

การพัฒนาเซิร์ฟเวอร์ประเภทกระดาษเพื่อวัดความดันและทดสอบการตั้งครรภ์



นางสาวเนตรชนก จิรานุสรณ์กุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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-BASED SENSORS FOR PRESSURE MEASUREMENT AND
PREGNANCY TEST.

Miss Netchanok Jiranusornkul



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	การพัฒนาเซนเซอร์ประเภทกระดาษเพื่อวัดความดันและทดสอบการตั้งครรภ์
โดย	นางสาวเนตรชนก จิรานุสรณ์กุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระยุทธ ศรีธรรมาภิชา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุณจินี มณีรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระยุทธ ศรีธรรมาภิชา)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. ศักดิ์นันท์ สรุ้งบุญมี)

เนตรชนก จิรานุสรณ์กุล : การพัฒนาเซนเซอร์ประเภทกระดาษเพื่อวัดความดันและทดสอบการตั้งครรภ์ (DEVELOPMENT OF PAPER-BASED SENSORS FOR PRESSURE MEASUREMENT AND PREGNANCY TEST.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. วีระยุทธ ศรีธรรวานิช, 110 หน้า.

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ขนาดไมครอนกลายเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยทั่วไปอุปกรณ์เหล่านี้มักถูกสร้างขึ้นบนแผ่นซิลิกอน แต่ขยะอิเล็กทรอนิกส์จากอุปกรณ์เหล่านี้กำลังก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์ขนาดไมครอนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สร้างจากกระดาษ โดยได้พัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษขึ้นเป็นครั้งแรก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้เสนอวิธีการปรับปรุงกระบวนการสร้างชุดทดสอบการตั้งครรภ์ประเภทกระดาษโดยการพิมพ์และวิธีการแก้ไขปัญหาการเกาะติดของตัวแสดงผล (marker) บนกระดาษ ในส่วนของการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนั้นทางคณะวิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการหน้ากาน้ำที่ทางคณะวิจัยได้พัฒนาขึ้นในการขึ้นรูปตัวต้านทานที่สร้างจากสารแขวนลอยแกรไฟต์ ซึ่งพบว่าตัวต้านทานที่สร้างขึ้นมีค่าความต้านทาน $3.54 \pm 1.3 \Omega$ (จำนวนตัวอย่าง $N = 6$) นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์การโก่งตัวของแผ่นรับแรงดันภายใต้ความดันต่างๆด้วยแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL เปรียบเทียบกับการทดลอง ในการทดสอบการใช้งานเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นพบว่าความไว (sensitivity) มีค่าเท่ากับ 0.150 mV/V/kPa ในช่วงความดัน $0 - 8.7 \text{ kPa}$ ในส่วนของการพัฒนาชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษได้ประยุกต์ใช้วิธีการหน้ากาน้ำในการสร้างช่องทางการไหลและการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทในการเตรียมแถบทดสอบและแถบควบคุมซึ่งทำให้สามารถสร้างชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาวัสดุที่ใช้เป็นชั้นรองเพื่อลดปัญหาการเกาะติดของตัวแสดงผล ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสามารถใช้สารละลายกลูโคสเป็นชั้นรองในการป้องกันการเกาะติดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5770437121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PRESSURE SENSOR, PIEZORESISTIVE, SCREEN PRINT, WATER MASK, COLLOIDAL GOLD PARTICLES

NETCHANOK JIRANUSORNKUL: DEVELOPMENT OF PAPER-BASED SENSORS FOR PRESSURE MEASUREMENT AND PREGNANCY TEST.. ADVISOR: ASST. PROF. WERAYUT SRITURAVANICH, 110 pp.

Nowadays, electronic devices and micro-devices have become necessary things in our daily life. Generally, these devices are fabricated on silicon substrates. However, the wastes of such devices are causing some environmental issues. Therefore, a new concept to develop environmental-friendly electronic devices has emerged. This work aims to develop a new pressure sensor using a paper substrate as the diaphragm so-called a paper-based pressure sensor for the first time. Moreover, this work proposed a method to improve the fabrication process of a paper-based pregnancy test strip and a method to overcome the adsorption of the marker on the paper substrate. In the development of the paper-based pressure sensor, we utilized our previously proposed water mask method to fabricate resistors using graphite colloid where the resistance of the fabricated resistors was $3.54 \pm 1.3 \Omega$ (sample number $N = 6$). Furthermore, the deflection of the diaphragm under several pressures have been simulated using COMSOL and compared with the experimental results. In the performance test of the developed pressure sensor, the sensitivity of sensor was found to be 0.150 mV/V/kPa in a pressure range from 0 to 8.7 kPa. In the development of a paper-based pregnancy test strip, the water mask method was used to fabricate a channel whereas the inkjet printing method was used to prepare test line and control line enabling the fabrication process of the paper-based pregnancy test strip without the need of expensive equipment. Furthermore, to reduce the adsorption of the marker onto the paper substrate, materials to be used as the intermediate layer have been investigated. It was found that glucose solution could be used as the intermediate layer to prevent the adsorption issue effectively.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการได้รับความช่วยเหลือในหลายๆด้านจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วีระยุทธ ศรีสุระวานิช ซึ่งได้มอบความรู้และคำแนะนำในด้านต่างๆทั้งในด้านการทำวิทยานิพนธ์และด้านการดำเนินชีวิต และช่วยผลักดันให้ผู้ทำวิจัยได้ประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ตามที่คาดหวังเอาไว้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการขับเคลื่อนการวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช Special Task Force for Activating Research (STAR) ภายใต้กลุ่มการวิจัยเทคโนโลยีการสร้างระดับจุลภาคและนาโน (GSTAR 56-005-21-002) และได้รับทุน 90 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 26 (1/2558)

ขอขอบพระคุณพี่ และเพื่อนในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคนาโน เทคโนโลยีที่ได้ให้กำลังใจและความเอื้ออาทรตลอดมาโดยเฉพาะ นายณัฏฐ์ นิลธวัช และนาย ศตวรรษ กระตือองเดช ที่ช่วยให้คำปรึกษาและช่วยกันแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมไปถึงทุกคนในห้องปฏิบัติการที่คอยสร้างความสนุกสนานและเสียงหัวเราะซึ่งเป็นกำลังใจให้กับผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ในท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณนางภทิตยา จิรานุสรณ์กุล และนางสาวพรนิดา จิรานุสรณ์กุล ครอบครัวของผู้วิจัยที่คอยอบรม เลี้ยงดู ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำวิจัยและประสบความสำเร็จมาจนถึงทุกวันนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการ ทฤษฎี และ ปรัชศน์วรรณกรรม	5
2.1 หลักการและทฤษฎีของเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)	5
2.1.1 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)	5
เซนเซอร์วัดความดัน	5
2.1.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์ทั่วไปและเซนเซอร์วัดความดันในระบบไฟฟ้า เครื่องกลจุลภาค	6
2.2 ปรัชศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับเซนเซอร์ประเภทกระดาษ (Paper based sensors).....	8
2.2.1 เซนเซอร์วิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทกระดาษ (Quantitative Analysis sensors) ...	9
2.2.1.1 เซนเซอร์ตรวจสอบเทียบเคียง (Colorimetric Detection).....	9
2.2.1.2 เซนเซอร์ตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Detection).....	11
2.2.1.3 เซนเซอร์ตรวจสอบทางไฟฟ้า (Electrical Detection).....	12

2.2.1.4 เซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและเซนเซอร์ ตรวจสอบการเปล่งแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Chemiluminescent and Electrochemiluminescent Detection).....	14
2.2.2 วิธีการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์ประเภทกระดาษขนาดไมครอน.....	15
2.2.2.1 การสร้างลวดลายด้วยวิธีพิมพ์แบบสกรีน (Print Screen).....	15
2.2.2.2 การสร้างลวดลายด้วยวิธีพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	17
2.2.2.3 การสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากน้ำ.....	18
2.2.2.4 การสร้างลวดลายด้วยการใช้สเปรย์พ่น.....	19
2.2.2.5 การสร้างลวดลายด้วยการฉายแสง (photolithography).....	20
2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับแถบทดสอบการตั้งครรภ์.....	21
2.3.1 การตรวจหาสารเคมีและสารโมเลกุลชีวภาพ (ELISA)	21
2.3.1.1 Indirect ELISA	21
2.3.1.2 Sandwich ELISA.....	22
2.3.1.3 Competitive ELISA.....	22
2.3.2 แถบทดสอบ (Test Strip).....	23
2.3.2.1 หลักการทำงานของแถบทดสอบการตั้งครรภ์ (Pregnancy Test Strip).....	24
2.3.3 การสร้างแถบทดสอบตั้งครรภ์ด้วยการพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทอง (Goldnanoparticle)	26
2.3.4 การสร้างแถบทดสอบประเภทกระดาษ (Test Strip) โดยการพิมพ์โพลีสไตรีน (Polystyrene) จากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท	27
2.4 สรุปงานวิจัยที่ศึกษา	30
บทที่ 3 การสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ	32
3.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ	32
3.2 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ	33

3.2.1	ฐาน	33
3.2.2	ส่วนรับความดัน	37
3.2.2.1	วัสดุเพียโซรีซิสทีฟ คอลลอยดอลแกรไฟต์เพส (Colloidal Graphite Paste).....	37
3.2.2.2	กระดาษกรองวอทแมน (Whatman) เบอร์ 1	38
3.2.2.3	สายไฟ	38
3.2.2.4	กาวทางไฟฟ้าตัวนำคาร์บอน (Conductive Carbon Glue)	38
3.2.2.5	วัสดุเคลือบกระดาษพาราฟิล์ม (Parafilm).....	39
3.2.2.6	คอลลอยดอลซิลเวอร์แบบเหลว (Colloidal Silver liquid).....	39
3.3	กระบวนการออกแบบเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ	40
3.4	กระบวนการขึ้นรูปวงจรรีซิสทีฟ	41
3.4.1	การขึ้นรูปวงจรรีซิสทีฟด้วยวิธีการหน้ากากน้ำ (Water Mask).....	41
3.4.2	เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Inkjet Printer).....	42
3.4.3	การเตรียม สารละลายของน้ำบริสุทธิ์และเอททิลีนไกลคอล (Deionized water in Ethylene Glycol Solution)	43
3.4.4	การเตรียม Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane.....	43
3.5	กระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ.....	44
3.5.1	การพิมพ์ขอบเขตของเซนเซอร์วัดความดันลงบนกระดาษ (Alignment).....	45
3.5.2	การสร้างหน้ากากน้ำชนิดที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง	45
3.5.4	การเคลือบพาราฟิล์ม	46
3.5.5	การขึ้นรูปฐาน	46
3.5.6	การประกอบขึ้นส่วนรับความดันกับฐาน	46
3.6	การปรับปรุงคุณภาพของการสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำ	47
3.7	อภิปรายและสรุปบท	50

บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองของแผ่นโครงสร้างรับแรงและการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน	51
4.1 การสร้างแบบจำลองของแผ่นโครงสร้างรับแรง	51
4.1.1 การทำนายค่าความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จาก แบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม COMSOL.....	51
4.1.2 การทำนายค่าความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จากการ ทดลอง.....	54
4.1.3 การทำนายค่าความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จาก ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical).....	55
4.1.4 การเปรียบเทียบความโก่งงอของกระดาษจากการทดลองและจากการจำลองด้วย โปรแกรม COMSOL.....	56
4.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน	58
4.3 อภิปรายและสรุปบท	63
บทที่ 5 ชุดทดสอบการตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ.....	66
5.1 การทดลองปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ	66
5.1.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง [10]	66
5.1.1.1 อนุภาคทองคำ (Colloidal gold).....	66
5.1.1.2 Storage Buffer	67
5.1.1.3 การติดอนุภาคทองคำกับโปรตีน Anti-Beta hCG (Conjugate Colloidal gold and Anti-Beta hCG Protein).....	67
5.2 การสร้างชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ.....	68
5.3 การทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha	70
5.3.1 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ไม่มีชั้นรองอนุภาคทองคำด้วยการหยดโปรตีน anti- IgG และ anti-alpha	70

5.3.2 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 25% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วย การหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha.....	71
5.3.3 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วย การหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha.....	72
5.3.4 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วย การหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha.....	73
5.4 การทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์โปรตีน anti-IgG และ anti-alpha	74
5.5 อภิปรายและสรุปบท	75
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย.....	76
รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก.ความต้านทานของวงจรในการปรับปรุงคุณภาพของการสร้างลวดลายบนกระดาษ ด้วยวิธีการแบบหน้ากาน้ำ.....	80
ภาคผนวก ข. การโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาษ.....	83
ภาคผนวก ค. รูปภาพจากการจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL.....	92
ภาคผนวก ง. ตารางบันทึกค่าระยะการโค้งตัวของกระดาษ	102
ภาคผนวก จ. ตารางบันทึกค่าความต้านทานของวงจรเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล ...	103
ภาคผนวก ฉ. ตารางบันทึกค่าแรงดันขาเข้าและขาออกของวงจร	105
ภาคผนวก ช. ตารางค่า uncertainty ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติทางกายภาพของคอลลอยดอลแกรไฟต์.....	37
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติทางกายภาพของกาวตัวนำคาร์บอน	39
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติทางกายภาพของพาราฟิล์ม	39
ตารางที่ 3.4	ผลการวัดค่าความต้านทาน 7 วงจร วงจรละ 5 ครั้ง ที่การพิมพ์น้ำ 1-6 ครั้ง.....	49
ตารางที่ 4.1	การหาค่า grid independent ที่แบบจำลองที่ได้รับความดัน 17.39 kPa	52
ตารางที่ 4.2	ตารางเปรียบเทียบระยะเวลาโค้งงอของกระดาษจากการทดลองและจากโปรแกรม COMSOL.....	56
ตารางที่ 4.3	ความดันและแรงดันขาออกเฉลี่ยสำหรับการทดลองบนชิ้นงาน 3 ชั้น ชิ้นละ 5 ครั้ง... 61	
ตารางที่ 4.4	error ของความดันเทียบกับความดันช่วงที่สนใจ 0 - 8.7 kPa	64
ตารางที่ 4.5	ตารางเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่สร้างขึ้นกับเซนเซอร์วัดความดันประเภทซิลิกอน (MPX2300DT1) [20]	65
ตารางที่ ก. 1	ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์สารละลายของน้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์	80
ตารางที่ ก. 2	ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์สารละลายของน้ำ 4 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์	81
ตารางที่ ก. 3	ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์สารละลายของน้ำ 5 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์	81
ตารางที่ ก. 4	ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์สารละลายของน้ำ 6 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์	82
ตารางที่ ข. 1	ค่าคงตัวสำหรับการโค้งงอของแผ่นจัตุรัสที่ปลายถูกยึดทั้ง 4 ด้าน ด้วยแรงสม่ำเสมอ..85	
ตารางที่ ข. 2	ค่าการโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาษแผ่นที่ 1 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์มที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ.....	89
ตารางที่ ข. 3	ค่าการโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาษแผ่นที่ 2 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์มที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ.....	90

ตารางที่ ข. 4 ค่าการโก่งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาดแผ่นที่ 3 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์มที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ.....	90
ตารางที่ ข. 5 ค่าการโก่งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาดแผ่นที่ 4 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์มที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ.....	91
ตารางที่ ข. 6 ค่าการโก่งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาดแผ่นที่ 5 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์มที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ.....	91
ตารางที่ ง. 1 บันทึกค่าระยะการโก่งตัวของกระดาดที่ได้รับความดันจากการถ่วงมวลที่ 0.1-1.0 กิโลกรัม 5 ครั้ง.....	102
ตารางที่ จ. 1 ค่าความต้านทานของวงจรถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรถ่วงที่ 1 ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาดเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม.....	103
ตารางที่ จ. 2 ค่าความต้านทานของวงจรถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรถ่วงที่ 2 ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาดเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม.....	104
ตารางที่ ฉ. 1 แรงดันขาออกของวงจรถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาดเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม บนชิ้นงานที่ 1.....	105
ตารางที่ ฉ. 2 แรงดันขาออกของวงจรถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาดเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม บนชิ้นงานที่ 2.....	105
ตารางที่ ฉ. 3 แรงดันขาออกของวงจรถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาดเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม บนชิ้นงานที่ 3.....	106
ตารางที่ ช. 1 ตัวอย่างการหาค่า uncertainty ที่ความดัน 17.4 kPa.....	107
ตารางที่ ช. 2 ตารางค่า uncertainty ทุกช่วงความดันของเครื่องมือ.....	107

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 เซนเซอร์ชนิดวัดความดัน โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวแปลงสัญญาณ [1]	6
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของไมโครเซนเซอร์ [1]	7
รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของเครื่องวัดความดันประเภทซิลิกอนของ Ninghai Sendo Sensor Co., [2].....	8
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสและโปรตีน Martinez et al., 2008[3].....	9
รูปที่ 2.5 แลปบชิปประเภท กระจกตาช Andres et al, 2010 [4].....	10
รูปที่ 2.6 เซนเซอร์ใช้ตรวจสอบกลูโคส แลคโตส และกรดยูริกโดยใช้วิธีตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้า Henry et al.,2009 [5].....	11
รูปที่ 2.7 เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระจกตาช Liu et al., 2011 [7]	12
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระจกตาช Liu et al., 2011 [7]	13
รูปที่ 2.9 เซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่ใช้ในการทดสอบสาร Delaney et al., 2011 [8]	14
รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ด้านการไหลของของไหลประเภทกระจกตาช Martinez et al., 2008 [9].....	15
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการพิมพ์แบบสกรีน (ก) บล็อกสกรีนที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการฉายแสงแล้ว (ข) เทสที่ที่ต้องการพิมพ์ลงด้านบนของบล็อกสกรีน (ค) ใช้ไม้ยางพาราปาดสีบนบล็อกสกรีนเข้าหาตัว (ง) สีจะทะลุบล็อกสกรีนเป็นลวดลายตามที่ออกแบบบนชิ้นงาน.....	16
รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการหน้ากาน้ำ Punpanttanakul et al.,2012 [10]	18
รูปที่ 2.13 เซนเซอร์วัดแรงประเภทกระจกตาชที่สร้างลวดลายด้วยวิธีการใช้สเปรย์ Kim et al., 2012 [11].....	19
รูปที่ 2.14 การสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง Martinez et al., 2008 [3].....	20
รูปที่ 2.15 วิธีการของ ELISA L.o.B. Sciences, 2014 [13].....	23
รูปที่ 2.16 ตารางเทียบสีแถบทดสอบสารเคมีที่พบในปัสสาวะ L.o.B. Sciences, 2014 [12]	24
รูปที่ 2.17 แถบทดสอบการตั้งครรภ์ Millipore co., 2015 [15].....	25

รูปที่ 2.18 การสร้างแถบทดสอบตั้งครรภ์ Nagatani et al., 2006 [16] a.) แถบทดสอบตั้งครรภ์ด้านบนและสารที่ใช้แต่ละตำแหน่ง b.) แถบทดสอบตั้งครรภ์แบบตัดขวาง c.) การใช้งานแถบทดสอบตั้งครรภ์ในการทดลอง	26
รูปที่ 2.19 การพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองโดยการนำอนุภาคทองร่วมกับสารก่อภูมิต้านทาน Nagatani et al., 2006 [16]	27
รูปที่ 2.20 กระบวนการในการสร้างลวดลายของแถบทดสอบ (Test Strip) Abe et al., 2010 [17]	28
รูปที่ 2.21 กลไกการทำงานของแถบทดสอบประเภทกระดาษ (Paper-Based Test Strip) Abe et al., 2010 [17].....	29
รูปที่ 3.1 แบบจำลองเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ.....	32
รูปที่ 3.2 a.) เซนเซอร์ในสภาวะปกติ b.) เซนเซอร์ในสภาวะได้รับความดัน.....	33
รูปที่ 3.3 แบบของฐานโพลีสไตรีนที่ออกแบบในหน่วยมิลลิเมตร	35
รูปที่ 3.4 โพลีสไตรีนจากการออกแบบและโพลีสไตรีนที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป	36
รูปที่ 3.5 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้นรูปฐาน	36
รูปที่ 3.6 แบบของตัวต้านทานและอิเล็กทรอนิกส์	40
รูปที่ 3.7 ขนาดของวงจรความต้านทานที่ออกแบบ	41
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการหน้ากากน้ำ Punpanttanakul et al.,2011 [10]..	42
รูปที่ 3.9 แผนภาพขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ	44
รูปที่ 3.10 การพิมพ์ขอบเขตของเซนเซอร์ลงบนกระดาษกรอง	45
รูปที่ 3.11 เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่สร้างขึ้น	47
รูปที่ 3.12 กระดาษกรองหลังการพิมพ์สารละลายของน้ำ แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์.....	48
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแบ่ง mesh 42291 ขึ้นเพื่อใช้ในการหาค่า grid independent.....	52
รูปที่ 4.2 grid independent ที่แบบจำลองเมื่อได้รับความดัน 17.39 kPa.....	53
รูปที่ 4.3 การโค้งตัวของเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL ที่ความดัน 17.39 kPa.....	54

รูปที่ 4.4 แผนภาพระบบการวัดความโค้งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษจากการทดลอง	55
รูปที่ 4.5 ผลการวัดระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันที่ความดันต่างๆในช่วง 0-18 kPa เปรียบเทียบกับค่าจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL และค่าจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์	57
รูปที่ 4.6 วงจร Wheatstone bridge.....	58
รูปที่ 4.7 การติดตั้งระบบทดลองการสอบเทียบเครื่องมือ.....	59
รูปที่ 4.8 การให้ความดันแก่ระบบโดยการถ่วงมวล 0.1 กิโลกรัม	60
รูปที่ 4.9 กราฟ Output voltage Vs. Pressure ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ ในช่วงความดัน 0-17.4 kPa.....	61
รูปที่ 4.10 กราฟ Output voltage Vs. Pressure ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ ในช่วงความดัน 0-8.7 kPa.....	62
รูปที่ 5.1 แผนภาพการสร้างชุดตรวจตั้งครุภัณฑ์ประเภทกระดาษ.....	68
รูปที่ 5.2 ลวดลายและขนาดในการสร้างชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์ด้วยวิธีหน้ากาน้ำ.....	69
รูปที่ 5.3 ชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์ที่ไม่มีชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ	70
รูปที่ 5.4 ชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์ที่ใช้กลูโคส 25% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ.....	71
รูปที่ 5.5 ชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์ที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ.....	72
รูปที่ 5.6 ชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์ที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบ และหลังการทดสอบ.....	73
รูปที่ 5.7 ชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์แบบที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำและชั้นรูปด้วยการพิมพ์โปรตีน.....	74
รูปที่ 5.8 ชุดทดสอบตั้งครุภัณฑ์แบบที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำและชั้นรูปด้วยการพิมพ์โปรตีน.....	74
รูปที่ ข. 1 คานปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end).....	83
รูปที่ ข. 2 คานปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้านเมื่อถูกแรงกระทำทำให้เกิดการโก่งงอ.....	84

รูปที่ ข. 3 แผ่นจัตรัสที่ปลายทั้งสี่ถูกยึดติด และแรงภายนอกกระทำสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ Boresi et al, 2002 [19].....	85
รูปที่ ข.4 ขนาดของคานปลายยื่นที่ทำการสร้างขึ้นมา.....	86
รูปที่ ข. 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลถ่วงน้ำหนักที่ปลายคานกับค่าความโก่งงอเฉลี่ยของกระดาศ 88	88
รูปที่ ข. 6 จำลองโครงสร้างของคานปลายยื่นโดยใช้กระดาศวอทแมนเบอร์ 1 ที่ผ่านการเคลือบพาราฟิล์ม 1 หน้า พร้อมถ่วงมวล 0.1 กรัม.....	89
รูปที่ ค. 1 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1 กิโลกรัม (1.739 kPa).....	92
รูปที่ ค. 2 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.2 กิโลกรัม (3.478 kPa).....	93
รูปที่ ค. 3 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.3 กิโลกรัม (5.217 kPa).....	94
รูปที่ ค. 4 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.4 กิโลกรัม (6.956 kPa).....	95
รูปที่ ค. 5 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.5 กิโลกรัม (8.695 kPa).....	96
รูปที่ ค. 6 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.6 กิโลกรัม (10.434 kPa).....	97
รูปที่ ค. 7 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.7 กิโลกรัม (12.173 kPa).....	98
รูปที่ ค. 8 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.8 กิโลกรัม (13.912 kPa).....	99
รูปที่ ค. 9 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.9 กิโลกรัม (15.651 kPa).....	100
รูปที่ ค. 10 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 1.0 กิโลกรัม (17.39 kPa).....	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยทั่วไปนิยมใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุหลัก ซึ่งราคาต้นทุนของซิลิกอนในการผลิตนั้นก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆและในขณะเดียวกันนั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เราเลิกใช้ก็ก่อให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงกลายเป็นประเด็นสำคัญ ในช่วง 5-6 ปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีงานวิจัยในการประยุกต์ใช้กระดาษเป็นวัสดุหลักในการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทต่างๆแทนที่วัสดุเดิม เนื่องจากกระดาษมีราคาถูก น้ำหนักเบา และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ตรวจวัดสารเคมี เซนเซอร์วัดแรง (force sensor) ชิปสำหรับเครื่องตรวจวัดน้ำตาลในเลือด (glucometer) โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการประยุกต์ใช้กระดาษในการพัฒนาแลบบนชิป (lab-on-a-chip) ซึ่งแลบบนชิปนี้เป็นอุปกรณ์ที่ย่อขนาดของกระบวนการปฏิบัติการในห้องทดลองมาไว้บนแผ่นชิปขนาดเล็ก แลบบนชิปนี้ครอบคลุมทั้งการบรรจุสารทดลอง ผสมสารทดลอง รวมไปถึงการอ่านผลการทดลองได้ด้วยสายตา ซึ่งมีข้อดีที่การใช้งานไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการพกพา ทั้งนี้การศึกษาวิจัยในการประยุกต์ใช้กระดาษในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นและยังต้องการการการศึกษาวิจัยอีกมาก

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำกระดาษมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ในห้องทดลอง เพื่อใช้ในการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันโดยใช้แผ่นกระดาษเป็นวัสดุซึ่งครอบคลุม กระบวนการสร้าง การทำแบบจำลอง (Simulation) เพื่อทำนายค่าความโค้งงอของกระดาษขณะรับความดันที่ค่าต่างๆ การทดสอบสมรรถนะเพื่อนำไปใช้งานจริง และใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์แลบบนชิปประเภทหนึ่ง โดยมุ่งเน้นเรื่องการพัฒนาการเคลื่อนที่ของของไหลบนแถบกระดาษทดสอบเพื่อตรวจสอบสารโมเลกุลชีวภาพ โดยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นคือ ต้นทุนในการผลิตต่ำ น้ำหนักเบา กระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนา สร้าง และทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ
2. เพื่อพัฒนา สร้าง และทดสอบการทำงานของชุดทดสอบการตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ และปรับปรุงวงจรให้สามารถควบคุมค่าความต้านทานได้
2. การสร้างแบบจำลองของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ
3. การทดสอบสมรรถนะของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ
4. ศึกษาเรื่องการลดแรงตึงผิว เพื่อปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ (Colloidal gold) บนกระดาษกรอง
5. การขึ้นรูปเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษและแถบกระดาษทดสอบโดยวิธีการขึ้นรูปแบบหน้ากาน้ำ

1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย

1. การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ และปรับปรุงวงจรให้สามารถควบคุมค่าความต้านทานได้

ศึกษาค้นคว้าการขึ้นรูปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากกระดาษ (Paper-Based Electronic devices) และกลไกการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากกระดาษ รวมไปถึงการออกแบบกระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ กำหนดขนาดของอุปกรณ์และวงจรในการสร้างให้มีความเหมาะสมกับช่วงการทดลองที่ออกแบบ โดยปรับคุณสมบัติของสารละลาย

Octadecyltrichlorosilane (OTS) และคุณสมบัติของคาร์บอน (Colloidal Graphite) ให้เหมาะสมกับการใช้งานกับกระดาษกรอง ด้วยวิธีการสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำ (Water Mask)

2. การสร้างแบบจำลองของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

สร้างแบบจำลองและการเปรียบเทียบค่าความโค้งของของกระดาษที่ได้จากการทดลอง (Experiment) จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical) และจากโปรแกรม COMSOL เพื่อดูแนวโน้มการโค้งตัวของกระดาษจากการทดลองว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

3. การทดสอบสมรรถนะของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

ทดสอบสมรรถนะและปรับปรุงแบบของเซนเซอร์วัดความดัน เพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งานในช่วงความดันที่เหมาะสม โดยการทดสอบเซนเซอร์จะทดลองโดยให้ความดันค่าต่างๆ (0-200 kPa) กระทำลงบนกระดาษที่มีวงจรถั่วด้านทานอยู่ด้านบน นำค่าแรงดันขาออกที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรมาส่งเป็นเส้นโค้งเปรียบเทียบ (Calibration curve) โดยมีการปรับปรุงกระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความดัน เพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตในเชิงพาณิชย์

4. ศึกษาเรื่องการลดแรงตึงผิว เพื่อปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ (Colloidal gold) บนกระดาษกรอง

ศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคทองคำ (Colloidal gold) เช่น การสังเคราะห์อนุภาคทองคำ ขนาดของอนุภาคเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้อง

5. การขึ้นรูปชุดทดสอบตั้งครุฑประเภทกระดาษโดยวิธีการขึ้นรูปแบบหน้ากากน้ำ

สร้างแถบทดสอบจากกระดาษต้นแบบและทดสอบประสิทธิภาพรวมถึงการปรับปรุงคุณภาพของแถบทดสอบที่สร้างขึ้น

6. สรุปผลงานวิจัยและหาข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันโดยใช้แผ่นกระดาษเป็นวัสดุนี้ ถือเป็นการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเป็นครั้งแรก งานวิจัยนี้ได้สร้างและทดสอบอุปกรณ์การวัดความดัน ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ในการทำนายคำตอบของปัญหา และการประยุกต์ความรู้ในเชิงวิศวกรรมหลายๆด้าน มาเพื่อแก้ปัญหา หรือตอบโจทย์ตามที่ได้ตั้งเป้าประสงค์ไว้ ในส่วนของการพัฒนาการเคลื่อนที่ของของไหลบนแถบกระดาษทดสอบนั้น เป็นการพัฒนาแลปบนชิปประเภทแถบทดสอบที่สร้างจากกระดาษ ให้มีประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลให้ดีขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้ต่อไป โดยการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันและการพัฒนาการเคลื่อนที่ของของไหลบนแถบกระดาษทดสอบ มีจุดประสงค์หลักเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุหลักอย่างซิลิกอน ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีต้นทุนในการผลิตต่ำ น้ำหนักเบากระบวนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และ ปรัชญาวิศวกรรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของอุปกรณ์ เทคนิคและวิธีการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์วัดความดันประเภท Silicon ชุดทดสอบการตั้งครุภัณฑ์ หรือชุด test strip อุปกรณ์ประเภทกระดาษต่างๆไป เช่น เซนเซอร์วัดแรงประเภทกระดาษ และ ชุดทดสอบสารโมเลกุลชีวภาพประเภทกระดาษ

2.1 หลักการและทฤษฎีของเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)

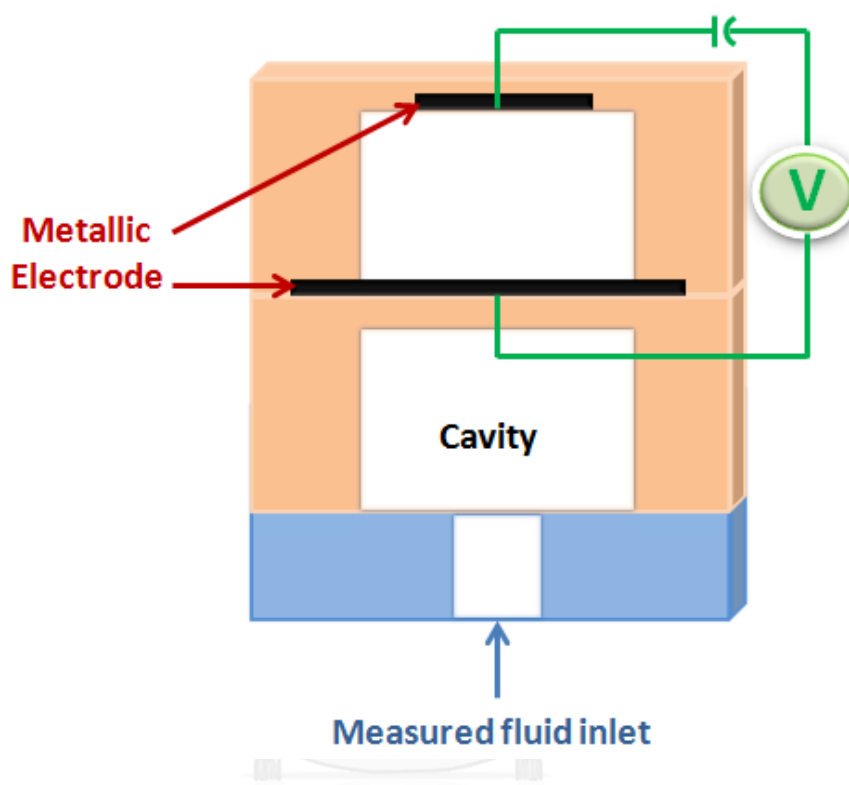


เซนเซอร์ (Sensor) คืออุปกรณ์ตรวจวัดตัวแรกในระบบของการวัด สามารถตรวจจับและรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพที่สนใจ ตัวอย่างเช่น ความดัน การไหล การเคลื่อนที่ ระยะทาง เป็นต้น เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับปริมาณเหล่านี้ได้แล้วจะเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณ หากเป็นการวัดแบบสัมผัสกับตัวแปรโดยตรงจะเรียกดาวตรวจวัดแบบปฐม (Primary sensors) แต่หากมีการตรวจวัดโดยผ่านส่วนอื่นก่อน เช่น สเตรนเกจ จะเรียกดาวตรวจวัดในกรณีนี้ว่าเป็น ดาวตรวจวัดทุติยภูมิ (Secondary sensor) การตรวจวัดจะอาศัยผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในตัวเซนเซอร์ที่สามารถตรวจวัดได้ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส ความต้านทาน ความจุ และความเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่อค่าตัวแปรเปลี่ยนแปลงแล้วพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเปลี่ยนตาม ทำให้สามารถวัดและทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามได้ ซึ่งเราอาจวัดได้โดยใช้มิเตอร์หรือวงจรบริดจ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นการวัดตัวแปรด้วยวิธีทางไฟฟ้า

2.1.1 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)

เซนเซอร์วัดความดันเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดตัวแรกในระบบของการวัดความดันของก๊าซหรือเหลว เซนเซอร์วัดความดันทำงานโดยส่งสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความดัน ซึ่งเซนเซอร์วัดความดันนี้จะถูกสร้างให้มีเยื่อบางเนื่องจากสามารถโค้งงอตามความดันได้ ซึ่งระดับความโค้งงอสามารถวัดได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือ การเปลี่ยนแปลงของการเก็บประจุไฟฟ้า เซนเซอร์วัดความดัน ส่วนมากผลิตจากซิลิกอนและวัสดุแข็งอื่นๆ เนื่องจากสามารถวัดแรงดันสูงได้ มีความไวและประสิทธิภาพที่ดี สำหรับในปัจจุบันได้มีการนำโครงสร้างของเซนเซอร์ประเภทนี้มาพัฒนา

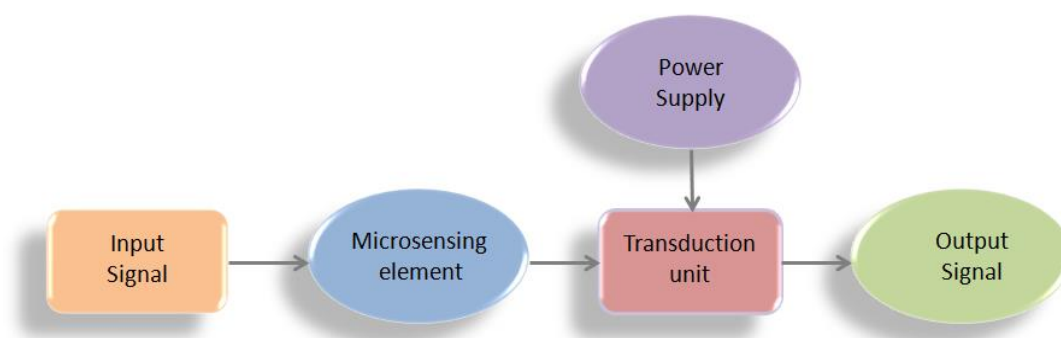
เป็นระบบการวัดแรงดันน้ำและแรงดันลม (Pressure Transmitter) ที่มีความละเอียดสูงสำหรับงานอุตสาหกรรมปรับอากาศและการเกษตรด้วย แสดงเซนเซอร์วัดความดัน โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวแปลงสัญญาณ [1] ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เซนเซอร์ชนิดวัดความดัน โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวแปลงสัญญาณ [1]

2.1.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์ทั่วไปและเซนเซอร์วัดความดันในระบบไฟฟ้าเครื่องกลอุตสาหกรรม

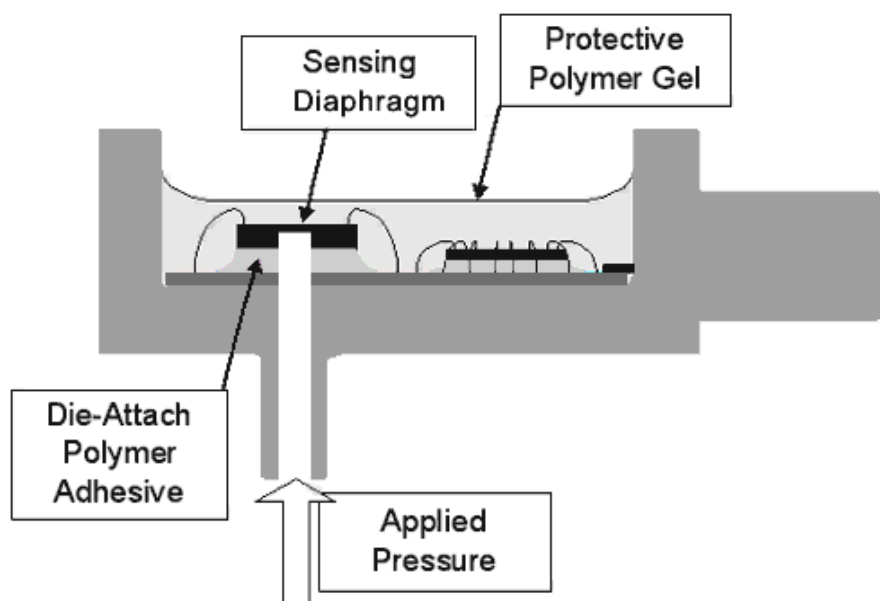
เซนเซอร์ทั่วไปในระบบไฟฟ้าเครื่องกลอุตสาหกรรมของ [1] มีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีสัญญาณขาเข้า (Input Signal) เข้ามาในระบบจะมีหน่วยรับสัญญาณ (Micro sensing Element) เพื่อรับสัญญาณขาเข้าที่มีการเปลี่ยนแปลง และส่งต่อให้หน่วยแปลงสัญญาณ (Transduction Unit) เป็นหน่วยที่อ่านค่าที่รับเข้ามาหรือจะเรียกได้ว่าเป็นตัวอ่านเซนเซอร์ ซึ่งในหน่วยนี้เองจะได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายภายนอก เช่น พลังงานไฟฟ้า เมื่ออ่านค่าที่รับเข้ามาจากตัวเซนเซอร์แล้วระบบนี้ก็จะส่งสัญญาณขาออก ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบอาจส่งสัญญาณขาออกมาในรูปของ กระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้า หรือค่าอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่เลือกที่ใช้ แผนภาพหลักการทำงานของ ไมโครเซนเซอร์แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของไมโครเซนเซอร์ [1]

ซึ่งหลักการในการทำงานนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเซนเซอร์ในระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคได้หลากหลายชนิด เซนเซอร์วัดความดันขนาดเล็กเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทำงานดังกล่าวโดยที่ตัวเซนเซอร์วัดความดันสามารถอ่านระยะทางที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการโก่งงอของโครงสร้างทางกลแล้วแปลงค่าส่งสัญญาณขาออกมาเป็นความดัน โดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวแปลงสัญญาณ เริ่มทำงานเมื่อมีการให้แรงดันทางไฟฟ้า ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เมื่อเซนเซอร์วัดความดันได้รับความดันจากภายนอกทำให้เกิดการโก่งตัวของฟิล์มที่ติดอยู่กับอิเล็กโทรดซึ่งเมื่อช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

เซนเซอร์วัดความดันในระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค มีหลักการทำงาน คือ การตรวจวัดความดันของก๊าซหรือเหลว โดยเซนเซอร์จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความดัน เซนเซอร์ที่ถูกสร้างขึ้น มันจะถูกออกแบบให้แผ่นรับความดันบางสามารถโค้งงอได้ตามความดัน ซึ่งระดับความโค้งงอสามารถวัดได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือ การเปลี่ยนแปลงของการเก็บประจุ ในการพัฒนาเซนเซอร์แรกเริ่มทำด้วยวิธีการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (Surface Micromachining) สำหรับใช้งานในช่วงความดันต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันในเส้นเลือด เป็นต้น สำหรับในปัจจุบันได้มีการนำโครงสร้างของเซนเซอร์ประเภทนี้มาพัฒนาเป็นระบบการวัดแรงดันน้ำและแรงดันลม (Pressure Transmitter) ที่มีความละเอียดสูงสำหรับงานอุตสาหกรรมปรับอากาศและการเกษตรด้วยซึ่งวัสดุหลักของเครื่องวัดความดันมักจะทำมาจากวัสดุหลัก (Diaphragm) ประเภทซิลิกอน แสดงภาพตัดขวางของเครื่องวัดความดันประเภทซิลิกอนของ Ninghai Sendo Sensor Co., [2] ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของเครื่องวัดความดันประเภทซิลิกอนของ Ninghai Sendo Sensor Co., [2]

2.2 ปรัชน์วรรณกรรมเกี่ยวกับเซนเซอร์ประเภทกระดาษ (Paper based sensors)







ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในการ ติดต่อสื่อสาร และส่งผ่านข้อมูล ต่างๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถคือทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อเปิดปิดวงจร ซึ่งเป็น ส่วนประกอบสำคัญในระบบคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ วงจรอิเล็กทรอนิกส์นี้ยังถูกนำไปใช้ผลิต พลังงานทดแทน เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน ในการส่งพลังงานไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล และยังมีใช้ใน อุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งพบเห็นได้ทั่วไป แต่วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตมักจะมีราคาแพง และย่อยสลาย เองไม่ได้ตามธรรมชาติหรืออาจเป็นพิษ ด้วยความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีการผลิตที่ นำสมัย เหตุนี้เองทำให้กระดาษเข้ามามีบทบาทในการผลิต เนื่องจากกระดาษมีราคาถูก มีหลากหลาย ชนิด สามารถหาซื้อได้ทั่วไป น้ำหนักเบา ย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึง เกิดการประยุกต์ใช้กระดาษในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อนำมาปรับใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง เซนเซอร์วิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทกระดาษ (Quantitative Analysis sensors) เป็นเซนเซอร์ที่มี การใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์การไหลจุลภาคประเภทกระดาษ (paper-based microfluidic devices) เนื่องจากสามารถทดสอบปริมาณของสารที่ต้องการทราบได้

2.2.1 เซนเซอร์วิเคราะห์เชิงปริมาณประเภทกระดาษ (Quantitative Analysis sensors)

สามารถแบ่งเซนเซอร์ตามประเภทการใช้งาน ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจสอบเทียบเคียง (Colorimetric Detection), เซนเซอร์ตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Detection), เซนเซอร์ตรวจสอบทางไฟฟ้า (Electrical Detection) และ เซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและเซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Chemiluminescent and Electrochemiluminescent Detection)

2.2.1.1 เซนเซอร์ตรวจสอบเทียบเคียง (Colorimetric Detection)

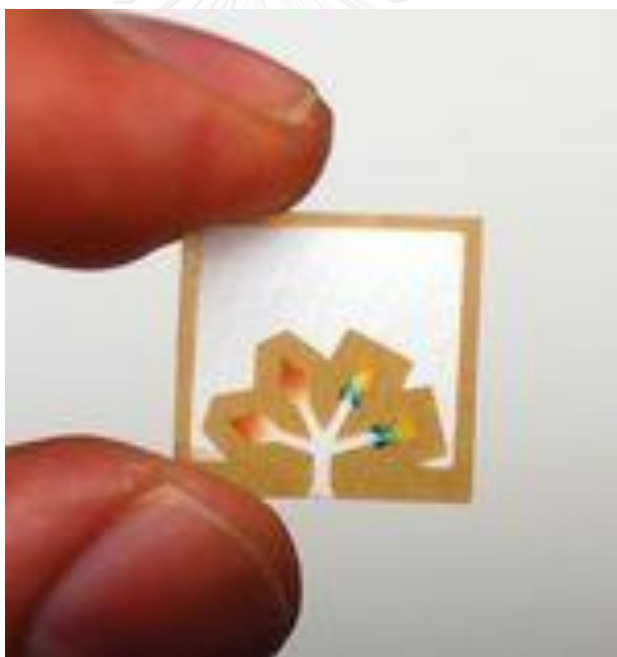
Colorimetric Detection เป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบและวิเคราะห์สารโดยจะแสดงผลด้วยการเปลี่ยนแปลงของสีที่แสดงบนกระดาษซึ่งจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตา เนื่องจากเกิดการทำงานร่วมกันของเอนไซม์ที่ใช้ทดสอบ เช่น อุปกรณ์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสและโปรตีน Martinez et al., 2008 [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ Lab on a chip

[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 อุปกรณ์ในการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสและโปรตีน Martinez et al., 2008[3]

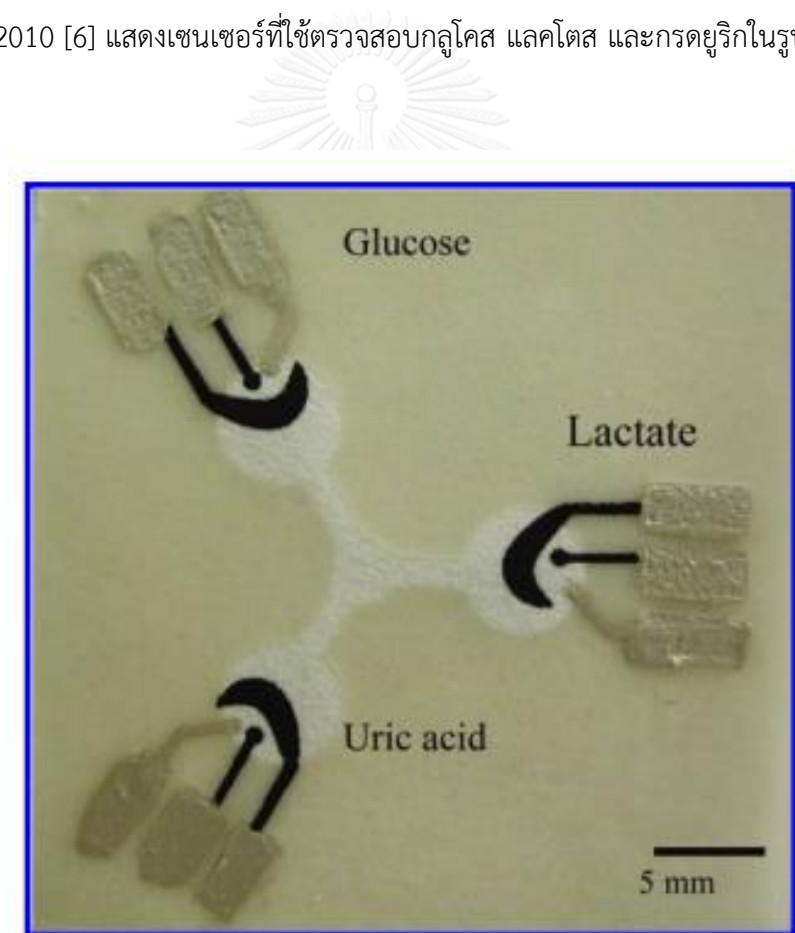
Lab on a chip คืออุปกรณ์ขนาดเล็กซึ่งถือเป็นอุปกรณ์ในการตรวจสอบและวิเคราะห์สารที่รวบรวมเอากระบวนการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory) มารวมไว้บนแผ่นชิปขนาดเล็กเพียงชิ้นเดียว เพื่อที่จะสามารถตรวจวิเคราะห์ทางเคมีได้อย่างรวดเร็วและให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ โดยแลปบนชิปนี้ใช้เทคนิคการจัดการกับของไหลที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยให้ไหลไปตามทางขนาดเล็ก ซึ่งมักจะเป็นการไหลแบบชั้น (Laminar flow) จึงอาจมีการรบกวนการไหลเพื่อทำให้การไหลเป็นแบบกวน (Turbulent flow) เพื่อให้เกิดการผสมกันของสาร โดยแลปบนชิปที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะพัฒนาไปในทิศทางที่ทำให้มีขนาดเล็กลง ต้นทุนของวัสดุหลักในการผลิตต่ำ กระบวนการสร้างไม่ซับซ้อน เพื่อเป็นการลดต้นทุนในระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ แลปบนชิปประเภทกระดาษแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจากรูปแสดงแลปบนชิปประเภทกระดาษที่ใช้ทดสอบความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (Glucose) และความเข้มข้นของโปรตีน (Protein) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ผลลัพธ์ของการทดสอบแสดงด้วยสีที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แลปบนชิปประเภท กระดาษ Andres et al, 2010 [4]

2.2.1.2 เซนเซอร์ตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Detection)

เซนเซอร์ชนิดนี้ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ระบบไฟฟ้า 3 ขั้ว ในการทำงานคือ working electrode, counter electrode และ reference electrode โดยจะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในระบบ ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารที่ต้องการตรวจสอบแล้วจึงวัดค่ากระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถใช้เซนเซอร์ชนิดนี้ตรวจสอบทางไฟฟ้า (electro analytical) ได้เนื่องจากขั้วไฟฟ้าของแข็งมักมีราคาแพง การสร้างเซนเซอร์ตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้าชนิดกระดาษจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการตรวจสอบทางไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบกลูโคส แลคโตส และกรดยูริก [5] Henry et al.,2009 และเซนเซอร์ที่ใช้ในการวินิจฉัยโรคประเภทกระดาษเพื่อตรวจสอบปริมาณน้ำตาลในเลือด Nie et al., 2010 [6] แสดงเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบกลูโคส แลคโตส และกรดยูริกในรูปที่ 2.6



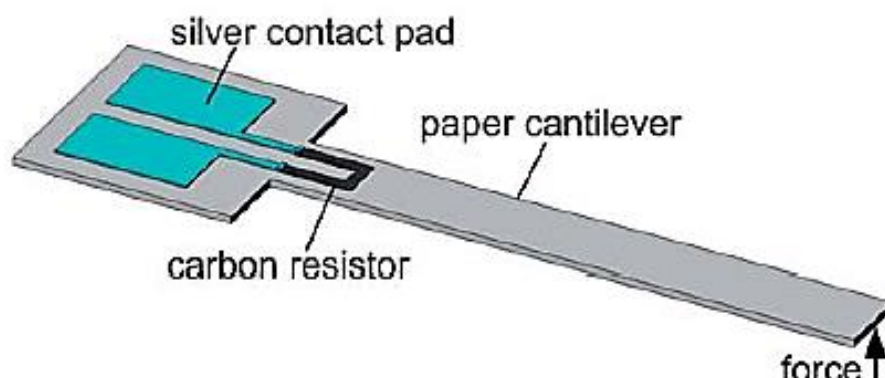
รูปที่ 2.6 เซนเซอร์ใช้ตรวจสอบกลูโคส แลคโตส และกรดยูริกโดยใช้วิธีตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้า Henry et al.,2009 [5]

2.2.1.3 เซนเซอร์ตรวจสอบทางไฟฟ้า (Electrical Detection)

เป็นการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางไฟฟ้าของวัสดุในรูปของสารเคมีบนกระดาษ โดยมีลักษณะเด่นคือมีการใช้งานง่ายและต้องการกำลังทางไฟฟ้าที่ต่ำในการทำงาน ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟประเภทกระดาษ

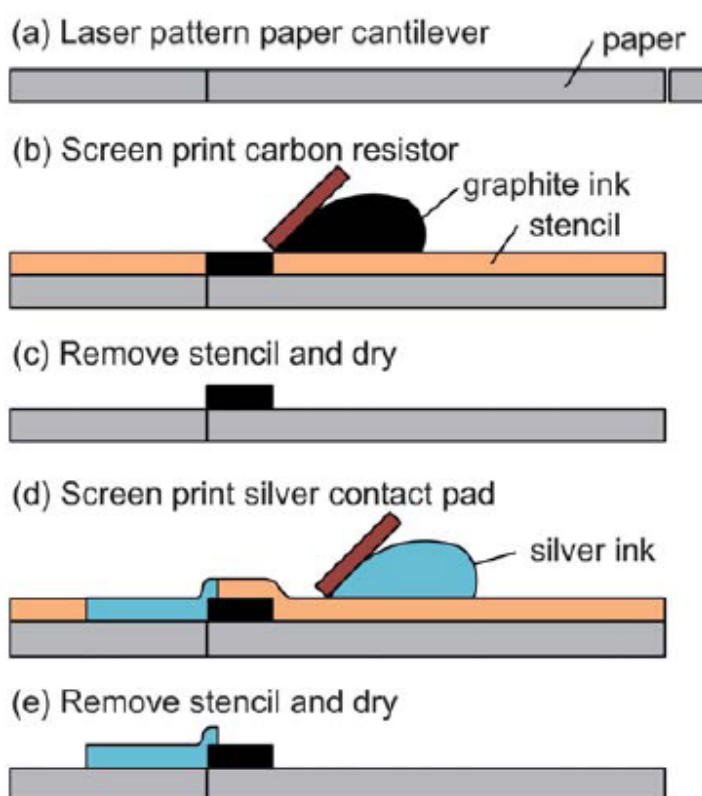
เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ (Paper based piezoresistive force sensor) Liu et al., 2011 [7] เป็นการนำเอากระดาษมาเป็นมาใช้เป็นโครงสร้างหลักในพัฒนาเซนเซอร์วัดแรงในระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค โดยอาศัยหลักการทำงานที่วัสดุประเภทเพียโซรีซิสทีฟมีความต้านทานทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อได้รับแรงเค้นทางกล หรือที่เรียกว่า เพียโซรีซิสทีฟเอฟเฟกต์

การสร้างเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ เป็นการสร้างลวดลายที่ต้องการลงบนกระดาษ โดยใช้วัสดุประเภทเพียโซรีซิสทีฟ ซึ่งการใช้วัสดุเพียโซรีซิสทีฟนี้ ทำให้ได้เซนเซอร์วัดความดันที่เรียกว่า เพียโซรีซิสเตอร์ โดยมีลักษณะสำคัญคือมีหน้าสัมผัส 2 หน้า (Contact pad) ซึ่งมีไว้เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าภายนอกเพื่อใช้วัดค่าปริมาณความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยหน้าสัมผัสทั้ง 2 หน้า ใช้วัสดุประเภทซิลเวอร์ (Silver paste) ซึ่งซิลเวอร์นี้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี ใช้น้ำหมึกแกรไฟต์ (Graphite ink) เป็นวัสดุเพียโซรีซิสทีฟและใช้เลเซอร์ในการตัดกระดาษให้มีลักษณะตามต้องการ คือเป็นคานซึ่งมีปลายข้างหนึ่งยื่นออกมา เพื่อใช้เป็นส่วนที่รับแรงของเซนเซอร์วัดแรง แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษ Liu et al., 2011 [7]

การขึ้นรูปของวงจรทำได้โดยการพิมพ์แบบสกรีนโดยใช้แม่พิมพ์ เป็นบล็อกสกรีน ใช้หมึกซิลเวอร์เป็นวงจรในส่วนของหน้าสัมผัส และใช้แกรไฟต์เป็นส่วนของวงจรตัวต้านทาน ใช้กระดาษกรองวอทแมน (Whatman) เป็นโครงสร้างหลักเนื่องจากมีคุณสมบัติในการคัดกรองอนุภาคหรือสิ่งเจือปนขนาดเล็กออกจากสารละลายและมีความคงทนเมื่อเปียกน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถกักเก็บอนุภาคของสารที่ต้องการไว้ที่ผิวของกระดาษและยังมีคุณสมบัติเป็น Hydrophilic คือชอบน้ำและสามารถดูดซึมน้ำได้ แสดงขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษในรูปที่ 2.8



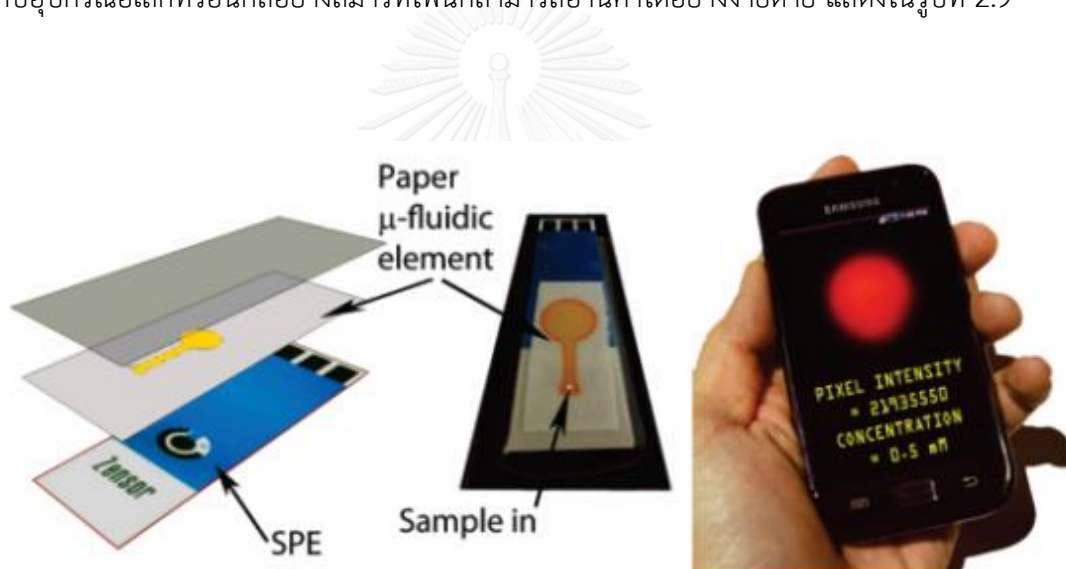
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ Liu et al., 2011 [7]

(a) ตัดกระดาษกรองด้วยเลเซอร์ให้เป็นคานปลายยื่น (b) พิมพ์แกรไฟต์ลงบนกระดาษ (c) ยกบล็อกสกรีนออกและทิ้งไว้ให้แห้ง (d) พิมพ์หมึกซิลเวอร์ลงบนกระดาษกรองเพื่อใช้เป็นหน้าสัมผัส (e) วงจรซิลเวอร์หลังจากที่ยกบล็อกสกรีนออกและทิ้งไว้ให้แห้ง

ซึ่งเราสามารถประยุกต์ใช้ความสามารถของวัสดุเพียโซรีซิสทีฟและเซนเซอร์วัดแรงประเภทเพียโซรีซิสทีฟชนิดกระดาษมาช่วยในการวิเคราะห์และการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษในวิทยานิพนธ์นี้ได้

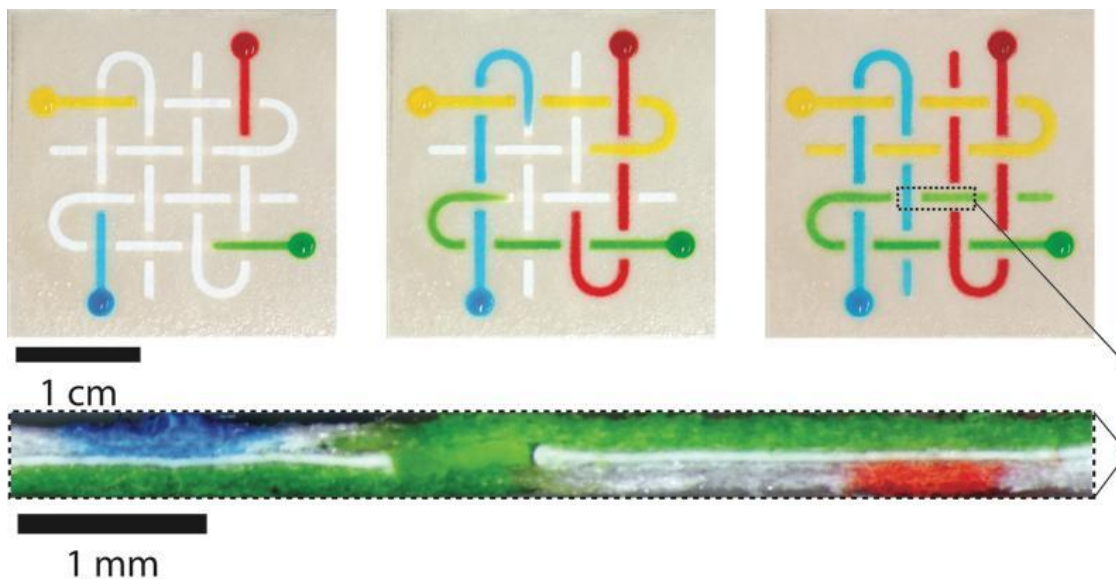
2.2.1.4 เซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและเซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Chemiluminescent and Electrochemiluminescent Detection)

เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากมีความไวสูง และมีความเรียบง่ายในการใช้งานโดยสามารถอ่านค่าได้จากความเข้มของแสงที่เปล่งออกมา เมื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างสมาร์ทโฟนก็สามารถอ่านค่าได้อย่างง่ายดาย แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เซนเซอร์ตรวจสอบการเปล่งแสงที่ใช้ในการทดสอบสาร Delaney et al., 2011 [8]

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประเภทกระดาษอื่นๆที่เริ่มมีการนำมาใช้งาน เช่น อุปกรณ์ด้านการไหลของของไหลประเภทกระดาษ (Paper based microfluidic) ซึ่งมีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบเชิงปริมาณในระบบของไหลจุลภาคในอนาคต ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ด้านการไหลของของไหลประเภทกระดาษ Martinez et al., 2008 [9]

2.2.2 วิธีการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์ประเภทกระดาษขนาดไมครอน

วิธีการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์ประเภทกระดาษขนาดไมครอนนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การสร้างลวดลายด้วยวิธีพิมพ์แบบสกรีน (Print Screen), การสร้างลวดลายด้วยวิธีพิมพ์อิงค์เจ็ท, การสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากน้ำ, การสร้างลวดลายโดยการใช้สเปรย์และการสร้างลวดลายด้วยการฉายแสง

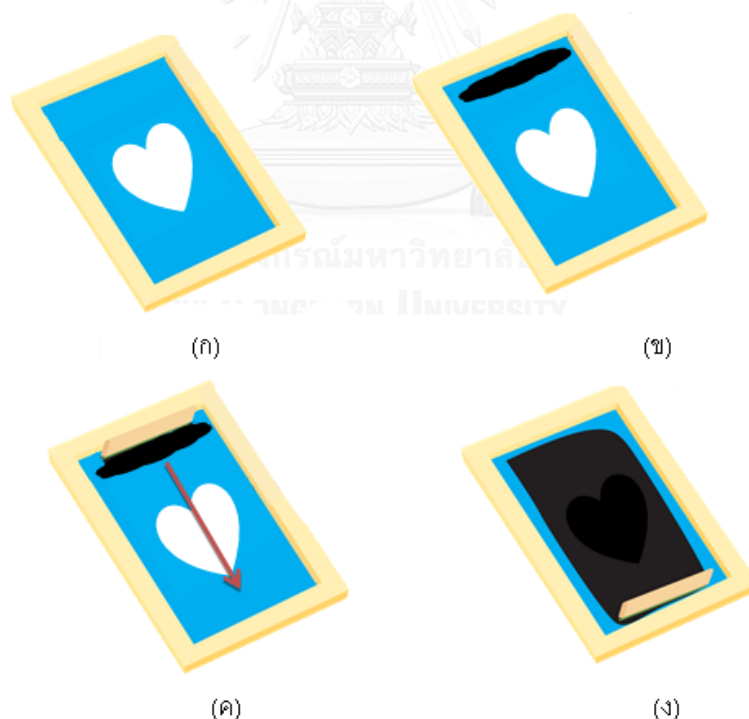
2.2.2.1 การสร้างลวดลายด้วยวิธีพิมพ์แบบสกรีน (Print Screen)

วิธีการนี้พบเห็นได้ทั่วไปสำหรับการพิมพ์ผ้า หรือพิมพ์ลวดลายลงบนเสื่อยืดโดยอุปกรณ์สำคัญที่ใช้คือ บล็อกสกรีน สี และไม้ยางพารา โดยจะต้องออกแบบลวดลายที่ต้องการพิมพ์บนชิ้นงานในโปรแกรม ILLUSTRATOR (Ai) ให้มีขนาดและลวดลายตามที่ต้องการและจึงทำการสร้างลวดลายบนบล็อกสกรีนโดยอาศัยการฉายแสง และจะมีน้ำยาไวแสงซึ่งทำปฏิกิริยากับแสงที่ฉาย หลังจากทิ้งไว้จะทำให้เกิดรูปตามทีออกแบบขึ้นบนบล็อกสกรีน และมีกาวอัด ซึ่งทำให้เกิดการติดกันของน้ำยาไวแสงและบล็อกสกรีน หลังจากนั้นจึงสามารถนำบล็อกสกรีนไปใช้งานได้ แสดงขั้นตอนการพิมพ์แบบสกรีนในรูปที่ 2.11

ขั้นตอนแรก ทำความสะอาดบล็อกสกรีนให้สะอาดโดยการเอาผ้าแห้งมาเช็ดทำความสะอาด เอาฝุ่นผง หรือสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ออกให้หมด หลังจากนั้นจึงนำเอาชิ้นงานวางไว้หลังบล็อกสกรีนโดยทำการยึดชิ้นงานให้แน่นและให้ชิ้นงานแนบกับบล็อกสกรีนให้สนิทแล้วจึงเทสีไว้ด้านบนของบล็อกสกรีน โดยเทสีให้มีประมาณปริมาณสีให้มากกว่าปริมาณที่ใช้จริง

ขั้นตอนที่สอง ปาดสีจากด้านบนลงมาด้านล่าง โดยให้เอียงไม้ยางพาราเข้าหาตัวเล็กน้อย กดน้ำหนักพอประมาณ ปาดสีจนเลยรูปบนบล็อกสกรีน โดยการปาดในหนึ่งครั้งต้องปาดจากขอบหนึ่งไปยังอีกขอบหนึ่งอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สีที่พิมพ์ลงบนชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่สามให้พลิกไม้ยางพาราอีกฝั่ง ปาดโดยเอาสีที่เหลือไว้ด้านบนในส่วนปลายของไม้ยางพาราแล้วจึงปาดข้างจนสุดขอบอีกฝั่ง ทำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าสีจะเต็มแบบเมื่อสีเต็มแบบแล้วจึงถอดเอาชิ้นงานไปตากให้แห้ง เมื่อพิมพ์ลวดลายลงบนชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จึงทำการล้างบล็อกสกรีน โดยเน้นล้างบริเวณที่เป็นลวดลายของบล็อกสกรีนให้สะอาดเนื่องจากอาจเกิดการอุดตันของบล็อกสกรีนในการใช้งานครั้งต่อไป และต้องเก็บรักษาให้ห่างจากของมีคม เนื่องจากอาจเกิดการขีดขูดของสิ่งมีคมทำให้บล็อกสกรีนเป็นรอยและอาจฉีกขาดได้



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการพิมพ์แบบสกรีน (ก) บล็อกสกรีนที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการฉายแสงแล้ว (ข) เทสีที่ต้องการพิมพ์ลงด้านบนของบล็อกสกรีน (ค) ใช้ไม้ยางพาราปาดสีบนบล็อกสกรีนเข้าหาตัว (ง) สีจะทะลุบล็อกสกรีนเป็นลวดลายตามที่ออกแบบบนชิ้นงาน

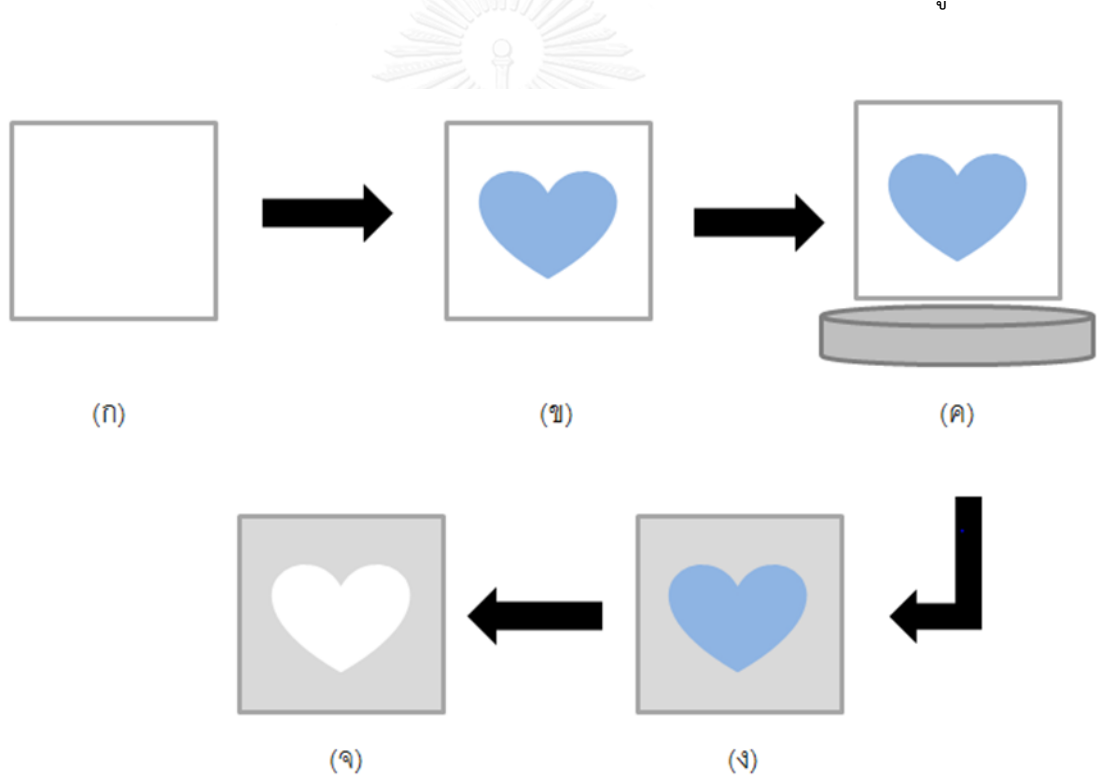
2.2.2.2 การสร้างลวดลายด้วยวิธีพิมพ์อิงค์เจ็ท

เทคนิคการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย สามารถนำมาใช้ในการสร้างภาพในรูปแบบ 2 มิติ โดยเฉพาะงานทางด้านอาร์ตเวิร์ค หรือการพิมพ์งานเอกสารทั่วไป อิงค์เจ็ทปริ้นเตอร์ เป็นเครื่องพิมพ์ชนิดหนึ่ง อาศัยการพ่นน้ำหมึกลงบนกระดาษหรือชิ้นงาน โดยน้ำหมึกจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดขนาดเล็กซึ่งหมึกที่ใช้จะเป็นสีดำและแม่สี 3 สี คือ แดง(Magenta) เหลือง(Yellow) และน้ำเงิน(Cyan) สามารถพิมพ์ได้เร็ว ผสมสีให้ได้ในตัวมีหลักการทำงาน คือ เมื่อเราสั่งพิมพ์ที่หน้าจคอมพิวเตอร์จะเกิดกระบวนการทำงานเป็นลำดับต่อเนื่องดังนี้ เริ่มต้นจากซอฟต์แวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลคำสั่งการพิมพ์ไปยังเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท ไดรฟ์เวอร์จะส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท ผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อ หลังจากนั้นเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท จะรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์และทำการเก็บข้อมูลนั้นไว้ในบัฟเฟอร์ เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจะเริ่มพิมพ์จากตำแหน่งเริ่มต้นของหน้าแรก มอเตอร์หัวพิมพ์จะบังคับสายพานให้เลื่อนชุดหัวพิมพ์ไปมาอย่างเป็นจังหวะ การพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทจะพิมพ์ทีละจุด ทีละแถบเรียงต่อเนื่องติดกันไปบนกระดาษ ซึ่งหัวพิมพ์จะฉีดหมึกในโหมดสี CMYK ได้อย่างแม่นยำ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปจะไหลผ่านตัวต้านทานที่มีลักษณะบางซึ่งอยู่ที่ด้านล่างหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าไปนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานดังกล่าว การที่เกิดอุณหภูมิสูงมากในระยะเวลานั้นๆ จะทำให้หมึกเดือดจนก่อตัวเป็นไอ และกลายเป็นฟองลอยขึ้นมาจากด้านล่างดันให้น้ำหมึกผ่านท่อ จึงเกิดการพ่นน้ำหมึกออกมา ปริมาณน้ำหมึกที่พ่นออกมาจะน้อยมากประมาณหนึ่งในล้านของหยดน้ำปกติ การทำให้เกิดตัวอักษรหนึ่งตัวต้องใช้จุดหมึกมากกว่าหนึ่งจุดแล้วแต่ข้อมูลที่มีอยู่ในตาราง เมื่อตัวต้านทานเย็นตัวลงฟองอากาศที่ขยายตัวก็จะหายไปพร้อมกับดูดน้ำหมึกเข้ามาในหัวฉีดใหม่เตรียมพร้อมสำหรับการพ่นครั้งต่อไป เมื่อสิ้นสุดการพ่นหมึกในหนึ่งแถวกระดาษ เครื่องก็จะเลื่อนกระดาษขึ้นพิมพ์แถวถัดมา ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจน พิมพ์เสร็จทั้งหน้า หัวพิมพ์จะหยุด มอเตอร์ที่ดึงกระดาษจะหมุนลูกกลิ้งหลักกระดาษที่พิมพ์เสร็จแล้วออกมาด้านหน้าเครื่องพิมพ์

คุณลักษณะเด่นของเครื่องพิมพ์แบบนี้คือ มีตลับหมึกสีแยกอิสระ สามารถถอดเปลี่ยนใหม่ได้คุณภาพการพิมพ์คมชัดกว่าแบบใช้หัวเข็มและให้ความละเอียดสูง นอกจากนี้เทคนิคการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทสามารถพิมพ์งานได้โดยไม่สัมผัสกับลวดลายและทั้งระบบทำงานภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำ อีกทั้งยังสามารถพิมพ์งานลงบนชิ้นงานได้หลายประเภท

2.2.2.3 การสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากน้ำ

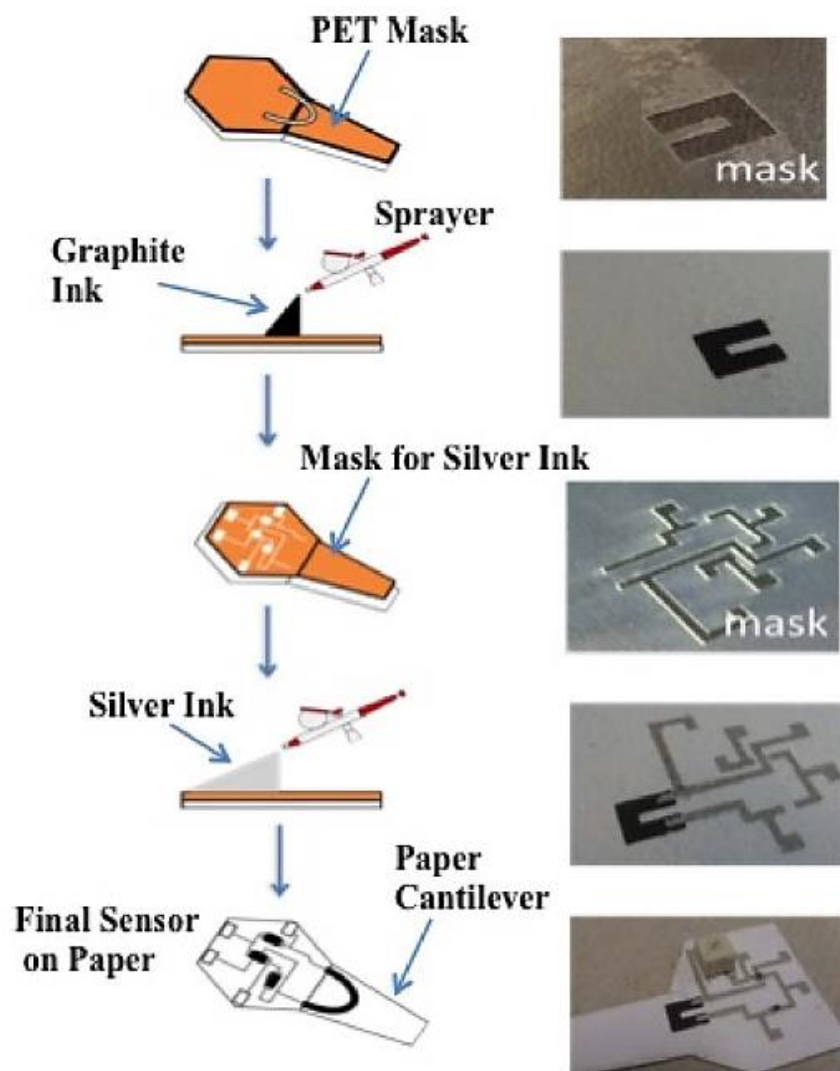
การใช้หน้ากากน้ำ Punpanttanakul et al., 2012 [10] เป็นการสร้างลวดลายของวัสดุชนิดหนึ่ง โดยการพิมพ์น้ำซึ่งผ่านการผสมกับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เพื่อปรับลดความตึงผิวและความหนืดให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการพิมพ์ ออกแบบลวดลายแล้วจึงพิมพ์น้ำลงไปในกระดาษกรองให้ออกมาเป็นลวดลายที่ต้องการ หลังจากนั้นนำกระดาษกรองไปซุบลงในโพลีเมอร์ที่ถูกละลายในสารละลาย น้ำที่ถูกพิมพ์ลงไปจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันโพลีเมอร์และสารละลายไม่ให้แทรกซึมเข้าไปในกระดาษ เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติที่ไม่มีขั้ว ส่วนสารละลายมีคุณสมบัติมีขั้วต่ำ หรือแทบจะไม่มีเลย จึงไม่สามารถเข้ากันหรือละลายซึ่งกันได้ หลังจากซุบแล้วก็นำออกมา ปล่อยให้แห้ง ทำให้สารละลายและน้ำที่พิมพ์ลงไปแห้งและระเหยออกไปจนหมด เหลือทิ้งไว้แค่โพลีเมอร์เคลือบไว้บริเวณที่ไม่ได้พิมพ์น้ำเท่านั้น แสดงขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการหน้ากากน้ำในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยวิธีการหน้ากากน้ำ Punpanttanakul et al.,2012 [10]
 (ก) กระดาษกรอง (ข) พิมพ์น้ำลงบนกระดาษกรอง (ค) นำกระดาษกรองไปซุบลงในโพลีเมอร์ที่ถูกละลายในสารละลาย (ง) กระดาษกรองหลังซุบลงในโพลีเมอร์ที่ถูกละลายในสารละลาย (จ) กระดาษกรองหลังจากปล่อยให้สารละลายและน้ำระเหยแห้งออกไป

2.2.2.4 การสร้างลวดลายด้วยการใช้สเปรย์พ่น

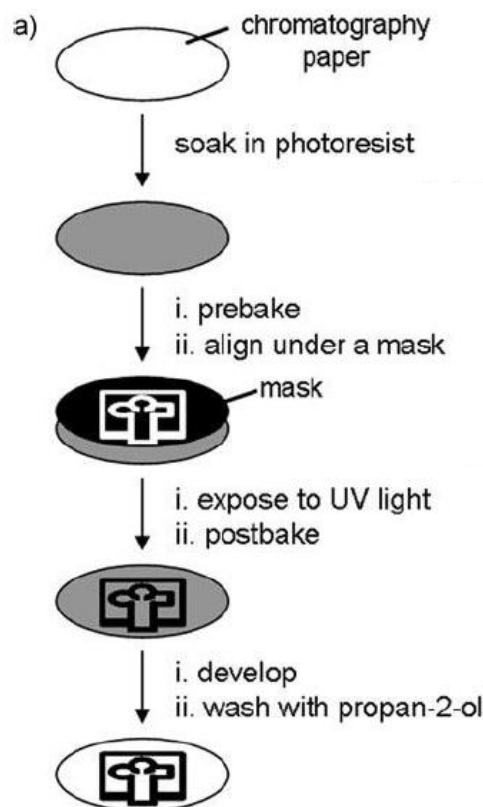
ในการสร้างลวดลายด้วยการใช้สเปรย์พ่นนั้นจะมีการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาตามรูปแบบที่ต้องการนำไปวางบนวัสดุที่ต้องการสร้างลวดลาย แล้วจึงทำการฉีดสเปรย์พ่นสารที่ต้องการลงบนแม่พิมพ์ แสดงตัวอย่างงานที่ใช้การสร้างลวดลายด้วยวิธีการใช้สเปรย์พ่นในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เซนเซอร์วัดแรงประเภทกระดาษที่สร้างลวดลายด้วยวิธีการใช้สเปรย์ Kim et al., 2012 [11]

2.2.2.5 การสร้างลวดลายด้วยการฉายแสง (photolithography)

วิธีการนี้เป็นการสร้างลวดลายด้วยการฉายแสงโดยการใช้พอลิเมอร์ SU-8 โดยการนำเอากระดาษกรองไปชุบในสารละลายให้มีคุณสมบัติไวต่อแสง แล้วจึงทำการฉายแสงผ่านหน้ากาก พอลิเมอร์บริเวณที่ไม่โดนฉายแสงจะอ่อนแอลงและถูกกำจัดออก แล้วจึงนำชิ้นงานไปอบหลังการฉายรังสี เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เช่นความแข็งแรง หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปล้างในสารละลายที่เป็น developer เพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการออก ทำให้ได้ลวดลายตามต้องการแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การสร้างลวดลายด้วยวิธีการฉายแสง Martinez et al., 2008 [3]

2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับแถบทดสอบการตั้งครรภ์

2.3.1 การตรวจหาสารเคมีและสารโมเลกุลชีวภาพ (ELISA)

ในการวิเคราะห์หาสารเคมีนั้นสามารถแบ่งการวิเคราะห์ได้ 2 ประเภทคือ การวิเคราะห์เชิงปริมาณว่ามีสารที่ต้องการตรวจสอบมากน้อยเพียงไร และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพว่าพบสารที่ต้องการตรวจสอบหรือไม่ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้หลายวิธี และในแต่ละวิธีก็จะมีผลการแสดงผลในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ในช่วงแรกของการพัฒนาการวิเคราะห์สารเคมีนั้นวิเคราะห์สารเคมีโดยใช้การชั่ง ตวง เพื่อวัดค่าพื้นฐานต่างๆ ต่อมาในภายหลังจึงมีการนำหลักการทางเคมีฟิสิกส์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบ เช่น หลักการของแสง หลักการทางไฟฟ้า เป็นต้น ในส่วนของการตรวจวัดสารโมเลกุลชีวภาพนั้นก็สามารถตรวจสอบได้หลายวิธี แต่วิธีการที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือวิธีการของอีไลซ่า (ELISA) Richard et al, 2000 [12]

ELISA หรือชื่อเต็มคือ Enzyme-Linked Immunosorbent Assay เป็นวิธีการตรวจวัดสารโมเลกุลชีวภาพที่ได้รับการยอมรับในวงกว้างเนื่องจากมีผลการตรวจสอบที่แม่นยำ มักใช้ในการตรวจวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารก่อภูมิคุ้มกัน (Antigen) และสารภูมิคุ้มกัน (Antibody) ในระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในคน สัตว์และพืช และในปัจจุบันมีการใช้วิธีการวิเคราะห์สารชีวโมเลกุลด้วยวิธีของ ELISA ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ และใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบคุณภาพของสิ่งเจือปนในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับผู้บริโภคได้ในเบื้องต้น วิธีการวิเคราะห์สารชีวโมเลกุลของ ELISA ที่ทำการศึกษา มีด้วยกัน 3 วิธี คือ Indirect ELISA, Sandwich ELISA และ Competitive ELISA

2.3.1.1 Indirect ELISA

วิธีการนี้ตรวจสอบสารชีวโมเลกุลโดยอาศัยหลักการตรวจหาสารภูมิคุ้มกันที่อยู๋ในสารตัวอย่าง เริ่มด้วยการใช้สารก่อภูมิคุ้มกันที่มีความจำเพาะกับสารภูมิคุ้มกัน ซึ่งสารทั้งสองนี้จะสามารถจับและรวมตัวกัน เมื่อสารภูมิคุ้มกันจับกับสารก่อภูมิคุ้มกันแล้วจำเป็นต้องทำการล้างออก เพื่อเอาปริมาณสารส่วนเกินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกแล้วจึงใส่สารภูมิคุ้มกันตัวที่สองที่ติดฉลากเอนไซม์ (Enzyme) และมีความจำเพาะกับสารภูมิคุ้มกันตัวแรก ในกระบวนการนี้สารภูมิคุ้มกันตัวแรกจะจับกับสารภูมิคุ้มกันตัวที่สอง หลังจากนั้นจำเป็นต้องทำการล้างออก เพื่อเอาปริมาณสารส่วนเกินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกเช่นเดิม ในขั้นตอนสุดท้ายจึงใส่สารตั้งต้น (Substrate) ลงไป ทำให้

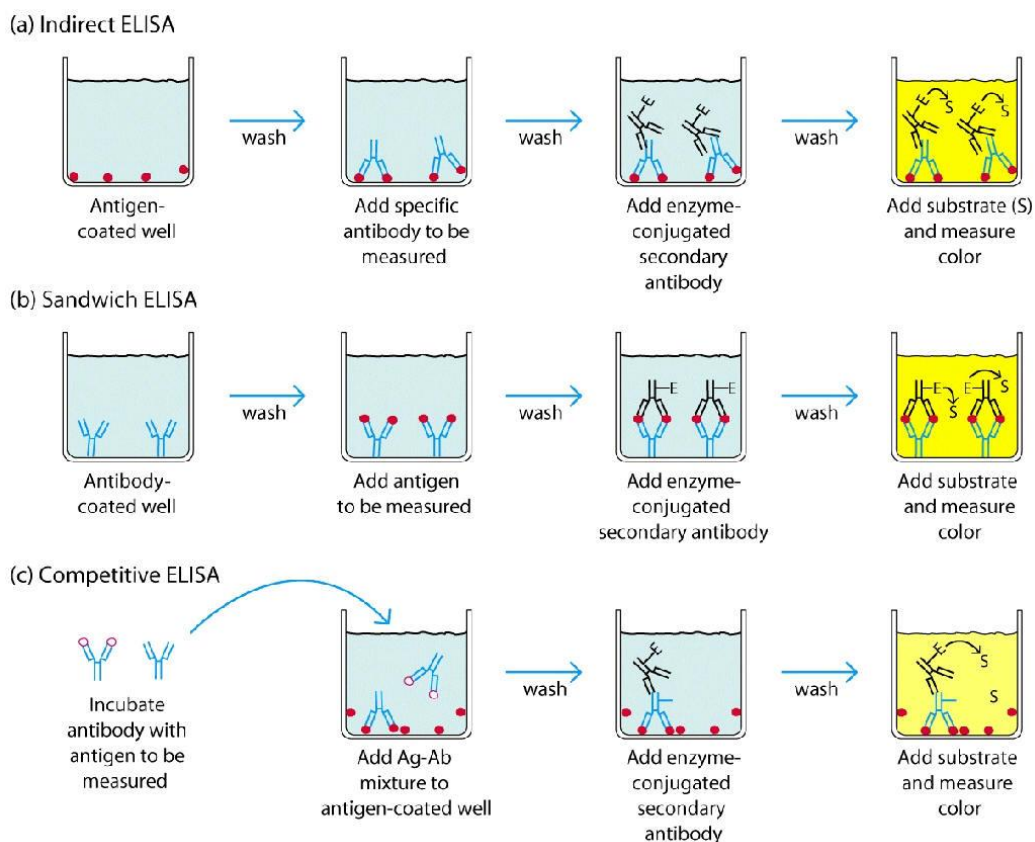
เอนไซม์ที่ติดอยู่กับสารภูมิต้านทานตัวที่สองจะเกิดการย่อยสารตั้งต้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ซึ่งความเข้มข้นของสีที่แสดงจะขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ซึ่งแปรผันตรงกับสารภูมิต้านทานที่เราต้องการตรวจหา

2.3.1.2 Sandwich ELISA

การตรวจสอบสารชีวโมเลกุลด้วยวิธีนี้เป็น การตรวจหาสารก่อภูมิต้านทานที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ในขั้นแรกของการตรวจสอบ จะใช้สารภูมิต้านทานที่มีความจำเพาะกับสารก่อภูมิต้านทานที่ต้องการตรวจหา โดยจะติดสารภูมิต้านทานที่ภาชนะที่ต้องการทดสอบ แล้วจำเป็นต้องทำการล้างออก เพื่อเอาปริมาณสารส่วนเกินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออก แล้วจึงใส่สารตัวอย่างที่ต้องการตรวจหาสารก่อภูมิต้านทาน ในขั้นตอนนี้เองสารก่อภูมิต้านทานและสารภูมิต้านทานจะจับและรวมตัวกัน นำไปล้างออกอีกครั้ง แล้วจึงใส่สารภูมิต้านทานตัวที่สองที่มีความจำเพาะกับสารก่อภูมิต้านทานที่ต้องการตรวจหา พร้อมกับติดฉลากเอนไซม์ เมื่อสารก่อภูมิต้านทานจับและรวมตัวกับสารภูมิต้านทานตัวที่สองแล้ว จึงนำไปล้างออกอีกทีหนึ่ง หลังจากนั้นจึงใส่สารตั้งต้นลงไป เอนไซม์ที่ติดอยู่กับสารภูมิต้านทานตัวที่สอง จะทำการย่อยสารตั้งต้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีซึ่งความเข้มข้นของสีที่แสดงจะขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ซึ่งแปรผันตรงกับสารก่อภูมิต้านทานที่เราต้องการตรวจหา

2.3.1.3 Competitive ELISA

การตรวจสอบสารชีวโมเลกุลด้วยวิธีนี้เป็น การตรวจหาสารภูมิต้านทานที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ในขั้นแรกของการตรวจสอบ เริ่มด้วยการใช้สารก่อภูมิต้านทานที่มีความจำเพาะกับสารภูมิต้านทานที่ต้องการตรวจหา มาทำการบ่มรวมกันไว้ ซึ่งสารก่อภูมิต้านทานและสารภูมิต้านทานบางส่วนจะเกิดการจับคู่และรวมตัวกัน ซึ่งไม่จำเป็นต้องรอให้จับคู่กันทั้งหมด เมื่อบ่มแล้วจึงนำไปใส่ในภาชนะที่ต้องการทดสอบที่มีสารก่อภูมิต้านทานที่ภาชนะที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นสารภูมิต้านทานที่ไม่ได้จับคู่กับสารก่อภูมิต้านทานในการบ่มขั้นต้น จะเข้าไปจับกับสารก่อภูมิต้านทานที่อยู่ในภาชนะ แล้วจึงทำการล้างออกและใส่สารภูมิต้านทานตัวที่สองที่มีความจำเพาะกับสารก่อภูมิต้านทานตัวแรกซึ่งติดฉลากเอนไซม์ ในขั้นตอนนี้สารภูมิต้านทานตัวแรกที่เราต้องการตรวจหา นั้นจะเข้าไปจับกับสารก่อภูมิต้านทานตัวที่สอง แล้วจึงทำการล้างออกอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นจึงใส่สารตั้งต้นลงไป เอนไซม์ที่ติดอยู่กับสารภูมิต้านทานตัวที่สอง จะทำการย่อยสารตั้งต้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีซึ่งความเข้มข้นของสีที่แสดงจะขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ซึ่งแปรผันตรงกับสารภูมิต้านทานที่เราต้องการตรวจหา ในกรณีที่สารภูมิต้านทานถูกจับกับสารก่อภูมิต้านทานจนหมดในขั้นตอนของการบ่ม จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ในขั้นตอนสุดท้ายของการแสดงผล

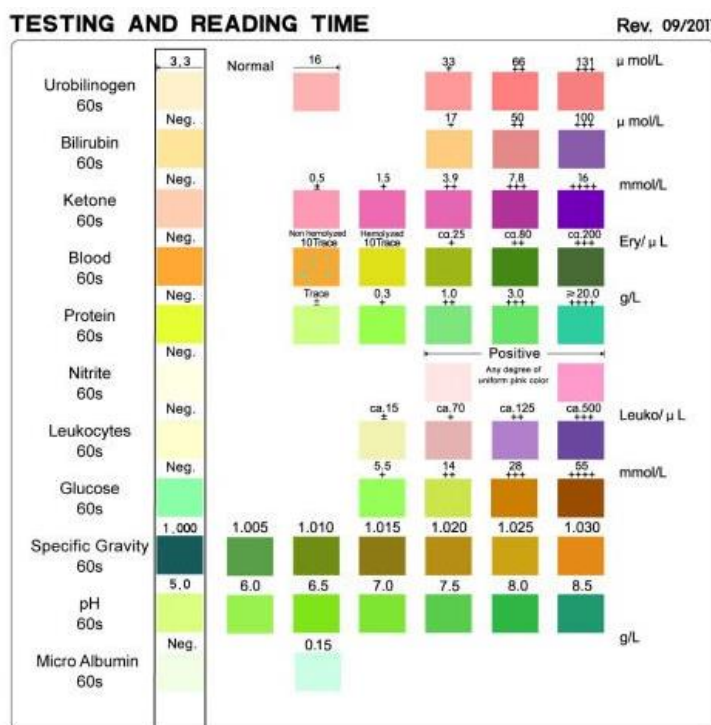


รูปที่ 2.15 วิธีการของ ELISA L.o.B. Sciences, 2014 [13]

2.3.2 แถบทดสอบ (Test Strip)

แถบทดสอบ Abe et al., 2008 [14] มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในทางการแพทย์สามารถตรวจสอบความผิดปกติของร่างกายได้ แถบทดสอบที่เป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันคือแถบทดสอบความผิดปกติของร่างกายที่ตรวจสอบได้จากปัสสาวะเรียกอุปกรณ์ประเภทนี้ว่า แถบทดสอบสารเคมีในปัสสาวะ (Urinary Chemistry Test Strip) ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้สามารถหาระดับสารเคมีบางอย่างในร่างกายที่ขับออกมาด้วยปัสสาวะ เพื่อช่วยในการหาความผิดปกติของร่างกาย โดยเป็นการนำเอาวิธีการของ ELISA มาประยุกต์ใช้บนแถบทดสอบ โดยในแถบทดสอบนั้นจะมีน้ำยาที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการตรวจสอบ ทำให้ได้ผลเป็นระดับความเข้มสีต่างๆขึ้นกับความเข้มข้นของปริมาณสารที่ตรวจพบซึ่งสามารถเทียบเคียงได้จากตารางเทียบสี ช่วยให้เราสามารถควบคุมและดูแลสมดุลในร่างกายได้ สารเคมีในร่างกายที่นิยมตรวจหาความผิดปกติหรือเพื่อใช้ติดตามผลการควบคุมรักษา ได้แก่ ระดับเม็ดเลือดขาว ระดับไนโตรเจน โปรตีน ความเป็นกรด/ด่างของปัสสาวะ เลือดใน

ปัสสาวะ ความถ่วงจำเพาะของปัสสาวะ คีโตน (Ketone) ระดับน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ในปัสสาวะ แสดงตัวอย่างตารางเทียบสีในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ตารางเทียบสีแถบทดสอบสารเคมีที่พบในปัสสาวะ L.o.B. Sciences, 2014 [12]

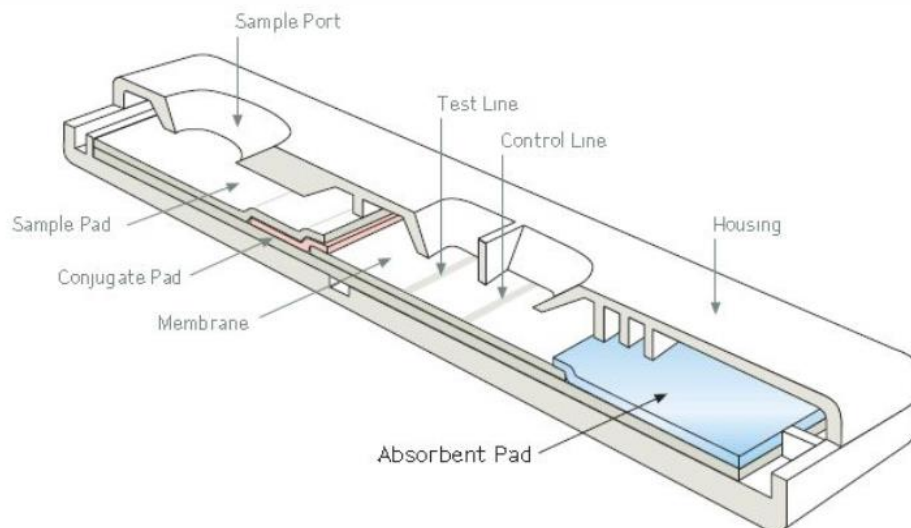
แถบทดสอบอีกประเภทหนึ่งที่ตรวจสอบจากปัสสาวะและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้งานง่ายสามารถหาซื้อได้ทั่วไป และนิยมทดสอบ คือ แถบทดสอบการตั้งครรภ์ (Pregnancy Test Strip)

2.3.2.1 หลักการทำงานของแถบทดสอบการตั้งครรภ์ (Pregnancy Test Strip)

กลไกการทำงานของแถบทดสอบการตั้งครรภ์ คือการตรวจหาฮอร์โมน (Hormone) ชนิดหนึ่งในปัสสาวะ โดยฮอร์โมนชนิดนี้จะมีการผลิตขึ้นหลังจากที่ไข่ได้รับการผสมกับสเปิร์มเรียบร้อยแล้ว ฮอร์โมนชนิดนี้มีชื่อว่า Human Chorionic Gonadotropin (hCG) ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่สัปดาห์ที่สาม และมีปริมาณสูงสุด ณ เดือนที่แปดของการตั้งครรภ์ การทดสอบอาศัยการ

เกิดปฏิกิริยาของระบบภูมิคุ้มกัน สารภูมิต้านทาน (Antibody) ซึ่งเป็นโปรตีนลักษณะรูปตัว Y ร่างกายจะสร้างขึ้นทุกครั้ง เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมที่เรียกว่า สารก่อภูมิคุ้มกัน (Antigen) เข้ามาในร่างกาย เพื่อจะเข้าไปจับสารก่อภูมิคุ้มกันทำให้หมดฤทธิ์ โดยทั่วไปพื้นผิวของแผ่นทดสอบจะมีบริเวณที่เป็นหลุมอยู่สองส่วนสำคัญและจะเคลือบด้วยสารภูมิต้านทาน (Antibody) หลุมหนึ่งเป็นบริเวณทดสอบ อีกหลุมหนึ่งเป็นบริเวณควบคุม สารภูมิต้านทานนี้จะติดไว้กับอนุภาคทองทำให้สามารถเปลี่ยนให้เห็นเป็นแถบสีได้ โดยสารภูมิต้านทานที่ติดกับอนุภาคทองนี้จะทำงานต่อเมื่อเกิดการจับกันระหว่างสารก่อภูมิคุ้มกันกับสารภูมิต้านทาน

เมื่อเราใส่ปัสสาวะบนแผ่นทดสอบในบริเวณที่กำหนด (Sample Port) หากในปัสสาวะมีฮอร์โมน HCG ในปริมาณที่กำหนด ฮอร์โมน HCG จะถูกจับกับสารภูมิต้านทานที่เคลือบบนแผ่นหลุมบริเวณทดสอบ เกิดเป็นแถบทดสอบ (Test Line) ดังนั้นบริเวณนี้ก็จะปรากฏแถบสีขึ้น ส่วนสารภูมิต้านทานที่เหลืออยู่ที่ไม่ได้จับกับฮอร์โมน hCG ก็จะเคลื่อนไปจับกับสารภูมิต้านทานที่เคลือบอยู่ในบริเวณควบคุม เกิดเป็นแถบควบคุม (Control Line) การปรากฏแถบสีขึ้น 2 แห่งนี้ แสดงผลว่าตั้งครรภ์ แต่หากเกิดแถบสีขึ้นในบริเวณแถบควบคุมเพียงแห่งเดียว แสดงว่าไม่ได้ตั้งครรภ์ (ระดับฮอร์โมน hCG ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ตรวจพบ) แถบทดสอบการตั้งครรภ์แสดงในรูปที่ 2.17

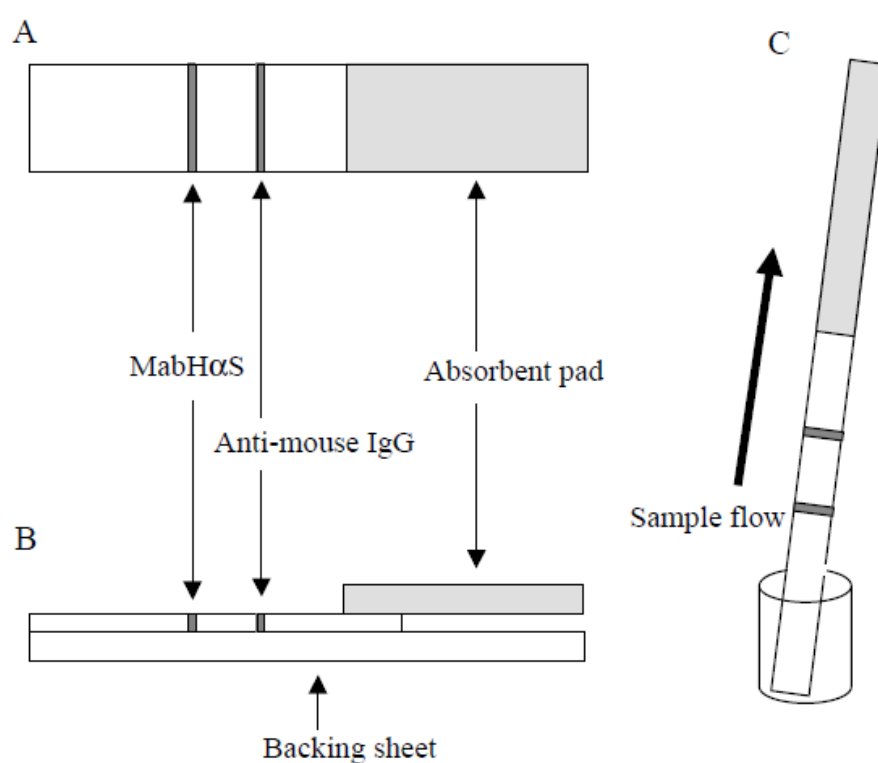


รูปที่ 2.17 แถบทดสอบการตั้งครรภ์ Millipore co., 2015 [15]

เนื่องจากการพัฒนาแถบทดสอบบนกระดาษนั้นมักจะมีปัญหาในเรื่องของการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ เนื่องจากบนกระดาษ อนุภาคทองคำเคลื่อนที่ได้ช้ามากเมื่อเทียบกับบนไนโตรเซลลูโลส ในแถบทดสอบตั้งครุฑที่วางขายตามท้องตลาด จึงต้องมีการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ และการสร้างลวดลายบนแถบทดสอบตั้งครุฑเพิ่มเติม

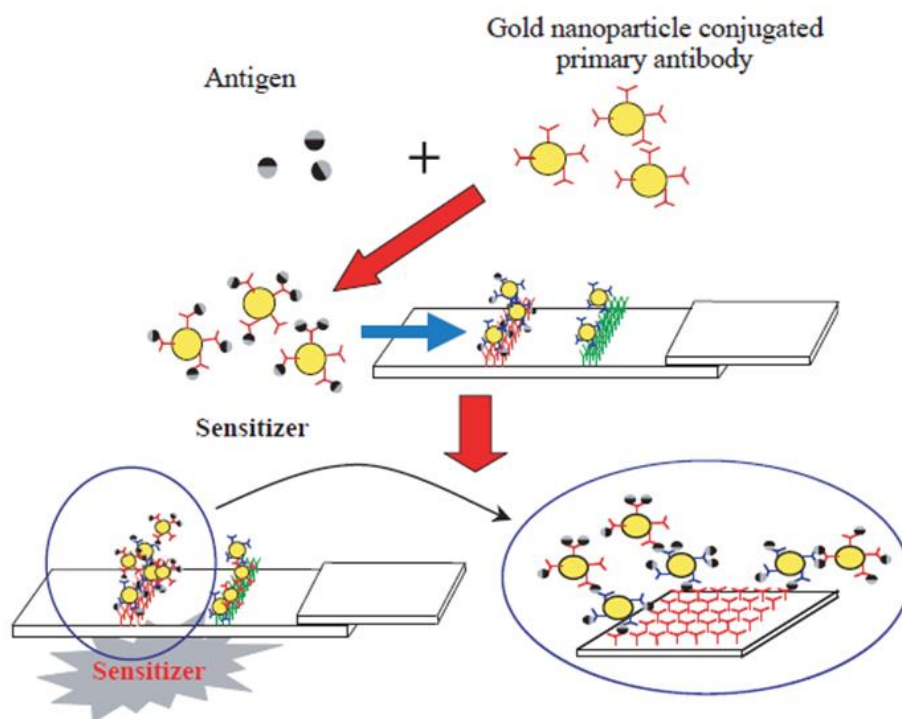
2.3.3 การสร้างแถบทดสอบตั้งครุฑด้วยการพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทอง (Goldnanoparticle)

การพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทอง Nagatani et al., 2006 [16] สามารถทำได้โดยการลดขนาดของอนุภาคทองให้อยู่ในระดับนาโน (Nanoparticle) แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับแถบทดสอบตั้งครุฑโดยใช้ monoclonal anti-human α -subunit of follicle-stimulating hormone (MabH α S) เป็นแถบทดสอบ และใช้ monoclonal anti-human chorionic gonadotropin (MabhCG) เป็นแถบควบคุม แสดงแถบทดสอบตั้งครุฑจากการทดลองในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การสร้างแถบทดสอบตั้งครุฑ Nagatani et al., 2006 [16] a.) แถบทดสอบตั้งครุฑ ด้านบนและสารที่ใช้แต่ละตำแหน่ง b.) แถบทดสอบตั้งครุฑแบบตัดขวาง c.) การใช้งานแถบทดสอบตั้งครุฑในการทดลอง

ปรับปรุงอนุภาคของทองคำให้มีอนุภาคระดับนาโนเมตร และนำไปรวมกันเป็นคู่กับสารภูมิคุ้มกัน จากนั้นนำไปรวมกับสารก่อภูมิคุ้มกันจนได้เป็น Sensitizer นำ Sensitizer ที่ได้ไปวางบนเป็นแถบทดสอบ แสดงแผนภาพการพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองโดยการนำอนุภาคทองรวมกับสารก่อภูมิคุ้มกันด้านหน้าในรูปที่ 2.19



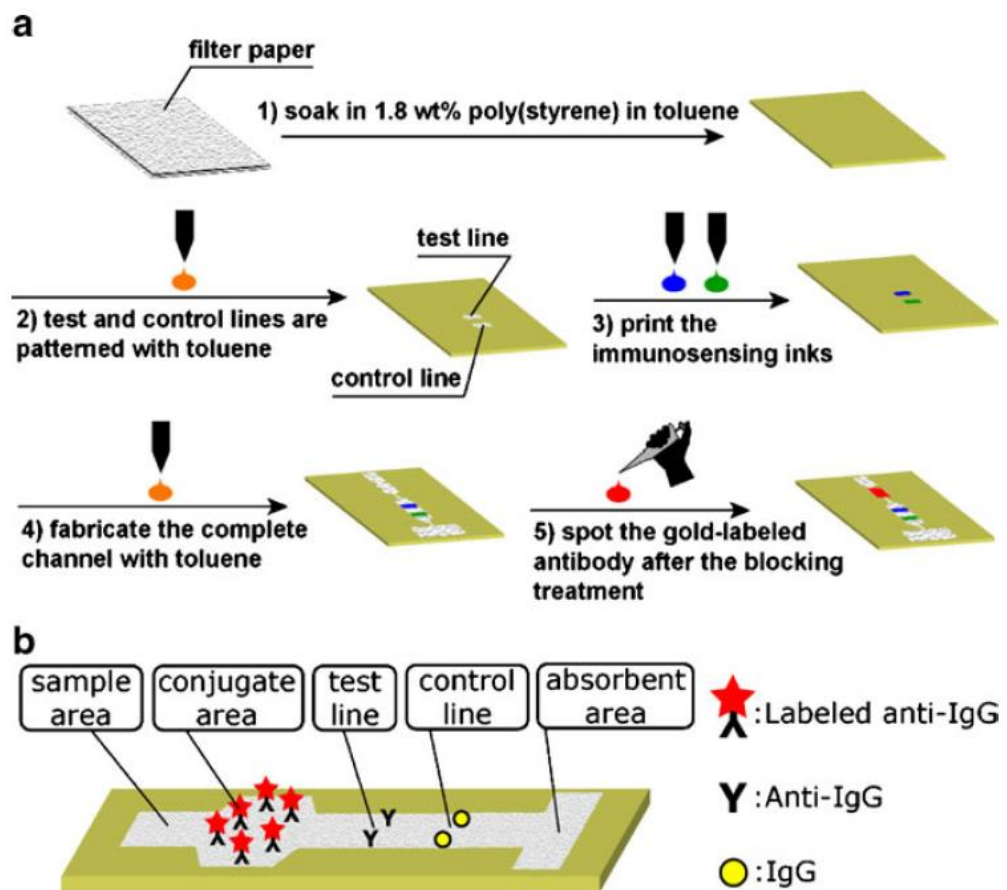
รูปที่ 2.19 การพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองโดยการนำอนุภาคทองรวมกับสารก่อภูมิคุ้มกันด้านหน้า Nagatani et al., 2006 [16]

หลังจากการปรับปรุงการสร้างแถบทดสอบตั้งครรรภ์พบว่า แถบตั้งครรรภ์ที่ใช้อนุภาคทองคำเล็กก็จะทำให้อ่านผลได้ไวขึ้นและแถบสีที่ได้มีความชัดเจนมากขึ้นด้วย

2.3.4 การสร้างแถบทดสอบประเภทกระดาษ (Test Strip) โดยการพิมพ์โพลีสไตรีน (Polystyrene) จากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

วิธีการสร้างแถบทดสอบประเภทกระดาษ (Test Strip) โดยการพิมพ์โพลีสไตรีน (Polystyrene) จากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท นี้ Abe et al., 2010 [17] เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์

อิงค์เจ็ทโดยเปลี่ยนจากตลับหมึกที่บรรจุน้ำหมึกให้กลายเป็นตลับที่บรรจุวัสดุประเภทตัวทำละลายพลาสติก โดยจะนำวัสดุหลักไปเคลือบสารละลายประเภทพลาสติกซึ่งคือ โพลีสไตรีน (Polystyrene) ที่ละลายในโทลูอีนที่มีความเข้มข้น 1.8 เปอร์เซ็นต์มวลต่อปริมาตร แล้วจึงปล่อยให้แห้ง หลังจากเคลือบวัสดุหลักแล้ว พื้นผิวของวัสดุหลักจะเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จากนั้นจึงพิมพ์สารที่เป็นตัวทำละลายพลาสติกลงไป สร้างเป็นลวดลายตามที่ต้องการแบบไว้ โดยวิธีการนี้มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน รวดเร็วและราคาถูก แสดงรูปกระบวนการสร้างลวดลายของแถบทดสอบ (Test Strip) โดยการพิมพ์สารตัวทำละลายโพลีสไตรีนและพิมพ์สารที่ต้องการทดสอบจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทในรูปที่ 2.20

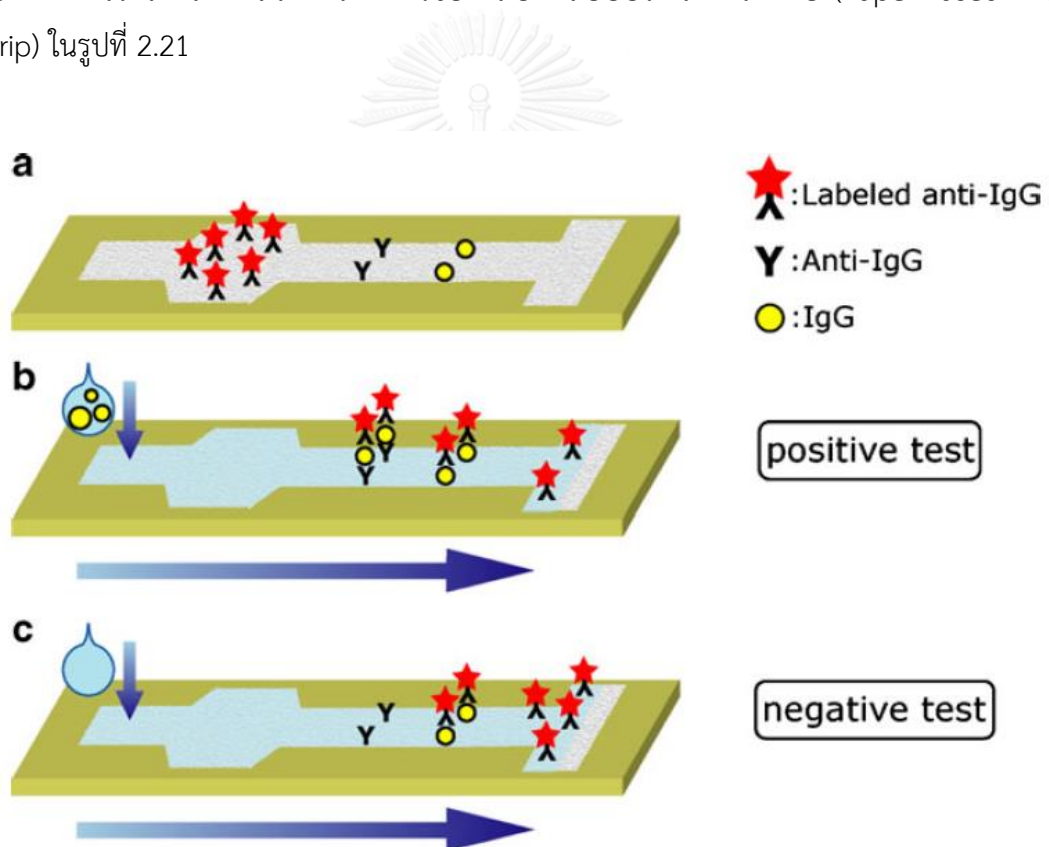


รูปที่ 2.20 กระบวนการในการสร้างลวดลายของแถบทดสอบ (Test Strip) Abe et al., 2010 [17]

a.) การสร้างลวดลายของแถบทดสอบโดยการพิมพ์สารตัวทำละลายโพลีสไตรีนและสารที่ต้องการทดสอบจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท b.) ชื่อเรียกและความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ในภาพ

จากรูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของแถบทดสอบ 5 ตำแหน่งด้วยกัน ตำแหน่งแรกคือบริเวณที่ใช้ในการหยดสารที่ต้องการทดสอบ (Sample Area) ถัดมาคือพื้นที่สำหรับการจับตัวกันของสารภูมิคุ้มกัน (Antibody) และสารก่อภูมิคุ้มกัน (Antigen) ที่ทดสอบ (Conjugate Area) ถัดมาแสดงตำแหน่งของเส้นแสดงผลการทดสอบ (Test Line) และตำแหน่งของเส้นแสดงการควบคุมการทดสอบของระบบ (Control Line) ต่อมาคือพื้นที่ดูดซับสารเพื่อทำให้ของเหลวบนแถบทดสอบไหลผ่านได้ตลอดไม่หยุดเคลื่อนที่ (Absorbent Area)

แถบทดสอบนี้เป็นการนำเอากระดาษเข้ามาแทนที่วัสดุหลักประเภทใยสังเคราะห์และแก้วซึ่งสามารถทดสอบสารตัวอย่างได้จากการบรรจุสารลงในช่องบรรจุสาร สารที่บรรจุจะเคลื่อนที่ไปตามช่องทางการไหล แสดงกลไกการทำงานของแถบทดสอบประเภทกระดาษ (Paper-Based Test Strip) ในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กลไกการทำงานของแถบทดสอบประเภทกระดาษ (Paper-Based Test Strip)
 Abe et al., 2010 [17]

จากรูปที่ 2.21-b.) จะพบว่าผลของการทดสอบเป็นบวก แสดงว่าสารที่นำมาทดสอบมี ปริมาณของสารที่ต้องการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยแสดงเป็นสีแดงที่เส้นทดสอบและแสดงสีแดงบนเส้นควบคุมด้วย จากรูปที่ 2.21-c.) จะพบว่าผลของการทดสอบเป็นลบแสดงว่าสารที่นำมา ทดสอบไม่มีปริมาณของสารที่ต้องการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยจะไม่แสดงสีแดงที่เส้น ทดสอบจะแสดงแต่บนเส้นควบคุมเท่านั้น ส่วนของเส้นควบคุมจะแสดงออกมาเป็นสีแดงเสมอไม่ว่าผล จะออกมาเป็นบวกหรือลบ เพื่อแสดงถึงระบบที่ใช้ในการทดสอบ ว่ายังสามารถใช้งานได้ตามปกติ ไม่มี สารใดเสื่อมสภาพไป

2.4 สรุปงานวิจัยที่ศึกษา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีวิธีการนำเอากระดาษมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นจำนวนมากในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ประเภทแลปบอนด์ชิป ได้มีการพัฒนา เซนเซอร์ประเภทกระดาษขึ้นเป็นครั้งแรก โดยเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดแรง โดยอาศัยหลักการ ทำงานของวัสดุประเภท piezoresistive ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์แบบสกรีน ซึ่งพบว่าการขึ้น รูปแบบนี้มีข้อเสีย คือต้องใช้แม่พิมพ์ และขณะทำการขึ้นรูปขึ้นงานนั้นแม่พิมพ์จะต้องวางทับบน ชิ้นงาน ทำให้เมื่อยกแม่พิมพ์ออก สารที่ใช้ในการพิมพ์แบบสกรีนนั้นจะติดขึ้นมากับแม่พิมพ์และทำให้ เกิดการปนเปื้อนบนชิ้นงานด้วย ทำให้การกระจายตัวของวัสดุประเภท piezoresistive นั้นไม่ดี เท่าที่ควร จึงได้มีการศึกษาการขึ้นรูปของชิ้นงานบนกระดาษเพิ่มเติม พบว่าการขึ้นรูปโดยการสร้าง ลวดลายโดยใช้หน้ากากน้ำนั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปกับวัสดุ ประเภท piezoresistive แต่ยังคงต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุประเภท piezoresistive เพื่อให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยวิธีการสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำต่อไป

ในส่วนของแถบทดสอบการตั้งครรภ์ ได้มีการนำกระดาษเข้ามาประยุกต์ใช้บนแถบทดสอบ สารชีวโมเลกุลเป็นจำนวนมาก โดยส่วนมากนั้นจะใช้วิธีการกัดโพลีเมอร์ในการขึ้นรูปขึ้นงาน ซึ่ง เครื่องพิมพ์ที่สามารถพิมพ์สารที่ใช้กัดโพลีเมอร์ได้นั้น เป็นเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งมีราคาสูง มากเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทตามที่ใช้กันทั่วไป และการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำนั้นถือเป็น ปัญหาสำคัญในการทดสอบการตั้งครรภ์บนกระดาษเนื่องจากบนกระดาษนั้นอนุภาคทองคำจะ เคลื่อนที่ได้ช้ากว่ามากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำบนไนโตรเซลลูโลส จึงได้ศึกษา เพิ่มเติมเกี่ยวกับการพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำบนกระดาษ พบว่าการลดขนาดของ อนุภาคทองคำสามารถพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำได้ แต่มีกระบวนการที่ยุ่งยากและ

ฉบับซ้อน ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาการพัฒนาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองโดยใช้กลูโคสเป็นชั้นรองอนุภาค
ทองคำแทนการลดขนาดของอนุภาคทองคำ



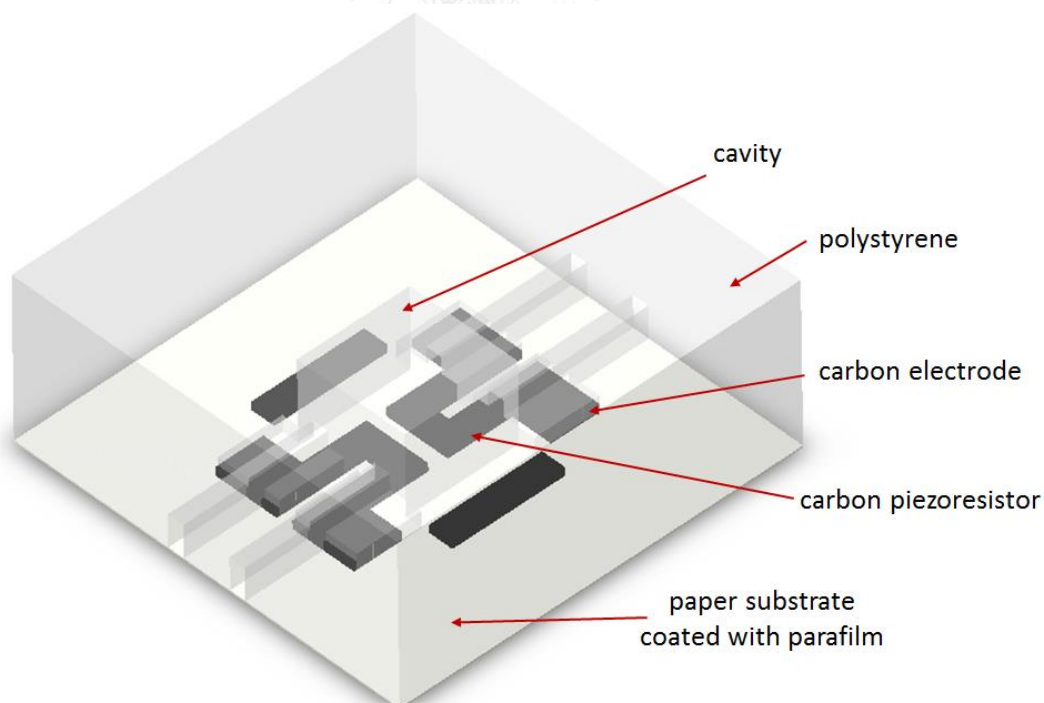
บทที่ 3

การสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบส่วนประกอบต่างๆของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ ได้แก่ ฐานและวงจรถ่ายที่อยู่บนส่วนที่รับความดัน ทั้งยังได้อธิบายการขึ้นรูป กระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ รวมไปถึงการปรับปรุงคุณภาพของการสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำ Punpanttanakul et al., 2012 [10] เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

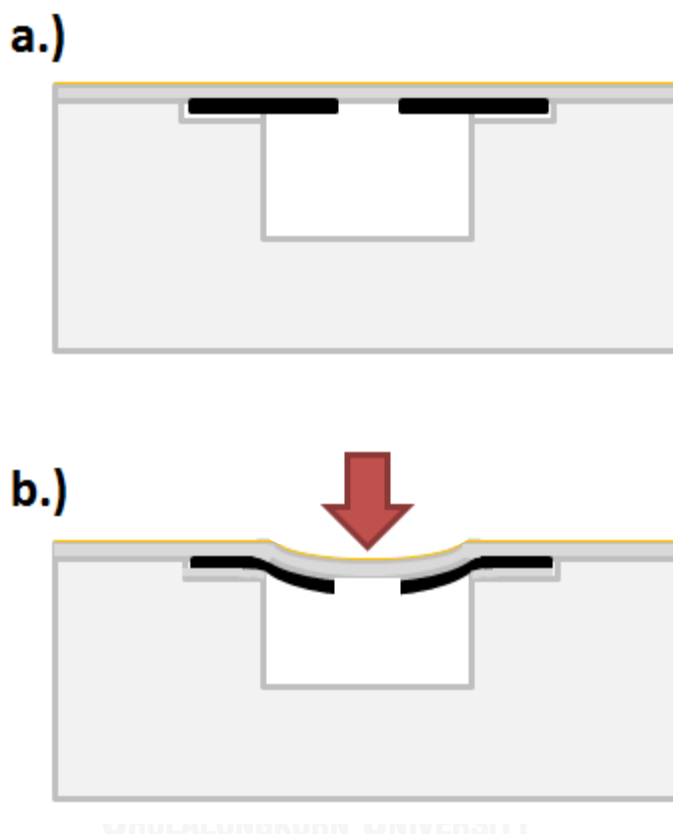
3.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับเซนเซอร์วัดความดันขนาดเล็กทั่วไป คือ เมื่อมีการให้ความดันแก่ระบบกระทำลงบนแผ่นกระดาษส่วนที่มีวงจรถ่ายด้านทานเพียโซรีซิสทีฟดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

ในสภาวะปกติกระดาษจะราบเรียบและแต่ละวงจรมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง แต่ในสภาวะที่กระดาษได้รับความดัน กระดาษจะเกิดการโก่งงอ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อส่วนของวงจรตัวต้านทานได้รับความเค้นเชิงกลอันเนื่องมาจากความโก่งงอดังกล่าวค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจึงทำการวัดค่าความต้านทาน และนำค่าที่วัดได้แปลงกลับเป็นค่าความดัน



รูปที่ 3.2 a.) เซนเซอร์ในสภาวะปกติ b.) เซนเซอร์ในสภาวะได้รับความดัน

3.2 ส่วนประกอบของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

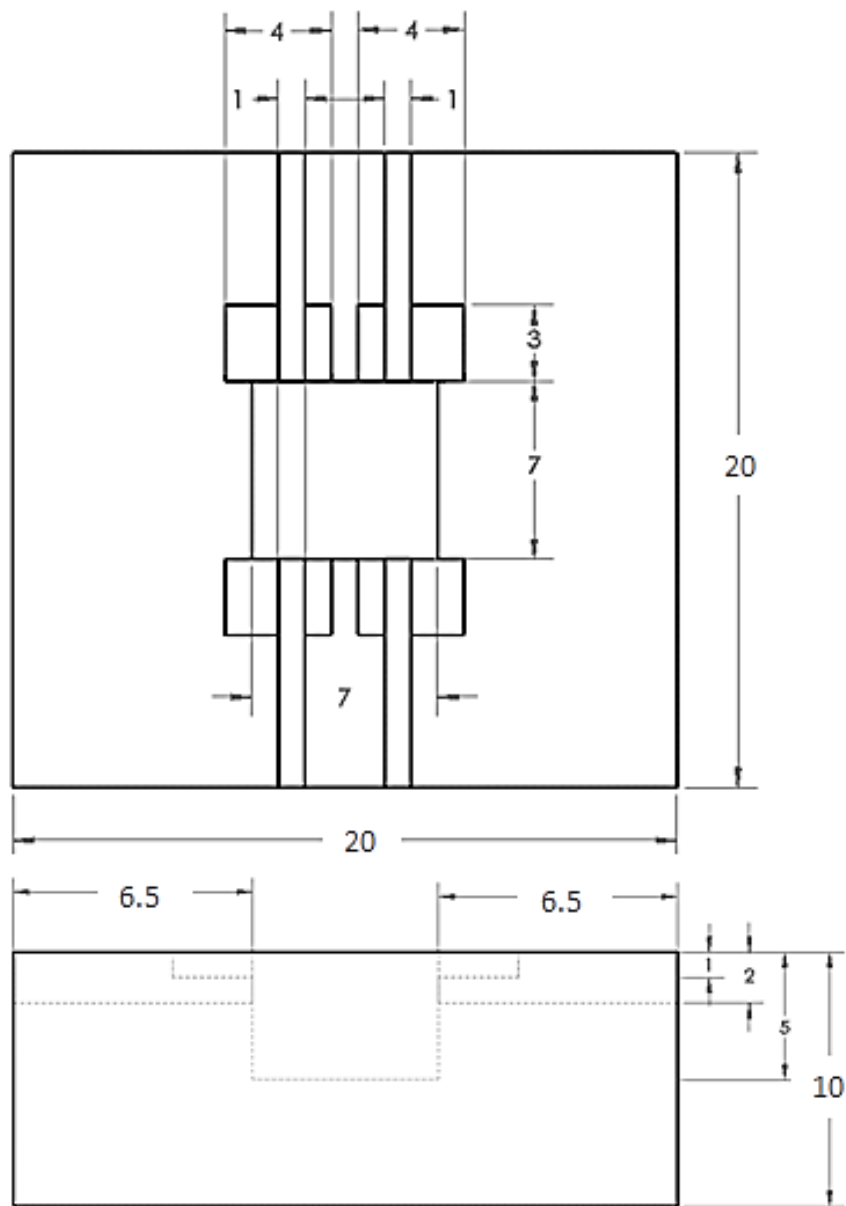
3.2.1 ฐาน

ฐานมีลักษณะเป็นกรอบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 cm หนา 1 cm โดยมีช่องว่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 7 mm อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของฐาน หน้าที่หลักของฐานคือช่วยยึดกระดาษให้

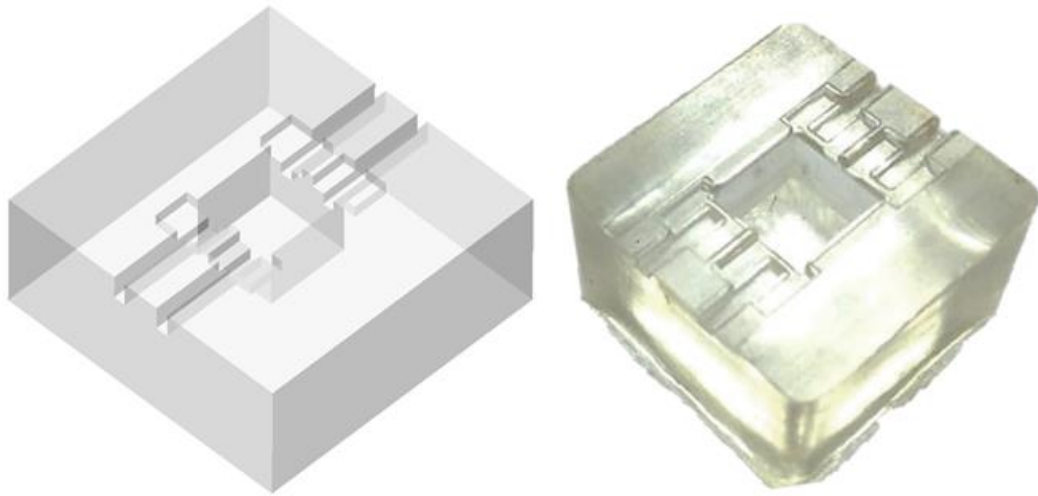
เป็นแผ่นเรียบในสภาวะปกติ ส่วนช่องว่างตรงกึ่งกลางมีไว้สำหรับให้ความดันจากภายนอกที่กระทำต่อ กระจกผ่านความดันให้กับกระจกทำให้เกิดการโค้งงอของกระจกขึ้น ฐานของเซนเซอร์วัดความ ดันประเภทกระจกนี้จะต้องสามารถทนและรับแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี ไม่สึกหรอ เนื่องจาก เซนเซอร์นั้นจำเป็นต้องรับแรงดันอยู่เสมอ และมีคุณสมบัติทนต่อความชื้นได้ดีด้วย เพื่อให้ เซนเซอร์สามารถวัดความดันในสภาวะชื้นและสามารถวัดความดันของของเหลวได้

3.2.1.1 โพลีสไตรีน (Polystyrene)

โพลีสไตรีน (Polystyrene) เป็นที่รู้จักในชื่อย่อว่า PS เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งซึ่งผลิตจาก โมโนเมอร์ของสไตรีน เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม มีการใช้งานกัน อย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรม สารชนิดนี้มีคุณสมบัติคืออยู่ในสถานะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) คือไม่ชอบน้ำจึงเกิดพันธะกับน้ำหรือสารละลายได้ยาก ทำให้น้ำไม่สามารถซึมและยึดเกาะบนผิวได้ จึง สามารถใช้งานร่วมกับน้ำได้โดยไม่เกิดการเสียรูป และโพลีสไตรีนนั้นเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โม พลาสติก คือสามารถหลอมเหลวในการขึ้นรูปได้ โดยจะอยู่ในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเริ่ม หลอมละลายเมื่อได้รับความร้อนที่ 100 °C และสามารถกลับมาแข็งตัวได้ใหม่เมื่อเย็นตัวลง วัสดุนี้จึง เหมาะสำหรับการหล่อขึ้นรูปและเหมาะสำหรับการใช้งานที่ความชื้นสูง อีกทั้งยังสามารถรับแรง กระแทกได้ดี ไม่เป็นพิษ และราคาถูก ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกใช้โพลีสไตรีนสำหรับขึ้นรูปที่ อุณหภูมิ 160 °C ทำให้สามารถหล่อโพลีสไตรีน ลงในแม่พิมพ์ให้ได้รูปแบบและขนาดตามที่ต้องการ แสดงขนาดของโพลีสไตรีนที่ออกแบบในรูปที่ 3.3 และแสดงแบบจำลองของโพลีสไตรีนตามขนาดที่ ออกแบบและโพลีสไตรีนได้จากการหล่อขึ้นรูปในรูปที่ 3.4 โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้นรูปฐานนั้น แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 แบบของฐานโพลีสไตรีนที่ออกแบบในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 โพลีสเตอร์รีนจากการออกแบบและโพลีสเตอร์รีนที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป



รูปที่ 3.5 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้นรูปฐาน

3.2.2 ส่วนรับความดัน

ส่วนที่ทำหน้าที่รับความดันที่ออกแบบขึ้นทำจากกระดาษสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 cm ที่มีวงจรรความต้านทานขนาดเล็ก 2 วงจร วางอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของด้านทั้งสองของสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 7 mm เนื้อช่องว่างที่ตำแหน่งกึ่งกลางของฐาน โดยให้วงจรหน้าสัมผัส (Contact pad) อยู่รอบกรอบสี่เหลี่ยมดังกล่าวและมีสายไฟเชื่อมต่อกับวงจรหน้าสัมผัสเพื่อให้จ่ายแก่การวัดค่าความต้านทาน

3.2.2.1 วัสดุเพียโซรีซิสทีฟ คอลลอยดอลแกรไฟต์เพส (Colloidal Graphite Paste)

วัสดุเพียโซรีซิสทีฟเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซนเซอร์ เพราะเป็นส่วนที่ใช้สร้างวงจรถอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความดัน และเนื่องจากจุดประสงค์ของโครงการต้องการพัฒนาการขึ้นรูปวงจร จึงเลือกวัสดุเพียโซรีซิสทีฟที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ หรือสามารถแห้งได้เองที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้วัสดุเพียโซรีซิสทีฟมีความสามารถในการยึดเกาะที่ดี ยึดเกาะบนกระดาษได้ จึงเลือกใช้คอลลอยดอลแกรไฟต์เพส (Colloidal Graphite Paste) ของบริษัท Ted pella, inc. (Product no.16051) เนื่องจากตัวนำแกรไฟต์ มีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์ของอนุภาคแกรไฟต์ขนาดเล็ก มีคุณสมบัติการเกิดฟิล์มได้บนวัสดุหลายประเภท ซึ่งฟิล์มนี้จะปรับเปลี่ยนรูปร่างให้เข้ากับลักษณะพื้นผิว และทำหน้าที่ในการยึดเกาะกับพื้นผิวนั้นไม่ว่าจะเป็นพื้นผิวร้อนหรือเย็น นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเพียโซรีซิสทีฟที่ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความเค้นเชิงกล ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีจุดเด่นที่สำคัญคือ สามารถละลายน้ำได้ แห้งได้ง่าย เป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ดี ที่สำคัญคือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีส่วนประกอบของสารที่ทำลายชั้นโอโซน ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของคอลลอยดอลแกรไฟต์

ตัวทำละลาย	น้ำกลั่น
pH	10.4 - 10.6
ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุด	3 μ m
อายุการใช้งาน	12 เดือน

3.2.2.2 กระดาษกรองวอทแมน (Whatman) เบอร์ 1

กระดาษมีบทบาทสำคัญในการเป็นฐานให้กับวงจรเพียโซรีซิสทีฟและใช้ในการรับความดันของระบบ จึงมีความจำเป็นต้องมีความคงทน ไม่ฉีกขาดง่าย พร้อมทั้งมีคุณสมบัติที่สามารถคัดกรองอนุภาคของวัสดุเพียโซรีซิสทีฟให้อยู่บริเวณผิวของกระดาษ กระดาษกรองมีการใช้งานอย่างแพร่หลายส่วนใหญ่ขึ้นรูปจากเส้นใยเซลลูโลสและมีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียกน้ำ โดยมีขนาดของรูกรอง 11 μm หน้า 180 μm น้ำหนัก 88 g/m^2 มีขนาดให้เลือกหลากหลายตั้งแต่แบบวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ไปจนถึง 500 mm ซึ่งกระดาษวอทแมนเบอร์ 1 สามารถคัดกรองอนุภาคแกรไฟต์ไม่ให้ซึมผ่านกระดาษลงมาได้ เนื่องจากอนุภาคของแกรไฟต์เมื่อละลายจะรวมตัวกันจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าขนาดรูของกระดาษกรอง จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนที่รับแรงดันของระบบ

3.2.2.3 สายไฟ

วงจรตัวต้านทานที่สร้างขึ้นนั้นมีขนาดเล็กระดับมิลลิเมตรและมีหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อได้รับความเค้นเชิงกลหรือความดันจากภายนอก กระแสไฟที่ผ่านวงจรตัวต้านทานจึงมีค่าน้อยมาก จึงเลือกใช้สายไฟขนาดเล็กเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน และทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากสายไฟน้อย

3.2.2.4 กาวทางไฟฟ้าตัวนำคาร์บอน (Conductive Carbon Glue)

เนื่องจากวงจรตัวต้านทานที่สร้างขึ้นไม่ได้สร้างจากโลหะจึงไม่สามารถใช้วิธีบัดกรีเพื่อเชื่อมสายไฟเข้ากับวงจรได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้วิธีอื่น สำหรับโครงการนี้จึงเลือกใช้กาวทางไฟฟ้าของบริษัท Ted pella, inc. (Product no.16050) เพื่อเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับวงจร

กาวตัวนำคาร์บอนเป็นกาวอะคริลิกซึ่งมีแกรไฟต์เป็นตัวในการสร้างพันธะตัวนำระหว่างวงจร โดยมีส่วนผสมของสารเพื่อลดแม่เหล็กไฟฟ้า เรซินอะคริลิกช่วยในการป้องกันแกรไฟต์ความเสียหายที่เกิดจากการเสียดสีของแกรไฟต์ และชั้นเคลือบสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการใช้งานโดยไม่เกิดการแตกหัก ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลาย วัสดุดังกล่าวมีจุดเด่นที่สำคัญคือ มีความนำไฟฟ้าสูง มีความสามารถในการยึดเกาะสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของกาวตัวนำคาร์บอน

แห้งและสามารถจับต้องได้	3-5 นาที
เวลาสำหรับทาสี	5 นาที
เวลาเพื่อให้สารแห้งสนิท ณ อุณหภูมิห้อง	24 ชั่วโมง
เวลาเพื่อให้สารแห้งสนิท ณ อุณหภูมิ 65°C	30 นาที
อายุการใช้งาน	3 ปี
อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา	-5 ถึง +40°C

3.2.2.5 วัสดุเคลือบกระดาษพาราฟิล์ม (Parafilm)

นอกจากกระดาษกรองจะมีข้อดีในด้านความแข็งแรง และการคัดกรองอนุภาคของ Graphite แต่ยังมีข้อด้อยเพราะอากาศและน้ำสามารถผ่านกระดาษกรองได้ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษเพื่อลดจุดด้อยดังกล่าว คือ ฟิล์มของพลาสติกพาราฟิน (Paraffin) ของ Pechiney plastic packaging ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติ ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โปร่งแสง และมีความสามารถในการยึดเกาะ โดยปกติแล้วใช้สำหรับปิดผนึกภาชนะใส่สารเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของพาราฟิล์ม

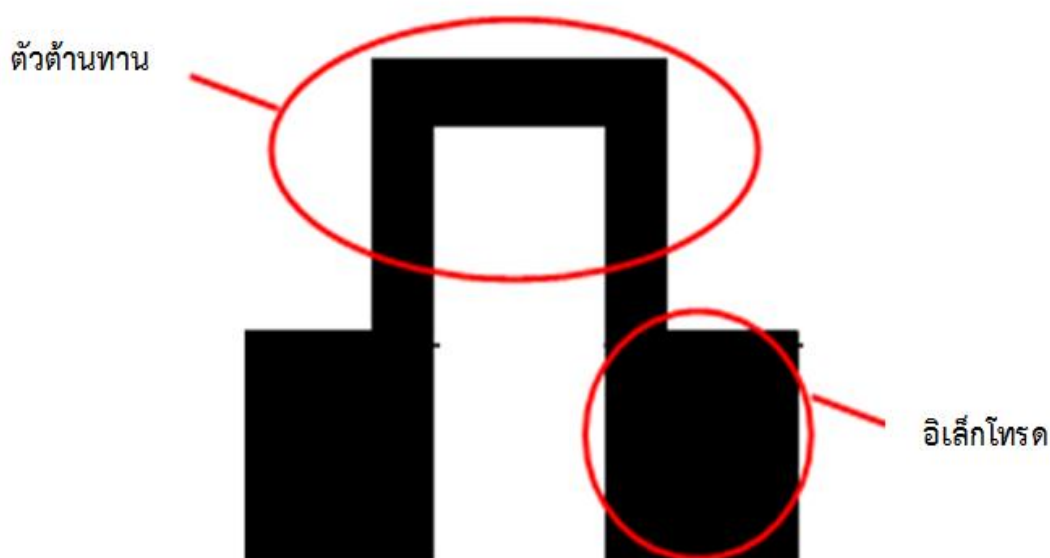
ความเป็นพิษ	ไม่เป็นพิษ
จุดหลอมเหลว	60°C
จุดวาบไฟ	301°C
ค่ามอดูลัสของยัง [18]	55-70 MPa

3.2.2.6 คอลลอยดอลซิลเวอร์แบบเหลว (Colloidal Silver liquid)

เนื่องจากแรงดึงดูดของกาวตัวนำคาร์บอนมีค่าสูง จึงกระจายตัวยึดเกาะวงจรรกับสายไฟได้ไม่ดีนัก คอลลอยดอลซิลเวอร์แบบเหลวจึงเป็นตัวเชื่อมระหว่างสายไฟและวงจรรหน้าสัมผัสได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีการกระจายตัวดี และนำไฟฟ้าได้ดีมาก แต่เปราะง่ายจึงต้องเคลือบด้วยกาวตัวนำคาร์บอนอีกที เลือกลงใช้คอลลอยดอลซิลเวอร์แบบเหลวของบริษัท Ted pella, inc. (Product no.16031)

3.3 กระบวนการออกแบบเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

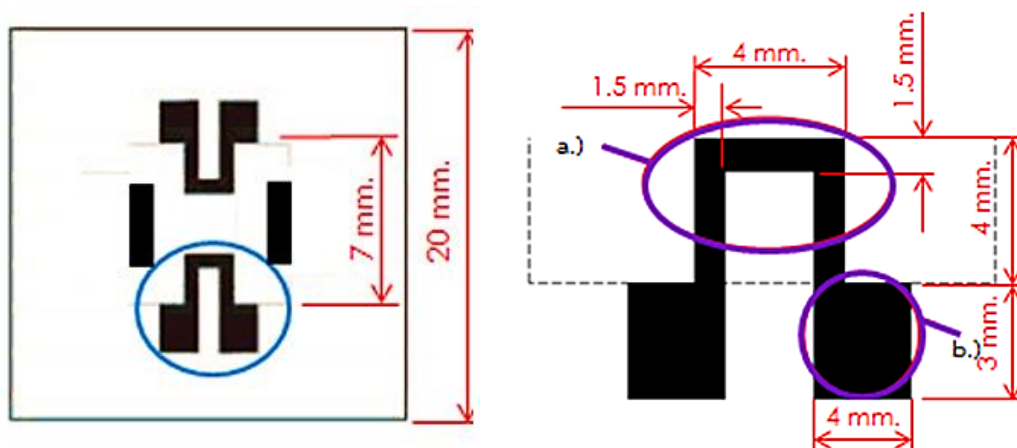
วงจรที่ใช้ในเซนเซอร์วัดความดันแบบกระดาษแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือตัวต้านทานที่ติดอยู่บนกระดาษที่สามารถเกิดการโก่งงอ ทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลง ส่วนที่สองเป็นอิเล็กทรอนิกส์อยู่บนกระดาษบริเวณที่ติดกับฐาน สำหรับเชื่อมต่อกับสายไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบของตัวต้านทานและอิเล็กทรอนิกส์

3.3.1 การออกแบบตัวต้านทานและอิเล็กทรอนิกส์

การออกแบบวงจรทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีพื้นฐานมาจากขนาดของเซนเซอร์ที่ออกแบบไว้คือ 2 cm และช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสตรงกลางขนาด 7 mm. ดังนั้นจึงออกแบบให้ตัวต้านทานมีลักษณะคล้ายตัวยูแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4 mm แถบวงจรมีความกว้าง 1.5 mm โดยส่วนบนของตัวยูอยู่ชิดกับแต่ละด้านของช่องว่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับสายไฟเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3 mm * 4 mm ต่อกับขาทั้งสองข้างของตัวยู ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขนาดของวงจรรความต้านทานที่ออกแบบ

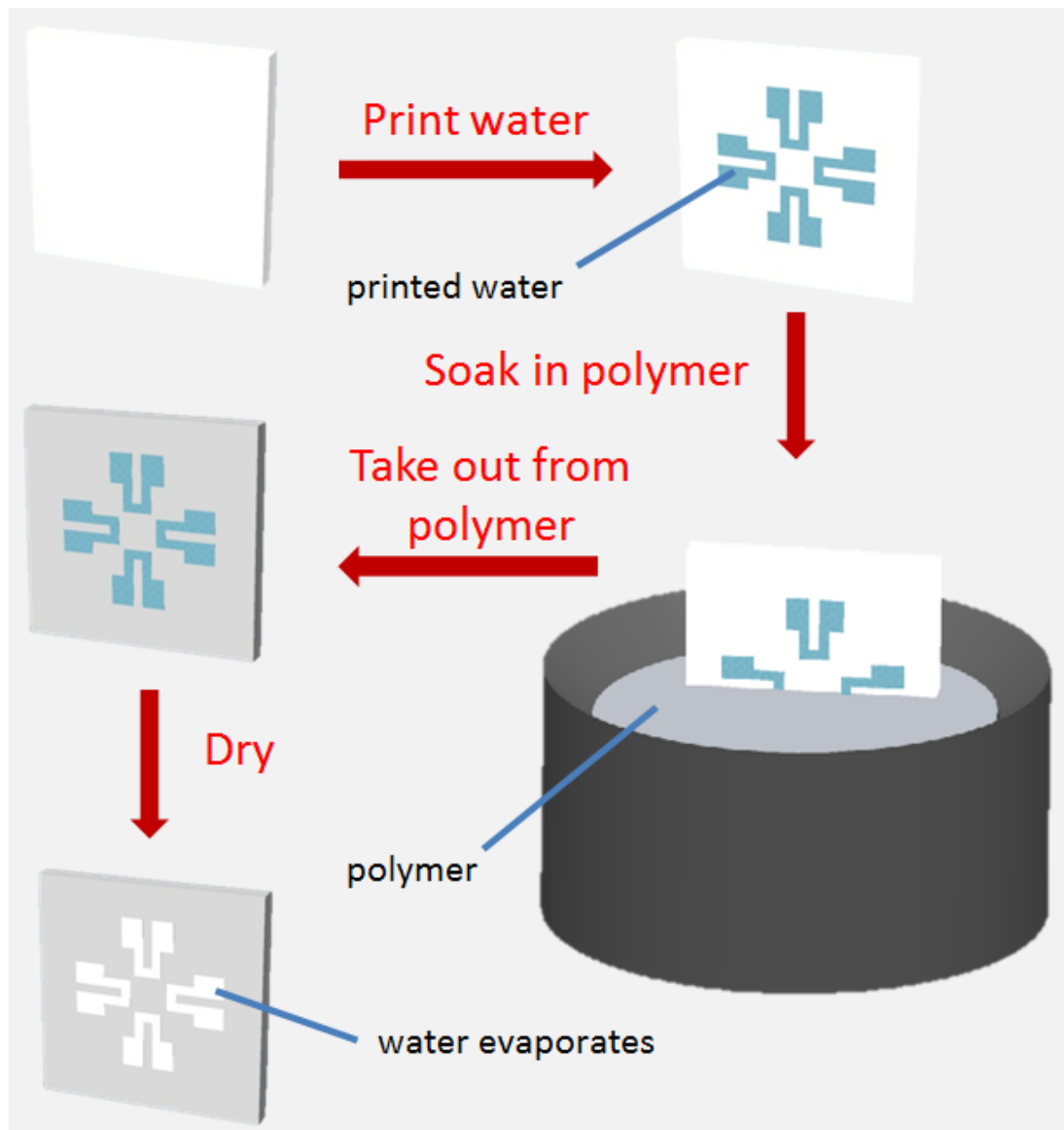
3.4 กระบวนการขึ้นรูปวงจรรเพียโซรีซิสทีฟ

วงจรรเพียโซรีซิสทีฟ เป็นส่วนของเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่ตอบสนองเมื่อกระดาษได้รับความดัน และเกิดการโก่งงอ ทำให้ค่าความต้านทานของวงจรมีเปลี่ยนแปลงไป การเลือกกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปวงจรรดังกล่าวเพื่อให้ได้วิธีการที่เหมาะสมที่สุดนั้นจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบและพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

3.4.1 การขึ้นรูปวงจรรด้วยวิธีการหน้ากากน้ำ (Water Mask)

การใช้หน้ากากน้ำ Punpanttanakul et al.,2011 [10] เป็นการสร้างลวดลายของวัสดุประเภทหนึ่ง โดยการพิมพ์น้ำซึ่งผ่านการผสมกับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) เพื่อปรับลดความตึงผิวและความหนืดของสารละลายให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการพิมพ์ ออกแบบลวดลายที่ต้องการบนคอมพิวเตอร์แล้วจึงพิมพ์สารละลายของน้ำลงไปบนกระดาษกรองให้ออกมาเป็นลวดลายที่ต้องการ เพื่อให้สารละลายของน้ำที่พิมพ์ลงไปบนกระดาษกรองนั้น ทำหน้าที่เป็นหน้ากาก (Mask) หลังจากนั้นนำกระดาษกรองไปชุบลงในโพลีเมอร์ที่ถูกละลายในสารละลาย น้ำที่ถูกพิมพ์ลงไปก่อนหน้านี จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันโพลีเมอร์และสารละลายไม่ให้แทรกซึมเข้าไปในกระดาษ ในบริเวณที่ไม่ต้องการ เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติที่ไม่มีขั้ว ส่วนสารละลายมีคุณสมบัติมีขั้วต่ำ หรือแทบจะไม่มีเลย จึงไม่สามารถเข้ากันหรือละลายซึ่งกันได้ หลังจากชุบโพลีเมอร์แล้วก็นำออกมาปล่อยให้แห้ง จากนั้นสารละลายและน้ำที่พิมพ์ลงไปจะแห้งและระเหยออกไปจนหมด เหลือทิ้งไว้แค่โพลีเมอร์เคลือบไว้

บริเวณที่ไม่ได้พิมพ์น้ำเท่านั้น แสดงแผนภาพขั้นตอนของการสร้างสวดลายด้วยวิธีการหน้ากากน้ำในรูปที่ 3.8 และมีวัสดุอุปกรณ์ในการสร้างวงจรรตัวต้านทานแบบหน้ากากน้ำ ดังนี้



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการสร้างสวดลายด้วยวิธีการหน้ากากน้ำ Punpanttanakul et al.,2011 [10]

3.4.2 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Inkjet Printer)

ในการพิมพ์สารละลายของน้ำนั้นเลือกใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Inkjet Printer) EPSON รุ่น ME - 101 เนื่องจากเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีหัวพิมพ์ (Inkjet Head) อาศัยหลักการทำงานแบบ

Piezoelectric ในการสร้างหยดหมึก ซึ่งในหัวพิมพ์นั้นจะมีขั้วทางไฟฟ้าคอยจ่ายกระแสไฟให้ diaphragm ใน Piezoelectric transducer ทำให้เกิดความร้อนขึ้น จึงเกิดการโก่งตัว ทำให้ดันหยดหมึกออกมา ความร้อนที่เกิดจากหัวพิมพ์แบบนี้มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบ Thermal heat สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของสารเคมีกับความร้อนจากหัวพิมพ์ได้ อีกทั้งเครื่องพิมพ์รุ่นนี้ มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถหาซื้อได้ทั่วไป และสามารถแยกตลับหมึกอิสระ เหมาะสำหรับใช้พิมพ์สารอื่นนอกจากสีตั้ยังมีคุณภาพการพิมพ์ความละเอียดสูงอีกด้วย

3.4.3 การเตรียม สารละลายของน้ำบริสุทธิ์และเอทิลีนไกลคอล (Deionized water in Ethylene Glycol Solution)

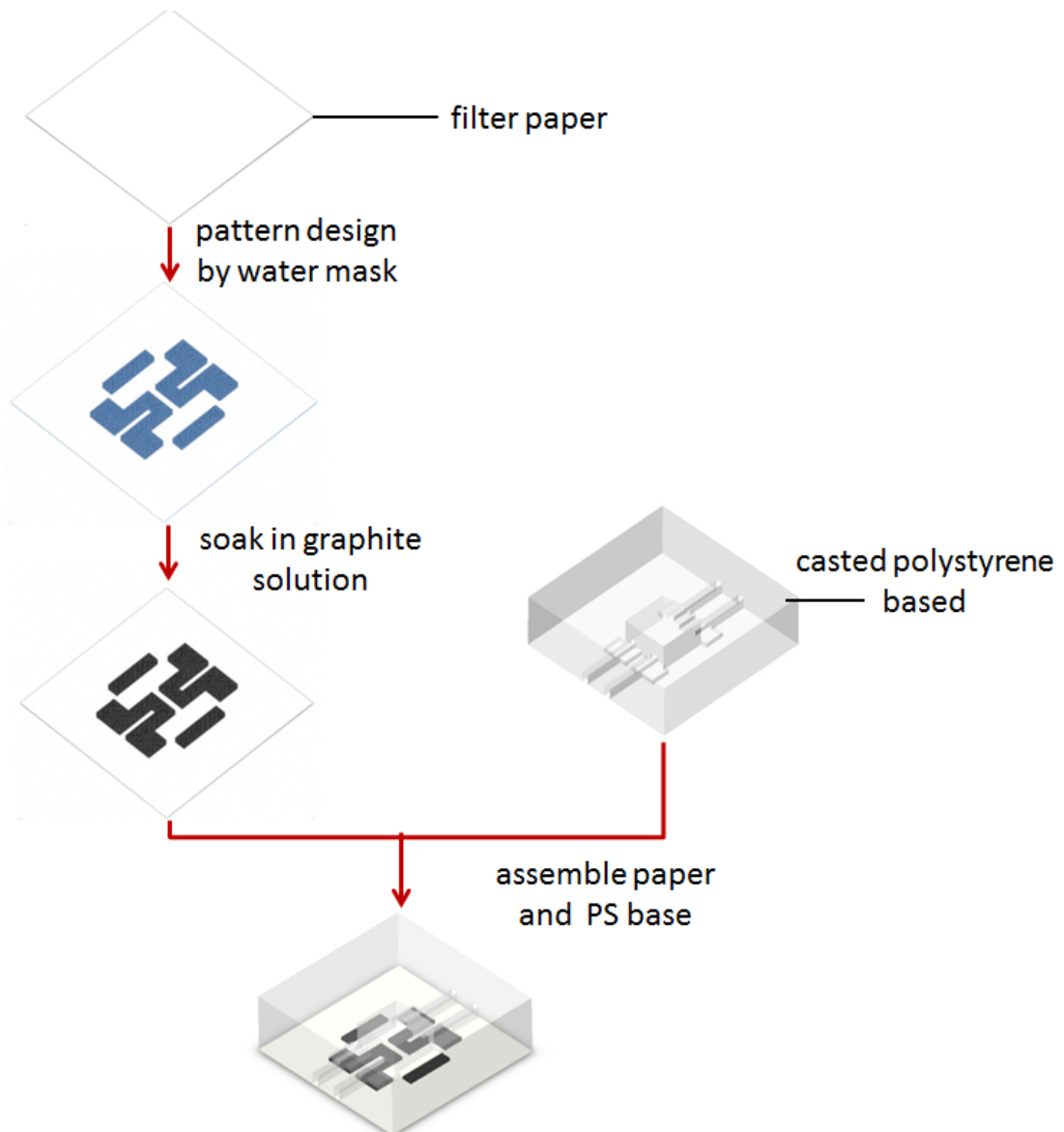
เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทนั้นไม่สามารถพิมพ์น้ำบริสุทธิ์ลงบนกระดาษได้โดยตรง เนื่องจากแรงตึงผิว (Surface tension) และค่าความหนืด (Viscosity) แตกต่างจากหมึกที่ใช้พิมพ์ปกติทั่วไป ในการขึ้นรูปของวงจรด้วยวิธีการหน้ากาน้ำนั้นต้องเปลี่ยนตลับหมึกให้เป็นตลับที่บรรจุน้ำบริสุทธิ์ เมื่อเปลี่ยนตลับหมึกให้เป็นตลับที่บรรจุน้ำบริสุทธิ์แล้วใช้งานในการพิมพ์นั้น หัวพิมพ์จะเกิดการอุดตัน ทำให้ต้องปรับปรุงค่าความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำบริสุทธิ์ให้เหมาะสมกับการพิมพ์ เอทิลีนไกลคอลสามารถช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำได้ ในการประยุกต์ใช้น้ำกับเครื่องพิมพ์นั้นจึงเลือกใช้สารละลายของน้ำและเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol Solution) ในอัตราส่วน 1 : 1 ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการอุดตันของหัวพิมพ์

3.4.4 การเตรียม Octadecyltrichlorosilane (OTS) ในสารละลาย n-hexane

โพลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวงจรด้วยวิธีหน้ากาน้ำในการพัฒนาเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนี้ เป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ไม่ชอบน้ำสูง (Super Hydrophobic) คือ ออกตะเตซิลไตรคลอโรซิลเลน (Octadecyltrichlorosilane, OTS) โดยนำโพลิเมอร์ชนิดนี้ไปละลายในสารละลายเฮกเซน (n-hexane) ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่มีขั้ว เพื่อกันโพลิเมอร์ไม่ให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการสร้างลวดลาย เนื่องจากน้ำเป็นสารละลายที่มีขั้ว จึงไม่สามารถผสมกับโพลิเมอร์ชนิดนี้ได้

3.5 กระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

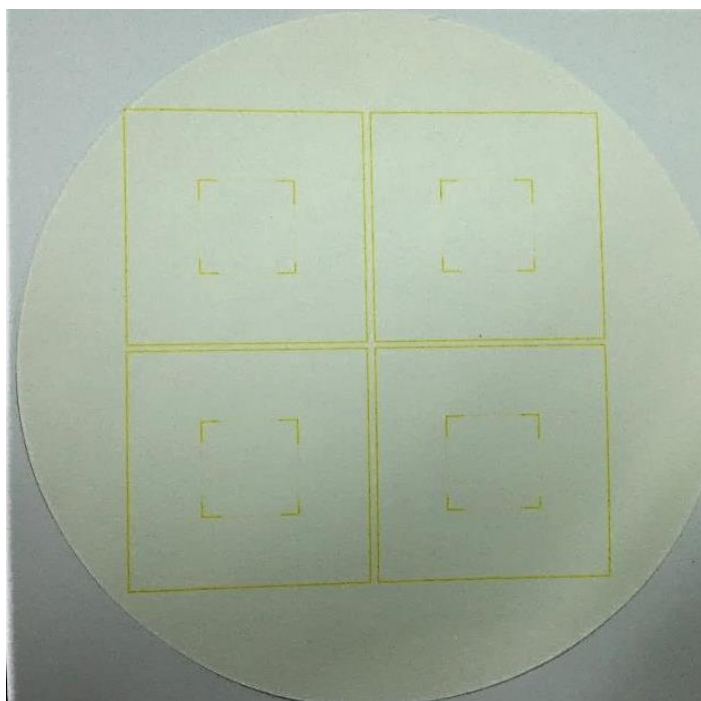
เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษนี้มีขั้นตอนการสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

3.5.1 การพิมพ์ขอบเขตของเซนเซอร์วัดความดันลงบนกระดาษ (Alignment)

พิมพ์สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 cm. ในตำแหน่งเดียวกับที่จะพิมพ์น้ำเปล่าเป็นรูปร่างวงจรถนบนกระดาษ เพื่อใช้สำหรับการบอกตำแหน่งในการประกอบกระดาษเข้ากับฐานของเซนเซอร์ และเป็นแนวทางในการตัดกระดาษเพื่อให้พอดีกับฐาน



รูปที่ 3.10 การพิมพ์ขอบเขตของเซนเซอร์ลงบนกระดาษกรอง

3.5.2 การสร้างหน้ากักน้ำชนิดที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง

พิมพ์สารละลายของน้ำลงบนกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 ที่คุณภาพสูงสุดซ้ำที่ตำแหน่งเดิม เพื่อให้ปริมาณน้ำมากพอที่จะป้องกันโพลิเมอร์และสารละลายไม่ให้แทรกซึมลงในกระดาษบริเวณที่ต้องการจะสร้างวงจรถั่วตันทานเมื่อกระดาษกรองผ่านการพิมพ์สารละลายของน้ำแล้วจะตัดกระดาษตามขอบเขตรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 cm. แล้วจึงนำกระดาษกรองไปซุบลงในสารละลายโพลิเมอร์ชนิดออกตะเดซิลไตรคลอโรซิเลนในสารละลายเอน-เฮกเซน (OTS in n-Hexane) เมื่อซุบเรียบร้อยแล้วจึงนำกระดาษไปล้างด้วย สารละลาย เอน-เฮกเซน และสารละลายเอทานอล (Absolute Ethanol) แล้วจึงใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าให้กระดาษแห้งเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อน้ำเปล่าและตัวทำละลายโพลิเมอร์ระเหยออกไปหมด จะหลงเหลือเพียงโพลิเมอร์ชนิดออกตะเดซิลไตรคลอโรซิเลนเป็นลวดลายเพื่อเป็นช่องทางการไหลของสารละลายแกรไฟต์ให้เป็นวงจรมีรูปร่างดังต้องการ

3.5.4 การเคลือบพาราฟิล์ม

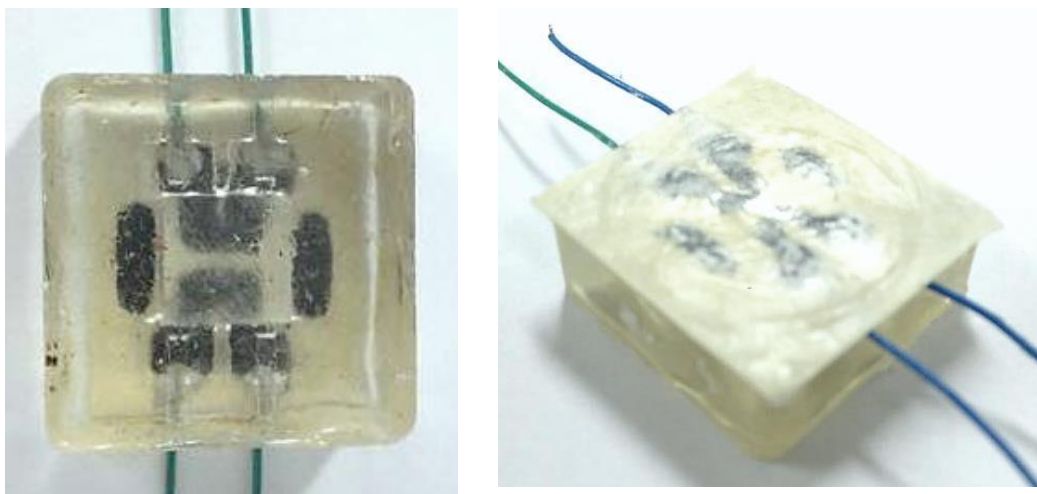
เนื่องจากกระดาษบริเวณวงจรไม่สามารถป้องกันการซึมของน้ำหรือสารละลายได้ดีเท่าที่ควร รวมไปถึงกระดาษกรอนี้ยังยินยอมให้อากาศสามารถไหลผ่านได้ ดังนั้นจึงต้องเคลือบกระดาษด้วยพาราฟิล์มซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ทำให้น้ำไม่ซึมลงในเนื้อกระดาษ รวมถึงป้องกันการไหลผ่านของอากาศ การเคลือบสามารถทำได้โดยวางพาราฟิล์มทับลงบนกระดาษในด้านที่ต้องการ จากนั้นนำไปให้ความร้อนบนเตาที่อุณหภูมิ 90-100°C เมื่อพาราฟิล์มละลายจนติดกับกระดาษทั้งแผ่น จึงหยิบออกจากเตา และรอจนพาราฟิล์มแข็งตัว

3.5.5 การขึ้นรูปฐาน

ฐานของเซนเซอร์วัดความดันนี้ หน้าหลักคือช่วยยึดกระดาษให้เป็นแผ่นเรียบในสภาวะปกติ ส่วนช่องว่างตรงกึ่งกลางมีไว้สำหรับให้ความดันจากภายนอกที่กระทำต่อกระดาษส่งผ่านความดันให้กับกระดาษทำให้เกิดการโก่งงอของกระดาษขึ้น โดยขึ้นรูปมาจากโพลีสไตรีน ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 6 ชม.

3.5.6 การประกอบชิ้นส่วนรับความดันกับฐาน

ติดกาวทางไฟฟ้าตัวนำคาร์บอน เพื่อเชื่อมสายไฟกับวงจรที่สร้างขึ้น แล้วใช้กาวตราช่างทาบบนฐานและในช่องว่างสำหรับสายไฟแล้วจึงนำมาประกบกับส่วนรับความดันที่ติดสายไฟแล้ว โดยให้สายไฟออกมาตามช่องสายไฟ กัดไว้ให้ติดกันแนบสนิทจะได้เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่สร้างขึ้น

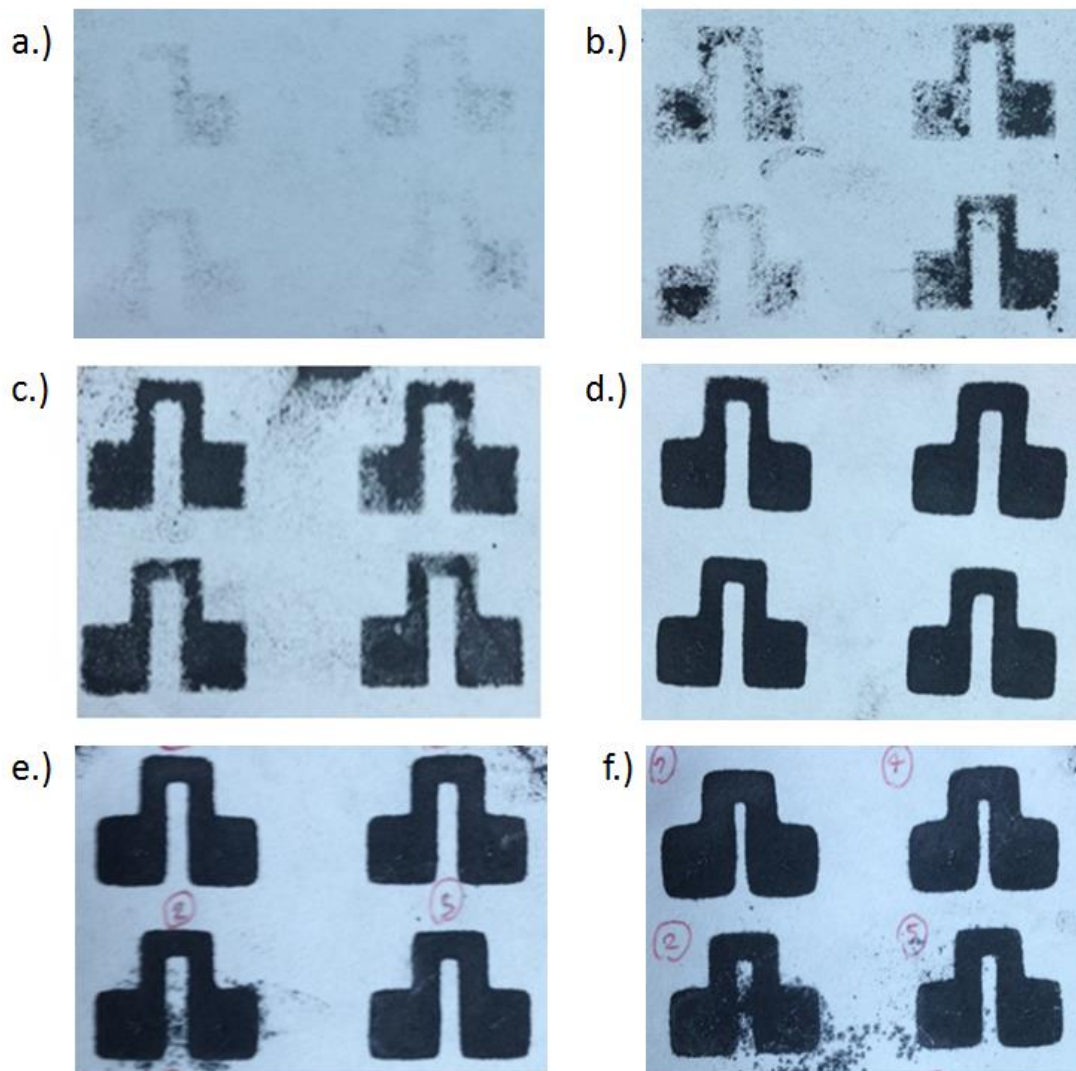
3.6 การปรับปรุงคุณภาพของการสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำ

3.6.1 ทดลองสร้างวงจรแกรไฟต์ด้วยวิธีการสร้างหน้ากากน้ำชนิดที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง

ทดลองพิมพ์สารละลายของน้ำที่จำนวนครั้งที่แตกต่างกันไปเพื่อหาจำนวนครั้งในการพิมพ์น้ำที่เหมาะสมกับการสร้างวงจรแกรไฟต์ด้วยการสร้างหน้ากากน้ำชนิดที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง ทั้งนี้ความเหมาะสมของจำนวนครั้งที่พิมพ์สารละลายน้ำพิจารณาจากค่าความต้านทานของวงจรแกรไฟต์ทั้ง 7 วงจรหลังการนำกระดาษกรองที่พิมพ์น้ำไปสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากน้ำและชุบกระดาษลงในสารละลายแกรไฟต์ที่อัตราส่วน แกรไฟต์ (Colloidal Graphite Paste): สารละลายน้ำ ที่ 1: 10 และขนาดของวงจรหลังการสร้างว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ตารางแสดงค่าความต้านทานของวงจรทั้ง 7 แสดงในภาคผนวก ก

3.6.1.1 การพิมพ์สารละลายของน้ำแล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์

พิมพ์สารละลายของน้ำ 1-6 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์ แล้ววัดค่าความต้านทาน แสดงรูปหลังนำกระดาษที่พิมพ์สารละลายของน้ำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์ในรูปที่ 3.12



WU LALUNGKUN UNIVERSITY

รูปที่ 3.12 กระจกกรองหลังการพิมพ์สารละลายของน้ำ แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์
 a.) พิมพ์สารละลายของน้ำ 1 ครั้ง b.) พิมพ์สารละลายของน้ำ 2 ครั้ง c.) พิมพ์สารละลายของน้ำ 3
 ครั้ง d.) พิมพ์สารละลายของน้ำ 4 ครั้ง e.) พิมพ์สารละลายของน้ำ 5 ครั้ง f.) พิมพ์สารละลายของน้ำ
 6 ครั้ง

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดค่าความต้านทาน 7 วงจร วงจรละ 5 ครั้ง ที่การพิมพ์น้ำ 1-6 ครั้ง

จำนวนครั้งที่พิมพ์ สารละลายน้ำ	ความต้านทาน (Ω)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	การกระจายตัวของแกรไฟต์
1	ไม่สามารถวัดได้	-	ไม่เต็มวงจร
2	ไม่สามารถวัดได้	-	ไม่เต็มวงจร
3	44.26	59.44	ไม่เต็มวงจร
4	3.54	1.3	เต็มวงจร
5	3.29	1.22	เต็มวงจร
6	2.3	1.31	เต็มวงจร

การพิมพ์สารละลายของน้ำจำนวน 1-2 ครั้งแล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์ ทุกวงจรไม่สามารถวัดค่าความต้านทานได้ และมีรูปร่างไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ เนื่องมาจากจำนวนครั้งของการพิมพ์สารละลายของน้ำที่น้อยจนเกินไปทำให้ปริมาณน้ำในการสร้างหน้ากากน้ำไม่พอจึงไม่สามารถสร้างหน้ากากน้ำได้ การพิมพ์สารละลายของน้ำจำนวน 3 ครั้งแล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์นั้นวงจรมีขนาดใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้แต่สารละลายแกรไฟต์กระจายตัวไม่เต็มวงจรทำให้ค่าความต้านทานมีความคลาดเคลื่อนสูง อาจเนื่องมาจากจำนวนครั้งในการพิมพ์สารละลายของน้ำน้อยไปทำให้ปริมาณน้ำในการสร้างหน้ากากน้ำไม่พอจึงน้ำไม่สามารถสร้างหน้ากากที่สมบูรณ์ได้ การพิมพ์สารละลายของน้ำจำนวน 4 และ 5 ครั้งแล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์ วงจรมีขนาดใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้มาก และสารละลายแกรไฟต์กระจายตัวเต็มวงจรทำให้ค่าความต้านทานมีความคลาดเคลื่อนต่ำ เพราะจำนวนครั้งที่พิมพ์น้ำมากพอ จะทำให้ปริมาณน้ำมีพอที่จะสร้างหน้ากากน้ำที่สมบูรณ์ได้ เมื่อนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์จึงทำให้กระจายตัวติดบนกระดาษได้เต็มวงจรตามที่ออกแบบไว้ แต่ที่การพิมพ์น้ำ 5 ครั้งในบางวงจรมีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้ อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปจนทำให้เกิดการสร้างหน้ากากน้ำนอกบริเวณที่ออกแบบไว้ การพิมพ์สารละลายของน้ำจำนวน 6 ครั้งแล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์ วงจรมีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้มากเนื่องจากการพิมพ์น้ำซ้ำมากเกินไปทำให้เกิดการสร้างหน้ากากน้ำนอกบริเวณที่ออกแบบไว้มากเมื่อนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์จึงได้วงจรที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น สารละลายแกรไฟต์กระจายตัวเต็มวงจรทำให้ค่าความต้านทานมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

3.7 อภิปรายและสรุปบท

พบว่า การพื้สารละลายของน้ำ 1-3 ครั้ง มีการกระจายตัวได้ดีและมีขนาดเป็นไปตามที่ ออกแบบไว้ แต่เนื่องจากการพื้สารละลายของน้ำในจำนวนครั้งที่น้อยจนเกินไป อาจทำให้ปริมาณ น้ำไม่มากพอจะปกคลุมบริเวณที่ต้องการสร้างหน้ากากน้ำได้ ทำให้หน้ากากน้ำที่สร้างขึ้นไม่สมบูรณ์ เมื่อนำไปซุบในสารละลายแกรไฟต์แล้วจึงพบว่ามีการกระจายตัวของสารละลายแกรไฟต์ได้ไม่ดีจะเห็น ได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวงจรถูกสูงมาก

การพื้สารละลายของน้ำจำนวน 4 ครั้ง ในการสร้างช่องทางการไหลด้วยการสร้างหน้ากาก น้ำโดยใช้สารละลาย OTS ใน n-Hexane ที่ความเข้มข้น 0.01% สามารถสร้างหน้ากากน้ำที่สมบูรณ์ แบบมากกว่าเมื่อเทียบกับการพื้สารละลายของน้ำที่จำนวนครั้งอื่นๆ เนื่องจากสารละลายแกรไฟต์ มีการกระจายตัวได้ดีและมีขนาดเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

การพื้สารละลายของน้ำที่ 5-6 ครั้งนั้นพบว่าช่องทางการไหลมีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบ ทำให้มีสารละลายแกรไฟต์บางส่วนไหลออกนอกช่องทางการไหล เนื่องมาจากการพื้สารละลาย ของน้ำมากจนเกินไป ทำให้หน้ากากน้ำที่สร้างขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบ หลังจากสร้างลวดลาย แล้วนำไปซุบสารละลายแกรไฟต์ ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้ มีการกระจายตัวของ แกรไฟต์ที่ดี ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานต่ำ

ดังนั้นการพื้สารละลายของน้ำจำนวน 4 ครั้ง ในการสร้างช่องทางการไหลด้วยการสร้าง หน้ากากน้ำโดยใช้สารละลาย OTS ใน n-Hexane ที่ความเข้มข้น 0.01% จึงเหมาะสมในการใช้สร้าง เซนเซอร์วัดความดันด้วยวิธีการหน้ากากน้ำในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 4

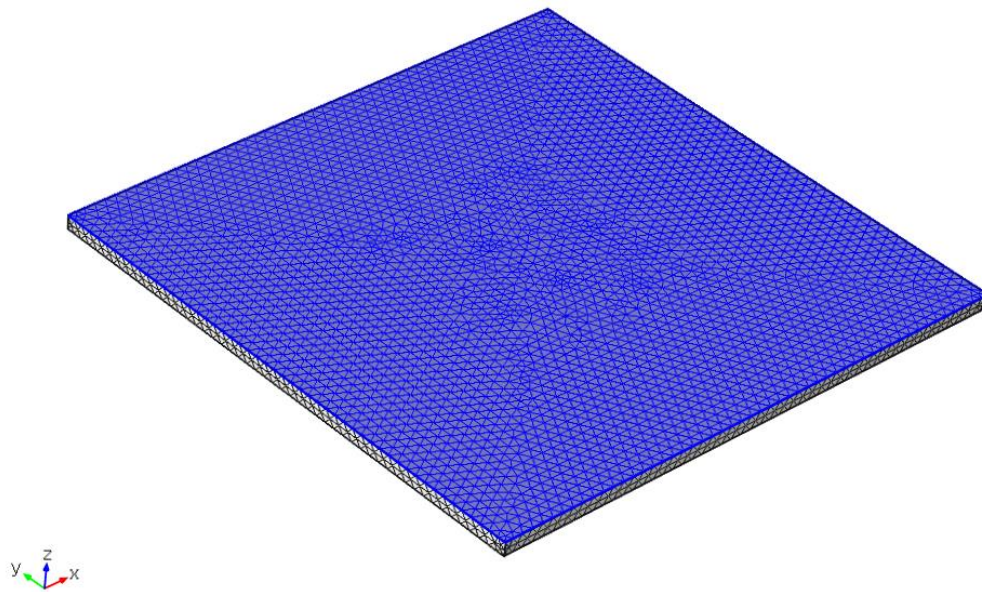
การสร้างแบบจำลองของแผ่นโครงสร้างรับแรงและการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน

ในบทนี้ประกอบด้วยการสร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรม COMSOL และการเปรียบเทียบค่าความโค้งงอจากการจำลอง จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และจากการทดลอง รวมไปถึงการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดันที่สร้างขึ้น

4.1 การสร้างแบบจำลองของแผ่นโครงสร้างรับแรง

4.1.1 การทำนายค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม COMSOL

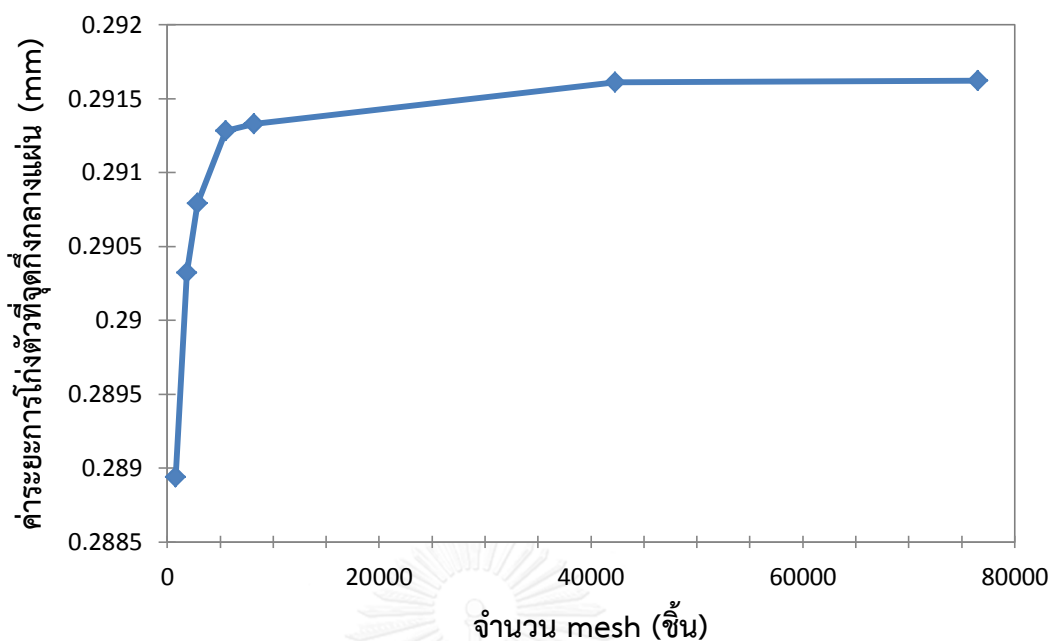
ในการสร้างแบบจำลองของเซนเซอร์วัดความดันชนิดกระดาษโดยใช้โปรแกรม COMSOL นั้นสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน solid mechanics (solid) และใส่รายละเอียดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างซึ่งในที่นี้คือกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 ที่ผ่านการเคลือบด้วยพาราฟิล์ม แล้วจึงวาดรูปร่างตามขนาดของเซนเซอร์วัดความดันที่ออกแบบไว้และเลือกให้การจับยึดเป็นแบบปลายยึดติดทั้งสี่ด้านสำหรับแผ่นจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate) หลังจากนั้นจึงทำการใส่ความดันเข้าไปในระบบให้เซนเซอร์วัดความดันรับความดันจากการถ่วงมวล 0.1-1.0 กิโลกรัม แล้วทำการเก็บข้อมูลระยะของการโค้งงอที่เปลี่ยนไปที่กึ่งกลางแผ่นเซนเซอร์วัดความดันชนิดกระดาษ ซึ่งต้องทำการแบ่ง mesh เพื่อใช้ในการหาค่า grid independent ของการจำลองเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษด้วยโปรแกรม COMSOL ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และแสดงตารางและกราฟของการหาค่า grid independent ที่แบบจำลองที่ได้รับความดัน 17.39 kPa ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งการหาค่ามอดูลัสของยังของกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 ที่ผ่านการเคลือบด้วยพาราฟิล์ม แสดงในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการแบ่ง mesh 42291 ชิ้นเพื่อใช้ในการหาค่า grid independent

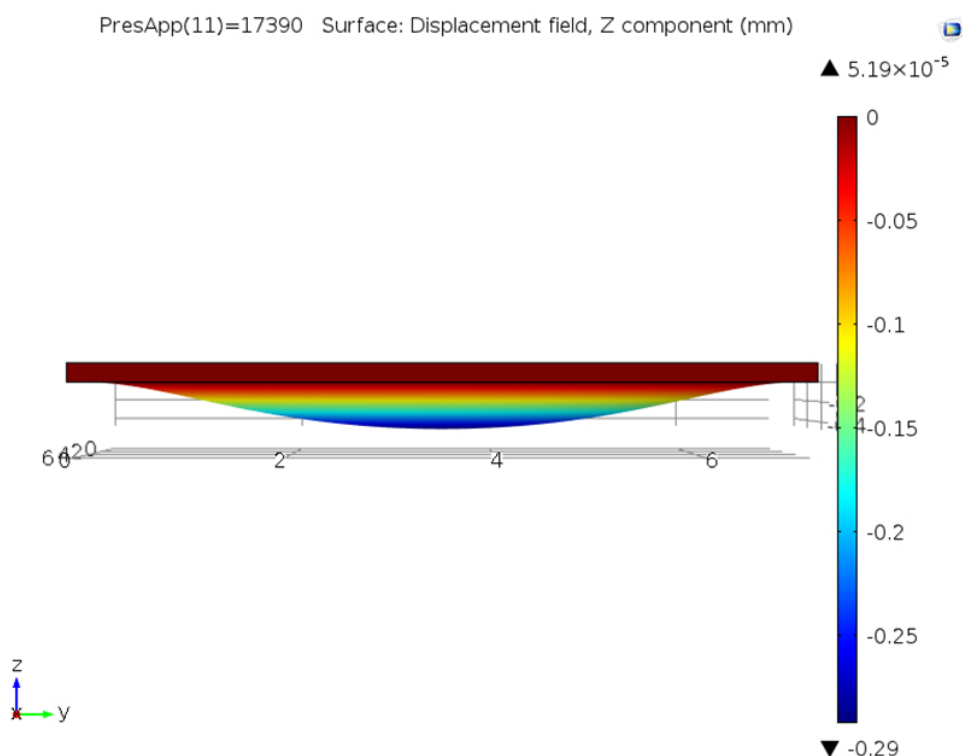
ตารางที่ 4.1 การหาค่า grid independent ที่แบบจำลองที่ได้รับความดัน 17.39 kPa

จำนวน mesh (ชิ้น)	ค่าระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางแผ่น (mm)
780	0.28894
1832	0.29032
2856	0.29079
5539	0.29128
8182	0.29133
42291	0.29161
76521	0.29162



รูปที่ 4.2 grid independent ที่แบบจำลองเมื่อได้รับความดัน 17.39 kPa

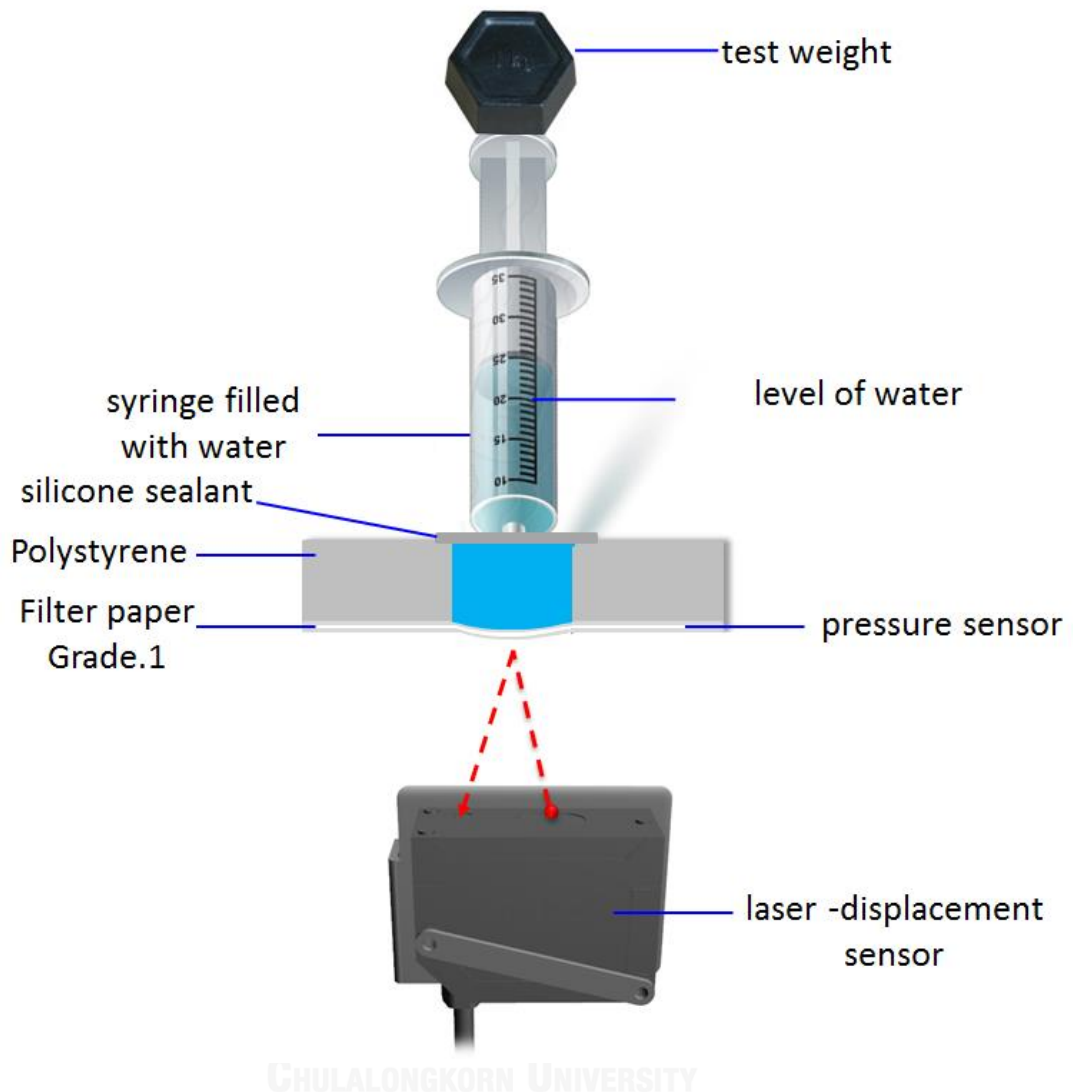
ซึ่งจากการแบ่ง mesh เพื่อหาค่า grid independent นั้นพบว่าค่าระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางแผ่นนั้นเริ่มเข้าสู่ที่จำนวนการแบ่ง mesh 5539 ชิ้น และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ที่จำนวนการแบ่ง mesh 42291 ชิ้น ดังนั้นจึงใช้การแบ่ง mesh จำนวน 42291 ชิ้นในการจำลองเซนเซอร์วัดความดันในการทดลองนี้ แสดงตัวอย่างการโก่งตัวของเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL ในรูปที่ 4.3 และแสดงภาพการจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL ทั้งหมดเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวลในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.3 การโก่งตัวของเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL ที่ความดัน 17.39 kPa

4.1.2 การทำนายค่าความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จากการทดลอง

เซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษสามารถจำลองขึ้นได้โดยใช้หลอดฉีดยาบรรจุน้ำพอประมาณวางบนฐานของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษโดยวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างรับแรงของเซนเซอร์คือกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 ที่ผ่านการเคลือบด้วยพาราฟิล์ม เติมน้ำให้เต็มบริเวณฐานของเซนเซอร์วัดความดัน เพื่อไม่ให้มีอากาศเข้าไปในระบบที่จะทำการทดลอง และใช้กาวซิลิโคนทารอบฐานเพื่อสร้างแนวเชื่อมกันการรั่วซึมของน้ำ แล้วใช้ตัวจับสำหรับยึดหลอดฉีดยา (camp) จับยึดให้หลอดฉีดยาตั้งตรงในแนวระดับ หลังจากนั้นนำตุ้มถ่วงน้ำหนักมาตรฐานขนาด 0.1-1.0 กิโลกรัมมาวางไว้บนปลายด้ามของกระบอกฉีดยา เป็นการให้ความดันแก่ระบบ ทำให้เกิดการโก่งงอของกระดาษขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการตั้งค่าเครื่องเลเซอร์วัดระยะ (laser-displacement sensor) วางเซนเซอร์ให้อยู่ในแนวระดับ ให้แสงเลเซอร์ที่วัดระยะนั้นชี้ไปที่จุดกึ่งกลางของกระดาษที่รับความดัน และให้ค่าระยะก่อนได้รับแรงดันเป็นระยะอ้างอิง แผนภาพการวัดความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษจากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 และแสดงตารางบันทึกค่าการโก่งงอของกระดาษที่ได้รับความดันจากการถ่วงมวล 0.1-1.0 กิโลกรัม จำนวน 5 ครั้ง แสดงในภาคผนวก



รูปที่ 4.4 แผนภาพระบบการวัดความโค้งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษจากการทดลอง

4.1.3 การทำนายค่าความโค้งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical)

ความโค้งงอของกระดาษที่จุดกึ่งกลางของแผ่นจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate) ซึ่งมีแรงภายนอกที่กระทำสม่ำเสมอทั่วพื้นของวัตถุจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์สามารถหาได้จากสมการ (2.1) ซึ่งการทำนายค่าความโค้งงอแสดงในภาคผนวก ข.

$$\delta_{\substack{X=0 \\ Y=0}} = \frac{C(1-\nu^2)pb^4}{Eh^3} \quad (2.1)$$

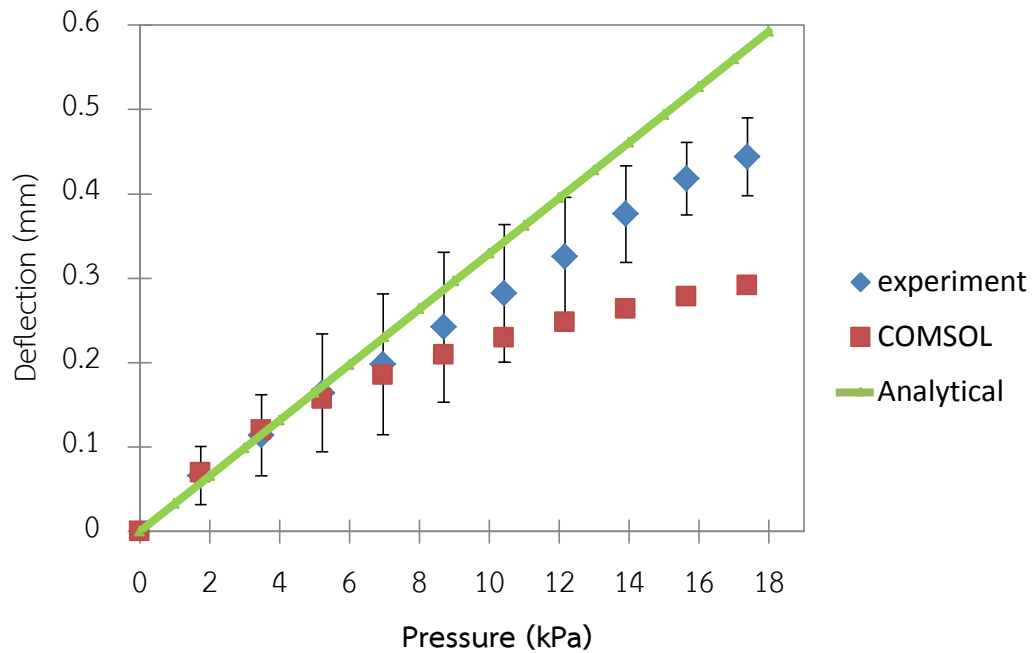
เมื่อ δ คือ ระยะที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการโก่งงอที่จุดกึ่งกลางแผ่น (m), C คือ ค่าคงตัวสำหรับการโก่งงอ แสดงในตารางที่ ข.1, p คือ แรงที่กระทำสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น (), b คือ ความกว้างของแผ่นชิ้นงาน (m), ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

4.1.4 การเปรียบเทียบความโก่งงอของกระดาศจากการทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL

จากการจำลองระบบการวัดความโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาศจากการทดลองและจากโปรแกรม COMSOL สามารถเปรียบเทียบระยะความโก่งงอจากการจำลองของทั้ง 2 วิธีการได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และแสดงกราฟเปรียบเทียบระยะความโก่งงอจากการจำลองของทั้ง 3 วิธีการพร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบระยะโก่งงอของกระดาศจากการทดลองและจากโปรแกรม COMSOL

Pressure (kPa)	deflection simulated by COMSOL (mm)	deflection by Analytical (mm)	deflection by experiment (mm)
1.739	0.0696	0.0573	0.066
3.478	0.1200	0.1146	0.114
5.217	0.1568	0.1718	0.164
6.956	0.1856	0.2291	0.198
8.695	0.2094	0.2864	0.242
10.434	0.2298	0.3437	0.282
12.173	0.2477	0.4009	0.326
13.912	0.2637	0.4582	0.376
15.651	0.2783	0.5155	0.418
17.390	0.2916	0.5728	0.444



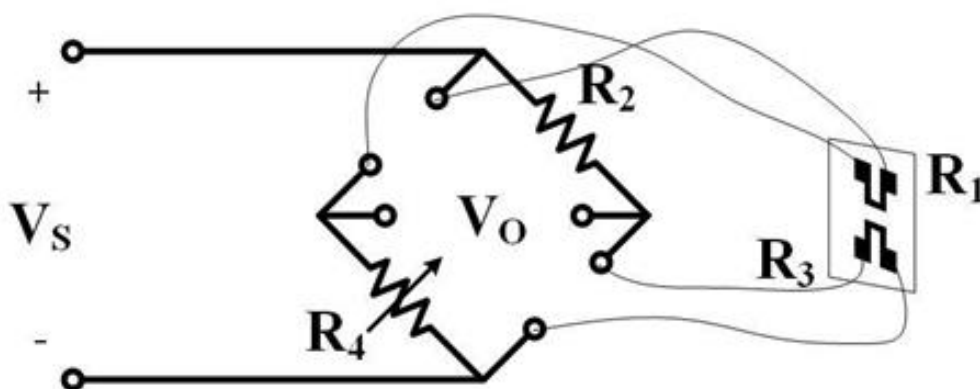
รูปที่ 4.5 ผลการวัดระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันที่ความดันต่างๆในช่วง 0-18 kPa เปรียบเทียบกับค่าจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL และค่าจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์

จากผลการทดลองพบว่าค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทั้งนี้ในช่วงที่ค่าระยะการโก่งตัวมีค่าไม่มาก (0- 0.15 มิลลิเมตร) ค่าระยะการโก่งตัวที่ได้จากการทดลองมีค่าสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ และค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL แต่เมื่อค่าระยะการโก่งตัวมีค่ามากขึ้นค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์มีค่าแตกต่างไปจากค่าจากแบบจำลอง เนื่องจากสมการของระยะการโก่งตัวตามวิธีระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์นั้นได้มาจากการวิเคราะห์ภายใต้สมมุติฐานที่ค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันนั้นมีค่าน้อย (small deflection) โดยไม่ควรเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นรับความดันหรือประมาณ 0.154 มิลลิเมตร (ความหนาแผ่น 0.307 มิลลิเมตร) ดังนั้นค่าระยะการโก่งตัวที่มากกว่าค่าดังกล่าว ค่าจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์จะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นและไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง นอกจากนี้ในช่วงความดันที่มากกว่า 10 kPa ระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองนั้น เนื่องจากในการทดลองจริงนั้นเมื่อความดันมีค่ามากขึ้น ฐานยึดของแผ่นรับความดันจะมีลักษณะผสมระหว่างแบบ fixed support และแบบ simple support [19] ในขณะที่ค่าจากแบบจำลองเป็นกรณีพื้นฐานยึดเป็นแบบ fixed

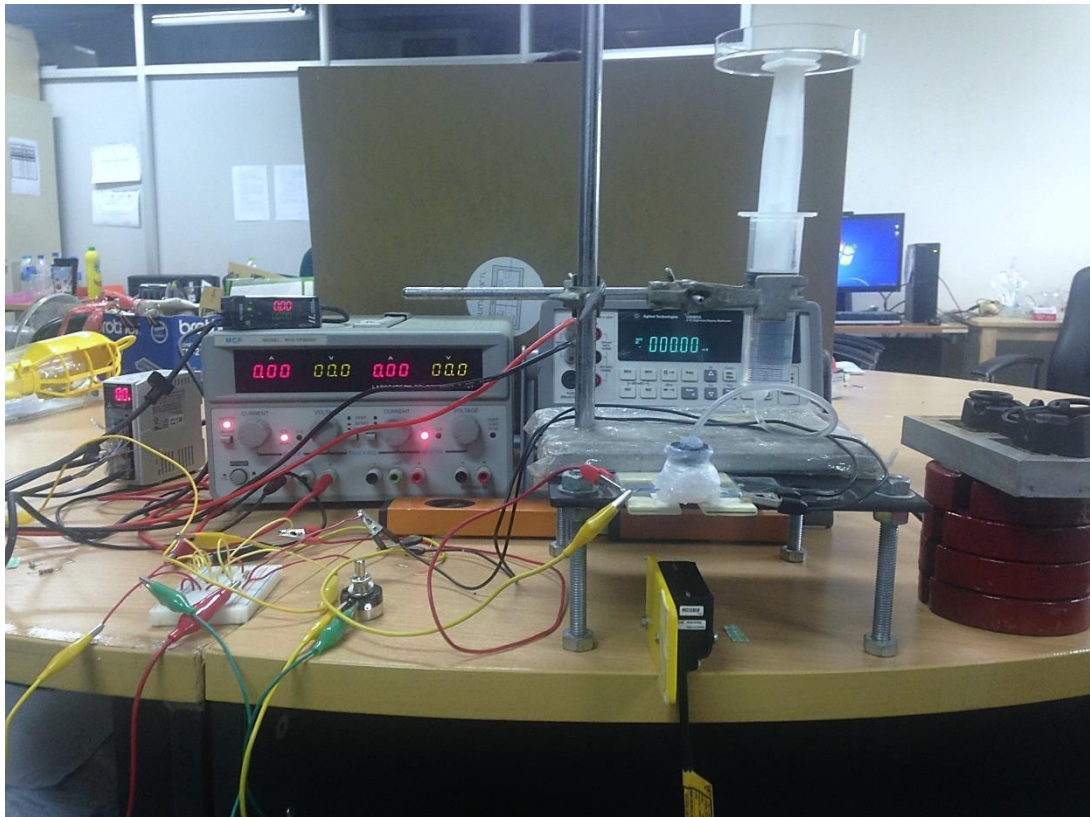
support จึงทำให้ค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันจากผลการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง

4.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความดัน

ก่อนที่จะสามารถนำเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นไปใช้งานเพื่อวัดความดัน จำเป็นต้องมีการสอบเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเสียก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความดันค่าต่างๆกระทำลงบนเซนเซอร์ที่มีวงจรตัวต้านทานเพียโซรีซิสทีฟ ที่จะตอบสนองต่อค่าความดันโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของวงจร แล้วทำการต่อเซนเซอร์เข้ากับวงจร Wheatstone bridge แสดงวงจร Wheatstone bridge ในรูปที่ 4.6 เพื่อบันทึกค่าแรงดันขาออก (V_o) ของวงจร ที่ค่าความดันต่างๆ 10 ค่า และทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้งกับเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น 3 ตัว แสดงการติดตั้งระบบทดลองการสอบเทียบเครื่องมือในรูปที่ 4.7 และได้แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของวงจรของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กิโลกรัม ในภาคผนวก จ



รูปที่ 4.6 วงจร Wheatstone bridge



รูปที่ 4.7 การติดตั้งระบบทดลองการสอบเทียบเครื่องมือ

หลังจากติดตั้งระบบเรียบร้อยแล้วก็ทำการป้อนแรงดันขาเข้าให้กับระบบ (Vs) 10 โวลต์ เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร แต่ขณะที่ป้อนแรงดันขาเข้าให้กับระบบนั้นจะทำให้ค่าแรงดันขาออก (Vo) มีค่าหนึ่งแสดงรูปเมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟให้กับระบบค่าแรงดันขาออกไม่เท่ากับศูนย์ จึงต้องทำการ balance bridge หรือทำให้บริดจ์อยู่ในสภาพสมดุล ซึ่งในสภาวะนี้จะไม่มีการไหลผ่านมัลติมิเตอร์ ทำให้แรงดันขาออกเป็นศูนย์ การทำให้บริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลนี้ ทำได้โดยการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ติดตั้งอยู่กับวงจร ปรับจนอ่านค่าแรงดันขาออกได้ศูนย์โวลต์

เมื่อทำให้บริดจ์อยู่ในสภาพสมดุลแล้วก็ให้ความดันแก่ระบบโดยการถ่วงตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่ทราบค่า 0.1-1.0 กิโลกรัม แสดงรูปภาพตัวอย่างการให้ความดันแก่ระบบโดยการถ่วงมวล 0.1 กิโลกรัมในรูปที่ 4.8 แล้วเก็บค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ และค่าความดันขาออกที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ทดลองกับชิ้นงาน 3 ชิ้น และแสดงผลการบันทึกค่าแรงดันขาออกที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบในภาคผนวก ฉ.



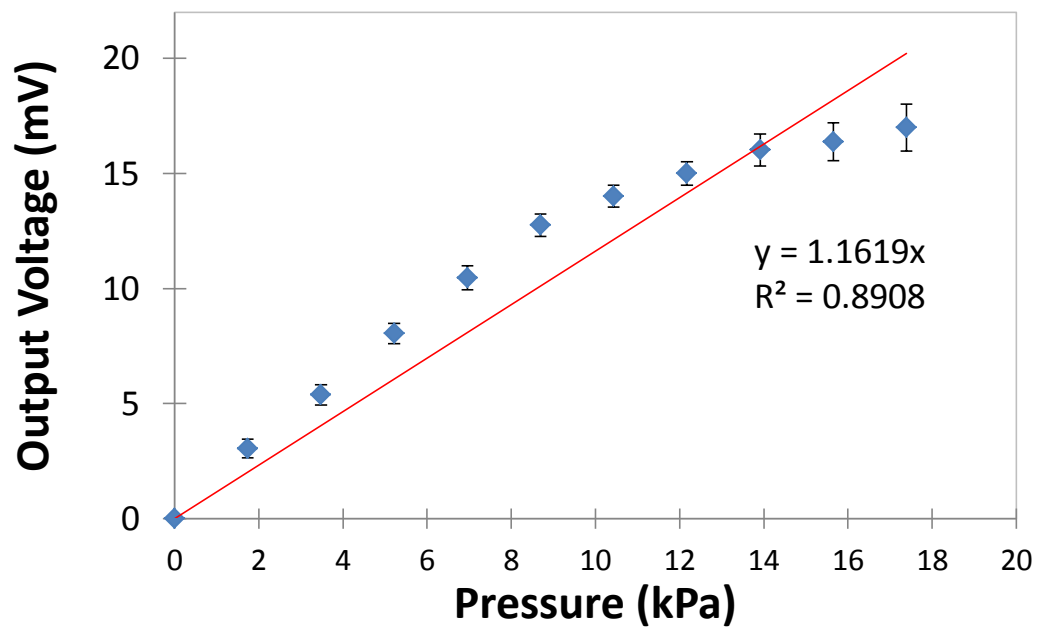
รูปที่ 4.8 การให้ความดันแก่ระบบโดยการถ่วงมวล 0.1 กิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

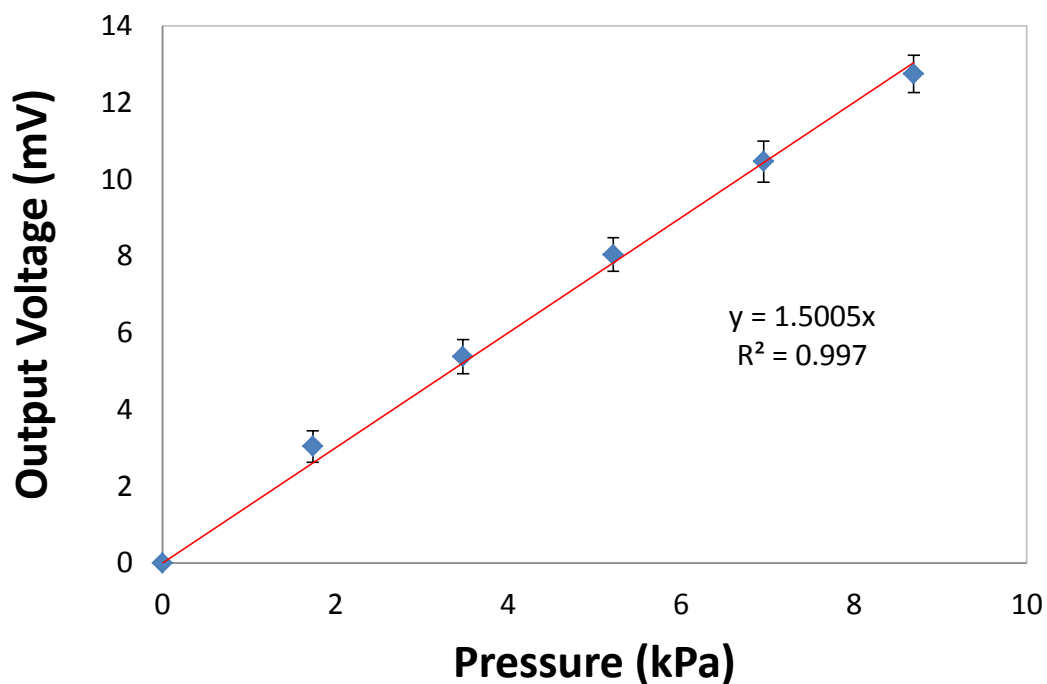
จากนั้นนำค่าความดันขาออกของวงจรที่ความดันค่าต่างๆมาเฉลี่ยกันได้ตามตารางที่ 4.3 เพื่อสร้างกราฟการสอบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ความดันและแรงดันขาออกเฉลี่ยสำหรับการทดลองบนชิ้นงาน 3 ชั้น ขึ้นละ 5 ครั้ง

Pressure kPa	mean Vo mV	SD Vo mV
0	0.000	0
1.739	3.037	0.4078
3.478	5.377	0.4432
5.217	8.041	0.4404
6.956	10.463	0.5318
8.695	12.750	0.4828
10.434	14.008	0.4764
12.173	15.003	0.5073
13.912	16.021	0.692
15.651	16.367	0.8228
17.39	16.988	1.0164



รูปที่ 4.9 กราฟ Output voltage Vs. Pressure ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษในช่วงความดัน 0-17.4 kPa



รูปที่ 4.10 กราฟ Output voltage Vs. Pressure ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษในช่วงความดัน 0-8.7 kPa

หลังจากเก็บข้อมูลครบแล้ว จึงนำไปหาค่า uncertainty ของชิ้นงานโดยแสดงตัวอย่างการหา uncertainty ที่ความดัน 17.4 kPa และแสดงตารางค่า uncertainty ทุกช่วงความดันของเครื่องมือในภาคผนวก ข. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าคือ มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Agilent รุ่น U1251A และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าขาออกคือ มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Agilent รุ่น U3401A

4.3 อภิปรายและสรุปบท

จากผลการทดลองการวัดค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันที่ความดันต่างๆในช่วง 0-18 kPa ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าในช่วง 0-0.15 มิลลิเมตรนั้นระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันของผลการทดลองมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และค่าจากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL แต่เมื่อค่าระยะการโก่งตัวมีค่ามากขึ้นค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์มีค่าแตกต่างไปจากค่าจากแบบจำลอง เนื่องมาจากสมการของระยะการโก่งตัวตามวิธีระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์นั้นได้มาจากการวิเคราะห์ภายใต้สมมุติฐานที่ค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันนั้นมีค่าน้อย (small deflection) โดยไม่ควรเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นรับความดันหรือประมาณ 0.154 มิลลิเมตร (ความหนาแผ่น 0.307 มิลลิเมตร) ดังนั้นค่าระยะการโก่งตัวที่มากกว่าค่าดังกล่าวค่าจากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์จะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นและไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

นอกจากนี้ในช่วงความดันที่มากกว่า 10 kPa ระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองนั้น เนื่องจากการทดลองจริงนั้นเมื่อความดันมีค่ามากขึ้น ฐานยึดของแผ่นรับความดันจะมีลักษณะผสมระหว่างแบบ fixed support และแบบ simple support [19] ในขณะที่ค่าจากแบบจำลองเป็นกรณีพื้นฐานยึดเป็นแบบ fixed support จึงทำให้ค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันจากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง

จากกราฟการสอบเทียบความดันในช่วง 0- 17.4 kPa พบว่าแรงดันขาออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่เพิ่มขึ้น สำหรับการใช้งานในช่วง 0 - 8.7 kPa มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและความดันเป็นแบบเชิงเส้น และค่า sensitivity เท่ากับ 1.5 mV/V/kPa และมี error เท่ากับ 3.28 % FSO. โดยแสดงตารางคำนวณ error ของความดันเทียบกับความดันช่วง 0-17.4 kPa ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 error ของความดันเทียบกับความดันช่วงที่สนใจ 0 - 8.7 kPa

Pressure (kPa)	meanVo (mV)	predicted V (mV)	ΔV (mV)	ΔP (kPa)	%FSO
0	0	0	0	0	0
1.739	3.037	2.609	0.428	0.285	3.280
3.478	5.377	5.219	0.158	0.105	1.210
5.217	8.041	7.828	0.213	0.142	1.629
6.956	10.463	10.437	0.025	0.017	0.193
8.695	12.750	13.047	0.297	0.198	2.275

และหลังจากทราบข้อมูลในการสอบเทียบของเซนเซอร์วัดความดันที่สร้างขึ้นแล้วจึงนำมาสร้างตารางเพื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดความดันประเภทซิลิกอนที่มีขายทั่วไปในอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษที่สร้างขึ้นกับเซนเซอร์วัดความดันประเภทซิลิกอน (MPX2300DT1) [20]

Specifications	Commercial MEMS pressure sensor (MPX2300DT1)	Paper-based pressure sensor
Material	Silicon	Filter paper, colloidal graphite
Sensing principle	Piezoresistive	Piezoresistive
Sensing area dimension (LxW)	Ø 2.41-2.72 mm	7 mm x 7 mm
Pressure ranges	0-300 mmHg	0-8.7 kPa (0-65.26 mmHg)
Sensitivity	5 $\mu\text{V/V/mmHg}$	16.84 $\mu\text{V/V/mmHg}$
Device cost	\$5.38 per device (sale price)	\$ 0.61 per device (material cost)

บทที่ 5

ชุดทดสอบการตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ

ชุดทดสอบการตั้งครรภ์เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่วัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตของชุดทดสอบตั้งครรภ์นั้นส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุสังเคราะห์หลากหลายประเภท ซึ่งมีราคาแพง และยิ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมาได้ การนำแนวความคิดของการใช้แลบบนชิปต้นแบบมาประยุกต์ใช้กับชุดทดสอบการตั้งครรภ์ โดยใช้วัสดุหลักเป็นกระดาษ จึงทำให้สามารถย่อขนาดของกระบวนการทดสอบการตั้งครรภ์มาไว้บนแผ่นกระดาษขนาดเล็ก ครอบคลุมทั้งการบรรจุสารทดลอง ผสมสารทดลอง รวมไปถึงการอ่านผลการทดลองได้ด้วยสายตา การใช้งานไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการพกพา มีข้อดีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้ง่าย ถูกและมีน้ำหนักเบา แต่ชุดทดสอบการตั้งครรภ์ประเภทกระดาษนั้นก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ (Colloidal gold) บนกระดาษกรองอยู่ ดังนั้นการพัฒนาชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษนั้นจึงเริ่มพัฒนาจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำและหาแนวทางการปรับปรุงต่อไป โดยในเบื้องต้นได้เพิ่มชั้นรองระหว่างอนุภาคทองคำกับกระดาษกรอง โดยเลือกใช้สารที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำ (Solubility) ได้สูงและไม่เกิดปฏิกิริยากับสารที่ต้องการทดสอบ เช่น สารละลายของกลูโคส (Glucose)

5.1 การทดลองปรับปรุงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทองคำ

5.1.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการทดลอง [10]

5.1.1.1 อนุภาคทองคำ (Colloidal gold)

โดยปกติอนุภาคทองคำจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 40 นาโนเมตรโดยเฉลี่ยแต่สามารถปรับแต่งให้มีขนาดตามที่ต้องการได้โดยวิธีการต่างๆ [21] ซึ่งสามารถเลือกและปรับแต่งให้มีขนาดตามที่ต้องการได้ตั้งแต่ช่วง 1-20 นาโนเมตร หรือ 20-100 นาโนเมตร ซึ่งขนาดที่แตกต่างกันของอนุภาคทองคำก็จะแสดงด้วยสีที่แตกต่างกันออกไปด้วย โดยอนุภาคทองคำที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 นาโนเมตร จะมีสีแดงคล้ำ และจะมีสีเข้มขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นสีม่วงเข้มตามขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการสังเคราะห์อนุภาคทองคำโดยเริ่มจากการใช้สารตั้งต้น HAuCl_4 และ Trisodium citrate โดยเริ่มจากการนำสาร HAuCl_4 ปริมาณ 40 มิลลิลิตร ของ 1.0 มิลลิโมล มาต้มให้เดือดที่อุณหภูมิ 200°C หลังจากนั้นน้ำเดือดแล้วจึงเติม Trisodium citrate 0.01 % w/v ปริมาณ 4 มิลลิลิตร 10 นาทีผ่านไป สารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงเข้มกลายเป็นสีแดง จึงนำมาทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นสามารถเก็บรักษาสารละลายที่อุณหภูมิ 4°C

5.1.1.2 Storage Buffer

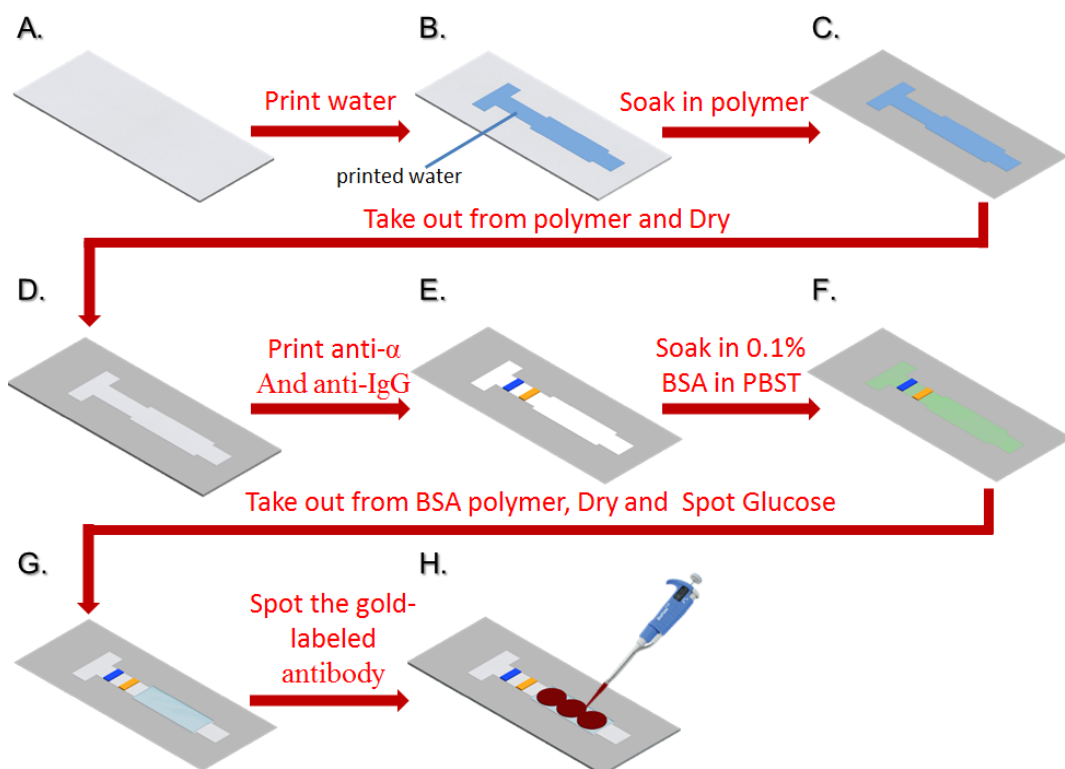
Storage Buffer สำหรับอนุภาคทองคำที่ติดกับโปรตีน Anti-Beta hCG ประกอบด้วยสาร 1 กรัมของ Bovine Serum Albumin (BSA), 0.05 กรัมของโพลีเอททิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol (PEG)), 0.1 กรัมของ NaN_3 , 0.8766 กรัมของ NaCl และ 2.423 กรัมของ Tris-base ซึ่งถูกละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และปรับค่า pH ด้วย 0.1 โมลของ NaOH และ HCl เพื่อให้สารละลายมีค่า pH 8.2

5.1.1.3 การติดอนุภาคทองคำกับโปรตีน Anti-Beta hCG (Conjugate Colloidal gold and Anti-Beta hCG Protein)

เนื่องจากอนุภาคทองคำมีแรงยึดเกาะที่สามารถยึดติดกับโปรตีนได้ด้วยแรง Electronegativity โดยอนุภาคของทองคำจะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบและ โปรตีนมีคุณสมบัติเป็นประจุบวก [20] สำหรับงานวิจัยนี้มีการเตรียม อนุภาคทองคำและโปรตีน Anti-Beta hCG เริ่มจากการนำ 900 ไมโครลิตรของอนุภาคทองคำผสมกับ 100 ไมโครลิตรของโปรตีน Anti-Beta hCG ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีเพื่อให้อนุภาคทองคำและโปรตีน Anti-Beta hCG เข้าจับคู่และผสมกัน หลังจากนั้นจึงเติมสารโพลีเอททิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol (PEG)) ที่ความเข้มข้น 0.01 % w/v ปริมาณ 50 ไมโครลิตร, สาร KH_2PO_4 ที่ pH 7.5 ปริมาณ 50 มิลลิโมล และสาร Bovine Serum Albumin (BSA) 0.1% w/v pH 9.0 ปริมาณ 100 ไมโครลิตร เมื่อผสมสารแล้วจึงนำมาบ่มเก็บไว้ 5 นาทีแล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปปั่นตก (Centrifugal) ที่ความเร็วรอบ 8,200 rpm ในอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 15 นาที หลังจากปั่นตกเรียบร้อยแล้วจะได้อนุภาคของทองคำและโปรตีน Anti-Beta hCG เป็นตะกอนกองอยู่บริเวณก้นหลอดทดลอง นำสารละลายที่อยู่เหนือตะกอนเหล่านี้ออกให้เหลือแต่เพียงตะกอนเท่านั้น แล้วจึงเติมสารละลาย Storage Buffer ลงไปแทนให้เท่ากับปริมาตรของสารละลายที่ดูดออกไป ค่า pH ของส่วนผสมต่าง ๆ นั้นมีผลต่อขนาดของอนุภาคทองคำ

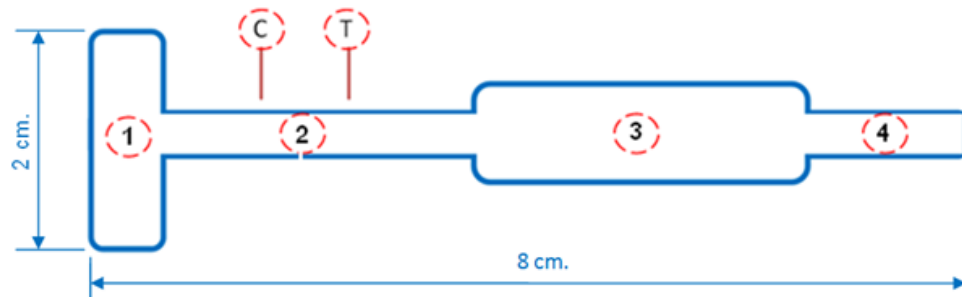
5.2 การสร้างชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ

อาศัยกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการแบบหน้ากาน้ำที่ตั้งกล่าวไปแล้วในบทที่ 3 จะมีการใส่สารเพิ่มเข้าไปบนกระดาษเพื่อให้สามารถตรวจครรภ์ได้ จากปริมาณฮอร์โมน hCG รูปที่ 46 แสดงแผนภาพการสร้างชุดตรวจตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ ซึ่งทำจากวัสดุหลักคือกระดาษกรองวอทแมน เบอร์ 1



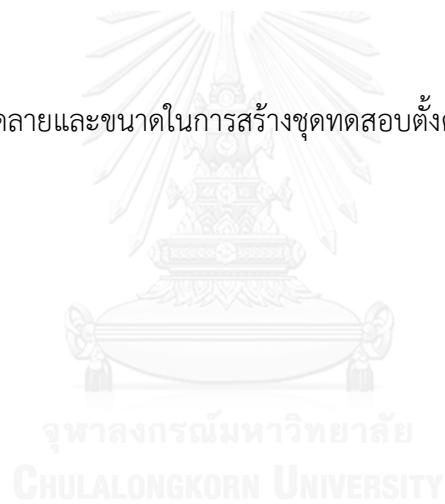
รูปที่ 5.1 แผนภาพการสร้างชุดตรวจตั้งครรภ์ประเภทกระดาษ

5.2.1 การออกแบบชุดทดสอบตั้งครุฑประเภทกระดาษ



- | | | | |
|----------|-----------------------|----------|-----------------------------------|
| 1 | Absorbent zone | 2 | Control and Test line zone |
| 3 | Conjugate zone | 4 | Sample zone |

รูปที่ 5.2 ลวดลายและขนาดในการสร้างชุดทดสอบตั้งครุฑด้วยวิธีหน้ากากน้ำ



5.3 การทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha

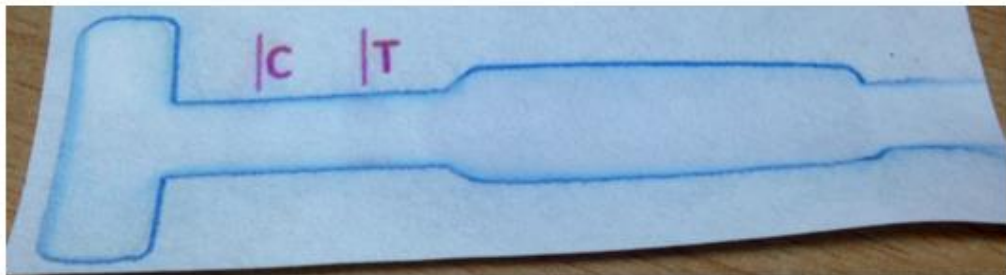
5.3.1 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ไม่มีชั้นรองอนุภาคทองคำด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha

ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบไม่มีชั้นรองอนุภาคทองคำพบที่ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีจึงสามารถอ่านผลการทดสอบได้ รูปก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.3

Before Testing hCG



After Testing hCG

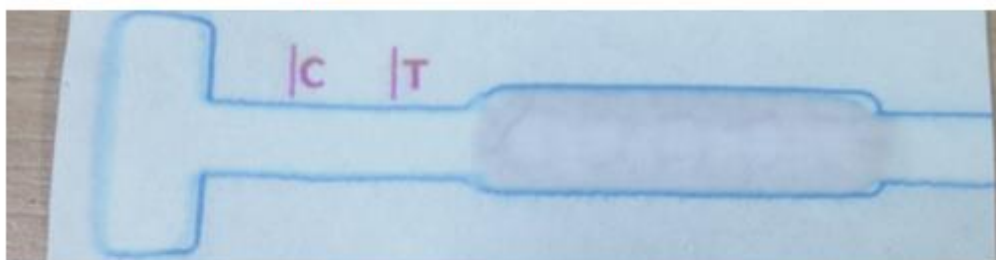


รูปที่ 5.3 ชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ไม่มีชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ

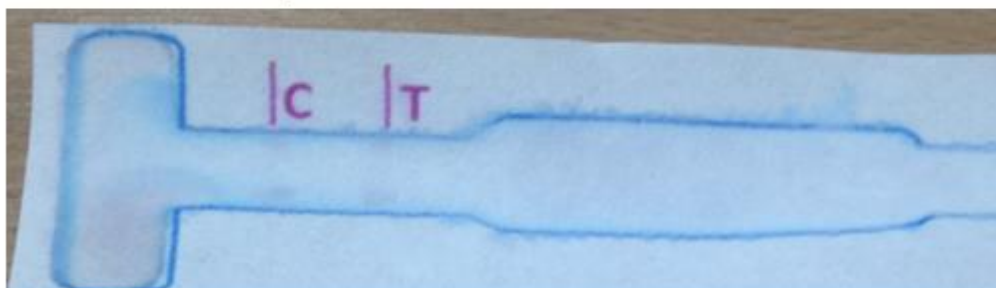
5.3.2 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 25% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha

ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 25% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ พบว่าใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงจึงสามารถอ่านผลการทดสอบได้ รูปก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.4

Before Testing hCG



After Testing hCG

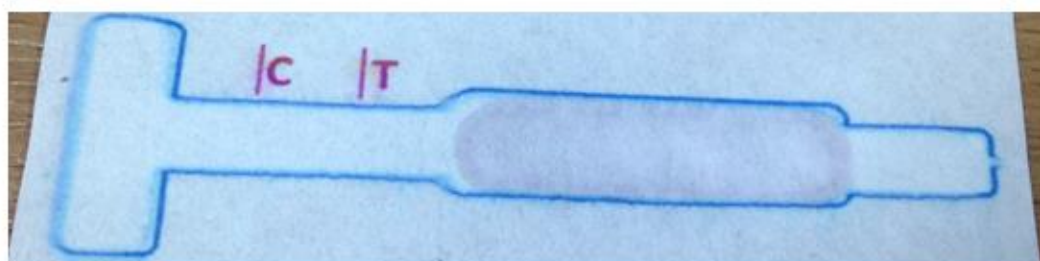


รูปที่ 5.4 ชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 25% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ

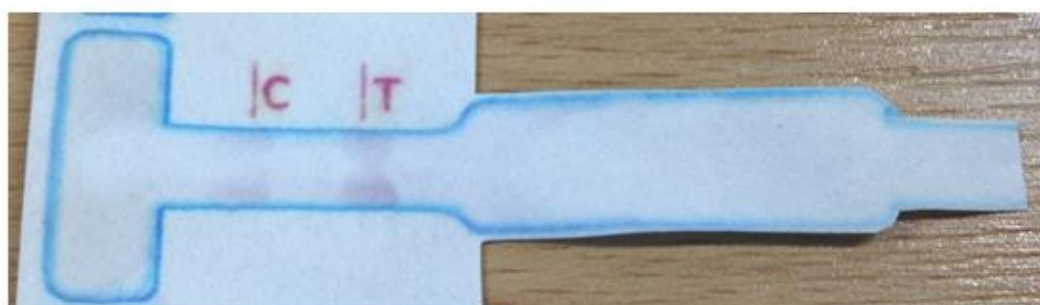
5.3.3 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha

ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ พบว่าใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงจึงสามารถอ่านผลการทดสอบได้ รูปก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.5

Before Testing hCG



After Testing hCG

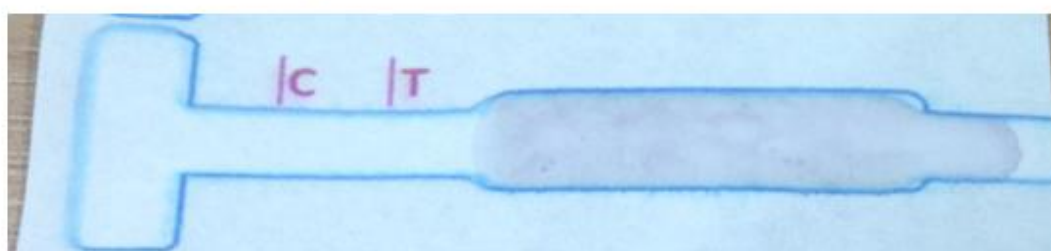


รูปที่ 5.5 ชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ

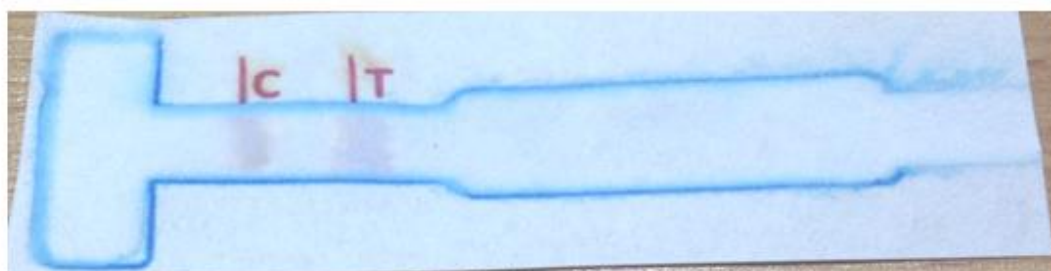
5.3.4 ทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha

ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ พบว่าใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงจึงสามารถอ่านผลการทดสอบได้ รูปก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.6

Before Testing hCG



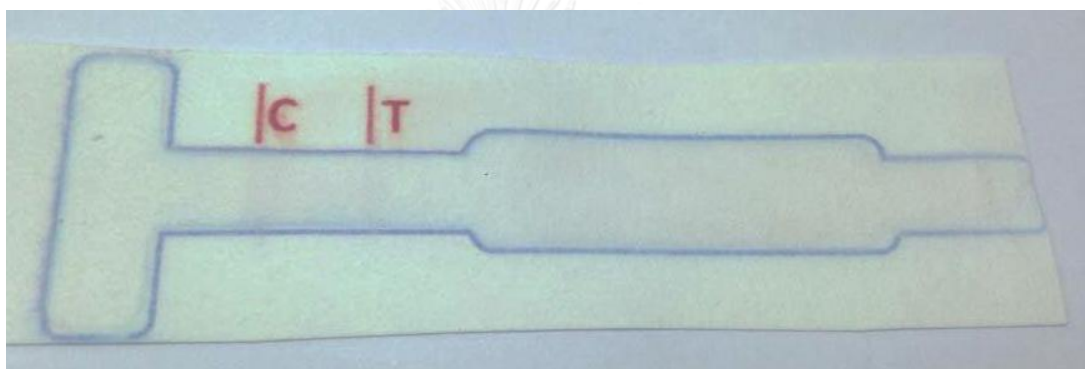
After Testing hCG



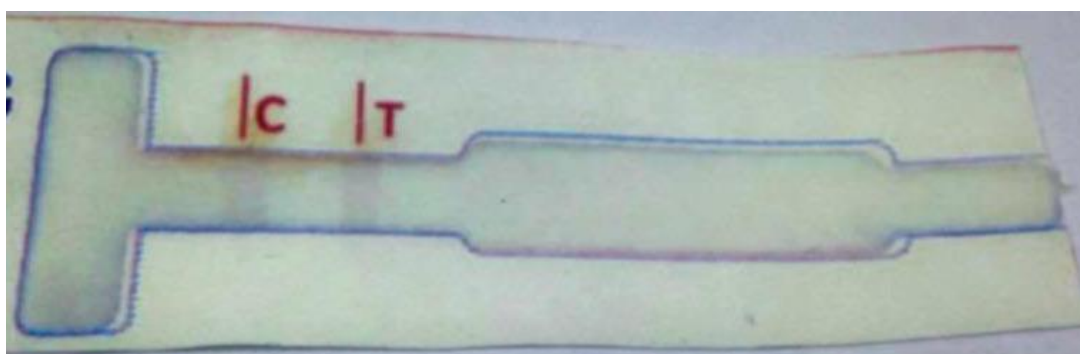
รูปที่ 5.6 ชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ

5.4 การทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ประเภทกระดาษที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์โปรตีน anti-IgG และ anti-alpha

ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ไม่มีชั้นรองอนุภาค และใช้กลูโคส 25% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำพบว่าไม่สามารถอ่านแถบสีได้ ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ พบว่าใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงจึงสามารถอ่านผลการทดสอบได้ รูปหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.7 ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ พบว่าใช้เวลาประมาณ 5-6 ชั่วโมงจึงสามารถอ่านผลการทดสอบได้ รูปหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 50% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำและขึ้นรูปด้วยการพิมพ์โปรตีน



รูปที่ 5.8 ชุดทดสอบตั้งครรภ์แบบที่ใช้กลูโคส 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำและขึ้นรูปด้วยการพิมพ์โปรตีน

5.5 อภิปรายและสรุปบท

จากการทดสอบชุดทดสอบตั้งครรภ์ที่ไม่มีชั้นรองอนุภาค และใช้กลูโคส 25 %W/V , 50%W/V , 85% W/V เป็นชั้นรองอนุภาคทองคำ ด้วยการหยดโปรตีน anti-IgG และ anti-alpha นั้นพบว่าการใช้ชั้นรองอนุภาคที่มีความเข้มข้นมากจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอ่านผลได้ช้า เนื่องจากสารละลายฮอโมน hCG ต้องใช้เวลาในการทำละลายชั้นรองอนุภาค ยิ่งความเข้มข้นชั้นรองอนุภาค มากก็จะใช้เวลาในการละลายมาก ส่งผลให้สารละลายไหลบนชุดทดสอบตั้งครรภ์ช้าไปด้วย แต่ยิ่งชั้นรองอนุภาคมีความเข้มข้นมากก็จะสามารถพาอนุภาคทองคำที่ติดฉลากไปได้มากเช่นกัน จึงทำให้ที่ชั้นรองอนุภาคความเข้มข้นมากมีแถบสีที่ชัดเจนมากกว่าชั้นรองอนุภาคที่ความเข้มข้นน้อย และแถบสีจะมีความคมชัดขึ้นเมื่อขึ้นรูปชุดทดสอบตั้งครรภ์ด้วยการพิมพ์โปรตีน anti-IgG และ anti-alpha



บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย

จากการปรับปรุงคุณภาพของการสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำโดยใช้สารละลาย OTS ใน n-Hexane ที่ความเข้มข้น 0.01% พบว่าสามารถสร้างลวดลายแบบหน้ากากน้ำที่สมบูรณ์แบบโดยพิมพ์สารละลายของน้ำจำนวน 4 ครั้ง โดยเมื่อนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์แล้วพบว่า สารละลายแกรไฟต์มีการกระจายตัวที่ดีและมีขนาดเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

ในการสร้างแบบจำลอง พบว่าค่าระยะการโก่งตัวของกระดาดจากการทดลอง จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และจากการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL นั้นมีค่าไปในทิศทางเดียวกันในช่วงแรกเท่านั้น (0- 0.15 มิลลิเมตร) เนื่องจากการวิเคราะห์แบบ small deflection ของแผ่นรับความดันแบบระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์นั้น สมการจะมีความแม่นยำในการทำนายค่าระยะการโก่งตัว ที่ระยะการโก่งตัวไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นรับความดันหรือประมาณ 0.154 มิลลิเมตร ทำให้ค่าระยะการโก่งงอมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองและจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL มากในช่วงความดันสูง และแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL ในช่วงท้ายมีค่าน้อยกว่าในการทดลอง เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลองวัดระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของเซนเซอร์วัดความดันที่คลาดเคลื่อนไปจากจุดกึ่งกลาง และอาจมาจากการกำหนดแบบจำลองให้มีลักษณะเป็นแบบ fix-support ซึ่งเป็น Ideal case แต่ในการทดลองจริงนั้นแผ่นรับความดันอาจจะมีลักษณะเป็นแบบ simply support ซึ่งทำให้ค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันมากขึ้นกว่าเดิมถึง 3 เท่า จึงทำให้ค่าระยะการโก่งตัวของแผ่นรับความดันของการทดลองในช่วงท้ายมีค่าสูงกว่าแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL

การสอบเทียบความดันในช่วง 0- 17.4 kPa พบว่าแรงดันขาออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่เพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกและความดันเป็นแบบเชิงเส้นสำหรับการใช้งานในช่วง 0 - 8.7 kPa และพบว่าค่า sensitivity ของเซนเซอร์วัดความดันที่สร้างขึ้นเท่ากับ 1.5 mV/V/kPa และมี error เท่ากับ 3.28 % FSO.

ในการทดสอบชุดทดสอบตั้งครุฑ พบว่าการใช้ชั้นรองอนุภาคที่มีความเข้มข้นมากจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอ่านผลทดสอบตั้งครุฑได้ช้า เนื่องจากสารละลายฮอริโมน hCG ต้องใช้เวลาในการทำละลายชั้นรองอนุภาค ซึ่งจากการทดลองที่การใช้ชั้นรองอนุภาคความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 85 %W/V จะอ่านผลการทดสอบได้ช้าที่สุด แต่ยิ่งชั้นรองอนุภาคมีความเข้มข้นมากก็จะสามารถพาอนุภาคทองคำที่ติดฉากไปได้มากเช่นกัน จึงทำให้ที่ชั้นรองอนุภาคความเข้มข้น 85 %W/V มีแถบสีที่

ชัดเจนมากที่สุด และแถบสีจะมีความคมชัดขึ้นเมื่อขึ้นรูปชุดทดสอบตั้งครรภ์ด้วยการพิมพ์โปรตีน anti-IgG และ anti-alpha



รายการอ้างอิง

- [1] T.-R. Hsu, *MEMS and Microsystems : Design and Manufacture*: McGraw-Hill, 2002.
- [2] L. Ninghai Sendo Sensor Co. (2015). *Automotive Pressure Sensor Products and Extended Reading*. Available:
<http://www.pressuresensorsuppliers.com/Automotive-Pressure-Sensor.html>
- [3] A. W. Martinez, S. T. Phillips, M. J. Butte, and G. M. Whitesides, "Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 46, pp. 1318-1320, 2007.
- [4] S. T. P. Andres W. Martinez, and G. M. Whitesides, "Diagnostics for the Developing World, Microfluidic Paper-Based Analytical Devices," *Anal. Chem.*, vol. 82, pp. 3-10, 2010.
- [5] O. C. a. C. S. H. W. Dungchai, "electrochemical detection for paper-based microfluidics," *Analytical Chemistry*, vol. 81, 2009.
- [6] Z. Nie, F. Deiss, X. Liu, O. Akbulut, and G. M. Whitesides, "Integration of paper-based microfluidic devices with commercial electrochemical readers," *Lab Chip*, vol. 10, pp. 3163-9, 2010.
- [7] X. Liu, M. Mwangi, X. Li, M. O'Brien, and G. M. Whitesides, "Paper-based piezoresistive MEMS sensors," *Lab Chip*, vol. 11, pp. 2189-96, 2011.
- [8] C. H. JL. Delaney, J. Tian and W. Shen, "Electrogenerated chemiluminescence detection in paper-based microfluidic sensors," *Analytical chemistry*, vol. 83, 2011.
- [9] A. W. Martinez, S. T. Phillips, and G. M. Whitesides, "Three-dimensional microfluidic devices fabricated in layered paper and tape," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, pp. 19606-19611, 2008.
- [10] เกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล, "การพัฒนาช่องการไหลขนาดเล็กและการลดการยึดเกาะของแอนติบอดีติดฉลากทองสำหรับแล็บบนชิปประเภทกระดาษ," วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2012.

- [11] J. J. T. Akter, and W. S. Kim, "Fabrication of Sensitivity Tunable Flexible Force Sensor via Spray Coating of Graphite Ink," *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, vol. 33, p. 3, 2012.
- [12] T. J. K. Richard A. Goldsby , Barbara A. Osborne , Janis Immunology Kuby *Kuby Immunology* W.H. Freeman & Company, 2000.
- [13] L. o. B. Sciences, "Lecture of Biological Sciences ", ELISA, Ed., ed, 2014.
- [14] K. Abe, K. Suzuki, and D. Citterio, "Inkjet-printed microfluidic multianalyte chemical sensing paper," *Analytical chemistry*, vol. 80, pp. 6928-6934, 2008.
- [15] M. M. Corporation. (2015). *diagnostics*. Available: <http://www.merckmillipore.com/diagnostics>
- [16] N. Nagatani, R. Tanaka, T. Yuhi, T. Endo, K. Kerman, Y. Takamura, *et al.*, "Gold nanoparticle-based novel enhancement method for the development of highly sensitive immunochromatographic test strips," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 7, pp. 270-275, 2006.
- [17] K. Abe, K. Kotera, K. Suzuki, and D. Citterio, "Inkjet-printed paperfluidic immuno-chemical sensing device," *Anal Bioanal Chem*, vol. 398, pp. 885-93, 2010.
- [18] J. W. G. Pu, S.J. Severton, "Properties of Paraffin Wax/Montmorillonite Nanocomposite Coating," *NSTI Nanotechnology* vol. 2, 2007.
- [19] R. J. S. P. Boresi, *Advanced Mechanics of Materials*: Wiley, 2002.
- [20] I. Freescale Semiconductor. (2015). *MPX2300DT1 Datasheet* Available: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/188309/FREESCALE/MPX2300DT1.html>
- [21] A. P. Tapan K. Sau, N.R. Jana, Z.L. Wang and Tarasankar Pal., "Size controlled synthesis of gold nanoparticles using photochemically prepared seed particles.," *Nanoparticle Research*, pp. 257-261, 2001.

ภาคผนวก ก.ความต้านทานของวงจรในการปรับปรุงคุณภาพของการสร้างลวดลายบนกระดาษ
ด้วยวิธีการแบบหน้ากาน้ำ

ตารางที่ ก. 1 ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์
สารละลายของน้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์

ความต้านทาน ($k\Omega$)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
ชิ้นงานที่ 1	2.356	2.365	2.46	2.496	2.701	2.4756
ชิ้นงานที่ 2	195.64	185.547	121.89	131.652	188.89	164.7238
ชิ้นงานที่ 3	15.227	14.865	15.288	14.64	15.596	15.1232
ชิ้นงานที่ 4	13.887	13.865	13.84	13.812	13.631	13.807
ชิ้นงานที่ 5	15.379	16.012	16.477	18.546	15.379	16.3586
ชิ้นงานที่ 6	86.23	81.94	82.57	80.46	83.45	82.93
ชิ้นงานที่ 7	14.423	14.388	14.367	14.434	14.505	14.4234

ตารางที่ ก. 2 ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์ สารละลายของน้ำ 4 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์

ความต้านทาน ($k\Omega$)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
ชิ้นงานที่ 1	4.035	4.135	4.063	4.284	3.98	4.099
ชิ้นงานที่ 2	3.121	3.085	3.187	3.055	3.19	3.128
ชิ้นงานที่ 3	5.93	6.27	6.47	6.178	5.88	6.146
ชิ้นงานที่ 4	2.665	2.704	2.772	2.775	2.695	2.722
ชิ้นงานที่ 5	3.522	3.637	3.625	3.761	3.581	3.625
ชิ้นงานที่ 6	2.7	2.668	2.677	2.725	2.678	2.69
ชิ้นงานที่ 7	2.301	2.207	2.241	2.382	2.644	2.355

ตารางที่ ก. 3 ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์ สารละลายของน้ำ 5 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์

ความต้านทาน ($k\Omega$)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
ชิ้นงานที่ 1	1.285	1.332	1.348	1.295	1.288	1.3096
ชิ้นงานที่ 2	4.955	4.917	5.123	5.791	5.219	5.201
ชิ้นงานที่ 3	3.834	3.445	3.104	3.233	3.545	3.4322
ชิ้นงานที่ 4	2.747	2.323	2.482	2.468	2.782	2.5604
ชิ้นงานที่ 5	4.207	4.065	4.366	4.104	4.184	4.1852
ชิ้นงานที่ 6	3.262	3.109	3.655	3.065	3.197	3.2576
ชิ้นงานที่ 7	3.137	3.205	3.004	2.942	3.205	3.0986

ตารางที่ ก. 4 ความต้านทานของวงจรทั้ง 7 จากการสร้างลวดลายบนกระดาษกรองหลังการพิมพ์ สารละลายของน้ำ 6 ครั้ง แล้วนำไปชุบในสารละลายแกรไฟต์

ความต้านทาน ($k\Omega$)						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
ชิ้นงานที่ 1	1.018	1.069	1.031	1.047	1.074	1.0478
ชิ้นงานที่ 2	1.795	1.931	1.616	1.687	1.632	1.7322
ชิ้นงานที่ 3	1.69	1.835	1.672	1.829	1.867	1.7786
ชิ้นงานที่ 4	1.022	1.001	1.082	1.026	1.102	1.0466
ชิ้นงานที่ 5	2.867	2.794	2.988	2.975	2.835	2.8918
ชิ้นงานที่ 6	4.76	4.789	4.634	4.665	4.77	4.7236
ชิ้นงานที่ 7	2.801	2.872	2.994	2.76	2.851	2.8556



ภาคผนวก ข. การโก่งงอและค่าโมเมนต์ของยังของคานกระดาด

1. การโก่งงอของวัสดุ (Deflection)

การโก่งงอของวัสดุ เป็นการบอกระดับการโก่งงอของโครงสร้างหลังจากได้รับแรงกระทำภายนอกซึ่งสามารถบ่งบอกได้ด้วยระยะทางหรือมุมที่เปลี่ยนแปลงไป ระยะของการโก่งงอเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับแรงกระทำภายนอก ความลาดเอียงของโครงสร้าง รูปร่างและลักษณะของโครงสร้าง และการยึดติดของโครงสร้าง ในที่นี้จะกล่าวถึงการยึดแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) สำหรับคานปลายยื่น (Cantilever Beam) และ การยึดแบบปลายยึดติดทั้งสองด้านสำหรับแผ่นจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate)

1.1 กรณีที่ 1 การยึดแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end)

สำหรับคานปลายยื่น (Cantilever Beam) แสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข. 1 คานปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end)

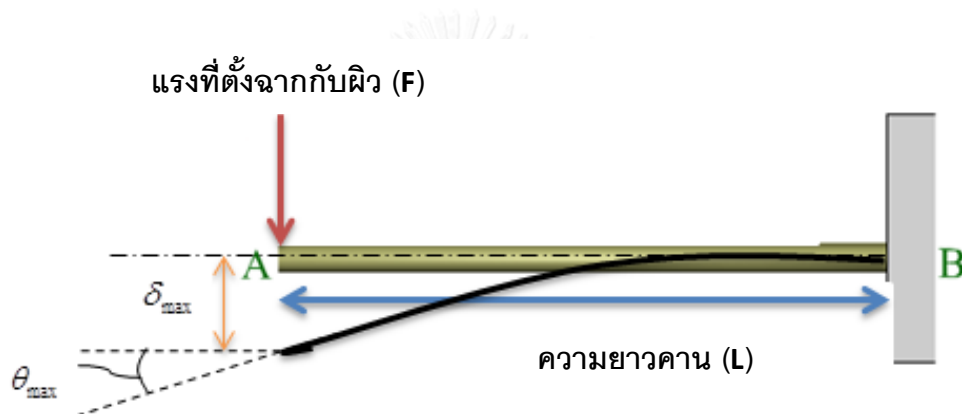
สามารถคำนวณหาการโก่งงอของคานปลายยื่น (Cantilever Beam) โดยยึดคานแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) ได้จากสมการ ข.1 ดังแสดงในรูปที่ ข.2

$$\delta_{max} = \frac{-FL^3}{3EI} \quad (\text{ข.1})$$

ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคำนวณรอบแกนสะเทินแกน X (I_x) หาได้จากสมการ ข.2

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (\text{ข.2})$$

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



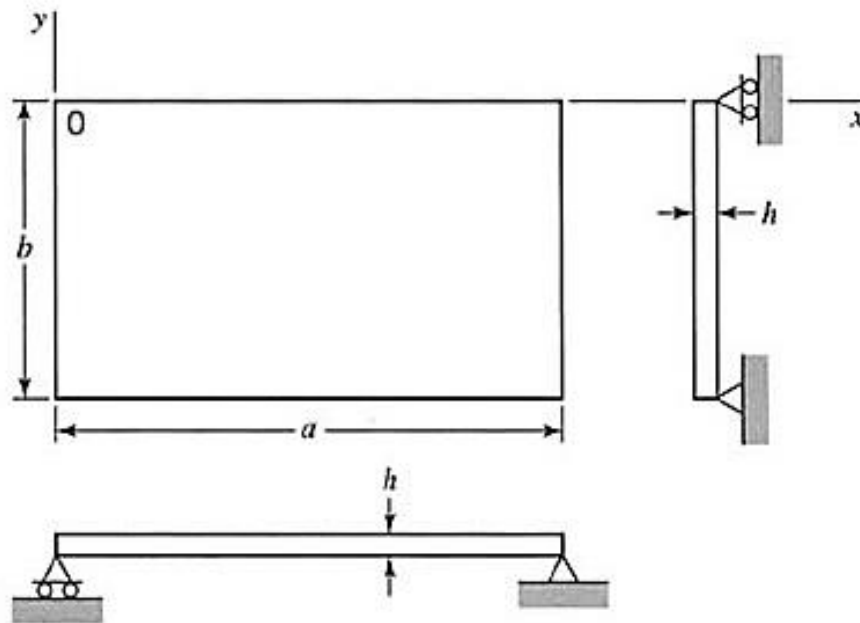
รูปที่ ข. 2 คานปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้านเมื่อถูกแรงกระทำทำให้เกิดการโก่งงอ

1.2 กรณีที่ 2 การยึดชิ้นงานแบบปลายยึดติดทั้งสี่ด้านสำหรับแผ่นจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate)

โดยมีแรงภายนอกที่กระทำ กระทำสม่ำเสมอทั่วพื้นของวัตถุ สามารถคำนวณหาการโก่งงอของจุดกึ่งกลางของแผ่นจัตุรัส (Clamped Rectangular Plate) Boresi et al, 2002 [19] ซึ่งมีแรงภายนอกที่กระทำสม่ำเสมอทั่วพื้นของวัตถุได้จากสมการ ข.3 แสดงแผ่นจัตุรัสในรูปที่ ข.3

$$\delta_{\substack{X=0 \\ Y=0}} = \frac{C(1-\nu^2)pb^4}{Eh^3} \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ δ คือ ระยะที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการโก่งงอที่จุดกึ่งกลางแผ่น (m), C คือ ค่าคงตัวสำหรับการโก่งงอ แสดงในตารางที่ ข.1, p คือ แรงที่กระทำสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น (N/m^2), b คือ ความกว้างของแผ่นชั้นงาน (m), v คือ อัตราส่วนปัวซอง



รูปที่ ข. 3 แผ่นจัตุรัสที่ปลายทั้งสี่ถูกยึดติด และแรงภายนอกกระทำสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ Boresi et al, 2002 [19]

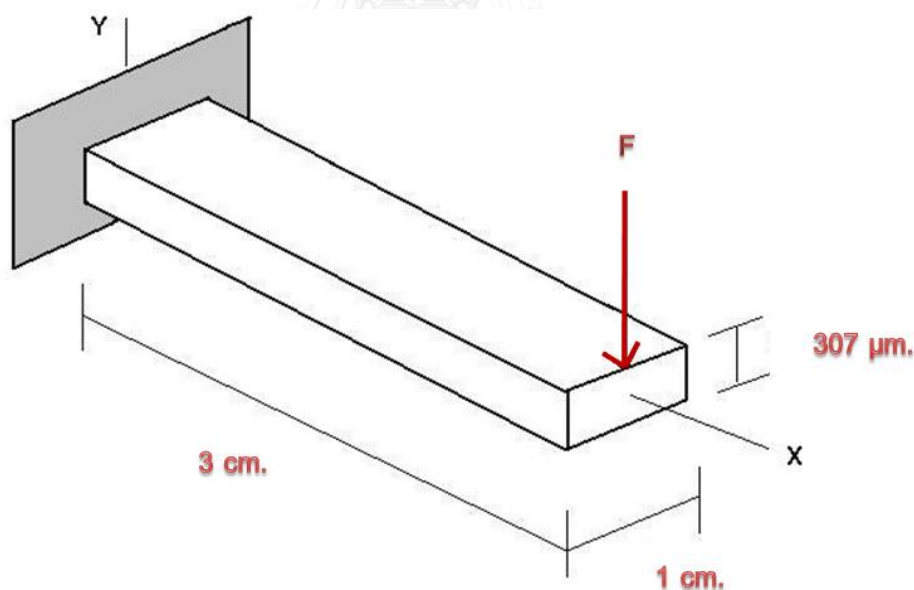
ตารางที่ ข.1 ค่าคงตัวสำหรับการโก่งงอของแผ่นจัตุรัสที่ปลายถูกยึดทั้ง 4 ด้าน ด้วยแรงสม่ำเสมอ (อัตราส่วนปัวซอง (ν) = 0) Boresi et al, 2002 [19]

	Moments in span b		Moments in span a		Value of C
	At center of edge	At center of slab	At center of edge	Along center line of slab	At maximum deflection
Rectangular slab all edges fixed	$\frac{1}{2} \frac{wb^2}{1 + \alpha^4}$	$\frac{1}{8} \frac{pb^2}{3 + 4\alpha^4}$	$\frac{1}{24} wb^2$	$0.009pb^2 (1 + 2\alpha^2 - \alpha^4)$	$\frac{0.032}{1 + \alpha^4}$

2. การหาค่ามอดูลัสของยังของแผ่นโครงสร้างรับแรง

ในการทำนายค่าการโก่งงอของเซนเซอร์วัดความดันจากการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม COMSOL นั้น จำเป็นจะต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานของกระดาษกรองที่ใช้ เนื่องจากการใช้งานกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 นี้มีการปรับปรุงคุณภาพของกระดาษด้วยการเคลือบพาราฟิล์มบนผิวของกระดาษกรอง 1 ด้านจึงต้องทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 1 โดยการหาค่ามอดูลัสของยังนี้สามารถทำได้โดย ทำการจำลองโครงสร้างของคานโดยนำกระดาษมาตัดให้มีลักษณะเป็นคานปลายยื่น (Cantilever Beam) และยึดคานที่จำลองนี้ให้เป็นแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) ซึ่งปลายอิสระนี้เมื่อถูกแรงภายนอกกระทำจะเกิดการโก่งงอ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ด้วยระยะทางหรือมุมที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถคำนวณหาการโก่งงอของคานกระดาษปลายยื่น (Cantilever Beam) โดยยึดคานแบบปลายยึดติดหนึ่งด้านปลายอิสระหนึ่งด้าน (Fixed-Free end) โดยพิจารณาแบบ Small deflection ได้จากสมการ (ข.1)

ซึ่งในการจำลองโครงสร้างของคานปลายยื่นนี้ใช้กระดาษกรองโดยมีขนาดดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 ขนาดของคานปลายยื่นที่ทำการสร้างขึ้น

เนื่องจากคานที่นำมาทดลองนั้น มีการเคลือบด้วยพาราฟิล์มทำให้คานมีลักษณะเป็น Composite beam แต่ค่ามอดูลัสของพาราฟิล์มนั้นมีค่าน้อยมาก (55-77 MPa) [18] เมื่อเทียบ

กับยังมอดูลัสของกระดาศกรอง (1 GPa) จึงได้ละผลของยังมอดูลัสของพาราฟิล์มโดยในการคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังนั้นจะคิดเป็นคานแบบ Cantilever beam เมื่อแทนค่าขนาดของคานลงในสมการ (ข.2) เมื่อ $h = 307 \times 10^{-6}m$ และจะได้ว่า $I_x = 2.411 \times 10^{-14} m^4$ จึงนำไปแทนค่าลงในสมการ (ข.1) จะได้ว่า

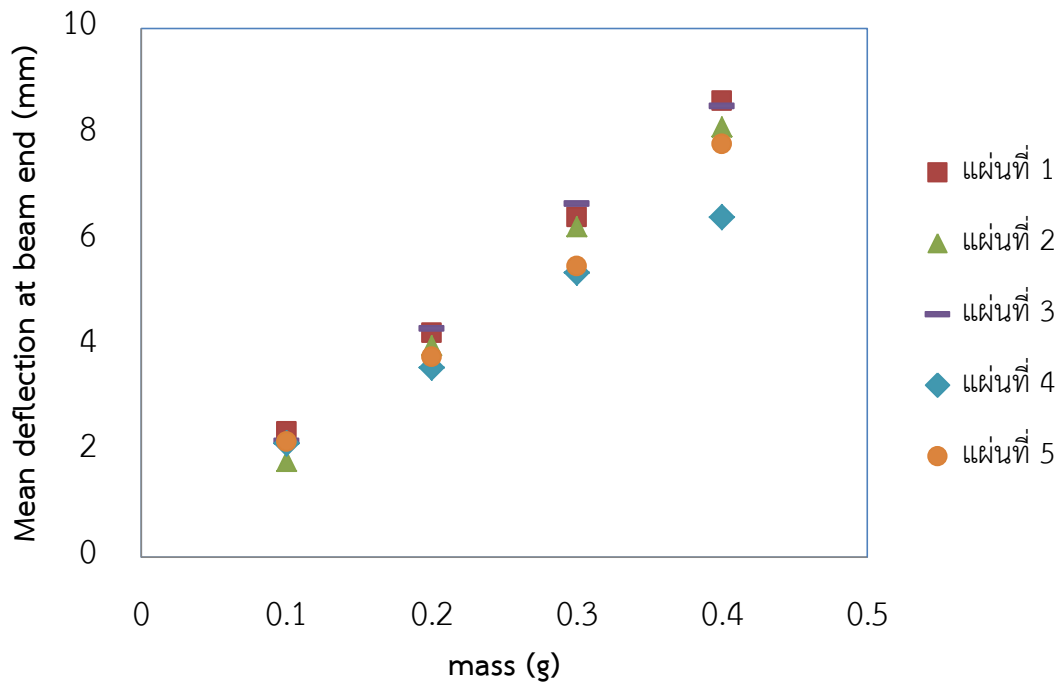
$$\delta_{\max} = \frac{-F \times (3 \times 10^{-2})^3}{3E \times 2.411 \times 10^{-14}} = \frac{-m \times 9.81}{E \times 2.411 \times 10^{-8}} = -3.662 \times 10^9 \times \frac{m}{E}$$

เมื่อ m คือ มวลของวัตถุที่นำมาถ่วง (kg)

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและระยะการโก่งงอของกระดาศในรูปของค่ามอดูลัสของยังเป็นไปตามสมการ

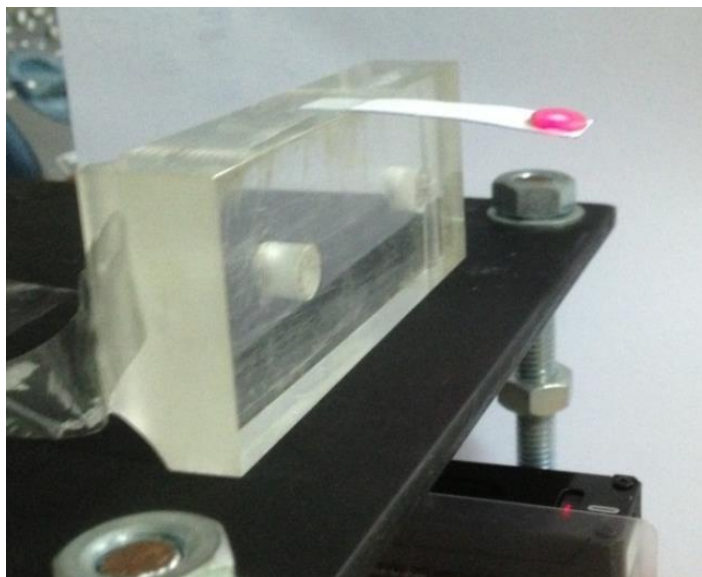
$$E = -3.662 \times 10^9 \times \frac{m}{\delta_{\max}} \quad (\text{ข.4})$$

จึงทำการทดลองถ่วงมวลที่ปลายคานกระดาศโดยใช้มวลคือดินน้ำมันขนาด 0.1 กรัม , 0.2 กรัม , 0.3 กรัม และ 0.4 กรัม ถ่วงที่ปลายคานแล้วทำการวัดระยะการโก่งงอของคานที่เปลี่ยนไปโดยกระดาศ 1 แผ่นเก็บค่าระยะความโก่งงอ 3 ครั้ง แล้วจึงเปลี่ยนกระดาศเพื่อทำการทดลองใหม่โดยการเก็บค่าใช้คานกระดาศทั้งหมด 5 แผ่น แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลถ่วงน้ำหนักที่ปลายคานกับค่าความโก่งงอเฉลี่ยของกระดาศในรูปที่ ข.5 และแสดงตารางผลการทดลองในตารางที่ ข.2-ข.6



รูปที่ ข. 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลถ่วงน้ำหนักที่ปลายคานกับค่าความโก่งงอเฉลี่ยของกระดาศ

จากผลการทดลองจะได้ค่ามอดูลัสของยังของกระดาศกรงวอทแมนเบอร์ 1 ที่เคลือบผิวด้วยพาราฟิล์ม 1 หน้าพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมวลถ่วงน้ำหนักที่ปลายคานกับค่าความโก่งงอเฉลี่ยของกระดาศมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สามารถหาค่ามอดูลัสของกระดาศได้ $E = 1.820 \times 10^8 \pm 0.145 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ (ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) รูปประกอบการทดลองแสดงในรูปที่ ข.6



รูปที่ ข. 6 จำลองโครงสร้างของคานาปลายยื่นโดยใช้กระดาษวอทแมนเบอร์ 1 ที่ผ่านการเคลือบพาราฟิล์ม 1 หน้า พร้อมถ่วงมวล 0.1 กรัม

ตารางที่ ข. 2 ค่าการโก่งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานากระดาษแผ่นที่ 1 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์มที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ

จุพาลงกรณ์ แผ่นที่ 1 ยาลัย				
มวล g	0.1	0.2	0.3	0.4
ครั้งที่				
1	2.47	4.36	6.75	9.4
2	2.23	4.22	6.21	8.45
3	2.4	4.14	6.32	8.03
ค่าการโก่งงอเฉลี่ย	2.366667	4.24	6.42667	8.62667
ค่าโมดูลัสของยัง	1.55E+08	1.73E+08	1.71E+08	1.70E+08

ตารางที่ ข. 3 ค่าการโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาศแผ่นที่ 2 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์ม
ที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ

แผ่นที่ 2				
มวล g ครั้งที่	0.1	0.2	0.3	0.4
1	1.83	4.17	6.7	8.16
2	1.61	3.8	6.66	8.13
3	1.98	4	5.36	8.11
ค่าการโค้งงอเฉลี่ย	1.806667	3.99	6.24	8.13333
ค่าโมดูลัสของยัง	2.03E+08	1.84E+08	1.76E+08	1.80E+08

ตารางที่ ข. 4 ค่าการโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาศแผ่นที่ 3 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์ม
ที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ

แผ่นที่ 3				
มวล g ครั้งที่	0.1	0.2	0.3	0.4
1	2.24	4.33	6.92	8.62
2	2.34	4.45	6.67	8.32
3	1.98	4.17	6.45	8.63
ค่าการโค้งงอเฉลี่ย	2.186667	4.31667	6.68	8.52333
ค่าโมดูลัสของยัง	1.67E+08	1.70E+08	1.64E+08	1.72E+08

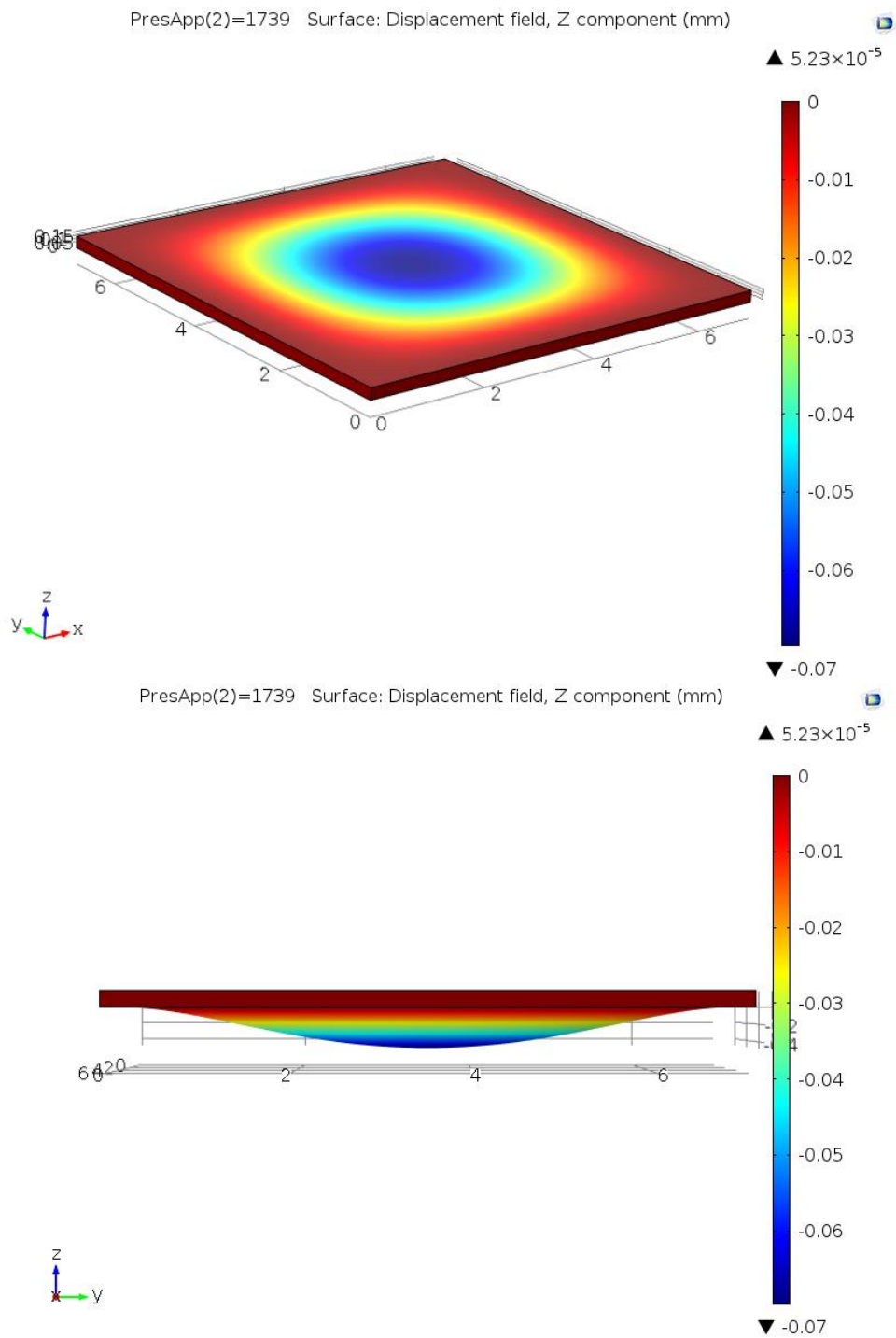
ตารางที่ ข. 5 ค่าการโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาดแผ่นที่ 4 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์ม
ที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ

แผ่นที่ 4				
มวล g ครั้งที่	0.1	0.2	0.3	0.4
1	2.17	3.68	5.42	6.3
2	2.24	3.46	5.38	6.25
3	2.03	3.6	5.33	6.73
ค่าการโค้งงอเฉลี่ย	2.146667	3.58	5.37667	6.42667
ค่าโมดูลัสของยัง	1.71E+08	2.05E+08	2.04E+08	2.28E+08

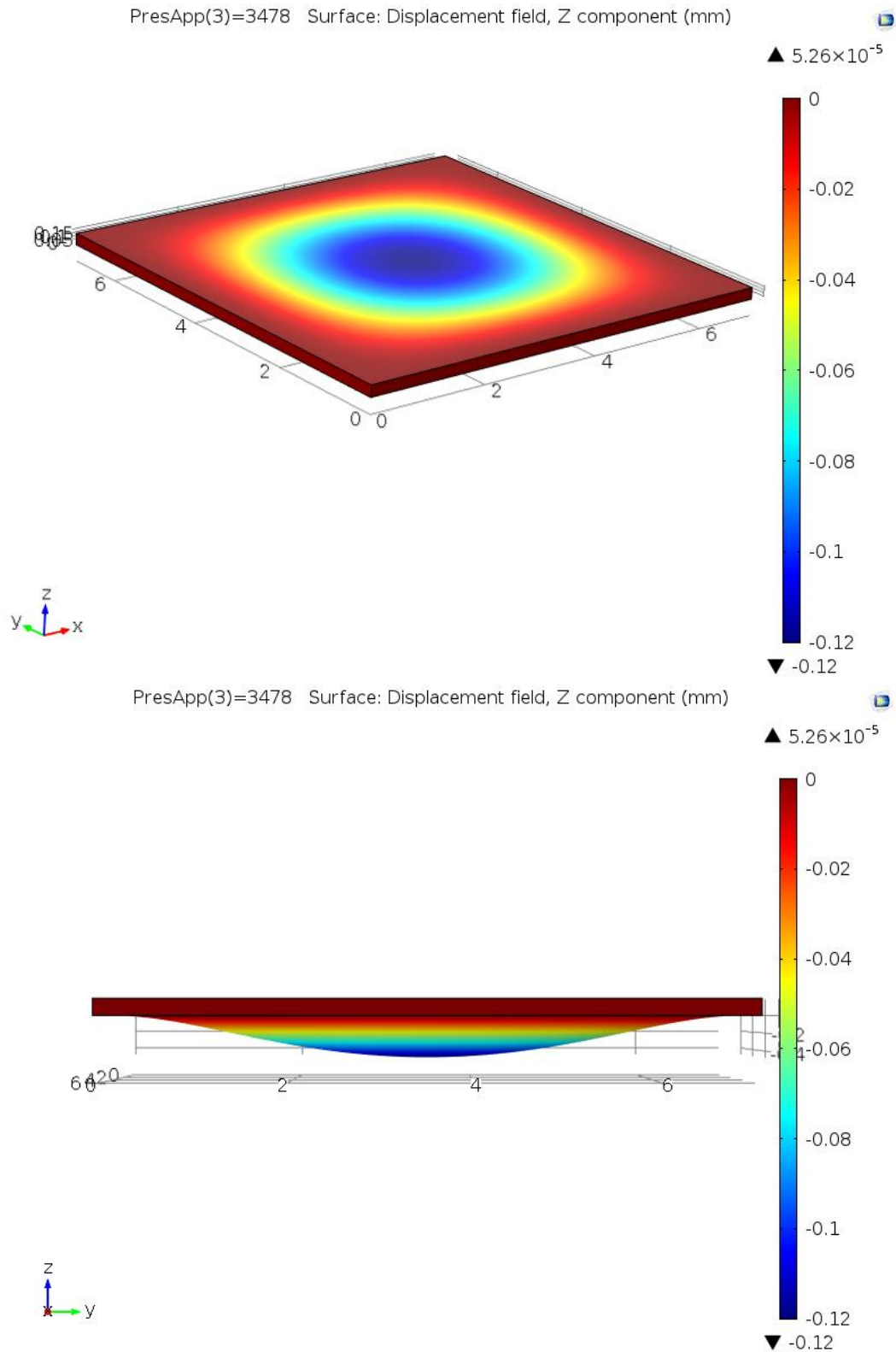
ตารางที่ ข. 6 ค่าการโค้งงอและค่าโมดูลัสของยังของคานกระดาดแผ่นที่ 5 ที่ถูกเคลือบด้วยพาราฟิล์ม
ที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักโดยใช้มวลค่าต่างๆ

แผ่นที่ 5				
มวล g ครั้งที่	0.1	0.2	0.3	0.4
1	2.38	3.78	5.1	7.64
2	2.24	4.4	5.83	8.15
3	1.91	3.16	5.57	7.63
ค่าการโค้งงอเฉลี่ย	2.176667	3.78	5.5	7.80667
ค่าโมดูลัสของยัง	1.68E+08	1.94E+08	2.00E+08	1.88E+08

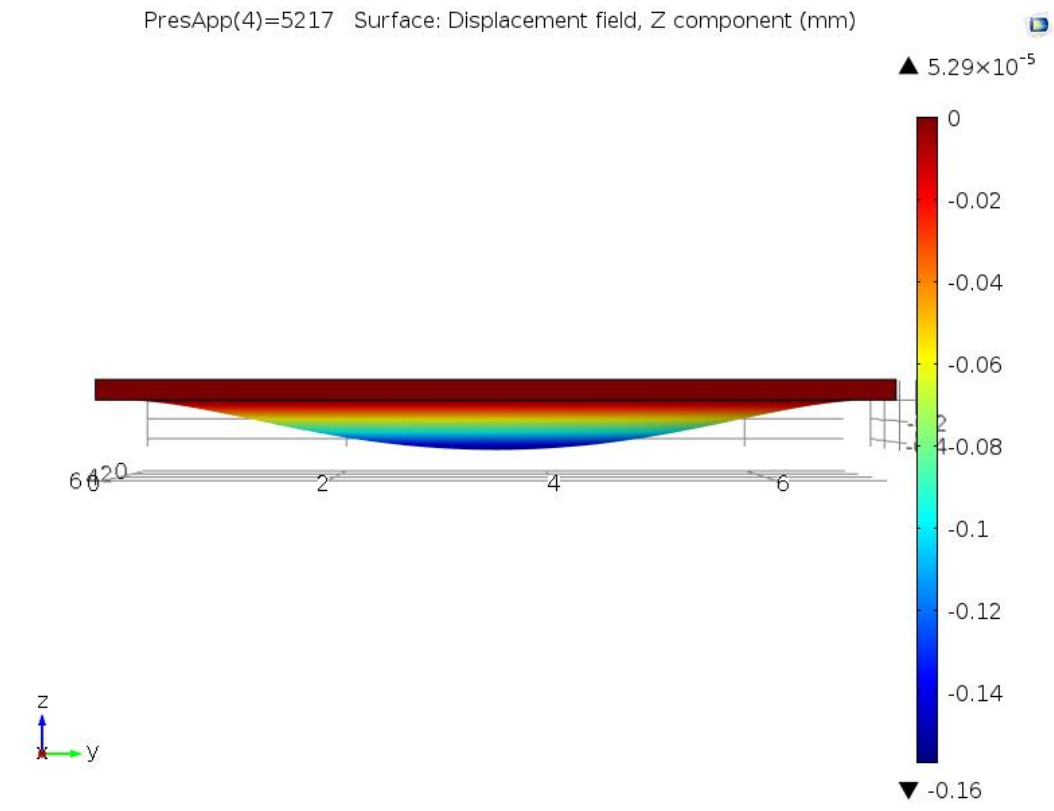
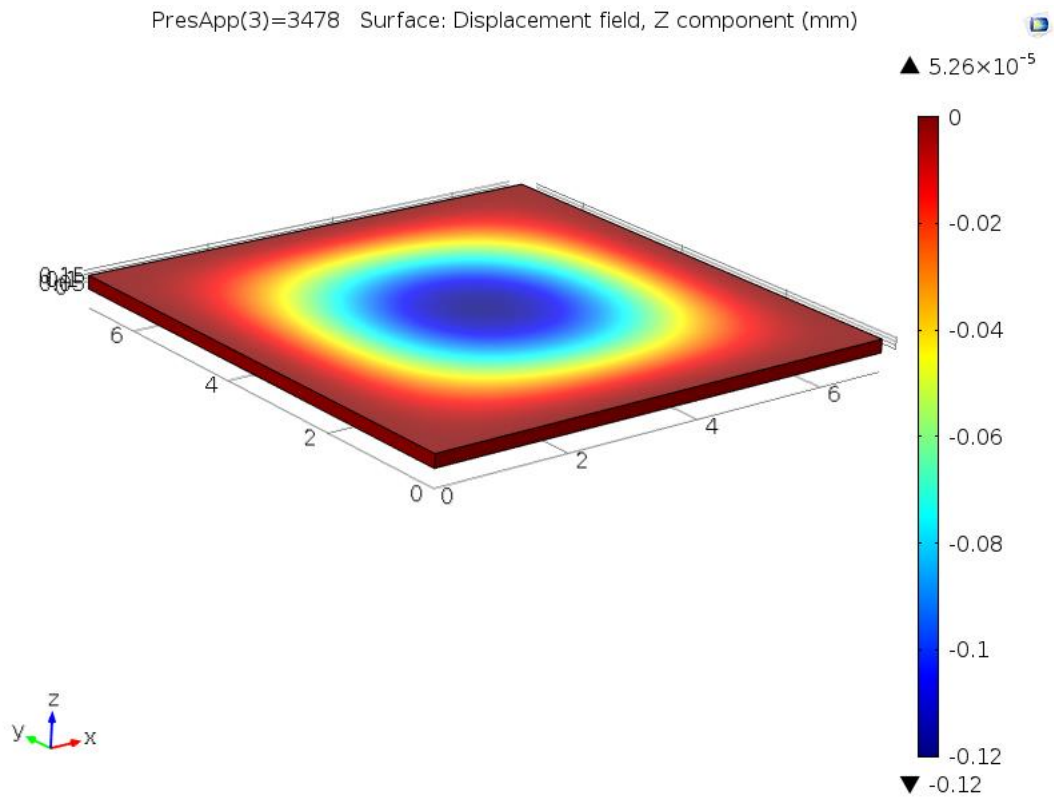
ภาคผนวก ค. รูปภาพจากการจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL



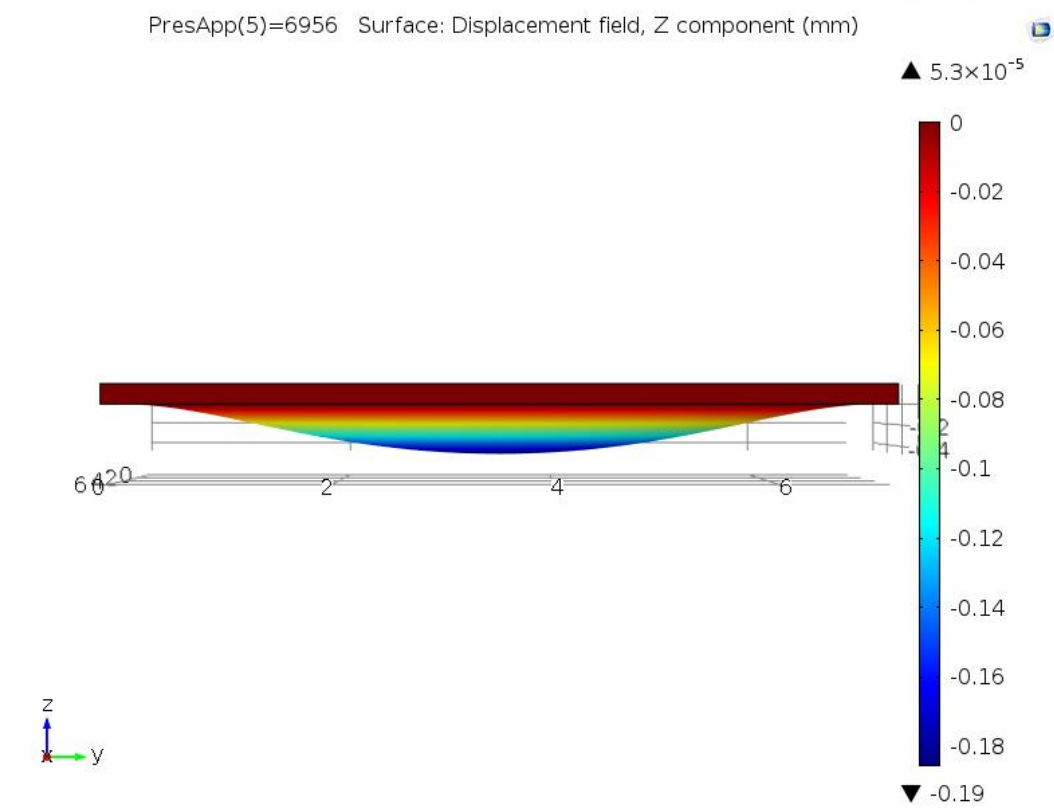
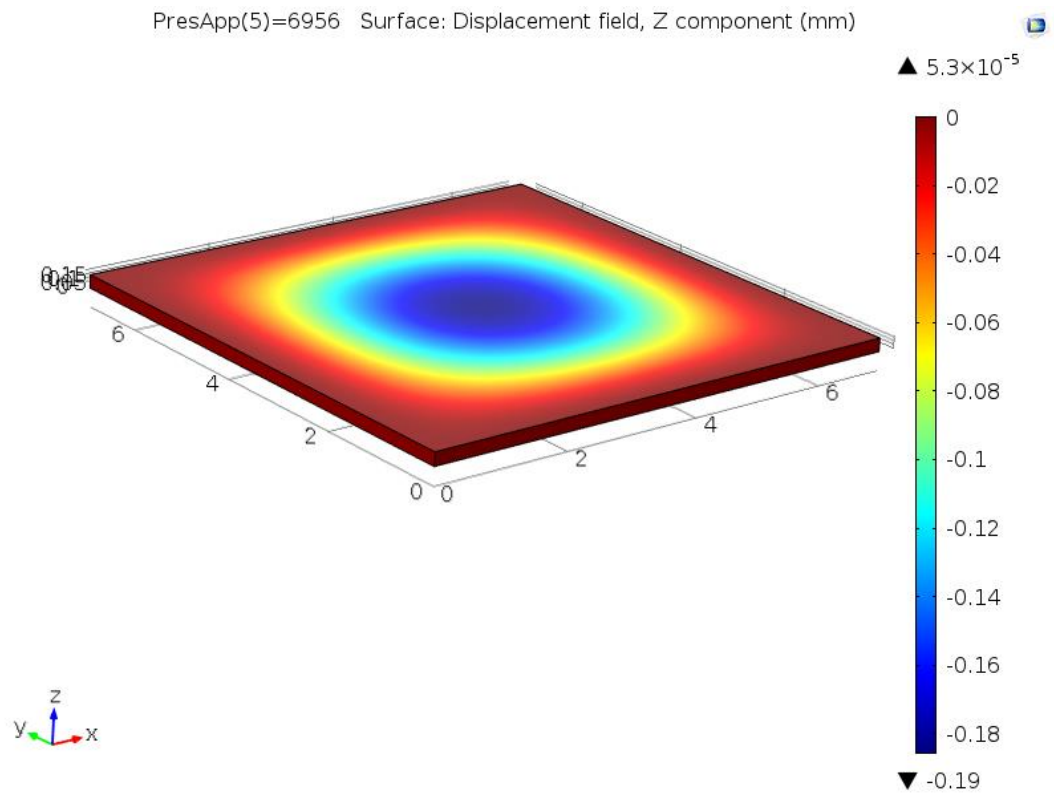
รูปที่ ค. 1 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1 กิโลกรัม (1.739 kPa)



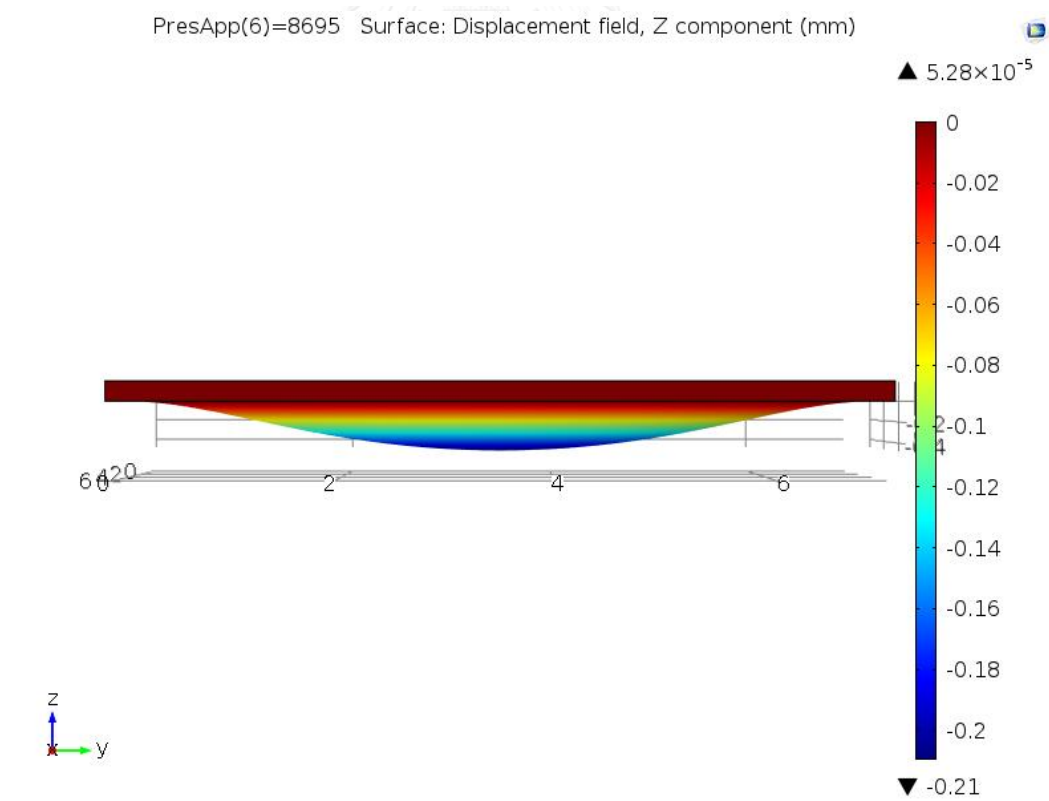
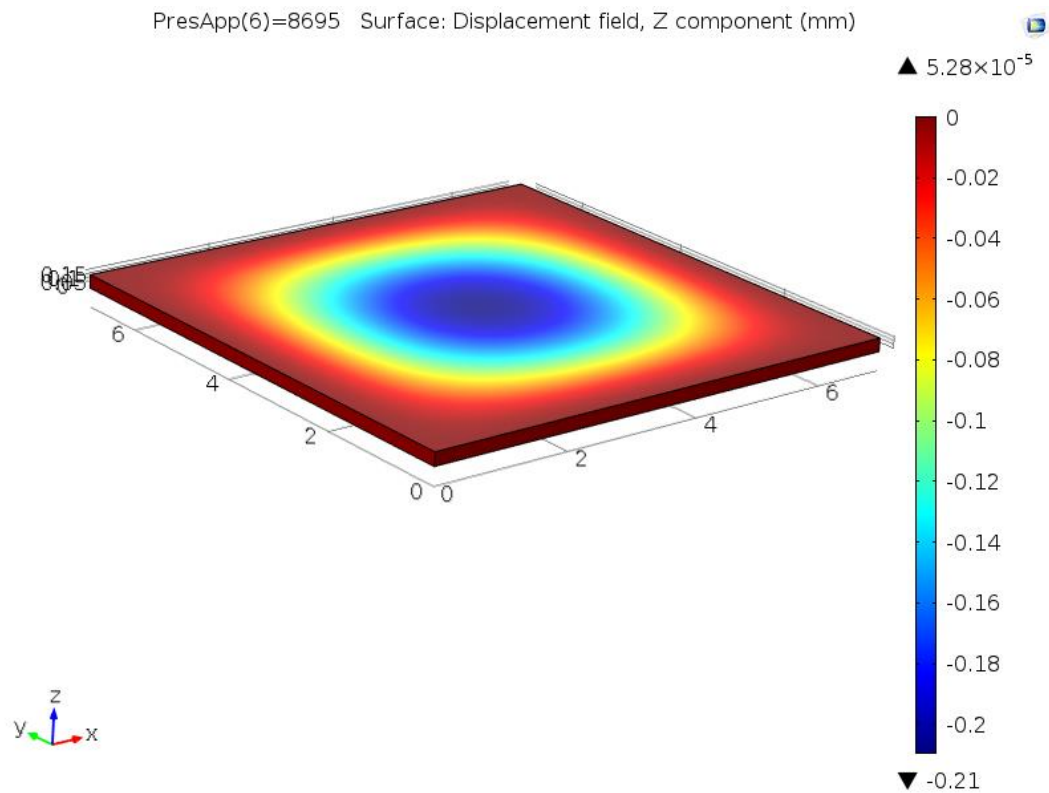
รูปที่ ค. 2 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.2 กิโลกรัม (3.478 kPa)



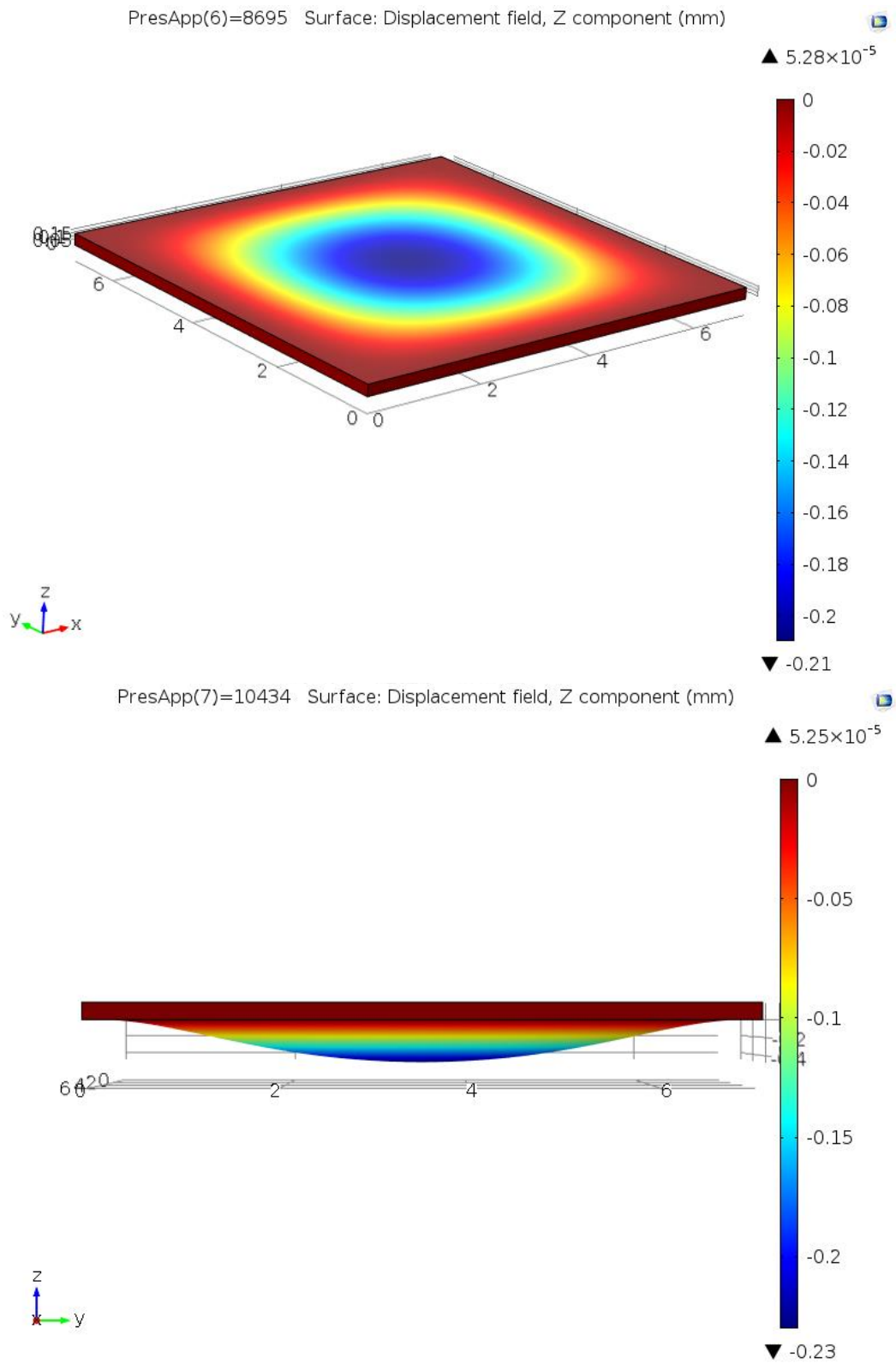
รูปที่ ค. 3 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.3 กิโลกรัม (5.217 kPa)



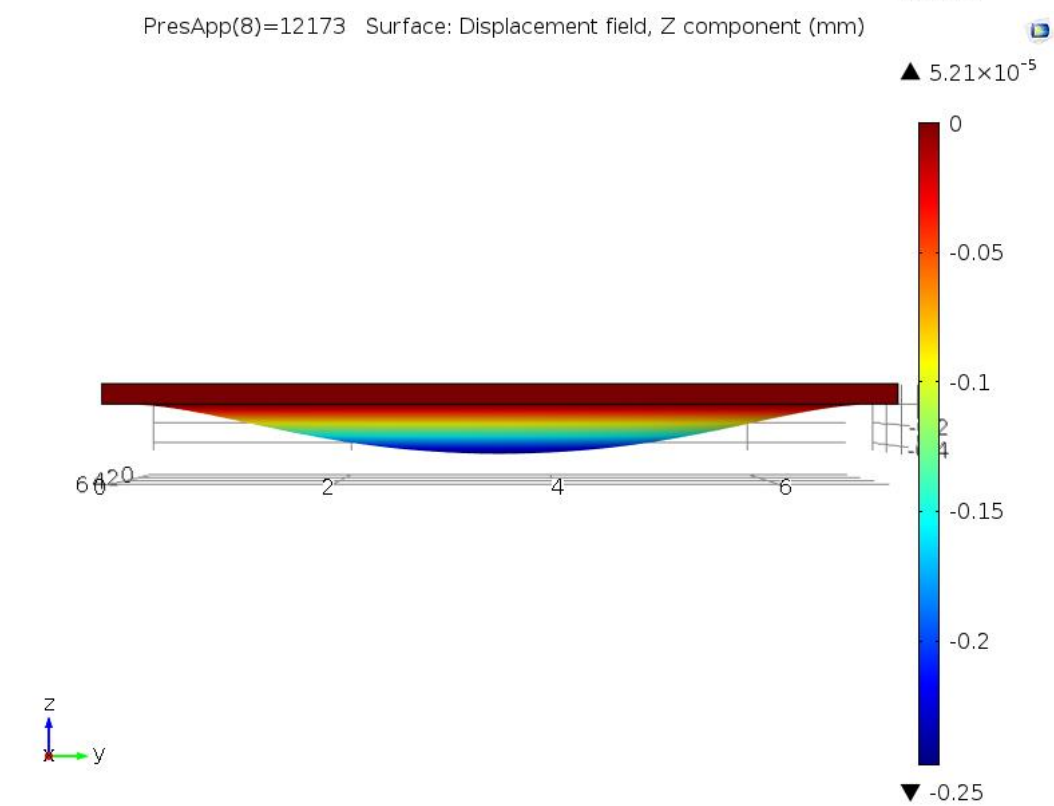
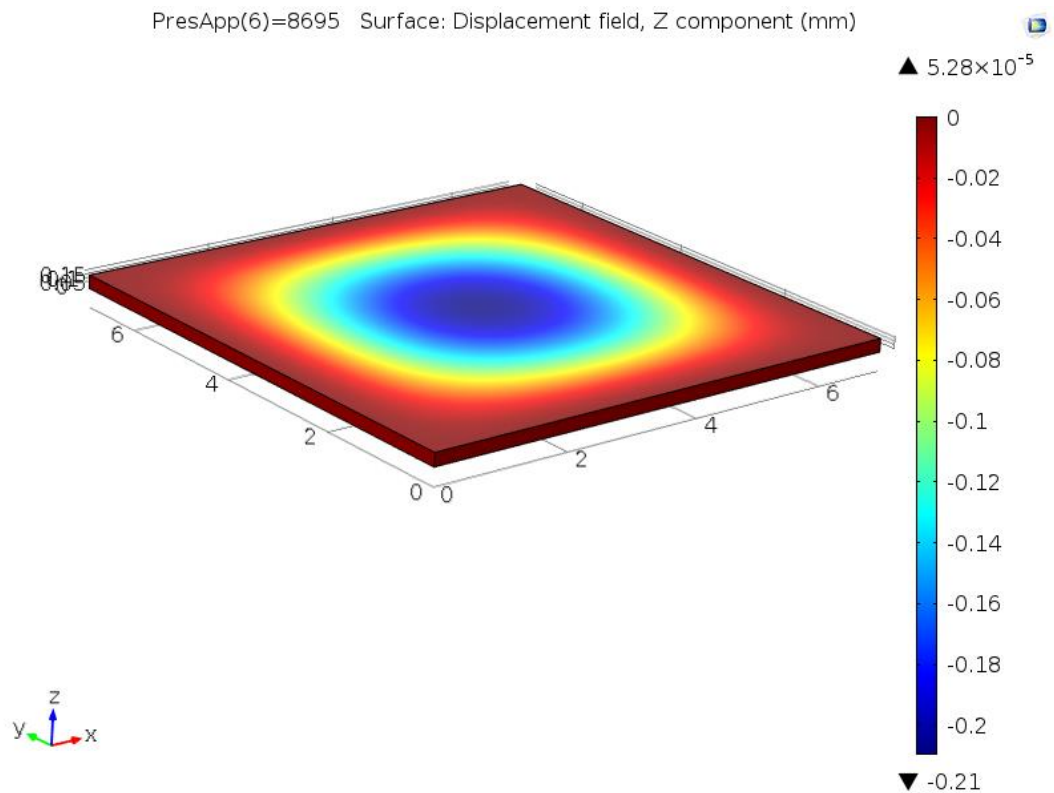
รูปที่ ค. 4 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.4 กิโลกรัม (6.956 kPa)



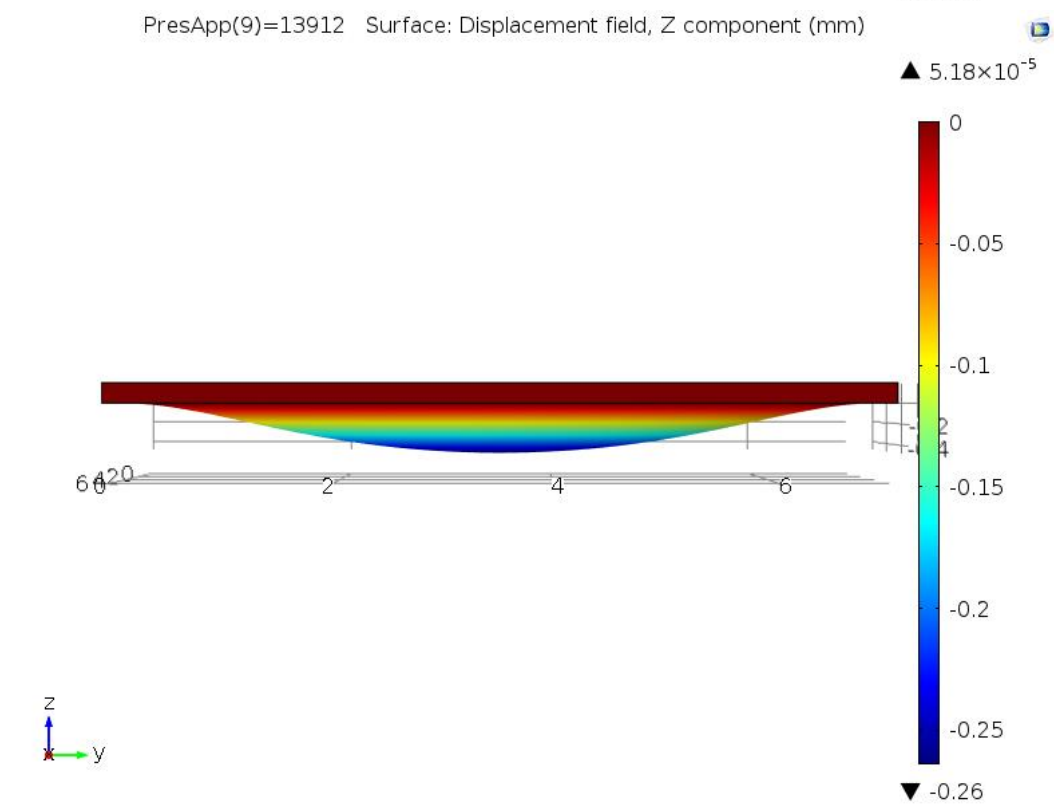
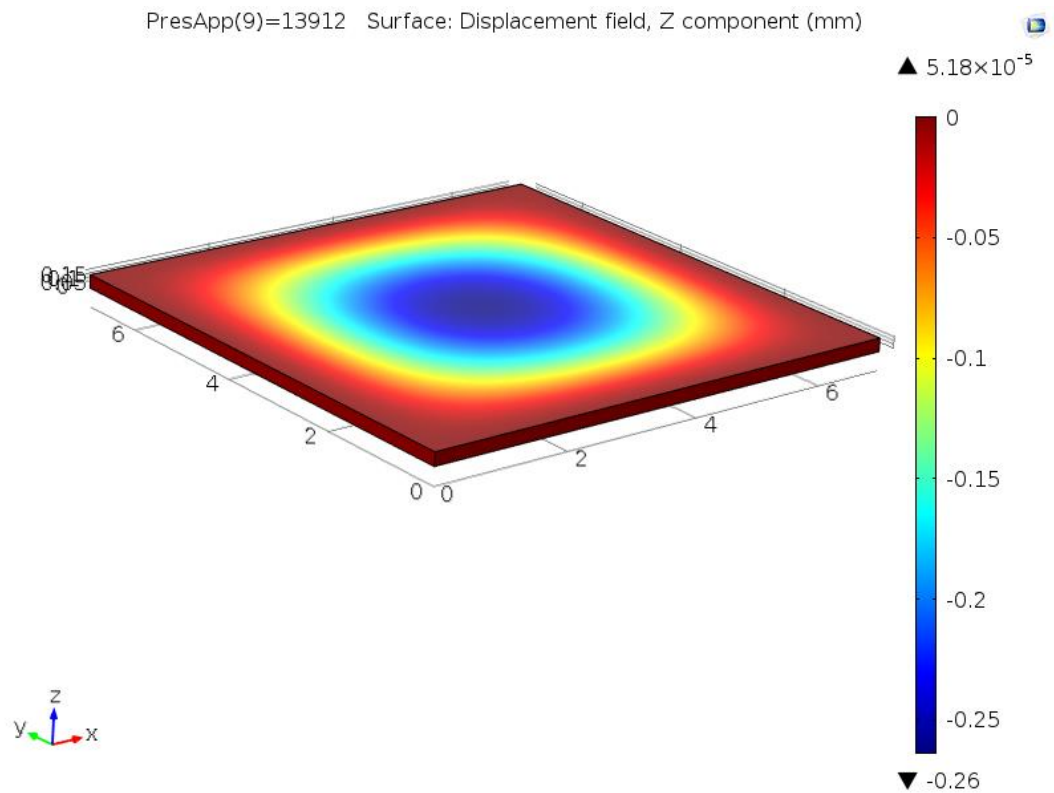
รูปที่ ค. 5 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.5 กิโลกรัม (8.695 kPa)



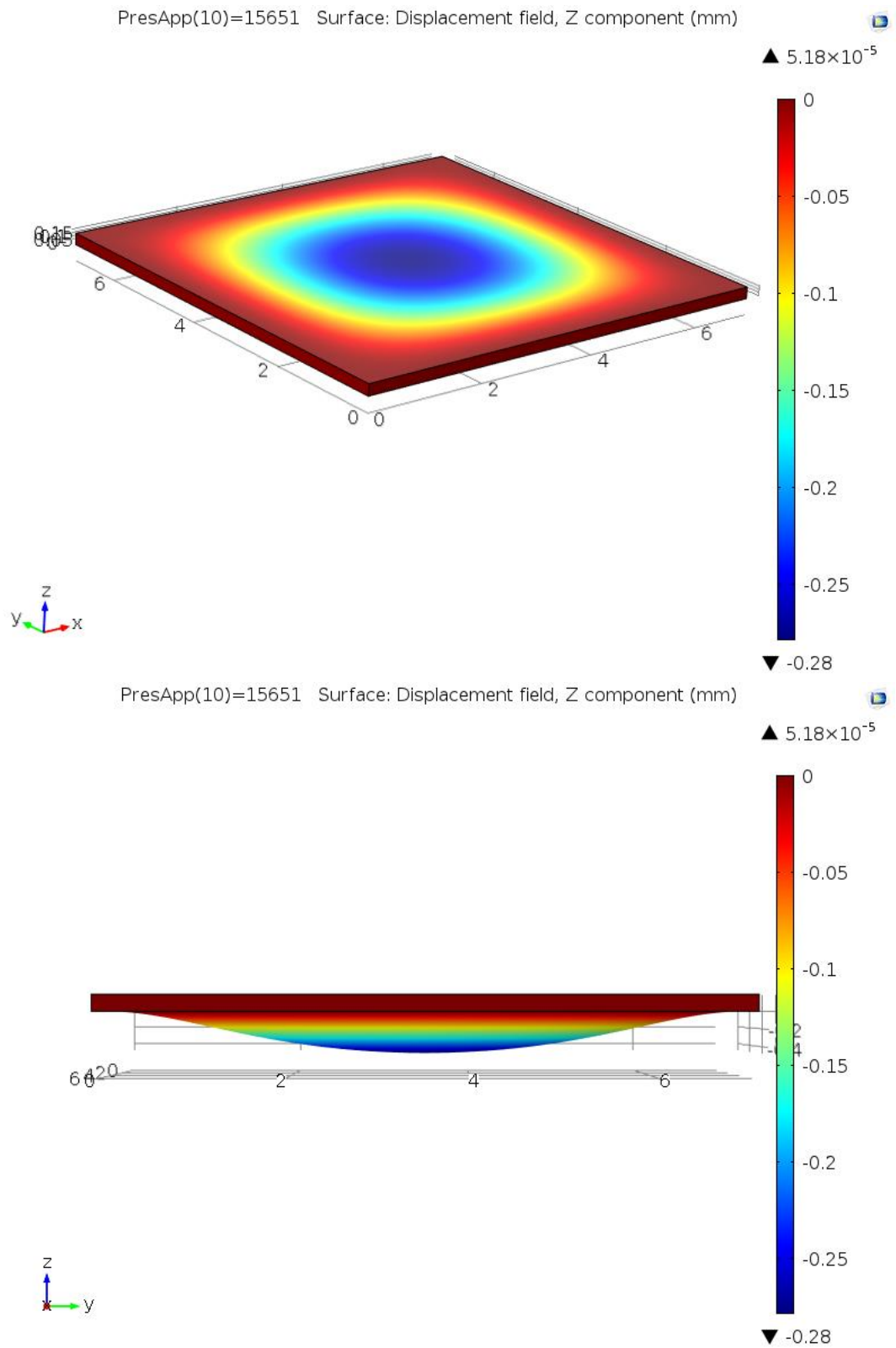
รูปที่ ค. 6 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.6 กิโลกรัม (10.434 kPa)



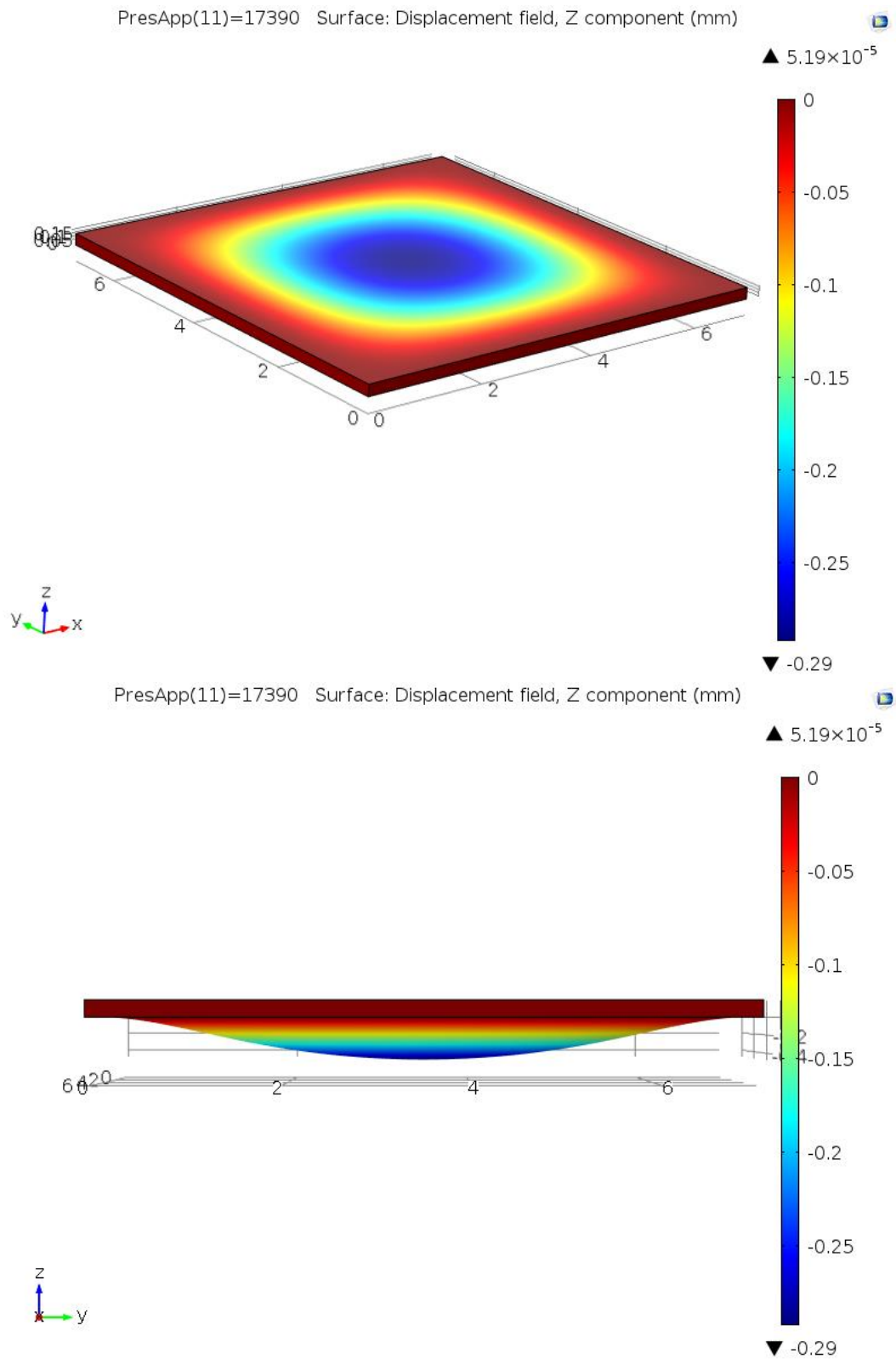
รูปที่ ค. 7 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.7 กิโลกรัม (12.173 kPa)



รูปที่ ค. 8 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.8 กิโลกรัม (13.912 kPa)



รูปที่ ค. 9 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.9 กิโลกรัม (15.651 kPa)



รูปที่ ค. 10 การจำลองเซนเซอร์วัดความดันด้วยโปรแกรม COMSOL เมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 1.0 กิโลกรัม (17.39 kPa)

ภาคผนวก ง. ตารางบันทึกค่าระยะการโก่งตัวของกระดาศ

ตารางที่ ง. 1 บันทึกค่าระยะการโก่งตัวของกระดาศที่ได้รับความดันจากการถ่วงมวลที่ 0.1-1.0 กิโลกรัม 5 ครั้ง

Deflection (mm)					
mass(kg)	1 st experiment	2 nd experiment	3 th experiment	4 th experiment	5 th experiment
0.1	0.02	0.04	0.08	0.09	0.1
0.2	0.06	0.07	0.12	0.15	0.17
0.3	0.08	0.11	0.17	0.21	0.25
0.4	0.11	0.13	0.19	0.25	0.31
0.5	0.15	0.18	0.22	0.29	0.37
0.6	0.19	0.23	0.27	0.32	0.4
0.7	0.24	0.28	0.33	0.36	0.42
0.8	0.31	0.33	0.38	0.41	0.45
0.9	0.37	0.39	0.41	0.44	0.48
1	0.39	0.41	0.44	0.48	0.5

ภาคผนวก จ. ตารางบันทึกค่าความต้านทานของวงจรมือให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล

ตารางที่ จ. 1 ค่าความต้านทานของวงจรมือที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรมือ 1 ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม

วงจรมือ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0.1 kg	1210	1206	1202	1182	1161	1192.2
0.2 kg	1016	1002	981	976	968	988.6
0.3 kg	952	947	903	887	857	909.2
0.4 kg	877	849	826	809	804	833
0.5 kg	849	846	805	791	769	812
0.6 kg	846	826	764	764	739	787.8
0.7 kg	796	785	749	738	721	757.8
0.8 kg	785	778	732	722	717	746.8
0.9 kg	778	737	707	697	695	722.8
1.0 kg	717	695	686	683	676	691.4

ตารางที่ จ. 2 ค่าความต้านทานของวงจรถ่ายที่เปลี่ยนแปลงไปของวงจรถ่ายที่ 2 ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม

วงจรถ่ายที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0.1 kg	920	907	894	882	871	894.8
0.2 kg	893	897	884	876	873	884.6
0.3 kg	840	845	826	827	825	832.6
0.4 kg	790	802	783	770	758	780.6
0.5 kg	735	741	736	733	727	734.4
0.6 kg	711	712	704	701	696	704.8
0.7 kg	673	679	673	671	660	671.2
0.8 kg	663	662	655	652	647	655.8
0.9 kg	655	656	647	638	635	646.2
1.0 kg	642	634	625	623	620	628.8



ภาคผนวก ฉ. ตารางบันทึกค่าแรงดันขาเข้าและขาออกของวงจร

ตารางที่ ฉ. 1 แรงดันขาออกของวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม บนชิ้นงานที่ 1

mass	Vo1	Vs1	Vo2	Vs2	Vo3	Vs3	Vo4	Vs4	Vo5	Vs5
kg	mV	V	mV	V	mV	V	mV	V	mV	V
0	0	10.004	0	10.004	0	10.004	0	10.004	0	10.004
0.1	2.37	10.004	2.67	10.004	2.82	10.004	3.23	10.004	3.48	10.003
0.2	4.69	10.004	4.84	10.004	5.13	10.004	5.41	10.004	5.84	10.003
0.3	7.21	10.004	7.32	10.004	7.85	10.004	8.1	10.004	8.27	10.003
0.4	9.42	10.004	9.54	10.004	10.11	10.004	10.33	10.004	10.64	10.003
0.5	11.78	10.004	12.14	10.004	12.49	10.004	12.83	10.004	13.25	10.003
0.6	13.04	10.004	13.31	10.005	13.72	10.004	14.14	10.004	14.47	10.004
0.7	14.17	10.004	14.15	10.005	14.56	10.004	15.12	10.004	15.53	10.004
0.8	14.83	10.004	15.09	10.005	15.62	10.004	15.97	10.003	16.34	10.004
0.9	15.08	10.004	15.27	10.005	15.42	10.004	16.31	10.003	16.42	10.004
1	15.48	10.004	15.89	10.005	16.24	10.004	16.53	10.003	16.57	10.004

ตารางที่ ฉ. 2 แรงดันขาออกของวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม บนชิ้นงานที่ 2

mass	Vo1	Vs1	Vo2	Vs2	Vo3	Vs3	Vo4	Vs4	Vo5	Vs5
kg	mV	V	mV	V	mV	V	mV	V	mV	V
0	0	10.004	0	10.004	0	10.004	0	10.004	0	10.004
0.1	2.86	10.004	3.05	10.004	3.34	10.005	3.58	10.004	3.87	10.004
0.2	4.81	10.004	5.08	10.004	5.33	10.005	5.52	10.004	5.84	10.004
0.3	7.83	10.004	7.96	10.004	8.24	10.005	8.45	10.004	8.9	10.004
0.4	10.01	10.004	10.15	10.004	10.58	10.004	10.69	10.004	11.06	10.004
0.5	12.87	10.003	12.99	10.004	13.12	10.004	13.33	10.004	13.51	10.004
0.6	13.46	10.003	13.75	10.004	14.08	10.004	14.22	10.004	14.33	10.004
0.7	14.6	10.003	14.74	10.004	14.97	10.004	15.31	10.004	15.74	10.004
0.8	15.12	10.003	15.43	10.004	15.89	10.004	16.24	10.004	16.75	10.004
0.9	15.68	10.003	15.86	10.004	16.09	10.004	16.23	10.004	16.41	10.004
1	16.03	10.003	16.24	10.004	16.48	10.004	16.72	10.004	17.1	10.004

ตารางที่ ฉ. 3 แรงดันขาออกของวงจรที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษเมื่อให้ความดันแก่ระบบด้วยการถ่วงมวล 0.1-1.0 กรัม บนชิ้นงานที่ 3

mass	Vo1	Vs1	Vo2	Vs2	Vo3	Vs3	Vo4	Vs4	Vo5	Vs5
kg	mV	V	mV	V	mV	V	mV	V	mV	V
0	0	10.003	0	10.004	0	10.004	0	10.004	0	10.004
0.1	2.52	10.004	2.61	10.004	2.87	10.004	3.04	10.004	3.25	10.004
0.2	5.04	10.004	5.32	10.004	5.61	10.005	5.92	10.004	6.27	10.004
0.3	7.68	10.004	7.85	10.004	8.02	10.005	8.26	10.004	8.67	10.004
0.4	10.43	10.004	10.69	10.004	10.84	10.005	11.07	10.004	11.38	10.004
0.5	12.06	10.004	12.38	10.004	12.62	10.005	12.81	10.004	13.07	10.004
0.6	13.84	10.004	14.03	10.004	14.29	10.005	14.61	10.004	14.83	10.004
0.7	14.79	10.004	14.86	10.004	15.17	10.005	15.43	10.004	15.9	10.004
0.8	16.06	10.004	16.23	10.004	16.41	10.004	16.99	10.004	17.34	10.004
0.9	16.73	10.004	17.17	10.004	17.38	10.004	17.53	10.004	17.92	10.004
1	17.86	10.004	18.12	10.004	18.27	10.004	18.45	10.004	18.84	10.004



ภาคผนวก ข. ตารางค่า uncertainty ของเซนเซอร์วัดความดันประเภทกระดาษ

ตารางที่ ข. 1 ตัวอย่างการหาค่า uncertainty ที่ความดัน 17.4 kPa

Error Source	Output Voltage (Vo)		Source Voltage (Vs)	
	% (reading)	mV	% (reading)	V
Instrument Accuracy	0.02	0.00340	0.03	0.003
Measurement				
Mean		16.988		10.004
Standard Deviation		1.0164		0.000261
Sample size		15		15
Mean V ratio		1.6981 mV/V		
Mean precision, P		0.262433		6.74419E-05
Sensitivity, q		0.099961		0.169746
Bias Propagation, B		0.000612		
Precision Propagation, P		8.92E-04		
Density degree of freedom, u		15		
Student t statistic (15,.05)		2.1315		
Total Uncertainty at 95%	3.293	0.055919043		

ตารางที่ ข. 2 ตารางค่า uncertainty ทุกช่วงความดันของเครื่องมือ

pressure (kPa)	mass (kg)	meanVo (mV)	meanVs (V)	Accuracy Voltmeter	
				Bo	Bs
0	0	0	10.0039	0.00E+00	3.00E-03
1.739	0.1	3.037	10.004	6.07E-04	3.00E-03
3.478	0.2	5.376	10.0041	1.08E-03	3.00E-03
5.217	0.3	8.040	10.0041	1.61E-03	3.00E-03
6.956	0.4	10.462	10.004	2.09E-03	3.00E-03
8.695	0.5	12.750	10.0039	2.55E-03	3.00E-03
10.434	0.6	14.008	10.0041	2.80E-03	3.00E-03
12.173	0.7	15.002	10.0041	3.00E-03	3.00E-03
13.912	0.8	16.020	10.0039	3.20E-03	3.00E-03
15.651	0.9	16.366	10.0039	3.27E-03	3.00E-03
17.39	1	16.988	10.0039	3.40E-03	3.00E-03

SDVo	SDVs	Mean Precision		Sensitivity		Precision Propagation
		Po	Ps	θ_o	θ_s	Pp
0	1.89E-04	0	4.86864E-05	0.09996	0	0.00000
0.4078	1.89E-04	0.105	4.86864E-05	0.09996	0.03034	0.01053
0.4432	3.35E-16	0.114	8.64898E-17	0.09996	0.05372	0.01144
0.4404	3.35E-16	0.114	8.64898E-17	0.09996	0.08034	0.01137
0.5318	1.89E-04	0.137	4.86864E-05	0.09996	0.10454	0.01373
0.4828	3.35E-16	0.125	8.64865E-17	0.09996	0.1274	0.01246
0.4764	3.35E-16	0.123	8.64832E-17	0.09996	0.13996	0.01230
0.5073	3.35E-16	0.131	8.64832E-17	0.09996	0.14990	0.01309
0.6920	2.61E-04	0.179	6.74419E-05	0.09996	0.16008	0.01786
0.8228	2.61E-04	0.212	6.74419E-05	0.09996	0.16353	0.02124
1.0164	2.61E-04	0.262	6.74419E-05	0.09996	0.16974	0.02623

Bias Propagation	dof	t	mean V ratio	Total Uncertainty	
Bp				U total	%
0			0	0	
0.00011	15	2.1315	0.30361	0.02244	7.390
0.00019	15	2.1315	0.53745	0.02438	4.537
0.00029	15	2.1315	0.80374	0.02423	3.014
0.00038	15	2.1315	1.04585	0.02926	2.797
0.00046	15	2.1315	1.27450	0.02656	2.084
0.00050	15	2.1315	1.40023	0.02622	1.872
0.00054	15	2.1315	1.49966	0.02791	1.861
0.00058	15	2.1315	1.60144	0.03807	2.377
0.00059	15	2.1315	1.63602	0.04527	2.767
0.00061	15	2.1315	1.69813	0.05592	3.292

โดยการคำนวณ Uncertainty คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{mean V ratio} = \frac{V_{\text{output}}}{V_{\text{source}}}$$

$$\text{mean precision} = \frac{SD}{\sqrt{n}}$$

$$V_{\text{output Sensitivity}} = \theta_o = \frac{1}{V_s}$$

$$V_{\text{source Sensitivity}} = \theta_s = \frac{V_o}{V_s^2}$$

$$\text{Bias propagation} = B = \sqrt{(\theta_o B_o)^2 + (\theta_s B_s)^2}$$

$$\text{Precision propagation} = P = \sqrt{(\theta_o P_o)^2 + (\theta_s P_s)^2}$$

$$\text{Mean V ratio degree of freedom} = u = \frac{(\sum((\theta_{oi} P_{oi})^2 + (\theta_{si} P_{si})^2))^2}{\sum \frac{((\theta_{oi} P_{oi})^2 + (\theta_{si} P_{si})^2)}{n}}$$

$$\text{Total uncertainty at 95\%} = U_{\text{total}} = \sqrt{B^2 + (t_{u,.05}P)^2}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเนตรชนกจิรานุสรณ์กุล เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2535 สถานที่เกิด จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี การศึกษา 2557

