

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีในการพัฒนา
ตัวตรวจรู้เชิงแสงสำหรับปริมาณทางชีวเวชศาสตร์

นางสาวสมปอง สุขประสงค์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**APPLICATIONS OF SYNCHROTRON X-RAY
LITHOGRAPHY TECHNIQUE IN DEVELOPMENT
OF BIOMEDICAL OPTICAL SENSORS**

Sompong Sukprasong



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2013

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโกราฟีในการพัฒนา
ตัวตรวจรู้เชิงแสงสำหรับปริมาณทางชีวเวชศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ)
กรรมการ

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)
กรรมการ

(ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สมปอง สุขประสงค์ : การประยุกต์ใช้งานเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี
ในการพัฒนาตัวตรวจรู้เชิงแสงสำหรับปริมาณทางชีวเวชศาสตร์ (APPLICATIONS OF
SYNCHROTRON X-RAY LITHOGRAPHY TECHNIQUE IN DEVELOPMENT OF
BIOMEDICAL OPTICAL SENSORS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง,
148 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้
ฟองอากาศโดยใช้เทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี ตัวตรวจรู้ความชื้นใช้สารไวแสงชนิด
ลบ (SU-8) เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งความเข้มแสงที่ส่งผ่านจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่แทรกตัวอยู่
ภายในเนื้อของ SU-8 โครงสร้างของ SU-8 ได้ถูกออกแบบเป็นแบบซี่ (Comb-like) และใช้
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผลตอบแทนของแสงในย่านของความยาวคลื่นแสงที่
ต้องการ ตัวตรวจรู้ความชื้นใช้แหล่งกำเนิดแสงส่งแสงผ่านโครงสร้างของวัสดุไวความชื้นและมี
อุปกรณ์รับแสงเพื่อนำแสงเข้าสู่วงจรที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ การทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้
ความชื้นใช้การเปรียบเทียบความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน พบว่าตัวตรวจรู้ที่มีขนาดซี่
กว้าง $60\text{ }\mu\text{m}$ มีความไว $17,038\text{ ppm}/\% \text{RH}$ เวลาในการดูดความชื้น 2.7 วินาที เวลาในการคาย
ความชื้น 6.5 วินาที ค่าความผิดพลาดสูงสุด $\pm 5\%$ สีสเตอร์ริซิตี 4.10%F.S. สำหรับตัวตรวจรู้
ฟองอากาศนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าในทางการแพทย์ระบบการให้สารน้ำเข้าสู่หลอดเลือด หากมี
ฟองอากาศอยู่ภายในอาจจะเป็นอันตรายต่อผู้ป่วย ตัวตรวจรู้ฟองอากาศจึงมีความจำเป็นในระบบ
ดังกล่าว ตัวตรวจรู้ที่ถูกออกแบบเป็นช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างจากซิลิโคน (PDMS) โดยใช้แม่พิมพ์
โลหะเพื่อการผลิตซ้ำ จากนั้นทำการเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างช่องทางเดินจุลภาค PDMS กับกระจก ซึ่ง
มีการรับและส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ปลายทั้งสองด้านที่วางอยู่ระหว่างช่องทางเดิน
จุลภาค การทดสอบตัวตรวจรู้ใช้น้ำและฟองอากาศไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคแล้วพบว่าตัว
ตรวจรู้ที่มีขนาดช่องทางเดินจุลภาคกว้าง $65\text{ }\mu\text{m}$ สามารถตรวจรู้ฟองอากาศขนาด $0.3\text{ }\mu\text{l}$ ที่อัตราการ
ไหลของของเหลว 0.1 ถึง $5.0\text{ }\mu\text{l/s}$ ค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรของฟองอากาศสูงสุด $\pm 5\%$

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2556

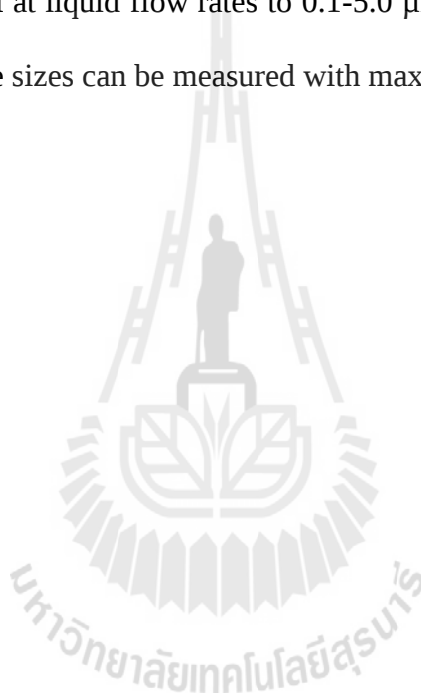
ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

SOMPONG SUKPRASONG : APPLICATIONS OF SYNCHROTRON
X-RAY LITHOGRAPHY TECHNIQUE IN DEVELOPMENT OF
BIOMEDICAL OPTICAL SENSORS. THESIS ADVISOR :
NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 148 PP.

HUMIDITY SENSOR/BUBBLE DETECTOR/X-RAY LITHOGRAPHY

This thesis presents design and fabrication of humidity sensor and bubble detector using synchrotron x-ray lithography technique. For humidity sensors, su-8 photoresist was used as moisture sensitive material in which the intensity of transmitted light varies with concentration of water inside. A comb-like su-8 microstructure was designed and a mathematical model was used to predict its response to transmitted light at a selected wave length. The sensing comb-like microstructures were fabricated using x-ray lithography techniques. The resulting su-8 modules were combined with a light source and photodetector as well as related computer interfacing circuits. The humidity sensors were calibrated against saturated salt solution standards. Their sensitivity, response time and temperature dependency were characterized. Experiments showed that a sensor with 60 μm -wide su-8 combs has sensitivity of 17,038 ppm/%RH adsorption time of 2.7 seconds, desorption time of 6.5 seconds, maximum error of $\pm 5\%$ and full-scale hysteresis error of 4.10%. For the bubble detector, it has been known that the presence of air bubbles in fluid-transporting micro passages might be harmful to patients in cases where microfluidic devices were clinically used. Air-bubble sensors are therefore needed in such system. This optical sensor was designed as a PDMS microchannel that allows insertion of

light transmitting and receiving fiber optics on both sides of the fluid passage. A metal mold was fabricated using x-ray lithography technique so that it can be used to produce multiples of such PDMS microchannel chips. A duplicated PDMS chip was bonded to glass substrate, combined with fiber optics and light transmitting/receiving circuits. The module was tested by feeding DI water into the detector along with some air bubbles. Experiments showed that the sensor with 65 μm -wide microchannel can detect bubble of 0.3 μl at liquid flow rates to 0.1-5.0 $\mu\text{l/s}$. The presence of air bubbles as well as their volume sizes can be measured with maximum error of $\pm 5\%$.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

Co- Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ อีกทั้งสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการประพันธ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและการดำเนินงานวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาสละเวลาในการเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง

ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ นักวิจัยประจำสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และการให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรค จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สมปอง สุขประสงค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	2
2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปรัชญ์วรรณกรรมของตัวตรวจรู้ความชื้น	4
2.1.1 ประเภทของตัวตรวจรู้ความชื้นตามหลักการตรวจรู้	5
2.1.2 ประเภทของตัวตรวจรู้ความชื้นตามชนิดของวัสดุไวความชื้น	10
2.1.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน	11
2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ	20
2.2.1 ประเภทของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ.....	20
2.2.2 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน.....	22
2.3 สรุป.....	29
3 กระบวนการพื้นฐานของระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	กระบวนการเคลือบโลหะ (Metallization).....	30
3.2	กระบวนการเคลือบชั้นฟิล์มสารไวแสง(Coating-photoresist)	32
3.3	กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process).....	35
3.4	กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating).....	36
3.5	กระบวนการสกัดเนื้อวัสดุ (Etching).....	37
3.6	การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับซิลิโคน PDMS.....	37
3.6.1	การเชื่อมต่อพื้นผิวแบบเปียก.....	37
3.6.2	การเชื่อมต่อพื้นผิวแบบแห้ง.....	38
3.7	กระบวนการสร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์	39
3.8	สรุป.....	41
4	ทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง	42
4.1	ทฤษฎีการคำนวณของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง	42
4.1.1	ความชื้น	42
4.1.2	การแพร่และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวตรวจรู้ความชื้น	44
4.1.3	การดูดกลืนแสง (Absorption)	48
4.1.4	ผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น	50
4.2	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น.....	53
4.2.1	การออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้น	53
4.2.2	การสร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ความชื้น	55
4.2.3	การสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้น	57
4.3	สรุป.....	59
5	การทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS.....	60
5.1	ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว.....	63
5.1.1	การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน	63
5.1.2	การวัดผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว	66
5.2	การหาสมการเพื่อแทนชุดข้อมูล.....	81

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3	การวัดผลตอบแทนทางเวลา.....	84
5.3.1	ผลตอบแทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบขั้นบันได.....	85
5.3.2	ผลตอบแทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบหลายขั้น.....	87
5.4	การทดสอบวัดความชื้นด้วยตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS.....	89
5.5	สรุป.....	91
6	ทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ	93
6.1	ทฤษฎีการคำนวณของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ.....	93
6.1.1	การหักเหของแสง	93
6.1.2	ความเข้มแสง	95
6.1.3	การส่งสัญญาณแสงผ่านวัสดุ	97
6.1.4	อัตราการไหลของของไหล	98
6.2	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ.....	99
6.2.1	การออกแบบลวดลายของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ.....	99
6.2.2	การสร้างหน้ากาคูดซับรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ	100
6.2.3	การสร้างแม่พิมพ์โลหะนิกเกิล	102
6.2.4	การผลิตชิ้นช่องทางเดินของของเหลวโดยใช้ซิลิโคน PDMS	106
6.2.5	การสร้างทางเข้าออกของของเหลว.....	108
6.2.6	การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับซิลิโคน PDMS.....	111
6.3	สรุป	112
7	การทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD.....	114
7.1	การวัดความเข้มแสง	117
7.1.1	ความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง	118
7.1.2	ความเข้มแสงหลังจากผ่านช่องทางเดินของของเหลว.....	118
7.2	การคำนวณอัตราการไหลของของเหลวใน ระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD.....	119
7.3	ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD	121

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.3.1	การทดสอบวงจรไฟฟ้าของระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD.....	121
7.3.2	การทดสอบวัดฟองอากาศของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD.....	122
7.3.3	การหาปริมาตรของฟองอากาศ	125
7.4	สรุป	127
8	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	128
8.1	บทสรุปงานวิจัย.....	128
8.2	ข้อเสนอแนะ.....	130
	รายการอ้างอิง	131
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ...	135
	ภาคผนวก ข. การประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS	137
	ภาคผนวก ค. ระบบป้องกันความชื้นในการวัดผลตอบสนองทางเวลา.....	140
	ภาคผนวก ง. โปรแกรมจำลองผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้น	143
	ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	146
	ประวัติผู้เขียน	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อดีและข้อด้อยของตัวตรวจรู้ความชื้นในแต่ละประเภท.....9
2.2	เปรียบเทียบผลตอบแทนของทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น 19
3.1	สารละลายที่ใช้ในการสกัดโลหะ 37
5.1	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 64
5.2	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับ Digital Output ที่อุณหภูมิ 30 °C..... 68
5.3	ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้เชิงแสงที่อุณหภูมิ 30 °C 71
5.4	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับ Digital Output ที่อุณหภูมิ 40 °C..... 72
5.5	ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้เชิงแสงที่อุณหภูมิ 40 °C 75
5.6	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับ Digital Output ที่อุณหภูมิ 50 °C..... 76
5.7	ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้เชิงแสงที่อุณหภูมิ 50 °C 79
5.8	ค่าความคลาดเคลื่อนของความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากชุดสมการเส้นโค้งกำลังสอง และความชื้นสัมพัทธ์จากการเปรียบเทียบกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน 83
5.9	ค่าความชื้นที่ป้อนให้กับตัวตรวจรู้ในการทดสอบผลตอบแทนแบบขั้นบันได 85
5.10	ผลตอบแทนของทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น SU-8..... 87
5.11	ค่าความชื้นที่ป้อนให้กับตัวตรวจรู้ในการทดสอบผลตอบแทนแบบหลายขั้น 88
6.1	ค่าดัชนีการหักเหแสงของตัวกลางชนิดต่าง ๆ 94
7.1	ค่าความเข้มแสงจากตำแหน่งการวัด 119
7.2	อัตราการไหลของชุดควบคุมอัตราการไหลและระบบตัวตรวจรู้ 120
7.3	เปรียบเทียบจำนวนฟองอากาศที่นับได้ที่อัตราการไหลคงที่ 125
7.4	ปริมาตรของฟองอากาศที่อัตราการไหล 0.10 $\mu\text{l/s}$ และ 0.50 $\mu\text{l/s}$ 126
7.5	ปริมาตรของฟองอากาศที่อัตราการไหล 1.00 $\mu\text{l/s}$ และ 5.00 $\mu\text{l/s}$ 127

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ไฮโดรมิเตอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล.....5
2.2	ไฮโดรมิเตอร์แบบวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง.....6
2.3	ไฮโดรมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง7
2.4	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Laville (2001)..... 12
2.5	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Arregui (2003)..... 13
2.6	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Tetelin (2003)..... 14
2.7	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Khijwania (2005) 15
2.8	ผลคล้ายตัวตรวจรู้ความชื้นแบบจีหรีของ Ketthanom (2006)..... 15
2.9	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Mapato (2007)..... 16
2.10	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Corres (2008)..... 17
2.11	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Viegas (2009)..... 18
2.12	ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Wang (2011)..... 18
2.13	เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบต่าง ๆ.....20
2.14	ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ Ultrasonic.....21
2.15	ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ IR22
2.16	ตัวตรวจรู้ของ Lyrouas (2002).....23
2.17	ตัวตรวจรู้ของ Morgan (2002).....24
2.18	ตัวตรวจรู้ของ Ozeri (2006)25
2.19	ตัวตรวจรู้ของ Seemungkoon (2007)26
2.20	ตัวตรวจรู้ของ Clinton (2008)26
2.21	ตัวตรวจรู้ของ Adam (2008).....27
2.22	ตัวตรวจรู้ของ Tao JIN (2008)28
2.23	ตัวตรวจรู้ของ Chen (2009).....29
3.1	เครื่องเคลื่อนโหลหะด้วยไอระเหยในสุญญากาศ.....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	เครื่องหมุนเคลือบ (spinner).....32
3.3	กระบวนการทำสารไวแสงแบบผง.....34
3.4	ห้องสุญญากาศ.....34
3.5	กระบวนการลิโธกราฟฟีของสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ.....35
3.6	วงจรการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....36
3.7	การเปลี่ยนแปลงของหยดน้ำบนซิลิโคน PDMS ก่อนและหลัง การพลาสมาด้วยออกซิเจน.....38
3.8	โครงสร้างทางเคมีของ PDMS-PDMS ด้วยการพลาสมาด้วยออกซิเจน39
3.9	กระบวนการสร้างหน้ากาคูดัชรังสีเอกซ์.....40
4.1	ทิศทางการแพร่ความชื้นเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุไวความชื้น45
4.2	ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัด โดยใช้วิธี Crank-Nicolson.....46
4.3	ผลตอบแทนของเวลาของตัวตรวจวัดที่มีความกว้างของซี่ต่างกัน47
4.4	กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแสงของน้ำ.....48
4.5	ลักษณะการส่งแสงผ่านโครงสร้างสารไวแสงชนิดลบ (SU-8)49
4.6	การตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบอันดับหนึ่ง.....50
4.7	ผลตอบแทนของเวลาขาขึ้น (ดูความชื้น) ของตัวตรวจวัดความชื้น51
4.8	ผลตอบแทนของเวลาขาลง (คายความชื้น) ของตัวตรวจวัดความชื้น.....52
4.9	ความไวของตัวตรวจวัดความชื้น.....52
4.10	ตัวตรวจวัดความชื้นที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout editor54
4.11	หน้ากาคูดัชรังสีเอกซ์ของตัวตรวจวัดความชื้นเชิงแสง55
4.12	กระบวนการสร้างหน้ากาคูดัชรังสีเอกซ์ของตัวตรวจวัดความชื้น56
4.13	โครงสร้างของตัวตรวจวัดความชื้นที่มีความกว้างของซี่ 70 μm57
4.14	กระบวนการสร้างโครงสร้างของตัวตรวจวัดความชื้นด้วยรังสีเอกซ์58
4.15	โครงสร้างของตัวตรวจวัดความชื้นที่มีความกว้างของซี่ 35 μm59
5.1	ตัวตรวจวัดความชื้นเชิงแสง (SUT HS).....60
5.2	วงจรรับส่งแสงผ่านตัวตรวจวัดความชื้น SUT HS.....61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3	แรงดันที่ขา 3(INA122P) กับแรงดันเอาต์พุต 61
5.4	แผนภาพระบบทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 62
5.5	ระบบทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 63
5.6	สารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน 66
5.7	ชุดเปรียบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจรู้ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว 67
5.8	โครงสร้างของชุดเปรียบเทียบความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว 67
5.9	ค่า Digital Output เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 30 °C 69
5.10	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการส่งแสงผ่านวัสดุที่อุณหภูมิ 30 °C 69
5.11	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 30 °C 70
5.12	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 30 °C 70
5.13	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 30 °C 71
5.14	ค่า Digital Output เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 40 °C 73
5.15	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการส่งแสงผ่านวัสดุที่อุณหภูมิ 40 °C 73
5.16	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 40 °C 74
5.17	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 40 °C 74
5.18	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 40 °C 75
5.19	ค่า Digital Output เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 50 °C 77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการส่งแสงผ่านวัสดุที่อุณหภูมิ 50 °C 77
5.21	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 50 °C 78
5.22	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 50 °C 78
5.23	ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นเทียบกับ ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 50 °C 79
5.24	ค่า DO ของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS เทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของ สารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐานที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °C เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง 80
5.25	ค่า DO ของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS เทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของ สารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐานที่อุณหภูมิ 30 °C เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วย สมการเส้นโค้งกำลังสอง 81
5.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Digital Output และความชื้นสัมพัทธ์ จากการทำ Surface Fitting แบบพหุนาม 82
5.27	แผนภาพระบบการวัดผลตอบสนองทางเวลา 84
5.28	ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ ความชื้นเชิงพาณิชย์ (SHT15) และตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 85
5.29	ผลตอบสนองในการดูความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 86
5.30	ผลตอบสนองในการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 86
5.31	ผลตอบสนองแบบต่อการเปลี่ยนแปลงหลายขั้นของตัวตรวจรู้ความชื้น เชิงพาณิชย์ (SHT15) และตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 88
5.32	ฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS 89
5.33	ความชื้น ณ ห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 25 °C 90
5.34	ความชื้นจากลมหายใจ (หายใจ 4 ครั้ง/นาที) 90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.35 การแกว่งตัวของความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดด้วยตัวตรวจรู้เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย.....	91
6.1 การหักเหของแสง	93
6.2 การหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน.....	95
6.3 ตำแหน่งการวัดความเข้มแสง.....	96
6.4 การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900)	96
6.5 การเดินทางของแสงผ่านช่องทางเดินของเหลว	98
6.6 การไหลของของเหลวในท่อที่มีขนาดไม่เท่ากัน	99
6.7 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout editor.....	100
6.8 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ	101
6.9 หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ	102
6.10 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์โลหะบนฐานกระจก	103
6.11 โลหะนิกเกิลหลุดจากฐานกระจก.....	104
6.12 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์โลหะทั้งชิ้น	105
6.13 โครงสร้างของทางเดินของของเหลวและแม่พิมพ์โลหะนิกเกิล.....	106
6.14 กระบวนการผลิตซ้ำช่องทางเดินของของเหลวโดยใช้ซิลิโคน PDMS.....	107
6.15 โครงสร้าง PDMS หลังการถอดแบบจากแม่พิมพ์โลหะนิกเกิล	107
6.16 กระบวนการสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนกระจกด้วยการพันทราย	108
6.17 ทางเข้าออกของของเหลวบนกระจก.....	109
6.18 กระบวนการสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS	110
6.19 ทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS.....	111
6.20 การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับ PDMS ด้วยการพลาสมาออกซิเจน	112
6.21 ทดสอบการเชื่อมต่อของพื้นผิวด้วยสารละลายสีแดง.....	112
7.1 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD.....	114
7.2 วงจรรับส่งแสงผ่านตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD	115
7.3 ระบบทดสอบของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4	แผนภาพระบบทดสอบของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD 116
7.5	การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) 117
7.6	การวัดความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง..... 118
7.7	การวัดความเข้มแสงหลังจากผ่านช่องทางเดินของเหลว..... 118
7.8	ภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศผ่าน Micro channel ด้วยอัตราการไหล 0.1 $\mu\text{l/s}$ บันทึกโดยวิดีโอที่มีอัตราการบันทึกภาพ 30 เฟรมต่อวินาที 120
7.9	โครงสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ 121
7.10	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมีน้ำและฟองอากาศไหลผ่านบริเวณจุดตรวจรู้..... 122
7.11	ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 0.10 $\mu\text{l/s}$ 123
7.12	ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 0.50 $\mu\text{l/s}$ 123
7.13	ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 1.00 $\mu\text{l/s}$ 124
7.14	ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 5.00 $\mu\text{l/s}$ 124
7.15	ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 10.00 $\mu\text{l/s}$ 125
8.1	กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS กับตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผู้สร้างขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน 129

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างมากทำให้กระบวนการทั้งในอุตสาหกรรมหรือทางการเกษตรสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการได้ง่าย โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อควบคุมปัจจัยเหล่านั้น และช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการผลิต การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งเทคโนโลยีทางแสงกำลังได้รับความสนใจและใช้กันอย่างแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อน ประสิทธิภาพดีและราคาถูก ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอุตสาหกรรม คือ ความชื้นในอากาศ ซึ่งต้องมีการควบคุมปริมาณดังกล่าวให้เหมาะสมตลอดเวลา เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนในการผลิต เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารและยา หรืออุตสาหกรรมประเภทย่อยอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมแล้ว ในทางการแพทย์ยังมีการใช้เทคโนโลยีทางแสงในการวินิจฉัยโรคของผู้ป่วย ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวัดความชื้นจากลมหายใจ การวัดการเต้นของชีพจร การวัดปริมาณออกซิเจนในเลือด ตรวจนับจำนวนเม็ดเลือด หรือแม้กระทั่งการตรวจเช็คฟองอากาศในระบบการให้สารน้ำทางหลอดเลือด ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาช่วยประกอบกับข้อมูลทางด้านกายภาพเพื่อวินิจฉัยโรคต่าง ๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น ความชื้นจากลมหายใจช่วยวินิจฉัยโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ การตรวจนับจำนวนเม็ดเลือดช่วยวินิจฉัยโรคเกี่ยวกับระบบเลือด ได้แก่ โรคกระเพาะในเม็ดเลือดขาว โรคโลหิตจาง และโรคที่เกิดจากการขาดเกล็ดเลือด ส่วนการตรวจเช็คฟองอากาศในระบบการให้สารน้ำทางหลอดเลือดก็เพื่อป้องกันฟองอากาศเข้าสู่เส้นเลือด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบการไหลเวียนของโลหิตหรือถึงขั้นเสียชีวิตได้ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เรามีความสนใจที่จะสร้างตัวตรวจวัดความชื้นและตัวตรวจวัดฟองอากาศด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์และใช้เทคนิคทางแสงในการตรวจวัด เพราะเทคนิคนี้ไม่มีความซับซ้อน ประสิทธิภาพดี อีกทั้งยังมีราคาถูก ซึ่งตัวตรวจวัดความชื้นที่สร้างขึ้นจะใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เป็นวัสดุไวความชื้น โครงสร้างจะมีลักษณะเป็นซี่เพื่อให้ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อของวัสดุไวความชื้นได้เร็วขึ้น ส่วนตัวตรวจวัดฟองอากาศจะสร้างแม่พิมพ์โลหะแล้วทำการถอดแบบด้วยซิลิโคน PDMS โดยตัวตรวจวัดฟองอากาศที่สร้างขึ้นจะใช้ตรวจเช็คฟองอากาศในระบบการให้สารน้ำทางหลอดเลือด เพื่อป้องกันฟองอากาศเข้าไปอุดตันในเส้นเลือดซึ่งจะส่งผลให้ผู้ป่วยได้รับ

อันตราย เหตุผลหลักในการใช้รังสีเอกซ์ (แสงซินโครตรอน) ในการสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานสูงจึงสามารถสร้างโครงสร้างที่มีสัดส่วนระหว่างความกว้างกับความสูงของชิ้นงานได้มาก โครงสร้างมีขนาดเล็กและมีผนังโครงสร้างที่ตั้งตรง ซึ่งจะมีผลดีต่อตัวตรวจรู้ ความชื้นคือ โครงสร้างมีขนาดเล็กจะทำให้ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้เร็วส่งผลให้ตัวตรวจรู้มีผลตอบสนองทางเวลาที่ดี อีกทั้งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสามารถเดินทางผ่านโครงสร้างได้ ดีกว่าเมื่อโครงสร้างมีผนังที่เรียบ และการสร้างโครงสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ สามารถทำการสำเนาโครงสร้างได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

นำเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีมาประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้จุลภาคเชิงแสง เช่น ตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศทางด้านชีวเวชศาสตร์ ซึ่งเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเชิงแสง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

วัสดุนำแสงที่ทำให้เกิดการตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศคือ สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) หรือ PDMS ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิงที่ใช้เป็นมาตรฐาน คือ SHT15

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างและทดสอบการทำงานของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงและตัวตรวจรู้ฟองอากาศ โดยตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงมีความคลาดเคลื่อนได้ในช่วง $\pm 5\%$ จากมาตรฐานการเปรียบเทียบความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวตรวจรู้เชิงแสงที่สร้างจากเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี ตลอดจนได้พัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

1.6 การจัดรูปเล่มของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหา 8 บท ได้แก่ บทที่ 1 บทนำ ซึ่งจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขต ข้อตกลงเบื้องต้นและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่

เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานของระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม
บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง บทที่ 5
กล่าวถึงการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS ประกอบด้วย การวัดผลทางพลวัตโดยการ
เปรียบเทียบกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐานและวัดผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ที่สร้าง
ขึ้น ตลอดจนการทดสอบวัดความชื้นในห้องปฏิบัติการและความชื้นจากลมหายใจ บทที่ 6 กล่าวถึง
ทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ บทที่ 7 กล่าวถึงการทดสอบตัวตรวจ
รู้ฟองอากาศ SUT BD บทที่ 8 เป็นการสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้เชิงแสง ทั้งตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศ ผลของการปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ตลอดจนเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ปรัทัศนัวรรณกรรมของตัวตรวจรู้ความชื้น

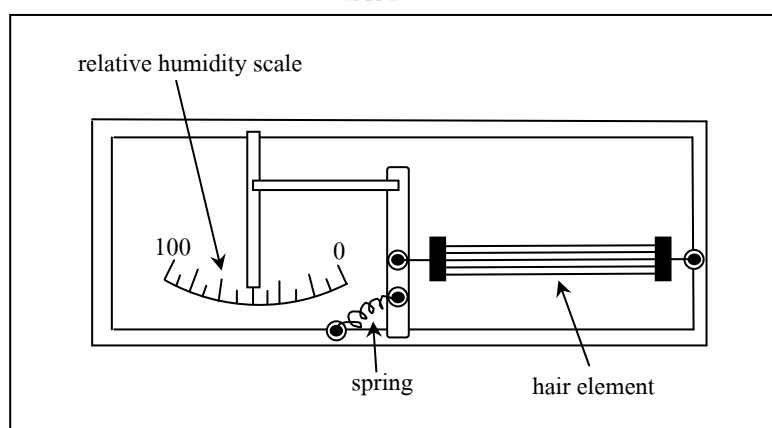
ความชื้น(Humidity) เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำในสถานะแก๊สในอากาศหรือในแก๊สอื่น ๆ การวัดความชื้นสามารถวัดได้หลายรูปแบบทั้งทางตรงและทางอ้อม รูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การวัดความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity measurement) และการวัดความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity measurement) โดยความชื้นสัมบูรณ์เป็นการวัดอัตราส่วนของมวลไอน้ำเทียบกับมวลอากาศแห้งที่รวมตัวอยู่ในปริมาตรเดียวกัน แต่หน่วยการวัดที่นิยมใช้กันคือความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจะคิดอัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศเทียบกับมวลของไอน้ำในสภาวะอิ่มตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกัน มีหน่วยเป็น %RH ในปัจจุบันความชื้นมีความสำคัญต่อการปฏิบัติงานและการควบคุมอัตโนมัติในระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ การผลิตสิ่งทอ ตลอดจนทางการแพทย์ ซึ่งอุตสาหกรรมในแต่ละประเภทก็ต้องการปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันไป เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีประสิทธิภาพ เมื่อกล่าวถึงการควบคุมความชื้นในทางการแพทย์ ก็อย่างเช่น การควบคุมปริมาณความชื้นในเครื่องช่วยหายใจ ระบบฆ่าเชื้อ ตู้บ่มเพาะเชื้อ การทำความสะอาดเครื่องมือผ่าตัดที่เป็นยาง การเก็บรักษายาและเวชภัณฑ์ นอกจากนี้แล้วยังสามารถวัดปริมาณความชื้นจากลมหายใจ เพื่อดูรูปแบบการหายใจสำหรับใช้เป็นข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจบางชนิดได้ ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีขายในท้องตลาดก็มีมากมายหลายประเภท การเลือกใช้งานอาจเลือกจาก ขนาด น้ำหนัก ราคา ประสิทธิภาพและการบำรุงรักษา

2.1.1 ประเภทของตัวตรวจวัดความชื้นตามหลักการตรวจวัด

ตัวตรวจวัดความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสมกับประเภทการใช้งานและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยตัวตรวจวัดความชื้นสามารถจำแนกตามหลักการตรวจวัดได้ 5 ประเภท (T.L.Yeo, 2008) ได้แก่ ไฮโกรมิเตอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล (Mechanical hygrometer) ไฮโกรมิเตอร์แบบวัดจุดน้ำค้าง (Chilled mirror hygrometer) ไฮโกรมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง (Wet and dry bulb psychrometer) ไฮโกรมิเตอร์แบบดูดกลืนแสงอินฟราเรด (Infrared (IR) optical absorption hygrometer) และตัวตรวจวัดความชื้นขนาดเล็ก (Miniaturised humidity sensors) โดยตัวตรวจวัดความชื้นแต่ละประเภทก็มีทั้งข้อดีและข้อด้อยดังตารางที่ 2.1

2.1.1.1 ไฮโกรมิเตอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล

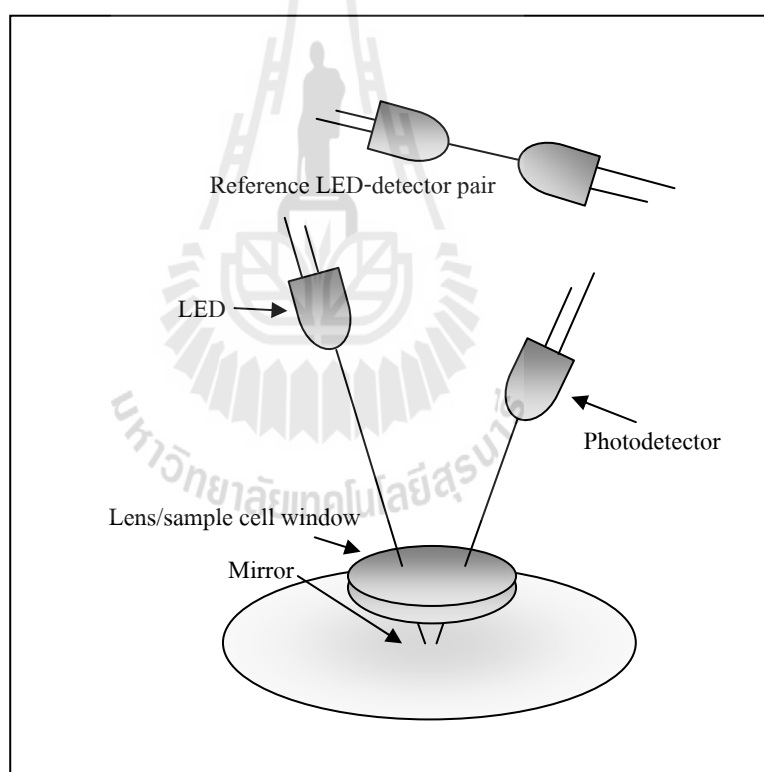
กลไกของไฮโกรมิเตอร์ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางกลในการตรวจวัดความชื้น (Mechanical hygrometer) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่เก่าแก่ที่สุด ที่อาศัยการใช้วัสดุที่สามารถขยายและหดตัวในสัดส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลง วัสดุทั่วไปที่ใช้ได้แก่ เส้นใยสังเคราะห์และเส้นผมของมนุษย์ โดยไฮโกรมิเตอร์จะประกอบด้วยวัสดุตรวจวัดที่เชื่อมโยงเข้ากับมาตรวัดหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่สามารถวัดการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น ซึ่งมีการปรับเทียบระยะการเคลื่อนที่กับความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อม วิธีการดังกล่าวมีราคาไม่แพงและง่ายต่อการดำเนินการ แต่ช้าและไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งยังมีปัญหาในเรื่องของฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการชดเชยเมื่อจะทำการวัด จึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.1 ไฮโกรมิเตอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล

2.1.1.2 ไฮโกรมิเตอร์แบบวัดจุดน้ำค้าง

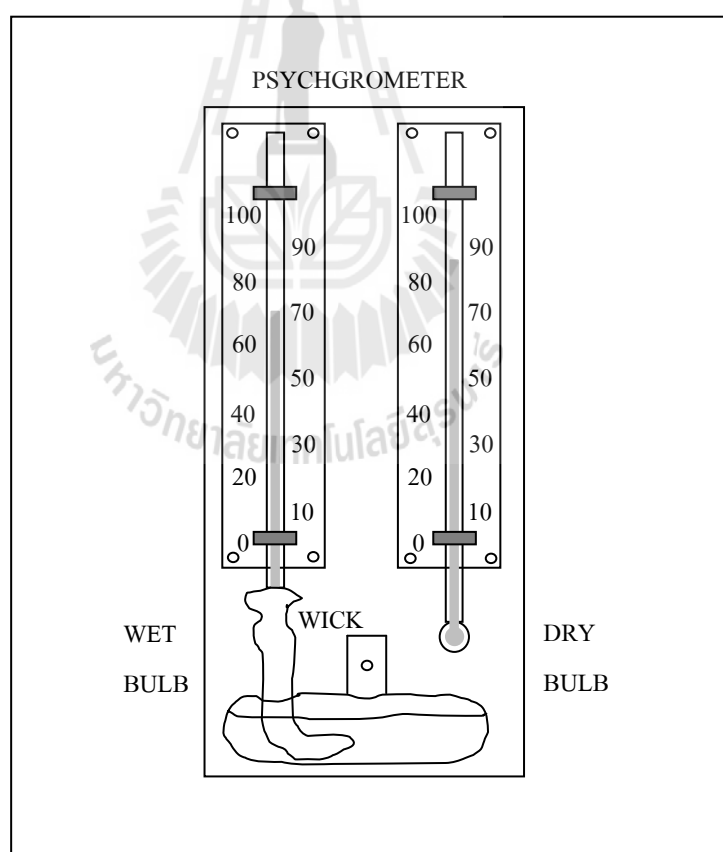
ไฮโกรมิเตอร์แบบวัดจุดน้ำค้าง (Chilled mirror hygrometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคทางแสงในการตรวจวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง เทคนิคนี้มีความแม่นยำสูงและเป็นการวัดที่น่าเชื่อถือ มักจะถูกนำไปใช้สำหรับเป็นมาตรฐานในการสอบเทียบ ในการใช้งานจะมีการควบคุมอุณหภูมิกระจกสะท้อนแสงและโมดูลอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจสอบสัญญาณแสงสะท้อนจากพื้นผิวของกระจก ในสถานะที่อากาศแห้งอุณหภูมิของกระจกจะสูงกว่าจุดน้ำค้าง โมดูลอิเล็กทรอนิกส์จะตรวจจับแสงสะท้อนได้สูงสุด เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดน้ำค้าง ความเข้มของสัญญาณก็จะลดลง เนื่องจากการกระเจิงของแสงที่เป็นผลมาจากการเกิดหยดน้ำเกาะที่ผิวของกระจก ไฮโกรมิเตอร์ประเภทนี้มีความแม่นยำสูงถึง $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ แต่มีราคาแพงและต้องบำรุงรักษาอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากอาจมีสิ่งเจือปนที่ผิวของกระจก



รูปที่ 2.2 ไฮโกรมิเตอร์แบบวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

2.1.1.3 ไฮโครมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง

ไฮโครมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้งใช้หลักการตรวจวัดแบบง่าย ๆ และต้นทุนต่ำ จึงได้รับความนิยมในการนำมาใช้งาน มีส่วนประกอบคือ เทอร์โมมิเตอร์สองตัว เทอร์โมมิเตอร์ตัวแรกถูกคลุมด้วยไส้ตะเกียงเปียกเพื่อวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก ส่วนอีกตัวใช้วัดอุณหภูมิของแก๊สดวอย่าง (อุณหภูมิกระเปาะแห้ง) โดยอุณหภูมิกระเปาะแห้งก็คืออุณหภูมิของอากาศ ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกเป็นอุณหภูมิที่เกิดจากการระเหยของน้ำและการถ่ายโอนความร้อนแฝง โดยอุปกรณ์การวัดนี้สามารถนำไปใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบได้ แต่ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานในพื้นที่ปิดขนาดเล็กและข้อควรระวังที่จำเป็นเพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวัดคือการปนเปื้อนในไส้ตะเกียงที่คลุมเทอร์โมมิเตอร์และความไม่แม่นยำของเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ โดยทั่วไปเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์การวัดจะมีความแม่นยำของอุณหภูมิเท่ากับ $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ มีความแม่นยำของความชื้นเท่ากับ $\pm 3\%\text{RH}$ เมื่อใช้งานในช่วงอุณหภูมิ $5-80^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.3 ไฮโครมิเตอร์แบบกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง

2.1.1.4 ไฮโกรมิเตอร์แบบดูดกลืนแสงอินฟราเรด

หลักการทำงานของไฮโกรมิเตอร์แบบดูดกลืนแสงอินฟราเรด (Infrared (IR) optical absorption hygrometer) จะใช้วิธีการดูดกลืนคู่ความยาวคลื่นที่ใช้ความยาวคลื่นหลักที่มีการดูดกลืนแสงมากและความยาวคลื่นที่เหลือจะดูดกลืนแสงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การวัดความชื้นจะออกมาในรูปของอัตราส่วนการส่งผ่านแสงของทั้งสองความยาวคลื่น เทคนิคนี้จะเป็นการวัดการดูดซับน้ำโดยตรงซึ่งช่วยลดการครีฟท์ในการอ่านและการรบกวนที่เกิดจากการปนเปื้อน เช่น อนุภาคและแก๊สอื่น ๆ ในสภาพแวดล้อมของการทดสอบ ความไวของไฮโกรมิเตอร์จะขึ้นอยู่กับระยะทางในการดูดกลืนแสงตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต คือ แสงอินฟราเรดที่ส่งผ่านวัสดุดูดซับความชื้นจะแปรผกผันกับปริมาณความชื้นและระยะทางของวัสดุดูดซับความชื้นแบบเอกโพเนนเชียล ไฮโกรมิเตอร์แบบดูดกลืนแสงอินฟราเรดมีข้อดีคือ มีค่าครีฟท์น้อย มีย่านการวัดกว้างจึงสามารถนำมาใช้งานได้ทั่วไป

2.1.1.5 ตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก

ตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก (Miniaturized humidity sensors) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งทางด้านเทคโนโลยีการผลิต เทคนิคการตรวจวัด เพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีราคาต่ำลง ขนาดเล็ก และประสิทธิภาพดี ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็กที่มีตามท้องตลาด เช่น ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Humidity Sensor) ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวต้านทาน (Resistive Humidity Sensor) และตัวตรวจรู้ความชื้นแบบท่อนำแสง (Optical waveguide sensors) เป็นต้น โดยตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุจะอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุไวความชื้น มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยชั้นสารไวความชื้นซึ่งถูกวางอยู่ระหว่างวัสดุนำไฟฟ้า ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวต้านทานจะอาศัยหลักการนำไฟฟ้าที่เกิดจากการดูดซับความชื้นของวัสดุไวความชื้น ส่วนตัวตรวจรู้ความชื้นแบบท่อนำแสง จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุดูดซับความชื้นเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของตัวตรวจรู้ความชื้นในแต่ละประเภท

ประเภทของ ตัวตรวจรู้	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อด้อย
ไฮโกรมิเตอร์ แบบ Mechanical	การเปลี่ยนแปลงความ ยาว	-ไม่ต้องใช้พลังงาน -ราคาถูก -สร้างได้ง่าย	-เอาท์พุตไม่เป็นเชิงเส้น -มีฮิสเตอร์รีซิส -มีการพัดพามาก (drift)
ไฮโกรมิเตอร์ แบบวัดจุดน้ำค้าง	วัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง โดยตรวจรูรูปแบบการ ควบแน่นบนพื้นฐาน ของการทำความเย็น	-ไม่ต้องปรับเทียบ -ย่านการวัดกว้าง -ความแม่นยำสูง	-ราคาแพง -ใช้พลังงานไฟฟ้าสูง -มีขนาดใหญ่ -ต้องทำความสะอาดผิว กระจกอย่างสม่ำเสมอ
ไฮโครมิเตอร์ แบบกระเปาะ เปียก-กระเปาะ แห้ง	ประเมินความชื้นบน พื้นฐานของกระ เปาะก กระเปาะ แห้ง และอุณหภูมิ	-ไม่ต้องทำการ ปรับเทียบ	-ต้องเทียบหาความชื้น จากคู่มือ -ต้องมีการเปลี่ยนไส้และ น้ำกลั่น -ไม่สามารถใช้ในพื้นที่ ปิดขนาดเล็กได้
อินฟราเรด ไฮโกรมิเตอร์	เลือกการดูดกลืนโดย จำแนกอินฟราเรด สเปกตรัมจากน้ำ	-ย่านการวัดกว้าง -ใช้กับแก๊สที่กัดกร่อน ได้	-ราคาแพง -มีความเสี่ยงต่อการถูก รบกวนจากก๊าซอื่นๆ
ตัวตรวจรู้ ความชื้นขนาด เล็ก	คุณสมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลง ไป เช่น ความจุ ไฟฟ้า ความ ต้านทาน แรงดัน	-ราคาถูก -มีขนาดเล็ก -บำรุงรักษาง่าย -สร้างได้ง่าย -สามารถผลิตจำหน่าย	-มีฮิสเตอร์รีซิส -ไวต่อสิ่งสกปรก

2.1.2 ประเภทของตัวตรวจรู้ความชื้นตามชนิดของวัสดุไวความชื้น

การแบ่งประเภทของตัวตรวจรู้ความชื้นตามชนิดของวัสดุไวความชื้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ วัสดุเซรามิกและวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งแต่ละชนิดมีหลักการทำงานดังนี้

2.1.2.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น

ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น (ceramic based humidity sensor) สามารถจำแนกตามประเภทกลไกการตรวจรู้ ได้แก่ 1) ตัวตรวจรู้ประเภทไอออนิก ซึ่งจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงความนำของไอออนจากการดูดซึมความชื้นและการคายความชื้น คุณลักษณะเฉพาะของการตรวจรู้ความชื้นขึ้นอยู่กับความนำจำเพาะของวัสดุที่ใช้ 2) ตัวตรวจรู้ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ จะใช้หลักการให้อิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำแก่สารกึ่งตัวนำออกไซด์ ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C 3) ตัวตรวจรู้ประเภทเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นโลหะขนานกัน ตรงกลางเป็นวัสดุเซรามิกโดยตัวตรวจรู้ประเภทนี้ใช้วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป 4) ตัวตรวจรู้ประเภทของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์ จะอาศัยสภาพความนำของโปรตอนในวัสดุ ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้นนั้นจะมีข้อดีคือ ความแข็งแรงทางกล ทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี มีเสถียรภาพทางกายภาพและอุณหภูมิ (Traversa, 1995) ส่วนข้อเสียของตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทนี้คือ ต้องการความร้อนเพื่อทำให้ตัวตรวจรู้คืนสภาพ และช่วงเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ที่ได้ไม่ดีนักเนื่องจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกบนพื้นผิวของเซรามิก เช่น คราบฝุ่น น้ำมัน คาร์บอน แอลกอฮอล์ สารเคมีและอื่น ๆ ซึ่งสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดได้โดยการให้ความร้อน

2.1.2.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุไวความชื้น

ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น (polymer based humidity sensor) มีการนำมาใช้งานเป็นระยะเวลานานกว่าและแพร่หลายมากกว่าวัสดุเซรามิก เนื่องจากวัสดุเซรามิกจะเน้นไปทำงานประเภทความร้อนสูง และสภาพแวดล้อมมีการกัดกร่อน ซึ่งงานโดยทั่วไปจะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ พอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พอลิอิเล็กโทรไลต์และไดอิเล็กทริก ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นจะใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ความจุไฟฟ้า ความต้านทาน คลื่นเสียงพื้นผิว และเพียโซรีซิสทีฟ โดยตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ จะใช้ความนำไอออนของวัสดุประเภทไอออนิก เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นวัสดุจะมีความนำไอออนิกเพิ่มขึ้น กลไกการตรวจรู้จะอาศัยอัตราเร็วของอนุภาคไอออนิก ซึ่งเคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก หรือความเข้มข้นประจุพาหะ (Yamazoe, 1986) สมดุลของประจุเกิดจากการที่ไอออนเคลื่อนที่ตรงกันข้ามประจุ นั่นคือ มีแรงไฟฟ้าสถิตดึงดูดกลุ่มขั้ว

ที่อยู่กับที่ เมื่อน้ำดูดซึมผ่านวัสดุ อัตราเร็วของอนุภาคประจุที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นระหว่างกันบริเวณใกล้เคียงกันเป็นอิสระมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง ส่วนตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทไดอิเล็กทริกใช้หลักการดูดซึมน้ำของโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของน้ำและพอลิเมอร์มีค่าต่างกันมาก คือน้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เท่ากับ 80 ส่วนพอลิเมอร์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประมาณ 5 ซึ่งเมื่อมีการดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงข่ายของพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น หลักการนี้สามารถนำไปใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร วัสดุไวความชื้น ซึ่งสามารถวัดได้ง่าย วัสดุที่นิยมใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้น ได้แก่ พอลิอิมิด เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารเคมีและการปนเปื้อน นอกจากนี้ การใช้ PMMA เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งมีผลเสียคือ มีความไม่เป็นเชิงเส้นที่ความชื้นสูงและมีฮิสเทอรีซิสมาก

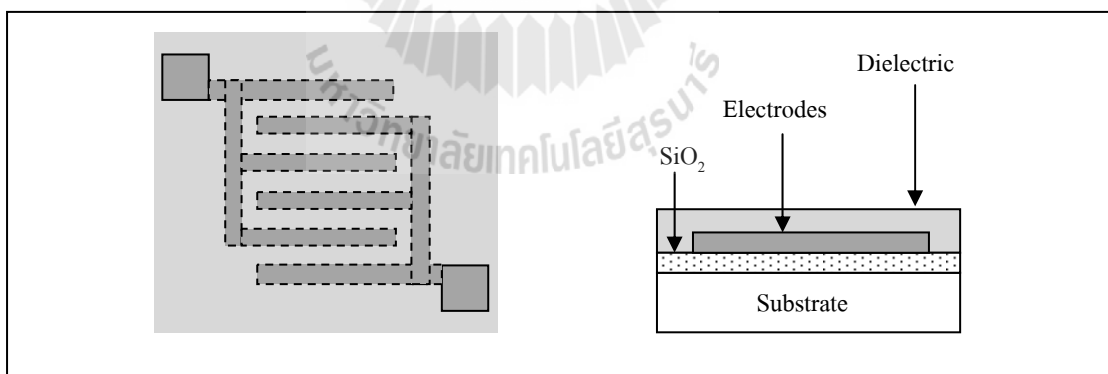
2.1.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ตัวตรวจรู้ความชื้นได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนั้นได้มีนักวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาค้นคว้า ทั้งทางด้านการออกแบบ การจำลองผลทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนวัสดุที่ใช้ในการสร้าง เพื่อให้ได้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีประสิทธิภาพ โดย Denton (1990) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้พอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นและสร้างวงจรที่สามารถแปลงความถี่ไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นมีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 600 วินาที มีความไว 13,470 ppm/%RH ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 0.49 V Blotshauser (1991) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยใช้พอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น มีโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบซี่หวี วัดความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% ได้ 1.5 pF และตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวเท่ากับ 2,670 ppm/%RH แต่ผลตอบสนองทางเวลาช้ามาก ต่อมาในปี 1993 ได้มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี CMOS เพื่อให้สามารถแปลงค่าความจุไฟฟ้าออกมาเป็นค่ากระแสไฟฟ้า ทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวเพิ่มขึ้นเป็น 5,333 ppm/%RH มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 0.3 μ A และมีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 30 นาที Sager (1995) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดของพอลิอิมิดเมื่อได้รับความชื้น มีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 90 วินาที และมีความไว 60 ppm/%RH

Qiu (2001) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ โดยโครงสร้างมีลักษณะเป็นซี่หวี ใช้การหมุนเคลือบพอลิอิมิดให้ได้ความหนา 38 μ m เพื่อใช้เป็นวัสดุไวความชื้นและสร้าง

อิเล็กทรอนิกส์มีเนียมด้วยเทคโนโลยี CMOS ตัวตรวจรู้ความชื้นมีผลตอบสนองทางเวลา 20 วินาที มีความไวเท่ากับ 196,000 ppm/%RH มีฮีสเตอร์รีซิสส์น้อย Gupta (2001) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงมาทำการงอให้เป็นรูตัวยู (U-shaped) พร้อมทั้งเคลือบสาร PMMA (polymethylmethacrylate) เพื่อเป็นวัสดุไวความชื้น โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุไวความชื้นซึ่งส่งผลต่อปริมาณของแสงเอาท์พุทที่ความชื้นต่างกัน ตัวตรวจรู้ความชื้นนี้มีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 5 วินาที และความไวเท่ากับ 33,333 ppm/%RH

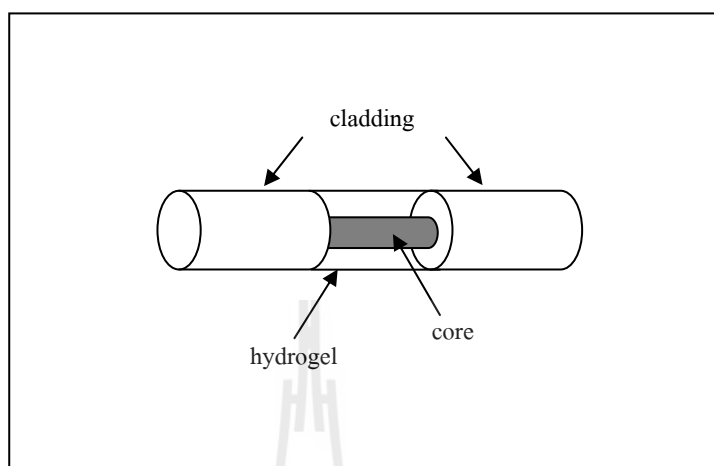
Laville (2001) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้วัดความชื้นจากลมหายใจ ใช้พอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น โดยทำการโคปสารซิลิกอนไดออกไซด์ลงบนแผ่นซิลิกอนแล้วเคลือบโลหะไททาเนียมความหนา $0.5\ \mu\text{m}$ เพื่อสร้างอิเล็กโทรด จากนั้นหมุนเคลือบพอลิอิมิดความหนา $3\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นดังรูปที่ 2.4 ผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นอยู่ที่ 1 วินาที เวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 15 วินาที ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH มีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF และมีสัมประสิทธิ์การดักกลืนความชื้นของพอลิอิมิดที่ได้จากการใช้สมการการแพร่ (Fick's law) มีค่าเท่ากับ $5 \times 10^{-13}\ \text{m}^2/\text{s}$ ต่อมาในปี 2002 ได้พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นโดยติดตั้งตัวให้ความร้อนพบว่าผลตอบสนองทางเวลาลดลงอยู่ที่ 0.2 วินาที เวลาในการคายความชื้นอยู่ที่ 11 วินาที ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH และมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF



รูปที่ 2.4 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Laville (2001)

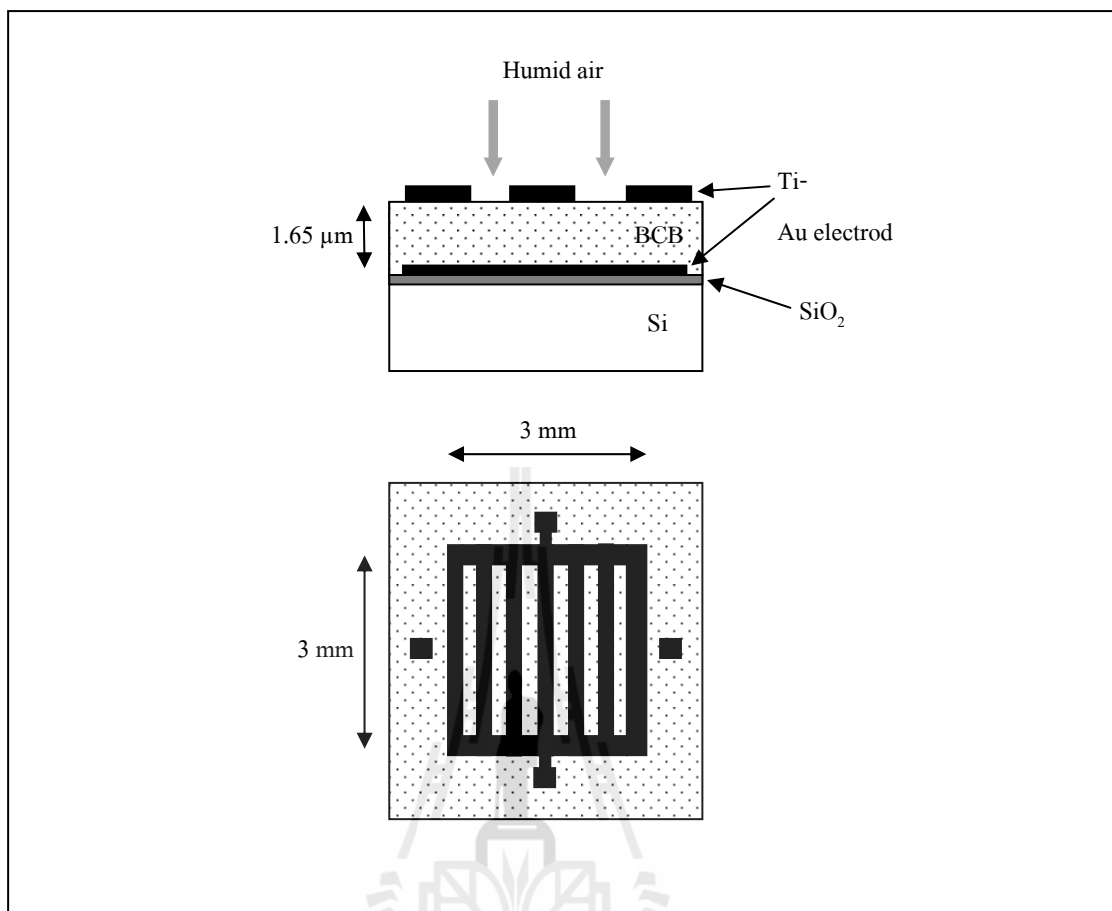
Arregui (2003) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบใช้แสงในการตรวจวัด โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสงบริเวณแคดดิงของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งได้ใช้สารไวความชื้นทั้งหมด 4 ชนิดเคลือบลงไปแทนที่แคดดิงในสายเส้นใยแก้วนำแสง ได้แก่ (poly-N-VP), poly-hydroxyethyl methacrylate (poly - HEMA), poly-crylamide, poly-N-vinyl pyrrolidinone

และ agarose gel ดังรูปที่ 2.5 เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของสารไวความชื้นแต่ละชนิด โดยสาร agarose gel ให้ผลตอบสนองทางเวลาดีที่สุดคือ 90 วินาที



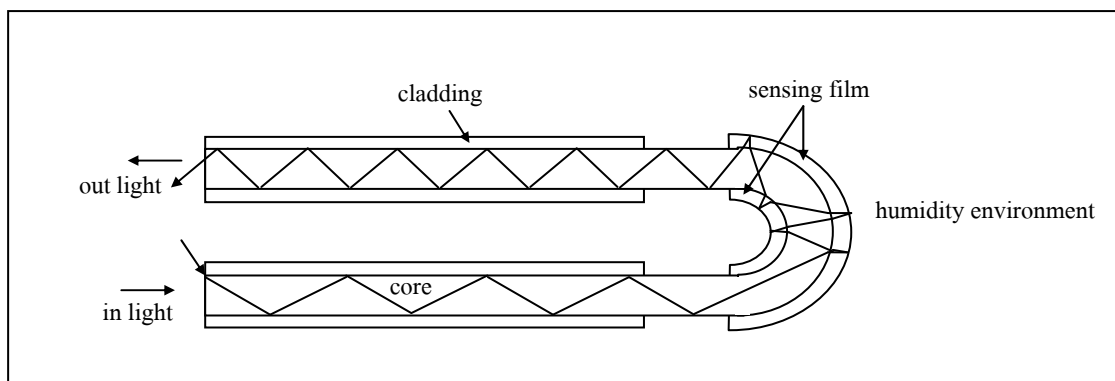
รูปที่ 2.5 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Arregui (2003)

Tetelin (2003) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ เพื่อใช้ในทางการแพทย์สำหรับวินิจฉัยโรคปอด โดยใช้สาร benzocyclobutene (BCB) เป็นวัสดุไวความชื้นปิดทับด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งด้านบนจะมีช่องสำหรับให้ความชื้นแพร่เข้าสู่วัสดุไวความชื้น ดังรูปที่ 2.6 ผลตอบสนองทางเวลาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในการดูดความชื้นประมาณ 0.5 วินาที เวลาในการคายความชื้นประมาณ 6 วินาที ความไว 0.1 pF/%RH ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 2 %RH และใช้สมการการแพร่ (Fick's law) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความชื้นของสาร benzocyclobutene ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4.08 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ต่อมาในปี 2004 ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความไวและความเร็วของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบชี้หวี ซึ่งพบว่าชี้แคบ ๆ และมีระยะห่างกันมากจะช่วยให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีผลการตอบสนองทางเวลาที่เร็วขึ้น



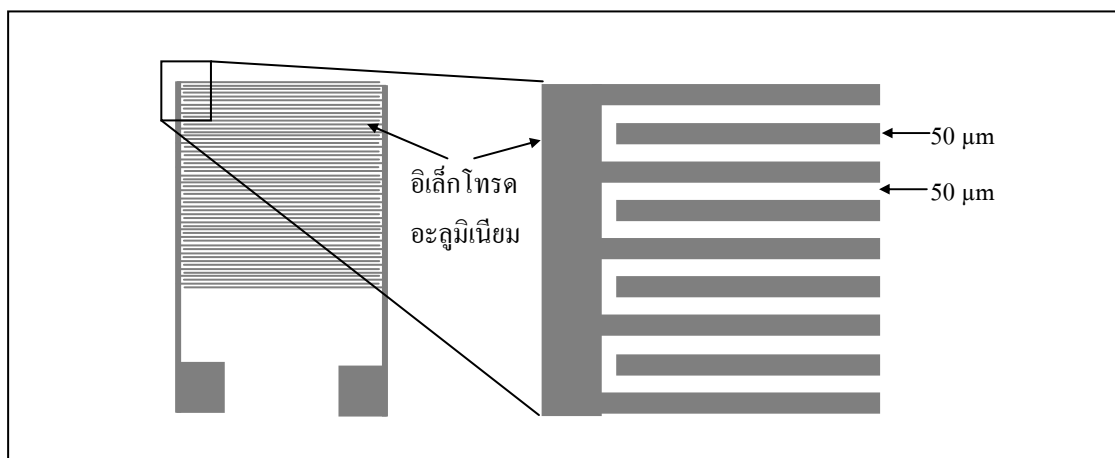
รูปที่ 2.6 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Tetelin (2003)

Khijwania (2005) ได้ทำการศึกษาและออกแบบโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้การตรวจจับแบบใช้แสง ซึ่งจะใช้เส้นใยแก้วนำแสงแบบมัลติโหมดทำเป็นรูปตัวยูขนาดครึ่งของความโค้งประมาณ 5 mm และหุ้มบริเวณแกนของเส้นใยแก้วนำแสงด้วยพอลิเมอร์ (CoCl₂) สำหรับใช้เป็นวัสดุไวความชื้นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งทำการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดของแกนแตกต่างกัน คือ 100 μm 200 μm และ 300 μm พบว่าความหนาของฟิล์มที่หุ้มบริเวณแกนของเส้นใยแก้วนำแสงและขนาดของเส้นใยแก้วนำแสงมีผลต่อผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ กล่าวคือเส้นใยแก้วนำแสงที่มีแกนขนาดเล็กจะตอบสนองต่อความชื้นได้ดีกว่าขนาดใหญ่ โดยเส้นใยแก้วนำแสงที่มีแกนขนาด 100 μm จะให้ผลตอบสนองทางเวลาที่ 10 ถึง 90%RH ประมาณ 1 วินาที และมีความไวเท่ากับ 71,000 ppm/%RH



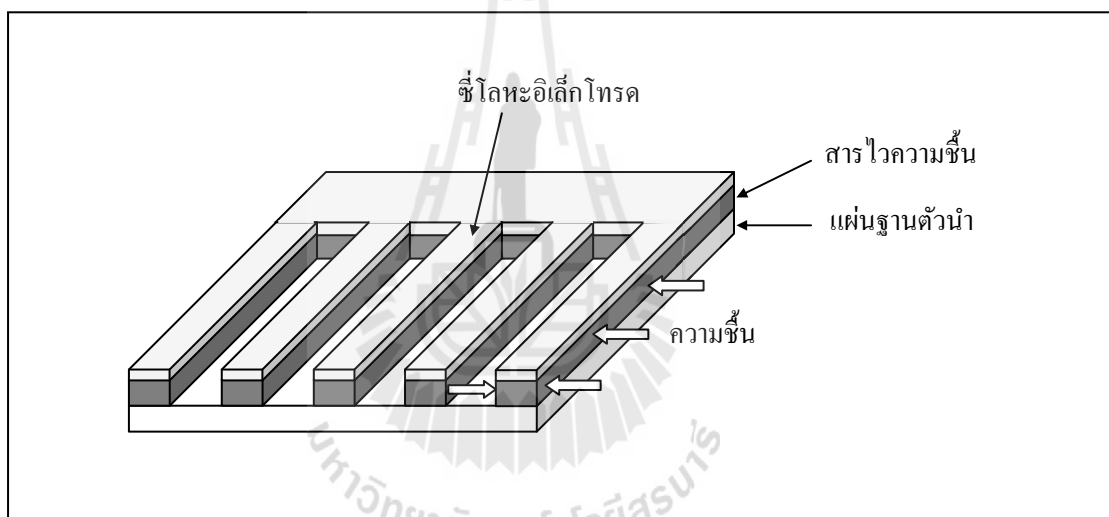
รูปที่ 2.7 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Khijwania (2005)

Ketthanom (2006) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุแบบซีพวีด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เพื่อเปรียบเทียบว่าเทคโนโลยีแบบใดสามารถสร้างตัวตรวจรู้ให้มีผลตอบสนองทางเวลาที่ดียิ่งที่สุด โดยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคให้ผลตอบสนองทางเวลาที่เร็วที่สุด ซึ่งทำการสร้างอิเล็กโทรดที่มีขนาดเพียง $3\ \mu\text{m}$ แล้วจึงเคลือบอิเล็กโทรดด้วยฟิล์มพอลิอิมิด์โดยการสเปดเตอร์ริง ซึ่งมีตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 16 วินาทีและมีความไว $0.114\ \text{pF}/\%\text{RH}$ หรือ $2,740\ \text{ppm}/\%\text{RH}$ ส่วนตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซีพวีที่สร้างจากเทคโนโลยีวงจรรวมดังรูปที่ 2.8 มีอิเล็กโทรดขนาด $50\ \mu\text{m}$ ใช้กระจกเป็นฐานรองและพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น มีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 23 วินาทีและมีความไว $0.163\ \text{pF}/\%\text{RH}$ หรือ $1,379\ \text{ppm}/\%\text{RH}$



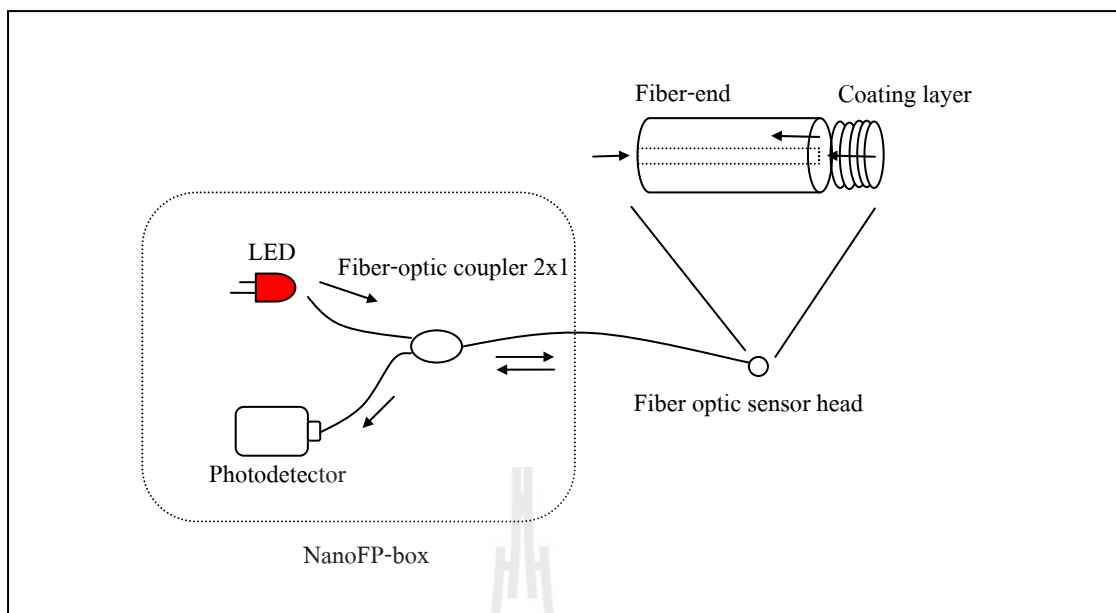
รูปที่ 2.8 ลวดลายตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซีพวีของ Ketthanom (2006)

Tsigara (2007) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงซึ่งมีโครงสร้างเป็นสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) แบบตะแกรงหนาประมาณ $1\ \mu\text{m}$ ถึง $1.5\ \mu\text{m}$ แล้วหมุนเคลือบด้วย PEO/ CoCl_2 หนาประมาณ $100\ \mu\text{m}$ ถึง $250\ \mu\text{m}$ และใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งให้ผลตอบแทนที่เร็ว Mapato (2007) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ โดยมีโครงสร้างเป็นแบบซี่ยาวที่มีความกว้างของแต่ละซี่ $51\ \mu\text{m}$ หนา $2\ \mu\text{m}$ และใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เป็นสารไดอิเล็กทริกปิดทับด้วยอิเล็กโทรดโลหะที่มีลักษณะคล้ายกังปาลาดังรูปที่ 2.9 เมื่อมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้สารไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ตัวตรวจรู้ความชื้นนี้มีผลตอบแทนทางเวลาเท่ากับ 0.56 วินาที มีความไวเท่ากับ 2,677 ppm/%RH ค่าความผิดพลาดในการวัดความชื้นสูงสุดเท่ากับ $\pm 5\%$



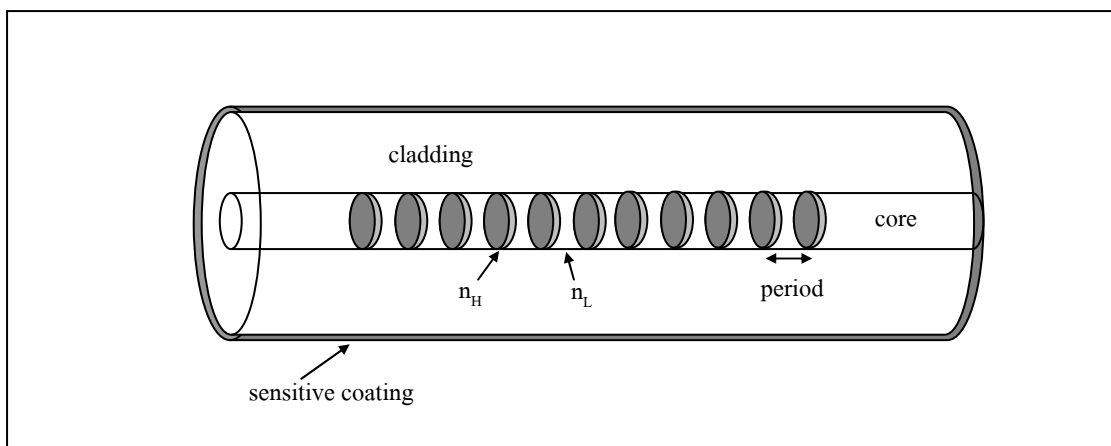
รูปที่ 2.9 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Mapato (2007)

Corres (2008) ได้ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น โดยใช้หลักการทางแสงในการตรวจรู้ความชื้นจากลมหายใจ ซึ่งจะเคลือบวัสดุไวความชื้น (SiO_2 nanoparticles) บริเวณปลายของเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดียว และมีแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 1310 nm ส่งแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสง ดังรูปที่ 2.10 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นนี้มีผลตอบแทนทางเวลาในการดูดความชื้นเท่ากับ 0.1 วินาที และผลตอบแทนทางเวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 0.15 วินาที



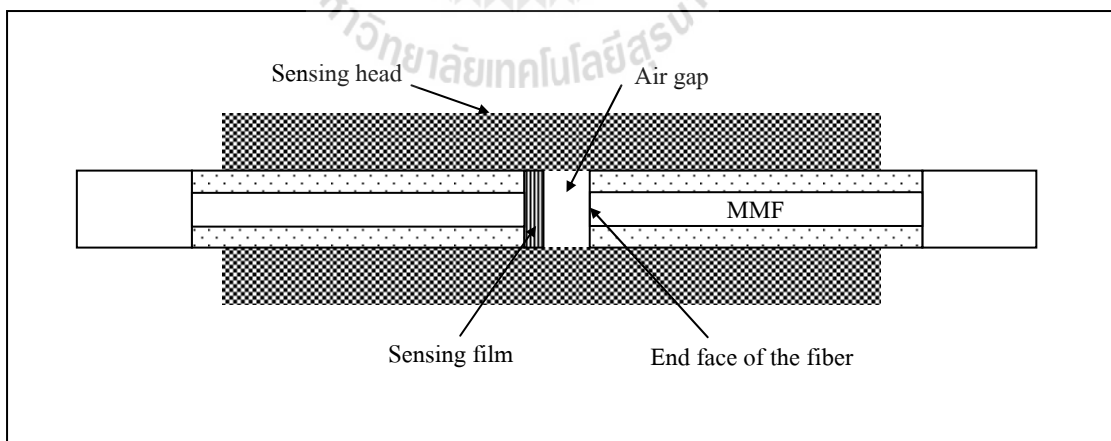
รูปที่ 2.10 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Corres (2008)

Yeo (2008) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงแบบมัลติโหมดมาใช้เป็นทางเดินของแสงและทำการเคลือบวัสดุไวความชื้น (HEC/PVDF 4:1) ความหนาประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$ ถึง $1\ \mu\text{m}$ เข้าไปแทนที่พลาสติกหุ้มแกนของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งแกนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ทำจาก PMMA จะมีดัชนีหักเห 1.489 ส่วน HEC/PVDF จะมีดัชนีหักเห 1.492 ในสภาวะปกติ แต่ถ้ามีความชื้นเข้ามาดัชนีหักเหก็จะลดลงน้อยกว่า 1.465 จากหลักการนี้จึงสามารถตรวจวัดค่าความชื้นได้ ซึ่งมีผลตอบสนองทางเวลาประมาณ 5 วินาที Viegas (2009) ได้สร้างออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบ Long-Period Fiber Grating (LPG) ใช้ SiO_2 -nanospheres ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสามารถดูดซับความชื้นได้เคลือบลงบน LPG เพื่อใช้เป็นวัสดุไวความชื้น โดยใช้หลักการทางแสงในการตรวจจับปริมาณของแสงที่ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น ซึ่งตัวตรวจรู้นี้มีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 0.2 วินาทีและมีความไวเท่ากับ $80,000\ \text{ppm}/\%RH$



รูปที่ 2.11 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Viegas (2009)

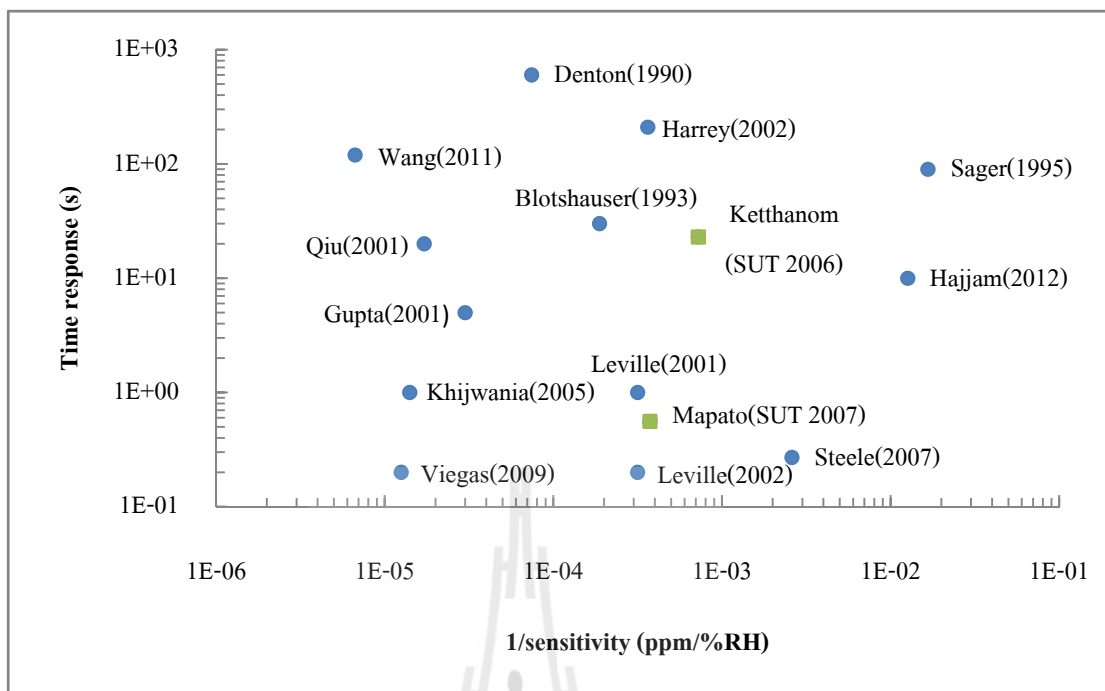
Wang (2011) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบ resistive ที่อาศัยวัสดุไวความชื้นในการเปลี่ยนแปลงแสงที่ส่งผ่านมายังอุปกรณ์รับแสง โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงแบบมัลติโหมดที่มีขนาดของคอร์และแคลดดิ้ง 62.5/125 μm มาตัดและเคลือบวัสดุไวความชื้น ($\text{CoCl}_2\text{-PVA/SiO}_2$) ลงบนปลายของเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการหมุนเคลือบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อวินาทีจำนวน 5 ชั้น โดยตัวตรวจรู้ความชื้นมีลักษณะดังรูปที่ 2.12 มีผลตอบสนองทางเวลาน้อยกว่า 2 นาที มีความไวเท่ากับ 150,000 ppm/%RH และมีเสถียรภาพที่ดี



รูปที่ 2.12 ตัวตรวจรู้ความชื้นของ Wang (2011)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น

ปี	ผู้ประพันธ์	หลักการ	วัสดุ	ความไว (ppm/%RH)	เวลา ตอบสนอง (s)
1990	Denton, et al.	ความจุไฟฟ้า/ แรงดัน	พอลิอีไมด์	13,470	600
1993	Blotshauser, et al.	ความจุไฟฟ้า/ กระแส	พอลิอีไมด์	5,330	30
1995	Sager, et al.	เปลี่ยนแปลง ขนาด PI	พอลิอีไมด์	60	90
2001	Qiu, et al.	ตัวเก็บประจุ	พอลิอีไมด์	58,333	20
2001	Laville, et al.	ตัวเก็บประจุ	พอลิอีไมด์	3,166	1
2001	Gupta, et al.	แสง	PMMA	33,333	5
2002	Laville, et al.	ตัวเก็บประจุ	พอลิอีไมด์	3,166	0.2
2002	Harrey, et al.	ตัวเก็บประจุ	พอลิอีไมด์	2,752	210
2003	Tetelin, et al.	ตัวเก็บประจุ	Benzocyclobutene	-	0.5
2003	Arregui, et al.	แสง	Hydrogel	-	90
2005	Khijwania , et al.	แสง	พอลิเมอร์ CoCl ₂	71,000	1
2006	Ketthanom	ตัวเก็บประจุ	พอลิอีไมด์	1,379	23
2006	Steele, et al.	แสง	TiO ₂	384.9	0.27
2007	Mapato	ตัวเก็บประจุ	SU-8	2,677	0.56
2008	Corres, et al.	แสง	SiO ₂ nanoparticles	-	0.15
2008	Yeo, et al.	แสง	HEC/PVDF	-	5
2009	Viegas, et al.	แสง	SiO ₂ nanospheres	80,000	0.2
2011	Wang, et al.	แสง	CoCl ₂ -PVA/SiO ₂	150,000	120
2012	Hajjam, et al.	ความถี่	Polyethyleneimine (PEI)	79	10



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบต่าง ๆ

2.2 ปรัชสนวัตกรรมกรรมของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

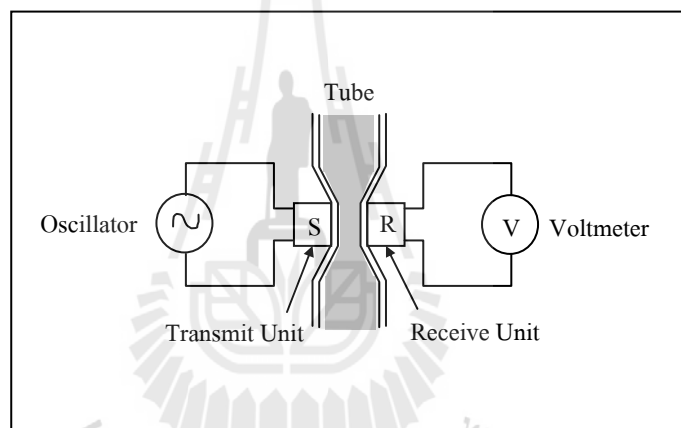
ตัวตรวจรู้ฟองอากาศมีความสำคัญต่อวิทยาการทางการแพทย์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการไหลเวียนของโลหิต เช่น การให้สารน้ำผ่านทางเส้นเลือด การบายพาสหัวใจ การฟอกไต และอื่น ๆ หากฟองอากาศเข้าสู่เส้นเลือดอาจส่งผลกระทบต่อระบบไหลเวียนโลหิตจนถึงขั้นเสียชีวิตได้ การเลือกใช้ตัวตรวจรู้ฟองอากาศอาจพิจารณาจาก ประเภทของเหลว ชนิดของหลอดหรือท่อสำหรับขนส่งของเหลว ความแม่นยำ ความง่ายในการประยุกต์ใช้กับระบบทางการแพทย์ที่มีอยู่ในปัจจุบันและราคา

2.2.1 ประเภทของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

การใช้งานตัวตรวจรู้ฟองอากาศมีทั้งแบบที่ต้องสัมผัสกับสารละลายและไม่ต้องสัมผัสกับสารละลาย สามารถจำแนกตามหลักการตรวจรู้ได้ 3 ประเภท ได้แก่ ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ Ultrasonic (Ultrasonic bubble sensor) ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ IR และ Photoelectric และตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ capacitive โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1.1 Ultrasonic bubble sensor

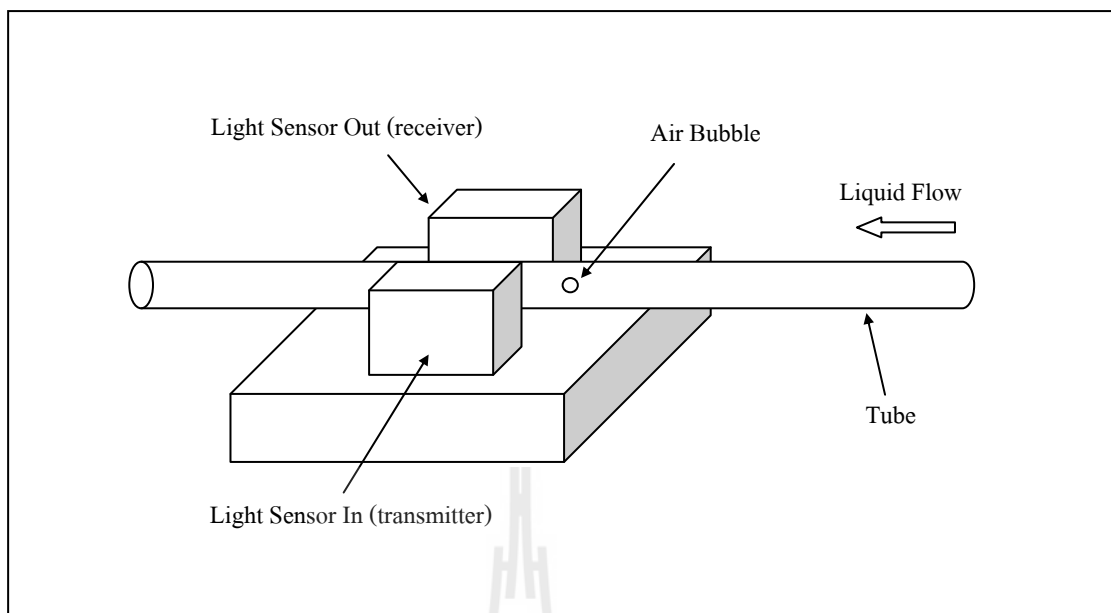
ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ Ultrasonic มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยจะใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) สร้างคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับส่งไปยังสารละลาย ตัวอย่าง ซึ่งสามารถส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกได้ 2 แบบคือ ส่งสัญญาณแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์ โดยการส่งสัญญาณแบบต่อเนื่องนั้นสัญญาณที่วัดได้เป็นอะนาล็อก ขนาดของคลื่นจะลดลงเมื่อคลื่นเดินทางผ่านฟองอากาศ ส่วนการส่งสัญญาณแบบพัลส์จะมีความแม่นยำกว่า จะสามารถวัดทั้งขนาดของคลื่นและเวลาในการรับสัญญาณคลื่น ข้อดีคือสามารถวัดฟองอากาศได้โดยตัวตรวจรู้ไม่ต้องสัมผัสกับสารละลาย มีความแม่นยำสูง การสะสมของอนุภาคไม่ส่งผลต่อการวัด สามารถใช้ท่อนำส่งสารละลายประเภทใดก็ได้ ข้อเสียคือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีราคาค่อนข้างแพง



รูปที่ 2.14 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ Ultrasonic

2.2.1.2 IR or Photoelectric bubble sensor

ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ IR หรือ Photoelectric มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ ลักษณะ โครงสร้างของตัวตรวจรู้ดังรูปที่ 2.15 หลักในการตรวจรู้คือเมื่อมีฟองอากาศเดินทางผ่านบริเวณช่องรับส่งแสง เวลาในการรับส่งสัญญาณจะช้าลง ข้อดีคือตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ IR สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบทางการแพทย์ได้ง่ายและมีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้หลอดนำส่งสารละลายที่โปร่งใสหรือโปร่งแสงเท่านั้นและการสะสมของอนุภาคจะส่งผลให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 2.15 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบ IR

2.2.1.3 Capacitive bubble sensor

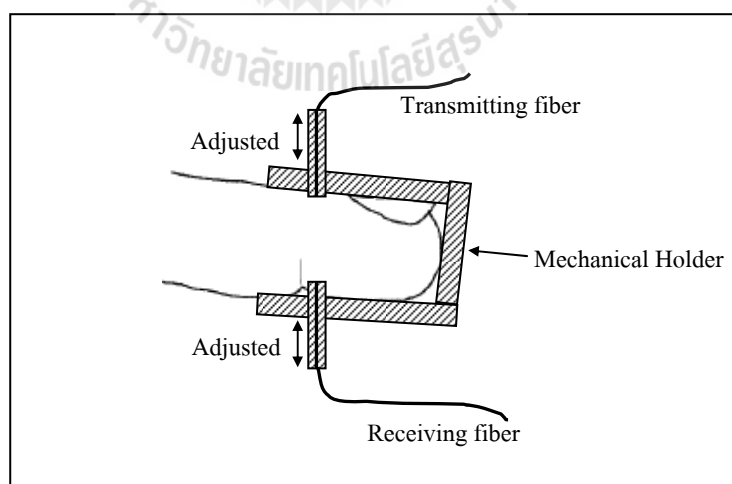
ตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบตัวเก็บประจุอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุในการตรวจรู้ฟองอากาศ ข้อดีคือสามารถใช้งานได้โดยตัวตรวจรู้ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับสารละลาย ใช้ท่อนำส่งสารละลายประเภทใดก็ได้และการสะสมของอนุภาคภายในท่อไม่มีผลกระทบกับค่าความจุ ส่วนข้อเสียคือไม่สามารถตรวจพบฟองอากาศขนาดเล็กได้ ต้องมีการปรับเทียบตัวตรวจรู้กับท่อนำส่งสารละลายและมีราคาแพง

2.2.2 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ตัวตรวจรู้ฟองอากาศได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ตัวตรวจรู้ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งตัวตรวจรู้ที่ทำการศึกษานี้มีทั้งตัวตรวจรู้ฟองอากาศและตัวตรวจนับอนุภาค โดยจะเน้นไปที่หลักการทำงานของตัวตรวจรู้เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ โดย Koumpouros (2000) ได้นำเสนอแนวทางสำหรับออกแบบระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศในท่อนำส่งของเหลว 2 แบบ คือ แบบที่ใช้วงจรดิจิทัลและอนาล็อก เพื่อการเลือกใช้งานที่เหมาะสมกับความต้องการ โดยการส่งสัญญาณความถี่อัลตราโซนิกผ่านท่อนำส่งของเหลวและมีตัวรับสัญญาณอยู่อีกด้านเพื่อรอรับสัญญาณ พบว่าแบบที่ใช้วงจรดิจิทัลสามารถตรวจจับฟองอากาศได้โดยการนับเวลาที่ส่งสัญญาณจนมาถึงตัวรับสัญญาณ

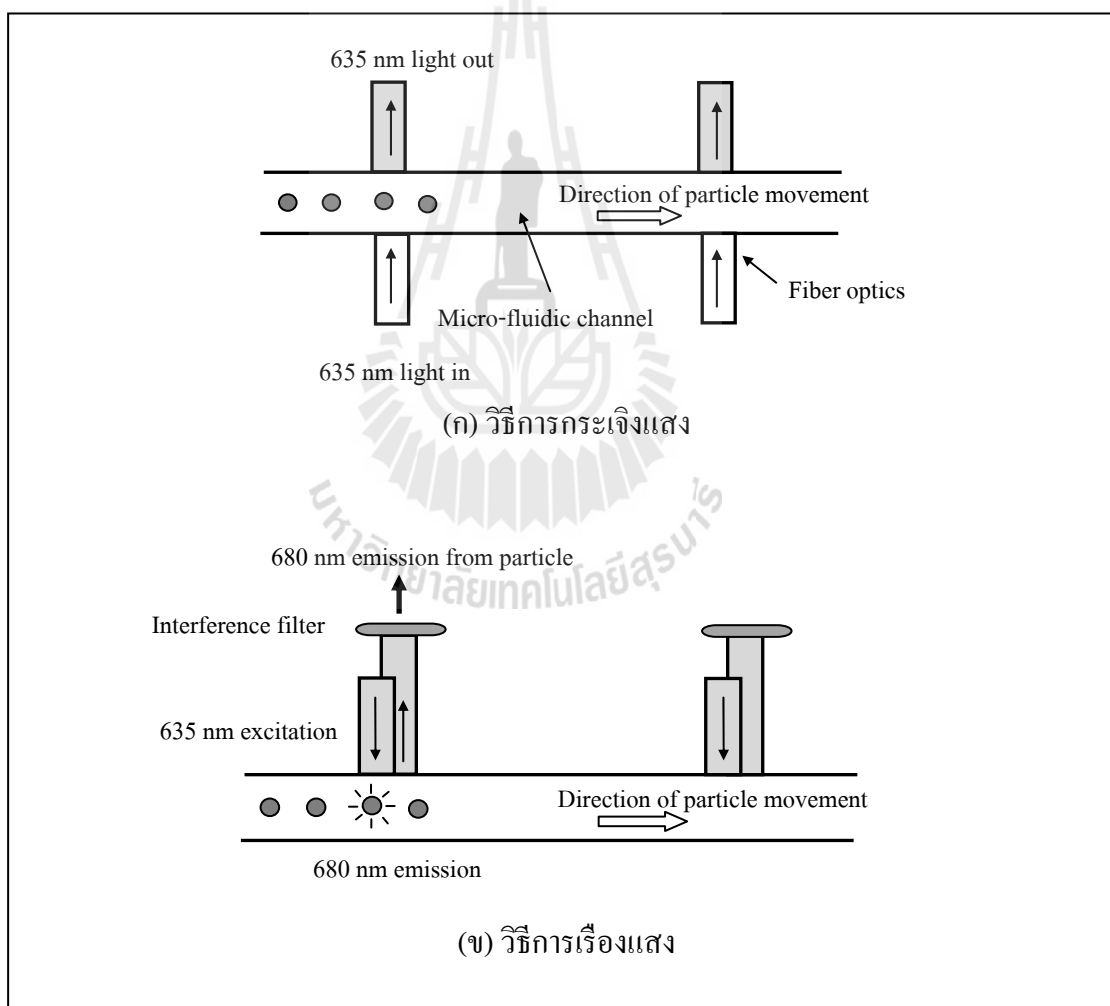
(time delay) ซึ่งหากฟองอากาศมีขนาดใหญ่เวลาก็จะเพิ่มขึ้นตามและวงจรนี้จะสามารถตรวจจับฟองอากาศที่มีขนาดได้ไม่เกิน 1.44 mm ส่วนวงจรอนาล็อกสามารถตรวจจับฟองอากาศได้โดยการวัดการลดทอนของสัญญาณ เมื่อมีอากาศอยู่ในท่อนำส่งของเหลวเพียงอย่างเดียวสัญญาณที่ได้เกือบจะเป็นศูนย์ แต่ถ้ามีอากาศและของเหลวอยู่ในท่อนำส่งของเหลวสัญญาณก็จะลดทอนลงขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ Jenderka (2000) ได้สร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศในระบบไหลเวียนโลหิตเพื่อพัฒนาและปรับใช้กับระบบควบคุมอัตโนมัติและการวัดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวตรวจรู้จะใช้หลักการส่งสัญญาณความถี่อัลตราโซนิกขนาด 2 MHz ผ่านท่อนำส่งของเหลวและวัดสัญญาณเอาต์พุต โดยสามารถตรวจจับฟองอากาศที่มีขนาด 10 μm ถึง 120 μm

Lyrouras (2002) ได้เสนอแนวความคิดในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้สำหรับวัดปริมาณของเลือดในหลอดเลือดและวัดการเต้นของชีพจรบริเวณนิ้วมือของมนุษย์ด้วยเทคนิคทางแสง โดยสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาวินิจฉัยโรคเกี่ยวกับหลอดเลือดและโรคเสื่อมต่าง ๆ ได้ ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแสงจากไดโอดเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 800 nm เป็นแสงในย่านอินฟราเรดส่งแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงและผ่านบริเวณนิ้วมือ มีอุปกรณ์รับแสงอยู่อีกด้านเพื่อวัดปริมาณความเข้มแสงที่ผ่านบริเวณนิ้วมือมา ดังรูปที่ 2.16 ข้อดีของตัวตรวจรู้นี้คือสามารถวัดปริมาณของเลือดในหลอดเลือดและการเต้นของชีพจรได้จากภายนอก ส่วนข้อจำกัดก็คือสำหรับการใช้งานจะต้องวางตัวตรวจรู้บริเวณนิ้วชี้ห้ามเลยกระดูกข้อนิ้วเข้ามาด้านใน ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับส่งแสงจะต้องคงที่และต้องสัมผัสกับผิวหนัง ซึ่งเป็นไปไม่ได้ว่าแต่ละคนจะมีขนาดนิ้วมือที่เท่ากันทุกคน



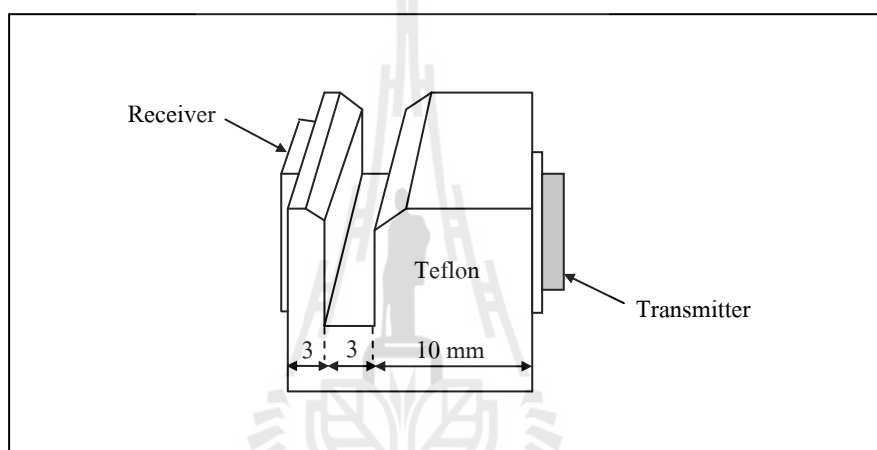
รูปที่ 2.16 ตัวตรวจรู้ของ Lyrouras (2002)

Morgan (2002) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับประมวลผลและนับอนุภาคชีวภาพด้วยเทคนิคทางแสง โดยใช้วิธีการกระเจิงแสงดังรูปที่ 2.17(ก) และวิธีการเรืองแสงดังรูปที่ 2.17(ข) ช่องทางเดินอนุภาคมีความกว้าง $200\text{ }\mu\text{m}$ สูง $130\text{ }\mu\text{m}$ ช่องสำหรับใส่เส้นใยแก้วนำแสงกว้าง $130\text{ }\mu\text{m}$ ใช้ชุดตัวรับส่งแสงมากกว่า 1 คู่ ซึ่งแต่ละคู่อยู่ห่างจากคู่ถัดไป 2 mm จำนวน peak ของสัญญาณที่ตัวรับแสงวัดได้จะบ่งบอกถึงจำนวนอนุภาค อนุมาณว่าอนุภาคเดินทางผ่านบริเวณตัวรับส่งแสงที่ละ 1 อนุภาค ส่วนความเร็วของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากระยะทางและเวลาที่อนุภาคเดินทางผ่านชุดตัวรับส่งแสง 2 ชุดที่อยู่ติดกัน ข้อจำกัดคือตัวตรวจรู้ใช้ได้เฉพาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากอนุภาคต้องผ่านบริเวณรับส่งแสงที่ละ 1 อนุภาคเท่านั้น



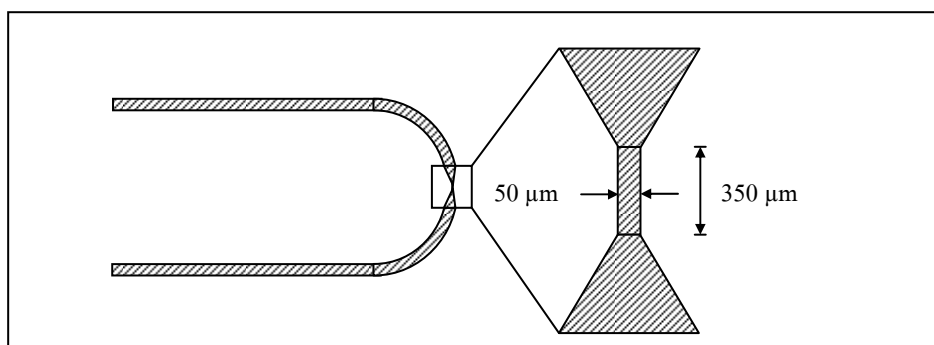
รูปที่ 2.17 ตัวตรวจรู้ของ Morgan (2002)

Ozeri (2006) ได้สร้างระบบตรวจรู้ฟองอากาศสำหรับการนำส่งสารเข้าสู่หลอดเลือดที่จะต้องหลีกเลี่ยงฟองอากาศ โดยใช้หลักการส่งคลื่นเสียง (อัลตราโซนิก) ผ่านของเหลวมายังตัวรับสัญญาณที่อยู่ฝั่งตรงข้ามเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โครงสร้างของตัวตรวจรู้ฟองอากาศดังรูปที่ 2.18 ตัวรับสัญญาณ PZT จะรับสัญญาณไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวรับสัญญาณแบบ PVDF แต่จะเริ่มอิ่มตัวเมื่อฟองอากาศมีขนาดเกิน 20 μl ส่วนตัวรับสัญญาณแบบ PVDF จะมีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้ครอบคลุมความยาวของท่อ ซึ่งสามารถวัดฟองอากาศที่มีขนาดถึง 80 μl ข้อดีคือง่ายและราคาไม่แพง



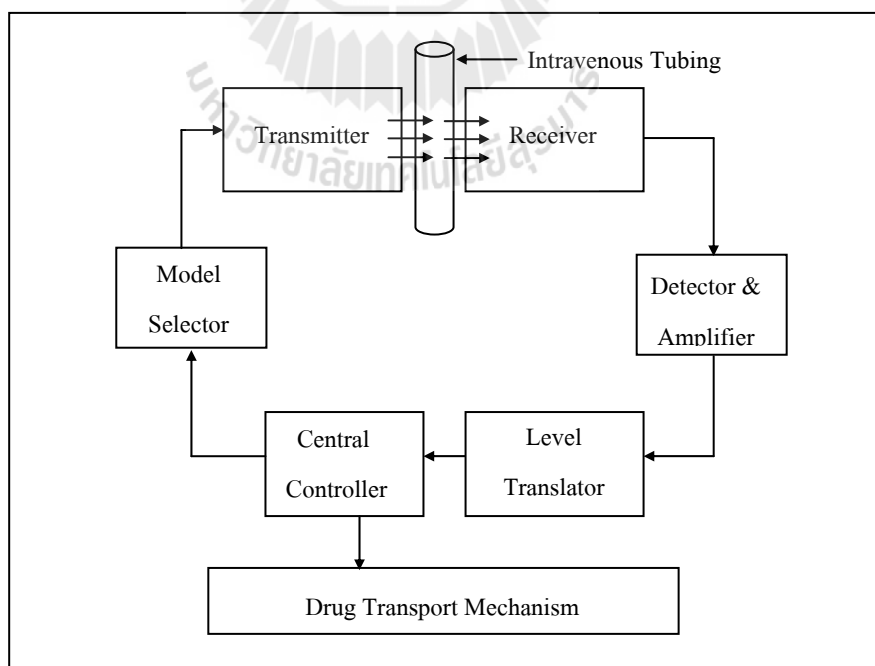
รูปที่ 2.18 ตัวตรวจรู้ของ Ozeri (2006)

Seemungkoon (2007) ได้ออกแบบและสร้างตัวตรวจนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยสร้างแม่พิมพ์โลหะ निकเกลบนฐานกระจกด้วยวิธีหุบโลหะด้วยไฟฟ้าและผลิตซ้ำด้วยซิลิโคน PDMS เพื่อเป็นช่องทางเดินจุลภาคของตัวตรวจรู้ ซึ่งช่องทางเดินดังกล่าวมีความกว้าง 50 μm สูง 70 μm และยาว 350 μm ดังรูปที่ 2.19 ขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยฟิล์มโลหะ Ti/Cu/Ni/Au จำนวน 2 ขั้ว วางตัวกันผ่านส่วนที่เล็กที่สุดภายในช่องทางเดินจุลภาคเพื่อตรวจวัดความต้านทานและใช้อนุภาคตัวอย่าง (polymethacrylate) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 μm ในการทดสอบตัวตรวจรู้ ข้อดีคือการสร้างแม่พิมพ์โลหะจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตและสามารถสร้างช่องทางเดินจุลภาคด้วยการผลิตซ้ำด้วยซิลิโคน PDMS ที่มีขนาดเท่าเดิม ข้อจำกัดคือในการวัดผลมีสัญญาณรบกวนมาก จึงจำเป็นต้องใช้ตัวตรวจรู้เพิ่มอีก 1 ตัวบรรจุเฉพาะสารละลายที่ไม่มีอนุภาค เพื่อนำสัญญาณมาหักลบกันและใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนเพิ่มเติม



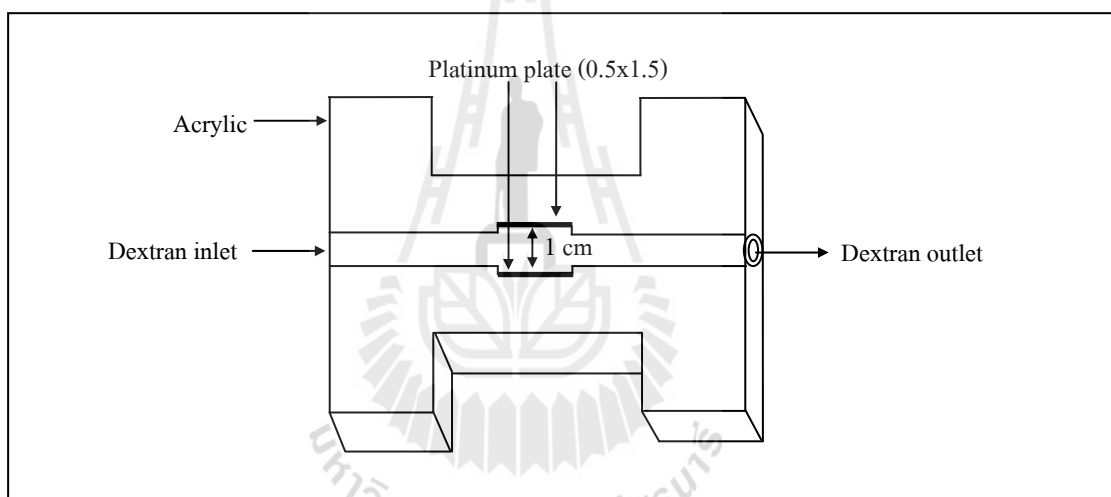
รูปที่ 2.19 ตัวตรวจรู้ของ Seemungkoon (2007)

Clinton (2008) ได้สร้างแบบจำลองและการควบคุมระบบการให้สารเข้าสู่หลอดเลือดดำด้วยเครื่องตรวจจับฟองอากาศด้วยแสง มีการจำลองระบบการตรวจจับฟองอากาศดังรูปที่ 2.20 โดยส่งแสงอินฟราเรดผ่านท่อบรรจุของเหลวและวัดแรงดันเอาท์พุทที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงที่ส่งผ่านท่อมายังอุปกรณ์รับแสง พบว่าการป้อนไฟให้กับแหล่งกำเนิดแสงแบบไดนามิกและความถี่แบบพัลส์ในช่วง 2 kHz ถึง 10 kHz เหมาะสำหรับการออกแบบตัวตรวจจับฟองอากาศด้วยแสง ซึ่งสามารถให้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้แม้ในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวน



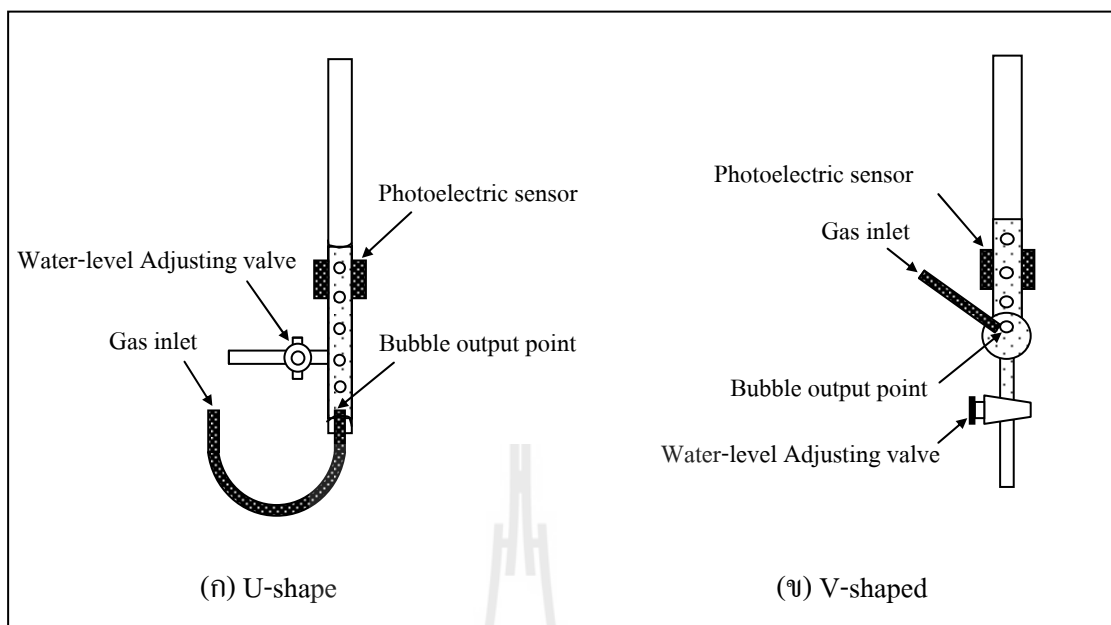
รูปที่ 2.20 ตัวตรวจรู้ของ Clinton (2008)

Adam (2008) ได้สร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศแบบตัวเก็บประจุสำหรับการย้ายเลือดในไตเทียม โครงสร้างของตัวตรวจรู้ประกอบด้วยแผ่นแพลทินัม 2 แผ่น พื้นที่ 0.75 cm^2 ระยะห่างระหว่างแผ่น 1 cm ดังรูปที่ 2.21 ใช้สาร dextran 70 แทนเลือดเพื่อหลีกเลี่ยงการแข็งตัวขณะที่ดำเนินการทดลอง หลักการทำงานคือวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุเนื่องจากมีฟองอากาศ ตัวตรวจรู้มีความไวเท่ากับ $2 \text{ mV}/0.079 \text{ pF}$ ที่ 250 kHz ต่อมาในปี 2009 ได้ทำการศึกษาผลของความถี่ที่ป้อนให้กับระบบ (30 Hz และ 3 kHz) พบว่าผลการทดลองกับการจำลองผลมีความสอดคล้องกัน โดยตัวตรวจรู้มีความไวเท่ากับ 11 mV/nF ที่ 30 Hz และ 0.4 mV/nF ที่ 30 kHz ข้อดีคือมีราคาถูกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่น



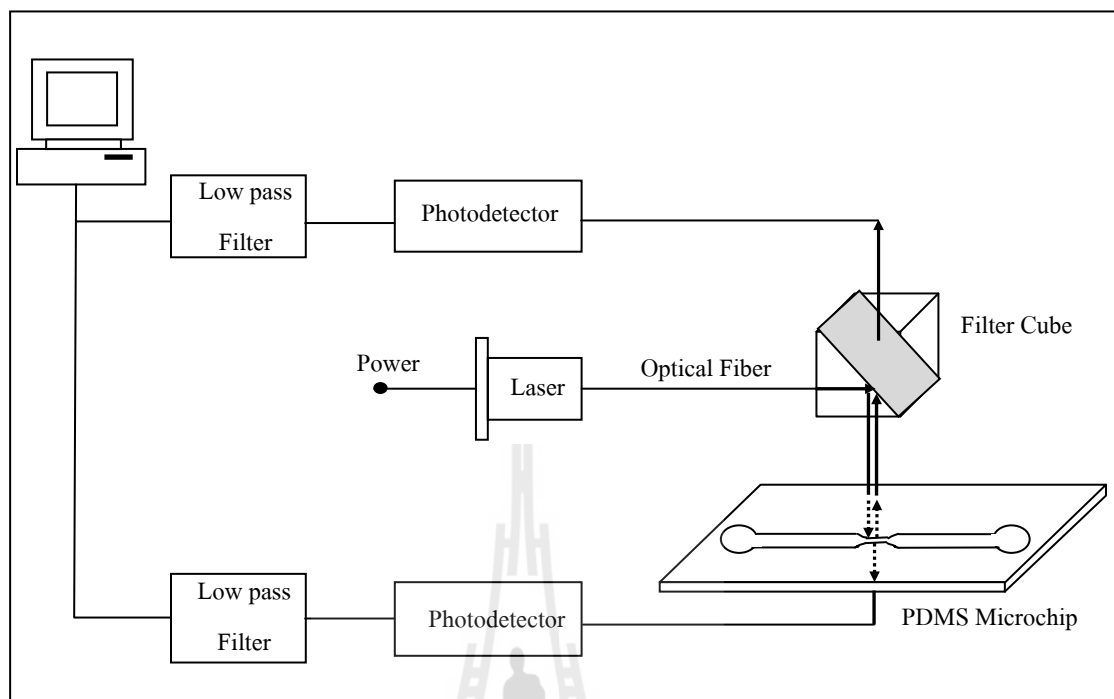
รูปที่ 2.21 ตัวตรวจรู้ของ Adam (2008)

Tao JIN (2008) ได้สร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศด้วยเทคนิค photoelectric สำหรับตรวจสอบการรั่วไหลของวาล์วแก๊สเย็นยิ่งยวด (cryogenic) โดยได้ทดสอบที่ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ บริเวณที่ต่อท่อเข้ากับหลอดแก้วสำหรับทดสอบ (ด้านล่างและด้านข้าง) ขนาดความยาวของท่อ ($0 \ 1 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8$ และ 10 m) และอัตราการรั่วไหล ($10 \ 20 \ 30$ และ 40 bubbles/min) พบว่าการต่อท่อเข้ากับหลอดแก้วบริเวณด้านข้างหรือ V-shaped จะทำให้ได้อัตราการไหลของฟองอากาศและขนาดของฟองอากาศคงที่ ส่วนความยาวของท่อแก๊สจะส่งผลต่อเวลาที่ฟองอากาศฟองแรกผ่านช่องการวัดและอัตราการไหลของฟองอากาศ ตัวตรวจรู้ฟองอากาศนี้สามารถใช้งานได้ดีเมื่อมีอัตราการไหลของฟองต่ำกว่า 200 ฟองต่อนาที ข้อดีคือตัวตรวจรู้มีโครงสร้างขนาดเล็กและต้นทุนต่ำ



รูปที่ 2.22 ตัวตรวจรู้ของ Tao JIN (2008)

Omar (2009) ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดความขุ่นของน้ำด้วยเทคนิคทางแสง โดยการพัฒนาตัวตรวจวัดความขุ่นของน้ำด้วยเทคนิคทางแสงมีข้อจำกัดหลายอย่าง ก่อนที่จะเน้นในเรื่องความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการผลิตได้ ซึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณาได้แก่ ความยาวคลื่นและความเข้มแสงของอุปกรณ์กำเนิดแสง ความไวของอุปกรณ์รับแสง มุมของการวัดระหว่างแสงที่ตกกระทบลงไปใต้น้ำกับที่ตั้งของอุปกรณ์รับแสง คุณสมบัติของอนุภาค เช่น ขนาด สี รูปร่างและองค์ประกอบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความขุ่นและความจุของอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ ซึ่งมีผลต่อทิศทางการกระจายแสงและความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนด้วยอนุภาค นอกจากนี้การเพิ่มระยะทางเดินของแสงอาจจะช่วยเพิ่มความไวให้กับตัวตรวจรู้ที่พัฒนาขึ้นได้ Chen (2009) ได้สร้างตัวตรวจนับอนุภาคด้วยเทคนิคทางแสงที่สามารถบอกทั้งขนาดและจำนวนของอนุภาค โดยโครงสร้างของช่องทางเดินจุลภาคสร้างจาก PDMS ที่ได้จากการผลิตซ้ำจากแม่พิมพ์ SU-8 มีขนาดความกว้างของช่อง $50\ \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 2.23 อนุภาคตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมี 4 ขนาดคือเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 3 4.8 6 และ $10.2\ \mu\text{m}$ ระบบการตรวจรู้มี 2 ระบบคือ แสงส่งผ่านช่องทางเดินจุลภาคจะบ่งบอกทั้งขนาดและจำนวนของอนุภาค ส่วนแสงที่สะท้อนกลับจะบอกเฉพาะจำนวนของอนุภาคเท่านั้น ข้อดีคือกระบวนการสร้างช่องทางเดินจุลภาคช่วยลดต้นทุนในการผลิต ข้อจำกัดคือระบบใช้วิธี electro-osmotic flow ในการควบคุมอัตราการไหลจึงส่งผลให้มีอัตราการไหลที่ค่อนข้างต่ำและอุปกรณ์รับส่งแสงมีราคาค่อนข้างแพง



รูปที่ 2.23 ตัวตรวจรู้ของ Chen (2009)

Zhang (2012) ได้นำเสนอการวัดขนาดฟองอากาศที่กระจายอยู่ในของเหลวด้วยวิธีการทางแสงและเสียง ถึงตอนนี้ระบบการวัดขนาดของฟองอากาศจะยังคงมีความซับซ้อนมาก จุดมุ่งหมายของการวิจัยนี้คือการวัดขนาดฟองที่กระจายอยู่ได้อย่างถูกต้องและง่ายด้วยวิธีการทางแสงและเสียง กล้องความละเอียดสูงและการประมวลผลภาพดิจิทัลของฟองอากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบทางแสง ความเร็วของเสียงและการลดทอนคลื่นตรวจจับด้วยวิธีทางเสียง ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการนี้มีความน่าเชื่อถือ

2.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้เชิงแสง ทั้งตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้างตัวตรวจรู้เชิงแสงสำหรับงานวิจัยนี้ ส่วนในบทที่ 3 จะกล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานของระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่มีความจำเป็นในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศต่อไป

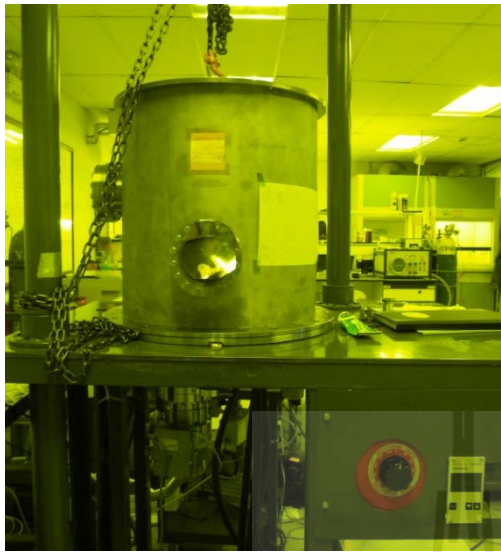
บทที่ 3

กระบวนการพื้นฐานของระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

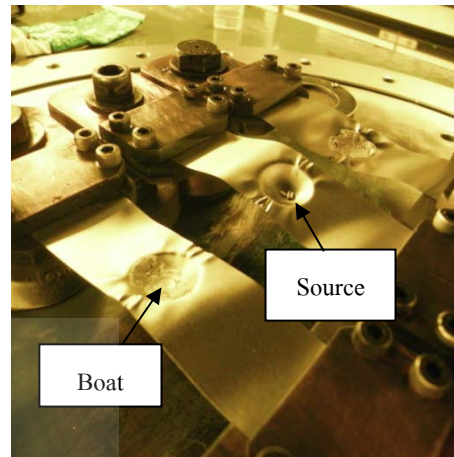
ในบทนี้จะนำเสนอกระบวนการพื้นฐานของระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่มีความจำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย การเคลือบโลหะ การเคลือบชั้นฟิล์มสารไวแสง กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การสกัดเนื้อวัสดุ การเชื่อมต่อพื้นผิวและการสร้างหน้ากาอุดักซ์บริงส์อิเล็กซ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 กระบวนการเคลือบโลหะ (Metallization)

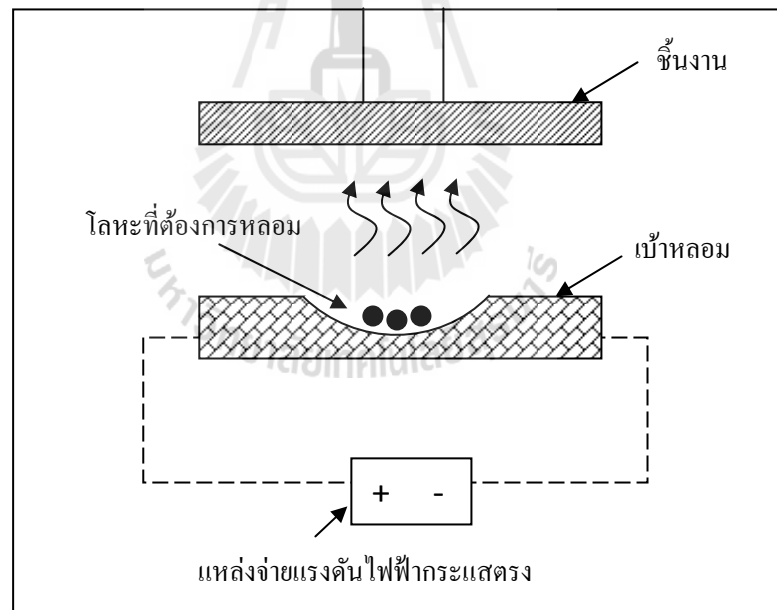
กระบวนการเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Evaporation) เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางลงบนชิ้นงาน สามารถเคลือบฟิล์มได้หนาตั้งแต่ระดับอังสตรอมจนถึงไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณโลหะที่ใช้เคลือบ โดยการเคลือบโลหะด้วยวิธีนี้จะต้องทำในห้องความดันต่ำประมาณ 10^{-5} - 10^{-6} torr ส่วนวัสดุที่ใช้เคลือบ (Source) จะถูกนำมาวางลงบนเบ้าหลอม (Boat) ที่เป็นโลหะทั้งสแตน เนื่องจากทั้งสแตนมีจุดหลอมเหลวสูงมาก ดังรูปที่ 3.1(ข) ซึ่งสามารถที่จะเคลือบโลหะได้สูงสุด 3 ชั้นต่อการเดินเครื่องหนึ่งครั้ง โดยโลหะที่นิยมนำมาเคลือบ ได้แก่ เงิน ไททานเนียม ทองแดง อะลูมิเนียม และโครเมียม เป็นต้น เมื่อนำวัสดุมาใส่ในเบ้าหลอมแล้วให้ความร้อนที่เบ้าหลอมจนวัสดุในเบ้าหลอมเกิดการหลอมเหลวกลายเป็นไอและลอยขึ้นไปสัมผัสกับชิ้นงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ไอระเหยจึงกลายเป็นของแข็งเคลือบอยู่บนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.1(ค) ซึ่งการเคลือบโลหะด้วยวิธีนี้วัสดุที่ใช้เคลือบต้องเป็นโลหะเท่านั้น



(ก) เครื่องเคลือบโลหะ



(ข) เป้าหลอมโลหะ

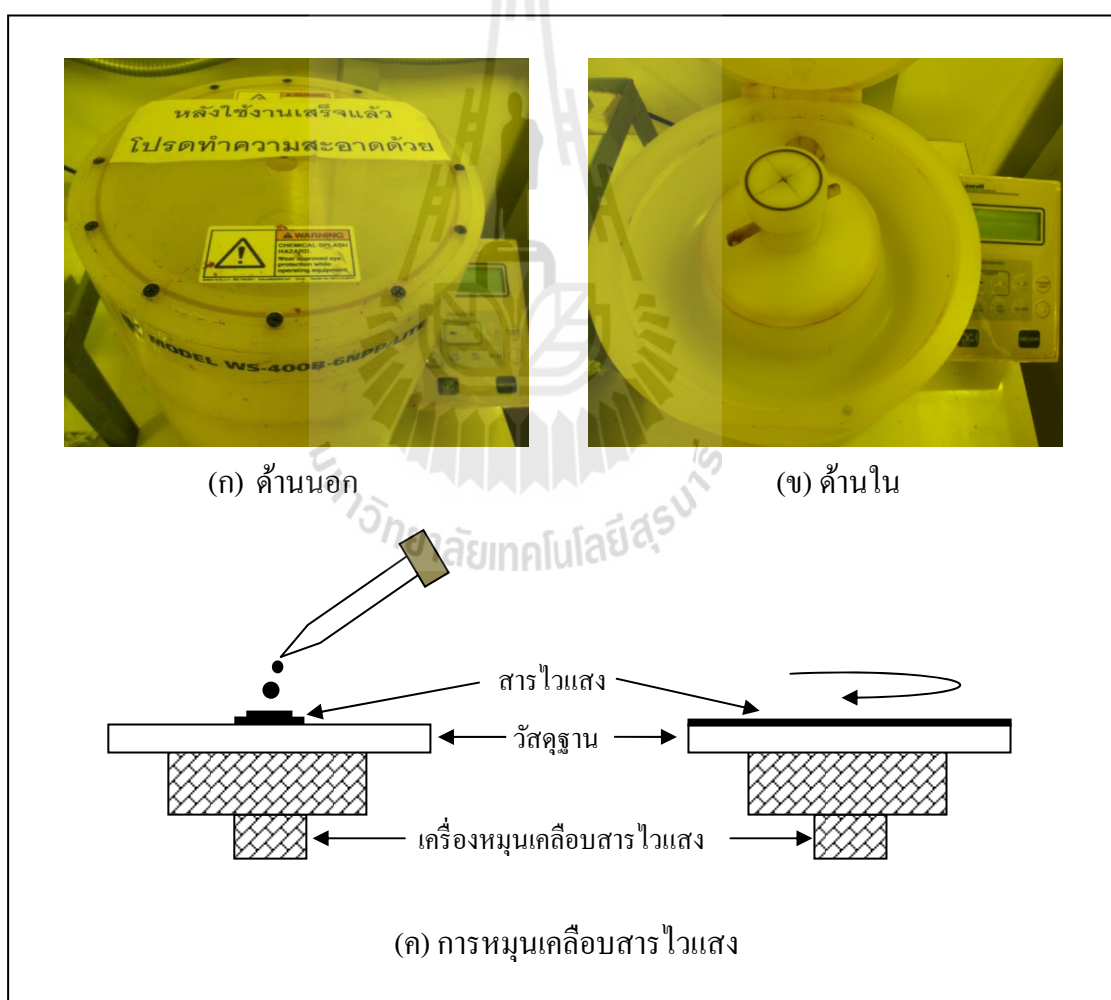


(ค) วงจรและอุปกรณ์เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ

รูปที่ 3.1 เครื่องเคลือบโลหะด้วยไอระเหยในสุญญากาศ

3.2 กระบวนการเคลือบชั้นฟิล์มสารไวแสง (Coating-photosensitive)

การเคลือบสารไวแสงลงบนฐานรองมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือ การหมุนเคลือบสารไวแสงและการหลอมรวมสารไวแสงแบบผง โดยการหมุนเคลือบสารไวแสงจะได้ความหนาที่น้อยจึงเหมาะกับการเคลือบสารไวแสงเพื่อนำมาสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หรือการเคลือบชั้นฟิล์มเพื่อเชื่อมต่อพื้นผิว ส่วนการหลอมรวมสารไวแสงแบบผงนั้นจะได้ความหนาที่มากกว่าการใช้เครื่องหมุนเคลือบ จึงมักจะใช้สร้างเป็นชิ้นงานสำหรับนำไปฉายรังสีเอกซ์เพื่อทำโครงสร้างใช้งานต่อไป การหมุนเคลือบสารไวแสงเป็นการเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบดังรูปที่ 3.2 สามารถสร้างความหนาของสารไวแสงได้ตั้งแต่ 1-300 μm ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของสารไวแสงคือความเร็วรอบของการหมุนเคลือบและความหนืดของสารไวแสง

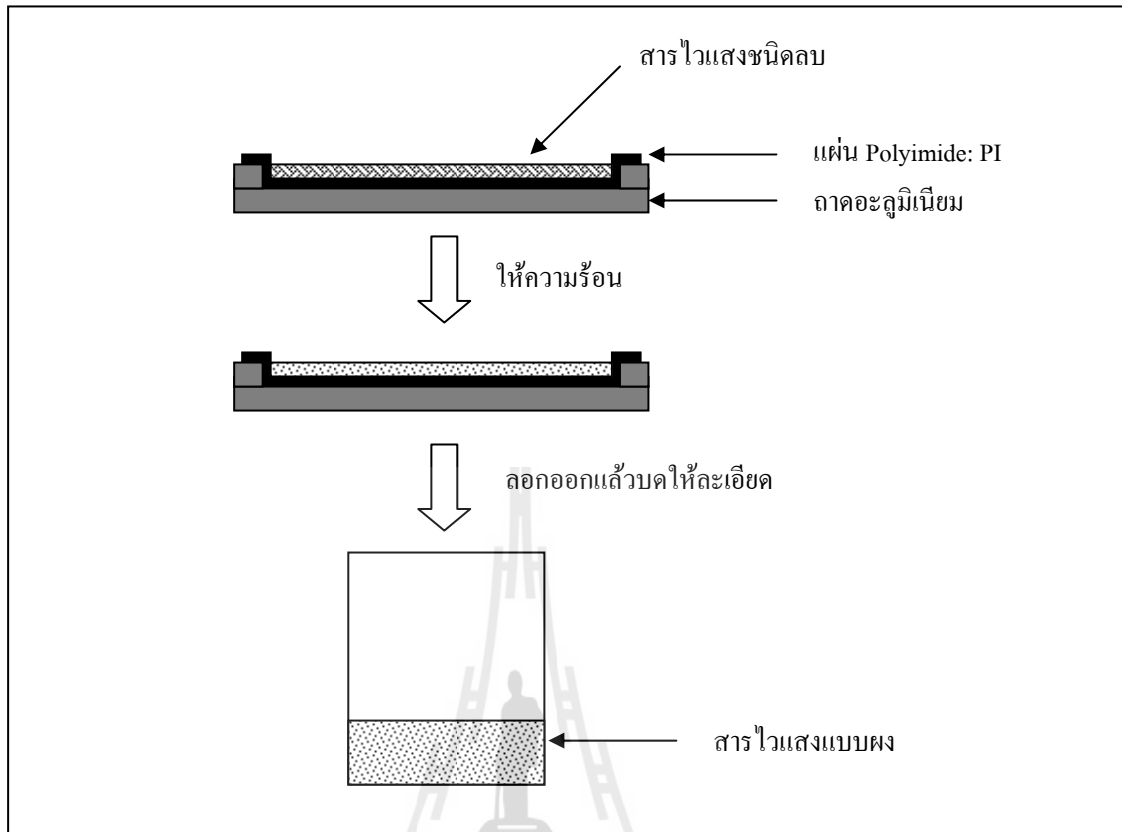


รูปที่ 3.2 เครื่องหมุนเคลือบ (spinner)

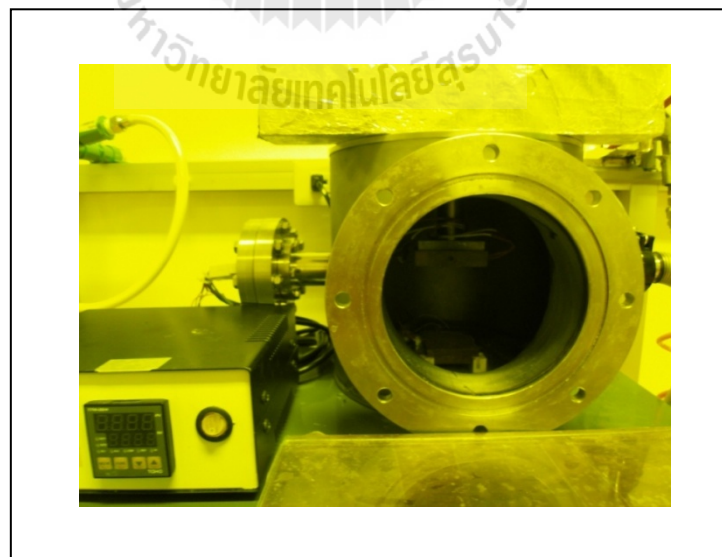
การเคลือบสารไวแสงด้วยการหลอมรวมสารไวแสงแบบผง วิธีนี้จะทำได้เฉพาะสารไวแสงชนิดลบเท่านั้น ซึ่งนิยมใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8 2100) มาทำเป็นผงก่อน โดยเริ่มจากการติดแผ่นเทปพอลิอิมิด (Polyimide: PI) ลงบนถาดอะลูมิเนียมขนาดพื้นที่ 400 cm^2 และทำความสะอาดผิวของเทปพอลิอิมิด จากนั้นเทสารไวแสงชนิดลบลงไปในถาดประมาณ 7 กรัมแล้วเกลี่ยให้ทั่วแผ่น นำไปตั้งบนแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง สารไวแสงจะอยู่ในรูปของแข็ง จากนั้นแกะสารไวแสงที่แข็งตัวแล้วออกด้วยการลอกแผ่นพอลิอิมิดออกจากถาดอะลูมิเนียม แล้วนำไปบดให้ละเอียดเพื่อให้ในกระบวนการต่อไปดังรูปที่ 3.3 หลังจากเตรียมสารไวแสงแบบผงแล้วต่อไปจะเป็นการหลอมรวมสารไวแสงแบบผงในห้องสุญญากาศดังรูปที่ 3.4 โดยเริ่มจากการวางกรอบโพลีไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) วางลงบนฐานรองแล้วใส่ชุดประกอบฐานรองลอคให้แน่น จากนั้นใส่ผงสารไวแสงลงในบล็อก PDMS แล้วนำเข้าในห้องสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกและให้ความร้อนที่ 105°C โดยปริมาณผงของสารไวแสงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความหนา ขนาดของชิ้นงาน ความหนาแน่นของสารไวแสง รวมทั้งค่า Factor ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 เมื่อสารไวแสงหลอมเหลวและไม่มีฟองอากาศในเนื้อของสารไวแสงก็นำชิ้นงานออกจากห้องสุญญากาศแล้วปล่อยให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารไวแสงจะแข็งตัว จากนั้นนำชิ้นงานออกจากตัวประกอบแล้วนำไปขัดให้เรียบเพื่อใช้งานต่อไป

$$M = F \times D \times A \times T \quad (3.1)$$

- เมื่อ M คือ มวลของผงสารไวแสง SU-8 2100 (g)
 D คือ ความหนาแน่นของ SU-8 2100 มีค่าเท่ากับ $1.2 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
 A คือ พื้นที่ของเบ้าหลอม (cm^2)
 T คือ ความหนาของสารไวแสงที่ต้องการ (μm)
 F คือ ค่า Factor โดยที่ค่า Factor สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งจากการใช้งานจริงใช้ค่า Factor เท่ากับ 0.8



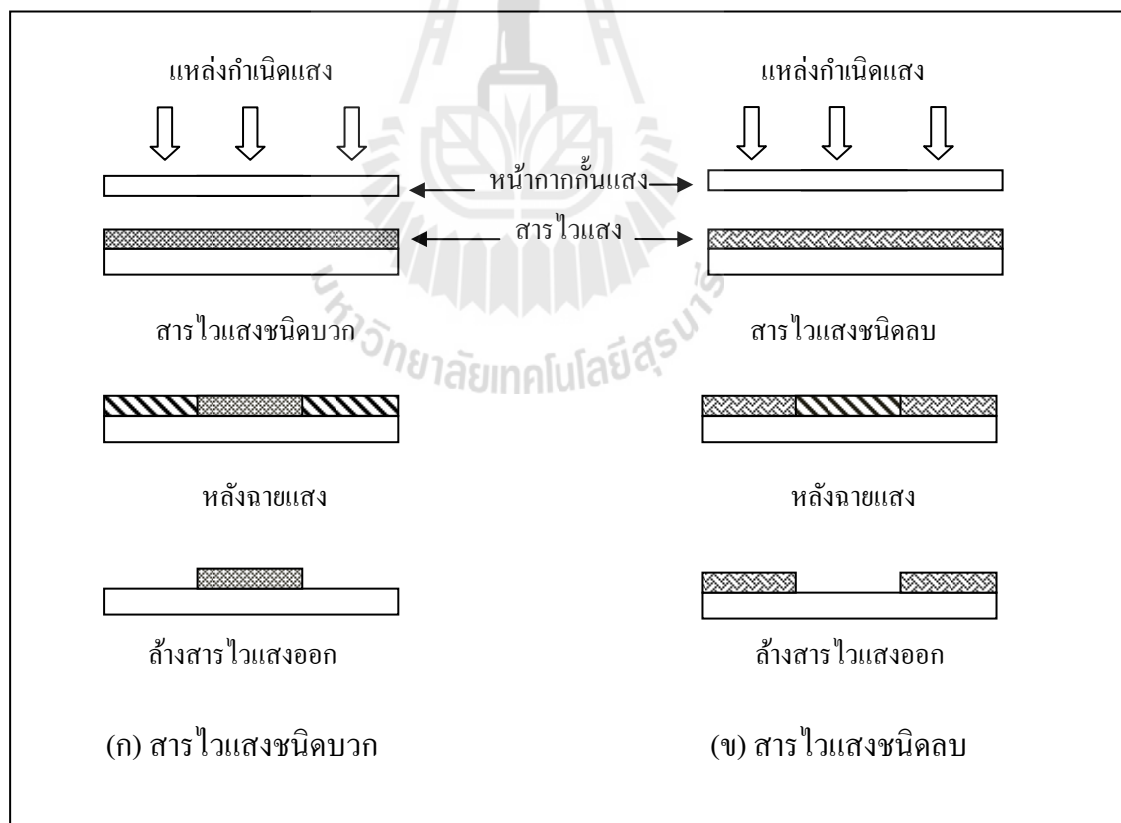
รูปที่ 3.3 กระบวนการทำสารไวแสงแบบผง



รูปที่ 3.4 ห้องสุญญากาศ

3.3 กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process)

กระบวนการลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายทอดลวดลายด้วยการฉายแสงผ่านหน้ากากกันแสง (Mask) ลงบนสารไวแสง (Photoresist) แสงที่ใช้ในกระบวนการนี้จะมีสองชนิดด้วยกันคือ แสงในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอกซ์ ส่วนสารไวแสงก็จะแบ่งออกได้เป็นสองชนิดคือ สารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ โดยขั้นตอนจะเริ่มจากการนำสารไวแสงที่เคลือบบนฐานรองเรียบรื้อแล้วไปฉายแสงผ่านหน้ากากดูดซับแสง เมื่อสารไวแสงโดนแสงจะเกิดปฏิกิริยาก่อให้เกิดลวดลายขึ้นมาตามลวดลายของหน้ากากดูดซับแสง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (Developer) สำหรับสารไวแสงชนิดบวกส่วนที่โดนแสงจะอ่อนตัวและถูกล้างออก ส่วนที่ไม่โดนแสงจะยังคงอยู่บนฐานรอง ในกรณีของสารไวแสงชนิดลบส่วนที่ไม่โดนแสงจะถูกล้างออกและส่วนที่โดนแสงจะแข็งตัวกลายเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 3.5 โดยข้อดีข้อเสียของสารไวแสงแต่ละชนิดจะแตกต่างกันคือ สารไวแสงชนิดบวกสามารถล้างออกได้ง่าย แต่สารไวแสงมีความหนาไม่มากนัก ส่วนสารไวแสงชนิดลบสามารถสร้างความหนาได้มากแต่สกัดทิ้งได้ยาก



รูปที่ 3.5 กระบวนการลิโธกราฟีของสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ

3.4 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

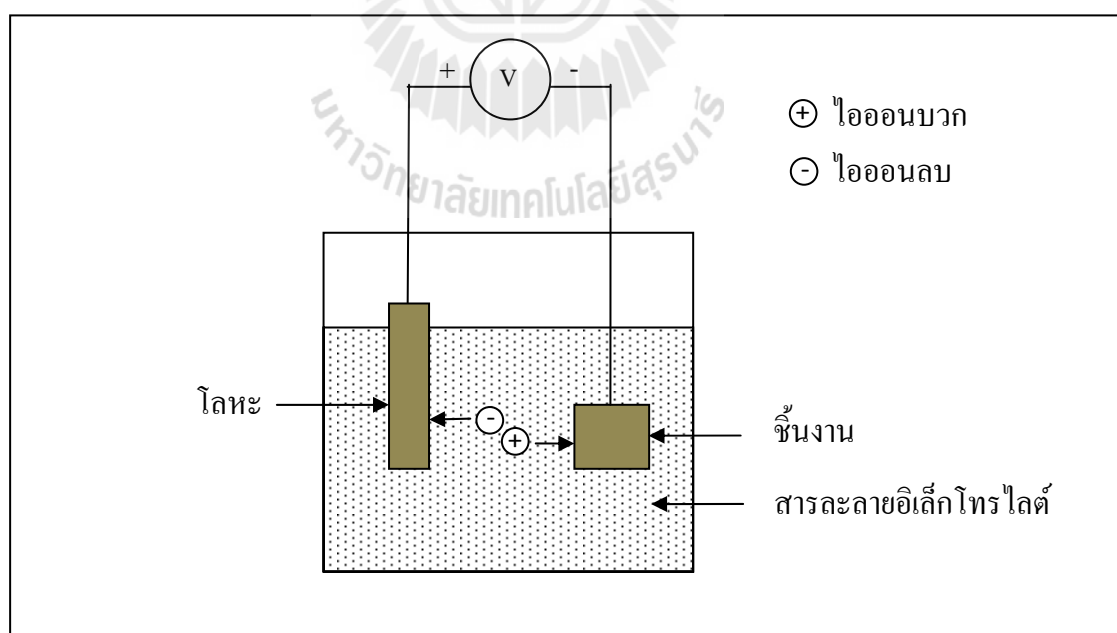
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยโลหะที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ เงิน ทองแดง นิกเกิล และทองคำ เป็นต้น มีหลักการคือต่อขั้วแอโนดหรือขั้วบวกเข้ากับโลหะที่ใช้ในการชุบและต่อขั้วแคโทดหรือขั้วลบเข้ากับวัสดุที่ต้องการจะชุบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีไอออนของโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะที่จะใช้ชุบ ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อะตอมจะแตกตัวเป็นไอออนบวกกับไอออนลบ ซึ่งไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด ซึ่งต่อเข้ากับชิ้นงานเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ไอออนบวกกับอิเล็กตรอนรวมกันเป็นอะตอมของธาตุเกาะที่ผิวชิ้นงาน ดังนั้นผิวของชิ้นงานต้องนำไฟฟ้าจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้



เมื่อ M คือ วัสดุที่เกิดปฏิกิริยา

M^{n+} คือ จำนวนไอออนของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา

ne^- คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.6 วงจรการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

3.5 กระบวนการกัดเนื้อวัสดุ (Etching)

กระบวนการกัดเนื้อวัสดุมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือ การกัดแบบแห้ง (Dry etching) และการกัดแบบเปียก (Wet etching) โดยการกัดแบบแห้งเป็นการกัดเนื้อวัสดุออกด้วยการใช้ไอออนของธาตุ (ส่วนมากใช้แก๊ส) มาทำปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุ เช่น การพลาสมาด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) อาร์กอน (Ar) ฟลูโอโรคาร์บอน (CF_4) เป็นต้น เป็นการกัดเนื้อวัสดุออกได้ทั้งแบบทิศทางเดียว (Anisotropic) หรือทุกทิศทาง (Isotropic) ส่วนการกัดแบบเปียกจะใช้สารละลายทำปฏิกิริยากับเนื้อสารและหลุดออกจากเนื้อชิ้นงาน ซึ่งจะใช้สารละลายเป็นตัวกัดกร่อนชิ้นงานบริเวณที่ไม่ต้องการออก ตัวอย่างสารละลายที่ใช้ในการกัดโลหะดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารละลายที่ใช้ในการกัดโลหะ

สารละลาย	โลหะ
HF	ไททาเนียม
$H_2O_2 : NH_4OH$ (1:10)	เงิน, ทองแดง
$(NH_4)_2S_2O_8$ 20%wt	ทองแดง
KOH : Fe	สารไวแสง AZ

3.6 การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับซิลิโคน PDMS

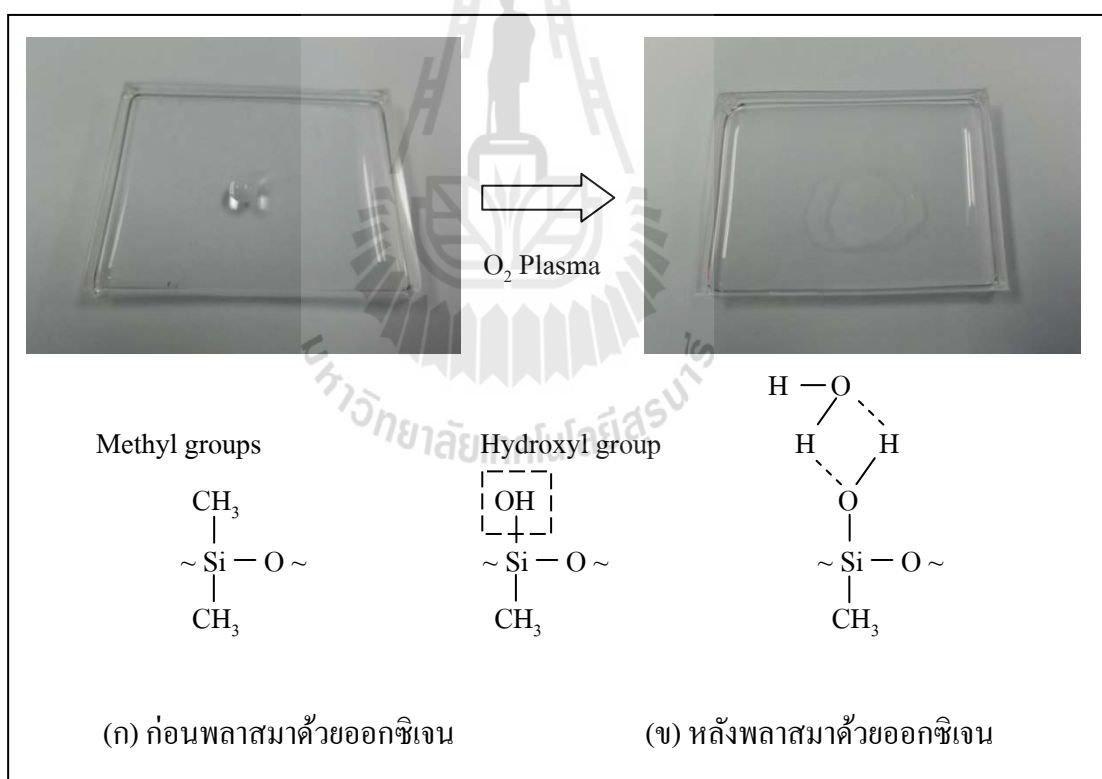
การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับซิลิโคน PDMS สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเชื่อมต่อพื้นผิวแบบเปียกด้วยการหมุนเคลือบซิลิโคน PDMS และการเชื่อมต่อพื้นผิวแบบแห้งด้วยการพลาสมาออกซิเจน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 การเชื่อมต่อพื้นผิวแบบเปียก

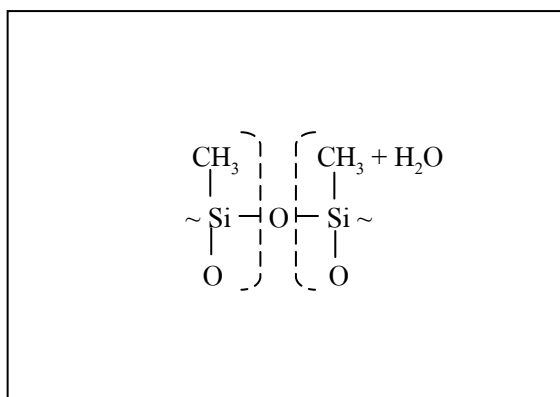
โดยวิธีนี้จะสามารถแยกออกเป็น 2 แบบ ซึ่งแบบแรกจะนำแผ่นกระจกมาหมุนเคลือบซิลิโคน PDMS ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที เสร็จแล้วนำชิ้นงานซิลิโคน PDMS มาประกบลงบนแผ่นกระจกดังกล่าว อบด้วยอุณหภูมิ $90^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนแบบที่สองจะนำแผ่นกระจกมาหมุนเคลือบซิลิโคน PDMS ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที อบด้วยอุณหภูมิ $90^\circ C$ ให้ซิลิโคน PDMS หนืด แล้วจึงนำชิ้นงานซิลิโคน PDMS มาประกบลงบนแผ่นกระจกดังกล่าว อบด้วยอุณหภูมิ $90^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยการเชื่อมต่อพื้นผิวแบบนี้มีความเสี่ยงต่อการที่ซิลิโคน PDMS จะเข้าไปอุดตันช่องทางเดินจุลภาคได้ง่าย

3.6.2 การเชื่อมต่อพื้นผิวแบบแห้ง

การเชื่อมต่อพื้นผิวแบบแห้งโดยวิธีการพลาสมาด้วยแก๊สออกซิเจน วิธีการเชื่อมต่อพื้นผิวแบบนี้จะก่อให้เกิดการเชื่อมติดกันอย่างถาวรของพื้นผิวและยังป้องกันสารละลายไหลออกไปจากช่องทางเดินของของไหลที่ต้องการ เริ่มจากการนำสำเนาโครงสร้าง (PDMS) ไปพลาสมาด้วยออกซิเจน เพื่อสร้างให้หน้าสัมผัสของซิลิโคน PDMS จากเดิมที่อยู่ในสถานะ hydrophobic (พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ) เปลี่ยนเป็นสถานะ hydrophilic (พื้นผิวที่ชอบน้ำ) หากลองหยดน้ำลงที่ผิวของซิลิโคน PDMS ก่อนการพลาสมาด้วยออกซิเจนจะพบว่าหยดน้ำจะกลิ้งบนผิวดังกล่าวเหมือนหยดน้ำกลิ้งบนใบบัวถ้าเป็นพื้นผิวของซิลิโคน PDMS หลังการพลาสมาด้วยออกซิเจนหยดน้ำจะกระจายตัวออก ดังรูปที่ 3.7 สถานะที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น hydrophilic ของซิลิโคน PDMS จะก่อให้เกิดการเชื่อมติดกันอย่างถาวรของพันธะ Si-O-Si ระหว่างผิวหน้าสัมผัสของ PDMS-กระจก หรือ PDMS-Si หรือ PDMS-PDMS ดังแสดงในรูปที่ 3.8



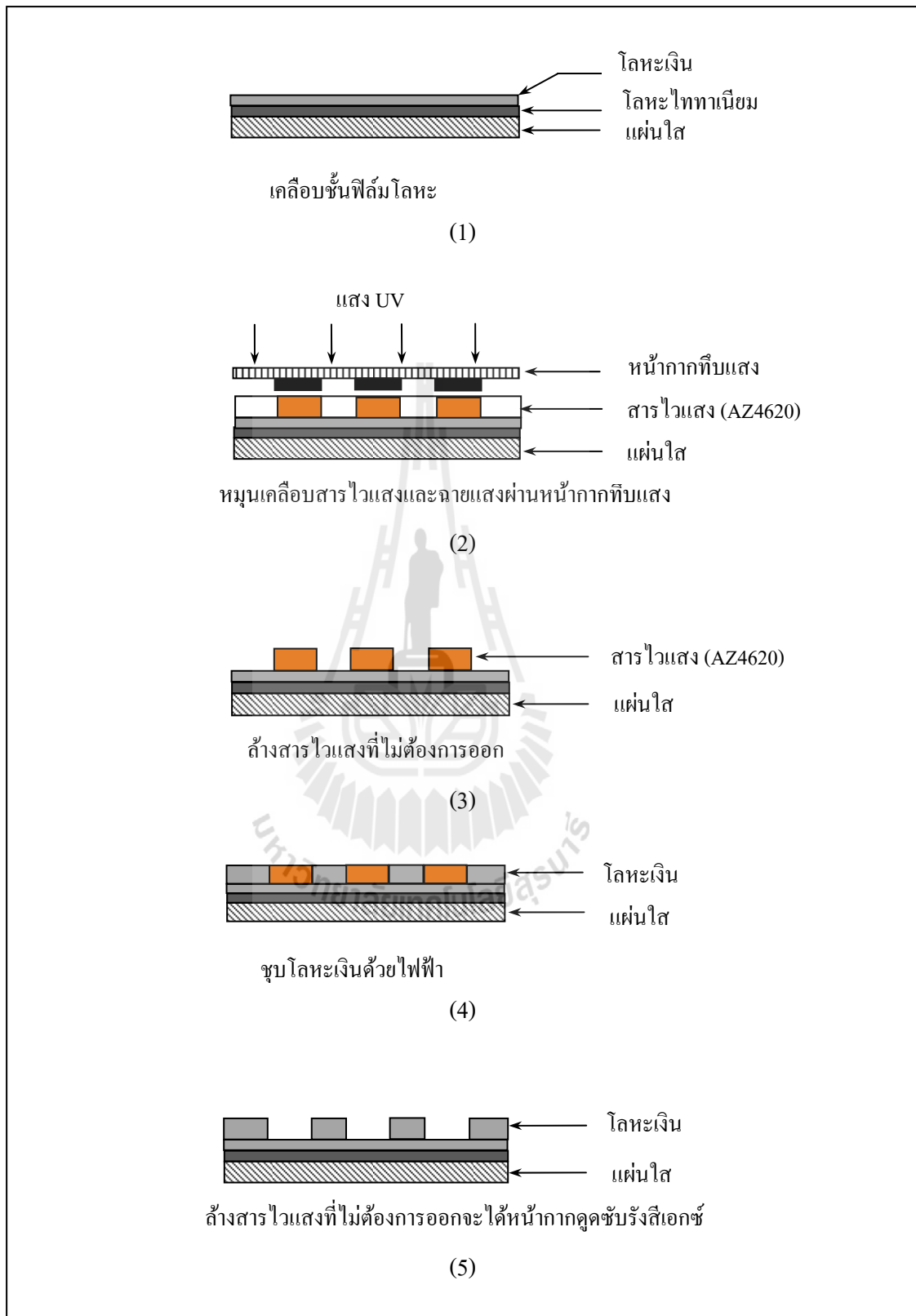
รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของหยดน้ำบนซิลิโคน PDMS ก่อนและหลังการพลาสมาด้วยออกซิเจน



รูปที่ 3.8 โครงสร้างทางเคมีของ PDMS-PDMS ด้วยการพลาสมาด้วยออกซิเจน

3.7 กระบวนการสร้างหน้ากาอุดักจับรังสีเอกซ์

การสร้างหน้ากาอุดักจับรังสีเอกซ์จะเริ่มจากการออกแบบบลูเพลนของตัวตรวจรู้เชิงแสงด้วยซอฟต์แวร์เครื่องมือการออกแบบวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรมวาดบลูเพลน Layout Editor ในการออกแบบ แล้วส่งไฟล์ไปพิมพ์บลูเพลนด้วยเครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียดของภาพ 3,600 dpi สามารถสร้างภาพบลูเพลนได้เล็กที่สุดประมาณ 30 μm ซึ่งจะได้โฟโตมาร์กที่สามารถดักจับรังสีเอกซ์ได้และนำมาใช้สร้างหน้ากาอุดักจับรังสีเอกซ์ โดยเริ่มจากการนำวงแหวนมาติดลงบนแผ่นใสด้วยกาวอีพ็อกซี่ ปล่อยให้แห้งประมาณ 6 ชั่วโมง ตัดแผ่นใสขอบของวงแหวนและทำความสะอาดวงแหวนแผ่นใสด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน น้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเคลือบโลหะ Ti/Ag ด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศลงบนวงแหวนแผ่นใส ดังรูปที่ 3.9(1) หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที ต่อด้วย 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบให้แห้ง (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และนำมาฉายแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ดังรูปที่ 3.9(2) ล้างฟิล์ม (development) ด้วยน้ำยา AZ developer จะได้โครงสร้าง AZ ดังรูปที่ 3.9(3) เติมโลหะเงินลงในช่องโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จนมวลโลหะเงินสูงเท่ากับความสูงของ AZ ดังรูปที่ 3.9(4) ล้างสารไวแสงชนิดบวก AZ ออกด้วยอะซิโตน ดังรูปที่ 3.9(5) ก็จะได้หน้ากาอุดักจับรังสีเอกซ์สำหรับนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.9 กระบวนการสร้างหน้ากาคูดชุบรังสีเอกซ์

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานของระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่มีความจำเป็นในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วย การเคลือบโลหะ การเคลือบชั้นฟิล์มสารไวแสง กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การสกัดเนื้อวัสดุ การเชื่อมต่อพื้นผิวและการสร้างหน้ากาคูดัชนีรังสีเอกซ์ ส่วนในบทที่ 4 จะกล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงต่อไป



บทที่ 4

ทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง

ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง ซึ่งทฤษฎีการคำนวณจะประกอบด้วยนิยามของความชื้น การแพร่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การดูดกลืนแสง ผลตอบสนองทางเวลาและความไว ส่วนการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงนั้น ประกอบด้วยการวาดลวดลายด้วยโปรแกรม Layout editor ตลอดจนขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ทฤษฎีการคำนวณของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง

ทฤษฎีการคำนวณของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงจะประกอบด้วยนิยามของความชื้น การแพร่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การดูดกลืนแสง ผลตอบสนองทางเวลาและความไว โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ความชื้น

ความชื้น(Humidity) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ปรากฏอยู่ในสถานะของแก๊สในอากาศหรือในแก๊สชนิดอื่น ๆ การวัดความชื้นสามารถวัดได้หลายรูปแบบทั้งทางตรงและทางอ้อม รูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การวัดความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity measurement) การวัดความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity measurement) และการวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature measurement) โดยมีความหมายที่แตกต่างกันแต่มีความสัมพันธ์กันดังนี้

ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศหรือแก๊ส อาจเปรียบเทียบได้ว่าเป็นความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

$$d_w = \frac{M_w}{V_w + V_g} = \frac{M_w}{V} \quad (4.1)$$

- เมื่อ M_w คือ มวลของไอน้ำ (kg)
 V_w คือ ปริมาตรของไอน้ำ (m^3)
 V_g คือ ปริมาตรของอากาศแห้ง (m^3)
 V คือ ปริมาตรรวมที่ผสมกันของไอน้ำกับอากาศแห้ง (m^3)
 d_w คือ ความชื้นสัมบูรณ์ (kg/m^3)

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำขณะนั้นต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉพาะ โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%) โดยความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการที่ 4.2

$$RH = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (4.2)$$

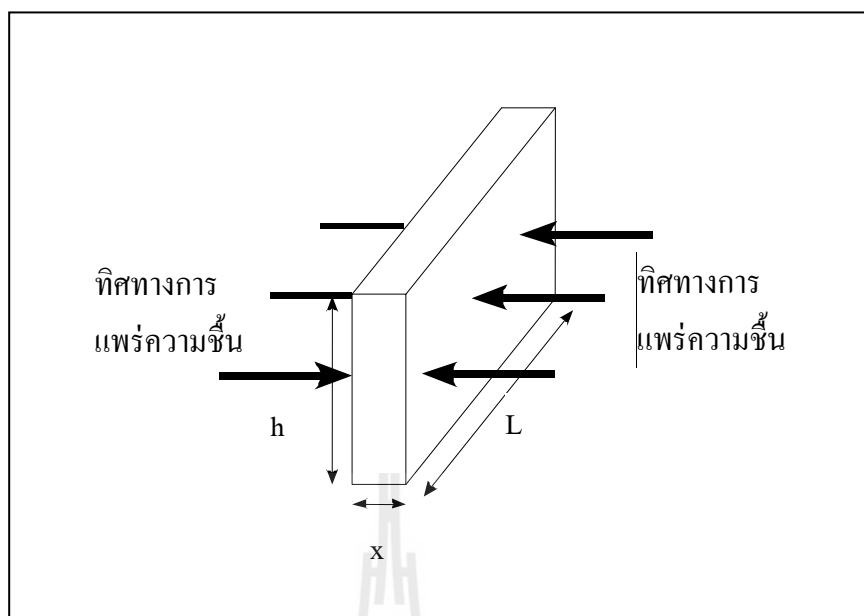
- เมื่อ P_w คือ ความดันไอน้ำบางส่วน (mbar)
 P_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)
 RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) คือ อุณหภูมิซึ่งความดันไอน้ำจริงในอากาศหรือแก๊สมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมินี้ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าเป็น 100% และไอน้ำเริ่มเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ อากาศหรือแก๊สจะไม่สามารถเก็บกักปริมาณไอน้ำได้มากกว่านี้ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่าจุดนี้ความดันไอน้ำอิ่มตัวก็จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ความดันไอน้ำจริงยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ความดันไอน้ำจริงในอากาศมีค่าเกินกว่าค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวและเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำมากขึ้นตามลำดับเหมือนกับปรากฏการณ์ที่มีหยดน้ำเกาะอยู่รอบ ๆ แก้วน้ำแข็ง สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิของน้ำในแก้วมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ ณ ขณะนั้น จึงทำให้เกิดการควบแน่นและกลายเป็นหยดน้ำที่บริเวณข้างแก้ว โดยอุณหภูมิจุดน้ำค้างนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันไอน้ำในขณะนั้นด้วย ดังนั้นในการพูดถึงจุดน้ำค้างเราต้องพูดถึงความดันที่คงที่ด้วยเสมอ

4.1.2 การแพร่และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวตรวจรู้ความชื้น

การแพร่ของโมเลกุลของสารเป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การเคลื่อนที่นี้เป็นไปในลักษณะทุกทิศทุกทางโดยมีทิศทางไม่แน่นอน ผลจากการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะทำให้ความเข้มข้นของโมเลกุลของสารในภาชนะที่มีเนื้อที่จำกัดนั้นมีความเข้มข้นเท่ากันหมด ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยในขณะที่อุณหภูมิสูงโมเลกุลของสารจะมีพลังงานจลน์มากขึ้น ทำให้โมเลกุลเหล่านั้นเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ การแพร่จึงเกิดได้เร็ว ส่วนความแตกต่างของความเข้มข้นนั้นถ้าหากมีความเข้มข้นของสาร 2 บริเวณแตกต่างกันมากจะทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้เร็วขึ้นด้วย เนื่องจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากโมเลกุลมีโอกาสนชนและกระแทกกันมากทำให้โมเลกุลกระจายออกไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าได้เร็วกว่าเมื่อความเข้มข้นใกล้เคียงกัน รวมทั้งขนาดของโมเลกุลของสาร โดยสารที่มีโมเลกุลเล็กจะเกิดการแพร่ได้เร็วกว่าสารโมเลกุลใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลเล็กสามารถแทรกไประหว่างโมเลกุลของสารตัวกลางได้ดีกว่าสารโมเลกุลใหญ่ สารโมเลกุลเล็กจึงแพร่ได้ดี และสุดท้ายคือความเข้มข้นและชนิดของสารตัวกลาง สารตัวกลางที่มีความเข้มข้นมากจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวกลาง ทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ไปได้ยาก แต่ถ้าสารตัวกลางมีความเข้มข้นน้อยโมเลกุลของสารก็จะเคลื่อนที่ได้ดีทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้เร็วด้วย

โครงสร้างของตัวตรวจรู้ลักษณะต่าง ๆ ทั้งแบบทรงกระบอก ทรงลูกบาศก์ ทรงที่มีความยาวมากกว่าความกว้าง พบว่าโครงสร้างที่มีลักษณะของซี่ที่มีความยาวมากกว่าความกว้างจะให้ผลตอบแทนของเวลาที่เร็วกว่าแบบอื่น (Mapato, 2007) โดยได้สร้างแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองผลตอบแทนของเวลาในการแพร่ความชื้นเข้าสู่โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาว ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีความยาวมากกว่าความกว้างมาก ๆ ดังรูปที่ 4.1 กำหนดให้ความชื้นที่แพร่เข้าสู่ด้านหน้าและด้านหลังน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านข้างจนสามารถละทิ้งได้ ส่วนความสูงของตัวตรวจรู้ถ้ามีความสูงมากก็สามารถละทิ้งได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นเราจะใช้การวิเคราะห์การแพร่ในหนึ่งมิติ โดยที่ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้จากสองด้านและระยะทางการแพร่มีค่าเท่ากับระยะความกว้าง x



รูปที่ 4.1 ทิศทางการแพร่ความชื้นเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุไวความชื้น

การหาผลตอบสนองทางเวลาต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น จะใช้หลักการแพร่ของ Fick's law ซึ่งสามารถหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัด (Finite difference) โดยใช้วิธีของ Crank Nicolson (Numerical-Methods for Engineers) โดยมีการลู่เข้าแบบกำลังสองและความแม่นยำกว่าแบบอื่น ๆ เนื่องจากใช้การประมาณค่าที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุดข้อมูล มีรายละเอียดการคำนวณโดยเริ่มต้นจากสมการการแพร่ในหนึ่งมิติดังสมการที่ 4.3 ทำการประมาณค่าความเข้มข้นของความชื้นเทียบกับเวลาได้ดังสมการที่ 4.4

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} \cong \frac{M_i^{l+t} - M_i^l}{\Delta t} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \cong \frac{1}{2} \left[\frac{M_{i+1}^l - 2M_i^l + M_{i-1}^l}{(\Delta x)^2} + \frac{M_{i+1}^{l+1} - 2M_i^{l+1} + M_{i-1}^{l+1}}{(\Delta x)^2} \right] \quad (4.5)$$

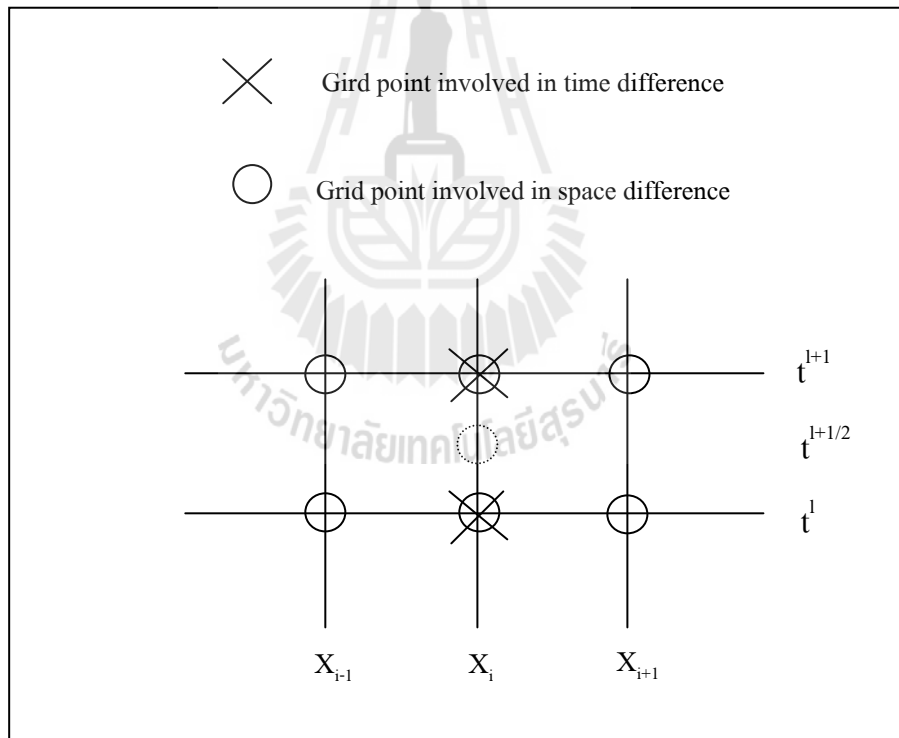
แทนค่าสมการที่ 4.4 และ 4.5 ลงในสมการที่ 4.3 จะได้สมการที่ 4.6 สำหรับจุดใด ๆ ส่วนสมการที่ 4.7 และ 4.8 ใช้สำหรับจุดแรกและจุดสุดท้ายของคำตอบตามลำดับ

$$-\partial M_{i-1}^{l+1} + 2(1+\lambda)M_i^{l+1} - \lambda M_{i+1}^{l+1} = \lambda M_{i-1}^l + 2(1+\lambda)M_i^l + \lambda M_{i+1}^l \quad (4.6)$$

$$2(1+\lambda)M_1^{l+1} - \lambda M_2^{l+1} = \lambda f_0(t^l) + 2(1-\lambda)M_1^l + \lambda f_0(t^{l+1}) \quad (4.7)$$

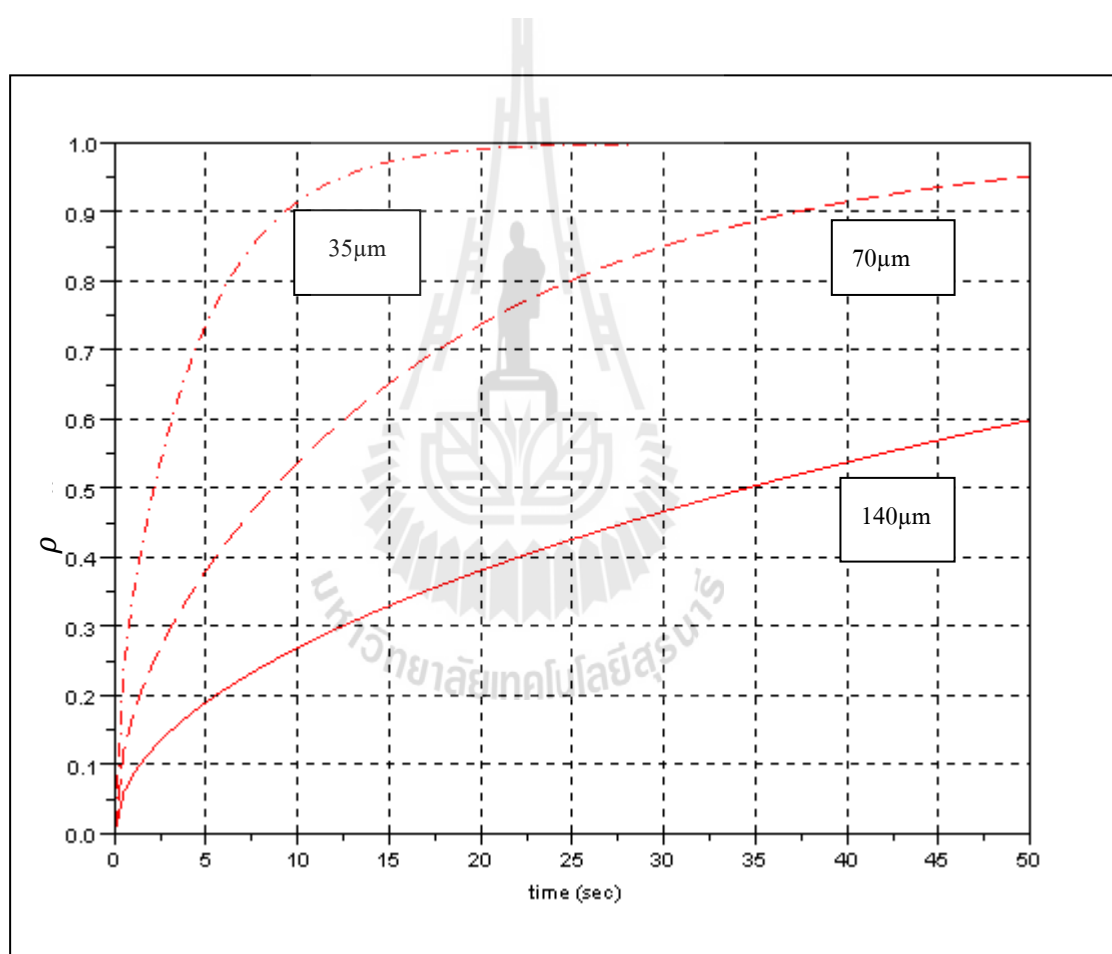
$$-\lambda M_{i-1}^{l+1} + 2(1+\lambda)M_m^{l+1} = \lambda f_{m+1}(t^l) + 2(1-\lambda)M_m^l + \lambda M_{m-1}^l - \lambda f_{m+1}(t^{l+1}) \quad (4.8)$$

$$\lambda = D \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.2 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดยใช้วิธี Crank Nicolson

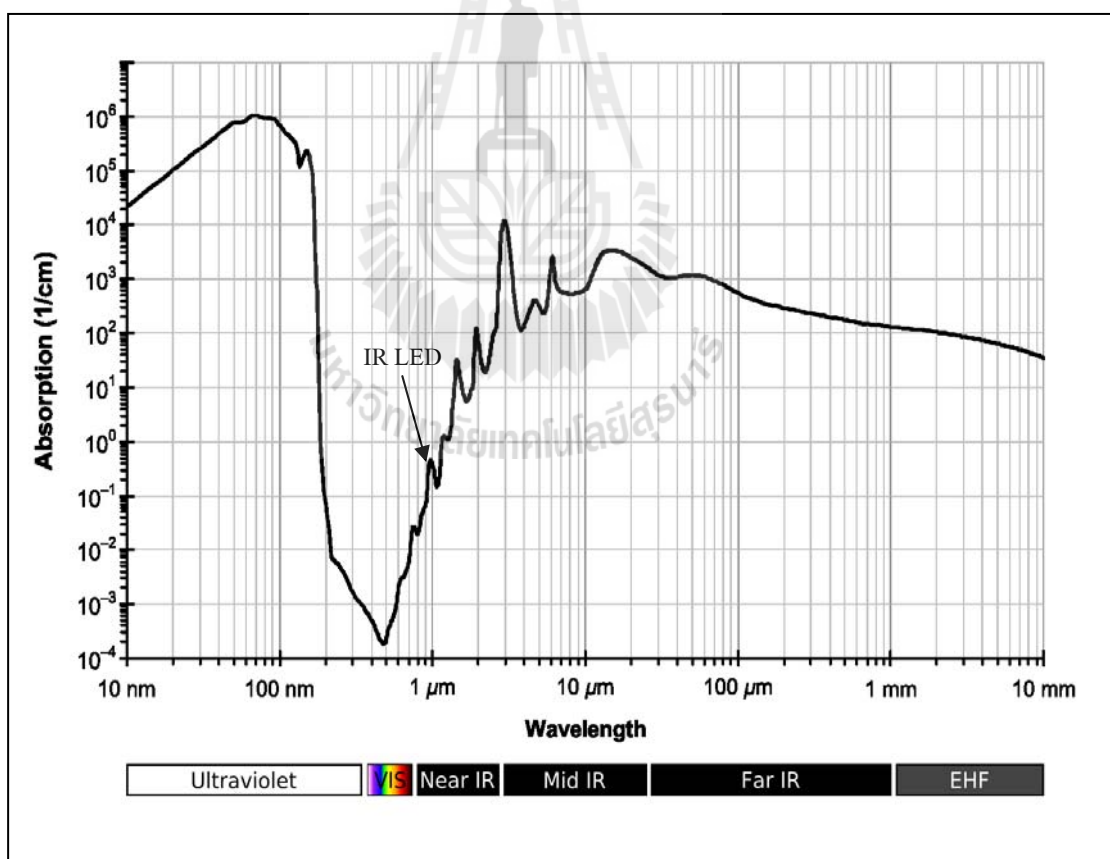
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เพื่อทำนายผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น ซึ่งในที่นี้จะใช้หลักการแพร่ของ Fick's law โดยหาอนุพันธ์ย่อยด้วยวิธีของ Crank Nicolson และนำผลเฉลยที่ได้ไปจำลองผลโดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Sci lab) ซึ่งจะเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีโครงสร้างแบบซี่ยาวที่มีขนาดความกว้างของซี่แตกต่างกัน และกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในสารไวความชื้นเท่ากับ $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพอลิอิมิด (PI) จะได้ผลดังรูปที่ 4.3 พบว่าขนาดความกว้างของซี่มีผลต่อผลตอบสนองทางเวลา หากความกว้างของซี่เพิ่มขึ้นผลตอบสนองทางเวลาก็จะช้าลง



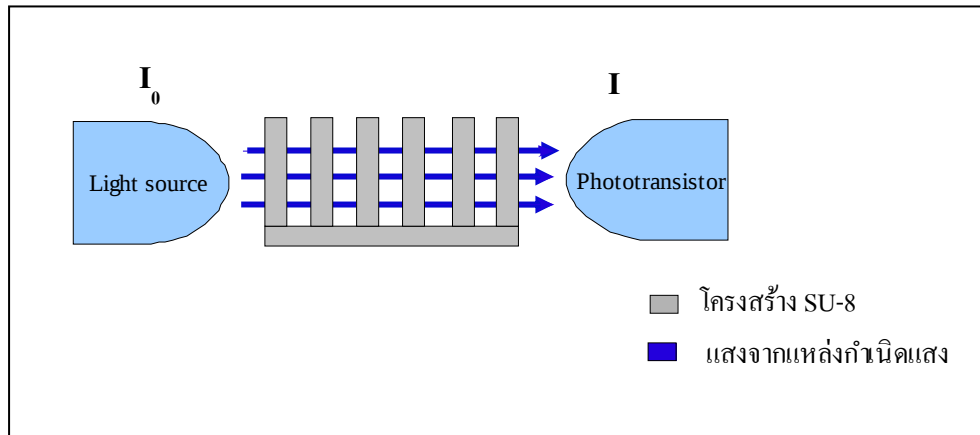
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ที่มีขนาดความกว้างของซี่ PI ต่างกัน

4.1.3 การดูดกลืนแสง (Absorption)

วัสดุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นที่ต่างกัน วัสดุที่ไม่มีสีส่วนใหญ่จะดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีความยาวคลื่น 200 ถึง 300 μm และช่วงความยาวคลื่น 780 ถึง 1000 μm เป็นช่วงคลื่นอินฟราเรด (Near IR) ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ส่วนวัสดุมีสีจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 380 ถึง 780 μm ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงขาวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ปริมาณของแสงที่วัสดุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนไว้ได้นั้นขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุนั้นและระยะทางที่แสงเดินทางในวัสดุ ยิ่งแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุมากขึ้นปริมาณความเข้มแสงที่ทะลุออกมาก็จะน้อยลง ซึ่งสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) ประกอบด้วย $\text{C}_{87}\text{H}_{96}\text{O}_{16}$ โดยน้ำจะมีผลต่อการดูดกลืนแสงมากกว่า SU-8 และเมื่อมีความชื้นหรือไม่มีความชื้นแสงก็เดินทางผ่าน SU-8 เช่นเดิม ดังนั้นสิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงก็คือ น้ำ โดยมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของน้ำดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแสงของน้ำ



รูปที่ 4.5 ลักษณะการส่งแสงผ่านโครงสร้างสารไวแสงชนิดลบ (SU-8)

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าน้ำสามารถดูดกลืนแสงในย่านแสงอินฟราเรดได้ดีกว่าย่านแสงขาว ดังนั้นจึงเลือกใช้แสงในย่านอินฟราเรด (ไดโอดเปล่งแสงความยาวคลื่น 950 nm) ในการส่งแสงผ่านโครงสร้างของสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) ดังรูปที่ 4.5 โดยโครงสร้างของสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) มีลักษณะเป็นซี่ คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของเปียร์-แลมเบิร์ต (Atomic data and nuclear data tables, 1993) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงที่ตกกระทบบัวกลางและความเข้มแสงที่สามารถทะลุผ่านได้ดังสมการที่ 4.10 ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านโครงสร้างของสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของปริมาณไอน้ำที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อสารไวแสง ณ ขณะนั้น หากความหนาแน่นของปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณแสงที่ทะลุผ่าน (I) ลดลง

$$I = I_0 e^{-L(\mu_S \rho_S (1-x_H) + \mu_H \rho_H x_H)} \quad (4.10)$$

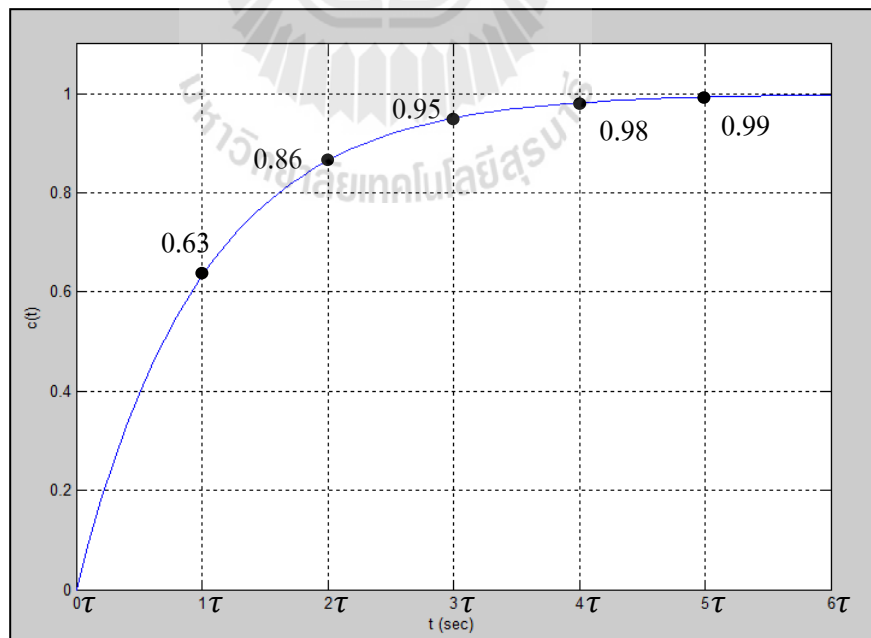
- เมื่อ I คือ ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากวัสดุ
- I_0 คือ ความเข้มแสงก่อนเข้าสู่วัสดุ
- L คือ ความหนาของวัสดุที่แสงเคลื่อนผ่าน (cm)
- x_H คือ อัตราส่วนของน้ำในเนื้อ SU-8 (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
- μ_S, μ_H คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ SU-8 และน้ำ (cm^{-1})
- ρ_S, ρ_H คือ ความหนาแน่นของ SU-8 และน้ำ (g/cm^3)

4.1.4 ผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น

ผลตอบสนองทางเวลาและความไวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจรู้ความชื้น ในการหาผลตอบสนองทางเวลาจะป้อนความชื้นแบบขั้นบันไดเพื่อหาค่าคงที่ทางเวลา (time constant) ของการตอบสนอง โดยผลตอบสนองของเซนเซอร์ทั่ว ๆ ไปจะสมมติให้อยู่ในระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบอันดับหนึ่ง (first order) ซึ่งจะสามารถหาผลตอบสนองได้ดังสมการที่ 4.11 และเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นจะคิดที่ 63% คือ เวลาตั้งแต่เริ่มป้อนความชื้นให้ตัวตรวจรู้จนกระทั่งผลตอบสนองเพิ่มขึ้นไปที่ 63% เนื่องจากตัวตรวจรู้ที่เรานำมาอ้างอิงบอกผลตอบสนองทางเวลาที่ 63% เช่นเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถคิดผลตอบสนองทางเวลาแบ่งเป็น เวลาขาขึ้น (Rise time) และเวลาขาลง (Fall time) ดังสมการที่ 4.12 และ 4.13

$$c(t) = 1 - e^{-t/\tau} \quad (4.11)$$

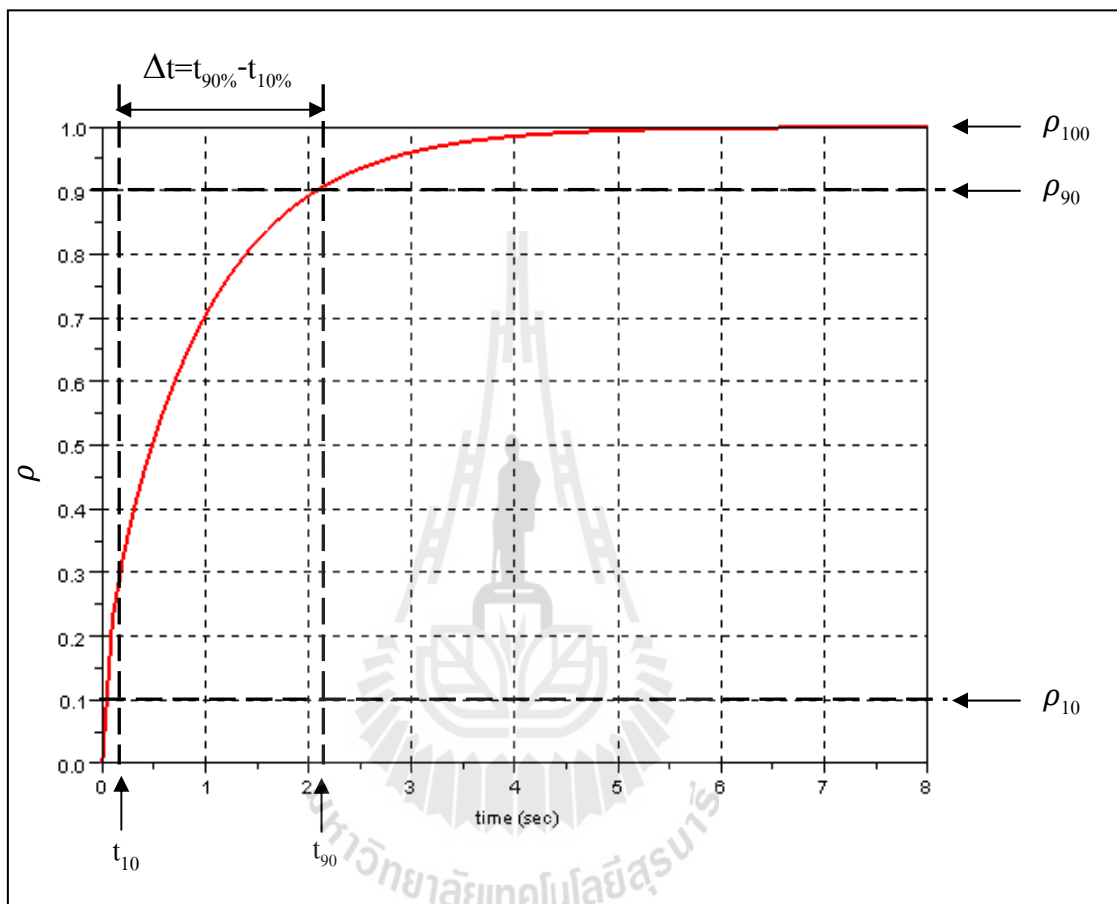
เมื่อ $c(t)$ คือ การตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย
 t คือ เวลา มีหน่วยเป็นวินาที
 τ คือ ค่าคงที่ทางเวลา



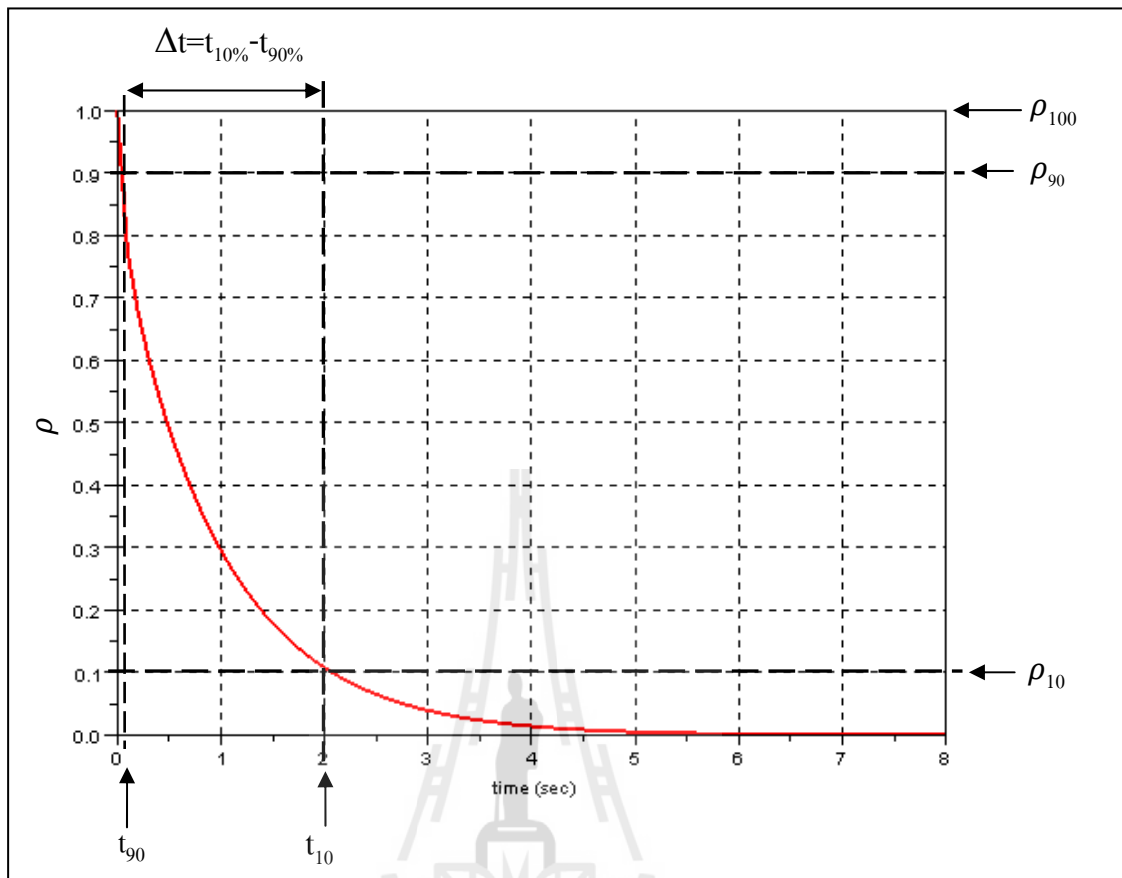
รูปที่ 4.6 การตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบอันดับหนึ่ง

$$\text{Rise time} = t_{\rho 90} - t_{\rho 10} \quad (4.12)$$

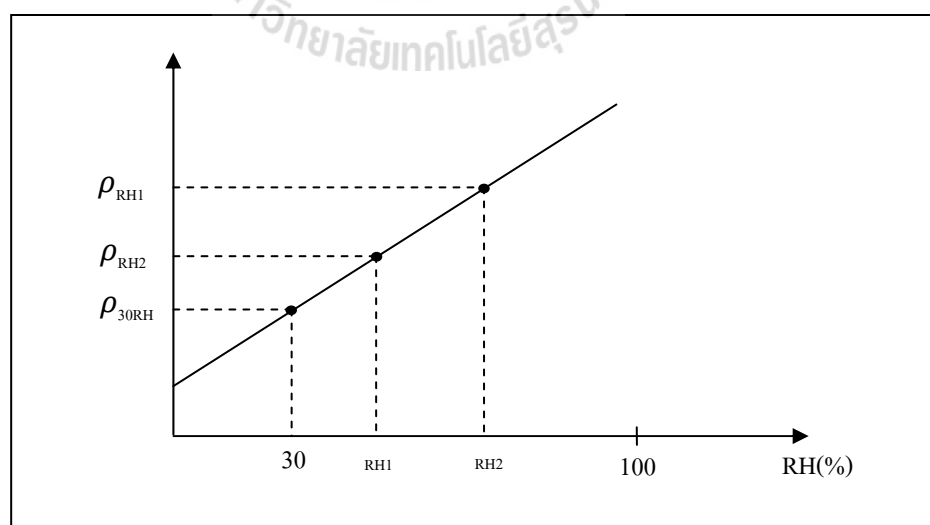
$$\text{Fall time} = t_{\rho 10} - t_{\rho 90} \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น (จุดความขึ้น) ของตัวตรวจรู้ความขึ้น



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (คายความชื้น) ของตัวตรวจรู้ความชื้น



รูปที่ 4.9 ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น

ส่วนความไวจะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนไปต่อความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% ดังสมการที่ 4.14 รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.9

$$Sensitivity = \frac{\Delta\rho}{\rho_{30RH}} = \frac{(\rho_{RH1} - \rho_{RH2})}{\rho_{30RH}} \cdot \frac{1}{RH2 - RH1} \times 10^6 \text{ (ppm/\%RH)} \quad (4.14)$$

เมื่อ $Sensitivity$ คือ ค่าความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น มีหน่วยเป็น ppm/%RH
 $\Delta\rho$ คือ ความชันของกราฟที่ได้จากตัวตรวจรู้ความชื้น
 ρ_{30RH} คือ ค่าผลตอบแทนของตัวตรวจรู้ความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 30%
 ชนิดของสัญญาณตอบสนองอาจเป็น ค่าความจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรืออื่น ๆ

จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับความชื้น การดูดกลืนแสงและการสร้างแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการแพร่ความชื้นเข้าสู่เนื้อของวัสดุดูดซับความชื้นแบบซึ่งยาวพบว่า ขนาดความกว้างของชั้นวัสดุดูดซับความชื้นมีผลต่อผลตอบแทนทางเวลาของตัวตรวจรู้ ยิ่งชั้นวัสดุดูดซับความชื้นแคบมากเท่าไรผลตอบแทนทางเวลาก็จะยิ่งเร็วขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ลวดลายที่สามารถพิมพ์ลวดลายได้เล็กที่สุดประมาณ 30 μm ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้นให้มีลักษณะเป็นซี่ที่มีความกว้าง 35 μm และ 70 μm โดยใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เป็นวัสดุดูดซับความชื้น ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุใหม่ที่ใช้สำหรับสร้างเป็นวัสดุดูดซับความชื้น ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

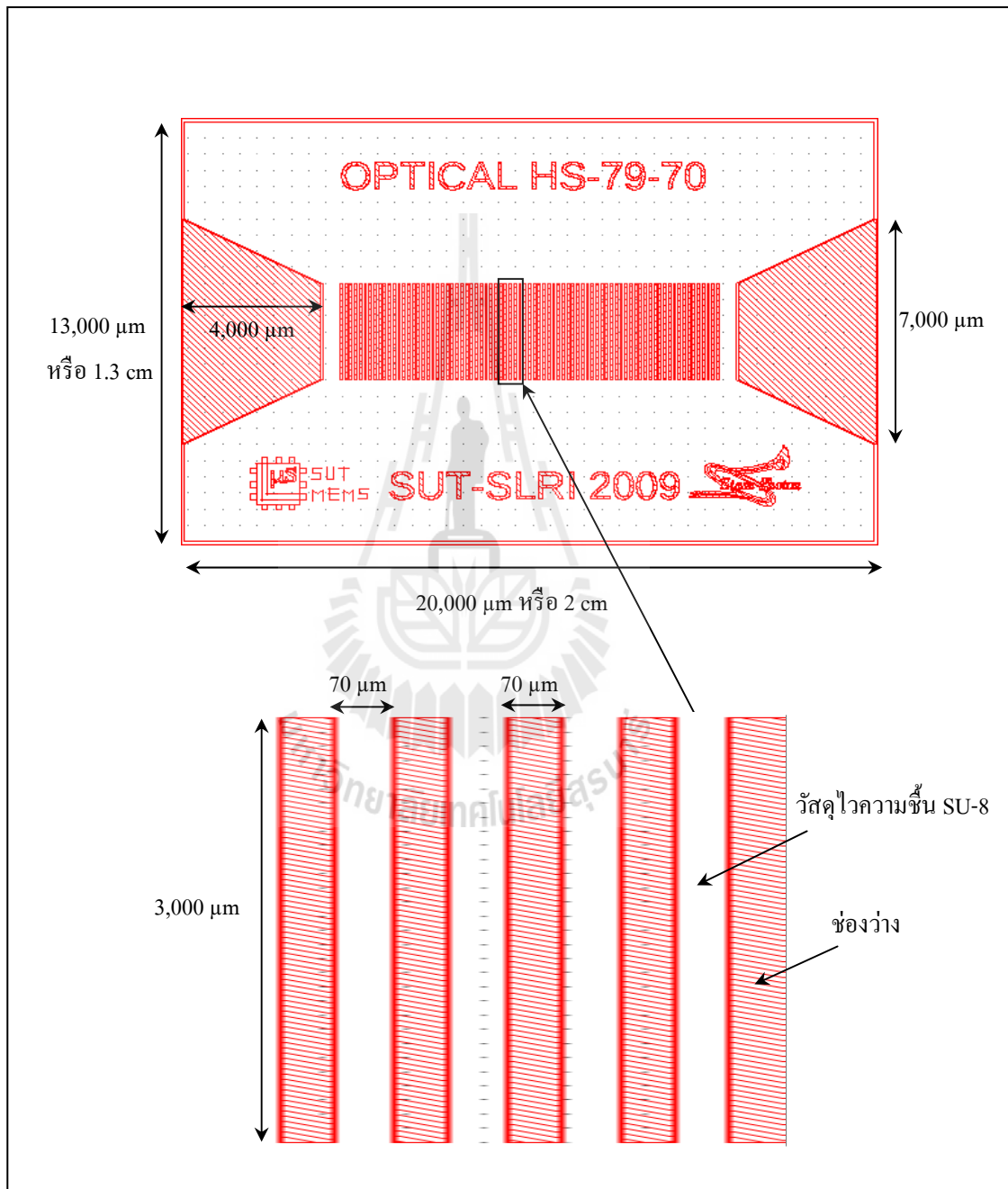
4.2 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงจะมีขั้นตอนในการสร้างหลายขั้นตอน ประกอบด้วย การออกแบบลวดลายของตัวตรวจรู้ด้วยโปรแกรม Layout Editor การสร้างหน้ากากระบุตำแหน่งและสีและการสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้น โดยรายละเอียดมีดังนี้

4.2.1 การออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้น

การออกแบบลวดลายของตัวตรวจรู้ความชื้นในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมวาดลวดลาย Layout Editor ในการออกแบบ แล้วส่งไฟล์ไปพิมพ์ลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียดของภาพ 3,600 dpi สามารถสร้างภาพลวดลายได้เล็กที่สุดประมาณ 30 μm ลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย Layout Editor ของตัวตรวจรู้ความชื้นจะมีลักษณะเหมือนปีกผีเสื้อ มีขนาดความกว้าง 1.3 cm ความยาว 2 cm และบริเวณตรงกลางจะมีลักษณะเป็นซี่เพื่อให้

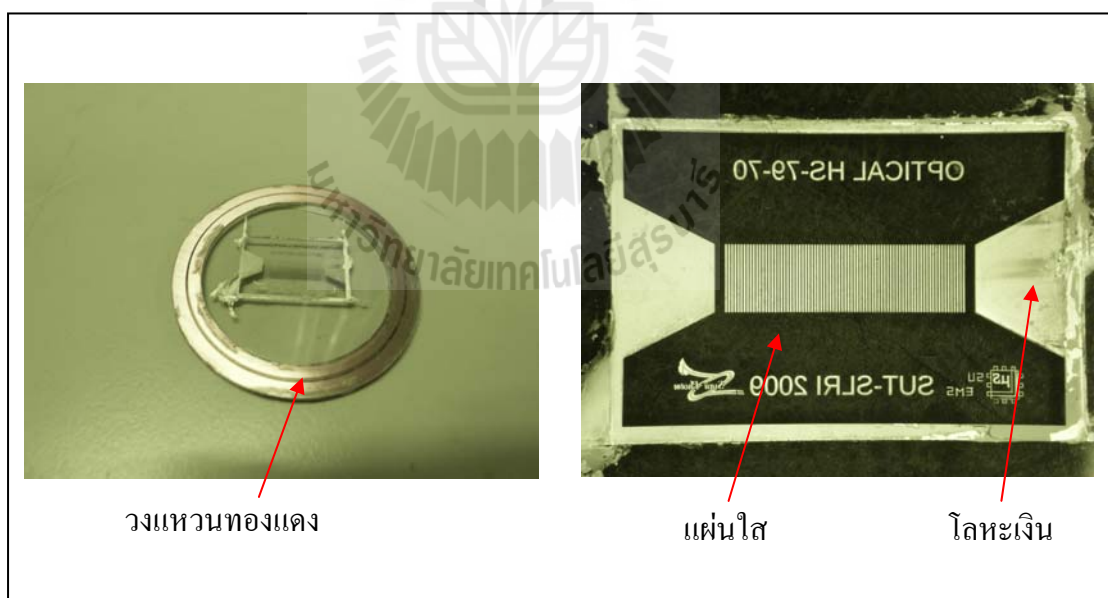
ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อวัสดุได้ง่ายและรวดเร็ว โดยได้ทำการออกแบบความกว้างและจำนวน
ซี่มา 2 แบบด้วยกันคือ แบบที่ 1 จำนวน 155 ซี่ แต่ละซี่กว้าง $35\text{ }\mu\text{m}$ ยาว $3,000\text{ }\mu\text{m}$ แบบที่ 2
จำนวน 80 ซี่ แต่ละซี่กว้าง $70\text{ }\mu\text{m}$ ยาว $3,000\text{ }\mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.10



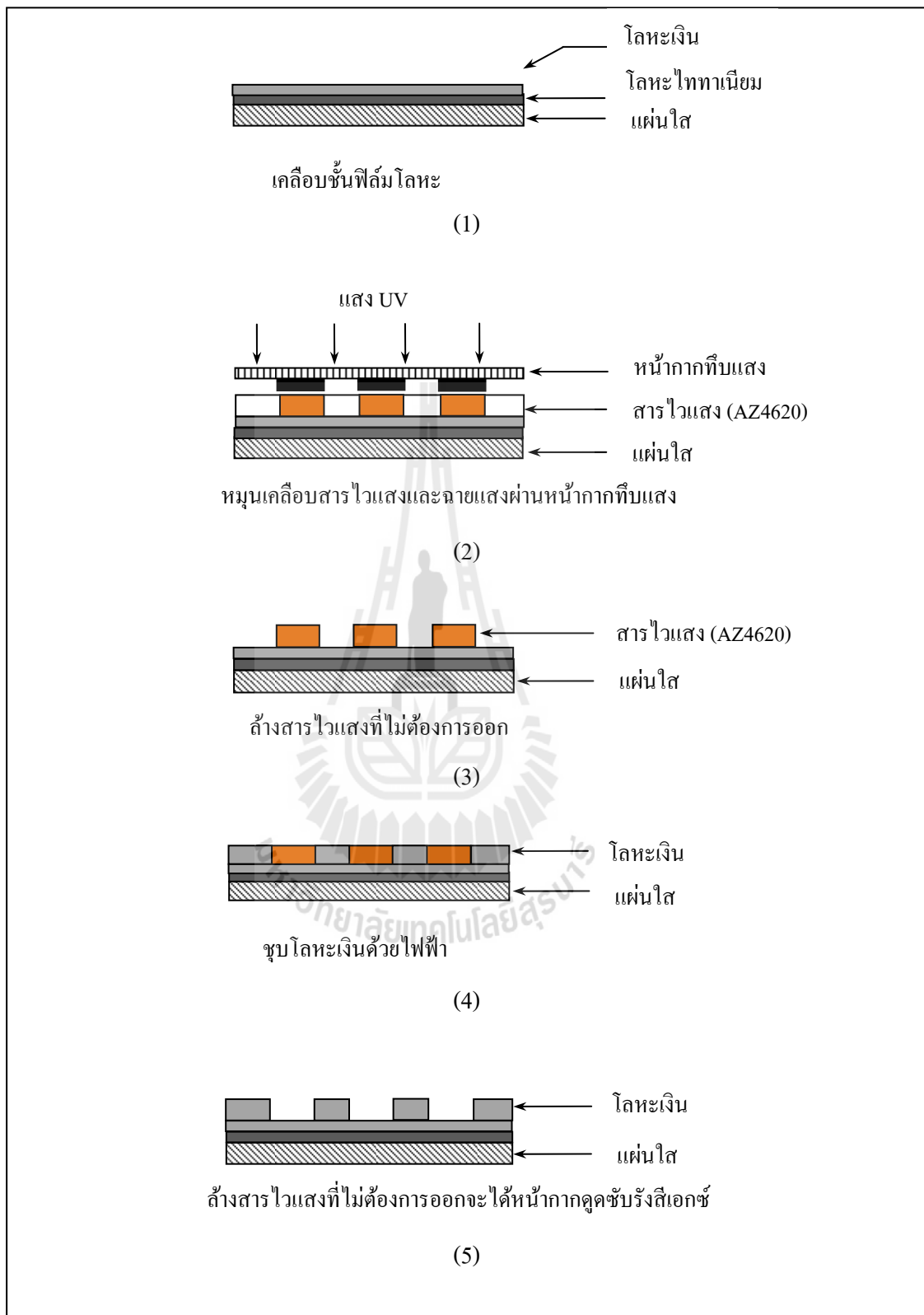
รูปที่ 4.10 ตัวตรวจวัดความชื้นที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout editor

4.2.2 การสร้างหน้ากาอุดซับริ่งสี่เหลี่ยมของตัวตรวจรู้ความชื้น

เริ่มจากการนำวงแหวนมาติดลงบนแผ่นใสด้วยกาวอีพ็อกซี่ ปล่อยให้แห้งประมาณ 6 ชั่วโมง ตัดแผ่นใสชิดขอบของวงแหวนและเคลือบโลหะ Ti/Ag ด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศลงบนวงแหวนแผ่นใส ดังรูปที่ 4.12(1) จากนั้นหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที ต่อด้วย 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบให้แห้ง (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และนำมาฉายแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ดังรูปที่ 4.12(2) ล้างฟิล์ม (development) ด้วยน้ำยา AZ developer จะได้โครงสร้าง AZ ดังรูปที่ 4.12(3) เติมโลหะเงินลงในช่องโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จนมวลโลหะเงินสูงเท่ากับความสูงของ AZ ดังรูปที่ 4.12(4) ล้างสารไวแสงชนิดบวก AZ ออกด้วยอะซิโตน ดังรูปที่ 4.12(5) จะได้หน้ากาอุดซับริ่งสี่เหลี่ยมของตัวตรวจรู้ความชื้นดังรูปที่ 4.11 หน้ากาอุดซับริ่งสี่เหลี่ยมที่ได้นั้นมีขนาดความกว้างของลวดลายที่คิดเพิ่มขึ้นจากที่ออกแบบเอาไว้ในตอนแรก โดยได้แสดงผลการวัดขนาดความกว้างของหน้ากาอุดซับริ่งสี่เหลี่ยม ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเนื่องมาจากการยิงฟิล์มและขั้นตอนการสร้างหน้ากานั้นเอง



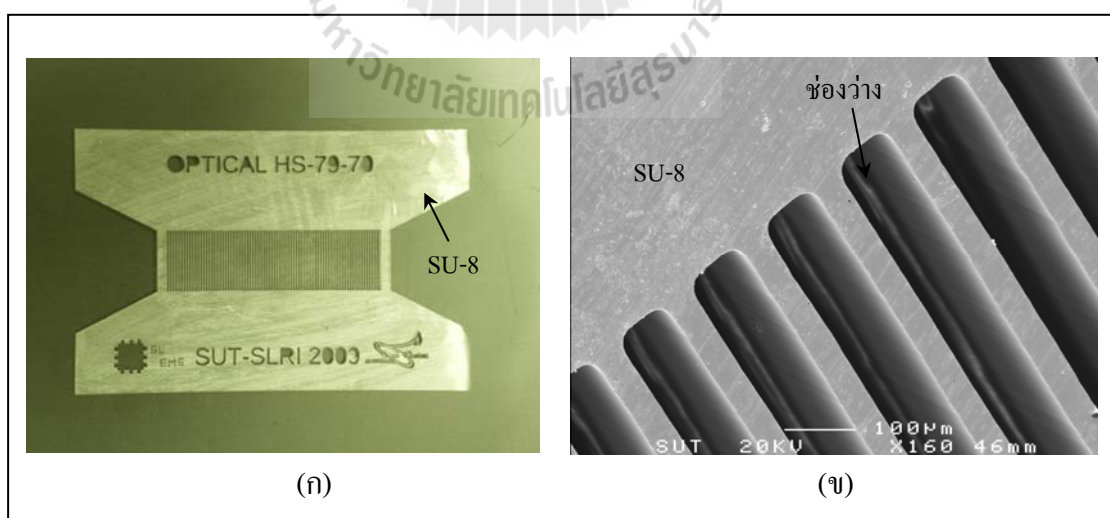
รูปที่ 4.11 หน้ากาอุดซับริ่งสี่เหลี่ยมของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง



รูปที่ 4.12 กระบวนการสร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ความชื้น

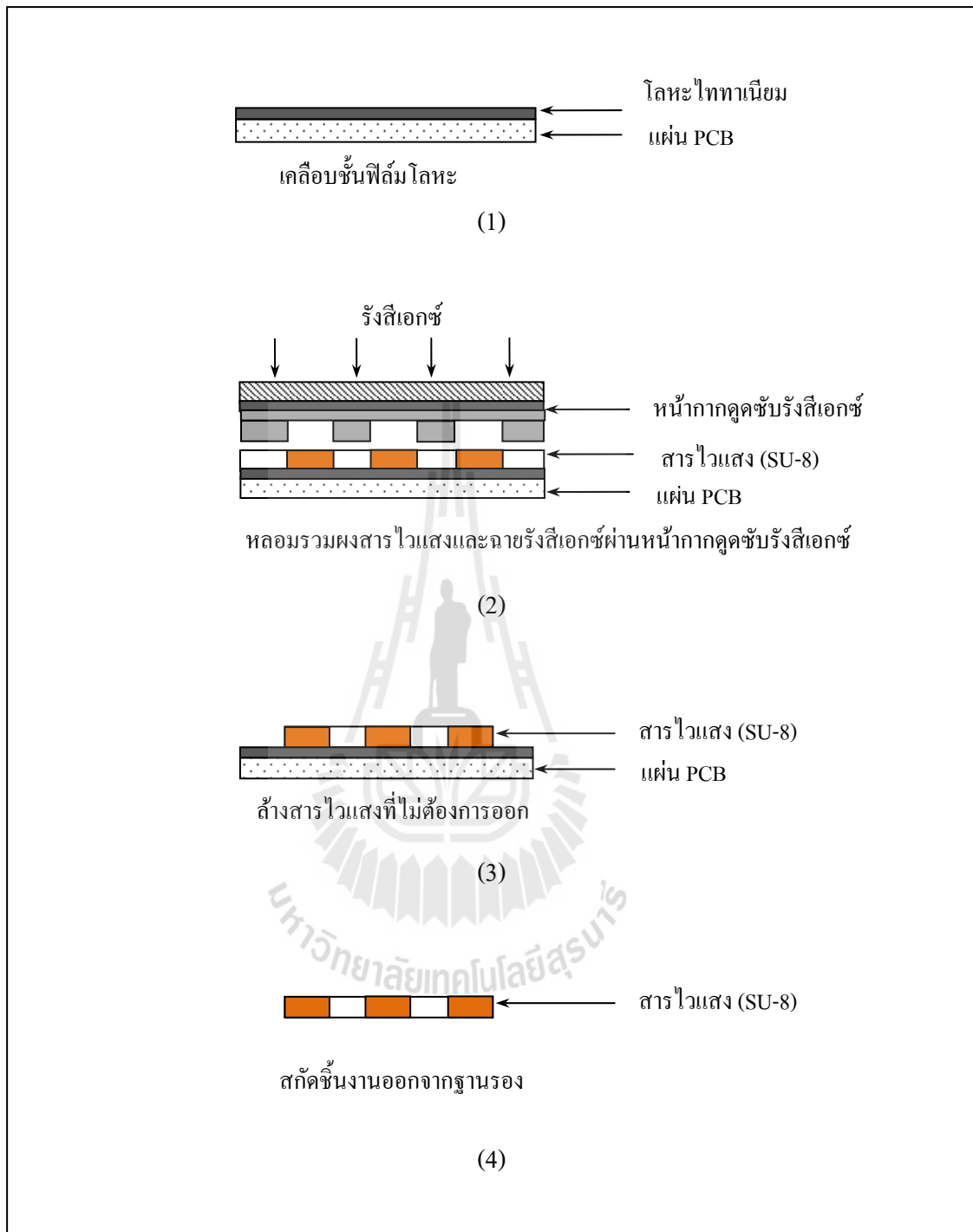
4.2.3 การสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้น

การสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เป็นวัสดุเคลือบความชื้นที่มีลักษณะเป็นซี่เพื่อให้ความชื้นแพร่เข้าสู่เนื้อของวัสดุเคลือบความชื้นได้เร็ว กระบวนการสร้างเริ่มจากการนำแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว มาทำความสะอาดและเคลือบโลหะไททานเนียมด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศ ดังรูปที่ 4.14(1) หลอมรวมผงสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) ด้วยความร้อนในสภาวะสุญญากาศให้มีความหนาประมาณ 500 μm นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากเคลือบรังสีเอกซ์ ออบแน่นหลอดฉายที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.14(2) ล้างสารไวแสงที่ไม่แข็งตัวออกด้วยน้ำยา SU-8 developer ดังรูปที่ 4.14(3) สกัดชิ้นงานที่เป็นเนื้อสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) ออกจากฐานรอง ด้วยการแช่ชิ้นงานในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 48% เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้กรดกัดโลหะไททานเนียมออกและทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากฐานรอง ดังรูปที่ 4.14(4) จะได้โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นดังรูปที่ 4.13 ซึ่งใช้หน้ากากเคลือบรังสีเอกซ์แบบที่ 2 ที่มีความกว้างของซี่ 70 μm ส่วนโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบที่ 1 ที่มีความกว้างของซี่ 35 μm นั้นได้โครงสร้างดังรูปที่ 4.15 จากภาพจะพบว่าโครงสร้างที่ได้ออกมาจะมีลักษณะบิดงอ เนื่องจากการสร้างหน้ากากเคลือบรังสีเอกซ์ได้ความกว้างของซี่ประมาณ 20 μm จึงส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างความสูงกับความกว้างของซี่มีค่าที่แตกต่างกันมากเกินไป

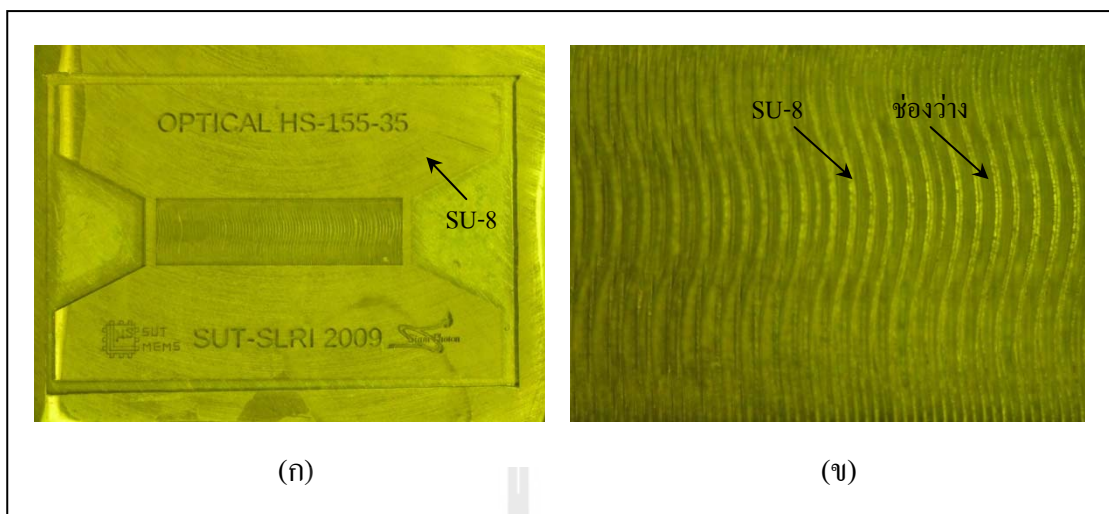


รูปที่ 4.13 โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความกว้างของซี่วัสดุไวความชื้น SU-8 70 μm

(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ (ข) ภาพจากเครื่อง SEM



รูปที่ 4.14 กระบวนการสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.15 โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความกว้างของซี่วัสดุไวความชื้น SU-8 35 μm
(ก) ภาพหลังการ develop (ข) ซี่มีลักษณะโค้งงอ

4.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง ซึ่งทฤษฎีการคำนวณจะประกอบด้วยนิยามของความชื้น การดูดกลืนแสง ผลตอบสนองทางเวลา ความไว การแพร่และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้น โดยตัวตรวจรู้ที่จะออกแบบมีลักษณะเป็นซี่ยาว ความกว้างของซี่เท่ากับ 35 μm และ 70 μm เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการพิมพ์ลงบนฟิล์มและกระบวนการสร้างส่งผลให้หน้ากากดุจดั้งที่สร้างได้มีความกว้างของซี่ 20 μm และ 60 μm ดังนั้นจึงสามารถสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นได้แบบเดียวคือ แบบที่มีความกว้างของซี่ 60 μm โดยตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ เรียกว่า ตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS ส่วนในบทที่ 5 จะกล่าวถึงการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS ต่อไป

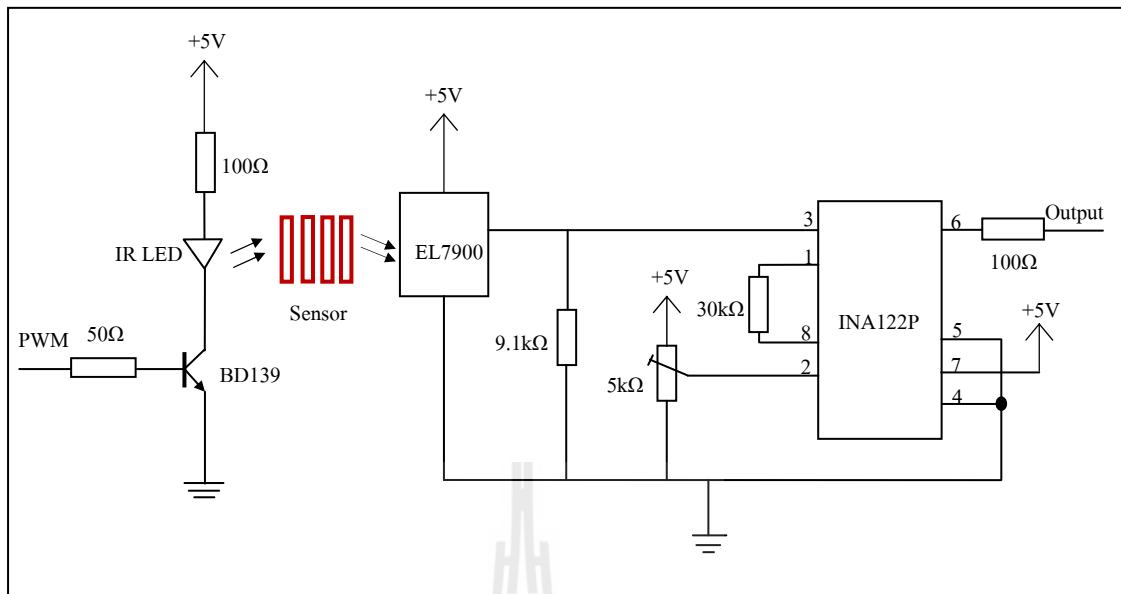
บทที่ 5

การทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง

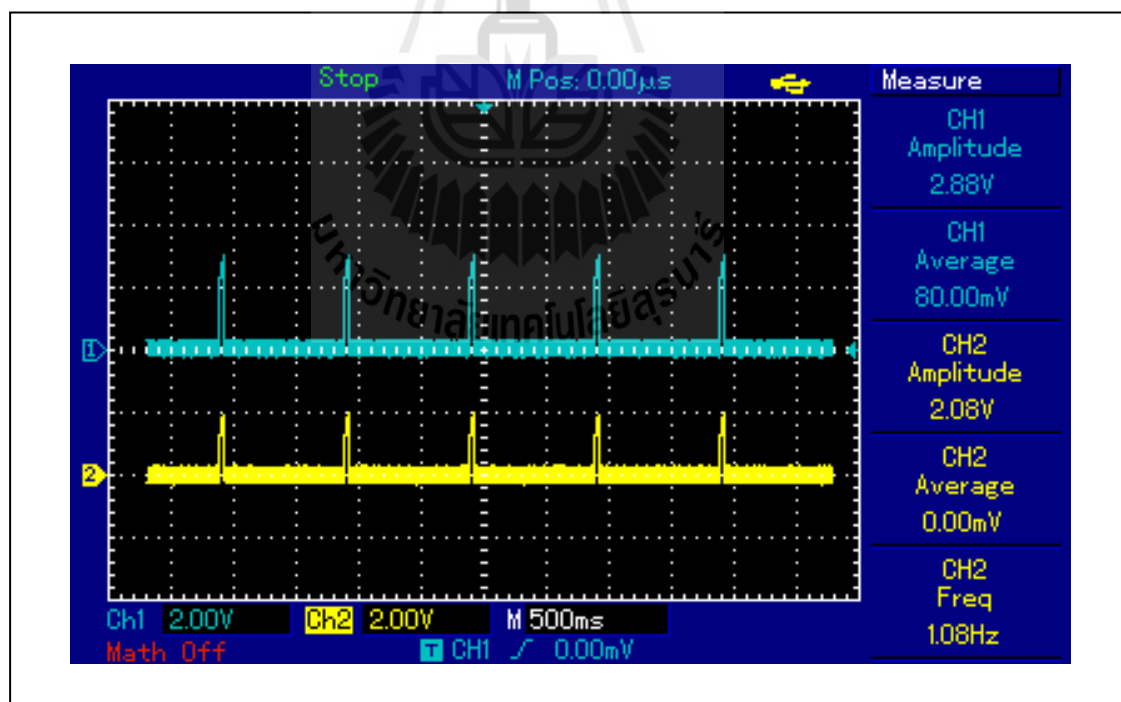
การทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นประกอบด้วยการวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (Static response) และผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) การวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว เพื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นกับความชื้นมาตรฐานซึ่งได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัว อันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด ส่วนการวัดผลตอบสนองทางพลวัตหรือผลตอบสนองทางเวลา เพื่อทดสอบความเร็วในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ต่อความชื้น ซึ่งป้อนให้กับตัวตรวจรู้ความชื้นแบบขั้นบันได โดยตัวตรวจรู้ความชื้นนั้นจะใช้แสงในย่านอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 900-1050 nm ส่งผ่านโครงสร้างสารไวความชื้นลักษณะเป็นซี่ยาวที่มีความกว้างของซี่เท่ากับ 60 μm ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง

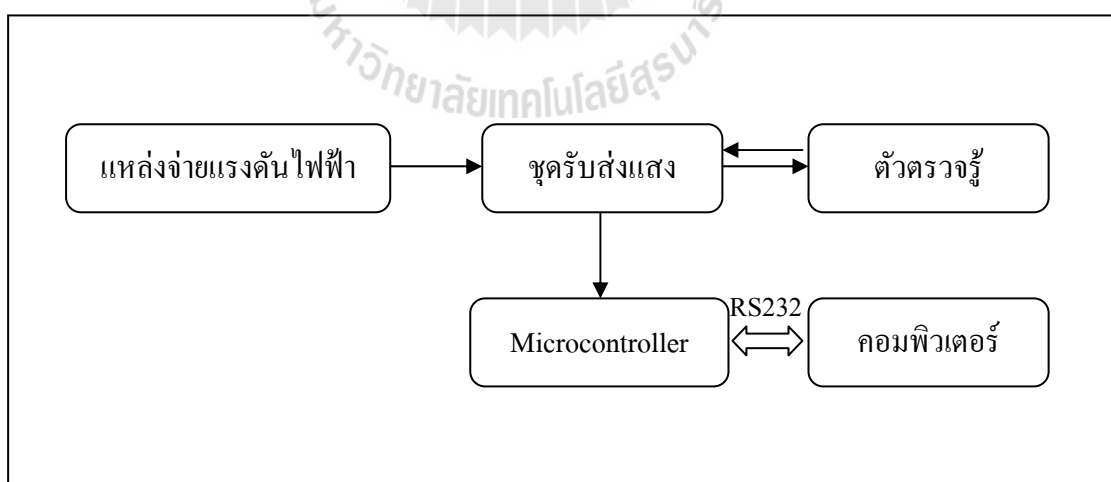


รูปที่ 5.2 วงจรรับส่งแสงผ่านตัวตรวจรู้ความเข้มเชิงแสง

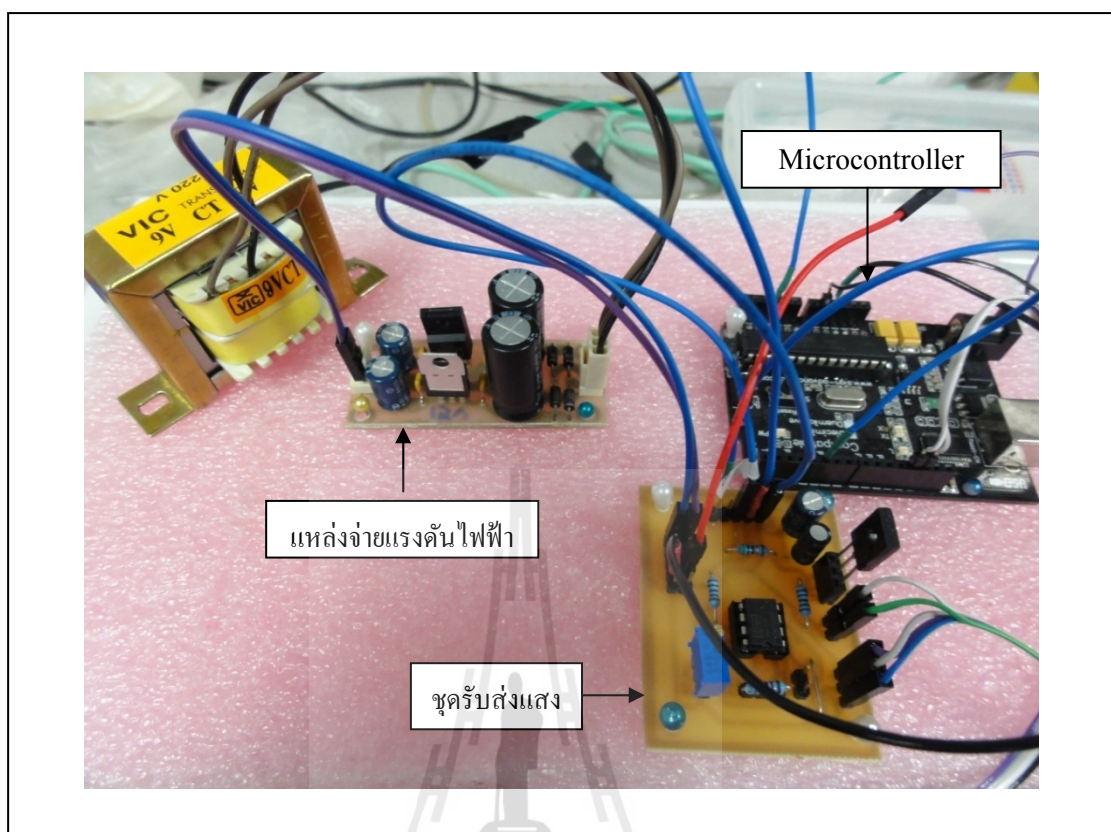


รูปที่ 5.3 แรงดันที่ขา 3(INA122P) กับแรงดันเอาต์พุต

วงจรรับส่งแสงผ่านตัวตรวจรู้ความชื้นดังรูปที่ 5.2 จะใช้แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 900-1050 nm เนื่องจากน้ำสามารถดูดกลืนแสงในย่านนี้ได้ดีกว่าแสงในย่านอื่น ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ (BD139) ทำหน้าที่เปิดและปิดไดโอดเปล่งแสงเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานาน ส่วน EL7900 จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับแสงที่ผ่านโครงสร้างของสารไวความชื้นมา ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะมีวงจรควบคุมกระแสบรรจุอยู่ภายในตัวถังและสามารถปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานโหลดได้ตามความต้องการสำหรับการเพิ่มหรือลดค่าแรงดันเอาต์พุต เนื่องจากค่าเอาต์พุตที่ได้อยู่ในย่านที่แคบจึงได้เพิ่มออปแอมป์ (INA122P) เพื่อทำการขยายย่านให้กว้างขึ้นเป็น 11.67 เท่าจากการคำนวณ เมื่อนำมาใช้งานจริงสามารถขยายเอาต์พุตได้ประมาณ 11.44 เท่า ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นภาพจากการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคป กราฟเส้นบนเป็นแรงดันไฟฟ้าจากขา 3 ของออปแอมป์ (INA122P) ส่วนกราฟเส้นล่างเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผ่านการขยายแรงดันไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว โดยมีระบบทดสอบของตัวตรวจรู้ความชื้นดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ระบบทดสอบใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้คงที่ 4.96 V ชุดรับส่งแสงจะประกอบไปด้วยวงจรส่งแสงที่มีไดโอดเปล่งแสงที่จะส่งแสงในทุก ๆ 1 วินาที ผ่านโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นและใช้ EL7900 เป็นอุปกรณ์รับแสงพร้อมทั้งใช้ออปแอมป์ช่วยขยายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยมีการสั่งการและเก็บข้อมูลการทดสอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino รุ่น ET-Base AVR EASY168 โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้จะสามารถอ่านค่า A to D ได้ 10 Bit) ผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 มาแสดงผลยังหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.4 แผนภาพระบบทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น



รูปที่ 5.5 ระบบทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น

5.1 ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

การวัดผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวนั้นจะต้องใช้แหล่งกำเนิดความชื้นมาตรฐาน โดยทั่วไปใช้ความชื้นที่ได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัว เนื่องจากความชื้นที่ได้มีความคลาดเคลื่อน สูงสุดไม่เกิน $\pm 1\% \text{RH}$ (25°C) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัวแสดงดังตาราง ที่ 5.1 ซึ่งเกลือแต่ละชนิดจะให้ความชื้นที่ต่างกันและค่าอุณหภูมิยังมีผลต่อค่าความชื้นของไอเกลือ อิ่มตัว วิธีการเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ด้วยความชื้นมาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่มตัวมีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน

เริ่มจากการนำภาชนะที่เป็นขวดแก้วขนาด 5 ml มาทำความสะอาดและเช็ดให้แห้ง จากนั้นเติมเกลือลงไปในภาชนะ เติมน้ำบริสุทธิ์จนเกลือเปียกแล้วคนให้เกลือละลายในน้ำ เติมน้ำเกลือลงในภาชนะอีกพร้อมทั้งคนจนกระทั่งเกลือไม่สามารถละลายได้อีก นำภาชนะไปอุ่นบนแผ่นให้ความร้อนเพื่อให้เกลือสามารถละลายตัวได้ง่ายขึ้น จากนั้นปิดฝาและทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยเพื่อให้สารละลายเกลือตกผลึก ซึ่งจะได้สารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อใช้ในการวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	Lithium Chloride (LiCl)	Potassium acetate (CH ₃ COOK)	Magnesium Chloride (MgCl ₂)	Potassium Carbonate (K ₂ CO ₃)
0	11.23±0.54		33.66±0.33	43.13±0.66
5	11.26±0.47		33.60±0.28	43.13±0.50
10	11.29±0.41	23.28±0.53	33.47±0.24	43.14±0.39
15	11.30±0.35	23.40±0.32	33.30±0.21	43.15±0.33
20	11.31±0.31	23.11±0.25	33.07±0.18	43.16±0.33
25	11.30±0.27	22.51±0.32	32.78±0.16	43.16±0.39
30	11.28±0.24	21.61±0.53	32.44±0.14	43.17±0.50
35	11.25±0.22		32.05±0.13	
40	11.21±0.21		31.60±0.13	
45	11.16±0.21		31.10±0.13	
50	11.10±0.22		30.54±0.13	
55	11.03±0.23		29.93±0.16	
60	10.95±0.26		29.26±0.18	
65	10.86±0.29		28.54±0.21	
70	10.75±0.33		27.77±0.25	
75	10.64±0.38		26.94±0.29	
80	10.51±0.44		26.05±0.34	
85	10.80±0.51		25.11±0.39	
90	10.23±0.59		24.12±0.46	
95	10.07±0.67		23.07±0.52	
100	09.90±0.77		21.97±0.60	

ตารางที่ 5.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	Magnesium nitrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)	Sodium Chloride (NaCl)	Potassium Chloride (KCl)	Potassium Nitrate ($\text{K}_2(\text{NO}_3)_2$)
0	60.35±0.55	75.51±0.34	88.61±0.53	96.33±2.90
5	58.86±0.43	75.65±0.27	87.67±0.45	96.27±2.10
10	57.36±0.33	75.67±0.22	86.77±0.39	95.96±1.40
15	55.87±0.27	75.61±0.18	85.92±0.33	95.41±0.96
20	54.38±0.23	75.47±0.14	85.11±0.29	94.62±0.66
25	52.89±0.22	75.29±0.12	84.34±0.26	93.58±0.55
30	51.40±0.24	75.09±0.11	83.62±0.25	92.31±0.60
35	49.91±0.29	74.87±0.12	82.95±0.25	90.79±0.83
40	48.42±0.37	74.68±0.13	82.32±0.28	89.03±1.20
45	46.93±0.47	74.52±0.16	81.74±0.28	87.03±1.80
50	45.44±0.60	74.43±0.19	81.20±0.31	84.78±2.50
55		74.41±0.24	80.70±0.35	
60		74.50±0.30	80.25±0.41	
65		74.71±0.37	79.85±0.48	
70		75.06±0.45	79.49±0.57	
75		75.58±0.55	79.17±0.66	
80		76.29±0.65	78.90±0.77	
85			78.68±0.89	
90			78.50±1.00	
95				
100				



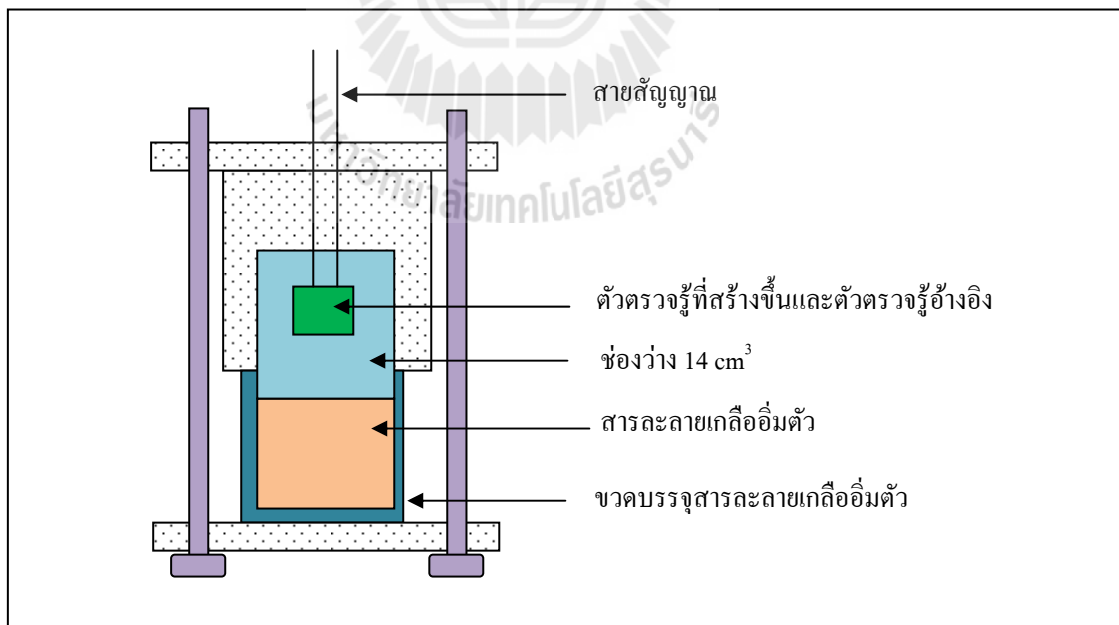
รูปที่ 5.6 สารละลายเกลืออิมตัวมาตรฐาน

5.1.2 การวัดผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

หลังจากทำการเตรียมสารละลายเกลืออิมตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะนำตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นพร้อมกับตัวตรวจรู้อุณหภูมิและตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง (SHT15) บรรจุภายในภาชนะที่มีสารละลายเกลืออิมตัวที่ปิดสนิท ทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นภายในภาชนะมีค่าเท่ากับความชื้นของสารละลายเกลืออิมตัวนั้น ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการวัดค่า Digital Output ทางด้านตัวรับแสงที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เตาอบในการควบคุมอุณหภูมิ และในแต่ละอุณหภูมินั้นจะทำการวัดค่าประมาณ 30 นาที ทำซ้ำวิธีการเดิมเพียงแต่เปลี่ยนชนิดของเกลือที่ให้ค่าความชื้นแตกต่างกันออกไป ณ อุณหภูมิคงที่ สำหรับในการทดสอบนี้จะใช้เกลือทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมไนเตรด โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมไนเตรด ที่ให้ความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 11 %RH ถึง 93 %RH โดยมีชุดปรับเทียบมาตรฐานของตัวตรวจรู้ด้วยสารละลายเกลืออิมตัวดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ชุดปรับเทียบมาตรฐานของตัวตรวจรู้ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว



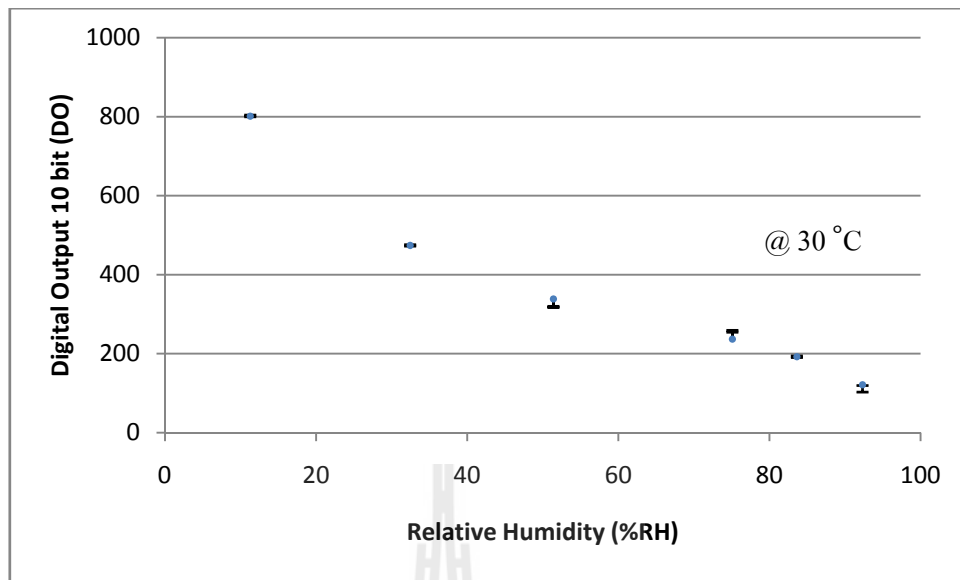
รูปที่ 5.8 โครงสร้างของชุดปรับเทียบความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว

5.1.2.1 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

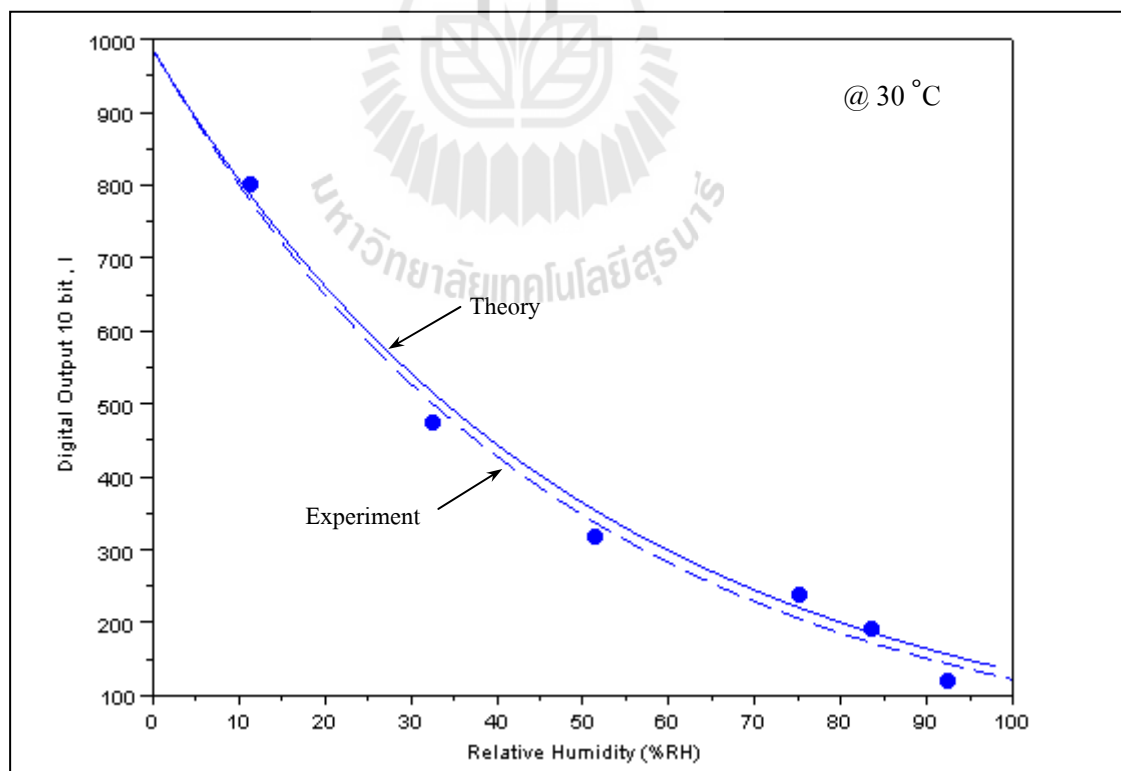
จากข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดลองได้แก่ ค่าอุณหภูมิและ Digital-Output (sensor) โดยทำการหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยการประมาณค่าในช่วง (interpolation) จากตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน โดยผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสดังตารางที่ 5.2 เมื่อนำผลการทดสอบมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสมการการส่งแสงผ่านวัสดุของแลมเบิร์ต (สมการที่ 4.10 ในบทที่ 4) ดังรูปที่ 5.10 พบว่าผลการทดสอบและทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งในการใช้งานจริงของตัวตรวจรู้ความชื้นนั้น ค่าผลตอบสนองของเอาต์พุตจะอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์แทนที่จะเป็นค่า Digital Output ดังนั้นจึงวาดกราฟผลตอบสนองใหม่โดยการสลับแกนของกราฟดังรูปที่ 5.11 5.12 และ 5.13 สำหรับกรณีการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง เส้นโค้งกำลังสอง และเอกซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับ Digital Output ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

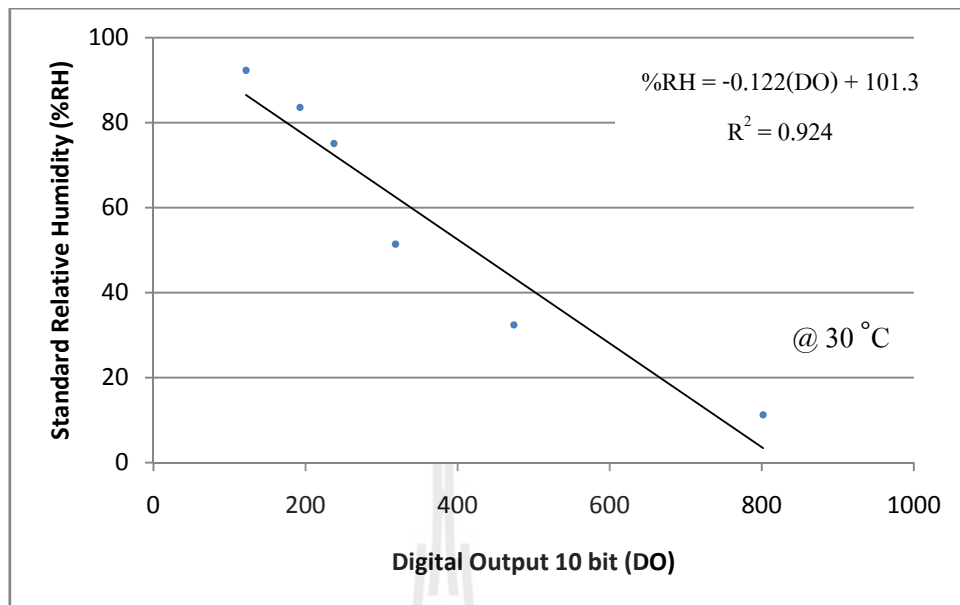
อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%RH)	Digital Output		
		max	average	min
30.156	11.28	804.283	801.623	799.577
30.100	32.44	476.104	473.854	472.217
30.227	51.40	319.994	318.358	316.721
30.259	75.09	238.973	237.131	234.062
30.475	83.62	194.575	192.529	190.483
30.223	92.31	123.374	121.532	119.486



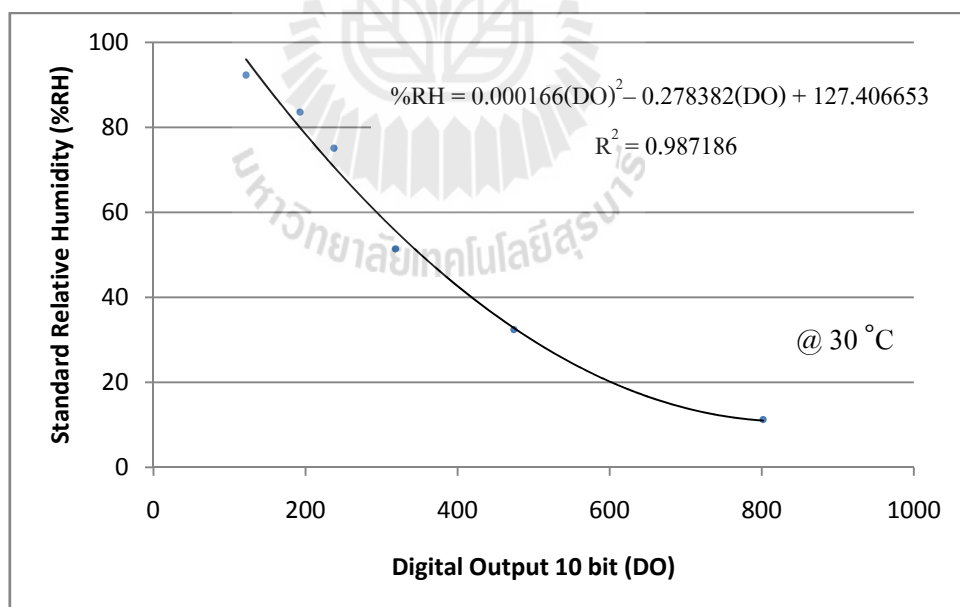
รูปที่ 5.9 ค่า Digital Output กับความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



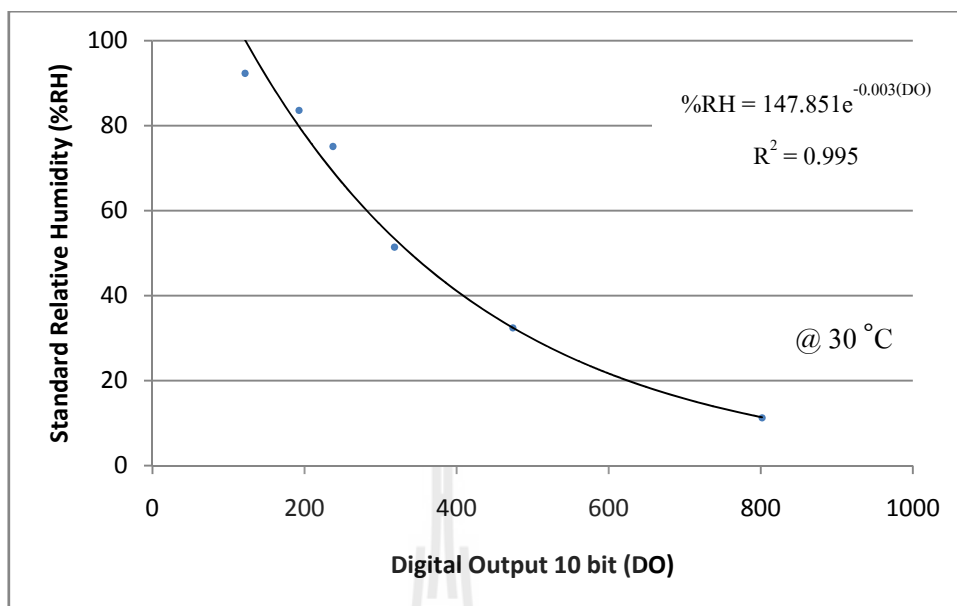
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการส่งแสงผ่านวัสดุที่อุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 5.11 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.12 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.13 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นเทียบกับ
ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้เชิงแสงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%RH)	ความคลาดเคลื่อนของความชื้น (%RH)		
	สมการเส้นตรง	สมการเส้นโค้ง กำลังสอง	สมการเอกซ์ โพเนนเชียล
11.28	-7.778	0.328	2.068
32.44	11.050	4.206	3.242
51.4	11.060	-4.362	5.491
75.09	-2.720	-3.657	-2.501
83.62	-5.808	3.716	-0.638
92.31	-5.840	0.328	10.369

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับค่า Digital Output ของตัวตรวจรู้ความชื้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยใช้ชุดสมการเส้นตรง เส้นโค้งกำลังสอง และเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 5.11 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการแทนค่าในชุดสมการแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 แบบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากตารางที่ 5.1 ซึ่ง

เป็นความชื้นสัมพัทธ์ของเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน หากพิจารณาเพียงแค่ค่า R^2 จะพบว่าชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 0.995 แต่ถ้านำข้อมูลมาแทนค่าในชุดสมการนี้ จะพบว่าไม่มีบางจุดข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับความชื้นจากเกลืออิ่มตัวมาตรฐานถึง 10.37 %RH ซึ่งได้แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความชื้นจากการแทนข้อมูลในชุดสมการทั้ง 3 แบบดังตารางที่ 5.3 โดยจะพบว่าการแทนข้อมูลในชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองดังสมการที่ 5.1 จะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกับความชื้นจากเกลืออิ่มตัวมาตรฐานที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.987 และจากสมการที่ 5.1 %RH คือความชื้นสัมพัทธ์ DO คือค่า Digital Output 10 bit

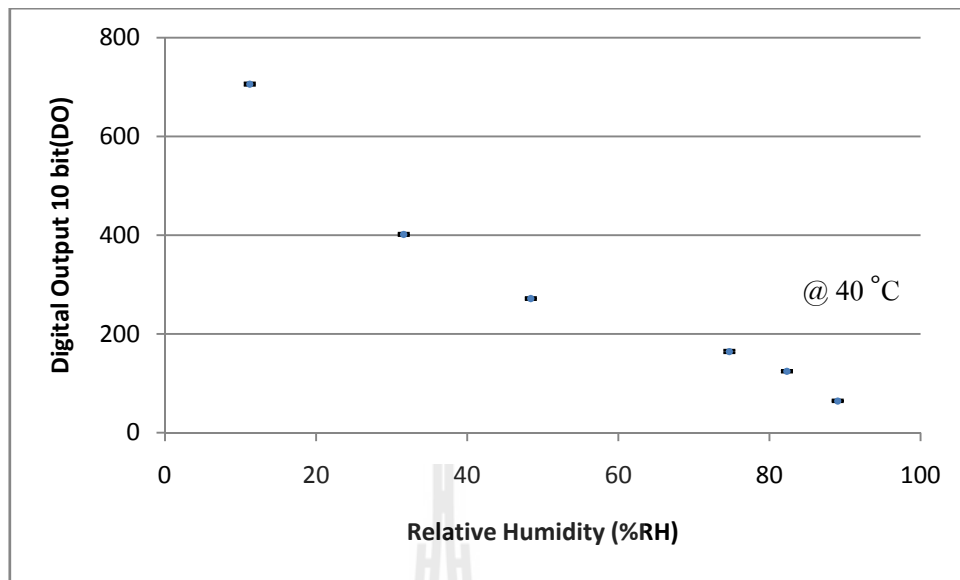
$$\%RH = f(DO) = 0.0001(DO)^2 - 0.2784(DO) + 127.4066 \quad (5.1)$$

5.1.2.2 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

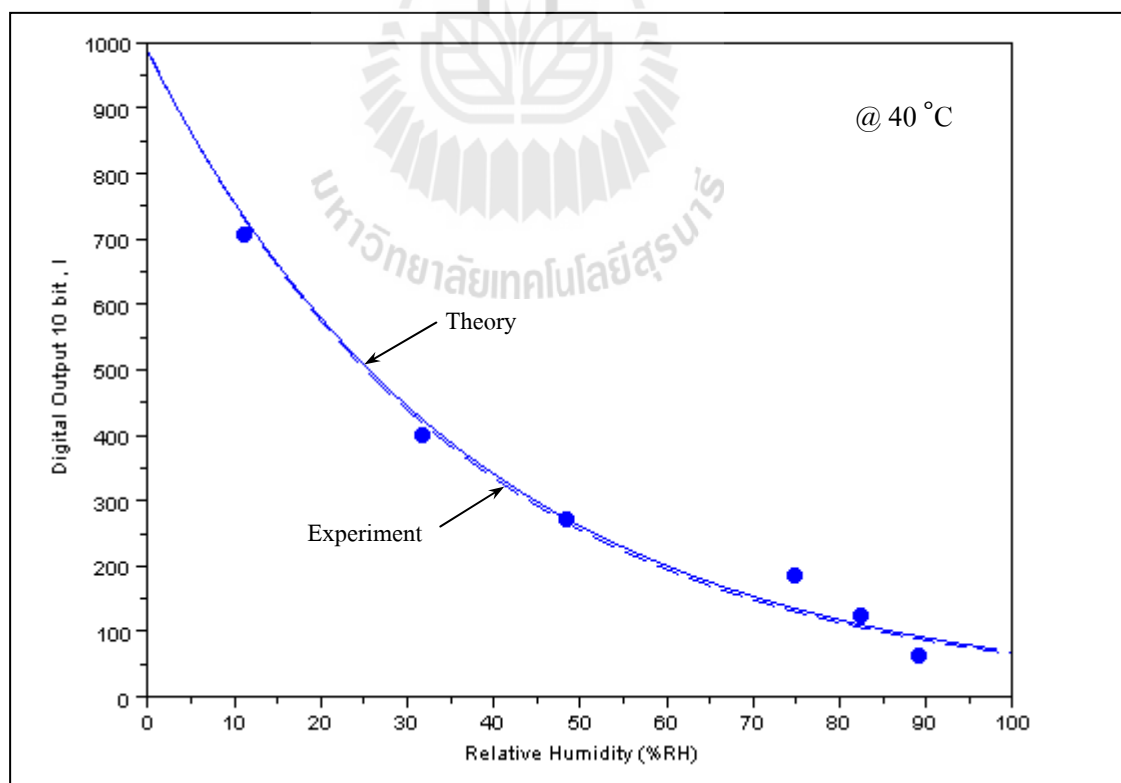
ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสดังตารางที่ 5.5 เมื่อนำผลการทดสอบมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสมการการส่งแสงผ่านวัสดุของแลมเบิร์ต (สมการที่ 4.10 ในบทที่ 4) ดังรูปที่ 5.15 พบว่าผลการทดสอบและทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งในการใช้งานจริงของตัวตรวจรู้ความชื้นนั้น ค่าผลตอบแทนของเอาต์พุตจะอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์แทนที่จะเป็นค่า Digital Output ดังนั้นจึงวาดกราฟผลตอบแทนใหม่โดยการสลับแกนของกราฟดังรูปที่ 5.16 5.17 และ 5.18 สำหรับกรณีการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง เส้นโค้งกำลังสอง และเอกซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับ Digital Output ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

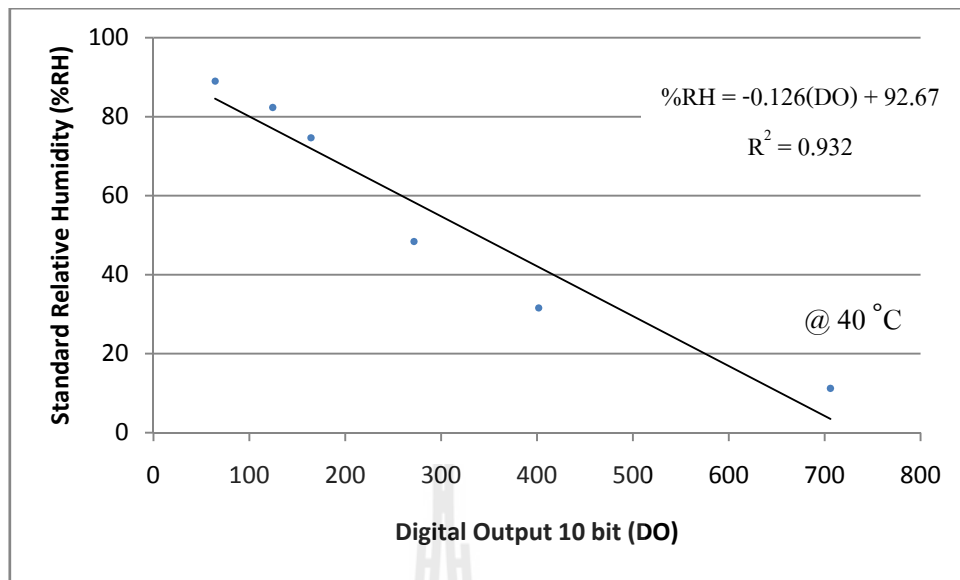
อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%RH)	Digital Output		
		max	average	min
40.121	11.21	708.734	706.075	703.824
40.350	31.60	404.085	401.630	399.379
39.805	48.42	273.755	271.504	269.458
40.490	74.68	187.823	184.754	182.299
40.499	82.32	126.443	124.397	122.76
40.443	89.03	66.495	64.244	62.608



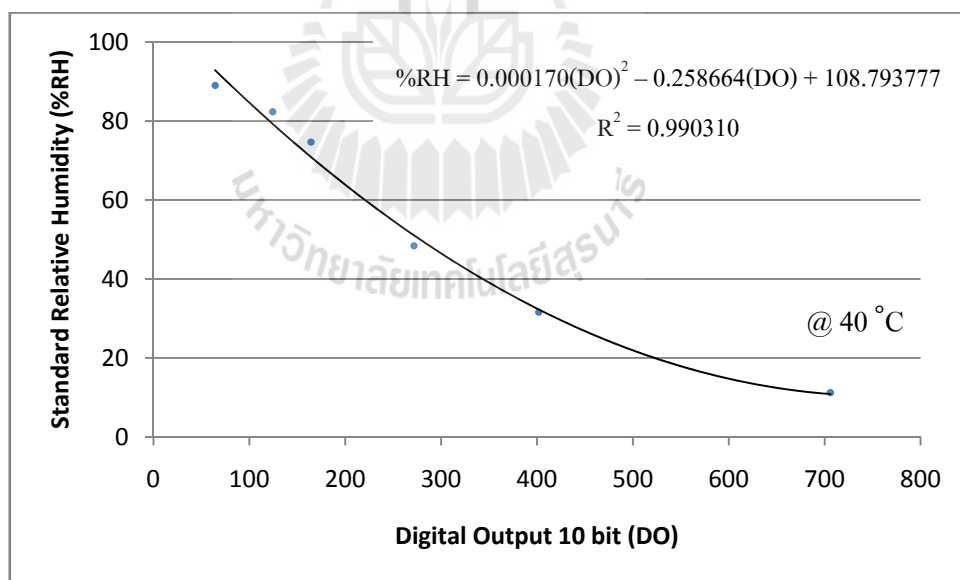
รูปที่ 5.14 ค่า Digital Output เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



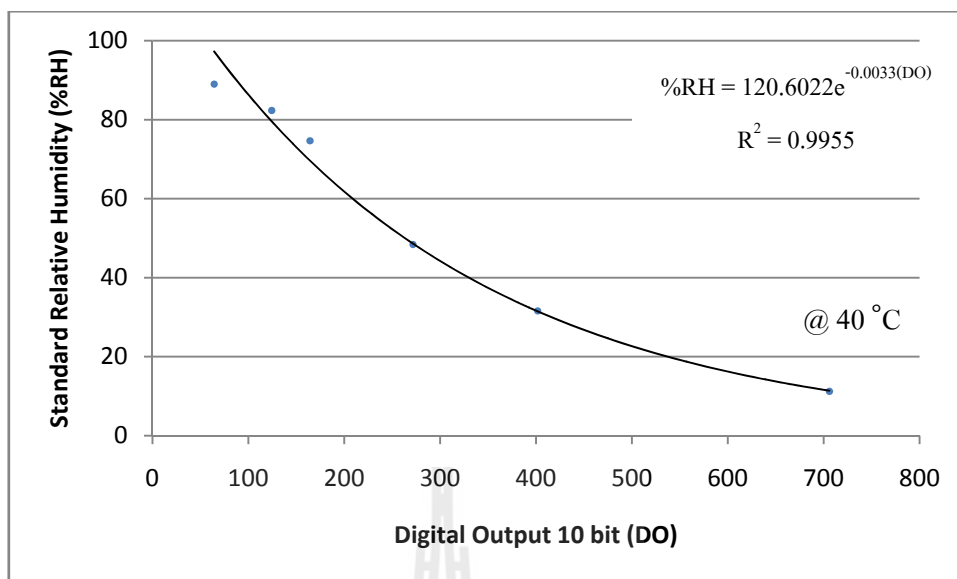
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการส่งแสงผ่านวัสดุที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 5.16 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.17 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.18 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นเทียบกับ
ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้เชิงแสงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%RH)	ความคลาดเคลื่อนของความชื้น (%RH)		
	สมการเส้นตรง	สมการเส้นโค้ง กำลังสอง	สมการเอกซ์ โพเนนเชียล
11.21	-7.54	-0.57	-0.08
31.60	10.73	1.76	-0.27
48.42	10.44	3.75	0.35
74.68	-2.21	-2.91	-4.46
82.32	-4.78	-2.31	-1.90
89.03	-3.85	4.37	9.64

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับค่า Digital Output ของตัวตรวจรู้ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสโดยใช้ชุดสมการเส้นตรง เส้นโค้งกำลังสอง และเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 5.16 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการแทนค่าในชุดสมการแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 แบบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากตารางที่ 5.1 ซึ่ง

เป็นความชื้นสัมพัทธ์ของเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน หากพิจารณาเพียงแค่ค่า R^2 จะพบว่าชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 0.996 แต่ถ้านำข้อมูลมาแทนค่าในชุดสมการนี้ จะพบว่าไม่มีบางจุดข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับความชื้นจากเกลืออิ่มตัวมาตรฐานถึง 9.64 %RH ซึ่งได้แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความชื้นจากการแทนข้อมูลในชุดสมการทั้ง 3 แบบดังตารางที่ 5.5 โดยจะพบว่าการแทนข้อมูลในชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองดังสมการที่ 5.2 จะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกับความชื้นจากเกลืออิ่มตัวมาตรฐานที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.990 และจากสมการที่ 5.2 %RH คือความชื้นสัมพัทธ์ DO คือค่า Digital Output 10 bit

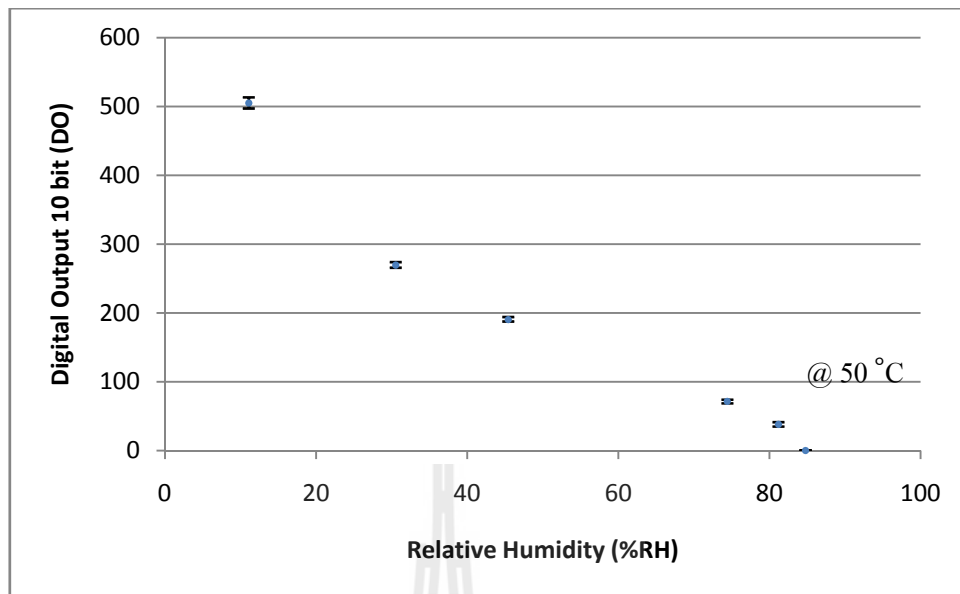
$$\%RH = f(DO) = 0.000170(DO)^2 - 0.258664(DO) + 108.793777 \quad (5.2)$$

5.2.3 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

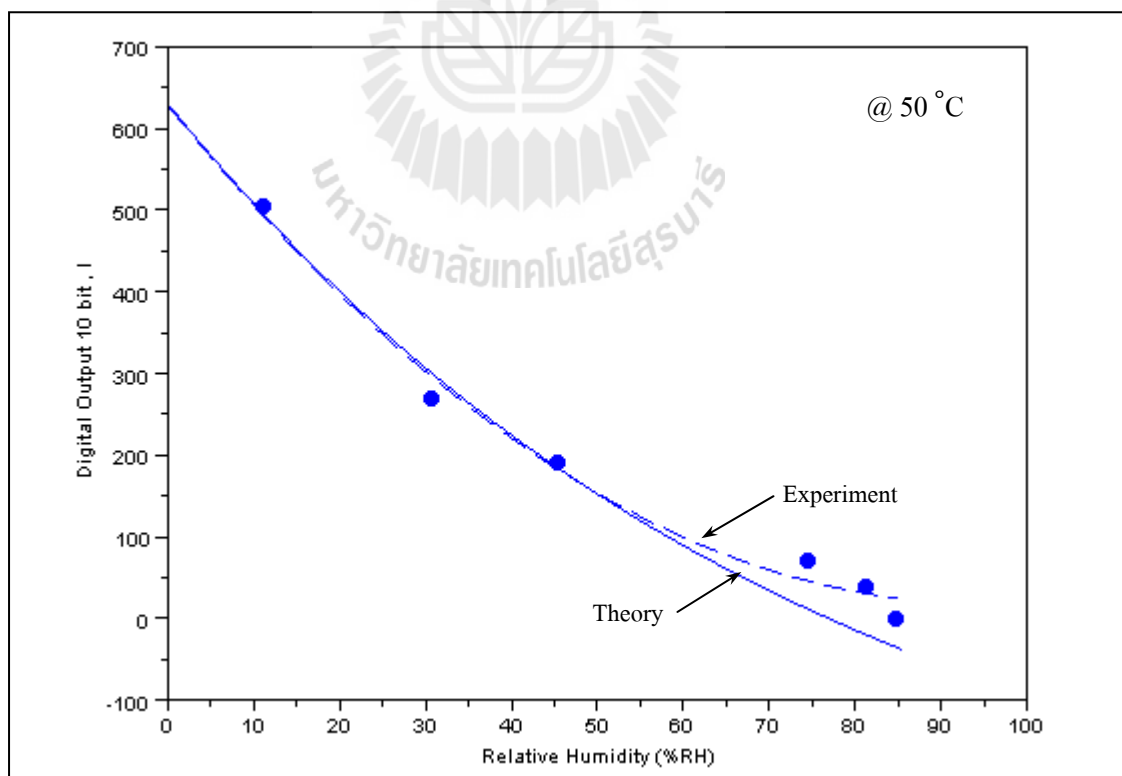
ผลการทดสอบตัวตรวจวัดความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสดังตารางที่ 5.6 เมื่อนำผลการทดสอบมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากสมการการส่งแสงผ่านวัสดุของแลมเบิร์ต (สมการที่ 4.10 ในบทที่ 4) ดังรูปที่ 5.20 พบว่าผลการทดสอบและทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งในการใช้งานจริงของตัวตรวจวัดความชื้นนั้น ค่าผลตอบสนองของเอาต์พุตจะอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์แทนที่จะเป็นค่า Digital Output ดังนั้นจึงวาดกราฟผลตอบสนองใหม่โดยการสลับแกนของกราฟดังรูปที่ 5.21 5.22 และ 5.23 สำหรับกรณีการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง เส้นโค้งกำลังสอง และเอกซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) กับ Digital Output ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

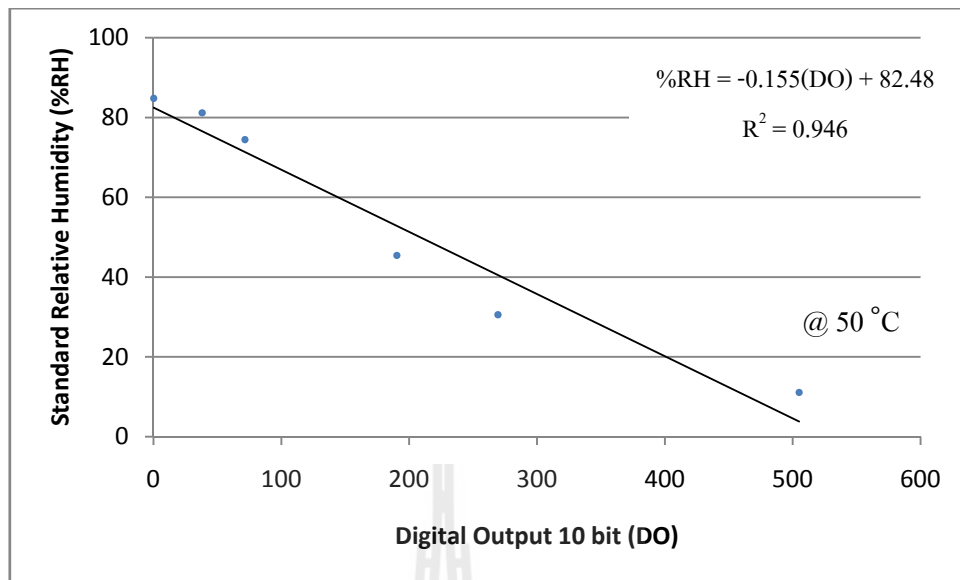
อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (%RH)	Digital Output		
		max	average	min
50.367	11.10	513.341	504.953	497.178
50.012	30.54	273.959	269.458	265.775
50.025	45.44	194.165	190.278	187.618
50.059	74.43	74.065	71.405	68.746
50.377	81.20	41.329	38.056	34.987
49.925	84.78	0.409	0.061	0.000



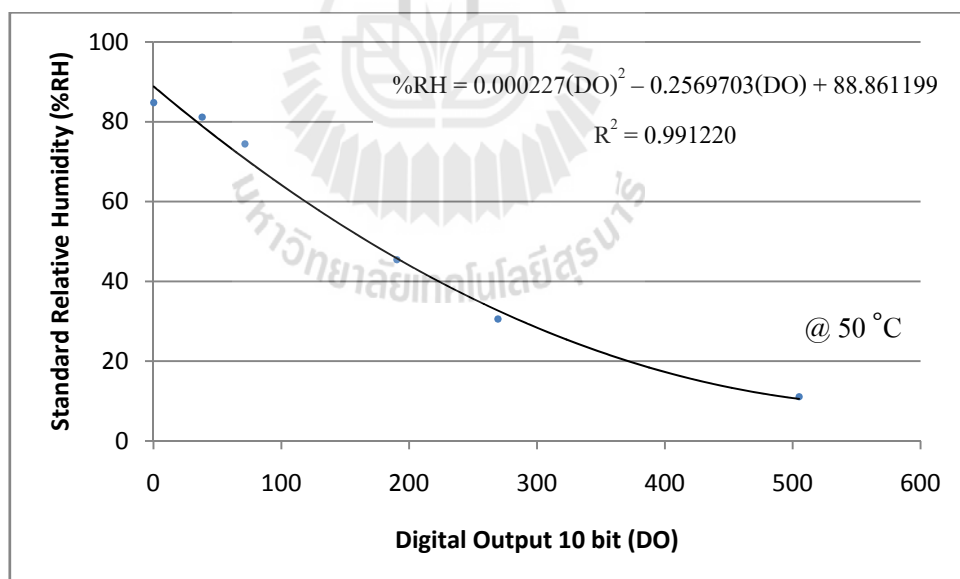
รูปที่ 5.19 ค่า Digital Output เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



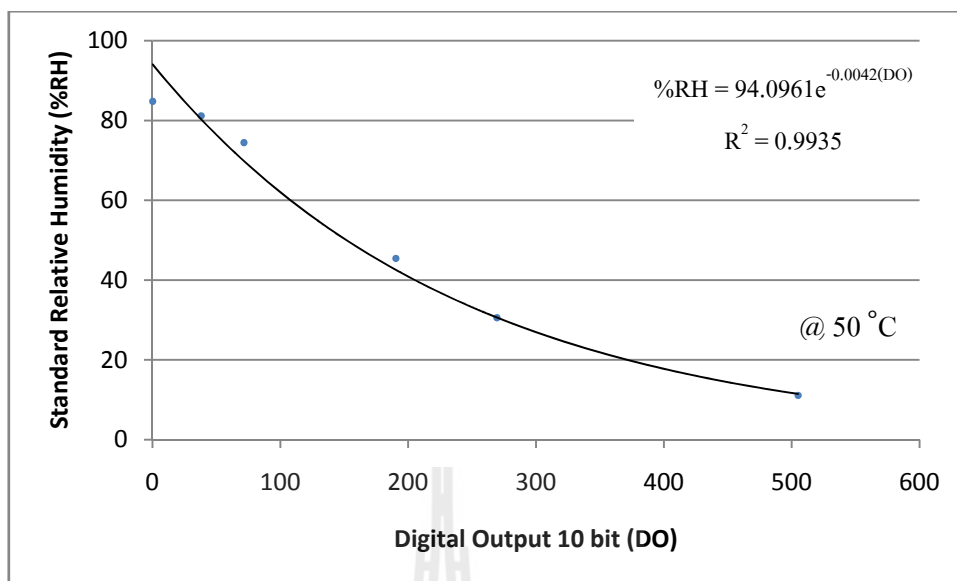
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีการส่งแสงผ่านวัสดุที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 5.21 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.22 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.23 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นเทียบกับ
ค่าความชื้นจริงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

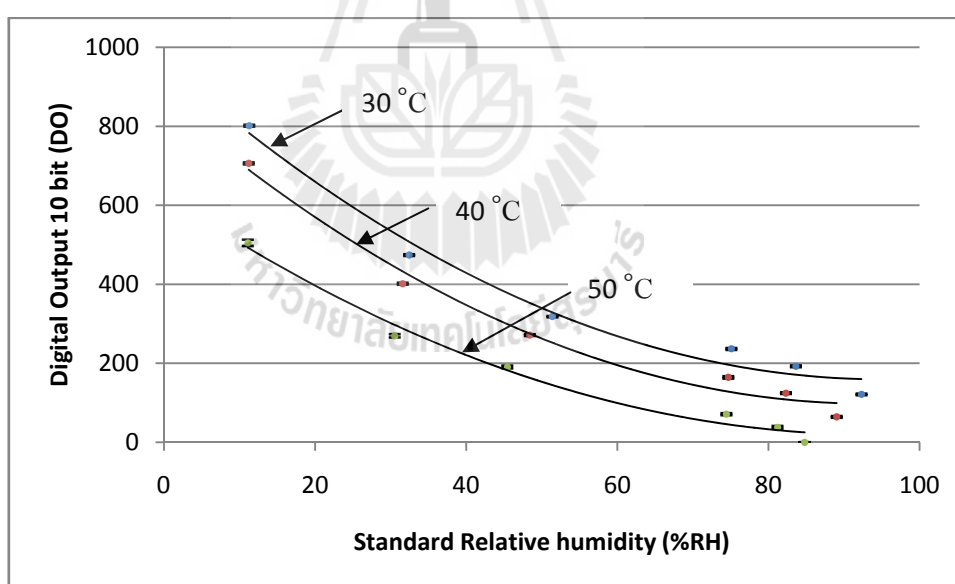
ตารางที่ 5.7 ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้เชิงแสงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%RH)	ความคลาดเคลื่อนของความชื้น (%RH)		
	สมการเส้นตรง	สมการเส้นโค้ง กำลังสอง	สมการเอกซ์ โพเนนเชียล
11.10	-6.89	-0.55	0.18
30.54	10.17	2.13	-0.20
45.44	7.55	0.32	-3.12
74.43	-3.02	-3.67	-4.72
81.2	-4.62	-2.27	-1.00
84.78	-2.31	4.06	9.29

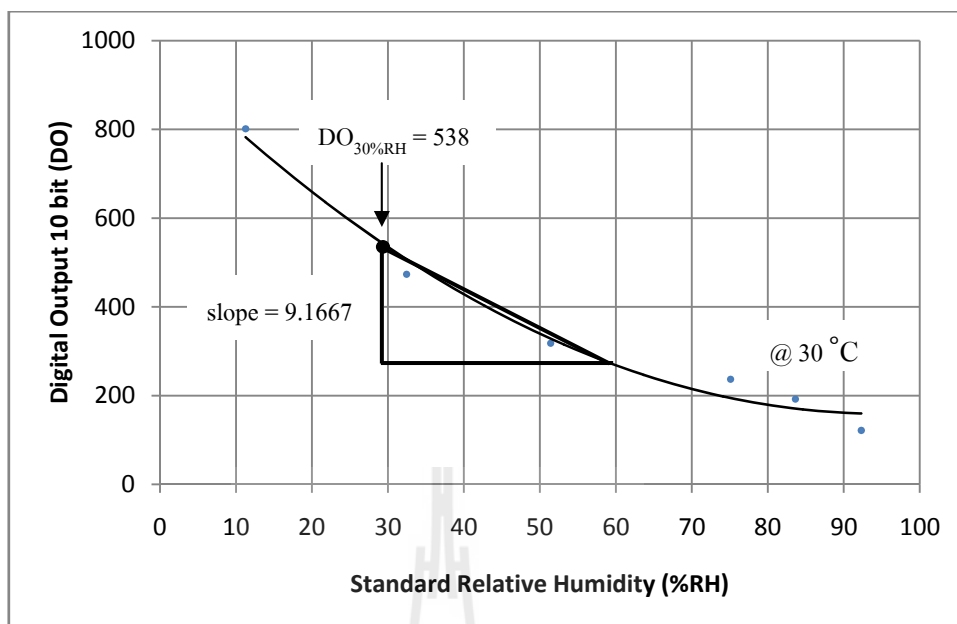
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับค่า Digital Output ของตัวตรวจรู้ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสโดยใช้ชุดสมการเส้นตรง เส้นโค้งกำลังสอง และเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 5.21 5.22 และ 5.23 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการแทนค่าในชุดสมการแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 แบบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากตารางที่ 5.1 ซึ่ง

เป็นความชื้นสัมพัทธ์ของเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน หากพิจารณาเพียงแค่ค่า R^2 จะพบว่าชุดสมการเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 0.994 แต่ถ้านำข้อมูลมาแทนค่าในชุดสมการนี้จะพบว่าไม่มีบางจุดข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับความชื้นจากเกลืออิ่มตัวมาตรฐานถึง 9.29 %RH ซึ่งได้แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความชื้นจากการแทนข้อมูลในชุดสมการทั้ง 3 แบบดังตารางที่ 5.7 โดยจะพบว่าการแทนข้อมูลในชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองดังสมการที่ 5.3 จะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกับความชื้นจากเกลืออิ่มตัวมาตรฐานที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.991 และจากสมการที่ 5.2 %RH คือความชื้นสัมพัทธ์ DO คือค่า Digital Output 10 bit ซึ่งสามารถหาความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น SU-8 จากความชันเฉลี่ยของสมการเส้นโค้งกำลังสองได้เท่ากับ 9.1667/%RH หรือเมื่อเทียบกับค่า Digital Output ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30 % จะได้ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 17,038 ppm/%RH ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5.25 และ 18,519 ppm/%RH 22,222 ppm/%RH ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

$$\%RH = f(DO) = 0.000227(DO)^2 - 0.269703(DO) + 88.861199 \quad (5.3)$$



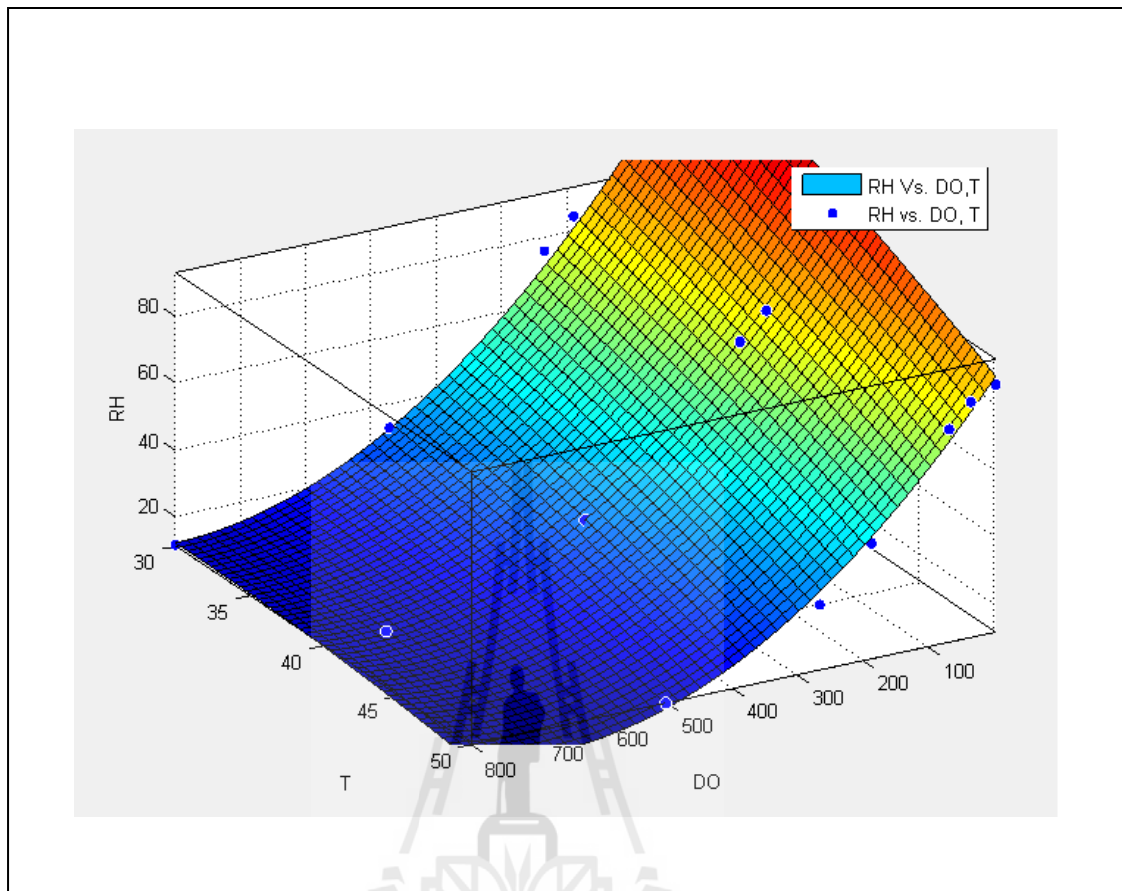
รูปที่ 5.24 ค่า Digital Output ของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °C เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง



รูปที่ 5.25 ค่า Digital Output ของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 30 °C เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง

5.2 การหาสมการเพื่อแทนชุดข้อมูล

การหาสมการเพื่อแทนชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง ซึ่งข้อมูลจะมี 3 ตัวแปร คือ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ Digital Output โดยจะใช้ Tool box ในโปรแกรม MATLAB ในการทำ Surface Fitting เพื่อหาสมการที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่สุ่ม แม้ว่ากราฟที่ได้จะไม่ผ่านทุกจุดของข้อมูลแต่กราฟจะเป็นกราฟเพียงเส้นเดียว นั่นคือมีสมการกราฟเพียงสมการเดียวตลอดช่วงที่กำหนดให้ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการปรับเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่า Digital Output และความชื้นสัมพัทธ์แบบพื้นผิว ดังรูปที่ 5.26 และจากการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง ดังสมการที่ 5.4 ซึ่งเป็นชุดสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลชุดนี้ โดยจะได้ค่าผลต่างกำลังสอง (R^2) เท่ากับ 0.989 และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด -4.578 ดังตารางที่ 5.8 ซึ่งในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะบอกค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง $\pm 2\%RH$ หรือ $\pm 5\%RH$ ดังนั้นตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นจึงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%RH$



รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Digital Output และความชื้นสัมพัทธ์
จากการทำ Surface Fitting แบบพื้นผิว

$$RH(\%) = 164.400000 - 0.356300(DO) - 0.631800(T) + 0.000178(DO)^2 + 0.002246(DO)(T) - 0.018210(T)^2 \quad (5.4)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ มีหน่วยเป็น %RH

DO คือ Digital Output 10 bit

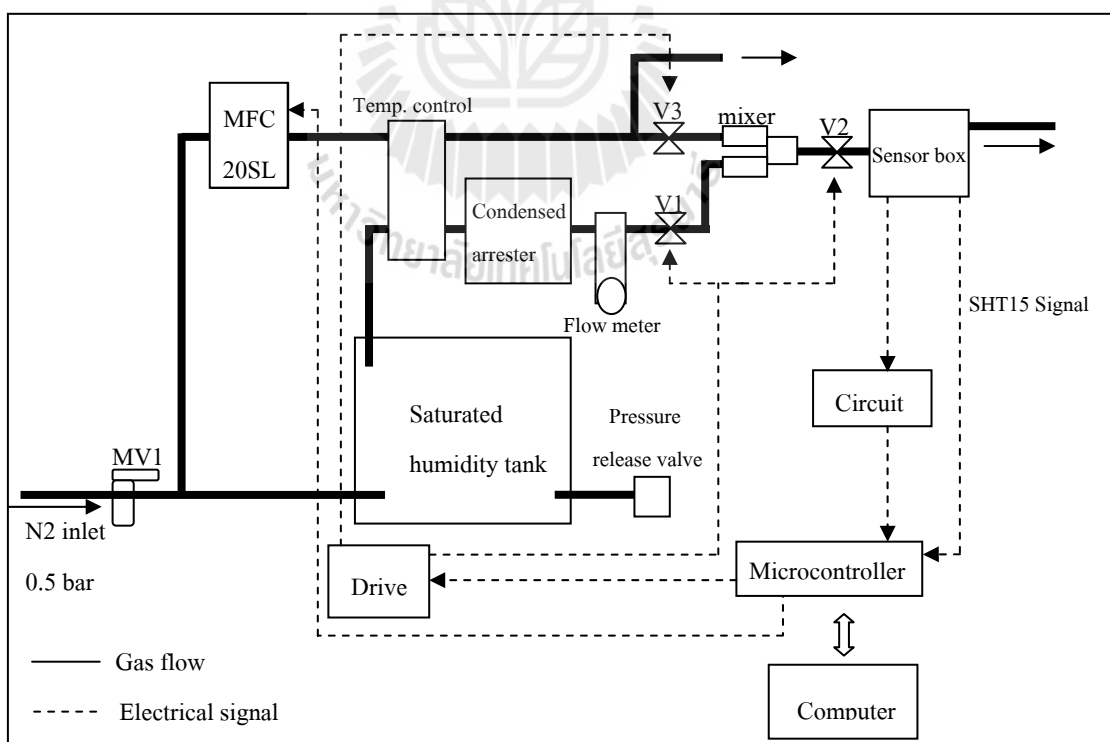
T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

ตารางที่ 5.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองและความชื้นสัมพัทธ์จากการเปรียบเทียบกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน

Digital Output 10 bit	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)		ความคลาดเคลื่อนของ ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)
		สารละลายเกลือ	สมการเส้นโค้ง กำลังสอง	
801.623	30	11.28	11.835	-0.555
473.854		32.44	32.119	0.321
318.818		51.40	55.037	-3.637
237.131		75.09	70.554	4.536
192.529		83.62	80.030	3.590
121.532		92.31	96.573	-4.263
706.075	40	11.21	10.592	0.618
401.630		31.60	31.686	-0.086
271.504		48.42	50.768	-2.348
164.294		74.68	71.019	3.661
124.397		82.32	79.600	2.720
64.244		89.03	93.608	-4.578
504.953	50	11.10	9.462	1.638
269.458		30.54	34.461	-3.907
190.278		45.44	47.302	-1.862
71.405		74.43	70.770	3.660
38.056		81.20	78.257	2.943
0.061		84.78	87.270	-2.490

5.3 การวัดผลตอบสนองทางเวลา

ผลตอบสนองทางเวลา (time response) เป็นการทดสอบความเร็วในการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ ในการทดสอบจะป้อนความชื้นแบบขั้นบันไดให้กับระบบเพื่อหาค่าคงที่ทางเวลา (time constant) ของการตอบสนอง โดยทั่วไปจะใช้ค่าคงที่ทางเวลาของผลตอบสนองที่ 63% เนื่องจากผลตอบสนองของเซนเซอร์ทั่ว ๆ ไปจะสมมติให้อยู่ในระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบอันดับหนึ่ง (first order) สำหรับเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นคือ เวลาตั้งแต่เริ่มป้อนความชื้นให้ตัวตรวจรู้จนกระทั่งผลตอบสนองเพิ่มขึ้นไปที่ 63% โดยมีระบบการป้อนความชื้นให้กับตัวตรวจรู้ดังรูปที่ 5.27 ซึ่งจะสร้างความชื้นด้วยการนำอากาศอิ่มตัวที่ได้จากไอน้ำของหม้อต้มน้ำกับอากาศแห้งจากแก๊สไนโตรเจน โดยควบคุมความชื้นด้วยการเพิ่มลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในขณะที่อากาศอิ่มตัวคงที่ ซึ่งอากาศอิ่มตัวและอากาศแห้งจะเข้ามารวมตัวกันกลายเป็นความชื้นที่เราต้องการเข้าสู่กล่องสำหรับบรรจุตัวตรวจรู้ในการทดสอบผลตอบสนองทางเวลา บันทึกผลการทดสอบผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 และแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของแผนภาพระบบการวัดผลตอบสนองทางเวลาจะอธิบายไว้ในภาคผนวก ง โดยจะวัดผลตอบสนองทั้งแบบหลายขั้นและแบบขั้นบันได ดังนี้



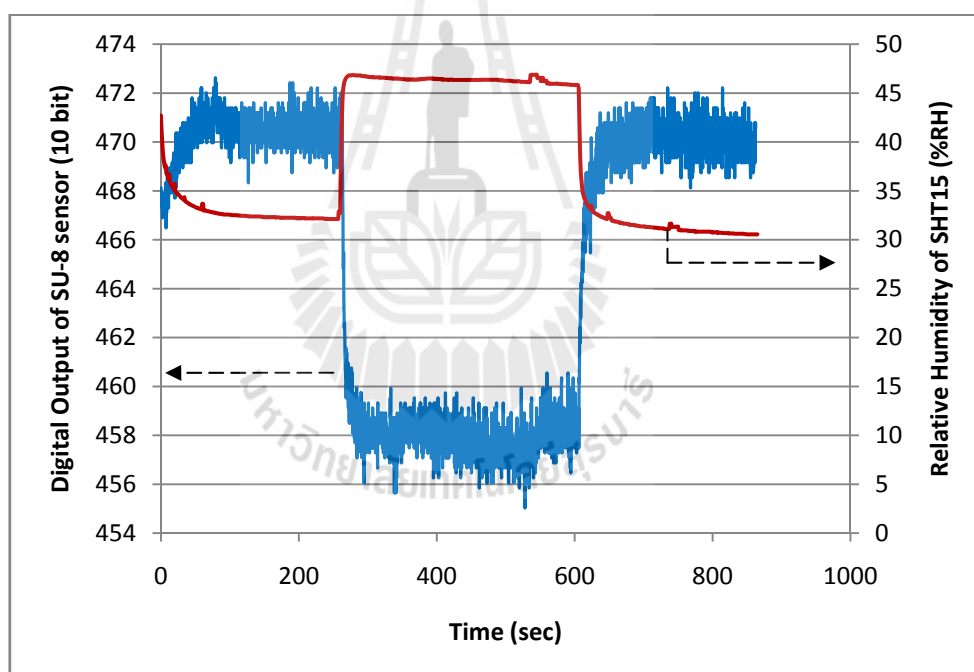
รูปที่ 5.27 แผนภาพระบบการวัดผลตอบสนองทางเวลา

5.3.1 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบขั้นบันได

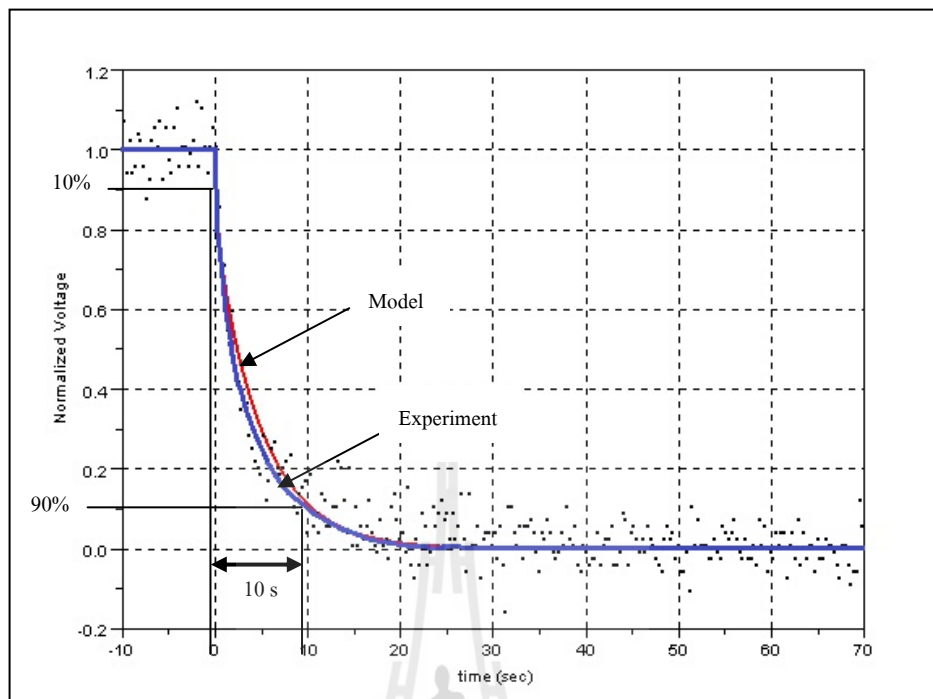
การวัดผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบขั้นบันไดโดยการป้อนความชื้นให้กับตัวตรวจรู้ความชื้นดังตารางที่ 5.9 เพื่อศึกษาผลตอบสนองทางเวลาในการดูดและคายความชื้นของตัวตรวจรู้

ตารางที่ 5.9 ค่าความชื้นที่ป้อนให้กับตัวตรวจรู้ในการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้นบันได

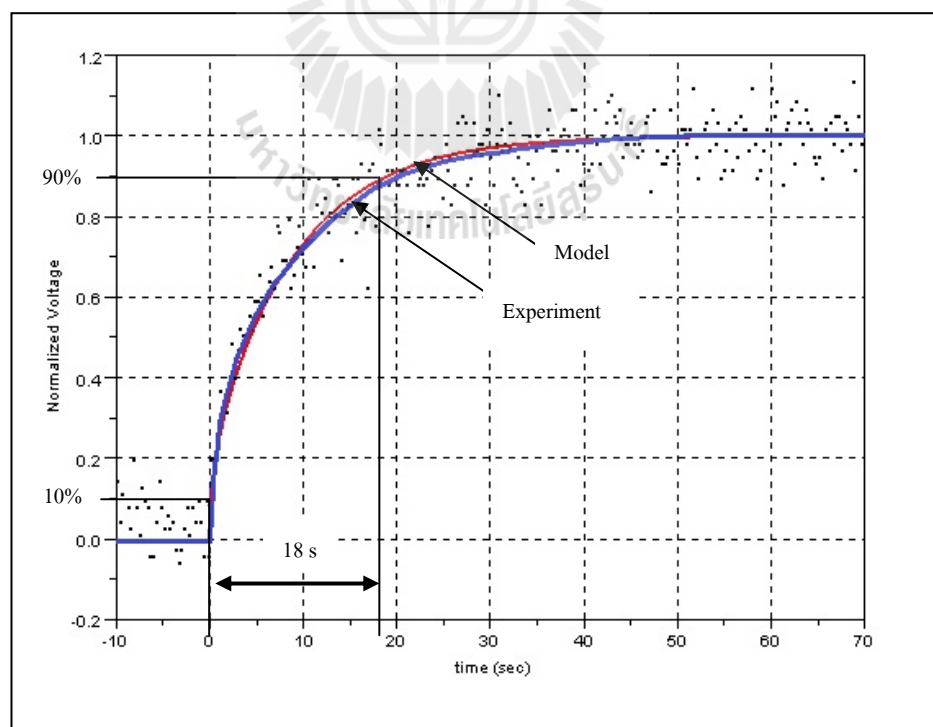
step	flow rate (dry) SCCM	flow rate (sat) SCCM	step time (s)
1	18,000	4,000	300
2	10,000	4,000	400
3	18,000	4,000	300



รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ (SHT15) และตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองในการลดความถี่ของตัวตรวจรู้เทียบกับการจำลองผลทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 5.30 ผลตอบสนองในการยกความถี่ของตัวตรวจรู้เทียบกับการจำลองผลทางคณิตศาสตร์

จากการวัดผลตอบแทนแบบขั้นบันไดโดยการป้อนความชื้นให้กับระบบ ในช่วง 20-30 %RH จะได้ผลตอบแทนของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นและตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ ดังรูปที่ 5.28 จะพบว่าในช่วงแรกค่าเอาต์พุตที่ได้จะค่อยๆ ต่ำลงมาจนกระทั่งมาหยุดนิ่งอยู่ที่ค่าๆ หนึ่ง เนื่องจากความชื้นในกล่องบรรจุตัวตรวจรู้มีค่ามากกว่าความชื้นที่ป้อนเข้าไปใหม่ ดังนั้น ผลการวัดที่ได้ทั้งค่าความชื้นจากตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์(SHT15) และค่า Digital Output จากตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นจึงค่อยๆ ลดต่ำลงมาจนกระทั่งถึงค่าความชื้นที่ป้อนให้กับระบบในขณะนั้น ผลตอบแทนทางเวลาของตัวตรวจรู้จะคิดที่ 63% (เริ่มนับเวลาตั้งแต่ 0% จนถึง 63%) และ 90% (เริ่มนับเวลาตั้งแต่ 10% จนถึง 90%) ซึ่งผลตอบแทนในการดูความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกันดังรูปที่ 5.29 โดยผลตอบแทนทางเวลาในการดูความชื้นของตัวตรวจรู้ที่ 63% มีค่าเท่ากับ 2.7 วินาที ที่ 90% มีค่าเท่ากับ 10 วินาที และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเข้าสู่สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เท่ากับ $50 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ส่วนผลตอบแทนในการคายความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 5.30 มีผลตอบแทนในการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ที่ 37% มีค่าเท่ากับ 6.5 วินาที ที่ 10% มีค่าเท่ากับ 18 วินาที และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นออกจากสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เท่ากับ $28 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ดังตารางผลตอบแทนทางเวลาของตัวตรวจรู้ที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลตอบแทนทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น SU-8

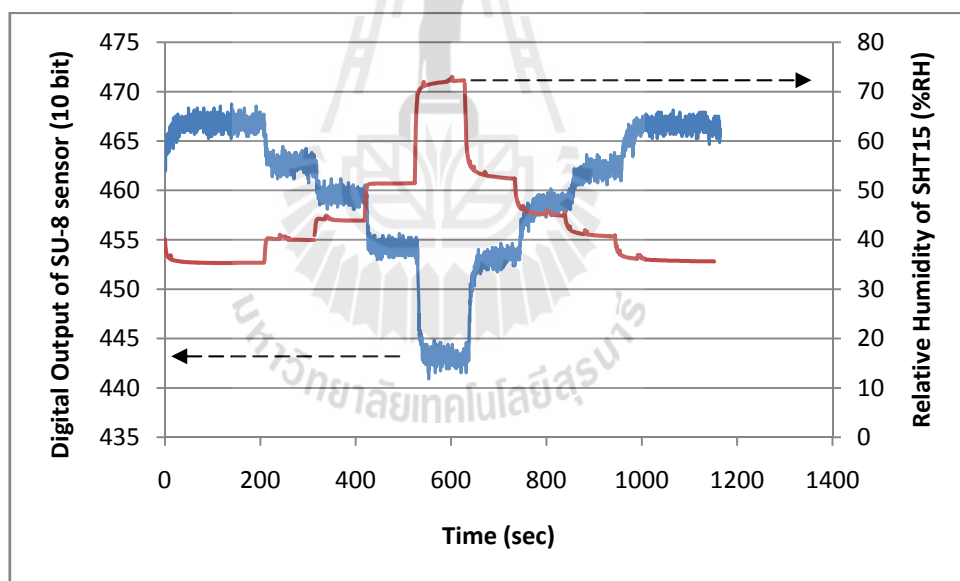
	ผลตอบแทนทางเวลา (sec)		สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
	63%	90%	
ดูความชื้น	2.7	10	50×10^{-12}
คายความชื้น	6.5	18	28×10^{-12}

5.3.2 ผลตอบแทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบหลายขั้น

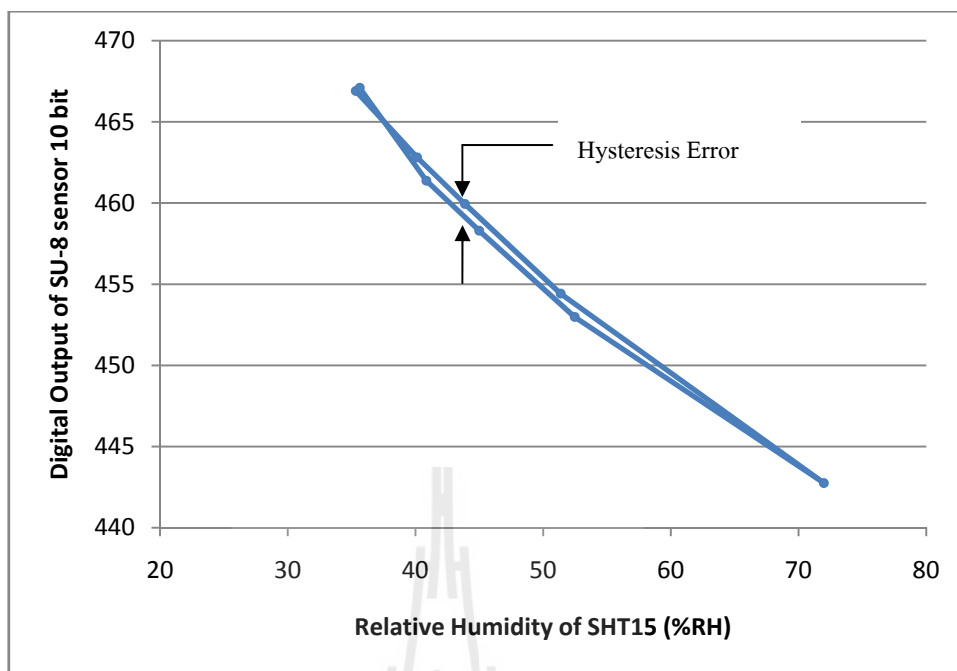
การวัดผลตอบแทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบหลายขั้นโดยการป้อนความชื้นให้กับตัวตรวจรู้ความชื้นดังตารางที่ 5.11 เพื่อศึกษาผลของฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งเป็นผลต่างสูงสุดของค่าแท้จริงที่อ่านได้จากตัวตรวจรู้ในช่วงขาขึ้น (จุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุด) กับขาลง (จุดสูงสุดถึงจุดเริ่มต้น) ที่จุด ๆ เดียวกัน โดยจะพิจารณาเฉพาะในส่วนของบริษัทช่วงที่กว้างที่สุดของวงรอบ (Loop) ฮิสเตอร์รีซิสจะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกลและมักจะเกิดขึ้นที่ระดับ 50% F.S. ของการวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุต

ตารางที่ 5.11 ค่าความชื้นที่ป้อนให้กับตัวตรวจรู้ในการทดสอบผลตอบแทนแบบหลายชั้น

step	flow rate (dry) SCCM	flow rate (sat) SCCM	step time (s)
1	18,000	4,000	240
2	15,000	4,000	120
3	13,000	4,000	120
4	10,000	4,000	120
5	5,000	4,000	120
6	10,000	4,000	120
7	13,000	4,000	120
8	15,000	4,000	120
9	18,000	4,000	240



รูปที่ 5.31 ผลตอบสนองแบบต่อการเปลี่ยนแปลงหลายชั้นของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ (SHT15) และตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น

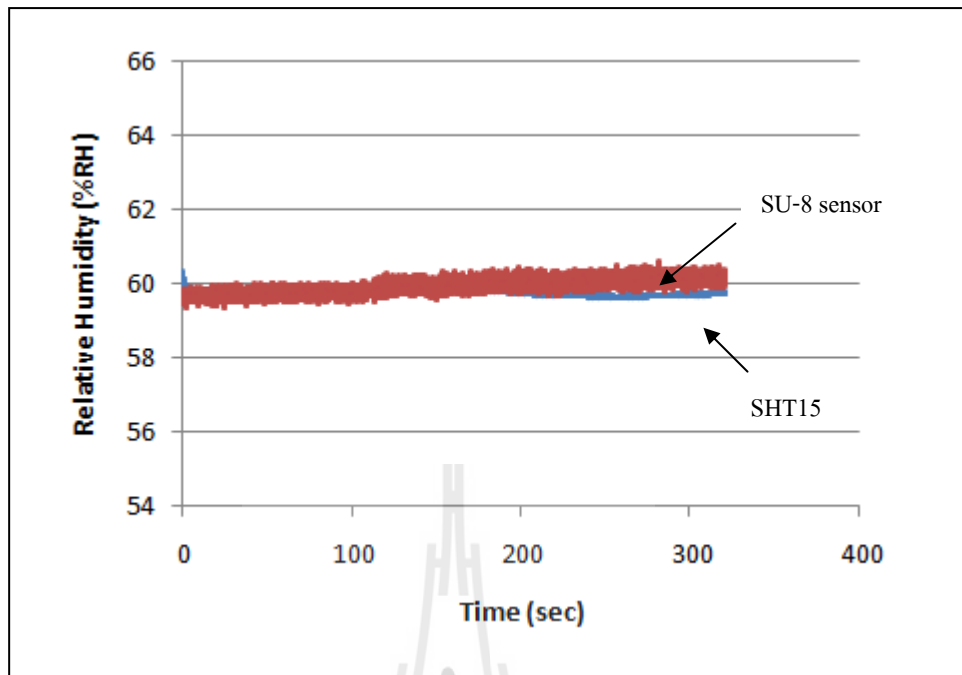


รูปที่ 5.32 ฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น

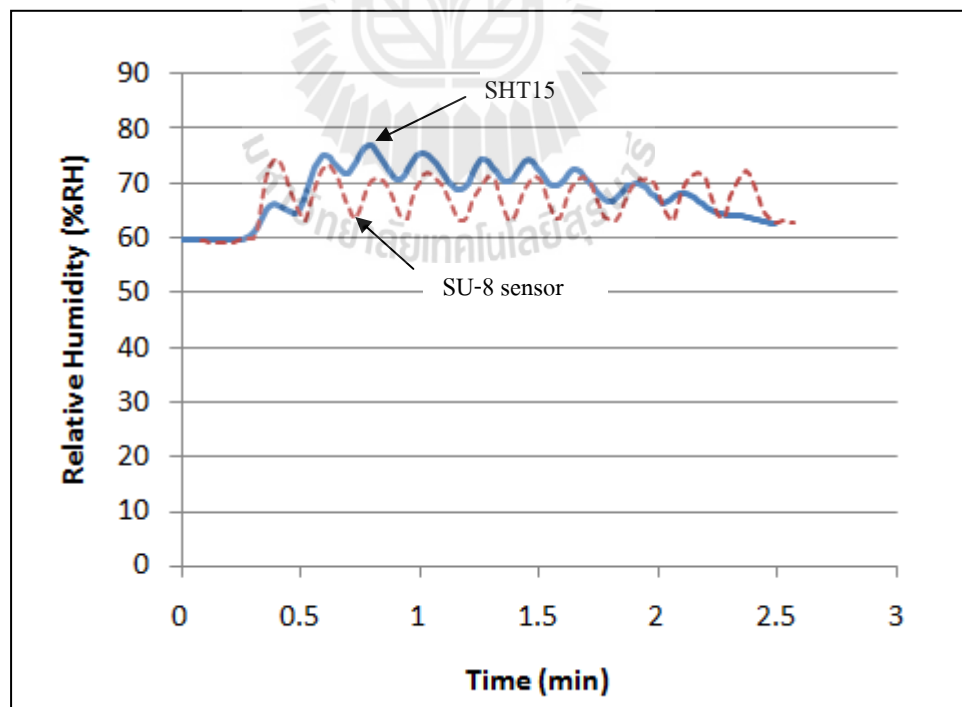
จากผลการทดสอบผลตอบแทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบหลายขั้นเพื่อศึกษาผลของฮิสเตอร์รีซิส โดยการป้อนความชื้นให้กับระบบดังตารางที่ 5.11 ซึ่งได้ผลตอบแทนต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบหลายขั้นของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ (SHT15) และตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 5.31 โดยนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละขั้นจำนวน 20 ค่า มาหาค่าเฉลี่ยและทำการพล็อตกราฟดังรูปที่ 5.32 เพื่อหาค่าฮิสเตอร์รีซิส พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นมีค่าฮิสเตอร์รีซิสเท่ากับ 4.10 %F.S.

5.4 การทดสอบวัดความชื้นด้วยตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง

การทดสอบวัดความชื้นด้วยตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) ลักษณะสีขาว ที่มีความกว้างของซี่ 60 μm เป็นวัสดุไวความชื้น โดยการนำสมการที่ 5.4 ซึ่งเป็นสมการเส้นโค้งกำลังสองเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลให้ออกมาในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ โดยได้นำตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นมาทดสอบวัดความชื้นของอากาศในห้องปฏิบัติการและวัดความชื้นจากลมหายใจ เพื่อดูความแม่นยำในการวัดค่าความชื้น ซึ่งใช้ความชื้นที่อ่านได้จากตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ (SHT 15) เป็นตัวอ้างอิง



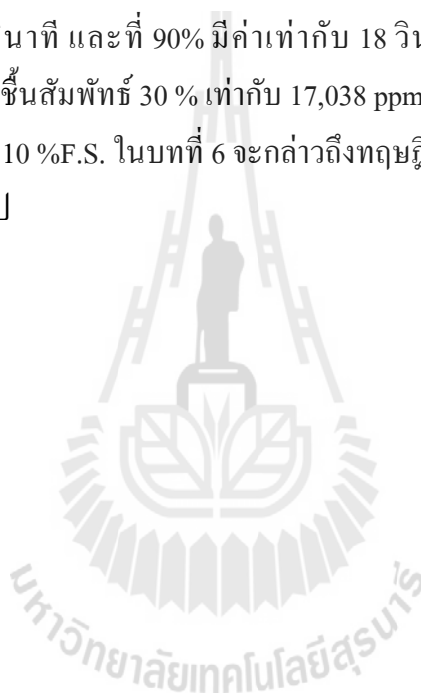
รูปที่ 5.33 ความชื้น ณ ห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.34 ความชื้นจากลมหายใจ (หายใจ 4 ครั้งต่อนาที)

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง (SU-8 sensor) ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (Static response) และการทดสอบวัดผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) การวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวโดยใช้ความชื้นมาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิคงที่ 3 ค่า คือ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ส่วนการวัดผลตอบสนองทางพลวัตหรือผลตอบสนองทางเวลาจะป้อนความชื้นให้กับตัวตรวจรู้ความชื้นแบบขั้นบันไดในช่วง 20-30 %RH ได้ผลตอบสนองทางเวลาในการดูดความชื้นที่ 63% มีค่าเท่ากับ 2.7 วินาที และที่ 90% มีค่าเท่ากับ 10 วินาที ผลตอบสนองในการคายความชื้นที่ 63% มีค่าเท่ากับ 6.5 วินาที และที่ 90% มีค่าเท่ากับ 18 วินาที มีความไวเฉลี่ยเมื่อเทียบกับค่า Digital Output ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30 % เท่ากับ 17,038 ppm/%RH ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าฮิสเตอร์รีซิสเท่ากับ 4.10 %F.S. ในบทที่ 6 จะกล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศต่อไป



บทที่ 6

ทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

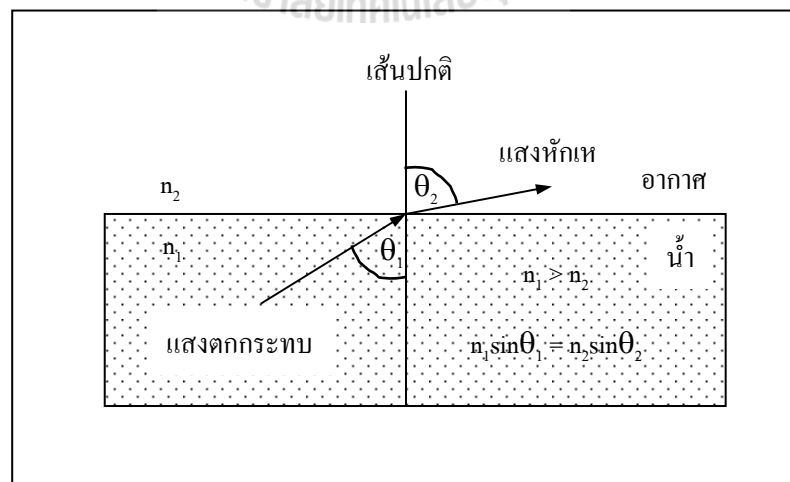
ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ ซึ่งทฤษฎีการคำนวณจะประกอบด้วยการหักเหของแสง ความเข้มแสง การส่งสัญญาณแสงผ่านวัสดุ ส่วนการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศนั้น จะประกอบด้วยการวาดกลายของตัวตรวจรู้ด้วยโปรแกรม Layout editor ตลอดจนขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 ทฤษฎีการคำนวณของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

ทฤษฎีการคำนวณของตัวตรวจรู้ฟองอากาศจะประกอบด้วยทฤษฎีทางแสง ได้แก่ การหักเหของแสง ความเข้มแสง และการส่งสัญญาณแสงผ่านวัสดุ โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1.1 การหักเหของแสง

การหักเหและมุมหักเหของแสง แสงตกกระทบจะหักเหที่รอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงที่ต่างกันได้ ดังรูปที่ 6.1 โดยแสงตกกระทบ แสงหักเห และเส้นปกติที่เกิด ณ จุดตกกระทบที่รอยต่อของตัวกลางทั้งสองจะอยู่ในระนาบเดียวกัน



รูปที่ 6.1 การหักเหของแสง

ค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) ปกติแล้วแสงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ คือ ประมาณ 3×10^8 m/s แต่ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางชนิดอื่น ๆ จึงเห็นได้ว่าแสงจะเกิดการหักเหขึ้น ซึ่งค่าดัชนีการหักเหของแสงจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านดังตารางที่ 6.1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการหักเหของแสง ความเร็วของแสงในตัวกลาง และความเร็วของแสงในสุญญากาศได้ดังสมการที่ 6.1

$$n = \frac{c}{v} \quad (6.1)$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีการหักเหของแสงในตัวกลางนั้น
 c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ (3×10^8 m/s)
 v คือ ความเร็วแสงในตัวกลางนั้น (m/s)

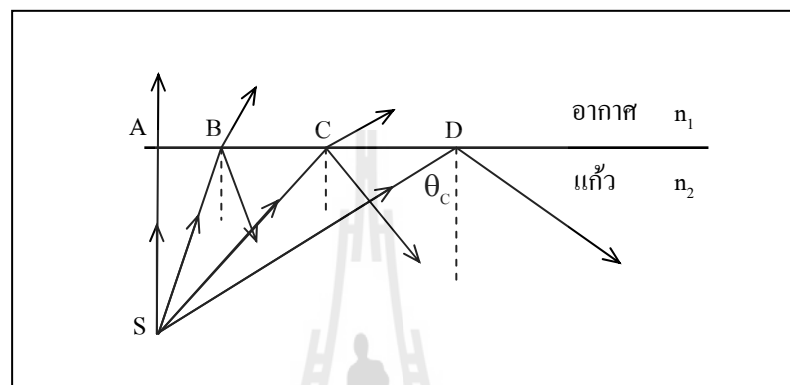
ตารางที่ 6.1 ค่าดัชนีการหักเหแสงของตัวกลางชนิดต่าง ๆ

ตัวกลาง	ดัชนีการหักเหแสง
อากาศ	1.00
น้ำ	1.33
ซิลิโคน PDMS	1.45
แก้ว	1.50
แอลกอฮอล์	1.36
เพชร	2.42
PMMA	1.49

อธิบายการหักเหของแสงด้วยหลักการของแสง (Geometrical optic) โดยให้จุดกำเนิดแสงอยู่ที่ S จะมีแสงออกจากจุด S นี้ไปยังจุดต่าง ๆ ของผิวแก้ว ดังรูปที่ 6.2 จุด A แสงจะพุ่งออกจากแก้วไปยังอากาศโดยไม่มีการหักเห ที่จุด B จะมีการหักเหเล็กน้อย และมีบางส่วนสะท้อนกลับมาในแก้ว ที่จุด C จะมีการหักเหมากขึ้นเล็กน้อย และมีบางส่วนสะท้อนกลับมาในแก้ว ที่จุด D จะไม่มีการหักเห แสงจากจุด S ทั้งหมดจะสะท้อนกลับมาในแก้ว ซึ่งจะเรียกมุม θ_c ว่ามุม

วิกฤต (Critical angle) ทำให้เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด (Total reflection) หาค่ามุม θ_c ได้จากสมการที่ 6.2 โดย n_1 และ n_2 คือค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

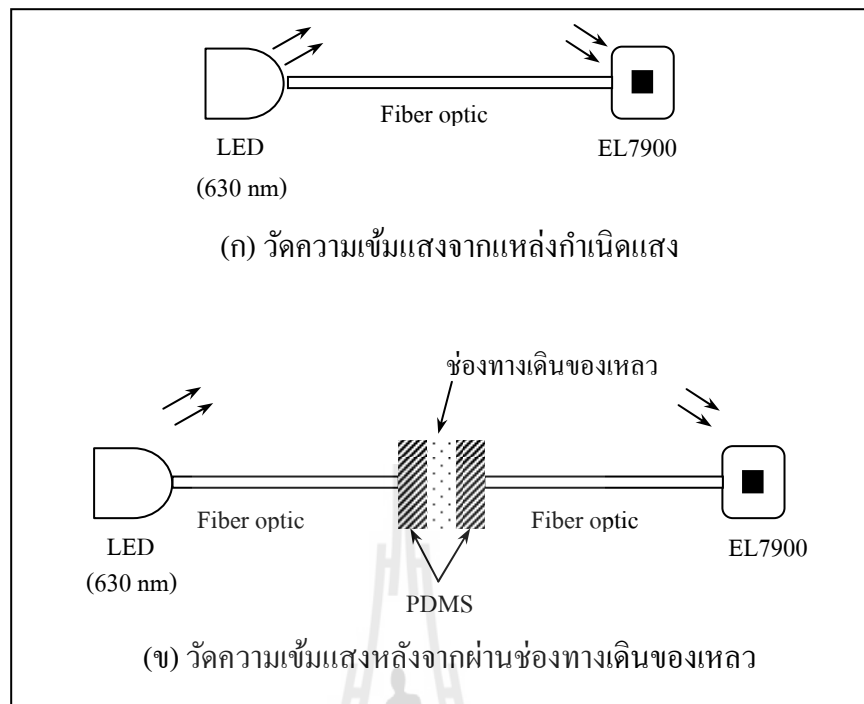
$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (6.2)$$



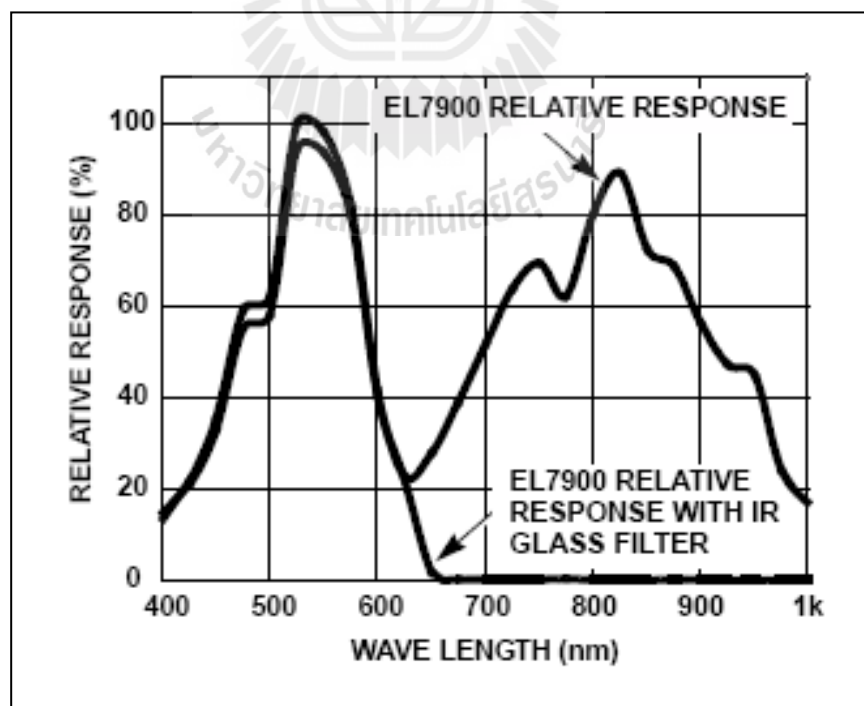
รูปที่ 6.2 การหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน

6.1.2 ความเข้มแสง

ความเข้มแสง (Illuminance; E; Lux) คือ ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบบนส่วนย่อยหนึ่งของพื้นที่ผิวนั้นหารด้วยพื้นที่ของส่วนย่อยนั้น มีหน่วยเป็น ลักซ์ (Lux; Lx) ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity; I; Cd) คือ ฟลักซ์ส่องสว่างที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงและกระจายในส่วนย่อยของมุมเชิงของแข็งในทิศทางที่กำหนดต่อส่วนย่อยของมุมเชิงของแข็งนั้น มีหน่วยเป็น แคนเดลา (Candela; Cd) ในวิทยานิพนธ์นี้จะวัดความเข้มแสงของตัวตรวจรู้ฟองอากาศโดยใช้โฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวรับแสง (EL7900) ซึ่งจะพิจารณาความเข้มแสง 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรกจะวัดความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงดังรูปที่ 6.3(ก) ตำแหน่งที่สองจะวัดความเข้มแสงหลังผ่านโครงสร้างของช่องทางเดินของเหลวในขณะที่มีอากาศบรรจุอยู่และในขณะที่มีของเหลวบรรจุอยู่ ดังรูปที่ 6.3(ข) โดยการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 ตำแหน่งการวัดความเข้มแสง



รูปที่ 6.4 การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900)

การหาค่าความเข้มแสงนั้นจะต้องพิจารณาความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากรูปที่ 6.4 เป็นการตอบสนองต่อความยาวคลื่นในย่านแสงขาว ซึ่งจะสามารถหาความเข้มแสง L_{INPUT} ได้ดังสมการที่ 6.5 โดยที่ I_{OUT} คือกระแสเอาต์พุต V_{OUT} คือความเข้มแสงอินพุต และ R_{LOAD} คือความต้านทานที่ต่อให้กับโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) และสามารถหาค่าความต้านทาน R_{LOAD} ที่เหมาะสมให้กับโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) ได้ดังสมการที่ 6.6 โดยที่ V_{SUP} คือแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และ L_{RANGE} คือความเข้มแสงในย่านที่ต้องการ

$$I_{OUT} = \left(\frac{60\mu A}{100lux} \right) \times L_{INPUT} \quad (6.3)$$

$$V_{OUT} = I_{OUT} \times R_{LOAD} = \left(\frac{60\mu A}{100lux} \right) \times L_{INPUT} \times R_{LOAD} \quad (6.4)$$

$$L_{INPUT} = \frac{V_{OUT}}{R_{LOAD}} \times \left(\frac{100lux}{60\mu A} \right) \quad (6.5)$$

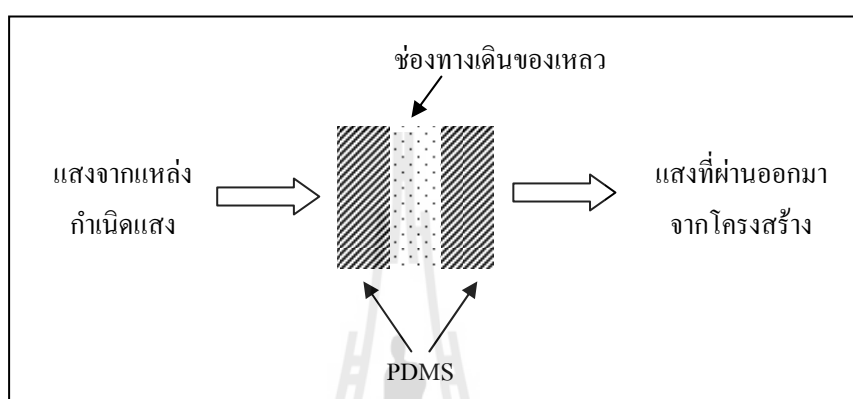
$$R_{LOAD} = \left(\frac{V_{SUP} - 0.3V}{60\mu A} \right) \times \frac{100lux}{L_{RANGE}} \quad (6.6)$$

6.1.3 การส่งสัญญาณแสงผ่านวัสดุ

ในทางการสื่อสารที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล จะต้องมีการสูญเสียสัญญาณ 2 ส่วน คือ การสูญเสียที่มีอยู่ในตัวเส้นใยแก้วนำแสง (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นจากการนำไปใช้งาน (Addition Loss) แต่หากเป็นระยะทางใกล้ ๆ เราจะไม่คิดเรื่องการสูญเสียสัญญาณแสง เนื่องจากมีการสูญเสียสัญญาณแสงน้อยมาก ซึ่งการส่งสัญญาณแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางผ่านวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่ต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยแสงตกกระทบทำมุมตั้งฉากกับผิวรอยต่อของวัสดุ (มุมตกกระทบเท่ากับ 0 องศา กับแนวเส้นปกติ) สามารถคำนวณหาสัญญาณแสงที่ส่งผ่านวัสดุมายังอุปกรณ์รับแสงได้จากสมการที่ 6.7 (Optical fiber communications, 2000) โดยที่ n_1 , n_2 คือ ดัชนีการหักเหแสงของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ $T(0)$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Fresnel (Fresnel transmission coefficient)

$$T(0) = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (6.7)$$

จากสมการที่ 6.7 เราสามารถนำมาใช้อธิบายสัญญาณแสงจากการส่งแสงผ่านช่องทางเดินของเหลวได้ เนื่องจากแสงจะเดินทางผ่านตัวกลางที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ แผ่นของซิลิโคน PDMS ช่องทางเดินของเหลว และแผ่นซิลิโคน PDMS ดังรูปที่ 6.5 แล้ววัดสัญญาณแสงที่ผ่านออกมาจากโครงสร้างช่องทางเดินของเหลวด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) ซึ่งให้ค่าออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 6.5 การเดินทางของแสงผ่านช่องทางเดินของเหลว

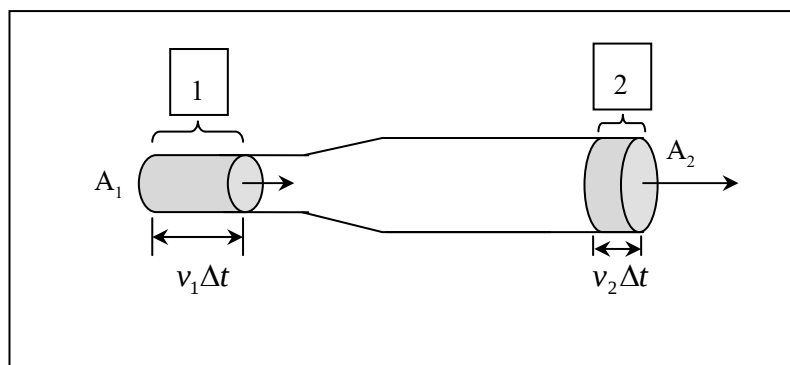
6.1.4 อัตราการไหลของของไหล

อัตราการไหล (Volume flow rate, Q) คือ ปริมาตรของของไหลที่ไหลผ่านท่อหรือช่องการไหลใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา หรืออีกนัยหนึ่งก็คือของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉาก (A) ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง (v) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6.8 และการไหลของของไหลในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอไหลผ่านจากปลายที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปยังปลายที่ 2 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A_2 ดังรูปที่ 6.6 เนื่องจากของไหลไม่สามารถไหลผ่านผนังท่อและไม่มีการสร้างหรือทำลายของไหลในท่อ ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านแต่ละส่วนของท่อการไหลในเวลา Δt เดียวกัน จึงมีค่าเท่ากัน ดังสมการที่ 6.9

$$Q = Av \quad (6.8)$$

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad (6.9)$$

$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (6.10)$$



รูปที่ 6.6 การไหลของของเหลวในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากของไหลในอุดมคติไม่สามารถอัดได้ ดังนั้นความหนาแน่นจึงคงตัว ($\rho_1 = \rho_2$) จึงได้ว่าผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดกับอัตราเร็วของของไหลอุดมคติไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใดในท่อ การไหลจะมีค่าคงตัว ดังสมการที่ 6.11

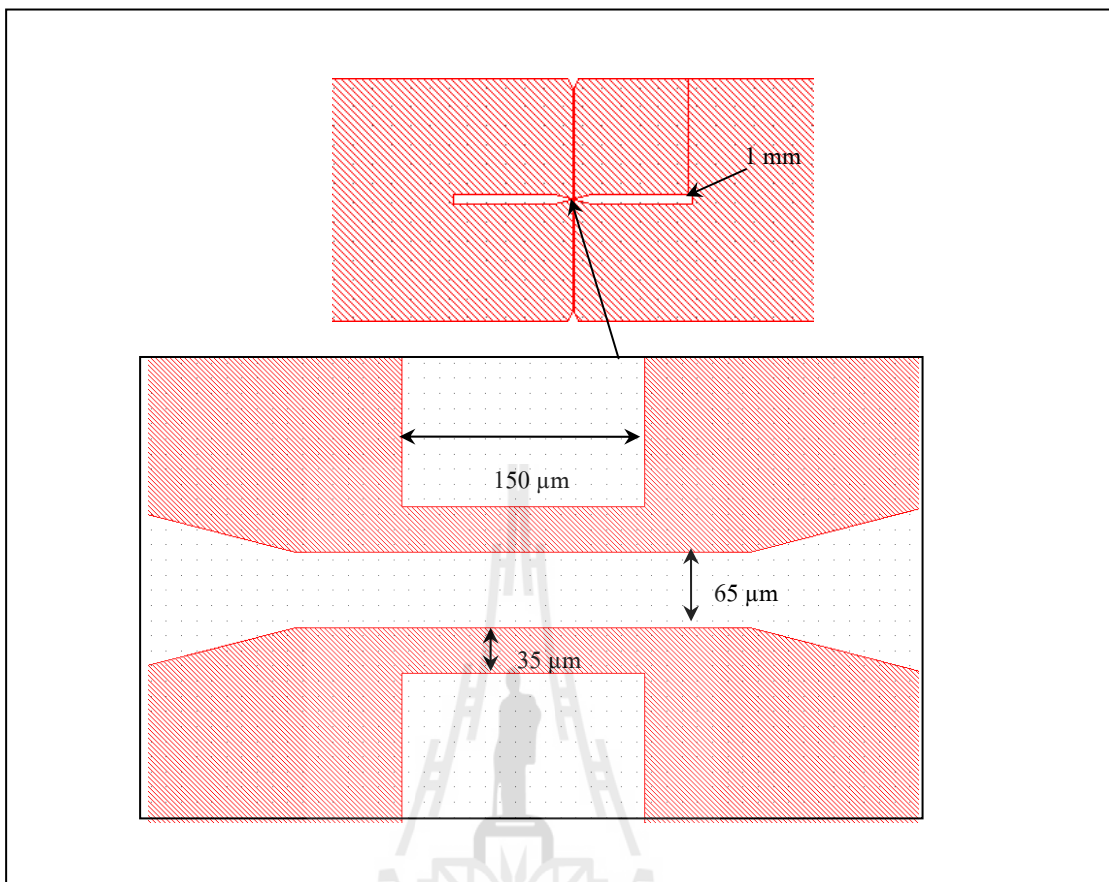
$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (6.11)$$

6.2 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศจะมีขั้นตอนในการสร้างหลายขั้นตอน ประกอบด้วย การออกแบบสัณฐานของตัวตรวจรู้ด้วยโปรแกรม Layout Editor การสร้างหน้ากากชุดซิปริงส์อิเล็กซ์ การสร้างแม่พิมพ์โลหะ निकел การผลิตซ้ำช่องทางเดินของของเหลวด้วยซิลิโคน PDMS การสร้างทางเข้าออกของของเหลวและการเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับช่องทางเดินของของเหลว โดยรายละเอียดมีดังนี้

6.2.1 การออกแบบสัณฐานของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

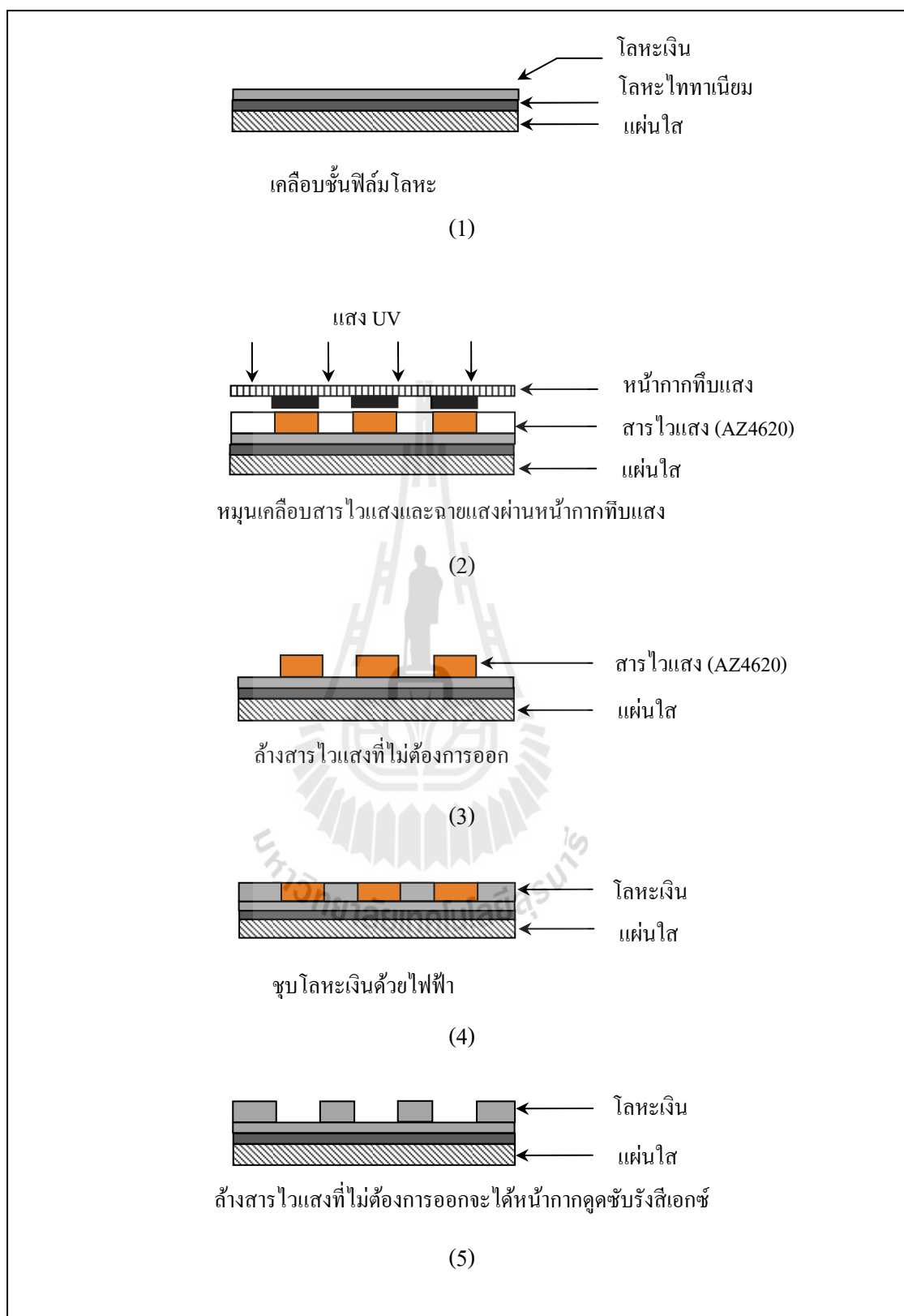
การออกแบบสัณฐานของตัวตรวจรู้ฟองอากาศในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมวาดสัณฐาน Layout Editor ในการออกแบบ แล้วส่งไฟล์ไปพิมพ์สัณฐานด้วยเครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียดของภาพ 3,600 dpi สามารถสร้างภาพสัณฐานได้เล็กที่สุดประมาณ $30 \mu\text{m}$ สัณฐานที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดสัณฐาน Layout Editor ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศมีลักษณะดังรูปที่ 6.7 โดยช่องทางเดินของของเหลวมีขนาดความกว้าง $65 \mu\text{m}$ ความยาว $300 \mu\text{m}$ ความสูง $150 \mu\text{m}$ และผนังกั้นระหว่างช่องทางเดินของของเหลวกับช่องใส่เส้นใยแก้วนำแสงมีขนาด $35 \mu\text{m}$



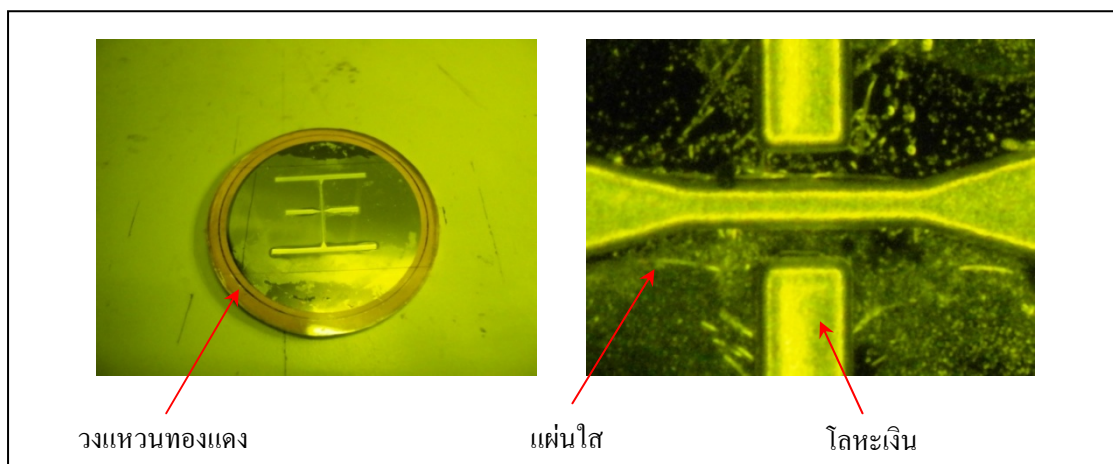
รูปที่ 6.7 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout editor

6.2.2 การสร้างหน้ากาทดัดชั้นรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

เริ่มจากการนำวงแหวนมาติดลงบนแผ่นใสด้วยกาวอีพ็อกซี่ ปล่อยให้แห้งประมาณ 6 ชั่วโมง ตัดแผ่นใสชนิดขอบของวงแหวนและเคลือบโลหะ Ti/Ag ด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศลงบนวงแหวนแผ่นใส ดังรูปที่ 6.8(1) จากนั้นหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที ต่อด้วย 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบให้แห้ง (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และนำมาฉายแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ดังรูปที่ 6.8(2) ล้างฟิล์ม (development) ด้วยน้ำยา AZ developer จะได้โครงสร้าง AZ ดังรูปที่ 6.8(3) เติมโลหะเงินลงในช่องโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จนมวลโลหะเงินสูงเท่ากับความสูงของ AZ ดังรูปที่ 6.8(4) ล้างสารไวแสงชนิดบวกออกด้วยอะซิโตน ดังรูปที่ 6.8(5) จะได้หน้ากาทดัดชั้นรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.8 กระบวนการสร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ



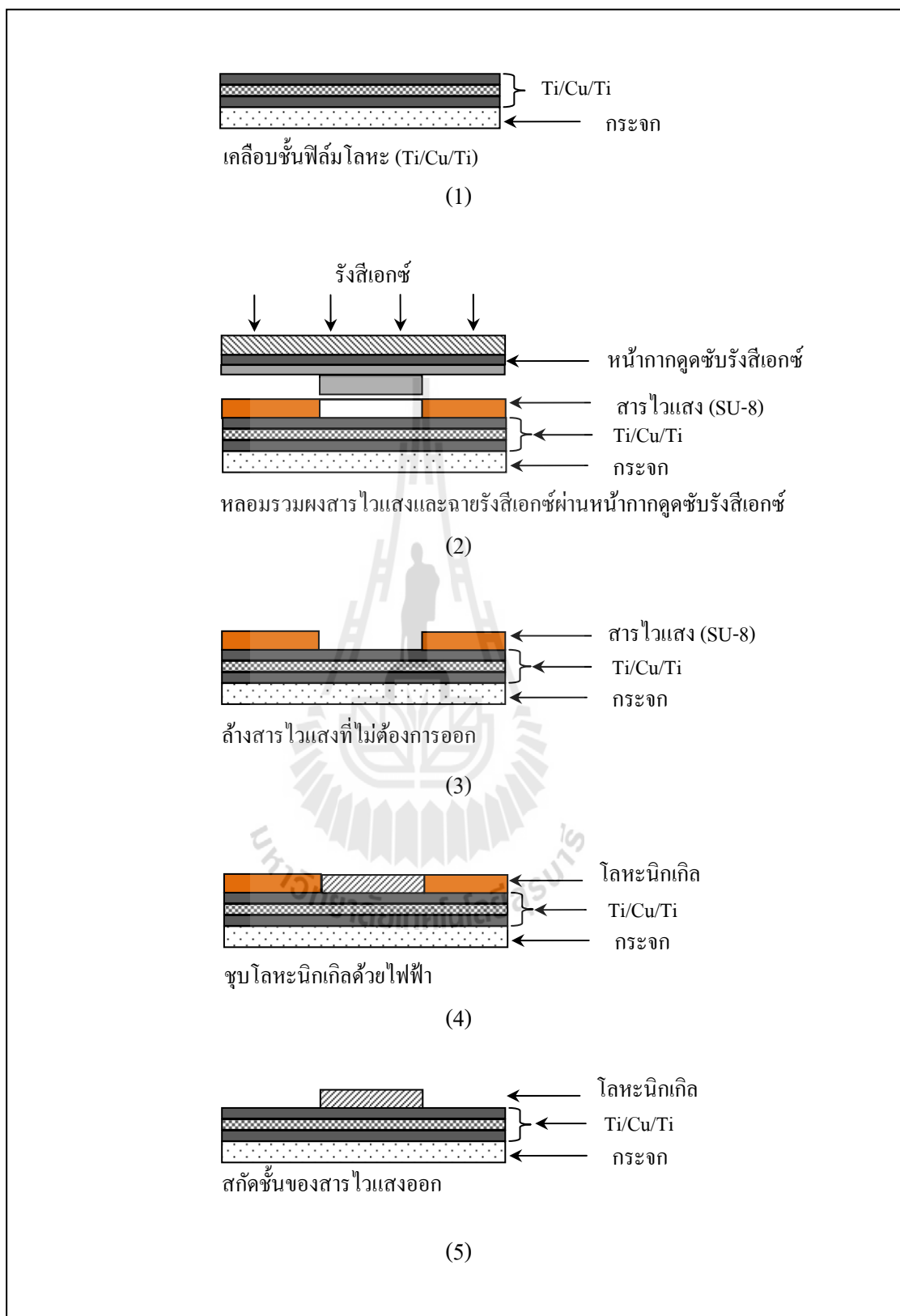
รูปที่ 6.9 หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ

6.2.3 การสร้างแม่พิมพ์โลหะนิกเกิล

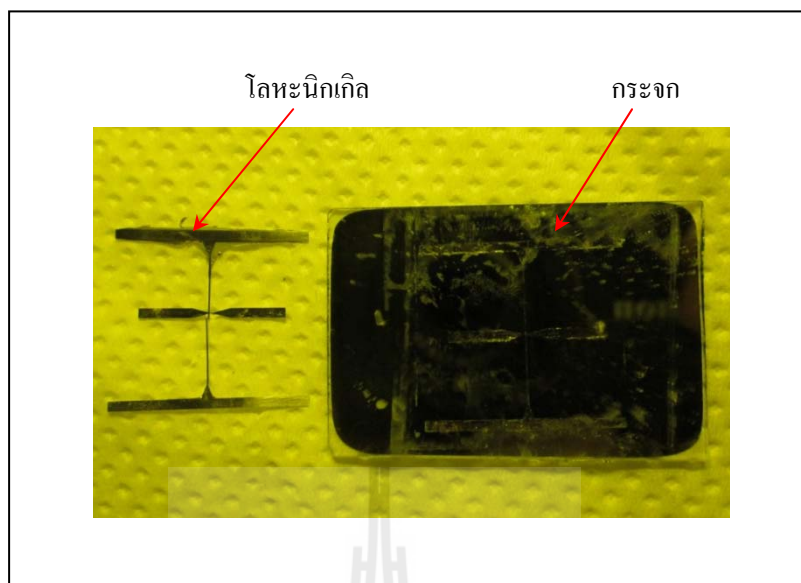
แม่พิมพ์โลหะนิกเกิลสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตซ้ำด้วยซิลิโคน PDMS ซึ่งจะเป็นปัจจัยสำคัญในการลดต้นทุนในการผลิต และโครงสร้างที่ได้จากการผลิตซ้ำจะมีลักษณะเช่นเดิมทุกประการ ซึ่งการสร้างแม่พิมพ์โลหะมี 2 วิธี โดยวิธีแรกจะเป็นการสร้างแม่พิมพ์โลหะบนฐานกระจก วิธีที่สองเป็นการสร้างแม่พิมพ์โลหะด้วยโลหะนิกเกิลทั้งชิ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2.3.1 การสร้างแม่พิมพ์โลหะบนฐานกระจก

การสร้างแม่พิมพ์โลหะบนฐานกระจกเริ่มจากการเตรียมแผ่นกระจกขนาด 1 นิ้ว x 3 นิ้ว มาเคลือบโลหะ (Ti/Cu/Ti) ด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศ ดังรูปที่ 6.10(1) จากนั้นหลอมรวมผงสารไวแสงชนิดลบให้มีความหนาประมาณ 150 μm และฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากระบายรังสีเอกซ์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 6.10(2) ล้างสารไวแสงที่ไม่แข็งตัวออกด้วยน้ำยา SU-8 developer ดังรูปที่ 6.10(3) นำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะนิกเกิลสูงเท่ากับความสูงของสารไวแสง ดังรูปที่ 6.10(4) สกัดชั้นของสารไวแสงชนิดลบออกด้วยการต้มในน้ำยา remover PG จากนั้นทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปอบที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ดังรูปที่ 6.10(5) แต่การสร้างแม่พิมพ์โลหะด้วยวิธีนี้ส่วนของฐานรองกระจกกับโลหะนิกเกิลจะหลุดออกจากกันในช่วงขั้นตอนการสกัดชั้นของสารไวแสง ดังรูปที่ 6.11 จึงไม่สามารถสร้างแม่พิมพ์โลหะด้วยวิธีนี้ได้



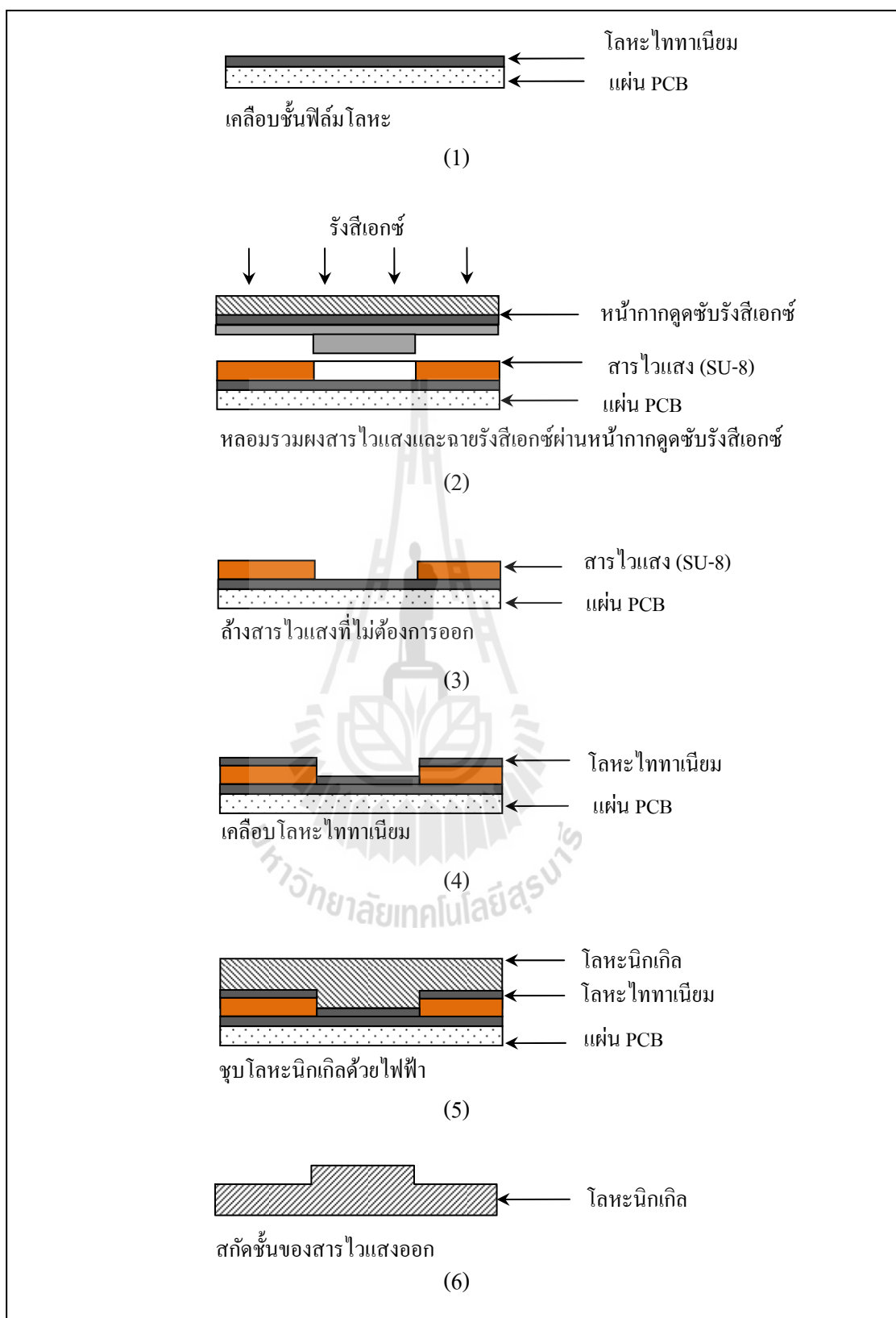
รูปที่ 6.10 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์โลหะบนฐานกระจก



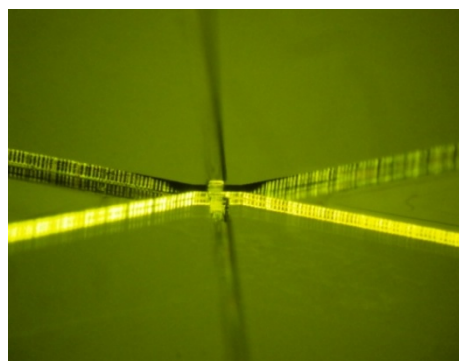
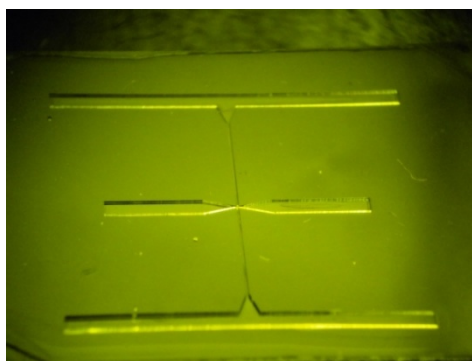
รูปที่ 6.11 โลหะนิกเกิลหลุดจากฐานกระจก

6.2.3.2 การสร้างแม่พิมพ์โลหะนิกเกิลทั้งชิ้น

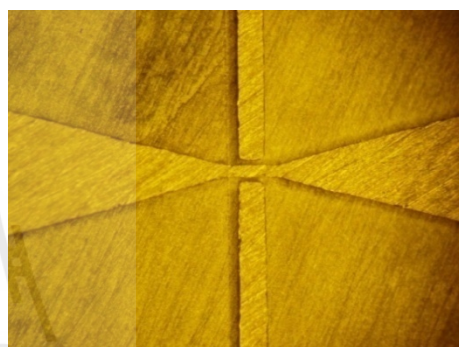
กระบวนการเริ่มจากการเตรียมแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Broad: PCB) ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว มาเคลือบโลหะไททาเนียมด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศ ดังรูปที่ 6.12(1) จากนั้นหลอมรวมผงสารไวแสงชนิดลบ SU-8 2100 ให้มีความหนาประมาณ $150\text{ }\mu\text{m}$ และฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากาอุดูดซับรังสีเอกซ์ นำไปอบเนิ่นลวดลายที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 6.12(2) ล้างสารไวแสงที่ไม่แข็งตัวออกด้วยน้ำยา SU-8 developer ดังรูปที่ 6.12(3) จากนั้นทำการเคลือบโลหะไททาเนียมด้วยระบบไอระเหยในสุญญากาศ ลงไปบนชิ้นงานเพื่อให้พื้นผิวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 6.12(4) นำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้วยความหนาแน่นกระแส 2 mA/cm^2 โดยแผ่นนิกเกิลเป็นขั้วแอโนด และแผ่นชิ้นงานเป็นขั้วแคโทด จนกว่าโลหะนิกเกิลจะสูงกว่าชิ้นงานและเชื่อมประสานกัน ดังรูปที่ 6.12(5) สกัดชั้นของสารไวแสงชนิดลบ (SU-8 2100) ออก โดยการต้มในน้ำยา remover PG จากนั้นทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปอบที่อุณหภูมิ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ดังรูปที่ 6.12(6) จะได้แม่พิมพ์โลหะนิกเกิลดังรูปที่ 6.12(2)



รูปที่ 6.12 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์โลหะทั้งชิ้น



(ก) โครงสร้างของสารไวแสงชนิดลบ (SU-8 2100) หลังการฉายรังสีเอกซ์

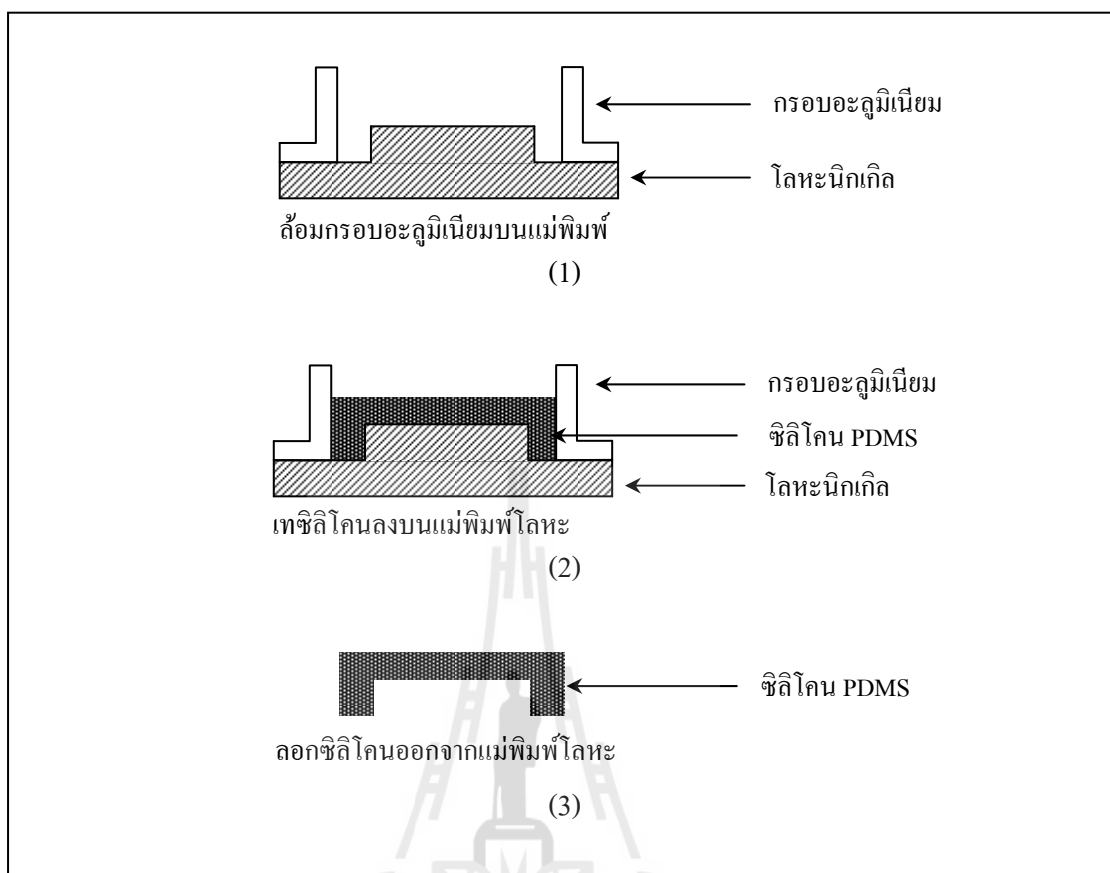


(ข) แม่พิมพ์โลหะนิกเกิล

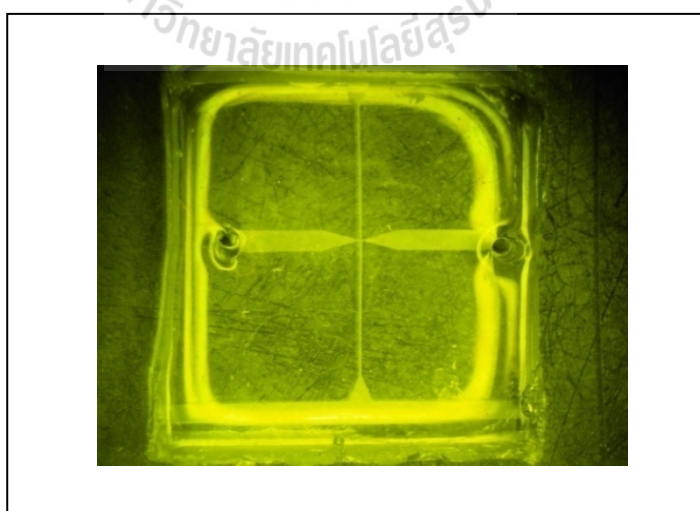
รูปที่ 6.13 โครงสร้างของทางเดินของของเหลวและแม่พิมพ์โลหะนิกเกิล

6.2.4 การผลิตช่องทางเดินของของเหลวโดยใช้ซิลิโคน PDMS

เริ่มจากการนำแม่พิมพ์โลหะนิกเกิลมาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้านด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสูงประมาณ 1 cm ยึดด้วยเทปกาวยเพื่อป้องกันการไหลออกของซิลิโคน PDMS ดังรูปที่ 6.14(1) ฉีดสเปรย์ถอดแบบให้ทั่วแม่พิมพ์โลหะ เพื่อให้สามารถลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์โลหะได้ง่ายขึ้น เตรียมซิลิโคน PDMS โดยการผสมส่วนที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวกับส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน นำเข้าโถดูดความชื้นเพื่อลดฟองอากาศ ออก เทซิลิโคน PDMS ลงในแม่พิมพ์โลหะที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 6.14(2) นำไปตั้งบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 6.14(3) จะได้ช่องทางเดินของของเหลวที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS ดังรูปที่ 6.15 ส่วนแม่พิมพ์โลหะก็นำไปทำความสะอาดเพื่อใช้งานในครั้งต่อไป



รูปที่ 6.14 กระบวนการผลิตช่องทางเดินของของเหลวโดยใช้ซิลิโคน PDMS



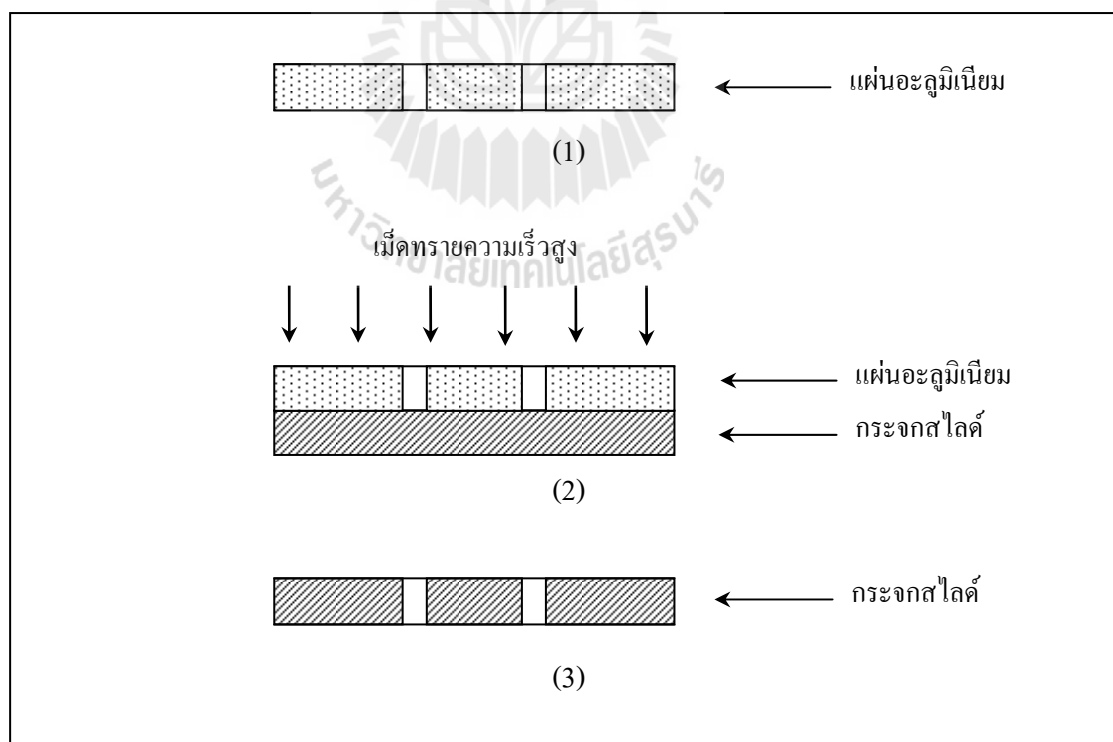
รูปที่ 6.15 โครงสร้าง PDMS หลังการถอดแบบจากแม่พิมพ์โลหะนิกเกิล

6.2.5 การสร้างทางเข้าออกของของเหลว

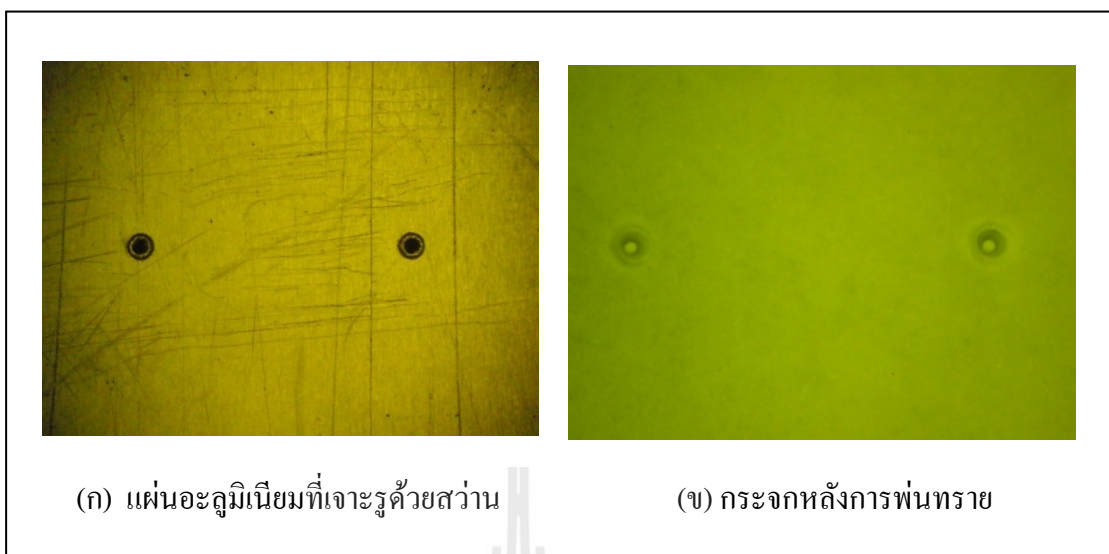
การสร้างทางเข้าออกของของเหลวมีวิธีการสร้างหลัก ๆ 2 วิธี คือ การสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนกระจกด้วยการพันทรายผ่านแผ่นอะลูมิเนียมที่เจาะรู และการสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2.5.1 การสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนกระจกด้วยการพันทราย

การพันทราย คือ การพันลมที่มีความเร็วสูงให้ทรายวิ่งมาชนเพื่อไปสกัดชิ้นงานให้หลุดออก เริ่มจากเตรียมแผ่นอะลูมิเนียมความหนา 1 mm เพื่อทำเป็นแบบมาทำการเจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ห่างกัน 2 cm จำนวน 2 รู ด้วยสว่านดังรูปที่ 6.16(1) จากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมมาประกบติดกับแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทปกาว และทำการยิงทรายไปยังแผ่นอะลูมิเนียมดังรูปที่ 6.16(2) กระจกตรงส่วนที่ถูกพ่นชนด้วยเม็ดทรายจะทะลุเป็นรูตามที่ต้องการดังรูปที่ 6.16(3) จะได้ทางเข้าออกของของเหลวบนกระจกดังรูปที่ 6.17 ซึ่งการสร้างทางเข้าออกของเหลวด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมงต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้นและแผ่นอะลูมิเนียมที่นำมาทำเป็นแบบก็ใช้ได้เพียง 3 ครั้งเท่านั้น



รูปที่ 6.16 กระบวนการสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนกระจกด้วยการพันทราย

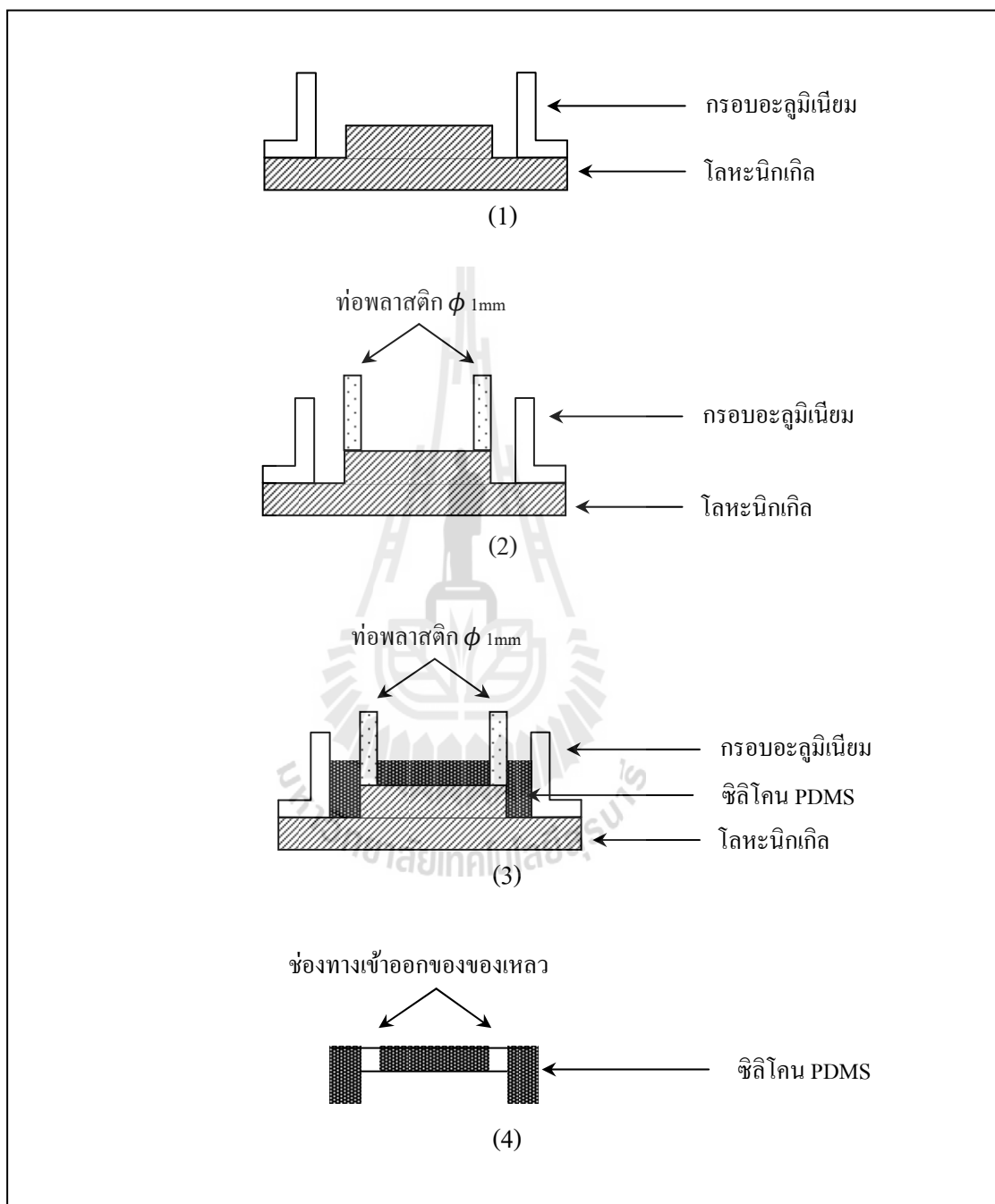


รูปที่ 6.17 ทางเข้าออกของของเหลวบนกระจก

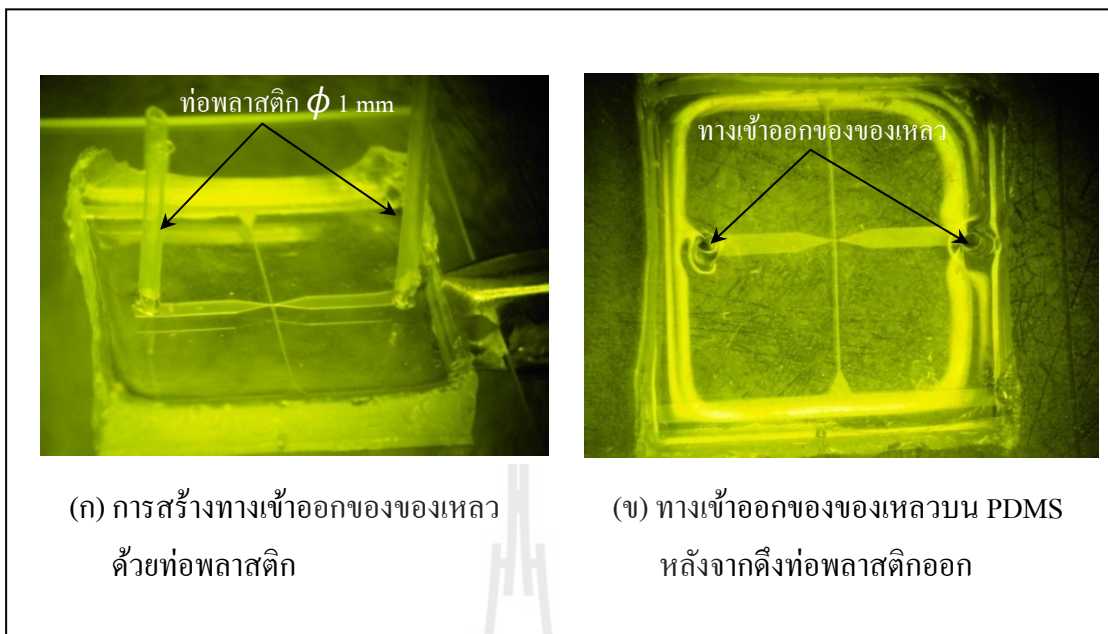
6.2.5.2 การสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS

การสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS สามารถทำได้ทั้งในระหว่างการเทซิลิโคน PDMS ลงในแม่พิมพ์โลหะและหลังการลอกแบบ โดยการเจาะรูเพื่อสร้างทางเข้าออกของของเหลวหลังการลอกแบบมีความเสี่ยงต่อการฉีกขาดของเนื้อซิลิโคน PDMS ซึ่งการสร้างทางเข้าออกของของเหลวในระหว่างการเทซิลิโคน PDMS ลงในแม่พิมพ์โลหะ เริ่มจากการนำแม่พิมพ์โลหะมาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้าน ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสูงประมาณ 1 cm ยึดด้วยเทปกาวเพื่อป้องกันการไหลออกของซิลิโคน PDMS ดังรูปที่ 6.18(1) ฉีดสเปรย์ถอดแบบให้ทั่วแม่พิมพ์โลหะและด้านในของกรอบอะลูมิเนียม เพื่อให้สามารถลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์โลหะได้ง่ายขึ้น จากนั้นนำไปตั้งบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 80°C และนำท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 1 mm ยาว 1 cm มาตั้งไว้บริเวณที่จะสร้างทางเข้าออกของของเหลวโดยการเชื่อมต่อพื้นผิวของแม่พิมพ์โลหะกับพื้นที่หน้าตัดของท่อพลาสติกด้วยซิลิโคน PDMS ดังรูปที่ 6.18(2) เมื่อท่อพลาสติกเชื่อมติดกับแม่พิมพ์โลหะแล้วให้นำออกจากแผ่นให้ความร้อนและปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นก็เทซิลิโคน PDMS ลงในแม่พิมพ์โลหะดังรูปที่ 6.18(3) นำไปตั้งบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ซิลิโคน PDMS แข็งตัวและปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการลอกแบบและดึงท่อพลาสติกออกจากซิลิโคน PDMS จะได้ช่องทางเดินของของเหลวพร้อมทั้งทางเข้าออกของของเหลวดังรูป

ที่ 6.18(4) ซึ่งการสร้างทางเข้าออกของของเหลวด้วยวิธีนี้มีความสะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีแรก
ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีนี้ในการสร้างทางเข้าออกของของเหลว



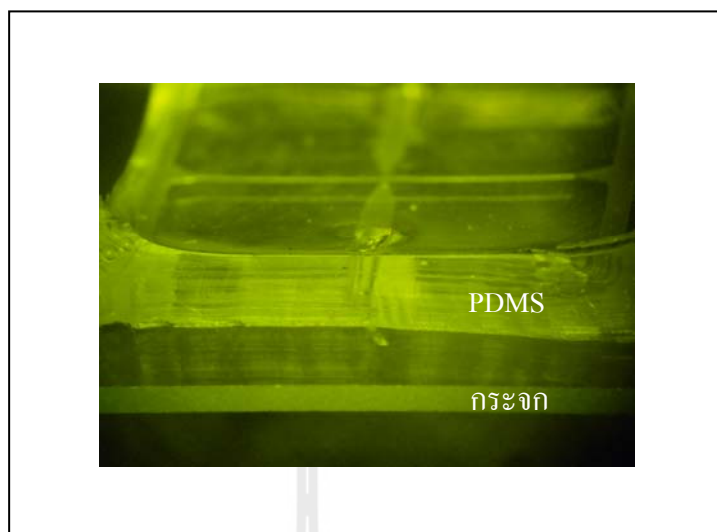
รูปที่ 6.18 กระบวนการสร้างทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS



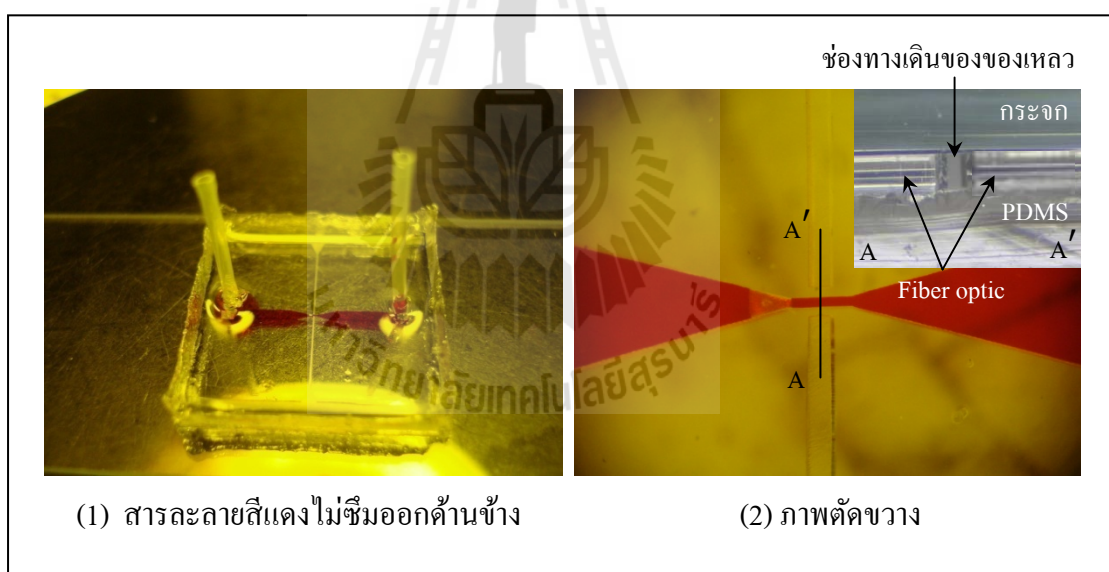
รูปที่ 6.19 ทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS

6.2.6 การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับซิลิโคน PDMS

การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับช่องทางเดินของของเหลวที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลวได้ จะใช้วิธีการเชื่อมต่อพื้นผิวแบบแห้งด้วยการพลาสมาด้วยออกซิเจน เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้สารที่นำมาทำการเชื่อมต่อเข้าไปอุดตันช่องทางเดินของของเหลวได้ โดยหลักการการพลาสมาด้วยออกซิเจนได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.6.2 กระบวนการเริ่มจากการทำความสะอาดกระจกและซิลิโคน PDMS จากนั้นนำไปทำการพลาสมาด้วยออกซิเจนที่ความดัน 0.7 mbar กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 30 วินาที นำกระจกและซิลิโคน PDMS มาประกบกันโดยใช้ปากคีบกดซิลิโคน PDMS ทิ้งทั้งแผ่นเพื่อให้ติดกับกระจกดังรูปที่ 6.20 ต่อท่อพลาสติกที่ทางเข้าออกของของเหลวและยึดท่อให้แน่นด้วยกาวอีพอกซี นำตัวตรวจรู้มาทดสอบการรั่วไหลของของเหลวด้วยสารละลายสีแดง สาเหตุที่ใช้สารละลายสีแดงเนื่องจากสามารถมองเห็นการไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลวได้ง่าย และสามารถตรวจสอบได้ว่าของเหลวซึมผ่านออกด้านข้างหรือไม่ ถ้ามีของเหลวซึมออกด้านข้างแสดงว่าการเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับซิลิโคน PDMS นั้นติดกันไม่สนิท หากไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้างแสดงว่าการเชื่อมต่อพื้นผิวติดกันสนิทและสามารถนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้ ดังรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.20 การเชื่อมต่อพื้นผิวระหว่างกระจกกับ PDMS ด้วยการพลาสมาออกซิเจน



รูปที่ 6.21 ทดสอบการเชื่อมต่อของพื้นผิวด้วยสารละลายสีแดง

6.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณ การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ ซึ่งทฤษฎีการคำนวณจะประกอบด้วยการหักเหของแสง ความเข้มแสงและการส่งสัญญาณแสง ส่วนการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศนั้น จะประกอบด้วยการวาดลวดลายของตัวตรวจรู้ด้วย

โปรแกรม Layout editor และขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์บนแผ่นใส แม่พิมพ์โลหะ निकелทั้งชิ้น สร้างทางเข้าออกของของเหลวบนซิลิโคน PDMS ในระหว่างการลอกแบบจากแม่พิมพ์โลหะและเชื่อมต่อพื้นผิวเพื่อสร้างตัวตรวจรู้โดยวิธีการพลาสมาด้วยออกซิเจน โดยตัวตรวจรู้ฟองอากาศที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ เรียกว่า ตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ส่วนในบทที่ 7 จะกล่าวถึงการทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ต่อไป



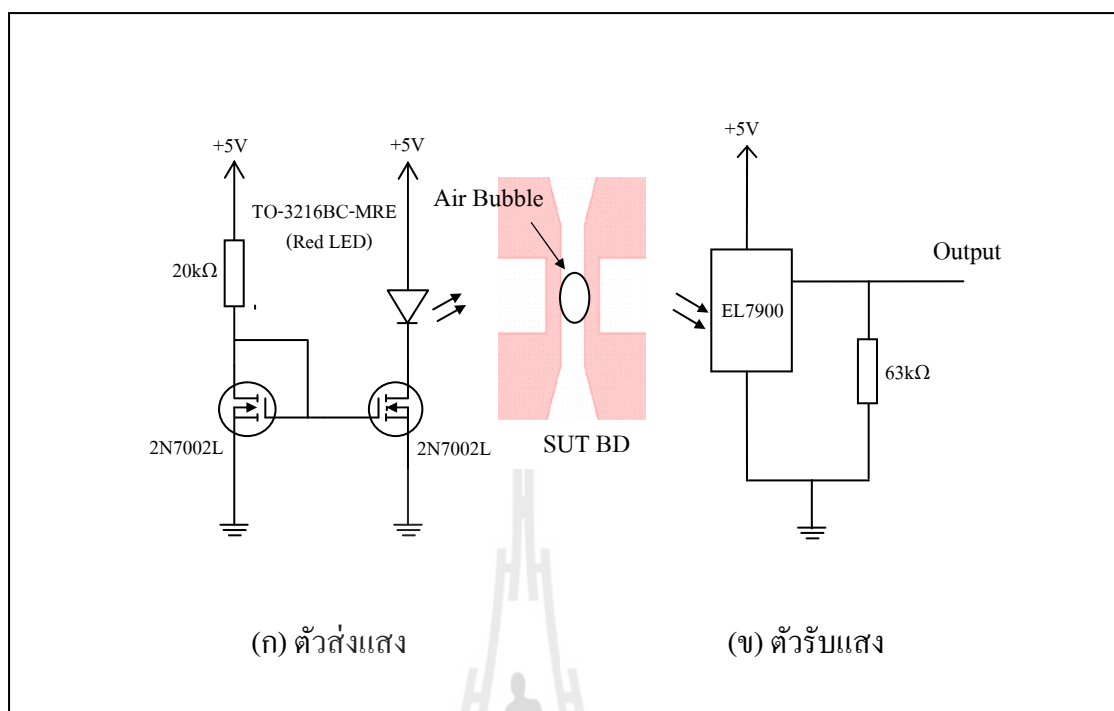
บทที่ 7

การทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

ในบทนี้จะทำการทดสอบการทำงานของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการตรวจรู้ฟองอากาศแสดงดังรูปที่ 7.1 ตัวตรวจรู้มีทางเข้าออกของของเหลวเพื่อให้ของเหลวไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลว โดยช่องทางเดินของของเหลวมีขนาดความกว้าง $65\text{ }\mu\text{m}$ ความยาว $300\text{ }\mu\text{m}$ ความสูง $150\text{ }\mu\text{m}$ ความกว้างของผนังกั้นระหว่างช่องทางเดินของของเหลวและช่องใส่เส้นใยแก้วนำแสง $35\text{ }\mu\text{m}$ และความกว้างของช่องสำหรับใส่เส้นใยแก้วนำแสง $130\text{ }\mu\text{m}$ การทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศจะดำเนินการทดสอบในห้องมืด เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกมาตกกระทบบนตัวรับแสง เพื่อทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าด้านตัวรับแสง โดยอาศัยหลักการส่งแสงผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน ซึ่งมีวงจรรับส่งแสงดังแสดงในรูปที่ 7.2

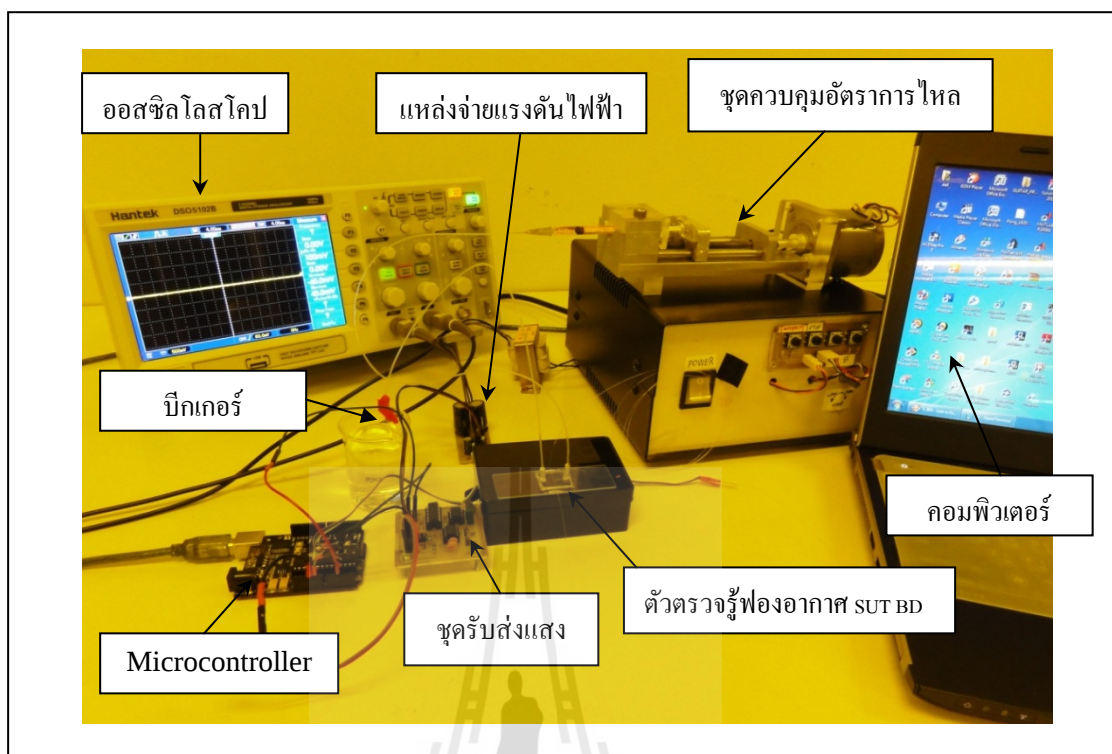


รูปที่ 7.1 ตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

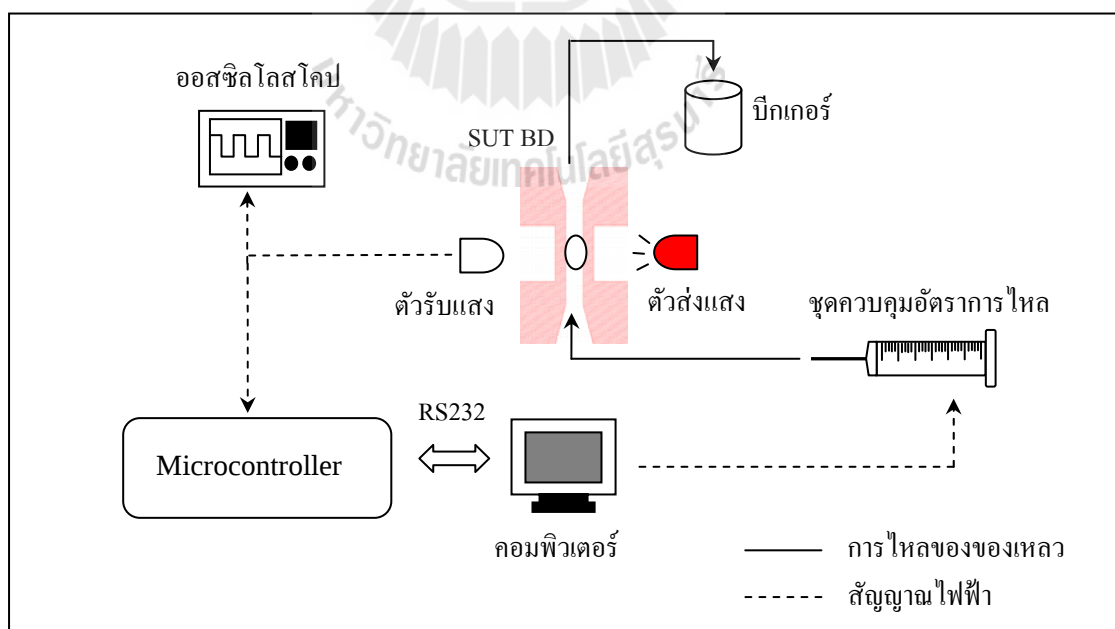


รูปที่ 7.2 วงจรรับส่งแสงผ่านตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

จากรูปที่ 7.2 ซึ่งเป็นวงจรรับส่งแสงที่ใช้ในการตรวจรู้ฟองอากาศ โดยวงจรด้านตัวส่งแสงจะใช้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงเบอร์ TO-3216BC-MRC ย่านความยาวคลื่น 630 nm และมีวงจร current mirror ช่วยในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านไดโอดให้คงที่ตลอดเวลา (ป้อนกระแสไหลผ่านไดโอดเท่ากับ 25 mA) ส่วนทางด้านวงจรรับแสงจะใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) ในการรับแสง ใช้ความต้านทาน R_L 63 k Ω โดยมีการตั้งการและเก็บข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino รุ่น ET-Base AVR EASY168) โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้จะสามารถอ่านค่า A to D ได้ 10 Bit) ผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 มาแสดงผลยังหน้าจอกอมพิวเตอร์ ระบบการทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ดังรูปที่ 7.3 ประกอบด้วยชุดวงจรรับส่งแสง ชุดควบคุมอัตราการไหลของของเหลวแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ออสซิลโลสโคป และตัวตรวจรู้สำหรับให้ของเหลวไหลในช่องทางเดินของของเหลว



รูปที่ 7.3 ระบบทดสอบของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD



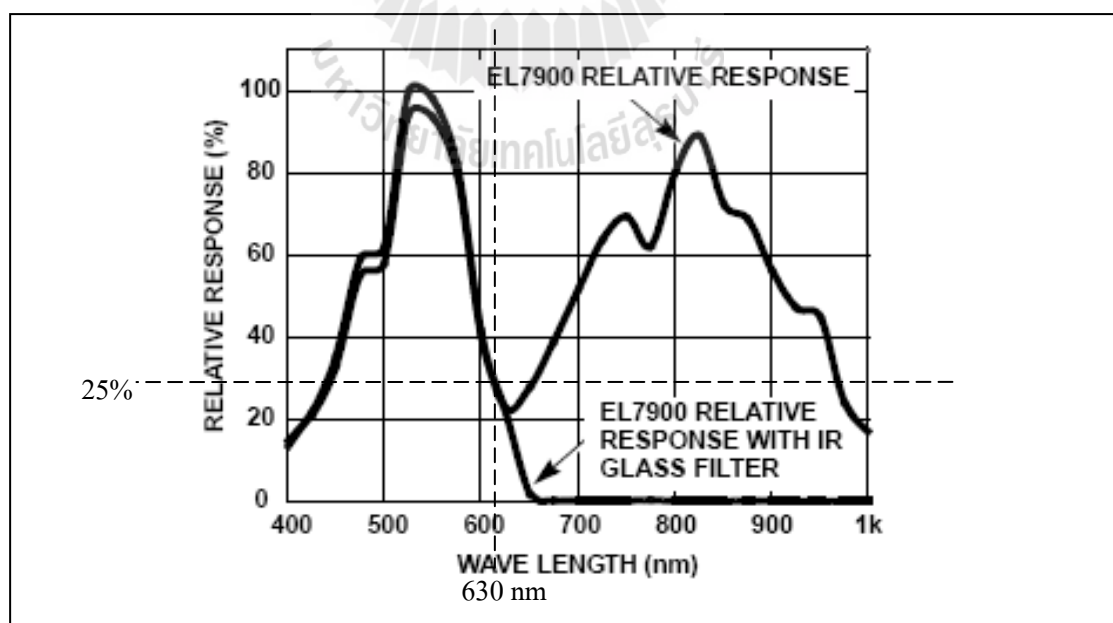
รูปที่ 7.4 แผนภาพระบบทดสอบของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

7.1 การวัดความเข้มแสง

การวัดความเข้มแสงจะวัด 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรกจะวัดความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ตำแหน่งที่สองจะวัดความเข้มแสงหลังผ่านโครงสร้างของช่องทางเดินของของเหลวในขณะที่มีอากาศบรรจุอยู่และในขณะที่มีของเหลวบรรจุอยู่ โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 630 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) เป็นอุปกรณ์รับแสงซึ่งให้ค่าเอาต์พุตออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า ในที่นี้เลือกใช้ค่าความต้านทาน 63 k Ω ส่วนการหาค่าความเข้มแสง L_{INPUT} สามารถหาได้จากสมการที่ 7.1 เมื่อ I_{OUT} คือกระแสเอาต์พุต V_{OUT} คือความเข้มแสงอินพุตและ R_{LOAD} คือความต้านทานที่ต่อให้กับโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900) เนื่องจากใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นเชิงเดี่ยวคือ 630 nm จึงต้องพิจารณาเพียงแค่ 25% ของผลตอบสนองของแสงในย่านแสงขาว ดังรูปที่ 7.5 ดังนั้นค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm จึงสามารถหาได้จากสมการที่ 7.2

$$L_{INPUT} = \frac{V_{OUT}}{R_{LOAD}} \times \left(\frac{100 \text{ lux}}{60 \mu\text{A}} \right) \quad (7.1)$$

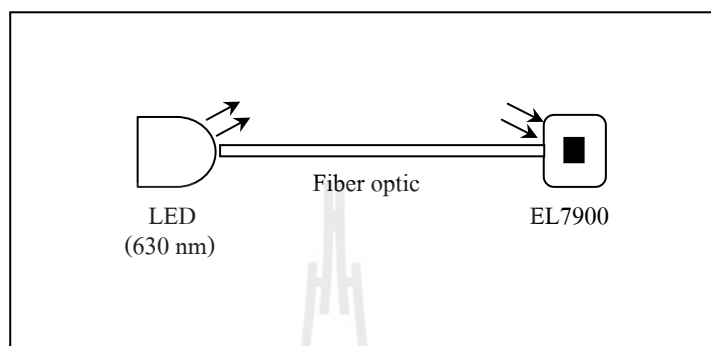
$$L_{630\text{nm}} = 0.25 \times L_{INPUT} \quad (7.2)$$



รูปที่ 7.5 การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตทรานซิสเตอร์ (EL7900)

7.1.1 ความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง

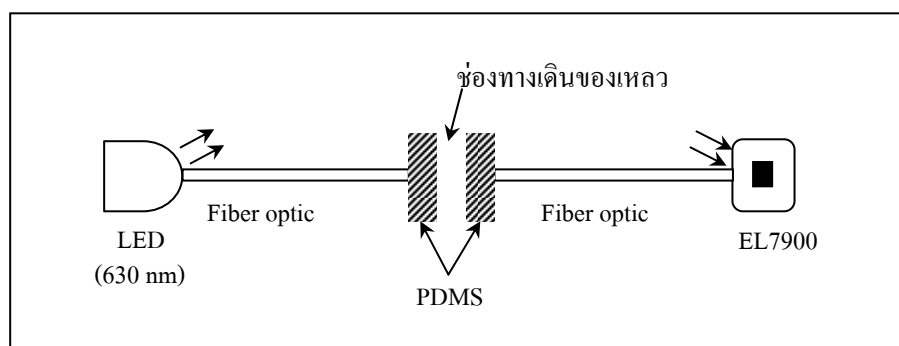
การวัดความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งจะได้เอาต์พุตออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 4.80 โวลต์ นำไปแทนในสมการที่ 7.2 จะได้ความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 630 nm มีค่าเท่ากับ 31.75 lux



รูปที่ 7.6 การวัดความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง

7.1.2 ความเข้มแสงหลังจากผ่านช่องทางเดินของของเหลว

การวัดความเข้มแสงหลังจากผ่านช่องทางเดินของของเหลว ดังรูปที่ 7.7 จะวัดในขณะที่มีอากาศบรรจุอยู่ในช่องทางเดินของของเหลว และในขณะที่มีน้ำบรรจุอยู่ในช่องทางเดินของของเหลว โดยในขณะที่มีอากาศบรรจุอยู่จะมีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 2.00 โวลต์ นำไปแทนในสมการที่ 7.2 จะได้ความเข้มแสง 13.23 lux และในขณะที่มีน้ำบรรจุอยู่จะมีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 2.40 โวลต์ นำไปแทนในสมการที่ 7.2 จะได้ความเข้มแสง 15.87 lux



รูปที่ 7.7 การวัดความเข้มแสงหลังจากผ่านช่องทางเดินของเหลว

ตารางที่ 7.1 ค่าความเข้มแสงจากตำแหน่งการวัด

ตำแหน่งที่วัด		แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ความเข้มแสง (lux)	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
แหล่งกำเนิดแสง		4.80	31.75	100.0000
หลังจากผ่านช่อง	น้ำ	2.40	15.87	49.98
ทางเดินของของเหลว	อากาศ	2.00	13.23	41.67

จากตารางที่ 7.1 จะพบว่าความเข้มแสงที่วัดจากตำแหน่งหลังจากผ่านช่องทางเดินของของเหลวเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดจากแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง มีค่าความเข้มแสงลดลงมาก เนื่องจากแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงต่างกันถึง 3 ครั้ง นั่นคือ PDMS สิ่งที่อยู่ภายในช่องทางเดินของของเหลว (อากาศหรือน้ำ) และ PDMS ซึ่งจะพบอีกว่าเมื่อน้ำบรรจุอยู่ภายในช่องทางเดินของของเหลวจะทำให้แสงเดินทางผ่านได้ดีกว่าอากาศ ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำมีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.33 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับดัชนีหักเหแสงของ PDMS (1.45) มากกว่าอากาศ (1.00) นั่นเอง ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วเกี่ยวกับการส่งสัญญาณแสงผ่านวัสดุ (*Fresnel transmission coefficient or Fresnel transmissivity*) ในหัวข้อที่ 6.1.3 ของบทที่ 6

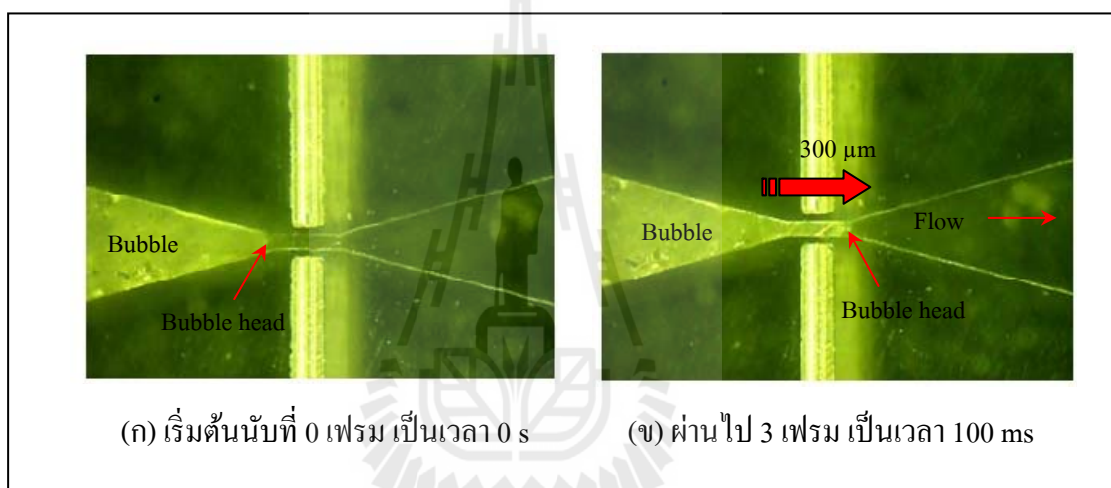
7.2 การคำนวณอัตราการไหลของของเหลวในระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

อัตราการไหลของของเหลวในระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศสามารถหาได้จากการนำพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเดินของของเหลวคูณด้วยระยะทางและหารด้วยเวลาดังสมการที่ 7.3 โดยเวลาจะได้อัตราการบันทึกภาพวิดีโอจากกล้องดิจิทัล (cannon รุ่น สามารถบันทึกภาพได้ 30 เฟรมต่อวินาที)

$$F = \frac{W \times H \times \Delta S}{\Delta t} \quad (7.3)$$

จากสมการที่ 7.3 อัตราการไหลสามารถหาได้จากการนำพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเดินของของเหลวคูณด้วยระยะทางและหารด้วยเวลา เมื่อ F คืออัตราการไหล มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที W คือความกว้างของช่องทางเดินของของเหลว มีขนาดเท่ากับ $65 \mu\text{m}$ H คือความสูงของช่องทางเดินของของเหลว มีค่าเท่ากับ $150 \mu\text{m}$ ΔS คือระยะทางการไหล โดยจะใช้ระยะทางตามขนาดความยาวของช่องทางเดินของของเหลว มีขนาดเท่ากับ $300 \mu\text{m}$ และ Δt คือระยะเวลาในการ

ไหลเป็นระยะทางเท่ากับ ΔS ซึ่งได้ทำการทดสอบอัตราการไหลของของเหลวด้วยชุดควบคุมอัตราการไหลที่คงที่เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของระบบที่ได้จากสมการที่ 7.3 ดังตารางที่ 7.2 โดยภาพในขณะที่ฟองอากาศอยู่ที่ตำแหน่ง $0\ \mu\text{m}$ และ $300\ \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 7.8 เนื่องจากความจำกัดของกล้องดิจิทัลที่ใช้ในการบันทึกภาพวิดีโอที่สามารถบันทึกภาพได้เพียง 30 เฟรมต่อวินาที ซึ่งมีความละเอียดไม่เพียงพอต่อการบันทึกภาพในอัตราการไหลที่เร็วได้ จึงไม่ทราบระยะเวลาที่แน่นอนเมื่อของเหลวไหลผ่านบริเวณช่องทางเดินของของเหลวที่มีระยะทาง $300\ \mu\text{m}$ จึงไม่สามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้ ดังนั้นในการทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT HS จึงยึดเอาอัตราการไหลตามชุดควบคุมอัตราการไหลแทน



รูปที่ 7.8 ภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศผ่าน Micro channel ด้วยอัตราการไหล $0.1\ \mu\text{l/s}$ บันทึกโดยวิดีโอที่มีอัตราการบันทึกภาพ 30 เฟรมต่อวินาที

ตารางที่ 7.2 อัตราการไหลของชุดควบคุมอัตราการไหลและระบบตัวตรวจรู้

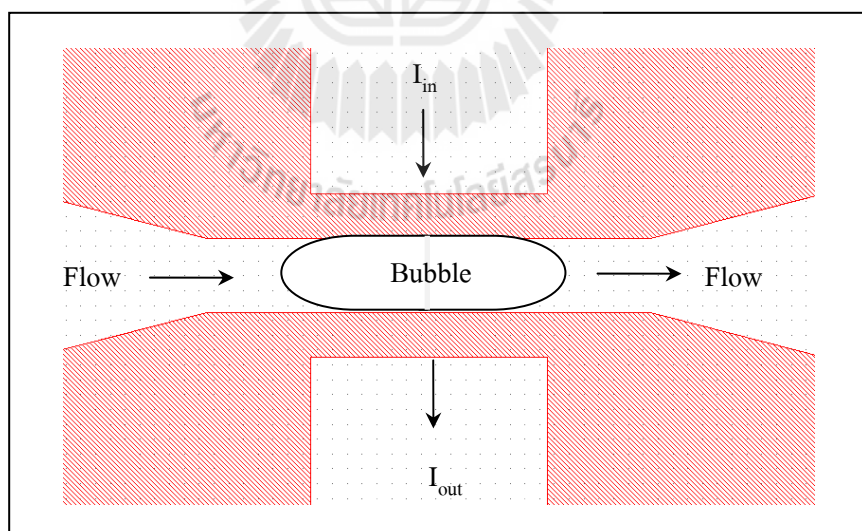
อัตราการไหล	
ชุดควบคุมอัตราการไหล ($\mu\text{l/s}$)	ระบบตัวตรวจรู้ (nl/s)
0.1	1.78
0.5	22.2
1.0	29.5
5.0	-
10.0	-

7.3 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

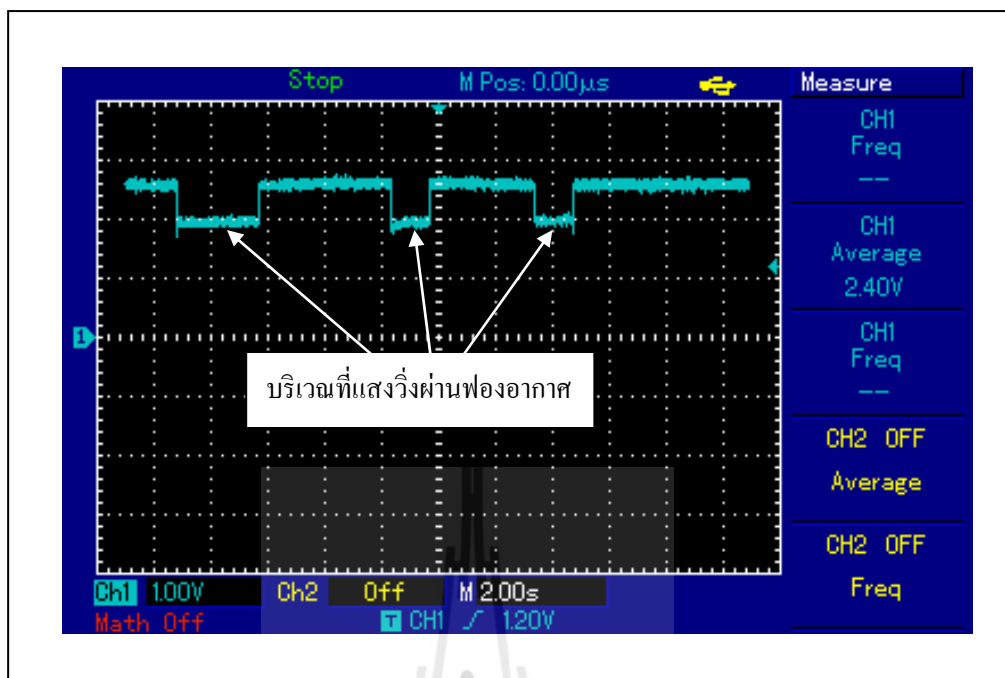
การทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD โดยการบรรจุน้ำและฟองอากาศเข้าไปในช่องทางเดินของของเหลวด้วยอัตราการใช้ที่คงที่ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของช่องทางเดินของของเหลวดังรูปที่ 7.9 เพื่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต โดยได้ทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคปและบันทึกค่าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ แบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบวงจรไฟฟ้าของระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD และการทดสอบนับจำนวนฟองอากาศด้วยอัตราการใช้ที่คงที่ ดังนี้

7.3.1 การทดสอบวงจรไฟฟ้าของระบบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

การทดสอบวงจรไฟฟ้าของระบบจะทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของวงจรทางด้านตัวรับแสง (EL7900) สำหรับตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะที่น้ำและฟองอากาศจำนวน 3 ฟอง ที่มีขนาดไม่เท่ากันไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลวบริเวณจุดตรวจรู้ ดังรูปที่ 7.10 พบว่าในขณะที่ฟองอากาศไหลผ่านบริเวณจุดตรวจรู้แรงดันไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากฟองอากาศกับ PDMS มีค่าดัชนีหักเหของแสงใกล้เคียงกันน้อยกว่าน้ำกับ PDMS ส่งผลให้แสงเดินทางผ่านฟองอากาศได้น้อยกว่าน้ำ



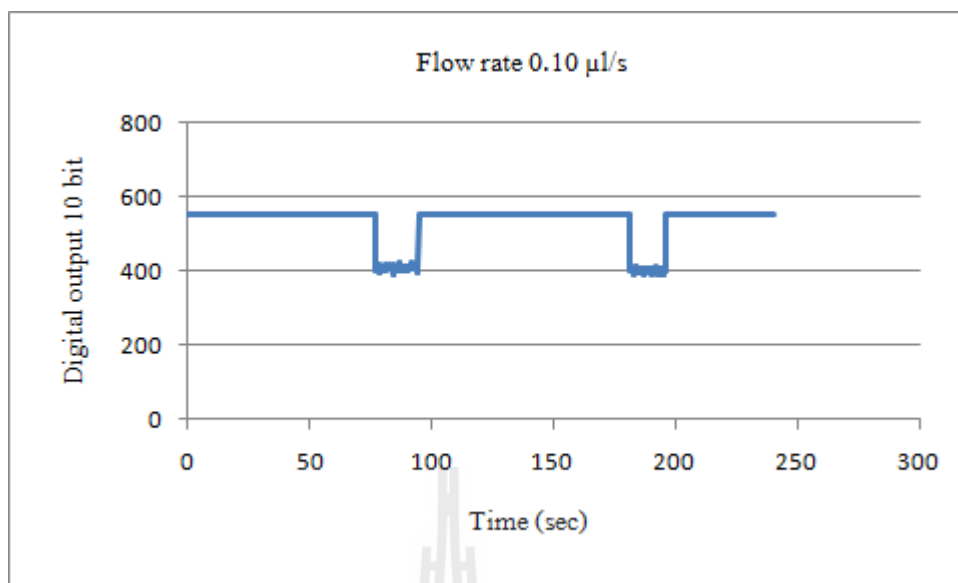
รูปที่ 7.9 โครงสร้างตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD



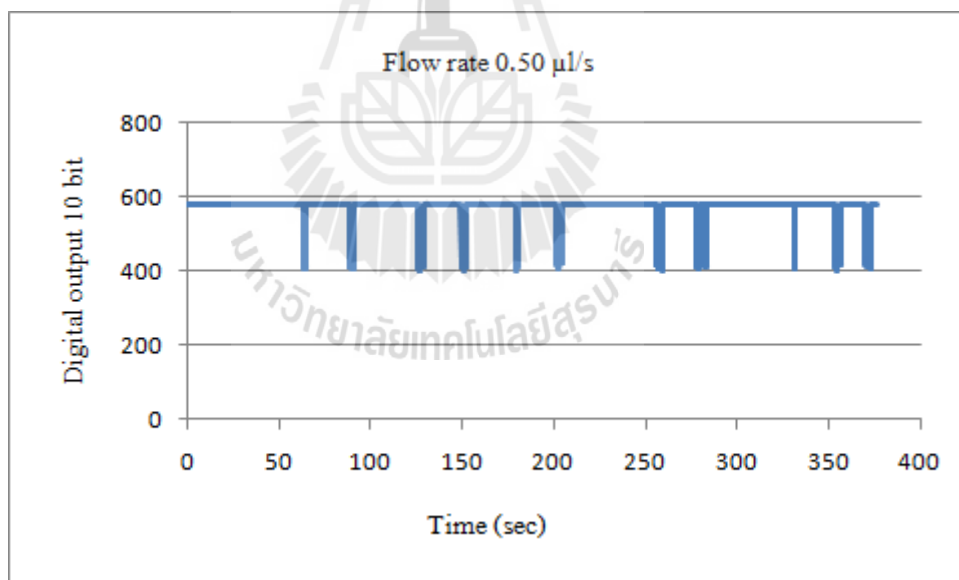
รูปที่ 7.10 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมีน้ำและฟองอากาศไหลผ่านบริเวณจุดตรวจรู้

7.3.2 การทดสอบวัดฟองอากาศของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD

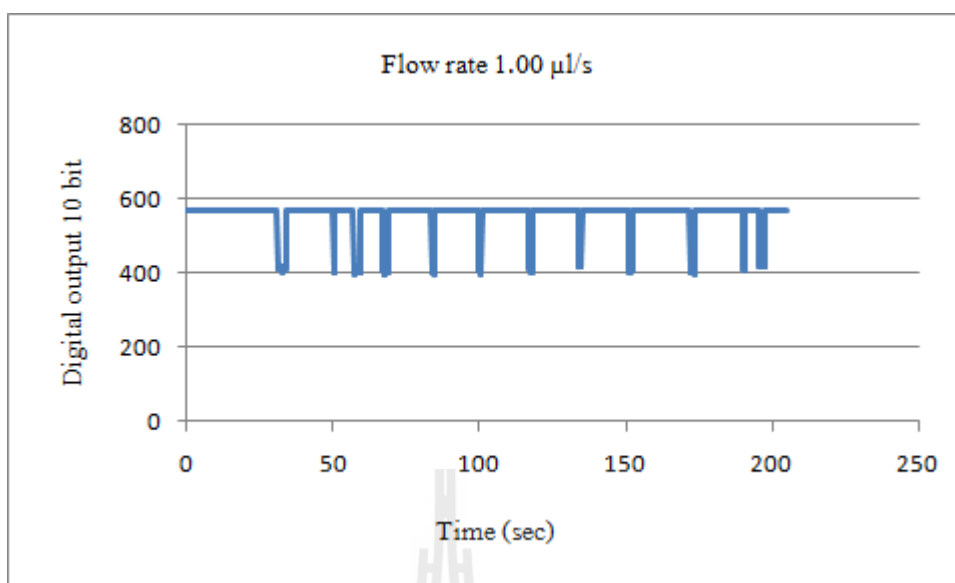
การทดสอบนับฟองอากาศจะทำการบันทึกค่าโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และบันทึกภาพวิดีโอด้วยกล้องดิจิทัล เพื่อจะได้สามารถนำมาเปรียบเทียบจำนวนฟองอากาศที่ไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลวและหาปริมาณของฟองอากาศแต่ละฟอง ซึ่งได้ทำการทดสอบด้วยอัตราการไหลที่คงที่ทั้งหมด 5 ค่าด้วยกันคือ 0.10 0.50 1.00 5.00 และ 10.00 $\mu\text{L/s}$ ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราการไหลด้วยชุดควบคุมอัตราการไหล ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 7.11 ถึง 7.15 และจากผลการทดสอบพบว่าจำนวนฟองอากาศที่พบทั้งจากภาพถ่ายวิดีโอและไมโครคอนโทรลเลอร์มีจำนวนที่เท่ากันดังตารางที่ 7.3 แต่ที่อัตราการไหล 10.00 $\mu\text{L/s}$ ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เร็วที่สุดสำหรับการทดสอบนี้ดังรูปที่ 7.15 จะพบว่าในขณะที่ฟองอากาศไหลผ่านบริเวณจุดตรวจรู้ฟองอากาศได้แตกออกเป็นฟองอากาศเล็ก ๆ อีกหลายฟอง ทำให้ไม่ทราบจำนวนฟองอากาศที่แท้จริงได้ ดังนั้นที่อัตราการไหล 10.00 $\mu\text{L/s}$ จึงไม่เหมาะสมกับตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่เร็วเกินไปและอาจทำให้การตรวจรู้ฟองอากาศที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD สามารถใช้อัตราการไหลได้ในช่วง 0.10 ถึง 5.00 $\mu\text{L/s}$



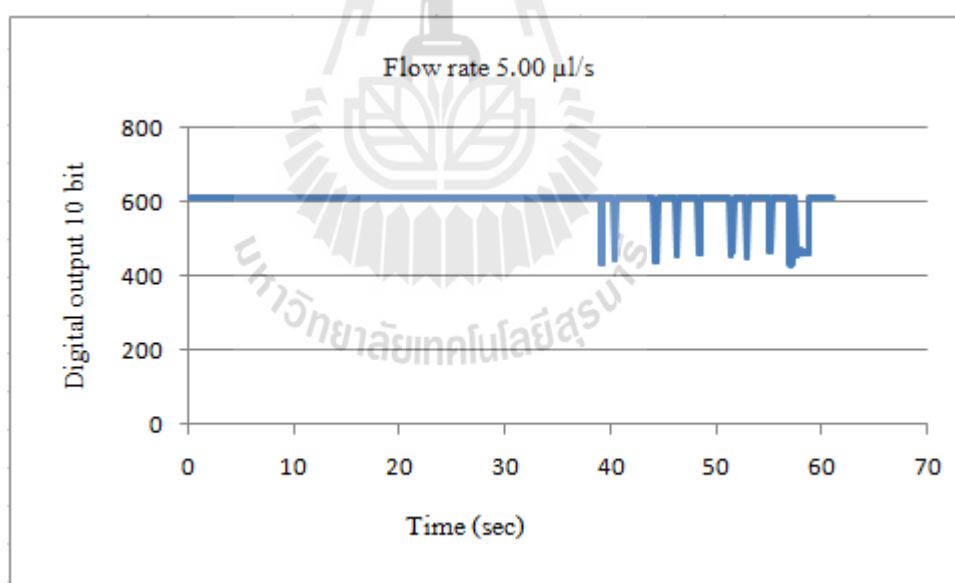
รูปที่ 7.11 ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 0.10 $\mu\text{l/s}$



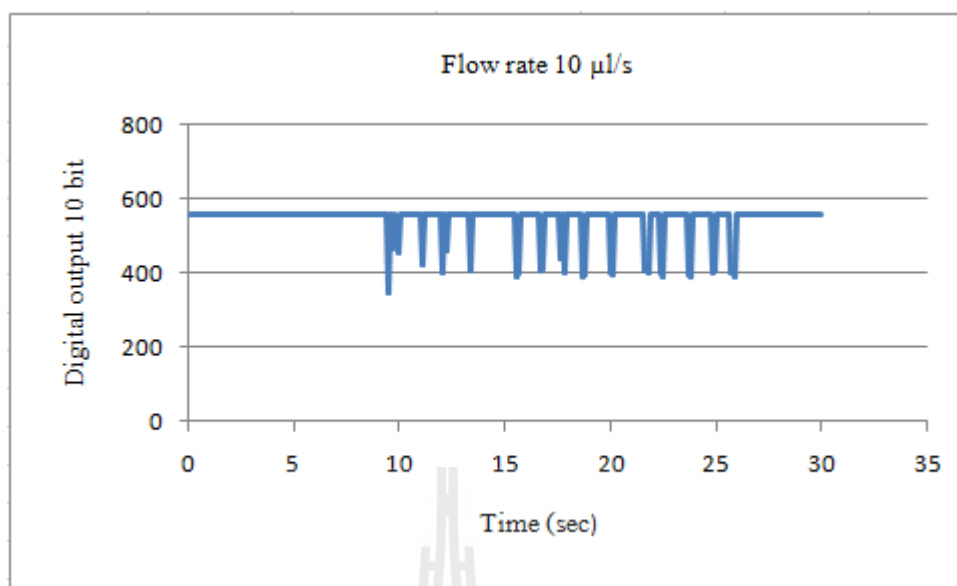
รูปที่ 7.12 ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 0.50 $\mu\text{l/s}$



รูปที่ 7.13 ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 1.00 $\mu\text{l/s}$



รูปที่ 7.14 ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 5.00 $\mu\text{l/s}$



รูปที่ 7.15 ค่า Digital output ที่อัตราการไหล 10.00 µl/s

ตารางที่ 7.3 เปรียบเทียบจำนวนฟองอากาศที่นับได้ที่อัตราการไหลคงที่

อัตราการไหล (µl/s)	จำนวนฟองอากาศ	
	VDO	Micro
0.10	2	2
0.50	12	12
1.00	12	12
5.00	10	10
10.00	18	18

7.3.3 การหาปริมาตรของฟองอากาศ

ปริมาตรของฟองอากาศ (V_{air} , cm^3) ที่ไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลวสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างอัตราการไหล (Q , cm^3/s) และระยะเวลาที่ฟองอากาศเดินทางผ่านบริเวณจุดตรวจรู้ (t , s) จากการบันทึกค่าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังสมการที่ 7.4 และปริมาตรของฟองอากาศยังสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเดินของของเหลว (A , cm^2) และความยาวของฟองอากาศเมื่อไหลผ่านบริเวณจุดตรวจรู้ (L , cm) จากการบันทึกภาพวิดีโอด้วยกล้องดิจิทัล ดังสมการที่ 7.4 เพื่อเปรียบเทียบปริมาตรของฟองอากาศ โดยจะพิจารณาเฉพาะที่อัตรา

การไหลในช่วง 0.10 ถึง 5.00 $\mu\text{l/s}$ (รูปที่ 7.11 ถึง 7.15) ปริมาตรของฟองอากาศดังตารางที่ 7.4 และ 7.5 ซึ่งจะพบว่าปริมาตรของฟองอากาศที่น้อยสุดที่ตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD สามารถตรวจวัดได้คือ 0.30 μl

$$V_{air} = Q \times t \longrightarrow \text{Micro} \quad (7.4)$$

$$V_{air} = A \times L \longrightarrow (\text{VDO}) \quad (7.5)$$

ตารางที่ 7.4 ปริมาตรของฟองอากาศที่อัตราการไหล 0.10 $\mu\text{l/s}$ และ 0.50 $\mu\text{l/s}$

อัตราการไหล ฟองที่	ปริมาตรของฟองอากาศ (μl)			
	0.10 $\mu\text{l/s}$		0.50 $\mu\text{l/s}$	
	Micro	VDO	Micro	VDO
1	1.70	1.74	0.80	0.82
2	1.50	1.46	1.10	1.08
3			1.70	1.71
4			1.50	1.47
5			0.40	0.37
6			1.80	1.83
7			1.80	1.78
8			0.90	0.92
9			0.30	0.32
10			0.40	0.41
11			1.50	1.53
12			1.80	1.78

จากตารางที่ 7.4 และ 7.5 ซึ่งเป็นการหาปริมาตรของฟองอากาศที่ไหลผ่านช่องทางเดินของของเหลวที่อัตราการไหล 0.10 0.50 1.00 5.00 และ 10.00 $\mu\text{l/s}$ ตามลำดับ โดยการคำนวณปริมาตรฟองอากาศด้วยสมการที่ 7.4 สำหรับการบันทึกค่าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และสมการที่ 7.5 สำหรับการบันทึกภาพวิดีโอด้วยกล้องดิจิทัล พบว่าปริมาตรของฟองอากาศที่คำนวณได้ทั้งจากสมการที่ 7.4 และสมการที่ 7.5 มีความใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ

$\pm 0.5 \mu\text{l}$ หรือ $\pm 5\%$ ที่ฟองอากาศที่ 9 ของอัตราการไหล $5.00 \mu\text{l/s}$ แสดงว่าปริมาณของฟองอากาศที่วัดได้จากตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD มีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 7.5 ปริมาตรของฟองอากาศที่อัตราการไหล $1.00 \mu\text{l/s}$ และ $5.00 \mu\text{l/s}$

อัตราการไหล ฟองที่	ปริมาตรของฟองอากาศ (μl)			
	$1.00 \mu\text{l/s}$		$5.00 \mu\text{l/s}$	
	Micro	VDO	Micro	VDO
1	2.90	2.93	0.50	0.48
2	0.60	0.58	0.40	0.43
3	2.60	2.61	1.40	1.37
4	1.70	1.71	0.60	0.59
5	1.10	1.15	1.20	1.21
6	0.60	0.62	1.30	1.26
7	1.10	1.12	0.60	0.61
8	1.10	1.15	1.10	1.13
9	1.10	1.07	1.50	1.55
10	1.40	1.44	6.20	6.23
11	0.90	0.94		
12	1.80	1.84		

7.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ประกอบไปด้วยการวัดความเข้มแสง หาอัตราการไหลของระบบตัวตรวจรู้และการทดสอบการตรวจรู้ฟองอากาศของตัวตรวจรู้ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมกับระบบของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD อยู่ในช่วง 0.10 ถึง $5.00 \mu\text{l/s}$ สามารถวัดฟองอากาศที่มีปริมาตรตั้งแต่ $0.30 \mu\text{l}$ ขึ้นไป และปริมาณของฟองอากาศมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ $\pm 0.5 \mu\text{l}$ หรือ $\pm 5\%$ ส่วนในบทที่ 8 จะกล่าวถึงการสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะต่อไป

บทที่ 8

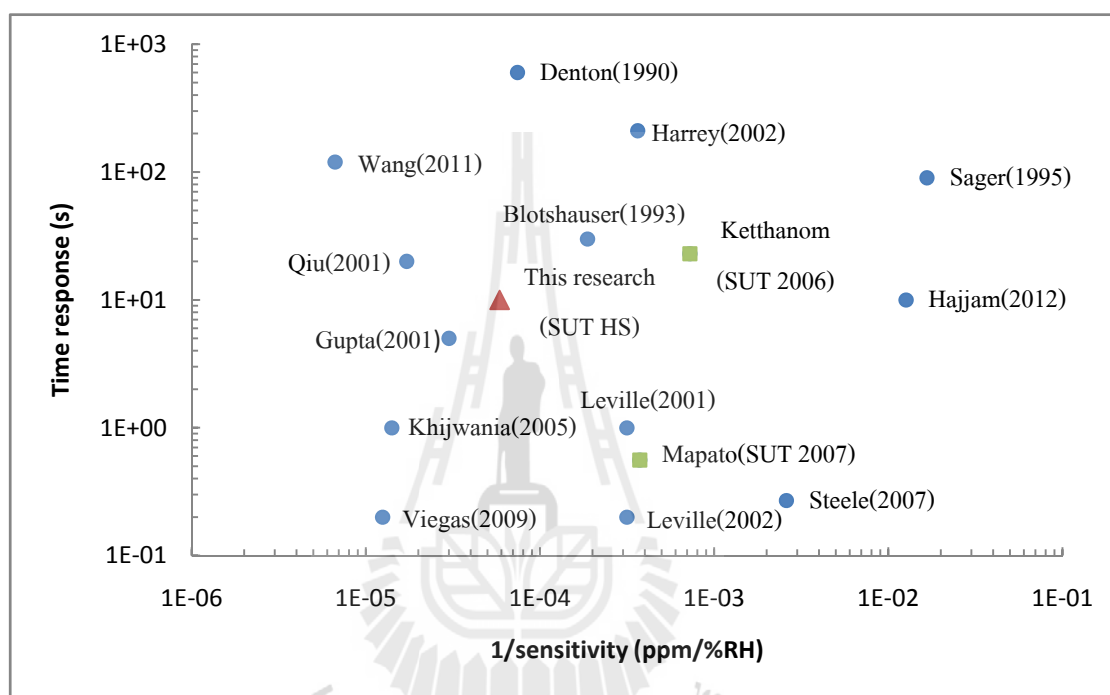
สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุปงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้เชิงแสง ประกอบด้วย ตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงแสง (SUT HS) และตัวตรวจรู้ฟองอากาศเชิงแสง (SUT BD) โดยตัวตรวจรู้เชิงแสงจะเน้นในเรื่องการใช้วัสดุไวความชื้นชนิดใหม่ ใช้กระบวนการลิโธกราฟีในการสร้างโครงสร้างและใช้เทคนิคทางแสงในการตรวจวัด เนื่องจากเทคนิคทางแสงเป็นวิธีการที่ง่ายและต้นทุนต่ำ ซึ่งจะแยกสรุปงานวิจัยโดยเริ่มจากตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS และตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD ตามลำดับ

ตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS จะใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งถือได้ว่าเป็นสารชนิดใหม่ที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น ในการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองผลการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ที่มีขนาดของซี่ที่ต่างกันของโครงสร้างแบบซี่ยาว ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ให้ผลตอบสนองทางเวลาที่เร็วกว่าโครงสร้างแบบอื่น และขนาดความกว้างของซี่ส่งผลโดยตรงต่อผลตอบสนองทางเวลา กล่าวคือ เมื่อซี่ของวัสดุไวความชื้นมีขนาดความกว้างลดลง เวลาในการตอบสนองก็จะลดลงเช่นเดียวกัน แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นฟิล์มที่สามารถสร้างลวดลายเล็กที่สุดได้ $30\text{ }\mu\text{m}$ ดังนั้นจึงได้ออกแบบลวดลายให้มีขนาดความกว้างของซี่ $70\text{ }\mu\text{m}$ โดยขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS เริ่มจากการเคลือบโลหะไททานเนียมลงบนแผ่น PCB และหลอมรวมผงสารไวแสงชนิดลบให้ได้ความหนาประมาณ $500\text{ }\mu\text{m}$ และฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากาอุดับรังสีเอกซ์เพื่อสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดลบ หลังการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่แข็งตัวออกแล้วก็สกัดสารไวแสงให้หลุดออกจากฐานรอง ก็จะได้โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีขนาดความกว้างของซี่ $60\text{ }\mu\text{m}$ การทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS แบ่งเป็นการทดสอบผลตอบสนองต่อความชื้นในสถานะอยู่ตัว เพื่อศึกษาค่าความไวและค่าความผิดพลาดจากการวัดความชื้นด้วยการเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ SUT HS กับความชื้นมาตรฐานที่ได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัว พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวเฉลี่ยเท่ากับ $17,038\text{ ppm}/\%RH$ ที่อุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขนาดความผิดพลาดในการวัดความชื้นสูงสุดเท่ากับ $4.57\text{ }\%RH$ เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง และสามารถสรุปได้ว่าตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS มีความแม่นยำเท่ากับ $\pm 5\text{ }\%RH$ ส่วนผลตอบสนองในการวัดความชื้นที่ 63% มีค่าเท่ากับ 2.7 วินาที และเวลาในการคายความชื้นที่ 37%

เท่ากับ 6.5 วินาที เมื่อนำค่าความไวและผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS มาเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ที่มีผู้สร้างไว้จากอดีตจนถึงปัจจุบันดังรูปที่ 8.1 โดยแกนนอนแสดงค่าส่วนกลับของความไวของตัวตรวจรู้ ส่วนแกนตั้งแสดงเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นอินพุตแบบขั้นบันได ซึ่งหากค่าความไวและเวลาในการตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกัน จะบ่งชี้ว่าตัวตรวจรู้ นั้น ๆ มีความไวและความเร็วสูง ตามลำดับ



รูปที่ 8.1 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS กับตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผู้สร้างขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD จะเน้นในเรื่องของการลดต้นทุนในการผลิตโดยการผลิตซ้ำช่องทางเดินของของเหลวจากแม่พิมพ์โลหะด้วยซิลิโคน PDMS โดยซิลิโคนที่ได้จากการผลิตซ้ำจะมีลวดลายเช่นเดิมทุกประการ และใช้หลักการตรวจวัดด้วยแสง กล่าวคือ อากาศและน้ำมีค่าดัชนีการหักเหของแสงไม่เท่ากัน ส่งผลให้เมื่อมีอากาศหรือน้ำบรรจุอยู่ภายในช่องทางเดินของของเหลวบริเวณที่ทำการตรวจวัดด้วยแสง ปริมาณแสงที่อุปกรณ์รับแสงวัดได้จะไม่เท่ากัน ซึ่งได้ออกแบบลวดลายช่องทางเดินของของเหลวที่มีขนาดความกว้าง 65 μm ความยาว 300 μm ความสูง 150 μm และผนังกั้นระหว่างช่องทางเดินของของเหลวกับช่องใส่เส้นใยแก้วนำแสงมีขนาด 35 μm โดยขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้เริ่มจากการฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากาอุดูดซับรังสีเอกซ์เพื่อสร้างลวดลาย

ลงบนสารไวแสงชนิดลบ หลังการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่แข็งตัวออกก็นำไปชุบโลหะ निकเกิดด้วยไฟฟ้าจนกระทั่งโลหะ निकเกิดสูงเท่ากับความสูงของสารไวแสง สกัชั้นของสารไวแสงชนิดลบออกด้วยการต้มในน้ำยา remover PG ก็จะได้แม่พิมพ์โลหะ निकเกิดสำหรับการผลิตซ้ำ ซึ่งแม่พิมพ์โลหะนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ในการสร้างช่องทางเข้าออกของเหลวบนชิลิกอน PDMS ด้วยท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จะสร้างในระหว่างการผลิตซ้ำช่องทางเดินของของเหลวด้วยชิลิกอน PDMS จากนั้นจะทำการเชื่อมต่อชิลิกอนที่ได้จากการผลิตซ้ำกับกระบอกด้วยการพลาสติกด้วยออกซิเจน ก็จะได้โครงสร้างของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD การทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมกับระบบของตัวตรวจรู้ฟองอากาศ SUT BD อยู่ในช่วง 0.10 ถึง 5.00 $\mu\text{L/s}$ สามารถวัดฟองอากาศที่มีปริมาตรตั้งแต่ 0.30 μL ขึ้นไป และค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรของฟองอากาศสูงสุดเท่ากับ $\pm 0.5 \mu\text{L}$ หรือ $\pm 5\%$

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างตัวตรวจรู้ความเข้มเชิงแสงควรลดขนาดความกว้างของซี่ให้เล็กลงเพื่อให้ตัวตรวจรู้มีผลตอบสนองทางเวลาที่เร็วขึ้น และการตรวจวัดด้วยเทคนิคทางแสงควรเลือกอุปกรณ์รับส่งแสงในย่านแสงอินฟราเรด ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3 μm เพราะน้ำสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้ได้ดี ซึ่งจะส่งผลให้ตัวตรวจรู้ทางแสงมีความไวเพิ่มขึ้น ส่วนการสร้างแม่พิมพ์โลหะสำหรับตัวตรวจรู้ฟองอากาศนั้น หากสร้างด้วยวิธีการชุบโลหะ निकเกิดทั้งชิ้นจะค่อนข้างใช้เวลานาน ดังนั้นควรสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีการชุบโลหะ निकเกิดบนฐานสแตนเลสแทน

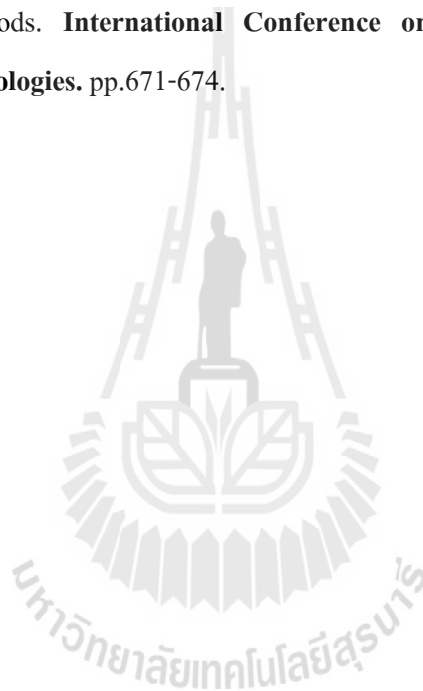
รายการอ้างอิง

- Abdalrahman, M.G., Adam, A.B., and Dennis, J.O. (2008). Capacitive air bubble detector for moving blood in artificial kidney. **The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering**. pp.332-337.
- Ahmed, M.G.A., Adam, A.B., and Dennis, J.O. (2009). Capacitive Air Bubble Detector Operated at Different Frequencies for Application in Hemodialysis. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. 26: 83-86.
- Ahmed, M.G.A., Adam, A.B., Dennis, J.O. and Steele, G.S. (2009). Capacitor Device for Air Bubbles Monitoring. **International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS**. 9: 1-4.
- Arregui, F.J., Ciaurriz, Z., Oneca, M., and Matias, I.R. (2003). An experimental study about hydrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors. **Sensor and Actuators B: Chemical**. 96: 165-172.
- Blakely, J.T., Gordon, D., and Sinton, D. (2007). Circulating Optical Particle Trapping Through the Integration of Fiber Optics and Microfluidics. **Laser and Electro-Optics**.
- Boltshauser, T., Leme, C.A., and Baltes, H. (1993). High sensitivity CMOS humidity sensors with on-chip absolute capacitance measurement system. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 15 (1-3): 75-80.
- Chen, H.T., and Wang, Y.N. (2009). Optical microflow cytometer for particle counting sizing and fluorescence detection. **Microfluid Nanofluid**. 6:529-537.
- Corres, J.M., Arregui, F.J., and Matias, I.R. (2006). Design of Humidity Sensors Based on Tapered Optical Fibers. **Journal of lightwave technology**. 24: 4329-4336.
- Corres, J.M., Arregui, F.J., and Matias, I.R. (2006). Design of Humidity Sensors Based on Tapered Optical Fibers. **Journal of lightwave technology**. 24: 4329-4336.
- Corres, J.M., Matias, I.R., Hernaez, M., Brovo, J., and Arregui, F.J. (2008). Optical Fiber Humidity Sensors Using Nanostructured Coating of SiO₂ Nanoparticles. **IEEE sensors journal**. 8: 281-285.

- Cui, L., Zhang, T., and Morgan, H. (2002). Optical particle detection integrated in a dielectrophoretic lab-on-a-chip. **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 12: 7-12.
- Dietrich, G., Jenderka, K.V., Cobet, U., and Kopsch, B. (2000). Investigation of the micro bubble size distribution in the extracorporeal blood circulation. **Acoustical Imaging**. 24: 281-285.
- Gerlach, G., and Sager, K. (1994). A piezoresistive humidity sensor. **Sensor and Actuator A: Physical**. 43 (1-3): 181-184.
- Gupta, B.D., and Ratnanjali (2001). A novel probe for a fiber optic humidity sensor. **Sensor and Actuators B: Chemical**. 80: 132-135.
- Hajjam, A., Guo, Y., Dietrich, K., and Pourkamali, S. (2012). MEMS Resonant Human Breath Sensors for Survivor Detection in Disaster Areas. **IEEE Sensors Conference**.
- Harrey, P.M., Ramsey, B.J., Evans, P.S.A., Harrison, D.J. (2002). Capacitive-type humidity sensors fabricated using the offset lithographic printing process. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 87: 226-232.
- Jin, T., XU, B., Tang, K., and Hong, J.P. (2007). Bubble counter based on photoelectric technique for leakage detection of cryogenic valves. **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**. 1: 88-92.
- Khijwania, S.K., Srinivasan, K.L., and Singh, J.P. (2005). An evanescent-wave optical fiber relative humidity sensor with enhanced sensitivity. **Sensor and Actuators B: Chemical**. 104: 217-222.
- Koumpouros, Y., and Maglogiannis, E. (2000). Proposed methods for designing an air in line detection system. **1st Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine & Biology**. pp.146-151.
- Laville, C., Deletage, J.Y., and Pellet, C. (2001). Humidity sensors for a pulmonary function diagnostic microsystem. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 76 (1-3): 304-309.
- Lygouras, J.N., and Tsalides, P.G. (2002). Optical-Fiber Finger Photo-Plethysmograph Using Digital Techniques. **IEEE sensors journal**. 2: 20-25.
- Mapato, M. (2007). Fabrication of fast response humidity sensor by using x-ray lithography technique. **Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand**.

- Omar, A.F.B., and MatJafri, M.Z.B. (2009). Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity. **Sensors: Physical**. 9: 8311-8335.
- Ozeri, S., Shmilovitz, D., and Fainguelernt, J. (2006). Ultrasonic Air Bubble Detection Employing Signal Processing Techniques. **IEEE**. pp.2840-2845.
- Qiu, Y.Y., Azeredo-Leme, C., Alcacer, L.R., and Franca, J.E. (2001). A CMOS humidity sensor with on-chip calibration. **Sensor and Actuator A: Physical**. 92: 80-87.
- Ralston, A.R.K., Klein, C.F., Thoma, Paul, E., and Denton, D.D. (1996). A model for the relative environmental stability of a series of polyimide capacitance humidity sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 34 (1-3): 343-348.
- Ravichandran, S., Shanthini, R., Ridza, N.N.R., Yikai, W., Kumar, P.M., Jayakumar, D., and Clinton, L.G. (2008). Modelling and Control of Intravenous Drug Delivery System Aided by Optical Bubble Detection Tools. **Proceeding of the 2nd International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology**. pp.16-19.
- Schnell, G. (1997). Measurement of flow in infusion systems. **Medical & Biological Engineering & Computing**. 35:737-741.
- Seemungkoon, S. (2007). Design and fabrication of detector for particle suspended in solutions using MEMs technology. **Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering Suranaree University of Technology**, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Steele, J.J., Popta, A.C., Hawkeye, M.M., Sit, J.C., and Brett, M.J. (2006). Nanostructured gradient index optical filter for high-speed humidity sensing. **Sensor and Actuators B: Chemical**. 120: 213-219.
- Tetelin, A., Pellet, C., Laville, C., and Kaoua, G. (2003). Fast response humidity sensors for a medical microsystem. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 91 (1-3): 211-218.
- Tsigara, A., Mountrichas, G., Gatsouli, K., Nichelatti, A., Pispas, S., Madamopoulos, N., Vainos, N.a., Du, H.L., and Kalantzopoulou, F.R. (2007). Hybrid polymer/cobalt chloride humidity sensors based on optical diffraction. **Sensor and Actuators B: Chemical**. 120: 481-486.

- Viegas, D., Goicoechea, J., Santos, J.L., Araujo, F.M., Ferreira, L.A., Arregui, F.J., and Matias, I.R. (2009). Sensitivity Improvement of a Humidity Sensor Based on Silica Nanospheres on a Long-Period Fiber Grating. **Sensors**. 9: 519-527.
- Wang, B., Zhang, F., Pang, F., and Wang, T. (2011). An optical fiber humidity sensor based on absorption. **SPIE-OSA-IEEE Asia Communications and Photonics**. 8311.
- Yeo, T.L., Sun, T., and Grattan, K.T.V. (2008). Fibre-optic sensor technology for humidity and moisture measurement. **Sensor and Actuator A: Physical**. 144: 280-295.
- Zhang, Y., and Sun, H. (2012). Measurement of bubble size distribution in liquids by optical and acoustical methods. **International Conference on Communication Systems and Network Technologies**. pp.671-674.



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน

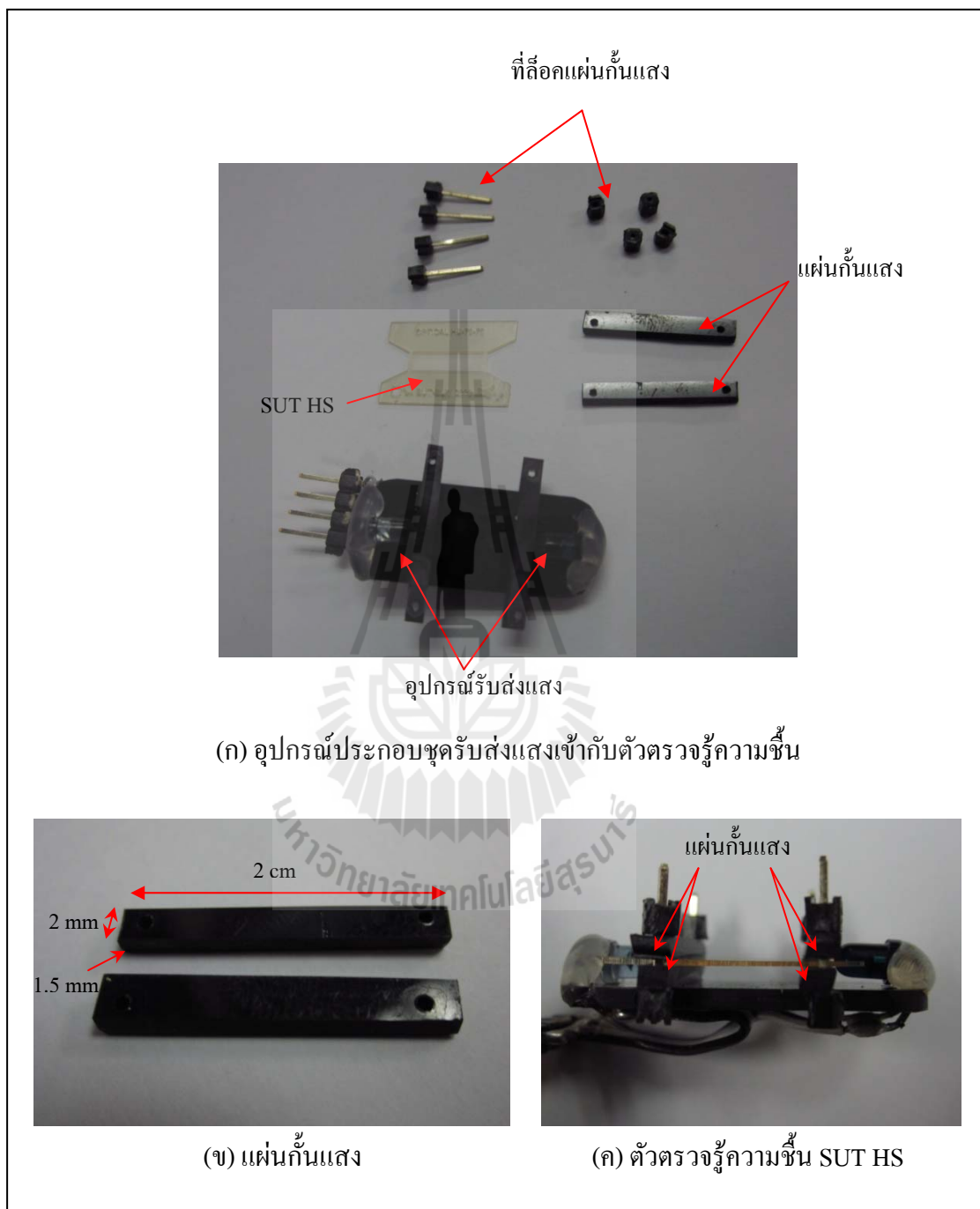
1. นำเกลือใส่ลงไปในภาชนะที่เป็นแก้ว เติมน้ำบริสุทธิ์ลงในภาชนะจนเกลือเปียกแล้วคนให้เกลือละลายในน้ำ
2. นำภาชนะไปอุ่นบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) เพื่อให้เกลือละลายพร้อมทั้งเติมเกลือแล้วจนกระทั่งเกลือไม่สามารถละลายได้อีก จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนสารละลายเกลือตกผลึก
3. นำตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นและตัวตรวจรู้อุณหภูมิเชิงพาณิชย์บรรจุลงในภาชนะที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ปิดสนิท (ข้อควรระวัง ห้ามให้ตัวตรวจรู้สัมผัสกับสารละลายเกลือโดยตรง) ทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นภายในภาชนะมีค่าเท่ากับความชื้นของสารละลายเกลือชนิดนั้น ๆ
4. นำภาชนะที่บรรจุเกลือและตัวตรวจรู้ใส่เข้าไปในเตาอบ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในระหว่างทำการทดสอบ
5. บันทึกค่า Digital Output ของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น อุณหภูมิจากตัวตรวจรู้อุณหภูมิเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 อุณหภูมิ คือ 30 40 และ 50 °C
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 เพียงแต่เปลี่ยนชนิดของเกลือที่ให้ค่าความชื้นแตกต่างกันออกไป ที่อุณหภูมิคงที่ ทั้งหมด 6 ชนิด คือ ลิเทียมคลอไรด์ โพแทสเซียมอะซิเตรด แมกนีเซียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไนเตรด โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมไนเตรด

The logo of SUT HS (Srinakharinwirot University Health Sciences) is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, flanked by two stylized 'H' shapes. Below this is a circular emblem with a book and a torch. The entire logo is encircled by the text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' (Srinakharinwirot University) in Thai script.

ภาคผนวก ข

การประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS

การประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS



รูปที่ ข.1 การประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS

การประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นสำหรับนำมาทดสอบและใช้งาน จะมีอุปกรณ์ดังรูปที่ ข.1 (ก) ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์รับส่งแสง SUT HS แผ่นกั้นแสงจำนวน 4 ชิ้น และที่ล็อกแผ่นกั้นแสง โดยแผ่นกั้นแสงจะเป็นแผ่นอะคลิลิกสีดำดังรูปที่ ข.1 (ข) มีความยาว 2 cm กว้าง 2 mm และสูง 1.5 mm เจาะรูบริเวณปลายทั้งสองด้านสำหรับใส่ที่ล็อกแผ่นกั้นแสง หลังจากประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS เรียบร้อยแล้วจะได้ตัวตรวจรู้ความชื้นสำหรับนำไปใช้งานดังรูปที่ ข.1 (ค) ขนาดความสูงของช่องที่ยอมให้แสงจากอุปกรณ์ส่งแสงเดินทางผ่านโครงสร้างของสารไวความชื้น (SU-8) มายังอุปกรณ์รับแสงที่อยู่อีกด้านคือ 300 μm (ขนาดความสูงของช่องจะขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้างสารไวความชื้น) โดยการประกอบชุดรับส่งแสงเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้น SUT HS ลักษณะนี้สามารถถอดเปลี่ยนโครงสร้างของสารไวความชื้นได้



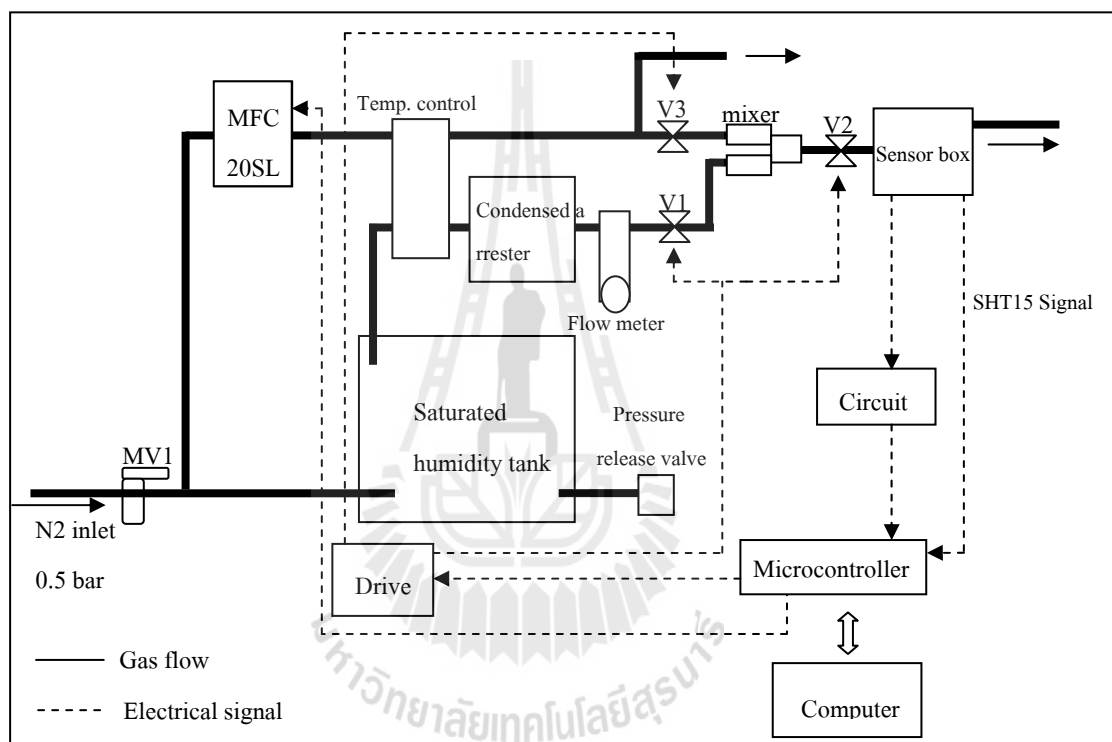
ภาคผนวก ค

ระบบการป้องกันความชื้นในการวัดผลตอบสนองทางเวลา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระบบการป้อนความชื้น

ระบบป้อนความชื้นนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของอากาศแห้งที่ได้จากแก๊สไนโตรเจนและส่วนของอากาศอิ่มตัวที่ได้จากไอน้ำของหม้อต้มน้ำ โดยควบคุมความชื้นด้วยการเพิ่มลดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในขณะที่อากาศอิ่มตัวคงที่ ซึ่งอากาศแห้งและอากาศอิ่มตัวจะเข้ามารวมกันกลายเป็นความชื้นที่เราต้องการเข้าสู่กล่องสำหรับบรรจุตัวตรวจรู้เพื่อทดสอบผลตอบแทนองทางเวลาต่อไป



รูปที่ ค.1 ระบบการวัดผลตอบแทนองทางเวลา

- Power Supply คือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ชุดควบคุมทั้งหมด
- ชุดวงจรควบคุม และติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ประกอบไปด้วย ชุดวงจรรับส่งแสง (Circuit) ชุดวงจรขับวาล์ว (Diver) และชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)
- MV1 คือ Manual valve1 ทำหน้าที่ปิดเปิดแก๊ส โดยผู้ใช้เป็นผู้เปิดปิดเองซึ่งก่อนการเริ่มทดลอง ต้องเปิด MV1 ไว้อย่างน้อย 5 นาทีเพื่อให้ความดันในถังเก็บความชื้นมีค่าคงที่

- MFC 20SLM คือ mass flow controller ขนาดการอัตราไหลสูงสุด 20 ลิตรต่อนาที เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของอากาศแห้ง เพื่อควบคุมความชื้นให้ได้ค่าตามต้องการ โดยปรับได้ 0-20 SLM
- Saturated humidity tank คือ หม้อต้มน้ำสำหรับสร้างอากาศอิ่มตัว โดยมีวาล์ว (Pressure release valve) เพื่อลดความดันภายในหม้อต้มน้ำ
- Condensed arrester คือ กักดักหยดน้ำ เป็นตัวป้องกันหยดน้ำที่ควบแน่นเข้าสู่ภาชนะบรรจุตัวตรวจรู้





ภาคผนวก ง

โปรแกรมจำลองผลตอบแทนความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น

```

/*****
//โปรแกรมจำลองผลการแพร่ใน 1 มิติ สำหรับโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบชีวะที่มีการแพร่ของความชื้น
//สองด้าน โดยใช้การแก้ปัญหาคำด้วยวิธีการของ Crank-Nicolson
//โดย นางสาวสมปอง สุขประสงค์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
//File: prop_sim.sci
/*****

clear;
t = 0:0.01:6;           //ช่วงเวลาในการจำลองผล
x = 0:5:35;             //ความกว้างของชี
D = 400;                 //สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น
left = 1;                //เงื่อนไขขอบเขตด้านซ้าย
right = 1;               //เงื่อนไขขอบเขตด้านขวา
d_t = t(2) - t(1);       //Δt
d_x = x(2) - x(1);        //Δx
lamda = D * d_t / (d_x^2); //คำนวณค่า lamda
h = 2 * (1 + lamda);
a = zeros(length(x)-2, length(x)-2); //ประกาศเมตริกซ์ a
b = zeros(length(x)-2, 1);           //ประกาศเมตริกซ์ b
m = zeros(length(x)-2, 1);           //ประกาศเมตริกซ์ m
as = zeros(length(x), length(t));    //เมตริกซ์ ที่ใช้เก็บคำตอบทุกช่วงเวลา
M = [];
for tn = 1 : length(t)               //ลูปสร้างเมตริกซ์ a และ b
for i = 1 : length(b)
    if i == 1
        a(i, i) = h;
        a(i, i+1) = -lamda;
        b(i) = lamda*left + 2*(1-lamda)*m(i) + lamda*m(i+1) + lamda*left;
    elseif i == length(b)
a(length(b), length(b) - 1) = -lamda;
a(length(b), length(b)) = h;
b(length(b)) = lamda*right + 2*(1-lamda)*m(length(b)) + lamda*m(length(b)-1) + lamda*right;
    else
        a(i, i-1) = -lamda;

```

```

a(i, i) = h;
a(i, i+1) = -lamda;
b(i) = lamda*m(i-1) + m(i)*2*(1-lamda) + lamda*m(i+1);
end
end
m = inv(a) * b; //แก้สมการหาคำตอบ
M = [M; m];
as(:, tn) = [left; m; right]; //รวมคำตอบเข้ากับเงื่อนไขขอบ
plot(x, as(:, tn)); //วาดกราฟผลตอบแทนในหนึ่งหน่วยเวลา
end
mt = zeros(1, length(t)); //ประกาศเมตริกซ์ mt
for n = 1 : length(t)
    mt(n) = intsplin(x, 1-(as(:, n))); //หาพื้นที่ใต้กราฟด้วยการ integrate
end
mt = mt / max(x); //การ normalization
figure(1, "Figure_name", "Output", ... //สร้างหน้าต่างสำหรับวาดกราฟ
    "BackgroundColor", [1 1 1], ...
    "Position", [80 20 800 600]);
clf(1, "clear");
plot(t, mt); //วาดกราฟผลตอบแทนทางเวลา
    xtitle("", "$t$", "$\int m(x) \ dx$"); //ชื่อแกน x และแกน y
save output
mkdir("out");
fprintfMat("out/Mom.txt", as, "%1.7f"); //การเก็บข้อมูล

```

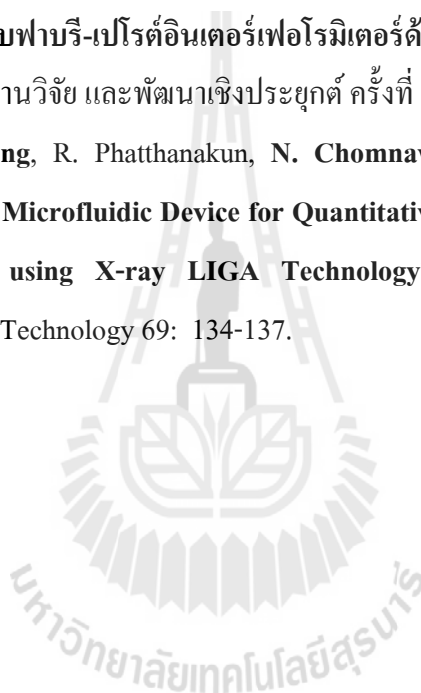
ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- Panwong Kuntanawat, Jirapat Ruenin, Rungrueang Phatthanakun, Phongsakorn Kunhorm, Werasak Surareungchai, **Sompong Sukprasong** and **Nimit Chomnawang** (2014). “**An electrostatic microwell-based biochip for phytoplanktonic cell trapping**”. AIP Publishing LLC, Biomicrofluidics 8: 1-15. (JIF 3.385).
- ชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์, รุ่งลดา นิมช้าง, **สมปอง สุขประสงค์**, รุ่งเรือง พัฒนากุล, และ รังสรรค์ ทองทา (2013). “การออกแบบและการสร้างระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) อุปกรณ์ชุดเซนเซอร์สำหรับฟาบรี-เพอร์มิตเตอร์เฟอโรอิเล็กโตรด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี”. การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5. 8-10 พฤษภาคม: หน้า 575-580.
- J. Ruenin, **S. Sukprasong**, R. Phatthanakun, **N. Chomnawang** and P. Kuntanawat (2012). “**Fabrication of Microfluidic Device for Quantitative Monitoring of Individual Algal Cell Behavior using X-ray LIGA Technology**”. World Academy of Science, Engineering and Technology 69: 134-137.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสมปอง สุขประสงค์ เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2529 ที่ตำบลระเวียง อำเภอนोनารายณ์ จังหวัดสุรินทร์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านระเวียงรัตนกิจวิทยา ตำบลระเวียง อำเภอนोनารายณ์ จังหวัดสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบ็ดพิทยาสรรค์ ตำบลเบิด อำเภอรัตนบุรี จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2551 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน โดยได้รับทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยได้พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นและตัวตรวจรู้ฟองอากาศเชิงแสงที่สร้างโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังกล่าวจนกว จ.

