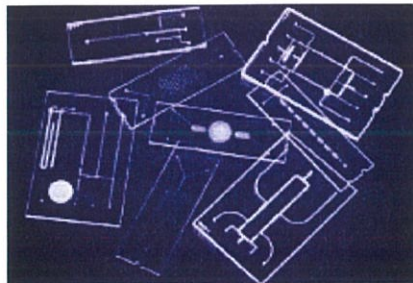
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการของไมโครฟลูอิดิก ใดลูชั่น (Microfluidics Dilution)

ในยุคปัจจุบันเราจะเห็นอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ จะมีการออกแบบให้มีลักษณะที่เล็กลงเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างง่ายมากขึ้น การพกพาสะดวกมากขึ้น และเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าและได้ผลที่รวดเร็ว แม่นยำ หนึ่งในรูปแบบโครงสร้างที่นิยมใช้ออกแบบมากที่สุดในตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก คือท่อไมโครชาแนลหรือเรียกว่า ท่อที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับไมโครเมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องทางไหลของสารที่มีปริมาณน้อยอยู่ในระดับไมโครลิตร จะนิยมมาใช้ร่วมกับ Lab on a chip หรือห้องปฏิบัติการบนชิพ ไมโครฟลูอิดิกจะเป็นการประยุกต์ใช้กับระบบของไหล (fluid) เช่น ก๊าซ หรือ ของเหลว ที่มีปริมาณน้อยในระดับมิลลิลิตรหรือในระดับไมโครลิตรที่ไหลผ่านท่อที่สร้างขึ้นให้มีขนาดเล็กอยู่ในระดับไมโครเมตร (ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผมของเราที่มีขนาด 17-181 ไมโครเมตร จะเห็นว่าท่อนั้นมีขนาดเล็กมาก) ซึ่งท่อขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายนี้จะถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิค Micro-fabrication techniques โดยในช่วงเริ่มต้นอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกจะสร้างจากวัสดุที่เป็นของแข็งหรือวัสดุที่เป็นฐานรอง เช่น แก้วและซิลิกอน โดยหลักการกัดลวดลายวงจรด้วยเทคนิคการฉายแสง (Photolithography) และการกัดลายโดยใช้สารเคมี (Etching) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้นิยมใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และการสร้างวงจรไฟฟ้าขนาดเล็ก แต่เนื่องจากตัวซิลิกอนและแก้วนั้นค่อนข้างมีราคาสูงและไม่มีความเหนียวหรือยืดหยุ่น นักวิจัยจึงหันมาสนใจการสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกโดยใช้พอลิเมอร์แทน เพราะการสร้างด้วยพอลิเมอร์นั้นจะใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างสั้น ขั้นตอนการสร้างไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก จึงสามารถใช้ครั้งเดียวและทิ้งได้ แต่การสร้างแม่พิมพ์นั้นก็ยังจะเป็นต้องอาศัยฐานที่เป็นของแข็งเพื่อให้ได้ลวดลายที่สวยงามและมีความสม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน [8]



ภาพที่ 2.1 เทคโนโลยีระบบของไหลแบบจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ฟิสิกส์ของไหล

2.2.1 ของไหล

ของไหล หมายถึงสสารที่เคลื่อนที่และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับภาชนะที่ทำการบรรจุ สสารลงไป ได้แก่ ของเหลวและก๊าซ การศึกษาความรู้และหลักเกณฑ์เบื้องต้นเกี่ยวกับของไหล ได้แก่ ของไหลที่หยุดนิ่งหรือเรียกว่า อุทกสถิตศาสตร์ (hydrostatic) ที่มีหลักการของ อาร์คิมิดีส หลักของ พาสคัส และความตึงผิว ส่วนการศึกษาของไหลที่เคลื่อนที่หรือเรียกว่า อุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic) นั้นจะศึกษาเกี่ยวกับสมการความต่อเนื่อง และความหนืดอุทกสถิตศาสตร์ ของไหล ที่อยู่นิ่งจะไม่มีแรงสัมผัส (tangential force) มากกระทำเพราะแรงนี้จะทำให้เกิดการไหลของสาร ดังนั้น ของไหลที่อยู่นิ่งจะมีแรงกระทำตั้งฉากกับผิวของของไหลเท่านั้น เรียกขนาดของแรงที่กระทำ ต่อผิวตั้งฉากนี้ว่าความดัน (pressure) โดยความดันนี้จะส่งต่อไปยังส่วนต่าง ๆ ของของไหลและถึงผิว ภาชนะในทิศทางตั้งฉาก

2.2.2 ของไหลในอุดมคติ

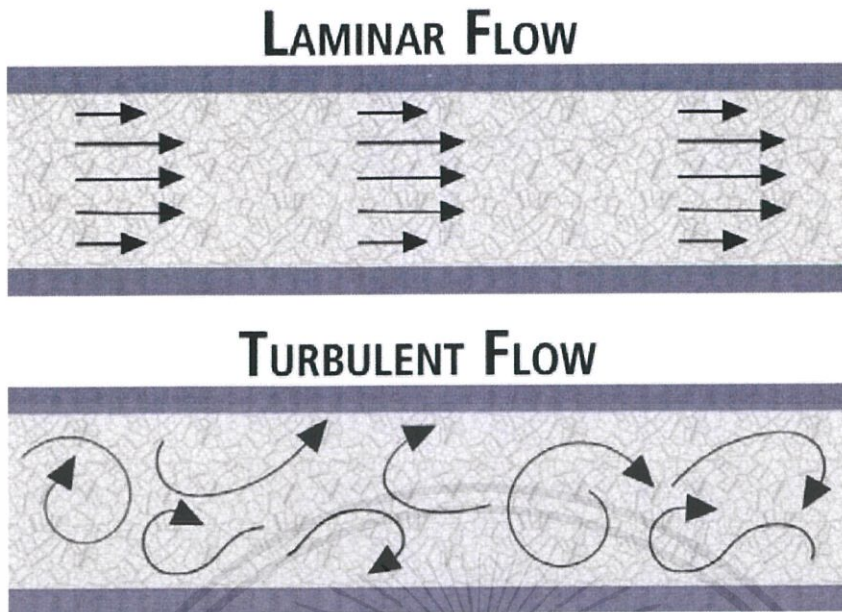
ของไหลอุดมคติ คือของไหลที่สามารถไหลหรือเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีแรงเสียดทาน มีความหนืด ซึ่งคุณสมบัติของของไหลอุดมคติ มีดังนี้

2.2.2.1 การไหลอย่างสม่ำเสมอ (Steady flow) ความหมายคือ ความเร็วของของไหลทุก ตำแหน่งต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะมีการไหลที่มีค่าคงตัวสม่ำเสมอ

2.2.2.2 การไหลโดยไม่หมุน (Irrotational flow) หมายถึง ภายในท่อหรือบริเวณที่ของไหลมีการเคลื่อนที่จะไม่มีการไหลหมุนวนของของไหลเลย

2.2.2.3 ความเร็ว (velocity) จะเป็นตัวที่กำหนดพฤติกรรมของการไหลของของไหลว่าจะเป็นไปในลักษณะใด กล่าวคือ

- เมื่อความเร็วในการไหลของของไหลมีการไหลแบบช้าๆ จะเรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)
- หากความเร็วมาถึงระดับหนึ่งจะทำให้ของไหลเกิดการปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะพบมากและจะมีรูปแบบการไหลที่ไม่แน่นอนซึ่งจะแตกต่างจากการไหลแบบราบเรียบ



ภาพที่ 2.2 การไหลแบบ Laminar และการไหลแบบ Turbulent [5]

4. ของเหลวส่วนใหญ่จะถูกบีบอัดไม่ได้ (Incompressible) หมายถึง ความหนาแน่นของของเหลวจะมีค่าคงที่ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามความดัน

2.2.3 การไหลภายในท่อ

ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของของไหลภายในท่อ ที่สามารถนำมาเป็นหลักการในการออกแบบตัวอุปกรณ์ ได้แก่

1. ความดัน (pressure) เนื่องจากความดันมีผลหรือมีความสัมพันธ์ต่อพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดความดันก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เราจึงสามารถนำสมการนี้ไปใช้หาความเร็วของของไหลได้ โดยจะใช้สมการของ “แบร์นูลลี” ต่อไปนี้ ในการคำนวณ

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh$$

โดยที่

P = ความดัน

ρ = ความหนาแน่น

V = ความเร็ว

h = ความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความหนาแน่น (density) จะใช้ในการคำนวณเพื่อหาความเร็วของของไหลที่จุดใด ๆ โดยความหนาแน่นจะอยู่ในรูปของมวลต่อปริมาตร

3. ความเร็ว (velocity) จะเป็นตัวที่กำหนดพฤติกรรมการไหลของของไหลว่าจะไปในลักษณะใด กล่าวคือ เมื่อความเร็วในการไหลของของไหลมีการไหลแบบช้า ๆ จะเรียกการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และหากความเร็วมาถึงระดับหนึ่งจะทำให้ของไหลเกิดการปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะพบมากและจะมีรูปแบบการไหลที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะแตกต่างจากการไหลแบบราบเรียบ

4. จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number) จะเป็นเลขที่บอกถึงสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล โดยจำนวนเลขเรย์โนลด์นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนืด ความเร็วในการไหล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล โดยจะเขียนสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

เมื่อ	Re	=	จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number)
	V	=	ความเร็วในการไหล (m/s)
	D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (m)
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
	μ	=	ความหนืดของของไหล (kg/m.s)

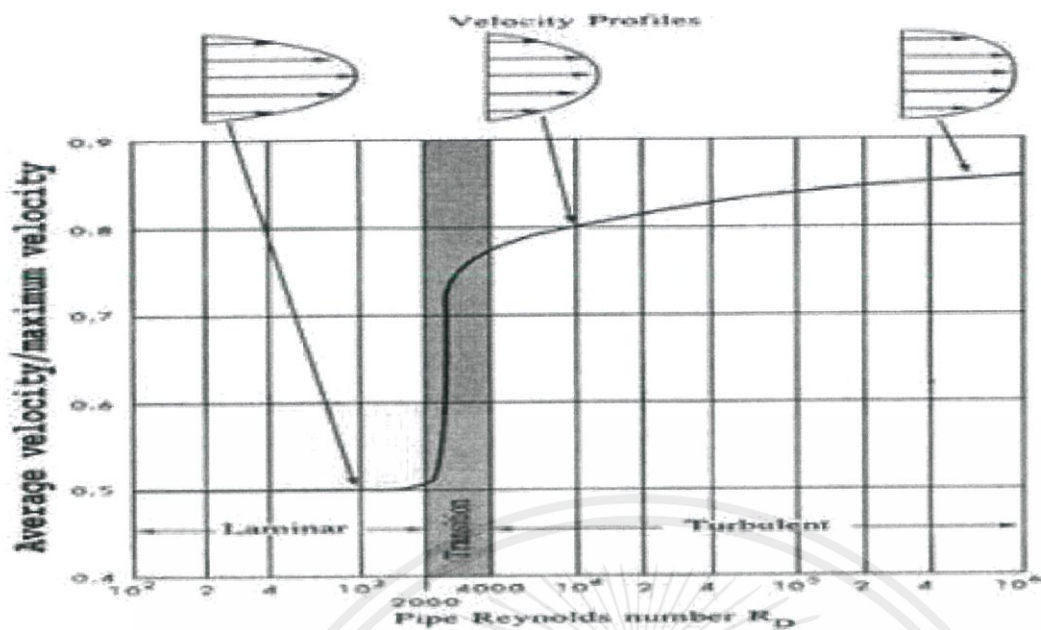
ซึ่งจำนวนเลขเรย์โนลด์จะไม่มีหน่วย แต่จะมีความสำคัญมากเพราะจำนวนเลขเรย์โนลด์นี้ จะใช้เป็นตัวกำหนดลักษณะหรือรูปแบบของการไหลของของไหล เช่น

Re อยู่ในช่วง 0 – 2000 จะสามารถบอกได้ว่าเป็นสภาพการไหลแบบ Laminar Flow

Re อยู่ในช่วง 2001 – 4000 จะสามารถบอกได้ว่าเป็นการไหลแบบ Transition Zone หรือเป็นการไหลแบบ Laminar + Turbulent

Re มากกว่า 4000 จะสามารถบอกได้ว่าเป็นสภาพการไหลแบบ Turbulent Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



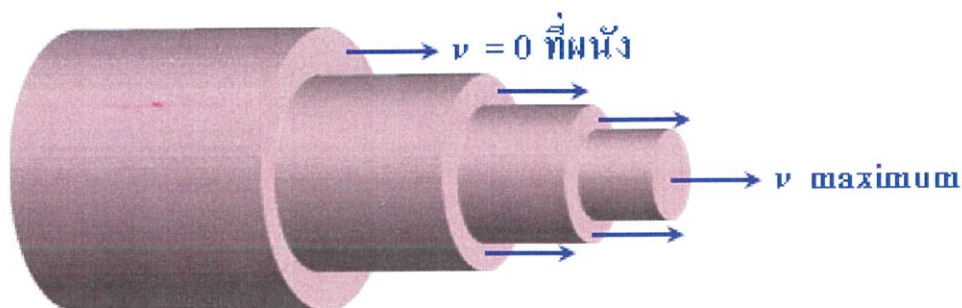
ภาพที่ 2.3 Velocity Profile ของการไหล [11]

2.2.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด คือความเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในของของไหล แรงหนืด (viscous force) เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของของไหลส่วนหนึ่งกับอีกส่วนหนึ่งที่อยู่ติดกัน ซึ่งความหนืดนั้นจะมีผลต่อการไหลภายในท่อ โดยความหนืดมาสารแบ่งออกได้ ดังนี้

1. ของไหลที่มีความหนืด (viscous fluid) มักจะเกาะตามผิวของของแข็งเป็นชั้นบาง ๆ (thin boundary layer) ซึ่งของไหลในชั้นนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่ ยกตัวอย่างเช่น ฝุ่นที่เกาะกับใบพัดได้ ทั้งที่ใบพัดยังคงหมุนอยู่ นั่นเป็นเพราะฝุ่นที่เกาะอยู่บริเวณผิวของใบพัดนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ เมื่อของไหลมีความหนืด ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะมีความเร็วต่างกัน ของไหลที่ตรงกลางท่อจะมีความเร็วมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามของไหลที่อยู่ชั้นติดกับผนังท่อจะไม่เคลื่อนที่เลย เนื่องจากมีแรงระหว่างโมเลกุลซึ่งจะมีผลมากขนาดที่ว่าถ้าผนังมีการเคลื่อน ของไหลที่ติดอยู่กับผนังนั้นก็จะต้องเคลื่อนที่ตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 การไหลของของไหลอุดมคติ (มีความหนืดมาเกี่ยวข้อง) [7]

2. ของไหลที่ไม่มีความหนืดทำให้ทุก ๆ ชั้นของของไหลอุดมคตินั้น เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากัน หรือแม้กระทั่งชั้นของไหลที่ติดอยู่กับผนัง

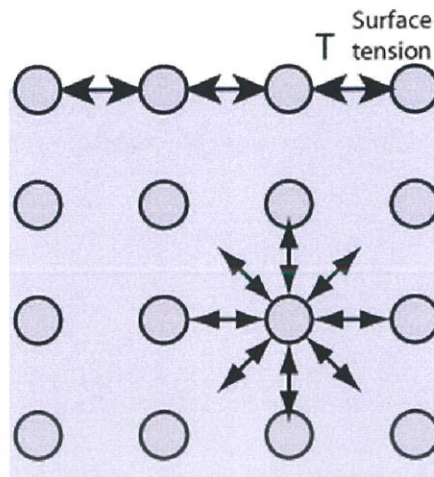


ภาพที่ 2.5 การไหลของของไหลอุดมคติ (ไม่มีความหนืด) [7]

2.2.5 ความตึงผิว

แรงตึงผิว หมายถึง แรงที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวซึ่งกันและกัน หรือเป็นแรงที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของภาชนะหรือของไหลชนิดอื่นที่มีการสัมผัสกัน แรงตึงผิวจะอยู่ในแนวขนานกับของเหลวเสมอ แรงแนี้พยายามทำให้พื้นที่ผิวของของเหลวมีขนาดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 ภาพแสดงถึงแรงตึงผิวหรือแรงเกาะติดระหว่างโมเลกุล [9]

ความตึงผิว (Surface tension) เป็นสมบัติเฉพาะตัวของของเหลว สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\gamma = \frac{F}{L}$$

โดยที่

γ	=	แรงตึงผิว
F	=	ขนาดของแรงตึงผิว (นิวตัน)
L	=	ความยาวของผิวสัมผัส (เมตร)

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงตึงผิวจะสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

1. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับความตึงผิว ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแข็งแรงจะมีแรงตึงผิวมากและทำให้มีความตึงผิวมากด้วย ยกตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำเป็นของเหลวที่มีความตึงผิวมาก เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นพันธะไฮโดรเจน

2. อุณหภูมิกับความตึงผิว อุณหภูมิมีผลต่อความตึงผิวของของเหลว เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ความตึงผิวของของเหลวจะเปลี่ยนไปด้วย

ปรากฏการณ์ในชีวิตประจำวันที่เกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว เช่น ของเหลวที่ไหลออกจากหลอดฉีดยา จะสังเกตเห็นว่าของเหลวจะไหลออกมาเป็นหยด ๆ แทนที่จะไหลเป็นเส้น นั่นเป็นเพราะที่ปลายของหลอดฉีดยาจะมีแรงที่เกิดขึ้นระหว่างผิวโมเลกุลของของเหลว ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นปริมาตรเล็ก ๆ โดยมีพื้นผิวน้อยที่สุด การวางเข็มเย็บผ้าเล็ก ๆ ลงไปบนผิวน้ำ เข็มจะสามารถลอยอยู่ได้ หรือ แมลงสามารถเดินบนผิวน้ำได้ เพราะแมลงนั้นมีน้ำหนักที่เบาบวกกับแรงตึงผิวของน้ำ จึงทำให้แมลงเกิดการ

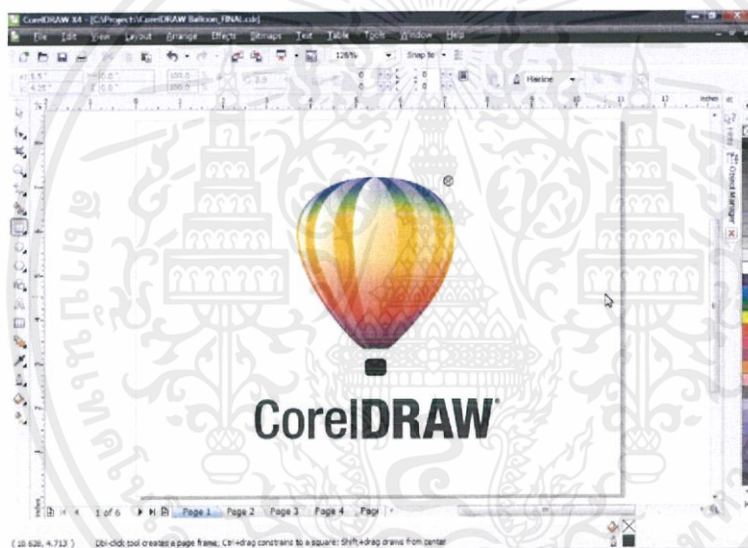
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอยตัวอยู่บนผิวน้ำได้ การจุ่มหลอดแก้วลงไปใต้น้ำ น้ำจะขึ้นไปในหลอดและมีความสูงกว่าระดับน้ำในแก้วน้ำ ซึ่งตั้งตัวอย่างที่กล่าวมานี้ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่เกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว

2.3 Microfluidics Chip

2.3.1 การออกแบบลวดลายไมโครฟลูอิดิก

การออกแบบจะใช้โปรแกรม CorelDRAW ในการออกแบบลักษณะของท่อไมโครชาแนล ซึ่งโปรแกรมนี้จะสามารถกำหนดขนาดของลวดลายได้ถึงระดับไมโครเมตร ในขณะที่เดียวกันท่อไมโครชาแนลนั้นก็ถูกออกแบบให้มีขนาดที่อยู่ในระดับไมโครเมตรเหมือนกัน ดังนั้น โปรแกรม CorelDRAW จึงเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมกับการใช้ออกแบบลวดลายของตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกมากที่สุด



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของโปรแกรมออกแบบคอเรลดรอว์ส์ [13]

2.3.2 โปรแกรม CorelDRAW

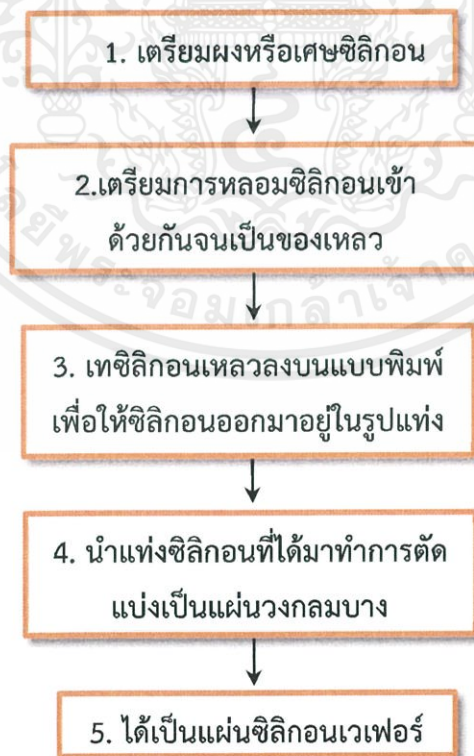
ในปัจจุบันโปรแกรม CorelDRAW ถือว่าเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมมาก ซึ่งในอดีตโปรแกรมที่ได้รับความนิยมตามโรงพิมพ์ หรือบริษัทที่รับออกแบบจะใช้โปรแกรมของบริษัทอะโดบี แต่เนื่องจากการใช้งานหรือการทำงานของโปรแกรมไม่ต่างกันมากและเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้น คอเรลจึงเป็นบริษัทที่สามารถเข้ามามีส่วนแผนทางการตลาดของโปรแกรมออกแบบในยุคนั้น และยังเป็นคู่แข่งรายสำคัญของบริษัทอะโดบีในเรื่องงานสื่อสิ่งพิมพ์ได้ไม่ยาก CorelDRAW มีให้ใช้มากในระบบปฏิบัติการและมีหลายแพลตฟอร์ม แต่ระบบปฏิบัติการหลักที่บริษัทคอเรลเข้ามาทำการตลาดคือระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

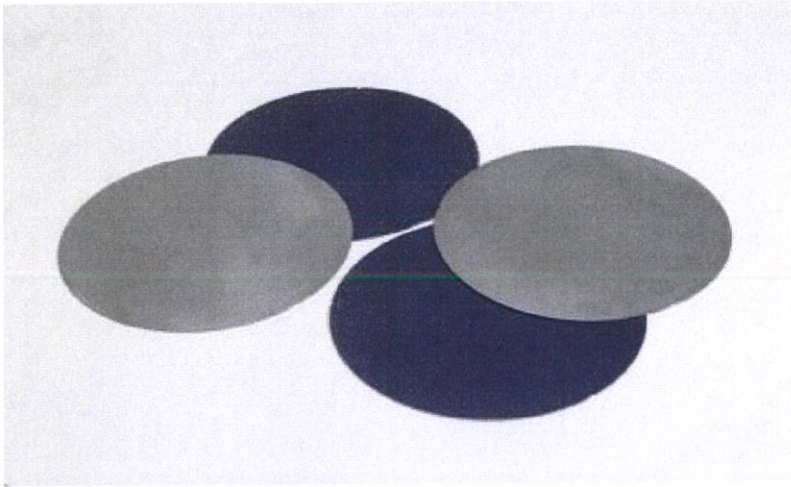
การทำงานกับไฟล์ข้อมูลรูปภาพของ CorelDRAW นั้น ส่วนใหญ่จะทำงานกับไฟล์ข้อมูลรูปภาพแบบเวกเตอร์ ที่จัดเก็บข้อมูลรูปภาพในแบบ 2 มิติ (2D) มากกว่า 3 มิติ (3D) (ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีคำสั่งสำหรับการทำงานกับไฟล์ข้อมูลรูปภาพ 3 มิติบ้างแล้วก็ตาม) โดยไฟล์ที่ CorelDRAW จัดเก็บในรูปแบบเฉพาะของตัวเอง จะใช้นามสกุลของไฟล์ว่า CDR, ซึ่งไฟล์ CDR นี้ จะสามารถจัดเก็บคุณลักษณะพิเศษของไฟล์ที่เป็นของ CorelDRAW ได้ครบถ้วน

2.3.3 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon Wafer)

ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นส่วนประกอบของทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นที่รู้จักและแพร่หลายมาก โดยอะตอมของซิลิกอนในเปลือกนอกสุดจะมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 4 อิเล็กตรอน และสามารถเชื่อมต่อกับอีก 4 อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณข้างเคียงจะเรียกว่า “อิเล็กตรอนร่วม” กลุ่มของอะตอมซิลิกอนจะมีการรวมกลุ่มกับอิเล็กตรอนเปลือกนอกสุดและจะเกาะกันอยู่ในรูปแบบของผลึก (Crystal) ซิลิกอนและเพชรจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นแบบเดียวกันแต่ต่างกันที่ซิลิกอนจะไม่โปร่งใสเหมือนเพชร ซิลิกอนสามารถหลอมรวมกันให้เป็นผลึกใหญ่ๆ และตัดออกมาเป็นแผ่นบาง ๆ จะเรียกแผ่นซิลิกอนเหล่านั้นว่า ซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon wafer) ที่ใช้สำหรับทำชิ้นส่วนหรือวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ แต่ซิลิกอนที่เป็นซิลิกอนบริสุทธิ์นั้นจะไม่ค่อยมีประโยชน์ ดังนั้น จึงเติมส่วนผสมสารชนิดอื่น ๆ เข้าไป เช่น โบรอน ฟอสฟอรัส หรือสารประเภทอื่น ซึ่งกระบวนการนี้จะเรียกว่าการโด๊ป (Doping) ซิลิกอน วิธีการในการสร้างแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ มีดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 ลักษณะของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

2.3.4 เทคนิคการกัดลายบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

การสร้างลวดลายบนแผ่นซิลิกอนนั้นจะต้องอาศัยเทคนิคในการฉายแสงและกัดลายบนแผ่นซิลิกอน เพื่อให้สามารถนำแผ่นซิลิกอนนั้นไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ได้ โดยเทคนิคการกัดลวดลายบนแผ่นซิลิกอนนั้นมีเทคนิคหลักที่ใช้ ดังต่อไปนี้

1. เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

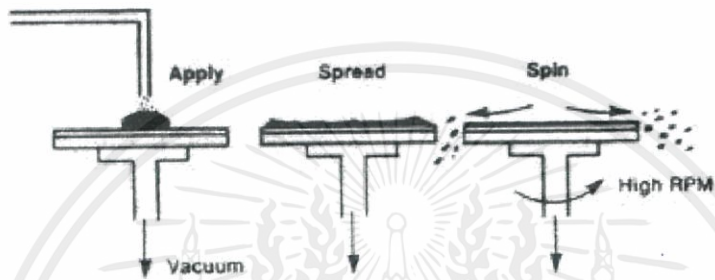
เทคนิคโฟโตลิโทกราฟีถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะเป็นการถ่ายทอดลวดลายที่มีขนาดเล็กมากด้วยแสงแบบส่องผ่านตามที่ได้ทำการมาร์คไว้ (Mark pattern) ลงบนแผ่นซิลิกอนที่ทำการเคลือบสารเคมีชนิดไวแสงที่เรียกว่า “โฟโตลิซิส” (Photo resist) โดยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี จะถูกใช้งานในด้านการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือสร้างแผ่นวงจรรวมหรือที่เรียกว่า CMOS ซึ่งเป็นตัวที่ใช้ในการทำตัว IC (Integrated Circuit) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “วงจรถ่ายเสียง”

1.1 โฟโตลิซิส (Photoresist)

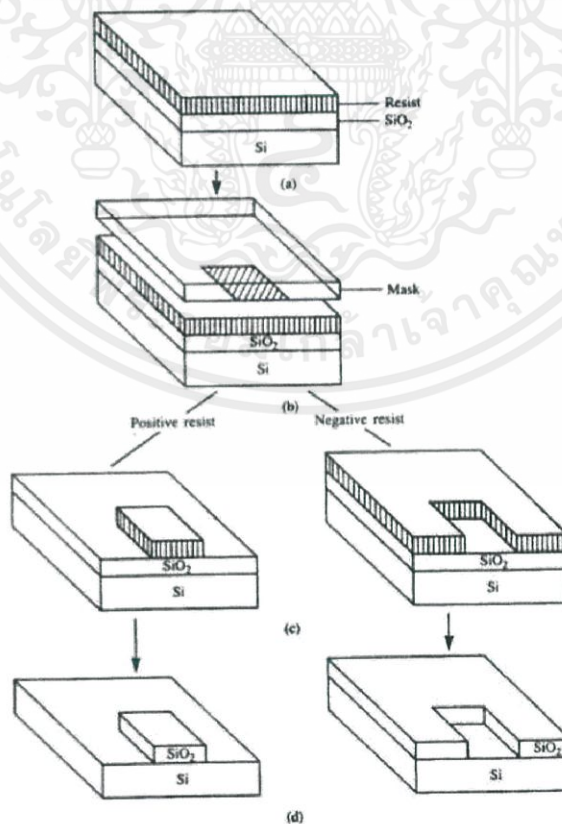
สิ่งถัดมาที่ควรทราบในการใช้เทคนิคโฟโตลิโทกราฟีนั่นก็คือ Photoreactive หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวัสดุ Photoresist ซึ่งเป็นสารที่มีความไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) หรือแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้น (น้อยกว่า 400 นาโนเมตร) จะใช้เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนเพื่อใช้ในการกัดลวดลายต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

Negative resist : เมื่อทำการฉายแสงไปที่ฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยโฟโตลิซิสที่เป็นชนิด Negative resist แล้วสังเกตได้ว่าส่วนที่โดนแสงดังกล่าวจะแข็งขึ้น จนไม่สามารถละลายได้ในสารละลายที่ใช้ล้างตัว resist ที่เคลือบเป็นชั้นฟิล์ม แต่ในส่วนที่ไม่โดนแสงจะสามารถละลายได้ ข้อเสียของ resist ชนิดนี้คือเหนียวและล้างออกได้ยาก

Positive resist : เมื่อทำการฉายแสงไปที่ฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยโฟโตลิซิสที่เป็นชนิด Positive resist แล้วสังเกตได้ว่าส่วนที่โดนแสงดังกล่าวจะอ่อนลง และสามารถละลายในสารละลายที่ใช้ล้าง resist ได้ดี แต่ส่วนที่ไม่โดนแสงก็จะเกิดการแข็งตัวจนไม่สามารถละลายได้ในสารละลาย

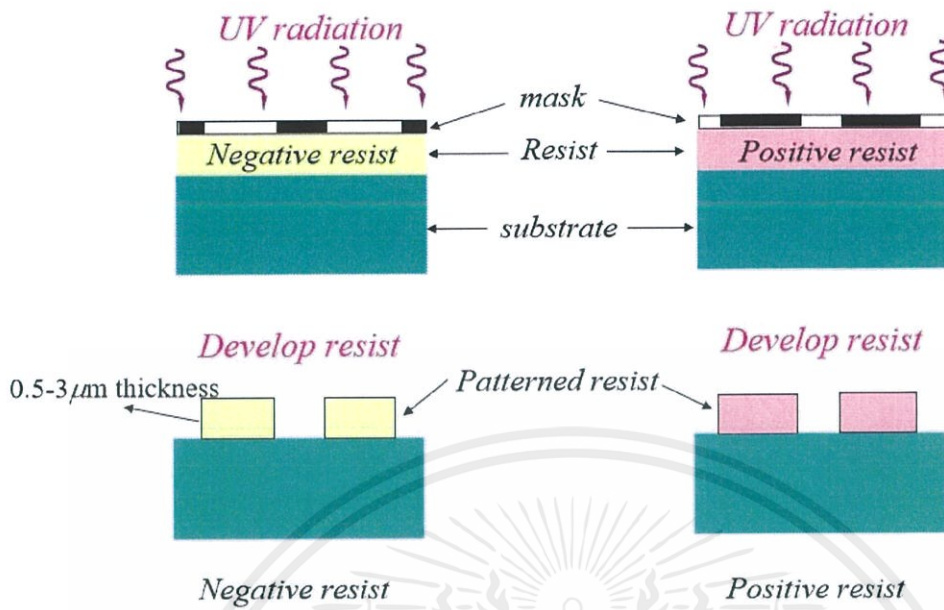


ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะการสปินเพื่อเคลือบชั้นโฟโตลิซิสลงบนแผ่นซิลิกอน [15]



ภาพที่ 2.10 ภาพเปรียบเทียบระหว่างการใช้ resist ชนิด negative และ positive [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 ลักษณะการกัดลายโดยใช้ Mask ในการฉายแสง [14]

1.2 ปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการใช้โฟโตลิซิส

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โฟโตลิซิสจะแบ่งออกเป็น 5 อย่าง ได้แก่

1.2.1 ความยาวคลื่น (Wavelength of UV source) : resist ที่ใช้ต้องเหมาะสมกับความยาวคลื่นในช่วงที่เหมาะสม เช่น resist ที่จะใช้สำหรับ Optical printing จะสามารถตอบสนองกับแสงหรือรังสีได้ในช่วง 330 – 340 นาโนเมตร จึงจำเป็นต้องใช้ resist ที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นช่วงนี้เท่านั้น

1.2.2 ความจำเพาะเจาะจง (Sensitivity) : เวลาในการฉายแสงนั้นจะสั้นหรือยาวขึ้นอยู่กับสารเคมีของตัว resist นั้น ๆ และความยาวคลื่นของแสงที่ฉายลงไป

1.2.3 ความเหนียวเกาะแน่น (Adhesion) : สาร resist จะต้องเกาะติดกับผิวแน่นเพียงพอ โดยต้องไม่หลุดร่อนระหว่างการทำให้กระบวนการอื่น ๆ

1.2.4 ความต้านทานการกัด (Etch Resistance) : ในการฉายแสงนั้นไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ตเท่านั้น สามารถใช้แสงชนิดอื่นฉายได้เช่นกัน ดังนั้น ตัว resist จะต้องทนต่อการกัดของแสงได้ เช่น ในบางครั้งต้องใช้แสงพลาสมา จึงจำเป็นต้องให้ resist ทนต่อการกัดด้วยรังสีพลาสมา

1.2.5 ความหนาของ resist : ไม่ควรหนาเกิน 1 ส่วน 3 ของลวดลายที่มีขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกัดลวดลายออกมาชัดเจนมากที่สุด

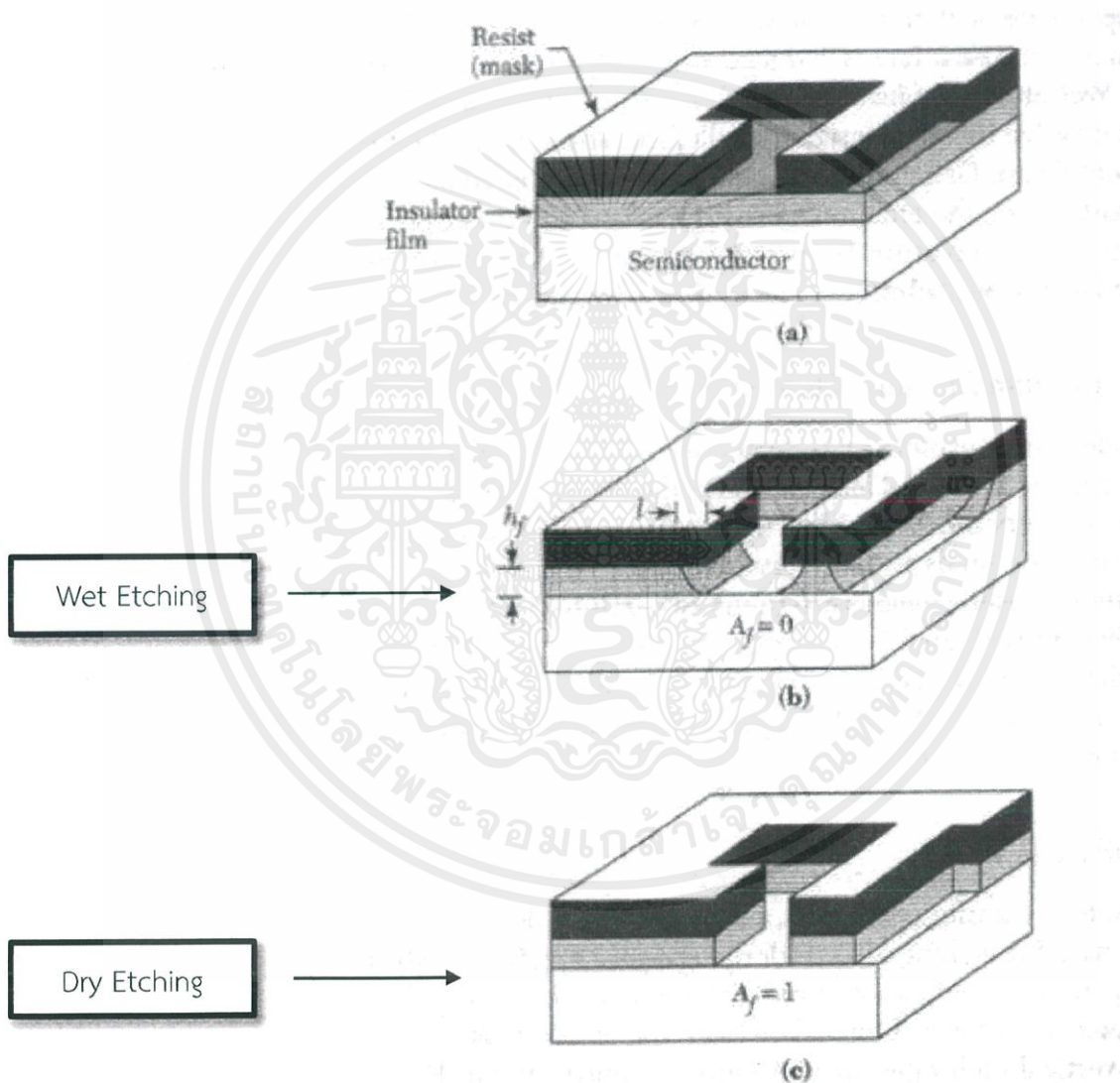
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เทคนิคการกัดลวดลายโดยใช้วิธีการกัดโดยสารเคมี (Etching)

เป็นกระบวนการกัดกร่อนซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

Wet Etching : ใช้สารเคมีในการกัดกร่อน

Dry Etching : ใช้พลาสมาในการกัดกร่อน



ภาพที่ 2.12 แสดงลักษณะการกัดลวดลายแบบ Wet Etching และ Dry Etching [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเทคนิคการกัดลวดลายนั้นถือว่ามีความจำเป็นมาก เพราะในการทำลวดลายของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกนั้น จำเป็นจะต้องใช้แม่พิมพ์ที่สร้างจากแผ่นซิลิกอนที่ทำการกัดเป็นลวดลายต่าง ๆ แล้วเท่านั้น เพราะลวดลายที่เกิดขึ้นบนแผ่นซิลิกอนนั้นจะให้ความสวยงาม เรียบเนียน และมีขนาดที่แน่นอน เพื่อให้ขนาดของท่อไมโครชาแนลมีการไหลของของไหลภายในได้ดี

2.3.5 พีดี้เอ็มเอส (PDMS : Polydimethylsiloxane)

พีดี้เอ็มเอสเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง Silicone Elastomer Base 10 ส่วน ผสมเข้าด้วยกันกับ Silicone Elastomer Agent 1 ส่วน สูตรทางเคมีคือ $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ จัดเป็น พอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะพิเศษต่างจากพอลิเมอร์ชนิดอื่น คือ เป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วย ซิลิกอน (Silicon) กับออกซิเจน (Oxygen) และมีหมู่ข้างเคียงเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจากลักษณะพิเศษเหล่านี้ ทำให้อยางซิลิโคนมีคุณสมบัติเป็นสารที่ละลายตัวยาก ทนทานต่อความร้อนสูง ยึดติดกับวัสดุได้ดี ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และไม่เกิดปฏิกิริยาต่อร่างกายของมนุษย์ จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ใช้ในการผลิตกาว สารเคลือบผิว สารหล่อลื่น รวมไปถึงการนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์เพื่อผลิตอุปกรณ์การแพทย์



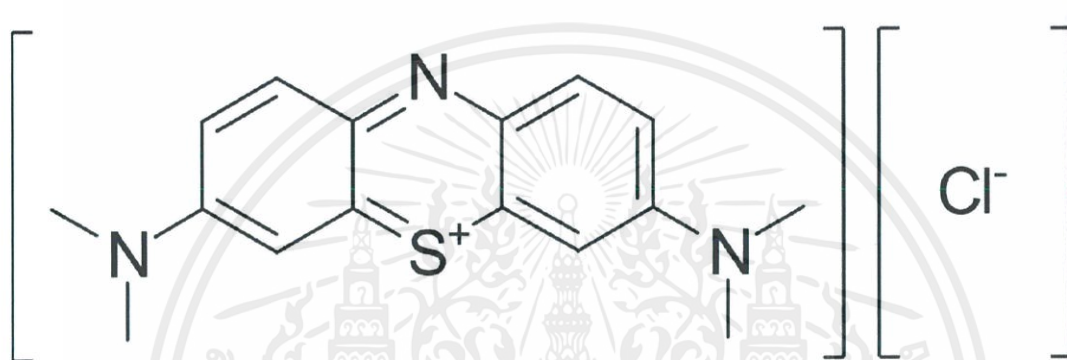
ภาพที่ 2.13 Silicone Elastomer Kit สำหรับเตรียมพีดี้เอ็มเอสเพื่อขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

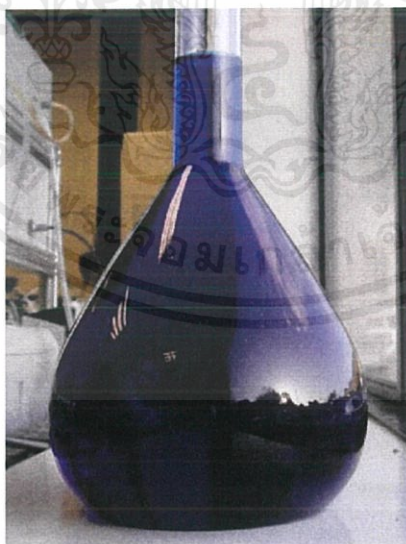
2.4 สารละลายเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

2.4.1 คุณสมบัติสารละลาย

เมทิลีนบลู (Methylene blue) หรือ Methylthioninium chloride เป็นสารประกอบเคมีที่เป็นของแข็งเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง ไม่มีกลิ่น มีสีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีฟ้า ภาพที่ 2.14 ถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านชีววิทยา ภาควิชาเคมี และใช้เป็นเภสัชภัณฑ์ สูตรทางเคมีของสารละลายเมทิลีนบลู คือ $C_{16}H_{18}N_3S^{+}Cl^{-}$ มีค่ามวลโมเลกุล (Molar mass) เท่ากับ 319.85 กรัมต่อโมล



ภาพที่ 2.14 สูตรทางเคมีของสารละลายเมทิลีนบลู [10]



ภาพที่ 2.15 สารละลายเมทิลีนบลูเมื่อละลายกับน้ำจะให้สีออกมาเป็นสีฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Simulation

โปรแกรมที่ใช้ Simulation จะใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า Computational Fluid Dynamics (CFD) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการสร้างแบบจำลองที่เกี่ยวกับของไหลภายในท่อเป็นอย่างมาก เพราะมีการใช้งานที่ง่าย สะดวก และรวดเร็วในการประมวลผลและมีค่าใช้จ่ายในการซื้อลิขสิทธิ์ค่อนข้างที่จะถูกกว่าโปรแกรมที่ใช้ในการ Simulation ประเภทอื่น ๆ

2.5.1 นิยามของโปรแกรม Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะเป็นการใช้ตัวคอมพิวเตอร์หรือซูเปอร์คอมพิวเตอร์สำหรับใช้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ทางด้านพลศาสตร์ของไหล โดยพื้นฐานในการทำงานในการวิเคราะห์ของไหลนั้นจะมีความต่อเนื่อง ซึ่งจะเกิดจากการแบ่งช่วงของการประมวลผลออกเป็นช่วงโดเมนปริภูมิให้เป็นเซลล์เล็ก ๆ เพื่อก่อให้เกิดโครงตาข่ายเชิงปริมาตร (Volume Mesh) หรือกริด (Grid) แล้วใช้อัลกอริทึม (Algorithm) ที่เหมาะสมในการแก้สมการของการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นสมการออยเลอร์ (Euler Equation) สำหรับการไหลแบบไม่หนืด (Inviscid Flow) และสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) สำหรับการไหลแบบหนืด (Viscid Flow) นอกจากนี้โครงตาข่ายอาจจะมีลักษณะรูปทรงแบบไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน (Unstructured Mesh) เช่น มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมใน 2 มิติ หรือมีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิดใน 3 มิติหรืออาจจะมีลักษณะรูปทรงแบบมีโครงสร้างแน่นอน (Structured Mesh) ก็ได้ โดยถ้าเป็นปัญหาที่มีพลวัต (Dynamic) สูงและมีสเกลขนาดใหญ่ ตัวกริดอาจจะถูกดัดแปลงให้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาดังระเบียบวิธีการปรับความละเอียดของโครงตาข่ายแบบอะแดปทีฟ (Adaptive Mesh Refinement Methods) ในกรณีที่เราดำเนินการ แก้ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลโดยไม่อาศัยฐานความรู้ของระเบียบวิธีแบบโครงตาข่าย (Mesh-Based Method)

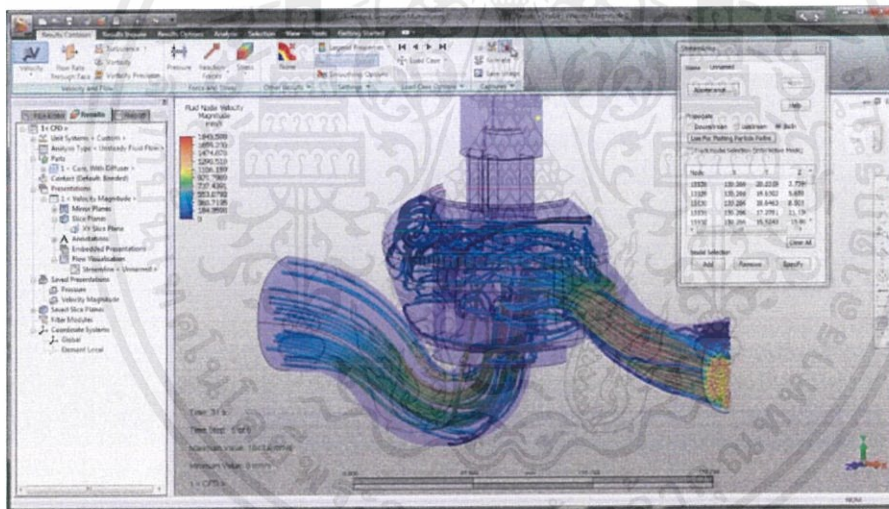
เราสามารถใชระเบียบวิธีต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. ระเบียบวิธีลากรางจ์ (Lagrangian Method)
2. ระเบียบวิธีสเปกตรัม (Spectral Method)
3. ระเบียบวิธีแลตติซ-โบลท์ซมานน์ (Lattice-Boltzmann Method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติเราสามารถแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ได้โดยตรงเมื่อสเกลความยาวมีความเหมาะสมกับปัญหาที่ทำการศึกษา ในกรณีนี้ การจำลองแบบของการไหลแบบปั่นป่วนอาจจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองปั่นป่วน (Turbulence Model) ในการจำลองแบบ และสำหรับการไหลแบบหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation) จำเป็นต้องอาศัยสมการ RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) กับแบบจำลอง $k-\epsilon$ หรือแบบจำลองแรงเค้นเรย์โนลด์ส (Reynolds Stress Model) ในการแก้ปัญหา

ในหลายๆ สถานการณ์อาจจำเป็นต้องอาศัยสมการอื่น ๆ ในการแก้ปัญหาไปพร้อม ๆ กับสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยสมการดังกล่าวได้อธิบายเกี่ยวกับความเข้มข้น สมการเคมี การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขั้นสูงสามารถจำลองแบบระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เช่น การไหลแบบหลายเฟส (Multi-Phase Flow) หรือของไหลที่มีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามกฎของนิวตัน (Non-Newtonian Fluids) เช่น เลือด เป็นต้น



ภาพที่ 2.16 รูปแบบของโปรแกรม Computational Fluid Dynamics (CFD) [16]

สิ่งที่จำเป็นต่อการ Simulation

- | | |
|-------------------|---|
| 1. Computer specs | 2. ค่าใช้จ่ายให้การซื้อลิขสิทธิ์โปรแกรม |
| - CPU 35 Core | - 1 ปี (129,600 บาท) |
| - Memory 32 GB | - 2 ปี (234,000 บาท) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความเข้มข้นและสูตรคำนวณที่เกี่ยวข้องในการเตรียมสารละลาย

1. หน่วยของน้ำหนัก

หน่วย	ตัวย่อ	ค่าเปรียบเทียบ
kilogram	kg	1 kg = 10^3 g
gram	g	1 g
milligram	mg	1 mg = 10^{-3} g
microgram	μ g	1 μ g = 10^{-6} g
nanogram	ng	1 ng = 10^{-9} g
picoqram	pg	1 pg = 10^{-12} g

2. หน่วยของปริมาตร

หน่วย	ตัวย่อ	ค่าเปรียบเทียบ
Liter	L	1 L
deciliter	dL	1 dL = 10^{-1} L
milliliter	mL	1 mL = 10^{-3} L
microliter	μ L	1 μ L = 10^{-6} L
nanoliter	nL	1 nL = 10^{-9} L
picoliter	pL	1 pL = 10^{-12} L

3. หน่วยของเนื้อสาร ได้แก่ Mole

หน่วย	ตัวย่อ	ค่าเปรียบเทียบ
mole	mol	1 mol
millimole	mmol	1 mmol = 10^{-3} mol
microgram	μ mol	1 μ mol = 10^{-6} mol
nanogram	nmol	1 nmol = 10^{-9} mol
picoqram	pmol	1 pmol = 10^{-12} mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรคำนวณ mol

$$\text{mole} = \frac{\text{น้ำหนักของสาร (g)}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของสาร}}$$

วิธีการคำนวณและการใช้หน่วยของความเข้มข้นของสารละลาย

1. ร้อยละโดยน้ำหนัก % (W/W)

$$\%(\text{W/W}) = \frac{\text{น้ำหนักของสารที่จะชั่ง (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักของสารละลาย (g)}}$$

เช่น NaCl 2% (W/W) = ชั่ง NaCl 2 กรัม + น้ำกลั่น 98 กรัม

2. ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร % (W/V)

$$\%(\text{W/V}) = \frac{\text{น้ำหนักของสารที่จะชั่ง (g)} \times 100}{\text{ปริมาตรของสารละลาย (mL)}}$$

เช่น เตรียม KCl 10% (W/V) = ชั่ง KCl 10 กรัมละลายในน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร

3. ร้อยละโดยปริมาตร % (V/V)

$$\%(\text{V/V}) = \frac{\text{ปริมาตรของตัวทำละลาย (mL)} \times 100}{\text{ปริมาตรของสารละลาย (mL)}}$$

เช่น เตรียม alcohol 70% (V/V) = ตวง alcohol 70 มิลลิลิตร + H₂O 30 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ppm (parts per million) = 1 ในหนึ่งล้านส่วน

ppb (parts per billion) = 1 ในพันล้านส่วน

$$\text{ppm} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย (g)} \times 10^6}{\text{น้ำหนักของสารละลาย (g)}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย (g)} \times 10^6}{\text{ปริมาตรของสารละลาย (mL)}}$$

$$\text{ppm} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย (g)} \times 10^9}{\text{น้ำหนักของสารละลาย (g)}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\text{น้ำหนักของตัวถูกละลาย (g)} \times 10^9}{\text{ปริมาตรของสารละลาย (mL)}}$$

เช่น น้ำ 155.3 กรัม มีปริมาณ phosphate 1.7×10^{-4} กรัม ในน้ำจะมี phosphate อยู่เท่าไร

(ppm หรือ ppb)

$$\begin{aligned} \text{ppm} &= \frac{1.7 \times 10^{-4} (\text{g}) \text{Phosphate} \times 10^6}{1.553 \times 10^2 (\text{g}) \text{solution}} \\ &= 1.1 \text{ ppm (1.1 } \mu\text{g/g)} \end{aligned}$$

5. Molarity หรือ (M) = จำนวน mol ของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 1 ลิตร

$$\text{น้ำหนัก (g)} = \text{จำนวน mol} \times \text{น้ำหนักโมเลกุล}$$

เช่น เตรียม NaOH 1 M , 100 mL (โมเลกุลของ NaOH = 40)

ใน solution 1000 mL ต้องการเนื้อสาร NaOH 1 mol = 1×40 กรัม

ใน solution 1000 mL ต้องการเนื้อสาร NaOH 1 mol = $\frac{1 \times 40 \times 100}{1000} = 4$ กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะต้องชั่ง NaOH 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นให้มีปริมาตรครบ 100 mL

6. Molarity หรือ (M) = จำนวน mol ของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย
หนัก 1 kg

ตัวอย่าง สารละลายหนัก 100 กรัม มีเนื้อ HCl 37 กรัม ดังนั้น มีตัวทำละลายหนัก 63 กรัม
ให้หา molality ของ HCl (น.น โมเลกุล HCl = 36.5)

$$\begin{aligned} \text{Mol HCl} &= \frac{37}{36.5 \text{ (น้ำหนักโมเลกุล)}} = 1.01 \\ \text{Molarity HCl} &= \frac{1.01 \text{ mol HCl}}{0.063 \text{ kg}} = 16.0 \end{aligned}$$

2.6 หลักการของเครื่อง UV-Spectrophotometer

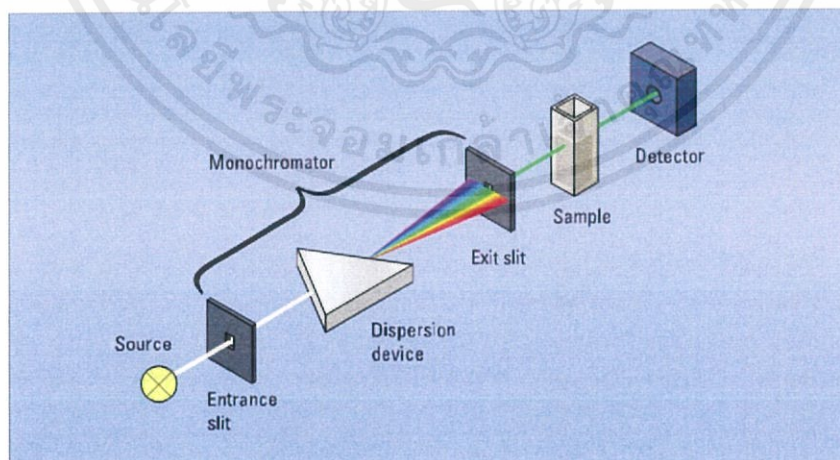
2.6.1 หลักการ UV-Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจวัดทางแสง เช่น ปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง (intensity) ในช่วงรังสียูวีและแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือเกิดการดูดกลืน โดยตัวอย่างที่ใช้ในเครื่องมือวัด โดยที่ความยาวคลื่นของแสงจะสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่สารที่อยู่ในตัวอย่างจะเป็นสารอินทรีย์ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่อยู่ในช่วงยูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานที่เหมาะสมในการให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นที่ค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลในตัวอย่างที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้น จึงสามารถใช้เทคนิคนี้ระบุชนิดและปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ข้อมูลจำเพาะ (Specification)

1. ระบบการวัดการดูดกลืนแสงโดยมีแสงที่ยิ่งเป็นแบบแสงคู่ (Double Beam) มีแหล่งกำเนิดแสงมาจากหลอดทิวเทอเรียม และหลอดทังสเตนฮาโลเจน
2. มีระบบแยกคลื่นแบบ Double monochromator
3. สามารถวัดการดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร และยังสามารถตั้งค่าได้จากเครื่องอีกว่าต้องการวัดในช่วงความยาวคลื่นได้ละเอียดถึง 0.1 นาโนเมตร
4. สามารถวัดความกว้างลำแสง (spectral bandwidth) ได้ในช่วง 0.1 – 5 นาโนเมตร
5. ชุดตรวจวัดแสง (Detector) เป็นชนิด Photomultiplier
6. ความแม่นยำของความยาวคลื่น (wavelength accuracy) มีความผิดพลาดไม่เกิน +0.15 นาโนเมตรในช่วง UV/VIS
7. ความถูกต้องของความยาวคลื่น (Wavelength reproducibility) มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน +0.06 นาโนเมตรในช่วง UV/VIS
8. มีชุด Integrating Sphere ใช้สำหรับวัดค่า Transmittance และ Reflectance ของผิวชิ้นงานตัวอย่าง โดยสามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลว
9. สามารถควบคุมอุณหภูมิของสารละลายตัวอย่างได้ในช่วง 5 – 90 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.17 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง UV – Spectrophotometer [17]

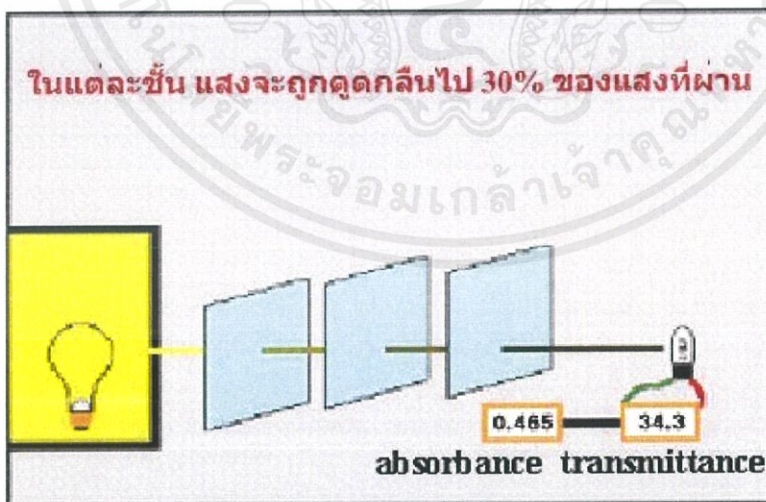
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ความสามารถในการวัดของเครื่อง UV-Spectrophotometer

1. ร้อยละของการทะลุผ่านของแสง (% Transmittance)
2. ร้อยละของการสะท้อนของแสง (% Reflectance)
3. ร้อยละของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (Diffuse %T)
4. ร้อยละของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง (Diffuse %R)
5. ร้อยละของ Variable Angle (%T)
6. ร้อยละของค่าการสะท้อนแสงของสเปคคิวลาร์ (Specular %R)
7. ร้อยละของการสะท้อนแสงรวม (Total %R)
8. การดูดกลืนของแสง (Absorbance)

2.6.4 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น (Beer-Lambert law)

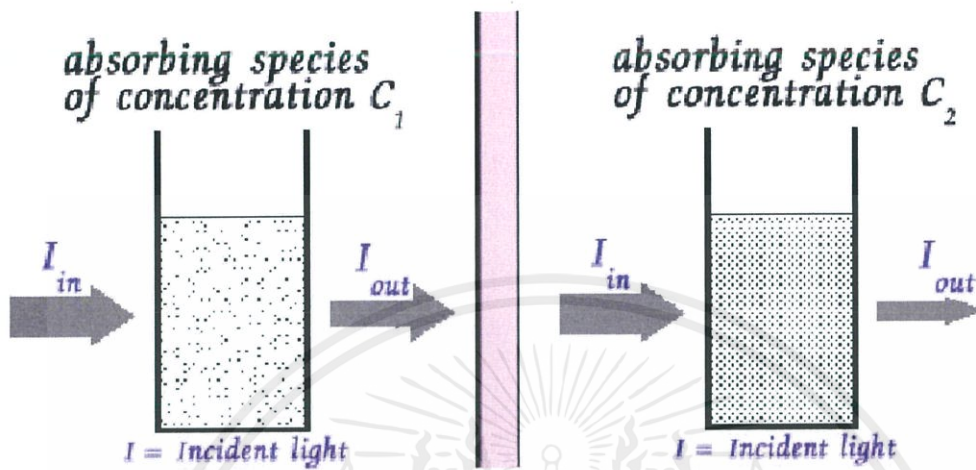
กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นแบบเดี่ยว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน



ภาพที่ 2.18 แสงจะถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลในแต่ละชั้น [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น



ภาพที่ 2.19 เปรียบเทียบแสงที่ทะลุผ่านสารความเข้มข้นมากและความเข้มข้นน้อย [17]

จาก ภาพที่ 2.19 ถ้าความเข้มข้นสารละลาย C_2 มากกว่าความเข้มข้นสารละลาย C_1 แสงที่ทะลุผ่านสารละลาย C_2 จะออกมาได้น้อยกว่าแสงที่ออกมาจากสารละลาย C_1 เนื่องจากที่ความเข้มข้นมากจะมีโมเลกุลที่สามารถดูดกลืนแสงสว่างทางเดินแสงอยู่มากกว่า เมื่อเราทำการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่แสงต้องเดินทางผ่าน จะเป็นที่มาของการรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

สมการกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

$$A = \epsilon cl$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

ϵ = molar absorptivity ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

l = ระยะที่แสงเดินทางผ่านตัวอย่าง (cm)

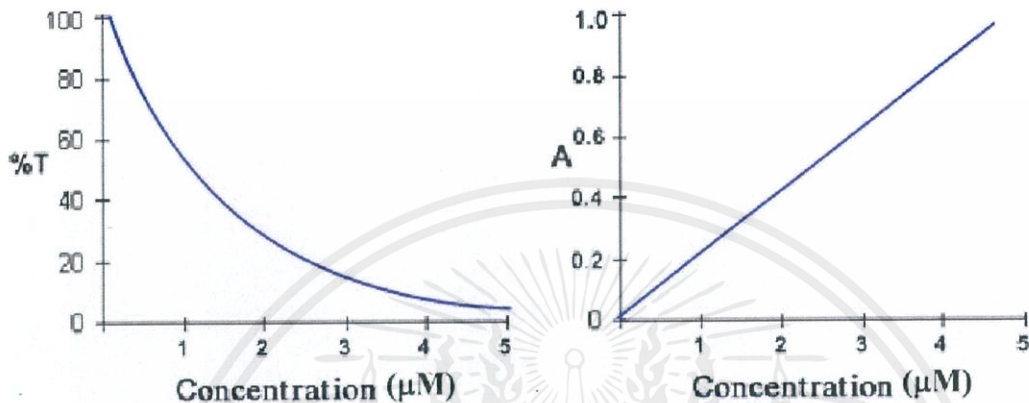
C = ความเข้มข้น (mol/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความเข้มข้นของสารอยู่ในหน่วยอื่นจะเขียนสมการได้เป็น

$$A = acl$$

โดยที่ a = absorptivity เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสารและความยาวคลื่น



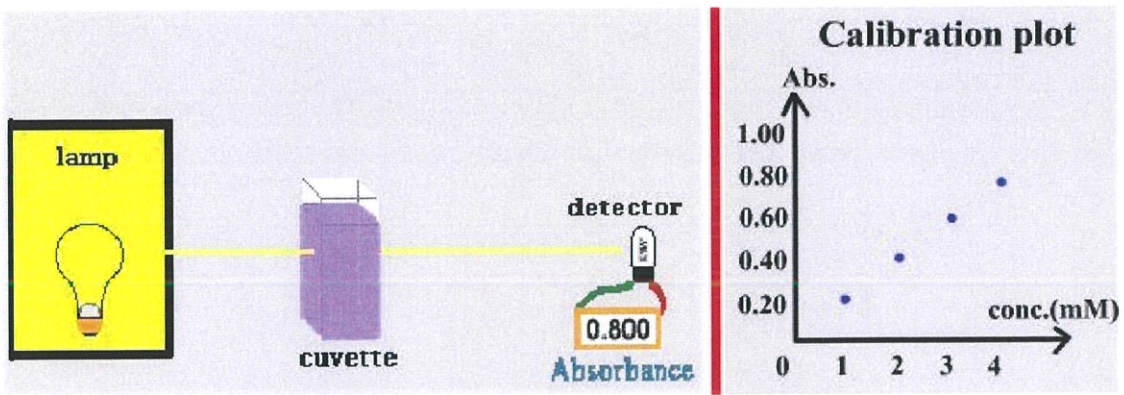
ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ %T และ absorbance [18]

กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (calibration curve)

กราฟความเข้มข้นมาตรฐานจะมีประโยชน์มากในเชิงการวิเคราะห์ เพราะสามารถใช้เทียบเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายที่ไม่ทราบค่าได้ โดยสารที่ไม่ทราบความเข้มข้นนั้นจะต้องอยู่ในช่วงความเข้มข้นมาตรฐานที่ทราบค่าแล้ว และกราฟมาตรฐานนั้นจะต้องเป็นเส้นตรงเสมอ

วิธีการสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน คือนำสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าความเข้มข้นที่แน่นอนอย่างน้อย 4-5 ความเข้มข้น มาวัดการดูดกลืนแสง จากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปเขียนกราฟ ส่วนความเข้มข้นที่ไม่ทราบค่าก็นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกัน และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ นั้นไปเปรียบเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐานหรือคำนวณได้จากสมการเชิงเส้นที่ได้จากกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณย้อนกลับมาเป็นความเข้มข้น เราก็จะทราบความเข้มข้นของสารนั้นได้

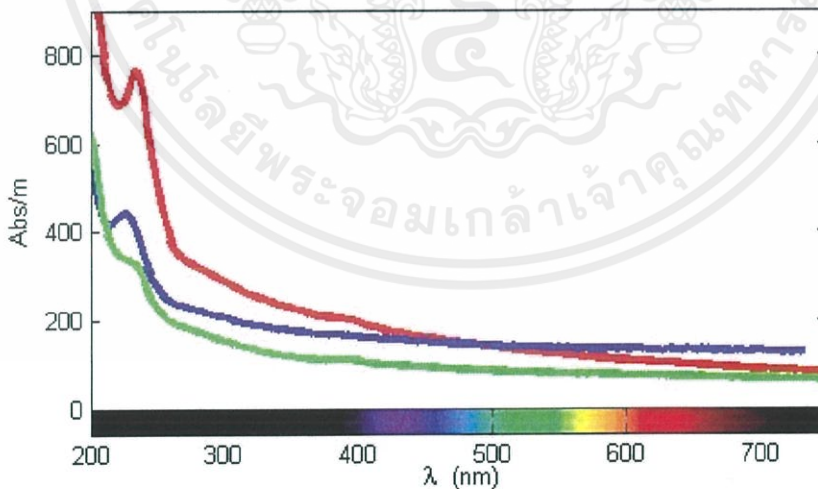
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.21 แสดงการสร้างกราฟมาตรฐาน [18]

2.6.5 การประยุกต์ใช้งาน

1. สามารถใช้วัดการดูดกลืนของแสงและการทะลุผ่านของคลื่นแสง เช่น ซีนตัวอย่างกระจก แว่นกันแดด คอนแทคเลนส์ กระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง หมึกพิมพ์ เครื่องสำอาง และตัวอย่างทางด้านชีวภาพ
2. สามารถใช้หาค่าการสะท้อนของแสงในชิ้นงานตัวอย่างฟิล์มและการเคลือบบนพื้นผิว ผ้า ผงโลหะ ผงออกไซด์ของโลหะ ผงสี พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น

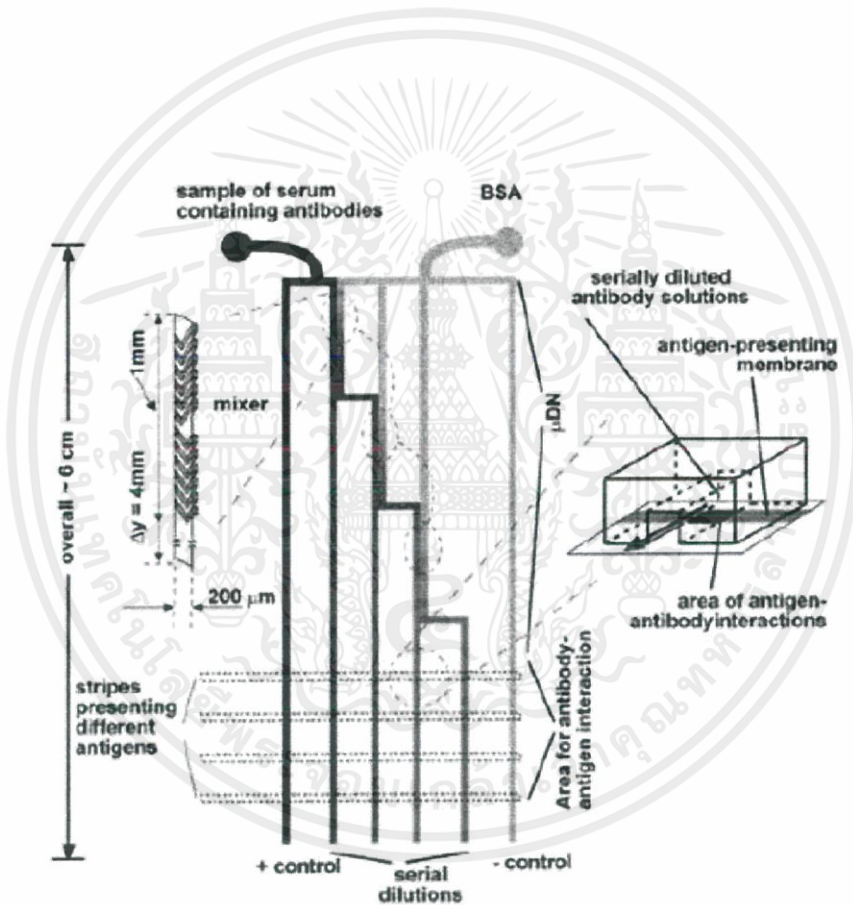


ภาพที่ 2.22 แสดงค่า Spectrum ที่ทำการวัดได้จากเครื่อง UV-Spectrophotometer [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

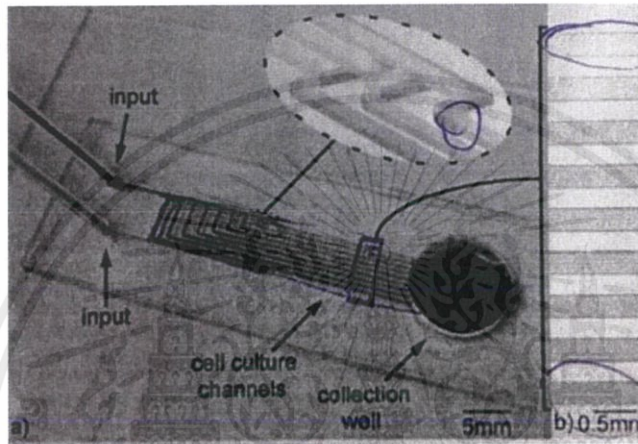
ในปี ค.ศ. 2003 X. Jiang และคณะ[3] ทำการวิจัยออกแบบ microfluidic chip โดยอาศัยหลักการของ mixing microfluidic โดยให้สารสองชนิดไหลเข้าหากันเป็นแบบโครงข่ายที่มีความยาวในแต่ละส่วนที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงในการ flow ของสารทั้งสองชนิดในแต่ละจุดไม่เท่ากัน แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับ flow rate ที่ใช้ด้วยเช่นกัน โดยการออกแบบให้มี inlet 2 ช่อง ซึ่งช่องแรกสำหรับการฉีด serum containing HIV antibodies และช่องที่สองสำหรับการฉีด bovine serum albumin เข้าไปเพื่อให้เกิดการเจือจางของ HIV Serum โดย chip รูปแบบนี้ออกแบบมาเพื่อให้ใช้สารที่มีปริมาณน้อย ซึ่งสามารถใช้ได้กับสารที่มีปริมาตรต่ำกว่า 1 ไมโครลิตร ซึ่งลักษณะของ Chip จะแสดงดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 แสดงตัวอย่างลักษณะของไมโครฟลูอิดิกสำหรับหาเชื้อ HIV [3]

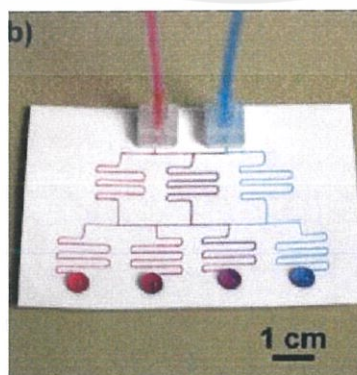
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 2006 *G. M. Walker* และคณะ[1] ได้ทำการออกแบบชิพโดยใช้หลักการคล้ายกับ mixing microfluidic โดยจะมีการสร้างท่อ microchannel ไว้บนแผ่น PDMS ทั้งสองแผ่นที่ทำการประกบกัน ซึ่ง chip นี้ตั้งใจที่จะออกแบบมาเพื่อให้ท่อ microchannel บนแผ่น PDMS ทั้ง 2 แผ่นประกบเข้าด้วยกันพอดี เพื่อให้สารทั้งสองชนิดนั้นเข้ามาผสมกันและมีการกำหนดระยะห่างให้เป็นความยาวต่าง ๆ ทำให้เกิดแรงดันค่าต่าง ๆ ภายในท่อ microchannel เพื่อให้สารผสมกันและได้ออกมาเป็นหลายความเข้มข้น โดยมีแถบที่ใช้ตรวจสอบการผสมกันของสารทั้งสองชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 แสดงตัวอย่างของไมโครฟลูอิดิกสำหรับตรวจสอบการเจือจางของสาร [1]

ในปี ค.ศ. 2013 *A. C. Glavan* และคณะ[2] ได้ออกแบบ Chip ในลักษณะที่เป็นขั้นๆ โดยการออกแบบนั้นจะให้สารสองชนิดไหลเข้าหากันด้วย flow rate ที่เหมาะสม เพื่อให้สารเข้ามาชนกันและเกิดการผสมกันเป็นลักษณะขั้นบันได และมีการสร้าง microchannel ให้มีลักษณะเป็นขดเพื่อเพิ่มระยะทางสำหรับการผสมกันของสารได้ดีขึ้น พร้อมทั้งมีช่อง outlet 4 ทาง โดย outlet แต่ละช่องจะมีความเข้มข้นของสารที่ถูกเจือจางแตกต่างกันไป [2] ซึ่งลักษณะของ Chip แสดงตาม ภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 ตัวอย่างของไมโครฟลูอิดิกสำหรับตรวจสอบการเจือจางของสาร [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะของ microfluidic chip	การประกบ PDMS	สารที่ใช้	อัตราการไหล (Flow rate)	ผลที่ได้รับ	เอกสารอ้างอิง
2 Layer	PDMS + PDMS	Blue and Yellow dry Each	0.44 uL/min	สารเกิดการ Dilution โดยจะสังเกตได้จากแถบตรวจสี	[1]
1 Layer	PDMS + Glass slide	0.05% Congo Red + 0.05% Methylene Blue	10 uL/min	สีที่ได้จาก Outlet แต่ละช่องมีสีที่ต่างกันซึ่งเกิดจากการ Dilution ของสารภายในอุปกรณ์	[2]
1 Layer	PDMS + Glass slide	serum containing HIV antibodies + bovine serum albumin	130 uL/min	จะแสดงแถบสีการเจือจางสารบริเวณแถบตรวจวัดด้านล่างของตัว Chip เพื่อตรวจดูการเจือจางของ HIV Serum ที่ได้ถูก Buffer เจือจางไป	[3]

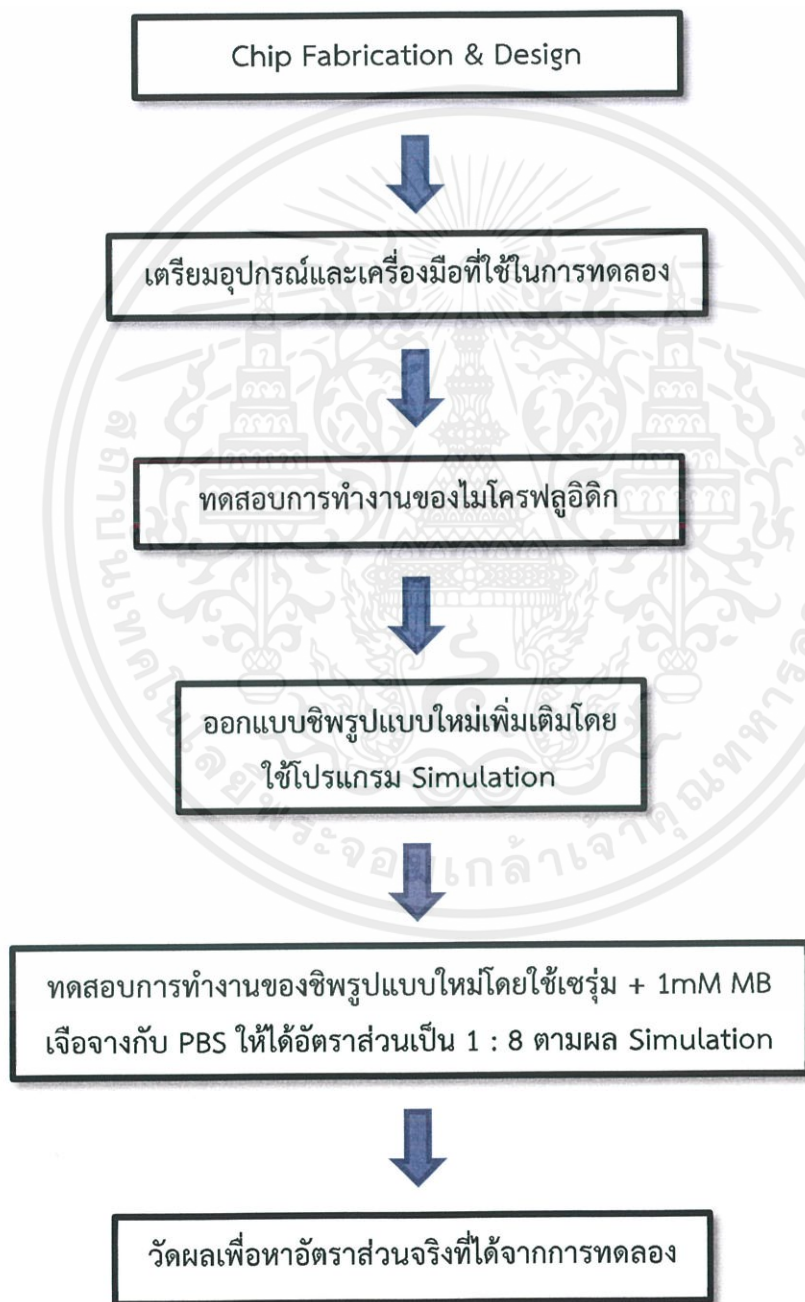
จากตารางนั้นทางผู้วิจัยจะทำเทคนิคและวิธีต่างๆเช่น รูปแบบของขดท่อรูปแบบการวางตัวของท่อที่สามารถให้สารเกิดการผสมกันได้ดีมากขึ้นและดูลักษณะของชิพที่มีการประกบที่แตกต่างกันเพื่อให้ชิพไมโครฟลูอิดิก ไคลูชั่นนั้นออกมาสมบูรณ์และมีความแข็งแรงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในขั้นตอนงานดำเนินงานวิจัยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงความรู้พื้นฐานของไมโครฟลูอิดิก ที่ใช้ในการเจือจางสาร และศึกษาหลักการสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกในแต่ละขั้นตอน เริ่มต้นตั้งแต่ออกแบบจนถึงการสร้างอุปกรณ์โดยจะมีแผนดำเนินงาน ดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

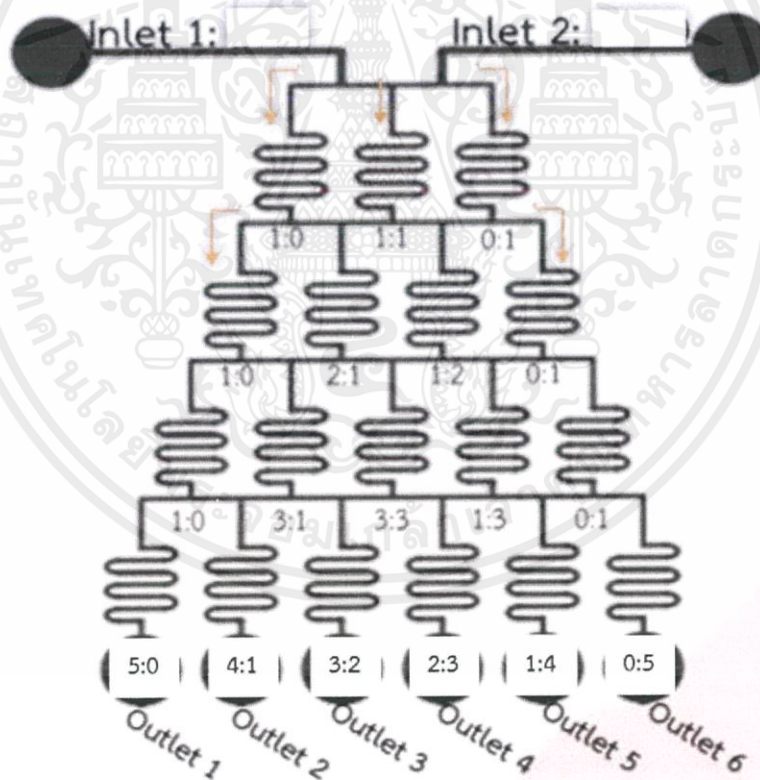
การทดลองที่ 1

3.1 การออกแบบและสร้างชิพไมโครฟลูอิดิกสำหรับเจือจางสาร และศึกษาวิธีวิเคราะห์ผลเพื่อบอกประสิทธิภาพการเจือจางสารของชิพไมโครฟลูอิดิก

3.1.1 Chip fabrication and design

3.1.1.1 การออกแบบ

การออกแบบจะทำการออกแบบในลักษณะเป็นขั้นๆ ซึ่งแต่ละขั้นจะมีชนิดในแต่ละขั้นเพื่อเพิ่มระยะทางและลดความเร็วให้สารที่ต้องการเจือจางทั้ง 2 ชนิด เกิดการผสมเข้าด้วยกัน และตัวไมโครฟลูอิดิก ไคลูชันนี้ออกแบบให้มีช่องทางเข้าของสาร (INLET) 2 ช่องและออกให้มีช่องทางออกของสาร (OUTLET) ทั้งหมด 6 ช่อง ซึ่งในแต่ละช่องจะมีความเข้มข้นของสารไม่เท่ากันตามอัตราส่วนดัง ภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงลักษณะการออกแบบของไมโครฟลูอิดิก ไคลูชัน

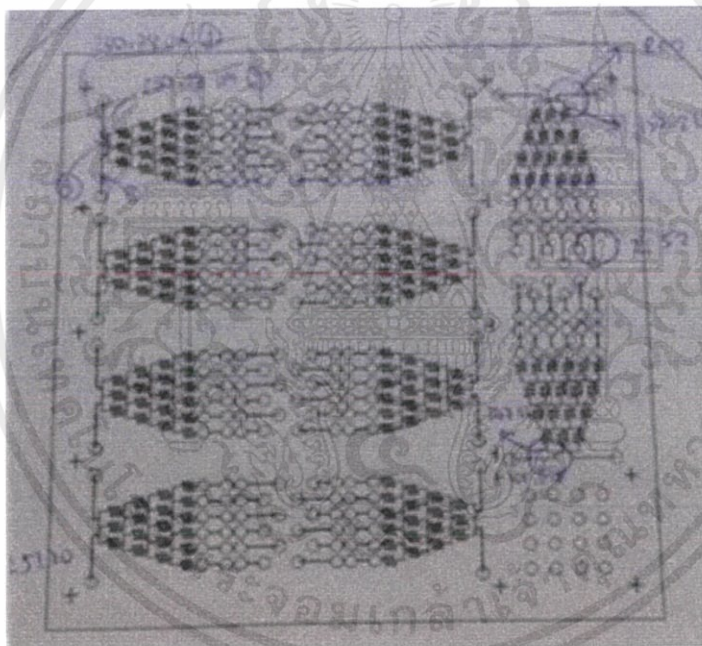
Note : อัตราส่วนที่ได้จากช่องทางออกของสาร (OUTLET) จะเป็นอัตราส่วนระหว่าง INLET 1 ต่อ INLET 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การสร้างแม่พิมพ์

การสร้างแม่พิมพ์ที่จะใช้สร้างตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก โดยสิ่งที่นำมาเป็นแม่พิมพ์นั้นจะใช้แผ่นซิลิกอน (Silicon Wafer) เพราะแผ่นซิลิกอนจะมีผิวที่ค่อนข้างเรียบเนียนและสามารถใช้สร้างตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกได้หลายครั้ง และลายที่ได้จากการกัดลายบนแผ่นซิลิกอนนั้นจะให้ลวดลายที่สวยงาม ซึ่งจะส่งผลให้ตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกมีทั้งความสวยงามและมีประสิทธิภาพอีกด้วย โดยขั้นตอนในการสร้างแม่พิมพ์จากแผ่นซิลิกอน มีดังนี้

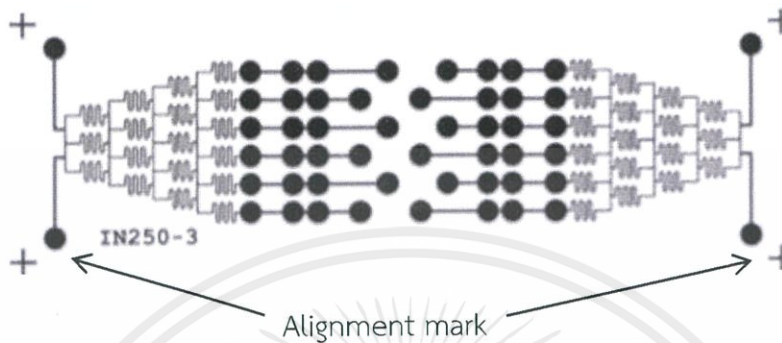
1. กำหนดขนาดของชิพไมโครฟลูอิดิกต่อขนาดของแม่พิมพ์ ว่าในแผ่นซิลิกอน 1 แผ่น จะสามารถสร้างตัวไมโครฟลูอิดิกได้กี่ชิ้น โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้ซิลิกอน 1 แผ่น สามารถผลิตตัวไมโครฟลูอิดิกได้ทั้งหมด 10 ชิ้น ดัง ภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะการออกแบบและการวางตัวของชิ้นงานเพื่อให้ผลิตได้มากที่สุด

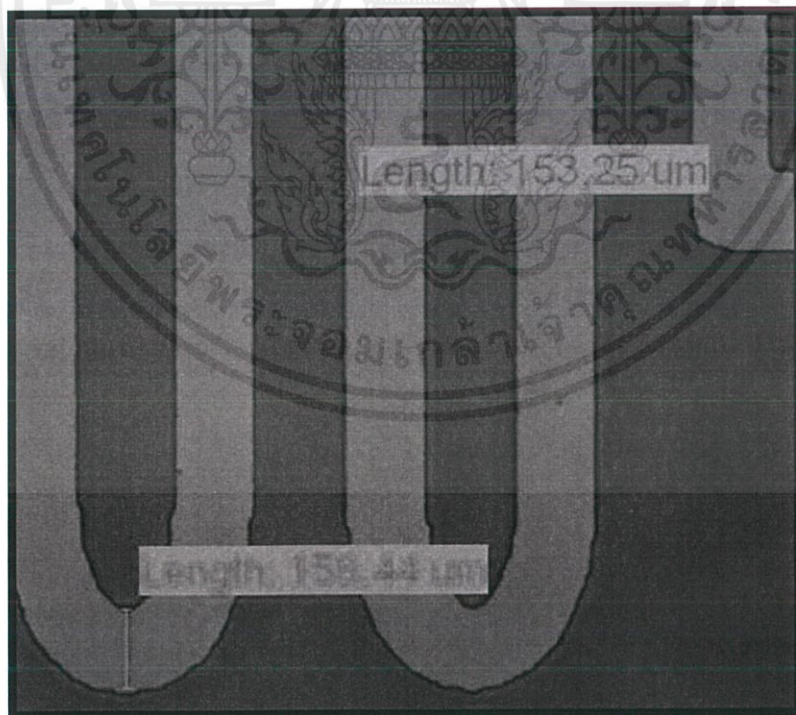
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดจุดมาร์ค (Alignment mark) ไว้สำหรับใช้ในการตัดแผ่น PDMS ออกเป็นชิ้น ๆ เพื่อแยกเป็นตัวไมโครฟลูอิดิก โดยลักษณะของจุดมาร์คจะมีลักษณะเป็นเครื่องหมายบวก ดัง ภาพที่ 3.3 เพราะเป็นเครื่องหมายที่ง่ายต่อการตัด และสามารถมองเห็นได้ชัดเจน



ภาพที่ 3.3 แสดงจุดที่ทำการมาร์คไว้เพื่อทำให้ง่ายต่อการตัดแบ่ง

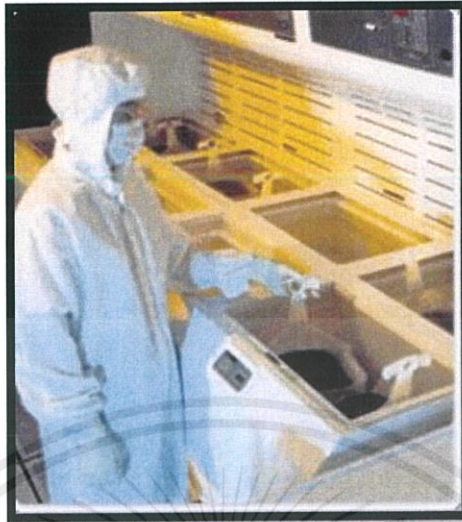
3. กำหนดขนาดท่อ Micro channel ภายในแม่พิมพ์ ด้วยโปรแกรม CorelDraw



ภาพที่ 3.4 แสดงการกำหนดขนาดท่อด้วยโปรแกรม CorelDraw

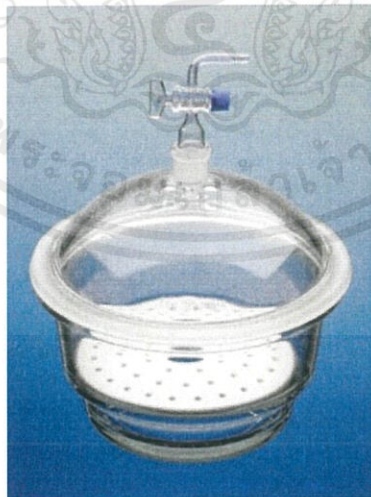
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่งเข้ากระบวนการกัดลายลงบนแผ่น Silicon Wafer ด้วยเทคนิค Photolithography



ภาพที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการสร้างลวดลายบนแผ่นซิลิกอน

5. อบ HMDS (Hexamethyldisilazane) ด้วยโถดูดอากาศ (Desiccator) เพื่อเคลือบผิวแม่พิมพ์ซิลิกอน เพื่อที่เวลาเท Polydimethylsiloxane หรือ PDMS ลงไปแล้ว เวลาลอกออกจากแม่พิมพ์ ซิลิกอนจะช่วยให้สามารถลอกออกได้ง่ายมากขึ้น และยังช่วยให้แผ่น PDMS ที่แห้งแล้วมีสภาพสมบูรณ์



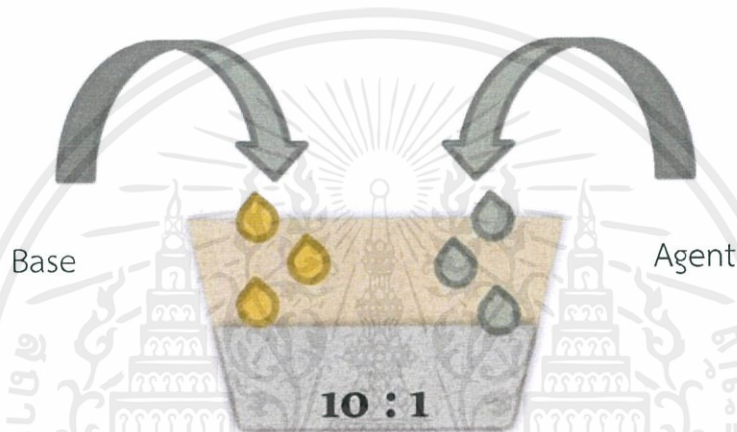
ภาพที่ 3.6 โถดูดอากาศ (Desiccator) ที่ใช้ในการอบ Hexamethyldisilazane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก ไคลูชั่น

ตัวชิพไมโครฟลูอิดิก ไคลูชั่นนั้นจะสร้างจากการการนำแผ่น PDMS ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยแผ่นซิลิกอนแล้วนำมาประกบกับแผ่นกระจก (Glass slide) ด้วยการใช้กระบวนการออกซิเจนพลาสมา (Oxygen Plasma) เพื่อให้ประกบกันได้ดีมากขึ้น โดยขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก ไคลูชั่นนั้นจะต้องมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ทำการผสม Silicone Elastomer Base กับ Silicone Elastomer Agent ในสัดส่วน 10 : 1 และทำการคนให้เข้ากัน ดัง ภาพที่ 3.7 ซึ่งเมื่อผสมกันดีแล้วจะให้ความหนืดมาก และเกิดฟองอากาศ



ภาพที่ 3.7 ภาพจำลองแสดงอัตราส่วนระหว่าง Base และ Agent

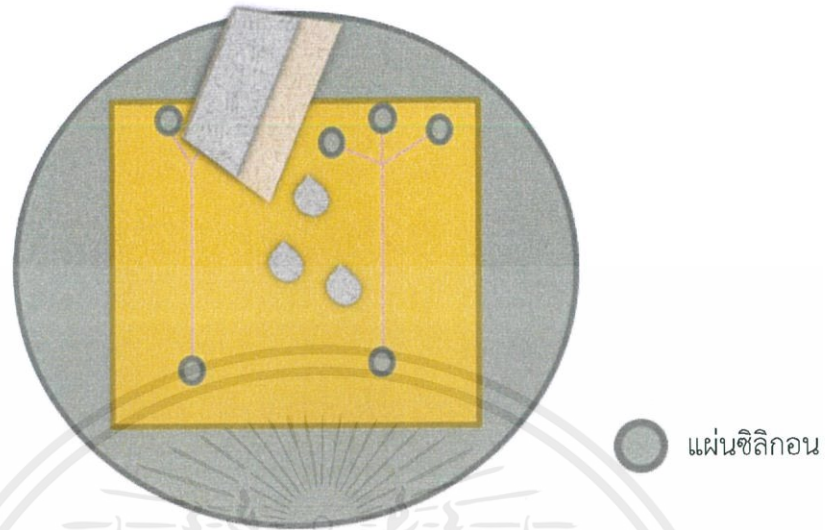
2. ทำการไล่ฟองอากาศด้วยโถดูดอากาศ (Desiccator) ใช้เวลาในการไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 20 นาที



ภาพที่ 3.8 โถดูดอากาศ (Desiccator) ที่ใช้ในการไล่ฟองอากาศที่เกิดจากการคน PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการเท Elastomer Base ที่ผสมกับ Elastomer Agent ลงบนแม่พิมพ์แผ่นซิลิกอนที่ได้จากการกระบวนการกัดลายเป็นลวดลายตามที่ได้ออกแบบแล้ว ดัง ภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.9 แสดงภาพจำลองการเท PDMS ลงบนแม่พิมพ์แผ่นซิลิกอน

4. นำแม่พิมพ์ที่ได้มาใส่ฟองอากาศด้วยเครื่องควบคุมความดัน (ถึงความดัน)

4.1 ถ้าลายที่ออกแบบเล็กจะใช้เวลาไล่ประมาณ 1 ชม.

4.2 ถ้าลายที่ออกแบบใหญ่จะใช้เวลาไล่ประมาณ 30 นาที



ภาพที่ 3.10 ภาพจำลองการไล่ฟองอากาศด้วยถังควบคุมความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. อบแม่พิมพ์ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 75 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



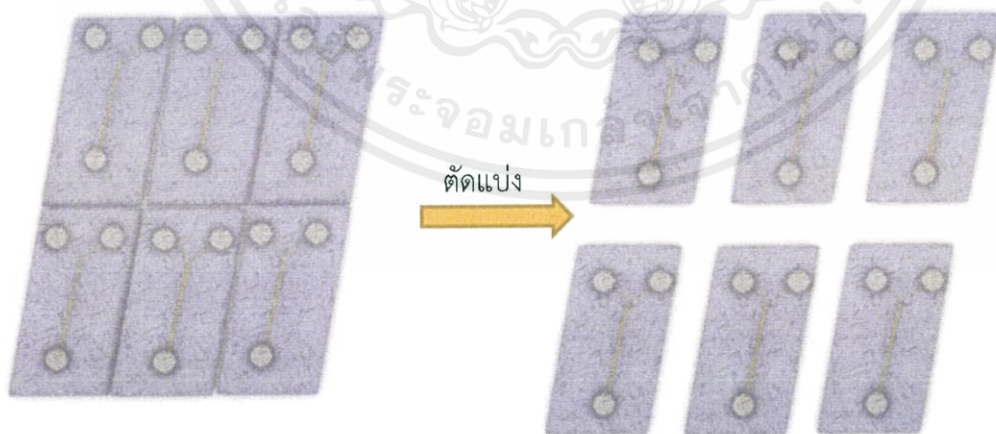
อบที่อุณหภูมิ 75 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ภาพที่ 3.11 แสดงการอบแผ่นซิลิกอนที่ทำการเท PDMS แล้ว

6. ลอกแผ่น (PDMS) ออกจากแม่พิมพ์ Silicon Wafer

7. ตัดแบ่งแผ่น PDMS ที่ลอกออกจากแม่พิมพ์เป็นชิ้น ๆ ตามจุดมาร์คที่ได้ทำการออกแบบไว้

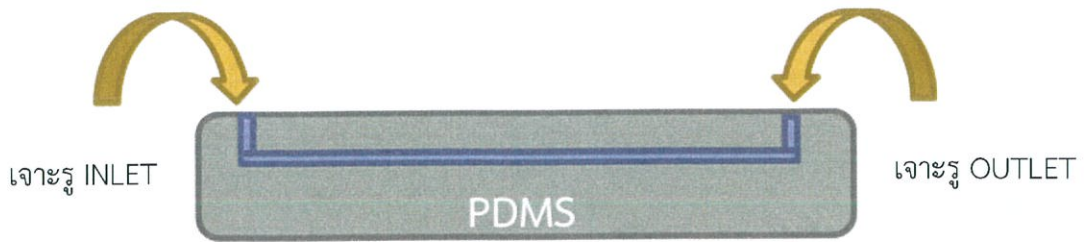
ข้างต้น



ภาพที่ 3.12 แสดงการตัดแบ่งตัวไมโครฟลูอิดิกออกเป็นชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เจาะรูเพื่อต่อท่อซิลิโคน ซึ่งจะใช้เป็นช่อง Inlet และ Outlet (ยังไม่ต้องต่อท่อซิลิโคน)



ภาพที่ 3.13 แสดงบริเวณที่ทำการเจาะรูจุดที่ต้องการต่อท่อซิลิโคน

9. เตรียมทำความสะอาด Glass Slide เพื่อนำไปประกบกับแผ่น PDMS ที่เตรียมไว้

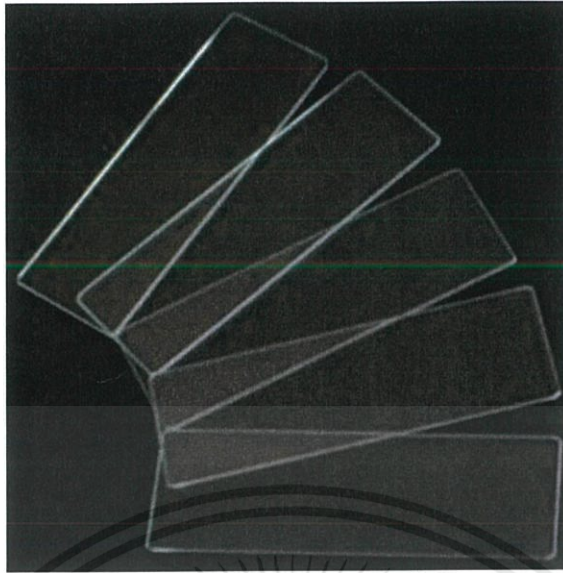
10. เตรียมวอร์มเครื่อง Oxygen Plasma เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่ก๊าซชนิดอื่นออก จะสังเกตเห็นว่าถ้าเหลือแต่ก๊าซออกซิเจนตรงบริเวณตาแมวจะเป็นสีขาว แต่ถ้ายังมีก๊าซชนิดอื่นอยู่ตรงบริเวณตาแมวจะเป็นสีชมพู



ภาพที่ 3.14 เครื่องออกซิเจนพลาสมา (Oxygen Plasma)

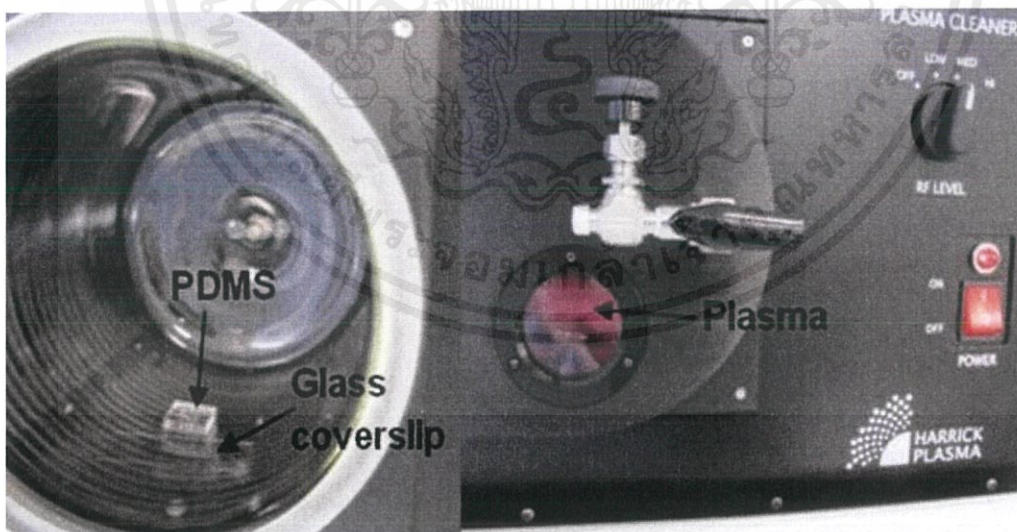
11. เตรียม Glass slide และ PDMS สำหรับ Oxygen Plasma ต้องสะอาดและไม่มีเศษฝุ่นติดอยู่บนผิวของกระจก เพื่อการประกบกันอย่างสมบูรณ์ โดยจะเตรียมทั้งหมด 5 แผ่น ภาพที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.15 เตรียมทำความสะอาดกระจก (Glass slide)

12. นำแผ่น PDMS และ Glass slide ใส่เข้าไปในเครื่อง Oxygen Plasma โดยการหยาด้านที่ต้องการจะประกบเข้ากันขึ้นด้านบน ดัง ภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 แสดงสีของแก๊สและการวาง PDMS และกระจกในเครื่องออกซิเจนพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ทำการ Plasma ด้วยก๊าซออกซิเจนเพื่อสร้างพันธะในการประกบกันของแผ่น PDMS และ Glass slide ด้วยกำลัง 30 watt เป็นเวลาประมาณ 1 นาที 20 วินาที (ตามเวลาเครื่อง Oxygen Plasma)

14. ประกบแผ่น PDMS กับ Glass slide เข้าด้วยกันทันทีหลังจากผ่านกระบวนการ Oxygen Plasma เสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้การประกบนั้นเกิดความสนิทกันอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 3.17 แสดงตัวอุปกรณ์ที่ทำการประกบกันแล้ว

15. ทำการต่อท่อซิลิโคนเข้ากับตัวอุปกรณ์ที่ได้ทำการเจาะรูไว้ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการ Oxygen Plasma ดัง ภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แสดงการต่อท่อเข้ากับตัวอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. อบตัวอุปกรณ์ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 75 องศา เวลา 30 นาที อีกครั้งเพื่อให้แผ่น PDMS แข็ง และมีความแข็งแรงมากขึ้น



อบที่อุณหภูมิ 75 องศา เป็นเวลา 30 นาที

ภาพที่ 3.19 ทำการอบตัวอุปกรณ์ที่ทำการต่อท่อแล้วอีกครั้งเพื่อความแข็งแรง

17. ได้เป็นตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก ไตลูชั่น (Microfluidic Dilution)



ภาพที่ 3.20 อุปกรณ์ที่ผ่านกระบวนการสร้างอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.4 ขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองและการเตรียมการทดลอง

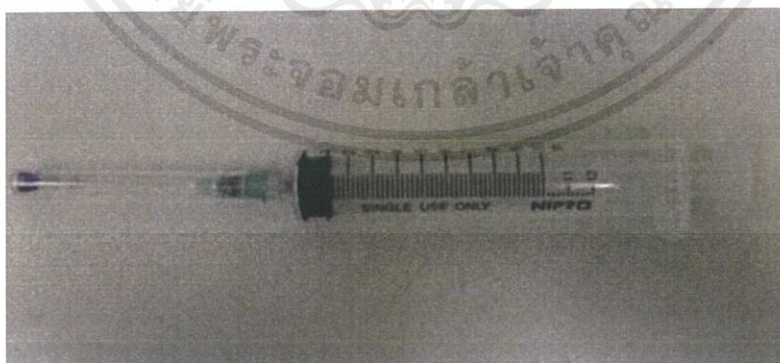
1. อุปกรณ์การทดลอง มีดังต่อไปนี้

1.1 เครื่อง Syringe pump รุ่น NE-1000



ภาพที่ 3.21 เครื่อง Syringe Pump รุ่น NE-1000

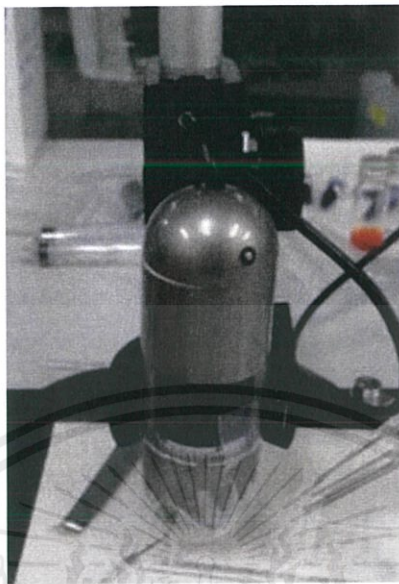
1.2 หลอดฉีดยา (Syringe) ขนาด 10 มิลลิลิตร



ภาพที่ 3.22 หลอดฉีดยา ขนาด 10 มิลลิลิตร

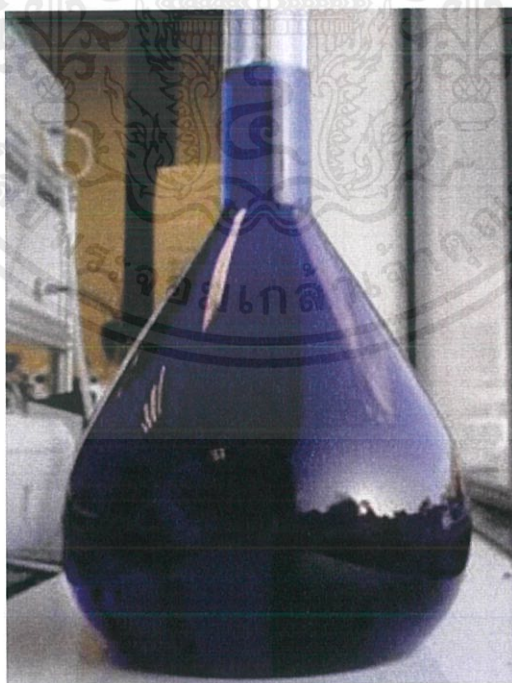
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 กล้องไมโครสโคปขนาดพกพา (USB Microscope)



ภาพที่ 3.23 กล้อง USB Microscope

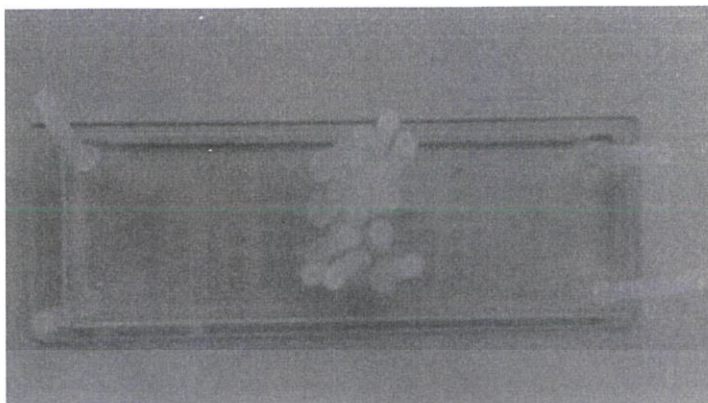
1.4 สารละลาย Methylene Blue ความเข้มข้น 1 mM



ภาพที่ 3.24 Methylene Blue 1 mM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก ไคล์ชั่น



ภาพที่ 3.25 Microfluidic Dilution

3.1.1.5 การเตรียมการทดลอง

การจัดเตรียมเครื่องมือที่ต้องการใช้ในการทดลองจะต้องจัดเตรียม ดัง ภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 การจัดเตรียมเครื่องมือที่ต้องการใช้ในการทดลอง

จาก ภาพที่ 3.26 โดยในการทดลองนี้จะใช้สารเพียง 2 ชนิด ได้แก่ สารละลาย Methylene Blue ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ฉีดเข้าไปที่ช่อง Inlet 1 และน้ำไร้ประจุ (DI Water) ฉีดเข้าไปที่ช่อง Inlet 2 โดยใช้อัตราการไหลระหว่าง Methylene Blue ต่อน้ำไร้ประจุ ดังนี้ 20 : 20 ไมโครลิตร/นาที 10 : 10 ไมโครลิตร/นาที และ 10 : 5 ไมโครลิตร/นาที และใช้เทคนิคในการตรวจวัด 2 วิธี คือ ใช้โปรแกรม Image J และวัดค่าโดยใช้เครื่อง UV-Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.6 ทดลองหาอัตราการไหล (Flow rate)

ทดลองหา Flow rate ที่เหมาะสมที่สุด ที่สารเมทิลีนบลูกับน้ำจะสามารถผสมกันได้ดี และดูผลของความหนืดของสารที่แตกต่างกันจะมีผลต่อ Flow rate หรือไม่ เพื่อให้สารเกิดการเจือจางกันภายในตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก และไหลออกมาทางช่องทางออกสาร (Outlet) โดยจะมีการวางแผนทางการทดลองปรับ Flow rate ไว้ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลอง

ครั้งที่	Flow rate (Methylene Blue : DI Water) $\mu\text{L}/\text{min}$
1	20 $\mu\text{L}/\text{min}$: 20 $\mu\text{L}/\text{min}$
2	10 $\mu\text{L}/\text{min}$: 10 $\mu\text{L}/\text{min}$
3	10 $\mu\text{L}/\text{min}$: 5 $\mu\text{L}/\text{min}$

** ทดลอง Flow Rate ต่ำเพื่อให้สารเกิดการผสมกันได้ดีขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการเจือจาง (Dilution) มากขึ้น

การทดลองที่ 2

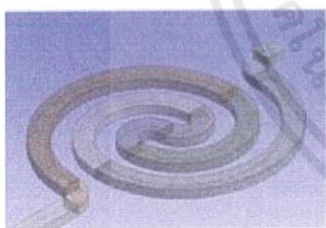
3.2 การศึกษาการออกแบบชิพโดยอาศัยโปรแกรมจำลองแบบ (simulation) และการทดสอบประสิทธิภาพชิพในการเจือจางน้ำเลือด (serum)

3.2.1 Simulation

การจำลองแบบ simulation นี้ได้รับข้อมูลและผลการจำลองทั้งหมด จาก รศ.ดร. เอกชัย จันทสาโร และ นายเท็ดไท เทียนทอง สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีความร่วมมือกันระหว่างศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์; TMEC, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร และวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างแบบจำลองหรือการ Simulation จะเป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบตัว Micro Mixing ก่อนที่จะลงมือสร้างอุปกรณ์จริงขึ้นมาโดยการสร้างแบบจำลองนั้นจะแบ่งเป็น ดังนี้

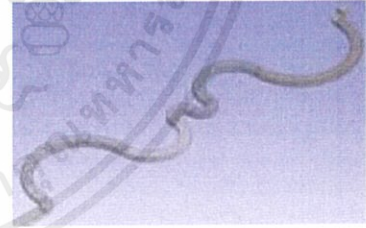
3.2.1.1 จำลองรูปแบบของท่อ Micro Mixing โดยจะทำการจำลองเป็น 5 ประเภท ดังนี้



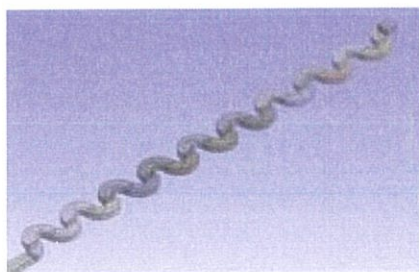
Outer-inlet Spiral



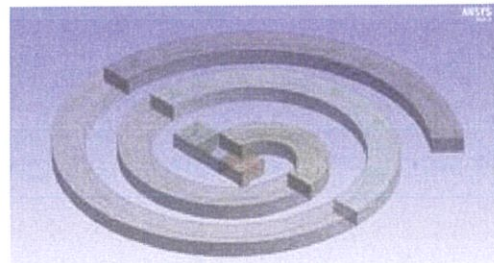
Reverse with Average R



Reverse with Various R



Reverse with R100



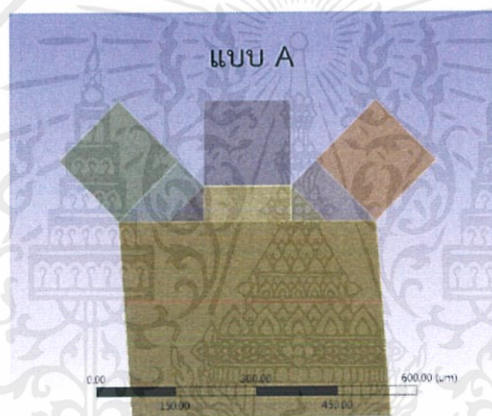
Center-inlet Spiral

ภาพที่ 3.27 รูปแบบท่อ Micro Mixing ประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ภาพที่ 3.27 แบบของขดท่อนั้นจะมีลักษณะเป็น ดังนี้ 1.) แบบ Outer-inlet Spiral จะมีลักษณะเป็นขดวงกลมแต่จะมีลักษณะการหมุนที่มีทั้งหมุนเข้าและหมุนออก 2.) ขดท่อแบบ Reverse with Average R จะมีลักษณะของขดท่อที่โค้งไปมาคล้ายกับงู 3.) ขดท่อแบบ Reverse with Various R จะมีลักษณะคล้ายกับการนำขดท่อ Outer-inlet Spiral มาดึงเป็นเส้นตรงจะให้โค้งที่มีขนาดไม่เท่ากัน 4.) ขดท่อแบบ Reverse with R100 จะมีลักษณะคล้ายกับขดท่อแบบ Reverse with Various R แต่จะมีความถี่ของขดท่อมากกว่า และ 5.) ขดท่อแบบ Center-inlet Spiral จะเป็นการหมุนวนของขดท่อ โดยจะมีลักษณะการหมุนของขดท่อจากด้านในออกมาด้านนอก ซึ่งด้วยความที่ขดท่อต่างกันนั้นจะทำให้ได้ค่าการผสมกันของสารภายในท่อที่ต่างกันด้วย และทำการหารูปแบบและอัตราการไหลที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็น Micro Mixing เพื่อจะได้นำไปประยุกต์ใช้และพัฒนา Microfluidic Dilution ต่อไป

3.2.1.2 ออกแบบทางเข้าของสาร (Inlet)



ภาพที่ 3.28 รูปแบบของช่อง Inlet

จาก ภาพที่ 3.28 แสดงรูปแบบของช่อง Inlet แบบ A โดย ช่องแบบ A นั้นจะมีขนาดของช่อง Inlet ที่เท่ากันทั้ง 3 ช่อง โดยการ Simulation นั้นจะสามารถทำให้เราทราบผลเบื้องต้นก่อนที่จะลงมือทำจริง เพื่อความสะดวกในการทำงานวิจัย

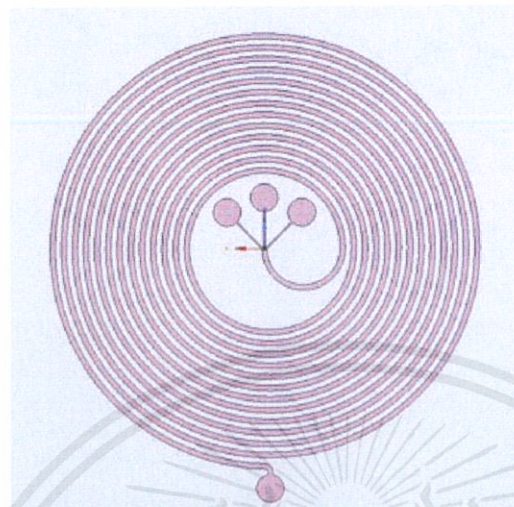
3.2.1.2 รูปแบบของชิพ Micro Mixing

การออกแบบนั้นจะต้องคำนึงถึงความเล็กเป็นอย่างแรกเพราะเมื่อมีขนาดเล็ก จะสามารถทำให้ประหยัดพื้นที่ในการสร้างชิพงานและใช้ปริมาณสารน้อยลง ดังนั้น ชิพจึงได้มีการออกแบบเป็น 2 แบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2.1 แบบเต็ม (Full)

ขนาด 45 mm x 45 mm , Volume 86.0705 mm³

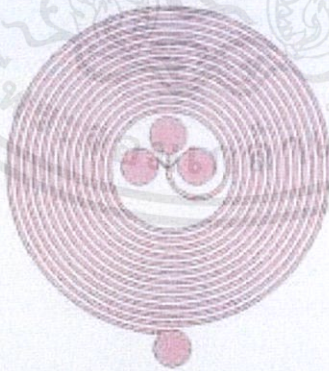


Full Scale Chip

ภาพที่ 3.29 รูปแบบ Micro Mixing แบบเต็ม

3.2.1.2.2 แบบครึ่ง (Half)

ขนาด 22.5 mm x 22.5 mm , Volume 11.5524 mm³



Semi-Half Scale Chip:

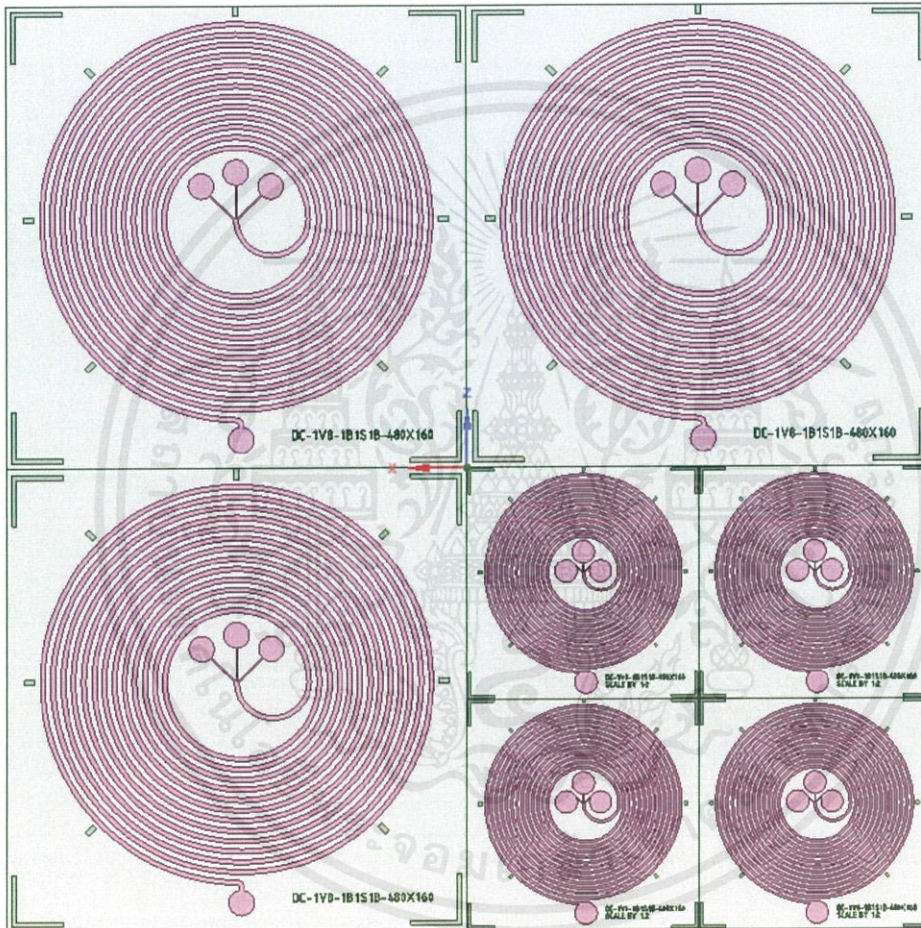
Half Scale on the top-view
but the depth remains the same.

ภาพที่ 3.30 รูปแบบ Micro Mixing แบบครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 การสร้างชิพ Micro Mixing

การสร้างชิพ Micro Mixing นั้นจะใช้วิธีการสร้างเดียวกันกับการทดลองที่ 1 ซึ่งจะมีทั้งหมด 17 ขั้นตอนดังที่กล่าวไปในการทดลองที่ 1 ข้างต้น ดังนั้น จึงได้ทำการออกแบบชิพสำหรับทำเป็นแม่พิมพ์ซิลิกอน เวเฟอร์ โดยในแผ่นแม่พิมพ์นั้นจะมี Micro Mixing ทั้งเป็นแบบ เต็ม (Full) และแบบ ครึ่ง (Half) ดัง ภาพที่ 3.31



ภาพที่ 3.31 รูปแบบการวางตัวของชิพเพื่อจะทำเป็นแม่พิมพ์ซิลิกอนเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.4 ขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองและการเตรียมการทดลอง

- เครื่อง Syringe pump รุ่น NE-1000 ทั้งหมด 3 เครื่อง
- หลอดฉีดยา (Syringe) ขนาด 10 มิลลิลิตร
- กล้องไมโครสโคปขนาดพกพา (USB Microscope)
- สารละลาย Methylene Blue ความเข้มข้น 1 mM
- เซรุ่ม (Serum)
- PBS (Phosphate-buffered saline)
- ตัวอุปกรณ์ Micro Mixing (ภาพที่ 3.32)

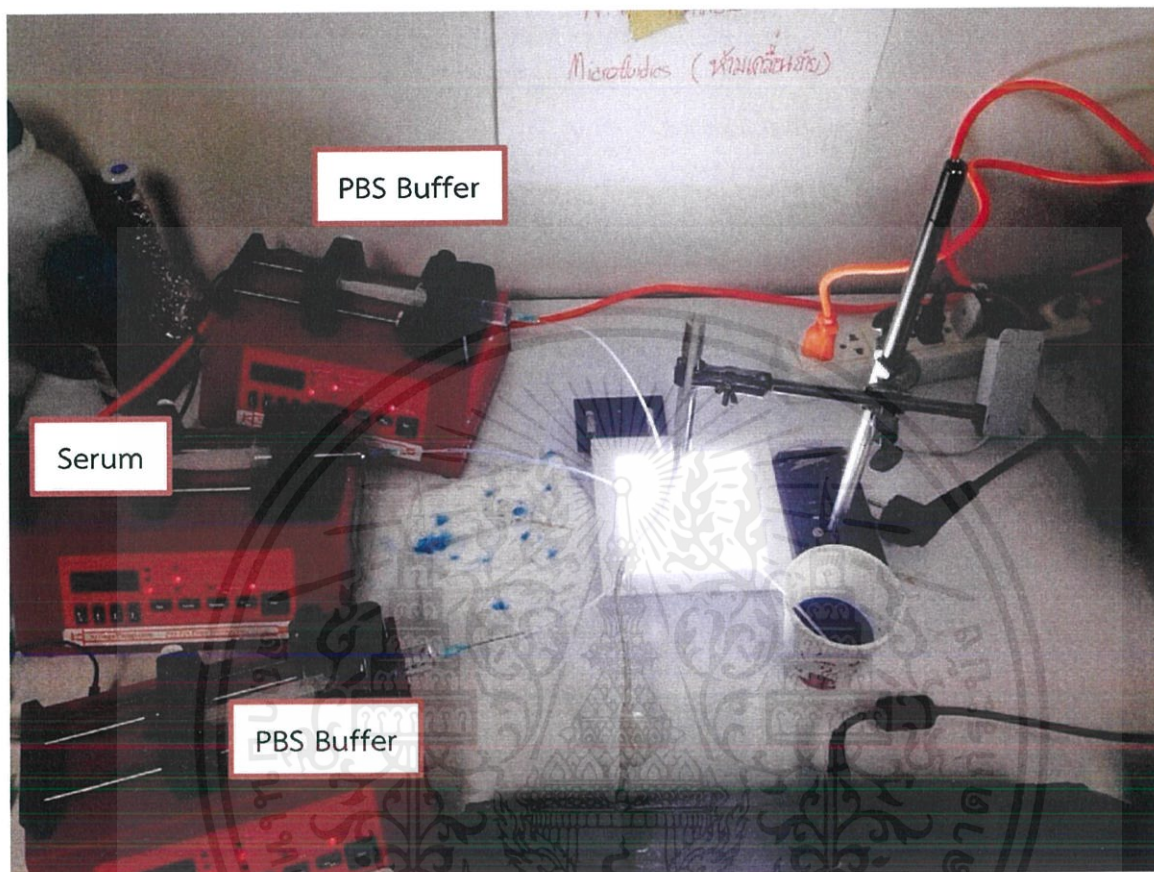


ภาพที่ 3.32 ชิพ Micro Mixing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.5 การเตรียมการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองจะต้องจัดเตรียมดัง ภาพที่ 3.33



ภาพที่ 3.33 การจัดเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง

สรุปการทดลองที่ 1 กับการทดลองที่ 2 จะแตกต่างกันเพราะรูปแบบของชิพแตกต่างกัน โดยการทดลองที่ 1 จะมีช่องทางเข้าสาร (Inlet) 2 ช่องเท่านั้น แต่ในการทดลองที่ 2 จะมีช่องทางเข้าสารทั้งหมด 3 ช่องจึงจะต้องใช้เครื่อง Syringe Pump มากกว่าเดิม 1 เครื่อง และสารที่ใช้ก็จะแตกต่างกัน โดยการทดลองที่ 1 จะใช้สาร 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายเมทิลีนบลูและน้ำไร้ประจุ ในขณะที่การทดลองที่ 2 นั้นจะใช้สาร 2 ชนิด คือ น้ำเลือด (serum) ที่ผสมเมทิลีนบลู 1 mM (เข้าช่องกลางของ inlet) และสารละลายบัฟเฟอร์ (เข้า 2 ช่องริมของ inlet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.6 อัตราการไหลสำหรับชิพแบบเต็ม (Full) และแบบครึ่ง (Half)

ตารางที่ 3.2 อัตราการไหลชิพแบบเต็ม (Full)

Q	-01	-02	-03
Inlet	Q at Inlet [$\mu\text{L}/\text{min}$]		
Inlet W1	70	140	210
Inlet S	20	40	60
Inlet W2	70	140	210

ตารางที่ 3.3 อัตราการไหลชิพแบบครึ่ง (Half)

Q	-01	-02	-03
Inlet	Q at Inlet [$\mu\text{L}/\text{min}$]		
Inlet W1	52.5	105	157.5
Inlet S	15	30	45
Inlet W2	52.5	105	157.5

3.3 วิธีการตรวจสอบการเจือจางของสาร

3.3.1 ใช้โปรแกรม Image J เพื่อหาค่าความเข้มของสี (Intensity) จากภาพถ่าย

โดยทำการถ่ายภาพบริเวณจุดพักสารก่อนที่สารจะออกทางช่อง Outlet โดยนำภาพที่ได้ไปปรับสีให้อยู่ในรูปขาว-ดำ (8 Bit) จากนั้นให้โปรแกรมหาค่าความเข้มสีแบบ Gray Scale ตรวจสอบความเข้มสีในแต่ละจุดและนำค่าความเข้มสีที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อดูผลการเจือจางสารจาก Outlet ทั้ง 6 ช่อง โดยสารที่ถูกเจือจางมากควรให้สีที่จางลงเรื่อย ๆ และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับค่าการเจือจางที่ได้ออกแบบไปข้างต้น โดยแนวโน้มของกราฟที่ได้ควรจะต้องมีการเปลี่ยนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) โดยเรียงลำดับจากความเข้มข้นมากไปหาความเข้มข้นน้อย (หากกราฟยังไม่เป็น Linear ให้ทำการปรับเปลี่ยน Flow rate ที่ใช้ต่อไป)

3.3.2 การใช้เครื่อง UV-vis Spectrophotometer หาปริมาณสาร

โดยนำสารที่ได้จาก Outlet แต่ละช่องไปวัดไปหาค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (Lambda Max; λ_{max}) จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณหาความเข้มข้น โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลูที่สร้างขึ้น

การสร้างกราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลูทำได้ ดังนี้

- เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้นในช่วง 0.001563 – 0.1 มิลลิโมลาร์
- นำสารละลายที่เตรียมขึ้นไปวัดสเปกตรัมยูวี
- พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นสารเมทิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max}
- หาความสัมพันธ์ของเส้นกราฟเพื่อให้ได้สมการเส้นตรง

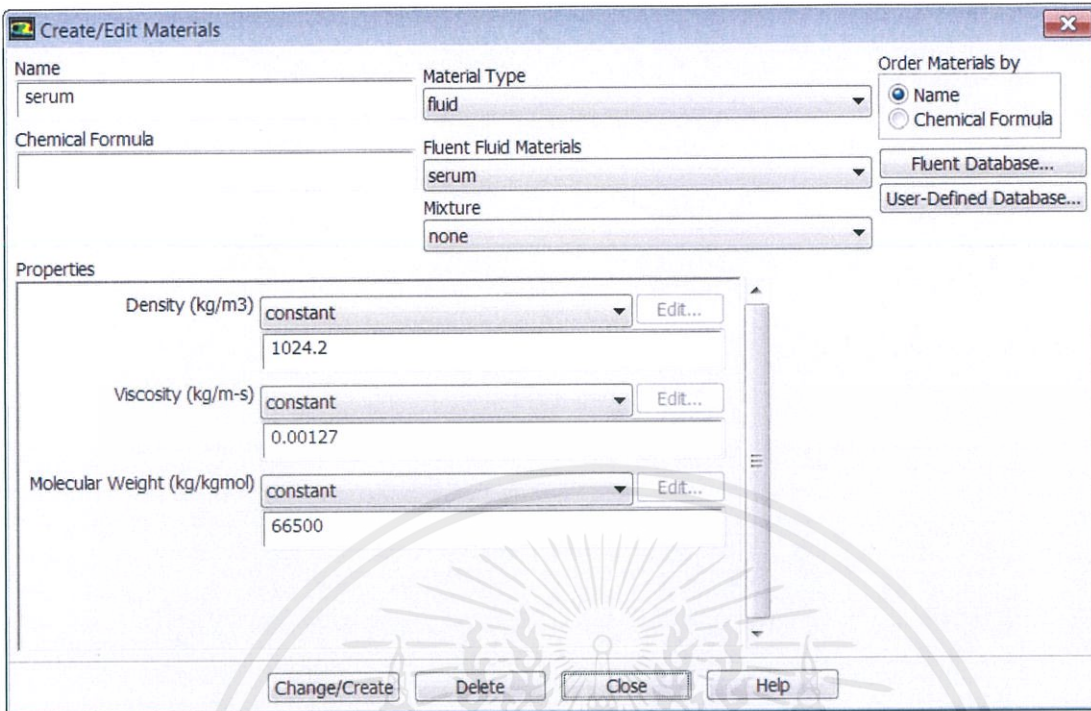
$y = mx + c$ ซึ่งสามารถนำไปใช้หาความเข้มข้นของสารเมทิลีนบลูจากสารตัวอย่าง unknown ได้ โดยแทนค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max} ไปที่ y ซึ่งจะทำให้คำนวณได้ค่าความเข้มข้นของสารออกมาจากตัวแปร x ในสมการ

การที่เลือกใช้เทคนิคการตรวจสอบการเจือจางของสารทั้ง 2 แบบนี้ เนื่องจากผู้วิจัยต้องการตรวจสอบว่าผลที่ได้มานั้นเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วให้ผลที่คล้ายหรือใกล้เคียงกันหรือไม่

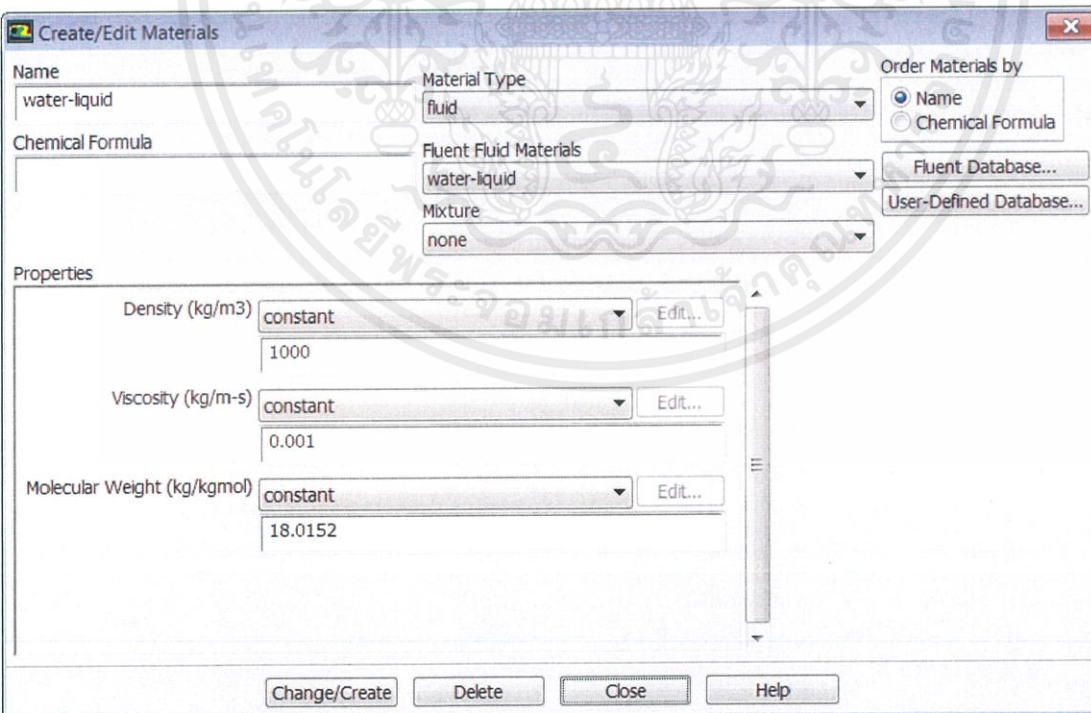
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง คือ ค่าความหนาแน่น (density), ความหนืด (viscosity) และ น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของสาร โดยในการทดลองจะทำการเจือจาง serum ด้วยน้ำหรือสารละลายบัฟเฟอร์ ดังนั้น จึงมีการใส่ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ทั้งของ serum และ น้ำ เข้าไปในโปรแกรม เพื่อให้สามารถคำนวณและจำลองรูปแบบชีพออกมาโดยค่าความหนาแน่น, ความหนืด และ น้ำหนักโมเลกุลของ serum ที่ใช้ในการคำนวณ คือ 1024.2 kg/m³, 0.00127 kg/m-s และ 66500 kg/kgmol ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ของน้ำ คือ 1000 kg/m³, 0.001 kg/m-s และ 18.0152 kg/kgmol ตามลำดับ โดยรูปแบบของโปรแกรมเมื่อทำการใส่ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัว Serum จะเป็น ดัง ภาพที่ 3.34 และรูปแบบของโปรแกรมเมื่อทำการใส่ค่าพารามิเตอร์สำหรับน้ำจะเป็น ดัง ภาพที่ 3.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.34 ค่าที่ใช้ในการ Simulation ของ Serum



ภาพที่ 3.35 ค่าที่ใช้ในการ Simulation ของน้ำ

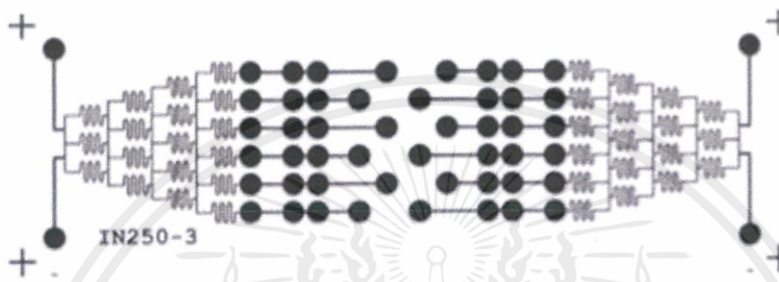
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

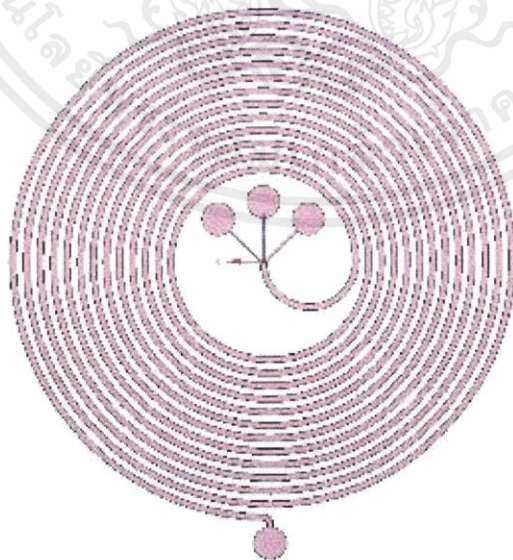
ในบทนี้จะแสดงถึงผลการทดลองทั้งหมดจากขั้นตอนการพัฒนาไมโครฟลูอิดิกไดลูชัน ที่ผู้วิจัยได้ศึกษา ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลัก ได้แก่

ตอนที่ 1 : การทดลอง ไมโครฟลูอิดิก ไดลูชัน รูปแบบที่ 1



ภาพที่ 4.1 Microfluidic Dilution รูปแบบที่ 1

ตอนที่ 2 : การศึกษาการออกแบบชิพ micro mixing โดยอาศัยโปรแกรมจำลอง (simulation) และการทดสอบประสิทธิภาพในการเจือจางน้ำเลือด (serum)



ภาพที่ 4.2 Micro mixing สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพ Microfluidic Dilution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของ microfluidic dilution chip


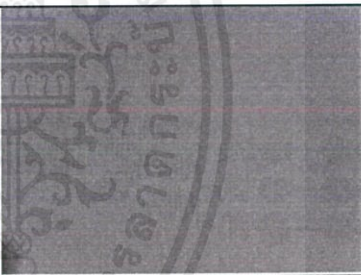

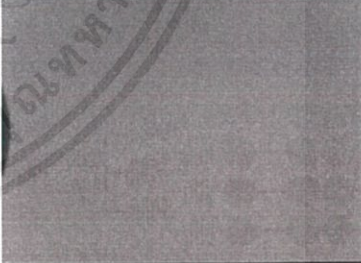
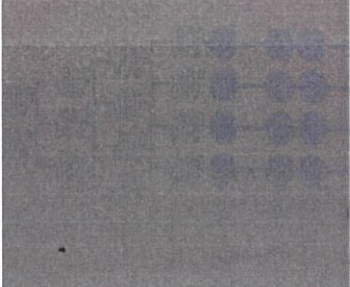
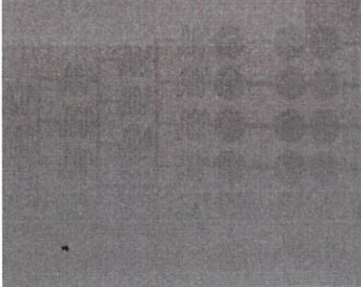
4.1.1 ทดลองหาอัตราการไหล (Flow rate)

เลือกใช้อัตราการไหล (Flow rate) ดังนี้

1. เมทิลีน บลู 20 ไมโครลิตร/นาที : น้ำไร้ประจุ 20 ไมโครลิตร/นาที
2. เมทิลีน บลู 10 ไมโครลิตร/นาที : น้ำไร้ประจุ 10 ไมโครลิตร/นาที
3. เมทิลีน บลู 10 ไมโครลิตร/นาที : น้ำไร้ประจุ 5 ไมโครลิตร/นาที

4.1.2 ตารางผลการทดลอง

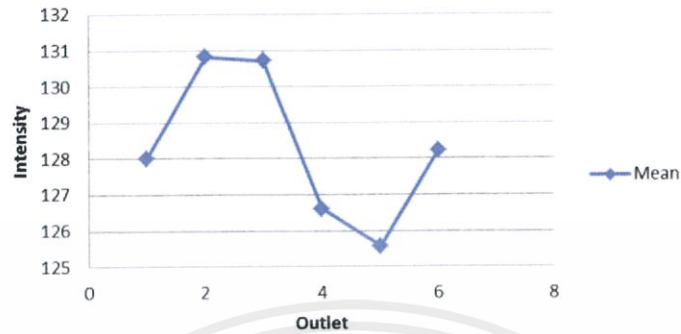
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลระหว่าง เมทิลีนบลู : น้ำไร้ประจุ	ภาพถ่ายปกติ	ภาพถ่ายแบบขาวดำ
20 $\mu\text{L}/\text{min}$: 20 $\mu\text{L}/\text{min}$		
10 $\mu\text{L}/\text{min}$: 10 $\mu\text{L}/\text{min}$		
10 $\mu\text{L}/\text{min}$: 5 $\mu\text{L}/\text{min}$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

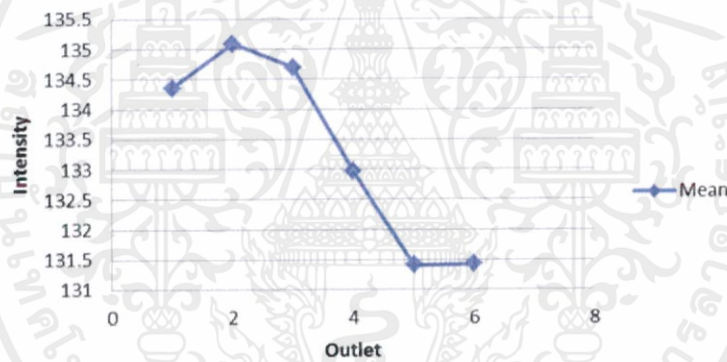
4.1.3 กราฟความเข้มแสงที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม image j

1. เมททีลีนบลู 20 ไมโครลิตร/นาที : น้ำไร่ประจุ 20 ไมโครลิตร/นาที



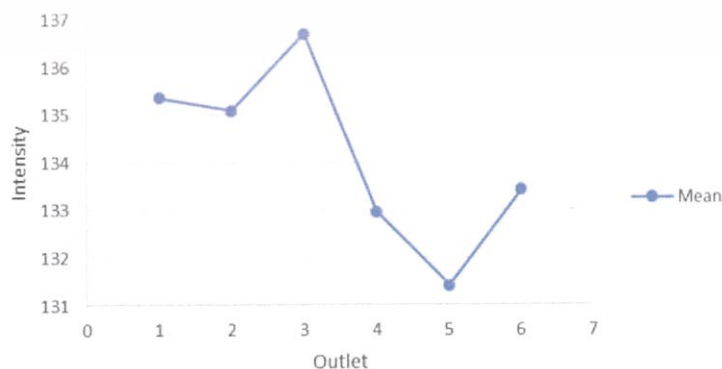
ภาพที่ 4.3 กราฟความเข้มสีที่ได้จากอัตราการไหล 20 : 20

2. เมททีลีนบลู 10 ไมโครลิตร/นาที : น้ำไร่ประจุ 10 ไมโครลิตร/นาที



ภาพที่ 4.4 กราฟความเข้มสีที่ได้จากอัตราการไหล 10 : 10

3. เมททีลีนบลู 10 ไมโครลิตร/นาที : น้ำไร่ประจุ 5 ไมโครลิตร/นาที



ภาพที่ 4.5 กราฟความเข้มสีที่ได้จากอัตราการไหล 10 : 5

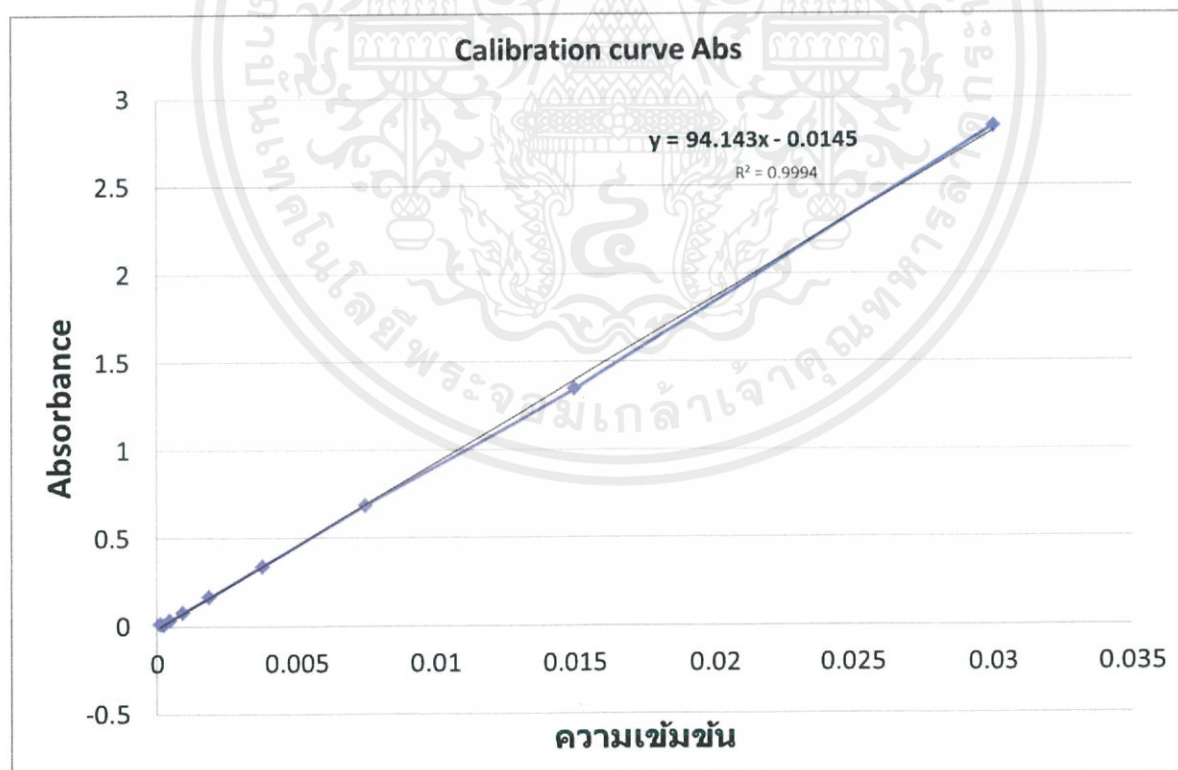
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากราฟความเข้มข้นที่ได้จากโปรแกรม image j นั้น ยังไม่เป็นเส้นตรงเท่าที่ควร และที่อัตราการไหล (Flow rate) ที่ต่างกัน กราฟความเข้มข้นนั้นก็จะมีค่าต่างกันด้วย แต่เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการใช้วิธีการตรวจสอบการเจือจางของสารโดยใช้โปรแกรม image j เพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าผลของการเจือจางที่ได้มานั้น เป็นไปตามรูปแบบข้างต้นหรือไม่ จึงต้องใช้วิธีการตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ซึ่งเป็นเครื่องที่มีการวัดที่ละเอียดและเป็นที่ยอมรับ และนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม image j อีกครั้ง

4.1.4 หาความเข้มข้นของ Methylene Blue ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer

4.1.4.1 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน

เครื่อง UV-Spectrophotometer นั้นเมื่อทำการวัดแล้วจะได้ค่าออกมาเป็นค่าการดูดกลืนซึ่งยังไม่สามารถบอกถึงค่าความเข้มข้นได้ ดังนั้น จึงต้องทำการเตรียมกราฟความเข้มข้นมาตรฐานโดยการเตรียมความเข้มข้นขึ้นมา 4-5 ความเข้มข้น ขึ้นมาเพื่อทำการหาค่าสมการเส้นตรง $Y = MX + C$ และจะนำสมการนี้ไปใช้ในการแก้สมการหาความเข้มข้นออกมา โดยกราฟความเข้มข้นมาตรฐานนั้นจะได้เป็น ดัง ภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเราจะได้สมการเส้นตรง $Y = 94.143X - 0.0145$ และมีค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.9994 ซึ่งตามหลักแล้ว ค่าความเป็นเส้นตรงควรจะต้องเข้าใกล้ 1 มากที่สุดจะยิ่งดี

4.1.4.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ได้จากไมโครฟลูอิดิก ไดลูชัน

ทางผู้วิจัยได้นำตัวอย่างอัตราการไหลระหว่าง เมทิลีนบลูต่อน้ำไร้ประจุ ที่ 10 ไมโครลิตร ต่อ 10 ไมโครลิตรมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงเพียงตัวอย่างเดียวเพราะว่า กราฟที่อัตราการไหล 10 : 10 นั้นมีความเป็นเส้นตรงของความเข้มข้นมากกว่าทุกอัตราการไหลที่ได้ทำการทดสอบไปทั้งหมด

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้ง 6 ตัวอย่าง ที่ได้จากไมโครฟลูอิดิก ไดลูชัน ที่วัดได้จากเครื่อง UV Spectrophotometer

Outlet	ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 663 นาโนเมตร
1	0.017
2	1.247
3	2.247
4	1.463
5	0.902
6	0.518

เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงออกมาแล้วนั้น ให้นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปแทนค่าในสมการเส้นตรงหรือ $y = mx + c$ ที่ได้จากกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) โดยจะมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$y = 94.143x - 0.0145$$

โดยที่ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง

$x =$ ค่าความเข้มข้น

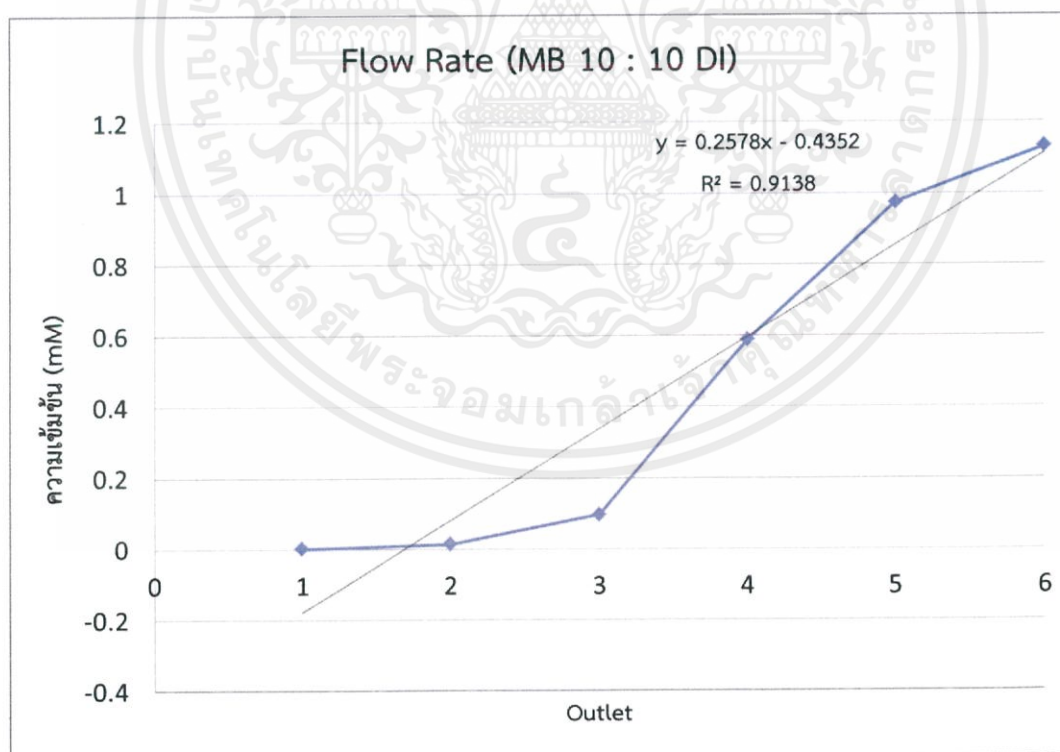
ดังนั้น เราจึงต้องแทนค่า y (ค่าการดูดกลืน) แล้วแก้สมการเพื่อหาค่า x (ความเข้มข้น) ออกมาดัง ตารางที่ 4.3 ซึ่งจะแสดงค่าการความเข้มข้นของสารละลาย Methylene Blue

ตารางที่ 4.3 ตารางคำนวณความเข้มข้นจากค่าการดูดกลืนแสง

Outlet	ความเข้มข้น (mM)
1	0.000898
2	0.01339
3	0.09608
4	0.5876
5	0.9735
6	1.1314

จากตารางจะเห็นว่าความเข้มข้นของ Methylene Blue นั้นจะมีความเข้มข้นที่เรียงลำดับกันโดยช่อง Outlet ที่ 6 จะมีความเข้มข้นของ Methylene Blue มากที่สุดและช่อง Outlet ที่ 1 นั้นจะมีความเข้มข้นของ Methylene Blue น้อยที่สุด

เมื่อได้ค่าความเข้มข้นของสารละลาย Methylene Blue ของ Outlet 1-6 มาแล้ว ผู้วิจัยจึงทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Outlet แต่ละช่องกับความเข้มข้นที่ได้เพื่อที่จะดูแนวทางว่ากราฟจะเป็นเส้นตรงหรือมีการเบี่ยงเบนเป็นเท่าจริงหรือไม่



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความเข้มข้นที่ได้จากตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นได้ว่ากราฟยังไม่เป็นเส้นตรงตามที่คาดไว้ตั้งแต่ต้นคือ กราฟจะต้องเป็นเส้นตรง เพราะช่องทางออกสารแต่ละช่องต้องได้รับความเข้มข้นที่ออกมาเป็นจำนวนเท่าที่แน่นอน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คำนวณหาอัตราส่วนที่ได้จริง เทียบกับอัตราส่วนที่คาดไว้ตั้งแต่ต้นให้อยู่ในอัตราทั้งหมด 10 ส่วน

เมื่อคำนวณได้ความเข้มข้นออกมาแล้วจึงคำนวณหาอัตราส่วนการผสมกันของสารละลาย เมทิลีนบลูผสมกับน้ำไร้ประจุให้อยู่ในอัตราส่วนทั้งหมด 10 ส่วน จะคำนวณได้เป็น ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนที่ได้จริงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่คาดว่าจะได้จาก Microfluidic Dilution

Outlet	อัตราส่วน MB : DI ที่คาดว่าจะได้จาก Microfluidics Dilution	อัตราส่วน MB : DI ที่ได้จริงจากการทดลอง (สิ่งที่คำนวณได้)
1	0 : 10	0 : 10
2	2 : 8	0.1 : 9.9
3	4 : 6	0.8 : 9.2
4	6 : 4	5.2 : 4.8
5	8 : 2	8.6 : 1.4
6	10 : 0	10 : 0

ดังนั้น ในการทดลองส่วนแรกจึงสามารถสรุปได้ว่า Microfluidic Dilution รูปแบบแรกนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากอัตราส่วนที่ได้นั้นค่อนข้างที่จะคาดเคลื่อนจากอัตราส่วนที่คาดว่าจะได้จากชิพตัวนี้ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองในส่วนที่ 2 คือการสร้าง Chip Mixing และทำการสร้างแบบจำลองหรือ Simulation เพื่อที่จะศึกษาและแก้ไขอัตราส่วนของการผสมกันให้มีความถูกต้องและแม่นยำเพื่อที่จะสามารถนำมาพัฒนาตัว Microfluidic Dilution รูปแบบที่ 1 ให้สามารถใช้งานได้จริงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบ Micro Mixing

ตัวชิพที่ใช้ผสมสารหรือ Micro Mixing นั้นถูกสร้างมาเพื่อนำไปใช้ใน Microfluidic Dilution เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราส่วนที่สารจะผสมกันให้มีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์รูปแบบที่ 1 นั้นให้อัตราส่วนผสมระหว่าง เมทิลีนบลูกับน้ำไร้ประจุยังไม่เป็นไปตามที่ได้วางแผนและคำนวณไว้ ผู้วิจัยและคณะจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองการไหล (Simulation fluid) ขึ้นเพื่อสร้างตัว Micro Mixing ที่ได้อัตราส่วนที่แน่นอนขึ้นมา โดยวิธีการและผลการจำลองได้รับข้อมูลจากรศ.ดร. เอกชัย จันทสาโร และนายเทิดไท เทียนทอง สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

4.2.1 Simulation

4.2.1.1 หารูปแบบขดท่อที่สามารถให้การผสมของสารดีที่สุด

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบรูปแบบของท่อที่มีลักษณะเป็นขดรูปแบบต่างๆ โดยสาเหตุที่ต้องทำเป็นขดนั้นเพราะด้วยขนาดของตัว Lab on a chip จะต้องขนาดเล็ก ผู้วิจัยจึงต้องออกแบบให้เป็นขด จากนั้นผู้วิจัยและคณะได้ทำการ Simulation โดยกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการไหลภายใน เพื่อที่จะทำการทดสอบเพื่อหารูปแบบขดท่อที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปเป็น Micro Mixing แต่ด้วยชิพตัวนี้ต้องการที่จะนำไปใช้ในการเจาะจางตัว Serum ผู้วิจัยจึงได้กำหนดปัจจัยการไหลต่าง ๆ ให้ใกล้เคียงกับตัว Serum จริง ซึ่งทางผู้วิจัยและคณะได้ขอสรุปการเลือกขดท่อเป็นดัง ตารางที่ 4.5

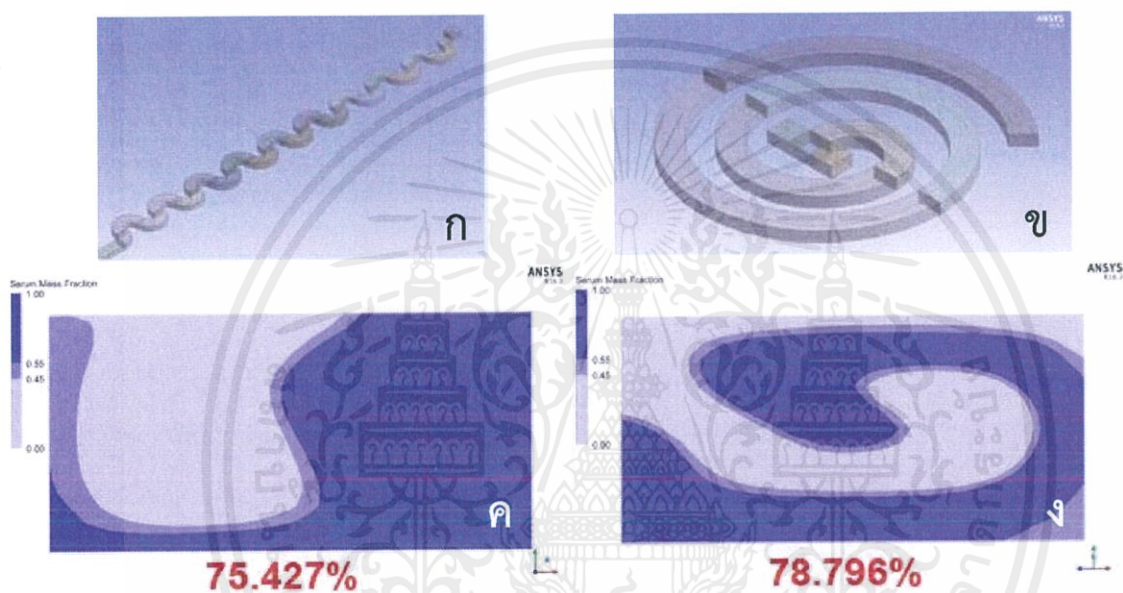
ตารางที่ 4.5 แสดงถึงประสิทธิภาพในการผสมกันของสารภายในชิพ

Geometry	Area-Wt Uniformity Index of Serum	Rank	Radius	Angle	No. of Curve
Outer-inlet Spiral	65.822%	3	vary	1080.00	6
Reverse with Average R	61.241%	4	300	1080.00	6
Reverse with Various R	60.780%	5	vary	1080.00	6
Reverse with R100	75.427%	2	100	3240.00	18
Center-inlet Spiral	78.796%	1	vary	855.00	5

จากตารางจะเห็นได้ว่าตัวชิพรูปแบบ Center-inlet Spiral จะให้รูปแบบการผสมกันได้ดีถึง 78.796% ซึ่งถือว่ามากที่สุดและมีประสิทธิภาพที่สุด แต่ในขณะเดียวกันตัวชิพรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

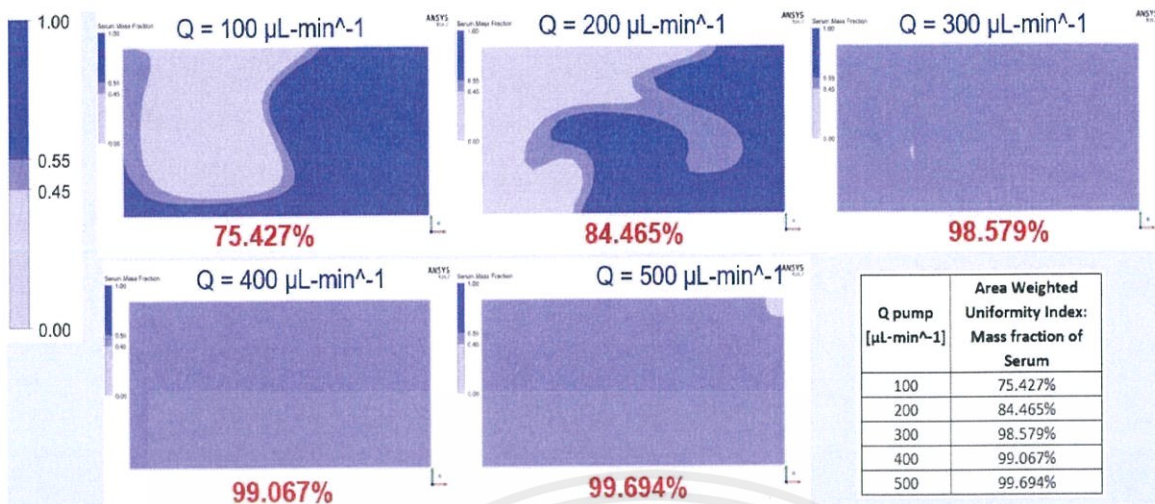
Reverse with R100 ก็สามารทำให้ประสิทธิภาพในการผสมกันได้ถึง 75.427% ซึ่งใกล้เคียงกันมาก ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบและตรวจสอบการผสมของสารภายในท่อเป็นดัง ภาพที่ 4.8 ซึ่งแสดงรูปแบบของชีพแบบขดไปมาแบบตรงยาว (4.8 ก) กับแบบขดม้วนเป็นก้นหอย (4.8 ข) โดยภาพการจำลองการผสมของสารแบบตัดขวางที่เกิดขึ้นในชีพแบบขดตรง (4.8 ค) และแบบขดม้วนก้นหอย (4.8 ง) สังเกตได้จากระดับสีที่ต่างกันในแต่ละบริเวณ ซึ่งระดับความเข้มมากที่สุดคือ 1 และต่ำสุดคือ 0 ดังนั้น บริเวณที่เกิดการผสมของสารได้ดีและเป็นที่ต้องการคือช่วงประมาณ 0.45 - 0.55 ซึ่งจะเห็นเป็นสีฟ้ากลาง ๆ



ภาพที่ 4.8 ลักษณะการผสมกันของของไหลภายในท่อที่อัตราการไหล 100 ไมโครลิตรต่ออนาที

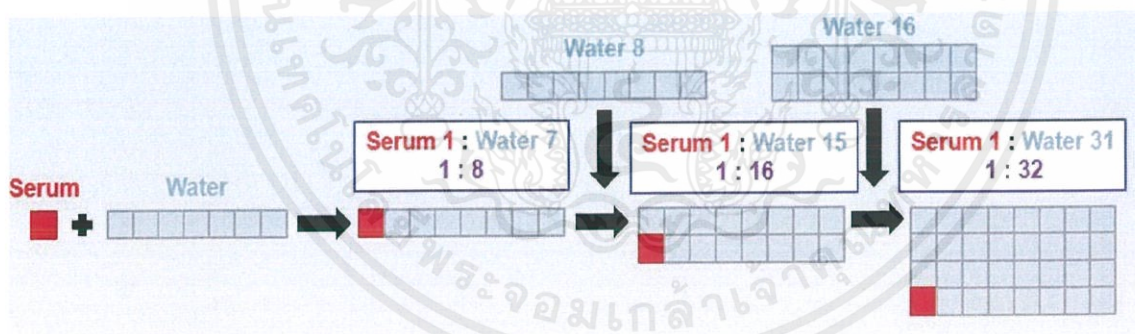
จากนั้นได้ทำการเพิ่มอัตราการไหลให้มากขึ้นเพื่อทดสอบว่าถ้าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการผสมกันของสารภายในท่อจะเพิ่มมากขึ้นด้วยหรือไม่ จึงได้ทำการเพิ่มอัตราการไหลจาก 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ เป็น 200 300 400 และ 500 $\mu\text{L}/\text{min}$ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.9 ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหล 100 และ 200 $\mu\text{L}/\text{min}$ สารเกิดการผสมกันเฉพาะส่วนที่ชนกันระหว่างสองสาร แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลตั้งแต่ 300 $\mu\text{L}/\text{min}$ ขึ้นไป พบว่าสารเกิดการผสมกันได้หมดโดยสังเกตจากรูปภาพที่มีสีฟ้าเดียวกันทั้งภาพ และสามารถแสดงค่าการผสมของสารภายในท่อที่เรียกว่า area weight uniformity index ได้ดังตารางใน ภาพที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้น

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่ารูปแบบของขดท่อชนิด Center-Inlet Spiral มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่น โดยมีค่า area weight uniformity index 78.796% และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสารได้โดยเพิ่มอัตราการไหล และจากการออกแบบนี้จะสามารถทำให้ชีพสามารถเจือจางสารได้ในอัตราส่วน 1 : 8 ดัง ภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แสดงถึงอัตราส่วนที่ได้ทำการออกแบบและคำนวณจากโปรแกรม Simulation

การ Simulation นั้นเป็นเพียงการสร้างแบบทดลองจำลองขึ้นมา ดังนั้น เพื่อที่จะตรวจสอบว่าผลของการ Simulation นั้นเป็นจริงหรือไม่ จะต้องลองทำการทดลองจริงโดยการสร้างชีพ Micro Mixing ขึ้นมา และทำการทดลองทุกอย่างให้เหมือนกับการ Simulation เพื่อที่จะนำค่ามาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ได้จริงจากการทดลองนั้นจะได้อัตราส่วนในการเจือจางเป็น 1 : 8 ตามที่ทีม Simulation ทำได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ทดสอบการทำงานของชิพ Micro Mixing ที่สร้างขึ้นจริง

จากการ Simulation ไปแล้วนั้นก็สร้างตัวอุปกรณ์จริงขึ้นมา โดยค่านึงว่าค่าที่ได้จริงกับค่าที่ได้จากการ Simulation นั้น อาจจะไม่ตรงกันเสมอไปแต่ควรจะใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการ Simulation ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพื่อดูว่าค่าจริงกับค่าที่ Simulation นั้น ตรงกันหรือคลาดเคลื่อนเพียงใด โดยจะแบ่งผลการทดลอง เป็นดังนี้

1. กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของ Serum และ Methylene Blue
2. ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง
3. ความเข้มข้น Serum และ Methylene Blue ที่ได้จากการทดลอง
4. อัตราส่วนความเข้มข้นเมื่อเทียบกับค่า Simulation

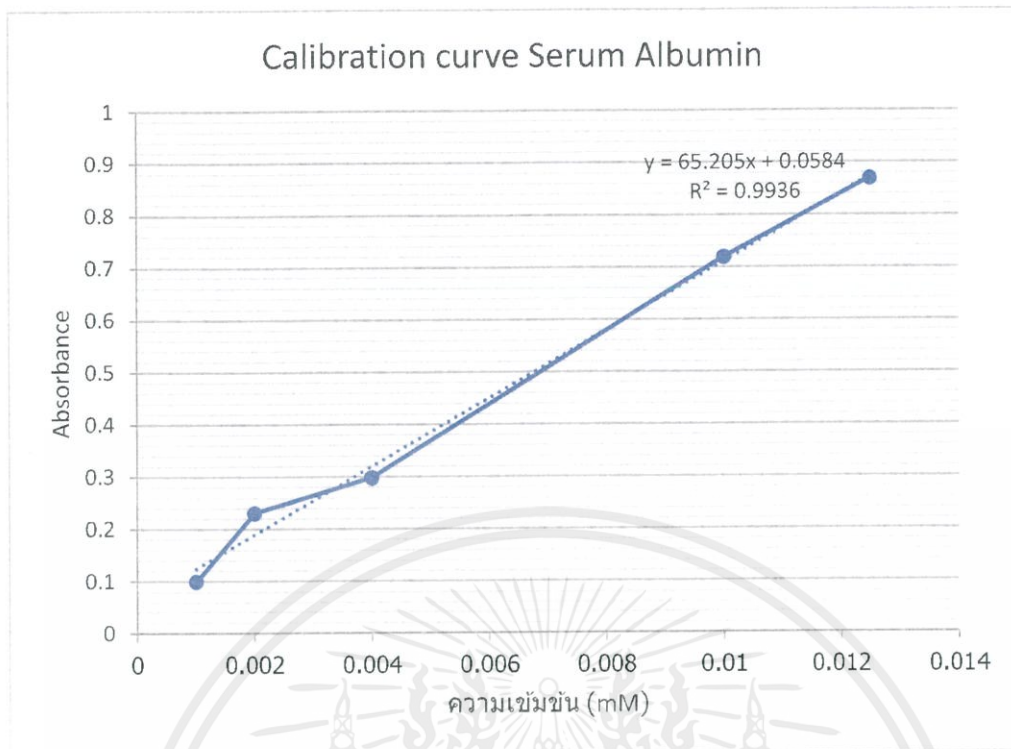
4.2.2.1 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของเซรัมอัลบูมิน (Serum Albumin)

กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของเซรัมอัลบูมินนั้นจะทำการเตรียมความเข้มข้นทั้งหมด 5 ความเข้มข้น เพื่อสร้างสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ขึ้นมาเพื่อที่จะคำนวณหาความเข้มข้น โดยความเข้มข้นที่เตรียมไว้แต่ละความเข้มข้นจะมีค่าการดูดกลืนแสง ดัง ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละความเข้มข้นเซรัมที่เตรียมด้วยมือ

ความเข้มข้นเซรัม (mM)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.001	0.099
0.002	0.230
0.004	0.298
0.001	0.718
0.0125	0.868

นำค่าที่ได้ใน ตารางที่ 4.6 มาเขียนกราฟ ดัง ภาพที่ 4.11 เพื่อสร้างสมการเส้นตรง $y = mx + c$ เพื่อที่จะใช้คำนวณหาความเข้มข้นเซรัมที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ชิพ Micro Mixing ที่อัตราการไหลต่าง ๆ และนำมาเทียบอัตราส่วนของเซรัมที่ได้ว่ามีค่าตรงกับอัตราส่วนที่ได้จากการ Simulation หรือไม่



ภาพที่ 4.11 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของเซรัม

จากกราฟจะเห็นว่าจะมีบางจุดที่ยังไม่มีความเป็นเส้นตรงอยู่บ้างเล็กน้อยแต่เมื่อดูที่ค่า R^2 ที่มีค่าเท่ากับ 0.9936 ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียง 1 จึงถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และจากกราฟความเข้มข้นมาตรฐานนั้นจะได้สมการเส้นตรงออกมา ดังนี้

$$y = 65.205x + 0.00584$$

โดยที่ y = ค่าการดูดกลืนแสง

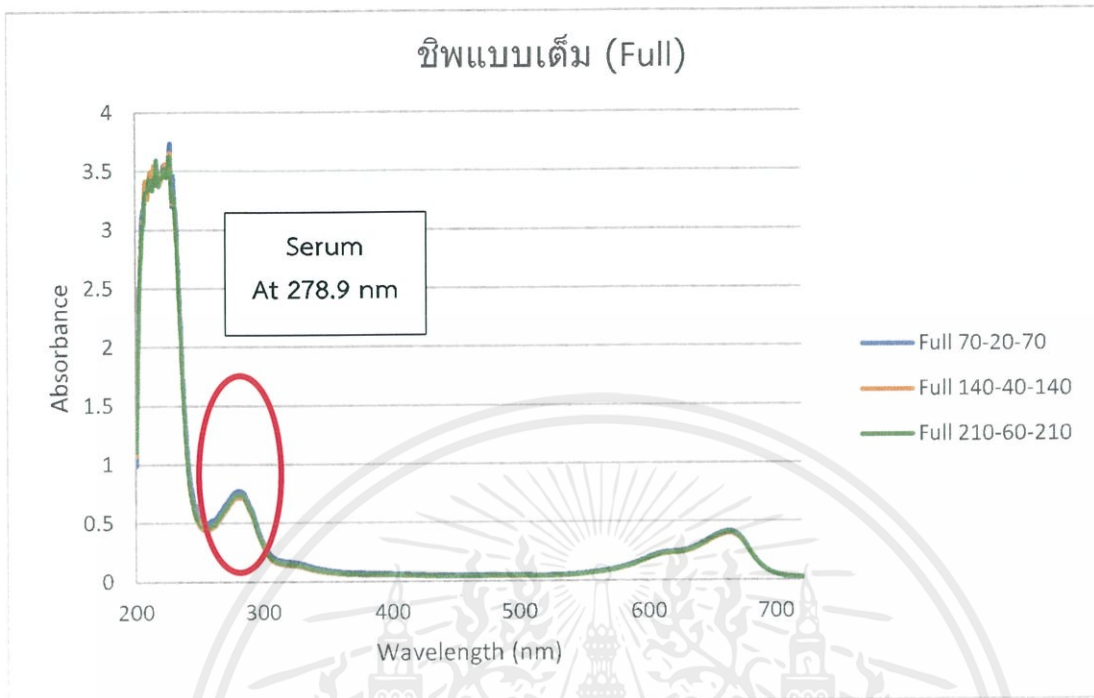
x = ค่าความเข้มข้น

4.2.2.2 ค่าการดูดกลืนแสงของ Serum ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ได้จากซิฟจริงของ Micro Mixing นำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer โดยค่าการดูดกลืนแสงนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบตามแบบของตัวซิฟ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2.1 ซิฟแบบเต็ม (Full)



ภาพที่ 4.12 แสดงพีคของเซรัมที่วัดด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 278.9 นาโนเมตร

จากกราฟจะเห็นว่าจะมีพีคของสารละลายเมทิลีนบลูอยู่ด้วย เป็นเพราะผู้วิจัยได้เติมสารละลายเมทิลีนบลูลงไป เพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นและตรวจสอบเซรัมเมื่อเข้าไปในซิฟ Micro Mixing

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากซิฟแบบเต็ม (Serum)

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าการดูดกลืนแสงของเซรัม
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.776
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.716
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.718

จากตารางข้างต้นสามารถนำค่าการดูดกลืนแสงของเซรัมมาคำนวณเพื่อหาความเข้มข้นได้จากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ที่ได้จากกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของเซรัม โดยทำการแทนค่าการดูดกลืนแสงไปที่ค่า Y และแก้สมการเพื่อหาค่า X ที่เป็นค่าของความเข้มข้นออกมาและเทียบเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

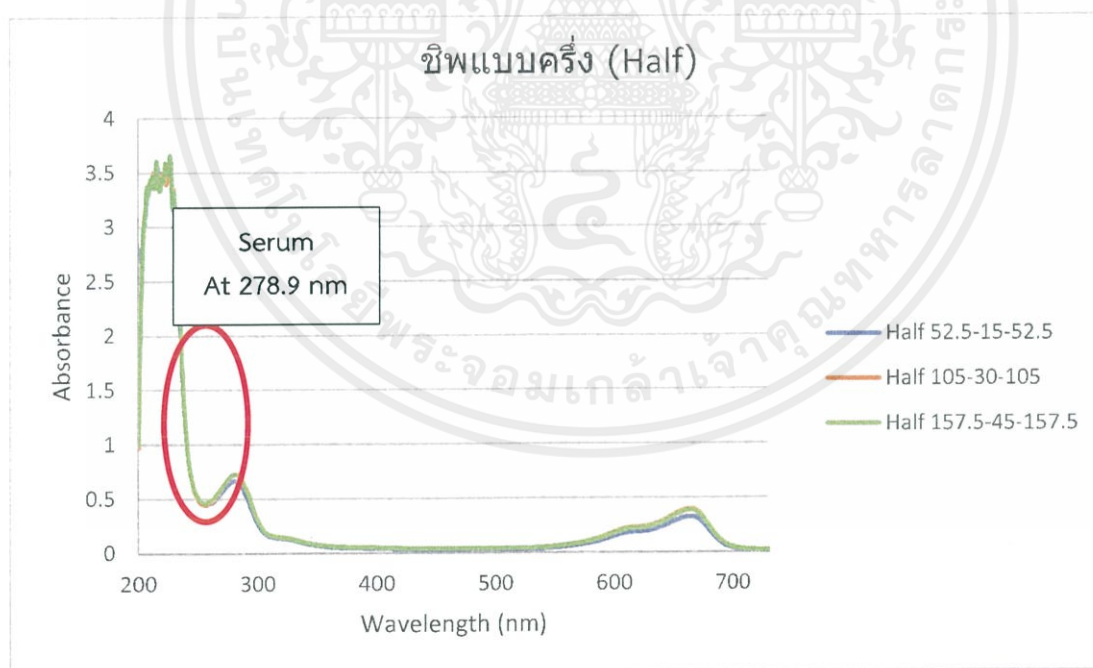
อัตราส่วนการเจือจาง เมื่อเทียบกับผล Simulation โดยเมื่อคำนวณแล้วจะได้ค่าความเข้มข้นเป็นดัง ตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าความเข้มข้นของเซรุ่ม (mM)
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.165 mM
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.151 mM
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.151 mM

จากตารางจะเห็นว่าความเข้มข้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากแต่จะมีค่าที่อัตราการไหล 70:20:70 นั้น เป็นค่าตัวเลขที่โดดไปบ้างแต่ก็ยังถือว่าใกล้เคียงกัน โดยที่ผลของ Simulation นั้น จะคำนึงถึงอัตราการไหลที่สูงที่สุด ดังนั้น ที่อัตราการไหลต่ำจึงไม่จำเป็นต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับอัตราการไหลสูงสุด

4.2.2.2 ซิปแบบครึ่ง (Half)



ภาพที่ 4.13 แสดงพีคของเซรุ่มที่วัดด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 278.9 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเมื่อเทียบกับชิพแบบเต็มจะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นแบบเดียวกันเพราะชิพทั้ง 2 แบบ ถูกออกแบบมาให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยใช้อัตราการไหลเป็นตัวกำหนด

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากชิพแบบครึ่ง

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าการดูดกลืนแสงของเซรุ่ม
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.683
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.722
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.730

เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงมาแล้วให้ทำการคำนวณเพื่อหาความเข้มข้นโดยใช้สมการเส้นตรงดังที่กล่าวไปในหัวข้อชิพแบบเต็มตาม ตารางที่ 4.8 เมื่อคำนวณแล้วจึงนำค่ามาเขียนเป็นข้อมูลดัง ตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าความเข้มข้นของเซรุ่ม (mM)
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.143 mM
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.152 mM
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.154 mM

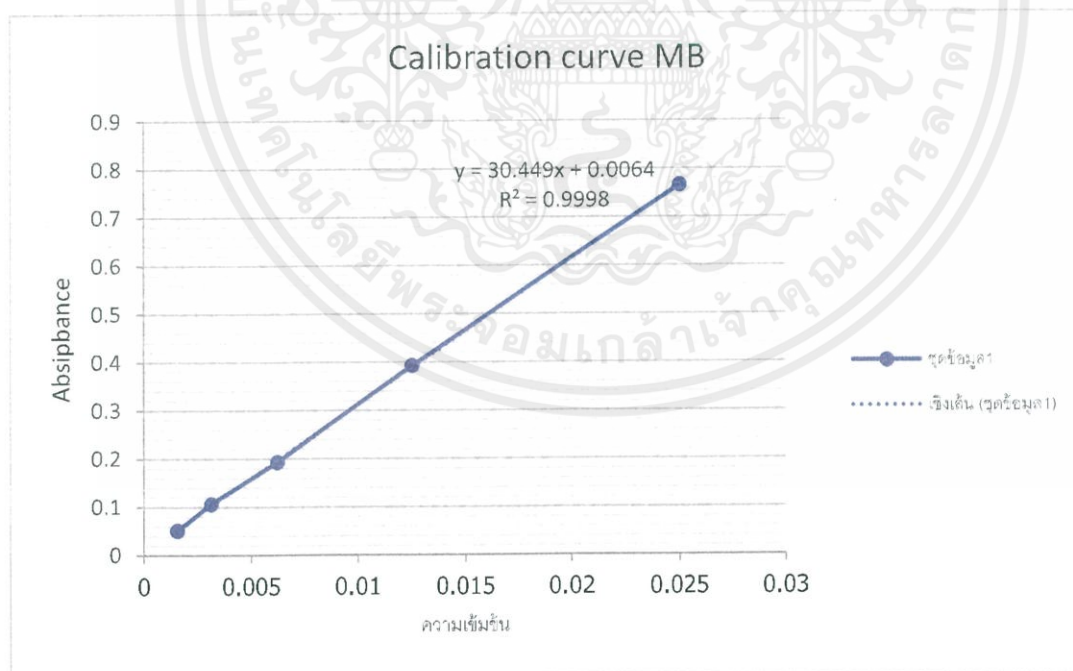
จากตารางจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากนั้น จะมีค่าอัตราการไหล 52.5 : 15 : 52.5 ที่น้อยกว่าอัตราการไหลทั้ง 2 อัตรา ที่มากกว่าไปบ้างแต่ก็ยังถือว่าใกล้เคียงกัน โดยที่ผลของ Simulation นั้น จะคำนึงถึงอัตราการไหลที่สูงที่สุด ดังนั้น ที่อัตราการไหลต่ำจึงไม่จำเป็นต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับอัตราการไหลสูงสุด

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราส่วนจริงกับอัตราส่วนที่ได้จากการ Simulation (Serum)

อัตราการไหล	อัตราส่วน จาก Simulation	อัตราส่วนจริงที่ได้ จากการทดลอง	ค่า ความคลาด เคลื่อน (%)
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 6	32 %
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 6.6	20.8 %
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 6.6	20.8 %
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 7	14.4 %
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 6	21.6 %
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 6.5	23.2 %

จากตารางจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนั้นจะมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากการทำการทดลองด้วยมีอนั้นอาจเตรียมสารได้ไม่แน่นอนเท่าการ Simulation จึงทำให้ค่าเกิดการคลาดเคลื่อนได้ แต่อย่างไรก็ตามการ Simulation นั้น สามารถจำลองประสิทธิภาพของชีพทั้งแบบเต็มและแบบครึ่งนั้นให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันได้

4.2.2.3 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของ Methylene Blue



ภาพที่ 4.14 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของ Methylene Blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นว่าจะมีบางจุดที่ยังไม่เป็นเส้นตรงอยู่บ้างเล็กน้อยแต่เมื่อดูที่ค่า R^2 ที่มีค่าเท่ากับ 0.9998 ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียง 1 จึงถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้และจากกราฟความเข้มข้นมาตรฐานนั้นจะได้สมการเส้นตรงออกมา ดังนี้

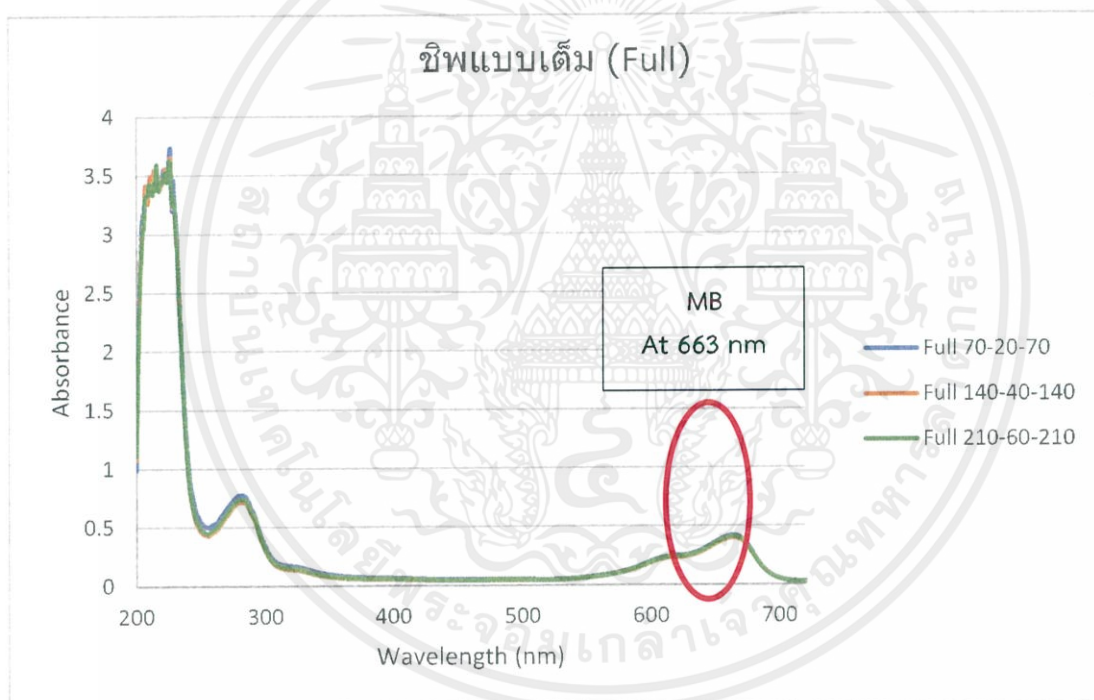
$$y = 30.449x + 0.0064$$

โดยที่ y = ค่าการดูดกลืนแสง

x = ค่าความเข้มข้น

4.2.2.4 ค่าการดูดกลืนแสงของ Methylene Blue ตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

4.2.2.4.1 ซิฟแบบเต็ม (Full)



ภาพที่ 4.15 แสดงพีคของ MB ในซิฟแบบเต็มที่วัดด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร

จาก ภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าในกราฟจะแสดงพีคของ Methylene Blue อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 663 นาโนเมตร ดังแสดงในวงกลมสีแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากซีฟแบบเต็ม (Methylene Blue)

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าการดูดกลืนแสงของ MB
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.436
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.404
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.409

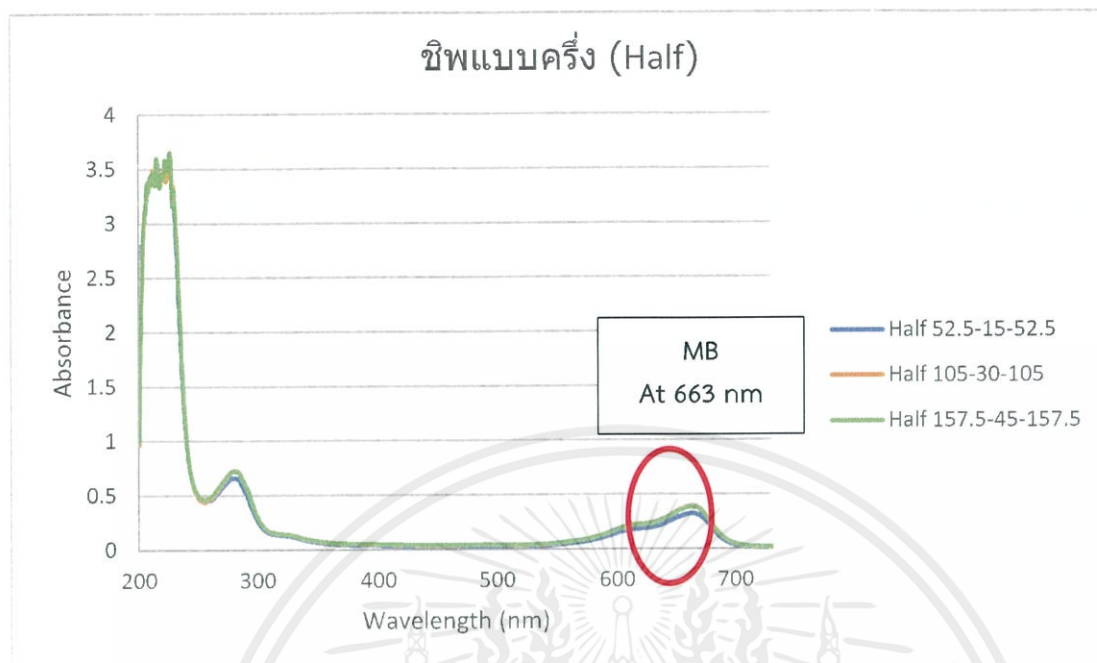
เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงของ Methylene Blue มาแล้วก็แทนค่าการดูดกลืนแสงลงไปในการสมการเส้นตรง $y = 30.449x + 0.0064$ โดยแทนค่าการดูดกลืนแสงลงไปเป็นค่า y แล้วแก้สมการหาค่า x ที่เป็นความเข้มข้นออกมาได้ดัง ตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าความเข้มข้นของ MB (mM)
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.211 mM
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.196 mM
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.198 mM

จากตารางจะเห็นว่าที่อัตราการไหล 70 : 20 : 70 นั้นจะมีความเข้มข้นที่แตกต่างกับอัตราการไหล 140 : 40 : 140 และอัตราการไหล 210 : 60 : 210 เพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งยังถือว่าอยู่ในระดับที่รับได้

4.2.2.4.2 ซิฟแบบครึ่ง (Half)



ภาพที่ 4.16 แสดงพีคของ MB ในซิฟแบบครึ่งที่วัดด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากซิฟแบบครึ่ง

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าการดูดกลืนแสงของเซรัม
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.339
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.403
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.402

เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงของ Methylene Blue มาแล้วก็แทนค่าค่าการดูดกลืนแสงลงไปในสมการเส้นตรง $y = 30.449x + 0.0064$ โดยแทนค่าการดูดกลืนแสงลงไปในค่า y แล้วแก้สมการ หา x ที่เป็นความเข้มข้นออกมาได้ดัง ตารางที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณจากสมการเส้นตรง

อัตราการไหล (ไมโครลิตรต่อนาที)	ค่าความเข้มข้นของเซรุ่ม (mM)
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.164 mM
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.195 mM
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	0.195 mM

จากตารางจะเห็นว่าความเข้มข้นของ Methylene Blue ที่อัตราการไหล 52.5 : 15 : 52.5 จะมีค่าความเข้มข้นห่างจากอัตราการไหล 105 : 30 : 105 และอัตราการไหล 0157.5 : 45 : 157.5 เพียงเล็กน้อย

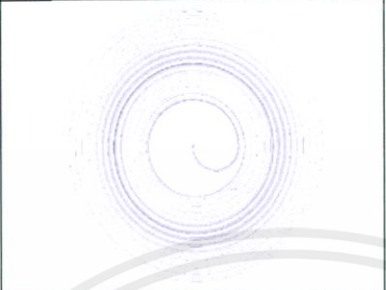
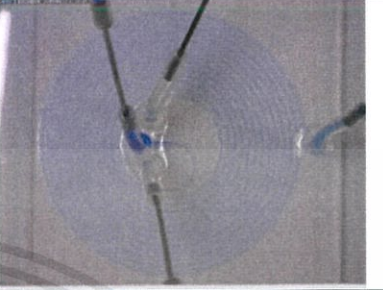

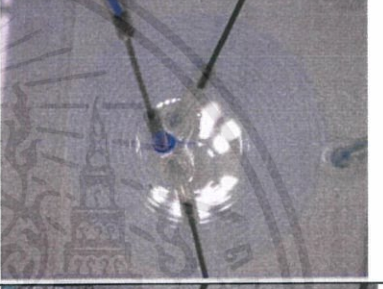
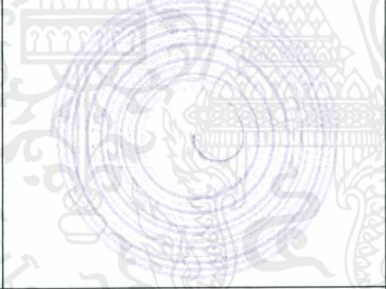
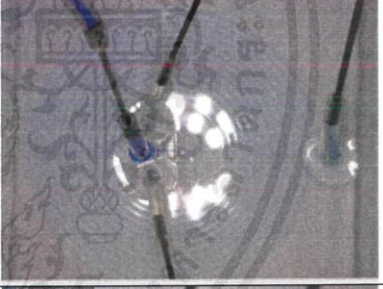

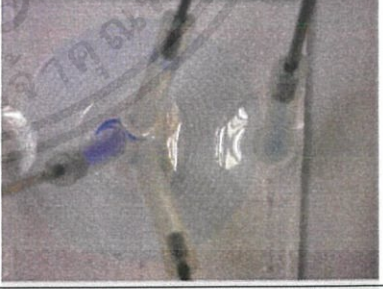
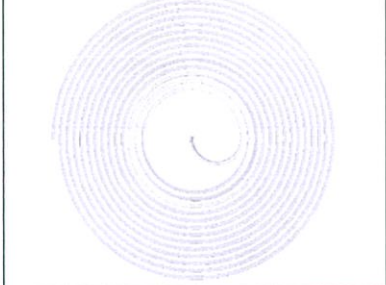
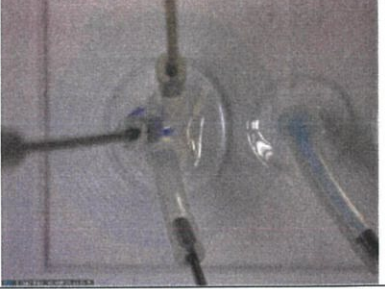
ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำตารางเปรียบเทียบอัตราส่วนการเจือจางจริงที่ได้จากการทดลองเทียบกับอัตราส่วนการเจือจางที่ได้จากการ Simulation ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 : 8 ว่ามีความคลาดเคลื่อนมากเพียงใดดัง ตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบอัตราส่วนจริงกับอัตราส่วนที่ได้จากการ Simulation (Methylene Blue)

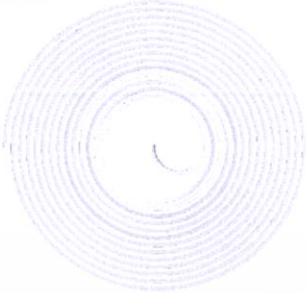
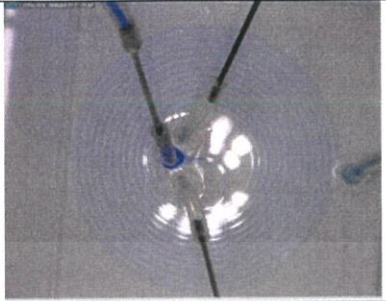
อัตราการไหล	อัตราส่วน จาก Simulation	อัตราส่วนจริงที่ได้ จากการทดลอง	ค่า ความคลาด เคลื่อน (%)
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 5	69.36 %
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 5.1	56.8 %
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 5	58.4 %
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 6	31.44 %
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 5.1	56 %
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$	1 : 8	1 : 5.1	56 %

จากตารางจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนเยอะมากนั้น อาจเป็นเพราะกระบวนการเตรียมการทดลองหรือการเตรียมความเข้มข้นของสารด้วยมือ อาจจะได้ผลที่ตรงกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม Simulation เท่าไรนัก จึงทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างจะมาก โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่าสูงถึง 69.36%

4.2.2.5 ภาพถ่าย Micro Mixing จากการทดลองเทียบกับภาพที่ได้จากการ Simulation

อัตราการไหล ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Simulation	ภาพถ่ายจริง
Full 70 : 20 : 70 $\mu\text{L}/\text{min}$		
Full 140 : 40 : 140 $\mu\text{L}/\text{min}$		
Full 210 : 60 : 210 $\mu\text{L}/\text{min}$		
Half 52.5 : 15 : 52.5 $\mu\text{L}/\text{min}$		
Half 105 : 30 : 105 $\mu\text{L}/\text{min}$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหล ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Simulation	ภาพถ่ายจริง
Half 157.5 : 45 : 157.5 $\mu\text{L}/\text{min}$		

จากตารางจะเห็นว่าภาพจริงนั้นไม่สามารถมองเห็นลักษณะการผสมกันได้เหมือนภาพของทาง Simulation ที่จะสามารถมองเห็นลักษณะการผสมกันได้อย่างชัดเจน วิธีปรับปรุงจะต้องหาวิธีตรวจสอบประเภทอื่นที่สามารถมองเห็นลักษณะการผสมกันของสารภายในท่อได้

4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 จากการทดลองพบว่า Microfluidic Dilution นั้นยังไม่มีคุณสมบัติเนื่องจากอัตราส่วนของสารละลาย Methylene Blue ที่ได้จาก Outlet แต่ละช่องนั้นไม่สามารถให้อัตราส่วนที่แน่นอนได้ และอัตราส่วนที่ได้ไม่มีความใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่ผู้วิจัยคำนวณไว้ตั้งแต่ต้น และการตรวจสอบค่าความเข้มข้นด้วยโปรแกรม Image J นั้นก็ไม่สามารถบอกประสิทธิภาพของ Microfluidic Dilution ได้เนื่องจากการถ่ายภาพนั้นมักจะมีแสงจากภายนอกเข้ามาบวกรวมจึงอาจทำให้ค่าความเข้มข้นเปลี่ยนไป

การทดลองที่ 2 จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้โปรแกรม Simulation ในการออกแบบและสร้างแบบจำลองขึ้นมานั้น สามารถทำให้สร้างตัว Micro Mixing ที่มีประสิทธิภาพได้เพราะมีการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Simulation มาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรม Simulation นั้น ได้ทำการทดสอบออกมาแล้วว่าชิพรูปแบบ Center-Inlet Spiral นั้นจะให้อัตราส่วนในการเจือจางนั้น เป็น 1 : 8 แต่ที่ผู้วิจัยลงมือทำจริงได้อัตราส่วนในการเจือจางเพียง 1 : 6 เท่านั้น และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 20.3% ซึ่งอาจจะเป็นเพราะการเตรียมสารด้วยมืออาจทำให้ไม่ได้ค่าที่พอดีเหมือนที่โปรแกรม Simulation ทำได้ จึงอาจทำให้ค่าอัตราส่วนการเจือจางของ Micro Mixing นั้นเกิดความคลาดเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชิพ Microfluidic Dilution ที่ใช้ในการเจือจางสารให้อยู่ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งจุดประสงค์ของการจัดทำคือสามารถพกพาง่ายและสะดวกในการใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ และในงานวิจัยต่าง ๆ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและออกแบบชิพสำหรับใช้เจือจางสารทางชีวเคมีเป็นหลัก และจะแบ่งการทดลองเป็น 4 ส่วน คือ ศึกษาหลักการไมโครฟลูอิดิก ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของของไหลภายในท่อ ศึกษาสมบัติของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง และพัฒนาชิพ Microfluidic Dilution โดยในส่วนของพัฒนานั้นผู้วิจัยได้แบ่งการทำทดลองออกเป็น 2 การทดลองหลัก ๆ ได้แก่ 1.) การศึกษาการออกแบบและสร้างชิพไมโครฟลูอิดิก รวมถึงการศึกษาวิธีวิเคราะห์ผล เพื่อบอกประสิทธิภาพการเจือจางสารของชิพไมโครฟลูอิดิก ซึ่งเป็นชิพตั้งต้นที่ออกแบบมาแบบคร่าวๆ และศึกษาอัตราส่วนของสารที่เกิดการเจือจางซึ่งได้มาจากการทดลองเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของสารที่คาดว่าจะได้จากการคำนวณ 2.) แก๊ซและออกแบบชิพ Micro Mixing โดยใช้โปรแกรม Simulation เข้ามาช่วยในการทำการทดสอบ ซึ่งทำการออกแบบชิพและสร้างชิพ Micro Mixing ซึ่งทำให้สารถูกเจือจางไปในอัตราส่วนที่แน่นอนเป็น 1:8 เพื่อนำมาแก้ไขในส่วนของ การทดลองที่ 1 ที่ยังไม่ได้อัตราส่วนในการเจือจางที่แน่นอน จึงจำเป็นต้องใช้ส่วนการทดลองที่ 2 เข้าไปช่วยให้ตัวชิพ Microfluidic Dilution นั้นมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ในการทดลองตอนที่ 1 เพื่อดูอัตราส่วนในการเจือจาง Methylene Blue โดยใช้น้ำไร้ประจุเป็นตัวเจือจางที่อัตราการไหลต่าง ๆ และใช้วิธีการตรวจสอบเพื่อหาอัตราส่วนจริงที่ได้จากการทดลอง โดยจะมี 2 วิธี ได้แก่ ใช้โปรแกรม Image J ในการตรวจหาค่าความเข้มสีที่ได้จากภาพถ่ายตัวชิพ Microfluidic Dilution และการใช้เครื่อง UV-Spectrophotometer เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสาร พบว่าวิธีวิเคราะห์ผลทั้งสองแบบสามารถหาค่าความเข้มข้นของสารเมทิลีนบลูที่ถูกเจือจางได้ แต่ตัวชิพที่ออกแบบยังไม่สามารถเจือจางสารได้ในอัตราส่วนที่ต้องการ นั่นอาจเป็นเพราะตัวชิพนั้นเป็นชิพแบบตั้งต้นซึ่งในการออกแบบนั้นยังไม่ได้ผ่านการคำนวณขั้นสูง เพียงแต่คำนวณโดยใช้หลักการพื้นฐานทั่วไป ดังนั้น ตัวชิพจึงยังไม่สามารถให้อัตราส่วนในการเจือจางตรงตามที่ต้องการได้ ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การทดลองที่ 2 ซึ่งจะเป็นการทดลองการสร้างรูปแบบของขดท่อไมโครชาแนล โดยใช้โปรแกรมการสร้างแบบจำลองหรือการ Simulation เข้ามาช่วยในการทำการทดลองด้วย โดยการออกแบบก่อนนั้น ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบท่อเพื่อที่จะสามารถให้อัตราส่วนในการเจือจางมีอัตราส่วนที่แน่นอน

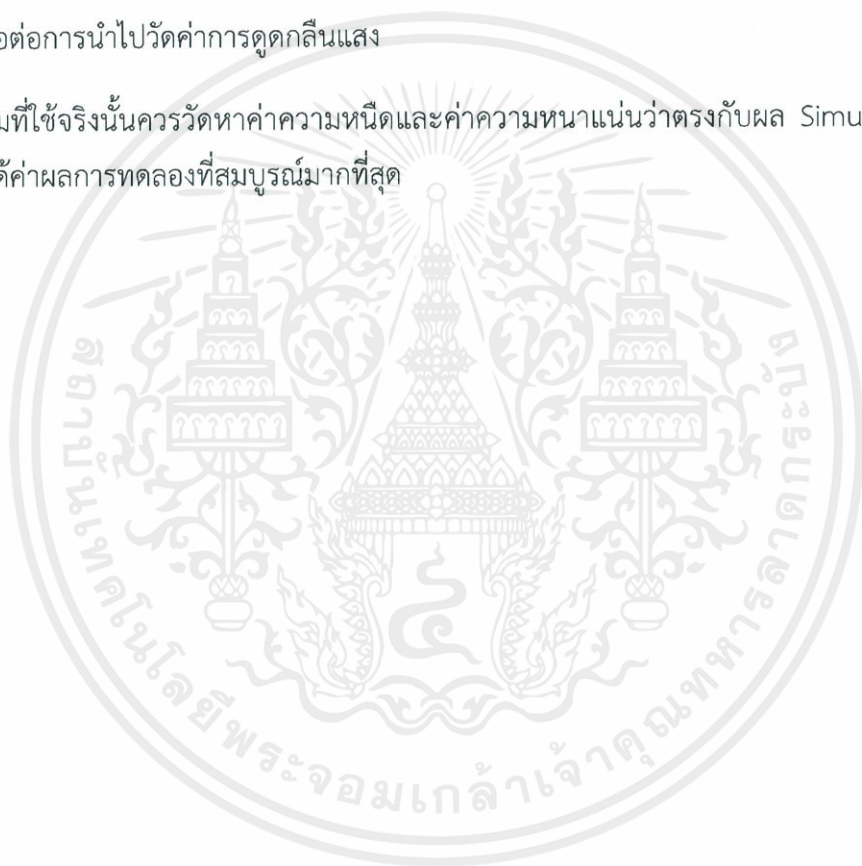
ในการทดลองที่ 2 นั้นจะใช้วิธีในการตรวจสอบเพียงวิธีเดียวคือ ใช้เครื่อง UV-Spectrophotometer ในการตรวจสอบเพื่อหาความเข้มข้นหรืออัตราส่วนของเซรุ่มที่ได้ถูกเจือจางไป ซึ่งผลพบว่าจะได้อัตราส่วนเท่ากับ 1 : 7 โดยอัตราส่วนนี้ ผู้วิจัยจะใช้อัตราส่วนที่อัตราการไหลที่สูงที่สุดของชิพแบบเต็ม (Full) และชิพแบบครึ่ง (Half) และเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่ได้จากการ Simulation ที่ได้อัตราส่วนเท่ากับ 1 : 8 นั้น จะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 20% ซึ่งอาจจะเกิดจากการเตรียมสารที่ไม่ตรงตามที่ Simulation เพราะเป็นการเตรียมสารด้วยมือจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจุดประสงค์ของผู้วิจัยนอกจากจะต้องการให้ได้อัตราส่วนในการผสมเท่ากับที่ Simulation แล้ว ผู้วิจัยยังได้ออกแบบชิพแบบเต็มและแบบครึ่งโดยทั้ง 2 แบบนี้จะต้องให้ประสิทธิภาพที่เท่ากัน โดยผลที่ได้ออกมานั้นชิพทั้งแบบเต็มและแบบครึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพในการผสมที่เท่ากันซึ่งสามารถตอบโจทย์ของผู้วิจัยได้ โดยการวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนากับ Microfluidic Dilution ต่อไปได้ในอนาคตเพื่อที่จะให้ชิพ Microfluidic Dilution นั้นออกมาสมบูรณ์และสามารถนำไปใช้งานจริงได้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในกระบวนการเตรียมสารจะต้องเตรียมสารให้ความเข้มข้นของสารนั้นตรงกับที่ต้องการใช้งาน เพื่อที่จะได้ง่ายต่อการคำนวณเพื่อหาค่าความเข้มข้นและเก็บข้อมูล
2. ท่อซิลิโคนที่ทำหน้าที่เป็นท่อเติมสารเข้าไปในตัวชิพควรมีความยาวที่เท่ากัน
3. การถ่ายภาพเพื่อหาค่าความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J ควรถ่ายในที่มืดเพื่อลดแสงรบกวนจากภายนอก ที่จะมีผลต่อการหาค่าความเข้มแสง
4. ถ้าต้องการเก็บตัวอย่างควรใช้หลอดไมโครเซนติพีวส์ขนาด 2 มิลลิเมตร ในการเก็บตัวอย่าง เพื่อที่จะเพียงพอต่อการนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง
5. เซอร์ุ่มที่ใช้จริงนั้นควรวัดหาค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นว่าตรงกับผล Simulation หรือไม่ เพื่อให้ได้ค่าผลการทดลองที่สมบูรณ์มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Glenn M. Walker, Nancy Monteiro-Riviere, Jillian Rouse and Adrian T. O'Neill. "A linear dilution microfluidic device for cytotoxicity assays". 26 June 2006
- [2] Ana C. Glavan, a Ramses V. Martinez, ab E. Jane Maxwell, a Anand Bala Subramaniam, a Rui M. D. Nunes, a Siowling Soha and George M. Whitesides. "Rapid fabrication of pressure-driven open-channel microfluidic devices in omniphobic RF paper³", March 21st 2013, 2922-2930
- [3] Xingyu Jiang, Jessamine M. K. Ng, Abraham D. Stroock, Stephan K. W. Dertinger, and George M. Whitesides, "A Miniaturized, Parallel, Serially Diluted Immunoassay for Analyzing Multiple Antigens", February 7, 2003.
- [4] Sourav Sarkar a, K.K. Singh b,*, V. Shankar a, K.T. Shenoy, "Numerical simulation of mixing at 1–1 and 1–2 microfluidic junctions", April 5, 2014, 227–240
- [5] ฟิสิกส์ราชชมงคล. บทที่ 8 กลศาสตร์ของไหลพลศาสตร์ของไหล. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.electron.rmutphysics.com/physics/charud/scibook/ru-book-4 / general-physics1/PH111-8.PDF>
- [6] ฟิสิกส์ราชชมงคล. บทที่ 6 กลศาสตร์ของไหลและการไหลภายในท่อ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/nuch/introphysics/6.pdf>
- [7] ฟิสิกส์มหิดล. บทที่ 8 ความหนืดและของไหลภายในท่อเมื่อความหนืด. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-physics2/lesson8_4.html
- [8] สำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์. ความหมายและประโยชน์ของ Microfluidic. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.thep-center.org/src/qa_read.php?question_id=1
- [9] สำนักงานชลประทาน. ทฤษฎีการไหลภายในท่อและการวิเคราะห์อัตราการไหลภายในท่อ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://irrigation.rid.go.th/rid4/km04/_data/57/general-05.pdf
- [10] National Center for Biotechnology Information. Methylene Blue. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/methylene_blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [11] Food Network Solution. Turbulent flow / การไหลแบบปั่นป่วน.[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1005/turbulent-flow>
- [12] คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหิดล.Blood protein.[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://www.si.mahidol.ac.th/department/biochemistry/home/md/Lecture/Lecture%20Blood%20Protein%20for%20web%20upload.pdf>
- [13] CorelDRAW การออกแบบและการใช้รูปแบบGraphics Suite [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://itnews4u.com/download-CorelDRAW-Graphics-Suite.html>
- [14] Positive and Negative Photoresist / กระบวนการกัดลายแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://www2.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/PosNegRes.html>
- [15] Lithography Terms / เทคนิคการกัดลายวงจรรูปแบบโฟโตลิโทกราฟี [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <http://www.microchem.com/Tech-LithoTerms.htm>
- [16] Simulation Software for All Fluid Flow Applications / โปรแกรมสร้างแบบจำลอง [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: <https://www.comsol.com/cfd-module>
- [17] UV-Vis Spectrophotometer / หลักการและส่วนประกอบของเครื่อง [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_2.html
- [18] ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น (absorbance and concentration) [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page2_3.html

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายจารุเดช ทองเดช
วัน - เดือน - ปีเกิด	3 เมษายน 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดนครนายก
ที่อยู่ปัจจุบัน	35 หมู่ที่ 6 ต.บ้านนา อ.บ้านนา จ.นครนายก 26110
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนนครนายกวิทยาคม ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตร วิศวกรรมบัณฑิต (วศ.บ) สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้