

การพัฒนาการสร้างลวดลายช่องทางการไหลขนาดเล็กและการลดการยึดเกาะของแอนติบอดีติด  
ฉลากด้วยทองสำหรับเส้นบนชิปประเภทกระดาษ

นายเกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF MINI-CHANNEL PATTERNING AND REDUCTION  
OF GOLD-LABELED ANTIBODY ADSORPTION FOR PAPER-BASED LAB-ON-A-CHIP

Mr.Krirktakul Punpattanakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาการสร้างความหลากหลายช่องทางการไหลขนาดเล็กและการลดการขีดเกาะของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองสำหรับแล็บบนชิปประเภทกระดาษ

โดย

นายเกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธูระวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธูระวานิช)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

เกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล : การพัฒนาการสร้างลวดลายช่องทางคาร์บอนขนาดเล็กและการลดการยึดเกาะของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองสำหรับแล็บบนชิปประเภทกระดาษ. (DEVELOPMENT OF MINI-CHANNEL PATTERNING AND REDUCTION OF GOLD-LABELED ANTIBODY ADSORPTION FOR PAPER-BASED LAP-ON-A-CHIP) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร.วิระยุทธ ศรีธูระวานิช, 101 หน้า.

แล็บบนชิป (LAB-ON-A-CHIP) เป็นอุปกรณ์ที่รวบรวมกระบวนการทำงานของห้องปฏิบัติการไว้บนชิปขนาดเล็กใช้สำหรับตรวจสอบสารเคมีหรือวินิจฉัยโรคภายนอกสถานที่ โดยในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาแล็บบนชิปประเภทกระดาษซึ่งมีต้นทุนต่ำและมีกระบวนการสร้างที่ง่ายขึ้นเพื่อให้การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวในการตรวจสุขภาพและวินิจฉัยโรคได้อย่างแพร่หลายมากขึ้นอันจะเป็นการยกระดับคุณภาพชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งประชากรในประเทศที่กำลังพัฒนา โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนากระบวนการสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษโดยประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่หาได้ทั่วไปตามท้องตลาดและใช้วัสดุต้นทุนต่ำ เช่น พลาสติก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้เสนอวิธีการในการลดการยึดติดของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองบนกระดาษซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการพัฒนาแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่ใช้ในการตรวจสอบสารชีวโมเลกุลซึ่งใช้ในการวินิจฉัยโรค

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษโดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท 2 วิธีคือ 1. วิธีการพิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 ลงบนกระดาษกรองเพื่อใช้สร้างท่อระดับไมครอน และ 2. วิธีการพิมพ์หน้ากาน้ำ (water mask) โดยพิมพ์น้ำลงบนกระดาษจากนั้นจึงจุ่มลงในสารละลายพลาสติก โดยบริเวณที่มีหน้ากาน้ำจะป้องกันไม่ให้สารละลายพลาสติกซึมลงบนกระดาษ เพื่อสร้างเป็นท่อระดับไมครอน ซึ่งวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีราคาถูกและหลากหลายกว่าวิธีแรกโดยไม่ทำให้เครื่องพิมพ์เกิดปัญหาอุดตัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขในการสร้างที่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย จำนวนครั้งในการพิมพ์ซ้ำ ขนาดความกว้างของผนังท่อ เป็นต้น นอกจากนี้ในการพัฒนาแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่ใช้ในการตรวจสอบสารชีวโมเลกุลนั้นมีปัญหาการยึดติดของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองบนกระดาษซึ่งทางคณะวิจัยได้เสนอวิธีการประยุกต์ใช้กลูโคส หรือ ฟรุคโตสเป็นชั้นรองเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวโดยได้ทำการพัฒนาขึ้นตัวอย่างเพื่อใช้ตรวจสอบสารชีวโมเลกุลประเภท human chorionic gonadotropin (hCG) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่พบในหญิงตั้งครรภ์ จากการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดการยึดติดของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองบนกระดาษได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีชั้นรอง ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ทำการพัฒนาต้นแบบของแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่สามารถใช้ตรวจสอบโปรตีน ความเป็นกรด-ด่าง และ ฮอร์โมน hCG ซึ่งแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแล็บบนชิปประเภทกระดาษต้นทุนต่ำสำหรับตรวจสอบสารเคมีหรือวินิจฉัยโรคต่อไป

ภาควิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..... 2555.....

## 5370208421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LAB-ON-A-CHIP / MICRO-CHANNEL / SU-8 / HUMAN CHORIONIC GONADOTROPIN / GOLD LABELED ANTIBODY

KRIRKTAKUL PUNPATTANAKUL : DEVELOPMENT OF MINI-CHANNEL PATTERNING AND REDUCTION OF GOLD-LABELED ANTIBODY ADSORPTION FOR PAPER-BASED LAB-ON-A-CHIP. ADVISOR : WERAYUT SRUTURAVANICH, Ph.D., 101 pp.

LAB-ON-A-CHIP which integrates the functions of laboratory into a compact chip is attracting a lot of interest from scientific community since it can perform chemical detection or disease diagnostics at the point of care. For the past 4-5 years, cheap and easy to fabricate paper-based lab-on-a-chips have been broadly developed for health monitoring and disease diagnostics thus increasing the quality of life especially for people in developing countries. This research aims to develop low-cost fabrication methods of paper-based lab-on-chip by utilizing a commercially available ink-jet printer and low-cost materials such as plastic. In addition, this research proposes a means to reduce the gold-labeled antibody adsorption on the paper substrate which is a critical issue for bio-molecule detection using a paper-based lab-on-a-chip.

In this research, two methods for paper-based lab-on-a-chip fabrication were proposed. In the first method, polymer SU-8 was used as ink and printed on a filter paper to fabricate micro-channels. In the second method (water mask method), water was printed on a filter paper after that the paper was immersed in a polymer solution. Water mask prevents the penetration of the polymer solution into that area leading to the formation of micro-channels. This method can be performed using a variety of low-cost materials and it does not cause the clogging problem in the ink-jet head. Parametric study was conducted to find the optimum fabrication conditions including concentration of solution, number of printing times and thickness. For bio-molecule detection, paper-based lab-on-a-chip has a critical issue on the adsorption of gold-labeled antibody onto the paper substrate. In this research, glucose or fructose was used as an intermediate layer to overcome this problem whereas a prototype of paper-based lab-on-a-chip for human chorionic gonadotropin (hCG) detection was developed. According to the experimental result, glucose or fructose intermediate layers can effectively reduce the adsorption of gold-labeled antibody onto the filter paper when compared to the sample without the intermediate layer. This research developed paper-based lab-on-a-chip which can be used for chemical (protein and pH) and bio-molecule (hCG) detection, and demonstrated the feasibility of developing low-cost paper-based lab-on-a-chip for chemical detection and disease diagnostics.

Department : .....Mechanical Engineering..... Student’s Signature.....

Field of Study : .....Mechanical Engineering..... Advisor’s Signature.....

Academic Year : .....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆด้านจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย อาจารย์ ดร.วิระยุทธ ศรีธนะวานิช ซึ่งได้มอบโอกาส ให้ความรู้และ คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างสูงไม่ว่าจะเป็นในด้านของการศึกษา งานวิจัย และการดำเนิน ชีวิตของผู้วิจัย อีกทั้งยังช่วยอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และช่วยผลักดันให้ผู้วิจัยเดินทางมาถึง จุดหมายที่คาดหวังไว้อย่างสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็น ประโยชน์อย่างสูงในด้านการศึกษา แนวคิด และการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.ชนภัทร ปาลกะ และพี่ๆ เพื่อนๆ ณ ห้องปฏิบัติการจุลวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยให้แนวคิด แนวทาง ข้อมูล และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้แผนปฏิบัติการไทยเข้มแข็ง 2555 โครงการ Green Engineering for Green Society คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ครั้งที่ 3 ภาค การศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2554 ปีงบประมาณ 2555

ตลอดระยะเวลา 2 ปี 5 เดือนที่ผ่านมา ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและนา โนเทคโนโลยี ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความเอื้ออาทรจาก พี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ใน ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก่ นายเอกยุทธ ว่องวิระยุทธ และ นายสรายุทธ แสงผล ที่เป็นเพื่อนให้คำแนะนำ คำปรึกษาและร่วมฟันฝ่าอุปสรรคตลอดการ ทำงานมาด้วยกัน ขอขอบคุณ น้องเอกฉันท พิษิตผองกิจ ผู้เริ่มดำเนิน โครงการมาด้วยกันในช่วง แรกเริ่ม น้องวรพงศ์ กิจอานันท์ และ น้องอาริชา โอพารณิช ผู้ที่สร้างความบันเทิงและบรรยากาศ ที่เป็นกัน ขอขอบคุณเพื่อนๆที่เรียนปริญญาโทมาด้วยกัน และน้องๆวิศวกรรมนาโนรุ่นที่ 94(3)- 95(4) ที่คอยให้กำลังใจและสร้างความสนุกสนานแก่ผู้วิจัยมาตลอด

และในท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายสุภัทร พันธุ์พัฒนกุล และ นางเกษมณี พันธุ์พัฒนกุล ผู้เป็นบิดา-มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้การเลี้ยงดูทั้งกายและใจ ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฌ
สารบัญภาพ .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทัศนวิสัยวรรณกรรม .....	4
2.1 วิธีการตรวจหาสารเคมีและสารโมเลกุลชีวภาพ (ELISA).....	4
2.2 แล็บบนชิป (LAB-ON-A-CHIP) .....	6
2.3 แล็บบนชิปประเภทกระดาษและวิธีการสร้าง.....	9
บทที่ 3 การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้ โพลิเมอร์ SU-8 ประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงค์ เจ็ท.....	19
3.1 การเลือกวัสดุอุปกรณ์ .....	19
3.2 การทดลอง .....	21
3.3 แล็บบนชิปประเภทกระดาษต้นแบบ.....	30
3.4 แนวทางการพัฒนาปรับปรุง .....	31
3.5 การปรับปรุงการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบ โดยใช้โพลิเมอร์ SU-8 จากการเปลี่ยน ขนาดของกระดาษ .....	32
3.6 การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบ โดยใช้โพลิเมอร์ Polyvinyl chloride (PVC) ประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	47

3.7 การหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์ซ้ำของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท .....	55
บทที่ 4 การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบ โดยใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ด้วยวิธีการ Water-Mask .....	60
4.1 วิธีการของ Water-mask .....	60
4.2 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบ ด้วยวิธี Water mask .....	68
4.3 ผลการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี Water mask .....	70
4.4 สรุปผลการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยวิธี Water mask .....	78
4.5 การวิเคราะห์หาตำแหน่งของโพลีเมอร์ Polystyrene ในกระดาษโดยการใช้วิธี Water-mask .....	79
4.6 การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองด้วยวิธี Water-mask .....	83
บทที่ 5 วิธีการปรับปรุงการเคลื่อนตัวของอนุภาคทอง (colloidal gold) บนกระดาษกรอง .....	88
5.1 การทดลองการปรับปรุงการเคลื่อนตัวของอนุภาคทอง .....	88
5.2 การสร้าง Paper test strip ต้นแบบ .....	94
บทที่ 6 สรุป .....	99
รายการอ้างอิง .....	102
ภาคผนวก .....	107
ภาคผนวก ก การทดลอง Test strip จำลองก่อนการนำไปประยุกต์ใช้กับ Paper test strip .....	108
ภาคผนวก ข ภาพจาก FEI Scanning Electron Microscope Systems (INSPECT S50) ...	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	115



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของกระดาษกรองเบอร์ 1 และ 41 .....	21
ตารางที่ 3.2 บันทึกข้อมูลการทดลองของชุดทดสอบบนกระดาษกรอง Whatman grade 1 .....	26
ตารางที่ 3.3 บันทึกข้อมูลการทดลองของชุดทดสอบบนกระดาษกรอง Whatman grade 41 .....	27
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะของกระดาษกรองเบอร์ 1, 41 และ 93.....	32
ตารางที่ 3.5 ผลการทดลองความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 5% โดยปริมาตรต่อปริมาตร .....	39
ตารางที่ 3.6 ผลการทดลองความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 7.5% โดยปริมาตรต่อปริมาตร .....	40
ตารางที่ 3.7 ผลการทดลองความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 10% โดยปริมาตรต่อปริมาตร .....	40
ตารางที่ 3.8 ผลการทดลองความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 12.5% โดยปริมาตรต่อปริมาตร ....	40
ตารางที่ 3.9 ผลการทดลองความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 15% โดยปริมาตรต่อปริมาตร .....	41
ตารางที่ 3.10 ผลการทดลองความเข้มข้นของ PVC 0.25wt% โดยมวลต่อปริมาตร.....	54
ตารางที่ 3.11 ผลจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดหมึกที่ถูกพิมพ์ลงบน กระดาษกรองและแผ่นใส .....	56
ตารางที่ 3.12 ผลการทดลองค่าความคลาดเคลื่อนหลังจากการพิมพ์ซ้ำที่ตำแหน่งเดิม (reprint error) .....	59
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Ethylene glycol และ น้ำ [16]	63
ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองหาค่าระยะห่างที่เป็นไปได้ระหว่างท่อนกับท่อขนาดเล็กใน แต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ของวิธี Water mask .....	76

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 วิธีการของ ELISA.....	6
ภาพที่ 2.2 แล็บบนชิปประเภทแก้ว [4] .....	8
ภาพที่ 2.3 แล็บบนชิปประเภทพลาสติก [5].....	8
ภาพที่ 2.4 แล็บบนชิปประเภทกระดาษ [6].....	9
ภาพที่ 2.5 วิธีการฉายแสง (photolithography) [7] .....	10
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการใช้อุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (bioassay) [7].....	11
ภาพที่ 2.7 ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างหัวพิมพ์โพลีเมอร์ PDMS [8].....	12
ภาพที่ 2.8 ผลงานจากการใช้เครื่องพลอตเตอร์สร้างลวดลายโดยมีโพลีเมอร์ PDMS [8].....	13
ภาพที่ 2.9 กระบวนการสร้างลวดลายจากการประยุกต์ใช้การพิมพ์ Wax [9] .....	14
ภาพที่ 2.10 ภาพตัดขวางผลการทดลองของวิธีการพิมพ์หมึก Wax [9] .....	15
ภาพที่ 2.11 การสร้างลวดลายจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท [10][11].....	16
ภาพที่ 2.12 กระบวนการสร้างลวดลายในรูปแบบแถบทดสอบ (strip test) [12].....	18
ภาพที่ 2.13 แถบทดสอบ (strip test) ประเภทกระดาษ [12].....	18
ภาพที่ 3.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Epson, รุ่น T13 [13] .....	20
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของ SU-8 [14].....	21
ภาพที่ 3.3 รูปแบบลวดลายการพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบหยด.....	23
ภาพที่ 3.4 รูปแบบลวดลายการพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจุ่ม .....	23
ภาพที่ 3.5 ผลการทดลองหยดของเหลว (น้ำ) ในชุดทดสอบ.....	25
ภาพที่ 3.6 ผลการทดลองจุ่มชุดทดสอบในของเหลว (น้ำ).....	25
ภาพที่ 3.7 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของกัมแพงโพลีเมอร์ SU-8 จากเงื่อนไขที่เหมาะสม .....	29
ภาพที่ 3.8 รูปภาพตัดขวางแสดงลักษณะของกัมแพงโพลีเมอร์ SU-8 จากเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม....	29
ภาพที่ 3.9 การทดสอบแล็บบนชิปต้นแบบจากการสร้างของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม .....	31
ภาพที่ 3.10 ลวดลายที่ใช้ในการทดลอง SU-8 กับการพิมพ์ บนกระดาษ Whatman grade 93.....	34
ภาพที่ 3.11 ผลการทดลองที่ขนาดของกัมแพง 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 5% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	36
ภาพที่ 3.12 ผลการทดลองที่ขนาดของกัมแพง 3.0, 3.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 5% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	36

ภาพที่ 3.13 ผลการทดลองที่ขนาดของกำแพง 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 10% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	37
ภาพที่ 3.14 ผลการทดลองที่ขนาดของกำแพง 3.0, 3.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 10% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	37
ภาพที่ 3.15 ผลการทดลองที่ขนาดของกำแพง 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 5% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	38
ภาพที่ 3.16 ผลการทดลองที่ขนาดของกำแพง 3.0, 3.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 15% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	38
ภาพที่ 3.17 ลวดลายที่ใช้ในการสร้างเส้นบนชิปต้นแบบ .....	43
ภาพที่ 3.18 ลวดลายของเส้นบนชิปที่บอกตำแหน่งของสารที่ใช้ในการทดสอบ .....	43
ภาพที่ 3.19 เส้นบนชิปต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ .....	44
ภาพที่ 3.20 เส้นบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบกับสารละลายตัวอย่าง .....	44
ภาพที่ 3.21 เปรียบเทียบระหว่างเส้นบนชิปต้นแบบที่ไม่มีการทดสอบสารและมีการทดสอบสาร	46
ภาพที่ 3.22 ลักษณะของโมเลกุลของสารสองชนิดที่สามารถละลายกันได้ [15] .....	49
ภาพที่ 3.23 รูปลักษณะของโมเลกุลของสารสองชนิดที่ไม่สามารถละลายกันได้ [15] .....	49
ภาพที่ 3.24 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 1wt%, 1 ไมโครลิตร .....	52
ภาพที่ 3.25 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 2.5wt%, 1 ไมโครลิตร .....	52
ภาพที่ 3.26 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 5wt%, 1 ไมโครลิตร .....	53
ภาพที่ 3.27 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 10wt%, 1 ไมโครลิตร .....	53
ภาพที่ 3.28 ชุดทดสอบจากความเข้มข้นของ PVC 0.25wt% .....	55
ภาพที่ 3.29 เปรียบเทียบระหว่างการพิมพ์ลวดลายบนกระดาษกับแผ่นใส .....	57
ภาพที่ 3.30 การทดสอบ Printing error .....	58
ภาพที่ 4.1 คุณสมบัติของ Ethylene glycol [16] .....	63
ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนการหาความเข้มข้นของสารละลาย Polystyrene ใน Toluene ที่เหมาะสม ในการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ .....	64
ภาพที่ 4.3 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 0.5% โดยมวลต่อปริมาตร .....	66
ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 1.0% โดยมวลต่อปริมาตร .....	66

ภาพที่ 4.5 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 1.5% โดยมวลต่อปริมาตร .....	66
ภาพที่ 4.6 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 2.0% โดยมวลต่อปริมาตร .....	67
ภาพที่ 4.7 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 2.5% โดยมวลต่อปริมาตร .....	67
ภาพที่ 4.8 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร .....	67
ภาพที่ 4.9 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 5.0% โดยมวลต่อปริมาตร .....	68
ภาพที่ 4.10 ขั้นตอนการทดลองหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างเป็นเส้นบนฉีปต้นแบบ โดยใช้วิธี Water-mask .....	69
ภาพที่ 4.11 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 .....	73
ภาพที่ 4.12 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 2 .....	73
ภาพที่ 4.13 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 3 .....	74
ภาพที่ 4.14 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 4 .....	74
ภาพที่ 4.15 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 5 .....	75
ภาพที่ 4.16 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 6 .....	75
ภาพที่ 4.17 แผนภูมิบอกความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของท่อขนาดเล็กในเงื่อนไขที่ แตกต่างกัน .....	77
ภาพที่ 4.18 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 .....	79
ภาพที่ 4.19 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% .....	79

ภาพที่ 4.20 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสี.....	80
ภาพที่ 4.21 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 200 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสี.....	80
ภาพที่ 4.22 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสีในส่วนที่เป็น Channel ของวิธี Water mask.....	81
ภาพที่ 4.23 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 200 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสีในส่วนที่เป็น Channel ของวิธี Water mask .....	81
ภาพที่ 4.24 ลวดลายที่ใช้ในการสร้างเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปจะบอกขนาดของท่อและหลุมที่ ตำแหน่งต่างๆ.....	86
ภาพที่ 4.25 เส้นบนชิปต้นแบบ โดยใช้วิธีการของ Water-mask.....	86
ภาพที่ 4.26 เส้นบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที ....	87
ภาพที่ 4.27 เส้นบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 32 นาที ..	87
ภาพที่ 5.1 กราฟแท่งของผลการทดลองการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทอง.....	91
ภาพที่ 5.2 ชุดทดลองกับชั้นรอง Glucose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% ก่อนการทดลอง.....	92
ภาพที่ 5.3 ทดลองกับชั้นรอง Glucose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% หลังการทดลอง .....	92
ภาพที่ 5.4 ทดลองกับชั้นรอง Fructose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% ก่อนการทดลอง .....	93
ภาพที่ 5.5 ทดลองกับชั้นรอง Fructose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% หลังการทดลอง .....	93
ภาพที่ 5.6 รูปแบบลวดลายที่ให้ในการสร้าง Paper test strip โดยวิธี Water mask.....	94
ภาพที่ 5.7 Paper test strip แบบไม่มีชั้นรองก่อนการทดสอบประสิทธิภาพ.....	97
ภาพที่ 5.8 Paper test strip แบบไม่มีชั้นรองหลังการทดสอบประสิทธิภาพ .....	97
ภาพที่ 5.9 Paper test strip แบบใช้ Glucose 85% เป็นชั้นรองก่อนการทดสอบประสิทธิภาพ .....	98
ภาพที่ 5.10 Paper test strip แบบใช้ Glucose 85% เป็นชั้นรองหลังการทดสอบประสิทธิภาพ.....	98

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Anti-Alpha	ชื่อกลุ่มหรือหมวดหมู่ของ โปรตีนชนิดนั้น
Anti-Beta	ชื่อกลุ่มหรือหมวดหมู่ของ โปรตีนชนิดนั้น

## อักษรกรีก

$\gamma$	แรงตึงผิว
$\eta$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของหมึก Wax เทลวกับกระดาษกรอง

## อักษรย่อ

ELISA	Enzyme-linked immunosorbent assay
DNA	Deoxyribonucleic acid
PDMS	Polydimethylsiloxane
PVC	Poly vinyl chloride
PS	Polystyrene
PEG	Polyethylene glycol
BSA	Bovine serum albumin
PBS	Phosphate buffered saline
HCG	Human Chorionic Gonadotropin
IGG	Immunoglobulin G

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการตรวจสอบสารเคมีทางวิทยาศาสตร์ทั้งในเชิงการวิเคราะห์หาคุณภาพ ปริมาณ เช่น การแยกสารเคมี (separation of chemicals) การไตเตรท (titration) สเปกโตรสโคปี (spectroscopy) การวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (electroanalytical methods) แมสสเปกโตรเมทรี (mass spectrometry) หรือ ตรวจสอบสารสังเคราะห์หรือสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในคน สัตว์ และ พืช ตลอดจน การวินิจฉัยโรคจากของเหลวต่างๆในร่างกาย เช่น เลือด เหงื่อ และน้ำเหลืองนั้น มีมากมายหลายวิธี ส่วนใหญ่จะกระทำในห้องปฏิบัติการซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อน ต้องอาศัยอุปกรณ์เครื่องมือราคาแพง การตรวจวิเคราะห์ใช้เวลานานโดยเฉพาะการตรวจหาสารโมเลกุลชีวภาพในการวินิจฉัยโรค เช่นวิธีการที่เรียกว่าอีไลซ่า (ELISA) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนา แล็บบนชิป (LAB-ON-A-CHIP) ขึ้นเป็นทางเลือกใหม่โดยย่อขนาดของกระบวนการในห้องปฏิบัติการมาไว้ในชิปขนาดเล็ก สะดวกในการพกพา ใช้งานง่ายและสามารถให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว แล็บบนชิปประกอบไปด้วยท่อขนาดเล็กระดับไมโครเมตร (micro-channel) และหลุม (well) เพื่อบรรจุสารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดสารเคมี หรือ สารโมเลกุลชีวภาพ เช่น โปรตีน DNA โดยใช้ท่อเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหล ตามที่ออกแบบไว้ แล้วอ่านผลด้วยตาเปล่าก็สามารถระบุ ประเภทของสารเคมี ความเข้มข้น หรือชนิดของโรคได้ วัสดุที่ใช้สร้างแล็บบนชิป นิยมใช้ แก้ว หรือ พลาสติก ซึ่งมีการพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง ภายหลังได้มีการประยุกต์สร้างบนกระดาษกรอง (filter paper) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการผลิต อันจะทำให้การใช้งานของแล็บบนชิปเป็นที่แพร่หลายและสามารถเข้าถึงได้มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนา แนวโน้มการพัฒนาแล็บบนชิปขณะนี้ไปในทิศทางของการลดขนาดเพื่อประหยัดทรัพยากร การเลือกใช้วัสดุที่มีราคาถูกและกระบวนการสร้างที่เหมาะสมเพื่อประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาแล็บบนชิปประเภทกระดาษซึ่งได้รับความสนใจไปทั่วโลกในด้านต่างๆ เช่น วิธีการสร้าง การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงราคาและสามารถหาได้ทั่วไป ขั้นตอนการประดิษฐ์ง่ายไม่สลับซับซ้อน ปลอดภัย สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระดับ โรงงานอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์เพื่อเป็นการลดต้นทุนเพิ่มความรวดเร็วในการผลิตการ เพื่อให้สามารถเข้าถึงมือผู้บริโภคได้อย่างแพร่หลาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโพลิเมอร์ SU-8 และ PVC มาใช้ทำลวดลายของแผ่นบนชิปโดยใช้โดยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

1.2.2 ศึกษาวิธีการปรับปรุงการเคลื่อนตัวของอนุภาคทอง (colloidal gold) บนกระดาษกรอง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำโพลิเมอร์ SU-8 และ PVC มาใช้ในการทำลวดลายโดยปรับเปลี่ยนชนิดของกระดาษ ความเข้มข้นของสาร ขนาดความหนาของผนัง และจำนวนการพิมพ์ซ้ำ

1.3.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารลดแรงตึงผิว และกาวน้ำ เพื่อปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำบนกระดาษกรอง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นการพัฒนาปรับปรุงแผ่นบนชิปต้นแบบทั้งในเรื่องของ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ วิธีการสร้าง ปัญหาในการผลิต แนวทางการแก้ไขพัฒนาต่อยอดเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเป็นการลดต้นทุนในการสร้างแผ่นบนชิปประเภทกระดาษจากเดิมที่เคยเป็นแก้ว พลาสติก ลดขนาดของวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการสร้าง กระบวนการผลิต เพื่อเป็นรูปแบบแนวทางในการพัฒนาต่อในระดับอุตสาหกรรม โรงงานและเชิงพาณิชย์ เป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนา ที่จะได้ใช้อุปกรณ์ที่ราคาถูกมีขนาดเล็ก ให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วและแม่นยำ



## 1.5 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับเส้นบนชิป เช่น ประวัติความเป็นมา การใช้งาน ขั้นตอนการผลิต ข้อดีข้อเสีย ผลกระทบต่อคนและสิ่งแวดล้อม แนวทางการพัฒนา

1.5.2 วิเคราะห์หาแนวทางการพัฒนาการสร้างเบื้องต้นโดยใช้อุปกรณ์ที่ราคาถูกลงและวิธีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยการใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

1.5.3 ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดขอบเขตของงาน และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างเส้นบนชิปประเภทกระดาษด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยมีโพลิเมอร์ SU-8 เป็นสารที่ใช้ในการทดลองสร้างลวดลาย

1.5.4 ทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามที่ออกแบบไว้ คือ ความเข้มข้นของโพลิเมอร์ ความกว้างของกำแพง และจำนวนครั้งที่พิมพ์ ของลวดลายที่ออกแบบไว้บนกระดาษกรอง เพื่อให้สามารถควบคุมหรือกำหนดทิศทางการไหลได้

1.5.5 สรุปผลการทดลองและหาแนวทางการปรับปรุงจากผลการทดลองจากวัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาถูก จากการใช้ Polyvinyl chloride และ Polystyrene

1.5.6 ศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคทอง (colloidal gold) เช่น ประวัติความเป็นมา การสังเคราะห์ประโยชน์จากการนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้อง

1.5.7 ปรับปรุงการลดการยึดเกาะของแอนติบอดีติดฉลากด้วยทองบนกระดาษกรอง

1.5.8 ออกแบบการทดลองเพื่อหาวิธีการทำให้แอนติบอดีติดฉลากด้วยทองสามารถเคลื่อนที่บนกระดาษกรอง

1.5.9 สรุปผลงานวิจัยและหาข้อเสนอแนะ

1.5.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ทางเคมีและเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ในปัจจุบัน และตัวอย่างของวิธีการตรวจหาสารโอมิกลูกลีวภาพอีไลซ่า เพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการ ขั้นตอนที่ใช้กันในปัจจุบัน ว่ามีขั้นตอนที่สลับซับซ้อน ต้องใช้ผู้ปฏิบัติการที่มีความรู้ความเข้าใจในการปฏิบัติงาน และใช้เวลานานในการได้มาซึ่งผลลัพธ์สำหรับผลการทดลองหนึ่งตัวอย่าง จึงนำไปสู่การพัฒนาแล็บบนชิปเพื่อย่นย่อวิธีการมากมายเหล่านี้ลงมาอยู่ในอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียว และในบทนี้จะกล่าวถึงความหมายของแล็บบนชิป และการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบประเภทกระดาษในหลายๆวิธีการ เพื่อนำไปสู่การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบประเภทกระดาษสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.1 วิธีการตรวจหาสารเคมีและสารโอมิกลูกลีวภาพ (ELISA)

การวิเคราะห์สารเคมีโดยทั่วไปการวิเคราะห์สารเคมีจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลักๆคือการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อทราบว่ามีสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ เช่น ธาตุ สารประกอบ หรือโมโนเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในสารที่ต้องการวิเคราะห์ว่ามีปริมาณอย่างละเท่าใด ในวิธีการวิเคราะห์สารตัวอย่างทางเคมีมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะให้ผลลัพธ์ที่ต้องการแตกต่างกัน วิธีการในสมัยแรกจะเป็นการวิเคราะห์สารเคมีโดยการวัดค่าต่างๆแบบพื้นฐานเช่น การชั่ง การตวง ต่อมาภายหลังใช้หลักการของเคมีฟิสิกส์เข้ามาช่วยในการตรวจสอบเช่น ใช้หลักการทางไฟฟ้า หลักการของแสง หลักการทางมวล และหลักการแยก ส่วนของการตรวจวัดสาร โอมิกลูกลีวภาพก็จะมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการของอีไลซ่า (ELISA) [1]

Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) เป็นวิธีการทางชีวเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการยอมรับมีผลลับที่แม่นยำ ส่วนใหญ่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของ แอนติเจน (antigen) หรือ แอนติบอดี (antibody) ในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายคน สัตว์ และ พืช จากสารตัวอย่าง ELISA ใช้เป็นวิธีวินิจฉัยโรคในทางการแพทย์ และตรวจสอบควบคุมคุณภาพสิ่งเจือปนในวัตถุดิบหรือสินค้าเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับผู้บริโภค ในระดับอุตสาหกรรมโรงงาน หรือ คราวเรือนต่างๆ ภาพที่ 2.1 วิธีของ ELISA มีด้วยกันหลายวิธีคือ

1. Indirect ELISA เป็นวิธีการตรวจหาแอนติบอดีที่อยู่ในสารตัวอย่าง เริ่มจากการใช้แอนติเจนที่จำเพาะกับแอนติบอดีที่เราต้องการตรวจสอบไปติดที่ก้นหลุมแล้วล้างออก จากนั้นใส่สารตัวอย่างที่ต้องการตรวจหาแอนติบอดี ในขั้นตอนนี้แอนติเจนกับแอนติบอดีจะจับกันแล้วล้างออก

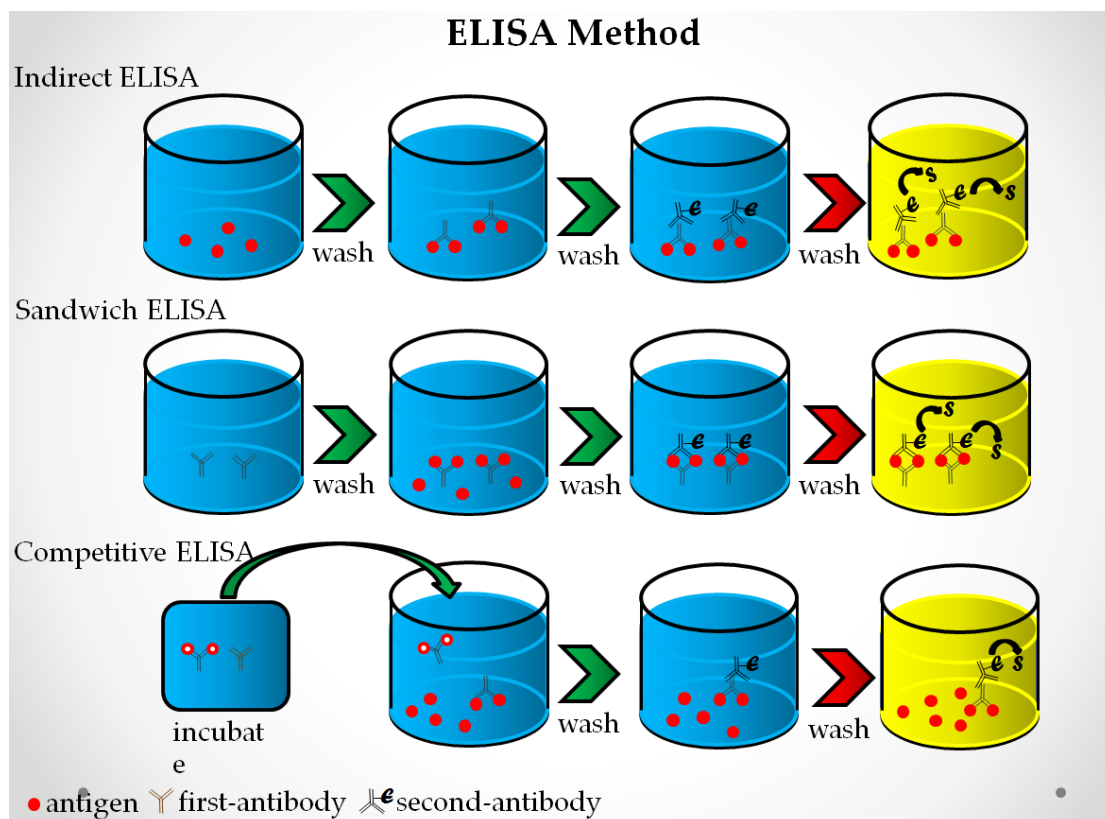
แล้วใส่แอนติบอดีตัวที่สองที่จำเพาะกับแอนติบอดีตัวแรกซึ่งติดฉลากเอนไซม์ (enzyme) ในกระบวนการนี้แอนติบอดีตัวแรก (ตัวที่เราต้องการตรวจวัดปริมาณ) จะจับกับแอนติบอดีตัวที่สอง แล้วล้างออก ขั้นตอนสุดท้ายใส่ Substrate ลงไปเอนไซม์ที่ติดอยู่กับแอนติบอดีตัวที่สองจะย่อย substrate แล้วเปลี่ยนสี ความเข้มของสีจะขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ซึ่งแปรผันตรงกับแอนติบอดีที่เราต้องการตรวจหาปริมาณ

2. Sandwich ELISA เป็นวิธีการตรวจหาแอนติเจนที่อยู่ในสารตัวอย่าง เริ่มจากการใช้แอนติบอดีที่จำเพาะกับแอนติเจนที่เราต้องการตรวจลงไปที่ก้นหลุมแล้วล้างออก จากนั้นใส่สารตัวอย่างที่ต้องการตรวจหาแอนติเจน ในขั้นตอนนี้แอนติเจนกับแอนติบอดีจะจับกันแล้วล้างออก แล้วใส่แอนติบอดีตัวที่สองที่จำเพาะกับแอนติเจนอีกตัวพร้อมติดฉลากเอนไซม์ (enzyme) ในกระบวนการนี้แอนติบอดีตัวสองจะจับกับแอนติเจน (ตัวที่เราต้องการตรวจวัดปริมาณ) แล้วล้างออก ขั้นตอนสุดท้ายใส่ Substrate ลงไปเอนไซม์ที่ติดอยู่กับแอนติบอดีตัวที่สองจะย่อย Substrate แล้วเปลี่ยนสี ความเข้มของสีจะขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ซึ่งแปรผันตรงกับแอนติเจนที่เราต้องการตรวจหาปริมาณ

3. Competitive ELISA เป็นวิธีการตรวจหาแอนติบอดีที่อยู่ในสารตัวอย่าง เริ่มจากการใช้แอนติเจนที่จำเพาะกับแอนติบอดีที่เราต้องการตรวจมาบ่มรวมกันไว้ก่อน อาจไม่จำเป็นต้องจับคู่กันทั้งหมดแล้วนำไปใส่ในหลุมที่มีแอนติเจนอยู่ แอนติบอดีที่ไม่ได้จับกับแอนติเจนจากการบ่มจะเหลือลงไปจับที่ก้นหลุมแล้วล้างออก แล้วใส่แอนติบอดีตัวที่สองที่จำเพาะกับแอนติบอดีตัวแรกซึ่งติดฉลากเอนไซม์ (enzyme) ในกระบวนการนี้แอนติบอดีตัวแรก (ตัวที่เราต้องการตรวจวัดปริมาณ) จะจับกับแอนติบอดีตัวที่สองแล้วล้างออก ขั้นตอนสุดท้ายใส่ Substrate ลงไปเอนไซม์ที่ติดอยู่กับแอนติบอดีตัวที่สองจะย่อย Substrate แล้วเปลี่ยนสี ความเข้มของสีจะขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ซึ่งแปรผันตรงกับแอนติบอดีที่เราต้องการตรวจหาปริมาณ ในกรณีที่แอนติบอดีถูกจับกับแอนติเจนหมดจากการบ่ม จะทำให้ไม่เกิดสีในขั้นตอนสุดท้าย [2][3]

หากเราสามารถนำวิธีการต่างๆในการวิเคราะห์ทางเคมีและสาร โมเลกุลชีวภาพที่มีขั้นตอนมากมายเหล่านี้มากรวมไว้ในอุปกรณ์เพียงชนิดเดียวหรือเพียงชิ้นเดียวเช่น แล็บบนชิป ที่เปรียบเสมือนการย่อเอาห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่ลงมาอยู่ในอุปกรณ์ขนาดเล็กเพียงชิ้นเดียว ก็จะเกิดประโยชน์อย่างมากทั้งในด้านทรัพยากรและบุคลากร

ภาพที่ 2.1 วิธีการของ ELISA โดยทั่วไป จะใช้คู่ด้วยกันสามวิธี คือ (a) Indirect ELISA ในการตรวจหาแอนติบอดี (b) Double antibody sandwich ELISA ในการตรวจหาแอนติเจน (c) Competitive ELISA ในการตรวจหาแอนติบอดี



ภาพที่ 2.1 วิธีการของ ELISA

## 2.2 แล็บบนชิป (LAB-ON-A-CHIP)

แล็บบนชิปเป็นเสมือนอุปกรณ์ขนาดเล็ก (อาจประมาณเท่ากับนิ้วมือ) ซึ่งรวบรวมเอาห้องปฏิบัติการ (laboratory) มากไว้บนอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียวเพื่อที่จะสามารถตรวจวิเคราะห์ทางเคมี ทั้งคุณสมบัติเชิงปริมาณและคุณภาพ ตรวจหาสารโมเลกุลทางชีวภาพ ได้อย่างรวดเร็วและให้ผลลัพธ์ ที่ถูกต้องแม่นยำ แล็บบนชิปใช้เทคนิคการจัดการกับของไหลที่มีประเพ็ญเล็กน้อยให้ไหลผ่านไป ตามท่อ และหลุมที่มีขนาดเล็ก หรืออาจมีส่วนประกอบอยู่ที่จำเป็นภายในแล็บบนชิป เช่น หัวฉีด ใช้ ในการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลภายในแล็บบนชิป, ปั๊ม ใช้ในการเพิ่มแรงดันของของไหลใน บริเวณที่มีขนาดเล็ก, วาล์ว ทำหน้าที่ควบคุมการไหลไปในทิศทางที่ต้องการ, พื้นที่ผสม ในแล็บบน ชิปก่อนการวิเคราะห์หาสารอาจต้องมีการผสมกับสารที่เตรียมไว้ในทดสอบก่อน โดยการบวกรวม การไหลของของเหลว ซึ่งโดยปกติแล้วการไหลภายในท่อขนาดเล็กระดับไมโครลิตร การไหลจะ

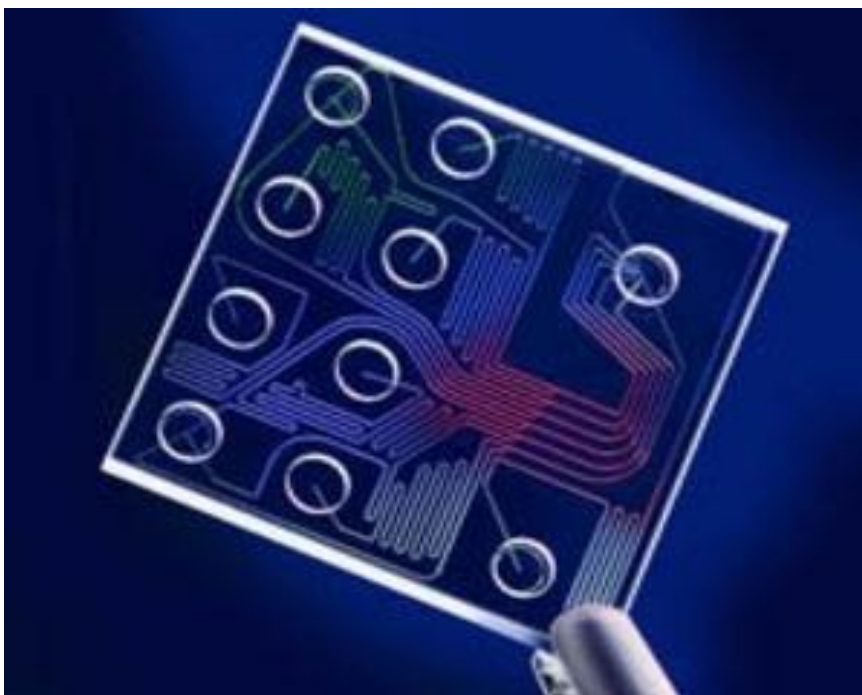
เป็นแบบชั้น (lamina flow) จึงต้องมีพื้นรับกวนการไหลทำให้เป็นแบบกวน (turbulent flow) เพื่อให้สารผสมกัน, ตัวกรอง เป็นส่วนที่สำคัญของการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการออกก่อนในการทดสอบ และ เซนเซอร์ เป็นส่วนที่สำคัญในการอ่านค่าของผลลัพธ์ เป็นต้น เพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการใช้ในการตรวจสอบ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถอ่านค่าได้ด้วยตาเปล่า โดยจะเห็นเป็นรูปแบบของสีต่างๆ รวมถึงความเข้มข้นของสีที่มีผลต่อปริมาณเข้มข้นที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง การจะออกแบบระบบการจัดการกับของไหลนั้นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในการออกแบบเพื่อที่จะสามารถสร้างแล็บบนชิปในการตรวจสอบสารต่างๆ ได้ และแนวโน้มการพัฒนาแล็บบนชิปจะไปในทางของ การทำให้ขนาดลดลง การใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาถูก กระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพื่อเป็นการลดต้นทุนในระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์

ที่ผ่านมาได้มีการเสนอวิธีการสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษนี้ด้วยกันหลายวิธีโดยแต่ละวิธีมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างท่อ และ หลุม ที่สามารถกั้นของเหลวไม่ให้รั่วซึมหรือทะลุผ่านกระดาษกรองตามที่ออกแบบไว้

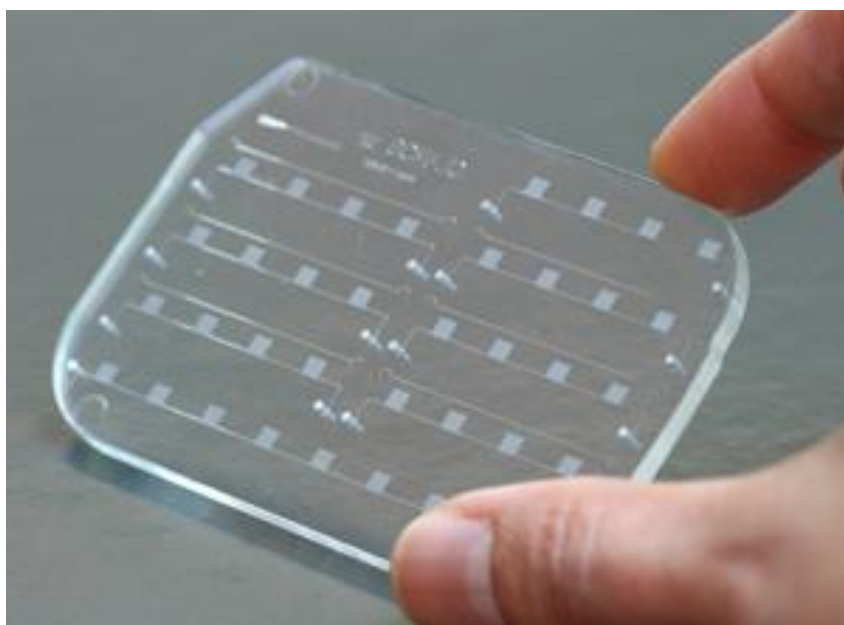
ภาพที่ 2.2 แสดงแล็บบนชิปประเภทแก้วที่มีลักษณะพื้นฐานคือจะประกอบด้วยท่อและหลุมขนาดเล็กจำนวนมาก ขนาด ทิศทาง ระยะทางของท่อและหลุมขึ้นกับการออกแบบในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ต่างกันไป แล็บบนชิปหนึ่งชิ้นสามารถตรวจวิเคราะห์หาสารที่ต้องการได้มากกว่าหนึ่งชนิด

ภาพที่ 2.3 แสดงแล็บบนชิปประเภทพลาสติกสำหรับตรวจเลือดเพื่อหาเชื้อเอชไอวี (HIV) ที่สามารถใช้ได้จริงในปัจจุบัน มีขนาดเท่ากับบัตรเครดิต อ่านผลได้อย่างแม่นยำใช้เวลาเพียง 20 นาที โดยแล็บบนชิปนี้มีพื้นฐานการทำงาน และพัฒนามาจากวิธีการของอีไลซ่า ซึ่งวิธีอีไลซ่านี้อาจต้องใช้เวลา 1-7 วันจึงจะรู้ผลลัพธ์

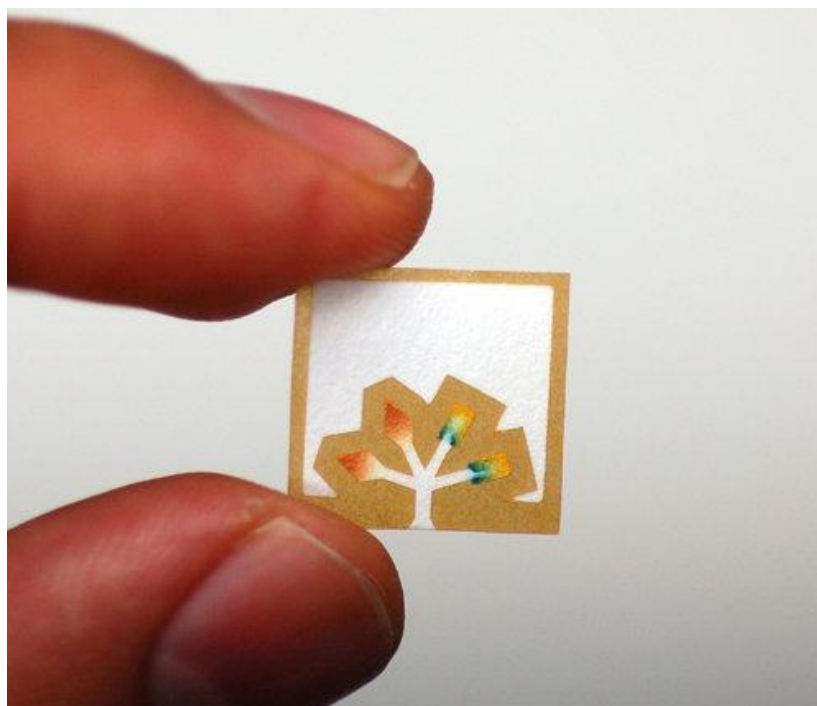
ภาพที่ 2.4 แสดงแล็บบนชิปประเภทกระดาษความเข้มข้นของกลูโคส (glucose) และ โปรตีน (protein) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง จะให้ผลลัพธ์อยู่ในรูปของสีที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการทดลองกลูโคสอยู่ที่สองช่องทางฝั่งซ้ายและการทดลองโปรตีนอยู่ที่สองช่องทางฝั่งขวา



ภาพที่ 2.2 แล่บบนชิปประเภทแก้ว [4]



ภาพที่ 2.3 แล่บบนชิปประเภทพลาสติก [5]



ภาพที่ 2.4 แล็บบนชิปประเภทกระดาษ [6]

## 2.3 แล็บบนชิปประเภทกระดาษและวิธีการสร้าง

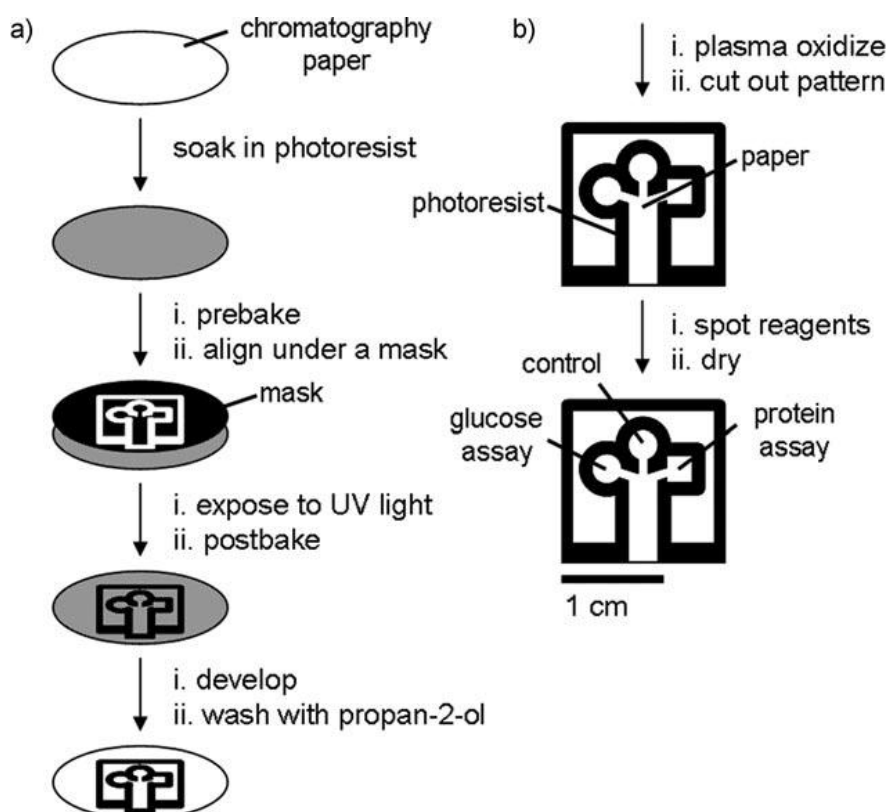
### 2.3.1 การฉายแสง (photolithography) โดยใช้โพลิเมอร์ประเภท SU-8

วิธีการการฉายแสง โดยใช้โพลิเมอร์ประเภท SU-8 [7] ซึ่งเมื่อโดนแสงจะแข็งตัวและติดแน่นบนการดาษกรองสามารถสร้างลวดลายท่อและหลุมตามที่ออกแบบจากแม่แบบ (mask) จากภาพที่ 2.5 กระบวนการเริ่มจากการนำกระดาษกรองมาจุ่มลงในโพลิเมอร์ทั่วทั้งแผ่น นำไปอบ (pre bake) และติดแม่แบบที่ต้องการ นำไปฉายแสง UV เพื่อให้โพลิเมอร์แข็งตัวและอบ (post bake) อีกครั้ง แล้วนำไปกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการออก (develop) จากกระบวนการนี้จะทำให้โพลิเมอร์แทรกซึมลงไปในพื้นที่ของกระดาษก่อดัวไปกำแพงขวางกั้นการแทรกซึมหรือทะลุผ่านของของเหลว และเป็นเสมือนตัวควบคุมทิศทางการไหลของของเหลวไปในทิศทางที่เราต้องการ เมื่อได้ต้นแบบแล้วนำไปปรับแต่งเป็นอุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพโดยการทำความสะอาดและตัดส่วนที่ไม่จำเป็นออก หยดสารที่จำเป็นต่อการใช้ในการตรวจสอบ ในบริเวณที่เตรียมไว้จากต้นแบบ จากภาพที่ 2.6 อุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (bioassay) ทดสอบระดับความเข้มข้นของกลูโคส (glucose) และ โปรตีน (protein) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยผลที่เกิดขึ้นแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสีที่เกิดขึ้น เช่น การวัดปริมาณความเข้มข้นของกลูโคส จากไม่มีสีที่ 0 มิลลิเมตรไปจนถึงเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มที่ 500 มิลลิเมตร และ การวัดปริมาณความเข้มข้นของโปรตีน จากสีเหลืองที่ 0 มิลลิเมตรไป

จนถึงเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มที่ 75 มิลลิเมตร โดยระดับความเข้มของสีสามารถแยกออกด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจน วิธีการนี้ยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้อุปกรณ์ในกระบวนการฉายแสงซึ่งมีราคาแพงและมีหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิต นอกจากนั้นยังต้องใช้โฟลิเมอร์จำนวนมากเนื่องจากต้องจุ่มแผ่นกระดาษกรองลงไปให้ทั่ว ข้อจำกัดของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลวดลายเนื่องจากต้องสร้างแม่แบบขึ้นมาใหม่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันที และความเร็วการผลิตที่ช้า ไม่เหมาะกับการผลิตเป็นจำนวนมากหรือในระดับพาณิชย์ แต่วิธีการนี้ก็เป็ต้นแบบความเป็นไปได้ที่จะสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษและความคิดริเริ่มของวิธีการอื่นๆต่อมาภายหลัง







ภาพที่ 2.5 วิธีการฉายแสง (photolithography) โดยที่ a) คือ ขั้นตอนกระบวนการสร้างลวดลายลงบนกระดาษกรองประกอบด้วยกระบวนการหลักและกระบวนการย่อย b) คือ กระบวนการปรับแต่งให้เป็นอุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (bioassay)

ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการใช้อุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (bioassay) ทดสอบระดับความเข้มข้นของกลูโคส (glucose) ในภาพทางฝั่งซ้าย และ โปรตีน (protein) ภาพทางฝั่งขวา ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ระดับปริมาณความเข้มข้นแปรผันตรงกับความเข้มของสีที่เปลี่ยนไปของกระดาษ



ภาพที่ 2.5 วิธีการฉายแสง (photolithography) [7]



[glucose]/ mM		[BSA]/ $\mu$ M
0		0
2.5		0.38
5.0		0.75
10		1.5
50		7.5
500		75

5 mm

ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการใช้อุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (bioassay) [7]

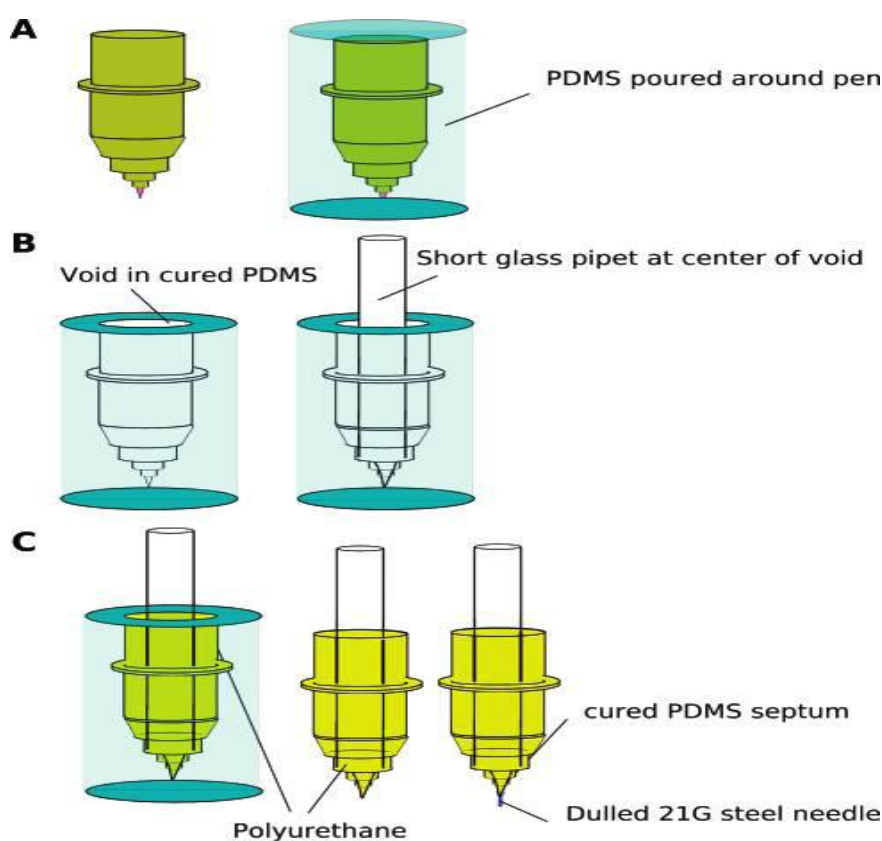
### 2.3.2 วิธีการพิมพ์ PDMS โดยใช้ประยุกต์ใช้กับเครื่องพล็อตเตอร์

วิธีการนี้ใช้เครื่องพล็อตเตอร์โดยทำการตัดแปลงหัวพิมพ์หมึกด้วยภาชนะสำหรับใส่โพลีเมอร์ประเภท Polydimethylsioxane (PDMS) [8] เพื่อใช้สร้างลวดลายที่ต้องการ วิธีการนี้มีขั้นตอนที่ซับซ้อนน้อยกว่าวิธีแรก และยังสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของลวดลายได้ง่ายโดยการเปลี่ยนรูปลวดลายที่ต้องการ ด้วยการเขียนแบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากภาพที่ 2.7 ภาพจำลองการออกแบบหัวพิมพ์โพลีเมอร์ เริ่มจากการหล่อแบบจากหัวพิมพ์ของเครื่องพล็อตเตอร์จริงซึ่งมีลักษณะคล้ายปากกามาสร้างเป็นแบบหัวพิมพ์โพลีเมอร์ที่มีขนาดเท่ากันโดยใช้วัสดุเป็นพลาสติก (polyurethane) เพื่อที่จะสามารถนำไปแทนที่หัวพิมพ์ของเครื่องพล็อตเตอร์ และใช้แทงแก้วติดกับเข็มเป็นแกนกลางทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุมการไหลของโพลีเมอร์ มีข้อดีคือ มีขั้นตอนน้อยไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้แม่แบบเหมือนวิธีการฉายแสง แต่ยังมีข้อจำกัดเรื่องความเร็วในการผลิต เนื่องจากเครื่องพล็อตเตอร์ทำหน้าที่เขียนแบบเพียงทีละเส้นคล้ายแขนกล เส้นแต่ละเส้นจากที่เขียนด้วยหมึกโพลีเมอร์จะไม่เรียบเสมอกันหรือคงที่เท่ากันทั้งเส้นทำให้ขนาดของลวดลายที่ออกแบบไว้

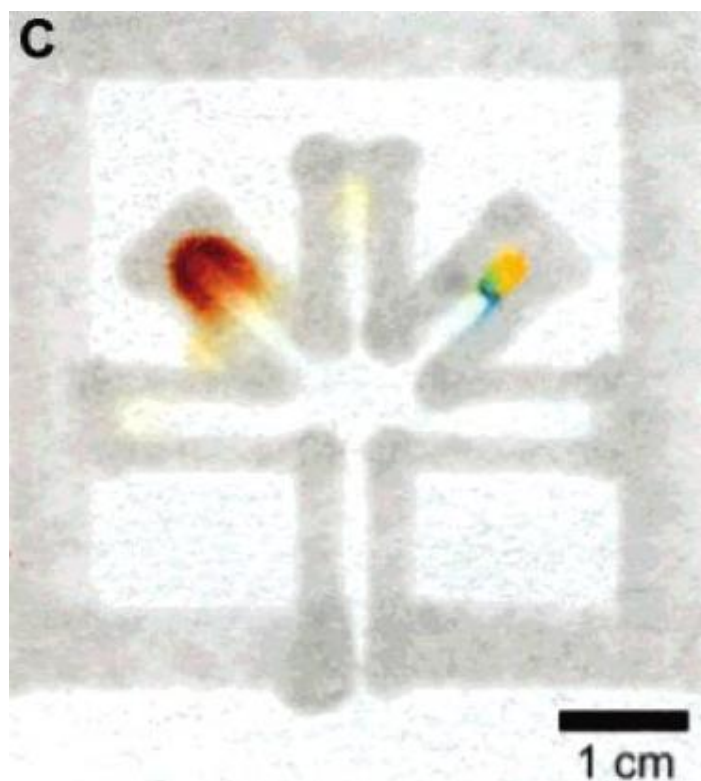
ผิดเพี้ยนไปจากเดิมมีผลต่อ Resolution (ขนาดของที่จะไม่คงที่) จากภาพที่ 2.8 จะเห็นได้อย่างชัดเจนในลักษณะของเส้นแต่ละเส้นที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลต่อขนาดท่อขนาดของท่อทำให้ไม่คงที่ อาจมีปัญหาระหว่างรอยต่อของเส้นที่ไม่เชื่อมติดกัน การเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวพิมพ์ที่บริเวณส่วนที่เป็นเข็มมีผลต่อปริมาณของโพลิเมอร์ที่ไหลออกซึ่งจะต้องมีความเหมาะสมกับลวดลายที่ออกแบบ ราคาเครื่องพล็อตเตอร์ที่มีราคาแพงและขนาดใหญ่

ภาพที่ 2.7 ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างหัวพิมพ์โพลิเมอร์ PDMS A) เป็นการหล่อแม่แบบโดยใช้โพลิเมอร์ PDMS จากหัวพิมพ์ของจริงที่ติดอยู่กับเครื่องพล็อตเตอร์ B) ใส่แท่งแก้วลงไปทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการไหลออกของโพลิเมอร์ PDMS C) หัวพิมพ์ต้นแบบที่สามารถพิมพ์โพลิเมอร์ PDMS และใช้ได้กับเครื่องพล็อตเตอร์ปรกติ

ภาพที่ 2.8 ผลงานจากการใช้เครื่องพล็อตเตอร์สร้างลวดลายโดยมีโพลิเมอร์ (PDMS) เป็นหมึกพิมพ์ทำให้เกิดเป็นกำแพงบนกระดาษกรองควบคุมทิศทางการไหลของของเหลวเพื่อทดสอบคุณสมบัติของสาร (ความเข้มข้นของโปรตีนและกลูโคส)



ภาพที่ 2.7 ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างหัวพิมพ์โพลิเมอร์ PDMS [8]



ภาพที่ 2.8 ผลงานจากการใช้เครื่องพลาสมาสร้างลวดลายโดยมีโพลีเมอร์ PDMS [8]

### 2.3.3 วิธีการพิมพ์หมึก Wax จากเครื่องพิมพ์เลเซอร์

วิธีการนี้ ประยุกต์ใช้การพิมพ์ Wax ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ชนิดที่ใช้ Wax [9] ในการสร้างลวดลายของท่อและหลุมบนกระดาษกรอง จากภาพที่ 2.9 เริ่มจาก A1. การออกแบบลวดลายที่ต้องการในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ A2. พิมพ์ออกมาบนกระดาษกรองด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ A3. นำชิ้นงานที่ได้ไปวางบนเตาความร้อนเพื่อให้หมึก Wax ละลายเป็นของเหลวซึมผ่านกระดาษกรอง เกิดเป็นลวดลายตามที่ออกแบบไว้ B, C และ D แสดงลวดลายที่ออกแบบไว้ในแต่ละขั้นตอนว่าการเปลี่ยนแปลงในแต่ละกระบวนการอย่างไร ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อผ่านกระบวนการไปแล้วจะทำให้ขนาดของลวดลายที่ออกแบบไว้เพิ่มขึ้น วิธีการนี้มีข้อดีคือขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน การผลิตที่รวดเร็ว และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบลวดลายได้ง่ายโดยการเปลี่ยนแบบที่ต้องการพิมพ์ในคอมพิวเตอร์ แต่หมึกพิมพ์ Wax และเครื่องพิมพ์เลเซอร์นั้นมีราคาแพง นอกจากนั้นการใช้ความร้อนในการทำให้ Wax ละลายยังทำให้ Resolution ของการพิมพ์ลดลง(ขนาดความกว้างของผนังท่อกว้างขึ้น) จากภาพที่ 2.9 A แสดงความหมายของตัวแปรแต่ละตัวเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางการซึมผ่านกระดาษกรองของ Wax จากสมการ

$$L = \left(\frac{\gamma Dt}{4\eta}\right)^{1/2} \quad (2.1)$$

$\gamma$  คือ แรงตึงผิวของ Wax เมื่อละลายจากอุณหภูมิสูง

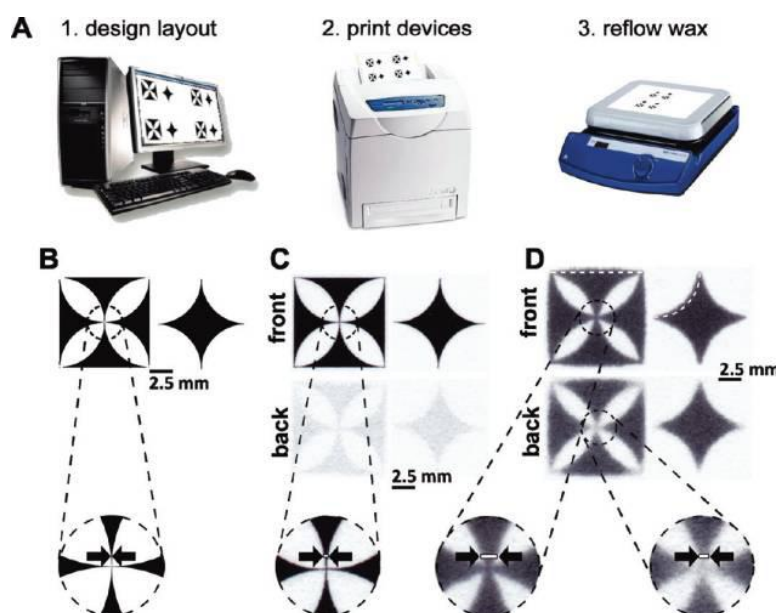
$D$  คือ ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางรูพรุนของกระดาษกรอง

$t$  คือ เวลา

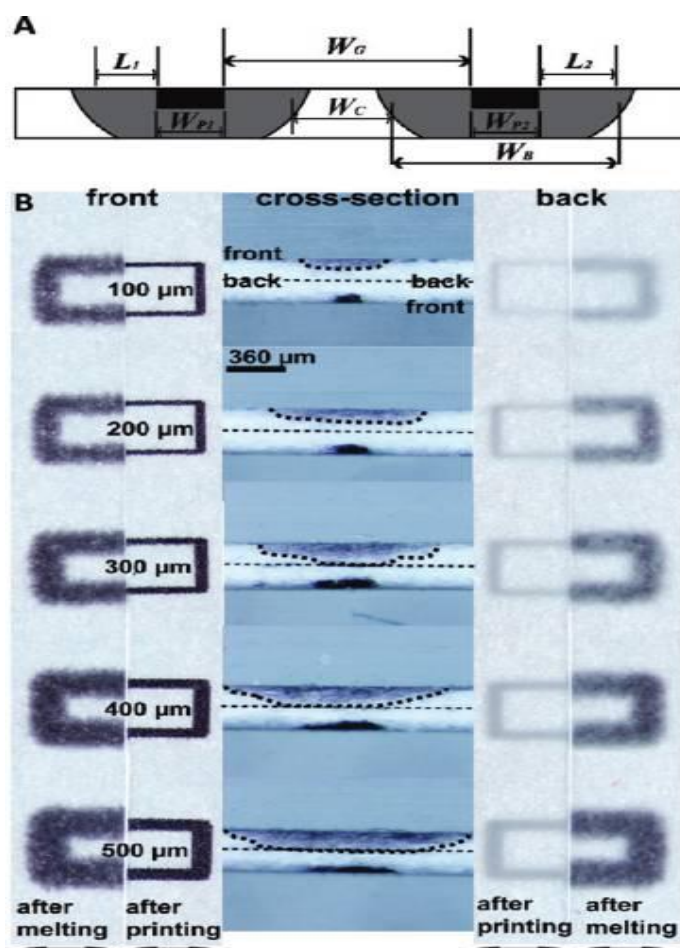
$\eta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่หิมิก Wax เหลวกับกระดาษกรอง

ภาพที่ 2.9 กระบวนการสร้างลวดลายจากการประยุกต์ใช้การพิมพ์ Wax ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ A) 1. ออกแบบลวดลายจากเครื่องคอมพิวเตอร์ 2. พิมพ์ลวดลายลงบนกระดาษกรองด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ 3. นำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อให้หิมิก Wax ละลาย กลายเป็นกำแพงกันของเหลวและควบคุมทิศทางการไหล B) C) และ D) เป็นภาพที่เกินขึ้นในแต่ละขั้นตอนจะเป็นความแตกต่างในขั้นตอนที่ 3. ที่ลวดลายมีขนาดใหญ่ขึ้น

ภาพที่ 2.10 A) ภาพตัดด้านข้างจำลองเพื่อบอกตัวแปลแต่ละตำแหน่งแทนความยาวของส่วนต่างๆ ในสมการ B) ภาพจากการทดลองความหนาของหิมิก Wax ที่ขนาดต่างๆกันจะกว้างขึ้นในทุกทิศทางเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงจากความกว้างที่ 100 – 500 ไมโครเมตร กระบวนการนี้ทำให้ Resolution เปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองขนาดความหนาของ Wax เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การแทรกซึมผ่านกระดาษกรองเมื่อเป็น Wax เหลวเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งขนาดความหนาที่เหมาะสมคือ 300 ไมโครเมตร จะเพียงพอที่สามารถแทรกซึมทะลุผ่านความหนาของกระดาษ เพื่อใช้เป็นกำแพงกันและกำหนดทิศทางการไหลของน้ำได้



ภาพที่ 2.9 กระบวนการสร้างลวดลายจากการประยุกต์ใช้การพิมพ์ Wax [9]



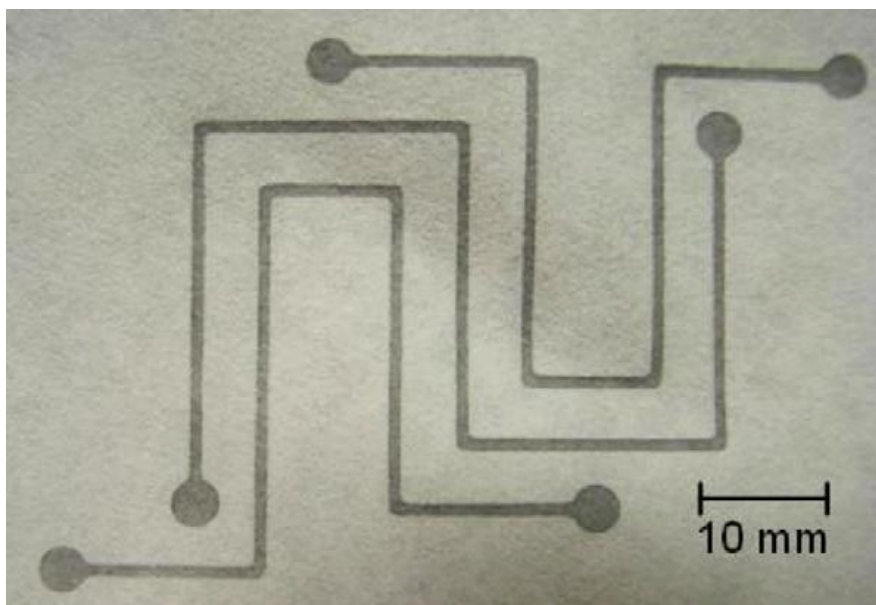
ภาพที่ 2.10 ภาพตัดขวางผลการทดลองของวิธีการพิมพ์หมึก Wax [9]

### 2.3.4 ประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

#### 2.3.4.1 วิธีการพิมพ์ alkenyl ketene dimer

วิธีการนี้ เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (inkjet printer) ในการพิมพ์ Alkenyl ketene dimer [10][11] เพื่อให้เกิดบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เป็นลวดลายตามแบบที่ต้องการ วิธีการนี้มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน รวดเร็ว และราคาถูกลง นอกจากนี้วิธีการนี้ยังสามารถพิมพ์สารอื่นๆที่จำเป็นในการสร้างเล็บบนชิป เช่น สารที่ใช้ในการวิเคราะห์ ลงในบริเวณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ซึ่งทำให้สามารถสร้างเล็บบนชิปได้สำเร็จภายในอุปกรณ์เดียว จากภาพที่ 2.11 ด้วยการพิมพ์ Alkenyl ketene dimer ตามสวดลายที่ออกแบบเป็นท่อและหลุมเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำ

ภาพที่ 2.11 การกำหนดทิศทางการไหลของน้ำด้วยการสร้างลวดลายจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากการพิมพ์ Alkenyl ketene dimer ที่ใช้แทนหมึก ส่วนที่พิมพ์ด้วยหมึกชนิดนี้จะทำให้กระดาษกรองกลายเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำและสามารถควบคุมทิศทางการไหลของน้ำในทิศทางที่ต้องการได้ด้วยการออกแบบลวดลายจากคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 2.11 การสร้างลวดลายจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท [10][11]

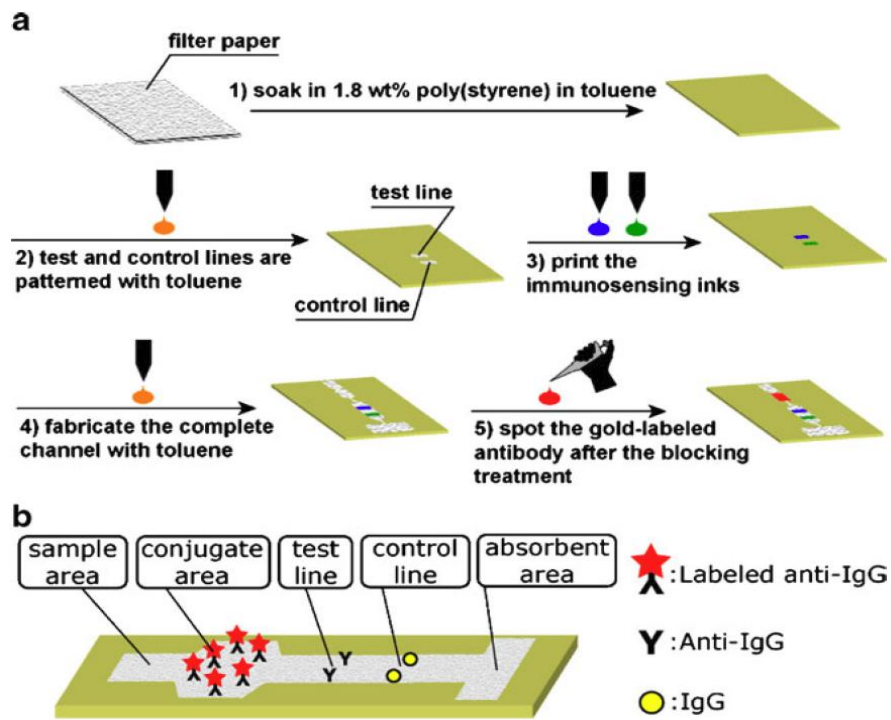
#### 2.3.4.2 วิธีการพิมพ์ polystyrene

วิธีการนี้ เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทคล้ายกับวิธีการพิมพ์ Alkenyl ketene dimer [12] เพียงแต่เปลี่ยนสารที่ใช้เป็นพลาสติก (polystyrene) ละลายในโทลูอีน (toluene) และขั้นตอนที่แตกต่างออกไปคือ จะไม่พิมพ์สารที่จะทำให้เกิดบริเวณที่ไม่ชอบน้ำลงไปก่อน แต่จะทำให้กระดาษทั้งแผ่นเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำด้วยการจุ่มลงในสารละลายพลาสติกที่มีความเข้มข้น 1.8 เปอร์เซ็นต์มวลต่อปริมาตร แล้วทำให้แห้ง จากนั้นใช้เครื่องพิมพ์ พิมพ์สารที่เป็นตัวทำละลายของพลาสติกลงไปทีละบริเวณตามรูปแบบลวดลายที่ต้องการใช้งาน ก็จะได้ท่อและหลุมตามที่ต้องการ วิธีการนี้แสดงลวดลายที่เป็นรูปแบบของแถบทดสอบ (strip test) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 a) หลังจากที่ได้รูปแบบลวดลายตามที่ต้องการแล้วหยดสารที่ใช้ในกระบวนการทดสอบตามจุดต่างๆ ด้วยเครื่องพิมพ์อีกเช่นกันจากภาพที่ 2.12 b) วิธีการนี้นอกจากจะพัฒนาด้านการสร้างลวดลายเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของน้ำแล้วยังจะพัฒนาในเรื่องของสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบเหมือนกัน อุปกรณ์แถบทดสอบทั่วไปในห้องทดลอง เช่น แถบทดสอบการตั้งครรภ์ โดยเทคนิคนี้มาจากพื้นฐาน

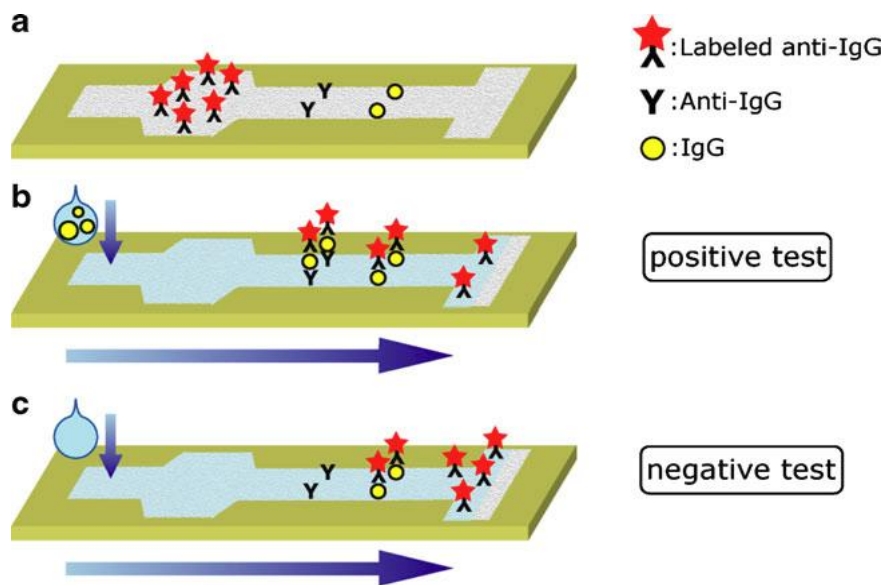
ของวิธีการอีไลซ่า และคุณสมบัติของอนุภาคทองคำ (colloidal gold) ซึ่งเป็นที่นิยมมากในปัจจุบันมีขนาดเล็ก ถูกต้องแม่นยำ และให้ผลที่รวดเร็ว แต่แถบทดสอบนี้ยังใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาสูงอยู่เนื่องจากปรกติแล้ว แล็บบนชิปประเภทกระดาษยังมีข้อจำกัดของการตรวจสอบต่างๆที่ยังครอบคลุมไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะเป็นการทดสอบสารที่เป็นพื้นฐานเท่านั้นเช่น โปรตีน กลูโคส ความเป็นกรด-ด่าง (pH) จากภาพที่ 2.13 แสดงแถบทดสอบประเภทกระดาษจำลอง และจำลองการทดสอบเบื้องต้นถึงผลที่จะได้รับการทดลอง แต่ในทางปฏิบัติแล้วยังติดปัญหาในเรื่องของการเคลื่อนตัวของอนุภาคทองไปบนพื้นผิว ซึ่งเคลื่อนตัวได้น้อย ถึงแม้ว่าจะมีการปรับปรุงโดยการใส่สารบางจำพวกลงไป การพัฒนาในจุดนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่มีประสิทธิภาพและครอบคลุมกับสารที่ต้องการทดสอบจำนวนมาก

ภาพที่ 2.12 a) กระบวนการสร้างลวดลายในรูปแบบแถบทดสอบ (strip test) รวมถึงการหยดสารที่จำเป็นในการทดสอบลงไปด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท และ b) ชื่อที่ใช้เรียกแต่ละตำแหน่งแต่ละพื้นที่และความหมายของแต่ละสัญลักษณ์ที่ใช้ในภาพ เริ่มจากฝั่งซ้าย พื้นที่หยดสารตัวอย่าง (sample area) พื้นที่สำหรับจับตัวกันของสารที่ต้องการตรวจหา (conjugate area) เส้นแสดงผลการทดสอบ (test line) เส้นควบคุมการทดสอบของระบบ (control line) และพื้นที่ดูดซับสารเพื่อทำให้ของเหลวไหลผ่านมาได้ตลอดไม่หยุดเคลื่อนที่ (absorbent area)

ภาพที่ 2.13 แถบทดสอบ (strip test) ประเภทกระดาษจำลองการทดสอบสารตัวอย่างจากการหยดสารตัวอย่างลงไปทางด้านซ้ายไหลผ่านช่องทางการไหลด้วยวิธีแทรกซึมผ่านกระดาษไปทางขวา ผลลัพธ์จากการอ่านจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ b) ผลเป็นบวกแสดงว่าสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีสารที่ต้องการตรวจหาอยู่โดยจะเป็นสีแดงที่เส้นทดสอบ (test line) c) ผลเป็นลบแสดงว่าสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นไม่มีสารที่ต้องการตรวจหาอยู่โดยจะไม่แสดงสีแดงบนเส้นทดสอบ (test line) ส่วนของเส้นควบคุม (control line) นั้นจะแสดงออกมาเป็นสีแดงเสมอไม่ว่าผลจะออกมาเป็นบวกหรือลบ เพื่อแสดงถึงระบบที่ใช้ในการทดสอบนั้นยังใช้งานได้อย่างเป็นปรกติไม่มีสารตัวใดเสื่อมสภาพ



ภาพที่ 2.12 กระบวนการสร้างลวดลายในรูปแบบแถบทดสอบ (strip test) [12]



ภาพที่ 2.13 แถบทดสอบ (strip test) ประเภทกระดาษ [12]



### บทที่ 3

#### การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้ โพลิเมอร์ SU-8 ประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

ในงานวิจัยนี้ทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษากระบวนการสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษ โดยประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทในการพิมพ์โพลิเมอร์ ประเภท SU-8 ลงบนกระดาษกรองเพื่อสร้างระบบท่อและหลุมให้สามารถกำหนดทิศทางการไหลของของเหลวหรือสารตัวอย่างได้โดยไม่มีกรร่วซึมหรือทะลุผ่านของสารละลายตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและทดสอบการใช้งานของแล็บบนชิปที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากวิธีการนี้ที่นำเอาโพลิเมอร์ประเภท SU-8 มาประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยตรง คือ การใช้โพลิเมอร์พิมพ์แทนหมึกนั้น จะสามารถช่วยลดขั้นตอนการผลิต ลดพลังงาน และต้นทุนการผลิตลง จากวิธีการเดิมคือ การใช้วิธีการของ photolithography ดังนั้นในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาถูกโดยวิธีการที่ง่ายไม่สลับซับซ้อน รวมถึงการทดสอบแล็บบนชิปต้นแบบตามเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

#### 3.1 การเลือกวัสดุอุปกรณ์

##### 3.1.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Epson, T13

ภาพที่ 3.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Epson รุ่น T13 จากบริษัท Epson Thailand เทคนิคหัวพิมพ์แบบ Piezoelectric ซึ่งเกิดความร้อนน้อยกว่าหัวพิมพ์แบบ Thermal heat เพื่อป้องกันอุณหภูมิจากหัวพิมพ์ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในหัวพิมพ์ อุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดเล็ก ราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย ใช้พิมพ์กับกระดาษขนาดมาตรฐาน (A4)

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องพิมพ์ Epson รุ่น T13

- Ink System 4-colour
- Max print Resolution 5760x1140 dpi
- Min Ink Droplet Size 4 pl



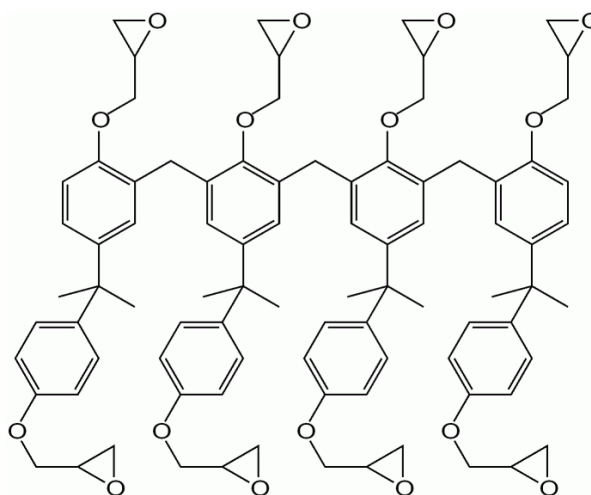
ภาพที่ 3.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Epson, รุ่น T13 [13]

### 3.1.2 โพลีเมอร์ SU-8 และตัวทำละลาย cyclopentanone

โพลีเมอร์ประเภท SU-8 2010 จากบริษัท Microchem ซึ่งโพลีเมอร์ที่มีความไวแสงโดยทั่วไปใช้ในกระบวนการฉายแสง (photolithography) เป็นสารที่มีความหนืดสูง แต่ก็สามารถเคลือบพื้นผิวเรียบได้โดยการปั่นและจะมีความหนาตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ขึ้นไป แสงอัลตราไวโอเลตที่ SU-8 สามารถดูดกลืนได้มากที่สุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร สามารถแข็งตัวเมื่อถูกแสง UV โดยจะทำให้โซ่โมเลกุลเชื่อมโยงกัน

SU-8 ปรกติแล้วถูกพัฒนามาใช้ในงานอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หรืองานที่มีความละเอียดสูง ใช้เป็นแม่แบบ สำหรับสร้างอุปกรณ์กึ่งตัวนำ แต่ปัจจุบันนี้ถูกใช้ในการสร้าง ระบบการจัดการของไหล (microfluidics) ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น Nanoimprint lithography และ ระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยสารที่สารสามารถทำละลาย SU-8 เพื่อลดความหนืด เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคือ Cyclopentanone

ภาพที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์ SU-8 ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน C, ไฮโดรเจน H, และ ออกซิเจน O ลักษณะ โครงสร้างทางโมเลกุลเป็น โซ่ยาวต่อกัน



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของ SU-8 [14]

### 3.1.3 การด้ายกรอง Whatman

งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรความต่างกันของกระดาษกรอง Whatman Grade 1, และ 41 ด้วย จากการสันนิษฐานว่า การด้ายที่มีคุณสมบัติต่างกันก็จะให้ผลการสร้างที่ต่างกันด้วย กระดาษกรองที่นำมาใช้นี้สามารถหาได้ทั่วไป ราคาถูก

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของกระดาษกรองเบอร์ 1 และ 41

Grade	Particle Retention Liquid (um)	Air Flow Rate (s/100mL/in <sup>2</sup> )	Typical Thickness (um)
1	11	10.5	180
41	20-25	3.4	215

### 3.2 การทดลอง

ในการทดลองจะทำการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างเล็บบนชิปประเภทกระดาษดังนี้คือ ความเข้มข้นของ SU-8 ในตัวทำละลาย Cyclopentanone ความกว้างของผนังท่อ และจำนวนครั้งที่พิมพ์ซ้ำ เพื่อสร้างระบบท่อและหลุมซึ่งสามารถกั้นของเหลว (น้ำ) โดยที่ไม่เกิดการรั่วซึม โดยมีเงื่อนไขต่างๆดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของ SU-8 ในสารทำละลาย Cyclopentanone ที่ทำการทดสอบคือ 1:10, 2:10 และ 3:10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร

2. ความกว้างของผนังท่อตั้งแต่ 0.5 – 5.0 มิลลิเมตร โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตร

3. จำนวนครั้งในการพิมพ์ซ้ำที่ 1, 2, 3, 5 และ 10 ครั้ง

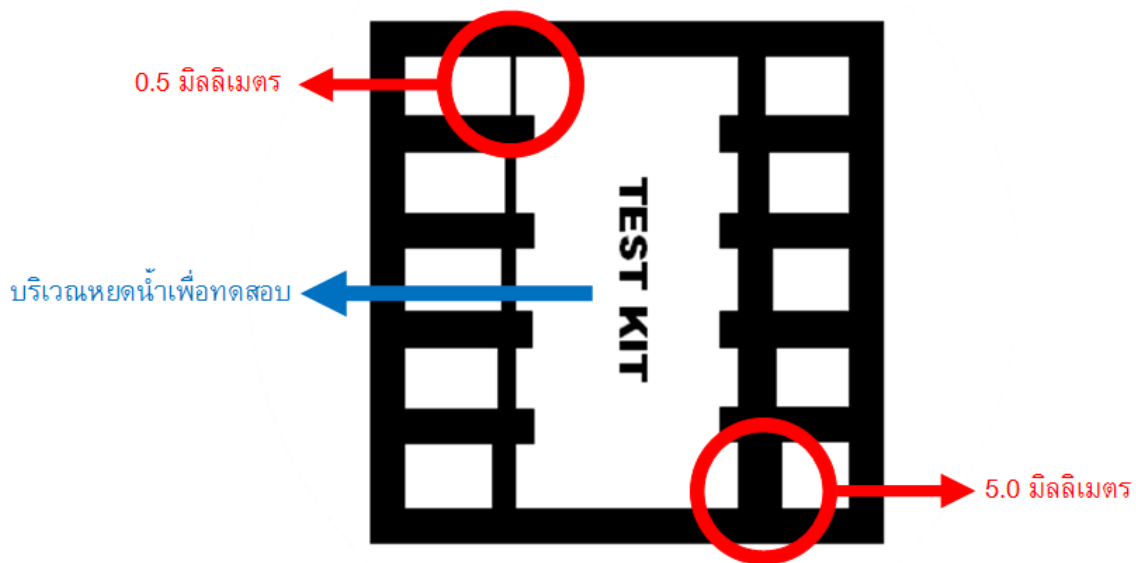
โดยได้ออกแบบชิ้นงานดังในภาพที่ 3.3 เมื่อสร้างชิ้นงานแล้วจะนำไปอบบนเตาความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศา เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้ SU-8 แข็งตัว จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบการรั่วซึมของน้ำโดยการจุ่มลงในน้ำกลั่น เพื่อหาเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมในการสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่ท่อและหลุมสามารถกั้นการรั่วซึมได้ดี

### 3.2.1 แบบลวดลายที่ใช้พิมพ์เพื่อทดสอบการสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษ

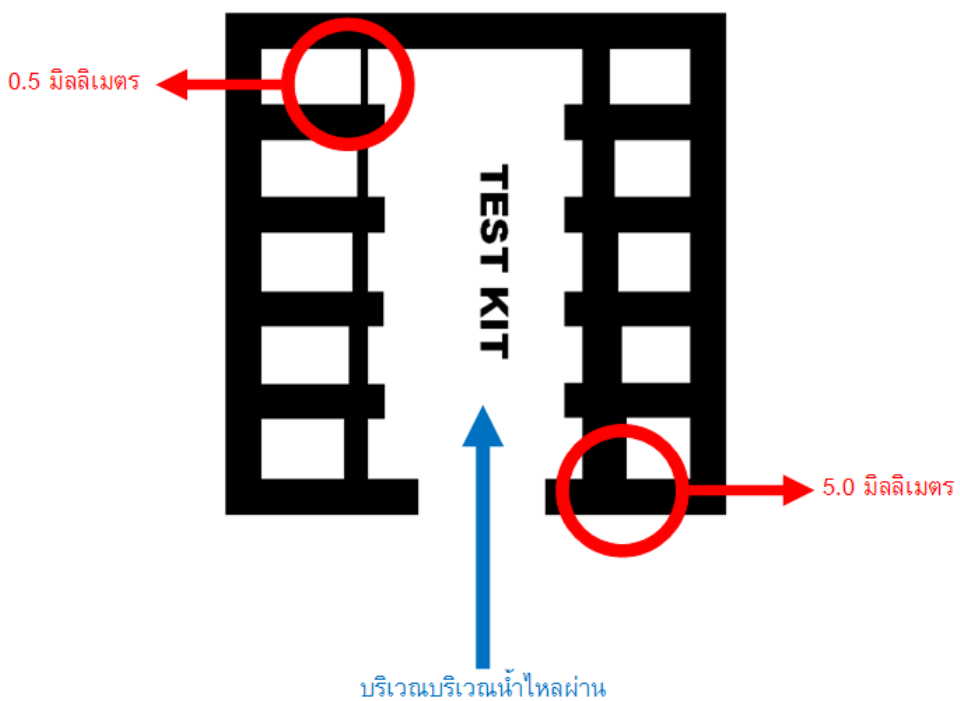
ภาพที่ 3.3 รูปแบบลวดลายการพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบหยดเพื่อหาขนาดความกว้างของกำแพงที่เหมาะสมกับการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบที่เหมาะสม โดยชุดทดสอบนี้สามารถหาขนาดความกว้างที่เหมาะสมได้ตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 5.0 มิลลิเมตร โดยแต่ละความกว้างจะเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตรตามลำดับ และจะต่างกับชุดทดสอบแบบหยดในตอนแรกที่บริเวณรอบด้านล่าง

ภาพที่ 3.4 รูปแบบลวดลายการพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจุ่มเพื่อหาขนาดความกว้างของกำแพงที่เหมาะสมกับการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบที่เหมาะสม โดยชุดทดสอบนี้สามารถหาขนาดความกว้างที่เหมาะสมได้ตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 5.0 มิลลิเมตร โดยแต่ละความกว้างจะเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตรตามลำดับ

จากภาพที่ 3.3 และ 3.4 ทั้งสองรูปแบบมีลักษณะที่คล้ายกันเพียงต่างกันที่รูปแบบใช้งานในการทดลองภาพที่ 3.3 เป็นรูปแบบลวดลายที่ใช้ในการทดลองแบบหยดของเหลวลงไปบริเวณกลางแผ่นกระดาษแล้วปล่อยให้ น้ำไปซึมผ่านกระดาษกรองไปในทั่วทุกทิศทางเป็นวงกว้าง จนไปกระทบกับกำแพงขนาดต่างๆ กันในชุดการทดลอง (test kit) ขนาดของกำแพงของชุดการทดลองนี้ จะมีความกว้างน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตร และจะเพิ่มความกว้างขึ้นไปทีละ 0.5 มิลลิเมตร ในกำแพงตัวสุดท้ายจะมีขนาดความกว้างเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ในภาพที่ 3.4 จะทดสอบโดยการจุ่มลงไป ในของเหลว และให้ของเหลวไหลผ่านจากด้านล่างขึ้นไปชนกับกำแพงในแต่ละเส้น ชุดการทดสอบทั้งสอบบแบบนี้ เป็นการหาพารามิเตอร์ ของขนาดของกำแพงที่เหมาะสมได้ในการทดลองเพียงครั้งเดียว แต่ถ้าต้องการหาค่าของพารามิเตอร์ตัวอื่นเช่น ความเข้มข้นของโพลิเมอร์ และจำนวนการพิมพ์ซ้ำ จะต้องประดิษฐ์เพิ่มขึ้นมาตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในตอนต้น



ภาพที่ 3.3 รูปแบบลวดลายการพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบหยด



ภาพที่ 3.4 รูปแบบลวดลายการพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจุ่ม

### 3.2.2 การปรับแต่งเครื่องพิมพ์เพื่อให้สามารถใช้พิมพ์โพลีเมอร์

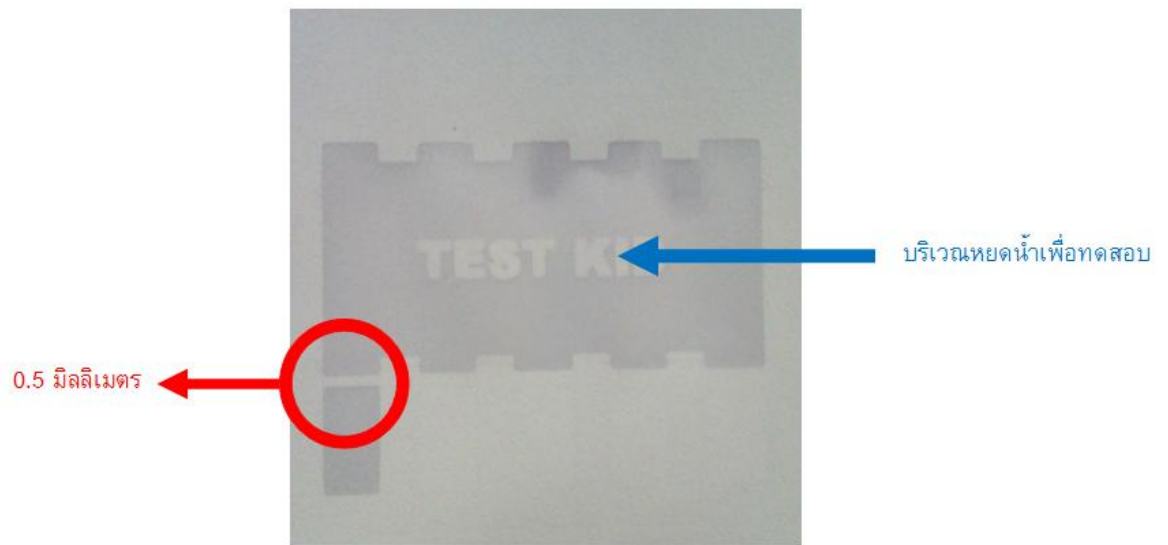
เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Epson, T13 เป็นรุ่นที่สามารถใส่ตลับหมึกได้ 4 สี นั่นคือ ดำ แดง เหลือง และ เขียว เราจึงนำโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ไปแทนที่หมึกที่ใช้ เช่น ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ 1:10 แทนที่ในตลับหมึกสีดำ ความเข้มข้นที่ 2:10 แทนที่ในตลับหมึกสีแดง เป็นต้น ในส่วนของการสั่งงานการพิมพ์ สามารถควบคุมได้โดยเป็นแกรมคอมพิวเตอร์ให้สั่งพิมพ์เป็นสี โดยแต่ละสีจะแทนแต่ละความเข้มข้น

วิธีการพิมพ์กระดาษกรอง โดยปรกติกระดาษกรองจะมีขนาดเล็กเป็นวงกลมไม่สามารถใช้กับเครื่องพิมพ์ที่ต้องการได้ (ขนาดทั่วไปของกระดาษ A4) จึงได้ปรับปรุงโดยการติดกระดาษกรองไว้กับกระดาษ A4 ทำให้สามารถพิมพ์ออกมาได้ และไม่ทำให้เครื่องพิมพ์เสียหายและกระดาษกรองฉีกขาดแต่อย่างใด

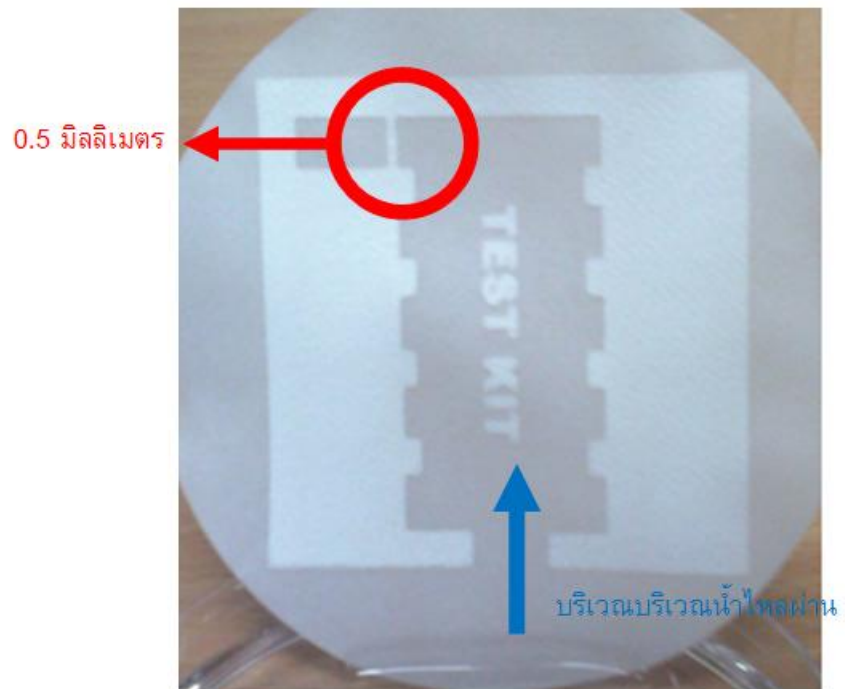
### 3.2.3 ตัวอย่างวิธีการทดลองการทดลอง

ในการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ 3 อย่าง คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ ความกว้างของกำแพง และจำนวนครั้งที่พิมพ์ซ้ำ จากการสร้างชุดทดลองนี้จำนวน 60 ตัวอย่าง คือ ในกลุ่มของ 30 ตัวอย่างแรกจะใช้กระดาษกรอง Whatman grade 1 แบ่งลวดลายออกเป็นสอบแบบ แบบละ 15 ตัวอย่างนั่นคือ แบบหยดและจุ่ม และในแต่ละ 5 ตัวอย่างของแต่ละแบบ จาก 15 ตัวอย่าง จะแทนกลุ่มของความเข้มข้น สุดท้ายในแต่ละความเข้มข้นจะแบ่งเป็นจำนวนครั้งที่พิมพ์ ส่วนอีก 30 ตัวอย่างที่เหลือจะเป็นส่วนของกระดาษกรอง Whatman grade 41 และจะแบ่งกลุ่มตัวอย่างเช่นเดียวกันกับ กระดาษกรอง Whatman grade 1

จากภาพที่ 3.5 และ 3.6 เป็นภาพจากการทดลองของชุดทดสอบที่มีพารามิเตอร์คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่ 1:10 จำนวนครั้งที่พิมพ์คือ 3 ครั้ง โดยใช้กระดาษกรอง Whatman grade 1 จะแสดงให้เห็นว่าการทดลองทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันในการใช้พารามิเตอร์ที่เหมือนกัน นั่นคือของเหลวสามารถทะลุผ่านกำแพงที่มีความกว้างที่ 0.5 มิลลิเมตร แต่ความกว้างของกำแพง ที่ขนาดอื่นๆสามารถกั้นของเหลวได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 3.5 ผลการทดลองหยดของเหลว (น้ำ) ในชุดทดสอบ



ภาพที่ 3.6 ผลการทดลองจุ่มชุดทดสอบในของเหลว (น้ำ)





ตารางที่ 3.2 บันทึกข้อมูลการทดลองของชุดทดสอบบนกระดาษกรอง Whatman grade 1 (X แทนข้อมูลจากการทดลองในความหมายคือ ของเหลวสามารถทะลุผ่านกำแพงที่มีพารามิเตอร์นั้นๆได้, Y แทนข้อมูลจากการทดลองในความหมายคือ ของเหลวสามารถทะลุผ่านกำแพงได้แต่ต้องใช้เวลาสักกระยะหนึ่ง (ประมาณ 5-10 นาที), O แทนข้อมูลจากการทดลองในความหมายคือ ของเหลวในการทดสอบไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงจากพารามิเตอร์นั้นๆในการสร้างได้)

ตารางที่ 3.3 บันทึกข้อมูลการทดลองของชุดทดสอบบนกระดาษกรอง Whatman grade 41

TEST TABLE (Filter papers Whatman No.41)												
concentration SU-8 1:10	times	width	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm	3.5 mm	4 mm	4.5 mm	5 mm
	1		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2		X	X	X	X	X	Y	Y	Y	Y	Y
	3		X	X	X	X	Y	O	O	O	O	O
	5		X	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10		X	O	O	O	O	O	O	O	O	O
concentration SU-8 2:10	times	width	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm	3.5 mm	4 mm	4.5 mm	5 mm
	1		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2		X	X	X	X	X	X	X	X	Y	Y
	3		X	X	X	X	X	X	Y	O	O	O
	5		X	X	X	X	X	Y	O	O	O	O
	10		X	X	X	X	X	O	O	O	O	O
concentration SU-8 3:10	times	width	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm	3.5 mm	4 mm	4.5 mm	5 mm
	1		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	10		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

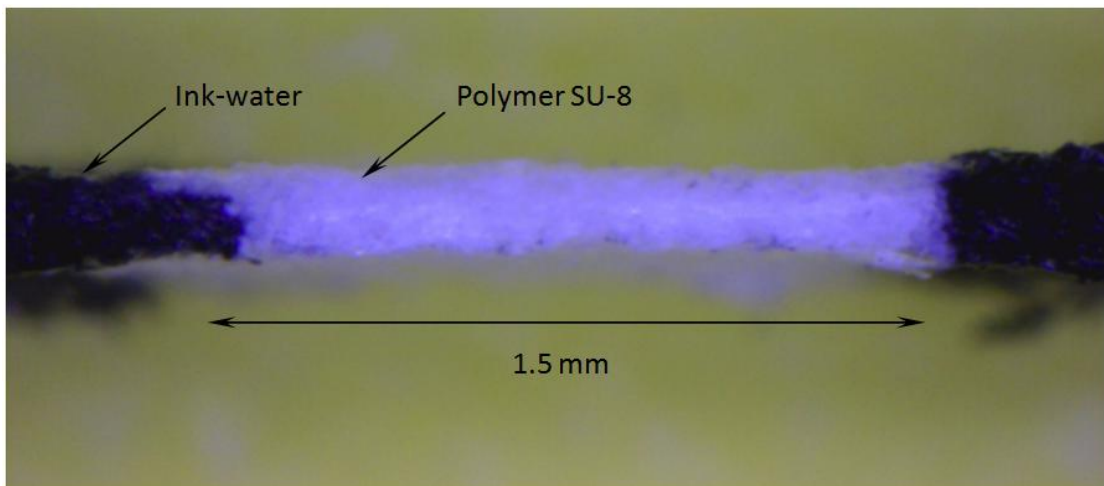
ตารางที่ 3.3 บันทึกข้อมูลการทดลองของชุดทดสอบบนกระดาษกรอง Whatman grade 41 (X แทนข้อมูลจากการทดลองในความหมายคือ ของเหลวสามารถทะลุผ่านกำแพงที่มีพารามิเตอร์นั้นๆได้, Y แทนข้อมูลจากการทดลองในความหมายคือ ของเหลวสามารถทะลุผ่านกำแพงได้แต่ต้องใช้เวลาสักกระยะหนึ่ง (ประมาณ 5-10 นาที), O แทนข้อมูลจากการทดลองในความหมายคือ ของเหลวในการทดสอบไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงจากพารามิเตอร์นั้นๆในการสร้างได้)

### 3.2.5 ลักษณะกำแพงที่เกิดขึ้นจากโพลีเมอร์ SU-8 ในการคาย

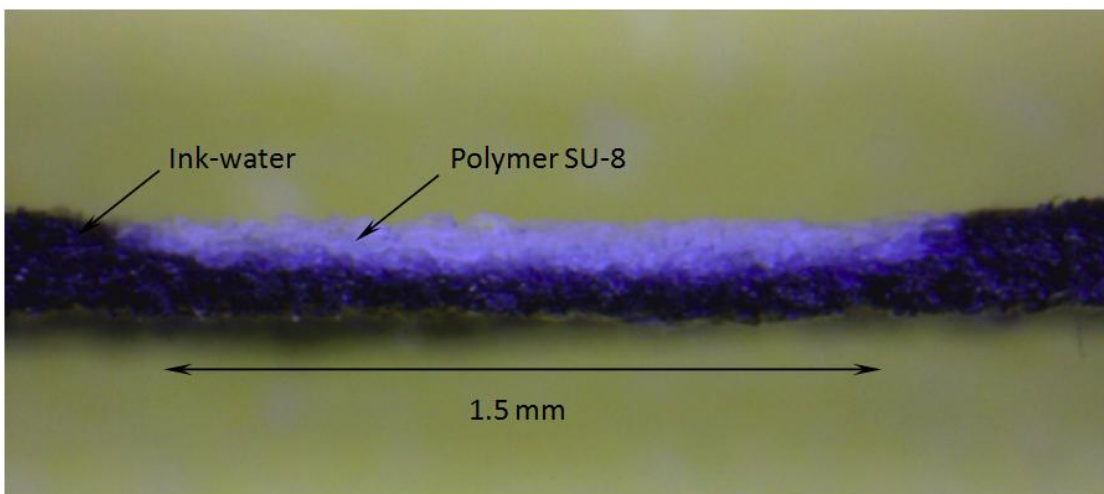
กำแพงที่เกิดขึ้นจากโพลีเมอร์ SU-8 นั้นเกิดขึ้นจากการที่พิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 ลงบนกระดาษและแทรกซึมลงไปจากบนพื้นผิวถึงก้นกระดาษด้านล่าง โดยที่โพลีเมอร์ SU-8 จะไปเคลือบบนเส้นใยกระดาษกรองทำให้เปลี่ยนสภาพของกระดาษกรองจากเดิมที่มีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) กลายเป็นมีลักษณะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถสร้างเป็นกำแพงเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของน้ำได้ แต่ถ้าการพิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 นั้น ไม่สามารถลงไปเคลือบเส้นใยบนผิวของกระดาษถึงก้นกระดาษได้ก็จะไม่สามารถสร้างเป็นกำแพงได้ เนื่องจากมีบริเวณพื้นที่ที่สามารถทำให้น้ำหรือสารละลายอื่นๆ ไหลผ่านได้

ภาพที่ 3.7 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของกำแพงโพลีเมอร์ SU-8 จากเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นที่ 1 : 10 จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 5 ครั้ง และ ขนาดความกว้างของกำแพงเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร กระดาษกรอง Whatman grade 1 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณที่มีโพลีเมอร์ SU-8 ที่เป็นสีขาวจะเคลือบเส้นใยกระดาษตั้งแต่ด้านบนผิวของกระดาษไปจนถึงก้นกระดาษ ส่วนบริเวณที่เป็นสีดำคือน้ำหมึกสีดำสำหรับใช้ในการทดสอบว่าโพลีเมอร์ SU-8 ได้เคลือบบนผิวกระดาษไปจนถึงก้นกระดาษ และเนื่องจากโพลีเมอร์ SU-8 เป็นสารที่ไม่มีสีการใช้สีน้ำหมึกสีดำในการทดสอบทำให้เป็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถใช้สร้างเป็นแถบบนชิปต้นแบบได้

ภาพที่ 3.8 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของกำแพงโพลีเมอร์ SU-8 จากเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นที่ 3:10 จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 5 ครั้ง และขนาดความกว้างของกำแพงเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร กระดาษกรอง Whatman grade 1 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณโพลีเมอร์ SU-8 ที่เป็นสีขาวจะเคลือบเส้นใยกระดาษตั้งแต่ด้านบนแต่จะไม่ถึงก้นกระดาษ ซึ่งจะเคลือบไปถึงบริเวณ ครึ่งหนึ่งของความหนาของกระดาษเท่านั้น จากการทดสอบใช้น้ำหมึกสีดำในการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขนี้ไม่สามารถสร้างเป็นแถบบนชิปต้นแบบได้



ภาพที่ 3.7 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของกัมพางโพลิเมอร์ SU-8 จากเงื่อนไขที่เหมาะสม



ภาพที่ 3.8 รูปภาพตัดขวางแสดงลักษณะของกัมพางโพลิเมอร์ SU-8 จากเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม

### 3.2.6 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานหลังจากการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ โดยจุ่มชิ้นงานลงในน้ำเพื่อให้น้ำผ่านเข้ามาจากทางเข้าด้านล่าง โดยมีเงื่อนไขในการสร้างชิ้นงานคือ ความเข้มข้นของ SU-8 1:10 และจำนวนครั้งในการพิมพ์ซ้ำ 3 ครั้ง จากภาพที่ 3.5 และ 3.6 จะเห็นว่าขนาดความกว้างที่ 0.5 มิลลิเมตรไม่สามารถกั้นน้ำได้ ผลการทดสอบในเงื่อนไขทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และ 3.3 จากผลการทดสอบพบว่า ความเข้มข้น SU-8 3:10 ไม่สามารถสร้างท่อที่กั้นการรั่วซึมของน้ำได้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าความเข้มข้นที่มากเกินไปทำให้สารละลายนั้นไม่สามารถซึมทะลุผ่านกระดาษ ไปก่อดัวเป็นท่อหรือ กัมพางกั้นน้ำได้ และเมื่อพิมพ์ซ้ำก็ไม่สามารถช่วยให้สารละลายซึม

ผ่านกระดาษได้อีกเช่นกัน เนื่องจากถูกขวางกั้นด้วยสารละลายจากการพิมพ์ครั้งก่อน จึงไม่สามารถซึมผ่านกระดาษทำให้เกิดเป็นผนังที่ไม่สมบูรณ์ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของ SU- 8 ที่ความเข้มข้นมากเกินไปจะไม่สามารถสร้างผนังท่อได้สมบูรณ์ ในขณะที่ความเข้มข้นน้อยเกินไปก็จะมีเนื้อสารที่พิมพ์ได้ในแต่ละครั้งในปริมาณที่น้อยจึงจำเป็นต้องพิมพ์หลายครั้งให้เพียงพอต่อการสร้างท่อบนกระดาษ

2. จำนวนครั้งในการพิมพ์ซ้ำนั้นหากทำการพิมพ์ซ้ำจะสามารถสร้างท่อได้สมบูรณ์ตามปริมาณของโพลิเมอร์ที่มากขึ้น แต่ถ้าพิมพ์ซ้ำมากเกินไปก็จะส่งผลให้ขนาดของท่อแคบลงเนื่องจากความหนาของผนังท่อที่ใหญ่ขึ้น หรือหากพิมพ์ซ้ำน้อยเกินไปก็อาจจะมีโพลิเมอร์ในปริมาณที่ไม่เพียงพอในการสร้างท่อน้ำที่สมบูรณ์

3. ความกว้างของผนังท่อ หากเพิ่มขนาดของความกว้างก็จะให้ท่อสามารถกั้นน้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ก็จะทำให้เปลืองสารและเสียเวลาในการพิมพ์มากขึ้น

จากผลการทดสอบข้างต้น เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างท่อที่สามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำ สามารถสรุปได้ดังนี้คือ ความเข้มข้นของ SU-8 ในสารทำละลาย cyclopentanone ที่ 1:10 จำนวนครั้งในการพิมพ์ซ้ำที่ 3 ครั้ง และ ความกว้างของท่อที่ 3 มิลลิเมตร

### 3.3 แล็บบนชิปประเภทกระดาษต้นแบบ

จากการผลทดลองจะได้เงื่อนไขที่เหมาะสมกับการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบได้ในหลายกรณี ขึ้นกับความต้องการของผู้ผลิตและความเหมาะสม ในการทดลองนี้ใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของ โพลิเมอร์ SU-8 1:10 ขนาดความกว้างของกำแพงเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และ จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 3 ครั้ง ในกระดาษกรอง Whatmam grade 1

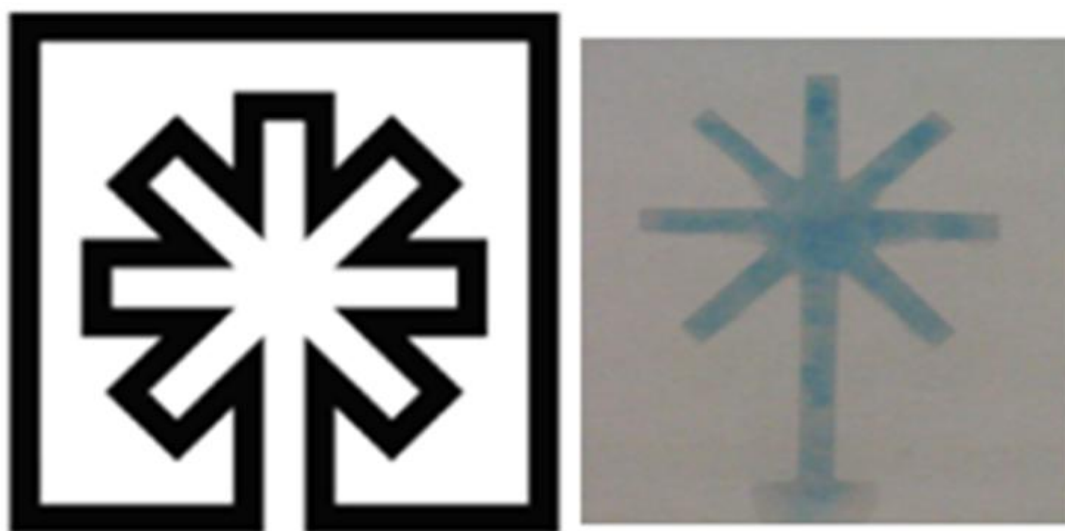
#### 3.3.1 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพของแล็บบนชิปต้นแบบ

การทดลองหาประสิทธิภาพของแล็บบนชิปต้นแบบเริ่มจากการออกแบบหลอดลายที่ใช้ในการทดสอบ โดยหลอดลายที่ออกแบบสำหรับการทดลองนี้จะมีลักษณะเป็นท่อ จะประกอบไปด้วยท่อหลักที่ใช้ในการลำเลียงสารตัวอย่างสำหรับการทดสอบไปจนถึงทางแยกจะแบ่งออกเป็นแปดท่อย่อยๆ ซึ่งหลอดลายนี้เหมาะสำหรับการทดลองแบบจุ่ม หลังจากที่ได้หลอดลายแล้วทำการผลิตแล็บบนชิปต้นแบบจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากผลที่ได้จากการทดลอง

เมื่อได้สร้างแล็บบนชิปต้นแบบจากเงื่อนไขที่เหมาะสมแล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพ โดยการจุ่มแล็บบนชิปต้นแบบแล้วปล่อยให้ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ (น้ำ) ซึมผ่านแล็บบนชิป

ผ่านท่อลำเลียงหลังไปจำถึงทางแยก แล้วดูการรั่วซึมของน้ำหรือไม่ ในการทดลองจะใช้น้ำผสมสี เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกต ในการทดสอบใช้เวลาประมาณ 20 นาที

### 3.3.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของແລັບชิปດັນแบบ



ภาพที่ 3.9 การทดสอบແລັบบนชิปດັນแบบจากการสร้างของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ภาพที่ 3.9 การทดสอบແລັบบนชิปດັນแบบจากการสร้างของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ 1:10 ขนาดความกว้างของกำแพง 3 มิลลิเมตร และจำนวนครั้งการพิมพ์ซ้ำเท่ากับ 3 ครั้ง

### 3.4 แนวทางการพัฒนาปรับปรุง

1. เนื่องจากกระดาษกรองที่ใช้ในการทดลองยังคงมีขนาดความหนาอยู่ ซึ่งอาจมีผลทำให้ผลการทดลองที่ได้นั้นยังไม่สมบูรณ์นัก ดังนั้นการใช้กระดาษกรองที่มีความหนาน้อยกว่านี้อาจจะทำให้ผลที่ได้ดีขึ้น เพราะกระดาษที่บางทำให้ โพลีเมอร์ SU-8 นั้นมีความเป็นไปได้ที่จะแทรกซึมบนกระดาษได้ง่ายกว่ากระดาษหนา

2. การเปลี่ยนชนิดของสารที่ใช้ในการสร้างเป็น Micro-channel wall เนื่องจาก โพลีเมอร์ SU-8 นั้นยังเป็นวัสดุที่มีราคาแพงอยู่ละหาซื้อยากอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นการหาโพลีเมอร์ตัวอื่นมาทดแทนจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้

3. การเปลี่ยนวิธีการสร้างແລັบบนชิป จากการทดลองพบว่าการใช้โพลีเมอร์ SU-8 เป็นพิมพ์ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทนั้นจะทำให้อายุการใช้งานของเครื่องพิมพ์ลดลง หรือเสียหายหลังจากการทดลอง เนื่องจากสาเหตุของการอุดตันของโพลีเมอร์ SU-8 ที่แห้งและแข็งตัว

4. เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทดลองเป็นกระดาษที่มีโครงสร้างเส้นใยที่ไม่แน่นอนและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากการทดลองได้ ดังนั้นในการทดลองจึงควรที่จะทำการทดลองซ้ำที่เงื่อนไขการสร้างเดียวกันเพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้นั้นจะถูกต้องและน่าเชื่อถือ

### 3.5 การปรับปรุงการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้โพลีเมอร์ SU-8 จากการเปลี่ยนขนาดของกระดาษ

หลังจากที่ได้ทำการทดลองการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้โพลีเมอร์ SU-8 ในเบื้องต้นแล้ว ผลที่ออกมาสามารถใช้เงื่อนไขในการพิมพ์ที่สามารถสร้างเป็นแล็บบนชิปได้ในหลายกรณี และขนาดของกระดาษกรองเบอร์ 1 และ 41 ก็แสดงให้เห็นผลของการทดลองที่แตกต่างกันเช่นกัน ดังนั้น ในการทดลองนี้ต้องการจะปรับปรุงผลการทดลองดังกล่าวโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 93 ซึ่งกระดาษกรองเบอร์นี้จะมีขนาดของความหนาที่แตกต่างกับสองเบอร์แรก โดยขนาดจะอยู่ที่ 153 ไมโครเมตร ในการทดลองนี้ได้มีการปรับปรุงรูปแบบของลวดลายที่ใช้ในการทดลองด้วย กล่าวคือในการทดลองก่อนหน้านี้นี้ ใช้ลวดลายในการทดลองทั้งแบบจุ่มและแบบหยดน้ำลงในชุดทดลอง ผลที่ได้จากทดลองจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในการทดลองนี้จะออกแบบลวดลายใหม่และใช้การทดลองเป็นแบบจุ่มเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการใช้งานจริงจะใช้เป็นรูปแบบจุ่ม ส่วนลวดลายใหม่ที่ใช้ในการทดลองจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นและง่ายต่อการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะของกระดาษกรองเบอร์ 1, 41 และ 93

Grade	Particleretention liquid (um)	Air flow rate (s/100mL/in <sup>2</sup> )	Typical Thickness (um)
1	11	10.5	180
41	20-25	3.4	215
93	10	7	145

### 3.5.1 การทดลอง

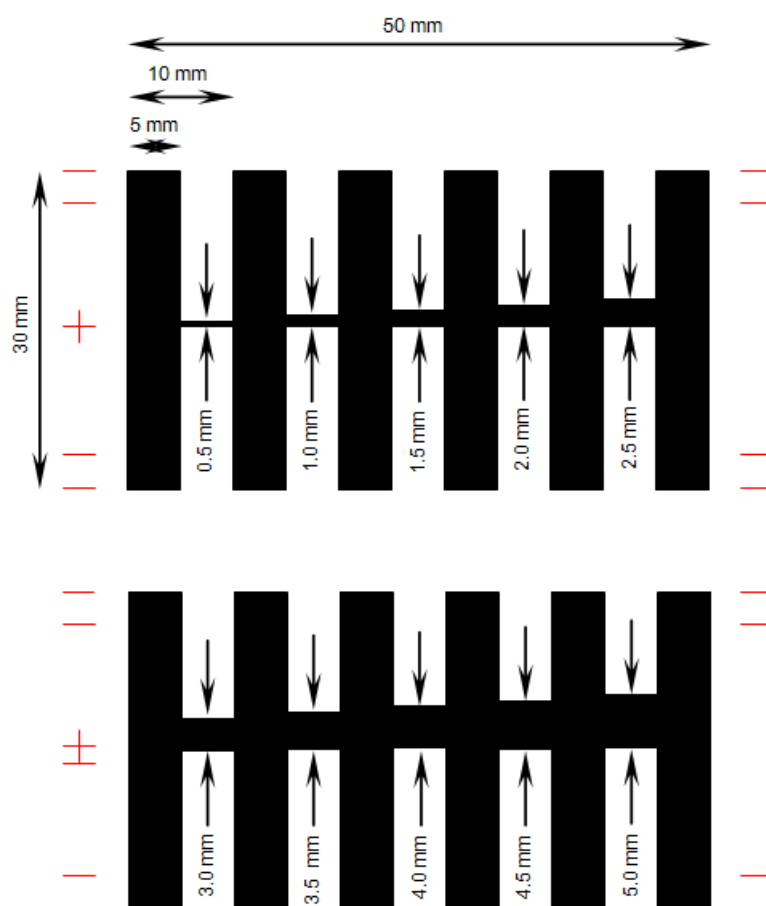
การทดลองนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการสร้างชุดทดสอบโดยมีขั้นตอนดังนี้ คือ

1. เริ่มจากการออกแบบลวดลายที่ใช้ทดลองใหม่
  2. พิมพ์ Polymer SU-8 ที่ความเข้มข้น จำนวนครั้งที่พิมพ์ ที่แตกต่างกันตามที่ได้กำหนดไว้
  3. หลังจากที่ พิมพ์ Polymer ดังกล่าวแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเพื่อไล่ความชื้นของ Solvent (cyclopentanone) ออกเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้แน่ใจว่า Solvent ดังกล่าวจะหายไปคงเหลือไว้แต่ Polymer SU-8 เท่านั้น
  4. นำชุดทดสอบไปผ่านวิธีการฉายแสง (expose UV-light) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ Polymer SU-8 แข็งตัว เนื่องจาก Polymer SU-8 นั้นเป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษคือเมื่อได้รับพลังงานจากแสงแล้วจะแข็งตัว
- พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้
5. ความเข้มข้นของ Polymer SU-8 จาก Micro chem 2010 เริ่มจาก 5%, 7.5%, 10%, 12.5% และ 15% โดยปริมาตรต่อปริมาตร ส่วนสารละลายที่ใช้เป็นตัวทำละลายคือ Cyclopentanone
  6. ขนาดของกำแพงที่ใช้ในการทดลอง เริ่มจากขนาดที่ 0.5 มิลลิเมตร และ เพิ่มขึ้นทีละ มิลลิเมตร ไปจนถึง 5.0 มิลลิเมตร
  7. จำนวนครั้งที่พิมพ์ในแต่ละชุดการทดลอง เริ่มจาก Printing time ที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ครั้ง

### 3.5.2 การออกแบบลวดลายที่ใช้ในการทดลองการปรับปรุงแถบบนชิป

ภาพที่ 3.10 ลวดลายที่ใช้ในการทดลอง SU-8 กับกริดพิมพ์ บนกระดาษ Whatman grade 93 โดยลวดลายจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ลวดลายส่วนบนจะใช้ทดสอบกำแพงที่มีความหนาตั้งแต่ 0.5, 1.0, 1.5, ..., 2.5 มิลลิเมตร และ ลวดลายส่วนล่างจะใช้ทดสอบกำแพงที่มีความหนาตั้งแต่ 3.0, 3.5, 4.0, ..., 5.0 มิลลิเมตร เนื่องจาก SU-8 นั้นเป็นสารที่ไม่มีสี เมื่อพิมพ์ไปบนกระดาษกรองสำหรับชุดทดลองแล้วจะไม่สามารถหาตำแหน่งที่ถูกต้องได้ดังนั้นในการทำชุดทดลองแต่ละชิ้นจะมีการทำเครื่องหมายเพื่อบอกตำแหน่งทุกครั้งดังแสดงในรูปจะมีลักษณะเครื่องหมายสีแดง ซึ่งจากรูปแบบลวดลายที่ใช้พิมพ์จะแบ่งออกเป็นสองสี ในส่วนของสีแดงจะใช้แทนเครื่องหมายบอกตำแหน่ง จี๊ดสีแดงแสดงถึงขอบบนและล่างของชุดทดสอบ เครื่องหมายวงสีแดงแทนตำแหน่งของชุดการทดลองที่มีกำแพงขนาดตั้งแต่ 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร และ เครื่องหมาย วงกลมสีแดงแทนตำแหน่งของชุดทดลองที่มีกำแพงขนาดตั้งแต่ 3.0, 3.5, ..., 5 มิลลิเมตร ส่วนสีที่ใช้แทนพื้นที่ที่ SU-

8 จะถูกพิมพ์ลงไปบนชุดทดลอง ชุดทดลองนี้จะถูกตัดออกเป็นสองส่วนก่อนใช้ทดสอบ ลักษณะ ลวดลายที่ถูกออกแบบมาใหม่นี้จะสามารถวัดเวลาได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น เนื่องจาก ระดับน้ำที่ขึ้นมาในการทดลอง จะขึ้นมาถึงกำแพงที่มีขนาดความหนาต่างๆ พร้อมๆกัน และง่ายต่อการสังเกต และเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตมากขึ้น จึงได้มีการเติมน้ำลงในน้ำที่ใช้ในการทดลอง ในการทดลองแต่ละเงื่อนไขจะทำซ้ำกับ 3 ชุด เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเฉลี่ยหาโอกาสความเป็นไปได้ที่ ถูกต้องและน่าเชื่อถือ



ภาพที่ 3.10 ลวดลายที่ใช้ในการทดลอง SU-8 กับกรพิมพ์ บนกระดาษ Whatman grade 93

### 3.5.3 วิธีการทดลอง

นำลวดลายที่ได้จากการสร้างจากเงื่อนไขดังกล่าว นำมาจุ่มลงในน้ำที่เป็นสีน้ำเงินเพื่อให้ ง่ายต่อการสังเกต หลังจากการจุ่มชุดทดสอบตัวอย่างลงในน้ำ ปล่อยให้สีน้ำไหลผ่านไปตามช่องทาง ที่เตรียมไวจนไปถึงกำแพงแล้วจับเวลา มีเงื่อนไขในการจดบันทึกข้อมูลคือ ถ้าขนาดของกำแพงที่ สามารถกั้นการไหลผ่านของน้ำได้ในเวลา 10 นาทีขึ้นไปจะถือว่าที่เงื่อนไขนั้นเหมาะสมที่จะ



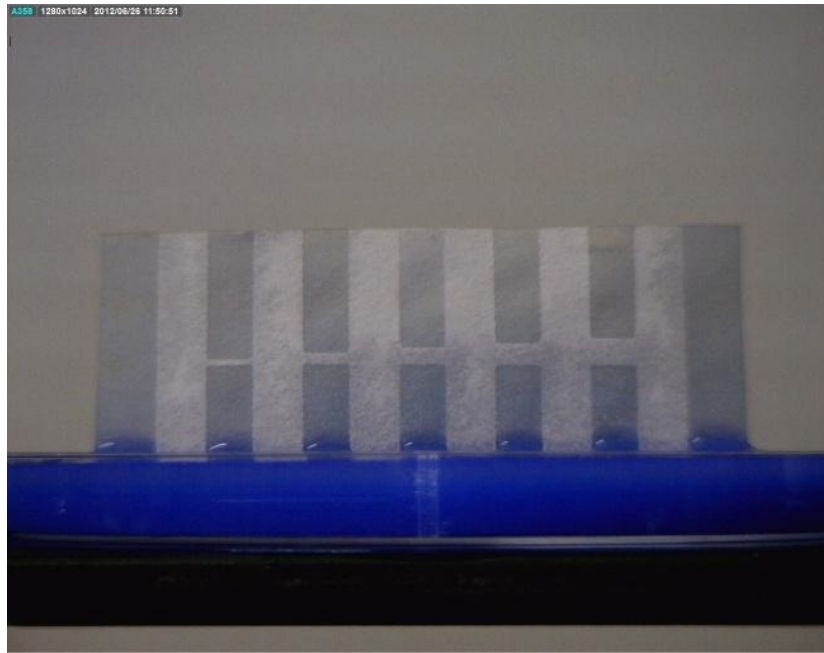
สามารถสร้างเป็น แล็บบนชิปได้ แต่ถ้าเงื่อนไขใดที่ไม่สามารถกั้นการไหลของน้ำได้ก็จะไม่สามารถที่จะสร้างเป็นแล็บบนชิปได้

### 3.5.4 ผลการทดลอง

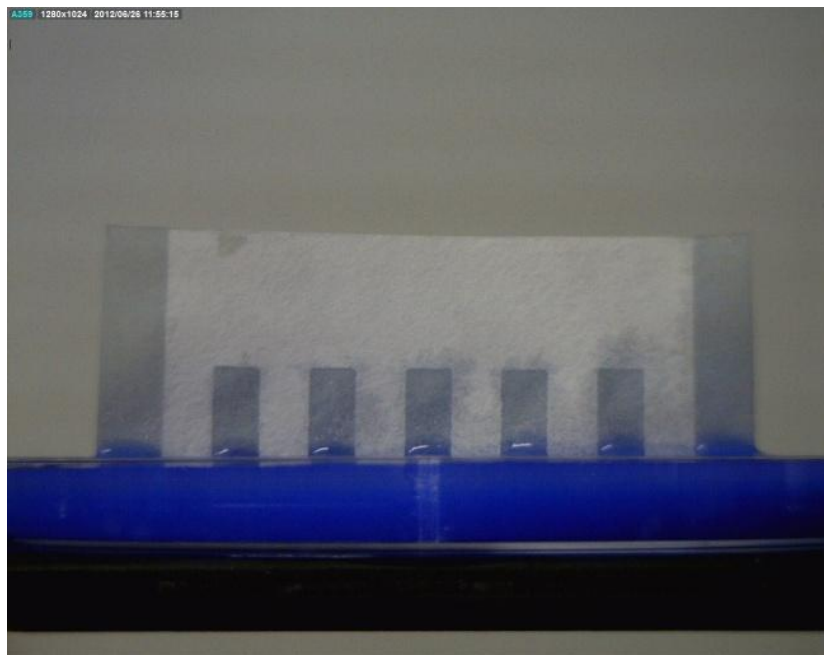
ภาพที่ 3.11 และ 3.12 เป็นการทดลองการของการหาขนาดความหนาของกำแพงที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบในรูปภาพจะประกอบไปด้วยกำแพงที่สร้างจากโพลีเมอร์ SU-8 ขนาดต่างๆตั้งแต่ 0.5, 1.0, ..., 5 มิลลิเมตร ในการทดลองใช้สีน้ำเพื่อช่วยในการสังเกตในการบันทึกผลการทดลองที่ถูกต้อง ชุดทดลองนี้ใช้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 5% จำนวนครั้งที่พิมพ์ 1 ครั้ง จากผลการทดลองในเงื่อนไขนี้จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ขนาดของกำแพงที่ 0.5, 1.0, ..., 5 มิลลิเมตร ไม่สามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำได้

ภาพที่ 3.13 และ 3.14 เป็นการทดลองการของการหาขนาดความหนาของกำแพงที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบในรูปภาพจะประกอบไปด้วยกำแพงที่สร้างจากโพลีเมอร์ SU-8 ขนาดต่างๆตั้งแต่ 0.5, 1.0, ..., 5 มิลลิเมตร ในการทดลองใช้สีน้ำเพื่อช่วยในการสังเกตในการบันทึกผลการทดลองที่ถูกต้อง ชุดทดลองนี้ใช้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 10% จำนวนครั้งที่พิมพ์ 1 ครั้ง จากผลการทดลองในเงื่อนไขนี้จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ขนาดของกำแพงที่ 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ไม่สามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำได้ และที่ขนาดของกำแพงที่ 1.5, 2.0, ..., 5.0 มิลลิเมตร สามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำได้

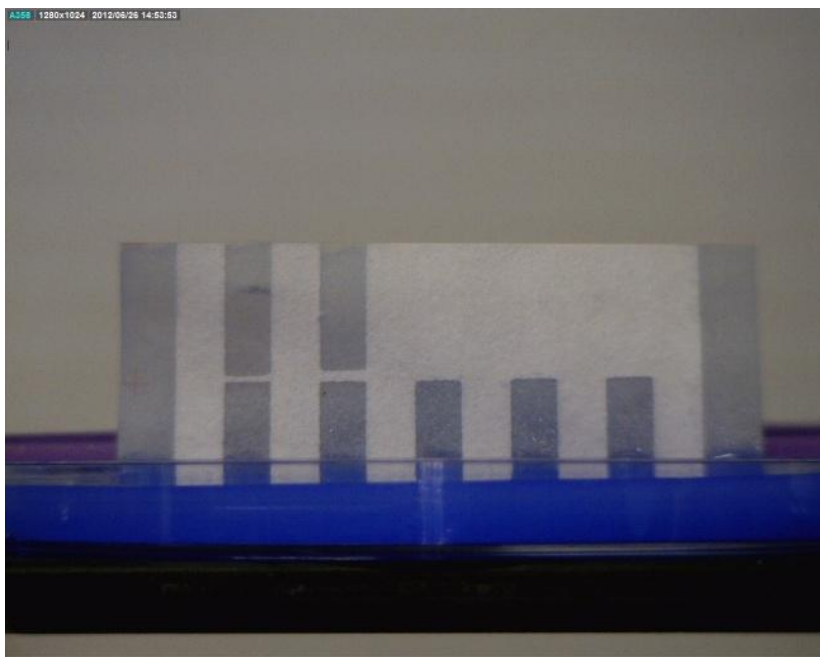
ภาพที่ 3.15 และ 3.16 เป็นการทดลองการของการหาขนาดความหนาของกำแพงที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบในรูปภาพจะประกอบไปด้วยกำแพงที่สร้างจากโพลีเมอร์ SU-8 ขนาดต่างๆตั้งแต่ 0.5, 1.0, ..., 5 มิลลิเมตร ในการทดลองใช้สีน้ำเพื่อช่วยในการสังเกตในการบันทึกผลการทดลองที่ถูกต้อง ชุดทดลองนี้ใช้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 10% จำนวนครั้งที่พิมพ์ 1 ครั้ง จากผลการทดลองในเงื่อนไขนี้จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ขนาดของกำแพงที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 มิลลิเมตร ไม่สามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำได้ และที่ขนาดของกำแพงที่ 2.0, 2.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร สามารถกั้นการรั่วซึมของน้ำได้



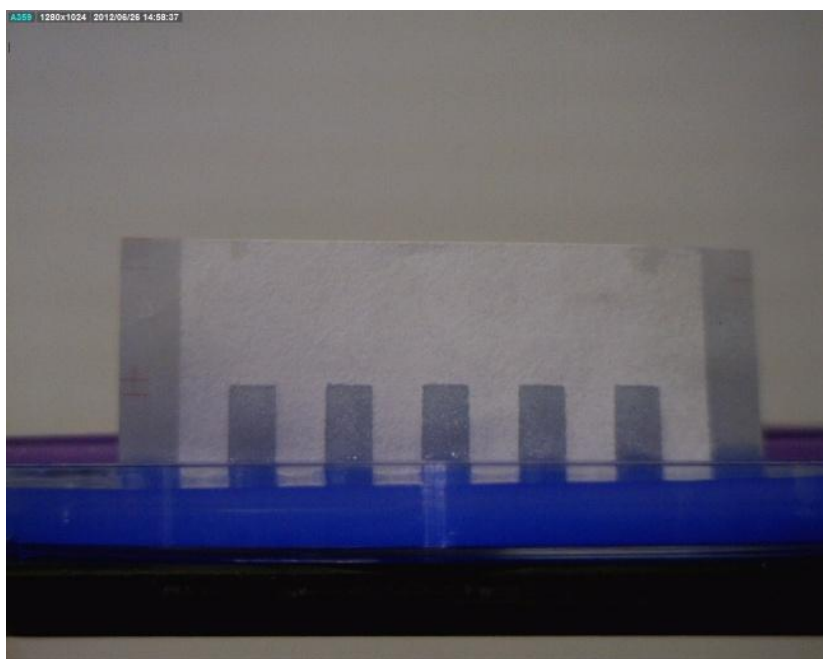
ภาพที่ 3.11 ผลการทดลองที่ขนาดของก้ำแพง 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร ความเข้มขึ้น 5% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1



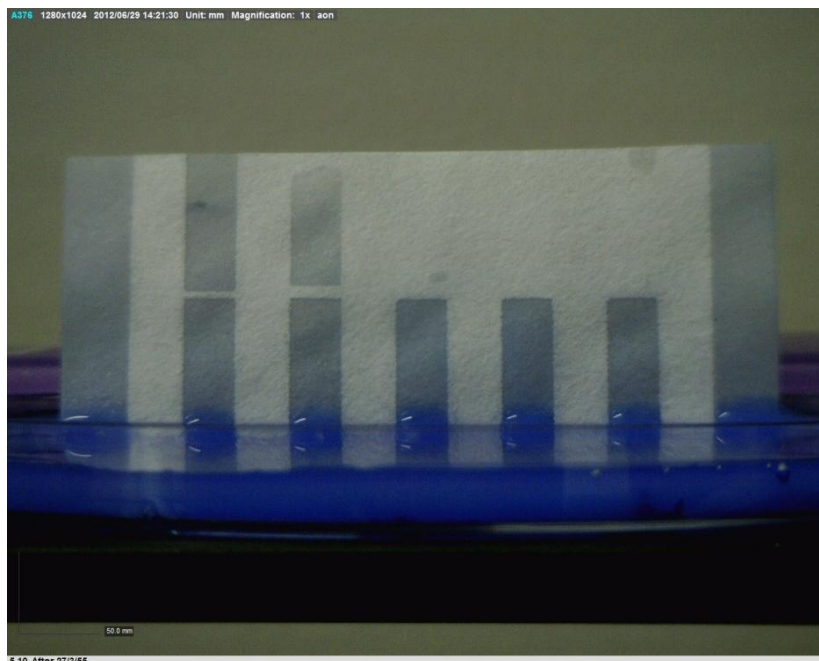
ภาพที่ 3.12 ผลการทดลองที่ขนาดของก้ำแพง 3.0, 3.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร ความเข้มขึ้น 5% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1



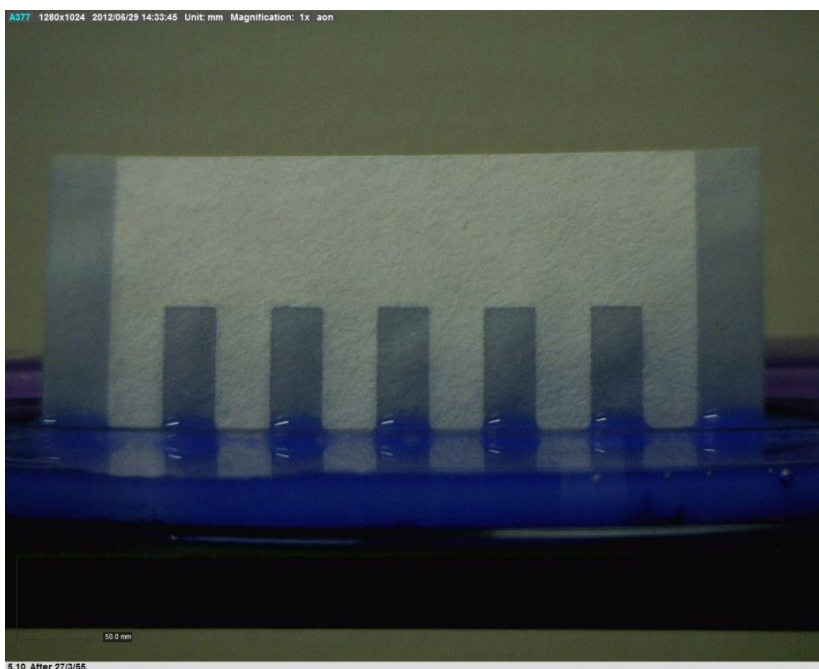
ภาพที่ 3.13 ผลการทดลองที่ขนาดของก้ำแพง 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร ความเข้มชั้น 10% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1



ภาพที่ 3.14 ผลการทดลองที่ขนาดของก้ำแพง 3.0, 3.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร ความเข้มชั้น 10% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1



ภาพที่ 3.15 ผลการทดลองที่ขนาดของกำแพง 0.5, 1.0, ..., 2.5 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 5% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1



ภาพที่ 3.16 ผลการทดลองที่ขนาดของกำแพง 3.0, 3.5, ..., 5.0 มิลลิเมตร ความเข้มข้น 15% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1





ตารางที่ 3.9 ผลการทดลองความเข้มข้นของโพลิเมอร์ SU-8 ที่ 15% โดยปริมาตรต่อปริมาตร

Concentration of Polymer SU-8 15% volume by volume	Printing times	Wall thickness (mm)									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
	1	0	0	0	66.67	66.67	100	100	100	100	100
	2	0	0	66.67	66.67	100	100	100	100	100	100
	3	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
	4	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
	5	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
	6	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100

### 3.5.5 สรุปผลการทดลอง

จากตารางบันทึกผลการทดลองจะสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของโพลิเมอร์ SU-8 ที่ใช้ในการสร้างเป็นเล็บบนชิปต้นแบบแล้วจะแสดงให้เห็นว่า ทุกความเข้มข้นนั้นจะมีเงื่อนไขที่สามารถสร้างเป็น เล็บบนชิปต้นแบบได้ แต่จะขึ้นอยู่กับอีกสองพารามิเตอร์อีกสองตัวคือ จำนวนครั้งที่พิมพ์และ ขนาดของความหนาของก้ำแพง
- เมื่อพิจารณาจากจำนวนครั้งที่พิมพ์ของโพลิเมอร์จะพบว่า แนวโน้มการพิมพ์ซ้ำนั้นจะช่วยเพิ่มโอกาสสำหรับการสร้างเล็บบนชิปต้นแบบมากขึ้น
- เมื่อพิจารณาจากความหนาของก้ำแพงของโพลิเมอร์จะพบว่า ที่ทุกความเข้มข้น ขนาดความหนาของก้ำแพงที่ 0.5 มิลลิเมตรจะไม่สามารถใช้สร้างเป็นเล็บบนชิปต้นแบบได้ และแนวโน้มของความหนาของก้ำแพงที่มีขนาดมากขึ้นจะมีโอกาสที่จะสามารถสร้างเป็นเล็บบนชิปต้นแบบได้มากขึ้น
- เมื่อพิจารณาทั้งสามเงื่อนไขพร้อมกันและจะพบว่า ที่ความเข้มข้น 10% จะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างเป็นเล็บบนชิปต้นแบบ เนื่องจากที่ความเข้มข้นที่ 10% มีโอกาสที่จะสร้างเป็นเล็บบนชิปในเงื่อนไขต่างๆ ได้มากกว่าความเข้มข้นอื่นๆ

### 3.5.6 การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

ในการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานจริง โดยการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบนี้จะสร้างขึ้นจากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง

#### 3.5.6.1 การออกแบบแล็บบนชิปต้นแบบ

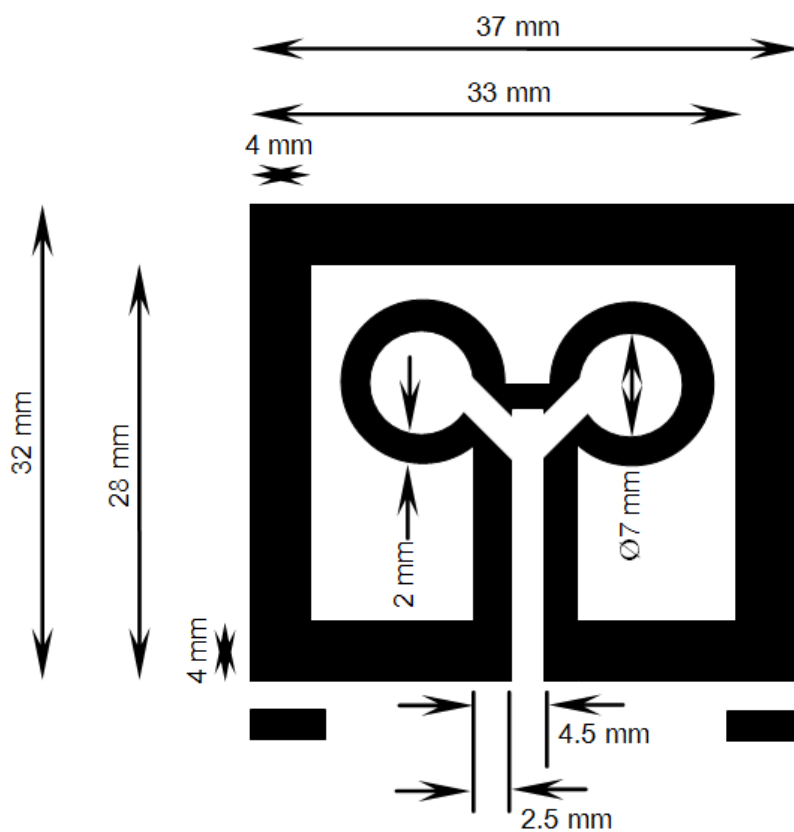
ภาพที่ 3.17 ของลวดลายที่ใช้ในการออกแบบสำหรับการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบ จะใช้สีดำแทนพื้นที่ที่จะพิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 ลงไป ลวดลายของแล็บบนชิปต้นแบบจะประกอบไปด้วย ท่อหลักที่จะสามารถลำเลียงสารละลายที่ใช้ในการทดสอบขึ้นมาโดยวิธีการแทรกซึมผ่านกระดาษกรอง และมีโพลีเมอร์ SU-8 เป็นกำแพงของท่อเพื่อกำหนดทิศทางการไหล ที่ปลายของท่อลำเลียงหลักจะมีทางแยกออกเป็นสองทางเพื่อลำเลียงสารตัวอย่างไปทดสอบกับสารอีกอื่นสองชนิดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบ โปรตีนและความเป็นกรด-ด่าง ในส่วนของลวดลายที่เป็นหลุมวงกลมทั้งสองด้าน

ภาพที่ 3.18 ลวดลายของแล็บบนชิปที่บอกตำแหน่งของสารที่ใช้ในการทดสอบ โดยแล็บบนชิปจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆคือ ส่วนที่เป็นท่อลำเลียงหลัก ทางแยก และ หลุมที่ใช้ในการทดสอบสองหลุม โดยหลุมทางด้านซ้ายจะบรรจุสารที่ใช้ในการทดสอบ โปรตีนบริสุทธิ์ (BSA) และหลุมด้านขวาจะบรรจุสารที่ใช้ในการทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่าง

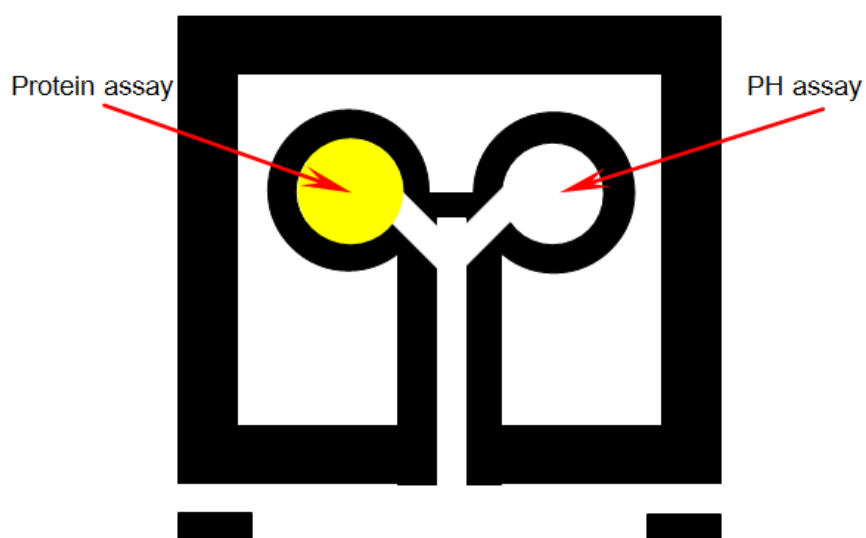
ภาพที่ 3.19 แล็บบนชิปต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบหลังจากที่ผ่านกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่างๆ และ หยดสารที่ใช้ในการทดสอบแล้ว จากรูปจะไม่สามารถเห็นลวดลายของแล็บบนชิปต้นแบบได้อย่างชัดเจนมากนักเนื่องจาก โพลีเมอร์ SU-8 เป็นสารที่ไม่มีสี

ภาพที่ 3.20 แล็บบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบกับสารละลายตัวอย่างจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของสี โดยทางด้านซ้ายเป็นการทดสอบ โปรตีนจะเปลี่ยนสีจากสี เหลืองเป็นสีน้ำเงิน และทางด้านขวาเป็นการทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่าง จากรูป เมื่อสารละลายตัวอย่างมาสัมผัสกับสารที่ใช้ในการทดสอบจะเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูเข้ม

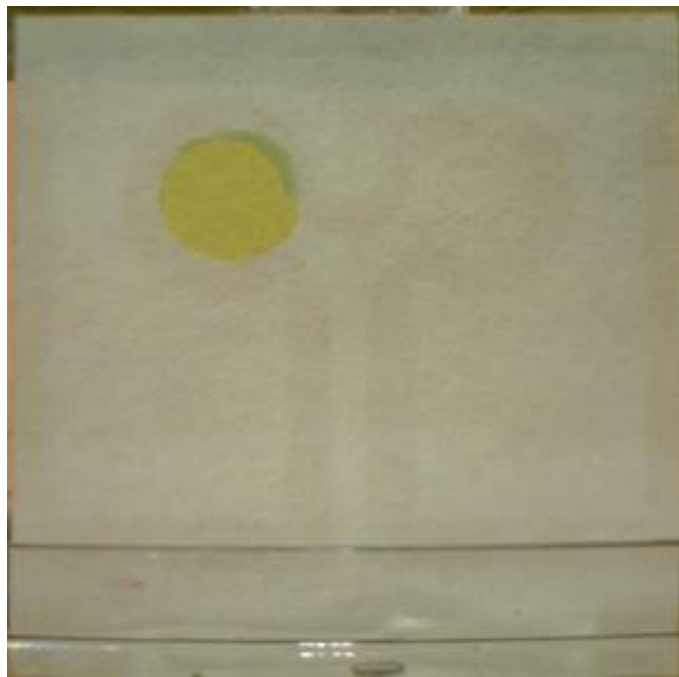




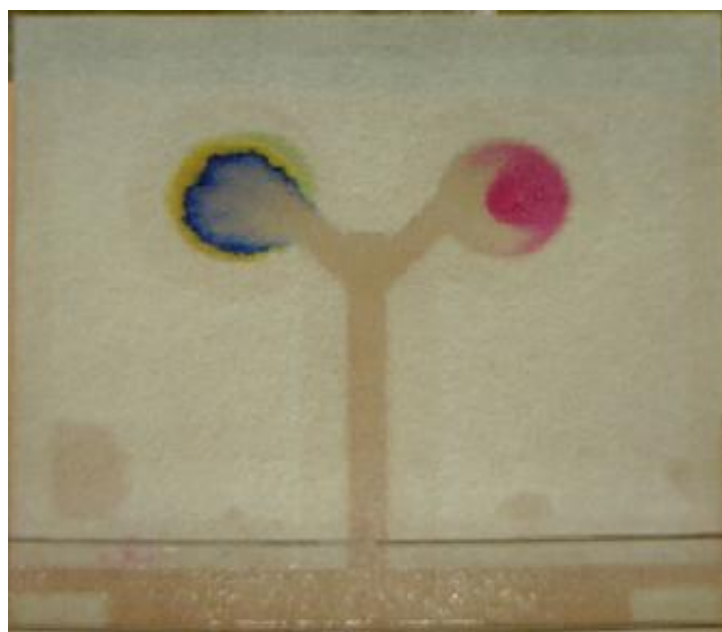
ภาพที่ 3.17 ลวดลายที่ใช้ในการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบ



ภาพที่ 3.18 ลวดลายของแล็บบนชิปที่บอกตำแหน่งของสารที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.19 แล็บบนชิปต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3.20 แล็บบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบกับสารละลายตัวอย่าง

### 3.5.6.2 การเตรียมแล็บบนชิปต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ

การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบจากเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ

1. ที่ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ SU-8 ที่ 10% โดยปริมาตรต่อปริมาตร
2. จำนวนครั้งที่พิมพ์คือ 5 ครั้ง
3. ความหนาของกำแพงที่ 2-4 มิลลิเมตร จากเงื่อนไขดังกล่าว คือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะสร้างเป็น แล็บบนชิป

หลังจากที่พิมพ์ลวดลายบนกระดาษแล้ว แล็บบนชิปจะถูกนำไปอบที่แผ่นใช้ความร้อน 130 องศาเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้สารละลายระเหยออกไปจนหมด และถูกนำไปฉายแสงเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้โพลีเมอร์ SU-8 แข็งตัว เมื่อได้ลวดลายของแล็บบนชิปต้นแบบที่พร้อมใช้งานแล้ว นำมาหยดสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ คือ การทดสอบโปรตีน และการทดสอบความเป็นกรด-ด่าง

### 3.5.6.3 การเตรียมสารที่ใช้ในการทดสอบสำหรับแล็บบนชิปต้นแบบ

การทดสอบโปรตีนสารที่ใช้ในการตรวจหา โปรตีนบริสุทซ์ (bovine serum albumin, BSA) 2 ไมโครลิตร ของ Citrate buffer 250 มิลลิเมตร ถูกหยดลงบนหลอดทางด้านซ้ายของแล็บบนชิปต้นแบบก่อน แล้ว 2 ไมโครลิตร ของ Tetrabromophenol blue 3.3 มิลลิเมตร ละลายใน 95% Ethanol จะถูกหยดตามไปที่บริเวณตำแหน่งเดียวกัน จากนั้นปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อแห้งบริเวณที่หยดสารที่ใช้ในการทดสอบจากสีขาวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง สารที่ใช้ในการตรวจหาสภาพความเป็นกรด-ด่าง 2 ไมโครลิตร ของ Phenolphthalein 59 มิลลิเมตร ละลายใน 95% ethanol จะถูกหยดลงบนหลอดทางด้านขวา และปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อแห้งบริเวณหลอดที่หยดจะเป็นสีขาวเนื่องจาก Phenolphthalein จะไม่แสดงสีเมื่ออยู่ในสภาพ pH ต่ำกว่า 8.3

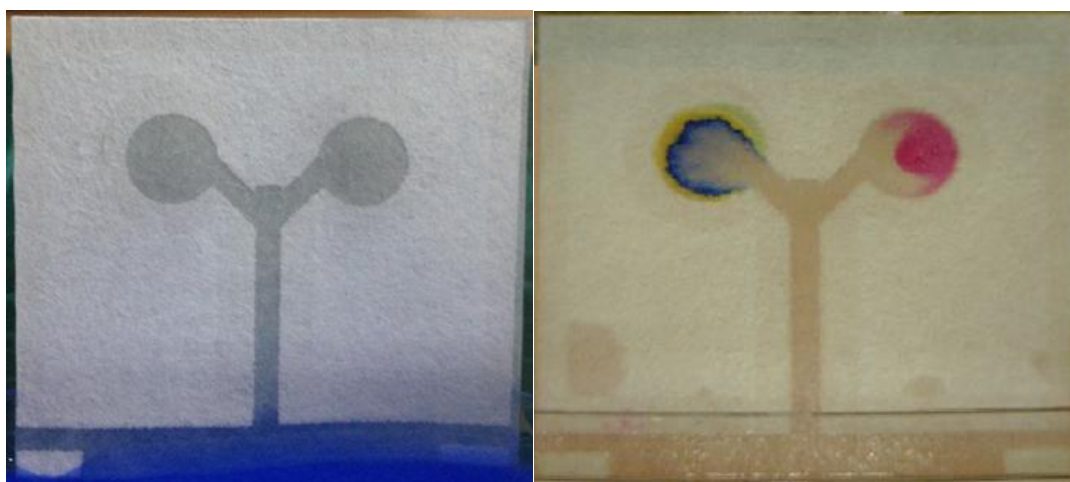
สารละลายตัวอย่างที่ใช้เป็นสารทดสอบโปรตีนบริสุทซ์ (BSA) และสภาพความเป็นกรด-ด่าง NaOH 0.25 M และ โปรตีนบริสุทซ์ (BSA) 32.5 ไมโครเมตร โดยสารที่ใช้ในการทดสอบนี้จะมีสภาพความเป็น ด่าง หรือ pH ที่ประมาณ 12.97 และมีโปรตีนบริสุทซ์ผสมอยู่

### 3.5.6.4 การทดสอบประสิทธิภาพของแล็บบนชิปต้นแบบ

ในการทดสอบประสิทธิภาพต้นแบบหลังจากที่ได้มีการหยดสารที่จะใช้ทดสอบแล้วคือ สารที่ใช้ในการทดสอบ โปรตีนบริสุทซ์ และสภาพความเป็นกรดด่าง การทดสอบใช้วิธีการจุ่มแล็บบนชิปลงไปในการละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ที่มีส่วนผสมของ โปรตีนและสภาพความเป็นด่าง

หลังจากการจุ่มแผ่นบนชิปในสารละลายตัวอย่าง สารละลายตัวอย่างนั้นจะแทรกซึมผ่านกระดาษกรอง ไหลไปตามหลอดลายที่ออกแบบไว้ โดยจะไหลไปในทิศทางตั้งฉากขึ้นไปด้านบน พอถึงปลายทางจะแยกออกเป็นสองทางเพื่อไปสัมผัสกับบริเวณหลุมที่มีการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดสอบในตอนแรก

ภาพที่ 3.21 เปรียบเทียบระหว่างแผ่นบนชิปต้นแบบที่มีการทดสอบสาร และไม่มีการทดสอบสาร จากเงื่อนไขในการสร้างแผ่นบนชิปที่เหมือนกันคือ ความเข้มข้น โพลีเมอร์ SU-8 10% โดยปริมาตรต่อปริมาตร จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 5 ครั้ง และความหนาของกำแพงที่มากกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการสร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบที่ได้จากการทดลอง รูปทางด้านซ้ายจะสามารถสังเกตเห็นการรั่วซึมของแผ่นบนชิปต้นแบบอยู่ ซึ่งแตกต่างกับรูปทางด้านขวาที่ไม่มีการรั่วซึม ที่เวลาเท่ากันคือประมาณ 8 นาที จากการตั้งสมมุติฐาน อาจเป็นเพราะสารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบมีสภาพความเป็นด่างมากเกินไปทำให้มีผลต่อกำแพงโพลีเมอร์ SU-8



ภาพที่ 3.21 เปรียบเทียบระหว่างแผ่นบนชิปต้นแบบที่ไม่มีการทดสอบสารและมีการทดสอบสาร

### 3.5.6.5 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นบนชิปต้นแบบ

1. สารตัวอย่างเมื่อเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสารที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะเปลี่ยนสี คือ หลุมทางด้านซ้ายที่ใช้ในการทดสอบโปรตีน จากเดิมที่บริเวณหลุมนั้นมีสีเหลืองจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ส่วนบริเวณหลุมทางด้านขวาที่ใช้ในการทดสอบ สภาพความเป็นกรด-ด่าง จากเดิมที่ไม่มีสีจะเปลี่ยนเป็นมีสีเป็นสีชมพูเข้ม การเปลี่ยนสีของสารละลายตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับสารตัวอย่างทั้งสอง

แล้วเกิดการเปลี่ยนสีได้นั้นแสดงให้เห็นว่าเล็บบนชิปต้นแบบนั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้งานได้

2. ในการทดสอบประสิทธิภาพเวลาที่ใช้ในการทดสอบ คือเวลาที่ใช้ในการที่สารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะไปสัมผัสกับสารละลายที่เตรียมไว้ในภาชนะตรวจสอบทั้ง โปรตีนและกรด-ด่างนั้น ใช้เวลาประมาณ 8 นาที ก็สามารถเห็นผลการทดสอบด้วยตาเปล่าได้

3. จากการทดสอบสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบที่อยู่ในสถานะความเป็นเบสนั้นจะมีผลต่อกำแพงของเล็บบนชิปต้นแบบ คือสารละลายนั้นจะทำให้กำแพงสึกกร่อน

### 3.5.7 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ โพลีเมอร์ SU-8 ในการสร้างลวดลายบนเล็บบนชิปต้นแบบเพื่อควบคุมทิศทางการไหลนั้นสามารถทำได้ แต่ในการตรวจสอบสารต่างๆในสารตัวอย่างนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ คือสารที่มีสภาพความเป็นกรด-เบสนั้นจะมีผลต่อกำแพงที่สร้างมาจาก โพลีเมอร์ SU-8 สามารถสังเกตได้จากผลการทดลองในการทดสอบประสิทธิภาพของเล็บบนชิปต้นแบบ

2. โพลีเมอร์ SU-8 เป็นสารที่มีราคาแพงและหาซื้อยากอาจทำให้เกิดข้อจำกัดของการสารเล็บบนชิปในประเทศที่กำลังพัฒนา

3. วิธีการพิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 กับเครื่องพิมพ์โดยตรงนั้นจะเป็นสาเหตุทำให้เครื่องพิมพ์เสียหายเนื่องจากการอุดตันของหัวพิมพ์ในเครื่องพิมพ์ ซึ่งในการทดลองการสร้างเล็บบนชิปต้นแบบนี้จะสามารถสร้างเล็บบนชิปได้ แต่เครื่องพิมพ์จะมีอายุการใช้งานสั้นลง จากการทดลองอยู่ที่ประมาณ 10-15 วันหลังจากการใช้ SU-8 พิมพ์เพื่อสร้างเป็นลวดลายบนเล็บบนชิปครั้งแรก

### 3.6 การสร้างเล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้โพลีเมอร์ Polyvinyl chloride (PVC) ประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงเจ็ท

การสร้างเล็บบนชิปจากการใช้โพลีเมอร์ SU-8 ในการสร้างเป็นลวดลายบนเล็บบนชิปเพื่อกำหนดทิศทางการไหลให้เป็นไปตามที่ต้องการนั้นสามารถทำได้ แต่เนื่องจากโพลีเมอร์ SU-8 เป็นโพลีเมอร์ที่มีราคาสูงและหาซื้อยากซึ่งไม่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ดังนั้นหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างเล็บบนชิปโดยใช้โพลีเมอร์ PVC เนื่องจากโพลีเมอร์ชนิดนี้มีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป ในการทดลองของบทนี้จะทำการทดลองคล้ายกับการใช้โพลีเมอร์ SU-8 สร้างเล็บบนชิป การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์จะยังคงเหมือนเดิม เช่น เครื่องพิมพ์อิงเจ็ท Epson รุ่น T13 แต่จะ

เปลี่ยนสารที่จะใช้ในการสร้างลวดลายของเส้นบนฉาบจากโพลีเมอร์ SU-8 ที่ละลายใน สารละลาย Cyclopentanone มาเป็นโพลีเมอร์ Polyvinyl Chloride ที่ละลายในสารละลาย Cyclohexanone แทน

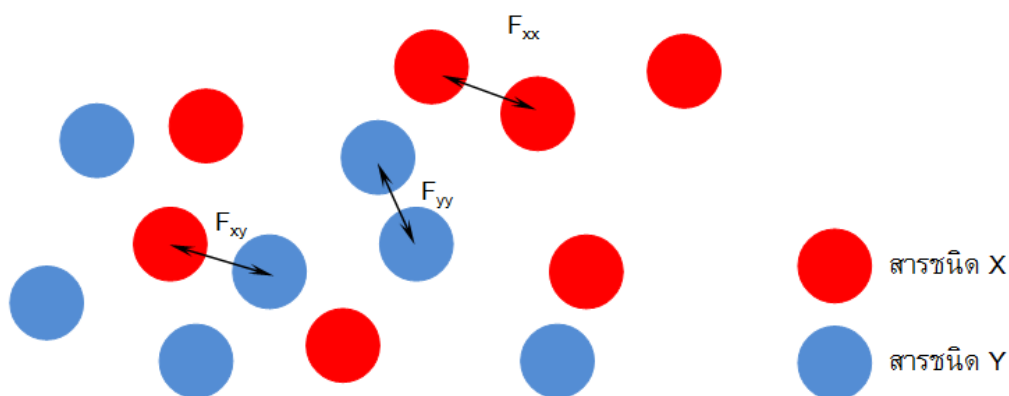
### 3.6.1 วิธีการเลือกสารและตัวทำละลาย

ในการสร้างเส้นบนฉาบนั้นหัวใจหลักจะอยู่ที่การเลือกใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic หรือ มีคุณสมบัติที่น้ำไม่ชอบมาสร้างเป็นลวดลายบนเส้นบนฉาบเพื่อให้สามารถกำหนดทิศทางการไหลได้ ซึ่งสารเหล่านี้ที่มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic จะได้แก่สารพวก โพลีเมอร์ต่างๆเช่น Polyvinyl chloride, Polystyrene และ Rubber หรือยางประเภทต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกสารที่มีคุณสมบัติดังกล่าวรวมกับปัจจัยอื่นคือ ราคา แหล่งที่ซื้อ ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะเน้นที่ราคาถูกเป็นหลัก หลังจาก que เลือกสารดังกล่าวได้แล้วจะต้องเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมด้วย ซึ่งโพลีเมอร์แต่ละชนิดจะมีตัวทำละลายที่ไม่เหมือนกัน บางตัวอาจมีตัวทำละลายหลายตัว หรือบางตัวอาจมีตัวทำละลายที่จำเพาะเพียงตัวเดียว โดยจะสามารถเลือกตัวทำละลายได้จากค่า Solubility ของโพลีเมอร์ต่างๆ นำค่า Solubility ไปเลือกสารละลายที่มีค่า Solubility ใกล้เคียงกัน เช่น สาร Polyvinyl chloride มีค่า Solubility เท่ากับ  $19.4 \text{ MPa}^{1/2}$  หรือ  $9.5 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$  ค่าของตัวทำละลายที่มี Solubility ใกล้เคียงและอยู่ในระดับที่รับได้ตามทฤษฎีคือ Xylene ( $18 \text{ MPa}^{1/2}$  หรือ  $8.8 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ), Dimethyl ether ( $18 \text{ MPa}^{1/2}$  หรือ  $8.8 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ), Toluene ( $18.2 \text{ MPa}^{1/2}$  หรือ  $8.9 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ), Cyclohexanone ( $20.2 \text{ MPa}^{1/2}$  หรือ  $9.9 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ ) แต่ข้อมูลจากการทฤษฎีนี้อาจยังครอบคลุมสำหรับการเลือกสารมาเป็นตัวทำละลาย เป็นเพียงแนวทางในการเลือกเบื้องต้นเท่านั้นเนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลต่อการทำละลาย และในกรณีนี้ สารที่ใช้ทำละลาย Polyvinyl chloride ที่ดีที่สุดในบรรดาสารทำละลายที่ยกตัวอย่างนี้คือ Cyclohexanone ถึงแม้ว่าสารทำละลายตัวนี้จะมีค่า Solubility ไม่ดีเท่าสารทำละลายตัวอื่นแต่เนื่องจากคุณสมบัติของ Cyclohexanone ที่สามารถละลายโปรตรอนใน Polyvinyl chloride ได้ดีกว่าตัวทำละลายตัวอื่นจึงสามารถทำละลายได้ดีกว่า

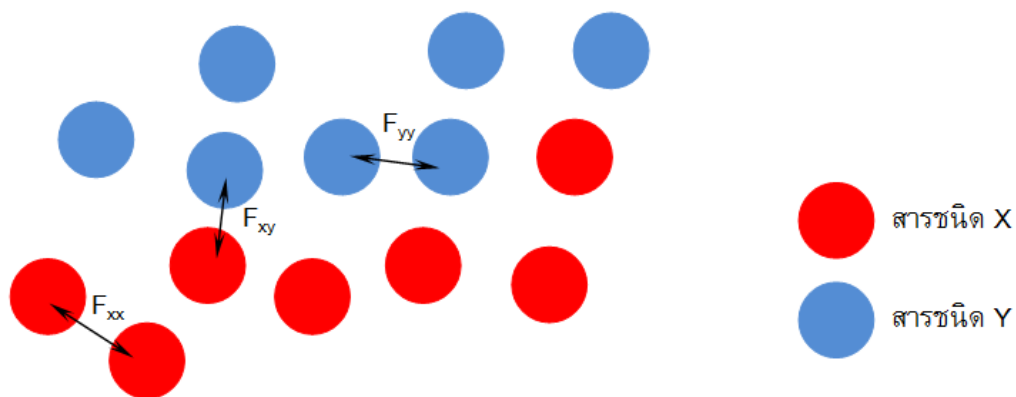
ภาพที่ 3.22 ลักษณะของโมเลกุลของสารสองชนิดที่สามารถละลายกันได้ชนิดคือ วงกลมสีแดงแทนสารที่เป็นตัวถูกทำละลาย X และ วงกลมสีน้ำเงินแทนสารที่เป็นตัวทำละลาย Y ซึ่งการที่สารทั้งสองตัวนี้จะทำละลายกันได้ก็ต่อเมื่อ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารสองชนิด  $F_{xy}$  จะต้องมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารชนิดเดียวกัน  $F_{xx}$  และ  $F_{yy}$  ในทางปฏิบัติจะเห็นสารทั้งสองชนิดละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้

ภาพที่ 3.23 ลักษณะของโมเลกุลของสารสองชนิดที่ไม่สามารถละลายกันได้คือ วงกลมสีแดงแทนสารที่เป็นตัวถูกทำละลาย X และ วงกลมสีน้ำเงินเป็นตัวแทนของที่เป็นตัวทำละลาย Y ซึ่ง

การที่สารทั้งสองตัวนี้จะไม่สามารถทำละลายกันได้เนื่องจากการ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลระหว่างสารทั้งสองชนิด  $F_{xy}$  มีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารชนิดเดียวกัน  $F_{xx}$  และ  $F_{yy}$  ในทางปฏิบัติจะเกิดการแยกชั้นหรือถูกแบบสถานะอย่างชัดเจน



ภาพที่ 3.22 ลักษณะของโมเลกุลของสารสองชนิดที่สามารถละลายกันได้ [15]



ภาพที่ 3.23 รูปลักษณะของโมเลกุลของสารสองชนิดที่ไม่สามารถละลายกันได้ [15]

ในการละลายโพลิเมอร์กับสารละลายที่ไม่มีขั้วนั้นจะไม่เหมือนการละลายของสารละลายมีขั้วทั่วไป เนื่องจากสารละลายที่ไม่มีขั้วจึงทำให้ไม่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ทั้งโมเลกุลชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน ดังนั้นการละลายของโพลิเมอร์และสารละลายที่ไม่มีขั้วจะเกิดขึ้นได้เมื่อแรงดึงดูดของสารที่ใช้ในการทำละลายและสารที่ถูกละลายนั้นมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วค่า ความสามารถในการละลาย (solubility) ของสารทั้งสองตัวจะต้องต่างกันไม่เกิน  $2 \text{ MPa}^{1/2}$  หรือ  $1 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$

จากเงื่อนไขคือ ราคาเป็นหลักในงานวิจัยนี้ ได้เลือกโพลิเมอร์คือ Polyvinyl Chloride, Polystyrene และ Rubber มีตัวทำละลายคือ Cyclohexanone และ Toluene เนื่องจากมีราคาถูกสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

### 3.6.1.1 การทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมเบื้องต้นสำหรับ PVC ละลายใน Cyclohexanone

การทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้ PVC ละลายในสารละลาย Cyclohexanone มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เริ่มจากการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการสร้างลวดลายของแล็บบนชิปก่อน จากความเข้มข้นดังต่อไปนี้ 1 wt%, 2.5 wt%, 5 wt% และ 10 wt% เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากการเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10 wt% ขึ้นไปจะไม่สามารถละลายได้เนื่องจากการอึดตัวของตัวทำละลาย ในการเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆจะต้องใช้เวลาในการเตรียมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่า PVC จะละลายในสารละลาย Cyclohexanone หมดอย่างสมบูรณ์ เพราะเนื่องจาก PVC นั้นอยู่ในของแข็งหรือเป็นผง จะใช้เวลานานมากกว่าการละลายที่อยู่ในรูปแบบของเหลวกับของเหลว

2. ทดสอบความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองแบบง่ายๆก่อนที่จะใส่ลงไปบนเครื่องพิมพ์ โดยการหยดสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นปริมาตร 1 ไมโครลิตร เพื่อใช้เป็นค่าแพนกันการไหลผ่านของสารละลายที่จะทดสอบ ลงบนกระดาษกรอง Whatman grade 1 ที่ถูกตัดเป็น สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด กว้าง x ยาว เท่ากับ 1 x 5 เซนติเมตร แล้วปล่อยให้แห้งเพื่อให้ Solvent ระเหยออกไปคงเหลือไว้แต่โพลิเมอร์เพียงอย่างเดียว ในการทดลองแต่ละความเข้มข้นจะทำซ้ำกันเป็นจำนวน 3 ครั้งเพื่อความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือ

3. เมื่อได้ช่วงของความเข้มข้นที่เหมาะสมแล้วนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์ และพิมพ์ลวดลายที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งลวดลายที่ใช้ในการพิมพ์ และเงื่อนไขในการทดลองนั้นจะเหมือนกับการทดลองที่ใช้โพลิเมอร์ SU-8 ในการสร้างแล็บบนชิป

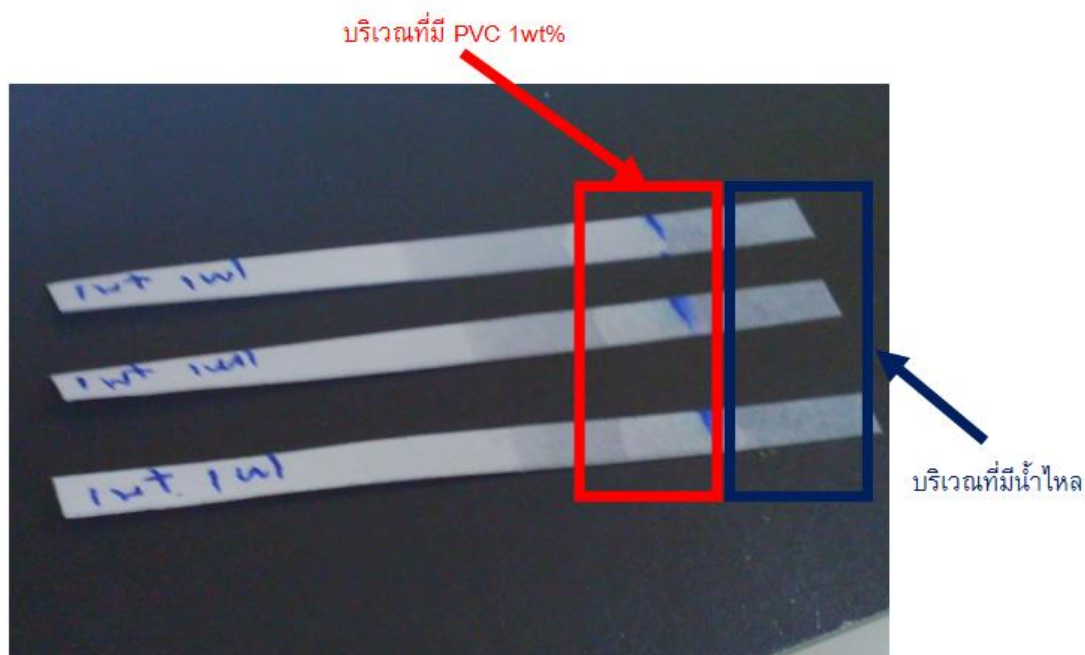


ภาพที่ 3.24 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 1 wt%, 1 ไมโครลิตร ในการทดสอบนำเอาส่วนปลายของกระดาษกรองทางด้านขวาไปจุ่มลงในน้ำโดยไม่ให้ระดับน้ำที่จุ่มลงไปเกินเส้นที่กำหนดไว้ (เส้นสีน้ำเงิน) เป็นเวลา 5 นาที จากเงื่อนไขนี้ไม่สามารถกั้นการแทรกซึมและทะลุผ่านของน้ำได้

ภาพที่ 3.25 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 2.5wt%, 1 ไมโครลิตร ในการทดสอบนำเอาส่วนปลายของกระดาษกรองทางด้านขวาไปจุ่มลงในน้ำโดยไม่ให้ระดับน้ำที่จุ่มลงไปเกินเส้นที่กำหนดไว้ (เส้นสีน้ำเงิน) เป็นเวลา 5 นาที จากเงื่อนไขนี้สามารถกั้นการแทรกซึมและทะลุผ่านของน้ำได้

ภาพที่ 3.26 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 5wt%, 1 ไมโครลิตร การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 2.5wt%, 1 ไมโครลิตร ในการทดสอบนำเอาส่วนปลายของกระดาษกรองทางด้านขวาไปจุ่มลงในน้ำโดยไม่ให้ระดับน้ำที่จุ่มลงไปเกินเส้นที่กำหนดไว้ (เส้นสีน้ำเงิน) เป็นเวลา 5 นาที จากเงื่อนไขนี้สามารถกั้นการแทรกซึมและทะลุผ่านของน้ำได้

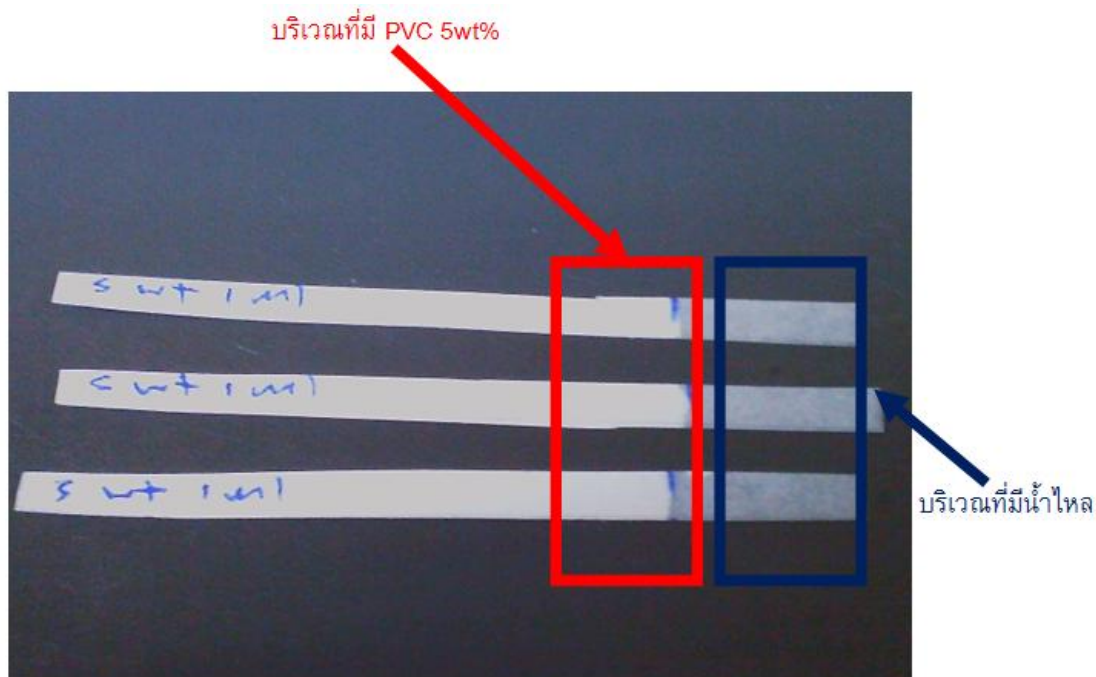
ภาพที่ 3.27 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 10wt%, 1 ไมโครลิตร การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 2.5wt%, 1 ไมโครลิตร ในการทดสอบนำเอาส่วนปลายของกระดาษกรองทางด้านขวาไปจุ่มลงในน้ำโดยไม่ให้ระดับน้ำที่จุ่มลงไปเกินเส้นที่กำหนดไว้ (เส้นสีน้ำเงิน) เป็นเวลา 5 นาที จากเงื่อนไขนี้สามารถกั้นการแทรกซึมและทะลุผ่านของน้ำได้



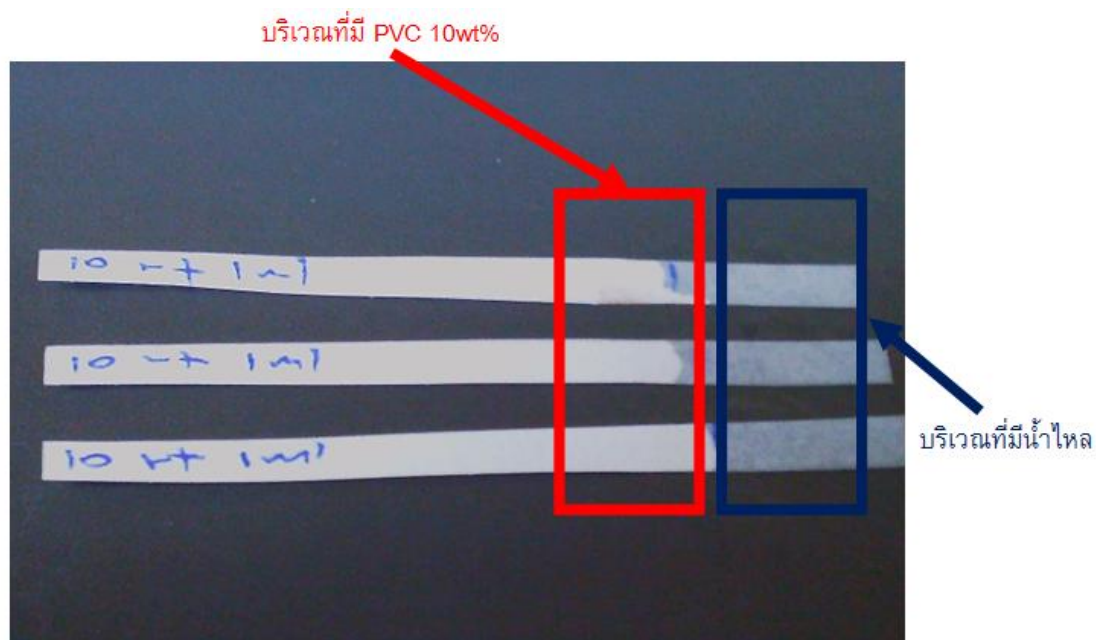
ภาพที่ 3.24 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 1wt%, 1 ไมโครลิตร



ภาพที่ 3.25 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 2.5wt%, 1 ไมโครลิตร



ภาพที่ 3.26 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 5wt%, 1 ไมโครลิตร



ภาพที่ 3.27 การทดสอบที่ความเข้มข้นของ PVC 10wt%, 1 ไมโครลิตร

### 3.6.1.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของ PVC เบื้องต้น

จากการหยดสารละลาย PVC แต่ละความเข้มข้นลงบนกระดาษเพื่อไปก่อตัวเป็นกำแพงในกระดาษปิดกันทางไหลของของเหลว จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 1wt% ไม่สามารถกั้นการรั่วซึมหรือทะลุผ่านของของเหลวได้เลย ส่วนที่ความเข้มข้นอื่น เช่น 2.5wt%, 5wt% และ 10wt% สามารถกั้นของเหลวไม่ให้ทะลุผ่านได้ และในกรณีของตัวอย่างที่ทำซ้ำจะให้ผลเช่นเดียวกัน

### 3.6.2 การทดลองใช้สารละลาย PVC กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

ในการทดลองใช้สารละลาย PVC กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทนั้นขั้นตอนจะคล้ายกับการทดลองของการใช้โพลีเมอร์ SU-8 ในการสร้างแผ่นบนชิป แต่จะแตกต่างกันที่ วัสดุที่ใช้คือ PVC ที่ละลายใน Cyclohexanone และกระดาษกรองที่ใช้กับการทดลองนี้คือ กระดาษกรอง Whatman grade 1 สารที่ใช้สำหรับการทดลองจะใช้ความเข้มข้นที่ 0.25wt%, 0.5wt%, 1wt%, 2.5wt%, 5wt% และ 10wt%

#### 3.6.2.1 ผลการทดลองจากการใช้สารละลาย PVC

จากการทดลองใช้ PVC พบว่าสารที่ใช้ทำละลาย Cyclohexanone ทำปฏิกิริยากับเครื่องพิมพ์ทำให้ไม่สามารถใช้งานเครื่องพิมพ์ได้หรือทำให้อายุการใช้งานสั้นลง จะสามารถสังเกตได้ว่าที่ส่วน Body part ของเครื่องพิมพ์ถูกละลายเสียหายจึงทำให้ไม่สามารถใช้สารละลายดังกล่าวในการสร้างลวดลายของแผ่นบนชิปได้ ในการทดลองนี้สามารถที่จะสร้างชุดทดสอบได้ที่ความเข้มข้นของ PVC 0.25wt% เพียงเงื่อนไขเดียว

ตารางที่ 3.10 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของ PVC 0.25wt% โดยมวลต่อปริมาตร

Concentration of polymer PS 0.25% โดยมวลต่อปริมาตร	Printing times	Wall thickness (mm)									
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
10	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O
15	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O



ภาพที่ 3.28 ชุดทดสอบจากความเข้มข้นของ PVC 0.25wt%

### 3.6.3 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองใช้ PVC กับสารละลาย Cyclohexanone กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทนั้นถึงแม้ว่าจะสามารถสร้างชุดการทดลองได้เพียงเงื่อนไขเดียวคือ ความเข้มข้นของ PVC 0.25wt% แต่ก็สามารถนำชุดทดลองมาใช้ทดสอบได้ และช่วงที่สามารถใช้สร้างเป็นเล็บบนชิปต้นแบบได้จะอยู่ในเงื่อนไขดังต่อไปนี้ จำนวนครั้งการพิมพ์จะต้องมากกว่า 7 ครั้ง และสำหรับความหนาของก้ำแพงจะต้องมากกว่า 2.5 มิลลิเมตร ส่วนจำนวนครั้งการพิมพ์ที่มากกว่า 10 ครั้ง ความหนาจะต้องมากกว่า 2.0 มิลลิเมตร ขึ้นไป

### 3.6.4 ข้อเสนอแนะ

การพิมพ์สารละลาย PVC เพื่อใช้ในการสร้างเป็นลวดลายควบคุมทิศทางการไหลของน้ำลายละลายตัวนี้จะมีผลทำให้เครื่องพิมพ์เสียหายและอายุการใช้งานสั้นลง เนื่องจากเครื่องพิมพ์นั้นมีส่วนประกอบที่เป็นโพลิเมอร์ที่สารละลายของ PVC นั้นสามารถทำละลายได้

### 3.7 การหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์ซ้ำของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

จากการสร้างเล็บบนชิปด้วยวิธีการพิมพ์โพลิเมอร์ SU-8 และการพิมพ์น้ำ Water-mask ทั้งสองวิธีผ่านกระบวนการผลิตที่อาจค่าความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์ซ้ำทำให้มีผลต่อขนาดของท่อและหลุมที่เป็นส่วนประกอบของเล็บบนชิปไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

Reprint คือ การพิมพ์ซ้ำของกระดาษเพื่อพิมพ์ลวดลายที่ต้องการลงบนกระดาษ และให้อยู่ในตำแหน่งเดิมหรือทับกันทุกตำแหน่งเพื่อใช้ในการสร้างลวดลายของเล็บบนชิปตามเงื่อนไขที่กำหนด

Reprint error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์ซ้ำ จากตำแหน่งของการพิมพ์ครั้งแรกกับตำแหน่งของ

การพิมพ์ครั้งที่สองว่าแตกต่างกันเท่าไรจากการทดลองหาค่า Reprint error ใช้ระยะห่างของตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของวงกลมวงแรกกับวงที่สอง

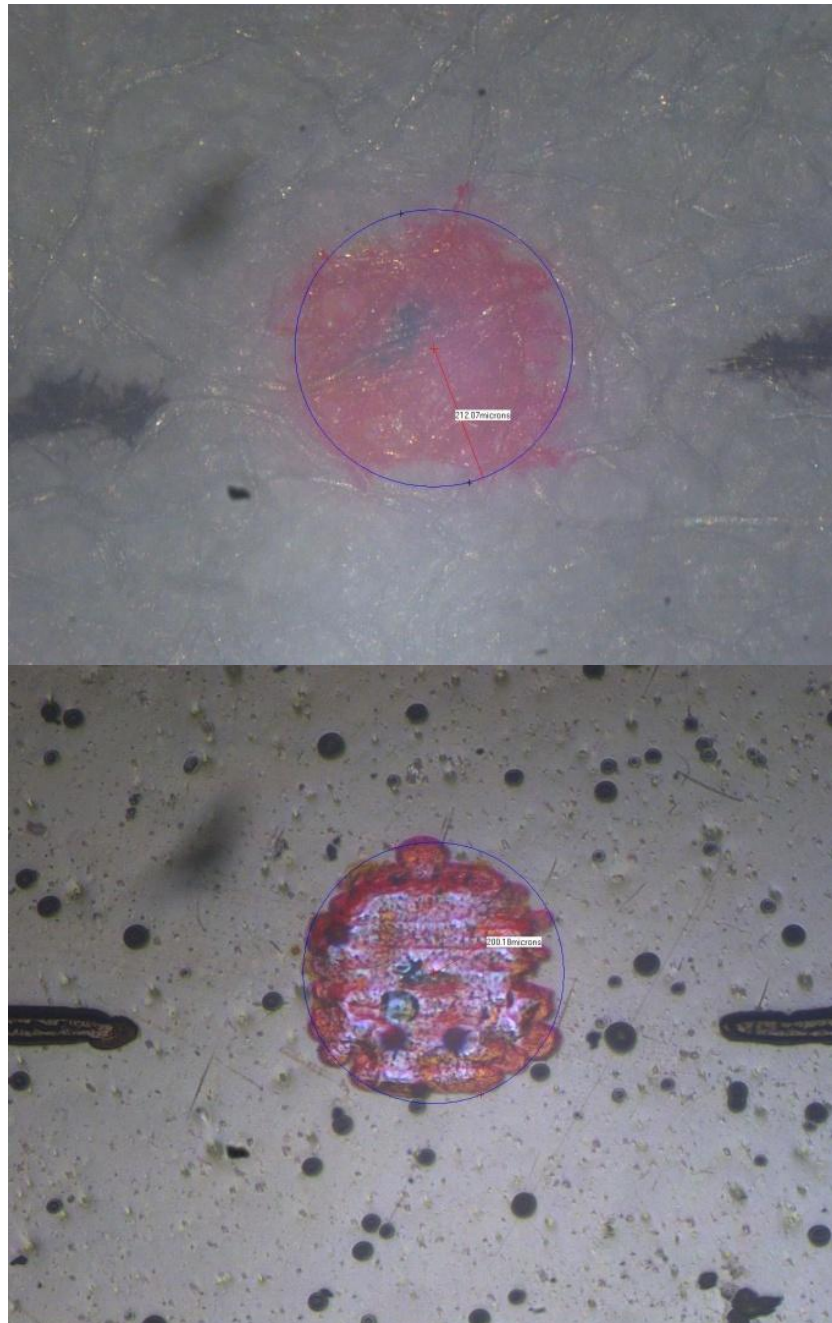
### 3.7.1 การทดลอง

เป็นการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์ซ้ำ ในการทดลองเริ่มต้นจากการพิมพ์วงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และใช้สีเหลือง (yellow 255, 255, 0) จำนวน 9 จุดที่มีระยะห่างเท่ากัน ในการพิมพ์ซ้ำครั้งต่อไปใช้รูปแบบลวดลายเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนสีเป็นสีฟ้า (cyan 0, 183, 235) จากการทดลองดังกล่าวในการพิมพ์ลวดลายที่ใช้ในการทดสอบบนกระดาษกรองนั้น จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการแทรกซึมของน้ำหมึกเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นใส ดังนั้นในการทดลองหาค่า Reprint error นั้นเพื่อต้องการให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุด จึงวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากแผ่นใสในกระบวนการทดลอง

ตารางที่ 3.11 ผลจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดหมึกที่ถูกพิมพ์ลงบนกระดาษกรองและแผ่นใส

Average Diameter of filter paper	199.96 microns
Average Diameter Clear of plastic sheet	222.09 microns

ภาพที่ 3.29 เปรียบเทียบระหว่างการพิมพ์ลวดลายบนกระดาษกับแผ่นใส จากภาพแสดงให้เห็นว่าการพิมพ์ลวดลายบนกระดาษจะทำให้เกิด Error มากกว่าการพิมพ์ลงบนแผ่นใสเนื่องจากกระดาษสามารถแทรกซึมน้ำหมึกได้ดีกว่าบนแผ่นใส จากการวัดผลจากการพิมพ์แบบละ 9 ตัวอย่าง ดังนั้นเราจึงใช้การวัดค่า Error จากการพิมพ์แผ่นใส เพื่อที่จะสามารถลด Error จากการแทรกซึมน้ำหมึกบนกระดาษ



ภาพที่ 3.29 เปรียบเทียบระหว่างการพิมพ์ลวดลายบนกระดาษกับแผ่นใส

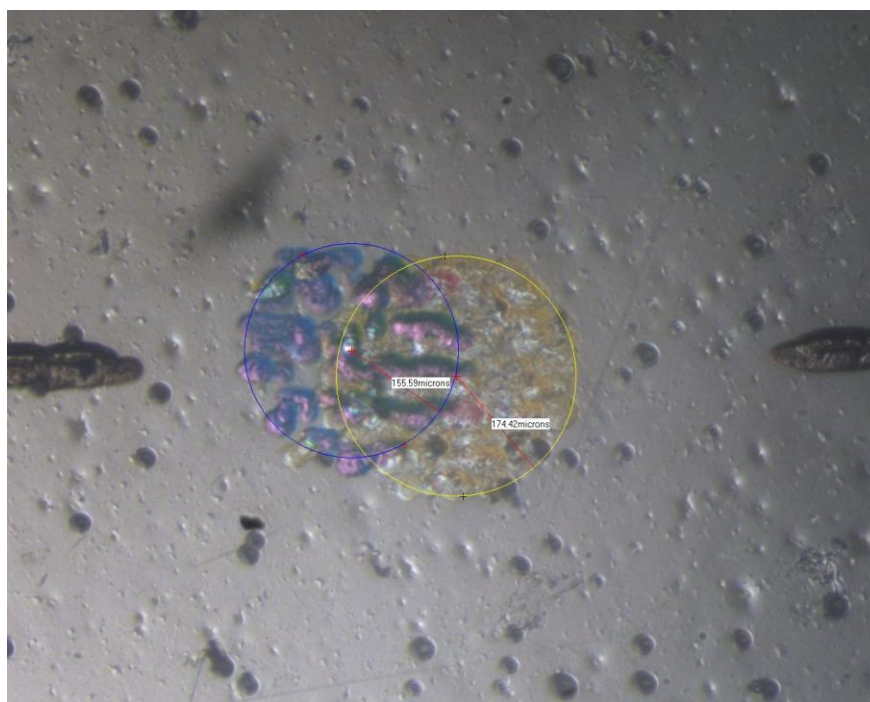
### 3.7.1.1 วัสดุอุปกรณ์

เครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการสร้างแถบบนชิป (Epson, T13)

แผ่นพลาสติกใสขนาด A4

### 3.7.1.2 วิธีการทดลอง

ภาพที่ 3.30 แสดงการทดสอบ Printing error ภายในภาพจะประกอบด้วยเส้นดำสองเส้นทางบริเวณซ้ายและขวาเพื่อเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของภาพที่ถูกต้องในการวัด วงกลมสีเหลือง แทนการพิมพ์ครั้งแรกจากการกำหนดค่าของโปรแกรมด้วยรูปวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร วงกลมสีน้ำเงินแทนการพิมพ์ครั้งที่สองจากการพิมพ์ลดขนาดเดียวกันกับรูปแรก จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวงกลมทั้งสองวงจะไม่ซ้อนทับกันโดยสมบูรณ์ และนี่คือ Printing error ที่เกิดขึ้นจากการพิมพ์ซ้ำภาพที่ได้มาจากกล้อง Microscope (seek 13) กับโปรแกรมที่ใช้ในการถ่ายภาพและวัดค่า Vis version 3.0 จากโปรแกรมสามารถวัดค่าระยะความคลาดเคลื่อนจากการเขียนวงกลมล้อมรอบวงกลมทั้งสองเพื่อหาระยะจุดศูนย์กลางทั้งสองวงกลม กำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงแรกอยู่ในตำแหน่ง 0,0 และจุดศูนย์กลางวงที่สองใช้บอกตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถใช้ระยะของจุดศูนย์กลางสองจุดนี้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของ Printing error ได้จากการทดสอบนี้ ได้ทำการเก็บข้อมูลจากตัวอย่างทั้งหมด 45 ตัวอย่าง เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์



ภาพที่ 3.30 การทดสอบ Printing error



### 3.7.1.3 ผลการทดลอง Reprint error

ผลการทดลองได้สรุปข้อมูลในตารางที่ 3.12 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนหลังจากการพิมพ์ซ้ำที่ตำแหน่งเดิม (reprint error)

Average-X แสดงค่าเฉลี่ย Reprint error ในแนวแกน X

Average-Y แสดงค่าเฉลี่ย Reprint error ในแนวแกน Y

Average-D แสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดลายการพิมพ์ครั้งที่หนึ่งและสอง

ตารางที่ 3.12 ผลการทดลองค่าความคลาดเคลื่อนหลังจากการพิมพ์ซ้ำที่ตำแหน่งเดิม (reprint error)

Average-X	-7.70911 microns
Average-Y	-11.4944 microns
Average-D	119.7072 microns
SD-X	144.2536 microns
SD-Y	22.57817 microns
SD-D	82.82079 microns

### 3.7.1.4 สรุปผลการทดลอง Reprint error

จากตำแหน่งของการพิมพ์ซ้ำค่าความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเดิมในแนวแกน X, Y อยู่ที่ -7,-11 ไมโครเมตร จากตำแหน่งเดิม และระยะทางค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดศูนย์กลางเป็นระยะทาง 119.9 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นค่าที่น้อยจากข้อมูลนี้สามารถสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการพิมพ์ซ้ำไม่มีผลต่อการสร้างเส้นบนชิปมากนัก เนื่องจากหน่วยที่ใช้อยู่ในระดับ มิลลิเมตร ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก ทำให้ในการสร้างลวดลายของเส้นบนชิปไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง Printing Error มากนัก

## บทที่ 4

### การสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้โพลิเมอร์ Polystyrene ด้วยวิธีการ Water-Mask

ในการที่จะเปลี่ยนวัสดุหรือสารที่ใช้พิมพ์ในเครื่องพิมพ์อิงเจ็ท เพื่อลดค่าใช้จ่ายและต้นทุนการผลิตของแล็บบนชิป มาเป็นสารตัวอื่นที่ใช้ในการสร้างตัวเป็นกำแพงนั้น สารเหล่านั้นจะต้องมีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic หรือ มีคุณสมบัติที่น้ำไม่ชอบ และสามารถละลายอยู่ใน Solvent หรือ สารละลายที่เป็นของเหลวได้ สารเหล่านั้นได้แก่ Polystyrene ละลายใน Toluene polyvinyl chloride ละลายใน Cyclohexanone หรือ Rubber ยางบางประเภท ที่สามารถละลายใน Solvent ต่างๆ ขึ้นอยู่กับค่า Solubility

จากการทดลองน้ำสารดังกล่าวคือ Polyvinyl chloride ที่สามารถละลายใน Cyclohexanone นำมาแทนที่ SU-8 ที่สามารถละลายได้ใน Cyclopentanone และใช้แทนหมึกในเครื่องพิมพ์นั้น พบว่า Solvent คือ Cyclohexanone ที่สามารถละลาย Polyvinyl chloride ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์บางส่วนเสียหายในบริเวณที่มี Solvent ดังกล่าวสัมผัสผ่าน จากรูปจะเห็นการสึกก่อนของชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์ หลังจากที่มีการใช้ Solvent นี้ทันที สาเหตุจากการสึกก่อนนี้มาจากชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์นั้นมีส่วนผสมของ Polymer บางชนิดที่ Solvent สามารถทำละลายได้ โดยปกติทั่วไปแล้วน้ำหมึกของเครื่องพิมพ์นี้จะใช้ Water เป็น Solvent พื้นฐานในการทำละลายสี หรือ เม็ดสี หรือใช้ Oil เป็น Solvent การที่นำ Solvent หรือ สารละลายอื่นที่ไม่ใช่ Solvent พื้นฐานดังกล่าวเหล่านี้จะทำให้มีผลกระทบต่อเครื่องพิมพ์และเครื่องพิมพ์

การใช้วิธีการ Water mask นี้เป็นการช่วยลดความเสี่ยงที่มีต่อเครื่องพิมพ์โดยตรง และสามารถประยุกต์ใช้กับ Solvent อื่นๆ ได้อีกด้วย เนื่องจาก Solvent ที่ใช้ละลาย Polymer ที่จะนำมาทำเป็น Micro-channel wall นั้น จะไม่สัมผัสกับ ชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์โดยตรง ทำให้เครื่องพิมพ์ไม่ได้รับความเสียหาย

#### 4.1 วิธีการของ Water-mask

การใช้ Water-mask ในการสร้างลวดลายของแล็บบนชิปนี้ทำได้โดย การพิมพ์น้ำเปล่าลงไปที่บริเวณกระดาษกรองให้ออกมาเป็นลวดลายที่ต้องการ หลังจากพิมพ์น้ำแล้วนำไปจุ่มลงใน Polymer ที่ละลายใน Solvent น้ำที่ถูกพิมพ์ลงไปนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกัน Polymer และ Solvent ไม่ให้แทรกซึมลงในกระดาษกรองเพราะน้ำและ Solvent เป็นสารละลายที่ไม่สามารถเข้ากันหรือละลายซึ่งกันและกันได้เนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกับคือ น้ำนั้นมีคุณสมบัติที่ไม่มีขั้ว ส่วน Solvent นั้นมีคุณสมบัติที่มีขั้วต่ำหรือแทบจะไม่มีขั้วเลย หลังจากจุ่มแล้วนำออกมาปล่อยให้แห้ง จะทำ

ให้ Solvent และ Water ที่พิมพ์ลงไปแห้ง เมื่อ Solvent และ Water แห้งแล้วจะเหลือไว้แต่ Polymer บริเวณที่ได้ออกแบบไว้เท่านั้น

แต่การใช้วิธีการนี้จะสามารถใช้ได้นั้นต้องมีการปรับคุณสมบัติของน้ำที่จะพิมพ์ออกมา ก่อน เนื่องจากการที่จะพิมพ์น้ำออกมาจากเครื่องพิมพ์โดยตรงนั้นไม่สามารถทำได้ โดยปกติแล้ว น้ำหมึกที่ใช้ในเครื่องพิมพ์ถึงแม้ว่าจะมี Water เป็น Solvent พื้นฐาน แต่ก็ต้องมีการปรับการ คุณสมบัติของ Solvent ด้วย อาทิ ค่าความหนืด (viscosity) แรงตึงผิว (surface tension) ซึ่งค่าเหล่านี้ มีผลกับการพิมพ์โดยตรง เพราะถ้าคุณสมบัติดังกล่าวนี้ไม่ตรงกับที่เครื่องพิมพ์ต้องการก็จะไม่สามารถพิมพ์ออกมาได้ ดังนั้นในการทดลองโดยวิธีการ Water mask นั้นจำเป็นจะต้องพิมพ์ Water ให้สามารถออกมาจากเครื่องพิมพ์ให้ได้ก่อนจึงจะสามารถใช้วิธีดังกล่าวได้ การที่จะปรับคุณสมบัติ ของน้ำให้เป็นไปตามที่เครื่องพิมพ์ต้องการนั้นจะต้องปรับที่ค่า ความหนืด และ ค่าแรงตึงผิว ให้ หมดสมกับเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยจะเน้นที่ ค่าความหนืดเป็นหลัก ในการทดลองนี้ได้มี การปรับค่าความหนืดของ Water โดยใช้สารละลายพวก Ethylene glycol เป็นตัวปรับ เพราะจุดเด่น ของ Ethylene glycol นั้นคือ สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก การปรับค่าแรงตึงผิวนั้นสามารถ ทำได้โดยการใส่สารเติมแต่งบางชนิด (surfactant) ที่สามารถละลายน้ำได้ มีสมการหาค่าความหนืด หลังจากการผสมสารดังกล่าว โดยการปรับค่าความหนืดนั้นจะอ้างอิงจาก ค่าความหนืดที่ใช้จริงใน น้ำหมึกของเครื่องพิมพ์

#### 4.1.1 วิธีการคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสารที่ใช้เป็น Water-mask

วิธีการหาคำนวนการค่าที่เหมาะสมสำหรับการผสม Ethylene glycol และ น้ำ เพื่อให้ได้ค่า ความหนืดที่ต้องการคือใกล้เคียงกับน้ำหมึกที่ใช้จริงในเครื่องพิมพ์โดยค่าความหนืดของหมึก สำหรับเครื่องพิมพ์นี้จะอยู่ที่ช่วงประมาณ 4 - 6 Cp ในการทดลองเริ่มจากกำหนดค่าความหนืดคือ 5 แทนลงในสมการออกมาแล้วจะได้ค่าความเข้มข้นของ Ethylene glycol ที่ต้องการ อุณหภูมิที่ใช้ใน การคำนวณอยู่ที่ 25°C หรือ 77°F นำอุณหภูมิที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ในตาราง เมื่อได้ค่าที่ต้องการ ครบทุกตัวแล้วสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นที่ต้องการได้

$$\text{Log}_{10}(\text{Viscosity}, C_p) = A - \frac{B}{X+C} \quad (4.1)$$

$C_p$  = หน่วย Viscosity ค่าความหนืดของ Ethylene glycol โดย 1 P = 0.1 Pa•s หรือ 1 Cp = 1 mPa•s = Pa•s

A, B and C = constant ค่าคงที่ที่ได้จาก Ethylene glycol ในอุณหภูมินั้นๆ

X = Weight % Ethylene glycol ปริมาตรที่ Ethylene glycol ละลายอยู่ในน้ำ

#### 4.1.1.1 ตัวอย่างการคำนวณ จากอุณหภูมิที่ 25°C จะได้ค่าคงที่ดังต่อไปนี้

$$A = -4.26$$

$$B = 1754.89$$

$$C = -421.63$$

$$C_p = 5$$

นำค่าคงที่และค่า  $C_p$  แทนลงในสมการ

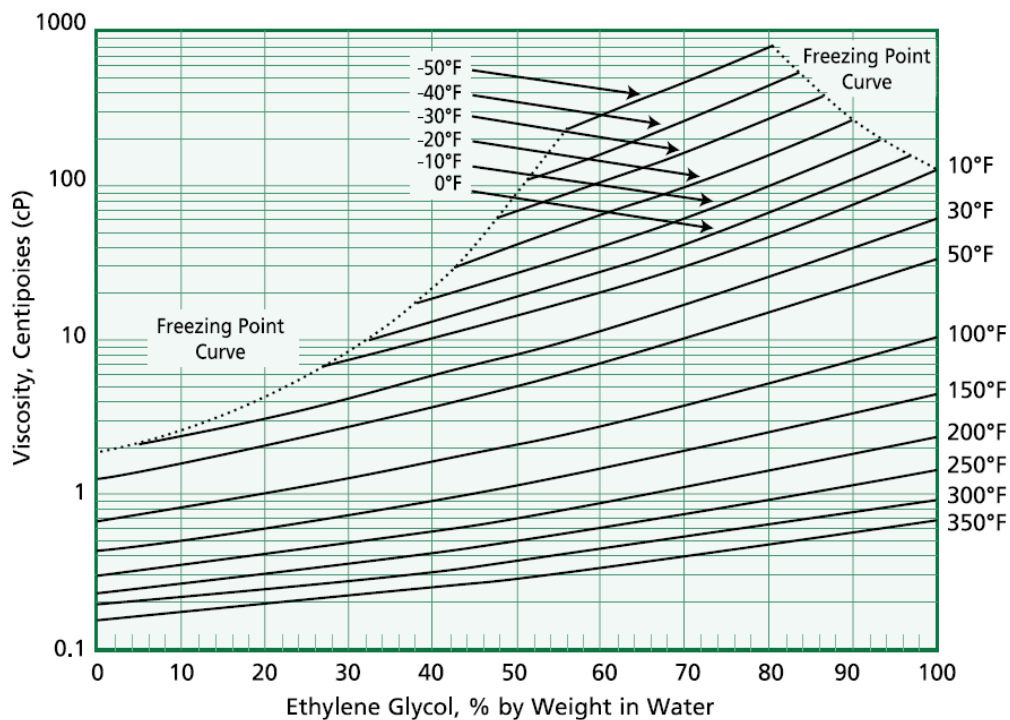
$$\text{Log}_{10}(5) = (-4.26) - 1,754.89/[X + (-421.63)]$$

$C_p = 4$  ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ X = 60.5%

$C_p = 5$  ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ X = 67.8%

$C_p = 6$  ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ X = 70.6%

หลังจากที่คำนวณค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมจากทฤษฎี นำค่าที่ได้ไปผสม Ethylene glycol กับ น้ำ แล้วทดสอบกับเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการสร้างเส้นบนชิป ในทางปฏิบัติค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นเพียงแนวทางเท่านั้นในการทดลองจริงจะค่อยเพิ่มค่าความเข้มข้นของอัตราส่วนผสมระหว่าง Ethylene glycol และน้ำไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม ผลที่ได้จากการผสมแล้วทดสอบการพิมพ์พบว่าน้ำที่มีการผสมกับ Ethylene glycol นั้นสามารถพิมพ์สารละลายออกมาได้เป็นอย่างดีโดยไม่พบการอุดตันของหัวพิมพ์ หรือ ทำให้ชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งเสียหาย การทดลองใช้ส่วนผสมอัตราส่วนระหว่างน้ำ และ Ethylene glycol คือ 50% ต่อ 50% หรือ หนึ่งต่อหนึ่ง



ภาพที่ 4.1 คุณสมบัติของ Ethylene glycol [16]

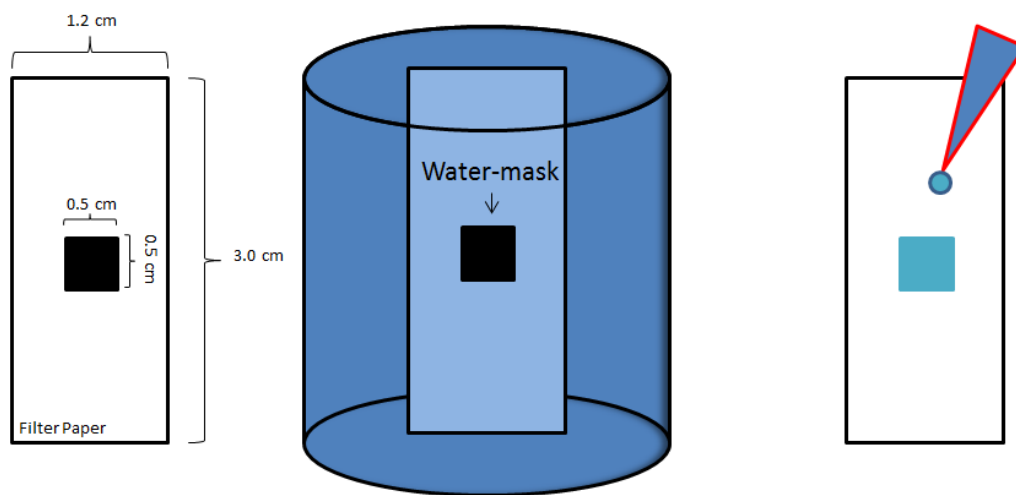
ภาพที่ 4.1 คุณสมบัติของ Ethylene glycol เปรียบเทียบค่าความหนืด (Viscosity) กับ ความเข้มข้นของ Ethylene glycol ที่ละลายในน้ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่สำหรับการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Ethylene glycol และ น้ำ [16]

T, °F	A	B	C
-50	-0.782928	516.030	-219.294
-40	-1.089569	556.509	-228.728
-30	-1.327771	586.133	-236.676
-20	-1.673072	666.763	-252.223
-10	-2.598652	992.919	-295.499
0	-2.255218	817.542	-279.933
10	-2.789821	1029.329	-310.416
30	-3.770236	1495.186	-368.930
50	-4.489869	1941.309	-422.768
100	-3.968390	1596.092	-420.283
150	-3.619555	1368.620	-420.761
200	-3.552380	1341.596	-442.146
250	-3.695975	1491.089	-487.664
300	-3.789550	1626.778	-532.123
350	-4.411432	2357.689	-655.745

#### 4.1.2 การทดสอบหาความเข้มข้นของ Polystyrene ที่เหมาะสมในการสร้างเป็น แล็บบนชิปต้นแบบ

หลังจากที่ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารที่จะใช้เป็นแม่แบบแล้วคือ Ethylene glycol ที่ละลายอยู่ในน้ำอัตราส่วนเท่ากับหนึ่งต่อหนึ่ง ขั้นตอนต่อไปคือหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ละลายอยู่ใน Toluene โดยเริ่มจากความเข้มข้นของ Polystyrene ใน Toluene ที่ 0.5% , 1.0% , 1.5% , 2.0% , 2.5% , 3.0% และ 5.0% โดยมวลต่อปริมาตร (เนื่องจาก Polystyrene มีลักษณะเป็นของแข็งและมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ทำให้การละลายจะต้องใช้เวลานาน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมงในการละลาย Polystyrene เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่มี Polystyrene ที่อยู่ในสภาพของแข็งหลงเหลืออยู่) หลังจากเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำมาทดสอบด้วยวิธีการ Water-mask โดยวิธีการทดลองจะมีขั้นตอนและรายละเอียด ดังนี้คือ



1. Design pattern

2. Soak in Ps/toluene

3. Test

ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนการหาความเข้มข้นของสารละลาย Polystyrene ใน Toluene ที่เหมาะสมในการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบ

1. ออกแบบลวดลายที่ใช้ในการทดลอง ในการทดลองนี้ได้ออกแบบลวดลายที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร x 0.5 เซนติเมตร และพิมพ์บนกระดาษกรองที่จะใช้ทำเป็นแล็บบนชิปต้นแบบ โดยกระดาษกรองจะถูกตัดออกเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

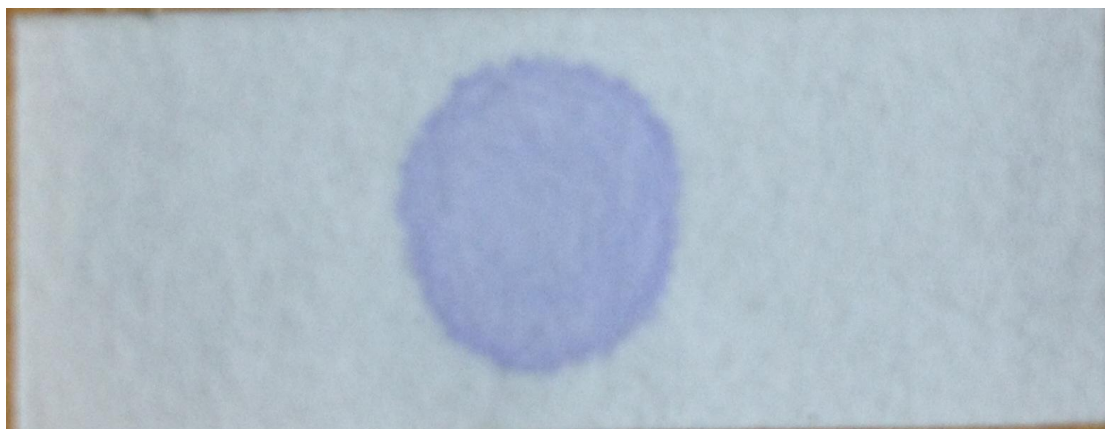
และมีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับ 1.2 เซนติเมตร x 3.0 เซนติเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการจุ่มชุดทดลองลงในสารละลาย Polystyrene

2. นำชุดทดลองที่ได้จากการพิมพ์น้ำแล้วจุ่มในสารละลาย Polystyrene ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบที่เตรียมไว้ ใช้เวลาประมาณ 10 วินาที เพื่อให้แน่ใจว่า Polystyrene ในแต่ละความเข้มข้นนั้นละลายและซึมไปในกระดาษอย่างทั่วถึง หลังจากนั้นนำมาทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ น้ำและ Toluene ระเหยออกไป ทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง โดยไม่มีการให้อุณหภูมิเพื่อช่วยในการระเหยของน้ำและ Toluene เนื่องจาก Polystyrene มีจะหลอมเหลวถ้าอาจทำให้ชุดทดสอบเสียหายได้

3. ทำการทดสอบโดยการหยดน้ำหมึกสีลงไปเป็นปริมาตร 5 ไมโครลิตร ต่อชุดทดลองในแต่ละความเข้มข้นเพื่อสังเกตดูว่าที่ความเข้มข้นใดจะสามารถรักษารูปร่างของสีเหลืองจตุรัสหลังจากที่หยดน้ำลงไปแล้ว ถ้าความเข้มข้นไหนที่ยังคงความเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสอยู่แสดงว่า ความเข้มข้นนั้นสามารถใช้สร้างเป็นแถบบนชิปต้นแบบได้ เวลาที่ใช้ในการทดลองหลังจากการหยดน้ำลงบนช่องสี่เหลี่ยมและสังเกตผลจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที

#### 4.1.3 ผลการทดลองการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย Polystyrene ใน Toluene

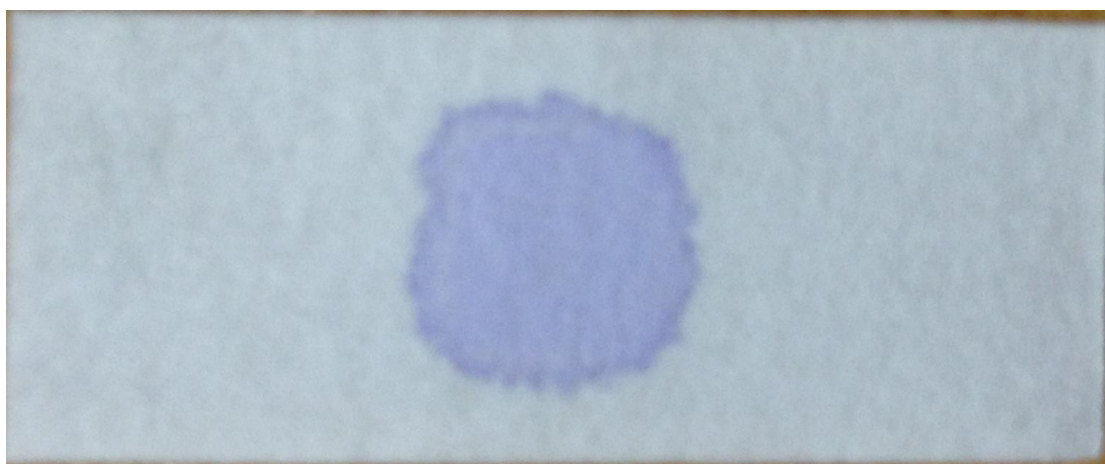
ผลการทดลองที่ได้มาจากการสังเกตลักษณะของสีเหลืองจตุรัสของชุดทดลองแต่ละชุด หลังจากที่ทำการหยดหมึกสีลงไปเป็นปริมาตร 5 ไมโครลิตรแล้วสังเกตดูว่าลักษณะของรูปร่างสี่เหลี่ยมดังกล่าวนี้จะยังคงรูปร่างเดิมได้หรือไม่ หากชุดการทดลองที่ความเข้มข้นนั้นๆ สามารถรักษารูปร่างได้ความเข้มข้นนั้นก็จะสามารถใช้ในการสร้างเป็นแถบบนชิปต้นแบบได้ จากผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าที่สารละลาย ความเข้มข้นที่ 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% ไม่สามารถที่จะรักษารูปร่างสี่เหลี่ยมไว้ได้โดยจะเห็นการรั่วซึมของน้ำหมึกออกมาจนกรอบสี่เหลี่ยม ส่วนในความเข้มข้นที่เป็น 2.5% นั้นจะสามารถเริ่มกันการรั่วซึมของน้ำได้และรักษารูปร่างของสี่เหลี่ยมในชุดการทดลองแต่ก็ยังมีส่วนที่รั่วซึมออกมาเล็กน้อย และส่วนของความเข้มข้นที่เหลือคือ 3.0% และ 5.0% สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำและรักษารูปร่างของสี่เหลี่ยมในชุดการทดลองได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 4.3 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลิเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 0.5% โดย  
มวลต่อปริมาตร

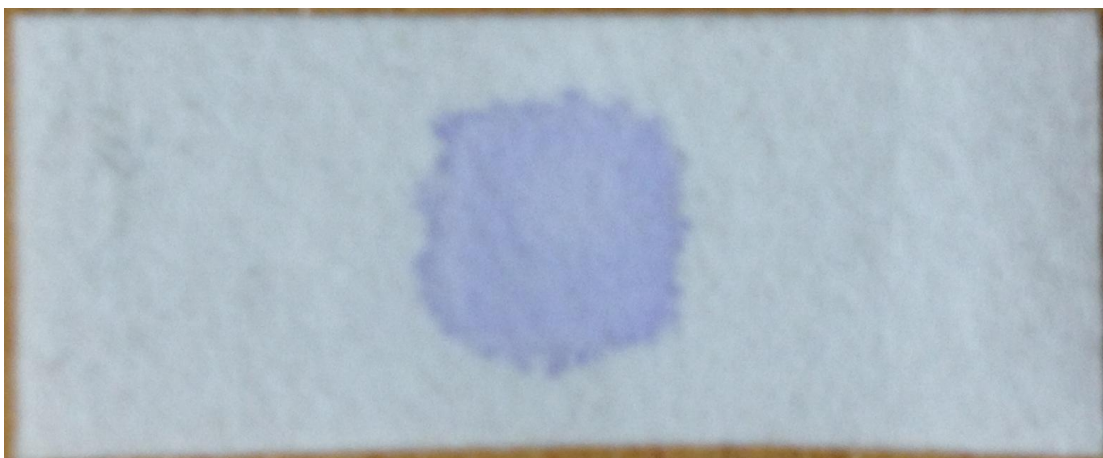


ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลิเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 1.0% โดย  
มวลต่อปริมาตร

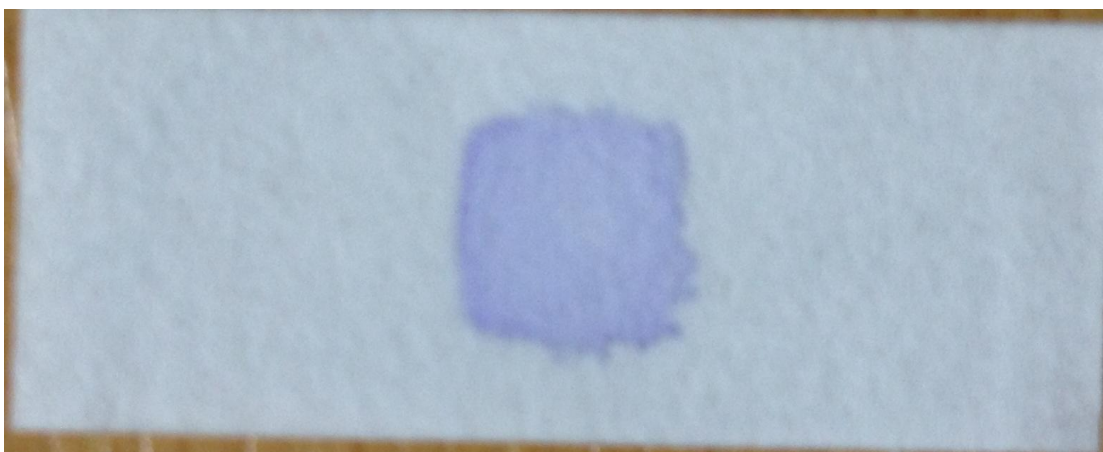


ภาพที่ 4.5 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลิเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 1.5% โดย  
มวลต่อปริมาตร

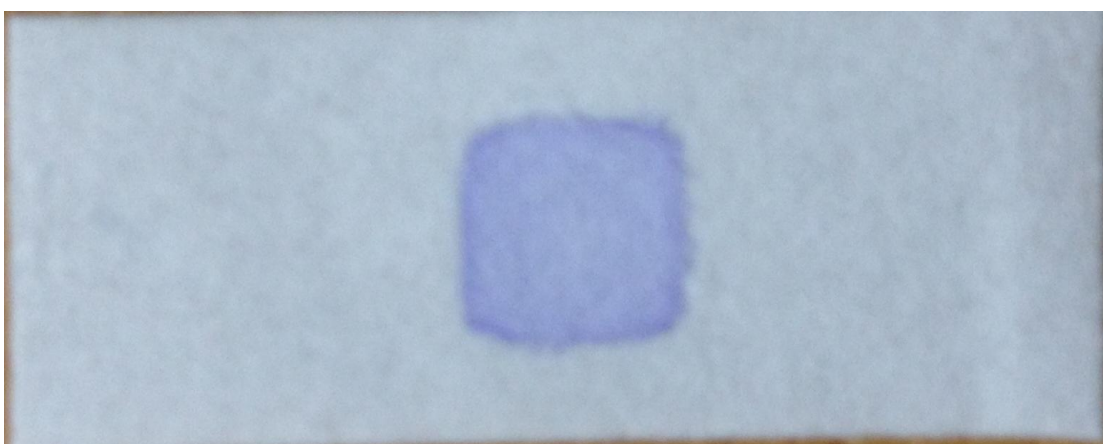




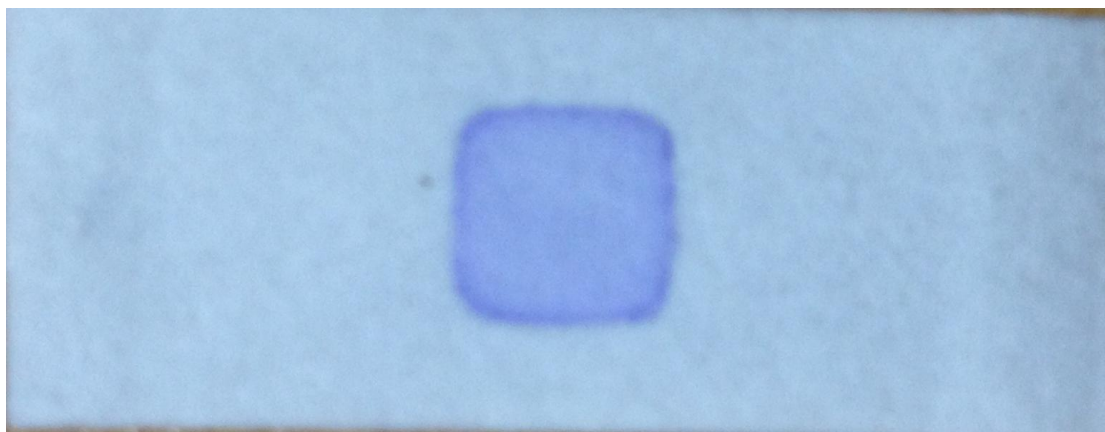
ภาพที่ 4.6 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 2.0% โดย  
มวลต่อปริมาตร



ภาพที่ 4.7 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 2.5% โดย  
มวลต่อปริมาตร



ภาพที่ 4.8 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดย  
มวลต่อปริมาตร



ภาพที่ 4.9 การทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโพลิเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 5.0% โดยมวลต่อปริมาตร

#### 4.1.4 สรุปผลการทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลิเมอร์ Polystyrene ในการสร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบ

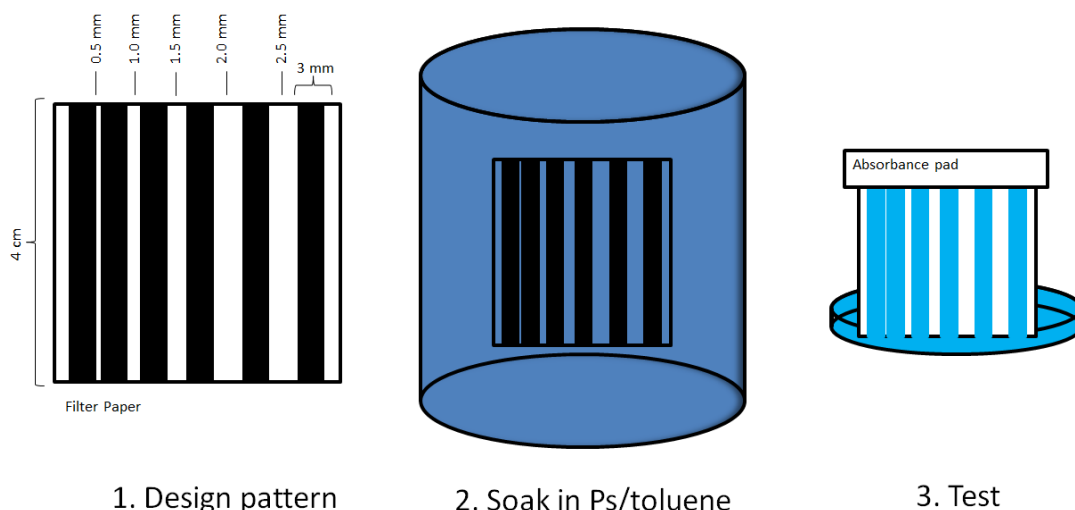
จากผลการทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลิเมอร์ Polystyrene ละลายใน Toluene ความเข้มข้นที่ 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% นั้นเป็นความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมในการสร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบ เนื่องจากความเข้มข้นเหล่านี้ไม่สามารถกันการรั่วซึมของน้ำได้ และในส่วนของความเข้มข้นที่ 2.5%, 3.0% และ 5.0% นั้นเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่จะใช้สร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบได้ แต่ในการทดลองจะสังเกตเห็นว่า ความเข้มข้นที่ 2.5% ยังมีการรั่วซึมของน้ำอยู่ ถึงแม้ว่าจะเป็นเพียงเล็กน้อยก็ตาม เพื่อความปลอดภัยจึงได้เลือกใช้โพลิเมอร์ Polystyrene ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง ความเข้มข้น 3.0% และ 5.0% ความเข้มข้นทั้งสองสามารถใช้สร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบได้จากผลการทดลอง แต่ที่เลือกความเข้มข้นที่ 3.0% เพราะความเข้มข้นนี้ใช้ปริมาณสารของโพลิเมอร์ Polystyrene น้อยกว่าความเข้มข้นที่ 5.0% ทำให้สามารถประหยัดราคาค่าใช้จ่ายและวัสดุได้มากกว่า

#### 4.2 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการสร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบ ด้วยวิธี Water mask

การใช้วิธีของ Water mask ในการสร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างเป็นแผ่นบนชิปต้นแบบคือ

1. ความเข้มข้นของสารละลายโพลิเมอร์ Polystyrene
2. จำนวนครั้งที่ใช้ในการพิมพ์ของ Water-mask

3. ระยะเวลาเป็นไปได้ของความห่างระหว่างท่อ หลุมกับหลุม และ ท่อกับหลุม สำหรับลวดลายในการออกแบบ ซึ่งในพารามิเตอร์ตัวแรกที่เหมาะสมคือความเข้มข้นของโพลีเมอร์ Polystyrene เท่ากับ 3.0% จะถูกใช้ในการพารามิเตอร์ตัวอื่นที่เหลือ จากการทดลองโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.10 ขั้นตอนการทดลองหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างเป็นแม่แบบบนชิปต้นแบบโดยใช้วิธี Water-mask

1. เริ่มจากการออกแบบลวดลายที่ใช้ในการพิมพ์ โดยลวดลายที่พิมพ์จะมีส่วนประกอบของท่อที่มีขนาดเท่ากันคือ ความกว้าง x ความยาว เท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร x 4.0 มิลลิเมตร จำนวน 6 ท่อ และแต่ละท่อจะมีความห่างแตกต่างกันคือ 0.5, 1.0, 1.5 ... เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 ไปจนถึง 3.0 มิลลิเมตร การออกแบบลวดลายเช่นนี้จะสามารถหาระยะห่างที่เหมาะสมของแต่ละท่อบนแม่แบบบนชิปต้นแบบได้

2. เมื่อได้ลวดลายที่เหมาะสมแล้วนำมาพิมพ์น้ำที่ใช้เป็น Water-mask ในการทดลองได้ กำหนดเงื่อนไขจำนวนครั้งการพิมพ์ของน้ำที่แตกต่างกัน คือ เริ่มตั้งแต่ 1 2 3...6 ครั้ง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นท่อขนาดเล็กของแม่แบบบนชิป หลังจากพิมพ์น้ำตามลวดลายที่ออกแบบไว้แล้ว นำชุดการทดลองไปจุ่มลงใน Polystyrene ที่ละลายใน Toluene ประมาณ 10 วินาทีเพื่อให้แน่ใจว่า polymer นี้จะเข้าไปแทรกซึมบนกระดาษกรองในส่วนพื้นที่ที่เหลืออยู่ หลังจากการพิมพ์น้ำ ขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างชุดทดสอบคือ นำชุดทดสอบออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่า น้ำ และ Solvent ของโพลีเมอร์ Polystyrene จะระเหยออกไปจนหมด เหลือไว้แต่โพลีเมอร์ Polystyrene ในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น

3. วิธีการทดลองชุดทดสอบ ในการทดสอบการประสิทธิภาพของท่อขนาดเล็ก ทำได้โดยการนำชุดทดสอบจุ่มลงในน้ำเพื่อทดสอบการไหลของน้ำผ่านท่อขนาดเล็กที่ออกแบบไว้ โดยน้ำที่ใช้ในการทดสอบจะใส่สารจำพวกเม็ดสีลงไปเพื่อแสดงผลการทดลองที่ชัดเจนยิ่งขึ้น เนื่องจากน้ำนั้นเป็นสารที่ไม่มีสี ในการทดลองแต่ละเงื่อนไข ได้มีการทำซ้ำกันถึง 3 ครั้ง เพื่อความน่าเชื่อถือ และถูกต้องแม่นยำ ผลการทดลองถูกบันทึกภาพและวิดีโอ เนื่องจากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นว่า อัตราการไหลของน้ำในท่อขนาดเล็ก ในแต่ละเงื่อนไขนั้นแตกต่างกัน ลักษณะการไหลของน้ำในชุดทดสอบจะเป็นการไหลโดยใช้หลักการแทรกซึม (diffusion) ของน้ำบนกระดาษกรองไปตามท่อขนาดเล็ก ในทิศทางเส้นตรงจนถึงจุดที่ทำเครื่องหมายไว้สำหรับการบันทึกผลการทดลอง เพื่อความถูกต้องแม่นยำสำหรับการวัดเวลาเพื่อใช้ในการคำนวณหา อัตราการไหลที่ถูกต้องแม่นยำ ข้อมูลทั้งหมดในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบถูกบันทึกไว้โดยใช้กล้องวิดีโอที่มีความละเอียดสูง เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกต

#### 4.3 ผลการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี Water mask

ผลการทดลองที่ได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1. ผลจากการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง เล็บบนชิปต้นแบบประเภทกระดาษ ด้วยวิธีการนี้ จากการเปรียบเทียบพารามิเตอร์คือ จำนวนครั้งที่พิมพ์น้ำลงไปบนกระดาษกรอง จากผลการทดลองจำนวนครั้งที่ใช้พิมพ์น้ำ จะต้องพิมพ์สองครั้งเป็นต้นไปถึงจะสามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของน้ำได้ ซึ่งการพิมพ์เพียงหนึ่งครั้งนั้นจะไม่สามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กได้อาจเป็นเพราะการพิมพ์เพียงหนึ่งครั้งจะมีปริมาณน้ำที่ใช้เป็น Water-mask น้อยเกินไปและระเหยออกไประหว่างกระบวนการผลิต จำนวนครั้งที่พิมพ์ Water-mask ในการสร้างท่อขนาดเล็กยังมีผลต่อขนาดของท่อ โดยจำนวนครั้งที่พิมพ์จะแปรผันตรงกับขนาดของท่อ

2. ผลจากการหาระยะห่างที่เป็นไปได้ของท่อกับท่อขนาดเล็ก จากผลการทดลองการพิมพ์ที่สองครั้งจะสามารถที่จะรักษาระยะห่างระหว่างท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างท่อกับท่อขนาดเล็กเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร การพิมพ์ที่สามและสี่ครั้งจะสามารถรักษาระยะห่างระหว่างท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างท่อกับท่อขนาดเล็กเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร การพิมพ์ที่ห้าครั้งสามารถรักษาระยะห่างได้ดีที่สุดคือ 1.5 มิลลิเมตร และ การพิมพ์ที่หกครั้งสามารถรักษาระยะห่างได้ดีที่สุดคือ 2.0 มิลลิเมตร

จากการทดลองยังพบข้อมูลบางอย่างนั้นคืออัตราการไหลของน้ำที่ใช้ทดลองในแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำนั้นที่ชุดการทดลองที่พิมพ์ Water-mask จำนวนสองครั้งจะมีอัตราการไหลของน้ำที่ค่อนข้างต่ำหรือไหลได้ยาก

เมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ โดยเหตุผลนี้จะทำให้เกิดปัญหาในการสร้างเส้นบนชิปต้นแบบกับการใช้งานจริง ผลการทดลองที่ได้จะได้ข้อสรุปคือ วิธีการ Water mask นี้สามารถสร้างเป็น เส้นบนชิปประเภทกระดาษได้ในหลายเงื่อนไข

ภาพที่ 4.11 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระยะห่างที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปภาพจะประกอบไปด้วยชุดทดลองที่ผ่านการพิมพ์ Water-mask มาแล้วหนึ่งครั้ง ชุดทดลองจะถูกจัดยึดติดกับตัวดูดซับ (absorbance pads) สีน้ำที่ใช้ในการทดลองจากเงื่อนไขนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ไม่มีท่อหรือลวดลายใดๆเกิดขึ้นบนชุดทดลองเลย แต่เมื่อบ่มลงในสีน้ำที่ใช้ในการทดลอง ก็จะเห็นว่าไม่มีน้ำแทรกซึมขึ้นมาบนกระดาษกรองเลย ซึ่งโดยปรกติแล้วจะแทรกซึมขึ้นมาอย่างรวดเร็วถ้าเป็นกระดาษกรองเปล่าๆ แต่ชุดการทดลองนี้ผ่านการบ่มโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร ทำให้ชุดทดลองนี้เปลี่ยนสภาพของกระดาษกรองจากพื้นที่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) กลายเป็นพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

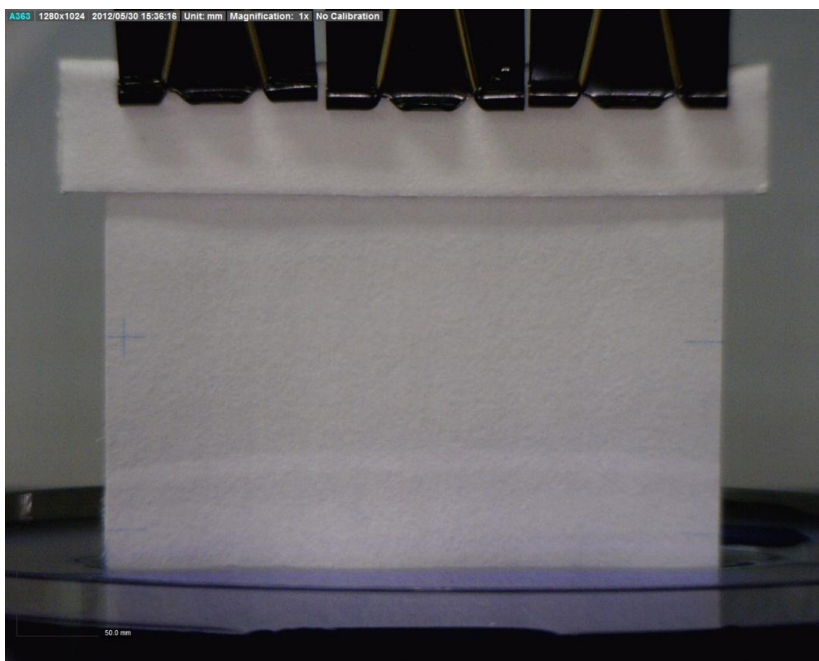
ภาพที่ 4.12 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระยะห่างที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปภาพจะประกอบไปด้วยชุดทดลองที่ผ่านการพิมพ์ Water-mask มาแล้วสองครั้ง ชุดทดลองจะถูกจัดยึดติดกับตัวดูดซับ (absorbance pads) สีน้ำที่ใช้ในการทดลองจากเงื่อนไขนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนก่อนการทดลองว่ามีลวดลายของการพิมพ์ Water-mask ในการทดสอบนั้น เมื่อบ่มชุดทดลองไปในน้ำ น้ำที่ใช้ทดสอบจะค่อยๆแทรกซึมขึ้นมาตามท่อที่ได้ออกแบบไว้ โดยในเงื่อนไขนี้สามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กโดยไม่มีกรร่วซึมของน้ำ และรักษาระยะห่างที่เป็นไปได้ของท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดอยู่ที่ระยะ 0.5 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.13 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระยะห่างที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปภาพจะประกอบไปด้วยชุดทดลองที่ผ่านการพิมพ์ Water-mask มาแล้วสามครั้ง ชุดทดลองจะถูกจัดยึดติดกับตัวดูดซับ (absorbance pads) สีน้ำที่ใช้ในการทดลองจากเงื่อนไขนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนก่อนการทดลองว่ามีลวดลายของการพิมพ์ Water-mask ในการทดสอบนั้น เมื่อบ่มชุดทดลองไปในน้ำ น้ำที่ใช้ทดสอบจะค่อยๆแทรกซึมขึ้นมาตามท่อที่ได้ออกแบบไว้ โดยในเงื่อนไขนี้สามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กโดยไม่มีกรร่วซึมของน้ำ และรักษาระยะห่างที่เป็นไปได้ของท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดอยู่ที่ระยะ 1.0 มิลลิเมตร

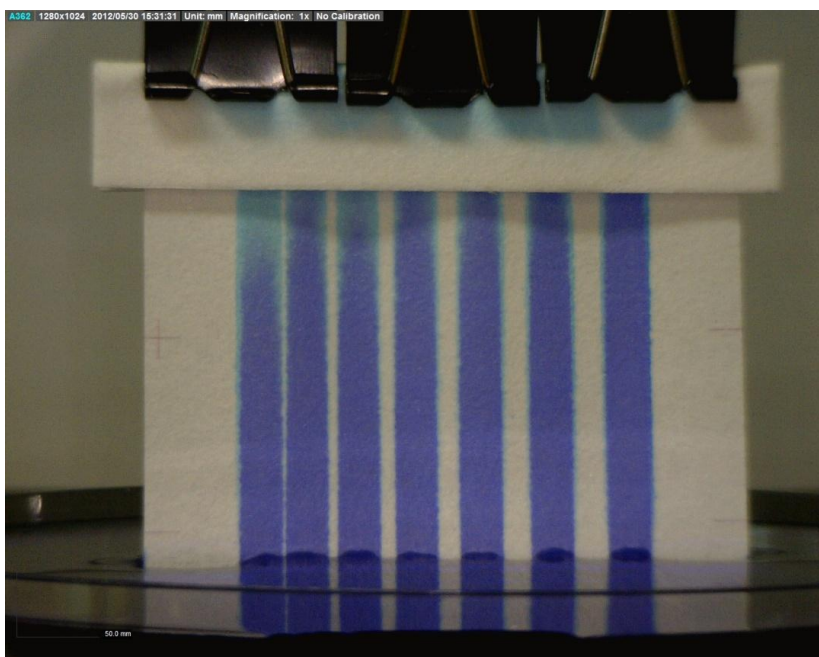
ภาพที่ 4.14 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระยะห่างที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปภาพจะประกอบไปด้วยชุดทดลองที่ผ่านการพิมพ์ Water-mask มาแล้วสี่ครั้ง ชุดทดลองจะถูกจัดยึดติดกับตัวดูดซับ (absorbance pads) สีน้ำที่ใช้ในการทดลอง จากเงื่อนไขนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนก่อนการทดลองว่ามีผลตายของการพิมพ์ Water-mask ในการทดสอบนั้น เมื่อจุ่มชุดทดลองไปในน้ำ น้ำที่ใช้ทดสอบจะค่อยๆแทรกซึมขึ้นมาตามท่อที่ได้ออกแบบไว้ โดยในเงื่อนไขนี้สามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กโดยไม่มีการรั่วซึมของน้ำและรักษาระยะห่างที่เป็นไปได้ของท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดอยู่ที่ระยะ 1.0 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.15 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระยะห่างที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปภาพจะประกอบไปด้วยชุดทดลองที่ผ่านการพิมพ์ Water-mask มาแล้วห้าครั้ง ชุดทดลองจะถูกจัดยึดติดกับตัวดูดซับ (Absorbance pads) สีน้ำที่ใช้ในการทดลอง จากเงื่อนไขนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนก่อนการทดลองว่ามีผลตายของการพิมพ์ Water-mask ในการทดสอบนั้น เมื่อจุ่มชุดทดลองไปในน้ำ น้ำที่ใช้ทดสอบจะค่อยๆแทรกซึมขึ้นมาตามท่อที่ได้ออกแบบไว้ โดยในเงื่อนไขนี้สามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กโดยไม่มีการรั่วซึมของน้ำและรักษาระยะห่างที่เป็นไปได้ของท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดอยู่ที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร

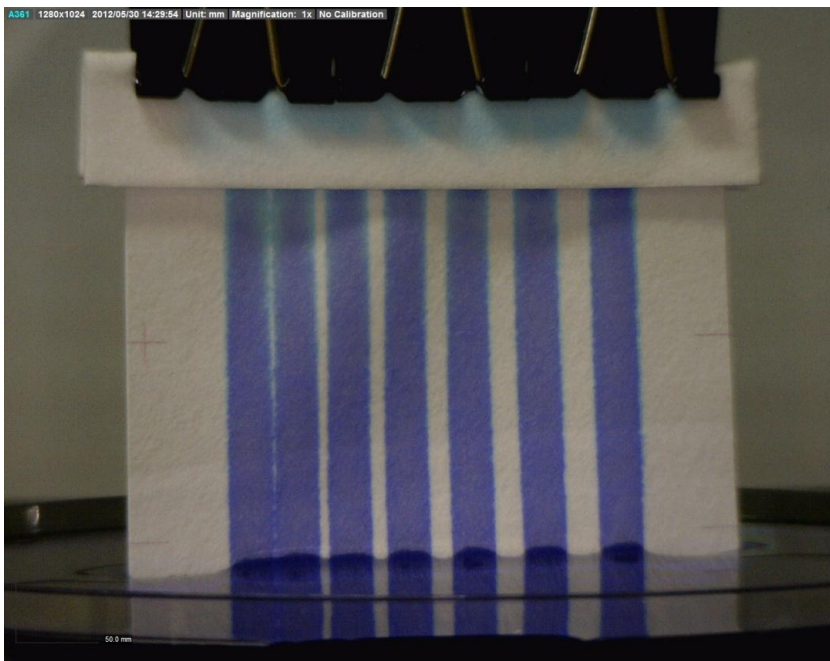
ภาพที่ 4.16 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและระยะห่างที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ ในรูปภาพจะประกอบไปด้วยชุดทดลองที่ผ่านการพิมพ์ Water-mask มาแล้วหกครั้ง ชุดทดลองจะถูกจัดยึดติดกับตัวดูดซับ (absorbance pads) สีน้ำที่ใช้ในการทดลอง จากเงื่อนไขนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนก่อนการทดลองว่ามีผลตายของการพิมพ์ Water-mask ในการทดสอบนั้น เมื่อจุ่มชุดทดลองไปในน้ำ น้ำที่ใช้ทดสอบจะค่อยๆแทรกซึมขึ้นมาตามท่อที่ได้ออกแบบไว้ โดยในเงื่อนไขนี้สามารถสร้างเป็นท่อขนาดเล็กโดยไม่มีการรั่วซึมของน้ำและรักษาระยะห่างที่เป็นไปได้ของท่อกับท่อขนาดเล็กได้ดีที่สุดอยู่ที่ระยะ 2.0 มิลลิเมตร



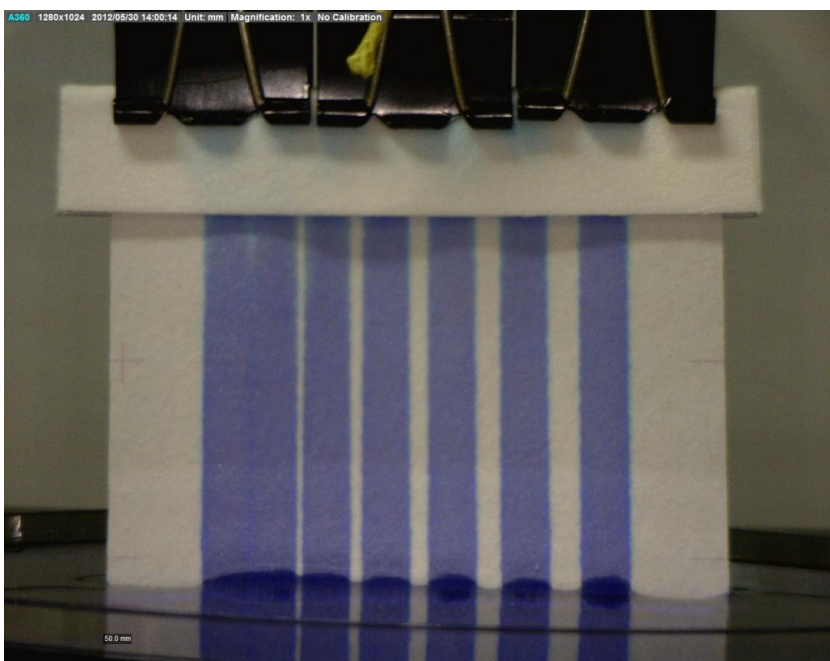
ภาพที่ 4.11 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1



ภาพที่ 4.12 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 2

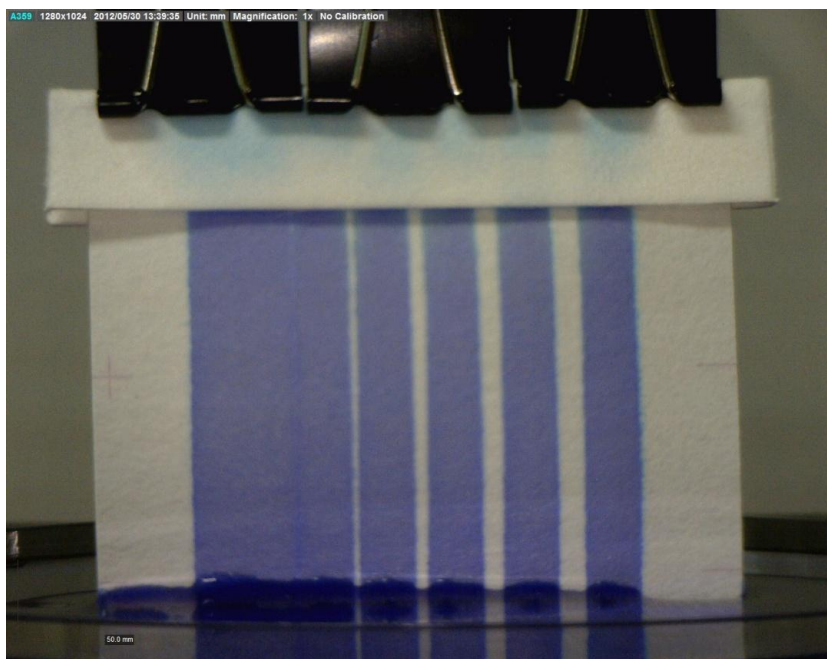


ภาพที่ 4.13 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวน  
ครั้งการพัฒนาเท่ากับ 3

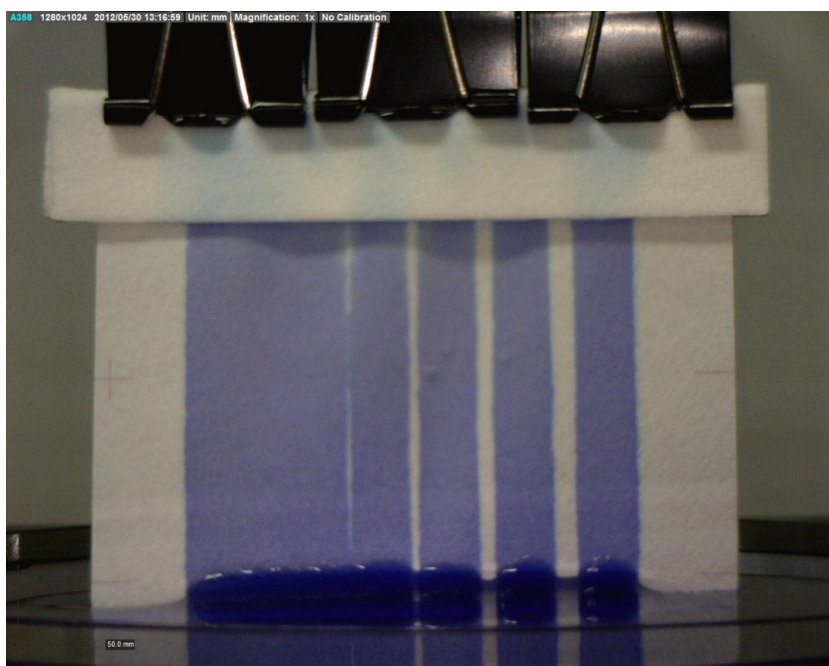


ภาพที่ 4.14 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวน  
ครั้งการพัฒนาเท่ากับ 4





ภาพที่ 4.15 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 5



ภาพที่ 4.16 การทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% จำนวน  
ครั้งการพิมพ์เท่ากับ 6

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองหาค่าระยะห่างที่เป็นไปได้ระหว่างท่อกับท่อขนาดเล็กในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ของวิธี Water mask

Concentration of Polymer Polystyrene in Toluene 3.0%	Printing times	Qualified	Distance between micro-channel and another one (mm)					
			0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	1	X	X	X	X	X	X	X
	2	/	O	O	O	O	O	O
	3	/	X	O	O	O	O	O
	4	/	X	O	O	O	O	O
	5	/	X	X	O	O	O	O
	6	/	X	X	X	O	O	O

ผลการทดลองถูกจดบันทึกไว้ในตารางที่ 4.2 โดยที่ตารางจะบอกรายละเอียดดังต่อไปนี้

Concentration of Polymer Polystyrene คือ ค่าความเข้มข้นที่ใช้ในการสร้างชุดการทดลองด้วยวิธีการ Water-mask ที่ความเข้มข้นโพลิเมอร์ Polystyrene เท่ากับ 3.0% โดยมีมวลต่อปริมาตร

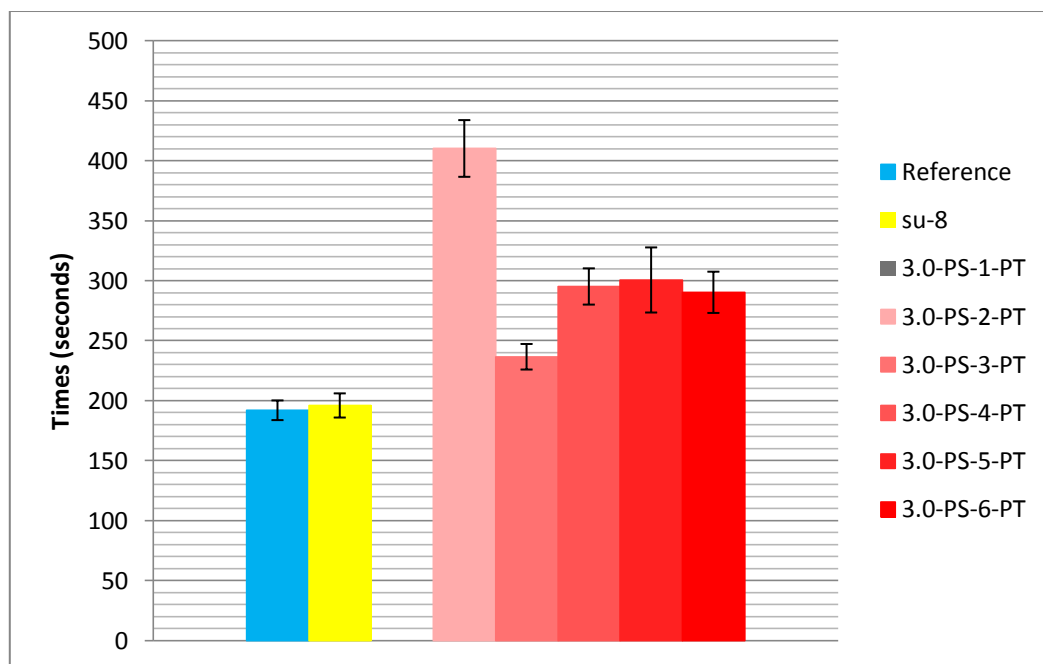
Printing times คือ จำนวนครั้งที่พิมพ์โดยวิธีการ Water-mask เริ่มตั้งแต่ 1 ครั้งไปจนถึง 6 ครั้ง

Qualified คือ ตัวบ่งชี้ว่าจำนวนครั้งที่พิมพ์ที่สามารถใช้สร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบได้

Distance between micro-channel and another one คือ ระยะห่างที่เป็นไปได้น้อยที่สุดที่ท่อกับท่อขนาดเล็กจะสามารถอยู่ใกล้กันได้ โดยในชุดการทดลองจะใช้ระยะห่างระหว่างท่อกับท่อเริ่มที่ 0.5 มิลลิเมตรและเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตร ไปจนถึง 3.0 มิลลิเมตร

ค่าที่อ่านได้จากตารางคือ

1. จำนวนครั้งการพิมพ์ที่มากกว่า 1 ครั้งสามารถใช้สร้างเส้นบนชิปได้
2. ระยะห่างระหว่างท่อกับท่อขนาดเล็กที่เป็นไปได้น้อยที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือ 0.5 มิลลิเมตร ในการทดลอง จากเงื่อนไขการพิมพ์ที่ 2 ครั้ง และเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งการพิมพ์จะทำให้ระยะห่างที่เป็นไปได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.17 แผนภูมิบอกความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของท่อขนาดเล็กในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 4.17 แผนภูมิบอกความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของท่อขนาดเล็กในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ในแผนภูมิจะประกอบไปด้วย

1. แกนแนวตั้งแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการที่น้ำจะไหลผ่านท่อขนาดเล็กไปจนถึงปลายสุดของท่อของชุดทดลองแต่ละชุด

2. แกนแนวนอนแสดงชนิดของข้อมูลในแต่ละเงื่อนไขของชุดการทดสอบ

3. ส่วนที่เป็นคำอธิบายของแกนข้อมูลแต่ละชนิด โดยเริ่มจาก

Reference คือชุดทดลองที่ทำการตัดกระดาษกรองเป็นรูปท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน คือ กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร

Reference SU-8 คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน คือ กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างจากการพิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 ลงบนกระดาษกรองโดยตรง (เป็นวิธีที่ใช้ในการทำเล็บบนชิปต้นแบบในบทที่ 3)

3.0-PS-1-PT คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างแบบ Water-mask ใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 3.0% และจำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 1 ครั้ง

3.0-PS-2-PT คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างแบบ Water-mask ใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 3.0% และจำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 2 ครั้ง

3.0-PS-3-PT คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างแบบ Water-mask ใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 3.0% และจำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 3 ครั้ง

3.0-PS-4-PT คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างแบบ Water-mask ใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 3.0% และจำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 4 ครั้ง

3.0-PS-5-PT คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างแบบ Water-mask ใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 3.0% และจำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 5 ครั้ง

3.0-PS-6-PT คือชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กและมีขนาดเท่าๆกัน กว้าง x ยาว เท่ากับ 3 มิลลิเมตร x 4 เซนติเมตร โดยวิธีการสร้างแบบ Water-mask ใช้โพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 3.0% และจำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 6 ครั้ง

#### 4.4 สรุปผลการทดลองการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยวิธี Water mask

จากภาพที่ 4.17 ได้สามารถสรุปได้สองกรณีคือ

1. เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของ Reference และ Reference SU-8 กับอัตราการไหลของชุดการทดลองที่ใช้วิธีการสร้างท่อขนาดเล็กด้วยวิธี Water-mask วิธี Water-mask จะทำให้ท่อขนาดเล็กมีอัตราการไหลที่ช้าลงเมื่อปล่อยให้ น้ำไหลผ่านท่อ อาจเป็นเหตุผลที่มาจากวิธีการ Water-mask ไปลดพื้นที่ของท่อขนาดเล็กทำให้การไหลหรือการแทรกซึมของน้ำผ่านท่อขนาดเล็กทำได้ช้าลง

2. เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของชุดทดลองที่สร้างท่อขนาดเล็กด้วยวิธี Water-mask จะแสดงให้เห็นว่าที่จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 2 ครั้งจะมีอัตราการไหลต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับจำนวนครั้งการพิมพ์อื่นๆ และเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งการพิมพ์ก็จะมีโอกาสทำให้อัตราการไหลของน้ำเพิ่มสูงขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะการเพิ่มจำนวนครั้งที่พิมพ์ที่มากขึ้นมีผลทำให้เพิ่มขนาดพื้นที่ของท่อขนาดเล็กให้มากขึ้นทำให้น้ำสามารถไหลผ่านท่อขนาดเล็กไปได้โดยง่ายขึ้น

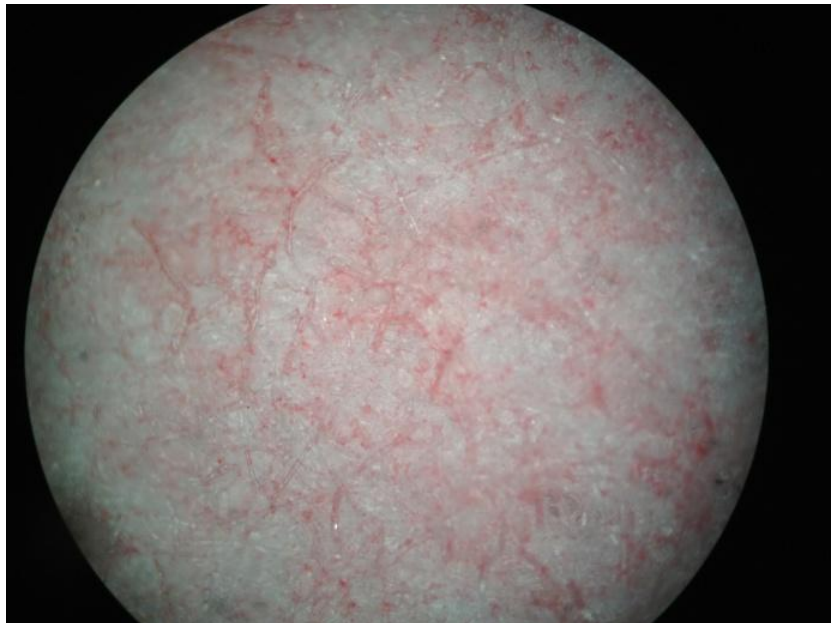
#### 4.5 การวิเคราะห์หาตำแหน่งของโพลีเมอร์ Polystyrene ในกระดาษโดยการใช้วิธี Water-mask



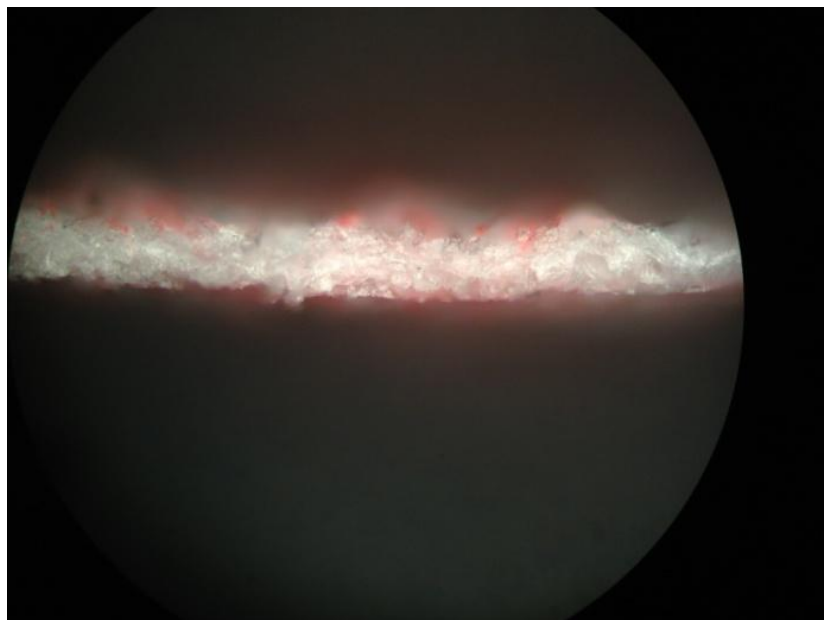
ภาพที่ 4.18 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1



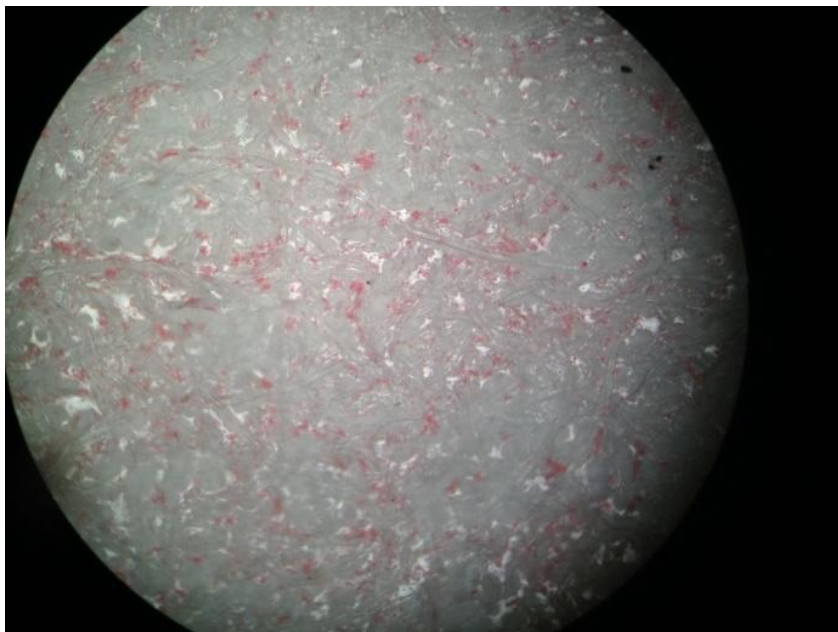
ภาพที่ 4.19 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0%



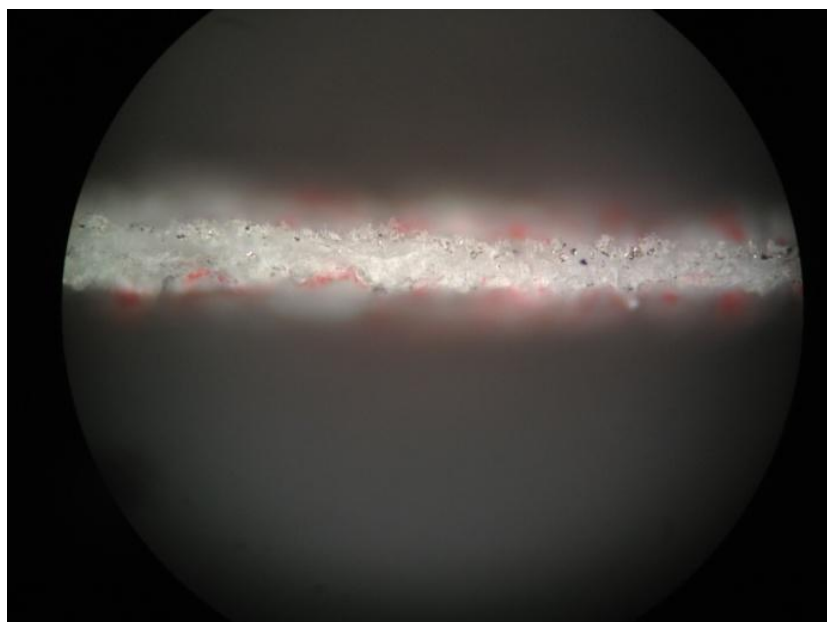
ภาพที่ 4.20 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสี



ภาพที่ 4.21 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 200 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสี



ภาพที่ 4.22 ภาพกำลังขยาย 100 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสีในส่วนที่เป็น Channel ของวิธี Water mask



ภาพที่ 4.23 ภาพตัดขวางกำลังขยาย 200 เท่าของกระดาษกรอง Whatman grade 1 ผ่านการเคลือบ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% และมีการผสมเม็ดสีในส่วนที่เป็น Channel ของวิธี Water mask

ภาพที่ 4.18 จากกล้อง Microscope nikon (รุ่น Eclipse, LV100) ที่กำลังขนาด 100 เท่า ถ่ายภาพกระดาษกรอง Whatman grade 1 บริเวณพื้นผิว จะเห็นเป็นเส้นใยกระดาษสีขาวใช้เป็น ตัวอย่าง

ภาพที่ 4.19 ภาพจากกล้อง Microscope nikon (รุ่น Eclipse, LV100) ที่กำลังขนาด 100 เท่า ถ่ายภาพกระดาษกรอง Whatman grade 1 ที่มีการเคลือบโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร บริเวณพื้นผิวจะเห็นเป็นเส้นใยกระดาษสีขาว เมื่อเปรียบเทียบกับรูปภาพถ่ายกระดาษกรองที่ใช้เป็นตัวอย่างจะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างกันระหว่างบริเวณที่มี โพลีเมอร์ Polystyrene อยู่ และ ไม่มีอยู่บนบริเวณของพื้นผิวกระดาษ

ภาพที่ 4.20 ภาพจากกล้อง Microscope nikon (รุ่น Eclipse, LV100) ที่กำลังขนาด 100 เท่า ถ่ายภาพกระดาษกรอง Whatman grade 1 ที่มีการเคลือบโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร และมีการใส่สีที่มีส่วนประกอบของน้ำมันเป็นตัวผสม เนื่องจากโพลีเมอร์ Polystyrene ละลายอยู่ในสารละลายที่ไม่มีขั้วคือ Toluene ดังนั้นสีที่ใช้ใส่ลงไปจะเป็นสีในกลุ่มที่มี น้ำมันเป็นตัวทำละลาย บริเวณพื้นผิวจะเห็นเป็นเส้นใยกระดาษสีขาวและสีแดงจากการเติมสีลงไป ในสารละลายโพลีเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปภาพถ่ายกระดาษกรองที่ใช้เป็นตัวอย่างจะสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างกันระหว่างบริเวณที่มี โพลีเมอร์ Polystyrene อยู่โดยจะแสดงในรูปของสีแดงออกมาอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ Polystyrene นั้นได้ไปเคลือบอยู่ในการดาษกรอง

ภาพที่ 4.21 ภาพจากกล้อง Microscope nikon (รุ่น Eclipse, LV100) ที่กำลังขนาด 200 เท่า ถ่ายภาพกระดาษกรอง Whatman grade 1 ที่มีการเคลือบโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร และมีการใส่สีที่มีส่วนประกอบของน้ำมันเป็นตัวผสม ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งของโพลีเมอร์ Polystyrene หลังจากทำการเคลือบโพลีเมอร์บนกระดาษ โพลีเมอร์ไม่เพียงแต่จะอยู่ที่ผิวของกระดาษเท่านั้น แต่ยังลงลึกไปถึงภายในกระดาษด้วย สังเกตได้จะมีสีแดงจะกระจายอยู่ทั่วบริเวณ

ภาพที่ 4.22 ภาพจากกล้อง Microscope nikon (รุ่น Eclipse, LV100) ที่กำลังขนาด 100 เท่า ถ่ายภาพกระดาษกรอง Whatman grade 1 ที่มีการเคลือบโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร และมีการใส่สีที่มีส่วนประกอบของน้ำมันเป็นตัวผสม โดยก่อนที่จะมีการเคลือบโพลีเมอร์ ได้มีการจุ่มน้ำมาก่อน วิธีการนี้เป็นการจำลองวิธี Water-mask เพื่อที่ต้องการหาตำแหน่งของโพลีเมอร์ Polystyrene จากรูปจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีโพลีเมอร์ เคลือบอยู่บริเวณพื้นผิวของกระดาษ และความเข้มข้นของสีเมื่อเทียบกับรูปภาพที่ 3 จะมีค่าน้อยกว่าหมายความว่า หลังจากที่ได้นำกระดาษไปจุ่มน้ำ แล้วน้ำมาจุ่ม โพลีเมอร์ กระดาษจะยังมีโพลีเมอร์



ติดอยู่ที่บริเวณพื้นผิวอยู่เล็กน้อย นี่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ขนาดของท่อขนาดเล็กที่สร้างด้วยวิธี Water-mask มีขนาดเล็กกลง

ภาพที่ 4.23 ภาพจากกล้อง Microscope nikon (รุ่น Eclipse, LV100) ที่กำลังขนาด 200 เท่า ถ่ายภาพกระดาษกรอง Whatman grade 1 ที่มีการเคลือบโพลีเมอร์ Polystyrene ที่ความเข้มข้น 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร และมีการใส่สีที่มีส่วนประกอบของน้ำมันเป็นตัวผสม ภาพที่ 6 เป็นภาพตัดขวางของภาพที่ 5 ในภาพจะสังเกตเห็นสีที่ใช้แทนตำแหน่งโพลีเมอร์ Polystyrene ที่บริเวณพื้นผิวทั้งสองด้านเท่านั้น นี่เป็นการช่วยยืนยันว่าในการสร้างท่อขนาดเล็กด้วยวิธีการ Water-mask จะทำให้ลดพื้นที่ของท่อลงทำให้มีผลต่ออัตราการไหล

#### 4.6 การสร้างเส้นบนชิปต้นแบบจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองด้วยวิธี Water-mask

การสร้างเส้นบนชิปต้นแบบด้วยวิธีการ Water-mask จากพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทดลองเริ่มจากการออกแบบเส้นบนชิปต้นแบบ

##### 4.6.1 การออกแบบลวดลายที่ใช้ในการสร้างเป็นเส้นบนชิปต้นแบบ

ภาพที่ 4.24 ลวดลายพื้นที่ที่เป็นสีดำจะเป็นตำแหน่งที่จะพิมพ์น้ำลงไปเป็นแม่แบบ โดยลวดลายจะประกอบไปด้วยท่อหลักที่ใช้ลำเลียงสารละลายให้ขึ้นมาสัมผัสกับสารที่จะใช้ในการทดสอบ โดยการแทรกซึมของของสารละลายไปบนกระดาษกรอง ที่ปลายท่อลำเลียงหลักจะทิวางแยกออกเป็นสองทางเพื่อแยกสารละลายไปทดสอบกับสารที่ใช้ในการทดสอบอีกสองชนิด สารที่ใช้ในการทดสอบสองชนิดคือ สารที่ทดสอบความเข้มข้นของโปรตีน และ สารที่ทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายตัวอย่าง ซึ่งสารที่ใช้ในการทดสอบทั้งสองจะอยู่ที่หลุมวงกลมทั้งสองด้าน

##### 4.6.2 การสร้างเส้นบนชิปต้นแบบโดยวิธี Water-mask

ในการสร้างเส้นบนชิปต้นแบบ จะใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ

1. ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ Polystyrene ใน Toluene ที่ 3.0% โดยมวลต่อปริมาตร
2. จำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 4 ครั้ง
3. ระยะห่างระหว่างลวดลายที่ใช้ในการสร้างเส้นบนชิปต้นแบบจะต้องมีระยะห่างกันอย่างน้อย 1.0 มิลลิเมตร

หลังจากที่พิมพ์ลวดลายของเส้นบนชิปต้นแบบและนำไปจุ่มในโพลิเมอร์ นำเส้นบนชิปต้นแบบทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนเพื่อให้ สารละลายโพลิเมอร์และน้ำระเหยออกไปจนหมด เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วค่อยหยดสารที่ใช้ในการทดสอบลงไป และปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ภาพที่ 4.25 เส้นบนชิปต้นแบบโดยใช้วิธีการของ Water-mask หลังจากที่ผ่านมากระบวนการผลิต และ หยดสารที่ใช้ในการทดสอบแล้ว จากรูปจะประกอบไปด้วยท่อลำเลียงหลัก ทางแยกทั้งสอง และ หลุมที่เป็นบริเวณสำหรับการทดสอบสารตัวอย่าง โดยหลุมทางด้านซ้ายจะบรรจุสารที่ใช้ในการทดสอบโปรตีนบริสุทซ์ (BSA) และ หลุมด้านขวาจะบรรจุสารที่ใช้ในการทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่าง

ภาพที่ 4.26 เส้นบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของสี โดยทางด้านซ้ายเป็นการทดสอบโปรตีนโดยถ้าสารละลายที่นำมาทดสอบมีส่วนผสมของโปรตีน (BAS) อยู่ จะเปลี่ยนสีหลุมทางด้านซ้ายจากสีเหลืองเป็นสีเขียว และ ทางด้านขวาเป็นการทดสอบสภาพความเป็นกรด ถ้าสารที่นำมาทดสอบมีสภาพความเป็นกรด หรือค่า pH ต่ำกว่า 7 จะเกิดการเปลี่ยนสีขึ้นบริเวณหลุมทางด้านขวา จากการทดสอบสารตัวอย่าง ในสารตัวอย่างจะประกอบไปด้วยโปรตีนบริสุทซ์ และ สภาพความเป็นกรด ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเส้นบนชิปทั้งสองหลุม จากหลุมซ้ายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีเขียว และจากหลุมทางด้านขวาจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง

ภาพที่ 4.27 เส้นบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 32 นาที จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของสี โดยทางด้านซ้ายเป็นการทดสอบโปรตีนจากที่ตอนแรกเป็นสีเหลืองเมื่อสารละลายตัวอย่างสัมผัสทั่วทั้งบริเวณวงกลมทางด้านขวาจะเปลี่ยนสีเป็นสีเขียวทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าสารละลายตัวอย่างที่นำมาทดสอบมาความเข้มข้นของโปรตีนบริสุทซ์ (BSA) อยู่ และทางด้านขวาเป็นการทดสอบสภาพความเป็นกรด-ด่าง จากเดิมในตอนแรกจะเป็นสีน้ำเงินแสดงสภาพที่เป็นเบสหรือมี pH มากกว่า 7 เมื่อสารละลายตัวอย่างมาสัมผัสทั่วทั้งบริเวณหลุมทางด้านขวาจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงทั้งหมด แสดงว่าสารละลายตัวอย่างมีสภาพความเป็นกรดอยู่

#### 4.6.3 การเตรียมสารที่ใช้ในการทดสอบสำหรับเส้นบนชิปต้นแบบโดยวิธีการ Water-mask

สารที่ใช้ในการตรวจหา โปรตีนบริสุทซ์ (Bovine Serum Albumin, BSA)

2 ไมโครลิตร ของ Citrate Buffer 250 มิลลิเมตร จะถูกหยดลงบนหลอดทางด้านซ้ายของแล็บบนชิปต้นแบบก่อน แล้ว 2 ไมโครลิตร ของ Tetrabromophenol blue 3.3 มิลลิเมตร ละลายใน 95% ethanol จะถูกหยดตามไปที่บริเวณตำแหน่งเดียวกัน จากนั้นปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อแห้งบริเวณที่หยดสารที่ใช้ในการทดสอบจากสีขาวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

- สารที่ใช้ในการตรวจหา สภาพความเป็นกรด-ด่าง

2 ไมโครลิตร ของ Litmas 0.01g/mL จะถูกหยดลงบนหลุมทางด้านขวา และปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและเมื่อแห้งบริเวณหลุมที่หยดจะเป็นสีน้ำเงินเนื่องจาก Litmas จะมีสีน้ำเงินเมื่ออยู่ในสภาพ PH ที่ประมาณมากกว่า 7

- สารที่ใช้เป็นสารทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BAS) และ pH

Citrate Buffer 125 มิลลิเมตร และ BAS 325 ไมโครโมล ละลายในน้ำ 10 มิลลิตร โดยสารที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH อยู่ที่ประมาณ 2.40

#### 4.6.4 การทดสอบประสิทธิภาพของแล็บบนชิปต้นแบบโดยวิธี Water-mask

การทดสอบประสิทธิภาพของวแล็บบนชิปต้นแบบหลังจากที่ได้มีการเตรียมสารที่ใช้ในการทดสอบแล้วคือ สารที่ใช้ในการทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ และสภาพความเป็นกรด-ด่าง การทดสอบเริ่มจากการนำแล็บบนชิปไปจุ่มในสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและปล่อยให้สารละลายตัวอย่างค่อยๆแทรกซึมผ่านกระดาษกรองขึ้นมาตามท่อละเลียงหลัก แล้วแยกออกไปสัมผัสกับสารละลายที่ใช้ในการทดสอบทั้งสองชนิดในหลุมทั้งสองด้านจากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่บริเวณหลุมทั้งสองด้าน

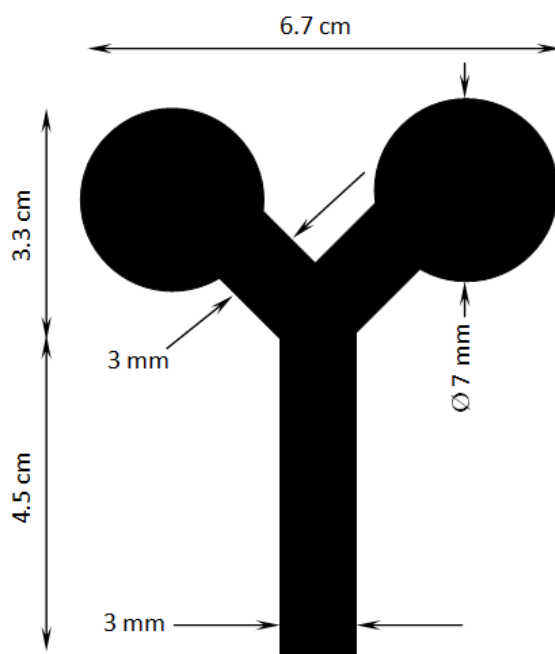
#### 4.6.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแล็บบนชิปโดยวิธีการ Water-mask

1. การใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ Polystyrene จำนวนครั้งที่พิมพ์ และ ระยะความห่างของหลอดลาย สามารถใช้สร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบได้ และสามารถทำได้ในหลายหลายเงื่อนไข

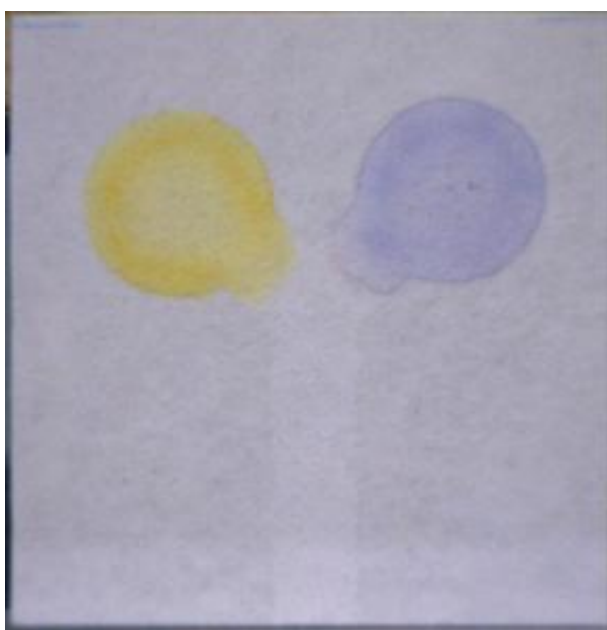
2. การใช้แล็บบนชิปต้นแบบมาทดสอบกับสารละลายต่างๆเช่นการทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BSA) และ สภาพความเป็นกรด-ด่าง สามารถทำได้โดยปราศจากการรั่วซึมของน้ำหรือสารละลายตัวอย่างและสามารถควบคุมทิศทางการไหลของน้ำไปในทิศทางที่ได้ออกแบบไว้

3. การใช้แล็บบนชิปด้วยวิธีการ Water-mask นี้ ยังมีเรื่องของเวลาที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดลอง กับ แล็บบนชิปที่สร้างจากวิธีการใช้โพลีเมอร์ SU-8 พิมพ์ลงบนกระดาษกรองโดยตรง วิธีการ Water-mask จะใช้เวลาประมาณ 32 นาที ส่วนวิธีการใช้โพลีเมอร์

SU-8 ใช้เวลาประมาณ 8 นาที แต่ในการใช้งานจริง การใช้เวลาประมาณ 32 นาที ถือว่าไม่นานเกินไปที่จะอ่านผล



ภาพที่ 4.24 ลวดลายที่ใช้ในการสร้างແຂັບบนชิปต้นแบบ ในรูปจะบอกขนาดของท่อและหลุมที่ตำแหน่งต่างๆ



ภาพที่ 4.25 แຂັບบนชิปต้นแบบโดยใช้วิธีการของ Water-mask



ภาพที่ 4.26 แล็บบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที



ภาพที่ 4.27 แล็บบนชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 32 นาที

## บทที่ 5

### วิธีการปรับปรุงการเคลื่อนตัวของอนุภาคทอง (colloidal gold) บนกระดาษกรอง

ในบทที่ผ่านมาจะเป็นการสร้างแถบบนชิปต้นแบบด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งแถบบนชิปต้นแบบที่สร้างขึ้นมานั้นจะสามารถใช้ตรวจสอบได้เพียงความเข้มข้นของโปรตีน (BSA) และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่านั้นซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อนมากนัก แต่สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการที่จะทำให้แถบบนชิปต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับการตรวจสอบสาร โมเลกุลชีวภาพได้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบสาร โมเลกุลชีวภาพอยู่เช่นพวก Test strip ที่ขายกันอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด โดยส่วนมากจะเป็นชุดทดสอบการตั้งครรภ์ (pregnancy strip) แต่อุปกรณ์ตัวนี้ยังคงใช้วัสดุหลากหลายประเภทและมีราคาแพง ซึ่งชุดทดสอบดังกล่าวจะประกอบด้วยชิ้นส่วนมากมายเช่น กระดาษ Nitrocellulose membrane, Conjugate pad, Absorbent pad, Housing case ฯลฯ ในงานวิจัยนอกจะทำให้แถบบนชิปต้นแบบสามารถใช้ในการตรวจสอบสาร โมเลกุลชีวภาพแล้วยังจะใช้แทน Test strip เพื่อเป็นการลดทุนและกระบวนการผลิต แต่การที่จะทำให้แถบบนชิปสามารถใช้งานแทนที่ Test strip ได้นั้นยังมีปัญหาอยู่ในเรื่องของการเคลื่อนตัวของอนุภาคทอง (colloidal gold) บนกระดาษกรอง การที่จะสามารถใช้แถบบนชิปมาแทน Test strip ได้นั้นจะต้องเริ่มจากการแก้ปัญหานี้ก่อน โดยแนวทางที่ใช้ในการแก้ไขคือ การเพิ่มชั้นรองระหว่างอนุภาคทองและกระดาษกรอง โดยใช้สารละลายที่มีความสามารถในการละลายน้ำ (solubility) สูงเช่น กลูโคส (glucose) และ ฟรุคโตส (fructose)

#### 5.1 การทดลองการปรับปรุงการเคลื่อนตัวของอนุภาคทอง

##### 5.1.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง

การสังเคราะห์อนุภาคทองโดยปรกติทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 40 นาโนเมตรแต่สามารถปรับให้มีขนาดที่ต้องการได้โดยวิธีการต่างๆ [17] ซึ่งสามารถเลือกขนาดได้เป็นช่วงของขนาดตั้งแต่ 1-20 นาโนเมตร หรือ 20-100 นาโนเมตร และแต่ละขนาดของอนุภาคทองก็ให้สีที่แตกต่างกัน เช่น ถ้าเป็นสีแดงอนุภาคทองจะมีขนาดอยู่ที่ 40 นาโนเมตร และจะมีสีเข้มขึ้นเรื่อยๆ เป็นสีม่วงเข้มตามขนาดที่ใหญ่ขึ้น งานวิจัยนี้ใช้วิธีการสังเคราะห์อนุภาคทองโดยเริ่มจากสารตั้งต้นสองตัวคือ  $\text{HAuCl}_4$  และ Trisodium citrate วิธีการเริ่มจากนำ 40 มิลลิลิตร ของ 1.0 มิลลิเมตร  $\text{HAuCl}_4$  มาต้มให้เดือดที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  หลังจากที่ได้เดือดเต็ม 4 มิลลิลิตร ของ 1% Trisodium citrate

ลงไป ใช้เวลา 10 นาที สารละลายจากสีม่วงเข้มจะกลายเป็นสีแดง สุดท้ายนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง รอให้สารละลายเย็นลงเย็นลง การเก็บรักษาน้ำสารละลายไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C [18]

การ Conjugate colloidal gold กับ โปรตีน เนื่องจาก Colloidal gold มีแรงยึดเกาะที่สามารถยึดติดกับกับโปรตีนได้ด้วยแรง Electro-negativity โดย Colloidal gold จะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบ และโปรตีนจะมีคุณสมบัติเป็นประจุบวก [18] สำหรับงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการเตรียม Colloidal gold กับโปรตีน Anti-Beta hCG เริ่มจาก นำ 900 ไมโครลิตร Colloidal gold ผสมกับ 100 ไมโครลิตร Anti-Beta hCG จะได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 1 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อให้ Colloidal gold กับ โปรตีนจับกันหลังจากนั้นเติม 50 ไมโครลิตร ของ 1% PEG ที่ pH 7.5 และ 100 ไมโครลิตร ของ 10% BSA pH 9.0 บ่มไว้ 5 นาที หลังจากนั้นนำไปปั่นตก (centrifugal) ที่ 8,000g หรือ 8,200 rpm 4°C เป็นเวลา 15 นาที จากการปั่นตกจะเป็น Colloidal gold และโปรตีนกอนอยู่บริเวณก้นหลอดทดลอง ให้ดูดสารละลายที่อยู่เหนือตะกอนเหล่านี้ออกแล้วเติม สารละลาย Storage buffer ลงไปแทนในปริมาณเท่ากัน ค่า pH ของสารละลายต่างๆที่เป็นส่วนผสม นั้นจะมีผลต่อขนาดของ Colloidal gold ที่ติดโปรตีน [19]

การเตรียม Storage buffer สำหรับ Colloidal gold ที่ติดกับโปรตีน Anti-Beta hCG จะประกอบไปด้วยสารดังนี้ 1 กรัมของ BSA, 0.05 กรัมของ PEG, 0.1 กรัมของ  $\text{NaN}_3$ , 0.8766 กรัมของ NaCl และ 0.2423 กรัมของ Tris-base ถูกละลายใน 100 มิลลิลิตรของ Distilled water และถูกปรับ pH ด้วย 0.1 โมลของ NaOH และ HCl เพื่อให้สารละลายมีค่า pH เท่ากับ 8.2 [20][21]

### 5.1.2 การเตรียมชุดทดสอบ

ตัดกระดาษกรองให้มีขนาดความกว้าง x ความยาวเท่ากับ 0.7 x 6 เซนติเมตร นำไปเคลือบ สารละลาย Bovine serum Albumin in Phosphate buffer saline (BSA in PBS) ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยมวลต่อปริมาตรแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นหยดสารที่จะใช้เป็นชั้นรองคือ กลูโคส และ ฟรุคโตส ที่ปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยในสารแต่ละตัวจะ ใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มตั้งแต่ 5%, 10%, 25%, 50% และ 85% โดยมวลต่อปริมาตร ในแต่ละชุดการทดลองจะหยดสารที่ใช้เป็นชั้นรองในปริมาณ 7 ไมโครลิตร หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งโดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 30 นาที สุดท้ายหยดอนุภาคทองที่ติดกับโปรตีน Anti-Beta hCG ในปริมาณ 2 ไมโครลิตร ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

### 5.1.3 วิธีการทดลอง

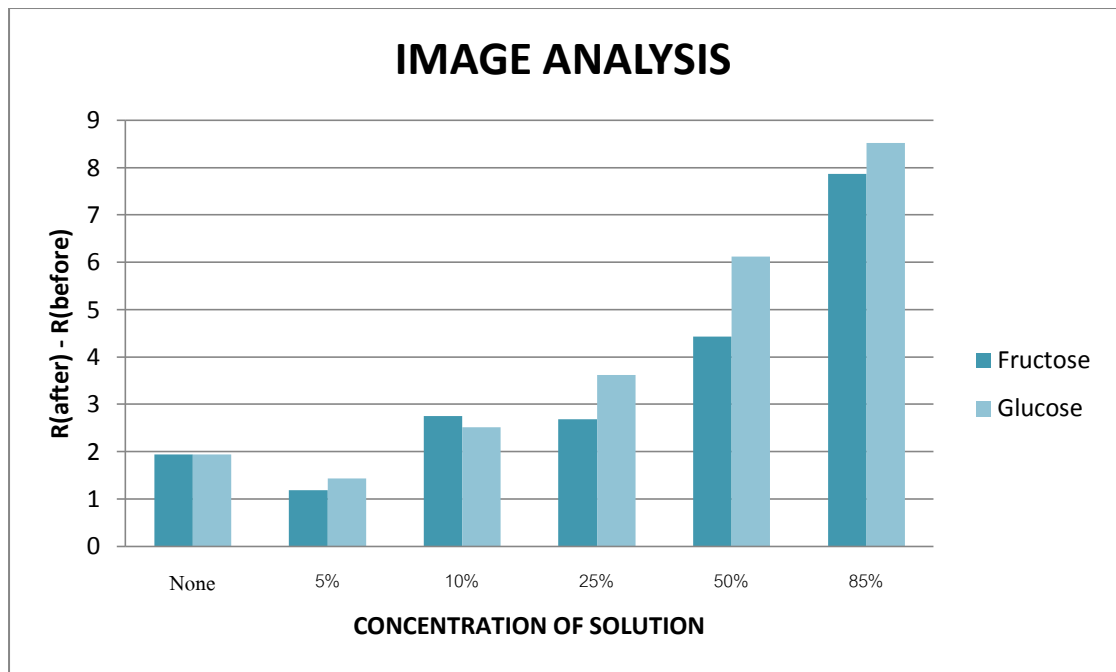
1. ทำการทดลองนำชุดทดสอบทุกชิ้นมาบันทึกภาพด้วยกล้อง Dino-lite Pro เพื่อเก็บข้อมูลการลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคทองและสีที่เกิดขึ้น ในตำแหน่งที่หยดอนุภาค
2. การทดลองจะนำชุดทดลองมาติดกับชุด Absorbent pad เพื่อช่วยให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ดีขึ้นขณะที่ทดลอง
3. นำชุดทดลองแต่ละชุดไปจุ่มน้ำที่ปลายข้างหนึ่งแล้วปล่อยให้ น้ำไหลผ่านชุดทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชุดทดลองออกมาทิ้งไว้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. นำชุดทดลองที่แห้งแล้วไปบันทึกภาพ เพื่อเก็บข้อมูลของอนุภาคทองที่เหลืออยู่จากตำแหน่งเดิม
5. ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop Version CS 6 วัดหาค่าความเข้มของสีแดง R (Red) ของภาพก่อนและหลังการทดลองของแต่ละชุดการทดลอง เนื่องจากค่า R เป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าค่าอื่นๆ สำหรับการทดลองก่อนหลัง [12]

### 5.1.4 ผลการทดลอง

ผลการทดลองถูกเก็บบันทึกไว้เป็นข้อมูลตัวเลขที่บอกถึงความแตกต่างกันระหว่างค่าความเข้มของสีแดง R (Red) ก่อนและหลังการทดลอง ในการทดลองแต่ละชุดการทดลองได้มีการทำซ้ำกันสามครั้งและนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย จากภาพที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ใช้ Glucose ความเข้มข้น 85% เป็นชั้นรองระหว่างอนุภาคทองกับกระดาษกรองจะให้ค่าความแตกต่างของความเข้มของสีแดงในโปรแกรมวัดสีมากที่สุดอยู่ที่  $R(\text{before}) - R(\text{after})$  เท่ากับ .852 และแนวโน้มความแตกต่างของสีก่อนและหลังการทดลองจะแปรผันตามเข้มข้นของชั้นรองของสารทั้งสองตัว

ภาพที่ 5.1 แสดงกราฟแท่งเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลผลการทดลองก่อนและหลังของการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองโดยใช้วิธีการวัดสีของอนุภาคทองที่อยู่บนกระดาษกรอง กราฟจะประกอบไปด้วยค่าที่บอกความแตกต่างของสีก่อนและหลังการทดลอง  $R(\text{after}) - R(\text{Before})$  ปริมาณความเข้มข้นของชั้นรองตั้งแต่ 0%, 5%, 10% 25% 50% และ 85% ของ Glucose และ Fructose จากกราฟสังเกตเห็นว่าความแตกต่างของสีก่อนและหลังการทดลองจะแปรผันตามเข้มข้นของชั้นรองของสารทั้งสองตัว





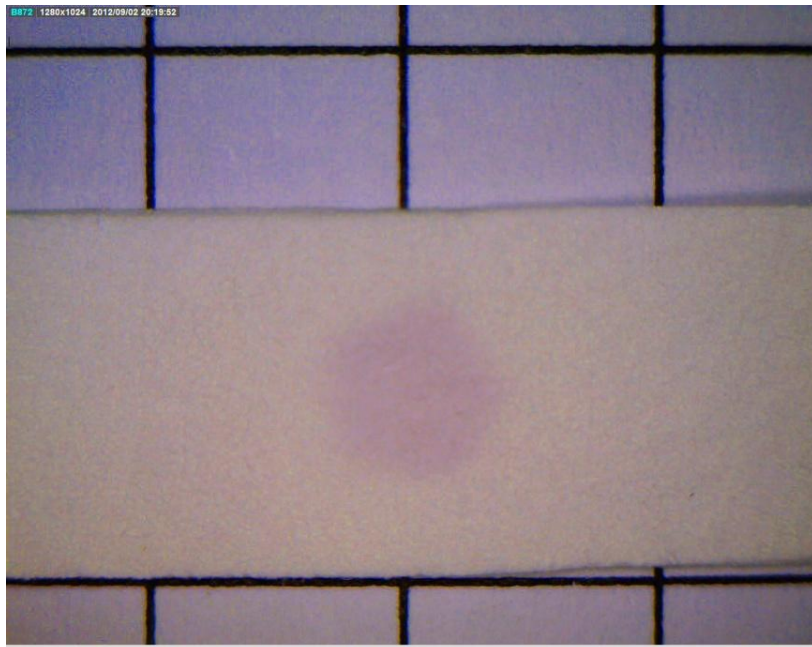
ภาพที่ 5.1 กราฟแท่งของผลการทดลองการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทอง

### 5.1.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้คือการใช้สารที่มีค่าความสามารถในการละลายสูงมาเป็นชั้นรองกับปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะมีแนวโน้มช่วยลดการยึดเกาะของอนุภาคทองกับกระดาษกรองได้ จากการวัดสีของภาพก่อนและหลังการทดลองมาเปรียบเทียบโดยใช้ค่า R ใน RGB (Red Green and Blue) ที่ได้จากภาพจากโปรแกรม Adobe Photoshop CS 6 ของผลการทดลองก่อนและหลัง 85% ของ Glucose สามารถลดยึดติดของอนุภาคทองบนกระดาษกรองได้ดีที่สุดเนื่องจากค่า  $R(\text{after}) - R(\text{before})$  เท่ากับ 8.52 ซึ่งมาค่ามากที่สุด



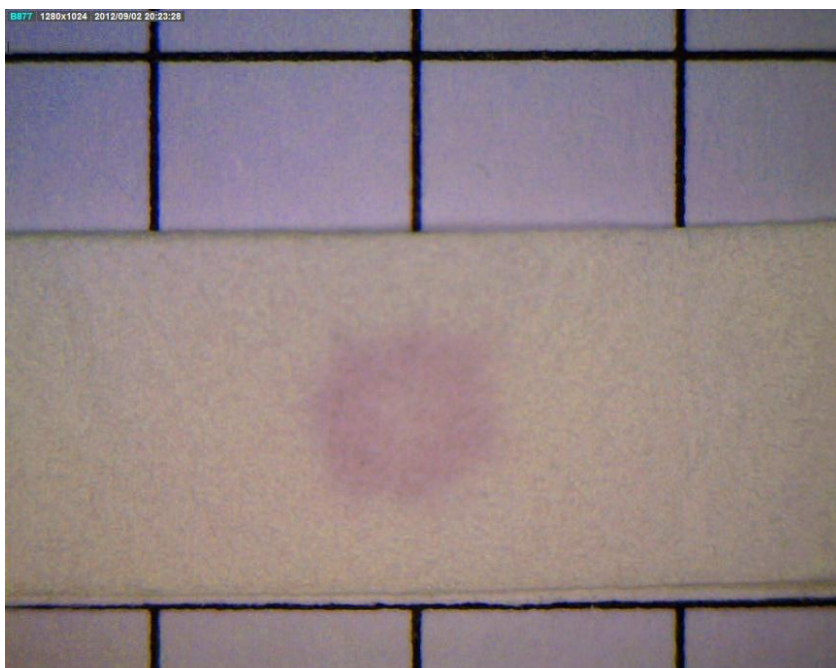
ภาพที่ 5.2 ชุดทดลองกับชั้นรอง Glucose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% ก่อนการทดลอง



ภาพที่ 5.3 ทดลองกับชั้นรอง Glucose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% หลังการทดลอง



ภาพที่ 5.4 ทดลองกับชิ้นรอก Fructose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% ก่อนการทดลอง



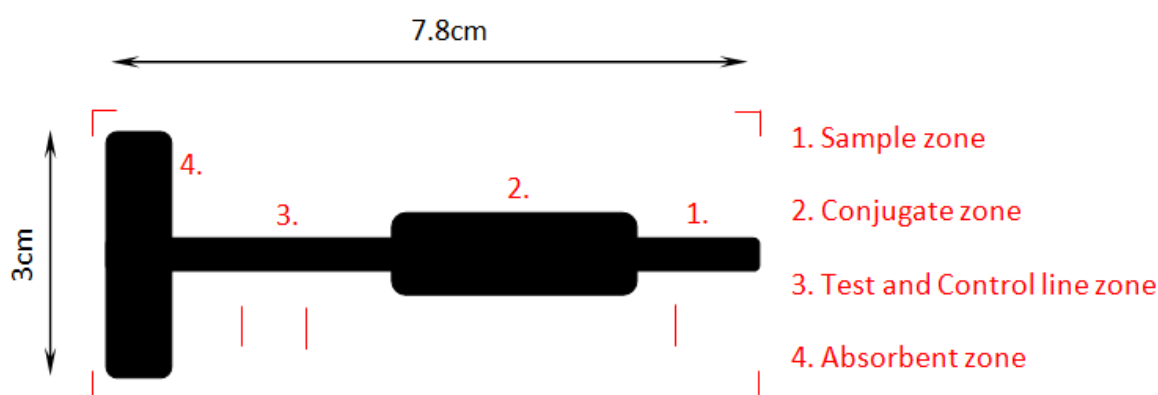
ภาพที่ 5.5 ทดลองกับชิ้นรอก Fructose ที่มีความเข้มข้นที่ 85% หลังการทดลอง

## 5.2 การสร้าง Paper test strip ต้นแบบ

ผลการทดลองที่ได้จากการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทอง ทำให้สามารถแก้ไขข้อจำกัดของการสร้าง Paper test strip ได้

### 5.2.1 การออกแบบ Paper test strip

การสร้าง Paper test strip ใช้วิธีการสร้างเหมือนกับวิธีของ Water-mask ในการสร้างแผ่นชิปต้นแบบ และได้ออกแบบ Paper test strip นี้ให้มีส่วนประกอบคล้ายกับ Test strip ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยจะมีบริเวณที่เป็น Sample zone, Conjugate zone, Test line zone, Control line zone และ Absorbent zone



ภาพที่ 5.6 รูปแบบลวดลายที่ให้ในการสร้าง Paper test strip โดยวิธี Water mask

### 5.2.2 ขั้นตอนการสร้าง Paper test strip

1. หลังจากที่ได้ลวดลายที่ต้องการดังทำการสร้าง Paper test strip โดยใช้วิธีการ Water-mask
2. หยดสารละลายโมเลกุลชีวภาพโปรตีน Anti-Alpha ที่บริเวณ Test line zone และ Anti IGG ที่บริเวณ Control line zone นำไปทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 45°C นาน 30 นาที
3. นำ Paper test strip ไปเคลือบ 0.1% BSA in PBS เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 45°C นาน 30 นาที

4. หยดชั้นรอง Glucose ที่ความเข้มข้น 85% ที่ Conjugate zone เป็นจำนวน 5 หยด หยดละ 5 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 45°C นาน 30 นาที
5. หยดอนุภาคทองที่ติดฉลากโปรตีน Anti-Beta ลงบน Conjugate zone เป็นจำนวน 3 หยด หยดละ 5 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 45°C นาน 30 นาที
6. เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดและกันความชื้นเพื่อรอการทดสอบประสิทธิภาพ

### 5.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพ

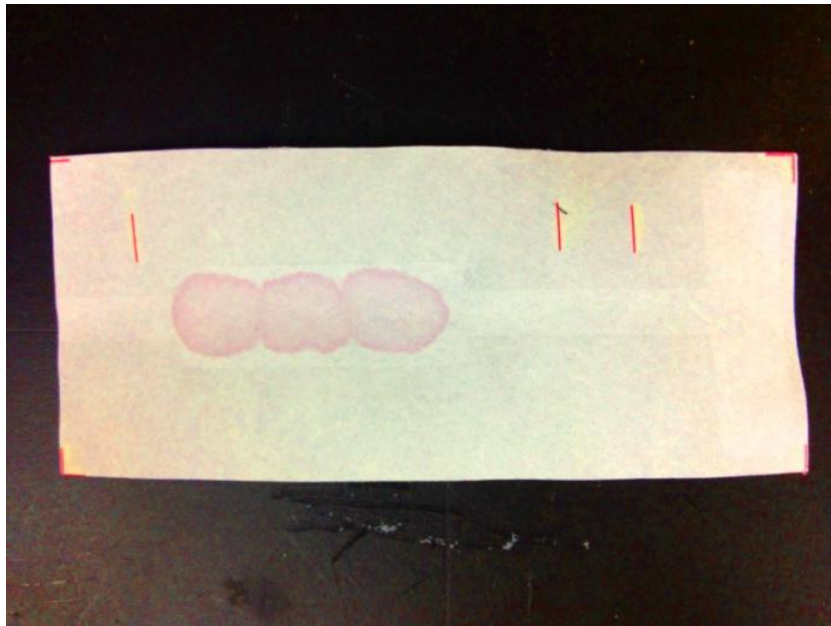
นำ Paper test strip ไปจุ่มในสารละลายตัวอย่างที่มี Antigen hCG ที่ความเข้มข้น 250 IU/mL ปล่อยให้สารละลายไหลไปจะถึง Absorbent zone เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการ แล้วสังเกตผลที่บริเวณ Test line และ Control line zone จะมีสีขึ้นเป็นสีม่วงในลักษณะเป็นแถบสีเหลืองขาวสองเส้น เนื่องจากอนุภาคทองที่ Conjugate zone วิ่งไปเกาะ การที่ Test line zone มีสีขึ้นจะแสดงว่าในสารละลายตัวอย่างมี Antigen hCG ผสมอยู่ ส่วน Control line zone มีสีขึ้นจะแสดงว่าระบบ Paper test strip ยังสามารถใช้งานได้เป็นปกติ

### 5.2.4 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพ

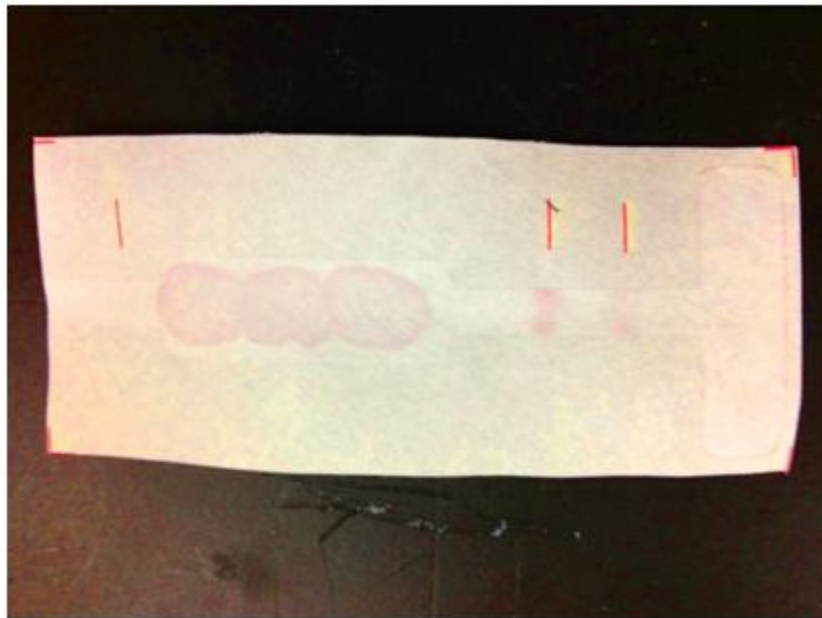
ในงานวิจัยได้สร้าง Paper test strip ขึ้นมาสองแบบคือ แบบที่ไม่มีชั้นรองและมีชั้นรอง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลจากการทดสอบประสิทธิภาพให้ชัดเจนว่า Paper test strip ที่ไม่มีชั้นรองกับมีชั้นรองนั้นจะมีผลแตกต่างกันในลักษณะใดบ้าง ผลที่ได้คือ Paper test strip ที่มีชั้นรองเป็น Glucose 85% สามารถลดการยึดติดของอนุภาคทองได้ดีกว่าไม่มีชั้นรอง ซึ่งจะมีผลต่อการอ่านผลใน Paper test strip ที่ Test และ Control line zone โดยจะทำให้มีสีเข้มขึ้นสามารถอ่านผลได้ง่าย เนื่องจากอนุภาคทองที่ Conjugate zone สามารถเคลื่อนบนกระดาษกรองได้อย่างสะดวก แต่ผลการทดลองนี้ยังได้ให้ข้อสังเกตคือ มีเปรียบเทียบ Paper test strip ที่ไม่มีชั้นรองกับมีชั้นรองแล้ว Paper test strip ที่มีชั้นรองจะอ่านผลจาก Test และ Control line zone ได้ช้ากว่าที่ไม่มีชั้นรอง ซึ่งใช้เวลาประมาณ อย่างน้อย 6 ชั่วโมง เนื่องจากชั้นรอง Glucose ที่มีความเข้มข้นสูงจะเป็นผลึกที่มีความหนาเคลือบผิวของกระดาษกรองอยู่ ทำให้เมื่อทดสอบกับสารละลายตัวอย่างจะต้องใช้เวลานานที่จะทำลายชั้นรองนี้และไหลผ่านไปจนจบกระบวนการทดสอบประสิทธิภาพ

### 5.2.5 ข้อเสนอแนะ

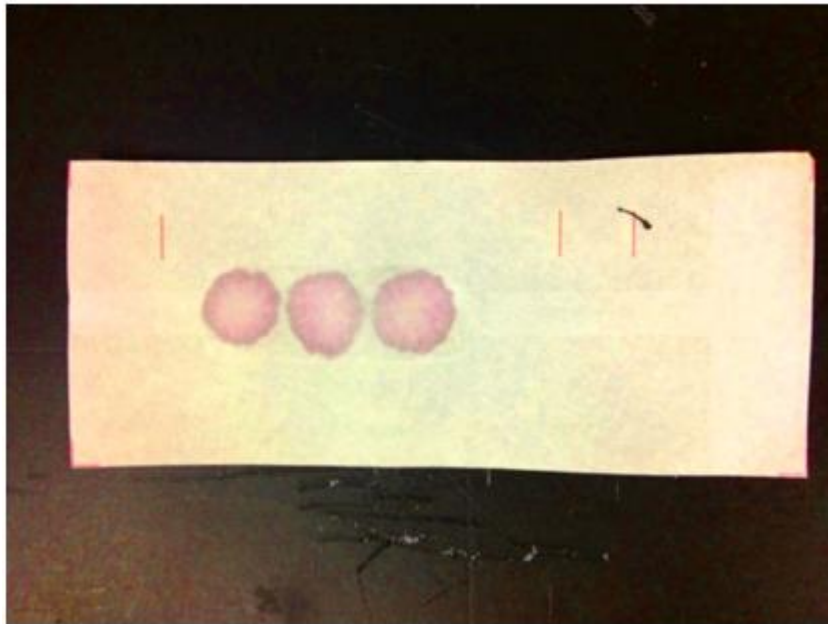
ในการใช้งานจริงของ Paper test strip ต้นแบบจากงานวิจัยนี้อาจยังมีข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ใช้ในการอ่านผลอยู่ ซึ่งอาจต้องใช้เวลารอการอ่านผลนานถึง 6 ชั่วโมง การปรับปรุงอาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของชั้นรองให้เหมาะสม หรืออาจใช้วัสดุอย่างอื่นที่สามารถในการละลายสูงกว่า Glucose มาทดสอบ หรืออาจออกแบบลวดลายของ Paper test strip ต้นแบบให้มีระยะทางสั้นลง



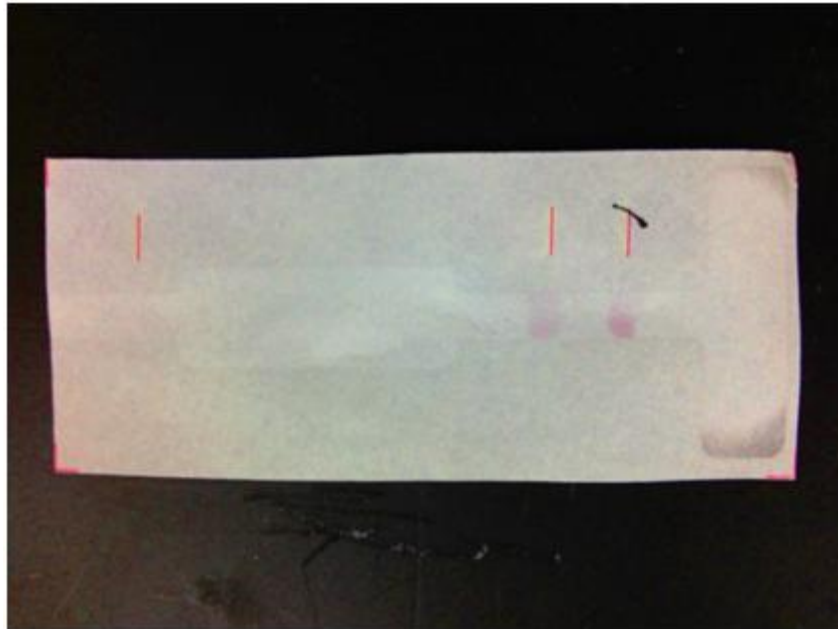
ภาพที่ 5.7 Paper test strip แบบไม่มีชั้นรองก่อนการทดสอบประสิทธิภาพ



ภาพที่ 5.8 Paper test strip แบบไม่มีชั้นรองหลังการทดสอบประสิทธิภาพ



ภาพที่ 5.9 Paper test strip แบบใช้ Glucose 85% เป็นชั้นรองก่อนการทดสอบประสิทธิภาพ



ภาพที่ 5.10 Paper test strip แบบใช้ Glucose 85% เป็นชั้นรองหลังการทดสอบประสิทธิภาพ



## บทที่ 6

### สรุป

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ 1. ต้องการหาความเป็นไปได้ที่จะสร้างแล็บบนชิปต้นแบบขึ้น โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท และ 2. ต้องการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองบนกระดาษกรอง

สำหรับวัตถุประสงค์แรก ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องพิมพ์ EPSON รุ่น T13 ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีราคาถูกสามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด และนำเสนอวิธีการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยใช้เครื่องพิมพ์รุ่นนี้ไว้ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. การใช้เครื่องพิมพ์พิมพ์โพลีเมอร์ SU-8 ที่ละลายอยู่ใน Cyclopentanone ลงไปบนกระดาษกรอง เพื่อเปลี่ยนสภาพของกระดาษบริเวณที่ถูกพิมพ์จาก Hydrophilic เป็น Hydrophobic และสามารถออกแบบลวดลายเพื่อที่จะควบคุมทิศทางการไหลของน้ำได้จากโปรแกรมเขียนแบบโดยทั่วไป จากวิธีการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบนี้ในงานวิจัยมี 3 พารามิเตอร์ที่ได้ทำการศึกษาว่ามีผลต่อการสร้างคือ ความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ จำนวนครั้งที่พิมพ์ซ้ำ และ ความเป็นไปได้ของความกว้างของกำแพง ในการทดลองเบื้องต้นสามารถสร้างแล็บบนชิปได้ในหลายกรณี และในงานวิจัยนี้ได้เสนอพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ ความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์ SU-8 คือ 10% โดยปริมาตรต่อปริมาตร จำนวนครั้งที่พิมพ์คือ 3 และความกว้างของกำแพงสำหรับการออกแบบแล้วต้องไม่ต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร เนื่องจากความเข้มข้นใช้ความเข้มข้นและจำนวนครั้งการพิมพ์น้อยเงื่อนไขอื่นๆ การปรับปรุงการสร้างแล็บบนชิปต้นแบบโดยวิธีการพิมพ์สารละลายโพลีเมอร์ลงบนกระดาษนี้สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดความหนาของกระดาษจากการทดลองเบื้องต้นกระดาษที่ใช้สร้างเป็นแล็บบนชิปคือ Filter paper Whatman grade 1 และ 41 ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 180 และ 215 ไมโครเมตร มาเป็น Grade 93 ที่มีความหนาเท่ากับ 153 ไมโครเมตร จากการทดลองจะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบคือ ความเข้มข้นของสารละลายโพลีเมอร์คือ 10% โดยปริมาตรต่อปริมาตร จำนวนครั้งการพิมพ์เท่ากับ 1 ครั้ง และความหนาของกำแพงที่ใช้สำหรับการออกแบบต้องไม่ต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร

2. การใช้เครื่องพิมพ์สร้างเป็นแม่แบบน้ำ (water-mask) จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่ต้องการจะเปลี่ยนแปลงสารที่จะใช้สร้างเป็นแล็บบนชิปต้นแบบเป็นโพลีเมอร์ PVC จากเดิมที่เคยใช้เป็นโพลีเมอร์ SU-8 เพื่อเป็นการลดต้นทุนของสารเคมี แต่ในการทดลองไม่สามารถพิมพ์สารโพลีเมอร์ PVC ที่ละลายอยู่ใน Cyclohexanone ได้เนื่องจากเป็นสารละลายที่สามารถละลายบางชิ้นส่วนของเครื่องพิมพ์ทำให้เครื่องพิมพ์เสียหาย ในงานวิจัยจึงได้เปลี่ยนมาใช้โพลีเมอร์

Polystyrene ที่ละลายอยู่ใน Toluene แต่ก็ไม่สามารถที่จะพิมพ์ออกมาตามปรกติได้เหมือนกับการทดลองที่ใช้โพลีเมอร์ SU-8 เพราะสารละลาย Toluene ที่อุณหภูมิห้องจะระเหยตัวเร็วอาจทำให้เกิดการอุดตันขึ้นบริเวณหัวพิมพ์ จึงเปลี่ยนวิธีการสร้างແຼັບบนชิปต้นแบบมาเป็นวิธีการ Water-mast วิธีการนี้เป็นการพิมพ์น้ำที่ผสมกับสาร Ethylene glycol ที่อัตราส่วนคือ 50 % โดยปริมาตรต่อปริมาตร ลงไปเพื่อสร้างเป็นลวดลายที่ต้องการก่อนหลังจากนั้นนำไปจุ่มในโพลีเมอร์ที่ต้องการเพื่อสร้างบริเวณที่เป็น Hydrophobic ขึ้น โดยมีน้ำทำหน้าที่เสมือนเป็นหน้ากากสำหรับที่ที่ต้องการจะให้ เป็น Hydrophilic เมื่อทิ้งให้น้ำและสารละลายโพลีเมอร์แห้งก็จะสามารถนำແຼັບบนชิปไปใช้งานได้ ในวิธีการนี้ได้ศึกษา 3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการนี้คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ Polystyrene จำนวนครั้งที่พิมพ์ water-mast ลงในกระดาษ และความเป็นไปได้ของระยะห่างของท่อและหลุมสำหรับการออกแบบลวดลาย จากผลการทดลองสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ Polystyrene เท่ากับ 3% โดยมวลต่อปริมาตร จำนวนครั้งที่พิมพ์เท่ากับ 3 ครั้ง และความเป็นไปได้ของระยะห่างของท่อและหลุมอย่างน้อยเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

การใช้วิธีการทั้งสองนี้สร้างเป็นແຼັບบนชิปต้นแบบในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองเพื่อทดสอบการใช้งานจริง สำหรับงานวิจัยนี้ได้สร้างແຼັບบนชิปต้นแบบเพื่อใช้ในการตรวจสอบสารตัวอย่างว่ามีสารละลายโปรตีนบริสุทธี (BSA) อยู่หรือไม่ และสภาพความเป็นกรด-ด่างในสารละลายนั้น จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของແຼັບบนชิปที่สร้างจากทั้งสองวิธีนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบได้โดยสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีบนແຼັບบนชิปต้นแบบ

จากวิธีการทั้งสองวิธีการนี้ในการทดลองหรือในการสร้างແຼັບบนชิปต้นแบบ มีพารามิเตอร์คือการพิมพ์ซ้ำที่สามารถทำให้เกิดข้อผิดพลาดในเรื่องของตำแหน่งได้ ในงานวิจัยนี้ได้หาค่า Reprint Error เพื่อบอกค่าความคลาดเคลื่อนจากการพิมพ์ในครั้งแรกกับการพิมพ์ซ้ำในครั้งที่สองว่ามีระยะห่างกันเท่าไรและการวัดจะอยู่ในพิสัย X-Y ผลที่ได้จากการทดลองค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน X เท่ากับ 7.709 ไมโครเมตร แนวแกน Y เท่ากับ 11.494 ไมโครเมตร และระยะห่างรวมเท่ากับ 119.707 ไมโครเมตร ค่าที่ได้มาจากค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 45 ตัวอย่าง

สำหรับวัตถุประสงค์ที่สอง ในการที่จะสามารถสร้างແຼັບบนชิปให้สามารถใช้งานกับสารโมเลกุลชีวภาพหรือนำมาใช้แทนที่ test strip เพื่อเป็นการลดต้นทุนจากวัสดุอุปกรณ์ที่หลากหลายได้นั้นต้องมีการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของบนกระดาษกรอง เนื่องจากกระดาษกรองเป็นวัสดุที่ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้งานในลักษณะนี้ ทำให้เกิดการยึดติดกันของอนุภาคของกับเส้นใยของกระดาษกรอง ในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มชั้นรองระหว่างอนุภาคของกับกระดาษกรองโดยใช้สารละลายที่มีความสามารถในการละลายสูง (high solubility) คือ กลูโคส (glucose) และ ฟรุคโตส (fructose) ในการทดลองใช้สารละลายทั้งสองตัวที่มีความเข้มข้น 5%, 10%, 25%, 50 % และ 85%

การวัดสำหรับการทดลองนี้ใช้การวัดสีของภาพก่อนและหลังการทดลองมาเปรียบเทียบ โดยใช้ค่า R ใน RGB (Red Green and Blue) ที่ได้จากภาพจากโปรแกรม Adobe Photoshop CS 6 ผลการทดลอง 85% ของ Glucose สามารถลดขีดตัดของอนุภาคทองบนกระดาษกรองได้ดีที่สุดค่า  $R(\text{after}) - R(\text{before})$  เท่ากับ 8.52 จากผลการทดลองนี้นำไปสร้างเป็น Strip test ประเภทกระดาษ โดยวิธีการ Water-mask เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริง ในการทดสอบประสิทธิภาพของ Strip test ประเภทกระดาษสารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

## รายการอ้างอิง

- [1] Wikipedia. เคมีวิเคราะห์ [Online] 2011. Available from:  
<http://th.wikipedia.org/wiki/เคมีวิเคราะห์> [2011, Sep 1]
- [2] Wikipedia. ELISA [Online] 2011. Available from:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/ELISA> [2011, Sep 1]
- [3] R. A. Goldsby, T. J. Kindt, B. A. Osborne, Kuby Immunology, 4th ed. (W. H. Freeman and Company, 2000), p. 162.
- [4] Image Lab on a chip [Online] 2011. Available from:  
<http://www.chem.agilent.com/enUS/products/instruments/lab-on-a-chip/pages/default.aspx> [2011, Sep 1]
- [5] Image Columbia engineering, Lab on a chip HIV [Online] 2011. Available from:  
<http://engineering.columbia.edu/prof-sia-develops-innovative-lab-chip> [2011, Sep 1]
- [6] Andres W. Martinez, Scott T. Phillips, and George M. Whitesides, “Diagnostics for the Developing World: Microfluidic Paper-Based Analytical Devices,” Anal. Chem. 82(2010):3–10.
- [7] Martinez, A. W., Phillips, S. T., Butte, M. J., and Whitesides, G. M., “Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays,” Anal. Chem., Int. Ed. 46(2007):1318– 1320.
- [8] Derek A. Bruzewicz, Meital Reches, and George M. Whitesides, “Low-Cost Printing of Poly(dimethylsiloxane) Barriers To Define Microchannels in Paper,” Anal. Chem. 80(2008):3387-3392.

- [9] Lu, Y., Shi, W., Jiang, L., Qin, J., and Lin, B., "Rapid prototyping of paper-based microfluidics with Wax for low-cost, portable bioassay," Electrophoresis 30(2009):1497– 1500.
- [10] Bruzewicz, D. A., Reches, M., and Whitesides, G. M., "Paper-Based Microfluidic Devices by Plasma Treatment," Anal. Chem. 80(2008):3387– 3392.
- [11] Li, X., Tian, J., and Shen, W., "Progress in patterned paper sizing for fabrication of paper-based microfluidic sensors," Cellulose 17(2010):649– 659.
- [12] Abe, K., Suzuki, K., and Citterio, D., "Inkjet-Printed Microfluidic Multianalyte Chemical Sensing Paper," Anal. Chem. 80(2008):6928– 6934.
- [13] Image Epson company, Epson T13 [Online] 2011. Available from:  
[http://www.epson.co.th/epson\\_thailand/printers\\_and\\_all\\_in\\_ones/inkjet/product.page?product\\_name=Epson\\_Stylus\\_T13](http://www.epson.co.th/epson_thailand/printers_and_all_in_ones/inkjet/product.page?product_name=Epson_Stylus_T13) [2011, Sep 1]
- [14] Wikipedia. SU-8 photoresist [Online] 2011. Available from:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/SU-8\\_photoresist](http://en.wikipedia.org/wiki/SU-8_photoresist) [2011, Sep 1]
- [15] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. สมบัติของพอลิเมอร์ Property of polymers, ภาควิชาวัสดุศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [2011, Jan 17]
- [16] Image Meglobal ethylene glycol product guide [Online] 2012. Available from:  
<http://www.meglobal.biz/monoethylene-glycol> [2012, Jan 18]
- [17] Tapan, K. Sau, Anjali, Pal, N.R., Jana, Z.L., Wang and Tarasankar, Pal, "Size controlled synthesis of gold nanoparticles using photochemically prepared seed particles," Journal of Nanoparticle Research 3(2001): 257-261.

- [18] Ossi, H., Gheorghe, T., Aurora, M., Traianos, Y. and Maria, T. "Protein Binding to Gold Colloids," Gold Bulletin 3(2007):40.
- [19] Sha, L., Jia-ying, Y., Ke-qiang, L. and Aiguo, W., "A gold nanoparticle-based immunochromatographic assay: The influence of nanoparticulate size," Analyst 137(2012):1174.
- [20] Koutarou, I., Miyuki, C., Kagan, K., Naoki, N., Teruko, Y., Tatsuro, E. and Eiichi, T., "Gold Nanoparticle-Based Redox Signal Enhancement for Sensitive Detection of Human Chorionic Gonadotropin Hormone," Electroanalysis 20(2008):14-21.
- [21] Naoki, N., Ryou, T., Teruko, Y., Tatsuro, E., Lagan, Keman., Yuzuru, T. and Eiichi, T., "Gold nanoparticle-based novel enhancement method for the development of highly sensitive immunochromatographic test strips," Science and Technology of advanced Materials 7(2006):270-275.
- [22] Wang, H., Feng, N., Yang, S., Wang, C., Wang, T. and Su, J., "A rapid immunochromatographic test strip for detecting rabies virus antibody," Journal of Virological Methods 170(2010):80-85.
- [23] Zhang, G.P., Wang, X.N., Yang, J.F., Yang, Y.Y., Xing, G.X., Li, Q.M., Zhao, D., Chai, S.J. and Guo, J.Q., "Development of and immunochromatographic lateral flow test strip for detection of B-adrenergic agonist Clenbuterol residues," Journal of Immunological Methods 312(2006):27-33.
- [24] Cui, S., Zhou, S., Chen, C., Qi, T., Zhang, C. and Oh, J., "A simple and rapid immunochromatographic strip test for detecting antibody to porcine reproductive and respiratory syndrome virus," Journal of Virological Methods 152(2008):38-42.

- [25] Li, Y.S., Zhou, Y., Lu, S.Y., Guo, D.J., Ren, H.L., Meng, X.M., Zhi, B.H., Lin, C., Wang, Z., Li, X.B. and Liu, Z.S., "Development of a one-step strip for rapid screening of fumonisins B1, B2 and B3 in maize," Food Control 24(2012):72-77.
- [26] Guo, Z., Duan, J., Yang, F., Li, M., Hao, T., Wang, S. and Wei, D., "A test strip platform based on DNA-functionalized gold nanoparticles for on-site detection of mercury (II) ions," Talanta 93(2012) 49-54.
- [27] Cui, S., Chen, C. and Tong, G., "A simple and rapid immunochromatographic strip test for monitoring antibodies to H5 subtype Avian Influenza Virus," Journal of Virological Methods 152 (2008):102-105.
- [28] Li, X., Lu, D., Sheng, Z., Chen, K., Guo, X., Jin, M. and Han, H., "A fast and sensitive immunoassay of avian influenza virus based on label-free quantum dot probe and lateral flow test strip," Talanta 100(2012):1-6.
- [29] Anke, B-R., Barrett, T., Garratt, J.C. and Anderson, J., "The detection of rinderpest virus RNA extracted from a rapid chromatographic strip-test by RT-PCR," Journal of Virological Methods 173(2011):394-398.
- [30] Schweers, B.A., Old, J., Boonlayangoor, P.W. and Reich K.A., "Developmental validation of a novel lateral flow strip test for rapid identification of human blood (Rapid Stain Identification<sup>TM</sup>-Blood)," Forensic Science International: Genetics 2(2008):243-247.
- [31] Huang, Z.B., Xu, Y., Li, L.S., Li, Y.P., Zhang, H. and He, Q.H., "Development of an immunochromatographic strip test for the rapid simultaneous detection of deoxynivalenol and zearalenone in wheat and maize," Food Control 28(2012):7-12.

- [32] Cha, R., Wang, D., He, Z. and Ni, Y., "Development of cellulose paper testing strip for quick measurement of glucose using chromogen agent," Carbohydrate Polymers 88(2012): 1414-1419.
- [33] Tripathi, V., Nara, S., Singh, K., Singh, H. and Shrivastav, T.G., "A competitive immunochromatographic strip assay for 17- $\alpha$ -hydroxy progesterone using colloidal gold nanoparticles," Clinica Chimica Acta 413(2012):262-268.
- [34] Zhang, H.C., Liu, C.Y., Liu, G.Y., Chen, X.L., Ye, Y.D., Wang, Y.R. and Chai, C.Y., "A Portable Photoelectric Sensor Based on Colloidal Gold Immunochromatographic Strips for Rapid Determination of Clenbuterol in Ping Urine," Anal Chem 40(2012):852-856.
- [35] Shi, C., Zhao, S., Zhang, K., Hong, G. and Zhu, Z., "Preparation of colloidal gold immunochromatography strip for detection of methamidophos residue," Journal of Environmental of science 20(2008):1392-1397.



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก การทดลอง Test strip จำลองก่อนการนำไปประยุกต์ใช้กับ Paper test strip

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารที่ใช้สำหรับทดสอบสารโอมิเลกุลชีวภาพเริ่มจากกระบวนการสังเคราะห์สารตั้งต้นไปจนถึงการประกอบเป็นชุด Test strip ดังนั้นขั้นตอนต่างๆอาจผิดพลาด หรือเป็นผลทำให้ระบบการใช้งานของ Test strip นั้นไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งก่อนที่จะนำ Test strip มาประยุกต์ใช้กับ Paper test strip จะต้องตรวจสอบระบบของ Test strip ก่อน โดยขั้นตอนจะมีขั้นตอนคือ

1. การตรวจสอบผลการสังเคราะห์อนุภาคทอง (colloidal gold) ในการสังเคราะห์อนุภาคทองจากภาพที่ ก1 ลักษณะสีของอนุภาคทองคือสีแดงเข้มซึ่งจะมีขนาดของอนุภาคทองอยู่ที่ประมาณ 40 นาโนเมตรและเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

2. การตรวจสอบผลการติดแอนติบอดี (Anti-Beta) กับอนุภาคทอง ในภาพที่ ก2 สีของอนุภาคทองหลังจากที่ผสมโปรตีนลงไปเป็นเวลา 15 นาทีแล้วจากสีแดงเข้มจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากโปรตีนลงติดกับอนุภาคทองทำให้ทั้งคู่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนสี

3. การทดสอบโปรตีน (Anti-IGG) สำหรับ Control line zone และระบบ Test strip การทดสอบเริ่มจากการนำ Anti-IGG มาหยดลงบน Test strip ในตำแหน่ง Control line และทดสอบโดยการจุ่มลงไป Gold-labeled Anti-Beta ถ้าระบบสามารถใช้งานได้บริเวณที่มี Anti-IGG อยู่จะมี Gold-labeled Anti-Beta ไปเกาะและสามารถสังเกตเห็นสีแดงจากอนุภาคทองได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบ Test strip ที่ Control line zone สามารถใช้งานได้ดังภาพที่ ก4

4. การทดสอบโปรตีน (Anti-Alpha) สำหรับ Test line zone และระบบ Test strip การทดสอบเริ่มจากการนำ Anti-Alpha มาหยดลงบน Test strip ในตำแหน่ง Test line และทดสอบโดยการจุ่มลงไป Gold-labeled Anti-Beta ร่วมกับโอมิเลกุลชีวภาพ (hCG) ถ้าระบบสามารถใช้งานได้บริเวณที่มี Anti-Alpha อยู่จะมี Gold-labeled Anti-Beta และ hCG ไปเกาะและสามารถสังเกตเห็นสีแดงจากอนุภาคทองได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบ Test strip ที่ Test line zone สามารถใช้งานได้ดังภาพที่ ก3

5. การทดสอบระบบ Test strip ก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับ Paper test strip ในการทดสอบจะเริ่มจากการนำ Anti-Alpha และ Anti-IGG มาหยดลงบน Test strip ที่บริเวณ Test และ Control line zone ตามลำดับโดยมีระยะห่างกันประมาณ 1 เซนติเมตร และจะมี Gold-labeled Anti-Beta ที่บริเวณ Conjugate zone ในการทดสอบระบบ Test strip จะแบ่งการทดสอบเป็นสองชุดคือ การ

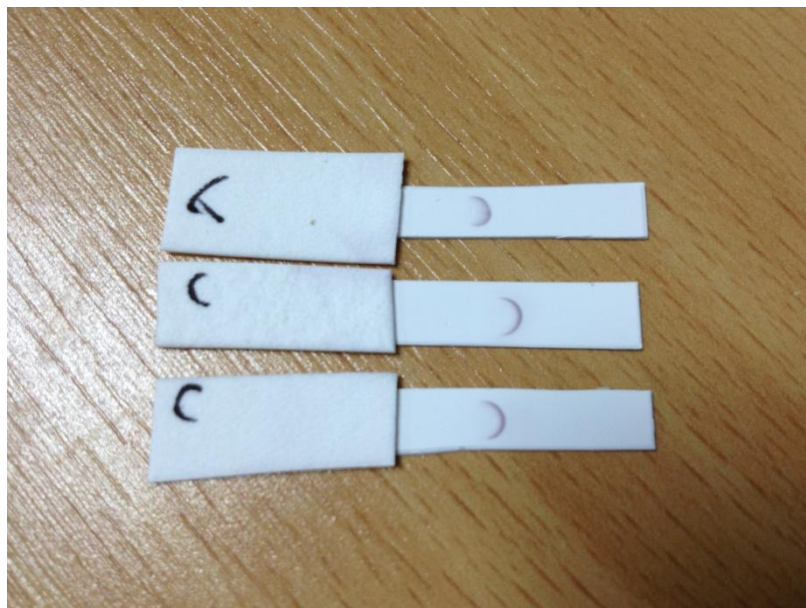
ทดสอบสารตัวอย่างที่ไม่มีสาร โมเลกุลชีวภาพและสารตัวอย่างที่มีสาร โมเลกุลชีวภาพ ผลที่ได้คือ ระบบ Test strip สำหรับการทดสอบสารตัวอย่างที่ไม่มีสาร โมเลกุลชีวภาพจะเกิดแถบสีแดงขึ้นที่ บริเวณ Control line zone เพียงอย่างเดียว และ ระบบ Test strip สำหรับการทดสอบสารตัวอย่างที่มี สาร โมเลกุลชีวภาพจะเกิดแถบสีแดงขึ้นที่บริเวณ Test และ Control line zone สรุปผลจากการ ทดสอบระบบ Test strip สามารถใช้งานได้



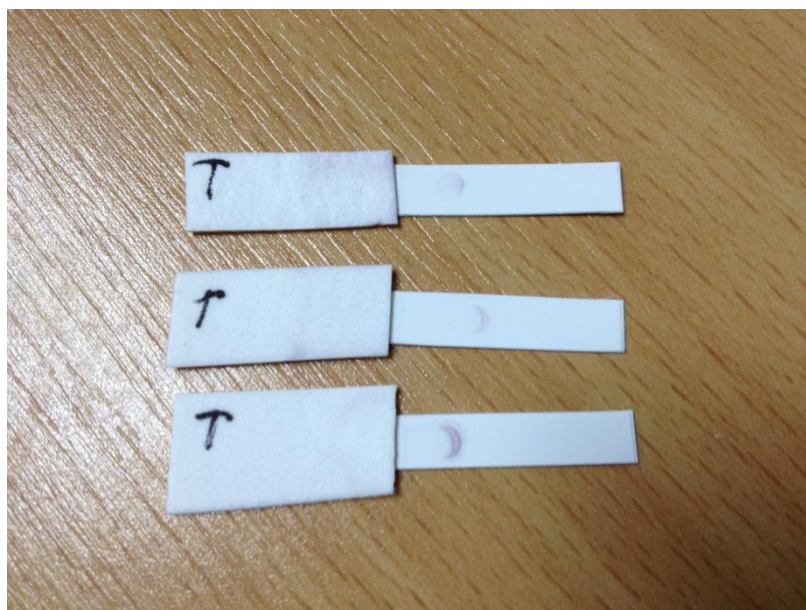
ภาพที่ ก1 Colloidal gold จากการสังเคราะห์



ภาพที่ ก2 Colloidal gold หลังจากที่ได้ติด โปรตีน Anti Bata hCG



ภาพที่ ก3 การทดลอง Control line ใน Test strip ก่อนการประกบคู่ให้กับ Taper test strip



ภาพที่ ก4 การทดลอง Test line ใน Test strip ก่อนการประกบคู่ให้กับ Paper test strip



ภาพที่ ก5 การทดลอง Test strip จำลองก่อนการประยุกต์ใช้กับ Paper test strip โดยสารที่ใช้ทดสอบไม่มี Antigen hCG



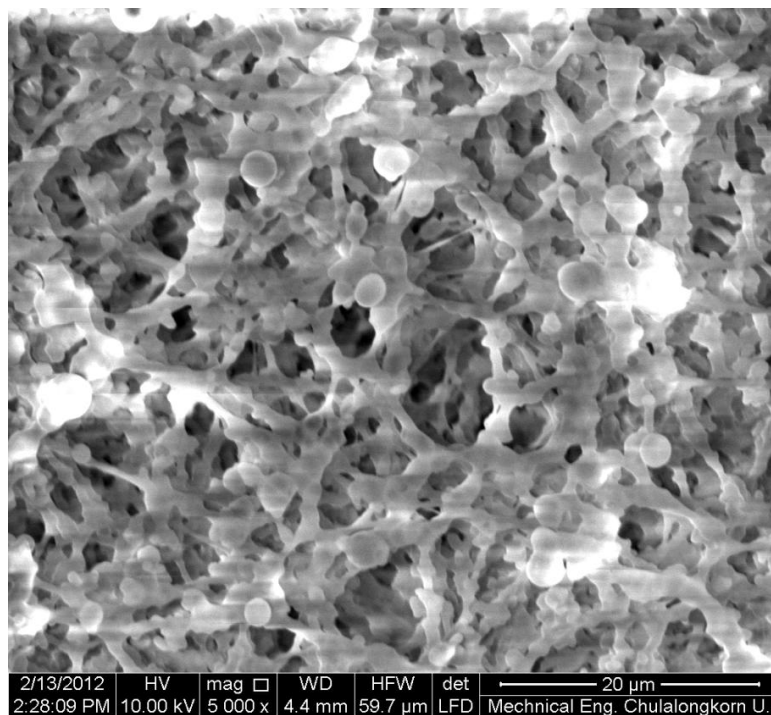
ภาพที่ ก6 การทดลอง Test strip จำลองก่อนการประยุกต์ใช้กับ Paper test strip โดยสารที่ใช้ทดสอบมี Antigen hCG

## ภาคผนวก ข ภาพจาก FEI Scanning Electron Microscope Systems (INSPECT S50)

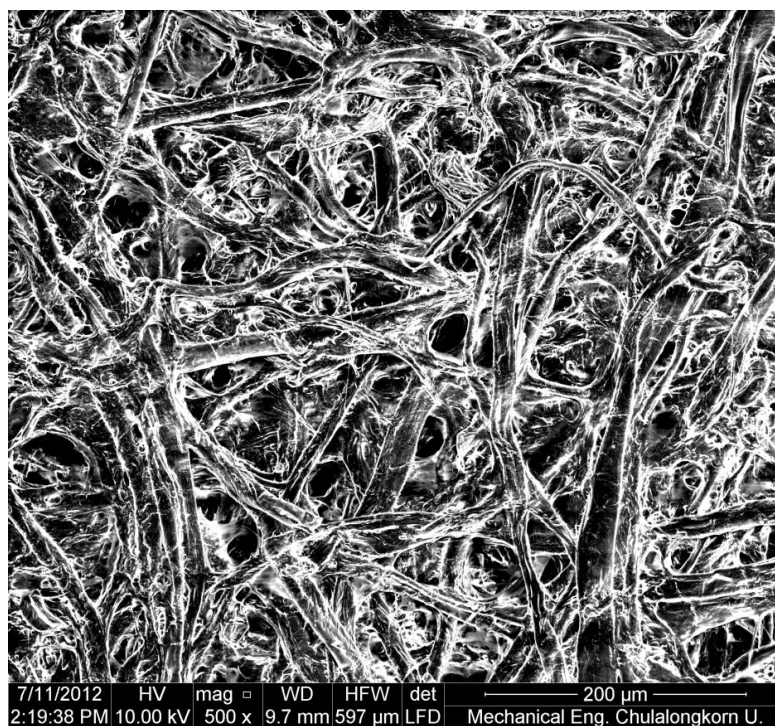
ภาพจาก FEI Scanning Electron Microscope Systems สามารถเปรียบเทียบโครงสร้างของ Nitrocellulose membrane ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการสร้าง Test strip ทั่วไป จากภาพที่ ข1 โครงสร้างเส้นใยจะมีระยะห่างกันมากและขนาดของเส้นใยมีรูปการเรียงตัวที่กระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบทำให้มีขนาดของรูพรุนมาก ด้วยโครงสร้างลักษณะนี้ทำให้อนุภาคทองสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก ซึ่งโครงสร้างของ Nitrocellulose membrane จะแตกต่างกับ Filter paper จากภาพที่ ข2 โดยขนาดของเส้นใยมีขนาดใหญ่และมีลักษณะ โครงสร้างและการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้มีรูพรุนน้อย จากโครงสร้างนี้อาจมีผลทำให้อนุภาคทองไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก

จากภาพที่ ข3 Filter paper ที่ผ่านการเคลือบ 85% Fructose ลักษณะโครงสร้างจะเปลี่ยนไป โดยการเคลือบ Fructose จะไปอุดบริเวณช่องว่างและมีลักษณะ โครงสร้างของ Fructose เป็นผลึกไปเคลือบบริเวณเส้นใย Filter paper จากโครงสร้างนี้อาจมีส่วนทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคทองสามารถผ่าน Filter paper ที่มี Fructose เคลือบอยู่ ได้อย่างสะดวกมากขึ้น

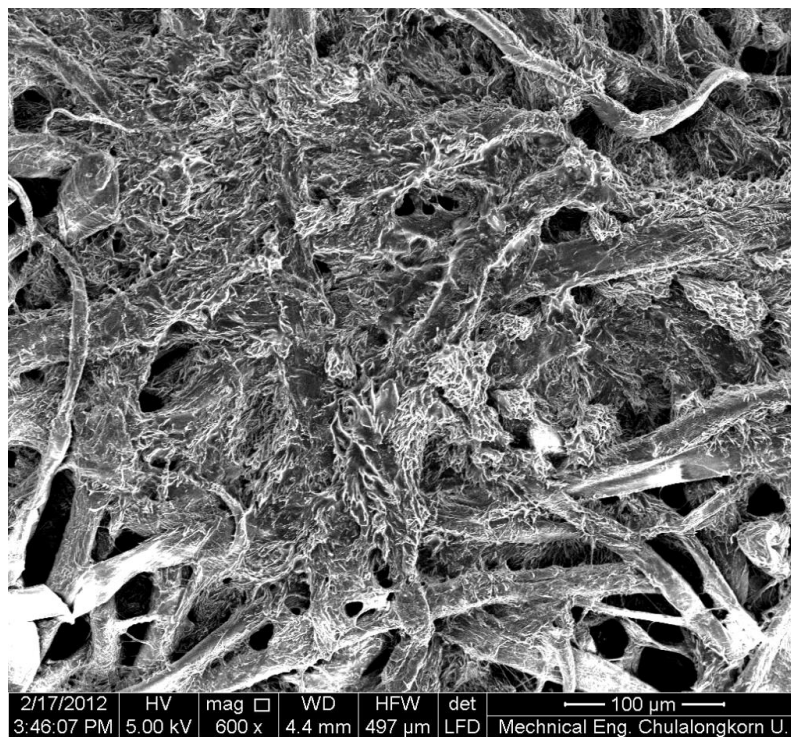
จากภาพที่ ข4 Filter paper ที่ผ่านการเคลือบ 85% Glucose ลักษณะ โครงสร้างจะเปลี่ยนไป โดยการเคลือบ Glucose จะไปอุดบริเวณช่องว่างและมีลักษณะ โครงสร้างของ Glucose เป็นผลึกที่ละเอียดกว่า Fructose ไปเคลือบบริเวณเส้นใย Filter paper จากโครงสร้างนี้อาจมีส่วนทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคทองสามารถผ่าน Filter paper ที่มี Glucose เคลือบอยู่ ได้อย่างสะดวกมากขึ้น



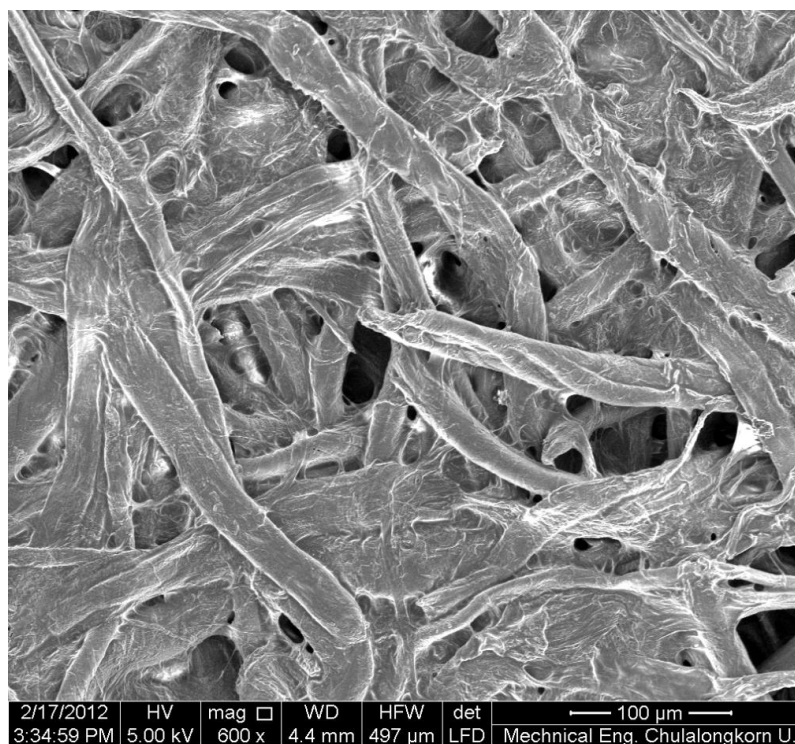
ภาพที่ ๗1 Nitrocellulose membrane



ภาพที่ ๗2 Filter paper Whatman Grade 1



ภาพที่ ข3 Filter paper Whatman Grade 1 เคลือบด้วย 85% Fructose



ภาพที่ ข4 Filter paper Whatman Grade 1 เคลือบด้วย 85% Glucose



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล เกิดเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Punpanttanakul, K., Pimpin, A., and Srituravanich, W., Fabrication of paper-based lab-on-a-chip by printing SU-8 Polymer. Proceeding of international Conference on Mechanical Engineering 21<sup>th</sup>, Oct, 2011, Aamm35, Krabi, 2010
2. เกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล, อลงกรณ์ พิมพ์พิณ, วีระยุทธ ศรีธรรวานิช, การสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษโดยการพิมพ์โพลีเมอร์ SU-8. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, Aamm26. 20 ตุลาคม 2554 ณ โรงแรมอ่าวนางวิลล่า รีสอร์ท จังหวัดกระบี่