

การพัฒนากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษโดยใช้หน้ากากน้ำ
เพื่อสร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษ



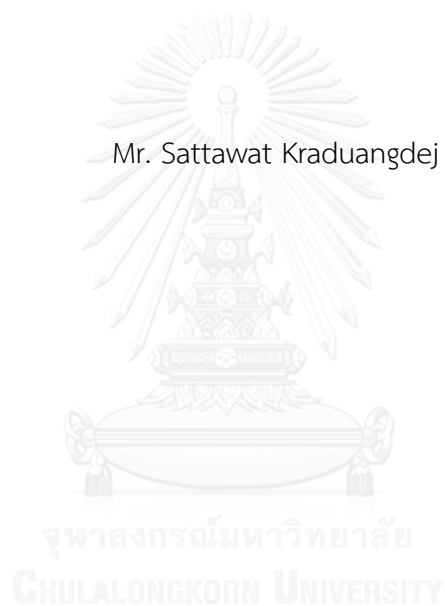
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Paper Patterning Method Using Water Mask
for Paper-Based Device Fabrication

Mr. Sattawat Krduangdej



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษโดยใช้ หน้ากากน้ำเพื่อสร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษ
โดย	นายศตวรรษ กระเดื่องเดช
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระยุทธ ศรีธรรวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุณขิณี มณีรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระยุทธ ศรีธรรวานิช)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. บุตรา บุญเลี้ยง)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5570386621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS:

SATTAWAT KRADUANGDEJ: Development of Paper Patterning Method Using Water Mask for Paper-Based Device Fabrication. ADVISOR: ASST. PROF. WERAYUT SRITURAVANICH, 102 pp.

In the past 50 years, electronic devices have been developed by using silicon as the main material. However, silicon has become more expensive and electronic devices have been the cause of electronic waste issues. In recent years, paper substrate has been introduced as alternative to silicon in device development whereas several patterning methods for paper-based device development such as photolithography, wax printing, plotter, ink-jet printing have been proposed. However, these methods are still limited by some issues such as requirement of expensive equipment, incapability of mass production or choices of materials that can be used for patterning etc. Therefore, this work aims to develop a novel method by utilizing an ink-jet printed water pattern as a protective mask for patterning of non-polar solutions onto paper substrate. Its advantages are low cost, mass productive and capable of using a variety of materials. In the experiment, the factors that affect the patterning process including paper type, printing time, solution concentration were studied. Furthermore, we applied this patterning method to fabricate a paper-based lab-on-a-chip for detecting bovine serum albumin and pH.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	4
2.1 วิธีการสร้างลวดลายบนพลาสติก.....	4
2.2 วิธีการสร้างลวดลายบนกระดาษ	5
2.2.1 การฉายแสง (photolithography) โดยใช้พอลิเมอร์ประเภท SU-8	5
2.2.2 วิธีการฉายแสง UV/O ₃ โดยใช้สาร Octadecyltrichlorosilane (OTS)	8
2.2.3 วิธีการพิมพ์ PDMS โดยใช้เครื่องพล็อตเตอร์ (plotter)	10
2.2.4 วิธีการพิมพ์หมึก Wax โดยใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์	12
2.2.5 การประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท	14
2.2.5.1 วิธีการพิมพ์ alkenyl ketene dimer	14
2.2.5.2 วิธีการ Water mask.....	15

2.3	วิธีการสร้างลวดลายบนกระดาษแบบ 3 มิติ	16
2.4	อุปกรณ์ประเภทกระดาษ	19
2.4.1	เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ (Paper based piezoresistive force sensor)	19
2.4.2	แล็บบนชิป (Lab-on-chip)	21
บทที่ 3	การพัฒนาการสร้างลวดลายด้วยวิธี Water mask.....	25
3.1	วิธีการ Water mask	25
3.2	การเลือกวัสดุอุปกรณ์.....	25
3.2.1	เครื่องพิมพ์อิงเจ็ท	25
3.2.2	กระดาษกรอง (filter paper)	26
3.2.3	น้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ที่ผสมใน เอททิลีนไกลคอล (ethylene glycol).....	27
3.2.4	พลาสติกประเภท Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene	27
3.3	การทดลองเบื้องต้นในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask	28
3.4	ผลการทดลองการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask.....	30
3.5	สรุปผลการทดลอง	37
3.6	การประยุกต์ใช้วิธี Water mask สร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษ	37
3.6.1	การสร้างช่องทางขนาดเล็กด้วยวิธี Water mask.....	37
3.6.2	การสร้างต้นแบบแล็บบนชิปประเภทกระดาษโดยวิธีการ Water mask.....	41
3.7	การพัฒนาวิธีการ Water mask โดยการใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง	45
3.7.1	เงื่อนไขที่เหมาะสมของสาร OTS	45
3.7.2	การประยุกต์ใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงกับวิธี Water mask.....	47
บทที่ 4	การพัฒนาการสร้างลวดลายบนกระดาษแบบ 3 มิติ	55
4.1	ขั้นตอนการทดลอง	55

4.2 ผลการทดลอง	58
4.3 การปรับปรุงการส้างลวดลายแบบ 3 มิติ	60
บทที่ 5 เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ	66
5.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดแรง	66
5.2 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดแรง.....	67
5.3 กระบวนการขึ้นรูปวงจร	70
5.4 การหาค่ามอดูลัสของยังของแผ่นโครงสร้างรับแรง	75
5.5 การหาค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดแรงประเภทกระดาษจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และจากการทดลอง	78
5.6 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดแรง.....	81
5.7 สรุปผลการทดลอง	83
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	85
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลค่าความต้านทานของวงจรเพียโซรีซิสทีฟ	90
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกค่าการโค้งงอและค่ามอดูลัสของยังของคาน	93
ภาคผนวก ค ตารางแสดงค่าความต้านทานของวงจรตัวต้านทานที่มีมูลค่าต่างๆ.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	102

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบวิธีการในการสร้างลวดลาย	23
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลจำเพาะของกระดาษกรองที่เลือกใช้.....	27
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลการทดลองสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1%.....	31
ตารางที่ 3.3	ข้อมูลการทดลองสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3%.....	33
ตารางที่ 3.4	ข้อมูลการทดลองสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5%.....	35
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบผลของค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้ จากแบบจำลองที่สร้างโดยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ โปรแกรม ANSYS และการ ทดลอง.....	80

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แผนภาพของเครื่องฉีดยาขึ้นรูปด้วยบล็อก.....	4
รูปที่ 2.2 ลวดลายที่เกิดขึ้นบนวัสดุประเภทพลาสติก.....	5
รูปที่ 2.3 การสร้างลวดลายด้วยวิธีฉายแสง (photolithography)	6
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบกลูโคสและโปรตีนโดยการเปลี่ยนเข้มข้นของกลูโคสและโปรตีน ซึ่งแสดงด้วยระดับความเข้มของสี	7
รูปที่ 2.5 สารตัวอย่างที่ติดมาพร้อมสิ่งสกปรก.....	7
รูปที่ 2.6 บริเวณกระดาษซึ่งนำไปจุ่มในสารละลาย OTS.....	9
รูปที่ 2.7 กระบวนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง UV/O ₃	9
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการทดลองโดยใช้วิธีการสร้างลวดลายโดยการฉายแสง UV/O ₃	10
รูปที่ 2.9 การสร้างลวดลายโดยใช้เครื่องฟลोटเตอร์ในการพิมพ์ PDMS	11
รูปที่ 2.10 ลักษณะของหัวพิมพ์ PDMS ที่ถูกนำมาดัดแปลงใช้ในเครื่องฟลोटเตอร์.....	11
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการพิมพ์หมึก Wax ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์.....	12
รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของการทดลองของวิธีการพิมพ์ด้วยหมึก Wax.....	13
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่สร้างด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยหมึก Wax.....	13
รูปที่ 2.14 การสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท	14
รูปที่ 2.15 แล็บนชิปต้นแบบโดยใช้วิธีการ Water mask.....	16
รูปที่ 2.16 กระบวนการสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการฉายแสง (photolithography).....	17
รูปที่ 2.17 โครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยทำการใส่สารสีแดง เหลือง เขียว และ ฟ้ำ เมื่อปล่อยให้เวลา ผ่านไป 2 นาที.....	18
รูปที่ 2.18 ภาพตัดขวางของโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยทำการใส่สารสีแดง เหลือง เขียว และ ฟ้ำ เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป 4 นาที.....	19
รูปที่ 2.19 เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ	20

รูปที่ 2.20	กระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟ	21
รูปที่ 2.21	แล็ปชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที	22
รูปที่ 2.22	แล็ปชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 32 นาที	22
รูปที่ 3.1	เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท รุ่น ME-101	26
รูปที่ 3.2	การออกแบบลวดลายบนคอมพิวเตอร์และพิมพ์น้ำลงบนกระดาษ	28
รูปที่ 3.3	การจุ่มกระดาษในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene	29
รูปที่ 3.4	การนำกระดาษขึ้นจากการจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene	29
รูปที่ 3.5	การปล่อยให้แห้งและเกิดเป็นลวดลายที่ได้ออกแบบไว้	30
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1%	32
รูปที่ 3.7	ตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3%	34
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5%	36
รูปที่ 3.9	รูปแบบลวดลายของช่องทางขนาดเล็ก	38
รูปที่ 3.10	ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที	39
รูปที่ 3.11	ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที	39
รูปที่ 3.12	ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที	40
รูปที่ 3.13	ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที	40
รูปที่ 3.14	รูปแบบลวดลายต้นแบบแล็ปชิปประเภทกระดาษ	42
รูปที่ 3.15	ลักษณะลวดลายหลังจากหยดสารทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BSA) ที่หลุมซ้าย และ สารทดสอบความเป็นกรดต่างที่หลุมขวา	44
รูปที่ 3.16	ลักษณะลวดลายหลังจากนำมาทดสอบกับสารตัวอย่าง เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที	44
รูปที่ 3.17	ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS)	46
รูปที่ 3.18	ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene	46

รูปที่ 3.19 รูปแบบลวดลายวงจรด้วยคอมพิวเตอร์.....	47
รูปที่ 3.20 การพิมพ์วงจรด้วยน้ำลงบนกระดาษกรอง	48
รูปที่ 3.21 การจุ่มในสาร Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane	48
รูปที่ 3.22 การนำออกมาหลังจากจุ่มในสาร Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane.....	49
รูปที่ 3.23 ลักษณะลวดลายของวงจรหลังปล่อยให้แห้ง	49
รูปที่ 3.24 วงจรที่พิมพ์น้ำ 1 ครั้ง	50
รูปที่ 3.25 วงจรที่พิมพ์น้ำ 2 ครั้ง	50
รูปที่ 3.26 วงจรที่พิมพ์น้ำ 3 ครั้ง	51
รูปที่ 3.27 วงจรที่พิมพ์น้ำ 4 ครั้ง	51
รูปที่ 3.28 วงจรที่พิมพ์น้ำ 5 ครั้ง	52
รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบการสร้างลวดลายโดยใช้วิธีการ Water mask ซึ่งใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene กับ สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane	53
รูปที่ 4.1 รูปแบบลวดลายด้านหน้าของกระดาษกรอง	56
รูปที่ 4.2 รูปแบบลวดลายด้านหลังของกระดาษกรอง.....	56
รูปที่ 4.3 การนำไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene 5%.....	57
รูปที่ 4.4 การนำออกมาหลังจากจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene 5%	57
รูปที่ 4.5 ลักษณะลวดลายของโครงสร้าง 3 มิติหลังปล่อยให้แห้ง	58
รูปที่ 4.6 รูปแบบลวดลาย 3 มิติที่เกิดขึ้นหลังจากจุ่มชุดทดลองลงไปใต้น้ำหมึก	59
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของกระดาษบริเวณส่วนที่น้ำหมึกซึมผ่านจากด้านหน้ากระดาษ.....	59
รูปที่ 4.8 รูปแบบลวดลายช่องทางการไหลของกระดาษด้านหน้า	60
รูปที่ 4.9 รูปแบบลวดลายช่องทางการไหลของกระดาษบริเวณส่วน Overlap.....	61
รูปที่ 4.10 รูปแบบลวดลายช่องทางการไหลของกระดาษด้านหลัง	61
รูปที่ 4.11 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที	62

รูปที่ 4.12 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 1.30 นาที.....	63
รูปที่ 4.13 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที.....	63
รูปที่ 4.14 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 5.30 นาที.....	64
รูปที่ 4.15 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหลังกระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 5.30 นาที.....	64
รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ	66
รูปที่ 5.2 กระดาษกรอง Whatman.....	68
รูปที่ 5.3 กราฟไฟต์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Graphite).....	68
รูปที่ 5.4 กาวคาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive Carbon Glue).....	69
รูปที่ 5.5 ของเหลวซิลเวอร์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Silver Liquid).....	70
รูปที่ 5.6 รูปแบบของวงจรเพียโซรีซิสทีฟ	71
รูปที่ 5.7 การพิมพ์รูปแบบขอบเขตของคาน	71
รูปที่ 5.8 การพิมพ์วงจรด้วยน้ำลงบนกระดาษกรอง	72
รูปที่ 5.9 ลักษณะของสารละลายคาร์บอนที่ติดบนกระดาษเบอร์ 41.....	73
รูปที่ 5.10 ลักษณะของสารละลายคาร์บอนที่ติดบนกระดาษเบอร์ 1.....	73
รูปที่ 5.11 ลักษณะของสารละลายคาร์บอนที่ติดบนกระดาษเบอร์ 3.....	74
รูปที่ 5.12 รูปแบบของคานปลายยื่น.....	77
รูปที่ 5.13 การหาค่ามอดูลัสของกระดาษด้วยวิธีการถ่วงมวลดินน้ำมัน.....	78
รูปที่ 5.14 การวัดค่าความโค้งงอของกระดาษจากผลการทดลอง	79
รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบค่าการโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันที่ได้จากระเบียบวิธีเชิง วิเคราะห์ และการทดลองที่ค่าแรงต่างๆ	81
รูปที่ 5.16 การใช้สายไฟต่อเข้ากับวงจรพีโซรีซิสทีฟเพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน.....	82
รูปที่ 5.17 การวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อมีแรงมากระทำที่ปลายคาน.....	82
รูปที่ 5.18 กราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับแรงที่กระทำ.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมของโลกในด้านต่างๆ โดยได้มีการใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุหลักในการสร้าง จากการพัฒนาดังกล่าวทำให้มีความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตและนำไปสู่การปฏิวัติทางข้อมูลในช่วงที่ผ่านมา แต่ซิลิกอนนั้นมีราคาแพงขึ้นและยังก่อให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ในช่วง 5 - 6 ปีที่ผ่านมาจึงได้มีการนำกระดาษมาใช้แทนซิลิกอนในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากกระดาษมีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น แล็บบนชิปประเภทกระดาษ เช่น เซอร์ประเภทกระดาษต่างๆ ตลอดจน ชิปสำหรับเครื่องตรวจวัดน้ำตาลในเลือด (glucometer) [1] ได้มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ ในการสร้างลวดลายบนกระดาษเพื่อใช้พัฒนาอุปกรณ์ประเภทกระดาษต่างๆ เช่น การฉายแสง (photolithography) [2] การพิมพ์สกรีน (screen print) [3] การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท [4] เป็นต้น แต่วิธีการเหล่านี้ยังต้องอาศัยเครื่องมือราคาแพง ไม่สามารถใช้สร้างในปริมาณมากและมีข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างลวดลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการพิมพ์หน้ากากน้ำ (water mask) [5] และประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แล็บบนชิปประเภทกระดาษ เช่น เซอร์ประเภทกระดาษ เป็นต้น โดยวิธีดังกล่าวจะทำการพิมพ์น้ำลงบนกระดาษด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทราคาถูก เพื่อใช้น้ำที่พิมพ์นั้นเป็นหน้ากากป้องกันในขั้นตอนการสร้างลวดลาย หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปจุ่มลงในสารละลายชนิดที่ไม่มีขั้ว โดยหน้ากากน้ำซึ่งเป็นสารที่มีขั้วจะป้องกันการแทรกซึมของสารละลายที่ไม่มีขั้วเข้าไปในบริเวณดังกล่าวได้ เมื่อปล่อยให้แห้งก็จะได้ลวดลายบนกระดาษตามที่ต้องการและสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ต่างๆต่อไป ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดี คือ มีต้นทุนต่ำ ผลิตได้ในปริมาณมากและสามารถใช้สารได้หลากหลายประเภทในการสร้างลวดลาย ซึ่งสารดังกล่าวส่วนใหญ่ไม่สามารถพิมพ์ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทได้ ซึ่งด้วยวิธีนี้เองเราสามารถสร้างแล็บบนชิปประเภทกระดาษเพื่อใช้ในการตรวจสอบ protein และ pH ได้ [5]

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังจะได้ศึกษาวิธีการสร้างโครงสร้างแบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น รวมทั้งการศึกษาวัดคุณสมบัติอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูงพิเศษ (Superhydrophobic) เช่น สารละลาย Parafin ใน Toluene และ สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) [6] ใน n-hexane ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวจะสามารถนำมา

ประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษชนิดต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ผ่านมา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาและพัฒนากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการพิมพ์หน้ากาน้ำ (water mask) โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

1.2.1.1 ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างลวดลายกระดาษ

1.2.1.2 ศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูงพิเศษเพื่อนำมาสร้างลวดลายโดยใช้สารอื่นซึ่งมีความหลากหลายได้

1.2.1.3 ศึกษาวิธีการสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ

1.2.2 ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ประเภทกระดาษ เช่น แล็บบนชิป เซ็นเซอร์วัดแรง ด้วยวิธีการ Water mask

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและพัฒนากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการ Water mask โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดของกระดาษ ความเข้มข้นของสาร จำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำ ระยะเวลาที่นำไปจุ่มในสารละลายโพลีเมอร์

1.3.2 ศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูงพิเศษเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ประเภทชนิดต่างๆได้

1.3.3 ศึกษาวิธีการสร้างโครงสร้างแบบ 3 มิติสำหรับใช้ในการสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนขึ้น

1.3.4 สร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษอย่างง่ายโดยใช้วิธีการ Water mask

1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาประวัติความเป็นมา การใช้งาน คุณสมบัติของวัสดุประเภทกระดาษรวมทั้ง ข้อดี ข้อเสีย เมื่อกับเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ

1.4.2 ศึกษากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การฉายแสง (photolithography) การพิมพ์สกรีน (screen print) การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (inkjet printing) การพิมพ์หน้ากากน้ำ (water mask) เป็นต้น

1.4.3 ปรับปรุงการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการ Water mask รวมทั้งการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการนี้ โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดของกระดาษ ความเข้มข้นของสาร จำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำ ระยะเวลาที่นำไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายอยู่ในสารละลาย Toluene

1.4.4 สร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการปรับปรุงการสร้างลวดลายประเภทกระดาษ โดยทำการสร้างเป็นแล็บบนชิปประเภทกระดาษ

1.4.5 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงการสร้างลวดลายบนกระดาษวิธีการ Water mask โดยใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูงพิเศษ คือ สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ใน n-hexane เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุที่หลากหลายขึ้น

1.4.6 ศึกษาวิธีการสร้างโครงสร้างลวดลายแบบ 3 มิติสำหรับใช้ในการสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

1.4.7 สร้างเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ

1.4.8 สรุปผลงานวิจัยและหาข้อเสนอแนะ

1.4.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การพัฒนาการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์จากวัสดุประเภทกระดาษแทนวัสดุหลัก เช่น ซิลิกอน ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากกระดาษนั้นมีราคาถูก ย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ และสามารถหาซื้อได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการปรับปรุงสร้างลวดลายบนกระดาษ รวมถึง พัฒนาสร้างขึ้นมาเป็นอุปกรณ์ประเภทกระดาษ เพื่อเป็นรูปแบบแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไปในห้องปฏิบัติการ รวมถึงในระดับภาคอุตสาหกรรม ทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อประเทศที่กำลังพัฒนาอีกด้วย

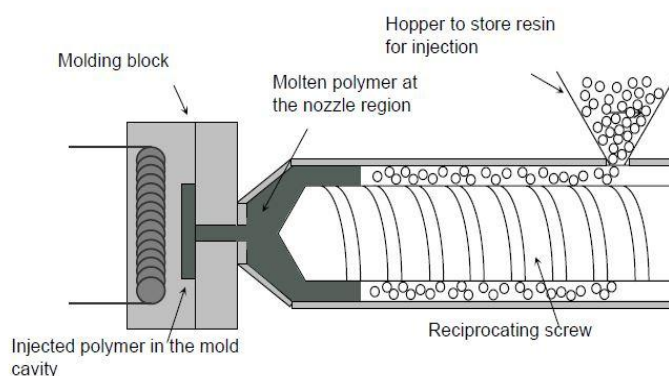
บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

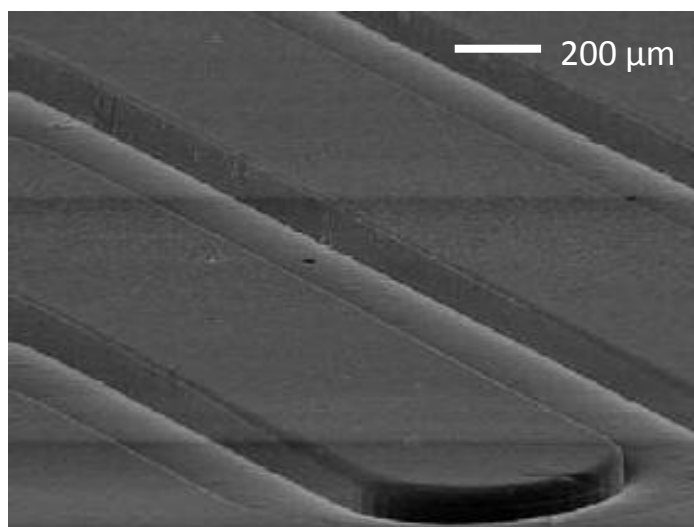
ที่ผ่านมามีการใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุหลักในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากการพัฒนาดังกล่าว ทำให้มีความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตและนำไปสู่การปฏิวัติทางข้อมูลในช่วงที่ผ่านมา แต่ซิลิกอนนั้นมีราคาแพงขึ้นและยังก่อให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ในช่วง 5 - 6 ปีที่ผ่านมาจึงได้มีการนำวัสดุชนิดอื่นมาใช้แทนซิลิกอนในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากกระดาษมีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในขณะนี้กล่าวถึงวิธีการในการสร้างลวดลายบนวัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก กระดาษด้วยวิธีการต่างๆ รวมถึงการนำวิธีเหล่านี้มาพัฒนาเป็นการสร้างลวดลายโครงสร้าง 3 มิติ และการสร้างลวดลายโดยใช้สารละลายที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูงพิเศษ (super hydrophobic) รวมถึงตัวอย่างอุปกรณ์ประเภทกระดาษที่สนใจนำมาพัฒนาในงานวิจัยนี้เป็นลำดับต่อไป

2.1 วิธีการสร้างลวดลายบนพลาสติก

วิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) [7, 8] เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับอุปกรณ์ช่องทางเดินขนาดเล็กและแผ่นบนชิปบนพื้นผิวพลาสติก ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่ามาใช้แทนซิลิกอน โดยการฉีดขึ้นรูปเป็นเทคนิคสำหรับการขึ้นรูปพลาสติก โดยจะมีเรซินซึ่งมีรูปแบบเม็ดและเมื่อมีการให้ความร้อนเรซินจะหลอมเหลวโดยสกรูถูกสูบโดยวิธีทางกลและจะถูกฉีดเข้าไปในโพรงแม่พิมพ์ (Cavity) ดังรูปที่ 2.1 โดยลวดลายบนวัสดุพลาสติกที่ได้จากกระบวนการนี้ ดังรูปที่ 2.2 ข้อเสียของวิธีนี้คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลวดลายต้องมีการเปลี่ยนแม่พิมพ์ (molding block) อีกทั้งต้องใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีราคาแพง



รูปที่ 2.1 แผนภาพของเครื่องฉีดขึ้นรูปด้วยบล็อก [7]



รูปที่ 2.2 ลวดลายที่เกิดขึ้นบนวัสดุประเภทพลาสติก [7]

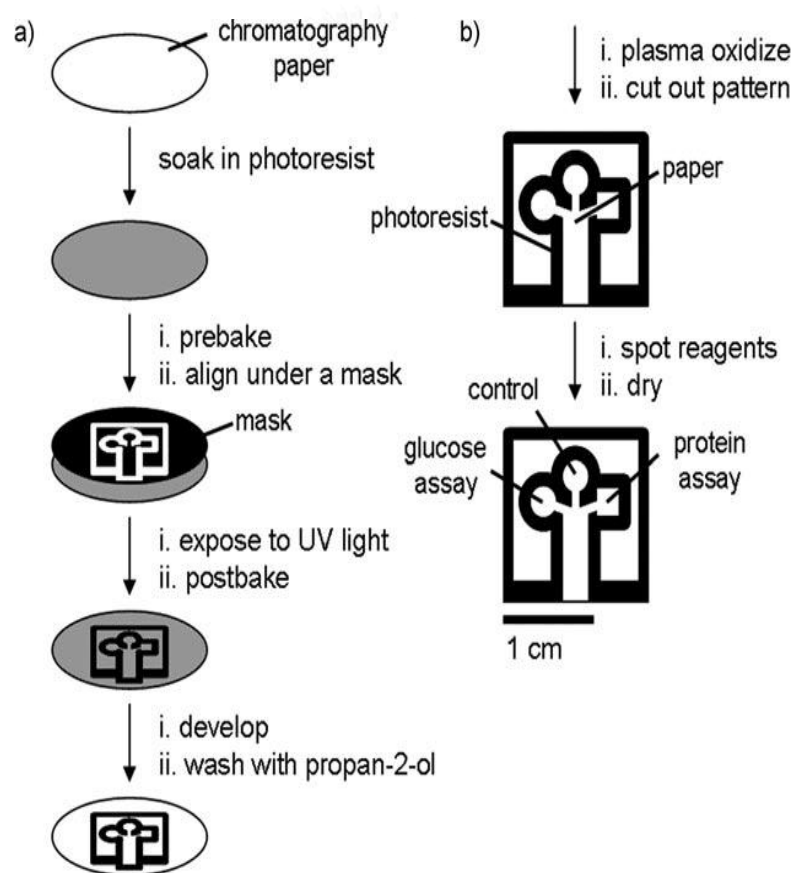
2.2 วิธีการสร้างลวดลายบนกระดาษ

2.2.1 การฉายแสง (photolithography) โดยใช้พอลิเมอร์ประเภท SU-8

วิธีนี้เป็นวิธีการฉายแสงเพื่อสร้างเป็นลวดลายขนาดเล็กบนกระดาษที่นำไปจุ่มในพอลิเมอร์ประเภท SU-8 [2] โดยใช้แสงส่องผ่านตัวแม่แบบหน้ากาก (mask) โดยมีขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 โดยเริ่มจากการ นำกระดาษไปจุ่มในพอลิเมอร์ประเภท SU-8 ซึ่งเป็นสารเคมีที่ไวต่อแสง (photoresist) เป็นเวลา 30 วินาที ต่อจากนั้นจะนำไปอบ (prebake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจะนำตัวแม่แบบหน้ากาก (mask) มาไว้บนกระดาษและทำการฉายด้วยแสง UV โดยบริเวณของพอลิเมอร์ที่โดนแสงจะมีลักษณะของ พอลิเมอร์ SU-8 ที่แข็งขึ้น ส่วนบริเวณที่ไม่โดนแสงพอลิเมอร์ SU-8 จะถูกกำจัดออกหลังจากขั้นตอนการนำไปกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ จากนั้นจึงทำการอบ (post bake) อีกครั้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์ SU-8 หลังจากนั้นจึงนำไปกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการออก (develop) สุดท้ายจึงนำไปล้างด้วยสารละลายโพรพานอล (propan-2-ol) จึงได้เป็นลวดลายบนกระดาษที่ออกแบบไว้ โดยจากกระบวนการนี้พอลิเมอร์จะซึมไปในเนื้อกระดาษซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เกิดเป็นกำแพงที่ควบคุมการไหลของของเหลว จึงได้เป็นช่องทางไหลบนกระดาษขึ้น ซึ่งได้นำประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (biological assays) ดังรูปที่ 2.4 โดยจะใช้ทดสอบระดับความเข้มข้นของโปรตีนและกลูโคสจากสารตัวอย่าง (reagents) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่าความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้เห็นสีที่เปลี่ยนแปลงไปได้ชัดเจนขึ้น โดยโปรตีนจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน และกลูโคสเปลี่ยนจากสารที่ไม่มีสีเป็นสีน้ำเงิน โดยที่ในบางกรณีที่สารตัวอย่าง (reagent) มีสิ่งสกปรกหรือฝุ่นปนมาอยู่ในสารตัวอย่าง สิ่งสกปรกจะ







ไม่สามารถไหลไปตามช่องทางการไหล (channel) จะติดอยู่บริเวณต้นทาง ดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสิ่งสกปรก (dirt) เกสรพืช (plant pollen) และ แกรไฟต์ (graphite powder) ที่ปนอยู่ในสารตัวอย่าง

จะเห็นได้ว่าการสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง (photolithography) เป็นวิธีการที่ซับซ้อน ประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน นอกจากนี้ยังต้องใช้อุปกรณ์ในกระบวนการซึ่งมีราคาแพง และมีข้อจำกัดในส่วนของแม่แบบหน้ากาก (mask) เนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนทุกครั้งเมื่อทำการเปลี่ยนลวดลาย อีกทั้งยังมีความเร็วในการผลิตที่ช้า



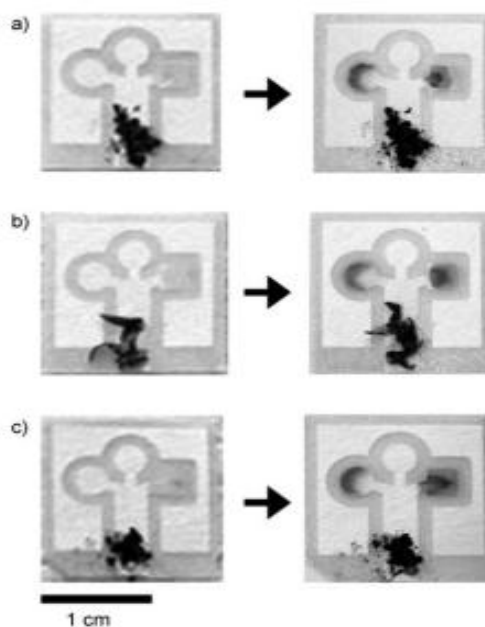
รูปที่ 2.3 การสร้างลวดลายด้วยวิธีฉายแสง (photolithography) [2]

- กระบวนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง (photolithography)
- ตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (biological assays)

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

5 mm

รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบกลูโคสและโปรตีนโดยการเปลี่ยนเข้มข้นของกลูโคสและโปรตีนซึ่งแสดงด้วยระดับความเข้มของสี [2]



รูปที่ 2.5 สารตัวอย่างที่ติดมาพร้อมสิ่งสกปรก [2]

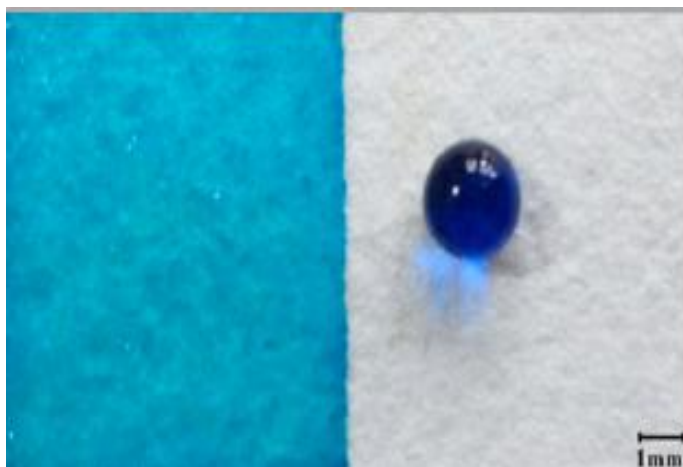
a.) สิ่งปนเปื้อน (dirty) b.) เกสรดอกไม้ (plant pollen) c.) กราไฟต์ (graphite)

2.2.2 วิธีการฉายแสง UV/O₃ โดยใช้สาร Octadecyltrichlorosilane (OTS)

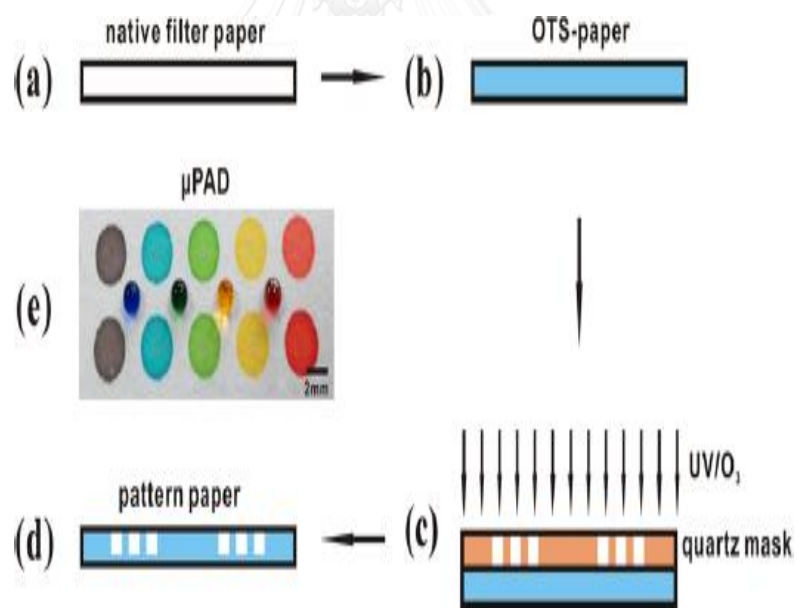
วิธีการนี้จะมีกระบวนการที่คล้ายกับกระบวนการฉายแสง (photolithography) แต่วิธีนี้จะมี ความพิเศษ คือ จะมีการนำกระดาษไปจุ่มในสารละลายที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง (super hydrophobic) [2] โดยมีขั้นตอนการสร้างลวดลาย ดังรูปที่ 2.6 โดยจะเริ่มจากการนำ กระดาษกรองไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) [6, 9] ที่ละลายในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1 โดยปริมาตรต่อปริมาตรเป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อให้สารละลายซึม ลงไปสู่เนื้อกระดาษกรอง (filter paper) ต่อมาจึงนำไปล้างออกด้วย n-hexane และ ethanol หลังจากนั้นจึงใช้ nitrogen stream เป่าให้แห้งสนิท ซึ่งบริเวณกระดาษที่ถูกนำไปจุ่มในสารละลาย OTS จะมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูง คือ จะมีลักษณะเป็นหยดน้ำอยู่บนกระดาษ ดังรูปที่ 2.7 ต่อจากนั้นจะนำแม่แบบ (mask) ที่ได้ออกแบบไว้มาวางบนกระดาษและทำการฉายแสง UV/O₃ ลง บนกระดาษ โดยกระดาษบริเวณส่วนที่โดนแสงจะถูกกำจัด เนื่องจากสาร OTS มีคุณสมบัติที่ไวต่อ แสง จึงเกิดเป็นบริเวณที่ชอบน้ำ (hydrophilic) บริเวณกระดาษที่ไม่โดนแสงจะเกิดเป็นบริเวณที่ไม่ ชอบน้ำขึ้น (hydrophobic) จึงเกิดเป็นลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ จากรูป 2.8 เป็นตัวอย่างจากการ ทดลองโดยการสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง UV/O₃ ลงบนกระดาษซึ่งออกแบบลวดลายโดยการ เพิ่มขนาดความกว้างของช่องทางการไหล หลังจากนั้นจะนำไปจุ่มสารละลาย Rodamine B

จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้ที่เป็นวิธีการที่ต้องใช้อุปกรณ์ในการฉายแสงซึ่งมีราคาแพง และมี ข้อจำกัดในส่วนของตัวแม่แบบ (mask) เนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนทุกครั้งเมื่อทำการเปลี่ยนลวดลาย ส่วนข้อดีของวิธีนี้คือ กระดาษที่จุ่มใน OTS จะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง ซึ่งงานวิจัยนี้สังเกตเห็นในส่วนนี้ จึงได้มีการนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้ต่อไป

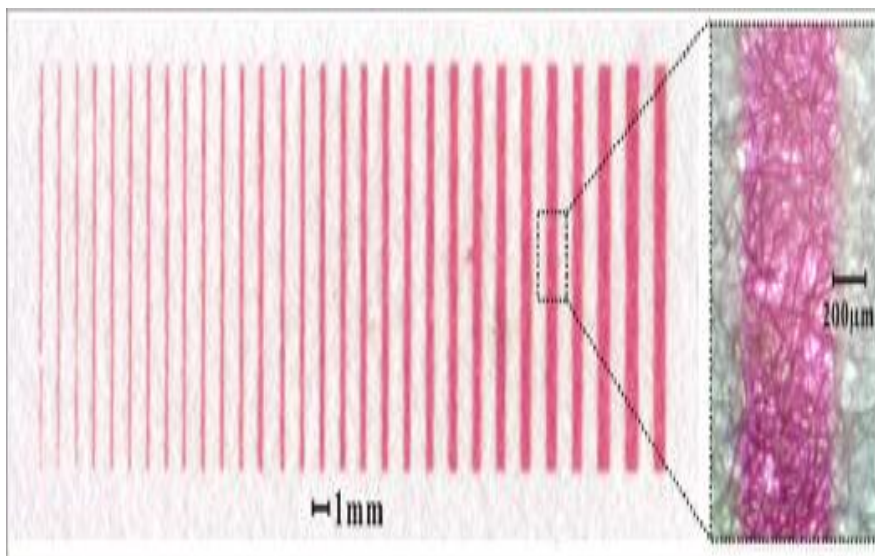
ข้อเสียของวิธีนี้ คือ เครื่องที่ใช้ฉายแสง UV/O₃ ซึ่งมีราคาแพง อีกทั้งยังต้องใช้หน้ากาก (mask) เพื่อให้เกิดเป็นลวดลายขึ้น โดยถ้าต้องการเปลี่ยนรูปแบบลวดลายก็ต้องมีทำหน้ากากขึ้นมา ใหม่



รูปที่ 2.6 บริเวณกระดาษซึ่งนำไปจุ่มในสารละลาย OTS [6]



รูปที่ 2.7 กระบวนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง UV/O₃ [6]



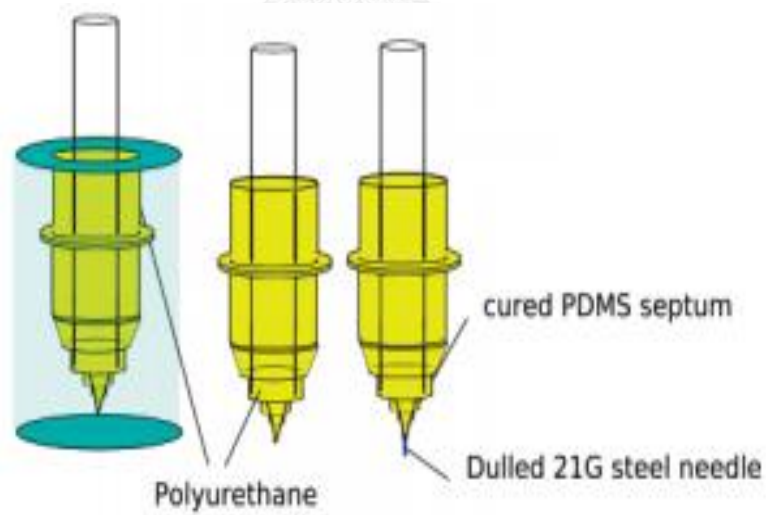
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการทดลองโดยใช้วิธีการสร้างลวดลายโดยการฉายแสง UV/O₃ [6]

2.2.3 วิธีการพิมพ์ PDMS โดยใช้เครื่องพล็อตเตอร์ (plotter)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้เครื่องพล็อตเตอร์ในการพิมพ์วัสดุพอลิเมอร์ที่เรียกว่า Polydimethylsioxane (PDMS) [10] ลงบนกระดาษเพื่อสร้างเป็นช่องทางไหลจุลภาค (micro channel) ซึ่งเป็นช่องทางไหลขนาดเล็กสำหรับของเหลวหรือสารละลายประเภทต่างๆ ดังรูปที่ 2.9 โดยจะมีการปรับแต่งหัวพิมพ์ของเครื่องพล็อตเตอร์เพื่อให้ใช้กับพอลิเมอร์ PDMS ซึ่งหัวพิมพ์จะมีลักษณะคล้ายปากกาทำจากพอลิเมอร์ประเภท (polyurethane) ที่บริเวณปลายปากกามีเข็มที่ทำมาจากเหล็ก โดยมีแท่งแก้วติดกับเข็มใช้เป็นตัวควบคุม ทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ PDMS ดังรูปที่ 2.10 ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาดหัวพิมพ์จะมีผลต่อปริมาณของพอลิเมอร์ที่ไหลออกซึ่งต้องมีความเหมาะสมกับลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดี คือ เป็นการออกแบบลวดลายโดยใช้คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงลวดลายที่ออกแบบได้อย่างสะดวกง่ายดายโดยไม่ต้องใช้แม่แบบ (mask) แต่มีข้อเสีย คือ เครื่องพล็อตเตอร์นั้นมีราคาแพงและมีความเร็วในการผลิตช้า นอกจากนี้อาจพบปัญหาว่าพอลิเมอร์ PDMS ที่ทำการพิมพ์ลงไปจะเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้น บริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางปลายปากกาจะอยู่บริเวณนานกว่าบริเวณอื่น ทำให้มีความหนามากกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้ไม่ได้ลวดลายตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 2.9 การสร้างลวดลายโดยใช้เครื่องพล็อตเตอร์ในการพิมพ์ PDMS [10]



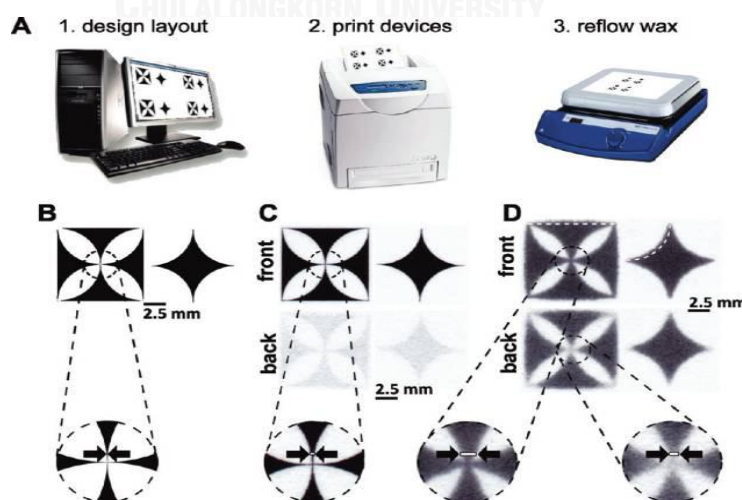
รูปที่ 2.10 ลักษณะของหัวพิมพ์ PDMS ที่ถูกนำมาดัดแปลงใช้ในเครื่องพล็อตเตอร์ [10]

2.2.4 วิธีการพิมพ์หมึก Wax โดยใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์

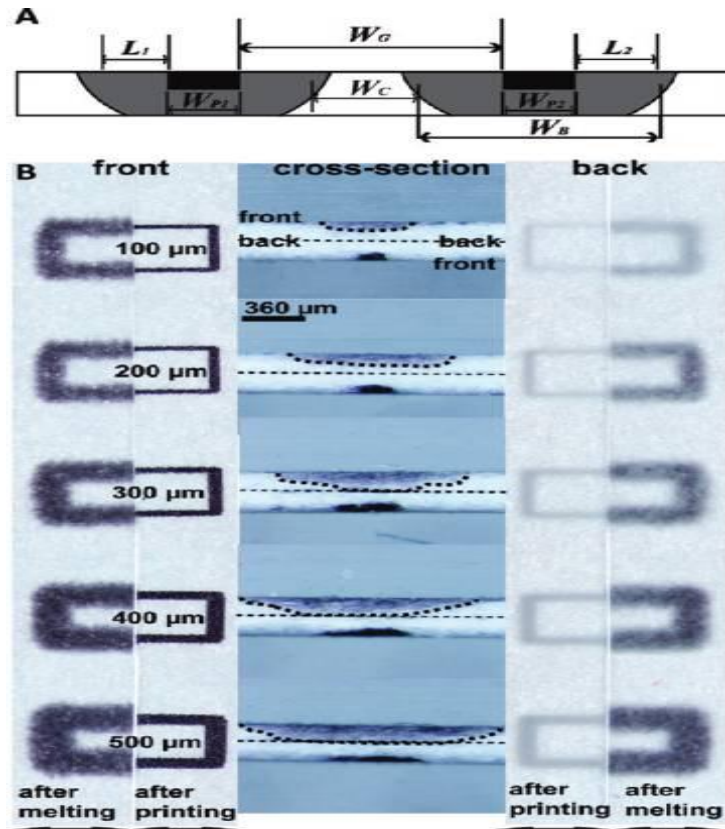
วิธีการนี้เป็นการใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์ในการสร้างส่วนบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ลงบนพื้นผิวกระดาษด้วยใช้หมึก Wax [11-14] โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 2.11 (A) เริ่มขั้นตอนแรกโดยการออกแบบสร้างลวดลายจากคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะทำการพิมพ์หมึก Wax โดยใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์ ต่อมาจึงนำไปตั้งบนเครื่องให้ความร้อน (hot plate) เพื่อให้หมึก Wax แทรกซึมลงสู่ผิวกระดาษ จึงได้เป็นลวดลายตามที่ได้ออกแบบไว้ รูป 2.11 (B),(C),(D) แสดงลวดลายที่ได้ทำการออกแบบไว้ในแต่ละขั้นตอน จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อผ่านการให้ความร้อนลวดลายที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 2.12 เป็นภาพตัดขวางแสดงผลการทดลองให้เห็นถึงลักษณะของหมึกพิมพ์ที่แทรกซึมลงสู่กระดาษที่ปริมาณสารต่างกันก่อนและหลังการให้ความร้อน

อุปกรณ์ที่สร้างจากวิธีการพิมพ์ด้วยวิธีนี้ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับความเข้มข้นของสาร (microzoneplate) และ อุปกรณ์ทดสอบทางชีวภาพ (biological assays) ซึ่งใช้ทดสอบ กลูโคส (glucose) โปรตีน (protein) และ คอเลสเตอรอล (cholesterol) ดังรูปที่ 2.13

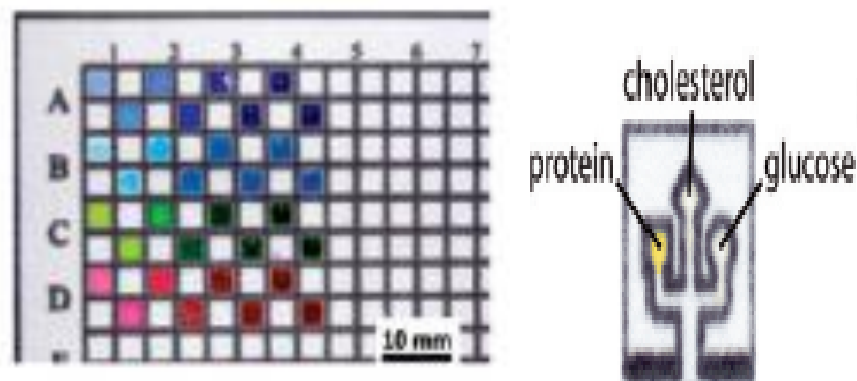
วิธีการนี้มีข้อดี คือ มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน สามารถเปลี่ยนแปลงลวดลายที่ออกแบบได้โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ มีความรวดเร็วในการผลิต ส่วนข้อเสีย คือ เครื่องพิมพ์เลเซอร์มีราคาแพง ลวดลายที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากต้องผ่านการให้ความร้อนเพื่อให้หมึก Wax แทรกซึมลงสู่เนื้อกระดาษทำให้มีค่า resolution ของการพิมพ์ที่ลดลง



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการพิมพ์หมึก Wax ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ [11]



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของการทดลองของวิธีการพิมพ์ด้วยหมึก Wax [11]



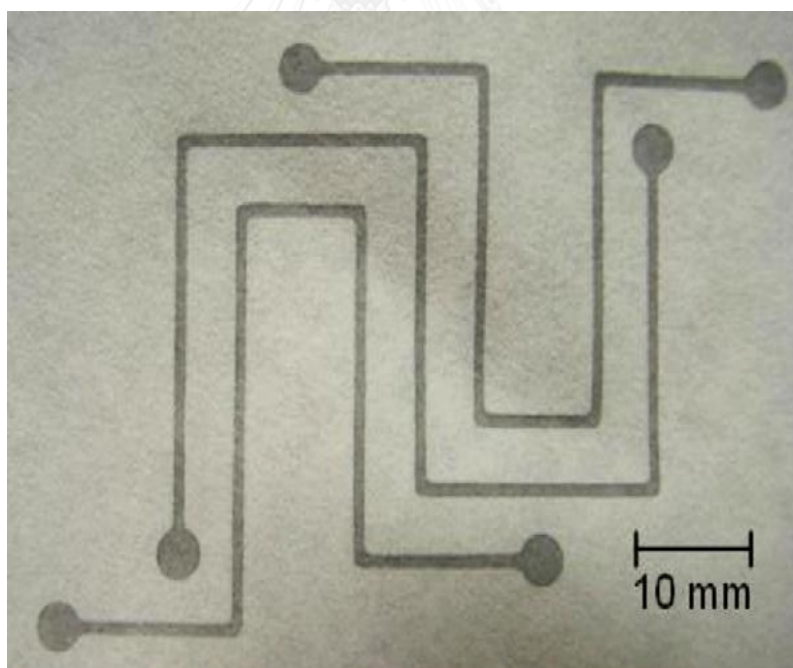
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่สร้างด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยหมึก Wax [11]

2.2.5 การประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

2.2.5.1 วิธีการพิมพ์ alkenyl ketene dimer

วิธีการนี้ เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (inkjet printer) ในการพิมพ์สาร Alkenyl ketene dimer [4, 15, 16] เพื่อให้เกิดบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เป็นลวดลายตามแบบที่ต้องการ วิธีการนี้เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน สามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยการออกแบบลวดลายบนคอมพิวเตอร์ได้เลย และมีราคาถูก นอกจากนี้วิธีการนี้ยังสามารถพิมพ์สารอื่นๆที่จำเป็นในการสร้างลวดลายบนกระดาษ เช่น สารที่ใช้ในการวิเคราะห์ ลงในบริเวณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ดังรูป 2.14 แสดงการสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยการพิมพ์สาร Alkenyl ketene dimer เพื่อสร้างเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ

วิธีการนี้มีข้อเสีย คือ อาจมีการอุดตันของหัวพิมพ์ได้เมื่อใช้ไปเป็นระยะเวลานาน อีกทั้งวิธีการในการใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทยังสามารถพิมพ์สารได้เพียงแค่บางชนิดเท่านั้นเนื่องจากจะทำให้หัวพิมพ์อุดตันนั่นเอง



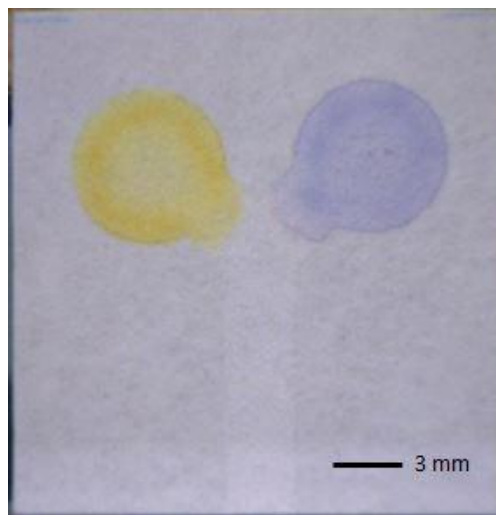
รูปที่ 2.14 การสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท [4]

2.2.5.2 วิธีการ Water mask

จากวิธีการที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการใช้เครื่องอิงค์เจ็ทพิมพ์สารพอลิเมอร์ลงไปโดยตรงจะทำให้หัวพิมพ์อุดตันและสามารถใช้ได้เพียงสารบางประเภทเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาวิธีการ Water mask ขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่หลากหลายขึ้น

วิธีการ Water mask เป็นวิธีการสร้างลวดลายโดยการพิมพ์น้ำลงไปบนกระดาษกรอง [5] เพื่อให้หน้าที่พิมพ์นั้นเป็นหน้ากาก (mask) ป้องกันลวดลายที่เราได้ออกแบบไว้ โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกจะทำการพิมพ์น้ำลงไปบนกระดาษกรองด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทให้ได้เป็นลวดลายที่เราต้องการ หลังจากนั้นจะนำกระดาษที่พิมพ์น้ำไปจุ่มในพอลิเมอร์ (polymer) ที่ละลายในสารละลาย (solvent) เนื่องจากหน้ากากน้ำซึ่งเป็นสารละลายที่มีขี้จะสามารถป้องกันการแทรกซึมของ polymer ที่ละลายใน solvent ซึ่งเป็นสารละลายไม่มีขี้ไม่ให้เข้าไปบริเวณที่สร้างลวดลายได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่ต่างกันจึงไม่สามารถละลายเข้ากันได้ หลังจากนั้นจึงนำกระดาษที่จุ่มขึ้นมาและปล่อยให้แห้ง ส่วนที่เป็นน้ำและ solvent จะระเหยและแห้งไปเหลือแต่ polymer เคลือบอยู่บนกระดาษจึงได้เป็นลวดลายที่ต้องการ จากรูป 2.15 แสดงแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่นำมาทดสอบกับสารละลายต่างๆ เช่น โปรตีนบริสุทธิ (BSA) [17] และสภาพความเป็นกรด ต่าง

วิธีการนี้มีขั้นตอนที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยการออกแบบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และมีราคาถูกเนื่องจากเป็นเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด สามารถสร้างได้ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนากระบวนการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการพิมพ์หน้ากากน้ำ (water mask) และประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แล็บบนชิปประเภทกระดาษ เช่น เซอร์ประเภทกระดาษ เป็นต้น โดยวิธีดังกล่าว



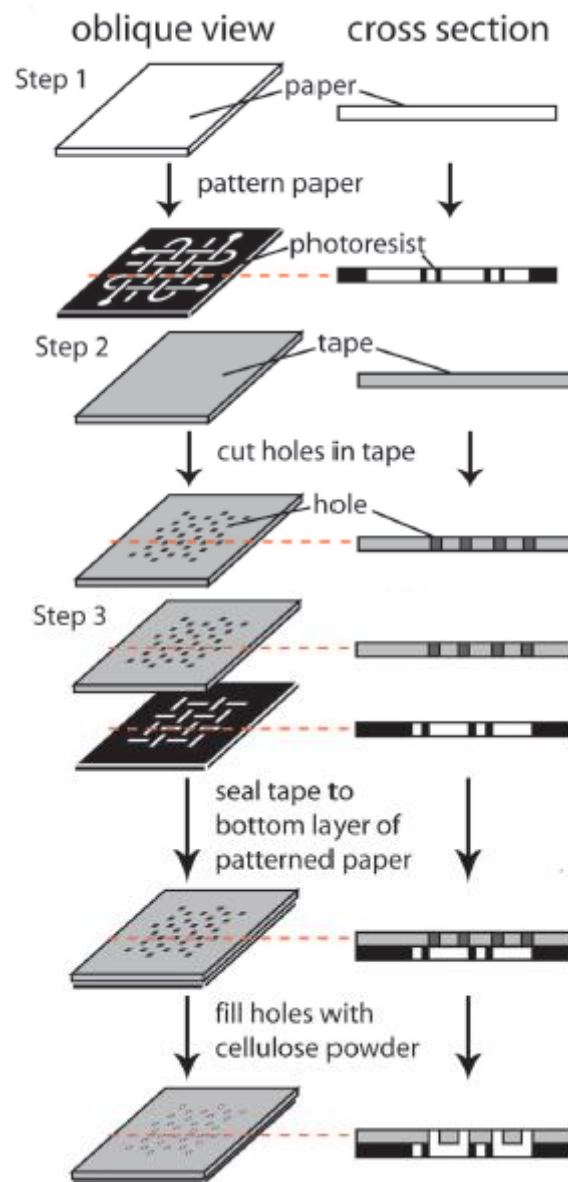
รูปที่ 2.15 แล็บนชิปต้นแบบโดยใช้วิธีการ Water mask [5]

2.3 วิธีการสร้างลวดลายบนกระดาษแบบ 3 มิติ

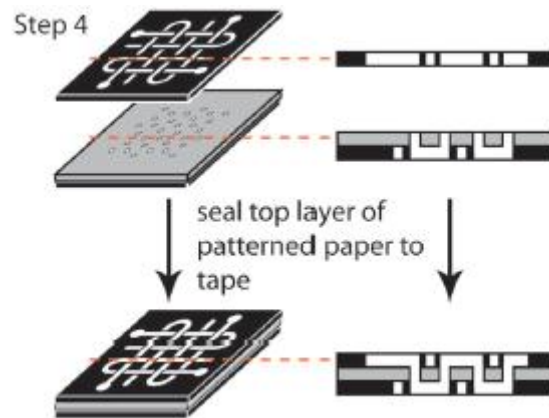
ในการสร้างลวดลายที่มีความซับซ้อนขึ้น เช่น การสร้างลวดลายแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้าง 3 มิติได้ จากวิธีการที่ผ่านมามองเห็นได้ว่าเป็นการสร้างลวดลายบนกระดาษเพียงชั้นเดียว แต่ในส่วนนี้จะนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการฉายแสง (photolithography) [18, 19] เหมือนกับวิธีที่ผ่านมามาแต่จะใช้กระดาษหลายชั้น โดยจะประกอบไปด้วย กระดาษประเภท ITW Technicloth wipers และเทป 2 หน้า (double-sided carpet tape) โดยมีขั้นตอนกระบวนการสร้างลวดลาย ดังรูปที่ 2.16 เริ่มแรกจะนำกระดาษไปจุ่มในพอลิเมอร์ SU-8 ซึ่งเป็น Photoresist ชนิดหนึ่ง หลังจากนั้นจะนำแม่แบบ (mask) มาวางบนกระดาษ จากนั้นจึงทำการฉายแสง จึงได้เป็นลวดลายที่ต้องการ จากนั้นนำเทป 2 หน้า มาเจาะรูเพื่อให้เกิดเป็นเส้นทางไหลระหว่างกระดาษทั้ง 2 ชั้น ต่อมาจึงนำกระดาษที่สร้างลวดลายแล้วมาประกบติดกับเทป 2 หน้า ซึ่งเราจะทำการฉายแสงเช่นเดียวกันอีกครั้งกับกระดาษอีกแผ่น หลังจากนั้นจึงนำไปประกบติดกับเทป 2 หน้าอีกด้านหนึ่งจึงเกิดเป็นลวดลายบนกระดาษที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยมีเทป 2 หน้าเป็นทางเชื่อมช่องทางเดินของกระดาษทั้ง 2 ด้าน ซึ่งหลังจากที่ได้มีการใส่สารสีเพื่อทดสอบจะเห็นได้ว่าบริเวณเทปที่มีการเจาะรู กระดาษทั้ง 2 แผ่นจะมีสารสีเชื่อมถึงกัน บริเวณเทปที่ไม่ได้เจาะรูไว้ กระดาษทั้ง 2 แผ่นจะมีสารสีแยกกันไม่ทะลุถึงกัน จากรูป 2.17 แสดงลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยการใส่สารสีแดง เหลือง เขียว และ ฟ้า เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป 10 วินาที และ 2 นาที ตามลำดับ จากรูปที่

2.18 แสดงลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยการใส่สารสีแดง เหลือง เขียว และ ฟ้า เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป 4 นาทีพร้อมทั้งแสดงภาพตัดขวางในแต่ละบริเวณของโครงสร้างแบบ 3 มิติ

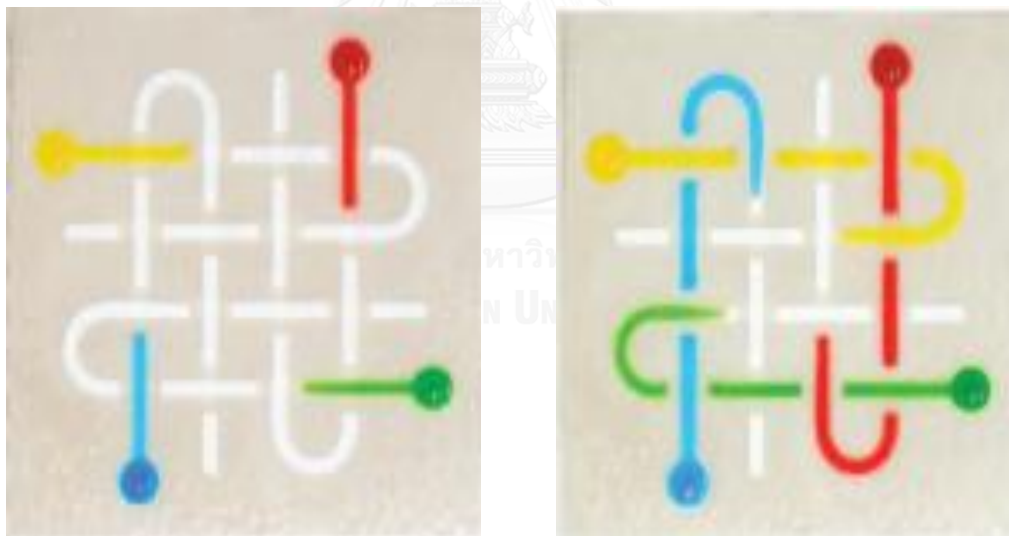
ข้อเสียของวิธีนี้ คือ มีกระบวนการที่ซับซ้อน มีการใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง ใช้สารไวแสง (Photoresist) ซึ่งก็มีราคาแพง อีกทั้งต้องใช้กระดาษ 2 แผ่นในการสร้างโครงสร้างแบบ 3 มิติขึ้น



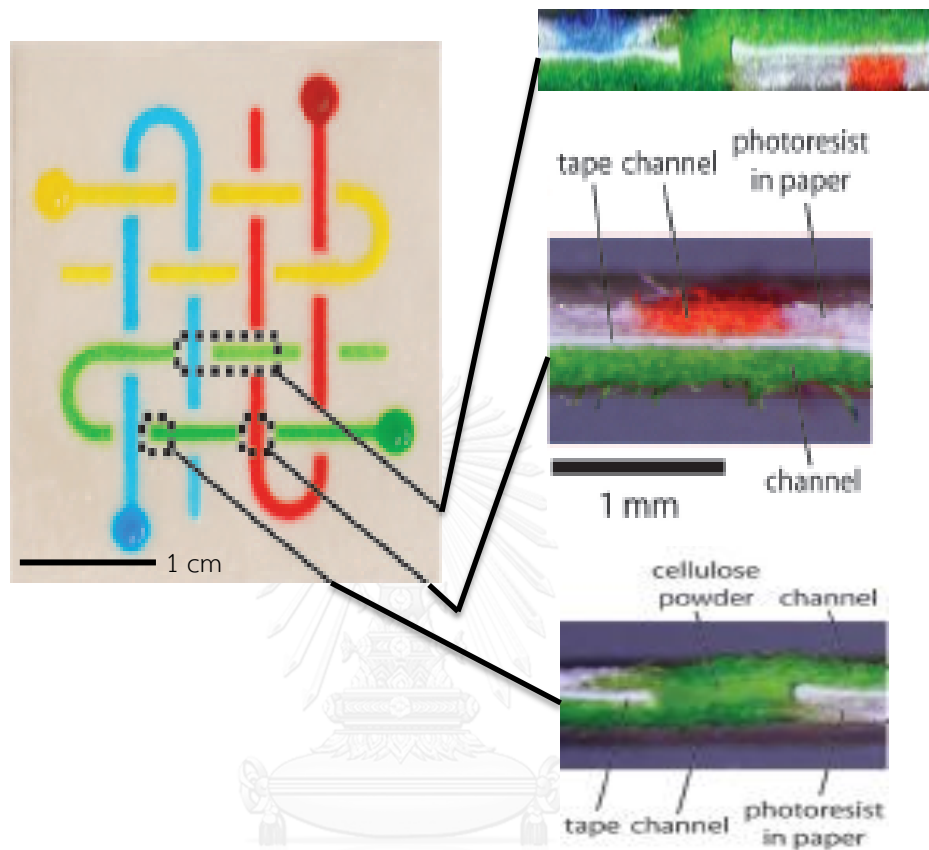
รูปที่ 2.16 กระบวนการสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการฉายแสง (photolithography)



รูปที่ 2.16 กระบวนการสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการฉายแสง (photolithography)
(ต่อ) [18]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยทำการใส่สารสีแดง เหลือง เขียว และ ฟ้ำ เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป 2 นาที [18]



รูปที่ 2.18 ภาพตัดขวางของโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยทำการใส่สารสีแดง เหลือง เขียว และ ฟ้ำ เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป 4 นาที [18]

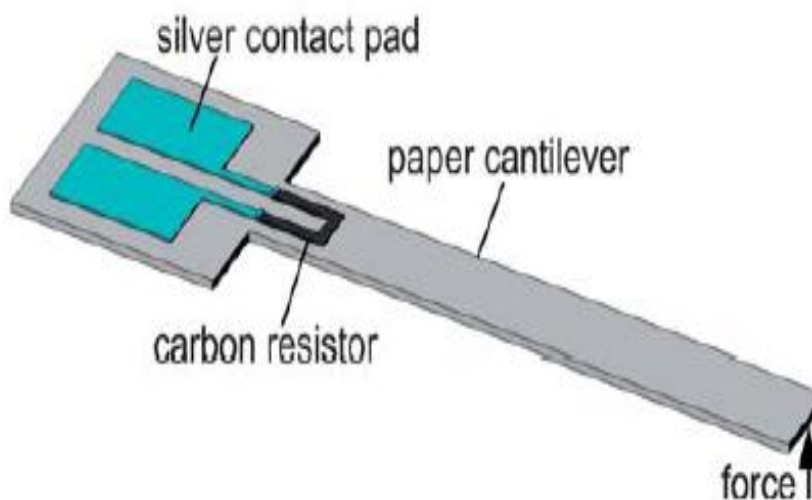
2.4 อุปกรณ์ประเภทกระดาษ

2.4.1 เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ (Paper based piezoresistive force sensor)

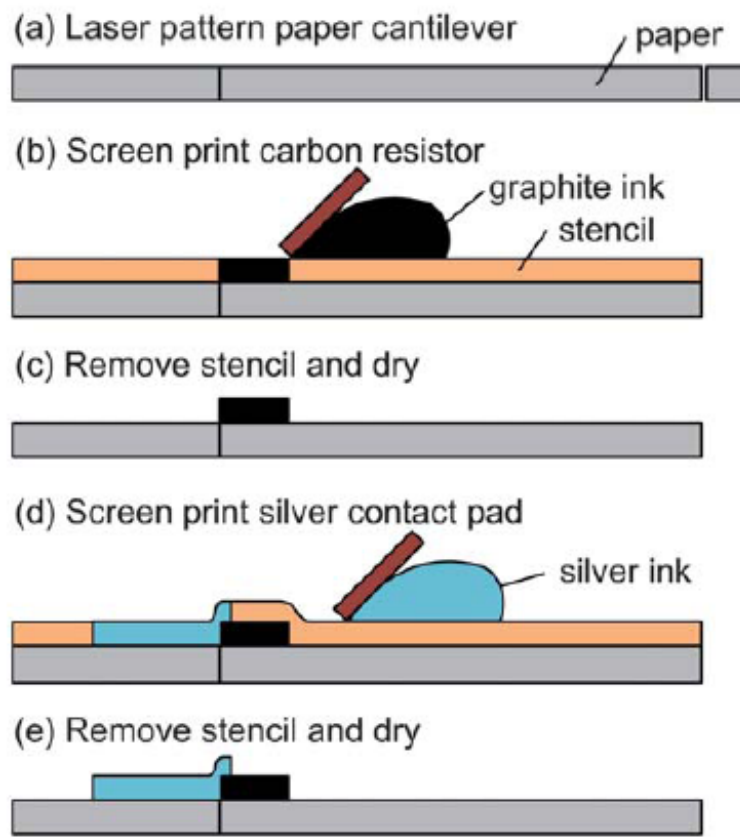
เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ (Paper based piezoresistive force sensor) [20] เป็นการพัฒนาเซนเซอร์วัดแรงในระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคโดยใช้กระดาษเป็นโครงสร้างหลักของเซนเซอร์วัดแรง อาศัยหลักการทำงานของ เพียโซรีซิสทีฟเอฟเฟกต์ คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุประเภทเพียโซรีซิสทีฟมีความต้านทานทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อได้รับแรงเค้นทางกล

การสร้างเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ เป็นการสร้างลวดลายบนกระดาษ ทำได้โดยสร้างลวดลายของ วัสดุเพียโซรีซิสทีฟ บนกระดาษให้ได้รูปแบบตามต้องการ ใช้วัสดุเพียโซรีซิสทีฟ ทำให้เซนเซอร์วัดความดันนี้ถือเป็นอุปกรณ์ที่เรียกว่า เพียโซรีซิสเตอร์ ซึ่งมีลักษณะสำคัญคือมีหน้าสัมผัส 2 หน้า (Contact pad) ที่มีไว้เพื่อใช้ต่อกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเพื่อใช้วัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้ซิลเวอร์ (Silver paste) เป็นหน้าสัมผัสทั้ง 2 หน้า ซึ่งซิลเวอร์นี้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และใช้สารละลายแกรไฟต์ (Graphite) เป็นวัสดุเพียโซรีซิสทีฟ ต่อจากนั้นใช้เลเซอร์ตัดกระดาษให้มีลักษณะเป็นคาน เพื่อให้ปลายที่ยื่นออกมาเป็นส่วนที่รับแรงของเซนเซอร์

การขึ้นรูปของวงจรใช้วิธีการพิมพ์แบบสกรีนโดยใช้บล็อกสกรีนเป็นแม่พิมพ์ ใช้แกรไฟต์เป็นส่วนของวงจรตัวต้านทานและใช้หมึกซิลเวอร์เป็นวงจรในส่วนของหน้าสัมผัส ใช้กระดาษกรองเป็นโครงสร้างหลักเนื่องจากเป็นกระดาษที่มีคุณสมบัติที่สามารถคัดกรองอนุภาคหรือสิ่งเจือปนออกจากสารละลายได้และมีความคงทนเมื่อเปียกน้ำ สามารถกักเก็บอนุภาคของสารไว้ที่ผิวของกระดาษกรองและกระดาษกรองสามารถดูดซับน้ำได้



รูปที่ 2.19 เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ [20]



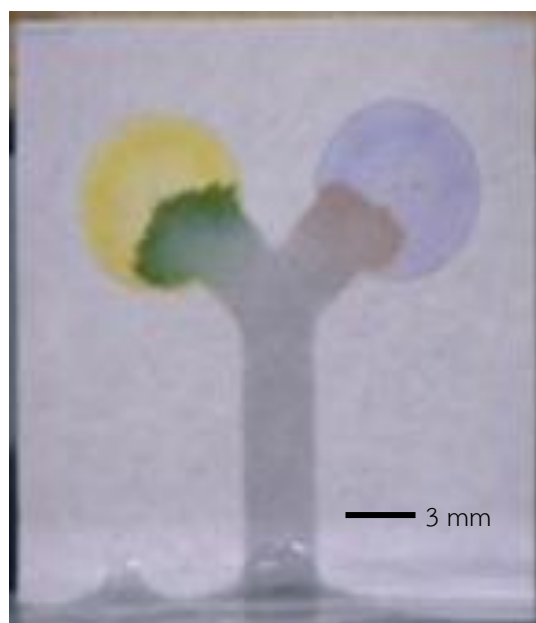
รูปที่ 2.20 กระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟ [20]

- (a.) กระดาษที่ถูกตัดด้วยเลเซอร์
- (b.) การพิมพ์แบบสกรีนของแกรไฟต์
- (c.) วงจรของแกรไฟต์ที่ได้หลังจากยกบล็อกสกรีนออก ปล่อยให้แห้ง
- (d.) การพิมพ์แบบสกรีนของหมึกซิลเวอร์ในส่วนของหน้าสัมผัส
- (e.) วงจรของที่ได้หลังจากยกบล็อกสกรีนออกและปล่อยให้แห้ง

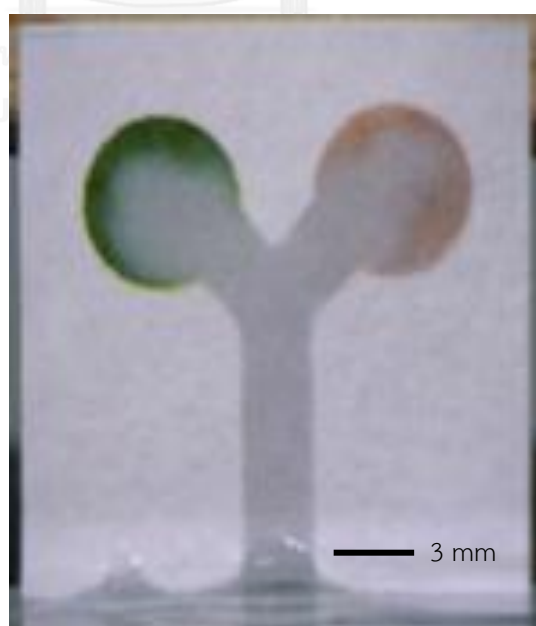
2.4.2 แล็บบนชิป (Lab-on-chip)

แล็บบนชิป (Lab-on-chip) เป็นอุปกรณ์ที่ซึ่งรวบรวมกระบวนการทำงานของห้องปฏิบัติการไว้บนชิปขนาดเล็กโดยใช้สำหรับตรวจสอบสารเคมี ซึ่งได้มีการพัฒนาการสร้างลวดลายมาเป็นแล็บบนชิปต้นแบบด้วยวิธี Water mask [6] เพื่อที่จะนำมาใช้ทดสอบสาร 2 ชนิด คือ สารที่ใช้ในการทดสอบโปรตีนบริสซูร์ (BSA) และสภาพความเป็นกรดต่าง โดยการทำการออกแบบลวดลายท่อและหลุม การทดสอบเริ่มจากการนำแล็บบนชิปไปจุ่มในสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและปล่อยให้สารละลายตัวอย่างค่อยๆแทรกซึมผ่านกระดาษกรองขึ้นมาตามท่อเฉลี่ยหลัก แล้วแยกออกไปสัมผัส

กับสารละลายที่ใช้ในการทดสอบทั้งสองชนิดในหลุมทั้งสองด้านจากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่บริเวณหลุมทั้งสองด้าน จากรูป 2.13 เป็นแล็ปบชิปต้นแบบโดยใช้วิธีการ Water mask จากรูปที่ 2.21 และ 2.22 แสดงแล็ปบชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที และ 32 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 แล็ปบชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที



รูปที่ 2.22 แล็ปบชิปต้นแบบหลังจากการทดสอบสารละลายตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 32 นาที

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบวิธีการในการสร้างลวดลาย

ผู้แต่ง	วิธีการสร้างลวดลาย	คำอธิบาย	ข้อดี	ข้อเสีย
Martinez A.W. et al. (2007)	การฉายแสง (Photolithography)	เป็นการใช้แสงในการสร้างลวดลาย โดยจะนำกระดาษไปจุ่มในพอลิเมอร์ไวแสงจากนั้นจะฉายแสงผ่านหน้ากากพอนำไปแช่ในสารละลายจึงเกิดเป็นลวดลายขึ้น	-ไม่มี Resolution สูง	-เป็นวิธีการที่มีความซับซ้อน -เครื่องมือมีราคาแพง -มีข้อจำกัดในส่วนของหน้ากาก -มีความเร็วในการผลิตช้า
Qiaohong He et al. (2013)	การฉายแสง UV/O ₃ โดยใช้สาร OTS	มีกระบวนการเหมือนวิธีฉายแสง แต่จะนำกระดาษไปจุ่มในสารละลาย OTS	-ไม่มี Resolution สูง -กระดาษมีความไม่ชอบน้ำสูง	-เป็นวิธีการที่มีความซับซ้อน -เครื่องมือมีราคาแพง -มีข้อจำกัดในส่วนของหน้ากาก -ความเร็วในการผลิตช้า
Bruzewicz D.A. et al. (2008)	การพิมพ์ PDMS โดยใช้เครื่องพิมพ์พล็อตเตอร์ (Plotter)	เป็นการปรับแต่งหัวพิมพ์ในเครื่องพล็อตเตอร์เพื่อใช้สำหรับพิมพ์สาร PDMS เพื่อสร้างเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำขึ้น	-ออกแบบลวดลายได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	-เครื่องมือมีราคาแพง -มี Resolution ต่ำ -หัวพิมพ์มีการอุดตัน

Lu Y. et al. (2009)	การพิมพ์หมึก Wax โดยใช้เครื่องพิมพ์ เลเซอร์	เป็นการใช้ เครื่องพิมพ์เลเซอร์ ในการพิมพ์ Wax ลงบนกระดาษเพื่อ สร้างเป็นบริเวณที่ ไม่ชอบน้ำขึ้น	-ออกแบบ ลวดลายได้ โดยใช้ โปรแกรม คอมพิวเตอร์	-เครื่องมือมี ราคาแพง -มี Resolution ต่ำ -หัวพิมพ์มี การอุดตัน
Li X. et al. (2010)	การพิมพ์สาร Alkenyl Ketene Dimer	เป็นการใช้ เครื่องพิมพ์อิงค์ เจ็ทพิมพ์สารพอลิ เมอร์คล้ายสาร เคลือบมันลงบน กระดาษเพื่อสร้าง เป็นบริเวณที่ไม่ ชอบน้ำขึ้น	-ออกแบบ ลวดลายได้ โดยใช้ โปรแกรม คอมพิวเตอร์ -มีราคาถูก -เป็นวิธีการ ที่ไม่ซับซ้อน	-ใช้พิมพ์ได้ เพียงแค่สาร บางประเภท -หัวพิมพ์มี การอุดตัน
เกริกฐากร พันธ์พัฒนกุล (2012)	หน้ากากน้ำ (Water mask)	เป็นการใช้ เครื่องพิมพ์อิงค์ เจ็ทพิมพ์น้ำลงบน กระดาษจากนั้น นำไปจุ่มในสารพ ลิเมอร์ซึ่งเป็นสาร ไม่มีขี้ผึ้งแยกจาก น้ำซึ่งเป็นสารมีขี้ จากนั้นปล่อยให้ แห้งจึงได้เป็น ลวดลายที่ ออกแบบขึ้น	-ออกแบบ ลวดลายได้ โดยใช้ โปรแกรม คอมพิวเตอร์ -มีราคาถูก -เป็นวิธีการ ที่ไม่ซับซ้อน -ใช้ได้กับ สารที่หลากหลาย ลายขึ้นซึ่งไม่ ก่อให้เกิด การอุดตัน ของหัวพิมพ์	-ต้องมีการ พิมพ์น้ำซ้ำ ซึ่งอาจทำให้ ลวดลายมี ขนาดใหญ่ กว่าที่ ออกแบบไว้

บทที่ 3

การพัฒนาการสร้างลวดลายด้วยวิธี Water mask

จากบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงข้อดีข้อเสียของวิธีการสร้างลวดลายของแต่ละวิธีการซึ่งเป็นที่มาของการสร้างลวดลายด้วยวิธีการ Water mask ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการ Water mask [6] อย่างละเอียด รวมทั้งการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการ Water mask อย่างละเอียดโดยการเพิ่มเงื่อนไขในการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงการเลือกวัสดุอุปกรณ์และสรุปผลการทดลอง

3.1 วิธีการ Water mask

วิธีการ Water mask [5] เป็นวิธีการสร้างลวดลายโดยการพิมพ์น้ำลงไปบนกระดาษกรอง เพื่อให้หน้าที่พิมพ์นั้นเป็นหน้ากาก (mask) ป้องกันลวดลายที่เราได้ออกแบบไว้ โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มแรกจะทำการพิมพ์น้ำลงไปบนกระดาษกรองด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทให้ได้เป็นลวดลายที่เราต้องการ หลังจากนั้นจะนำกระดาษที่พิมพ์น้ำไปจุ่มในพอลิเมอร์ (polymer) ที่ละลายในสารละลาย (solvent) เนื่องจากหน้ากากน้ำซึ่งเป็นสารละลายที่มีขี้้วจะสามารถป้องกันการแทรกซึมของ polymer ที่ละลายใน solvent ซึ่งเป็นสารละลายไม่มีขี้้วไม่ให้เข้าไปบริเวณที่สร้างลวดลายได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่ต่างกันจึงไม่สามารถละลายเข้ากันได้ หลังจากนั้นจึงนำกระดาษที่จุ่มขึ้นมาและปล่อยให้แห้ง ส่วนที่เป็นน้ำและ solvent จะระเหยและแห้งไปเหลือแต่ polymer เคลือบอยู่บนกระดาษจึงได้เป็นลวดลายที่ต้องการ

3.2 การเลือกวัสดุอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Epson รุ่น ME-101 ดังรูปที่ 3.1 มีหัวพิมพ์ (inkjet head) ซึ่งใช้วิธีการ piezoelectric เพื่อใช้ในการสร้างหยดหมึก โดยในหัวพิมพ์จะมีขี้้วไฟฟ้าที่คอยจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ diaphragm ใน piezoelectric transducer เกิดการยืดหดตัวเพื่อดันหยดหมึกออกมาซึ่งวิธีการนี้เอง จะทำให้เกิดความร้อนน้อยกว่าหัวพิมพ์ ที่ใช้วิธีการ thermal heat ซึ่งวิธีการนี้กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวต้านทานบางที่อยู่ด้านล่างของหัวฉีดทุกสีของเครื่องพิมพ์ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ส่วนล่างของตัวหัวฉีด ซึ่งจะทำให้มีอุณหภูมิสูงมาก ในระยะเวลาสั้นๆ หมึกจะเดือดก่อตัวเป็นไอ จากนั้นก็จะ เป็นฟองอากาศลอยขึ้นมาจากด้านล่างไอจะลอยขึ้นมาดันน้ำหมึกผ่านท่อขนาดเล็ก ทำให้น้ำหมึกพุ่ง ออกมาไปยังกระดาษ จึงเลือกใช้เครื่องพิมพ์ Epson ซึ่งใช้วิธีการ piezoelectric เพื่อป้องกัน

อุณหภูมิจากหัวพิมพ์ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในหัวพิมพ์ อุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดเล็ก ราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย ใช้พิมพ์กับกระดาษขนาดมาตรฐาน



รูปที่ 3.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท รุ่น ME-101

คุณลักษณะเด่นอีกอย่างของเครื่องพิมพ์แบบนี้ คือ มีตลับหมึกสีแยกอิสระ สามารถถอดเปลี่ยนใหม่ได้ คุณภาพการพิมพ์ให้ความละเอียดสูง นอกจากนี้เทคนิคการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทสามารถพิมพ์งานได้โดยไม่สัมผัสกับ pattern และทั้งระบบทำงานภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำ

3.2.2 กระดาษกรอง (filter paper)

กระดาษกรองที่เราเลือกใช้ กระดาษกรอง Whatman Grade 1, 41, 3 ซึ่งเป็นกระดาษประเภทเซลลูโลส (cellulose filter paper) ผลิตจากเยื่อไม้ เส้นใยจากพืชซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เนื่องด้วยกระดาษกรองในแต่ละเบอร์ที่เราเลือกใช้จะมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เช่น รูปทรง ความหนาของกระดาษ อัตราการไหลของของไหลบนกระดาษ เป็นต้น ดังตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเหล่านี้จึงส่งผลต่อกระบวนการสร้างลวดลายด้วยวิธี Water mask

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของกระดาษกรองที่เลือกใช้

Grade	Particle Retention Liquid (um)	Air Flow Rate (s/100mL/in ²)	Typical Thickness (um)
41	20-25	0.007	220
1	11	10.5	180
3	6	26	390

3.2.3 น้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ที่ผสมใน เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol)

เนื่องด้วยน้ำมีจะพิมพ์นั้นไม่สามารถพิมพ์ได้โดยตรงจึงจำเป็นต้องมีการปรับสัดส่วนคุณสมบัติของน้ำที่ต้องการจะพิมพ์ เช่น แรงตึงผิว (surface tension) ค่าความหนืด (viscosity) ซึ่งค่าเหล่านี้มีผลกับการพิมพ์โดยตรง ดังนั้นในการทดลองโดยวิธีการ Water mask นั้นจำเป็นต้องพิมพ์น้ำให้สามารถออกมาจากเครื่องพิมพ์ให้ได้ก่อนจึงจะสามารถใช้วิธีดังกล่าวได้ การที่จะปรับคุณสมบัติของน้ำให้เป็นไปตามที่เครื่องพิมพ์ต้องการนั้นคือจะต้องปรับที่ค่า ความหนืด และ ค่าแรงตึงผิว ให้เหมาะสมกับเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้ได้มีการปรับค่าแรงตึงผิว และความหนืดของน้ำโดยใช้สารละลายเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) ซึ่งมีค่าแรงตึงผิว และความหนืดมีค่าต่ำผสมลงไปในการใช้ส่วนผสมระหว่างน้ำและ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) ที่สัดส่วน 50% : 50% [6] นอกจากนี้ข้อดีของเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) อีกอย่างคือสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

3.2.4 พลาสติกประเภท Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene

พอลิสไตรีน (Polystyrene) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ ที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง พอลิสไตรีนแข็งที่บริสุทธิ์จะไม่มีสี ใส แต่สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด

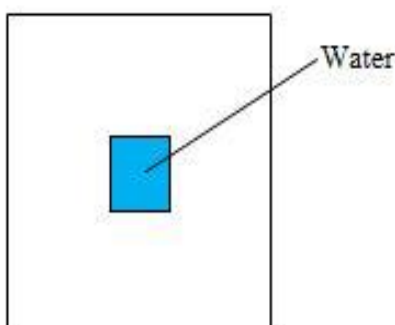
โดยที่วิธีการ Water mask จะเป็นส่วนหน้ากาน้ำซึ่งเป็นสารละลายที่มีขี้ผึ้งที่สามารถป้องกันการแทรกซึมของ polymer ที่ละลายใน solvent ซึ่งเป็นสารละลายไม่มีขี้ผึ้งไม่ให้เข้าไปบริเวณที่สร้างลวดลายได้ เราจึงเลือกใช้สารละลาย toluene ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง โดยปกติ

สารละลาย toluene จะใช้ในการผลิตสารเคมีชนิดอื่น วัตถุระเบิด สี และสารประกอบอื่นๆ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวทำละลายสำหรับหมึกพิมพ์ สี แล็กเกอร์ เรซิน น้ำยาทำความสะอาด กาว และผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์และเครื่องบิน

3.3 การทดลองเบื้องต้นในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask

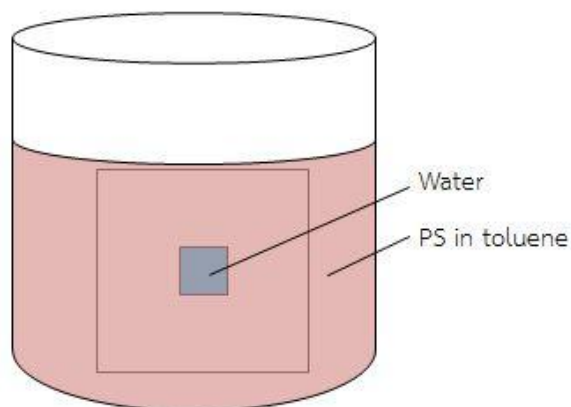
จากงานวิจัยการพัฒนาการสร้าลวดลายช่องทางการไหลขนาดเล็ก [6] ซึ่งใช้วิธีการ Water mask เป็นการหาที่เงื่อนไขที่กระดาษกรอง (filter paper) เบอร์ 1 เพียงเงื่อนไขเดียว งานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาขอบเขตเงื่อนไขที่หลากหลายมากขึ้น โดยจะทำการทดลองที่กระดาษกรองทั้งหมด 3 เบอร์ คือ เบอร์ 1, 41, 3 เนื่องจากในกระดาษกรองแต่ละเบอร์มีขนาดรูพรุนที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้อัตราการไหลของของไหลบนกระดาษไม่เท่ากัน โดยจะทำการวัดความเข้มข้นของ Polystyrene ใน Toluene ที่ 1%, 3% และ 5% โดยใช้เวลาในการจุ่มใน Polystyrene ที่ละลายใน Toluene ที่เวลา 3, 8, 60 วินาที รวมไปถึงจำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำลงในบริเวณที่เราได้ออกแบบที่จำนวน 1, 2, 3 และ 4 ครั้ง โดยมีขั้นตอนวิธีการทดลองดังนี้

1. ทำการออกแบบลวดลายโดยใช้คอมพิวเตอร์หลังจากนั้นจึงทำการพิมพ์น้ำลงกระดาษกรองโดยทำที่กระดาษกรองเบอร์ 1, 41, 3 โดยในการทดลองนี้เราได้ออกแบบลวดลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2



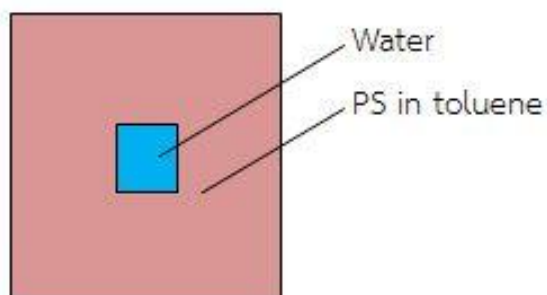
รูปที่ 3.2 การออกแบบลวดลายบนคอมพิวเตอร์และพิมพ์น้ำลงบนกระดาษ

2. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1%, 3%, และ 5% โดยจุ่มที่เวลา 3, 4 และ 60 วินาที ดังรูปที่ 3.3

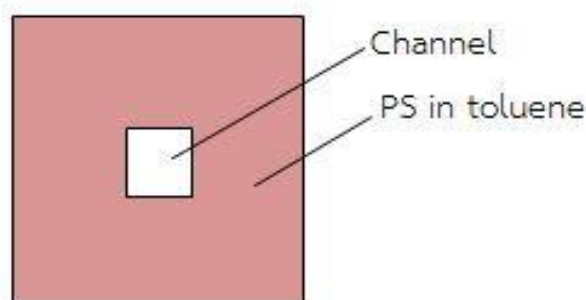


รูปที่ 3.3 การจุ่มกระดาษในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene

3. หลังจากจุ่มเสร็จจึงนำขึ้นมาจะสังเกตเห็นบริเวณที่พิมพ์ด้วยน้ำแยกออกจากสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene อย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แห้ง จะทำให้สารละลายและน้ำแห้งไปเหลือแต่สาร Polystyrene ที่เคลือบไว้บริเวณรอบลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.5 จึงเกิดเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ขึ้น ส่วนบริเวณที่เราออกแบบไว้เกิดเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) จึงได้เป็นลวดลายที่เราออกไว้



รูปที่ 3.4 การนำกระดาษขึ้นจากการจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene



รูปที่ 3.5 การปล่อยให้แห้งและเกิดเป็นลวดลายที่ได้ออกแบบไว้

4. เมื่อแห้งแล้วจึงนำชุดทดลองไปทดสอบโดยการหยดน้ำหมึกลงบนบริเวณที่เกิดเป็นลวดลายแล้วจึงรอประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงดูที่ความเข้มข้นต่างๆ กระจายในแต่เบอร์ จำนวนครั้งในการพิมพ์ เวลาในการจุ่ม เพื่อหาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ลวดลายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยังคงรักษารูปร่างอยู่ได้โดยที่หมึกไม่ซึมออกนอกบริเวณที่ได้ออกแบบไว้

3.4 ผลการทดลองการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask

จากผลการทดลองทั้งหมด 108 ตัวอย่าง จึงได้แสดงเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ดังนี้ ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดลองที่สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1% ที่กระดาดกรองเบอร์ 41, 1, 3 ใช้จำนวนในการพิมพ์ซ้ำ 1, 2, 3, 4 ครั้ง และระยะเวลาที่จุ่มเป็นระยะเวลา 3, 8, 60 วินาที โดยที่ x แทนข้อมูลในตาราง คือ น้ำหมึกซึมออกนอกบริเวณลวดลายที่ออกแบบ หรือ มีน้ำหมึกไม่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบ \triangle แทนข้อมูลในตาราง คือ บางครั้งน้ำหมึกซึมอยู่ในบริเวณลวดลาย แต่บางครั้งน้ำหมึกไม่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบ \circ แทนข้อมูลในตาราง คือ หมึกอยู่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบโดยที่ไม่มีการซึมออกบริเวณนอกลวดลาย

เบอร์กระดาษกรอง (ขนาดรูพรุน)	จำนวนครั้งที่พิมพ์น้ำซ้ (ครั้ง)											
	1			2			3			4		
	เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)		
	3	8	60	3	8	60	3	8	60	3	8	60
41 (20-25 μ m)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1 (11 μ m)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3 (6 μ m)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการทดลองสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1%

จากตารางที่ 3.2 สามารถสรุปได้ว่าสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1% หมึกจะซึมออกนอกบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบไว้เนื่องจากความเข้มข้นที่น้อยเกินไปจึงไม่สามารถเป็นกำแพงกั้นหมึกสีได้

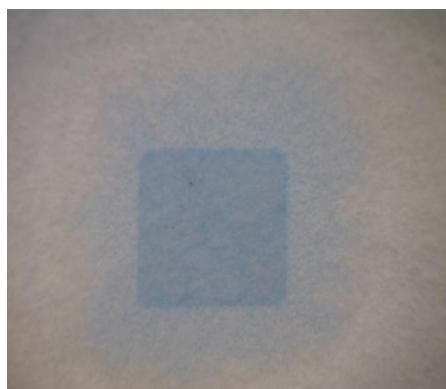
จากรูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความ

เข้มข้น 1% a.) กระดาษกรองเบอร์ 41 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที

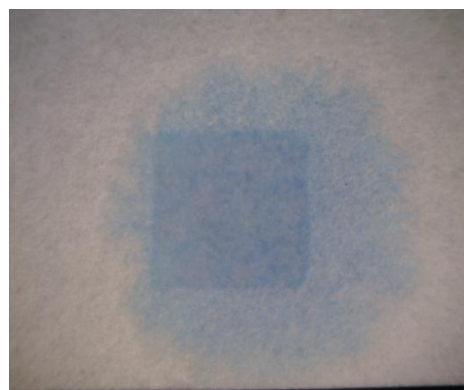
b.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที

c.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที

d.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 2 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 8 วินาที



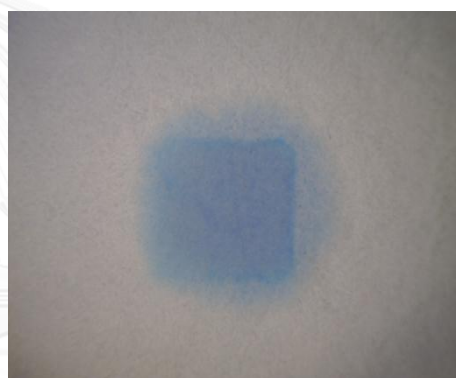
a.) กระจกกรองเบอร์ 41 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที



b.) กระจกกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที



c.) กระจกกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที



d.) กระจกกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 2 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 8

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 1%

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดลองที่สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3% ที่กระดาศกรองเบอร์ 41, 1, 3 ใช้จำนวนในการพิมพ์ซ้ำ 1, 2, 3, 4 ครั้ง และระยะเวลาที่จุ่มเป็นระยะเวลา 3, 8, 60 วินาที โดยที่ x แทนข้อมูลในตาราง คือ น้ำหมึกซึมออกนอกบริเวณลวดลายที่ออกแบบ หรือ มีน้ำหมึกไม่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบ \triangle แทนข้อมูลในตาราง คือ บางครั้งน้ำหมึกซึมอยู่ในบริเวณลวดลาย แต่บางครั้งน้ำหมึกไม่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบ \circ แทนข้อมูลในตาราง คือ หมึกอยู่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบโดยที่ไม่มีการซึมออกบริเวณนอกลวดลาย

เบอร์กระดาศกรอง (ขนาดรูพรุน)	จำนวนครั้งที่พิมพ์น้ำซ้ำ (ครั้ง)											
	1			2			3			4		
	เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการ จุ่ม (วินาที)		
	3	8	60	3	8	60	3	8	60	3	8	60
41 (20-25 μ m)	\circ	\circ	x	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ
1 (11 μ m)	\triangle	\triangle	x	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ
3 (6 μ m)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

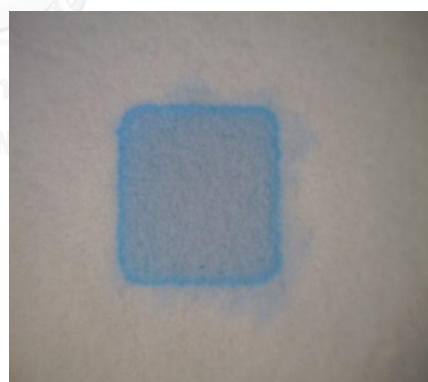
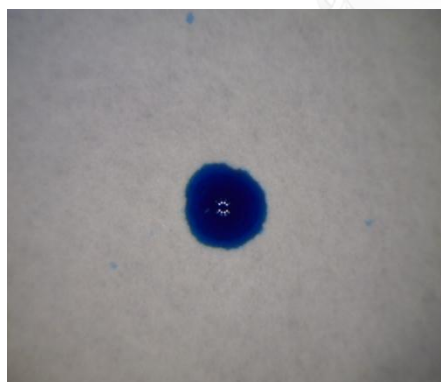
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการทดลองสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3%

จากตารางที่ 3.3 สามารถสรุปได้ว่าสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3% ที่จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ของกระดาศกรองเบอร์ 41 สร้างให้เกิดลวดลายได้ เนื่องจากกระดาศมีรูพรุนใหญ่น้ำจึงสามารถแทรกซึมสู่ผิวกระดาศได้ง่ายกว่า สำหรับกระดาศที่มีรูพรุนมีขนาดเล็ก เช่น กระดาศกรองเบอร์ 1 จึงต้องมีการพิมพ์น้ำที่จำนวนครั้งที่มากขึ้นเพื่อสร้างให้เกิดเป็นลวดลายได้

จากรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3% a.) กระดาษกรองเบอร์ 41 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที
 b.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที
 c.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที
 d.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 2 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 8 วินาที



a.) กระดาษกรองเบอร์ 41 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที b.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที



c.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที d.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 2 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 8 วินาที

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3%

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดลองที่สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5% ที่กระดาชกรองเบอร์ 41, 1, 3 ใช้จำนวนในการพิมพ์ซ้ำ 1, 2, 3, 4 ครั้ง และระยะเวลาที่จุ่มเป็นระยะเวลา 3, 8, 60 วินาที โดยที่ X แทนข้อมูลในตาราง คือ น้ำหมึกซึมออกนอกบริเวณลวดลายที่ออกแบบ หรือ มีน้ำหมึกไม่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบ \triangle แทนข้อมูลในตาราง คือ บางครั้งน้ำหมึกซึมอยู่ในบริเวณลวดลาย แต่บางครั้งน้ำหมึกไม่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบ O แทนข้อมูลในตาราง คือ หมึกอยู่เต็มบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบโดยที่ไม่มีการซึมออกบริเวณนอกลวดลาย

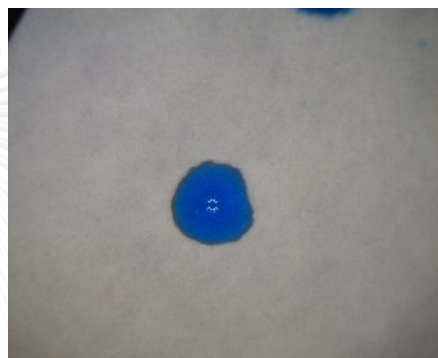
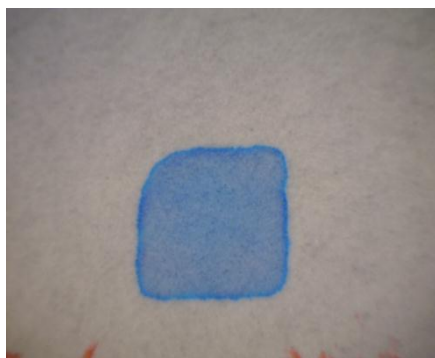
เบอร์กระดาชกรอง (ขนาดรูพรุน)	จำนวนครั้งที่พิมพ์น้ำซ้ำ (ครั้ง)											
	1			2			3			4		
	เวลาที่ใช้ในการจุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการจุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการจุ่ม (วินาที)			เวลาที่ใช้ในการจุ่ม (วินาที)		
	3	8	60	3	8	60	3	8	60	3	8	60
41 (20-25 μ m)	\triangle	x	x	O	O	O	O	O	O	O	O	O
1 (11 μ m)	x	x	x	O	O	O	O	O	O	O	O	O
3 (6 μ m)	x	x	x	O	O	O	O	O	O	O	O	O

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลการทดลองสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5%

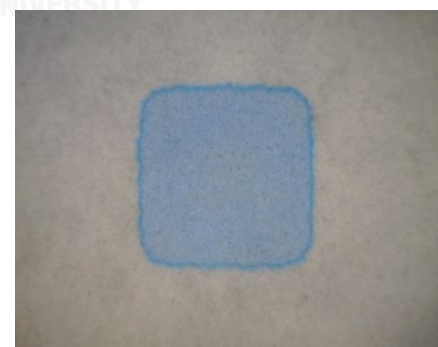
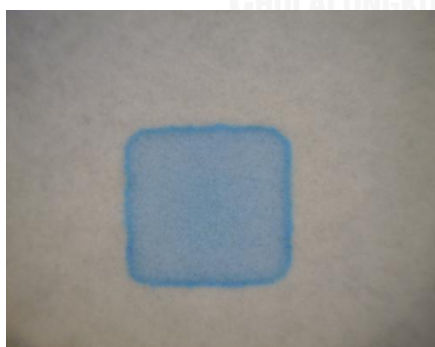
จากตาราง 3.4 สามารถสรุปได้ว่าสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5% เนื่องจากมีความเข้มข้นที่มากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ไม่เกิดเป็นลวดลายที่ออกแบบไว้ จึงต้องใช้จำนวนครั้งในการพิมพ์ที่มากขึ้น แต่เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับกระดาชกรองเบอร์ 3 เนื่องจากกระดาชกรองมีความหนามากกว่ากระดาชกรองเบอร์อื่นจึงต้องใช้ความเข้มข้นที่มากขึ้นแม้จะมีรูพรุน

น้อยที่สุดก็ตาม โดยที่ความเข้มข้นที่น้อยกว่า 5% สำหรับกระดาษเบอร์ 3 หมึกจะซึมออกจากบริเวณที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5% a.) กระดาษกรองเบอร์ 41 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที
b.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 8 วินาที
c.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 3 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที
d.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 2 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที



a.) กระดาษกรองเบอร์ 41 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที b.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 8 วินาที



c.) กระดาษกรองเบอร์ 1 จำนวนการพิมพ์ 3 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที d.) กระดาษกรองเบอร์ 3 จำนวนการพิมพ์ 2 ครั้ง ระยะเวลาในการจุ่ม 3 วินาที

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชุดทดสอบของสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5%

3.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ว่าถ้าใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปอาจทำให้สร้างเป็นลวดลายไม่ได้ เช่น ที่กระดาษกรองเบอร์ 1 และ 41 ที่การพิมพ์ 1 ครั้ง แต่ถ้าใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่มีความเข้มข้นน้อยเกินไปอาจทำให้ลวดลายที่ได้ไม่เป็นลวดลายในส่วนที่ต้องการ เช่น ที่กระดาษกรองเบอร์ 3 ที่การพิมพ์ 2 ครั้ง

นอกจากจากนี้รูพรุนของกระดาษยังมีผลต่อการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองด้วย โดยที่จะเห็นได้ว่า กระดาษกรองเบอร์ 41 ซึ่งมีขนาดรูพรุน 20-25 μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ากระดาษกรองเบอร์ 1 ซึ่งมีขนาดรูพรุน 11 μm และ เบอร์ 3 ซึ่งมีขนาดรูพรุน 6 μm จะสามารถสร้างเป็นลวดลายได้ง่ายกว่ากระดาษกรองซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็กเนื่องจากน้ำสามารถซึมลงสู่กระดาษได้ง่ายกว่าจึงเป็นเหตุผลที่ว่า กระดาษกรองเบอร์ 41 การพิมพ์น้ำ 1 ครั้ง ก็สามารถสร้างเป็นลวดลายได้ อีกทั้งยังเป็นการลดเวลาที่ใช้สร้างลวดลายอีกด้วย

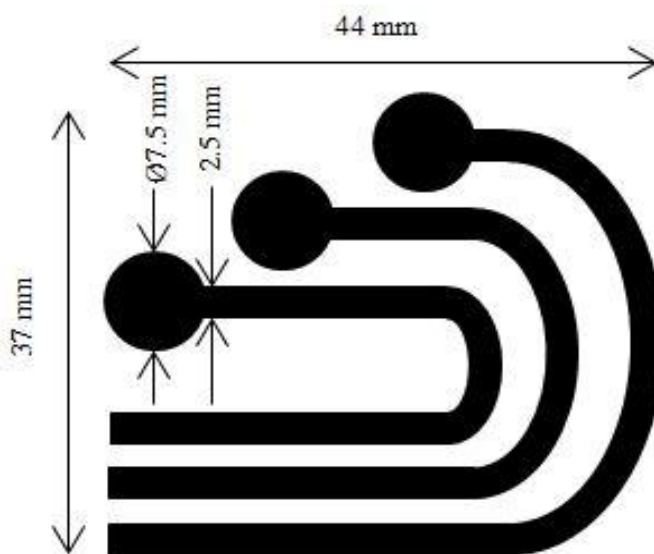
3.6 การประยุกต์ใช้วิธี Water mask สร้างอุปกรณ์ประเภทกระดาษ

จากวิธีต่างๆที่เคยมีการสร้างเป็นอุปกรณ์ประเภทกระดาษจะเห็นได้ว่าเป็นวิธีที่ค่อนข้างมีราคาแพง ซึ่งวิธี Water mask เป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ โดยสามารถนำมาสร้างลวดลายบนกระดาษได้โดยง่ายจากเงื่อนไขที่เหมาะสมดังหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

3.6.1 การสร้างช่องทางขนาดเล็กด้วยวิธี Water mask

3.6.1.1 การออกแบบช่องทางขนาดเล็ก

จากรูปที่ 3.9 แสดงลวดลายของช่องทางขนาดเล็กโดยประกอบไปด้วยท่อทั้งหมด 3 ท่อ และมีหลุมทั้ง 3 หลุมไว้สำหรับใส่หมึก โดยจะทดสอบด้วยการหยดหมึกสีแดง น้ำเงิน เขียว เพื่อทำการทดสอบ



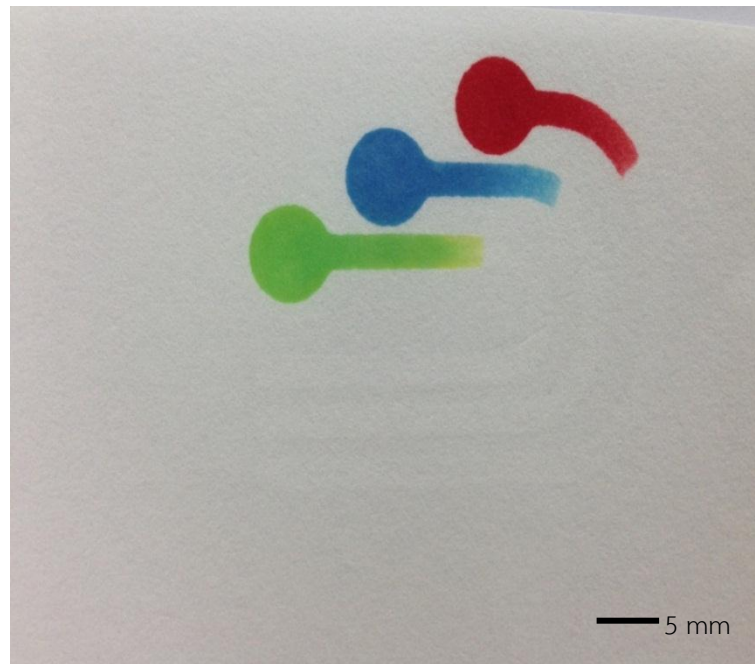
รูปที่ 3.9 รูปแบบลวดลายของช่องทางขนาดเล็ก

3.6.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

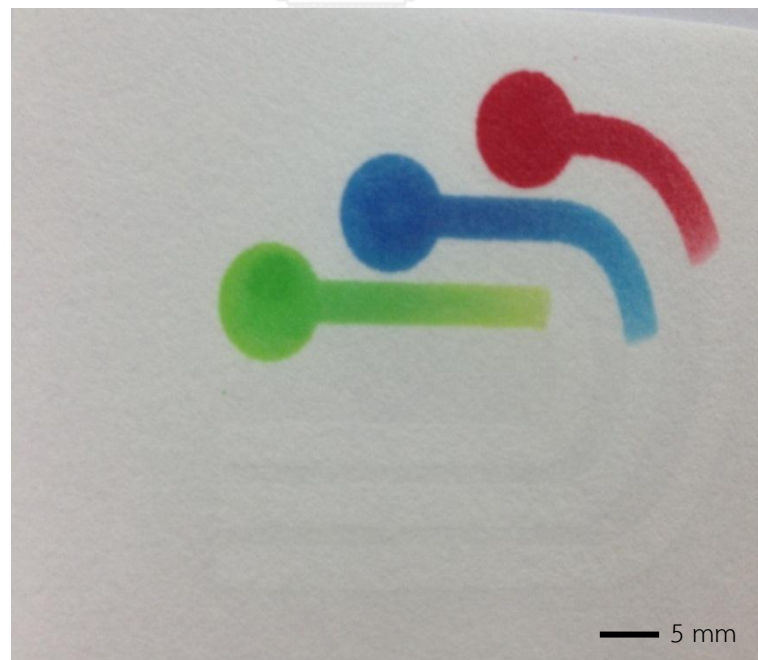
1. ออกแบบช่องทางขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. พิมพ์ช่องทางขนาดเล็กที่ได้ออกแบบไว้ด้วยน้ำลงบนกระดาษกรองเบอร์ 41
3. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3%
4. นำกระดาษกรองขึ้นมาและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารละลาย Polystyrene และน้ำระเหยออกไป บริเวณที่พิมพ์น้ำลงไปจะเกิดเป็นลวดลายที่ออกแบบขึ้น ส่วนบริเวณรอบๆจะมี Polystyrene เคลือบอยู่ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ
5. นำไปทดสอบด้วยการหยดหมึกสีแดง สีน้ำเงินและสีเขียว ลงบนหลุมช่องทางขนาดเล็ก

3.6.1.3 ผลการทดลอง

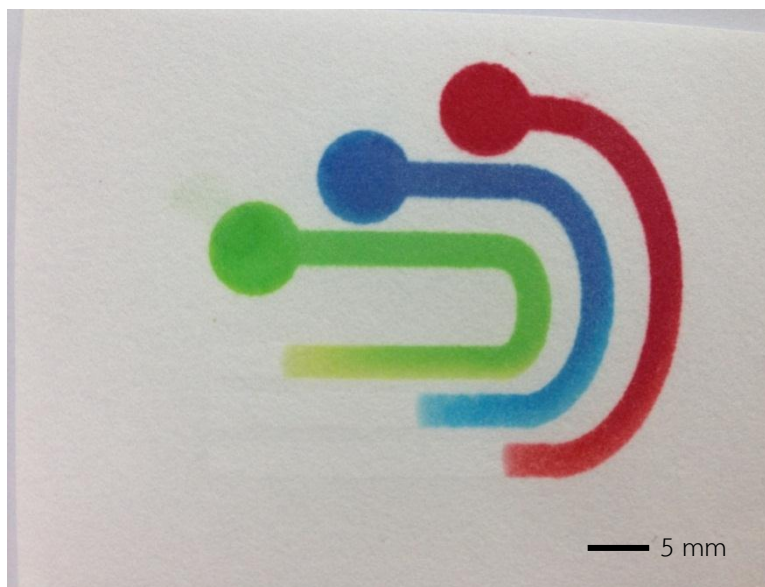
รูปที่ 3.10-3.13 แสดงช่องทางขนาดเล็กที่ได้มีการหยดหมึกสีแดง น้ำเงิน เขียว เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที, 1 นาที, 7 นาที และ 10 นาที ตามลำดับโดยจะสังเกตเห็นได้ว่าจะใช้เวลาในกระบวนการ 10 นาที หมึกสีทั้ง 3 สี จึงสามารถซึมไปจนถึงเส้นทางของช่องทางขนาดเล็กได้โดยไม่มีการรั่วซึมของหมึกสีออกมานอกบริเวณลวดลาย



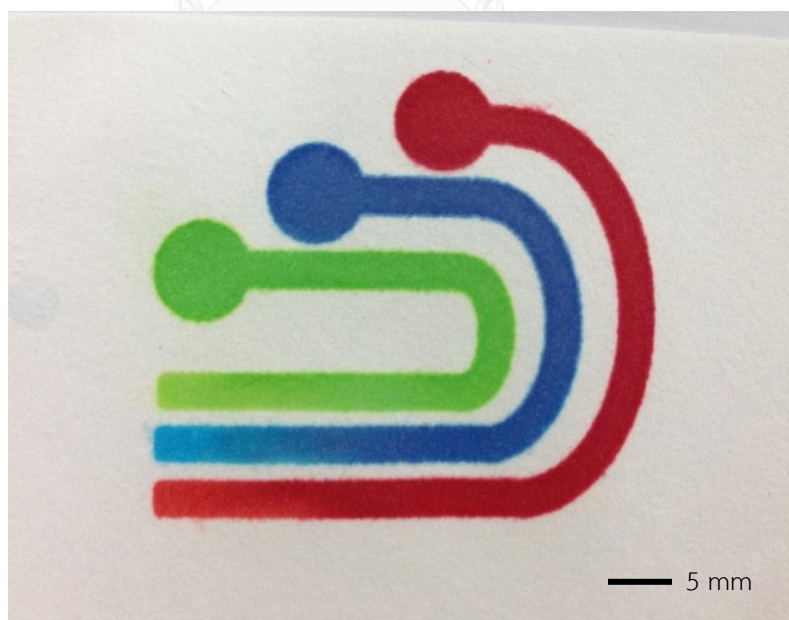
รูปที่ 3.10 ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที



รูปที่ 3.11 ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที



รูปที่ 3.12 ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที



รูปที่ 3.13 ลักษณะลวดลายช่องทางขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที

3.6.1.4 สรุปผลการทดลอง

การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask ซึ่งใช้กระดาษกรองเบอร์ 41 สาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3% โดยใช้การพิมพ์น้ำเพียงครั้งเดียวสามารถสร้างเป็นช่องทางขนาดเล็กได้ อีกทั้งช่องทางขนาดเล็กยังปราศจากการรั่วซึมของหมึกสีอีกด้วย โดยใช้เวลาในการซึมของหมึกสีไปจนสุดทางประมาณ 10 นาที

3.6.1.5 ข้อเสนอแนะ

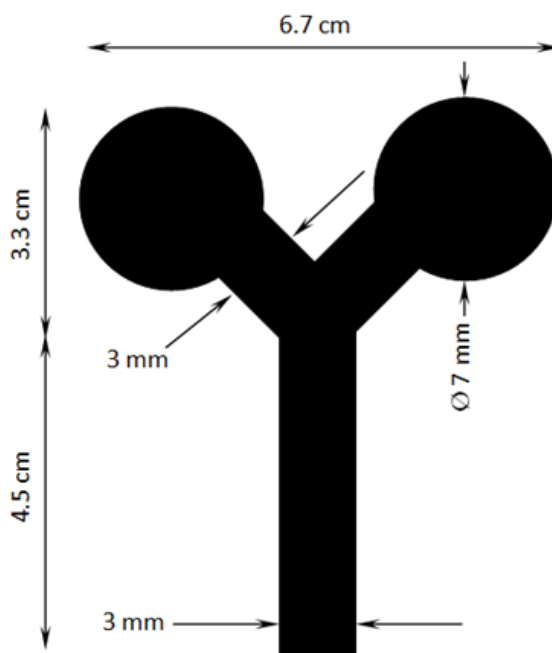
ในการทดลองนี้สามารถใช้กระดาษกรองเบอร์อื่นซึ่งมีรูพรุนเล็กกว่าได้ เช่น กระดาษกรองเบอร์ 1 (11 μm) และ กระดาษกรองเบอร์ 3 (6 μm) ซึ่งกระดาษกรองทั้ง 2 เบอร์นี้มีความหนาที่มากกว่ากระดาษกรองเบอร์ 41 ทำให้กักเก็บสารหรือหมึกสีได้มากกว่า แต่มีข้อเสียก็ต้องใช้จำนวนในการพิมพ์น้ำที่มากขึ้น ซึ่งเป็นการเสียเวลาในกระบวนการสร้างลวดลายช่องทางขนาดเล็ก ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้อีกด้วย

3.6.2 การสร้างต้นแบบแล็บบนชิปประเภทกระดาษโดยวิธีการ Water mask

อุปกรณ์ต้นแบบแล็บบนชิปได้ถูกนำมาพัฒนาจากงานที่เคยมีมา [6] โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 41 แทนกระดาษกรองเบอร์ 1 เนื่องจากกระดาษกรองเบอร์ 41 มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ากระดาษกรองเบอร์ 1 จึงทำให้น้ำที่พิมพ์ลงไปแทรกซึมสู่เนื้อกระดาษได้ดีกว่าจึงเกิดเป็นลวดลายได้ง่ายกว่าด้วยการพิมพ์น้ำเพียงแค่ 1 ครั้ง ในสาร Polystyrene ที่ละลายในสาร Toluene ที่ความเข้มข้น 3%

3.6.2.1 การออกแบบต้นแบบแล็บบนชิปประเภทกระดาษ

จากรูป 3.14 แสดงลวดลายของต้นแบบแล็บบนชิปประเภทกระดาษที่ประกอบด้วยท่อที่แยกออกเป็น 2 ทาง และหลุม 2 หลุม เพื่อทดสอบสาร 2 ชนิด คือ สารที่ใช้ทดสอบความเข้มข้นของโปรตีน และ สารที่ใช้ทดสอบสภาพความเป็นกรด ต่าง



รูปที่ 3.14 รูปแบบลวดลายต้นแบบแล็บบนชิปประเภทกระดาษ

3.6.2.2 การเตรียมสารที่ใช้ในการทดสอบ

1. สารที่ใช้ตรวจหาโปรตีนบริสุทธ์ (Bovine Serum Albumin, BSA) ใช้ Citrate Buffer 250 mL จำนวน 2 μ L ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้กันในการทดลองทั่วไป โดยจะนำไปหยดที่หลุมด้านซ้ายของต้นแบบแล็บบนชิป ต่อจากนั้นจะทำการหยด Tetrabromophenol blue 3.3 mL ซึ่งผสมใน 95% ของ Ethanol ลงบริเวณหลุมซ้ายที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งจะให้สีเหลือง หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แห้ง

2. สารที่ใช้ตรวจหาสภาพความเป็นกรด ต่าง ใช้ Litmas 0.01g/mL จำนวน 2 μ L หยดที่หลุมด้านขวาของต้นแบบแล็บบนชิป โดยที่หลุมด้านขวาจะให้สีน้ำเงิน คือมีสภาพเป็นเบส (pH > 7) หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แห้ง

3. สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ใช้ Citrate Buffer 125 mL กับ BSA 325 μ mol ผสมในน้ำ 10 mL โดยสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีค่า pH เท่ากับ 2.4

3.6.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ออกแบบลวดลายแล็บบนชิป ดังรูปที่ 4.3 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. พิมพ์น้ำลงบนบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ บนกระดาษกรองเบอร์ 41
3. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3%

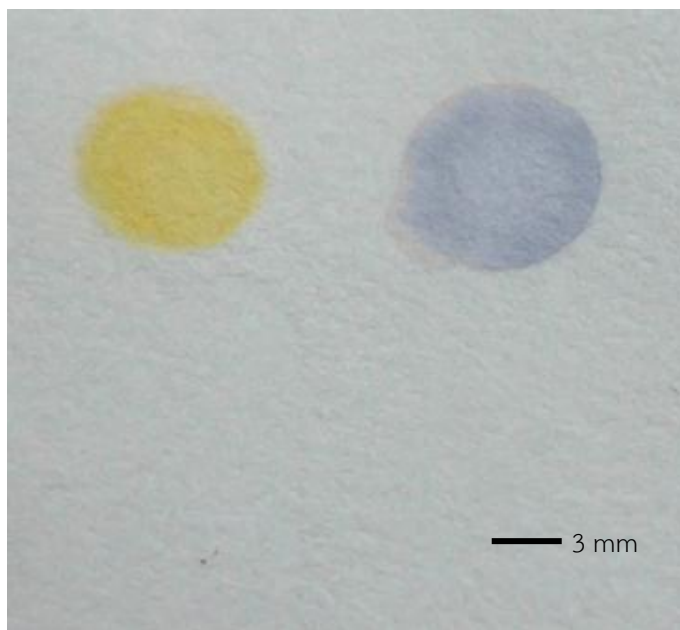
4. นำกระดาษกรองขึ้นมาและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารละลาย Polystyrene และน้ำระเหยออกไปบริเวณที่พิมพ์น้ำลงไปจะเกิดเป็นลวดลายที่ออกแบบขึ้น ส่วนบริเวณรอบๆจะมี Polystyrene เคลือบอยู่ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ

5. หลังจากนั้นเราจะทำการหยดสารที่ใช้ในการทดสอบลงที่บริเวณหลุมทั้ง 2 ข้าง โดยที่หลุมข้างซ้ายจะใส่สารที่ใช้ในการทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BSA) ให้สารที่มีสีเหลือง หลุมข้างขวาจะใส่สารในการทดสอบสภาพความเป็นกรด ต่าง ให้สารที่มีสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.14

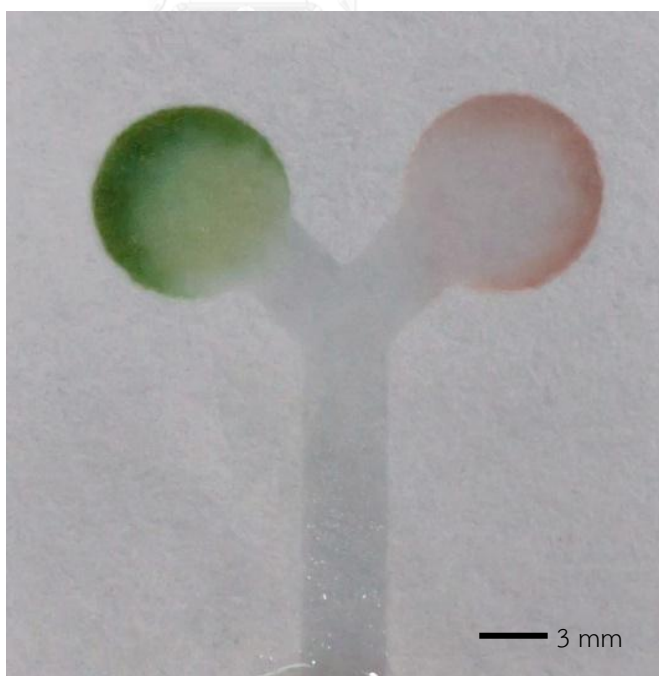
6. รอจนสารที่ใส่ไปในหลุมทั้ง 2 ข้างแห้ง ต่อจากนั้นจะทำการทดสอบสารละลาย ตัวอย่าง โดยนำแผ่นบชิปไปจุ่มในสารละลายตัวอย่างเพื่อให้สารละลายตัวอย่างไหลไปตามช่องทางการไหลจนไปถึงหลุมทั้ง 2 ข้าง โดยที่หลุมด้านซ้ายถ้าสารละลายที่นำมาทดสอบมีส่วนประกอบของโปรตีน สารที่หลุมด้านซ้ายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีเขียวและหลุมด้านขวาถ้าสารละลายที่นำมาทดสอบมีสภาพเป็นกรด สารที่หลุมด้านขวาจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ดังรูปที่ 3.15

3.6.2.4 สรุปผลการทดลอง

การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask ซึ่งใช้กระดาษกรองเบอร์ 41 สาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3% โดยใช้การพิมพ์น้ำเพียงครั้งเดียวสามารถสร้างเป็นต้นแบบแผ่นบชิปประเภทกระดาษได้ โดยที่เราได้ทำการใส่สารที่ใช้ในการทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BSA) ในหลุมข้างซ้าย และ สารที่ใช้ในการทดสอบสภาพความเป็นกรด ต่าง ในหลุมข้างขวา ผลการทดลองเมื่อจุ่มกระดาษกรองลงในสารทดสอบตัวอย่างจนสารตัวอย่างไปทำปฏิกิริยาสารที่อยู่ในหลุมทั้ง 2 ข้าง ผลคือ สารที่หลุมด้านซ้ายซึ่งมีสารที่ใช้ในการทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BSA)จะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีเขียว และหลุมด้านขวาซึ่งมีสารในการทดสอบสภาพความเป็นกรด ต่างจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง โดยใช้เวลาในกระบวนการ 20 นาที ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ลักษณะลวดลายหลังจากหยดสารทดสอบโปรตีนบริสุทธ์ (BSA) ที่หลุมซ้าย และ สารทดสอบความเป็นกรดต่างที่หลุมขวา



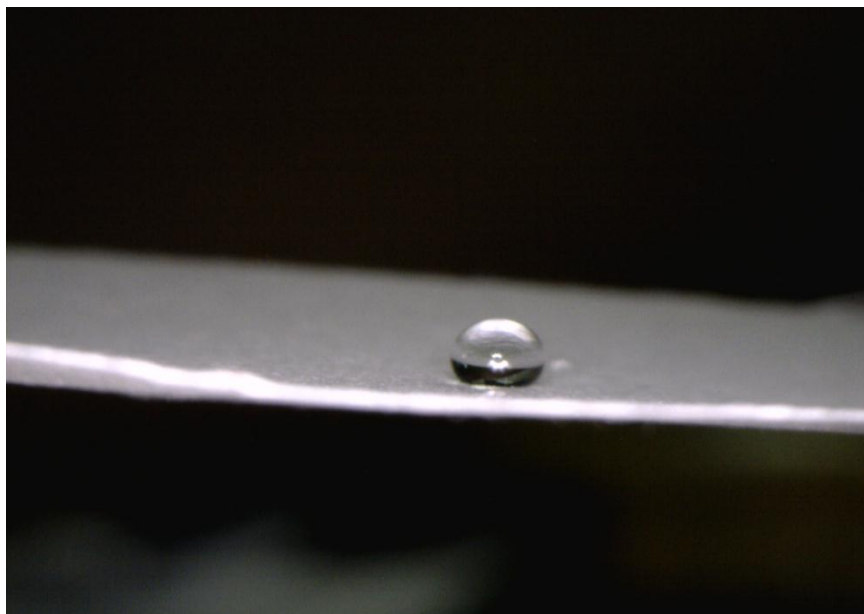
รูปที่ 3.16 ลักษณะลวดลายหลังจากนำมาทดสอบกับสารตัวอย่าง เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที

3.7 การพัฒนาวิธีการ Water mask โดยการใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง

จากบทนี้จะเห็นได้ว่าวิธีการ Water mask เป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำโดยการใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทซึ่งมีราคาถูก และหาซื้อได้ง่ายแต่เนื่องจากวิธี Water mask โดยการใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene มีข้อจำกัดในเรื่องความหลากหลายของสารที่จะนำมาสร้างลวดลายโดยไม่สามารถใช้ได้กับสารที่มีแรงดึงผิวสูง เนื่องจากเมื่อหยดสาร สารจะไม่ซึมลงบนกระดาษ กล่าวคือ วิธีนี้ใช้ได้กับสารบางประเภท เช่น แล็บนชิปต้นแบบ สำหรับทดสอบความเข้มข้นของโปรตีนบริสซูร์ (BSA) และทดสอบสภาพความเป็นกรดต่าง [6] งานวิจัยจึงสังเกตเห็นความสำคัญในส่วนนี้ จึงได้พัฒนาวิธีการ Water mask โดยการใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง (super hydrophobic) เพื่อเพิ่มทางเลือกในการใช้สารที่หลากหลายขึ้นในการนำมาใช้เป็นลวดลายบนกระดาษ เช่นสารละลายคาร์บอน (carbon) สารละลายซิลเวอร์ (silver) โดยสารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงที่นำมาใช้ คือ สาร Octadecyltrichlorosilane (OTS) ที่ละลายในสารละลาย n-hexane ซึ่งโดยปกติสารนี้จะถูกใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยวิธีฉายแสง (photolithography) [2] เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติไวต่อแสง เมื่อโดนแสง UV กระดาษที่นำไปจุ่มในสาร OTS จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) กลายเป็นบริเวณที่ชอบน้ำ (hydrophilic)

3.7.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมของสาร OTS

ในส่วนของการทดลองเบื้องต้นจะทำการทดลองนำกระดาษกรองเบอร์ 41 เนื่องจากเป็นกระดาษกรองที่มีรูพรุนใหญ่จึงสร้างให้เกิดเป็นลวดลายได้ง่าย โดยนำไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร โดยจุ่มเป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้นที่ 3 % โดยมวลต่อปริมาตร ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างลวดลายด้วยวิธีการ Water mask บนกระดาษกรองเบอร์ 41 เพื่อดูความแตกต่างของหยดน้ำ จากรูป 3.17 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร จากรูป 3.18 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 3% โดยมวลต่อปริมาตร จะสังเกตเห็นได้ว่าหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสาร OTS จะมีลักษณะหยดน้ำเป็นทรงกลมเหมือนหยดน้ำที่อยู่บนใบบัว เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)



รูปที่ 3.17 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS)
ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% (v/v)



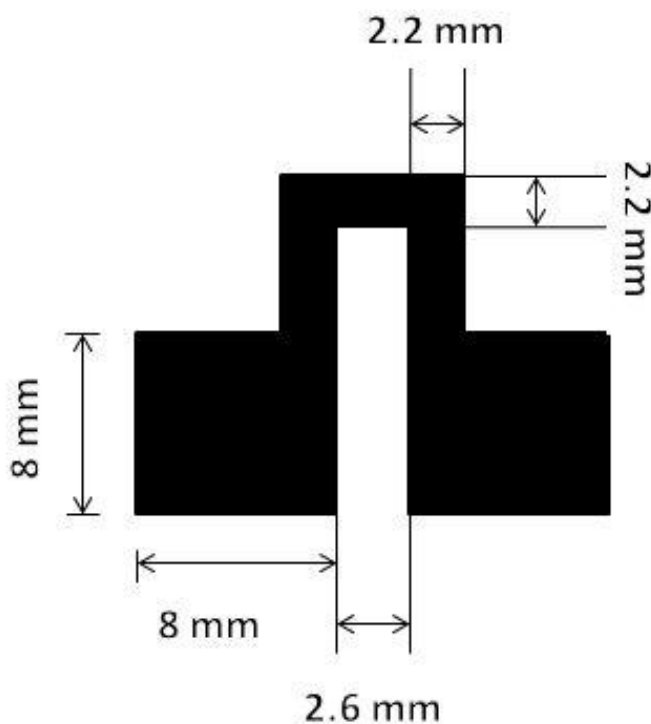
รูปที่ 3.18 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่จุ่มในสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene
ที่ความเข้มข้น 3% (m/v)

3.7.2 การประยุกต์ใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงกับวิธี Water mask

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร ก็เพียงพอที่จะทำให้กระดาษมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง (super hydrophobic) จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้กับวิธี Water mask โดยเปลี่ยนจากสาร Polystyrene ใน Toluene มาเป็นสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane แทน

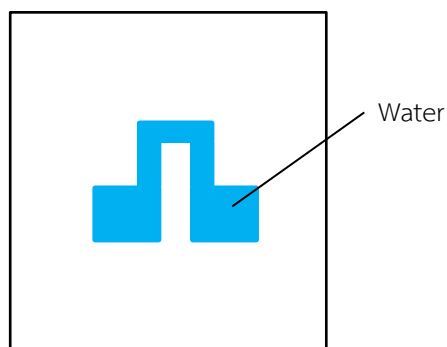
3.7.2.1 การทดลองในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของวิธีการ Water mask โดยใช้สาร OTS เป็นการหาที่เงื่อนไขที่เหมาะสมของกระดาษกรอง (filter paper) เบอร์ 41 เนื่องจากมีรูพรุนมากที่สุด จึงสร้างให้เกิดเป็นลวดลายได้เร็วและง่ายที่สุด โดยใช้สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร ใช้จำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำซ้่าในบริเวณที่เราได้ออกแบบที่จำนวน 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ครั้ง ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนวิธีการทดลองดังนี้

1. ทำการออกแบบลวดลายโดยใช้คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.19



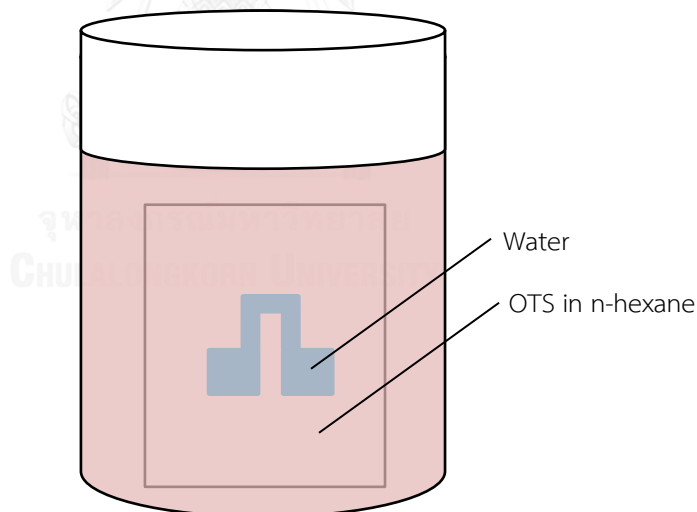
รูปที่ 3.19 รูปแบบลวดลายวงจรด้วยคอมพิวเตอร์

2. พิมพ์น้ำลงบนกระดาษกรองโดยใช้เครื่องพิมพ์ Epson โดยจะทำการที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้ ที่จำนวนการพิมพ์น้ำ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ครั้ง ได้เป็นลวดลายดังรูปที่ 3.20



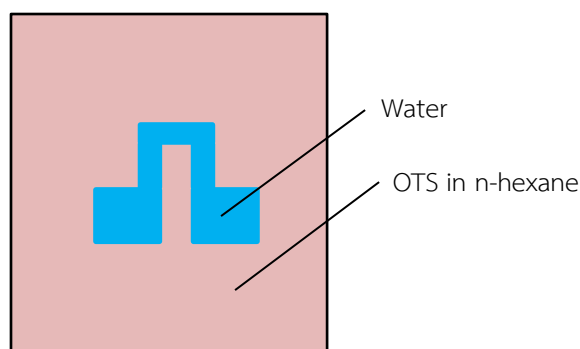
รูปที่ 3.20 การพิมพ์วงจรด้วยน้ำลงบนกระดาษกรอง

3. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร เป็นเวลา 5 นาที ดังรูปที่ 3.21



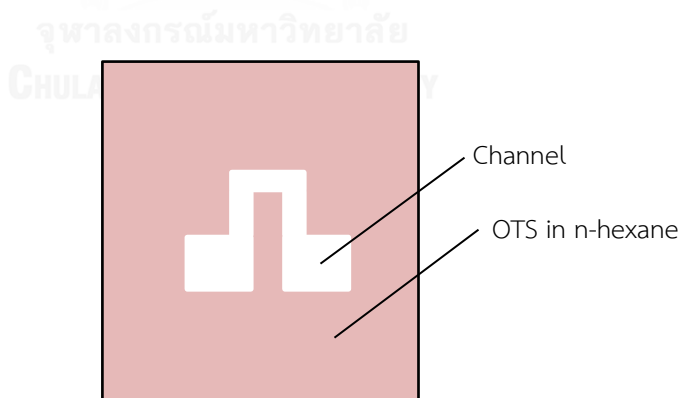
รูปที่ 3.21 การจุ่มในสาร Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane

4. หลังจากจุ่มเสร็จจึงนำชิ้นมาจะสังเกตเห็นบริเวณที่พิมพ์ด้วยน้ำแยกออกจากสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane อย่างชัดเจน ดังรูป 3.22



รูปที่ 3.22 การนำออกมาหลังจากจุ่มในสาร Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane

5. นำมาล้าง (Rinse) โดยการฉีดด้วยสารละลาย n-hexane เพื่อให้สาร OTS บางส่วนที่ติดบริเวณ ลวดลายที่ได้ออกแบบไว้หลุดออกมาจากบนพื้นผิวกระดาษ จากนั้นจึงล้างตามด้วย Ethanol ต่อมาใช้ แก๊สไนโตรเจนเป่าให้แห้ง ประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นจึงทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน ได้เป็นลวดลายที่ ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.23 แล้วจึงนำชิ้นงานมาทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.23 ลักษณะลวดลายของวงจรหลังปล่อยให้แห้ง

6. เมื่อแห้งแล้วจึงนำชุดทดลองไปทดสอบโดยการนำชิ้นงานของเราไปจุ่มลงในสารคาร์บอนซึ่งละลาย ในน้ำเป็นอัตราส่วน 1:10 เป็นเวลาประมาณ 10 วินาที

3.7.2.2 ผลการทดลอง

1. จากรูป 3.24 กระดาษกรองเบอร์ 41 ที่จำนวนการพิมพ์น้ำ 1 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่า สารละลายคาร์บอนติดกับกระดาษกรองเพียงบางส่วน เนื่องจากน้ำที่พิมพ์ลงไปมีปริมาณที่น้อยเกินไป



รูปที่ 3.24 วงจรที่พิมพ์น้ำ 1 ครั้ง

2. จากรูป 3.25 กระดาษกรองเบอร์ 41 ที่จำนวนการพิมพ์น้ำ 2 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่า สารละลายคาร์บอนจะติดกับกระดาษกรองมากขึ้นกว่าการพิมพ์น้ำ 1 ครั้ง เนื่องจากน้ำที่มีปริมาณมากขึ้นจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นหน้ากักป้องกันสารละลาย OTS ไม่ให้เข้ามาบริเวณลวดลายที่ได้ ออกแบบไว้ได้ดีขึ้นในขณะที่นำไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane แต่คาร์บอนก็ยังติดในปริมาณที่น้อยอยู่ โดยที่ติดเพียงแค่บางบริเวณของลวดลายที่ได้ ออกแบบไว้



รูปที่ 3.25 วงจรที่พิมพ์น้ำ 2 ครั้ง

3. จากรูป 3.26 กระดาษกรองเบอร์ 41 ที่จำนวนการพิมพ์น้ำ 3 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่า สารละลายคาร์บอนจะติดกับกระดาษกรองมากขึ้นกว่าการพิมพ์น้ำ 2 ครั้ง เนื่องจากน้ำที่มีปริมาณมากขึ้นจึงทำหน้าที่เหมือนเป็นหน้ากักป้องกันสารละลาย OTS ไม่ให้เข้ามาบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ได้ดีขึ้นในขณะที่นำไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ในขณะที่คาร์บอนติดบนลวดลายที่ออกแบบไว้ได้มากขึ้น



รูปที่ 3.26 วงจรที่พิมพ์น้ำ 3 ครั้ง

4. จากรูป 3.27 กระดาษกรองเบอร์ 41 ที่จำนวนการพิมพ์น้ำ 4 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่า สารละลายคาร์บอนจะติดกับกระดาษกรองได้ทั่วบริเวณของลวดลาย เนื่องจากน้ำที่มีปริมาณมากขึ้น จึงทำหน้าที่เหมือนเป็นหน้ากักป้องกันสารละลาย OTS ไม่ให้เข้ามาบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ ในขณะที่นำไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane



รูปที่ 3.27 วงจรที่พิมพ์น้ำ 4 ครั้ง

5. จากรูปที่ 3.28 กระดาษกรองเบอร์ 41 ที่จำนวนการพิมพ์น้ำ 5 ครั้ง จะสังเกตเห็นได้ว่า สารละลายคาร์บอนจะติดกับกระดาษกรองได้ทั่วบริเวณของลวดลาย เนื่องจากน้ำที่มีปริมาณมากขึ้น จึงทำหน้าที่เหมือนเป็นหน้ากากป้องกันสารละลาย OTS ไม่ให้เข้ามาบริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ ในขณะที่นำไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane

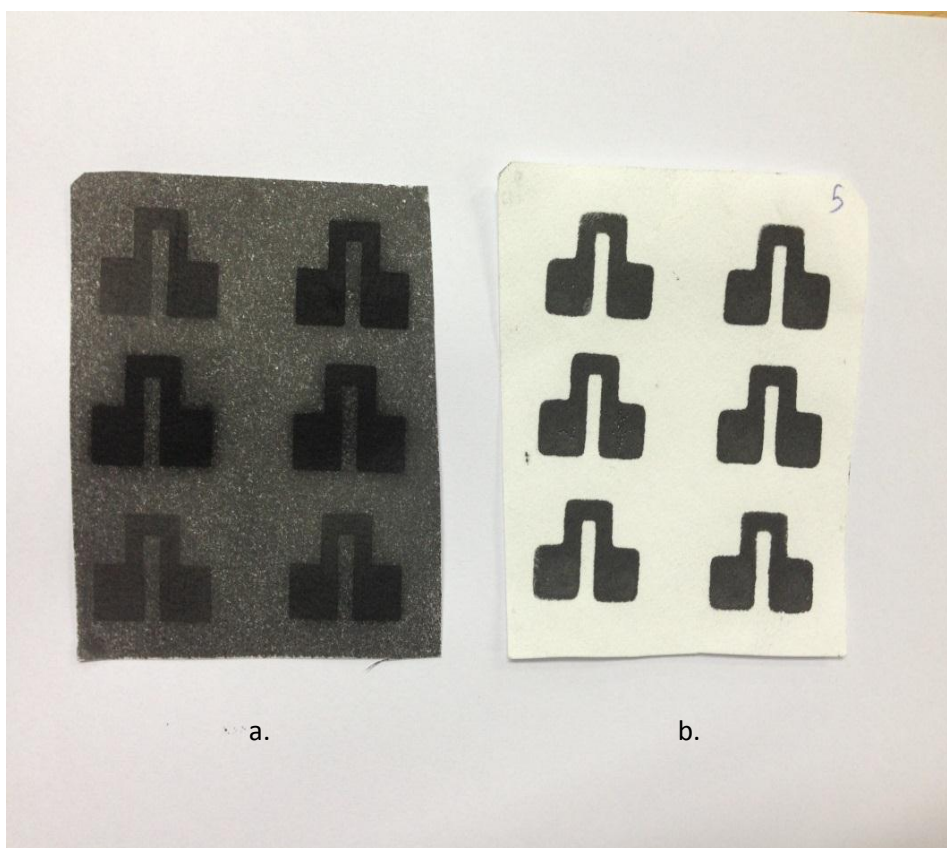


รูปที่ 3.28 วงจรที่พิมพ์น้ำ 5 ครั้ง

3.7.2.3 สรุปผลการทดลอง

การใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene มีข้อจำกัดในเรื่องความหลากหลายของสารที่จะนำมาสร้างลวดลาย กล่าวคือ วิธีนี้ใช้ได้กับสารบางประเภท ดังตัวอย่างในรูป 3.28 ที่แสดงการเปรียบเทียบการสร้างลวดลายโดยใช้วิธีการ Water mask ซึ่งใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene เทียบกับ สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane โดยใช้วิธีการจุ่ม ซึ่งสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ใช้ได้เพียงการหยดลงบนกระดาษเท่านั้น เนื่องจากถ้านำไปจุ่มในสารคาร์บอนจะทำให้คาร์บอนเปื้อนบริเวณรอบนอกลวดลาย เพราะสาร Polystyrene ไม่สามารถป้องกันสารละลายคาร์บอนได้ การทดลองนี้จึงได้พัฒนาวิธีการ Water mask โดยการประยุกต์ใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง (super hydrophobic) เพื่อเพิ่มทางเลือกในการใช้สารที่หลากหลายขึ้นในการนำมาใช้เป็นลวดลายบนกระดาษ และเปลี่ยนจากหยดสารมาใช้ในการจุ่มลงในสารแทน เช่น ในการทดลองนี้ใช้สารละลายคาร์บอน อีกทั้งยังสามารถผลิตได้ที่

ละหลายๆชิ้นงานในกระบวนการผลิต โดยที่ผลการทดลองสำหรับกระดาษกรองเบอร์ 41 สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 1% ที่การพิมพ์น้ำ ตั้งแต่ 4 ครั้งขึ้นไป สามารถสร้างเป็นลวดลายที่เราต้องการได้ เนื่องจากปริมาณน้ำมากพอที่จะเป็น หน้ากากป้องกัน สาร OTS ได้ แต่ในกรณีที่พิมพ์น้ำมากเกินไปก็จะส่งผลให้ลวดลายที่ได้มีขนาดใหญ่ กว่าของลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระดาษเบอร์ 41 ซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่ น้ำจึงแทรกซึมเข้าไป ได้มากกว่ากระดาษที่มีรูพรุนขนาดเล็ก



รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบการสร้างลวดลายโดยใช้วิธีการ Water mask ซึ่งใช้สาร Polystyrene ใน สารละลาย Toluene กับ สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane

- a.) ใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ทดลองโดยนำไปจุ่มในคาร์บอน
- b.) ใช้สารละลาย OTS ในสารละลาย n-hexane ทดลองโดยนำไปจุ่มในคาร์บอน

3.7.2.4 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแต่ละชิ้นงานที่บริเวณด้านข้างรอบๆ ลวดลายที่ได้ ออกแบบไว้ มีคาร์บอนติดอยู่ในบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้คาร์บอนติดอยู่ เนื่องจากในขนาดที่ฉีดล้าง (Rinse) โดยใช้สารละลาย n-hexane และ Ethanol เราต้องทำการ ล้างทั้งชิ้นงาน จึงทำให้มีสาร OTS ที่ติดอยู่บนผิวกระดาษทั้งในลวดลายที่ออกแบบไว้ และบริเวณรอบนอกถูกกำจัดออกไปบางส่วนทำให้บริเวณรอบนอกลวดลายมีบางจุดที่ยังเป็นบริเวณชอบน้ำอยู่ จึงทำให้มีรอยเปื้อนของคาร์บอนอยู่ทั่วไป นอกจากนี้ในการฉีดล้างยังมีผลต่อปริมาณคาร์บอนที่ติดอยู่ที่ บริเวณลวดลายที่ได้ออกแบบไว้หลังจากนำไปจุ่มในคาร์บอนอีกด้วย โดยถ้าล้างในปริมาณมากก็จะ ส่งผลให้บริเวณลวดลายเก็บคาร์บอนได้มากขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ บริเวณรอบนอกก็จะมีคาร์บอนติด มากตามไปด้วย ซึ่งทางคณะวิจัยจะนำไปพัฒนาต่อไป



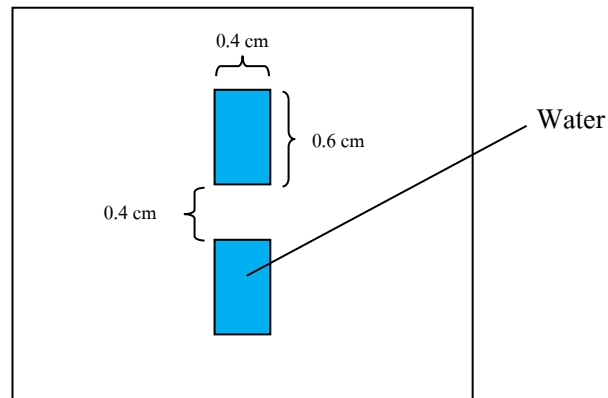
บทที่ 4

การพัฒนาการสร้างลวดลายบนกระดาษแบบ 3 มิติ

บทนี้จะได้กล่าวถึงการประยุกต์วิธีการ Water mask มาใช้สร้างลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังเป็นการสร้างลวดลายบนกระดาษเพียงแผ่นเดียว ซึ่งต่างจากวิธีการสร้างลวดลายแบบ 3 มิติที่เคยมีมา ที่เป็นการสร้างลวดลายบนกระดาษหลายชั้น และยังมีราคาแพงเนื่องจากเป็นการสร้างลวดลายโดยใช้วิธีการฉายแสง (photolithography) [7] งานวิจัยนี้จึงได้มีประยุกต์วิธีการ Water mask มาเป็นอีกทางเลือก โดยที่ในการสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติจะต้องใช้กระดาษรองซึ่งมีความหนาในระดับหนึ่ง เพื่อสร้างให้เกิดเป็นช่องทางการไหล ในส่วนการทดลองส่วนแรกเราจึงเลือกใช้กระดาษกระดาษรองเบอร์ 3 ซึ่งมีความหนา 390 μm โดยในการทดลองจะใช้สาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ซึ่งจากผลการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธี Water mask จากบทที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมกับกระดาษเบอร์ 3 คือสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5% โดยมวลต่อปริมาตร ดังตารางที่ 3.3 และในการพิมพ์น้ำนั้นจะทำการพิมพ์ทั้ง 2 ด้าน โดยพิมพ์ทำการซ้ำด้านละ 3 ครั้งของกระดาษเพื่อเป็นการสร้างเป็นลวดลายแบบ 3 มิติ

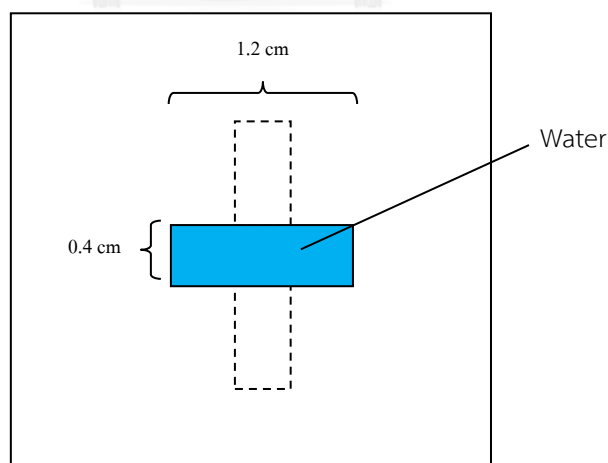
4.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้วิธีการ Water mask โดยทำการออกแบบลวดลายโดยใช้คอมพิวเตอร์หลังจากนั้นจึงทำการพิมพ์น้ำลงบนกระดาษรองด้านหน้าโดยทำที่กระดาษรองเบอร์ 3 เนื่องจากในการสร้างลวดลายแบบ 3 มิติ ต้องมีความหนาที่มากพอ โดยกระดาษเบอร์ 3 มีความหนา 390 μm ทำการพิมพ์ซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งเป็นจำนวนที่สามารถสร้างให้เกิดลวดลายได้ของกระดาษเบอร์ 3 โดยในส่วนของด้านหน้าของกระดาษรองนี้เราได้ออกแบบลวดลายช่องทางการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยม 0.6×0.4 เซนติเมตร จำนวน 2 รูป โดยมีระยะห่างกัน 0.4 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1



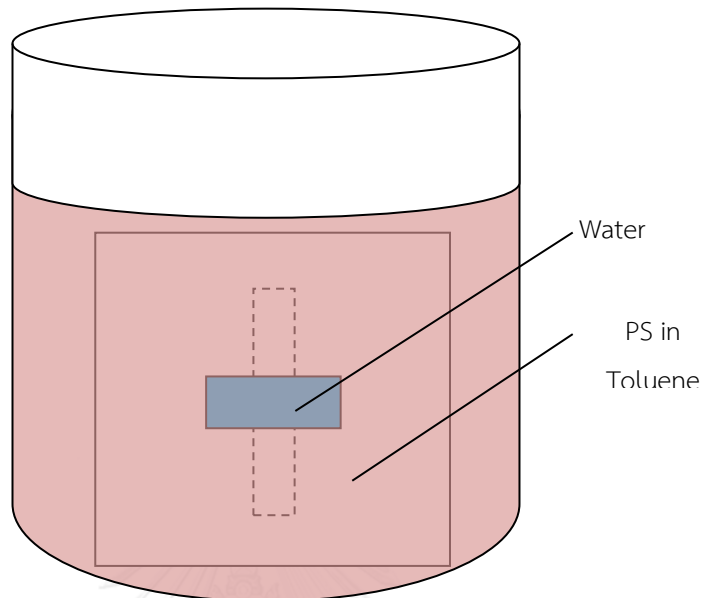
รูปที่ 4.1 รูปแบบลวดลายด้านหน้าของกระดาษกรอง

2. หลังจากนั้นจะพลิกกระดาษกรองเพื่อมาสร้างลวดลายด้านหลังของกระดาษกรองแผ่นเดิมและทำการออกแบบลวดลายด้านหลังของกระดาษโดยใช้คอมพิวเตอร์แล้วจึงทำการพิมพ์น้ำลงบนกระดาษกรอง ซึ่งทำการพิมพ์ซ้ำ 3 ครั้ง โดยในส่วนของด้านหลังของกระดาษกรองนี้เราได้ออกแบบลวดลายช่องทางการไหลเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 1.2×0.4 เซนติเมตร โดยจะทำการวางตำแหน่งของลวดลายกระดาษด้านหลังให้อยู่ในระหว่างลวดลายสี่เหลี่ยม 2 รูป ซึ่งเป็นลวดลายของกระดาษด้านหน้า ดังรูปที่ 4.2



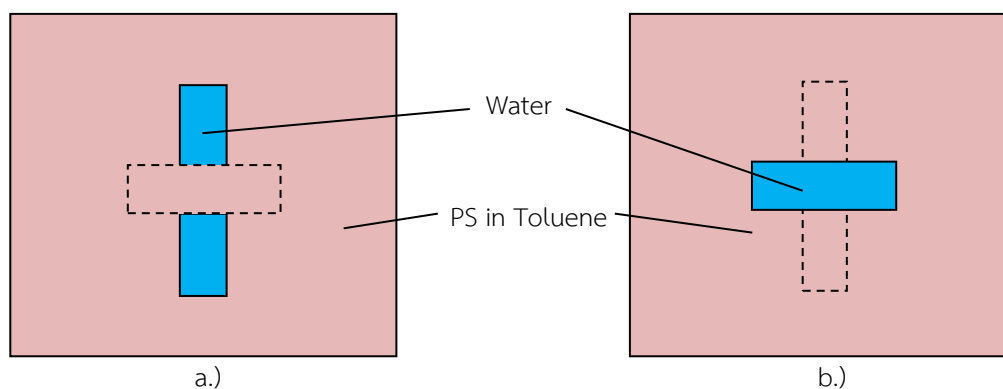
รูปที่ 4.2 รูปแบบลวดลายด้านหลังของกระดาษกรอง

3. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5% ดังรูปที่ 4.3



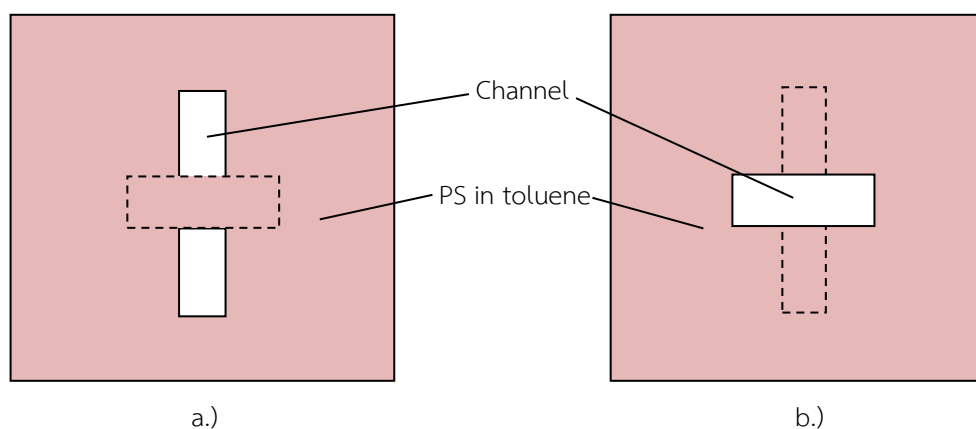
รูปที่ 4.3 การนำไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene 5%

4. หลังจากจุ่มเสร็จจึงนำขึ้นมาจะสังเกตเห็นบริเวณที่พิมพ์ด้วยน้ำแยกออกจากสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.4 หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แห้ง จะทำให้สารละลายและน้ำแห้งไปเหลือแต่สาร Polystyrene ที่เคลือบไว้บริเวณรอบลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 4.5 จึงเกิดเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ขึ้น ส่วนบริเวณที่เราออกแบบไว้เกิดเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) จึงได้เป็นลวดลายที่เราออกแบบไว้



รูปที่ 4.4 การนำออกมาหลังจากจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene 5%

a.) ส่วนด้านหน้าของกระดาษ b.) ส่วนด้านหลังของกระดาษ



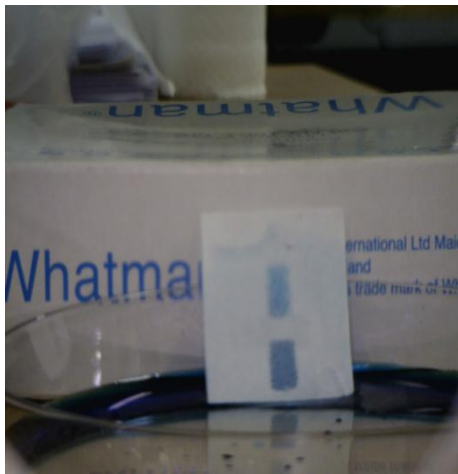
รูปที่ 4.5 ลักษณะลวดลายของโครงสร้าง 3 มิติหลังปล่อยให้แห้ง

a.) ด้านหน้าของกระดาษ b.) ด้านหลังของกระดาษ

5. เมื่อแห้งแล้วจึงนำชุดทดลองไปทดสอบโดยการจุ่มชุดทดลองลงในน้ำหมึก โดยน้ำหมึกจะค่อยๆ แทรกซึมขึ้นมาตามเส้นทางการเดินที่ได้ออกแบบไว้ เกิดเป็นลวดลายโครงสร้างแบบ 3 มิติ

4.2 ผลการทดลอง

จากรูป 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อจุ่มชุดทดลองลงในน้ำหมึก หมึกจะค่อยๆ แทรกซึมขึ้นมาตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อสังเกตที่บริเวณด้านหน้ากระดาษกรองจะเห็นว่าหลังจากน้ำหมึกซึมมาถึงบริเวณช่วงระหว่างกลาง น้ำหมึกจะซึมผ่านไปบริเวณด้านหลังกระดาษ เมื่อเวลาผ่านไปน้ำหมึกจึงซึมกลับมาบริเวณส่วนหน้าของกระดาษอีกครั้งตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ จากรูป 4.7 แสดงภาพตัดขวางของกระดาษบริเวณส่วนที่น้ำหมึกซึมผ่านจากด้านหน้ากระดาษไปสู่ด้านหลังของกระดาษ โดยจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสามารถสร้างเป็นโครงสร้างลวดลายแบบ 3 มิติได้ แต่ยังไม่สามารถแยกชั้นของลวดลายของกระดาษทั้ง 2 ด้านออกจากกันได้อย่างชัดเจน สมมติฐานเบื้องต้นอาจเกิดจากข้อจำกัดในส่วนของความหนาของกระดาษที่น้อยเกินไป จึงเป็นแนวทางในการปรับปรุงโดยการเพิ่มความหนาของกระดาษ นอกจากนี้อาจมีการเปลี่ยนสารที่ใช้ในวิธีการ Water mask โดยเปลี่ยนจากสาร Polystyrene ในสารละลาย Toluene มาเป็น สาร OTS ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงพิเศษ (super hydrophobic) โดยจะหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการสร้างลวดลายโครงสร้าง 3 มิติ ต่อไป



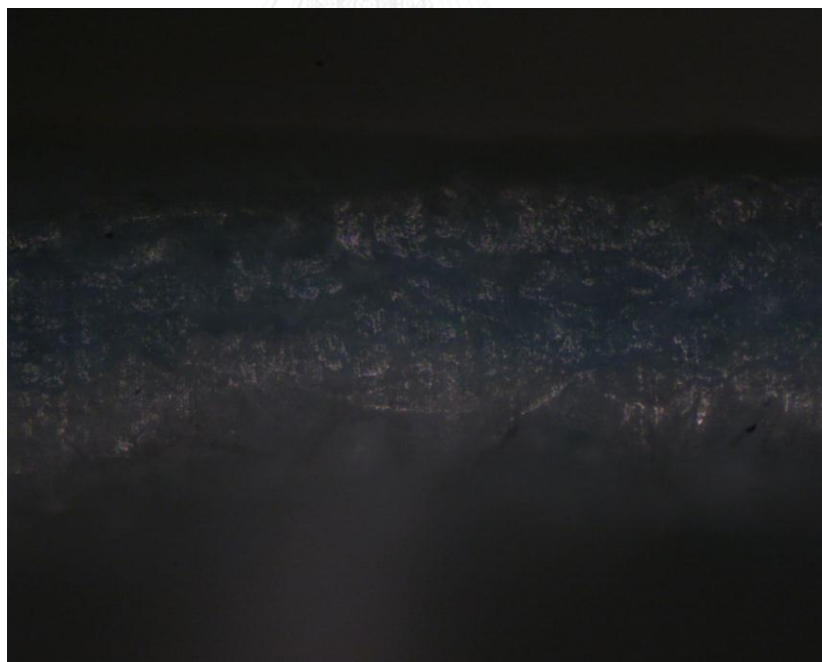
a.)



b.)

รูปที่ 4.6 รูปแบบลวดลาย 3 มิติที่เกิดขึ้นหลังจากกลุ่มชุดทดลองลงไปใต้น้ำหมึก

a.) ด้านหน้าของกระดาษ b.) ด้านหลังของกระดาษ



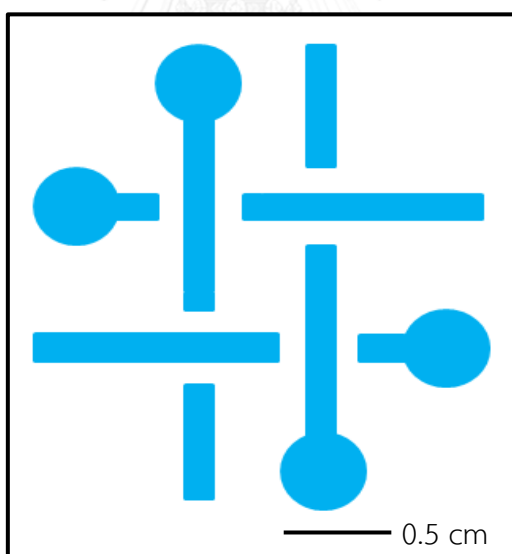
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของกระดาษบริเวณส่วนที่น้ำหมึกซึมผ่านจากด้านหน้ากระดาษ
ไปสู่บริเวณด้านหลังของกระดาษ

4.3 การปรับปรุงการสร้างลวดลายแบบ 3 มิติ

จากผลการทดลองของกระดาษกรองเบอร์ 3 จะเห็นได้ว่าเนื่องจากกระดาษเบอร์มีความหนาแน่นเกินไปจึงไม่สามารถแยกชั้นของช่องทางการไหลได้ จึงได้ปรับปรุงโดยการเปลี่ยนมาใช้กระดาษกรองซึ่งมีความหนาที่มากขึ้น มีความหนา 650 μm โดยจะทำการทดลองเหมือนหัวข้อที่ผ่านมาแต่จะมีการเพิ่มในส่วนที่ทับกันเพิ่มเติมขึ้นมาในบริเวณที่ต้องการให้ช่องทางการไหลของกระดาษทั้งด้านเชื่อมถึงกัน

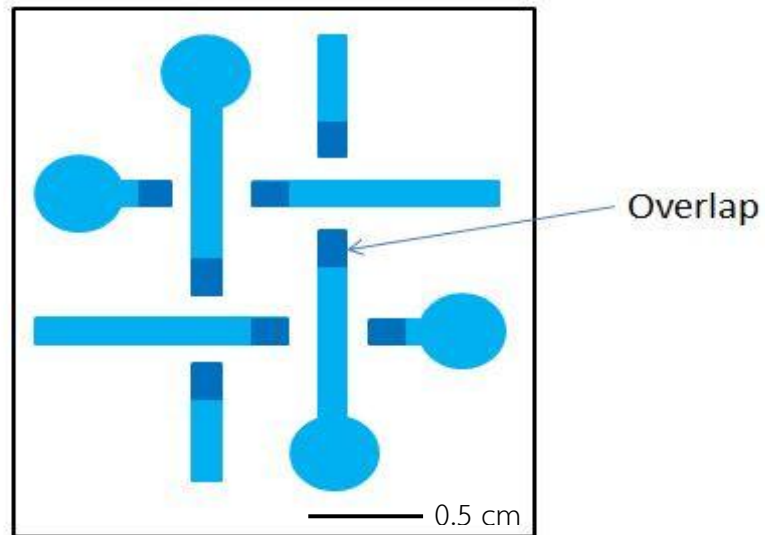
4.3.1 การออกแบบลวดลาย

1. ใช้วิธีการ Water mask โดยทำการออกแบบลวดลายโดยใช้คอมพิวเตอร์หลังจากนั้นจึงทำการพิมพ์น้ำลงบนกระดาษกรองด้านหน้าโดยทำที่กระดาษกรองเบอร์รองที่หนามากขึ้น ซึ่งทำการพิมพ์ซ้ำ 4 ครั้ง โดยได้ออกแบบให้บริเวณหลุมมีขนาดรัศมี 0.4 cm มีขนาดความกว้างท่อ 0.1 cm และมีความยาวท่อเท่ากับ 1.56 cm ดังรูปที่ 4.8



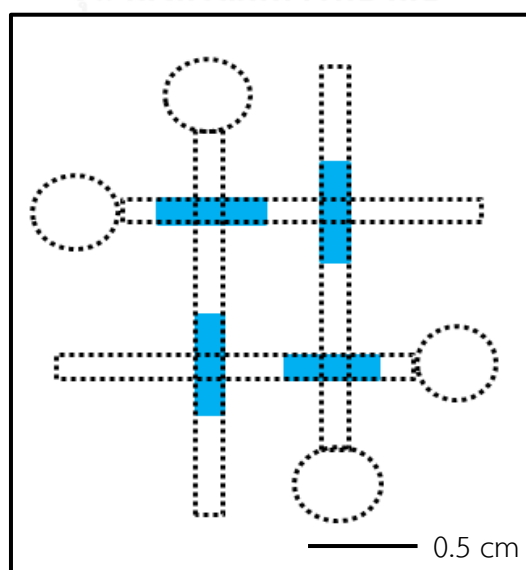
รูปที่ 4.8 รูปแบบลวดลายช่องทางการไหลของกระดาษด้านหน้า

2. พิมพ์น้ำบริเวณส่วนที่ต้องการให้ช่องทางการไหลเชื่อมกัน (Overlap) โดยใช้จำนวนในการพิมพ์น้ำ 1 ครั้ง โดยได้ออกแบบให้ส่วนนี้มีความยาว 0.28 cm โดยพิมพ์ไปทั้ง 8 ตำแหน่งที่ต้องการให้ทะลุถึงกัน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปแบบลวดลายช่องทางการไหลของกระตาศบริเวณส่วน Overlap

3. หลังจากนั้นจะพลิกกระตาศกรองเพื่อมาสร้างลวดลายด้านหลังของกระตาศกรองแผ่นเดิมและทำการออกแบบลวดลายด้านหลังของกระตาศโดยใช้คอมพิวเตอร์แล้วจึงทำการพิมพ์น้ำลงบนกระตาศกรอง ซึ่งทำการพิมพ์ซ้ำ 3 ครั้ง โดยได้ออกแบบส่วนนี้ให้มีความยาว 1.3 cm ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 รูปแบบลวดลายช่องทางการไหลของกระตาศด้านหลัง

4. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene ที่ความเข้มข้น 5%

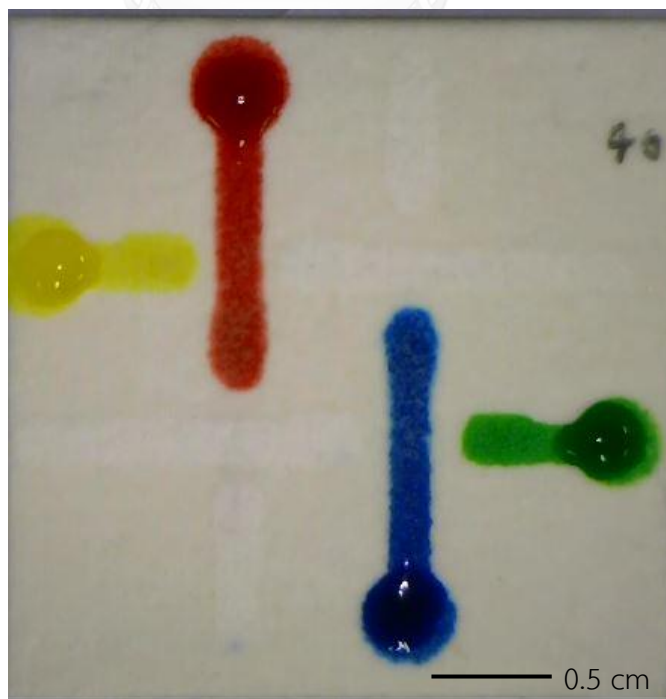
5. หลังจากจุ่มเสร็จจึงนำขึ้นมาจะสังเกตเห็นบริเวณที่พิมพ์ด้วยน้ำแยกออกจากสาร Polystyrene ที่ละลายในสารละลาย Toluene หลังจากนั้นจึงปล่อยให้แห้ง จะทำให้สารละลายและน้ำแห้งไปเหลือแต่สาร Polystyrene ที่เคลือบไว้บริเวณรอบลวดลายที่ได้ออกแบบไว้จึงเกิดเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ขึ้น ส่วนบริเวณที่เราออกแบบไว้เกิดเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) จึงได้เป็นลวดลายที่เราออกแบบไว้ หลังจากนั้นจึงนำไปทดลองป็นอันดับต่อไป

4.3.2 การทดลอง

จะทดลองโดยใช้หมึกสีซึ่งผสมในน้ำ มาหยดที่หลุมทั้ง 4 หลุม หลังจากนั้นสังเกตการเดินทางของหมึกสีให้เป็นไปตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้

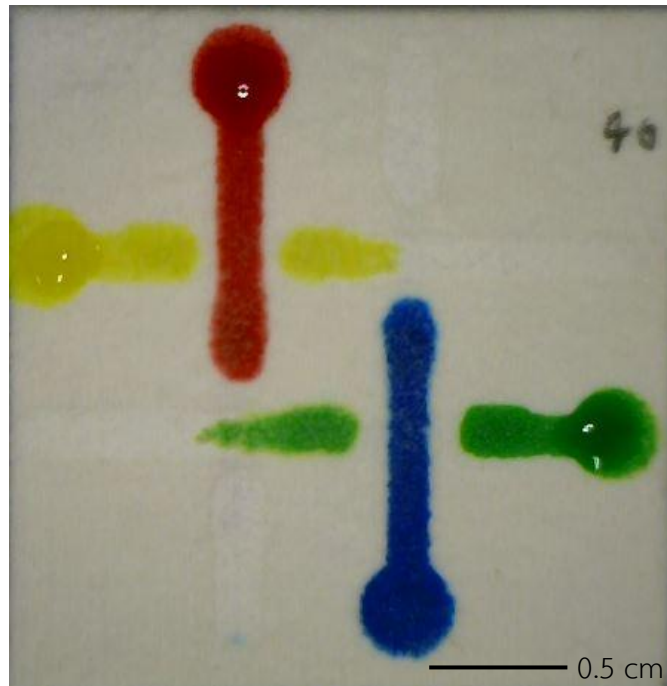
4.3.3 ผลการทดลอง

เมื่อผ่านไป 1 นาที หมึกสีจะไหลไปตามท่อช่องทางการไหลทั้ง 4 ช่อง ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณครึ่งนาทีเพื่อให้หมึกไหลไปยังช่องทางการไหลข้างหลังกระดาษ ดังรูปที่ 4.11



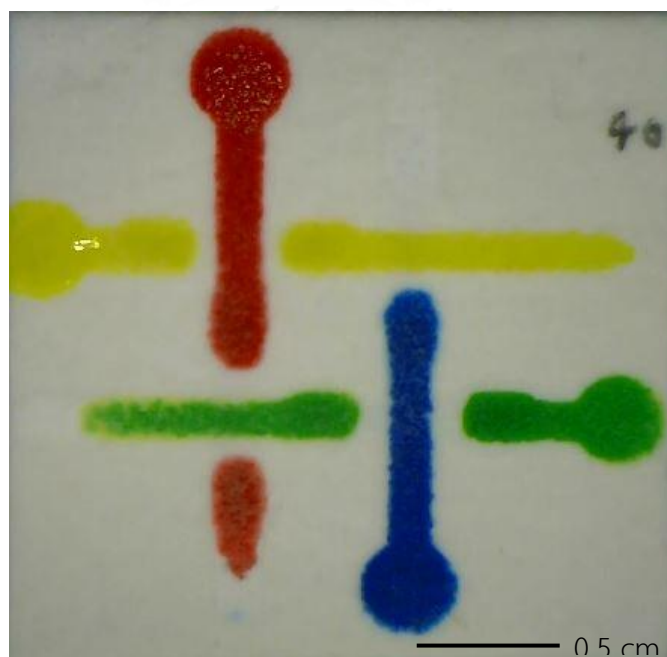
รูปที่ 4.11 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที

เมื่อผ่านไป 1.30 นาที ช่องทางการไหลในแนวนอนเริ่มมีหมึกสีมืดขึ้นมา โดยจะขึ้นมาก่อน
 ช่องทางการไหลในแนวตั้งเนื่องจากระยะทางช่องการไหลในช่วงต้นมีขนาดสั้นกว่าจึงมืดขึ้นมาก่อน ดัง
 รูปที่ 4.11



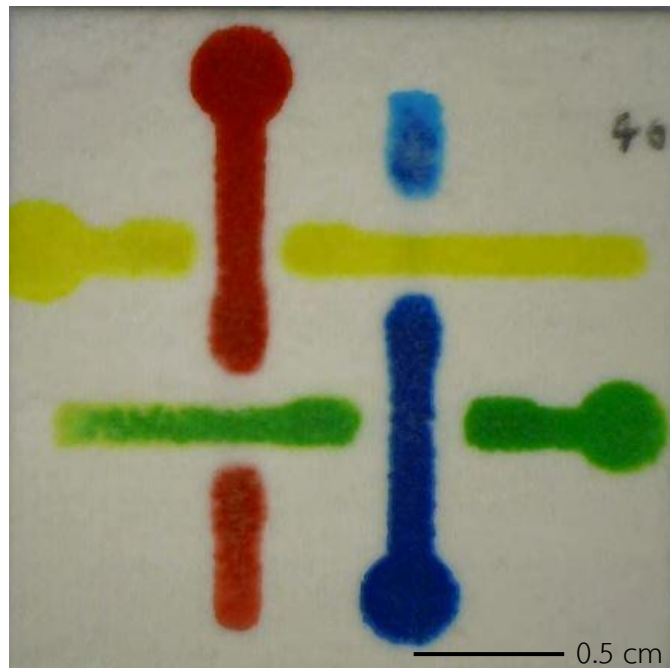
รูปที่ 4.12 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 1.30 นาที

เมื่อผ่านไป 2 นาที ช่องทางการไหลในแนวตั้งจึงเริ่มมืดขึ้นมา ดังรูปที่ 4.13

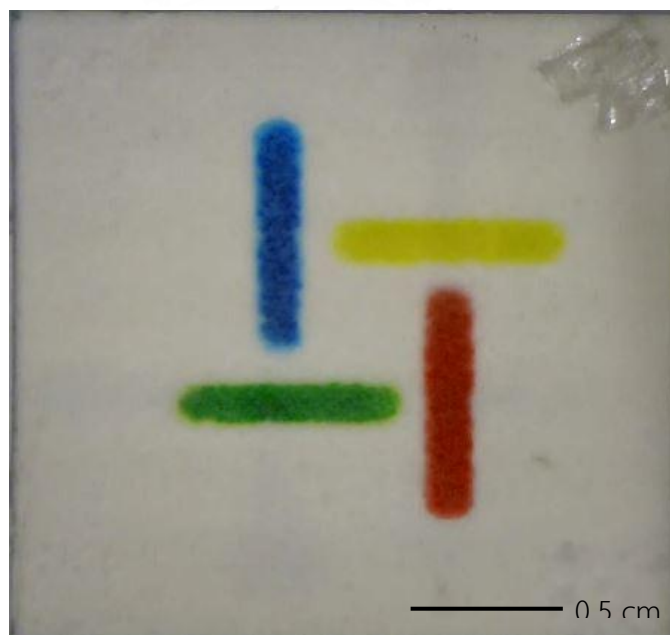


รูปที่ 4.13 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที

เมื่อเวลาผ่านไป 5.30 นาที หมึกสีจึงไหลไปทั่วทั้งหลอดลายที่ได้ออกแบบไว้ทั้งด้านหน้า ดังรูปที่ 4.14 และด้านหลังของกระดาษ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหน้ากระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 5.30 นาที



รูปที่ 4.15 ลวดลายของโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้านหลังกระดาษ เมื่อเวลาผ่านไป 5.30 นาที

4.3.4 สรุปผลการทดลอง

ในการสร้างลวดลายแบบ 3 มิติ กระดาษกรองที่ใช้ต้องมีความหนาที่มากพอควรเพื่อให้แยกชั้นของลวดลายบนกระดาษทั้ง 2 ข้างได้ โดยกระดาษกรองที่ใช้มีความหนาที่ $650 \mu\text{m}$ นอกจากนี้จำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำก็มีผลต่อการสร้างลวดลาย 3 มิติ เช่นกัน โดยที่ถ้าใช้จำนวนครั้งการพิมพ์ที่น้อยไปก็จะไม่เกิดเป็นช่องทางการไหลขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำที่น้อยเกินไป ถ้าใช้จำนวนครั้งในการพิมพ์ที่มากเกินไปก็จะทำให้ช่องทางการไหลทะลุถึงกันทั้งหมดจึงเกิดหมึกสีรัวซึมทำให้ไม่ได้ลวดลายตามที่ต้องการ โดยในการทดลองนี้ใช้จำนวนการพิมพ์ลวดลายข้างหน้า 4 ครั้ง ข้างหลัง 3 ครั้ง ส่วน Overlap 1 ครั้ง

4.3.5 ข้อเสนอแนะ

การสร้างลวดลายแบบ 3 มิติ โดยใช้วิธี Water mask โดยใช้สารละลาย Octadecyltrichlorosilan (OTS) ในสารละลาย n-hexane ไม่สามารถทำได้เนื่องจากสาร OTS มีความไม่ชอบน้ำสูง เมื่อนำกระดาษกรองไปจุ่มในสาร OTS ลักษณะของสารจะติดที่บริเวณผิว หมึกสีจึงไม่สามารถทะลุกระดาษด้านหน้าไปด้านหลังได้ ซึ่งแนวทางในการพัฒนาวิธีนี้ คือ การลดความเข้มข้นของสารละลาย Octadecyltrichlorosilan (OTS) ในสารละลาย n-hexane ซึ่งอาจนำมาซึ่งผลเสีย คือ อาจทำให้บริเวณรอบนอกของลวดลายหรือบริเวณส่วนที่ไม่ชอบน้ำมีโอกาสเกิดการเปื้อนมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความหนาของกระดาษจะทำให้การสร้างโครงสร้างแบบ 3 มิติทำได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

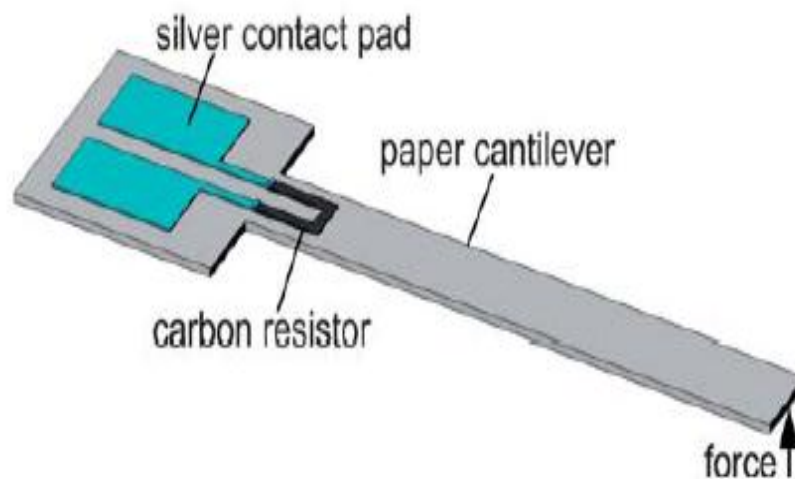
บทที่ 5

เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงาน ส่วนประกอบเซนเซอร์วัดแรงและการสร้างเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ (Paper based piezoresistive force sensor) โดยใช้วัสดุประเภทกระดาษ โดยประยุกต์ใช้วิธีการ Water mask มาสร้างเป็นวงจรถัดไป

5.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดแรง

เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ (Paper based piezoresistive force sensor) [20-22] เป็นการพัฒนาเซนเซอร์วัดแรงในระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคโดยใช้กระดาษเป็นโครงสร้างหลักของเซนเซอร์วัดแรง อาศัยหลักการทำงานของ เพียโซรีซิสทีฟเอฟเฟกต์ คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุประเภทเพียโซรีซิสทีฟมีความต้านทานทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อได้รับแรงเค้นทางกลซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทานในโลหะได้จากสูตรของโอห์ม ซึ่งความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะทำให้หาแรงที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 5.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ [20]

ซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทานในโลหะได้จากสูตรของโอห์ม

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5.1)$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าความต้านทาน (Ω)
	ρ	คือ	ค่าสภาพความต้านทาน ($\Omega \cdot m$)
	l	คือ	ความยาวของวัสดุที่นำไฟฟ้า (m)
	A	คือ	พื้นที่ของหน้าตัดวัสดุ (m^2)

5.2 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดแรง

5.2.1 กระดาษกรอง



กระดาษกรอง (Filter paper) คือ กระดาษที่มีคุณสมบัติที่คัดเลือกอนุภาคหรือสิ่งเจือปนออกจากสารละลายหรืออากาศโดยการวางแบบตั้งฉากกับทิศทางการไหลของสารละลายที่ต้องการกรองกระดาษกรอง จะมีขนาดของช่องว่างแตกต่างกันไปหลายขนาดด้วยกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะงานแต่ละชนิด ในที่นี้เราเลือกใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1, 41 และ 3 ซึ่งมีขนาดรูพรุนและความหนาต่างกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการความต้านทานที่น้อยที่สุดจึงต้องนำมากระดาษทั้ง 3 ประเภทมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาความต้านทานที่ดีที่สุด คุณสมบัติที่สำคัญของกระดาษกรองประกอบด้วย ความคงทนเมื่อเปียก ขนาดของช่องว่าง ความสามารถในการกรองอนุภาค อัตราการไหลของสารที่ต้องการกรอง ประสิทธิภาพและความจุ ในส่วนของเซนเซอร์วัดแรงนี้กระดาษมีหน้าที่เป็นฐานให้กับวงจรเพียโซรีซิสทีฟและเป็นส่วนที่ใช้สำหรับรับแรง



รูปที่ 5.2 กระดาษกรอง Whatman

5.2.2 กราไฟต์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Graphite)

ตัวนำแกรไฟต์ซึ่งมีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์ ใช้เป็นส่วนของเพียโซรีซิสทีฟโดยที่ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความเค้นเชิงกล ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีจุดเด่นที่สำคัญคือ สามารถละลายน้ำได้ กระจายตัวได้ดี แห้งได้เองโดยปล่อยไว้ที่อุณหภูมิห้อง ความต้านทานต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีส่วนประกอบของสารที่ทำลายชั้นโอโซน นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติการเกิดเป็นฟิล์มได้บนวัสดุหลายประเภท ซึ่งฟิล์มนี้จะปรับเปลี่ยนรูปร่างให้เข้ากับลักษณะพื้นผิว



รูปที่ 5.3 กราไฟต์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Graphite)

5.2.3 กาวคาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive Carbon Glue)

กาวคาร์บอนนำไฟฟ้ามีส่วนประกอบของอะคริลิก (Acrylic) โดยมีส่วนผสมของสารเพื่อลดแม่เหล็กไฟฟ้า เรซินอะคริลิกช่วยในการป้องกันเกรฟต์ความเสียหายที่เกิดจากการเสียดสีของเกรฟต์ และชั้นเคลือบสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายวัสดุตั้งกล่าวมีจุดเด่นที่สำคัญคือ มีความนำไฟฟ้าสูง มีความสามารถในการยึดเกาะสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน ใช้เวลา 1 วันเพื่อให้สารแห้งสนิทที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.4 กาวคาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive Carbon Glue)

5.2.4 ของเหลวซิลเวอร์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Silver Liquid)

เป็นอนุภาคซิลเวอร์ขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในของเหลว ความต้านทานต่ำ นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ระบายได้ง่าย คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง ภายใน 16-20 ชั่วโมง ใช้เพื่อทำให้พื้นผิวของกราไฟต์ชนิดคอลลอยด์กับกาวคาร์บอนนำไฟฟ้าเชื่อมติดกันได้ดีขึ้น โดยที่ค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 5.5 ของเหลวซิลเวอร์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Silver Liquid)

5.2.5 สายไฟ

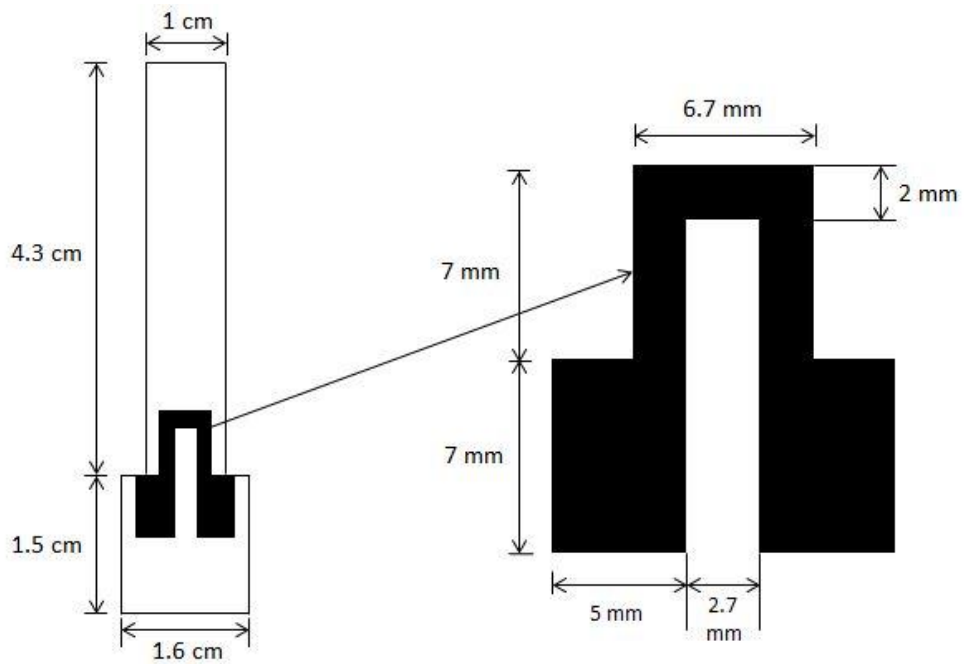
ใช้ต่อกับวงจรเพียโซรีซิสทีฟเพื่อวัดค่าความต้านทานโดยจะถูกเชื่อมติดบริเวณผิวสัมผัสซึ่งใช้วัดค่าความต้านทาน (Contact pad) ซึ่งจะถูกเชื่อมโดยใช้กาวคาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive Carbon Glue) และ ของเหลวซิลเวอร์ชนิดคอลลอยด์ (Colloidal Silver Liquid) โดยสายไฟที่ใช้จะใช้เป็นขนาดเล็ก เนื่องจากสายไฟขนาดใหญ่อาจมีผลต่อแรงที่มากกระทำต่อเซนเซอร์วัดแรง

5.3 กระบวนการขึ้นรูปวงจร

ในส่วนของการขึ้นรูปจะใช้วิธีการ Water mask โดยการใช้สารซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงเพื่อเพิ่มทางเลือกในการใช้สารที่หลากหลายขึ้นในการนำมาใช้เป็นลวดลายบนกระดาษ อีกทั้งวิธีนี้ยังสามารถสร้างชิ้นงานได้ครั้งละจำนวนมาก (Mass production)

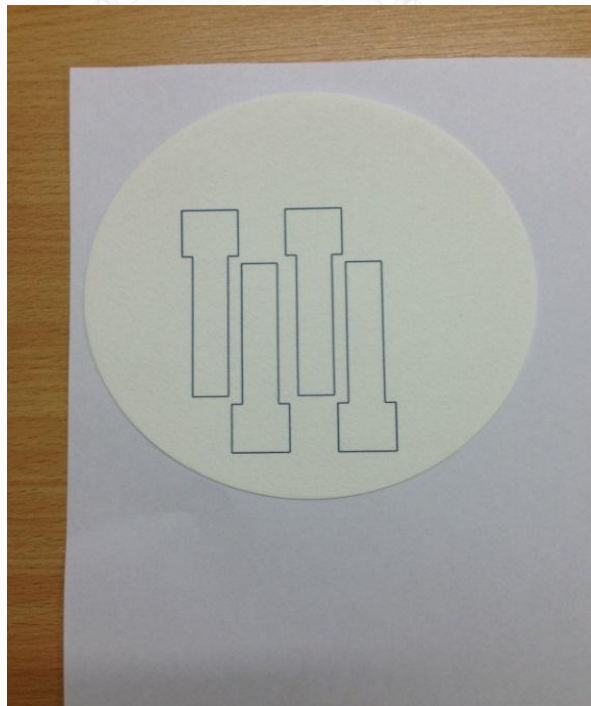
5.3.1 กระบวนการขึ้นรูปวงจรด้วยวิธี Water mask

1. ออกแบบเซนเซอร์วัดแรงซึ่งมีลักษณะเป็นคาน มีวงจรรเพียโซรีซิสทีฟ ประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วน คือ พื้นผิวสัมผัสสำหรับใช้ต่อกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า (contact pad) เพื่อใช้วัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป และบริเวณที่ส่วนที่เป็นตัวต้านทาน (resistor) ที่จะเกิดการโค้งงอขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำซึ่งเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน ดังรูปที่ 5.6



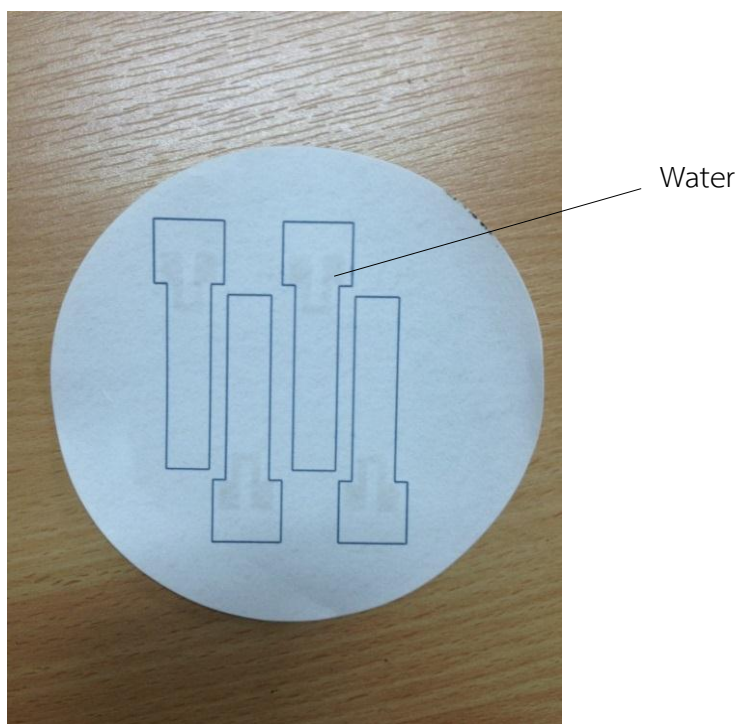
รูปที่ 5.6 รูปแบบของวงจรรเพียโซรีซิสทีฟ

2. พิมพ์รูปแบบขอบเขตรอบนอกของคานตำแหน่งเดียวกับที่จะพิมพ์น้ำเปล่าเป็นรูปร่างวงจรถนบนกระดาษ เพื่อใช้ตัดออกมาเป็นคานในภายหลัง ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การพิมพ์รูปแบบขอบเขตของคาน

3. พิมพ์น้ำลงบนกระดาษภายในขอบเขตของคานที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 5.8 สำหรับกระดาษเบอร์ 1, 41 ใช้จำนวนการพิมพ์ 4 ครั้ง กระดาษเบอร์ 3 ใช้จำนวนการพิมพ์ 7 ครั้ง เนื่องจากเป็นจำนวนครั้งการพิมพ์ที่น้อยที่สุดที่สร้างให้เกิดลวดลายได้ โดยที่กระดาษเบอร์ 3 มีรูพรุนเล็กกว่าจึงต้องใช้จำนวนการพิมพ์ที่มากกว่า



รูปที่ 5.8 การพิมพ์วงจรด้วยน้ำลงบนกระดาษกรอง

4. นำกระดาษกรองที่ได้ออกแบบลวดลายนี้ไปจุ่มในสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane ที่ความเข้มข้น 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาตร เป็นเวลา 5 นาที

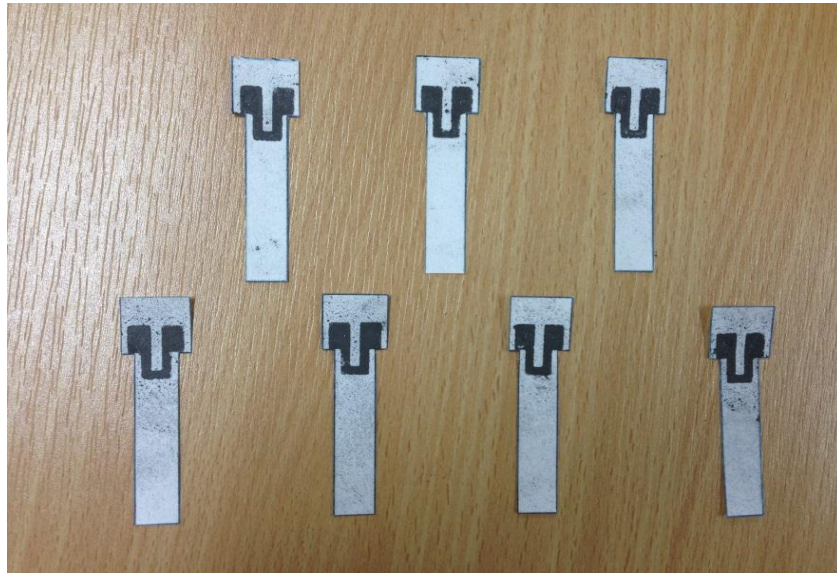
5. หลังจากจุ่มเสร็จจึงนำขึ้นมาจะสังเกตเห็นบริเวณที่พิมพ์ด้วยน้ำแยกออกจากสารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane อย่างชัดเจน ต่อมาจึงนำมาล้าง (Rinse) โดยการฉีดด้วยสารละลาย n-hexane เพื่อให้สาร OTS บางส่วนที่ติดบริเวณลวดลายที่ได้ ออกแบบไว้หลุดออกมาจากบนพื้นผิวกระดาษ จากนั้นจึงล้างตามด้วย Ethanol

6. ใช้แก๊สไนโตรเจน เป่าให้แห้ง ประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นจึงทิ้งไว้ประมาณ 1 คืน แล้วจึงนำชิ้นงานมาทดสอบได้

7. เมื่อแห้งแล้วจึงนำชุดทดลองไปทดสอบโดยการนำชิ้นงานของเราไปจุ่มลงในสารคาร์บอน ซึ่ง ละลายในน้ำเป็นอัตราส่วน 1:10 เป็นเวลาประมาณ 10 วินาที

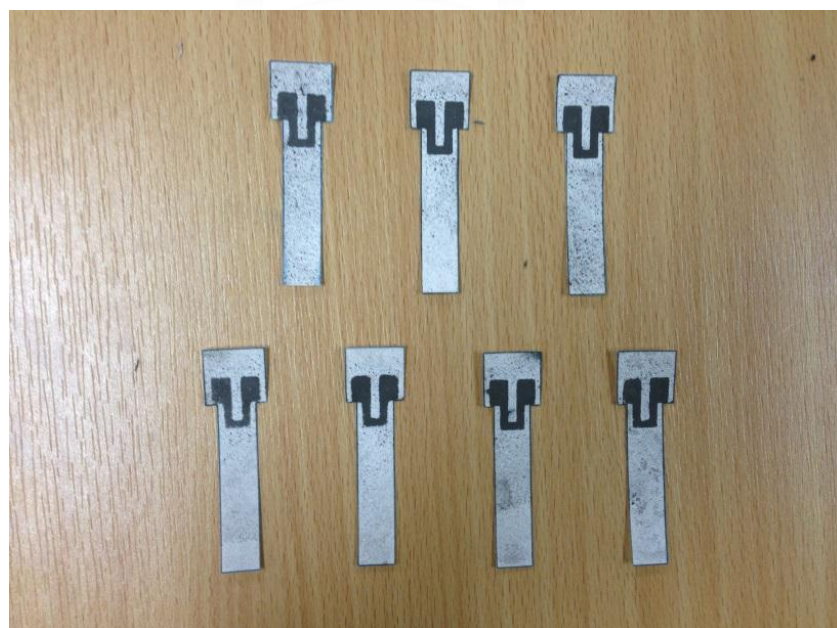
5.3.2 ผลการทดลอง

- กระดาษกรองเบอร์ 41 (ขนาดรูพรุน 25 μm)



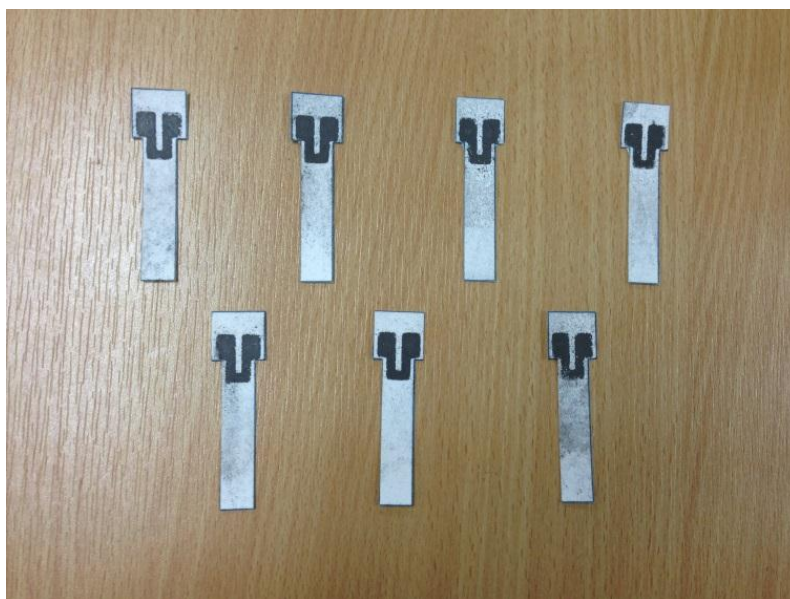
รูปที่ 5.9 ลักษณะของสารละลายคาร์บอนที่ติดบนกระดาษเบอร์ 41

- กระดาษกรองเบอร์ 1 (ขนาดรูพรุน 11 μm)



รูปที่ 5.10 ลักษณะของสารละลายคาร์บอนที่ติดบนกระดาษเบอร์ 1

- กระดาษกรองเบอร์ 3 (ขนาดรูพรุน 6 μm)



รูปที่ 5.11 ลักษณะของสารละลายคาร์บอนที่ติดบนกระดาษเบอร์ 3

ค่าความต้านทานของเซนเซอร์วัดแรงจากรกระดาษทั้ง 3 เบอร์ แสดงผลค่าความต้านทานดัง
ภาคผนวก ก โดยที่กระดาษกรองเบอร์ 41 มีค่าความต้านทานเฉลี่ย $1428 \pm 331 \Omega$ กระดาษกรอง
เบอร์ 1 มีค่าความต้านทานเฉลี่ย $2900 \pm 304 \Omega$ กระดาษกรองเบอร์ 3 มีค่าความต้านทานเฉลี่ย
 $330 \pm 72 \Omega$

5.3.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากระดาษเบอร์ 3 มีค่าความต้านทานที่น้อยที่สุดเนื่องจากมี
ความหนาที่มากกว่ากระดาษเบอร์ 1 และ เบอร์ 41 จึงสามารถกักเก็บสารละลายคาร์บอนได้มากกว่า
ความต้านทานที่ได้มีค่าน้อย จึงได้เลือกกระดาษเบอร์ 3 มาสร้างเป็นเซนเซอร์วัดแรงประเภทกระดาษ

5.3.4 ข้อเสนอแนะ

จะสังเกตเห็นได้ว่ารอบนอกวงจรรองของเซนเซอร์วัดแรงยังมีการเปื้อนของคาร์บอนอัน
เนื่องมาจากการล้าง (Rinse) ที่ไม่พอเหมาะ เนื่องจากถ้าเราล้างมากเกินไปจะทำให้บริเวณวงจรรอง

เซนเซอร์เก็บคาร์บอนได้มากขึ้น แต่ก็ทำให้บริเวณรอบนอกวงจรมีโอกาสเปื้อนคาร์บอนมากขึ้น เช่นนั้น ซึ่งในส่วนนี้จะได้มีการศึกษาต่อไป

5.4 การหาค่ามอดูลัสของยังของแผ่นโครงสร้างรับแรง

มอดูลัสของยังนิยามจากอัตราส่วนของความเค้นตามยาว (σ) ต่อความเครียดตามยาว (ε) ซึ่งความเค้นตามยาว (Stress, σ) คือ อัตราส่วนของแรงที่ตั้งฉากกับผิว (F) ต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (A)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.2)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นตามยาว (N/m^2)

A คือ พื้นที่ของหน้าตัดวัสดุ (m^2)

F คือ แรงที่ตั้งฉากกับผิว (N)

ความเครียดตามยาว (Longitudinal strain, ε) คือ อัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (Δl) ต่อความยาวเดิม (L_0)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (5.3)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดตามยาว

Δl คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (m)

L_0 คือ ความยาวเดิม (m)

จะได้ว่ามอดูลัสของยังคือ

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{FL_0}{A\Delta l} \quad (5.4)$$

เมื่อ E คือ มอดูลัสของยัง (N/m^2)

ในการทำนายค่าการโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันจากวิธีระเบียบเชิงวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานของกระดาศงที่ใช้ โดยการหาค่ามอดูลัสของยังนี้สามารถทำได้โดย ทำการจำลองโครงสร้างของคานปลายยื่นโดยตัดกระดาศงให้มีลักษณะเป็นคานปลายยื่น (Cantilever Beam) และทำการยึดติดให้คานปลายยื่นนี้เป็นคานประเภทที่มีปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) ด้านปลายอิสระนี้เมื่อถูกแรงภายนอกกระทำที่ปลายสุดของคานกระดาศง คานกระดาศงปลายยื่นนี้จะเกิดการโก่งงอขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของคานได้รับแรงกระทำภายนอกซึ่งสามารถบ่งบอกได้ด้วยระยะทางหรือมุมที่เปลี่ยนแปลงไป

สามารถคำนวณหาการโก่งงอของคานกระดาศงปลายยื่น (Cantilever Beam) โดยยึดคานแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) [23] ได้จากสมการ (5.5)

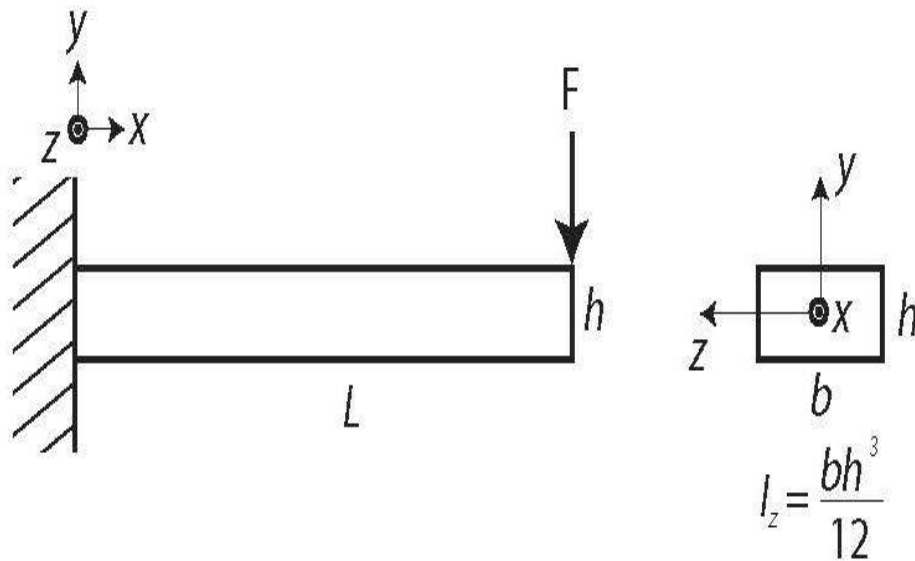
$$\delta_{\max} = \frac{-FL^3}{3EI} \quad (5.5)$$

และโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคำนวณรอบแกนสะเทินแกน $X (I_x)$ หาได้จากสมการ (5.6)

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (5.6)$$

เมื่อ	I	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคำนวณรอบแกนสะเทิน (m^4)
	E	คือ	มอดูลัสของยัง (N/m^2)
	F	คือ	แรงที่ตั้งฉากกับผิว (N)
	δ_{\max}	คือ	ระยะที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการโก่งงอของวัสดุ (m)
	L	คือ	ความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (m)
	b	คือ	ความยาวของวัสดุ (m)
	h	คือ	ความหนาของวัสดุ (m)

ซึ่งในการจำลองโครงสร้างของคานปลายยื่นนี้มีรูปแบบดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 รูปแบบของคานปลายยื่น

โดยเมื่อแทนค่าขนาดของคานลงในสมการ (7) เมื่อ $h = 390 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $b = 10^{-2} \text{ m}$ จะได้ว่า $I_x = 4.943 \times 10^{-14} \text{ m}^4$ จึงนำไปแทนค่าลงในสมการ (6) จะได้ว่า

$$\delta_{\max} = \frac{-F \times (4 \times 10^{-2})^3}{3E \times 4.943 \times 10^{-14}} = -4.234 \times 10^9 \times \frac{m}{E}$$

เมื่อ m คือ มวลของวัตถุที่นำมาถ่วง (kg)

เพราะฉะนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและระยะโก่งงอและค่ามอดูลัสของยังเป็นไปตามสมการ

$$E = -4.234 \times 10^9 \times \frac{m}{\delta_{\max}} \quad (5.7)$$

จึงทำการทดลองถ่วงมวลที่ปลายคานกระดาษ เลือกใช้กระดาษกรองเบอร์ 3 โดยใช้มวลคือดินน้ำมันขนาด 0.1-1.2 กรัม ถ่วงที่ปลายคานแล้วทำการวัดระยะการโก่งงอของคานที่เปลี่ยนไป โดยการเก็บค่าใช้คานกระดาษทั้งหมด 7 แผ่น ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 การหาค่ามอดูลัสของกระดาศด้วยวิธีการถ่วงมวลดินน้ำมัน

ผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข จะได้ค่ามอดูลัสของยังเฉลี่ย คือ $E = 1.099 \times 10^9 \pm 5.716 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
(ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

5.5 การหาค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดแรงประเภทกระดาศจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และจากการทดลอง

5.5.1 ค่าโค้งงอจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์

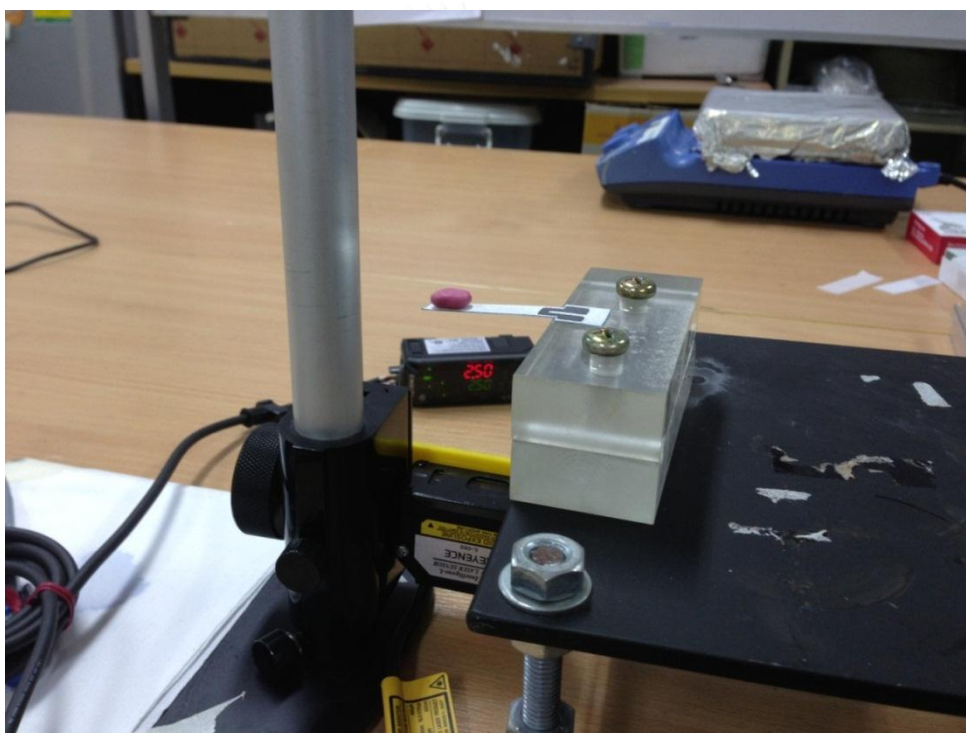
สามารถคำนวณหาการโค้งงอของคานกระดาศปลายยื่น (Cantilever Beam) โดยยึดคานแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) จากสมการ (5.8)

$$\delta_{\max} = \frac{-FL^3}{3EI} \quad (5.8)$$

ผลของการโค้งงอเปรียบเทียบจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และจากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5.5

5.5.2 ค่าโค้งงอจากผลการทดลอง

การวัดค่าการโค้งงอจะทำในลักษณะเดียวกับการหาค่ามอดูลัสแต่จะนำชิ้นงานขนาดจริงมาทดสอบโดยจะมีการใช้มวลดินน้ำมัน 0.1-1.2 กรัม เป็นตัวถ่วงคานเพื่อวัดค่าการโค้งงอที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องวัดความโค้งงอ (Laser sensor) โดยจะทำการที่กระดาศทั้งหมด 7 แผ่นแล้วจึงนำค่าทั้ง 7 ค่า มาเฉลี่ยกัน ดังรูปที่ 5.14 ผลของการโค้งงอเปรียบเทียบจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และจากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5.5



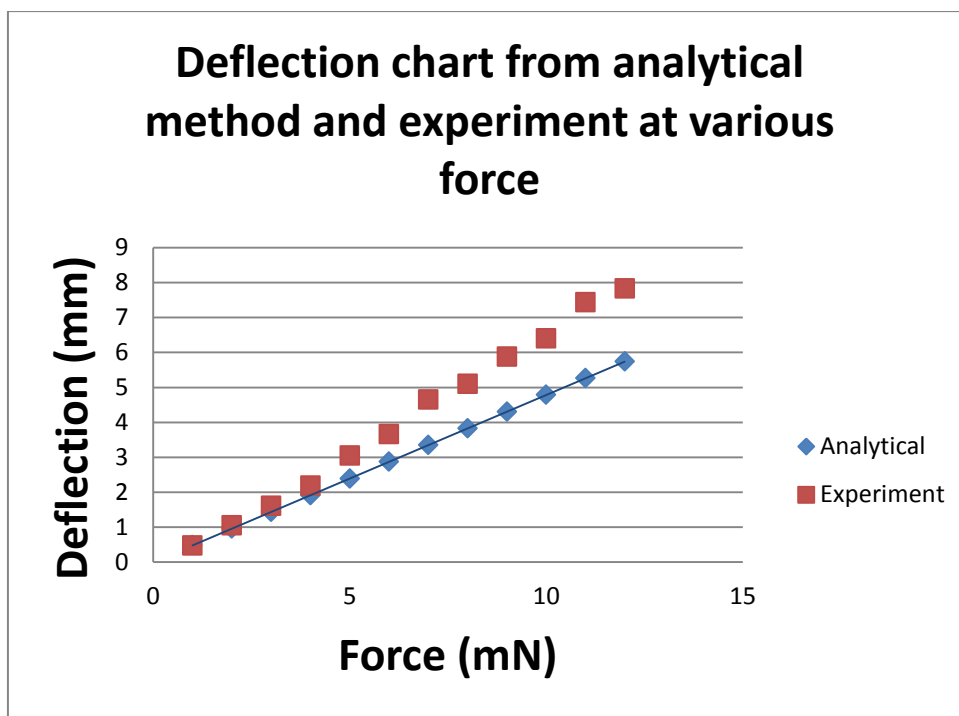
รูปที่ 5.14 การวัดค่าความโค้งงอของกระดาศจากผลการทดลอง

5.5.3 การเปรียบเทียบค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดแรงประเภทกระดาศที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และจากผลการทดลอง

ค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดแรงจากผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดแรงที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์เพื่อดูแนวโน้มของวิธีทั้ง 2 ว่าใกล้เคียงกันหรือไม่

มวลดินน้ำมัน (g)	ค่าความโก่งงอจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (mm)	ค่าความโก่งงอจากผลการทดลอง (mm)
0.1	0.479	0.47
0.2	0.957	1.05
0.3	1.436	1.61
0.4	1.914	2.19
0.5	2.393	3.05
0.6	2.872	3.66
0.7	3.350	4.65
0.8	3.829	5.10
0.9	4.308	5.88
1	4.786	6.40
1.1	5.265	7.44
1.2	5.743	7.83

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลของค่าความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างโดยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ โปรแกรม ANSYS และการทดลอง

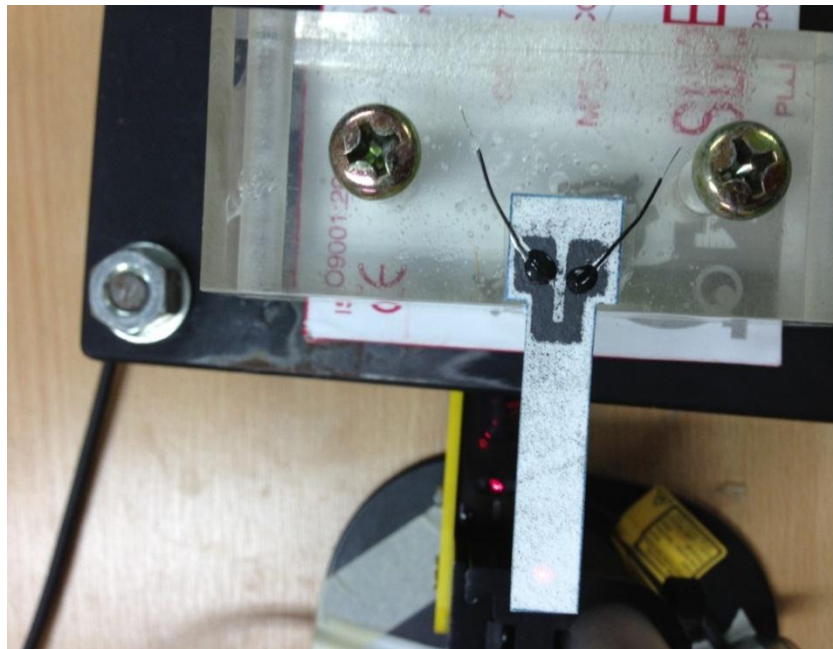


รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบค่าการโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และการทดลองที่ค่าแรงต่างๆ

จากการเปรียบเทียบดังรูป 5.15 พบว่า ค่าการโก่งตัวที่ได้จากทั้ง 2 วิธีนั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งทำให้สามารถทำนายค่าการโก่งตัวของเซนเซอร์วัดความดันที่สร้างขึ้นเมื่อได้รับความดันนอกช่วงที่ทำการทดลองได้ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์

5.6 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดแรง

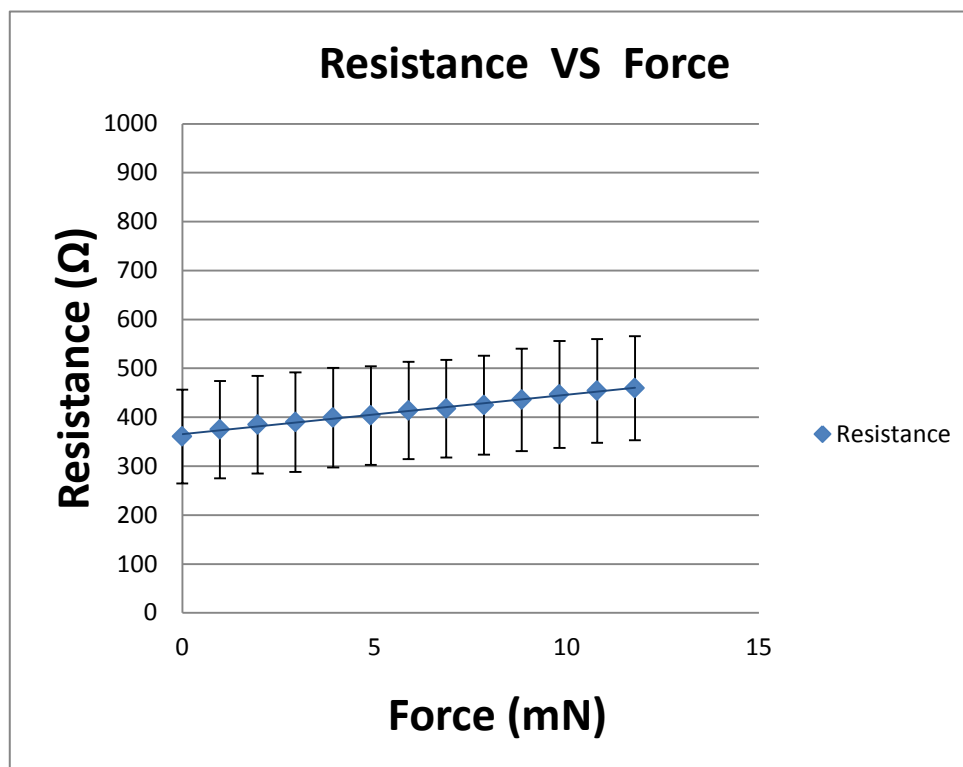
เป็นการสอบเทียบก่อนที่นำเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นไปใช้งานเพื่อวัดแรงที่มากระทำ โดยจะวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการมวลมากระทำที่ปลายคาน โดยจะใช้สายไฟต่อเข้ากับวงจรพีโซรีซิสทีฟเพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน ดังรูปที่ 5.16 หลังจากนั้นจะนำไปทดสอบซึ่งจะใช้ดินน้ำมันเป็นตัวถ่วงโดยมีการติดตั้งเครื่องวัดค่าการโก่งงอเพื่อใช้วัดค่าการโก่งงอของกระดาศกรงเมื่อมีแรงมากระทำที่ปลายคาน ดังรูปที่ 5.17 โดยจะใช้มวลตั้งแต่ 0.1-1.2 กรัม ทำทั้งหมด 7 วงจร ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาคผนวก ค จากนั้นจึงนำมาสร้างเป็นกราฟสอบเทียบ ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งกราฟดังกล่าวมีเส้นแนวโน้มที่มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงและค่าความต้านทานของวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแรงที่กระทำกับเซนเซอร์มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 5.16 การใช้สายไฟต่อเข้ากับวงจรพีโซรีซิสทีฟเพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน



รูปที่ 5.17 การวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อมีแรงมากกระทำที่ปลายคาน



รูปที่ 5.18 กราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับแรงที่กระทำ

จากรูป 5.8 สำหรับเซนเซอร์วัดแรงที่อยู่ในช่วง 0-12 mN จะมีค่าความคลาดเคลื่อนของแรงเท่ากับ 0.273 mN และมีค่าความต้านทานเฉลี่ยของเซนเซอร์ทั้ง 7 ชิ้นเท่ากับ 412.645 Ω โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานเท่ากับ 102.022 Ω

5.7 สรุปผลการทดลอง

การสร้างเป็นเซนเซอร์วัดแรงประเภทประเภทกระดาษด้วยวิธีการ Water mask โดยใช้สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ที่ละลายอยู่ในสารละลาย n-hexane โดยจะนำกระดาษกรองเบอร์ 3 เนื่องจากเป็นกระดาษมีความหนาแน่นมากกว่ากระดาษกรองเบอร์อื่นจึงมีช่วงที่สามารถรับแรงได้มากกว่า โดยจะใช้วิธีนี้ในการสร้างลวดลายขึ้นเป็นวงจรรพีโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) ในส่วนของการทดลองได้คำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงกับค่าการโก่งงอที่เกิดขึ้น โดยเราจะใช้มวลของดินน้ำมันมาวางที่บริเวณปลายคานจากนั้นใช้เครื่องวัดค่าความโก่งงอมาหาค่าความโก่งงอที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการโก่งงอของเซนเซอร์แรงที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าการโก่งงอที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ ซึ่งทำให้สามารถทำนายค่าการโก่งตัวของเซนเซอร์วัดความดันที่สร้างขึ้นเมื่อได้รับความดันนอกช่วงที่ทำการทดลองได้ ต่อมาจึงคำนวณหาความสัมพันธ์ของความต้านทานกับแรงที่มากระทำที่ปลายคาน จากผลการทดลอง

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีแรงกระทำที่ปลายคานมากขึ้นเกิดค่าความโก่งงอที่มากขึ้น ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้น โดยมีแนวโน้มกราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง โดยเซนเซอร์วัดแรงที่อยู่ในช่วง 0-12 mN จะมีค่าความคลาดเคลื่อนของแรงเท่ากับ 0.273 mN และมีค่าความต้านทานเฉลี่ยของเซนเซอร์ทั้ง 7 ชิ้นเท่ากับ 412.645 Ω โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานเท่ากับ 102.022 Ω โดยเซนเซอร์วัดแรงที่สร้างจากกระดาศมีจุดเด่น คือ มีความไว (sensitivity) มากและเหมาะสมสำหรับใช้ในช่วงรับแรงที่มีค่าต่ำ



บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีการต่างๆในการสร้างลวดลายบนกระดาษเพื่อใช้พัฒนาอุปกรณ์ประเภทกระดาษ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาการสร้างลวดลายบนกระดาษด้วยวิธีการใช้หน้ากากน้ำ (Water mask) ซึ่งวิธีนี้มีข้อดี คือ มีต้นทุนต่ำ ผลิตได้ในปริมาณมากๆและสามารถใช้สารได้หลากหลายประเภทในการสร้างลวดลาย ต่อจากนั้นจึงประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ โดยที่ในส่วนของวิธีการ Water mask ได้นำเสนอด้วย 2 วิธี คือ

1. วิธีการ Water mask โดยใช้วัสดุประเภท Polystyrene ที่ละลายอยู่ใน Toluene ซึ่งได้ทดลองที่กระดาษกรอง (Filter paper) ทั้งหมด 3 เบอร์ คือเบอร์ 1, 41 และ 3 ในแต่ละเบอร์จะมีรูพรุนซึ่งต่างกัน นอกจากนี้ยังมีผลของพารามิเตอร์อื่นๆ อีกเช่น ความเข้มข้นของ Polystyrene ที่ละลายอยู่ใน Toluene ในการทดลองใช้ความเข้มข้นที่ 1%, 3% และ 5% ระยะเวลาในการจุ่มที่ 3, 8 และ 60 วินาที จำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำจ้ำ 1, 2, 3 และ 4 ครั้ง โดยผลการทดลองที่ได้คือกระดาษกรองเบอร์ 41 จะเหมาะสมที่สุดในการสร้างลวดลายบนกระดาษ เนื่องจากกระดาษเบอร์ 41 มีรูพรุนใหญ่ที่สุด จึงใช้การพิมพ์น้ำเพียง 1 ครั้งก็เพียงพอที่น้ำจะแทรกซึมลงไปเนื้อกระดาษ ซึ่งหลังจากนำไปจุ่มใน Polystyrene ที่ละลายอยู่ใน Toluene ที่ 3% และปล่อยให้แห้ง สามารถสร้างให้เกิดเป็นลวดลายได้ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดในเรื่องความหลากหลายของสารที่จะนำมาสร้างลวดลาย กล่าวคือ วิธีนี้ใช้ได้กับสารบางประเภทเท่านั้น

2. พัฒนาวิธีการ Water mask จากวิธีการที่ 1 โดยใช้วัสดุประเภทที่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำสูงพิเศษ (Superhydrophobic) คือ สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ที่ละลายอยู่ในสารละลาย n-hexane ซึ่งโดยปกติสารนี้จะถูกใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยวิธีฉายแสง (photolithography) โดยมีข้อดี คือ สามารถใช้กับสารได้หลากหลาย เช่น สารจากวัสดุประเภทคาร์บอน อีกทั้งสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก (Mass production)

ในส่วนต่อมาได้ใช้วิธี Water mask มาประยุกต์ใช้สร้างลวดลายแบบ 3 มิติ โดยจะใช้กระดาษกรองที่มีความหนาที่มากขึ้นเพื่อให้สามารถแยกชั้นของช่องทางการไหลทั้ง 2 ด้านของกระดาษได้ โดยพิมพ์น้ำลงบนกระดาษกรองทั้ง 2 ด้านของกระดาษ หลังจากนั้นจะพิมพ์น้ำในส่วนที่ต้องการให้ช่องทางการไหลเชื่อมถึงกัน (Overlap) หลังจากนั้นจะนำไปจุ่มใน Polystyrene ที่ละลายอยู่ใน Toluene ที่ความเข้มข้น 5% ปล่อยให้แห้ง เกิดเป็นช่องทางการไหลแบบ 3 มิติ

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยการหยดหมึกสีเพื่อให้เห็นช่องทางการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสารอื่นได้ต่อไป

จากนั้นงานวิจัยจึงประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวในการประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ประเภทกระดาษ เช่น แล็บชิปประเภทกระดาษ เป็นอุปกรณ์ที่รวบรวมกระบวนการทำงานของห้องปฏิบัติการไว้บนชิปขนาดเล็กโดยใช้สำหรับตรวจสอบสารเคมี โดยที่งานวิจัยนี้จะใช้ในการตรวจสอบโปรตีน และสภาพความเป็นกรด ต่าง โดยได้ออกแบบให้ช่องทางการไหลแยกออกเป็น 2 ทางเพื่อใช้ตรวจสอบ protein และ pH โดยจะหยดสารที่ใช้ในการทดสอบลงไป ทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นจะทำการทดสอบสารตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้ คือ ถ้าสารละลายที่นำมาทดสอบมีส่วนผสมของโปรตีนบริสุทธิ (BSA) จะเปลี่ยนสีหลุมฝังจากสีเหลืองเป็นสีเขียว ถ้าสารที่นำมาทดสอบมีสภาพความเป็นกรดจะเปลี่ยนสีหลุมฝังขาวจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง

อุปกรณ์ชนิดต่อไปได้นำมาสร้างเป็นเซนเซอร์วัดแรงประเภทประเภทกระดาษด้วยวิธีการ Water mask โดยใช้สารละลาย Octadecyltrichlorosilane (OTS) ที่ละลายอยู่ในสารละลาย n-hexane โดยจะนำกระดาษกรองเบอร์ 3 เนื่องจากเป็นกระดาษมีความหนาแน่นมากกว่ากระดาษกรองเบอร์อื่นจึงมีช่องที่สามารถรับแรงได้มากกว่า โดยจะใช้วิธีนี้ในการสร้างลวดลายขึ้นเป็นวงจรรีโซซิสทีฟ (Piezoresistive) ในส่วนของการทดลองได้คำนวณหาความสัมพันธ์ของแรงกับค่าการโก่งงอที่เกิดขึ้น โดยเราจะใช้มวลของดินน้ำมันมาถ่วงที่บริเวณปลายคาน จากนั้นใช้เครื่องวัดค่าความโก่งงอมาหาค่าความโก่งงอที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการโก่งงอของเซนเซอร์แรงที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าการโก่งงอที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ ซึ่งทำให้สามารถทำนายค่าการโก่งตัวของเซนเซอร์วัดความดันที่สร้างขึ้นเมื่อได้รับความดันนอกช่วงที่ทำการทดลองได้ ต่อมาจึงคำนวณหาความสัมพันธ์ของความต้านทานกับแรงที่มากกระทำที่ปลายคาน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีแรงมากกระทำที่ปลายคานมากขึ้นเกิดค่าความโก่งงอที่มากขึ้น ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้น โดยมีแนวโน้มกราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ซึ่งเซนเซอร์วัดแรงที่สร้างจากกระดาษมีจุดเด่น คือ มีความไว (sensitivity) มากและเหมาะสมสำหรับใช้ในช่วงรับแรงที่มีค่าต่ำ

รายการอ้างอิง

1. Nie, Z., et al., Integration of paper-based microfluidic devices with commercial electrochemical readers. *Lab on a Chip*, 2010. 10(22): p. 3163-3169.
2. Martinez, A.W., et al., Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007. 46(8): p. 1318-1320.
3. Dungchai, W., O. Chailapakul, and C.S. Henry, A low-cost, simple, and rapid fabrication method for paper-based microfluidics using wax screen-printing. *Analyst*, 2011. 136(1): p. 77-82.
4. Li, X., J. Tian, and W. Shen, Progress in patterned paper sizing for fabrication of paper-based microfluidic sensors. *Cellulose*, 2010. 17(3): p. 649-659.
5. เกียรติภูมิกุล พันธุ์พัฒนกุล, การพัฒนาช่องการไหลขนาดเล็กและการลดการยัดเกาะของแอนติบอดีติดฉลากทองสำหรับแล็บบนชิปประเภทกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
6. He, Q., et al., Method for fabrication of paper-based microfluidic devices by alkylsilane self-assembling and UV/O₃-patterning. *Analytical chemistry*, 2013. 85(3): p. 1327-1331.
7. TRICHUR, R.K., Development of polymer MEMS structures for lab-on-a-chips using UV-LIGA and injection molding techniques. 2003, University of Cincinnati.
8. Trichur, R., G. Beaucage, and C. Ahn, Rapid fabrication of high aspect ratio plastic microstructures using microinjection molding techniques. *Polymer Preprints*, 2003. 44(2): p. 537-538.
9. Ma, C., et al., FABRICATION OF PAPER-BASED MICROFLUIDIC DEVICES BY OCTADECYLTRICHLOROSILANE SELF-ASSEMBLING AND UV-PATTERNING.
10. Bruzewicz, D.A., M. Reches, and G.M. Whitesides, Low-cost printing of poly(dimethylsiloxane) barriers to define microchannels in paper. *Analytical chemistry*, 2008. 80(9): p. 3387-3392.
11. Lu, Y., et al., Rapid prototyping of paper-based microfluidics with wax for low-cost, portable bioassay. *Electrophoresis*, 2009. 30(9): p. 1497-1500.

12. Carrilho, E., A.W. Martinez, and G.M. Whitesides, Understanding wax printing: a simple micropatterning process for paper-based microfluidics. *Analytical chemistry*, 2009. 81(16): p. 7091-7095.
13. Zhong, Z., Z. Wang, and G. Huang, Investigation of wax and paper materials for the fabrication of paper-based microfluidic devices. *Microsystem technologies*, 2012. 18(5): p. 649-659.
14. Lu, Y., et al., Fabrication and characterization of paper-based microfluidics prepared in nitrocellulose membrane by wax printing. *Analytical chemistry*, 2009. 82(1): p. 329-335.
15. Abe, K., K. Suzuki, and D. Citterio, Inkjet-printed microfluidic multianalyte chemical sensing paper. *Analytical chemistry*, 2008. 80(18): p. 6928-6934.
16. Li, X., et al., Paper-based microfluidic devices by plasma treatment. *Analytical chemistry*, 2008. 80(23): p. 9131-9134.
17. Abe, K., et al., Inkjet-printed paperfluidic immuno-chemical sensing device. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2010. 398(2): p. 885-893.
18. Martinez, A.W., S.T. Phillips, and G.M. Whitesides, Three-dimensional microfluidic devices fabricated in layered paper and tape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. 105(50): p. 19606-19611.
19. Li, X. and X. Liu, Fabrication of three-dimensional microfluidic channels in a single layer of cellulose paper. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2014. 16(5): p. 819-827.
20. Liu, X., et al., Paper-based piezoresistive MEMS sensors. *Lab on a Chip*, 2011. 11(13): p. 2189-2196.
21. เนตรชนก จิรานุสรณ์กุล, นัคนันท์ นิลธวัช, การพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ. ภาควิชาเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
22. Oosterbroek, R., et al., A micromachined pressure/flow-sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999. 77(3): p. 167-177.
23. Boresi, A.P. and Schmidt R .J., *Advanced mechanics of materials* 6th edition. 2002.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลค่าความต้านทานของวงจรเพียโซรีซิสทีฟ

ตารางที่ ก.1 ค่าความต้านทานของวงจรเพียโซรีซิสทีฟบนกระดาษกรองเบอร์ 41

ชั้นที่	ความต้านทานที่วัดได้ (Ω)							เฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7	
1	978	1025	1007	997	923	920	965	974
2	1742	1695	1782	1770	1802	1752	1761	1758
3	1282	1267	1298	1305	1302	1290	1311	1294
4	1119	1151	1069	1126	1159	1181	1249	1151
5	1854	1763	1735	1850	1646	1764	1659	1753
6	1264	1285	1291	1276	1305	1285	1294	1286
7	1797	1733	1753	1771	1805	1890	1703	1779
เฉลี่ย								1428
SD								331

ตารางที่ ก.2 ค่าความต้านทานของวงจรเพียโซรีซิสทีฟบนกระดาษกรองเบอร์ 1

ชั้นที่	ความต้านทานที่วัดได้ (Ω)							เฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7	
1	2834	2706	2709	2761	2773	2687	2650	2731.43
2	2656	2837	2612	2641	2410	2553	2330	2577
3	3704	3149	3257	3519	3701	3082	3134	3363.71
4	2946	2968	2987	2938	3019	2999	2965	2954.57
5	3265	3251	3210	3245	3236	3234	3310	3250.14
6	2756	2746	2765	2830	2822	2745	2756	2774.89
7	2698	2678	2610	2594	2615	2654	2684	2647.57
เฉลี่ย								2899.9
SD								303.51

ตารางที่ ก.3 ค่าความต้านทานของวงจรเพียโซรีซิสทีฟบนกระดาษกรองเบอร์ 3

ชั้นที่	ความต้านทานที่วัดได้ (Ω)							เฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7	
1	326	350	342	370	312	296	345	334.429
2	299	315	320	301	302	295	300	304.571
3	467	475	455	467	456	467	456	463.286
4	365	350	354	362	352	357	354	356.286
5	315	321	314	316	320	314	319	317
6	222	223	220	216	219	226	222	221.143
7	310	325	325	328	300	305	302	313.571
เฉลี่ย								330.041
SD								72.354

ภาคผนวก ข
ตารางบันทึกค่าการโก่งงอและค่าโมดูลัสของยังของคาน

กระดาด แผ่นที่	ค่าการโก่งงอ (mm)											
	มวลดินน้ำมันที่ถ่วง (g)											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
1	0.26	0.66	0.96	1.38	1.76	2.15	2.54	2.9	3.3	3.68	4.16	4.46
ค่า โมดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	1.63	1.28	1.32	1.23	1.2	1.18	1.17	1.17	1.15	1.15	1.12	1.14
2	0.5	0.89	1.26	1.62	2.1	2.48	2.72	3.37	3.59	4.12	4.54	4.91
ค่า โมดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	0.85	0.95	1.01	1.05	1.01	1.02	1.09	1.01	1.06	1.03	1.03	1.03
3	0.42	0.75	1.15	1.52	1.89	2.18	2.7	3.05	3.38	3.84	4.28	4.47
ค่า โมดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	1.01	1.13	1.1	1.11	1.12	1.17	1.1	1.11	1.13	1.1	1.09	1.14
4	0.35	0.73	1.12	1.51	1.85	25.15	2.64	3.04	3.51	3.8	4.3	4.48
ค่า โมดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	1.21	1.16	1.13	1.09	1.14	1.18	1.12	1.11	1.09	1.09	1.08	1.13

กระดาศ แผ่นที่	ค่าการโก่งงอ (mm)											
	มวลดินน้ำมันที่ถ่วง (g)											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
5	0.30	0.69	1.34	1.76	2	2.48	2.98	3.35	3.71	4.13	4.58	4.8
ค่า มอดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	1.41	1.23	9.48	9.62	1.06	1.02	1	1.01	1.03	1.03	1.02	1.06
6	0.46	0.87	1.22	1.63	1.89	2.3	2.6	2.98	3.52	3.75	4.24	4.5
ค่า มอดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	0.92	0.97	1.04	1.04	1.12	1.1	1.14	1.14	1.08	1.13	1.1	1.13
7	0.41	0.83	1.21	1.59	1.88	2.29	2.75	3.23	3.55	3.76	4.17	4.67
ค่า มอดูลัส ($\times 10^9$ N/m ²)	1.03	1.02	1.05	1.07	1.13	1.11	1.08	1.05	1.07	1.13	1.12	1.09
ค่ามอดูลัสเฉลี่ย (N/m ²)	1.099×10^9											
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.716×10^7											

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าความต้านทานของวงจรตัวต้านทานที่มีมวลค่าต่างๆ

ตารางที่ ค.1 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 1

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	362	362	362	362
0.1	371	371	370	370
0.2	380	378	379	379
0.3	382	382	382	382
0.4	389	391	390	390
0.5	395	395	397	396
0.6	401	399	402	401
0.7	402	402	402	402
0.8	402	403	402	402
0.9	405	405	405	405
1	409	409	408	409
1.1	413	416	415	415
1.2	416	416	416	416

ตารางที่ ค.2 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 2

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	328	328	329	328
0.1	357	356	358	357
0.2	365	367	363	365
0.3	370	370	370	370
0.4	372	372	372	372
0.5	380	379	381	380
0.6	395	396	396	396
0.7	401	401	400	401
0.8	405	405	405	405
0.9	410	410	411	410
1	415	415	413	414
1.1	423	421	421	422
1.2	425	425	425	425

ตารางที่ ค.3 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 3

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	536	536	536	536
0.1	550	548	549	549
0.2	569	566	566	567
0.3	579	579	579	579
0.4	591	591	591	591
0.5	595	595	595	595
0.6	603	603	602	603
0.7	605	605	605	605
0.8	614	614	614	614
0.9	630	631	631	631
1	640	641	641	641
1.1	642	642	642	642
1.2	647	647	647	647

ตารางที่ ค.4 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 4

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	408	409	409	409
0.1	424	425	425	425
0.2	428	429	428	429
0.3	434	433	434	434
0.4	440	441	441	441
0.5	444	445	444	444
0.6	453	453	453	453
0.7	458	460	460	459
0.8	467	470	470	469
0.9	482	483	484	483
1	514	514	514	514
1.1	518	521	520	520
1.2	526	527	527	527

ตารางที่ ค.5 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 5

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	336	338	336	337
0.1	351	350	365	355
0.2	360	360	360	360
0.3	361	360	361	361
0.4	365	365	365	365
0.5	366	366	366	366
0.6	381	380	381	381
0.7	372	373	373	373
0.8	378	378	378	378
0.9	393	394	393	393
1	400	400	399	400
1.1	412	412	413	412
1.2	425	425	425	425

ตารางที่ ค.6 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 6

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	220	220	220	220
0.1	215	215	217	216
0.2	233	235	233	234
0.3	241	241	241	241
0.4	253	253	253	253
0.5	262	261	262	262
0.6	271	272	273	272
0.7	274	276	275	275
0.8	282	282	282	282
0.9	286	287	287	287
1	290	291	290	290
1.1	301	301	301	301
1.2	305	305	305	305

ตารางที่ ค.7 ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน 7

มวล (g)	ค่าความต้านทาน (Ω)			
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย
0	333	335	333	334
0.1	351	349	351	350
0.2	361	359	357	359
0.3	362	365	363	363
0.4	385	383	381	383
0.5	382	378	387	382
0.6	394	392	390	392
0.7	411	406	406	408
0.8	424	422	422	423
0.9	441	441	441	441
1	458	458	458	458
1.1	467	467	467	467
1.2	470	471	471	471

