

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ
ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

นายชิตพงษ์ เกตุอนอม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-533-597-5

**DESIGN AND FABRICATION OF CAPACITIVE
HUMIDITY SENSORS USING MEMS TECHNOLOGY**

Chitphong Ketthanom

**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 2006

ISBN 974-533-597-5

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ
ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

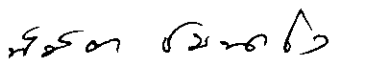
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



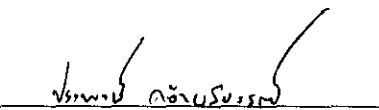
(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ




(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณี รัตนพานิ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชิตพงษ์ เกตุดอนอม : การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (DESIGN AND FABRICATION OF CAPACITIVE HUMIDITY SENSORS USING MEMS TECHNOLOGY)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.นิมิต ชมนาวัง, 198 หน้า. ISBN 974-533-597-5

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิคราเทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ทำการทดสอบและวัดคุณสมบัติตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นตลอดจนการพัฒนาต้นแบบของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างได้ สำหรับเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิคราโดยสร้างอิเล็กโทรดทองแดงแบบซีทีวีบนแผ่นวงจรมิคราและใช้วัสดุไวความชื้นที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ เทปกาวพอลิอิมิดหนา 60 ไมโครเมตร และพอลิอิมิดจากการสปัตเตอร์ริงหนา 45 Å ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นได้รับการเปรียบเทียบกับความชื้นของเกลืออิมิตัวชนิดต่าง ๆ และทดสอบหาความไวและผลตอบสนองทางเวลาซึ่งพบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิด และตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทดังกล่าวใช้เวลาคาดซึมและเวลาคายความชื้นเร็วกว่าเล็กน้อย แต่มีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 นั่นคือต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้ดีและมีราคาถูก เนื่องจากอิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็กลงสามารถสร้างด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม จึงได้ทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมในสองรูปแบบ รูปแบบแรกทำการสร้างอิเล็กโทรดอลูมิเนียมลงบนฐานกระจกสไลด์แล้วเคลือบทับด้วยพอลิอิมิดหนา 45 Å โดยการสปัตเตอร์ริง ส่วนรูปแบบที่สองทำการเคลือบฟิล์มของพอลิอิมิดลงบนฟิล์มอลูมิเนียมแล้วจึงสร้างอิเล็กโทรด จากการทดลองพบว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองรูปแบบมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 แต่ตัวตรวจรู้รูปแบบแรกมีผลตอบสนองทางเวลาดีกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 สำหรับเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นได้นำมาใช้เพื่อสร้างอิเล็กโทรดที่มีขนาดเพียง 3 ไมโครเมตรแล้วจึงเคลือบอิเล็กโทรดด้วยฟิล์มพอลิอิมิดโดยการสปัตเตอร์ริง สำหรับตัวตรวจรู้ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีนี้แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ แบบที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมทับด้านบน แบบที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมทับด้านบน และแบบที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมแต่เจาะเป็นรูพรุน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ยังคงมีความไวสูงสุด ตามด้วยแบบที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมทับด้านบน แบบที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไว้รูพรุนทับด้านบน แบบที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมซึ่งมีรูพรุนทับด้านบน ตามลำดับ ในการทดสอบผลตอบสนองทางเวลาพบว่าตัวตรวจรู้ทั้งสามรูปแบบมีผลตอบสนองทางเวลาดีกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 นอกจากนี้ยังพบว่าตัวตรวจรู้ที่มีความหนาของฟิล์มพอลิอิมิดน้อยจะตอบสนองทางเวลาเร็วขึ้น

ดังนั้น เทคนิคการเคลือบวัสดุไวความชื้นพอลิอีไมด์ด้วยเทคนิคการสปีดเทอริงซึ่งสามารถสร้างฟิล์มที่มีความหนาแน่นมาก ๆ ได้ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการพัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความเร็วมากขึ้นอีกในอนาคต เพื่อเป็นการสาธิตการประยุกต์ใช้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่พัฒนาขึ้นในงานที่ต้องการวัดความชื้นอย่างรวดเร็วจึงได้พัฒนาต้นแบบเครื่องวัดอัตราการหายใจโดยประกอบต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเข้ากับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ผลการทดลองสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นของลมหายใจซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการหายใจได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

CHITPHONG KETTHANOM : DESIGN AND FABRICATION OF
CAPACITIVE HUMIDITY SENSORS USING MEMS TECHNOLOGY.

THESIS ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D. 198 PP.

ISBN 974-533-597-5

HUMIDITY SENSOR/MICROSENSOR/MEMS/POLYIMIDE SPUTTERING

This thesis presents design and fabrication of capacitive humidity sensors based on three technologies, printed circuit board, integrated circuit and microelectromechanical systems. For printed circuit board technology, the sensors were fabricated by patterning copper layer into interdigital electrodes followed by application of humidity sensitive materials such as 60 μm -thick commercially available polyimide tape and 45 \AA -thick sputtered polyimide film. The fabricated sensors were calibrated against various saturated salts and characterized for sensitivity and response time. The results showed that sensors with sputtered polyimide has higher sensitivity than those with polyimide tape. In comparison with an SMTHS10 commercial sensor, both configurations have less adsorption and desorption times. This indicates that low cost humidity sensors can be realized using either polyimide tape or sputtered polyimide. Since smaller electrodes can be obtained using IC technology, two more versions of sensors were fabricated. For the first version, aluminum electrodes were patterned on a glass slide followed by coating of a 45 \AA -thick layer of sputtered polyimide. In case of second version a 45 \AA -thick polyimide film was coated on an aluminum surface followed by deposition and patterning of aluminum electrodes. In comparison with the commercial sensor, both versions are less sensitive. However, the first version gives better response time. In order to

fabricate much smaller electrodes, the three-layer polysilicon MEMS technology was used to obtain 3 micron-size electrodes. Three configurations of sensors were fabricated including sputtered polyimide on polysilicon electrodes with on-top aluminum ground plane, and sputtered polyimide on polysilicon electrodes with on-top perforated aluminum ground plane. Characterizations indicated that all versions of sensors provide faster response compared with the commercial sensor. In addition, it was found that thinner sputtered polyimide film gives faster response time. This finding opens possibility of obtaining very fast humidity sensors, if smaller and thinner electrodes were realized using better fabrication techniques. To demonstrate utilization of the fabricated sensor in application that requires fast response time, a MEMS based humidity sensor was incorporated with a microcontroller and used as a respiration rate monitor. Good results were obtained from the demonstration.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2006

Student's Signature Chitphong Kettlanom

Advisor's Signature Nimit Channaray

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ลู่ทางด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือเป็นอย่างดี กล่าวคือ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ได้สอนให้ข้าพเจ้าได้รู้จักความรับผิดชอบความเข้มแข็งในการทำวิจัย ด้วยความเมตตาเสมอมา และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการประพันธ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดร.อดิสร เตือนตรานนท์ นักวิจัย และคุณณอม โลมาส คุณธิติมา มธุรส ผู้ช่วยวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ดร.ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ หัวหน้าฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค และคุณสุพรรณ บุญสุยา วิศวกร ประจำศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ผศ. ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ และคุณรังสรรค์ เมืองเหลือ คุณวิระ เพ็งจันทร์ คุณนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง นักวิจัยประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คุณประพล จาระตะคุ คุณประพันธ์ คัทวิ คุณณรงค์ พิมพ์ปฐู ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย คุณอัญชุลี รักด่านกลาง เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป และคุณภัทรวรรณ สิทธิกวินกุล พนักงานธุรการ ที่ช่วยตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์ คุณสาวณี กรรโณ ที่คอยดูแล ห่วงใยและกำลังใจ ในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน น้อง บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่ และให้กำลังใจในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและท้อแท้ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรค จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

จิตพงษ์ เกตุณอม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นในอดีตจนถึงปัจจุบัน.....	5
2.3 ปรัชญ่วรรณกรรมของตัวตรวจรู้ความชื้น.....	11
2.4 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น.....	31
2.5 ลักษณะตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่ออกแบบและสร้างในงานวิจัย.....	32
2.6 สรุป.....	36
3 หลักการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ.....	39
3.1 กล่าวนำ.....	39
3.2 ความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์.....	39
3.3 การแพร่ (diffusion).....	44
3.4 การแพร่ในสภาวะคงตัว (steady-state diffusion).....	45
3.5 การแพร่ในสภาวะไม่คงตัว (nonsteady-state diffusion).....	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	ความจุไฟฟ้ากับการแพร่ความชื้นภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	51
3.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ.....	57
3.8	การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดความชื้น.....	60
3.9	สรุป.....	63
4	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์.....	64
4.1	กล่าวนำ.....	64
4.2	การใช้เทปกาพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น.....	64
4.3	วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับตัวตรวจรู้ความชื้น.....	67
4.4	ผลการทดลอง โดยใช้เทปกาพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น.....	71
4.5	การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์.....	75
4.6	การใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น.....	77
4.7	ผลการทดลอง โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น.....	78
4.8	เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้เทปกาพอลิอิมิด์กับการสปีดเตอริงพอลิอิมิด์ เป็นวัสดุไวความชื้น.....	81
4.9	สรุป.....	86
5	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม.....	88
5.1	กล่าวนำ.....	88
5.2	การใช้เทปกาพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น.....	88
5.3	ผลการทดลอง โดยใช้เทปกาพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น.....	91
5.4	การใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น โดยสร้างด้วย ฐานรองซิลิคอน.....	94
5.5	ผลการทดลองการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น โดยสร้างด้วย ฐานรองซิลิคอน.....	97
5.6	การใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น โดยสร้างด้วย ฐานรองกระจกสไลด์.....	100
5.7	ผลการทดลองการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น โดยสร้างด้วย ฐานรองกระจกสไลด์.....	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.8	เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้งานรองซิลิคอนกับฐานรองกระจกสไลด์ โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวกวามขึ้น.....	105
5.9	สรุป.....	110
6	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค.....	113
6.1	กล่าวนำ.....	113
6.2	การออกแบบโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี Multi User MEMS Process (MUMPs).....	113
6.3	ผลการทดลองโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกวามขึ้น.....	122
6.4	การใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกวามขึ้นและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม.....	127
6.5	ผลการทดลองการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกวามขึ้น และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม.....	131
6.6	เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกวามขึ้น แบบไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม และแบบมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู และไม่เจาะรู.....	137
6.7	สรุป.....	142
7	ต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์.....	146
7.1	กล่าวนำ.....	146
7.2	การออกแบบและสร้าง.....	146
7.3	การทดสอบวัดความชื้นอากาศ.....	149
7.4	การทดสอบวัดอัตราการหายใจ.....	150
7.5	สรุป.....	158
8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	159
8.1	ข้อสรุป.....	159
8.2	ข้อเสนอแนะ.....	162
	รายการอ้างอิง.....	170

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	ขั้นตอนการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว..	178
ภาคผนวก ข.	ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์เทคโนโลยีวงจรรวมและเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค.....	180
ภาคผนวก ค.	โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์.....	188
ภาคผนวก ง.	การเชื่อมต่อตัวตรวจรู้ความชื้นกับโปรแกรม LabVIEW™	192
ภาคผนวก จ.	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	196
ประวัติผู้เขียน.....		198

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน เครื่องมือเครื่องใช้และวัสดุในอุตสาหกรรมต่าง ๆ.....	6
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทฟิล์มบาง.....	10
2.3 วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในตัวตรวจรู้ความชื้น.....	18
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสปีดเตอริงพอลิเมอร์.....	21
2.5 เปรียบเทียบมาตรฐานความชื้นสัมพัทธ์ (ไฮโกรมิเตอร์).....	27
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเทคนิคโดยสังเขปของตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก.....	28
2.7 สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้แต่ละประเภท.....	37
3.1 ส่วนประกอบของแก๊สในบรรยากาศ.....	42
3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	60
4.1 เปรียบเทียบช่วงเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภท.....	83
4.2 สรุปค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz.....	84
5.1 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภท.....	107
5.2 สรุปค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz.....	108
6.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs.....	114
6.2 รายละเอียดคุณสมบัติของกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นที่ส่งไปสร้าง.....	116
6.3 เปรียบเทียบเวลาการดูดซึมความชื้น และเวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ทั้งสี่ประเภท.....	124
6.4 สรุปค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz.....	125
6.5 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้ทั้งสี่ประเภท.....	139
6.6 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz.....	140
7.1 รูปแบบ (pattern) การหายใจแบบต่าง ๆ.....	151
8.1 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้ที่ออกแบบและสร้างขึ้น.....	161
8.2 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz.....	162

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ (ก) แผนภาพตัดขวาง (ข) แผนภาพมองจากด้านบน..... 9
2.2	โครงสร้าง MIS ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้เซรามิกเป็น วัสดุไวความชื้น..... 16
2.3	แนวความคิดของความนำโปรตอนในตัวตรวจรู้ความชื้นของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์..... 17
2.4	ทรานสดิวเซอร์แบบซีวีสถานสลับหว่าง..... 22
2.5	หลักการตรวจรู้และวัสดุตรวจรู้ที่ใช้กับไฮโกรมิเตอร์..... 27
2.6	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี แผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น..... 34
2.7	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิด์เป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น..... 34
2.8	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี วงจรรวมโดยใช้เทปกาพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น..... 35
2.9	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี วงจรรวม โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิด์เป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น..... 35
2.10	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี วงจรรวม โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิด์เป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น..... 35
2.11	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี กระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิด์ เป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น..... 36
2.12	แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี กระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิด์ เป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น และมีชั้นแผ่นกราฟต์ออกไซด์..... 36
3.1	อธิบายเรื่องของความดันไอน้ำอิ่มตัว..... 43
3.2	การแพร่ในสภาวะคงตัวผ่านฟิล์มบางพอลิเมอร์..... 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นแบบเส้นตรงสำหรับสภาพการแพร่ในรูปที่ 3.2.....	47
3.4 วัสดุแผ่นระนาบความหนา L	49
3.5 ภาพตัดขวางของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ.....	51
3.6 รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแพร่ผ่านของความชื้น ความเข้มข้นความชื้นทั่วทั้งพื้นผิวกำหนดให้คือ M_s	52
3.7 ปริมาตรบางส่วนของปริมาตรทั้งหมด.....	53
3.8 โลหะตัวนำ 2 ตัว วางห่างกันเป็นระยะทาง d บนแผ่นวงจรมพิมพ์ ที่มีความหนา h และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r	58
3.9 โลหะตัวนำ 2 ตัว วางห่างกันเป็นระยะทาง d บนแผ่นวงจรมพิมพ์ ที่มีความหนา h และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r	59
4.1 ลวดลายและขนาดไดอิเล็กโตรดทองแดงของตัวตรวจรู้.....	65
4.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมพิมพ์ โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น.....	66
4.3 ต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมพิมพ์ และใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น.....	66
4.4 แผนภาพวงจรมกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง ตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น.....	67
4.5 วงจรมกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตซึ่งเปลี่ยนแปลง ตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น C_3	67
4.6 แผนภาพวงจรมกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น.....	68
4.7 วงจรมกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น.....	68
4.8 อุปกรณ์ NI USB-6009 ของบริษัท National Instruments.....	69
4.9 แผนภาพระบบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ NI USB 6009 กับวงจรม และตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น.....	70
4.10 แผนภาพแสดงระบบการวัดผลตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น.....	70

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว.....	71
4.12 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวกความชื้น.....	72
4.13 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วย เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	72
4.14 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วย เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	73
4.15 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วย เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	74
4.16 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วย เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	74
4.17 กราฟ FTIR จากการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอริงเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ของพอลิอิมิด.....	76
4.18 กราฟความหนา 76 นาโนเมตร ของฟิล์มบางพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริงเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง.....	76
4.19 ภาพสามมิติแสดงความหนา 76 นาโนเมตร ของฟิล์มบางพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริง เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง.....	76
4.20 ต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี แผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกความชื้น.....	77
4.21 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวกความชื้น.....	78
4.22 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวกความชื้น.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้นหนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	79
4.24 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	80
4.25 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	80
4.26 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	81
4.27 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ระหว่างการสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å กับเทปกาวพอลิอิมิด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	82
4.28 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ระหว่างการสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å กับเทปกาวพอลิอิมิด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ 1 kHz.....	85
4.29 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ระหว่างการสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å กับเทปกาวพอลิอิมิด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	86
5.1 ลวดลายและขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรคอลลูมิเนียมขนาด 120 μm ของตัวตรวจรู้แบบซีทีวี.....	89
5.2 ลวดลายและขนาดอิเล็กทรอนิกส์โทรคอลลูมิเนียมขนาด 120 μm ของตัวตรวจรู้แบบเขาวงกต.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3	ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนเทปกาวพอลิอิมิด์..... 90
5.4	ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น..... 90
5.5	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C ที่ 50%RH (IDT=ซีหวี, SP=เขาวงกต)..... 91
5.6	การเลื่อนความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นตัวนำ ของอิเล็กโทรด 30 μm ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C (IDT=ซีหวี, SP=เขาวงกต)..... 92
5.7	การเลื่อนความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นตัวนำ ของอิเล็กโทรด 60 μm ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C (IDT=ซีหวี, SP=เขาวงกต)..... 93
5.8	การเลื่อนความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นตัวนำ ของอิเล็กโทรด 120 μm ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C (IDT=ซีหวี, SP=เขาวงกต)..... 94
5.9	ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม โดยสร้างด้วยฐานรองซิลิคอน..... 96
5.10	ลวดลายและขนาดอิเล็กโทรดอลูมิเนียมของตัวตรวจรู้..... 97
5.11	ภาพถ่ายตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม โดยมีเส้นตัวนำขนาด 30 μm 97
5.12	ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้น..... 98
5.13	ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้น ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเทอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง..... 98
5.14	การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้น ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเทอริงพอลิอิมิด์ หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ..... 99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้อาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	99
5.16 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้อาต์พุตเป็นการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	100
5.17 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์.....	101
5.18 ลวดลายและขนาดคิเล็กโทรคอลลูมิเนียมของตัวตรวจรู้.....	102
5.19 ภาพถ่ายตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์ โดยมีเส้นตัวนำขนาด 50 μm	102
5.20 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวกความชื้น.....	103
5.21 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้อาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	103
5.22 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	104
5.23 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้อาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดหนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	105
5.25 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมระหว่างการสร้างบนฐานรองซิลิคอนกับการสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	106
5.26 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมระหว่างการสร้างบนฐานรองซิลิคอนกับการสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่มีความถี่ 1 kHz.....	109
5.27 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมระหว่างการสร้างบนฐานรองซิลิคอนกับการสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรถ่ายให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	110
6.1 ภาพร่างสองมิติของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่ออกแบบด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น.....	114
6.2 ภาพถ่ายชิพของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่ได้รับกลับมา.....	116
6.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสดงชิพตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ผ่านกระบวนการกัดชั้นผิวเคลือบป้องกันชิพ.....	117
6.4 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น.....	117
6.5 ภาพร่างสองมิติตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs จากโปรแกรม L-Edit student version มีความกว้างและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด Poly2 เท่ากับ 3 μm.....	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.6 ภาพถ่ายชีพของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ TO-5 (8 ขา).....	121
6.7 ภาพถ่ายเปรียบเทียบขนาดชีพของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ TO-5 เทียบกับเหรียญหนึ่งบาทไทย.....	121
6.8 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวกความชื้น.....	123
6.9 เปรียบเทียบช่วงเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 15 Å 30 Å และ 60 Å กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	123
6.10 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 15 Å 30 Å และ 60 Å กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ 1 kHz.....	126
6.11 เปรียบเทียบช่วงเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 15 Å 30 Å และ 60 Å กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	126
6.12 ภาพร่างสองมิติของหน้ากากสำหรับสร้างสวดลายฟิล์มบางอลูมิเนียม (ก) หน้ากากสวดลายเพื่อกัดชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียม (ข) หน้ากากสวดลายเพื่อเจาะรูแผ่นกราวด์อลูมิเนียม.....	128
6.13 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวกความชื้น มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู.....	128
6.14 ภาพถ่ายชีพของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ DIP 8 ขา.....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	132
6.16 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่มีความถี่ต่าง ๆ.....	133
6.17 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	133
6.18 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	134
6.19 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	135
6.20 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่มีความถี่ต่าง ๆ.....	136

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.21 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	136
6.22 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	137
6.23 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	138
6.24 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ 1 kHz.....	141
6.25 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	142
7.1 แผนภาพการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ในการสร้างเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์.....	147
7.2 ดันแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์.....	147
7.3 โครงสร้างภายในดันแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์.....	148
7.4 ความชื้นที่วัดได้จากดันแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แสดงผลบนจอ LCD.....	148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.5 กราฟการเปรียบเทียบมาตรฐานของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์กับสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเลขฐานสิบ.....	149
7.6 ความชื้นที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แสดงผลด้วย โปรแกรม Hyper Terminal ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232.....	150
7.7 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อทดสอบกับลมหายใจมนุษย์.....	155
7.8 คัดแปลงเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์เป็นเครื่องวัดอัตราการหายใจ.....	156
7.9 การเชื่อมต่อเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์กับคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องวัดอัตราการหายใจ.....	156
7.10 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อทดสอบกับลมหายใจมนุษย์ 1 รอบ.....	157
7.11 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อทดสอบกับลมหายใจมนุษย์ ขณะหายใจด้วยอัตรา 19 ครั้งต่อนาที.....	157
8.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุแบบมีโครงสร้างแขวนลอยอยู่ในอากาศ พร้อมทั้งมีตัวให้ความร้อนบนชิพเดียวกัน.....	163
8.2 (ก) และ (ข) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีอิเล็กโทรด ในแนวตั้งแบบ two-capacitor type tower array.....	164
8.3 (ก) และ (ข) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีอิเล็กโทรด ในแนวตั้งแบบ four-capacitor type tower array.....	165
8.4 (ก) และ (ข) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีอิเล็กโทรด ในแนวตั้งที่มีพอลิโิไมด์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก.....	166
8.5 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แบบ two-capacitor type ที่มีพอลิโิไมด์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 2.8 เปรียบเทียบกับ ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก (อากาศ) วางห่างกัน $5 \mu\text{m}$	167
8.6 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะแบบต่าง ๆ ในโครงสร้างแบบ two-capacitor type.....	167
8.7 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะแบบต่าง ๆ ในโครงสร้างแบบ four-capacitor type.....	168
8.8 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะแบบ four-capacitor type ความสูง $10 \mu\text{m}$ ขนาดแท่งโลหะ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และระยะห่างระหว่างแท่งโลหะ $5 \mu\text{m}$ ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่าง ๆ.....	169

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.1 การเชื่อมต่อต้นแบบเครื่องวัดความชื้นกับโปรแกรม LabVIEW™	193
ง.2 การเชื่อมต่อต้นแบบเครื่องวัดความชื้นกับอุปกรณ์ NI USB 6009 เพื่อติดต่อกับโปรแกรม LabVIEW™	193
ง.3 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW™ ในส่วนของ NI data logger.....	194
ง.4 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW™ ในส่วนของ NI data logger เมื่อวัดสัญญาณ.....	194
ง.5 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW™ ในส่วนของ NI data logger เมื่อวัดสัญญาณ ขณะความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น.....	195

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปริมาณความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศมีความสำคัญต่อการควบคุมอัตโนมัติในระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ทางด้านการเกษตร เช่น การควบคุมความชื้นในโรงเรือน การวัดความชื้นในขี้ข้าว การวัดความชื้นในดิน ทางด้านการแพทย์ เช่น การช่วยวินิจฉัยโรกระบบทางเดินหายใจ เป็นต้น ดังนั้นมีความจำเป็นต้องมีการวัดและเก็บข้อมูลของปริมาณความหนาแน่นของไอน้ำ ข้อมูลนี้สามารถจัดเก็บและนำเสนอได้ในหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะงานและเครื่องมือวัดที่ใช้ รูปแบบที่นิยมใช้กันมากคือ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ไม่ว่าค่าความชื้นจะถูกวัดและนำเสนอในรูปแบบใด ความจริงที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือ ปริมาณน้ำในอากาศสามารถสร้างความเสียหายให้กับระบบการผลิต เครื่องมือ เครื่องจักร วัสดุ และผลิตภัณฑ์ทั้งหลายได้ ดังนั้นการควบคุมค่าความชื้นจึงมีความจำเป็นและมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ตัวอย่างงานที่ต้องมีการควบคุมความชื้น ได้แก่ การป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำ กลายเป็นหยดน้ำซึ่งจัดเป็นการควบคุมค่าความชื้นในอากาศอย่างหนึ่ง หยดน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวใด ๆ อาจสร้างความเสียหายกับพื้นผิวนั้น ๆ อย่างรวดเร็วและคาดไม่ถึง เช่น กระจกหรือกล่องบรรจุภัณฑ์จะเปื่อยยุ่ยและเกิดเชื้อรา โลหะเกิดสนิมผุกร่อน เป็นต้น ตัวอย่างที่พบการเกิดความชื้นมากคือ ระบบสูบน้ำประปา การควบแน่นดังกล่าวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวภายในบริเวณที่มีอากาศชื้นล้อมรอบมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศ ไอน้ำที่อยู่ในอากาศชื้นที่สัมผัสกับพื้นผิวจะถ่ายเทความร้อนและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนพื้นผิว ทั้งนี้สาเหตุเกิดมาจากการที่จุดน้ำค้างภายในบรรยากาศบริเวณนั้น ๆ มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของพื้นผิว การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยลดความชื้นในอากาศซึ่งเป็นการลดมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศโดยตรง นอกจากนี้ยังทำให้จุดน้ำค้างของอากาศลดต่ำลงอีกด้วยเพราะเมื่ออากาศมีค่าความชื้นต่ำลงจุดน้ำค้างก็จะลดลงตาม

การป้องกันโลหะผุกร่อนซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้โลหะเกิดการผุกร่อน แม้กระทั่งอากาศที่มีความชื้นสูงก็ทำให้โลหะเกิดสนิมได้ ค่าความชื้นที่ปลอดภัยที่สุดที่ไม่ทำให้โลหะเกิดสนิมอยู่ที่ประมาณ 45-50%RH หากความชื้นมีค่าสูงถึง 60%RH การผุกร่อนก็จะเริ่มต้นขึ้นและอัตราเร็วในการผุกร่อนก็จะเพิ่มมากขึ้นอีกหากความชื้นเพิ่มมาก

ยิ่งขึ้นดังนั้นการป้องกันโลหะเกิดสนิมที่เร็วกว่าวิธีหนึ่งคือ จัดเก็บวัสดุที่เป็นโลหะภายในห้องปิดที่มีการควบคุมค่าความชื้นให้มีค่าต่ำหรือทำให้อากาศแห้ง การป้องกันสนิมสำหรับโครงสร้างสะพานเป็นตัวอย่างที่ดีอีกตัวอย่างหนึ่งเช่น สะพานแห่งหนึ่งในประเทศนอร์เวย์ ชื่อ Nordhordlandsbroen ขึ้นส่วนที่ใช้ประกอบเป็นโครงสร้างของสะพานแห่งนี้มีลักษณะเป็นกล่องเหล็กมีโพรงอยู่ภายใน ซึ่งกล่องโลหะเหล่านี้จะไม่ใช้การป้องกันสนิมด้วยวิธีการรักษาผิว (surface treatment) แต่จะใช้การควบคุมค่าความชื้นของอากาศภายในโพรงแทนเพราะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่ามาก ซึ่งวิธีนี้ยังนำไปใช้กับการป้องกันสนิมสำหรับเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่และมีพื้นที่เป็นโลหะกว้างในระหว่างไม่ใช้งาน

กระบวนการอบแห้งอาหาร ยา และเครื่องสำอางค์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุดูดเก็บความชื้นในปริมาณมากเนื่องจากผลิตภัณฑ์หลายอย่างจำเป็นต้องถูกผลิตในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำในช่วง 5-30%RH ซึ่งนอกจากจะใช้วัสดุดูดเก็บความชื้นแล้วการลดความชื้นด้วยวิธีอื่น เช่น ใช้ระบบทำอากาศแห้งก็เป็นวิธีที่เหมาะสมและประหยัดกว่า หากต้องใช้วัสดุดูดเก็บความชื้นเป็นปริมาณมากก็เป็นทางเลือกเพราะต้องมีการซื้อเปลี่ยนใหม่เรื่อย ๆ ตัวอย่างงานอื่น ๆ ที่ต้องพึ่งพากรรมวิธีควบคุมค่าความชื้นได้แก่ ระบบควบคุมความชื้นภายในเรือ ในโกดังสินค้าและการขนส่ง การบำรุงรักษาหม้อต้มไอน้ำ (boiler) เครื่องจักรไอน้ำ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์ (PCB) เทคโนโลยีวงจรรวม (IC) และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS)

- ทดสอบและวัดคุณสมบัติตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น
- พัฒนาด้านแบบของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่กล่าวมา สามารถแบ่งกรอบงานวิจัยออกได้เป็น 4 ส่วนได้แก่ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์ เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค การทดสอบและวัดคุณสมบัติตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นตลอดจนการพัฒนาด้านแบบของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างได้ ซึ่งในแต่ละกรอบงานวิจัยจะมีกิจกรรมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

กรอบงานวิจัยที่ 1 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์

1. ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์
2. ทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น และเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น

กรอบงานวิจัยที่ 2 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม

1. ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม
2. ทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น และเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น

กรอบงานวิจัยที่ 3 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

1. ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค
2. ทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น และเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น

กรอบงานวิจัยที่ 4 พัฒนาด้านแบบของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- มีความเชี่ยวชาญการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมินิ เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค
- มุ่งหมายที่จะทำให้ต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นใช้งานได้จริง
- สร้างองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเพื่อเป็นฐานในการถ่ายทอดความรู้เพื่อต่อยอดเป็นการผลิตตัวตรวจรู้ปริมาณต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการผลิตตัวตรวจรู้สภาพแวดล้อม การแพทย์ และการเกษตร เป็นต้น เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.4 การจัดรูปเล่มของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ ความชื้นสัมพัทธ์ การแพร่ความชื้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้น และการเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมินิ ทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น

และเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้กับสารละลายเกลืออิ่มตัว

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม ทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น และเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้กับสารละลายเกลืออิ่มตัว

บทที่ 6 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น และเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้กับสารละลายเกลืออิ่มตัว

บทที่ 7 กล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และตัดแปลงเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์เป็นเครื่องวัดอัตราการหายใจ

บทที่ 8 บทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว

ภาคผนวก ข. ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพิมพ์ เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์

ภาคผนวก ง. การเชื่อมต่อตัวตรวจรู้ความชื้นเข้ากับโปรแกรม LabVIEW™

ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดต่าง ๆ โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE (IEL online) IOP (Journal of Micromechanics and Microengineering) และ ScienceDirect เป็นต้น ผลจากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

2.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ในปัจจุบันการหาค่าความชื้นในอากาศมีความสำคัญต่อการปฏิบัติงานและการควบคุมอัตโนมัติในระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ การผลิตสิ่งทอ เครื่องใช้ไฟฟ้าอัจฉริยะ การควบคุมให้ความชื้นภายในอาคารที่พักอาศัยมีความเหมาะสมและเป็นผลดีต่อสุขภาพ เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นใช้งานในการประยุกต์ด้านต่าง ๆ (Traversa, 1995; Fenner, et al., 2001) ค่าความชื้นของอากาศนิยมนวัดเป็นปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของมวลไอน้ำในอากาศเทียบกับค่ามวลไอน้ำสูงสุดที่จุดอิ่มตัว ณ อุณหภูมิค่าเดียวกันหรือวัดเป็นความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของมวลไอน้ำเทียบกับมวลของอากาศแห้งที่รวมตัวกันอยู่ภายในปริมาตรเดียวกัน

จากการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความชื้นที่เป็นไปอย่างกว้างขวางขึ้น ประกอบกับราคาที่ต่ำลงของตัวประมวลผลและวงจรรีเลย์ทรอนิกส์อื่น ๆ ตลอดจนกระแสการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ทำให้ผู้ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าสมัยใหม่ หันมาคำนึงถึงประสิทธิภาพและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ของตน โดยการออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้าให้มีการทำงานด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น แนวโน้มดังกล่าวทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่ให้ค่าความชื้นออกมาในรูปของสัญญาณไฟฟ้าเป็นที่ต้องการมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็กมากซึ่งสร้างด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical

System) ซึ่งเป็นชื่อเรียกในแถบอเมริกาเหนือ โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548) แต่ในส่วนอื่น ๆ ของโลกก็มีการเรียกชื่อแตกต่างกันออกไป เช่นในยุโรปจะเรียกว่าเทคโนโลยีระบบจุลภาค (Microsystem Technology: MST) หรือในญี่ปุ่นจะเรียกว่า กลไกจุลภาค (micromachines) แต่ทั้งหมดความหมายถึงสิ่งเดียวกันคือ เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กและสร้างด้วยเทคนิคของการสร้างขนาดจุลภาค (microfabrication) เพราะเทคโนโลยีการผลิตมีลักษณะคล้ายคลึงกับการผลิตวงจรรวม ทำให้ผลิตได้ในปริมาณมาก และราคาถูก

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเครื่องมือเครื่องใช้และวัสดุในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ประเภทการใช้งาน	การประยุกต์ใช้งาน	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)
เครื่องใช้ไฟฟ้า ภายในบ้าน	เครื่องปรับอากาศ	5-40	40-70
	เครื่องอบแห้งเสื้อผ้า	80	0-40
	ควบคุมการหุงต้มในเตาอบไมโครเวฟ	5-100	0-100
ยานยนต์	ระบบสลายหมอกที่กระจกหลัง	-20-80	50-100
	สายการผลิตเครื่องยนต์	17-25	40-55
การแพทย์	เครื่องช่วยหายใจ	20-30	80-100
	ระบบฆ่าเชื้อ	> 100	0-100
	ตู้บ่มเพาะเชื้อ	10-30	50-80
	การทำความสะอาดเครื่องมือผ่าตัดที่เป็น ยาง	23-25	25-30
	การเก็บรักษายาและเวชภัณฑ์	20-25	20-40
	ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ	0-6	60-65
อุตสาหกรรม	การควบคุมความชื้นในโรงงาน	5-40	0-50
	เครื่องอบแห้ง	50-100	0-50
	เตาอบ	100-500	0-100
	การอบแห้งฟิล์ม	20-60	0-30
	เครื่องทำความชื้นในโรงงาน	30-300	50-100
	อุตสาหกรรม		
	การผลิตกระดาษ	10-30	50-100
	การผลิตสิ่งทอ	10-30	50-100

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเครื่องมือเครื่องใช้และวัสดุในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทการใช้งาน	การประยุกต์ใช้งาน	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)
อุตสาหกรรม	การผลิตผงเซรามิก	5-100	0-50
	การอบแห้งอิฐทนไฟ	45-55	50-60
	การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์	5-40	0-50
การเกษตรกรรม	การปรับสภาพอากาศในเรือนเพาะชำ	5-40	0-100
	การบำรุงรักษาพืชไร่	-10-60	50-100
	การเก็บรักษามล็ดธัญพืช	15-20	0-45
	ฟาร์มสัตว์ปีก	20-25	40-70
อาหารและโภชนาการ	การผลิตอาหารแห้ง	50-100	0-50
	การเก็บรักษาผลไม้สด	-1-1	75-85
	การเก็บรักษาเนื้อสัตว์แช่แข็ง	-17-15	85
	การเก็บรักษาน้ำตาล	25	45
	การผลิตเค้ก	20-25	30-50
	การเคลือบช็อกโกแลต	16-17	50-55

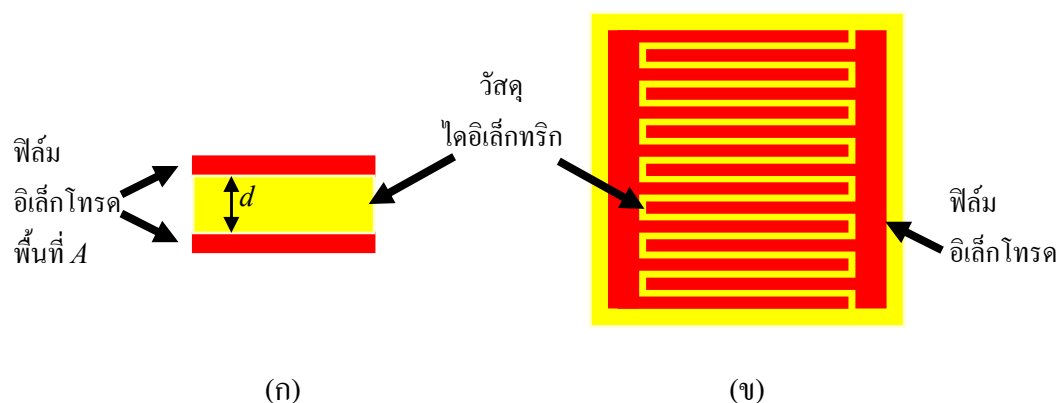
ในโลกของไมโครและนาโนเทคโนโลยีนั้น ดร.ฟายน์แมน ได้รับการยกย่องว่าเป็น “บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี” (ธีระชัย พรสินศิริรักษ์, 2549) เพราะท่านเป็นผู้ที่ทำนายถึงความเป็นไปได้ของความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ในระดับไมโครเมตร และนาโนเมตร ซึ่งเป็นการจุดประกายให้มีการทำงานวิจัยและศึกษาในระดับนี้มากขึ้น จากคำบรรยายในหัวข้อเรื่อง “ข้างล่างยังมีที่ว่างอีกเยอะ” (There is Plenty of Room at the Bottom) เมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2502 (ค.ศ. 1959) ในงานประชุมประจำปีของสมาคมฟิสิกส์แห่งอเมริกา ณ สถาบันแคลเทค ที่ต่อมากลายเป็นปาฐกถาประวัติศาสตร์หน้าหนึ่งของศตวรรษที่ 21 ด้านไมโครและนาโนเทคโนโลยี ท่านได้กล่าวถึงสาขาการศึกษา ที่แม้จะยังไม่ได้มีการศึกษามากมายในขณะนั้น แต่โดยทางทฤษฎีแล้วมีความเป็นไปได้สูงที่จะทำได้ สารสำคัญอีกตอนหนึ่งในปาฐกถานี้คือ การกระตุ้นให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกหันมาให้ความสนใจสิ่งที่มีขนาดเล็กมากเพื่อผลิตสิ่งต่าง ๆ โดยการจัดเรียงอะตอม แทนที่จะมุ่งศึกษาแต่สิ่งที่มีขนาดใหญ่โตยิ่งขึ้นแต่เพียงอย่างเดียว ท่านได้ยกตัวอย่างความเป็นไปได้หลายประการในการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ไม่ว่าจะเป็นการเขียนอักษรที่เล็กมากสามารถบรรจุหนังสือเอ็นไซโครปีเดีย

ทั้ง 24 เล่มลงบนหัวเข็มหมุด การสร้างคอมพิวเตอร์ให้เล็กลง การสร้างกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถมองเห็นได้ในระดับอะตอม เป็นต้น ดร.ฟายน์แมน กล่าวว่า “กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ เท่าที่ข้าพเจ้ามองเห็น ไม่ได้กล่าวถึงความเป็นไปได้ในการจัดการกับสิ่งของในระดับอะตอม มันไม่ได้เป็นความพยายามที่จะละเมิดกฎเกณฑ์ใด ๆ มันเป็นสิ่งหนึ่งในทางกฎเกณฑ์แล้วสามารถที่ทำได้ แต่ในทางปฏิบัติยังไม่ได้ทำเพราะว่าเรายังใหญ่เกินไป” สิ่งนี้ ดร.ฟายน์แมนกล่าวไว้ที่นั่นนำไปสู่แนวความคิดในการพัฒนาและคิดค้นอุปกรณ์ขนาดเล็กมากทั้งในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรในเวลาต่อมา

ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สามารถใช้งานด้านต่าง ๆ ได้ในวงกว้าง จะต้องมีความไวสูงในช่วงพิสัยอุณหภูมิและความชื้นกว้าง ให้ค่าความชื้นที่แน่นอน มีอิทธิพลน้อย ทนทาน มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็ว ทนทานต่อสิ่งปนเปื้อน มีอายุการใช้งานยาวนาน เชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก (Yamazoe, 1986; Rittersma, 2002; Suzuki, 2004) ตัวตรวจรู้ความความชื้นชนิดเก็บประจุได้รับความนิยม ในการใช้งานอย่างแพร่หลาย คิดเป็นจำนวนมากกว่า 75% ของตัวตรวจรู้ความชื้นในท้องตลาด (Rittersma, 2002) เนื่องจากผลตอบสนองต่อความชื้นที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ในขณะที่ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดตัวต้านทาน และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าจะให้ผลตอบสนองแบบลอการิทึม และแบบเอกซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ ทำให้ต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยปรับแก้ให้ผลตอบสนองเป็นเชิงเส้นในภายหลัง ด้วยเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ และเพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่จะสร้างขึ้นมีขนาดเล็กและมีความไวสูง สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก มีราคาถูก จะได้นำเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์มาใช้ในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ หลักการทำงานของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) หรือค่าสภาพยอม (permittivity) ของวัสดุไดอิเล็กทริก (ϵ) ตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น บริเวณพื้นที่ลวดลายอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง (A) และระยะห่างระหว่างลวดลายอิเล็กโทรด (d) ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้า (C) เปลี่ยนแปลงไป จากค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบในวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ (astable multivibrator) จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นความถี่ หรือความต่างศักย์ไฟฟ้า จากรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ แทนค่าความจุไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2-1) จะได้

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A(n-1)}{d} \quad (2-1)$$

- โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
 ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)
 d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตัวนำ (m)
 A คือ พื้นที่ผิวของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เส้นสนามไฟฟ้าลากผ่าน (m²)
 n คือ จำนวนซ็อกอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.1 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความขึ้นชนิดเก็บประจุ

(ก) แผนภาพตัดขวาง (ข) แผนภาพมองจากด้านบน

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยตัวตรวจรู้ความขึ้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นมาในอดีตจนถึงปัจจุบันมีโครงสร้างแบบแบนราบกับฐานรอง (substrate) ซึ่งใช้พื้นที่บนฐานรองมากและการแพร่ซึมของความชื้นเข้าสู่ตัวเก็บประจุเป็นไปได้ยาก ทำให้ความไว (sensitivity) ของตัวตรวจรู้ลดลง การสร้างตัวตรวจรู้ความขึ้นชนิดเก็บประจุแบบดั้งเดิม นิยมสร้างด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบาง (thin film) ในลักษณะโครงสร้างสองชั้นคือ ชั้นอิเล็กโทรดโลหะซึ่งเป็นฟิล์มบางมีหลายเป็นสองขั้วสานสลับหว่างกันคล้ายซี่ของหวี (interdigitated electrodes) ตั้งอยู่บนฐานรองที่เป็นฉนวน ชั้นถัดมาเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric materials) ซึ่งมีค่าสภาพยอมแปรผันตามความชื้นในอากาศได้แก่ วัสดุพอลิเมอร์ เช่น พอลิอิมิด์ (polyimide) (Boltshauser, et al., 1993; Qiu, et al., 2001; Laville, et al., 2001) ไดวินิลไซโลเซนเบนโซไซโครบิวเทน (divinyl siloxane benzocyclobutene: DVS-BCB) (Tetelin, et al., 2003) เซลลูโลสอะซีเตทบิวทีเรต (cellulose acetate butyrate: CAB) (Sakai, et al., 1996) พอลิเมธิลเมทาครีเลท (polymethyl methacrylate: PMMA) (Sakai, et al., 1996) พอลิอิมิด์จากการสปัตเตอร์ริง (Chomnawang, et al., 2005) วัสดุซิลิคอน เช่น ซิลิคอนพรุน (porous silicon)

(Fürjes, et al., 2003) ซิลิคอนนาโนเฟส (nanophase Si) (Kalkan, et al., 2004) และวัสดุเซรามิกเช่นฟิล์มบางนาโนอลูมิเนียมออกไซด์ (Steele, et al., 2006) แบเรียมทินออกไซด์ (BaTiO₃) (Yuk, et al., 2003) เป็นต้น ดังแสดงไว้ตามตารางที่ 2.2 ซึ่งรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทฟิล์มบางพร้อมทั้งรายละเอียดวัสดุไวความชื้นที่ใช้ ความหนาของฟิล์มบาง และระยะเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการทำวิจัยต่อไป

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทฟิล์มบาง

อ้างอิง	ปี	หลักการ	วัสดุ	ความหนาฟิล์ม (μm)	เวลาการตอบสนอง (s)
Shimizu, et al.	1988	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	<1	15
Denton, et al.	1990	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	5.5	600
Sadaoka, et al.	1992	แสง	พอลิเมออร์	5	60
Boltzhauser, et al.	1993	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	10	30
Kuroiwa, et al.	1993	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	2-5	30
Miyazaki, et al.	1994	ความต้านทาน	MnO ₂	300	900
Story, et al.	1995	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	2	NA
Roman, et al.	1995	ความจุไฟฟ้า	PMMA	5-10	60-120
Shibata, et al.	1996	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	1.3	15
Schroth, et al.	1996	ความถี่	พอลิอิมิด	8	NA
Boisen, at al.	2000	แรงดันไฟฟ้า	พอลิเมออร์	10	NA
Kang, at al.	2000	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	2	1
Qu, et al.	2000	ความต้านทานไฟฟ้า	WO ₃	0.2-0.5	NA
Dokmeci, et al.	2001	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	0.03-0.12	NA
Qiu, et al.	2001	แรงดันไฟฟ้า	พอลิอิมิด	3.8-4.2	<20
Laville, et al.	2001	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	0.65-2.5	<1
Chatzandroulis, et al.	2002	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	3.7	NA
Harry, et al.	2002	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด	7.6-25	108-630
Harpster, et al.	2002	ความถี่	พอลิอิมิด	0.41-0.56	NA

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทฟิล์มบาง (ต่อ)

อ้างอิง	ปี	หลักการ	วัสดุ	ความหนาฟิล์ม (μm)	เวลาการตอบสนอง (s)
Laville, et al.	2002	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์,BCB	0.65-2.5	0.4-0.75
Fürjes, et al.	2003	ความจุไฟฟ้า	ซิลิคอนพอรุน	20	5-10
Laconte, et al.	2003	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	2-6	NA
Lee, et al.	2003	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์	7.2	1.1
Yuk, et al.	2003	ความจุไฟฟ้า	BaTiO ₃	0.75	30
Tételin, et al.	2003	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์,BCB	1.6-2	0.4-0.65
Kalkan, et al.	2004	กระแสไฟฟ้า	ซิลิคอนนาโนเฟส	0.04-0.2	<0.2
Steele, et al.	2006	ความจุไฟฟ้า	Al ₂ O ₃	1.5-2	NA

2.3 ปรัชญาหรือหลักการของตัวตรวจรู้ความชื้น

ในวิทยานิพนธ์ได้ทำการวิจัยและพัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานวัดความชื้นในสภาพแวดล้อม การเกษตร อุตสาหกรรม และการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของการวิจัยและพัฒนา รวมไปถึงการดัดแปลงโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น แนะนำและดัดแปลงวัสดุตรวจรู้ความชื้น และกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีนักวิจัยทำการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยหลักการทำงานของตัวตรวจรู้ความชื้นมี 2 ประเภท คือ ประเภทตัวเก็บประจุ และประเภทตัวต้านทาน ทั้งสองประเภทขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุไวความชื้น โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแบบขั้วอิเล็กโทรดที่หิวสานสลับหว่างกัน และแบบแผ่นโลหะขนานกัน (parallel-plate electrodes) ชนิดขั้วอิเล็กโทรดที่หิวสานสลับหว่างกันจะเคลือบวัสดุไวความชื้นลงบนขั้วอิเล็กโทรด ส่วนชนิดแบบแผ่นโลหะขนานกันจะเคลือบวัสดุไวความชื้นระหว่างแผ่นโลหะขนาน วัสดุไวความชื้นที่นิยมใช้คือ เซรามิก (ceramic) และ พอลิเมอร์ (polymer) ซึ่งหลักการตรวจรู้ความชื้นโดยใช้กลไกอื่น ๆ มีผู้เสนอไว้ เช่น วิธีคลื่นเสียงพื้นผิว (surface acoustic wave: SAW) (Story, et al., 1995; Caliendo, et al., 1994; Penza, et al., 1999; Vetelino, et al., 1996) ประเภทเพียโซรีซิสทีฟ (piesoresistive) (Garlach, et al., 1994; Rittersma, et al., 2002) ทรานซิสเตอร์

สนามไฟฟ้า (field effect transistor: FET) (Lee, et al., 1996) และวิธีตัวนำแสง (Ren, et al., 2001) แนวโน้มของการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นอีกประเภทหนึ่งคือ การประกอบส่วนวงจรแปลงสัญญาณเข้ากับตัวตรวจรู้ความชื้นบนชิพเดียวกัน (Boltshauser, et al., 1993; Qiu, et al., 2001) เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมถึงนิยามที่ใช้วัดค่าความชื้น กลไกการตรวจรู้ของวัสดุไวความชื้น เช่น เซรามิก และพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น เทคนิคของ SAW เพียโซริซีสทีฟ และ FET ตัวตรวจรู้ความชื้นบางประเภทจะมีวงจรรวมสำหรับประมวลสัญญาณอยู่บนชิพตัวเดียวกันกับตัวตรวจรู้อีกด้วย

ตัวตรวจรู้ความชื้น โดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น (ceramic-based humidity sensors) ตัวตรวจรู้ประเภทนี้จำแนกตามประเภทกลไกการตรวจรู้ได้แก่ ไอออนิก อิเล็กทรอนิกส์ ความจุไฟฟ้า และของแข็ง-อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะเซรามิกโลหะออกไซด์นั้นมีข้อดีคือ ความแข็งแรงทางกล ทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี มีเสถียรภาพทางกายภาพ และอุณหภูมิ (Traversa, 1995) ข้อเสียของตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทเซรามิกคือ ต้องการความร้อนเพื่อให้ตัวตรวจรู้คืนสภาพ เพราะรูปแบบของเสถียรภาพการดูดซึมทางเคมีของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) OH^- ซึ่งเป็นกลุ่มอะตอมบนพื้นผิวเซรามิกที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจนอย่างละหนึ่งอะตอม เขียนแทนด้วย OH^- เป็นสาเหตุให้เกิดการเลื่อน (drift) ส่วนผลต่อความต้านทานของตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทเซรามิกนั้นสามารถแก้ปัญหานี้ด้วยการกำจัดไฮดรอกซิลไอออนออกด้วยการให้ความร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส และช่วงเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ที่ได้ไม่คืบคั้น เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกบนพื้นผิวเซรามิก เช่น คราบ ฝุ่น น้ำมัน กวีน แอลกอฮอล์ สารเคมี และอื่น ๆ ซึ่งสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดได้โดยการให้ความร้อน ส่วนต่อไปจะเป็นหัวข้อย่อยเกี่ยวกับกลไกการตรวจรู้แบบไอออนิก แบบอิเล็กทรอนิกส์ แบบความจุไฟฟ้า และแบบของแข็ง-อิเล็กทรอนิกส์ ของตัวตรวจรู้ความชื้น ซึ่งกลไกการตรวจรู้ของวัสดุประเภทเซรามิก (sensing mechanism of ceramic types) สามารถอธิบายและแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

ตัวตรวจรู้ประเภทไอออนิก (ionic types) ตัวตรวจรู้ประเภทนี้ใช้การเปลี่ยนแปลงความนำของไอออนจากการดูดซึมความชื้น และการคายความชื้น คุณลักษณะเฉพาะของการตรวจรู้ความชื้นขึ้นอยู่กับความนำจำเพาะของวัสดุที่ใช้ ซึ่งโครงสร้างขนาดเล็กประเภทไอออนิกออกไซด์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการดูดซึมทางเคมี และการดูดซึมทางกายภาพของโมเลกุลน้ำที่อยู่บนพื้นผิวออกไซด์ เช่น การควบแน่นในรูขนาดเล็กของรูพรุนในเซรามิก การดูดซึมทางเคมีเป็นสาเหตุให้เกิดการแยกโมเลกุลของน้ำจากพื้นผิวที่มีหมู่ OH^- หมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนชั้นพื้นผิวออกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดขรุขระที่มีความหนาแน่นประจุไฟฟ้าสูง และมีสนามไฟฟ้าเข้มข้น นอกจากนั้นปฏิกิริยาของโปรตอนที่อยู่ต่อระหว่างพื้นผิวหมู่ O_2^- จากหมู่ที่สองของ OH^- (Traversa, 1995) บริเวณพื้นผิวชั้นบนสุดที่มีหมู่ไฮดรอกซิล โมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซึมทำให้เกิดพันธะกับสองหมู่ไฮดรอกซิลที่ชั้นต่ำสุดมีรูปแบบพันธะเพียงพันธะเดียวเท่านั้น โมเลกุลพันธะเดี่ยวของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงได้

ดีกว่าแบบพันธะคู่ เป็นผลให้ความนำไฟฟ้าของโปรโตติกเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำทางกายภาพนั้นสามารถแยกตัวออกได้ง่ายโดยอยู่ในรูปของ H_3O^+ เพราะมีสนามไฟฟ้าสถิตความเข้มสูงในการดูดซึมน้ำทางเคมี ชั้นแรกของการดูดซึมน้ำทางกายภาพนั้น โมเลกุลน้ำมีลักษณะเป็นพันธะคู่ไฮโดรเจนของน้ำโมเลกุลเดี่ยว โมเลกุลน้ำในชั้นดูดซึมน้ำทางกายภาพเป็นพันธะเดี่ยวเท่านั้นซึ่งอยู่ในรูปโครงข่ายของเหลว กลไกความนำขึ้นอยู่กับการดูดซึมน้ำที่ครอบคลุมทั่วบริเวณพื้นผิว ไฮดรอกซิลไอออนเท่านั้นที่อยู่บนพื้นผิวออกไซด์ ประจุพาหะคือโปรตอนที่เป็นสาเหตุให้ไฮดรอกซิลแยกตัวออกจากโปรตอนที่อยู่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ถ้าน้ำครอบคลุมไม่ทั่วทั้งพื้นผิวส่งผลต่อการแพร่ H_3O^+ ในหมู่ไฮดรอกซิล

อย่างไรก็ดี การเก็บโปรตอนระหว่างโมเลกุลน้ำในหมู่ยังคงเกิดขึ้น การแยกตัวที่ง่ายที่สุดของการดูดซึมน้ำทางกายภาพทำได้โดยการสร้างหมู่ H_3O^+ ที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าแรงสูงในชั้นดูดซึมน้ำทางเคมี ประจุเหล่านี้จะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อ H_3O^+ ปลดปล่อยโปรตอนไปใกล้กับโมเลกุลของน้ำเกิดการไอออไนซ์ซึ่งทำให้เกิดเป็นรูปแบบ H_3O^+ อื่น ๆ ผลที่ได้คือมีโปรตอนเก็บไว้จากน้ำหนึ่งโมเลกุลหรือมากกว่านั้น กระบวนการนี้เรียกว่า ปฏิกริยาลูกโซ่ของ Grotthuss ตัณฐานวิทยาของเซรามิกที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำ การคายน้ำ และการควบแน่นของไอน้ำที่เกิดขึ้นเป็นผลจากปรากฏการณ์ในรูขนาดเล็ก (capillary effect) พฤติกรรมของการควบแน่นมีความสัมพันธ์กับขนาดของรูพรุนและการกระจายตัวของเซรามิก สมการเคลวิน (Kelvin's equation) สามารถใช้อธิบายรัศมีรูพรุนเมื่อเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะดังสมการที่ (2-2)

$$r_k = \frac{2\gamma M}{\rho RT \ln(P_s / P)} \quad (2-2)$$

โดยที่ r_k คือ รัศมีเคลวิน (Kelvin radius)

P คือ ความดันไอน้ำ (mbar)

P_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

γ, ρ, M คือ ความตึงผิว ความหนาแน่น และน้ำหนักโมเลกุลของน้ำ ตามลำดับ

การควบแน่นที่เกิดขึ้นในรูพรุนทั้งหมดมีรัศมีเพิ่มขึ้นจนถึง r_k และอยู่ภายใต้ความดันคงที่ P รัศมี r_k เล็กกว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการควบแน่นได้ง่ายที่สุด ขนาดของรูพรุนทำให้ช่วงเวลากการตอบสนองเร็ว เช่น ขนาดรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1000 อังสตรอม แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลากการตอบสนองเร็วมาก แต่ที่ขนาดรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100 อังสตรอม นั้นมีช่วงเวลากการตอบสนองช้ามากที่สุด

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทไอออนิก Qu (1997) ได้พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เซรามิกพอรุนของ $MgCr_2O_4-TiO_2$ เป็นชั้นไวความชื้น วัสดุเซรามิกมีปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำทั้งการดูดซึมทางกายภาพและการดูดซึมทางเคมี ขนาดรูพอรุนและความขรุขระโดยเฉลี่ยของ $MgCr_2O_4-TiO_2$ อยู่ที่ 30-40% คือ 3000 อังสตรอม และ 1-2 ไมโครเมตร ตามลำดับ โครงสร้างของตัวตรวจรู้ประกอบด้วยฐานรองเซรามิกพอรุนกับชั้นไอเล็กโทรูดรูอีเนียมออกไซด์พอรุน (RuO_2) ตัวให้ความร้อนซึ่งล้อมรอบตัวตรวจรู้ความชื้นจะช่วยคืนสภาพตัวตรวจรู้ความชื้น โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ทุก ๆ ครั้งที่ใช้งานตัวตรวจรู้ การให้ความร้อนมีความจำเป็นเพื่อที่จะกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเลื่อนค่าความต้านทานของเซรามิก (Traversa, 1995) ตัวให้ความร้อนจะช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อนเช่น ไขมัน และไอสารอินทรีย์ ตัวตรวจรู้มีความไวในย่านความชื้นต่ำ ความต้านทานลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ ความเร็วของการตอบสนองเมื่อดูดซึมความชื้นคือ 20 วินาที แต่สำหรับการคายความชื้นนั้นมากกว่า 100 วินาที ทำการทดสอบกับแก๊สออกซิเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สแอมโมเนีย และโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบเช่น ไฮดรอกซิล คาร์บอนิว คาร์บอกซิวิ อะมิโน และกำมะถัน ที่ความเข้มข้น 104 ppm สภาพความนำลดลงกับแก๊สเกือบทุกชนิดยกเว้น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอน สภาพความนำกับแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นซึ่งเหมือนกันกับไอน้ำ

Qu (1997) ได้ทำการศึกษาเซรามิกพอรุนของ $MnWO_4$ เป็นวัสดุไวความชื้น โครงสร้างตัวตรวจรู้เป็นขั้วไฟฟ้าตรงกันข้ามแบบขั้วไอเล็กโทรูดพลตินัมสลับหว่างกันในลักษณะซีวีเทคนิคในการสร้างฟิล์มบาง $MnWO_4$ บนฐานรองอลูมิเนียมซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการสร้างได้ และนำ LiCl มาช่วยสร้างการยึดติดกับฐานรองอลูมิเนียมระหว่างการเผา $MnWO_4$ ทำการเผา LiCl ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเผา $MnWO_4$ บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ตัวตรวจรู้ที่มี Li^+ มากกว่าทำให้ความหนาแน่นเซรามิกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานสูงกว่าตัวตรวจรู้ที่มี Li^+ น้อยกว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความต้านทานของตัวตรวจรู้จะลดลง อุณหภูมิที่ทดสอบตัวตรวจรู้อยู่ที่ 15 และ 35 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาการตอบสนองในการดูดซึมคือ 10 วินาที ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 15-98% สิ่งปนเปื้อนสามารถกำจัดได้โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีการเลื่อนของความต้านทานน้อยมาก

ตัวตรวจรู้ประเภทไอเล็กทรอนิกส์ (electronic types) ตัวตรวจรู้ประเภทนี้ใช้หลักการให้อิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำแก่สารกึ่งตัวนำออกไซด์ (Yamazoe, et al., 1986) ซึ่งมีการศึกษมานานแล้วพบว่าเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส (Traversa, 1995) การดูดซึมทางเคมีของโมเลกุลน้ำทำให้ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำออกไซด์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสารกึ่งตัวนำออกไซด์ดูดซึมโมเลกุลน้ำส่งผลให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลง แต่จะเพิ่มขึ้น

หรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับประเภทสารกึ่งตัวนำออกไซด์ (ชนิด n หรือ ชนิด p) ซึ่งบ่งบอกการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโมเลกุลน้ำไปยังพื้นผิวสารกึ่งตัวนำออกไซด์ที่ดูดซึมออกซิเจนไอออนในอากาศและไอออนเหล่านี้ส่งผลต่อความต้านทานที่พื้นผิวออกไซด์ ผลที่ได้คือสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด n ความต้านทานจะลดลง

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทอิเล็กทรอนิกส์ Nitta (1983) ได้ทำการศึกษาเซรามิก ZrO_2-MgO (สารกึ่งตัวนำชนิด n) ตัวตรวจรู้ประเภทนี้อุณหภูมิทำงานอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส แต่ความไวต่อไอน้ำสูงสุดอยู่ระหว่าง 450 ถึง 550 องศาเซลเซียส ตัวตรวจรู้ไวต่อแอลกอฮอล์และการลดลงของแก๊ส เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สแอมโมเนีย และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ความไวเนื่องจากแก๊สลดลงเกิดจากความชื้นในอากาศลดลงที่อุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส ส่วนแอลกอฮอล์มีผลต่อความไวต่อตัวตรวจรู้ทุกอุณหภูมิ แต่ไม่มีผลต่อการตรวจรู้ไอน้ำถ้าบรรยากาศในห้องมีจำนวนไอน้ำมากกว่าแอลกอฮอล์ ช่วงเวลาการตอบสนองในการคายความชื้นมากกว่าการดูดซึมความชื้น 5 เท่า ตัวตรวจรู้ประเภทอิเล็กทรอนิกส์มีการตอบสนองทางเวลาช้า สาเหตุเพราะอัตราการดูดซึมทางเคมีและกระบวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวออกไซด์ช้านั่นเอง

ตัวตรวจรู้ประเภทเก็บประจุ (capacitive types) ตัวตรวจรู้ประเภทนี้มีโครงสร้างแบบแผ่นโลหะขนานกัน ด้านบนเป็นชั้นอิเล็กโทรดถัดมาเป็นเซรามิกพูนซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนซึ่งมีรอยสัมผัสไอหุ้มที่อิเล็กโทรด ถัดมาเป็นเซรามิกพูนและชั้นอิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้สำหรับตัวตรวจรู้ประเภทนี้คืออลูมิเนียมออกไซด์พูน (Al_2O_3) (Nahar, et al., 1998) และประเภทเพอโรฟสไกต์ (perovskite) เช่น สตรอนเทียม-แลนทานัม-ไททานเตด ($Sr_{1-x}La_xTiO_3$) (Li, et al., 1997) สตรอนเทียม-ไททานเตด-ไนโอเบต ($SrNb_xTi_{1-x}O_3$) (Li, et al., 1999) และแบเรียมไททานเตด ($BaTiO_3$) วัสดุเหล่านี้สามารถวัดความต้านทานต่อความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป แต่ตัวตรวจรู้ประเภทนี้ใช้วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งโครงสร้างที่ใช้เป็นแบบอิเล็กโทรดแผ่นขนาน

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทเก็บประจุ Nahar (1998) และ Li (1997) นำเสนอวัสดุเซรามิกที่ใช้กับตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แบเรียมไททานเตด ($BaTiO_3$) สตรอนเทียม-แลนทานัม-ไททานเตด ($Sr_{1-x}La_xTiO_3$) และสตรอนเทียม-ไททานเตด-ไนโอเบต ($SrNb_xTi_{1-x}O_3$) โครงสร้างโดยทั่วไปมีลักษณะเป็น โลหะ-ฉนวน-โลหะ หรือ โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Insulator-Semiconductor: MIS) ดังรูปที่ 2.2 อลูมิเนียมออกไซด์เป็นชั้นไดอิเล็กทริก และมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ระหว่างชั้นเซรามิกกับฐานรองซิลิคอน การไวความชื้นของอลูมิเนียมออกไซด์เกิดจากการที่ไอออนไวนิวทริยกับแผ่นโลหะ (reactive ion plating) การตอบสนองของตัวตรวจรู้ขึ้นอยู่กับการเคลือบ ความดัน และอัตราส่วนของแก๊ส $Ar-O_2$ ในการใช้ไอออนที่ไวนิวทริยกับแผ่นโลหะ ผลการทดลองพบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้อลูมิเนียมออกไซด์

เป็นชั้นไวความชื้นครั้งแรกของการทดสอบมีฮิสเทอรีซิสมาก โดยในรอบการทดสอบทำการเพิ่มและลดความชื้นระหว่าง 0%RH จนถึง 100%RH ฮิสเทอรีซิสลดลงในการทดสอบครั้งที่ 7 บ่งบอกถึงระยะเวลาในการใช้งานตัวตรวจรู้ส่งผลต่อฮิสเทอรีซิส ผลที่ได้คือตัวตรวจรู้สามารถใช้งานได้ยาวนานและการสัมผัสไอน้ำเดือดก่อน 10 นาที จะช่วยปรับปรุงฮิสเทอรีซิสแต่จะทำให้ความไวลดลง



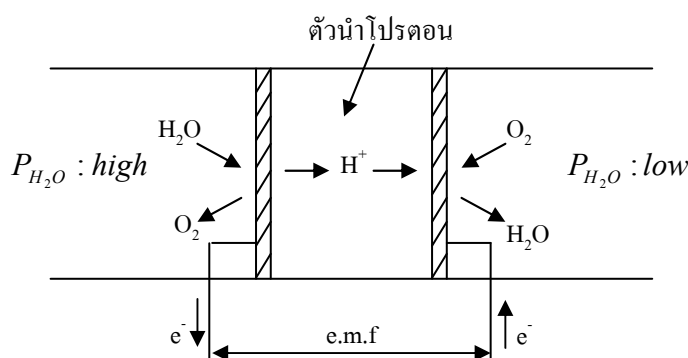
รูปที่ 2.2 โครงสร้าง MIS ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น

Nahar (1998) นำเสนอฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์โดยใช้เทคนิคการออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดในสารละลายกรดซัลฟูริก 10% หลังจากเคลือบอลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดแล้ว พบว่าความหนาแน่นของกระแสที่ขั้วแอโนดมีผลต่อการตอบสนองของตัวตรวจรู้ ตัวตรวจรู้ให้ความหนาแน่นของกระแสต่ำอยู่ที่ 10 mA/cm^2 ซึ่งส่งผลให้ความไวต่ำในช่วงความชื้นต่ำและความชันของการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสูง อย่างไรก็ตามตัวตรวจรู้ให้ความหนาแน่นของกระแสสูงถึง 20 mA/cm^2 ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงความไวในช่วงความชื้นต่ำและกำจัดความชันที่เพิ่มขึ้นในช่วงการเพิ่มขึ้นของความชื้น นั่นคือมีการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นมากกว่าเดิม ถ้าความหนาแน่นกระแสที่ขั้วแอโนดเพิ่มขึ้นพื้นผิวความพรุนของฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์จะลดลง นั่นคือแอนไอออนที่อยู่ในฟิล์มเพิ่มขึ้น Li (1997) ได้ทำการทดสอบการตอบสนองต่อความชื้นกับ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ โครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบซีทวิสตันสลับบ้างอยู่ด้านบนชั้นถัดมาเป็นชั้นของวัสดุ $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ ต่อมาเป็นชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ และมีชั้นฐานรองเป็นซิลิคอน ทำการสเปคเตอร์ฟิล์ม $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ ด้วยลำแสงไอออนของก๊าซอาร์กอนจะได้สารกึ่งตัวนำเซรามิกชนิด n ฟิล์มนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและแสงแต่ส่งผลต่อการวัดความชื้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ความไวสัมพันธ์กับแรงดันอินพุตกระแสสลับที่ความถี่ 0.5 kHz นั่นคือแรงดันอินพุตมากจะให้ความไวสูง การตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น และมีฮิสเทอรีซิส

ตัวตรวจรู้ประเภทของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์ (solid-electrolyte) ตัวตรวจรู้ประเภทนี้มีการศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิสูง ตัวตรวจรู้ประเภทนี้โดยหลักการแล้วอาศัยสภาพความนำของโปรตอนในวัสดุ (Traversa, 1995) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(electro motive force: emf) ที่เกิดจากตัวนำโปรตอน ผลที่ได้คือมีการเปลี่ยนแปลงตามความดันไอน้ำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ปรากฏระหว่างอิเล็กโทรดเป็นเหตุให้ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงไป การเคลื่อนที่ของโปรตอนเกิดขึ้นจากด้านความดันไอสูง ซึ่งเป็นขั้วลบสัมพันธ์กับด้านความดันไอต่ำ ปฏิกริยาเกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดอธิบายได้ดังรูปที่ 2.3

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์ นำเสนอโดย Shuk (1998) ได้ทำการศึกษา $\text{HZr}_2(\text{PO}_4)_3$ ซึ่งเป็นเป็นฟิล์มของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์ชนิดตัวต้านทานสำหรับใช้ใน ตัวตรวจรู้ความชื้น วัสดุนี้นำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงได้ดี โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบซีวีซาน สลับหว่างกันบนฐานรองอลูมิเนียมออกไซด์ $\text{HZr}_2(\text{PO}_4)_3$ จะถูกเคลือบลงบนขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เทคนิคฟิล์มบาง ผลที่ได้คือฟิล์มจะมีโครงสร้างแบบรูพรุน การตอบสนองของตัวตรวจรู้ใช้วิธีการวัดกระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 1 V ฟิล์มที่มีความหนามากทำให้มีความไวสูง และได้ทำการทดลองซ้ำที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ให้ผลการตอบสนองที่ดี ความไวของการตอบสนองอยู่ที่ 10-15 วินาที



บริเวณอิเล็กโทรดกับความดันไอน้ำสูง $\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+(\text{electrolyte}) + 1/2\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$

บริเวณอิเล็กโทรดกับความดันไอน้ำต่ำ $2\text{H}^+(\text{electrolyte}) + 1/2\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$

รูปที่ 2.3 แนวความคิดของความนำโปรตอนในตัวตรวจรู้ความชื้นของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์

ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุไวความชื้น (polymer-based humidity sensors) มีการนำมาใช้เป็นระยะเวลาานกว่าตัวตรวจรู้ชนิดเซรามิก วัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาใช้มีการศึกษาวิจัยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นแสดงดังตารางที่ 2.3 โดยแบ่งเป็นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ และไดอิเล็กทริก กลไกการตรวจรู้ของวัสดุพอลิเมอร์ดังกล่าว ได้แก่ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า คลื่นเสียงพื้นผิว และเพียโซรีซิสทีฟ กลไกการตรวจรู้

ของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ (sensing mechanism of polymer types) สามารถอธิบายและแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte-type humidity sensor) พอลิเมอร์กับไอออนิกโมโนเมอร์จัดว่าเป็นวัสดุประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ วัสดุประเภทไอออนิกมีสภาพความนำไอออนิกซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น กลไกการตรวจรู้อาศัยอัตราเร็วของอนุภาคประจุไอออนิกที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก หรือความเข้มข้นประจุพาหะ (Yamazoe, 1986) พอลิอิเล็กโทรไลต์เรซินเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยงข้ามกัน (cross-linked) กับกลุ่มขั้วประจุที่เกาะกับโซ่พอลิเมอร์ (polymer chain) สมดุลของประจุเกิดจากการที่ไอออนเคลื่อนที่ตรงกันข้ามประจุ นั่นคือมีแรงไฟฟ้าสถิตดึงดูดกลุ่มขั้วที่อยู่กับที่เมื่อน้ำดูดซึมผ่านวัสดุ อัตราเร็วของอนุภาคประจุที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นระหว่างกันในบริเวณใกล้ ๆ กันเป็นอิสระมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ไม่ทนทานต่อน้ำหรือการควบแน่นของไอน้ำเนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงข้ามกันของพอลิเมอร์ที่ดูดซึมน้ำ ปัญหาที่เกิดขึ้นแก้ไขด้วยโพลิเมอร์สหพันธ์ (copolymerization) หรือการเคลือบวัสดุป้องกันเพื่อปรับปรุงความทนทาน (Yamazoe, 1986; Hijikagawa, 1983)

ตารางที่ 2.3 วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในตัวตรวจรู้ความชื้น

ประเภท	วัสดุตรวจรู้	อ้างอิง
พอลิอิเล็กโทรไลต์	<ul style="list-style-type: none"> - Sodium sulphonated polystyrene + cellulose-based polymer - Styrene sulfonate monomer - Sulfonated polystyrene branch grafted on tetrafluoroethylene (PTFE) film - Various copolymer of ionic and noionic monomers 	<p>Yang, et al., 2002</p> <p>Hijikagawa, et al., 1983</p> <p>Sakai, et al., 1986</p> <p>Tsuchitani, et al., 1988</p>
ไดอิเล็กทริก	<ul style="list-style-type: none"> - Polyimide - Polymethyl methacrylate (PMMA) - Poly(ethyleneterephthalate) (PET) - Polysulfone (PSF) - Cellulose acetate butyrate (CAB) - Polyethynylfluorene (PEFL) 	<p>Gerlach, et al., 1994</p> <p>Ralston, et al., 1994</p> <p>Pérez, et al., 1997</p> <p>Kuroiwa, et al., 1995</p> <p>Grange, et al., 1987</p> <p>Caliendo, et al., 1994</p>

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ Hijikagawa (1983) ได้นำเสนอผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ ความทนทานต่อหยดน้ำ ไอสารอินทรีย์ และเสถียรภาพยาวนานที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน สไตรีนซัลโฟเนตจะเชื่อมโยงข้ามกับไวนิลพอลิเมอร์ที่เคลือบอยู่บนฐานรองอลูมิเนียมออกไซด์ที่ซึ่งมีลวดลายอิเล็กโทรดแบบซี่หวีสานสลับหว่างที่ถูกสร้างไว้ก่อนแล้วจากการทดลองพบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความไวจะเพิ่มขึ้นและการตอบสนองเป็นเชิงเส้นกว้างมากในช่วงความชื้น การทดสอบโดยการหยดน้ำด้วยฉีดให้เป็นละอองหรือการหยดลงบนตัวตรวจรู้และวัดการตอบสนองของตัวตรวจรู้พบว่าเอาต์พุตมีเสถียรภาพเมื่อทำการทดสอบซ้ำ ๆ กว่า 400 ครั้ง บ่งชี้ว่าตัวตรวจรู้มีเสถียรภาพดีเมื่อทดสอบกับเอซิลแอลกอฮอล์ อะซีโตน และแอมโมเนีย วิธีการเชื่อมโยงข้ามช่วยปรับปรุงความทนทานของตัวตรวจรู้ที่ใช้วัสดุประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นทดสอบการปนเปื้อนด้วยควีนบูทรี และน้ำมัน ผลการทดสอบที่ได้พบว่าตัวตรวจรู้สามารถป้องกันการปนเปื้อนได้ด้วยชั้นเซลลูโลสเอสเตอร์ ทำการทดสอบเสถียรภาพในระยะยาวภายใต้อุณหภูมิต่างกันคือ ที่อุณหภูมิห้อง 20 และ 80 องศาเซลเซียส และสภาวะความชื้นสูงในช่วง 90-95%RH พบว่ามีเสถียรภาพดีโดยใช้เวลาการทดสอบ 2500 ถึง 3000 ชั่วโมง

ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภท ไดอิเล็กทริก (dielectric-type humidity sensor) อาศัยขอบเขตของโครงข่ายพอลิเมอร์ที่มีกระบวนการดูดซึมและการคายโมเลกุลน้ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำและพอลิเมอร์คือ 80 และ 5 ตามลำดับ โมเลกุลของน้ำในพอลิเมอร์ส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อมีโมเลกุลของน้ำเพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ ถ้าขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบแผ่นโลหะขนาน ตัวตรวจรู้จะมีความจุไฟฟ้ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ (A) หรือความหนาฟิล์มพอลิเมอร์บางลง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มพอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการดูดซึมและคายความชื้นภายในฟิล์ม อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มพอลิเมอร์ หลักการทำงานของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุนี้สามารถอธิบายเป็นสมการที่ (2-3) คือ

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2-3)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มพอลิเมอร์

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตัวนำ (m)

A คือ พื้นที่ผิวของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เส้นสนามไฟฟ้าลากผ่าน (m²)

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทไดอิเล็กทริก วัสดุพอลิเมอร์ที่นำไปใช้บ่อยคือ พอลิอิมิด์ เหตุผลที่ใช้พอลิอิมิด์เพราะว่าเป็นวัสดุที่ใช้ในกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำ มีความทนทานต่อสารเคมี และการปนเปื้อน พอลิอิมิด์ถูกใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกภายใน เป็นชั้นกันชน และเคลือบผิวในวงจรรวม โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำและทนทานต่ออนุภาคอัลฟา Kang (2000) นำเสนอโครงสร้างแบบใหม่เพื่อปรับปรุงความเร็วการตอบสนองโดยสร้างคอลลัมน์พอลิอิมิด์ขนาดเล็กหลาย ๆ คอลลัมน์ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความเร็วการตอบสนองอยู่ที่ 1 วินาที สร้างโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็น โครงสร้างแบบทรงกระบอกของชั้นฟิล์มพอลิอิมิด์ทำให้ความชื้นแพร่เข้าไปรวดเร็ว ซึ่งสร้างแตกต่างกันทั้งระยะห่างระหว่างคอลลัมน์พอลิอิมิด์และเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลลัมน์พอลิอิมิด์ได้แก่ ชนิด A B และ C เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลลัมน์พอลิอิมิด์ทั้ง 3 แบบ คือ A = 5 ไมโครเมตร B = 10 ไมโครเมตร และ C = 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ พบว่าการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้น

Ralston (1994) ได้ทำการศึกษาตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ PMMA ใน 4 แนวทางด้วยกัน ได้แก่ PMMA เชิงเส้น (ไม่เกิดการเชื่อมโยงข้าม) PMMA แบบร่างแหกับเอซีรีนไกลคอลไดเมทาไซเลท (EGDM) 4.9 %wt การเคลือบ PMMA ด้วยพลาสติกความหนาแน่นต่ำ (LD-PMMA) และการเคลือบ PMMA ด้วยพลาสติกความหนาแน่นสูง (HD-PMMA) โครงสร้างตัวตรวจรู้ที่ใช้เป็นแบบขั้วอิเล็กโทรดแผ่นโลหะขนานกันซึ่งการตอบสนองสรุปได้ดังต่อไปนี้ คือ PMMA เชิงเส้นซึ่งการตอบสนองเป็นเชิงเส้นและมีฮิสเทอรีซิสน้อยมาก PMMA แบบร่างแห มีความไม่เป็นเชิงเส้นที่ความชื้นมากกว่า 90%RH และมีฮิสเทอรีซิสมากที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง LD-PMMA มีความเป็นเชิงเส้นและฮิสเทอรีซิสน้อยมาก และ HD-PMMA มีความเป็นเชิงเส้นและฮิสเทอรีซิสมาก

การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเซลล์โอสอะซีเตทบิวทิเรต (CAB) Grange (1987) ได้ทำการทดสอบพบว่า CAB มีความไวต่อความชื้นสูง มีเสถียรภาพทางเคมี และทางกลดี ฮิสเทอรีซิสในวงรอบแรกของการทดสอบอยู่ที่ 3.5-3.7% และฮิสเทอรีซิสในวงรอบที่สองของการทดสอบอยู่ที่ 0.5-3% ในวงรอบการทดสอบครั้งที่สองตัวตรวจรู้ให้การตอบสนองเร็วกว่า และมีฮิสเทอรีซิสน้อยกว่า ระยะเวลาการตอบสนองต่อความชื้นอยู่ที่ 2 นาที ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 98% ตัวตรวจรู้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเล็กน้อยเท่าที่พบอยู่ระหว่าง 75°F (23.8°C) และ 95°F (35°C) และขึ้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ -0.72pF/°C

Chomnawang (2005) นำเสนอวิธีการสปีดเตอริงเทปพอลิอิมิด์ด้วยความถี่วิทยุเป็นชั้นไวความชื้น ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุมีโครงสร้างฐานรองซิลิคอน ตามด้วยชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นเคลือบชั้นแผ่นกราวด์ด้วยการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศหนา 50 นาโนเมตร แล้วจึงเคลือบชั้นพอลิอิมิด์ด้วยการสปีดเตอริงหนา 45 อังสตรอม ชั้นสุดท้ายเป็นขั้วอิเล็กโทรดแบบซีวีฮิวสันสลับหว่างกันทำด้วยการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศหนา 50 นาโนเมตร

ที่มีความกว้างและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 30 ไมโครเมตร บนพื้นที่ขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร เมื่อทำการทดสอบตัวตรวจรู้ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-80% ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองเป็นเชิงเส้น และตารางที่ 2.4 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสปีดเตอริงพอลิเมอร์

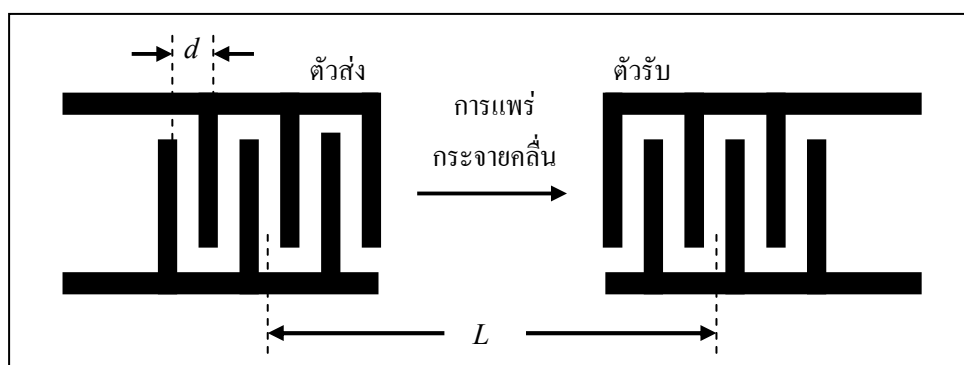
Pérez (1997) ได้นำ พอลิเอธิลีนเทเลฟเธเรต (polyethyleneterephthalate: PET) ฟิล์มมาใช้เป็นชั้นไวความชื้น โดย PET ฟิล์มจะอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทองคำแบบแผ่นโลหะขนาน การตอบสนองของตัวตรวจรู้ก่อนข้างเป็นเชิงเส้นและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเล็กน้อยระหว่าง 25 และ 35 องศาเซลเซียส เวลาการตอบสนองอยู่ที่ 7 นาที ที่ความชื้นสัมพัทธ์จาก 12-85% ตัวตรวจรู้มีเสถียรภาพดี เมื่อทำการทดสอบนาน 280 วัน ซึ่งพบว่าความถี่เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ ± 0.1 kHz ส่วน Kuroiwa (1995) ได้นำพอลิซัลโฟน (polysulfone: PSF) มาใช้เป็นชั้นไวความชื้นในตัวตรวจรู้ความชื้น PSF เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยสามารถใช้ที่ความถี่สูงและมีความทนทานต่อไอน้ำ มีโครงสร้างทางเคมีของหมู่ diphenyl sulfone ทำการทดสอบตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 100 kHz พบว่ามีความเป็นเชิงเส้น $+0.8\%RH$ ฮิสเทอรีซิส $0.0\pm 0.1\%RH/^{\circ}C$ ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-90% PSF เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีแต่ต้องเจออาการสลายละลายไซโครเฮกซาโนน (cyclohexanone), N, N-dimethylformamide และเมทิลเอทิลคีโตน (methyl ethyl ketone) ก่อนใช้

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสปีดเตอริงพอลิเมอร์

อ้างอิง	ปี	หลักการ	วัสดุที่ทำการสปีดเตอริง	ความหนาฟิล์ม (nm/min)
Kitoh, et al.	1995	สปีดเตอริงด้วยความถี่วิทยุ	พอลิอีไมด์	3-4
Biederman	2000	สปีดเตอริงด้วยความถี่วิทยุ	พอลิอีไมด์, PTFE	2, 70
Biederman, et al.	2003	สปีดเตอริงด้วยความถี่วิทยุ	พอลิอีไมด์, PTFE	2, 70
Chomnawang, et al.	2005	สปีดเตอริงด้วยความถี่วิทยุ	เทปกาวพอลิอีไมด์	0.1

ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทคลื่นเสียงพื้นผิว (SAW type humidity sensor) สำหรับตัวตรวจรู้โดยทั่วไปวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุไวความชื้น

ซึ่งเป็นวิธีการโดยตรง ส่วนการตรวจความชื้นด้วยวิธีการอื่น ๆ เช่น ใช้หลักการตรวจรู้แบบคลื่นเสียงพื้นผิว และหลักการเพียโซรีซิสทีฟ กลไกการตรวจรู้ที่กล่าวถึงนี้มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชั้นพอลิเมอร์หรือการพองตัวของพอลิเมอร์ เทคนิคการตรวจรู้แบบพื้นผิวคลื่นเสียงถูกนำมาใช้วัดความชื้นโดยอาศัยคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีการดูดซึมความชื้น อุปกรณ์พื้นผิวคลื่นเสียงแบ่งออกได้ 5 ประเภท โดยอยู่บนพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นเสียงบนฐานรองได้แก่ Rayleigh SAW คลื่นเสียงพื้นผิวแบบตัดแยกในแนวราบ (shear horizontal SAW: SH-SAW) เลิฟเวฟโหมด (love wave mode) โหมดแผ่นเสียง (acoustic plate mode: APM) และแผ่นคลื่นยืดหยุ่น (flexural plate wave: FPW) ตัวอย่างเช่น Rayleigh SAW ถูกนำมาใช้ตรวจรู้ความชื้นเพราะว่ามีปฏิสัมพันธ์ที่ดีสำหรับไปประยุกต์ใช้กับภาวะประเภทมวลได้ อุปกรณ์ประเภทพื้นผิวคลื่นเสียงถูกนิยามด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่อยู่บนฐานรอง การตัดผลึก และโครงสร้างขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งมีรูปแบบของตัวส่งและตัวรับที่ใช้ในคลื่นเสียง โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบทรานสดิวเซอร์แบบชีวิฮีสานสลับหว่าง (interdigital transducer: IDT) อยู่บนฐานรองเพียโซอิเล็กทริกโดยจะทำการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลหรือในทางตรงกันข้ามคือแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า แต่ส่วนของขั้วอิเล็กโทรดแบบ IDT จะตรวจรู้แบบ SAW ตัวอย่างการออกแบบ SAW นั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ทรานสดิวเซอร์แบบชีวิฮีสานสลับหว่าง

ระยะห่างระหว่างซี่สองอันที่ใกล้กันควรจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นยืดหยุ่นซึ่งแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2-4) คือ

$$d = \frac{\lambda_r}{2} \quad (2-4)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างซี่สองอันที่อยู่ใกล้กัน (m)

λ_r คือ ความยาวคลื่นยืดหยุ่น (elastic wavelength) (m)

และความถี่ f_0 สามารถนิยามเป็นสมการที่ (2-5) ได้คือ

$$f_0 = \frac{v_r}{\lambda_r} = \frac{v_r}{2d} \quad (2-5)$$

โดยที่ v_r คือ ความเร็วคลื่นเสียง (m/s)

จากสมการที่ (2-5) ทำให้ทราบว่าหากระยะห่างระหว่างซี่สองอันที่อยู่ใกล้กันน้อยมาก ๆ ความถี่จะสูงขึ้นแบนด์วิธทำงาน (operating bandwidth: BW) หาได้จากจำนวนของซี่ IDT (N) และความถี่ทำงาน (f_0) จะได้สมการที่ (2-6) คือ

$$BW = \frac{f_0}{N} \quad (2-6)$$

เวลาหน่วง (time delay, τ) เท่ากับความยาว L หารด้วยความเร็วคลื่นเสียง (v_r) จะได้สมการที่ (2-7) คือ

$$\tau = \frac{L}{v_r} \quad (2-7)$$

เมื่อมีการรบกวนเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสหรือความถี่ของคลื่น การเปลี่ยนความเร็วเสียงของคลื่นสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้อง (Δf) ของ SAW จะได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายเป็นสมการที่ (2-8)

$$\frac{\Delta v_r}{v_r} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2-8)$$

การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มวล หรือสภาพนำทางไฟฟ้าของวัสดุตรวจรู้ความชื้นเป็นผลมาจากการดูดซึมความชื้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ความเร็วของ SAW ลดลง การเปลี่ยนแปลงที่เอาต์พุตตัวรับสามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความถี่ หรือเฟสของคลื่น

ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นประเภท SAW และเพียโซรีซิสทีฟ ตัวตรวจรู้ความชื้นใช้หลักการของ SAW มีโครงสร้างแบบ IDT วางตัวอยู่บนฐานรองเพียโซอิเล็กทริก (Penza, et al., 1999) ใช้พอลิเมอร์ เช่น พอลิอีไมด์ (Story, et al., 1995) PEFL (Caliendo, et al., 1994) เซลลูลอสอะซีเตท และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl-alcohol: PVA) ซึ่งสามารถเคลือบลงบนฐานรองและครอบคลุมไปถึงขั้วอิเล็กโทรด IDT หรือเคลือบลงบนขั้วอิเล็กโทรด IDT ที่มีการแพร่กระจายคลื่นในกรณีโครงสร้างเป็นแบบ SAW

Penza (1999) นำเสนอตัวตรวจรู้ความชื้นแบบ SAW ที่มีโครงสร้างอยู่บนฐานรอง $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ และเคลือบ PVA ด้วยการเคลือบหมุนลงบนส่วนโครงสร้างแบบ IDT ที่เป็นส่วนแพร่กระจายคลื่น ผลการทดลองพบว่าการทำซ้ำที่ดี ทนทานต่อน้ำ ฮิสเทอรีซิสต่ำที่อุณหภูมิห้อง และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิระหว่าง 20-60 องศาเซลเซียส ผลการวัดเฟสกับความชื้นสัมพันธ์พบว่าการตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น และมีฮิสเทอรีซิสต่ำ ความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดจากผลการโป่งพองของ PVA เมื่อสัมผัสกับไอน้ำ ทำให้โครงสร้างของฟิล์ม PVA เปลี่ยนไป ส่วน Caliendo (1994) ได้นำ polyethynylfluoreno (PEFL) มาใช้เป็นชั้นไวความชื้นในตัวตรวจรู้ความชื้นแบบ SAW โดยนำ PEFL เคลือบแบบหมุนลงบนฐานรองควอทซ์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นตามแนวแกน x โดยที่โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดแบบ IDT วางตัวอยู่ด้านบนของฐานรอง ความถี่ในการทำงานอยู่ที่ 154 MHz PEFL ถูกใช้ในตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดตัวต้านทานด้วยการแพร่สารเจือด้วย SnCl_2 ในอัตราส่วน 50% wt./wt. (Bearzotti, et al., 1992) หลังจากสังเคราะห์ PEFL ได้แล้วทำให้แห้งจากนั้นทำละลายใน CH_2Cl_2 ก่อนจะทำการเคลือบแบบหมุน การตอบสนองที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิระหว่าง 30-60 องศาเซลเซียส

Gerlach (1994) นำเสนอเทคนิคใหม่ในการตรวจรู้ความชื้น โดยใช้เพียโซรีซิสทีฟทรานสดิวเซอร์ ด้านล่างซิลิคอนถูกกัดออกเพื่อให้ได้เป็นซิลิคอนไดอะแฟรม ซึ่งมีพอลิอีไมด์อยู่บนไดอะแฟรม ตัวต้านทานเพียโซชนิด P^+ ในไดอะแฟรมอยู่ในรูปของวงจรวัดสโตนบริดจ์ ตัวตรวจรู้นี้ใช้การโป่งพองของพอลิอีไมด์ในการตรวจรู้ความชื้น การดูดซึมความชื้นทำให้พอลิอีไมด์โป่งพองและเกิดความเครียดที่โครงสร้างแบบตัวต้านทานเพียโซ โดยมีชั้นพอลิอีไมด์ 2 ชนิดคือ ชนิด A ประกอบด้วยชั้นพอลิอีไมด์ที่ครอบคลุมผนังกัน ชนิด B ประกอบด้วยชั้นพอลิอีไมด์ที่เคลือบอยู่บนตัวต้านทานเพียโซ ตัวตรวจรู้ชนิด A และ B ให้ความไว 20-25 $\mu\text{V}/\%RH$ และ 80-100 $\mu\text{V}/\%RH$ ตามลำดับ นั่นหมายถึงตัวตรวจรู้ชนิด B มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าชนิด A การตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-95%

ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ซิลิคอนพรุนเป็นชั้นไวความชื้น (porous silicon type humidity sensors) ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทนี้สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการสร้างวงจรรวมสมัยใหม่ด้วยการเพิ่มกระบวนการสร้างซิลิคอนพรุนเป็นชั้นไวความชื้น (Rittersma, et al., 2000) ซิลิคอนพรุนตรวจรู้

ได้นำมาใช้เพราะการเพิ่มพื้นที่ระหว่างผิวของซิลิคอน กระบวนการสร้างซิลิคอนพอร์นาจะใช้วิธีพิเศษเช่น วิธี anodization ซึ่งสามารถนำเอากรดไฮโดรฟลูออริก 25% ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ ป้อนไฟฟ้าด้วยความหนาแน่นกระแสคงที่ 13 mA/cm^2 เป็นระยะเวลา 120 วินาที หลังจากกระบวนการนี้ซิลิคอนจะกลายเป็นซิลิคอนพอร์น ความพรุนและขนาดรูพรุนของซิลิคอนพอร์นเป็นปัจจัยที่สำคัญ เพราะมีผลต่อความไวและความเร็วการตอบสนองของตัวตรวจรู้ ความพรุนและขนาดรูพรุนนั้นสามารถควบคุมได้ด้วยการเจือความเข้มข้นของซิลิคอน โดยควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกและความหนาแน่นกระแส (Lang, et al., 1995)

Kim (2000) นำเสนอโครงสร้างลาดชัน (mesa) ข้อดีของโครงสร้างแบบนี้คือกำจัดผลจากค่าความจุไฟฟ้าส่วนเกิน (parasitic capacitance) จากชั้นวัสดุต่าง ๆ เพราะว่ามีอิเล็กโทรดเชื่อมต่อโดยตรงสัมผัสกับชั้นซิลิคอนพอร์น ที่ความถี่ต่ำค่าสภาพยอมที่ส่งผลกระทบต่อการกลับขั้วในขณะที่มีการเหนี่ยวนำที่ขั้วไฟฟ้า นี่คือเหตุที่ทำให้มีสภาพยอมการเพิ่มขึ้นอย่างมากในชั้นซิลิคอนพอร์น ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มขึ้น 300% ที่ความถี่สัมพัทธ์ 95% ความถี่ 120 Hz การตอบสนองของตัวตรวจรู้พบว่าความไวต่ำมากที่ความถี่สัมพัทธ์ต่ำส่วนที่ความถี่สัมพัทธ์สูงการตอบสนองจะไวกว่าที่ความถี่สัมพัทธ์ต่ำ และไม่เป็นเชิงเส้น ความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ของเหลวที่อยู่ในท่อขนาดเล็กในที่นี้คือ เกิดการควบแน่นของน้ำในรูพรุน ผลการทดสอบการขึ้นกับอุณหภูมิของตัวตรวจรู้พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซิลิคอนพอร์นไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ คุณสมบัติอื่น ๆ ที่สัมพันธ์กับตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซิลิคอนพอร์นคือ การเพิ่มขึ้นของสภาพยอมในบริเวณประจุว่างที่เกิดการควบแน่นภายในรูพรุนซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุให้ความไวสูง (Erson, et al., 1990) นอกจากนั้นการควบแน่นในรูพรุนเป็นสาเหตุให้เกิดฮิสเทอรีซิสมาก ซึ่งสามารถปรับปรุงด้วยการใส่ตัวให้ความร้อนบนฐานรอง (O'Halloran, et al., 1997)

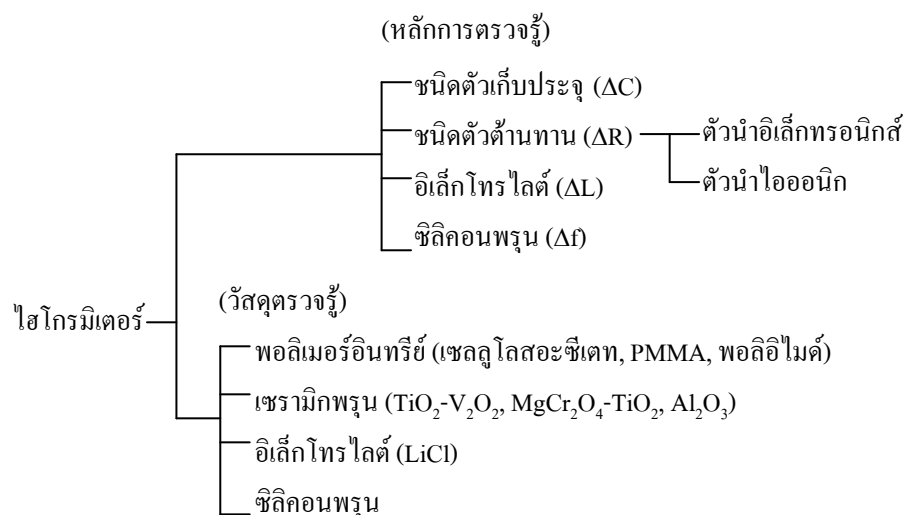
ตัวตรวจรู้ความชื้น โดยใช้ซิลิคอนนาโนเฟสเป็นชั้นไวความชื้น (nanophase silicon type humidity sensors) Kalkan (2004) นำเสนอตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดไอออนิกที่ใช้การเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนนาโนเฟสด้วยพลาสมา โครงสร้างตัวตรวจรู้มีลักษณะแบนราบ ขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบซี่หวีสานสลับหว่างกันมีขนาดและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 5 ไมโครเมตร วางตัวอยู่บนแก้วพลาستيك (parylene)-ฐานรองซิลิคอนที่มีออกไซด์เคลือบอยู่ ชั้นบนสุดเป็นลวดลายขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากกระบวนการระเหยโลหะด้วยความร้อน (Ti หนา 10 นาโนเมตร และ Pt หนา 50 นาโนเมตร) จากนั้นจึงทำการเคลือบชั้นซิลิคอนนาโนเฟสหนา 40-200 นาโนเมตร สาเหตุที่ต้องสร้างชั้นซิลิคอนนาโนเฟสตามความหนาดังกล่าวเนื่องมาจากเพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างที่ความหนาน้อยกว่า 10 นาโนเมตร เพราะจะทำให้การตอบสนองช้า เนื่องมาจากอัตราการดูดซึมและการคายความชื้นของไอน้ำมีขีดจำกัดที่อันเป็นผลมาจากอัตราการแพร่ของไอน้ำ อีกสาเหตุหนึ่งคือหลีกเลี่ยงขนาดรูที่น้อยกว่า 10 นาโนเมตร ที่จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ความถี่สัมพัทธ์ต่ำกว่า 80% ทำให้เกิดการอ้อมตัว

ของการตอบสนองและไม่ไวที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง ซึ่งในการทดสอบตัวตรวจรู้เป็นวงรอบในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 20-90% พบว่าใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น ≤ 0.2 วินาที

การรวมตัวตรวจรู้และวงจรแปลงสัญญาณลงบนชิพเพียงตัวเดียว (single chip integration solution) ที่มีการสร้างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวตรวจรู้ที่เชื่อมต่อเข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือ ตัวตรวจรู้ความชื้นที่เป็นส่วนหนึ่งของทรานซิสเตอร์ เช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Lee, et al., 1996) ประเภทที่สองคือส่วนตรวจรู้ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งในทรานซิสเตอร์แต่รวมอยู่กับวงจรประมวลสัญญาณเช่น ตัวขยายสัญญาณ หรือตัวเปรียบเทียบซึ่งอยู่บนชิพตัวเดียวกัน (Qiu, et al., 2001) ข้อดีของการรวมเอาตัวตรวจรู้กับวงจรประมวลสัญญาณหรือแบบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้านั้นเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการสร้างในเทคโนโลยีวงจรรวมสมัยใหม่ และยังเป็นการช่วยให้ตัวตรวจรู้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในเทคโนโลยีวงจรรวมสมัยใหม่มีส่วนช่วยในการลดต้นทุนในกระบวนการผลิต จำกัดการใช้วัสดุและลำดับในกระบวนการผลิตที่ยืดหยุ่นในการออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีวงจรประมวลสัญญาณอยู่บนชิพตัวเดียวกัน ในส่วนของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นชั้นไวความชื้นในตัวตรวจรู้ก็มีการคิดค้นเพื่อนำไปใช้กับกระบวนการผลิตวงจรรวมอีกด้วย (Qiu, et al., 2001) ซึ่งพอลิเมอร์นั้นเหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมสมัยใหม่ เทคนิคที่จะรวมส่วนของตัวตรวจรู้ความชื้นกับเกทของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าเข้าด้วยกันได้ถูกนำเสนอไว้โดย (Lee, et al., 1996)

Boltshauser (1993) นำเสนอวงจรประมวลสัญญาณที่มีพื้นฐานการทำงานจากการประจุและคายประจุกระแสไฟฟ้า วงจรสร้างด้วยกระบวนการ CMOS เคลือบด้วยพอลิเมอร์ วงจรจะให้กระแสเอาต์พุตซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันอ้างอิง ความถี่สัญญาณนาฬิกา และความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ผลการทดลองที่ได้ทำการวัดในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 30% จนถึง 95% Qiu (2001) นำเสนอตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีการสร้างวงจรการปรับเทียบบนชิพเดียวกันด้วยกระบวนการ CMOS พอลิเมอร์จะถูกเคลือบหลังจากสร้างเสร็จ วงจรจะใช้การแปลงประจุไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า สวิตช์คาปาซิเตอร์ เทคนิคนี้ต้องการตัวเก็บประจุอ้างอิงที่ประกอบด้วยออกไซด์และตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่เคลือบพอลิเมอร์ แรงดันเอาต์พุตนั้นมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างของค่าความจุไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุอ้างอิงและตัวตรวจรู้ความชื้นกับแรงดันอ้างอิง การสอบเทียบวงจรทำได้โดยการวัดความไวและการชดเชยของตัวตรวจรู้ การเบี่ยงเบนสูงสุดหลังจากการสอบเทียบคือ 1.7%RH ที่ความชื้นระหว่าง 0-100%RH เนื่องจากมีผู้แนะนำงานวิจัยด้านตัวตรวจรู้ความชื้นไว้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงได้ทำการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเทคนิคในการออกแบบขั้วอิเล็กโทรด ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างตัวตรวจรู้ ชนิดสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้จากตัวตรวจรู้แต่ละประเภท และวัสดุที่ใช้เป็นชั้นไวความชื้น รูปที่ 2.5 แสดงแผนผังหลักการตรวจรู้และวัสดุตรวจรู้ที่ใช้กับไฮโกรมิเตอร์ ส่วนตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบ

มาตรวัดความชื้นสัมพัทธ์ และตารางที่ 2.6 แสดงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยสังเขปของตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็กระเภทต่าง ๆ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.5 หลักการตรวจรู้และวัสดุตรวจรู้ที่ใช้กับไฮโกรมิเตอร์

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบมาตรวัดความชื้นสัมพัทธ์ (ไฮโกรมิเตอร์)

ไฮโกรมิเตอร์	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ไฮโกรมิเตอร์โดย ใช้วัสดุดูดความชื้น (hygroscopic materials)	มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลง ตามกลไก (ความยาว, ปริมาตร, ความเค้น)	- ไม่ต้องใช้พลังงาน - ความไวค่าที่อุณหภูมิ - ราคาถูก - สร้างได้ง่าย	- เอาต์พุตไม่เป็นเชิงเส้น - มีฮิสเทอรีซิส - มีการเลื่อนมาก (drift)
	มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไป (ความ ต้านทาน, ความจุไฟฟ้า, ความถี่)	- สามารถผลิตจำหน่าย - สร้างได้ง่าย - ราคาถูก - มีขนาดเล็ก - บำรุงรักษาง่าย	- มีฮิสเทอรีซิส - ไวต่อสิ่งสกปรก
ไฮโกรมิเตอร์ (มาตรความชื้น สัมพัทธ์แบบ กระเปาะเปียก- แห้ง)	ประเมินความชื้นสัมพัทธ์ บนพื้นฐานของกระเปาะ เปียก กระเปาะแห้ง และ วัดอุณหภูมิ	- ไม่ต้องทำการปรับเทียบ	- ต้องมีการเปลี่ยนไส้และ น้ำกลั่น - ต้องการอากาศไหลผ่าน ด้วยด้วยอัตราการไหล สูง (3 m/sec)

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบมาตรฐานความชื้นสัมพัทธ์ (ไฮโกรมิเตอร์) (ต่อ)

ไฮโกรมิเตอร์	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ไฮโกรมิเตอร์วัดจุดน้ำค้าง	วัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างโดยตรวจรูรูปแบบการควบแน่นบนพื้นฐานของการทำความเย็น	- ความแม่นยำสูง - ย่านพลวัตกว้าง - ไม่ต้องทำการปรับเทียบ	- มีขนาดใหญ่ - ราคาแพง - ใช้พลังงานไฟฟ้าสูง - ต้องทำความสะอาดผิวกระจกอย่างสม่ำเสมอ
อินฟราเรดไฮโกรมิเตอร์	เลือกการดูดกลืนโดยจำแนกอินฟราเรดสเปกตรัมจากไอน้ำ	- สามารถใช้กับแก๊สที่กัดกร่อนได้ - ย่านพลวัตกว้าง	- ราคาแพง - เป็นไปได้ที่จะมีการรบกวนจากแก๊สอื่น ๆ

ตารางที่ 2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเทคนิคโดยสังเขปของตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก

ปี	ผู้ประพันธ์	เทคนิค	การออกแบบ	ลักษณะเฉพาะ	เอาต์พุต	วัสดุ
1988	Shimizu, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	บริจค์ความจุไฟฟ้า	ความจุและแรงดันไฟฟ้า	พอลิอิมิด
1990	Denton, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	โซลิดสเตท	ความจุและแรงดันไฟฟ้า	พอลิอิมิด
1995	Story, et al.	ความจุไฟฟ้า, SAW	IDE, SAW	เทคโนโลยีฟิล์มบางและฟิล์มหนา	ความต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า การเลื่อนเฟส	พอลิเมออร์
1995	Traversa, et al.	-	-	รวบรวมตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเซรามิก	-	เซรามิก
1996	Ralston, et al.	ความจุไฟฟ้า	ความแตกต่างของฟิล์ม	เปรียบเทียบวัสดุ	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด
1996	Lee, et al.	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	วงจรรวม	ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	TiO ₂

ตารางที่ 2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเทคนิคโดยสังเขปของตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก (ต่อ)

ปี	ผู้ประพันธ์	เทคนิค	การออกแบบ	ลักษณะเฉพาะ	เอาต์พุต	วัสดุ
1996	Shibata, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	มาตรการความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิทัล	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
1996	Sakai, et al.	ความต้านทานไฟฟ้า	แผ่นโลหะขนาน	เทคโนโลยีฟิล์มบาง	ความต้านทานไฟฟ้า	พอลิเมอร์
1996	Schroth, et al.	ความถี่	เพียโซรีซิสทีฟ	ความถี่การสั่นสะเทือนแปรผันตามความชื้น	ความถี่	พอลิอิมิด์
1999	Patissier	ความจุไฟฟ้า	แผ่นโลหะขนาน	ขั้วไฟฟ้าแบบมีรูพรุน	ความจุไฟฟ้า	พอลิเมอร์
2000	Kang, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	ตัวให้ความร้อนแบบพอลิซิลิคอน	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2000	Rittersma, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE, แผ่นโลหะขนานเจาะรูพรุน	ตัวให้ความร้อน	ความจุไฟฟ้า	Cr-Au-Cr, ซิลิคอนพรุนชนิด p
2001	Qiu, et al.	ความจุไฟฟ้า	วงจรรวม	ทำการปรับเทียบบนชีพ	แรงดันไฟฟ้า	พอลิเมอร์
2001	Fenner, et al.	-	-	รวบรวมเทคโนโลยีการตรวจรู้ของตัวตรวจรู้ความชื้น	-	-
2001	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	นำไปใช้วินิจฉัยโรคทางเดินหายใจ	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2001	Li, et al.	ความจุและความต้านทานไฟฟ้า	IDE	เปรียบเทียบโครงสร้าง	ความจุและความต้านทานไฟฟ้า	พอลิเมอร์
2001	Dokmeci, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	เทคโนโลยีฟิล์มบาง	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2001	Das, et al.	ความจุไฟฟ้า	แผ่นโลหะ	โครงสร้างแบบแฉวน	ความจุไฟฟ้า	ซิลิคอนพรุน

ตารางที่ 2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเทคนิคโดยสังเขปของตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก (ต่อ)

ปี	ผู้ประพันธ์	เทคนิค	การออกแบบ	ลักษณะเฉพาะ	เอาต์พุต	วัสดุ
2002	Harrey, et al.	ความจุไฟฟ้า	แผ่นโลหะ ขนาน	ใช้กระบวนการ พิมพ์สร้างชั้น พอลิเมอร์	ความจุไฟฟ้า	พอลิเมอร์
2002	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE, โครงสร้าง หลาย รูปแบบ	ตัวให้ความร้อน ,นำไปใช้ วินิจฉัยโรค ทางเดินหายใจ	ความจุไฟฟ้า	Au, Ti, Al ,พอลิอิมิด์ , BCB
2002	Harpster, et al.	ความถี่สั่นพ้อง	วงจรรวม	ตัวตรวจรู้ ความชื้นไร้สาย	ความถี่สั่น พ้อง	พอลิอิมิด์, Cu
2002	Chatzandroulis, et al.	ความจุไฟฟ้า	โครงสร้าง แบบคาน	ความชื้นส่งผล ให้คานโก่งตัว หรือยัดตัว	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2002	Van Putten, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	ตัวตรวจรู้หลาย ชนิดสำหรับ นำไปใช้ วินิจฉัยโรค ทางเดินหายใจ	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2002	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	กักพอลิอิมิด์ ด้วยพลาสมา	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2003	Lee, et al.	ความจุไฟฟ้า	แบบคานและ แบบแขน	วัดอุณหภูมิได้	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2003	Tételin, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE, แผ่น โลหะขนาน	การตอบสนอง ต่อความชื้นเร็ว	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์, BCB
2003	Laconte, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	รูปแบบชั้น พอลิอิมิด์และ แบบจำลอง โครงสร้าง	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด์
2003	Yuk, et al.	ความจุและ ความต้านทาน ไฟฟ้า	IDE	เทคนิโพลีฟิล์ม บาง	ความจุและ ความ ต้านทาน ไฟฟ้า	BaTiO ₃ , Al ₂ O ₃

ตารางที่ 2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเทคนิคโดยสังเขปของตัวตรวจรู้ความชื้นขนาดเล็ก (ต่อ)

ปี	ผู้ประพันธ์	เทคนิค	การออกแบบ	ลักษณะเฉพาะ	เอาต์พุต	วัสดุ
2003	Das, et al.	แรงดันไฟฟ้า	IDE	ตัวให้ความร้อน, โครงสร้างลอยใน อากาศ	แรงดันไฟฟ้า	ซิลิคอน พอรุน
2003	Fürjes, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	ตัวให้ความร้อน, โครงสร้างลอยใน อากาศ	ความจุไฟฟ้า	ซิลิคอน พอรุน
2004	Tetelin, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	วัดความชื้นจากลม หายใจมนุษย์	ความจุไฟฟ้า	DVS-BCB
2004	Kalkan, et al.	กระแสไฟฟ้า	IDE	ฟิล์มซิลิคอน นาโนเฟส	กระแสไฟฟ้า	พอลิเมอร์
2005	Miglio, et al.	ความจุไฟฟ้า	แผ่นโลหะ ขนาน	ฟิล์มนาโน คาร์บอน	ความจุไฟฟ้า	ฟิล์มนาโน คาร์บอน
2005	Di Francia, et al.	กระแสไฟฟ้า	IDE	การสร้างแบบแผ่น ผิวและมีซิลิคอน พอรุนหนึ่งชั้น	กระแสไฟฟ้า	ซิลิคอน พอรุนชนิด n
2005	Wang, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	เทคโนโลยีฟิล์ม บาง	ความจุไฟฟ้า	Nc-Fe ₃ O ₄ , Si-NPA
2005	DeHennis, et al.	ความจุไฟฟ้า	IDE	ส่งข้อมูลแบบไร้ สาย มีตัวตรวจรู้ หลายชนิดบนชิพ เดียว	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิมิด
2006	Steele, et al.	ความจุไฟฟ้า และความถี่	IDE	เทคโนโลยีฟิล์ม บางแบบ โครงสร้างนาโน อลูมิเนียมออกไซด์	ความจุไฟฟ้า และความถี่	ฟิล์มบาง อลูมิเนียม ออกไซด์

2.4 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น

การเลือกวิธีการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้เทคโนโลยีแผ่นวงจรรวม การผลิตด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรรวม และการผลิตด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เพื่อให้ได้ตัวตรวจรู้ที่มีคุณภาพดีที่สุดในการนำตัวตรวจรู้ไปใช้กับงานการวัดต่าง ๆ กัน ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน การตรวจรู้สภาพอากาศ การเกษตร การแพทย์ เป็นต้น ปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น

ได้แก่ ความผลิตใหม่ได้ (good reproducibility) ซึ่งมีความสำคัญต่อความมั่นใจและความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์สำหรับตัวตรวจรู้อย่างยิ่ง นั่นคือ ตัวตรวจรู้อัตโนมัติที่ผลิตขึ้นต้องมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกตัว ความไวสูง (high sensitivity) เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในงานที่ต้องการตรวจรู้อัตโนมัติที่ความถี่อย่างรวดเร็ว ตัวตรวจรู้อัตโนมัติที่มีความไวสูงช่วยลดภาระในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ถ้าตัวตรวจรู้อัตโนมัติมีความไวต่ำมากจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณส่วนย่อยต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจรู้อัตโนมัติที่มีคุณภาพ ซึ่งทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนลดลง (signal to noise ratios) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำทำให้ตัวตรวจรู้อัตโนมัติมีความถี่ที่ถูกต้องเนื่องจากอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำทำให้เกิดการเพิ่มขึ้น และการลดลงของความถี่ ตัวตรวจรู้อัตโนมัติที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำทำให้ข้อมูลมีความเที่ยงตรงสูง ตัวตรวจรู้อัตโนมัติมีความเป็นเชิงเส้น แต่ความเป็นเชิงเส้นไม่ใช่ปัจจัยหลักเพราะสามารถชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นได้ด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ อย่างไรก็ตามความเป็นเชิงเส้นจะช่วยลดความต้องการในการใช้งานวงจร และการโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นได้

ตัวตรวจรู้อัตโนมัติที่ดีต้องมีความทนทานสูง (high durability) เช่น ทนทานต่อสารเคมี และทนทานต่อการกระทบกระเทือน ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของฐานรอง โครงสร้างของตัวตรวจรู้อัตโนมัติ วิธีการบรรจุตัวตรวจรู้อัตโนมัติในตัวถัง และความทนทานของวัสดุไวความถี่ รวมทั้งความไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานในการออกแบบตัวตรวจรู้อัตโนมัติ แต่ถ้าอุณหภูมิมีผลต่อตัวตรวจรู้อัตโนมัติสามารถชดเชยได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในส่วนความทนทานต่อสิ่งปนเปื้อน เช่น คราบ น้ำมัน สารอินทรีย์ กรด เบส ทางเคมี ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวตรวจรู้อัตโนมัติลดลง ผลที่ตามมาทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความผิดพลาด นั่นคือ ควรเลือกวัสดุไวความถี่ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานของตัวตรวจรู้อัตโนมัติ ตัวตรวจรู้อัตโนมัติที่สามารถคืนสภาพเดิมจากการปนเปื้อนจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่า แม้ว่าประสิทธิภาพของตัวตรวจรู้อัตโนมัติอาจจะดีเยี่ยม แต่ถ้าค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงเกินไปอาจจะกลายเป็นข้อจำกัดเชิงพาณิชย์ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้การออกแบบและการผลิตควรพิจารณาเรื่องต้นทุนอย่างระมัดระวัง ปัจจัยสุดท้ายคือ เวลาในการตอบสนองเร็ว (fast response) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้อัตโนมัติในงานที่ต้องการเวลาในการตอบสนองทางเวลาที่รวดเร็วเช่น ในกระบวนการอุตสาหกรรม และการแพทย์ เป็นต้น

2.5 ลักษณะตัวตรวจรู้อัตโนมัติชนิดเก็บประจุที่ออกแบบและสร้างในงานวิจัย

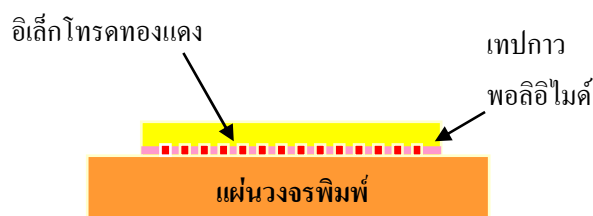
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างของตัวตรวจรู้อัตโนมัติ การเลือกชนิดของวัสดุเป็นชั้นไวความถี่ ใช้เทคโนโลยีที่ช่วยลดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการสร้าง รวมไปถึงพัฒนาหลักการตรวจรู้อัตโนมัติด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นฟิล์มวัสดุไวความถี่ และการใช้เทปกาวพอลิอิมิดที่มีราคาถูกเป็นวัสดุไวความถี่ โดยใช้เทคโนโลยีในการสร้างที่

แตกต่างกัน ได้แก่ เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น โครงสร้างตัวตรวจรู้ประกอบด้วยฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีลวดลายอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงแบบซี่หวีสานสลับหว่างกันอยู่ด้านบนโดยมีความกว้างและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด 150 ไมโครเมตร แล้วปิดทับอิเล็กทรอนิกส์โทรดทองแดงด้วยเทปกาวพอลิอิมิด ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ ราคาถูก สร้างได้ง่าย และใช้เทปกาวพอลิอิมิดที่มีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้มีขนาดใหญ่ และเทปกาวพอลิอิมิดที่หนาซึ่งทำให้ตัวตรวจรู้มีความไวต่ำเนื่องจากความชื้นซึมเข้าได้ยากกว่า จึงได้ทำการเปลี่ยนชั้นวัสดุไวความชื้นโดยใช้การสปีดเตอริงเทปกาวพอลิอิมิดด้วยความถี่วิทยุเคลือบเป็นชั้นไวความชื้นแทนเทปกาวพอลิอิมิดดังรูปที่ 2.7 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ ราคาถูก สร้างได้ง่าย และฟิล์มบางพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริงไวต่อความชื้นมากกว่าเทปกาวพอลิอิมิด ส่วนข้อเสียคือ โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้มีขนาดใหญ่ เนื่องจากเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์มีข้อจำกัดในการสร้างลวดลายให้มีขนาดเล็ก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขนาดตัวตรวจรู้จึงได้นำเทคโนโลยีวงจรรวมมาช่วยปรับปรุงโดยใช้ฐานรองเป็นกระจกสไลด์ จากนั้นติดเทปกาวพอลิอิมิดแล้วสร้างลวดลายอิเล็กทรอนิกส์โทรดอลูมิเนียมแบบซี่หวีสานสลับหว่างกันลงบนเทปกาว โดยมีความกว้างและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด 30, 50 และ 120 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ โครงสร้างตัวตรวจรู้มีขนาดเล็ก และใช้เทปกาวพอลิอิมิดที่มีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ มีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน และใช้ระยะเวลานาน

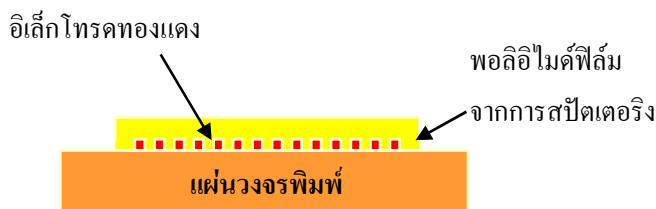
ดังที่กล่าวมาแล้วเนื่องจากเทปกาวพอลิอิมิดหนาส่งผลต่อความไวของตัวตรวจรู้จึงได้ทำการเปลี่ยนชั้นวัสดุไวความชื้นโดยใช้การสปีดเตอริงเทปกาวพอลิอิมิดด้วยความถี่วิทยุเคลือบฟิล์มบางพอลิอิมิดลงบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดอลูมิเนียมที่ใช้ฐานรองเป็นกระจกสไลด์ โดยมีความกว้างและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด 50 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ ราคาถูก โครงสร้างตัวตรวจรู้มีขนาดเล็ก และไวต่อความชื้นมากกว่าการใช้เทปกาวพอลิอิมิด ส่วนข้อเสียคือ มีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน และใช้ระยะเวลานาน จากนั้นจึงได้ทำการสร้างตัวตรวจรู้ลงบนฐานรองซิลิคอน ตามด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แล้วเคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยด้วยความร้อน โดยชั้นนี้เป็นแผ่นกราวด์ของตัวตรวจรู้ จากนั้นสปีดเตอริงพอลิอิมิดทับชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียม ชั้นสุดท้ายคือ สร้างลวดลายอิเล็กทรอนิกส์โทรดอลูมิเนียมแบบซี่หวีสานสลับหว่างกันลงบนชั้นไวความชื้นดังกล่าวโดยมีความกว้างและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด 30 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.10 ข้อดีของโครงสร้างแบบนี้คือ ตัวตรวจรู้มีขนาดเล็ก และชั้นแผ่นกราวด์ช่วยเพิ่มเส้นสนามไฟฟ้าที่ลากผ่านอิเล็กทรอนิกส์โทรด ข้อเสียคือ มีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน ใช้ระยะเวลานาน และต้นทุนสูง

เนื่องจากเทคโนโลยีวงจรรวมที่ใช้นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดการสร้างลวดลาย ดังนั้นจึงนำเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น (PolyMUMPs) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้าง

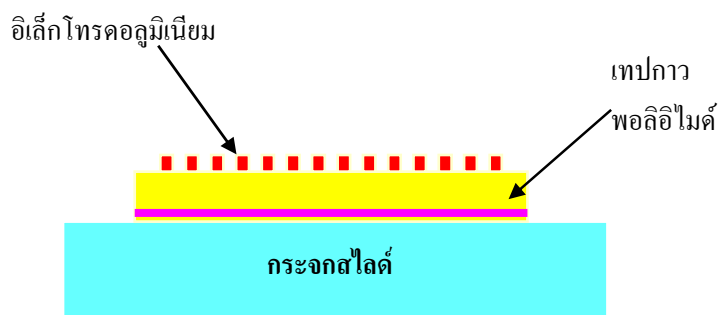
เชิงพาณิชย์โดยทำการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม L-Edit แล้วส่งไฟล์ไปสร้างโครงสร้างยังต่างประเทศ ซึ่งประกอบด้วยฐานรองซิลิคอน เคลือบทับด้วยไนไตรด์ตามด้วยชั้นพอลิ 0 จากนั้นสร้างชั้นออกไซด์ 1 สร้างชั้นพอลิ 1 ตามด้วยชั้นออกไซด์ 2 ต่อมาสร้างชั้นพอลิ 2 ชั้นสุดท้ายเป็นโลหะ (ทองคำ) เมื่อได้รับซิปกลับมาจากต่างประเทศแล้วต้องล้างชั้นป้องกันซิปออกก่อนด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์แล้วนำซิปแช่ในเมธิวแอลกอฮอล์เพื่อกำจัดน้ำออก จากนั้นอบซิปที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วจึงเคลือบทับด้วยพอลิอีไมด์จากการสปัตเตอร์ซึ่งซิปมีความกว้างและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กทรอนิกส์ 2 3 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.11 พร้อมทั้งยังได้สร้างชั้นแผ่นกรวดอคูมิเนี่ยมลงบนชั้นพอลิอีไมด์โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนที่มีการเจาะรูและไม่เจาะรูอคูมิเนี่ยม เพื่อเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 2.12 ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือโครงสร้างตัวตรวจรู้มีขนาดเล็กมาก ข้อเสียคือ มีกระบวนการสร้างที่ต้องคำนึงกฎการออกแบบลวดลาย ชั้นวัสดุ ความหนา ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีต่างประเทศ และต้นทุนสูง ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดจะอธิบายรายละเอียดในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น พร้อมทั้งผลการทดสอบตลอดจนการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นในบทที่ 4, 5, 6 และ 7 ต่อไป



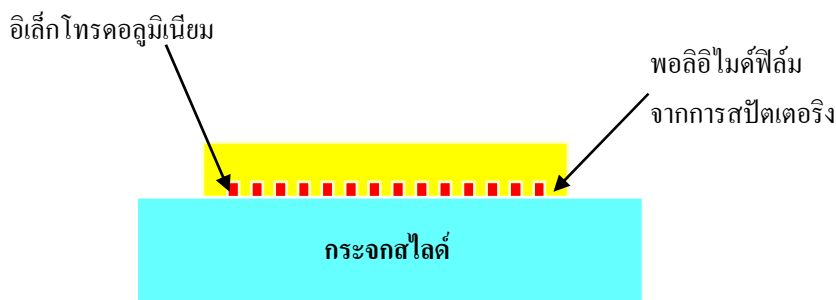
รูปที่ 2.6 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอีไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น



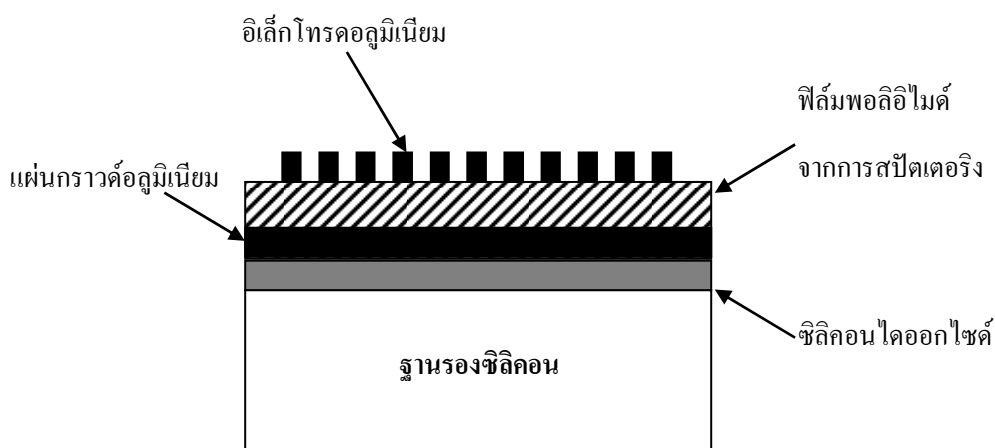
รูปที่ 2.7 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปัตเตอร์พอลิอีไมด์เป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น



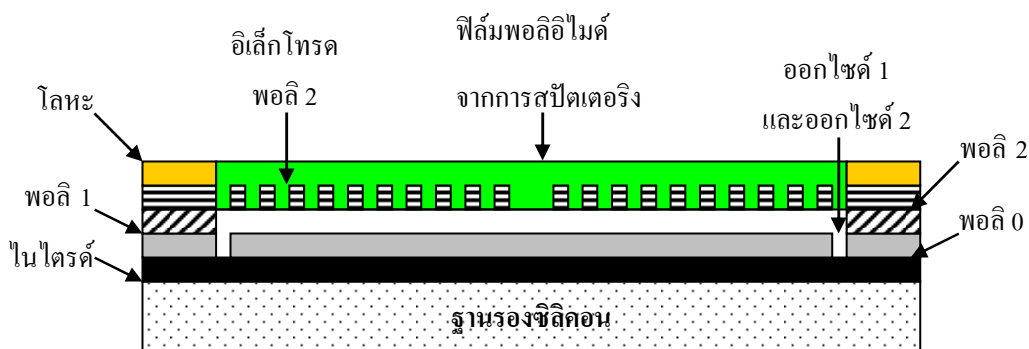
รูปที่ 2.8 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น



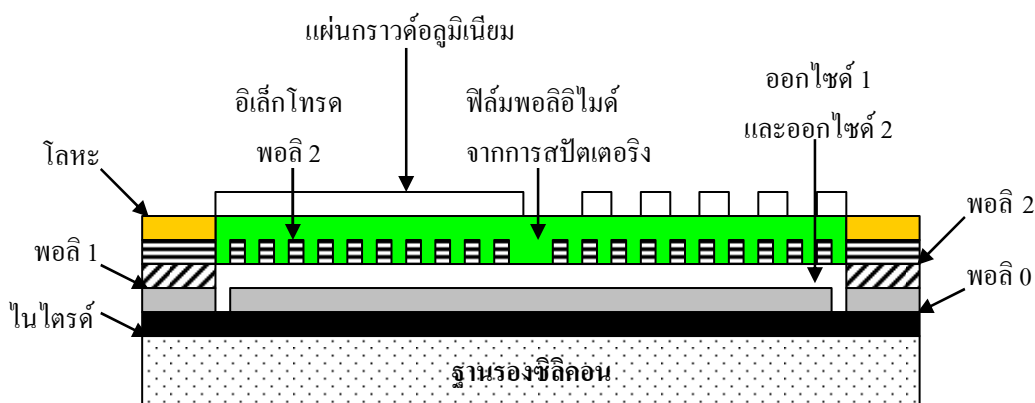
รูปที่ 2.9 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น



รูปที่ 2.10 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น และมีชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียม



รูปที่ 2.11 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความขึ้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอินเดียมเป็นฟิล์มวัสดุไวความขึ้น



รูปที่ 2.12 แผนภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความขึ้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอินเดียมเป็นฟิล์มวัสดุไวความขึ้น และมีชั้นแผ่นกราวด์ออลูมิเนียม

2.6 สรุป

บทที่ 2 ได้รายงานผลการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความขึ้นชนิดต่าง ๆ โดยอาศัยฐานข้อมูลจาก IEEE IEE (IEL online) IOP (Journal of Micromechanics and Microengineering) และScienceDirect การปริทัศน์วรรณกรรมแบ่งออกเป็นสองแนวทางคือ กล่าวถึงตัวตรวจรู้ความขึ้นในอดีตจนถึงปัจจุบัน กลไกการตรวจรู้ความขึ้นของวัสดุหลายชนิดซึ่งมีการสรุปเพื่อระบุวัสดุ และกลไกการตรวจรู้ไว้ดังตารางที่ 2.7 ในการสำรวจวรรณกรรมช่วยให้ผู้วิจัยได้แนวความคิดในการใช้วัสดุใหม่ กระบวนการใหม่ ๆ การออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสมที่สุด การคัดแปลงวัสดุ และกระบวนการที่นำไปสู่การประยุกต์ใช้งาน

แต่เป็นเรื่องยากที่จะสรุปคุณสมบัติ และประสิทธิภาพของตัวตรวจรู้ความชื้นทุกประเภท ตัวอย่างเช่น ประสิทธิภาพของการใช้พอลิเมอร์กับตัวตรวจรู้ ไม่เพียงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุเท่านั้น แต่การออกแบบขั้วอิเล็กโทรดก็มีส่วน อีกทั้งยังรวมไปถึงความหนาของชั้นพอลิเมอร์ และรูปแบบทางกายภาพของชั้นพอลิเมอร์อีกด้วย ผลการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกรรมทำให้ทราบถึงแนวทางวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ใช้ และผลการดำเนินงานจากคณะนักวิจัยต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา รวมไปถึงเกริ่นนำลักษณะตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบและสร้างในงานวิจัยนี้

จากการสำรวจวรรณคดีตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์คือ พอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งนิยมใช้มาอย่างยาวนานแตกต่างกันตรงที่เป็นเทปกาวพอลิอิมิดที่มีราคาถูก และพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริงด้วยความถี่วิทยุซึ่งได้ชั้นฟิล์มพอลิอิมิดที่บางมากช่วยให้การดูดซึมความชื้นและการคายความชื้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในส่วนโครงสร้างอิเล็กโทรดของตัวตรวจรู้ นั้นเป็นแบบซึ่งหิวสานสลับหว่างกัน แต่ต่างกันตรงที่ใช้เทคโนโลยีในการสร้างซึ่งมีข้อจำกัดที่ต่างกัน ได้แก่ เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีราคาถูก แต่ตัวตรวจรู้ที่สร้างได้มีขนาดใหญ่ เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่มีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน แต่ตัวตรวจรู้ที่สร้างได้มีขนาดเล็ก ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ ตลอดจนการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพันธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นในบทที่ 4, 5, 6 และ 7 ต่อไป

ตารางที่ 2.7 สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้แต่ละประเภท

วัสดุ	กลไกการตรวจรู้	ข้อดี	ข้อเสีย
เซรามิก	ไอออนิก	- นำไปใช้ที่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสูงได้ (>150°C)	- มีความเป็นคาบ น้อยที่อุณหภูมิสูง - ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ไวต่อการลดลงของ แก๊ส
	อิเล็กทรอนิกส์	- นำไปใช้ที่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสูงได้ (>150°C)	- มีความเป็นคาบ น้อยที่อุณหภูมิสูง - ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในช่วงกว้าง - ไวต่อการลดลงของ แก๊ส

ตารางที่ 2.7 สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้แต่ละประเภท (ต่อ)

วัสดุ	กลไกการตรวจรู้	ข้อดี	ข้อเสีย
เซรามิก	ของแข็ง-อิเล็กทรอนิกส์	<ul style="list-style-type: none"> - นำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงได้ - ไม่ไวต่อการลดลงของแก๊ส 	<ul style="list-style-type: none"> - ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงกว้าง
พอลิเมอร์	ไดอิเล็กทริก (พอลิไอไมด์ และ CAB)	<ul style="list-style-type: none"> - เสถียรต่อการวัดในย่านกว้าง (0 ถึง 100%RH) - ไม่มีฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิสูง - เสถียรต่ออุณหภูมิและสารเคมี - ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง - มีบ้างที่มีการเลื่อน - การตอบสนองช้า - ฮิสเทอรีซิสมาก
พอลิเมอร์	พอลิอิเล็กทรอนิกส์	<ul style="list-style-type: none"> - ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิน้อย - มีการเลื่อนน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง - ต้องมีการยึดเกาะพันธะพอลิเมอร์ - ไม่ทนทานต่อภาวะปนเปื้อน - ความต้านทานสูงมากบริเวณอากาศแห้ง
ซิลิคอนนาโนเฟส	ไอออนิก	<ul style="list-style-type: none"> - มีความไวมาก - การตอบสนองเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการตัวให้ความร้อนเพื่อคืนสภาพ
ซิลิคอนพอรัน		<ul style="list-style-type: none"> - มีความไวมาก - ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลตอบสนองช้า - อาจต้องการตัวให้ความร้อนเพื่อคืนสภาพ - ไม่เป็นเชิงเส้นสูง

บทที่ 3

หลักการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนับว่ามีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงานวิจัยในศาสตร์ทุก ๆ แขนง ทั้งนี้เพื่อช่วยในการปูพื้นฐานความรู้และความเข้าใจต่อนักวิจัยเอง และอาจนำไปใช้อ้างอิงหรือกล่าวอ้างในการดำเนินงานวิจัยดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ความชื้น (humidity) และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) การแพร่ (diffusion) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ และการปรับเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดความชื้น โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างอิงต่อการดำเนินงานวิจัย

3.2 ความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้น (humidity) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ปรากฏอยู่ในสถานะของแก๊สในอากาศหรือในแก๊สชนิดอื่น ๆ (สุราษฎร์ สุทธิเนตร, 2546) การวัดความชื้นสามารถวัดได้หลายรูปแบบทั้งทางตรงและทางอ้อม รูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การวัดความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity measurement) การวัดความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity measurement) และการวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature measurement) โดยมีความหมายที่แตกต่างกันแต่มีความสัมพันธ์กันซึ่งนิยามและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับความชื้น มีดังต่อไปนี้

ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศหรือแก๊ส อาจเปรียบเทียบได้ว่าเป็นความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ (Suzuki, 2004) แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-1)

$$d_w = \frac{M_w}{V_w + V_g} = \frac{M_w}{V} \quad (3-1)$$

โดยที่ 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)

และอัตราส่วนความชื้น คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้งอธิบายได้ดังสมการที่ (3-2)

$$W = \frac{M_w}{M_g} \quad (3-2)$$

โดยที่ M_w คือ มวลของไอน้ำ (kg)

M_g คือ มวลของอากาศแห้ง (kg)

W คือ อัตราส่วนความชื้น (kg/kg)

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำขณะนั้นต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉพาะ โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%) โดยความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิจนด้วย แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-3)

$$RH(\%) = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (3-3)$$

โดยที่ P_w คือ ความดันไอน้ำบางส่วน (mbar)

P_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

$RH(\%)$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

ความชื้นจำเพาะ (specific humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อผลรวมของมวลของไอน้ำกับมวลของอากาศแห้ง ดังสมการที่ (3-4)

$$q = \frac{M_w}{M_w + M_g} \quad (3-4)$$

โดยที่ M_w คือ มวลของไอน้ำ (kg)

M_g คือ มวลของอากาศแห้ง (kg)

q คือ ความชื้นจำเพาะ (kg/kg)

อัตราส่วน โมล (mole ratio) คือ อัตราส่วนจำนวน โมลของไอน้ำต่อจำนวน โมลของอากาศแห้ง ดังสมการที่ (3-5)

$$y = \frac{N_w}{N_g} \quad (3-5)$$

โดยที่ N_w คือ จำนวน โมลของไอน้ำ

N_g คือ จำนวน โมลของอากาศแห้ง

y คือ อัตราส่วน โมล

เศษส่วน โมล (mole fraction) คือ อัตราส่วนจำนวน โมลของไอน้ำต่อผลรวมจำนวน โมลของไอน้ำ กับจำนวน โมลของอากาศแห้ง ดังสมการที่ (3-6)

$$x = \frac{N_w}{N_w + N_g} = \frac{y}{1 + y} \quad (3-6)$$

โดยที่ N_w คือ จำนวน โมลของไอน้ำ

N_g คือ จำนวน โมลของอากาศแห้ง

y คือ อัตราส่วนจำนวน โมลของไอน้ำต่อจำนวน โมลของอากาศแห้ง

x คือ เศษส่วน โมล

ปริมาตร ppm (ppm by volume) คือ ปริมาตรบางส่วนของไอน้ำต่อผลรวมปริมาตรบางส่วนของไอน้ำกับปริมาตรบางส่วนของอากาศแห้ง ดังสมการที่ (3-7)

$$ppm_v = \frac{V_w}{V_w + V_g} \times 10^6 = \frac{V_w}{V} \times 10^6 \quad (3-7)$$

โดยที่ V_w คือ ปริมาตรบางส่วนของไอน้ำ (m^3)

V_g คือ ปริมาตรบางส่วนของอากาศแห้ง (m^3)

V คือ ผลรวมปริมาตรบางส่วนของไอน้ำกับปริมาตรบางส่วนของอากาศแห้ง (m^3)

ppm_v คือ ปริมาตร ppm

น้ำหนัก ppm (ppm by weight) คือ น้ำหนักโมลของไอน้ำต่อน้ำหนักโมลของอากาศแห้ง ดังสมการที่ (3-8)

$$ppm_w = \frac{M_w}{M_g} \times 10^6 \quad (3-8)$$

โดยที่ M_w คือ น้ำหนักโมลของไอน้ำ (kg)

M_g คือ น้ำหนักโมลของอากาศแห้ง (kg)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) คือ อุณหภูมิซึ่งความดันไอน้ำจริงในอากาศหรือก๊าซมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมินี้ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าเป็น 100% และไอน้ำเริ่มเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ อากาศหรือก๊าซจะไม่สามารถเก็บกักปริมาณไอน้ำได้มากไปกว่านี้ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่าจุดนี้ความดันไอน้ำอิ่มตัวก็จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ความดันไอน้ำจริงยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ความดันไอน้ำจริงในอากาศมีค่าเกินกว่าค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวและเกิดการควบแน่นของไอน้ำกลายเป็นหยดน้ำมากขึ้นตามลำดับ เหมือนกับปรากฏการณ์ที่มีหยดน้ำเกาะอยู่รอบ ๆ แก้วที่มีน้ำแข็งใสอยู่ สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิน้ำในแก้วมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ ณ ขณะนั้น จึงทำให้เกิดการควบแน่นและกลายเป็นหยดน้ำที่บริเวณข้างแก้ว โดยอุณหภูมิจุดน้ำค้างนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันไอน้ำในขณะนั้นด้วย ดังนั้นในการพูดถึงจุดน้ำค้างเราจะต้องพูดถึงความดันที่คงที่ด้วยเสมอ

อุณหภูมิเยือกแข็ง (frost point temperature) คือ อุณหภูมิที่ความชื้นในอากาศเริ่มควบแน่นจนกลายเป็นน้ำแข็ง ความดันเฉพาะส่วน (partial pressure: e) คือ ความดันเฉพาะส่วนของแก๊สแต่ละชนิด ซึ่งโดยทั่วไปในบรรยากาศจะประกอบด้วยแก๊สชนิดต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1 นี้ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแก๊สอุดมคติ (ideal gas component)

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของแก๊สในบรรยากาศ

ส่วนประกอบของแก๊ส	ปริมาตร (%)	น้ำหนัก (%)
ไนโตรเจน (N ₂)	78.03	75.47
ออกซิเจน (O ₂)	20.99	23.20
อาร์กอน (Ar)	0.93	1.28
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	0.03	0.04
แก๊สเฉื่อย : H ₂ , Ne, He, Kr	0.02	0.01

ผลรวมของความดันเฉพาะส่วนของแก๊สแต่ละชนิดจะมีค่าเท่ากับความดันโดยรวมของแก๊สดังสมการที่ (3-9) ความดันแก๊สทั้งหมดเป็นผลรวมของความดันแก๊สแต่ละชนิด

$$p = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots \quad (3-9)$$

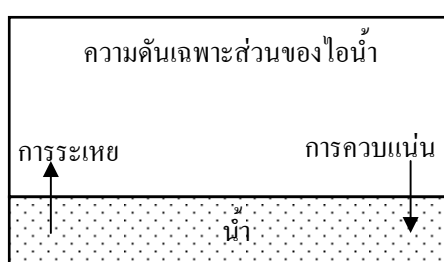
โดยที่ p คือ ผลรวมความดันเฉพาะส่วนของแก๊สแต่ละชนิด (mbar)
เมื่อมีความชื้นเพิ่มเข้ามาในส่วนประกอบของก๊าซอุดมคติซึ่งความชื้นก็คือ น้ำในสถานะแก๊สหรือไอน้ำนั่นเอง สมการที่ (3-9) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (3-10)

$$p = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots + e = p_{da} + e \quad (3-10)$$

โดยที่ e คือ ความดันบางส่วนของไอน้ำ (mbar)

p_{da} คือ ความดันบางส่วนของอากาศ (mbar)

ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturation vapour pressure: e_w) คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเมื่อน้ำในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิคงที่มีการสัมผัสกับแก๊ส จะเกิดกระบวนการสองกระบวนการขึ้นในทันทีกล่าวคือ โมเลกุลของน้ำจะระเหยจากสถานะของของเหลวไปสู่สถานะแก๊ส และโมเลกุลของน้ำจะควบแน่นจากสถานะแก๊สกลับสู่สถานะของเหลวที่สภาวะสมดุล กระบวนการทั้งสองกระบวนการจะเกิดขึ้นในอัตราที่เท่ากันซึ่งจุดนี้คือ จุดอิ่มตัว และความดันเฉพาะส่วน (partial pressure) ของน้ำ ณ จุดนี้ จะเรียกว่าเป็นความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturation vapour pressure) ถ้าความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำ (partial pressure of water vapour) มีค่าน้อยกว่าความดันไอน้ำอิ่มตัว น้ำจะระเหยเข้าสู่สถานะแก๊สมากขึ้น ความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำจะเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งการระเหยและการควบแน่นกลับมาอยู่ในอัตราที่เท่ากันอีกครั้งดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อธิบายเรื่องของความดันไอน้ำอิ่มตัว

ในทางกลับกันถ้าความดันเฉพาะส่วนมีค่ามากกว่าความดันไอน้ำอิ่มตัว จะเกิดการจับตัวของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในสถานะแก๊สเพื่อกลายเป็นหยดน้ำ ในอัตราที่มากกว่าการที่โมเลกุลของน้ำระเหยเข้าสู่สถานะแก๊ส จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลของกระบวนการทั้งสองอีกครั้ง ความดันไอน้ำอิ่มตัวนี้ จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นความดันไอน้ำอิ่มตัวมีค่าเพิ่มขึ้น อากาศก็จะมี ความสามารถในการที่จะรับโมเลกุลของน้ำในสถานะแก๊สเข้าไปได้มากขึ้น จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ดังนี้ ความชื้นสัมบูรณ์ใช้กับการวัดปริมาณของไอน้ำในกระบวนการเฉพาะ เช่น กระบวนการทางเคมี และกระบวนการผลิตอาหาร ต่อมาคือ อัตราส่วนผสม ปริมาตรไอน้ำ และความชื้นจำเพาะใช้วัดปริมาณไอน้ำในกระบวนการผสมแก๊สหลายชนิดเข้าด้วยกัน ส่วนกระบวนการที่ต้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์โดยทั่วไป เช่น ในการวัดปริมาณการให้ความร้อน การระบายอากาศ การทำความเย็นในระบบกระแสไฟฟ้าแรงสูง ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ส่งผลถึงความรู้สึกสบายของมนุษย์ รวมทั้งคุณภาพของอากาศในอาคาร อีกทั้งยังรวมไปถึงใน กระบวนการเฉพาะที่ต้องมีการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์เพราะถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นสาเหตุให้วัสดุเปราะ แตกหักได้ง่าย และเกิดไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงเป็นสาเหตุให้เกิด การรวม และการรวมกันเป็นก้อนของวัสดุ เป็นต้น จุดเยือกแข็งใช้เป็นตัวกำหนดปริมาณความแห้งของแก๊สในอุตสาหกรรมที่ใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่น ส่วนจุดน้ำค้างใช้เป็นตัววัด ปริมาณไอน้ำในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่น อุตสาหกรรมอบแห้ง เป็นต้น

3.3 การแพร่ (diffusion)

การแพร่ของโมเลกุลของสารเป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การเคลื่อนที่นี้เป็นไปในลักษณะทุกทิศทางทุกทางโดยไม่มีทิศทางที่แน่นอนผลจากการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะทำให้ความเข้มข้นของโมเลกุลของสารในภาชนะที่มีเนื้อที่จำกัดนั้นมีความเข้มข้นเท่ากันหมด ตัวอย่างของการแพร่ที่พบได้บ่อย เช่น การแพร่ของเกลือในน้ำ การแพร่ของน้ำหอมในอากาศ การแพร่ของความชื้นในอากาศ การแพร่ของสารที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปสู่สารที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า นอกจากตัวอย่างที่ยกมาให้ดูแล้วยังมีตัวอย่างอีกมากมายที่พบได้ในชีวิตประจำวันเช่น การฉีดสีที่ฆ่าแมลง การเติมน้ำตาลลงในถ้วยกาแฟ การหยดหรือแต่น้ำหอมตามเสื้อผ้า กลิ่นลูกเหม็นกันแมลง ควันจากท่อไอเสียรถยนต์ เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1828 (พ.ศ. 2371) โรเบิร์ต บราวน์ ได้สังเกตปรากฏการณ์อย่างหนึ่ง โดยพบว่าเมื่อเกสรดอกไม้ตกลงในน้ำ เกสรนั้นจะมีการเคลื่อนที่อย่างไม่มีการทิศทางแน่นอนต่อมาจึงเรียกการเคลื่อนที่อย่างไม่มีการทิศทางแน่นอนหรือไร้ทิศทางนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้ให้เหตุผลว่า การเคลื่อนที่ของเกสรดอกไม้ที่เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนนั้นเกิดจากโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่เข้าชนเกสรดอกไม้อยู่ตลอดเวลาทำให้

เกสรดอกไม้เคลื่อนที่ได้ การแพร่เกิดจากพลังงานจลน์ (kinetic energy) ของโมเลกุลหรือไอออนของสาร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และกระทบหรือชนกัน โดยบังเอิญเป็นผลให้เกิดการกระจายในทุกทิศทุกทาง บริเวณที่มีความเข้มข้นของโมเลกุลหรือไอออนน้อยกว่า จนทำให้ทุกบริเวณมีความเข้มข้นของโมเลกุลหรือไอออนเท่ากัน จึงเรียกว่า ภาวะสมดุลของการแพร่ (diffusion equilibrium) ในภาวะเช่นนี้สารต่าง ๆ ก็ยังมีการเคลื่อนที่อยู่แต่อยู่ในลักษณะที่ไปและมาหรือออกเข้าในจำนวนที่เท่า ๆ กันปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ ความเร็วของการแพร่จะมากหรือน้อย เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยในขณะที่ยุณหภูมิสูงโมเลกุลของสารมีพลังงานจลน์มากขึ้น ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำ การแพร่จึงเกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนความแตกต่างของความเข้มข้นนั้นถ้าหากมีความเข้มข้นของสาร 2 บริเวณแตกต่างกันมากจะทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้เร็วขึ้นด้วย เนื่องจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากโมเลกุลมีโอกาสชนและกระทบกันมากทำให้โมเลกุลกระจายออกไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าได้เร็วกว่าเมื่อความเข้มข้นใกล้เคียงกัน รวมทั้งขนาดของโมเลกุลสาร โดยสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะเกิดการแพร่ได้เร็วกว่าสารโมเลกุลใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลเล็กสามารถแทรกไประหว่างโมเลกุลของสารตัวกลางได้ดีกว่าสารโมเลกุลใหญ่ สารโมเลกุลเล็กจึงแพร่ได้ดี และสุดท้ายคือ ความเข้มข้นและชนิดของสารตัวกลาง สารตัวกลางที่มีความเข้มข้นมากจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวกลาง ทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ไปได้ยาก แต่ถ้าหากสารตัวกลางมีความเข้มข้นน้อยโมเลกุลของสารก็จะเคลื่อนที่ได้ดีทำให้การแพร่เกิดขึ้นเร็วด้วย

3.4 การแพร่ในสถานะคงตัว (steady-state diffusion)

การแพร่เป็นกระบวนการที่อาศัยเวลา กล่าวคือ ในเชิงมหภาคแล้วปริมาณไออน้ำที่ถูกขนส่งภายในวัสดุหนึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมากแล้วจำเป็นต้องทราบว่า การแพร่เกิดได้เร็วเท่าไร และอัตราการขนส่งมวลเป็นเท่าไร อัตราเร็วนี้มักถูกแสดงด้วยค่าฟลักซ์การแพร่ (diffusion flux: J) ซึ่งนิยามคือ มวลหรือจำนวนอะตอม M (มีหน่วยเป็น kg) ที่แพร่ผ่านวัสดุต่อพื้นที่หน้าตัดในทิศตั้งฉากต่อหน่วยเวลา (วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548) ดังสมการที่ (3-11)

$$J = \frac{M}{At} \quad (3-11)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน (m^2)

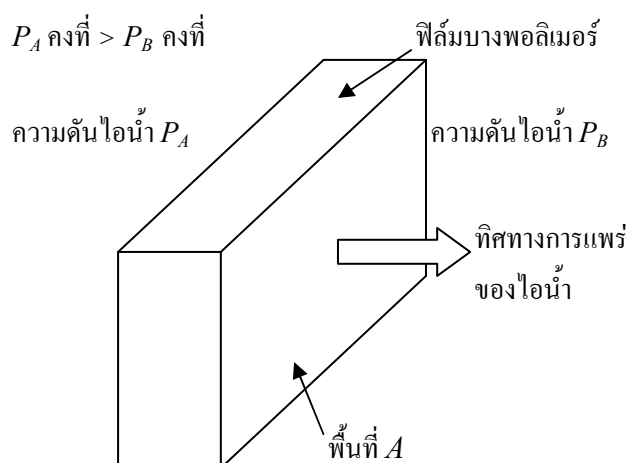
t คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่ (sec)

J คือ ฟลักซ์การแพร่ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ จะเขียนสมการที่ (3-11) ได้เป็นสมการที่ (3-12)

$$J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (3-12)$$

ในกรณีที่ฟลักซ์การแพร่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะเกิดสภาวะคงตัวขึ้น ตัวอย่างหนึ่งของการแพร่ในสภาวะคงตัวได้แก่ การแพร่ของไอน้ำผ่านชั้นพอลิเมอร์โดยที่ความเข้มข้นหรือความดันของไอน้ำที่กำลังแพร่นั้นถูกรักษาไว้ให้คงที่ ณ ผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



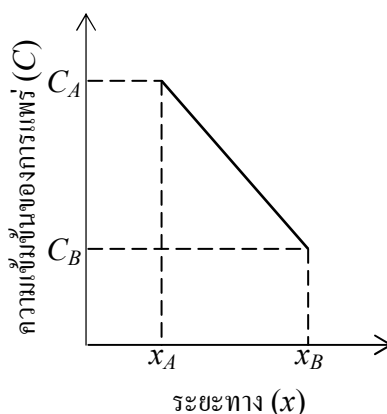
รูปที่ 3.2 การแพร่ในสภาวะคงตัวผ่านฟิล์มบางพอลิเมอร์

เมื่อพล็อตค่าความเข้มข้น C เทียบกับตำแหน่ง (หรือระยะทาง) ภายในพอลิเมอร์ x จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นหรือหน้าตัดข้างของความเข้มข้น (concentration profile) ค่าความชันของเส้นโค้งนี้ ณ จุดหนึ่ง ๆ เรียกว่า อัตราผลต่างความเข้มข้นหรือเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (concentration gradient) ดังสมการที่ (3-13)

$$\text{concentration gradient} = \frac{dC}{dx} \quad (3-13)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของการแพร่ (kg/m^3)

x คือ ระยะทาง (m)



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นแบบเส้นตรงสำหรับสภาพการแพร่ในรูปที่ 3.2

ในกรณีนี้หน้าตัดข้างของความเข้มข้นเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 3.3 ดังนั้น จะได้สมการที่ (3-14)

$$\text{concentration gradient} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad (3-14)$$

โดยที่ ΔC คือ ผลต่างความเข้มข้นของการแพร่ (kg/m^3)

Δx คือ ผลต่างของระยะทาง (m)

C_A คือ ความเข้มข้นของการแพร่ที่ตำแหน่ง A (kg/m^3)

C_B คือ ความเข้มข้นของการแพร่ที่ตำแหน่ง B (kg/m^3)

x_A คือ ระยะทางตำแหน่ง A (m)

x_B คือ ระยะทางตำแหน่ง B (m)

ในปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ บางครั้งจะนิยามค่าความเข้มข้นในรูปของมวลของสิ่งที่กำลังแพร่ต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้นจะสะดวกกว่า คณิตศาสตร์ของการแพร่ในสถานะคงตัวไปในทิศทางเดียว (x) เป็นความสัมพันธ์ง่าย ๆ คือ ฟลักซ์การแพร่แปรผันตรงกับเกรเดียนต์ของความเข้มข้น ดังสมการที่ (3-15)

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (3-15)$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/sec)

J คือ ฟลักซ์การแพร่ ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

C คือ ความเข้มข้นของการแพร่ (kg/m^3)

x คือ ระยะทาง (m)

ค่าคงที่ของการแพร่แปรผันตรง D เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) เครื่องหมายลบในสมการระบุว่าทิศทางของการแพร่คือ ทิศที่ทำให้อัตราผลต่างของความเข้มข้นน้อยลง กล่าวคือ การแพร่จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำกว่านั่นเอง สมการที่ (3-15) บางครั้งก็เรียกว่า กฎข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law of diffusion)

ตัวอย่างของการแพร่ในสถานะคงตัวในทางปฏิบัติ เช่น การทำให้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ด้านหนึ่งของแผ่นพลาสติกบางจะถูกล้างสัมผัสกับแก๊สที่ยังไม่สะอาดประกอบด้วยไฮโดรเจนและแก๊สอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน และความชื้น แก๊สไฮโดรเจนจะแพร่ผ่านแผ่นโลหะนี้ได้รวดเร็วกว่า และไปออกยังอีกด้านหนึ่งของแผ่นซึ่งถูกควบคุมความดันของไฮโดรเจนไว้ที่ความดันต่ำและคงที่

3.5 การแพร่ในสถานะไม่คงตัว (nonsteady-state diffusion)

สภาพการแพร่ที่เกิดขึ้นจริงมักเป็นแบบไม่คงตัวนั่นคือ ฟลักซ์การแพร่และอัตราผลต่างของความเข้มข้น ณ จุดหนึ่ง ๆ ในของวัสดุมีค่าแปรผันไปตามเวลา และมีการสะสมหรือลดลงของสารที่กำลังแพร่ ณ จุดนั้นเกิดขึ้นด้วย ภายใต้เงื่อนไขของสถานะไม่คงตัว สมการที่ (3-15) ไม่เหมาะสม แต่จะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ดังสมการที่ (3-16)

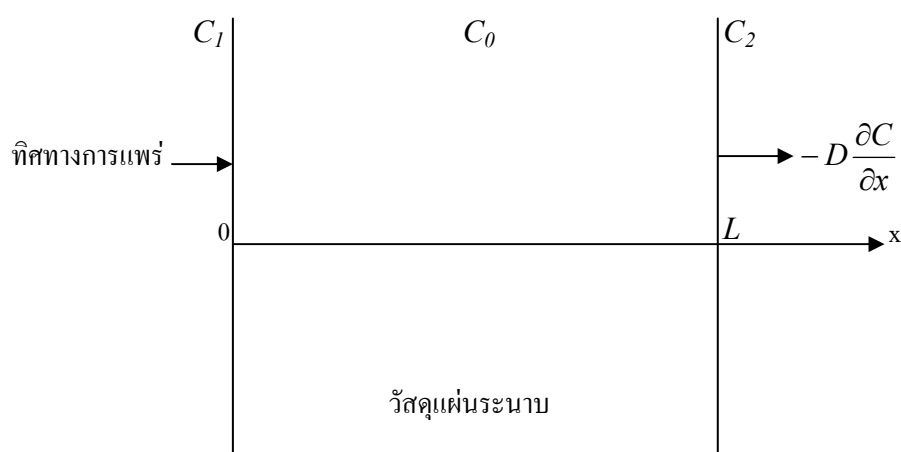
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3-16)$$

ซึ่งเรียกว่า กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น (ซึ่งต้องตรวจสอบเป็นกรณี ๆ ไปในการแพร่แต่ละสถานการณ์) สมการที่ (3-16) จะถูกทำให้ง่ายขึ้นได้เป็นสมการที่ (3-17)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3-17)$$

ผลเฉลยของสมการนี้ (ความเข้มข้นที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา) จะถูกหาได้ก็ต่อเมื่อมีการระบุเงื่อนไขขอบเขตทางกายภาพที่เหมาะสม วัสดุแผ่นระนาบเป็นวัสดุที่มีความบาง ทำให้ของไหล

เช่น ของเหลว ใอน้ำ และแก๊ส เป็นต้นสามารถแพร่ผ่านเข้าออกผิวหน้าของวัสดุได้ การแพร่หนึ่งมิติในวัสดุแผ่นระนาบโดยมีเงื่อนไขขอบเขตเริ่มจากที่ตำแหน่ง $x = 0$ (ผิวหน้าที่แพร่ผ่านเข้าสู่วัสดุแผ่นระนาบ) ถึง $x = L$ (ผิวหน้าที่แพร่ออกจากวัสดุแผ่นระนาบ) ของแกน x โดยมีสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ ดังรูปที่ 3.4 พิจารณาตามเงื่อนไขการแพร่ในสภาวะไม่คงตัว เมื่อมีการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าวัสดุ ($x = 0$) มีความเข้มข้น C_1 จากนั้นที่ผิวหน้าที่แพร่ออก ($x = L$) มีความเข้มข้น C_2 จนกระทั่งวัสดุมีความเข้มข้น C_0 นั่นคือ การแพร่เข้าสู่สภาวะคงตัวในช่วงระยะเวลาที่จำกัด ผลเฉลยของสมการการแพร่หาได้จากวิธีลาปลาซทรานสฟอร์มหรือวิธีการแยกตัวแปร (Crank, 1975)



รูปที่ 3.4 วัสดุแผ่นระนาบความหนา L

จากสมการ (3-17) สามารถจัดรูปสมการของการแพร่ตามแนวแกน x ในหนึ่งมิติ เมื่อ D คงที่ จะได้

$$C_{x,t} = C_1 + (C_2 - C_1) \frac{x}{L} + \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(C_2 \cos n\pi - C_1)}{n} \sin \frac{n\pi x}{L} \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2 t}{L^2}\right) + \frac{4C_0}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin \frac{(2m+1)\pi x}{L} \exp\left(-\frac{D(2m+1)^2\pi^2 t}{L^2}\right) \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-18) เมื่อ t เข้าสู่อนันต์ พจน์เอ็กซ์โพเนนเชียลจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการ (3-18) ใหม่ จะได้ผลรวมทั้งหมดของการแพร่ในวัสดุแผ่นระนาบในช่วงเวลา t คือ M_t และ M_{∞} คือ ผลรวมทั้งหมดของการแพร่ในวัสดุแผ่นระนาบเมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์ จะได้สมการที่ (3-19)

$$\frac{M_\infty - M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{L^2} Dt\right) \quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-19) สามารถจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right) \quad (3-20)$$

โดยที่ M_t คือ มวลรวมของการแพร่ที่เข้าสู่วัสดุแผ่นระนาบในช่วงเวลา t

M_∞ คือ มวลของของการแพร่ที่เข้าสู่วัสดุแผ่นระนาบเมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์

$$\text{ซึ่ง } M_\infty = L \left\{ \frac{1}{2} (C_1 + C_2) - C_0 \right\}$$

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/sec)

L คือ ความหนาของวัสดุในทิศทางเดียวกันกับการแพร่ (m)

การวัดการแพร่สามารถบันทึกผลเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับแรงดันเอาต์พุต พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (3-20) สามารถเขียนอยู่ในรูปของแรงดันเอาต์พุตบรรทัดฐานได้เป็นสมการที่ (3-21) และ (3-22)

$$V_{norm} = \frac{V_t - V_{dry}}{V_{wet} - V_{dry}} = \frac{M_t}{M_\infty} \quad (3-21)$$

$$V_{norm} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right) \quad (3-22)$$

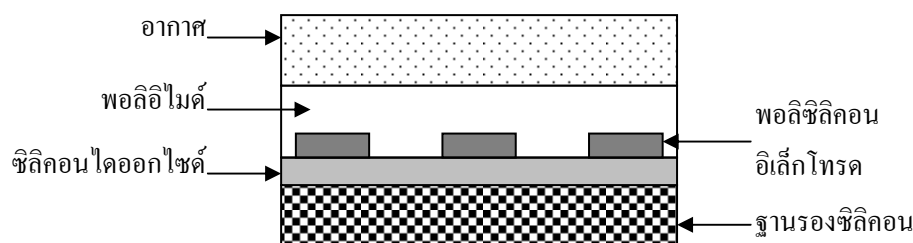
โดยที่ V_t คือ แรงดันเอาต์พุตที่เวลา t ใด ๆ (V)

V_{dry} คือ แรงดันเอาต์พุตขณะอากาศแห้ง (<10%RH) (V)

V_{wet} คือ แรงดันเอาต์พุตขณะอากาศเปียก (90%RH) (V)

V_{norm} คือ แรงดันเอาต์พุตบรรทัดฐาน

สมมติโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นดังรูปที่ 3.5 มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่วัสดุแผ่นระนาบ ค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามการแพร่ความชื้นในชั้นพอลิอิมไค์ที่เวลา t ใด ๆ จะได้สมการที่ (3-23) และ (3-24)



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ

$$C_{norm} = \frac{C_t - C_{dry}}{C_{wet} - C_{dry}} = \frac{M_t}{M_\infty} \quad (3-23)$$

$$C_{norm} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{D(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right) \quad (3-24)$$

โดยที่ C_t คือ ความจุไฟฟ้าที่เวลา t ใด ๆ (F)

C_{dry} คือ ความจุไฟฟ้าขณะอากาศแห้ง (<10%RH) (F)

C_{wet} คือ ความจุไฟฟ้าขณะอากาศเปียก (90%RH) (F)

C_{norm} คือ แรงดันเอาต์พุตบรรทัดฐาน

จากสมการที่ (3-23) และ (3-24) ค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามการแพร่ของไอน้ำในแผ่นวัสดุ สูตรนี้จะนำมาใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้

3.6 ความจุไฟฟ้ากับการแพร่ความชื้นภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พิจารณาความจุไฟฟ้าในสถานะชั่วคราวเมื่อมีการแพร่ทั้งสี่ด้านภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 3.6 แสดงการแพร่ความชื้นภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ซึ่งมีความยาว $2a$ กว้าง $2b$ และสูง d ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ในวัสดุในทิศทางเดียวตามแนวแกน x (isotropic substances) (Crank, 1975) ดังที่กล่าวมาแล้วจากสมการที่ (3-15) คือ

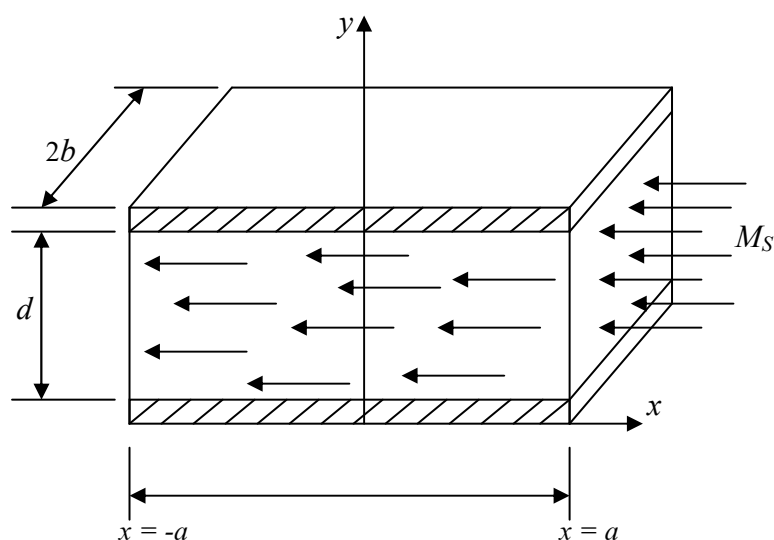
$$J = -D \frac{\partial M}{\partial x} \quad (3-25)$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/sec)

M คือ ความเข้มข้นของการแพร่ (kg/m^3)

J คือ ฟลักซ์การแพร่ ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

x คือ ระยะทาง (m)



รูปที่ 3.6 รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแพร่ผ่านของความชื้น ความเข้มข้นความชื้นทั่วทั้งพื้นผิว กำหนดให้คือ M_S

พิจารณาปริมาตรบางส่วนในรูปของท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งด้านข้างขนานกันกับแกนพิกัดและมีความยาว $2dx$, $2dy$, $2dz$ ให้จุดศูนย์กลางของส่วนย่อยอยู่ที่ $P(x,y,z)$ โดยที่ความเข้มข้นการแพร่ในวัสดุคือ M ให้ ABCD และ A'B'C'D' เป็นผิวตั้งฉากกับแกน x ดังรูปที่ 3.7 เมื่อฟลักซ์การแพร่เข้าสู่ปริมาตรบางส่วนตลอดผิว ABCD ในแผ่นระนาบ $x-dx$ จะได้การเปลี่ยนแปลงของมวลต่อเวลา

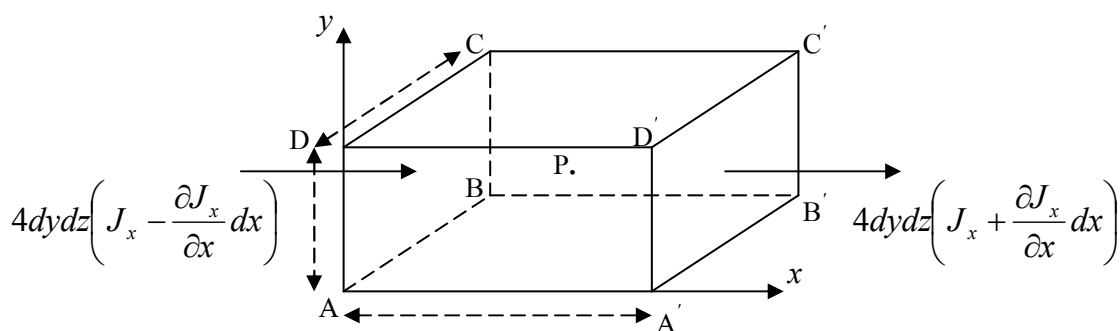
$$4dydz \left(J_x - \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right)$$

โดยที่ J_x คือฟลักซ์การแพร่ตามแนวแกน x ซึ่งสอดคล้องกับแผ่นระนาบ P โดยตลอด เช่นเดียวกันกับฟลักซ์การแพร่ผ่านตลอดผิว A'B'C'D' จะได้การเปลี่ยนแปลงของมวลต่อเวลา

$$4dydz \left(J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x} dx \right)$$

นั่นคืออัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรบางส่วนจากการแพร่ในแนวแกน x นี้จะได้

$$-8dx dy dz \frac{\partial J_x}{\partial x}$$



รูปที่ 3.7 ปริมาตรบางส่วนของปริมาตรทั้งหมด

เช่นเดียวกันจากผิวในแนวแกน y และ z จะได้

$$-8dx dy dz \frac{\partial J_z}{\partial z} \quad \text{และ} \quad -8dx dy dz \frac{\partial J_y}{\partial y}$$

เมื่อรวมการวิเคราะห์ในแนวแกน x y และ z เข้าด้วยกัน จะได้

$$8dx dy dz \frac{\partial M}{\partial t}$$

และเขียนใหม่ จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (3-26)$$

ถ้าสัมพันธ์วิธีการแพร่คงที่ J_x, J_y, J_z จากสมการที่ (3-25) และ (3-26) จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (3-27)$$

จากสมการที่ (3-27) สามารถแก้สมการโดยการกำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นสำหรับความเข้มข้น พื้นผิวด้านบนและด้านล่างเป็นขั้วอิเล็กโทรดสำหรับอ่านค่าความจุไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6 เมื่อไม่มีเกรเดียนต์ของความเข้มข้นตามแนวแกน z ดังนั้นจากกฎข้อที่ 1 ของฟิสิกส์ จะได้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (3-28)$$

สมมติที่สภาวะเริ่มต้นเป็นค่าคงที่ (คือ ที่เวลาเริ่มต้น ความเข้มข้นไอออน้ำคงที่ในชั้นตรวจรู้) เริ่มต้นจากชั้นตรวจรู้เปิดออกสู่ความชื้นในสภาพแวดล้อมทันทีทันใดจนกระทั่งไปถึงสภาวะคงตัว สมมติให้เงื่อนไขขอบเขตคงที่สอดคล้องกับลักษณะความชื้นสัมพัทธ์ในสิ่งแวดล้อม (Jahori, 2003) ดังนั้นการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนด้วยกันคือ

$$M = M_1 + M_2 \quad (3-29)$$

โดยที่ M_1 และ M_2 เป็นผลเฉลยจากทั้งสองสมการภายใต้ลักษณะสนามขอบเขตและสภาวะเริ่มต้น

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) \quad \text{กำหนดให้} \quad \begin{aligned} M_1(x, y, 0) &= M_0 \\ M_1(x, y, t) &= 0 \end{aligned} \quad (3-30)$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) \quad \text{กำหนดให้} \quad \begin{aligned} M_2(x, y, 0) &= 0 \\ M_2(x, y, t) &= M_s \end{aligned} \quad (3-31)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (3-30) และ (3-31) คือ

$$M_1(x, y, t) = M_0 \frac{16}{\pi^2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \exp(-\alpha_{m,n} t)}{(2n+1)(2m+1)} \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right) \right] \quad (3-32)$$

$$M_2(x, y, t) = M_s - M_s \frac{16}{\pi^2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \exp(-\alpha_{m,n} t)}{(2n+1)(2m+1)} \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right) \right] \quad (3-33)$$

ตามลำดับ โดยที่

$$\alpha_{m,n} = \frac{D\pi^2}{4} \left[\frac{(2m+1)^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{b^2} \right] \quad (3-34)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (3-35) ได้จากการรวมกันของสมการที่ (3-32) และ (3-33) นั่นคือ

$$M(x, y, t) = M_s + (M_0^2 - M_s) \frac{16}{\pi^2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \exp(-\alpha_{m,n} t)}{(2n+1)(2m+1)} \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right) \right] \quad (3-35)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิขึ้นดั่งนั้นจะได้

$$\epsilon_r(x, y, t) = K_1 M(x, y, t) + K_2 \quad (3-36)$$

โดยที่ K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่หาได้จากลักษณะเฉพาะของไอ้ภายใต้การควบคุม ให้ C เป็นความจุไฟฟ้าของรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้

$$C = \int_{-b-a}^b \int_a^a \frac{\epsilon_0 \epsilon_r(x, y, t)}{d} dx dy \quad (3-37)$$

โดยที่ a คือ ความยาวครึ่งส่วน (m)

b คือ ความกว้างครึ่งส่วน (m)

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m)

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

ε_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุไดอิเล็กทริก

โดยการแทนที่สมการที่ (3-36) ลงในสมการที่ (3-37) และจัดสมการจะ ได้ความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{4\varepsilon_0 K_2 ab}{d} + \frac{\varepsilon_0 K_1}{d} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a M(x, y, t) dx dy \quad (3-38)$$

$$C = \frac{4\varepsilon_0 K_2 ab}{d} + \frac{\varepsilon_0 K_1}{d} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \left[M_s + (M_0^2 - M_s) \frac{16}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \exp(-\alpha_{m,n} t)}{(2n+1)(2m+1)} \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right) \right] dx dy \quad (3-39)$$

จากสมการที่ (3-39) ทำให้อยู่ในรูปอย่างง่าย โดยหาความจุไฟฟ้าบรรทัดฐานด้วยการเทียบกับความจุไฟฟ้าในสภาวะคงตัว นั่นคือ

$$C_{norm} = \frac{C_t - C_{dry}}{C_{wet} - C_{dry}} \quad (3-40)$$

แทนที่สมการที่ (3-39) ลงในสมการที่ (3-40) สมการสุดท้ายสำหรับ C_{norm} คือ

$$C_{norm} = \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n}}{(2n+1)(2m+1)} \int_{-a-b}^a \int_{-a}^b \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right) - \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \exp(-\alpha_{m,n} t)}{(2n+1)(2m+1)} \int_{-a-b}^a \int_{-a}^b \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right)}{\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n}}{(2n+1)(2m+1)} \int_{-a-b}^a \int_{-a}^b \cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right)} \quad (3-41)$$

3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ

ในงานวิจัยนี้ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นใช้หลักการของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตามความชื้น โดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าสภาพยอมของวัสดุที่นำมาใช้เป็นชั้นไวความชื้นซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นดังสมการ (3-42)

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (3-42)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุไดอิเล็กทริก

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

A คือ พื้นที่ซึ่งเส้นสนามไฟฟ้าลากผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m)

เมื่อพิจารณาในกรณีที่โครงสร้างของตัวเก็บประจุมีลักษณะเป็นขั้วอิเล็กโทรดมากกว่า 2 ขั้วขึ้นไปจะได้เป็นสมการที่ (3-43)

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A (N-1)}{d} \quad (3-43)$$

โดยที่ N คือ จำนวนขั้วอิเล็กโทรด

ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำแบนราบ (capacitance between horizontal flat conductor)

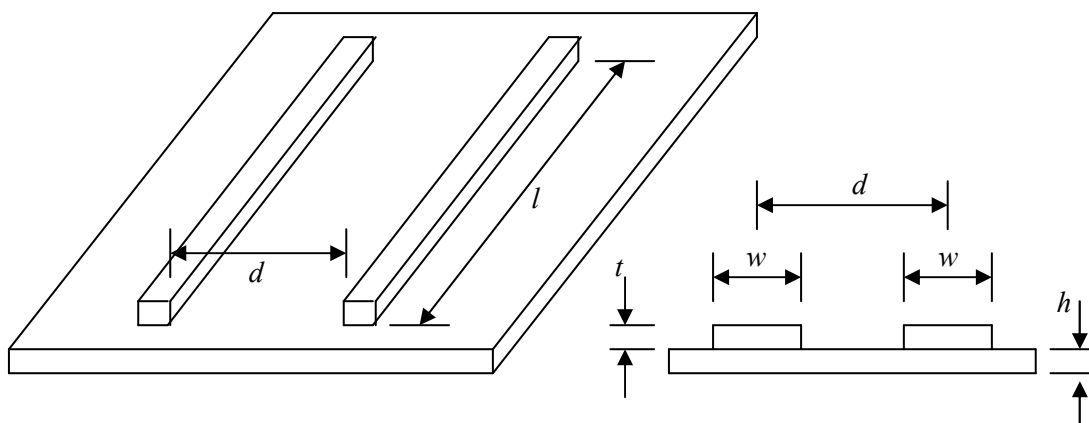
ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบนราบ (Walker, 1990) ที่วางตัวอยู่บนแผ่นวงจรมพิมพ์ดังรูปที่ 3.8 สามารถหาสมการประมาณค่าได้ดังนี้

$$C \approx \frac{\pi \epsilon_{r(eff)} \epsilon_0 l (N-1)}{\ln\left(\frac{\pi(d-w)}{w+t} + 1\right)} \quad (3-44)$$

กรณีที่ 1 ถ้าอัตราส่วนระหว่างระยะทาง d กับความหนาของแผ่นวงจรมพิมพ์ $h \gg 1$ แล้ว $\epsilon_{(eff)} \approx 1$

กรณีที่ 2 ถ้า $d \approx h$ แล้ว $\epsilon_{r(eff)} = \frac{(1 + \epsilon_r)}{2}$

ถ้า $d \gg w$ สามารถประมาณค่าจากสมการที่ (3-44) จะได้



รูปที่ 3.8 โลหะตัวนำ 2 ตัว วางห่างกันเป็นระยะทาง d บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีความหนา h และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r

$$C \approx \frac{\pi \epsilon_{r(\text{eff})} \epsilon_0 l (N-1)}{\ln\left(\frac{\pi d}{w+t}\right)} \quad (3-45)$$

สำหรับในกรณีที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความกว้างไม่เท่ากัน ($w_1 \neq w_2$) สามารถประมาณค่าความจุไฟฟ้าได้

$$C \approx \frac{2\pi \epsilon_{r(\text{eff})} \epsilon_0 l (N-1)}{\ln\left(\pi^2 d^2 \left(\frac{1}{w_1+t}\right) \left(\frac{1}{w_2+t}\right)\right)} \quad (3-46)$$

โดยที่	C	คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)
	$\epsilon_{r(\text{eff})}$	คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุไดอิเล็กทริก ($\epsilon_{r(\text{eff})} = \frac{(1 + \epsilon_r)}{2}$)
	ϵ_0	คือ ค่าสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)
	w	คือ ความกว้างของขั้วอิเล็กโทรด (m)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m)
	t	คือ ความหนาของขั้วอิเล็กโทรด (m)
	h	คือ ความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์ (m)
	w_1	คือ ความกว้างของขั้วอิเล็กโทรด (m)
	w_2	คือ ความกว้างของขั้วอิเล็กโทรด (m)

N คือ จำนวนขั้วเล็กโทรด

ค่าความจุไฟฟ้ารวมระหว่างแผ่นตัวนำแบนราบแบบมีแผ่นกราวด์ (mutual capacitance between a flat conductor and a ground plane) ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบนราบที่วางตัวอยู่บนแผ่นวงจรมิพพ์ และมีแผ่นกราวด์ (Walker, 1990) ดังรูปที่ 3.9 สามารถหาสมการประมาณค่าได้ดังนี้

$$C_m \approx \frac{\epsilon_r \epsilon_0 l (N-1)}{\pi} K_{L1} K_{C1} \left(\frac{w}{d} \right)^2 \quad (3-47)$$

จากสมการที่ (3-47) ใช้ได้ในกรณีที่ $\frac{2h}{d} < 0.3$

โดยที่ C_m คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม (F)

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมของวัสดุไดอิเล็กทริก

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

w คือ ความกว้างของขั้วเล็กโทรด (m)

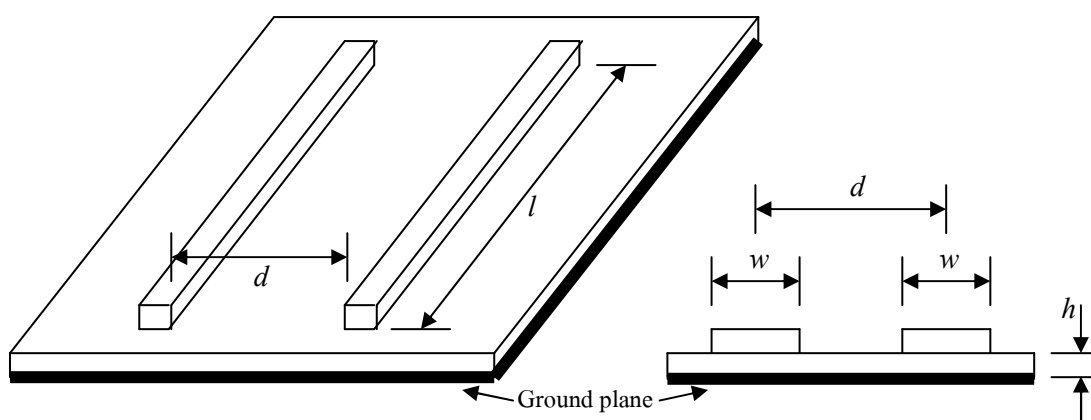
d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วเล็กโทรด (m)

h คือ ความหนาของแผ่นวงจรมิพพ์ (m)

K_{L1} คือ fringing factor

K_{C1} คือ fringing factor

N คือ จำนวนขั้วเล็กโทรด



รูปที่ 3.9 โลหะตัวนำ 2 ตัว วางห่างกันเป็นระยะทาง d บนแผ่นวงจรมิพพ์ที่มีความหนา h และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r

3.8 การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดความชื้น

การเปรียบเทียบมาตรฐานในลักษณะนี้จะใช้ความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวหลายชนิดเป็นมาตรฐาน ณ อุณหภูมิคงที่ ขั้นตอนในการเตรียมสารละลายเกลืออิมิตัวนั้น มีอธิบายไว้ในเอกสาร ASTM Standard E 104-85, OIML R121-EN. (1996) หรือ เอกสาร DIN 50008 การเปรียบเทียบมาตรฐานทำได้โดยเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ให้ตรงกับมาตรฐานวัดความชื้นสัมพัทธ์ อีกวิธีหนึ่งคือใช้สารละลายเกลืออิมิตัวซึ่งแต่ละชนิดจะให้ความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน ทำได้โดยบรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวลงในภาชนะที่ปิดสนิทความชื้นภายในภาชนะที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายที่ใช้ ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ขั้นตอนการเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิมิตัวมีดังนี้ เริ่มจากนำเกลือใส่ลงในภาชนะที่เป็นแก้ว เช่น บีกเกอร์ เติมน้ำบริสุทธิ์ลงในภาชนะจนเกลือเปียก คนให้เกลือละลายในน้ำ เติมเกลือพร้อมคนจนกระทั่งเกลือไม่สามารถละลายได้อีก นำบีกเกอร์ไปอุ่นด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์เพื่อให้เกลือละลายพร้อมทั้งเติมเกลือจนกระทั่งไม่สามารถละลายได้อีก ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จนสารละลายเกลือตกผลึก เติสารละลายเกลือที่ได้ลงในภาชนะที่เป็นแก้ว จากนั้นนำตัวตรวจรู้ความชื้นวางไว้ด้านบนของภาชนะ ข้อควรระวังอย่าให้ตัวตรวจรู้สัมผัสกับสารละลาย Һุ่มภาชนะพร้อมกับตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง และตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยพลาสติกห่อหุ้มอาหาร แล้วทิ้งไว้ประมาณ 2-6 ชั่วโมง ความชื้นภายในภาชนะจะมีค่าเท่ากับค่าความชื้นของสารละลายเกลือ นั้น ๆ โดยความชื้นจะแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งตรวจสอบได้จากตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าหรือต่อตัวตรวจรู้ความชื้นเข้ากับวงจรอะสเตบิลมัลติไวเบรเตอร์แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น ทำซ้ำวิธีการเดิมเพียงแต่เปลี่ยนชนิดของเกลือที่ให้ค่าความชื้นแตกต่างกันออกไป ณ อุณหภูมิคงที่

ตารางที่ 3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	ลิเทียมคลอไรด์ (lithium chloride)	โพแทสเซียมอะซิเตต (potassium acetate)	แมกนีเซียมคลอไรด์ (magnesium chloride)
0	11.23 ±0.54		33.66 ±0.33
5	11.26 ±0.47		33.60 ±0.28
10	11.29 ±0.41		33.47 ±0.24
15	11.30 ±0.35	23.28 ±0.53	33.30 ±0.21
20	11.31 ±0.31	23.40 ±0.32	33.07 ±0.18

ตารางที่ 3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	ลิเทียมคลอไรด์ (lithium chloride)	โพแทสเซียมอะซิเตด (potassium acetate)	แมกนีเซียมคลอไรด์ (magnesium chloride)
25	11.30 ±0.27	23.11 ±0.25	32.78 ±0.16
30	11.28 ±0.24	22.51 ±0.32	32.44 ±0.14
35	11.25 ±0.22	21.61 ±0.53	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 3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคาร์บอเนต (potassium carbonate)	แมกนีเซียมไนเตรด (magnesium nitrate)	โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride)
0	43.13 ±0.66	60.35 ±0.55	75.51 ±0.34
5	43.13 ±0.50	58.86 ±0.43	75.65 ±0.27
10	43.14 ±0.39	57.36 ±0.33	75.67 ±0.22
15	43.15 ±0.33	55.87 ±0.27	75.61 ±0.18
20	43.16 ±0.33	54.38 ±0.23	75.47 ±0.14

ตารางที่ 3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคาร์บอเนต (potassium carbonate)	แมกนีเซียมไนเตรด (magnesium nitrate)	โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride)
25	43.16 ±0.39	52.89 ±0.22	75.29 ±0.12
30	43.17 ±0.50	51.40 ±0.24	75.09 ±0.11
35		49.91 ±0.29	74.87 ±0.12
40		48.42 ±0.37	74.68 ±0.13
45		46.93 ±0.47	74.52 ±0.16
50		45.44 ±0.60	74.43 ±0.19
55			74.41 ±0.24
60			74.50 ±0.30
65			74.71 ±0.37
70			75.06 ±0.45
75			75.58 ±0.55
80			76.29 ±0.65
85			
90			
95			
100			

ตารางที่ 3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride)	โพแทสเซียมไนเตรด (potassium nitrate)	โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate)
0	88.61 ±0.53	96.33 ±2.90	98.77 ±1.10
5	87.67 ±0.45	96.27 ±2.10	98.48 ±0.91
10	86.77 ±0.39	95.96 ±1.40	98.18 ±0.76
15	85.92 ±0.33	95.41 ±0.96	97.89 ±0.63
20	85.11 ±0.29	94.62 ±0.66	97.59 ±0.53

ตารางที่ 3.2 ค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)			
อุณหภูมิ (°C)	โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride)	โพแทสเซียมไนเตรด (potassium nitrate)	โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate)
25	84.34 ±0.26	93.58 ±0.55	97.30 ±0.45
30	83.62 ±0.25	92.31 ±0.60	97.00 ±0.40
35	82.95 ±0.25	90.79 ±0.83	96.71 ±0.38
40	82.32 ±0.25	89.03 ±1.20	96.41 ±0.38
45	81.74 ±0.28	87.03 ±1.80	96.12 ±0.40
50	81.20 ±0.31	84.78 ±2.50	95.82 ±0.45
55	80.70 ±0.35		
60	80.25 ±0.41		
65	79.85 ±0.48		
70	79.49 ±0.57		
75	79.17 ±0.66		
80	78.90 ±0.77		
85	78.68 ±0.89		
90	78.50 ±1.00		
95			
100			

3.9 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการวัดความชื้นที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ได้แก่ ความชื้น ความชื้นสัมบูรณ์ ความชื้นสัมพัทธ์ จุดน้ำค้าง การแพร่ การแพร่ในสถานะคงตัว การแพร่ในสถานะไม่คงตัว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ และการปรับเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดความชื้น อันจะเป็นฐานความรู้ที่สำคัญในการวิเคราะห์ อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของตัวตรวจรู้อันจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุในบทต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมพิมพ์

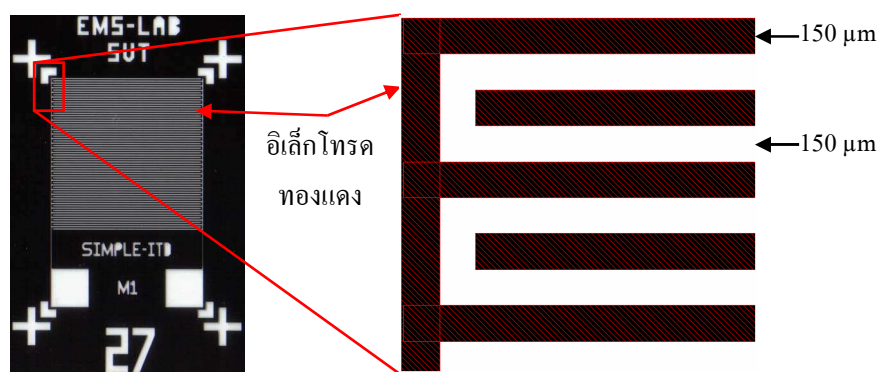
4.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีแผ่นวงจรมพิมพ์เป็นเทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้อย่างยาวนานและกว้างขวางในการสร้างวงจรรวม วงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์ควบคุมเครื่องจักร อุตสาหกรรม และอื่น ๆ เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีที่มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนในการสร้างมีราคาถูก ประกอบกับไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรอัตโนมัติขนาดใหญ่ในการสร้าง สามารถทำได้ด้วยมือ จึงได้นำเทคโนโลยีนี้มาใช้ในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีราคาถูก และสามารถผลิตได้ในอุตสาหกรรมจริงเป็นปริมาณมาก ๆ ได้

4.2 การใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมพิมพ์ในบทนี้แบ่งวัสดุไวความชื้นออกเป็น 2 ประเภท คือ ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น และใช้การสปีดเทอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นก่อน เนื่องจากพอลิอิมิดเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงตามความชื้น ดังนั้นจึงได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นสำหรับตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ ซึ่งโดยทั่วไปมีโครงสร้างประกอบด้วยอิเล็กโทรดแบบซี่หวี ซึ่งสร้างขึ้นบนแผ่นฐานรอง และชั้นของวัสดุไวความชื้นซึ่งถูกเคลือบทับลงบนขั้วอิเล็กโทรด พอลิอิมิดที่นิยมใช้ในกระบวนการเช่นนี้ตามปกติจะอยู่ในรูปของของเหลวหนืด ซึ่งสามารถนำมาหยดบนแผ่นฐานรองแล้วทำการกระจายให้ทั่วแผ่นด้วยการหมุนความเร็วรอบสูง (spin coating) พอลิอิมิดในรูปแบบนี้มีราคาแพงมาก และต้องนำเข้าจากต่างประเทศด้วยวิธีการที่ยุ่งยาก นอกจากนี้ภายหลังจากการเคลือบบนแผ่นฐานรองแล้ว ยังต้องทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการสร้างสูง เพื่อแก้ปัญหานี้ได้นำเสนอแนวคิดที่จะทดแทนพอลิอิมิดจากรูปแบบของเหลวหนืดมาเป็นรูปแบบที่มีขายในลักษณะเป็นเทปกาว ซึ่งมีราคาถูก และหาได้ง่ายภายในประเทศ เทปกาวพอลิอิมิดในรูปแบบนี้ ประกอบด้วยแถบพอลิอิมิดหนา 25 ไมโครเมตรซึ่งได้ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเรียบร้อยแล้ว ด้านล่างของแถบคือ ชั้นของกาวที่มีความหนา 35 ไมโครเมตร

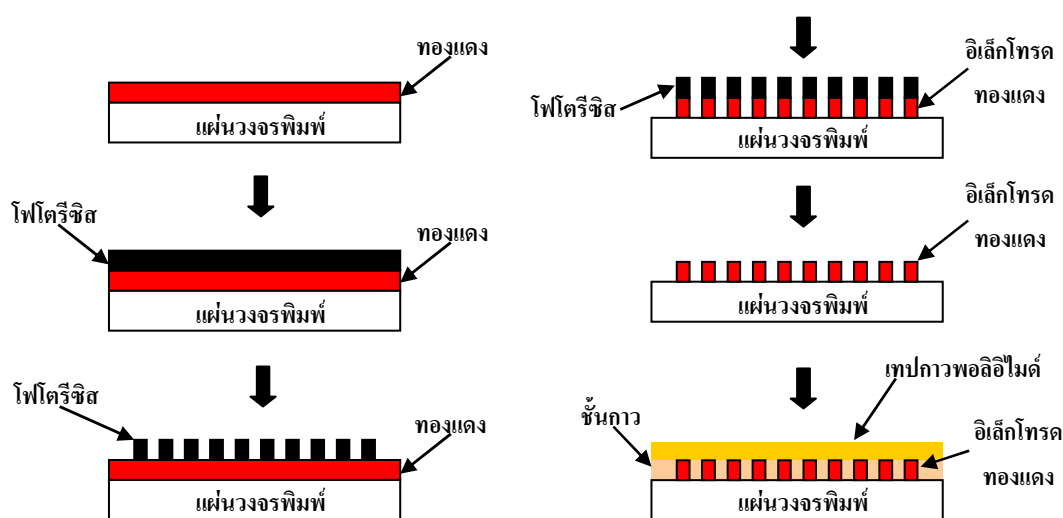
การออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้นราคาถูกสามารถทำได้โดยการสร้างอิเล็กโทรดแบบซี่หวีด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถสร้างลายเส้นตัวนำได้เล็กประมาณ 6 มิล (mil) หรือ 150 ไมโครเมตร ในงานวิจัยนี้ได้สร้างลวดลายอิเล็กโทรดทองแดงจำนวน 66 ซี่ แต่ละซี่กว้าง 150 ไมโครเมตร ยาว 19.55 มิลลิเมตร บนพื้นที่ตรวจรู้ขนาด 2×2 ตารางเซนติเมตร โดยมีชั้นทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์หนา 0.75 ไมโครเมตร จากนั้นทำการแปะเทปกาวพอลิอิมิด์ทับลงบนขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งลวดลายอิเล็กโทรดทองแดงของตัวตรวจรู้แสดงดังรูปที่ 4.1



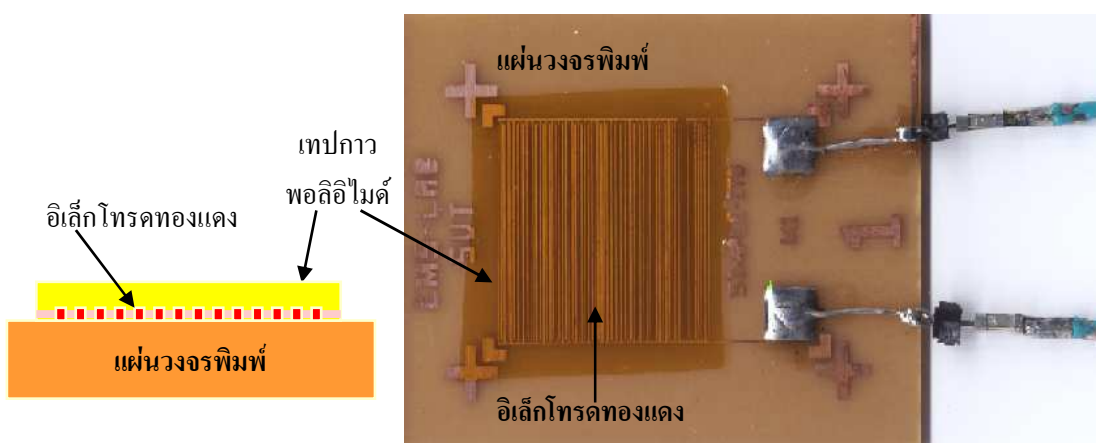
รูปที่ 4.1 ลวดลายและขนาดอิเล็กโทรดทองแดงของตัวตรวจรู้

กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้นอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้คือ เริ่มกระบวนการสร้างโดยทำความสะอาดแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำดีไอออไนซ์ (de-ionized water) คือ น้ำที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการไหลผ่านเรซินที่กักประจุไว้ จากนั้นทำความสะอาดผิวทองแดงด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5% (เพื่อให้ฟิล์มไวแสงโฟโตริซิชันยึดติดแน่น) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน คัดฟิล์มไวแสงโฟโตริซิชันชนิดแห้งลงบนผิวทองแดง นำเข้าเครื่องรีดฟิล์ม LAM-150 ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่อง EXP-152 dryfilm exposure unit ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด เพื่อถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มขาวดำต้นแบบไปยังโฟโตริซิชันชนิดแห้งนาน 3 นาที ลอกพลาสติกบนผิวฟิล์มไวแสงโฟโตริซิชันออก ล้างฟิล์มไวแสงโฟโตริซิชันด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ กัดลวดลายทองแดงด้วยน้ำยาคัดแผ่นวงจรพิมพ์จนกระทั่งเหลือลวดลายทองแดงตามแบบ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วจึงลอกฟิล์มไวแสงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (ในกระบวนการกัดแผ่นวงจรพิมพ์ให้เป็นลวดลายตามแบบ

ด้วยน้ำยากัดแผ่นวงจรพิมพ์นั้น ควรระมัดระวังไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณลวดลายบนผิวทองแดงเพราะจะทำให้น้ำยากัดไม่สามารถกัดทองแดงออกได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีช่องว่างระหว่างลวดลายเล็กมาก ๆ) และในขั้นตอนสุดท้ายติดเทปกาวพอลิอิมิด์ลงบนลวดลายทองแดง นำเข้าเครื่องรีดพิมพ์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปบัดกรีด้วยตะกั่วพร้อมต่อสายไฟ ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 4.3



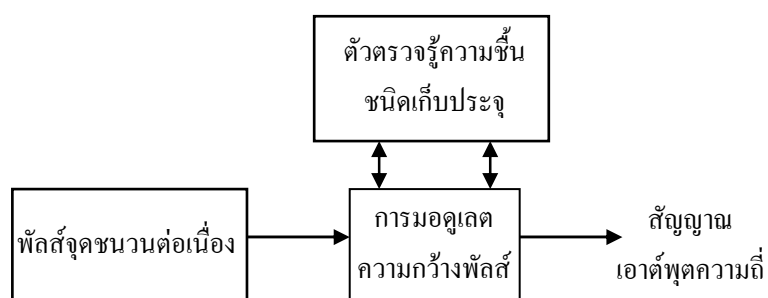
รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น



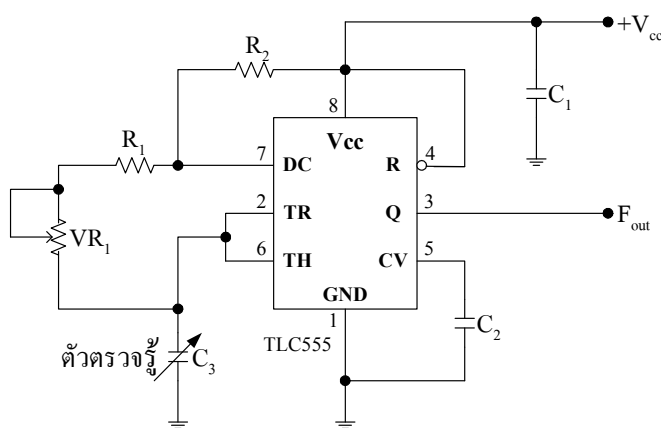
รูปที่ 4.3 ต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์และใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น

4.3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับตัวตรวจรู้ความชื้น

การทดลองทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างอิงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังต่อไปนี้ในทุกหัวข้อการทดลอง ได้แก่ วงจรกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยอุปกรณ์ในวงจรมีค่าดังนี้คือ ตัวต้านทาน $R_1 = 50 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $VR_1 = 500 \text{ k}\Omega$ ตัวเก็บประจุ $C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$, $C_3 =$ ตัวตรวจรู้ และไอซี TLC555



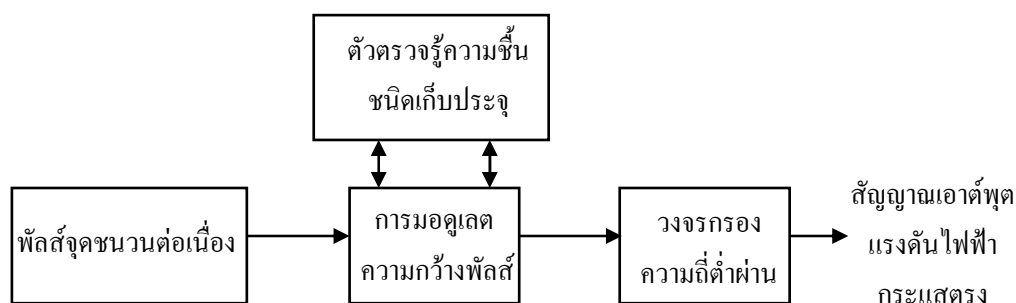
รูปที่ 4.4 แผนภาพวงจรกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น



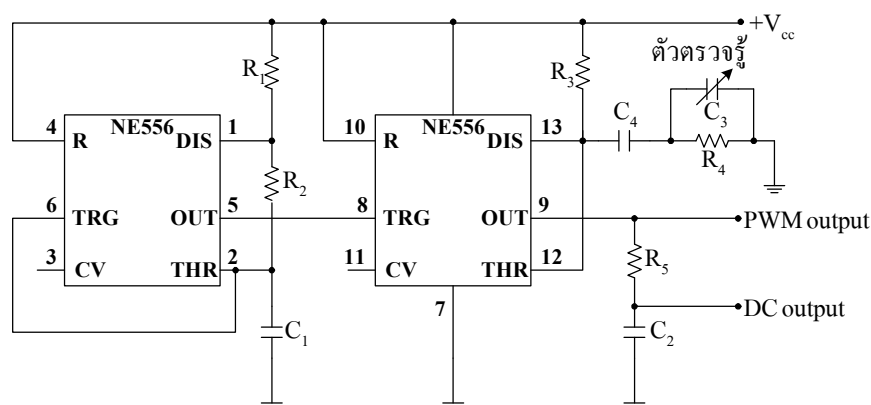
รูปที่ 4.5 วงจรกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น C_3

นอกจากวงจรให้เอาต์พุตเป็นความถี่แล้ววงจรกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยมี

ค่าอุปกรณ์ดังนี้คือ ตัวต้านทาน $R_1 = 56 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 69 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 10 \text{ M}\Omega$ และ $R_5 = 10 \text{ k}\Omega$ ตัวเก็บประจุ $C_1 = 121 \text{ pF}$, $C_2 = 10 \text{ }\mu\text{F}$, $C_3 =$ ตัวตรวจรู้ $C_4 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$ และไอซี NE556



รูปที่ 4.6 แผนภาพวงจรกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความขึ้น



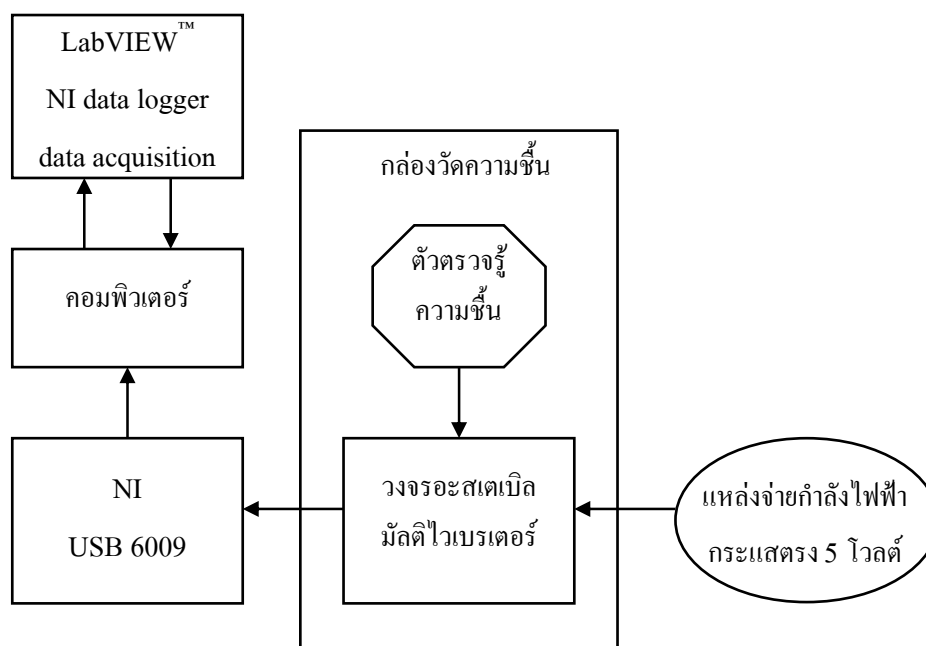
รูปที่ 4.7 วงจรกำเนิดความถี่ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความขึ้น

วงจรดังรูปที่ 4.7 มีการทำงานในโหมดพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (pulse width modulation: PWM) ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งของไอซี 556 ตัวตรวจรู้ถูกควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ไทมเมอร์ (timer) 2 ตัว ไทมเมอร์ตัวแรกสร้างขบวนพัลส์ (pulse) ต่อเนื่องเพื่อทำการจุกชนวน (trigger) ไทมเมอร์ตัวที่สองซึ่งทำงานในโหมดพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน ออสซิลเลเตอร์แบบอะสเตเบิลจะสร้างขบวนพัลส์ที่มีความถี่ 50 kHz โดยมีความกว้างของเอาต์พุตพัลส์เพิ่มขึ้นเมื่อความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับความขึ้นที่เพิ่มขึ้นด้วย

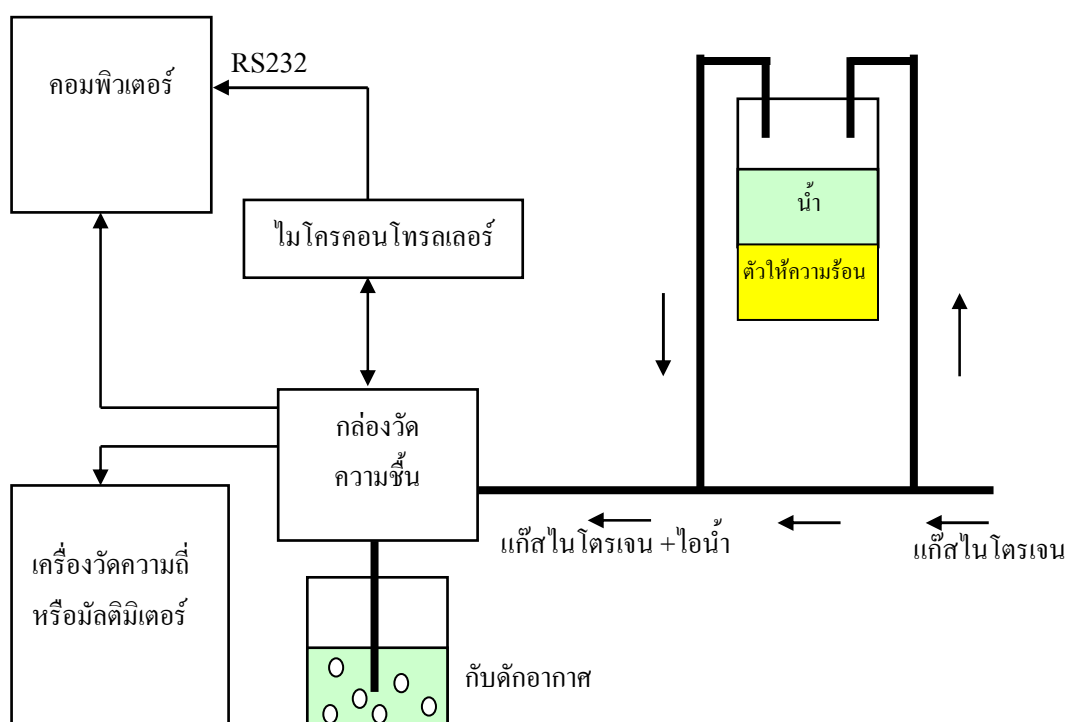
เพื่อให้ง่ายต่อการวัดช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของดินแบบที่สร้างขึ้น จึงนำตัวตรวจรู้มาประกอบเข้ากับวงจรกำเนิดความถี่ซึ่งมีส่วนกรองสัญญาณความถี่เอาต์พุตให้เป็นแรงดันกระแสตรง ทำให้สามารถวัดผลตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของอากาศ รูปที่ 4.7 แสดงรายละเอียดวงจรที่ใช้กำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าว โดยในการวัดช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นจะใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ NI USB-6009 8 inputs, 14-bit, multifunction I/O ของบริษัท National Instruments แสดงดังรูปที่ 4.8 ร่วมกันกับโปรแกรม LabVIEW™ version 7.1 ผ่านทางฟังก์ชันของโปรแกรมที่ชื่อว่า NI data logger (สามารถบันทึกข้อมูลได้ตลอดย่านการวัดและสามารถกำหนดอัตราการชั่งตัวอย่างของข้อมูลได้) โดยรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตแบบแอนะล็อกมีพิคกิ้งสูงสุด ± 10 โวลต์, 50 มิลลิแอมป์ และแบบดิจิทัลมีพิคกิ้งสูงสุด $+5$ โวลต์, 200 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ รับเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจร ทางพอร์ต A10 และกราวด์ (GND) รูปที่ 4.9 แสดงระบบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ NI USB 6009 กับวงจรและตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพระบบการวัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยขั้นตอนการวัดช่วงเวลาการตอบสนองมีดังต่อไปนี้คือ นำตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นใส่ลงในกล่องวัดความชื้นพร้อมต่อกับวงจรอะสเทเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ต่อสายวัดแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจร พร้อมทั้งนำหัววัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อ้างอิง SHT15 ของบริษัท Sensirion ซึ่งมีความแม่นยำของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ $\pm 2\%$ และความแม่นยำของอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสอยู่ที่ ± 0.3 ดีกรีเซลเซียส ปิดฝากล่องวัดความชื้น เปิดวาล์วเพื่อป้อนแก๊สไนโตรเจนไล่ความชื้นออกจากกล่อง โดยสังเกตได้จากความชื้นที่วัดได้จากตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง รักษาอุณหภูมิให้คงที่ 25 องศาเซลเซียส ก่อนการป้อนแก๊สไนโตรเจนควรดื่มน้ำในส่วนป้อนความชื้นจนเกิดเป็นไอน้ำในขวดแก้ว แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลง แปรความชื้นสัมพัทธ์ในกล่องวัดความชื้นทันทีที่ทันใดอยู่ที่ 25 ลิตรต่ออนาที โดยเริ่มจากความชื้นสัมพัทธ์ 0% จนถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์ 90% จากนั้นจึงลดความชื้นที่ป้อนให้กับกล่องวัดความชื้นอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกัน โดยป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งความชื้นกลับมาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ NI USB-6009 ของบริษัท National Instruments

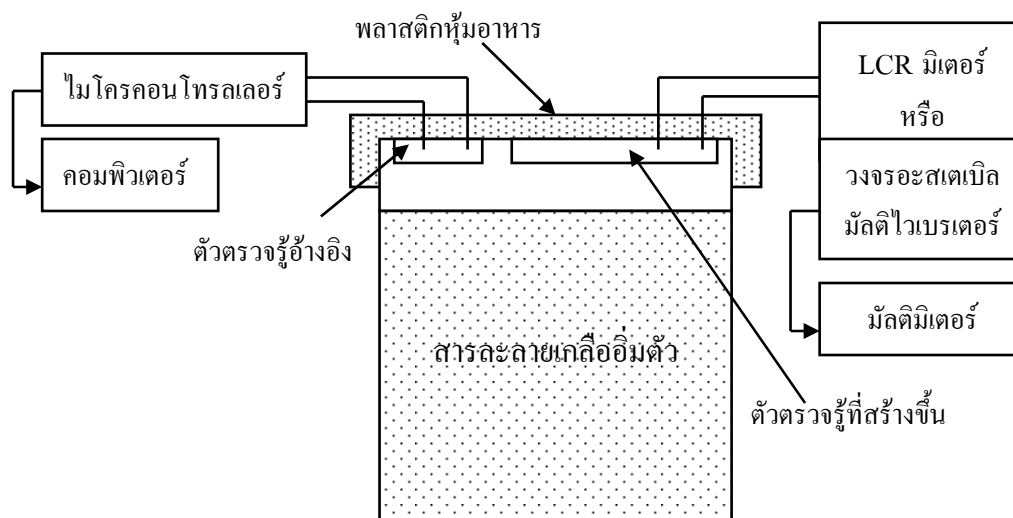


รูปที่ 4.9 แผนภาพระบบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ NI USB 6009 กับวงจรและตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงระบบการวัดผลตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น

การเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิมิตัวโดยนำตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นทดสอบการตอบสนองต่อความชื้นกับสารละลายเกลืออิมิตัวได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมไนเตรด โซเดียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งรายละเอียดค่าความชื้นมาตรฐานของสารละลายแต่ละชนิดนั้นแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 โดยนำสารละลายที่อิมิตัวใส่ลงในภาชนะที่เป็นแก้วแล้วนำตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง SHT15 ของบริษัท Sensirion ซึ่งมีความแม่นยำของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ $\pm 2\%$ และความแม่นยำของอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสอยู่ที่ ± 0.3 พร้อมทั้งตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นใส่ลงในภาชนะที่มีสารละลายเกลืออิมิตัวบรรจุอยู่ (โดยเริ่มต้นจากสารละลายที่ให้ค่าความชื้นต่ำสุดก่อนจนไปถึงค่าความชื้นสูงสุด) ปิดภาชนะด้วยพลาสติกห่อหุ้มอาหาร รอให้ความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากหัววัดความชื้นอ้างอิงคงที่ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วประมาณ 2-6 ชั่วโมง หลังจากปิดภาชนะ จากนั้นจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อความชื้นที่ความถี่ 1 kHz 10 kHz 100 kHz และ 1000 kHz ตามลำดับ โดยใช้ LCR Meter Precision model HP4284A วัดค่าความจุไฟฟ้าที่สัญญาณไซน์ชอยด์แอมพลิจูด 1 โวลต์ ส่วนการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นใช้วงจรดังรูปที่ 4.7

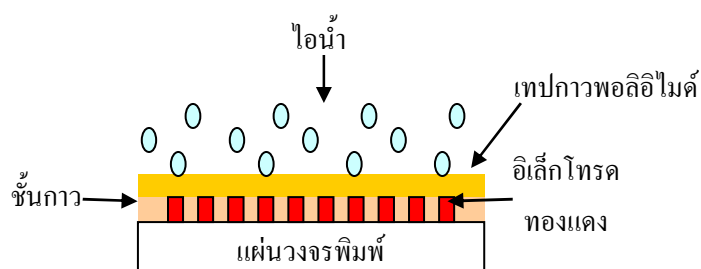


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิมิตัว

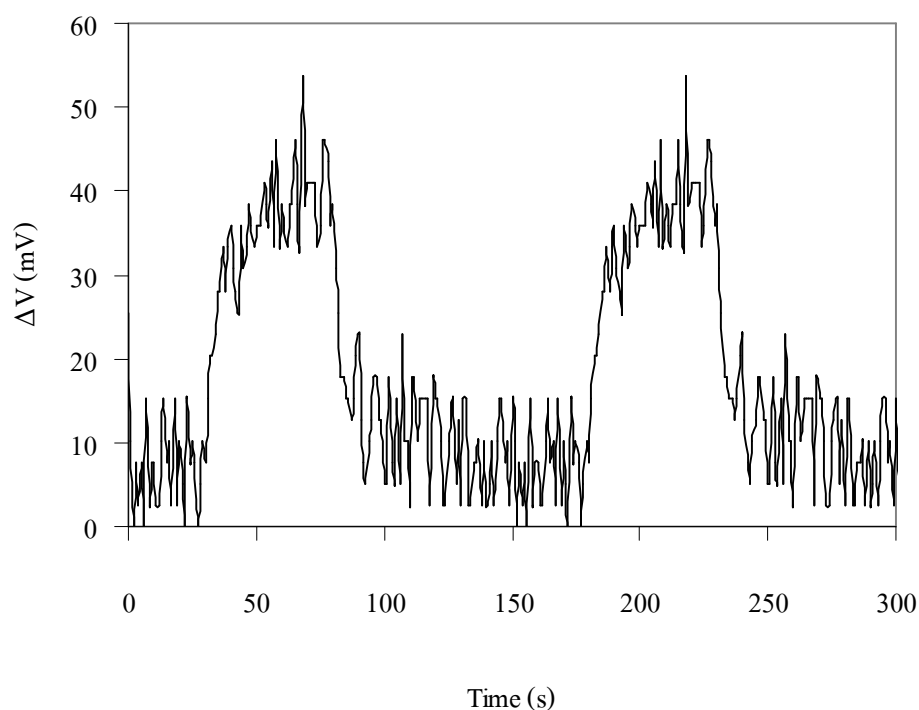
4.4 ผลการทดลองโดยใช้เทปกาวพอลิไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น

ทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้นดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงการวัดช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่

เปลี่ยนแปลงที่อัตราการชักตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที ให้ค่าแรงดันฐาน 2.74 โวลต์ พบว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90% ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 0-50 มิลลิโวลต์ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 40 วินาที และระยะเวลาการคายความชื้น 80 วินาที

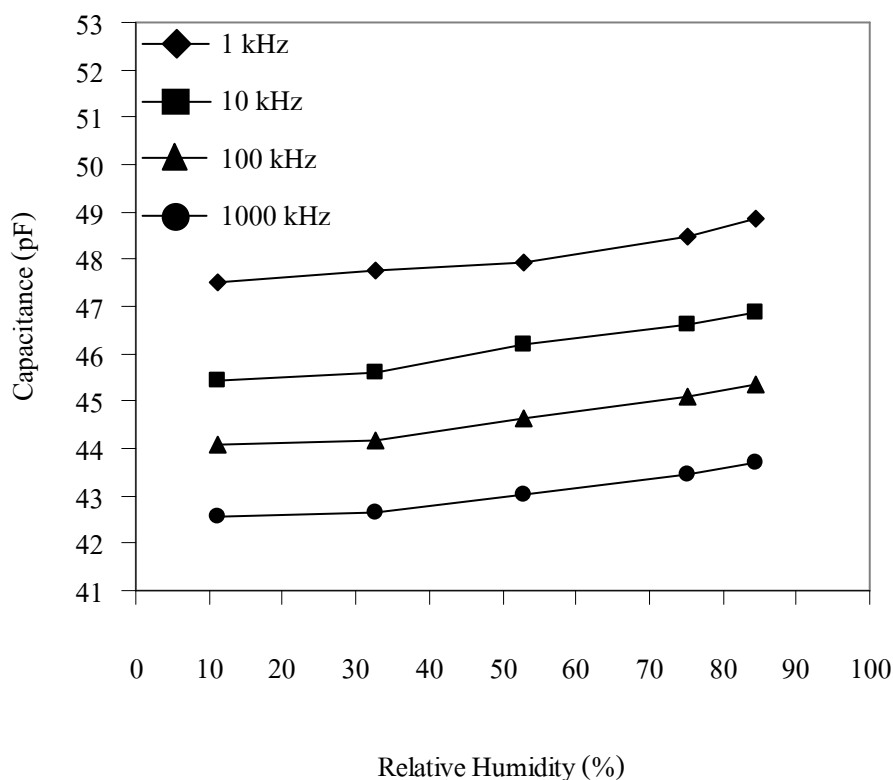


รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแปรความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้น

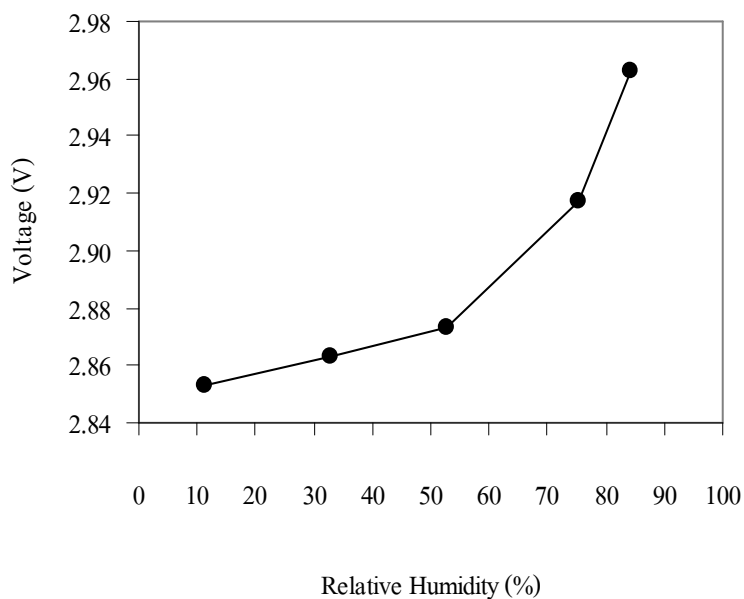


รูปที่ 4.13 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

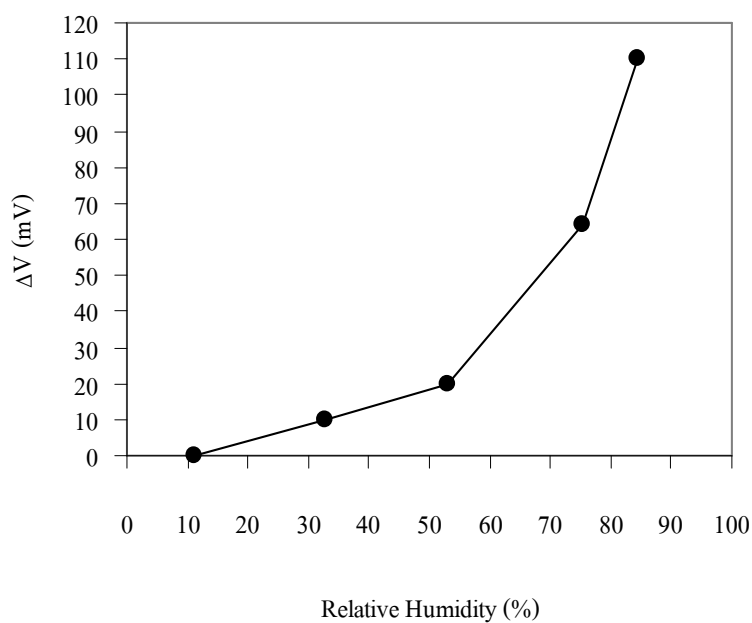
ทำการเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อความถี่การวัดสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้า ณ ความชื้นคงที่ใด ๆ จะลดลง ผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงในทุก ๆ ความถี่ที่ทำการทดลองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-85% รูปที่ 4.15 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์เมื่อต่อตัวตรวจรู้เข้ากับวงจรอะสเทเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ พบว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% ส่วนในย่านที่ไม่เป็นเชิงเส้นตั้งแต่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-85% ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ต่อจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.16 ทำให้ทราบว่าในช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% อยู่ที่ประมาณ 0-20 มิลลิโวลต์ ส่วนในย่านที่ไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-85% อยู่ที่ประมาณ 20-110 มิลลิโวลต์



รูปที่ 4.14 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุไวความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



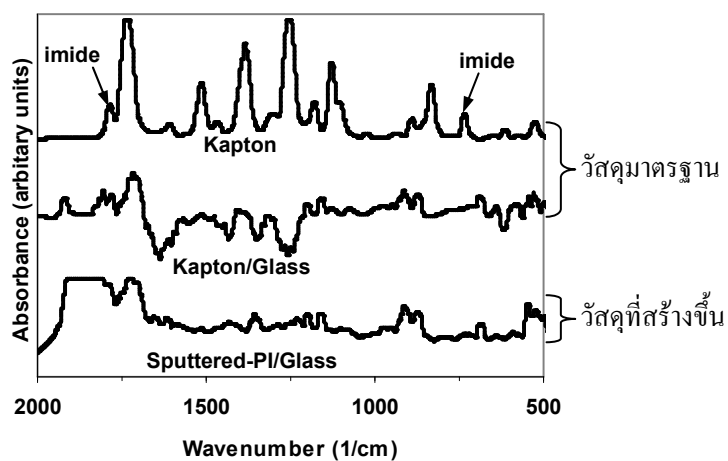
รูปที่ 4.16 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากการทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดี แสดงว่าแนวคิดในการนำเทปกาวพอลิอิมิดมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นสามารถทำได้ แนวคิดเดียวกันนี้สามารถต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นในดินเพื่อการให้น้ำต้นไม้อย่างมีประสิทธิภาพได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการประยุกต์ใช้งานด้านนี้เป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีผลตอบสนองทางเวลาที่รวดเร็ว จากราคาของตัวตรวจรู้ที่ถูกลงจะทำให้การประยุกต์ใช้งานในลักษณะนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น เพราะมีความคุ้มค่าในการลงทุน

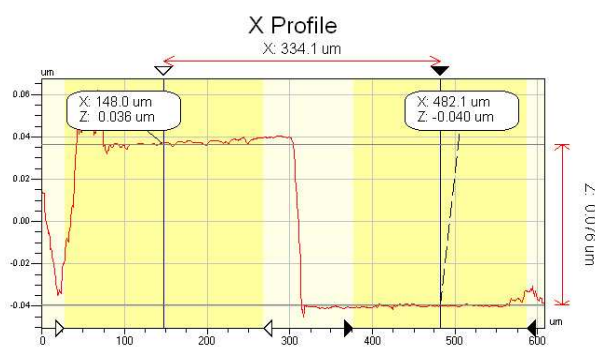
4.5 การสปีดเตอริงพอลิอิมิด

วิธีการสปีดเตอริงพอลิอิมิดโดยมีขั้นตอนดังนี้คือ แปะเทปกาวพอลิอิมิด (Kapton) ลงบนผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โมลิบดีนัม (หรือโลหะอื่น ๆ) ให้ทั่วบริเวณพื้นที่วงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร แล้วติดตั้งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องสปีดเตอริง Anelva SPF210A จากนั้นวางชิ้นงานลงบนฐานรองรับภายใต้ อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว และดูดอากาศออกจากเครื่องจนได้ความดัน 1×10^{-6} torr จากนั้นทำการป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าไปในเครื่องและรักษาระดับความดันไว้ที่ 1.2 Pa แล้วป้อนคลื่นความถี่วิทยุแรงดันสูงความถี่ 13.5 MHz โดยใช้ความหนาแน่นกำลังงาน 1.2 W/cm^2 (forward power 100 W และ reverse power 40 W) ทำการสปีดเตอริงโดยไม่เปิดชัตเตอร์เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของพอลิอิมิดก่อนทำการเคลือบจริง ประมาณ 30 นาที แล้วจึงทำการเปิดชัตเตอร์เพื่อทำการสปีดเตอริงจริงประมาณ 12 ชั่วโมง เนื่องจากการสปีดเตอริงเป็นระยะเวลานานทำให้ฟิล์มบางมีความหนาเพียงพอที่จะหาอัตราการเกิดฟิล์มบางพอลิอิมิดด้วยเครื่อง non-contact optical profiler (Wyko NT1100) โดยพิจารณาความหนาฟิล์มบางพอลิอิมิดต่อระยะเวลาการสปีดเตอริง

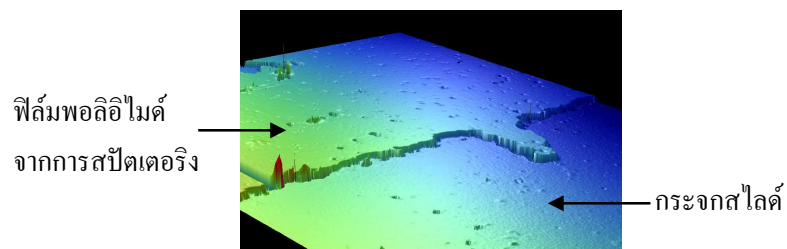
เมื่อทำการวิเคราะห์ฟิล์มของวัสดุที่ได้จากการสปีดเตอริง ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มมาตรฐานของพอลิอิมิดพบว่า วัสดุที่ได้จากการสปีดเตอริงไม่ใช่พอลิอิมิด แต่ได้เปลี่ยนสภาพไปเป็นวัสดุอื่นซึ่งทราบได้จากการหายไปของจุดสูงสุดของกราฟ FTIR ในตำแหน่งที่ควรจะเป็นสารเคมีในกลุ่มอิมิดดังรูปที่ 4.17 ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ด้วย FTIR จะแสดงว่าฟิล์มที่เตรียมได้จากกระบวนการสปีดเตอริงของเทปกาวพอลิอิมิดจะเปลี่ยนสภาพไปจากเดิม แต่ได้นำฟิล์มดังกล่าวไปทดสอบความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นวัสดุไวความชื้น โดยการสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบซีหิวบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้วเคลือบแผ่นวงจรพิมพ์โดยการสปีดเตอริงพอลิอิมิด สำหรับฟิล์มบางพอลิอิมิดที่ได้จากการสปีดเตอริงเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง เมื่อวัดด้วยเครื่อง non-contact optical profiler (Wyko NT1100) พบว่ามีความหนาเท่ากับ 76 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 นั่นคือฟิล์มบางพอลิอิมิดที่ได้มีอัตราการเกิด 76 นาโนเมตรต่อ 12 ชั่วโมง หรือ 6.33 นาโนเมตรต่อชั่วโมง คิดเป็น 0.1 นาโนเมตรต่อนาทีโดยประมาณ



รูปที่ 4.17 กราฟ FTIR จากการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอริงเปรียบเทียบกับมาตรฐานของพอลิอิมิด์



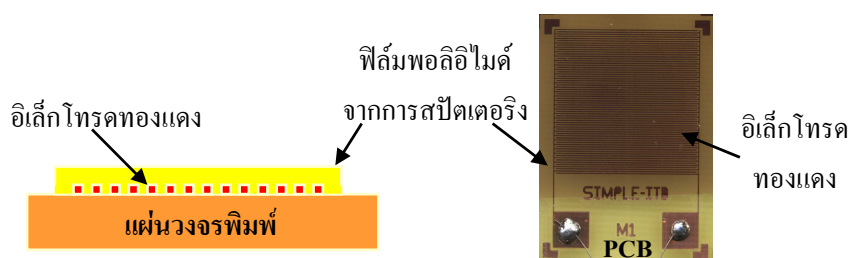
รูปที่ 4.18 กราฟความหนา 76 นาโนเมตร ของฟิล์มบางพอลิอิมิด์จากการสปีดเตอริงเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง



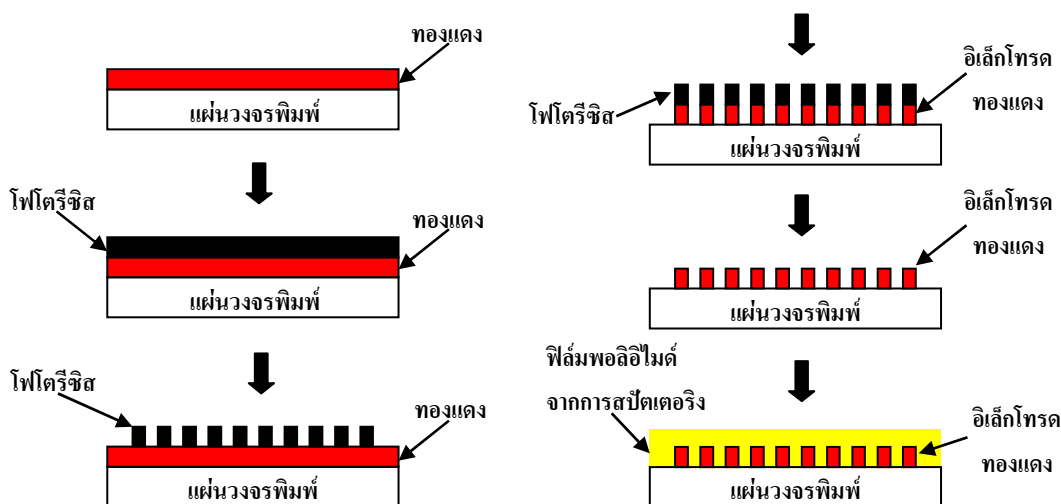
รูปที่ 4.19 ภาพสามมิติแสดงความหนา 76 นาโนเมตร ของฟิล์มบางพอลิอิมิด์จากการสปีดเตอริงเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง

4.6 การใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

ทำการออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้นโดยการสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบซีพวีด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์ ด้วยลายเส้นตัวนำขนาด 6 มิล (mil) หรือ 150 ไมโครเมตร ในงานวิจัยนี้ได้สร้างลวดลายอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงจำนวน 66 ซี แต่ละซีกว้าง 150 ไมโครเมตร ยาว 19.55 มิลลิเมตร บนพื้นที่ตรวจรู้ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร โดยมีชั้นทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์หนา 0.75 ไมโครเมตร จากนั้นทำการเคลือบทับอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการสปีดเตอริงพอลิอิมิดนาน 45 นาที นั่นคือหนา 45 อังสตรอม รูปที่ 4.20 แสดงต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นและรูปที่ 4.21 แสดงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นซึ่งอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้คือ เริ่มกระบวนการสร้างโดยทำความสะอาดแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยน้ำบริสุทธิ์ จากนั้นทำความสะอาดผิวทองแดงด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5% (เพื่อให้ฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสยึดติดแน่น) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ติดฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสชนิดแห้งลงบนผิวทองแดง นำเข้าเครื่องรีดฟิล์ม LAM-150 ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่อง EXP-152 dryfilm exposure unit ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด เพื่อถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มขาวดำต้นแบบไปยังโฟโตริซีสชนิดแห้งนาน 3 นาที ลอกพลาสติกบนผิวฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสออก ล้างฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ถัดมาลวดลายทองแดงด้วยน้ำยากัดแผ่นวงจรพิมพ์จนกระทั่งเหลือลวดลายทองแดงตามแบบ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วจึงลอกฟิล์มไวแสงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ขั้นตอนสุดท้ายทำการเคลือบพอลิอิมิดลงบนลวดลายทองแดงด้วยเทคนิคการสปีดเตอริงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แล้วจึงนำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จไปบัดกรีด้วยตะกั่วพร้อมต่อสายไฟ



รูปที่ 4.20 ต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

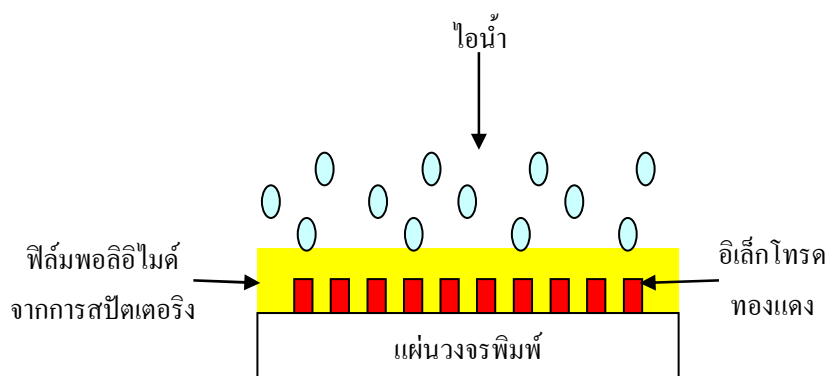


รูปที่ 4.21 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

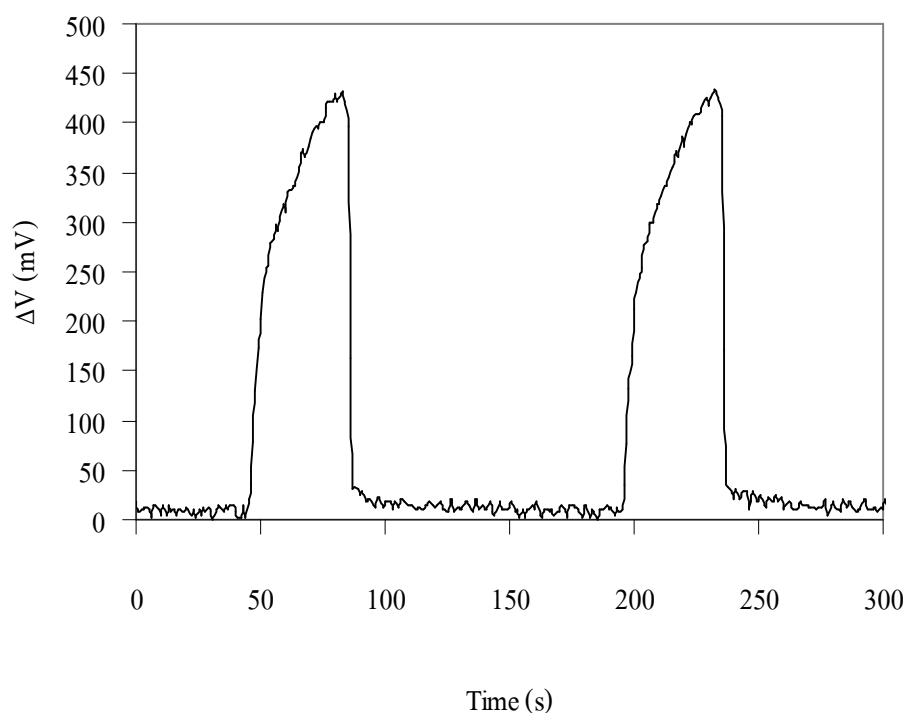
4.7 ผลการทดลองโดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

ทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้นดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 แสดงการวัดช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่อัตราการชั่งตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที ให้ค่าแรงดันฐาน 2.42 โวลต์ พบว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90% ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 0-425 มิลลิโวลต์ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 39 วินาที และระยะเวลาการคายความชื้น 62 วินาที ทำการปรับเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อความถี่การวัดสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้า ณ ความชื้นคงที่ใด ๆ จะลดลง ผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงในทุก ๆ ความถี่ทำการทดลองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75-85% รูปที่ 4.25 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์เมื่อต่อตัวตรวจรู้เข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ พบว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-30% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 30-85% ต่อจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.25 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.26 ทำให้ทราบว่าในช่วงการ

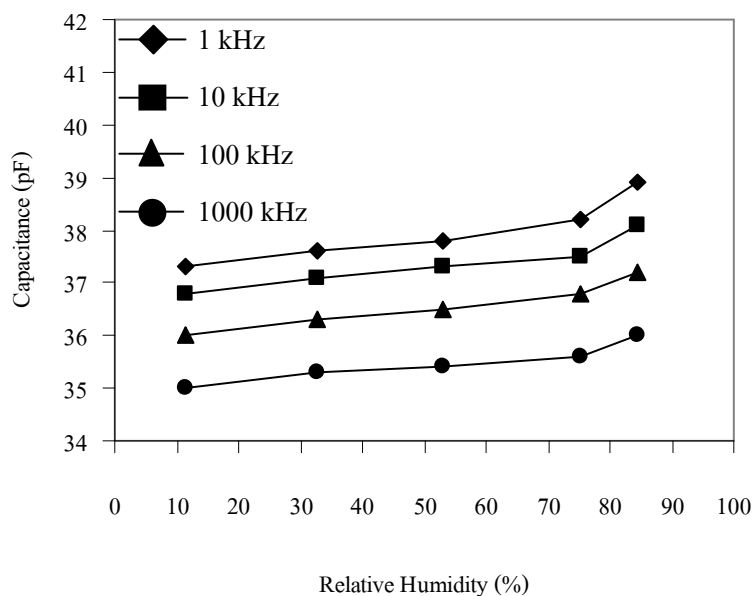
เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-30% อยู่ที่ 0-4 มิลลิโวลต์ โดยประมาณ และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 30-85% อยู่ที่ 4-40 มิลลิโวลต์ โดยประมาณ



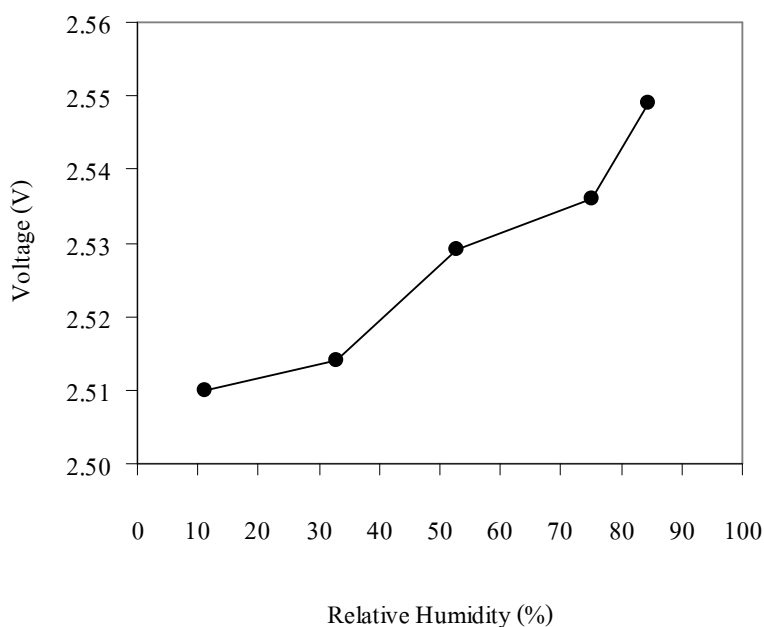
รูปที่ 4.22 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้น



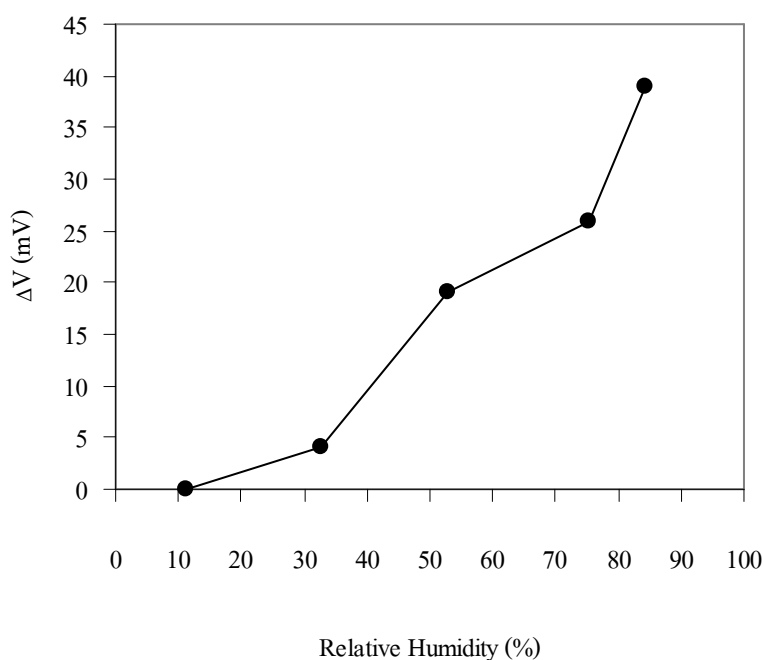
รูปที่ 4.23 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นหนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4.24 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอีไมด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 4.25 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมิมพ์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอีไมด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

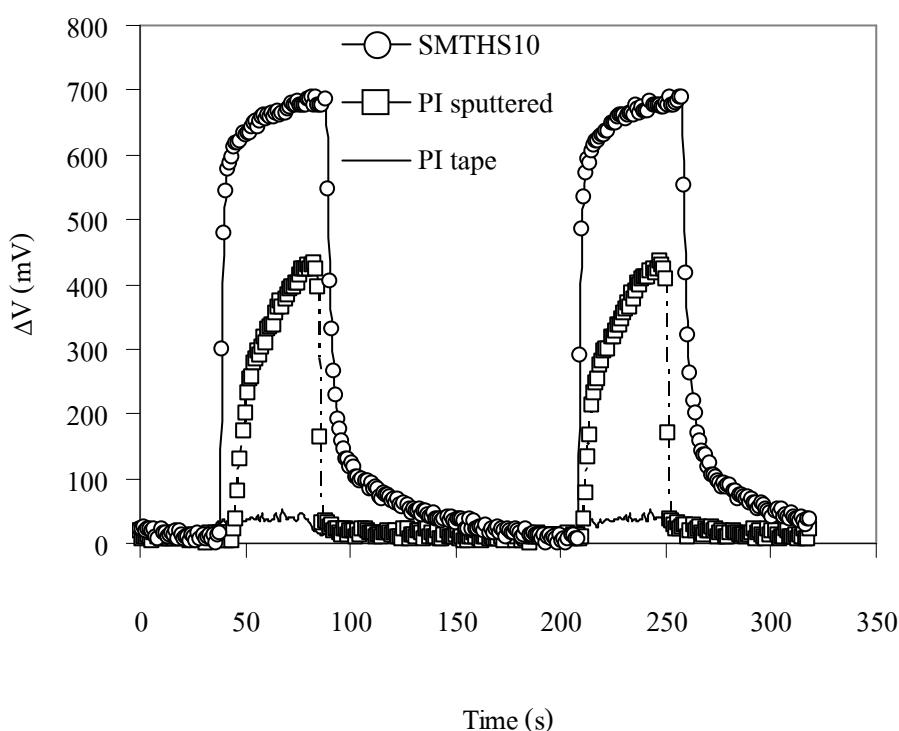


รูปที่ 4.26 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจวัดความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมินิโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

4.8 เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้เทปกาวพอลิอิมิด์กับการสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น

ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจวัดทั้งสองประเภทที่ใช้ชั้นไวความชื้นต่างกันโดยทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยเริ่มจากความชื้นสัมพัทธ์ 0-90% แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าตัวตรวจวัดที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้นใช้ระยะเวลาในการดูดซึมความชื้นและระยะเวลาการคายความชื้นมากกว่าตัวตรวจวัดที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้น เนื่องจากเทปกาวพอลิอิมิด์มีความหนามากกว่าทำให้ใช้ระยะเวลาการดูดซึมและการคายความชื้นมากกว่าพอลิอิมิด์จากการสปีดเตอริง แต่ตัวตรวจวัดทั้งสองประเภทดังกล่าวใช้ระยะเวลาการดูดความชื้นและการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจวัดเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ของบริษัท Smartec ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนของตัวตรวจวัดที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้นอยู่ที่ 0-50 มิลลิโวลต์ ส่วนตัวตรวจวัดที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้นอยู่ที่ 0-425 มิลลิโวลต์ และตัวตรวจวัดความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 อยู่ที่ 0-700 มิลลิโวลต์ พบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจวัดที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้นมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัด

ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นประมาณ 8.5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอร์พอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นและตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีค่าน้อยกว่าประมาณ 1.6 เท่า และ 14 เท่าตามลำดับ นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอร์พอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นจะมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น แต่ตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทดังกล่าวจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 จะเห็นได้ว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ไม่ได้บ่งบอกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงกว่าจะใช้ระยะเวลาในการดูดซึมความชื้นและระยะเวลาการคายความชื้นเร็วกว่า แต่ต้องพิจารณาจากระยะเวลาการดูดซึมความชื้นของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% ถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% และระยะเวลาการคายความชื้นต้องพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0%



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบช่วงเวลากการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีระหว่างสปัตเตอร์พอลิอิมิดหนา 45 Å กับเทปกาวพอลิอิมิด และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบช่วงเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภท

ประเภทตัวตรวจรู้	เวลาการดูดซึมความชื้น (วินาที)	เวลาการคายความชื้น (วินาที)
แผ่นวงจรมพิมพ์ (PI tape 60 μm)	40	80
แผ่นวงจรมพิมพ์ (PI sputtered 4.5 nm)	39	62
SMTHS10	54	110

จากการทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อปรับเทียบมาตรฐานความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว ดังรูปที่ 4.28 พบว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทที่มีผลคล้ายอิเล็กทรอนิกส์และขนาดเหมือนกันดังกล่าวให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ ซึ่งทำการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าเป็นการเลื่อนของความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz เพราะเป็นความถี่ที่ตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทมีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทดังกล่าวใช้วัสดุไวความชื้นที่แตกต่างกันทำให้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นให้ค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นอันเนื่องมาจากพอลิอิมิดเทปมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริงที่เคลือบขั้วอิเล็กทรอนิกส์อยู่นั่นเอง และตารางที่ 4.2 แสดงความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz พบว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นอยู่ที่ 0.022 pF/%RH คิดเป็น 0.059% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH มากกว่าความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นอยู่ที่ 0.019 pF/%RH คิดเป็น 0.039% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ดังกล่าว ซึ่งคำนวณความไวได้จากสมการที่ (4-1) และสมการที่ (4-2)

$$\text{sensitivity } (S) = \frac{\Delta C}{\Delta RH} \quad (4-1)$$

$$sensitivity (S) = \frac{\Delta C}{C_{11.3\%RH} \Delta RH} \times 100 \quad (4-2)$$

โดยที่ S คือ ความไว (pF/%RH หรือ %)

ΔC คือ ผลต่างของค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% กับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 84.3% (pF)

ΔRH คือ ผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ 84.3% (%)

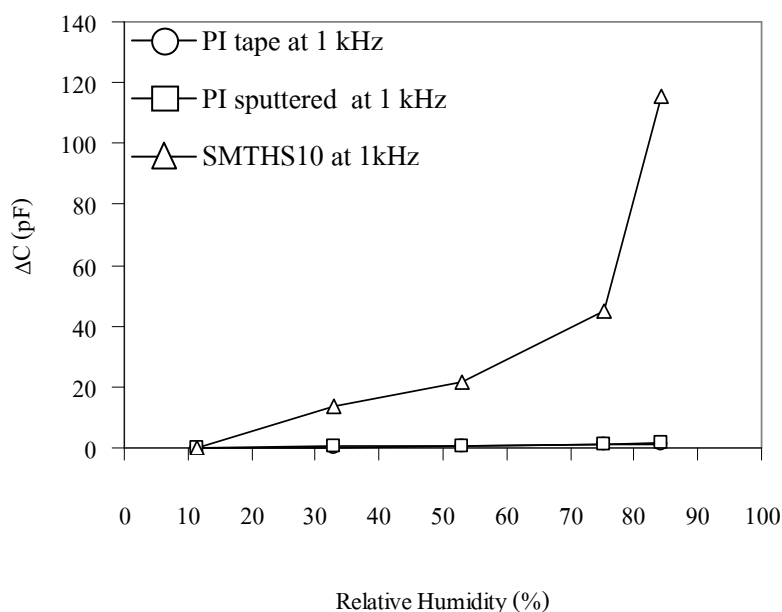
$C_{11.3\%RH}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% (pF)

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz

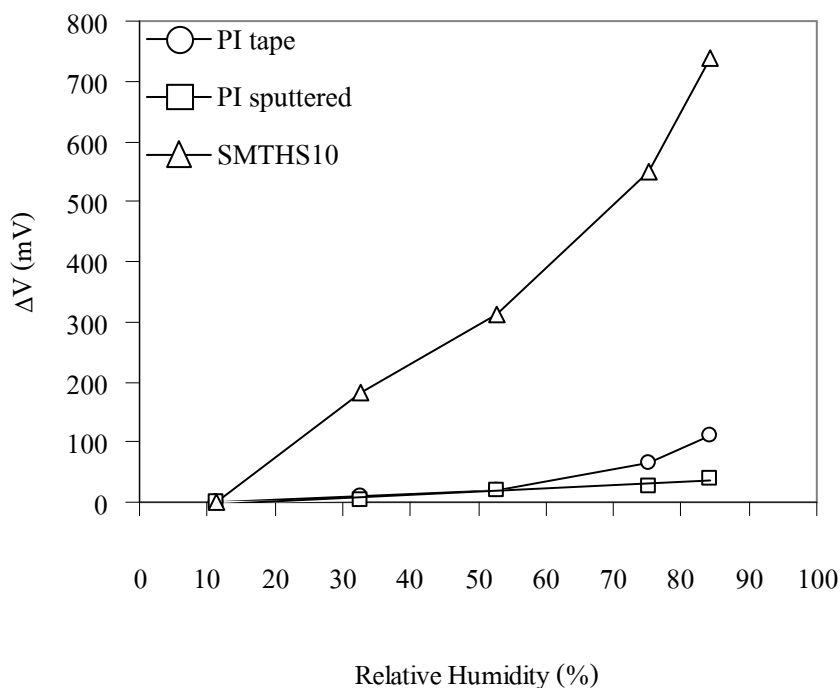
ประเภทตัวตรวจรู้	ค่าความจุไฟฟ้าที่ 11.3%RH (pF)	ค่าความจุไฟฟ้าที่ 84.3%RH (pF)	ความไว (pF/%RH)	ความไว (%)
แผ่นวงจรมพิมพ์ (PI tape 60 μ m)	47.500	48.870	0.019	0.039
แผ่นวงจรมพิมพ์ (PI sputtered 4.5 nm)	37.300	38.900	0.022	0.059
SMTHS10	161.815	277.436	1.583	0.978

จากการทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อสอบเทียบความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จึงได้นำตัวตรวจรู้มาประกอบเข้ากับวงจรรอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.29 พบว่าการตอบสนองที่ได้จากตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิอิมิดจากการสปัตเตอร์เป็นชั้นไวความชื้นให้ผลตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-30% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 30-85% โดยประมาณ ซึ่งแตกต่างกับตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นที่ให้ผลตอบสนองค่อนข้างเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-85% โดยประมาณ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่ให้ผลตอบสนองค่อนข้างเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ นอกจากนี้ตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นให้ค่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิอิมิดจากการสปัตเตอร์เป็นชั้นไวความชื้นอันเนื่องมาจากเทปกาวพอลิอิมิดมีความหนาของชั้นไวความชื้นมากกว่าพอลิอิมิดจากการสปัตเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่วัดค่าความจุไฟฟ้า นั่นคือเมื่อ

นำตัวตรวจรู้ประกอบเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่เปลี่ยนแปลงต่อความชื้นแปรผัน โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเอาต์พุตของวงจร เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% ตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-110 มิลลิโวลต์ มากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิอิมิดจากการสปัตเตอริงเป็นชั้นไวความชื้นที่มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-40 มิลลิโวลต์ ประมาณ 2.75 เท่า เนื่องจากเทปกาวพอลิอิมิดมีความหนาของชั้นไวความชื้นมากกว่าพอลิอิมิดจากการสปัตเตอริง และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-750 มิลลิโวลต์ พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นและตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีค่าน้อยกว่าประมาณ 18.75 เท่า และ 6.8 เท่า ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 มีความชันของกราฟมากกว่านั้นคือ มีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทดังกล่าว



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ระหว่างการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 45 Å กับเทปกาวพอลิอิมิด และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพระหว่างสารสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å กับเทปกาวพอลิอิมิด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

4.9 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพโดยใช้วัสดุไวความชื้นที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ เทปกาวพอลิอิมิด์ และพอลิอิมิด์จากการสปีดเตอริงหนา 45 อังสตรอม พร้อมทั้งทำการทดลองเพื่อทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น ความไว ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้น และการปรับเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ ช่วงเวลาการตอบสนองโดยทำการให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดโดยเริ่มจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% จนถึง 90% และลดลงจนเป็น 0% อีกครั้ง พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้นมีเวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นคือ 39 วินาที และ 62 วินาที ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นชั้นไวความชื้นที่มีเวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นคือ 40 วินาที และ 80 วินาที ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีเวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้น

คือ 54 วินาที และ 110 วินาที ตามลำดับ เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทใช้เวลาการดูดซึ่มความชื้นและเวลาการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ดังกล่าว และพบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นประมาณ 8.5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นและตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีค่าน้อยกว่าประมาณ 1.6 เท่า และ 14 เท่า ตามลำดับ นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นจะมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น แต่ตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทดังกล่าวจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10

ส่วนผลการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว สำหรับตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นและตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz พบว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นอยู่ที่ 0.022 pF/%RH คิดเป็น 0.059% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH มากกว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น 0.019 pF/%RH คิดเป็น 0.039% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ดังกล่าว ส่วนการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นประมาณ 2.75 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นและตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นมีค่าน้อยกว่าประมาณ 18.75 เท่า และ 6.8 เท่า ตามลำดับ จากการทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดี แสดงว่าเทปกาวพอลิอิมิดและฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอร์ริงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นได้ทั้งสองกรณี

บทที่ 5

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม

5.1 กล่าวนำ

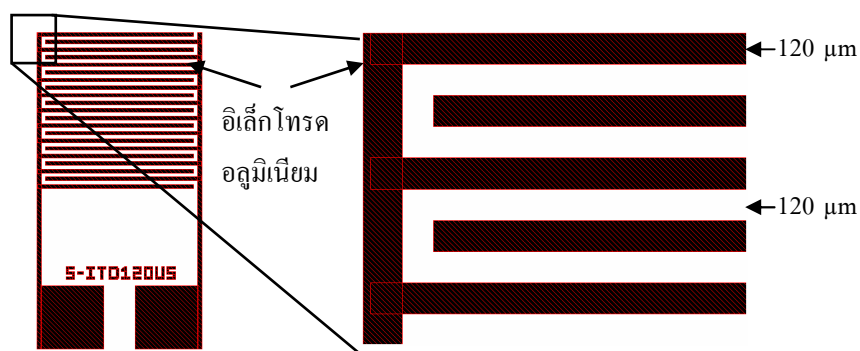
เทคโนโลยีวงจรรวมถูกนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ ไอซีเรกูเลเตอร์ และอุปกรณ์ไอซีอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นต้น จากนั้นได้มีการนำมาใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้และตัวขับเร้าชนิดต่าง ๆ เพราะสามารถสร้างให้อุปกรณ์เหล่านี้มีขนาดเล็กกลง ใช้พลังงานและกระแสไฟฟ้าต่ำ อีกทั้งยังสามารถบูรณาการตัวตรวจรู้ ตัวขับเร้า และวงจรแปลงสัญญาณลงบนชิพเพียงตัวเดียวกันได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีวงจรรวมมาใช้ในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ

5.2 การใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

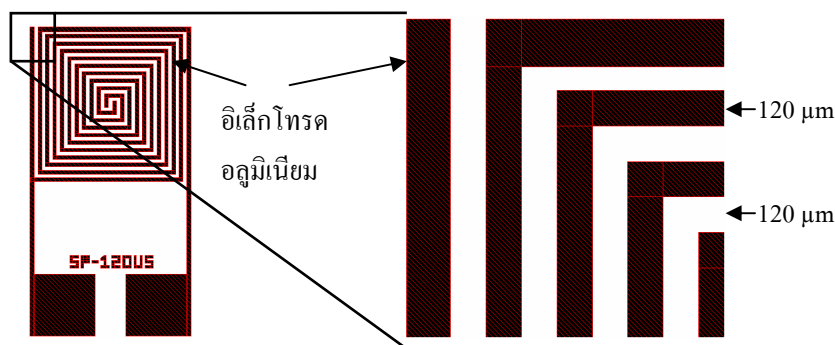
จากการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพิมพ์ ในบทที่ 4 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้มีขนาดใหญ่จึงได้ทำการปรับปรุงการสร้างต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น โดยการติดเทปกาวพอลิอิมิดบนแผ่นกระจกสไลด์แล้วเคลือบด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ (evaporation) จากนั้นทำการกัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ เช่น แบบซี่หวี และแบบเขาวงกต ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน (standard photolithography) เส้นตัวของอิเล็กทรอนิกส์มีขนาด 30 , 60 และ 120 ไมโครเมตร และพื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์มีขนาด 5×5 ตารางมิลลิเมตร และ 10×10 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งลวดลายและขนาดอิเล็กทรอนิกส์ของตัวตรวจรู้แบบซี่หวีและแบบเขาวงกต แสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2

จากรูปที่ 5.3 แสดงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นซึ่งอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้ เริ่มกระบวนการสร้างโดยทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ติดเทปกาวพอลิอิมิดลงบนผิวกระจกสไลด์ รีดให้เรียบด้วยมือ เคลือบด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ จากนั้นทำการกัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ เช่น แบบซี่หวี และแบบเขาวงกต

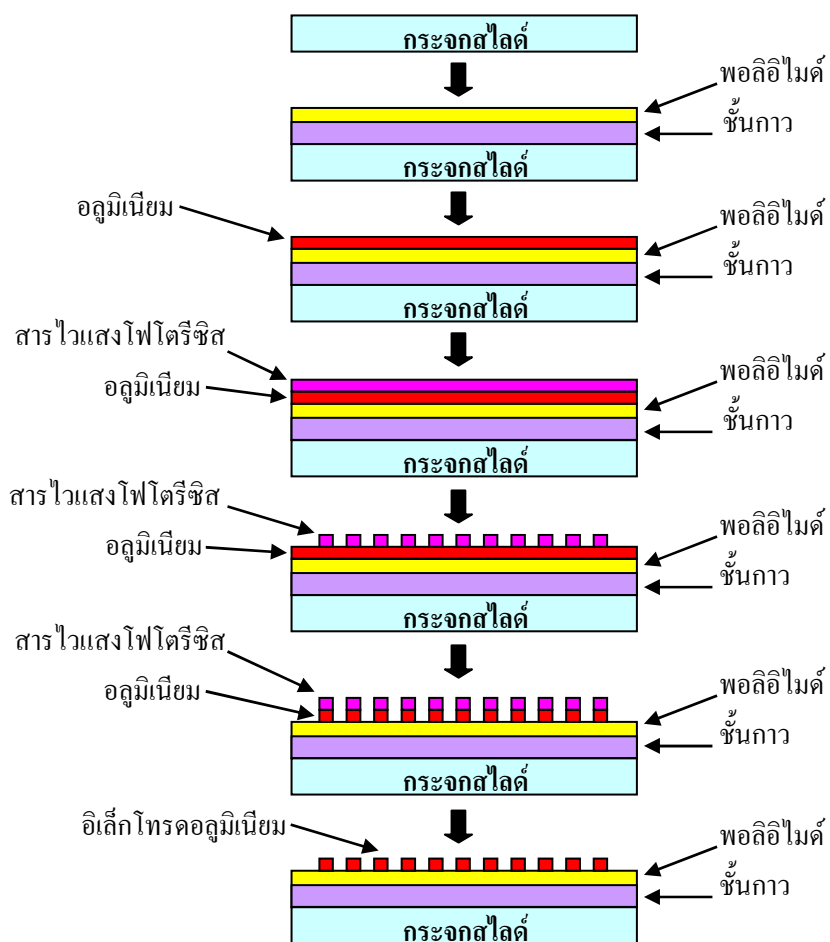
ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิส AZ1350 หยอดลงบนชั้น อลูมิเนียมและนำเข้าเครื่องหมุนที่ตั้งความเร็วรอบการหมุนต่อเนื่องได้สองระดับคือ ความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที และ ความเร็วรอบ 2,500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐานนาน 30 วินาที ล้างสารไวแสงโฟโตรีซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่ง นาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สองนาน 15 วินาที ล้างด้วยน้ำด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยากัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปเชื่อมต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมด้วยกาวตัวนำอิมพอกซีโลหะเงิน (silver conductive epoxy CW2400) ของบริษัท Chemtronic รูปที่ 5.4 แสดงภาพถ่ายของต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้ว



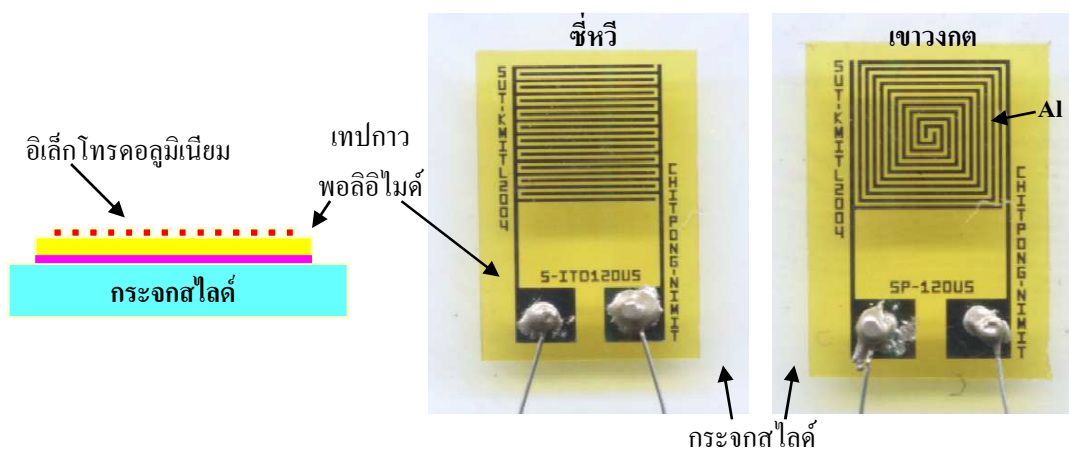
รูปที่ 5.1 ลวดลายและขนาดอิเล็กโทรดอลูมิเนียมขนาด 120 μm ของตัวตรวจรู้แบบซี่หวี



รูปที่ 5.2 ลวดลายและขนาดอิเล็กโทรดอลูมิเนียมขนาด 120 μm ของตัวตรวจรู้แบบเขาวงกต



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนเทปกาวพอลิอิมิด

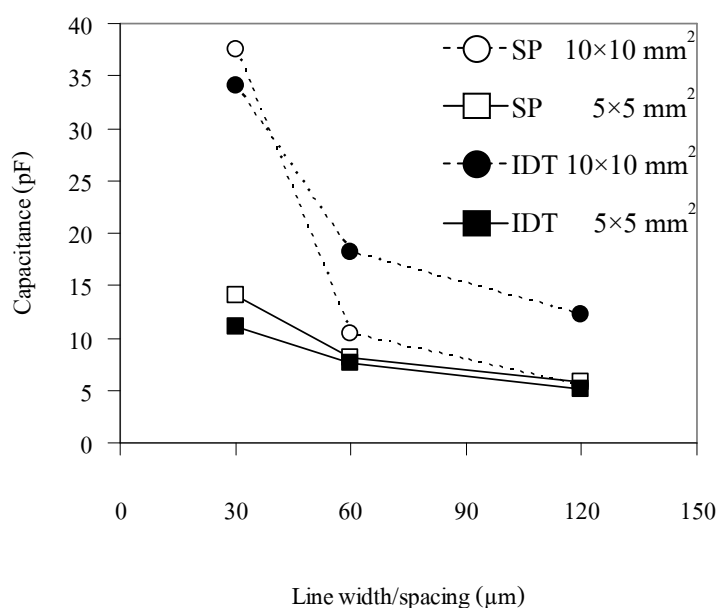


รูปที่ 5.4 ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

5.3 ผลการทดลองการใช้เทปกาวพอลิไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น

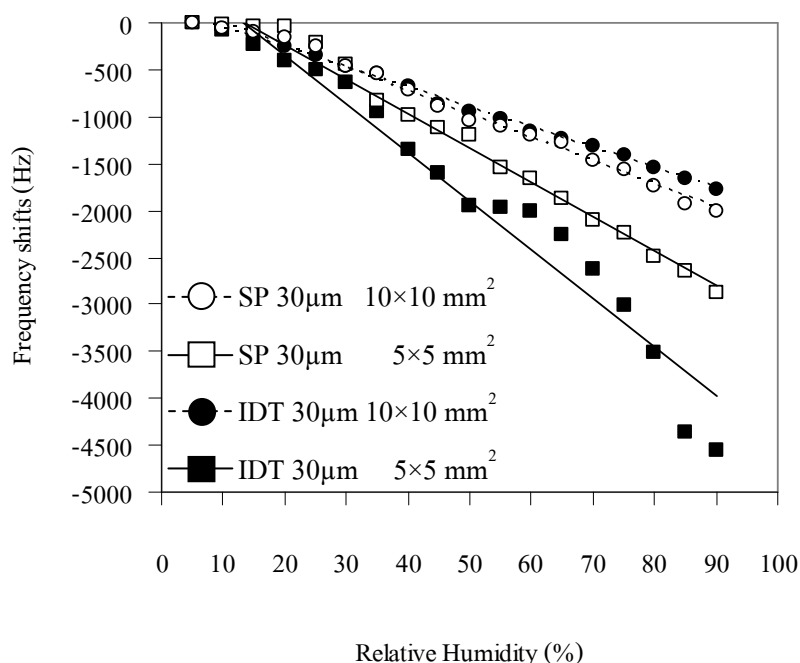
ผลการทดลองตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีรวมโดยใช้เทปกาวพอลิไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น เมื่อทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยประมาณของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วย LCR มิเตอร์ (BK Precision 875A) พบว่ามีค่าความจุไฟฟ้าขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 5 ถึง 38 pF ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ณ อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ในการวัดผลตอบสนองต่อความชื้นได้ทำการต่อตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นเข้ากับวงจรกำเนิดความถี่ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนตามค่าความจุไฟฟ้า ดังนั้นจะได้เอาต์พุตในรูปของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นในอากาศ

การทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้แต่ละแบบที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% พบว่าตัวตรวจรู้ที่มีพื้นที่ของอิเล็กโทรดมากกว่านั้นคือ มีพื้นที่ในการตรวจรู้มากกว่าจะมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดน้อยกว่า ส่วนประเภทของอิเล็กโทรดนั้นค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งแบบซีหวี (IDT) และแบบเขาวงกต (SP) ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ขนาด 5×5 ตารางมิลลิเมตร ให้ค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกัน ส่วนตัวตรวจรู้ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร นั้นมีค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน ระยะห่างและความกว้างระหว่างอิเล็กโทรดทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกันนั้นคือ ตัวตรวจรู้ที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยกว่าจะให้ค่าความจุไฟฟ้ามากกว่า ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นที่ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุไวความชื้นเปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย



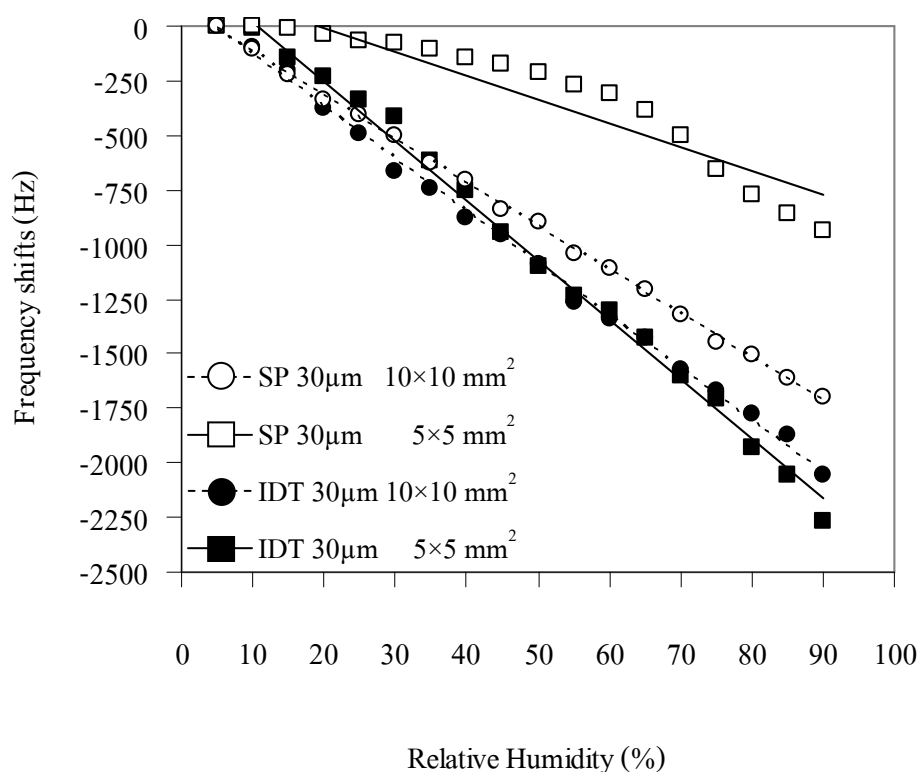
รูปที่ 5.5 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C ที่ 50%RH (IDT=ซีหวี, SP=เขาวงกต)

เมื่อเปรียบเทียบความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นในสภาวะเดียวกัน จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.6-5.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวตรวจรู้ที่มีความกว้างและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยกว่าจะมีความจุไฟฟ้ามากกว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่สร้างเพิ่มขึ้น ค่าความถี่เอาต์พุตจะลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าตัวตรวจรู้ที่มีพื้นที่มากกว่าให้ค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวที่มีพื้นที่น้อยกว่า ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้แบบเขาวงกตอยู่ในช่วงเดียวกับตัวตรวจรู้แบบซี่หวี อย่างไรก็ตามในการสร้างลวดลายอิเล็กโทรดแบบเขาวงกตมีข้อเสียคือ กระบวนการสร้างมีโอกาสเกิดความเสียหายทั้งหมดถ้าเส้นตัวนำขาดไปในช่วงใดช่วงหนึ่ง แต่แบบซี่หวีจะยังสามารถใช้งานซึ่งที่ไม่ขาดได้ต่อไป จากรูปที่ 5.6 แสดงผลการทดลองการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้เทปพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นที่มีโครงสร้างของลวดลายและขนาดของอิเล็กโทรดแตกต่างกัน โดยในการเปรียบเทียบนี้มีขนาดเส้นตัวนำ 30 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส โดยมีโครงสร้างเป็นแบบ IDT และ SP ซึ่งโครงสร้างทั้งสองมีขนาดพื้นที่ตรวจรู้ 5×5 ตารางมิลลิเมตร และ 10×10 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ การเลื่อนของความถี่ระหว่างของสร้างแบบ IDT และ SP ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ 10×10 ตารางมิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ส่วนการเลื่อนของความถี่ระหว่างของสร้างแบบ IDT และ SP ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ 5×5 ตารางมิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งสังเกตได้จากแนวโน้มความชันจากกราฟ



รูปที่ 5.6 การเลื่อนความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นตัวนำของอิเล็กโทรด 30 µm ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C (IDT=ซี่หวี, SP=เขาวงกต)

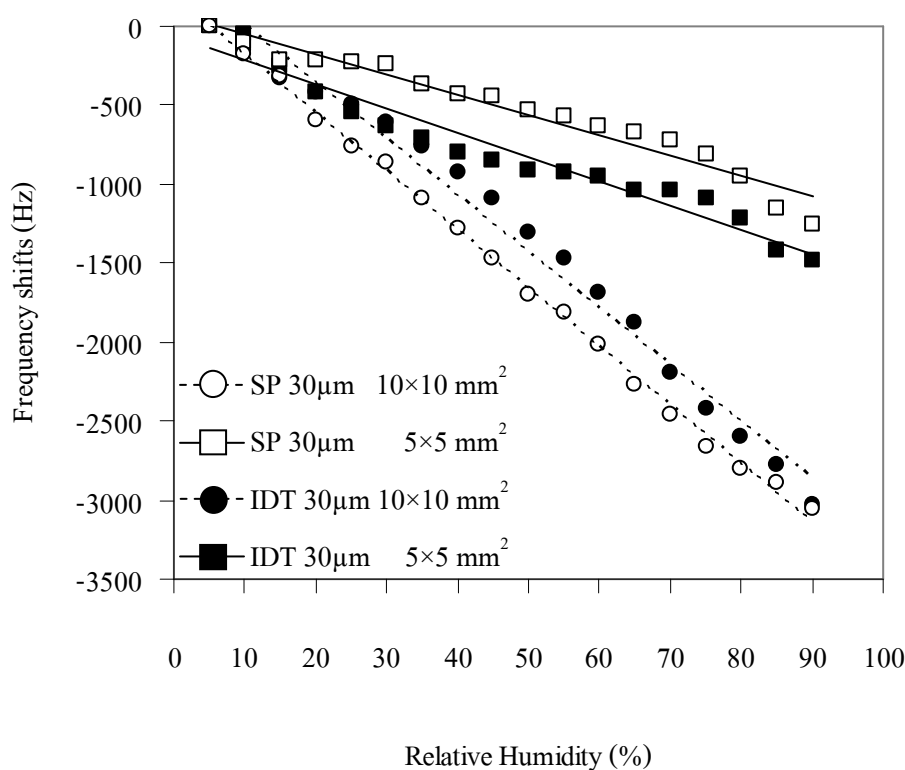
จากรูปที่ 5.7 แสดงผลการทดลองการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้ เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นที่มีโครงสร้างของลวดลายและขนาดของอิเล็กโทรดแตกต่างกัน โดยในการเปรียบเทียบนี้มีขนาดเส้นตัวนำ 60 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส โดยมี โครงสร้างเป็นแบบ IDT และ SP ซึ่ง โครงสร้างทั้งสองมีขนาดพื้นที่ตรวจรู้ 5×5 ตารางมิลลิเมตร และ 10×10 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ การเลื่อนของความถี่ระหว่างของสร้างแบบ IDT และ SP ที่มี พื้นที่ตรวจรู้ 10×10 ตารางมิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ส่วนการเลื่อนของความถี่ระหว่าง ของสร้างแบบ IDT และ SP ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ 5×5 ตารางมิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างมาก ซึ่งสังเกตได้จากแนวโน้มความชันจากกราฟ



รูปที่ 5.7 การเลื่อนความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นตัวนำของ อิเล็กโทรด 60 µm ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C (IDT=ซีหวี, SP=เขาวงกต)

จากรูปที่ 5.8 แสดงผลการทดลองการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้ เทปกาวพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้นที่มีโครงสร้างของลวดลายและขนาดของอิเล็กโทรดต่างกัน โดยในการเปรียบเทียบนี้มีขนาดเส้นตัวนำ 120 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส โดยมี โครงสร้างเป็นแบบ IDT และ SP ซึ่ง โครงสร้างทั้งสองมีขนาดพื้นที่ตรวจรู้ 5×5 ตารางมิลลิเมตร

และ 10×10 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ การเลื่อนของความถี่ระหว่างของสร้างแบบ IDT และ SP ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ 10×10 ตารางมิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ส่วนการเลื่อนของความถี่ระหว่างของสร้างแบบ IDT และ SP ที่มีพื้นที่ตรวจรู้ 5×5 ตารางมิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน ซึ่งสังเกตได้จากแนวโน้มความชันจากกราฟ จากข้อมูลการวัดที่ได้พบว่าความถี่เอาต์พุตของวงจรกำเนิดความถี่มีแนวโน้มลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าตัวตรวจรู้ขนาดใหญ่มีความเป็นเชิงเส้นและมีเสถียรภาพมากกว่าตัวตรวจรู้ขนาดเล็ก และไม่มี ความแตกต่างกันระหว่างแบบเขาวงกตและแบบซี่หวี สำหรับตัวตรวจรู้ที่มีขนาดเล็กพบว่ามี ความไวต่อการกระเพื่อมของอุณหภูมิมากกว่าตัวตรวจรู้ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงการควบคุม อุณหภูมิของระบบการวัดให้คงที่มากขึ้น



รูปที่ 5.8 การเลื่อนความถี่เอาต์พุตของตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นตัวนำของ อิเล็กโทรด $120 \mu\text{m}$ ทดลอง ณ อุณหภูมิ 29°C (IDT=ซี่หวี, SP=เขาวงกต)

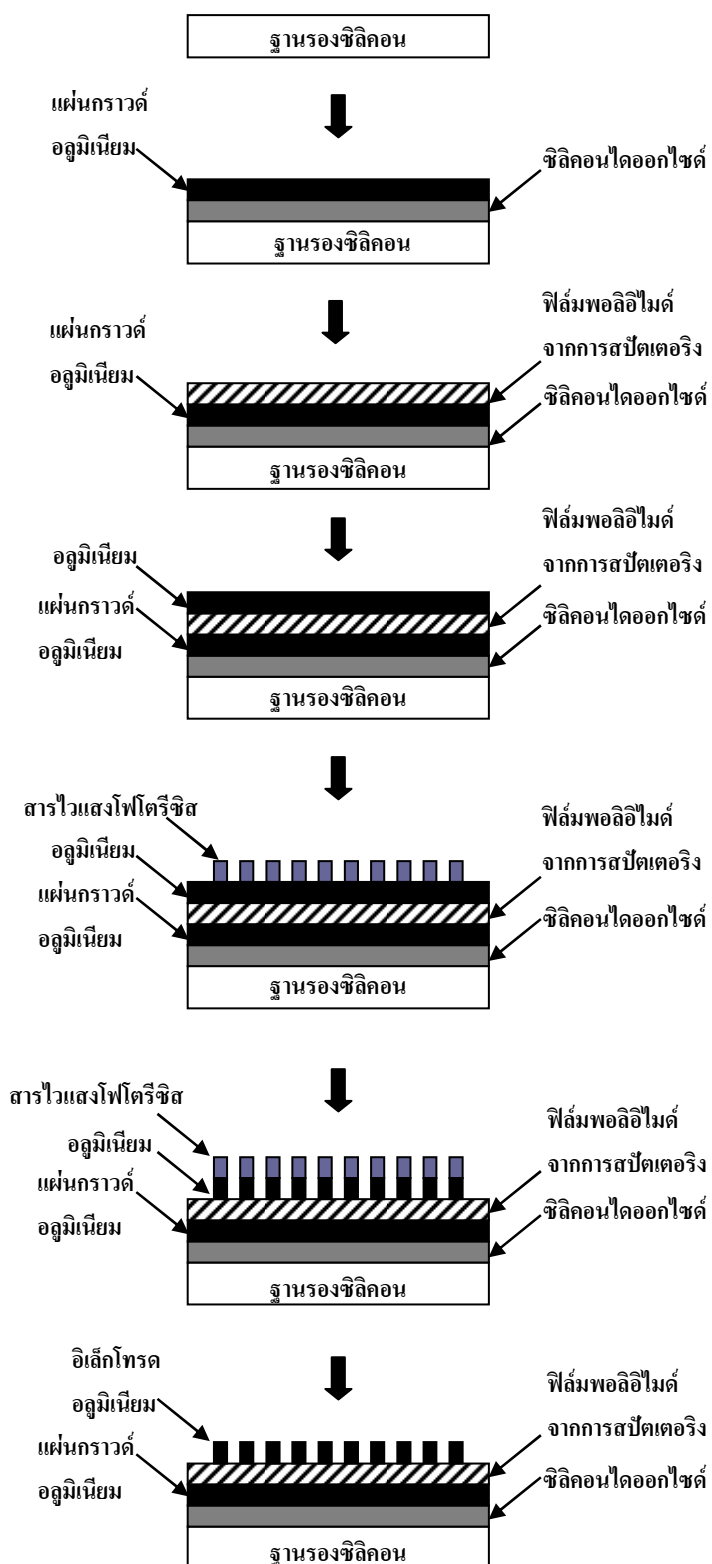
5.4 การใช้การสเปคโตริงพอลิอิมไนด์เป็นวัสดุไวความชื้นโดยสร้างด้วยฐานรองซิลิคอน

ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงการสร้างต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้การสเปคโตริงในการ เคลือบวัสดุไวความชื้น โดยออกแบบให้เส้นตัวนำของอิเล็กโทรดมีขนาดเล็กลงเหลือ

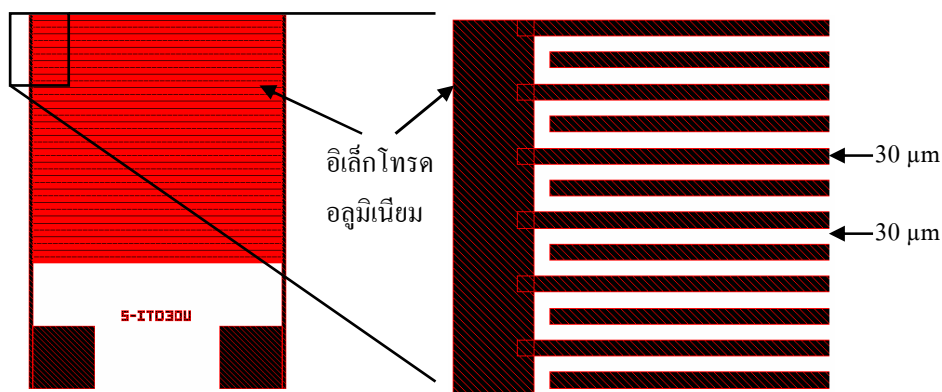
30 ไมโครเมตร และเพิ่มแผ่นกราวด์เพื่อให้ได้โครงสร้างตัวเก็บประจุที่ดีขึ้น กระบวนการสร้างเริ่มต้นจากการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ห่อหุ้มแผ่นซิลิคอนสะอาดด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) เพื่อให้ผิวแผ่นซิลิคอนกลายเป็นฉนวนไฟฟ้า แล้วเคลือบชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยวิธีการระเหยโลหะในสุญญากาศ ชั้นอลูมิเนียมนี้ทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ให้กับโครงสร้าง จากนั้นทำการเคลือบชั้นของพอลิอิมิด์ทับลงบนระนาบกราวด์อลูมิเนียม แล้วเคลือบทับด้วยอลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่ง สำหรับชั้นอลูมิเนียมด้านบนนั้นจะถูกกัดให้เกิดลวดลายอิเล็กทรอนิกส์แบบซีวี ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน

รูปที่ 5.9 แสดงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวม โดยใช้การสเปคเตอรืงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้นซึ่งอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้คือ เริ่มกระบวนการสร้างโดยทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ห่อหุ้มแผ่นซิลิคอนสะอาดด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน จากนั้นเคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียม โดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร ทำการเคลือบชั้นพอลิอิมิด์ด้วย การสเปคเตอรืงนาน 45 นาที (หนา 45 Å) เคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร

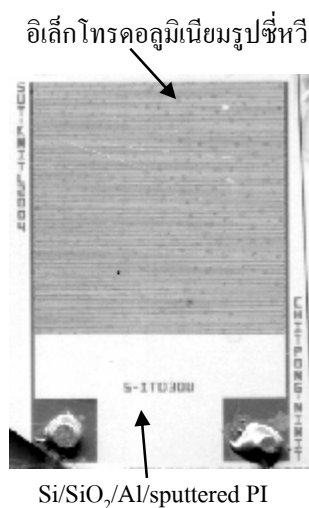
จากนั้นทำการกัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิส AZ1350 หยกลงบนชั้นอลูมิเนียมและนำเข้าเครื่องหมุนเคลือบที่ตั้งความเร็วรอบหมุนต่อเนื่องได้สองระดับคือ ความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที และ ความเร็วรอบ 2,500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงเพื่อถ่ายถอดลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐานนาน 30 วินาที ล้างสารไวแสงโฟโตรีซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่ง นาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สอง นาน 15 วินาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยาคัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 จากนั้นล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปเชื่อมต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมด้วยกาวตัวนำออกซีโลหะเงินของบริษัท Chemtronic จากลวดลายและขนาดอิเล็กทรอนิกส์ของตัวตรวจรู้ดังรูปที่ 5.10 ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ 197 ซี ยาว 9,930 ไมโครเมตร กว้าง 30 ไมโครเมตร พื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์มีขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร และรูปที่ 5.11 แสดงภาพถ่ายของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้ปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยใช้กระบวนการผลิตวงจรรวมแทนกระบวนการผลิตด้วยแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 5.9 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม โดยสร้างด้วย ฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 5.10 ทดสอบและขนาดอิเล็กโทรดอลูมิเนียมของตัวตรวจรู้

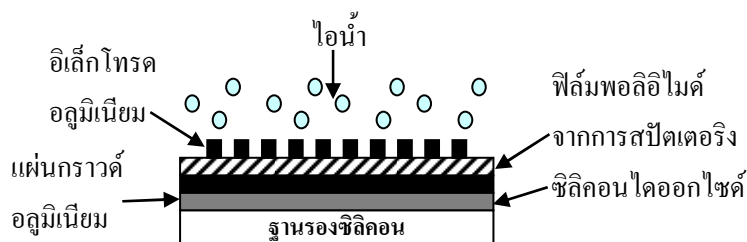


รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม โดยมีเส้น
ตัวนำขนาด 30 μm

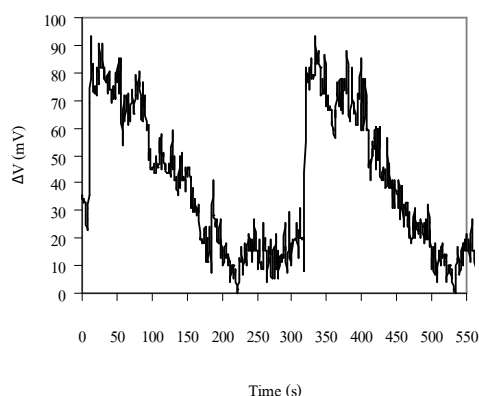
5.5 ผลการทดลองการใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นโดยสร้างด้วย ฐานรองซิลิคอน

ทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้นดัง
รูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 แสดงการวัดช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น
โดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่
เปลี่ยนแปลงที่อัตราการชั่งตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที ให้ค่าแรงดันฐาน 3.51 โวลต์ พบว่าแอมพลิจูด
ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศ

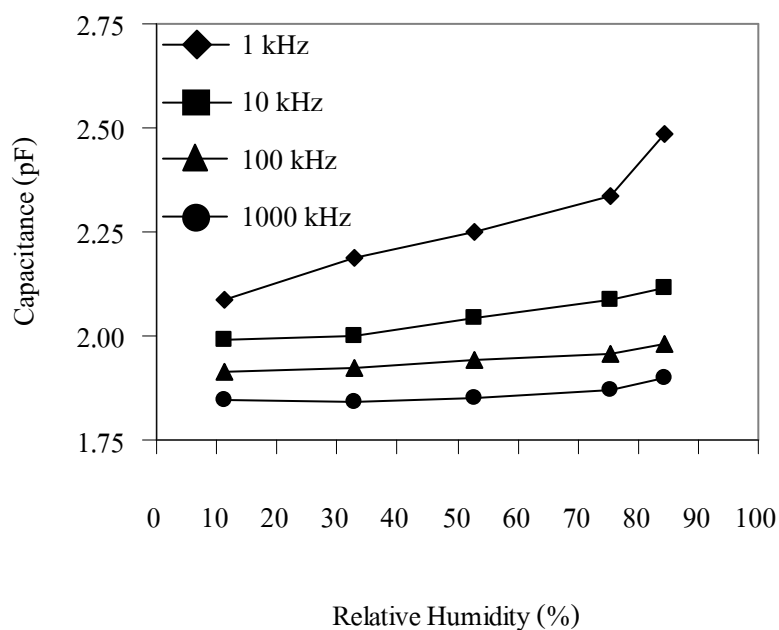
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90% ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 0-90 มิลลิโวลต์ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 1.3 วินาที และระยะเวลาการคายความชื้น 247.1 วินาที ทำการเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 5.14 พบว่าเมื่อความถี่การวัดสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้า ณ ความชื้นคงที่ใด ๆ จะลดลง ผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงในทุก ๆ ความถี่ที่ทำการทดลองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-85% รูปที่ 5.15 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์เมื่อต่อตัวตรวจรู้เข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ พบว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% ต่อจากผลการทดลองดังรูปที่ 5.15 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 5.16 ทำให้ทราบว่าในช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% อยู่ที่ประมาณ 0-4 มิลลิโวลต์



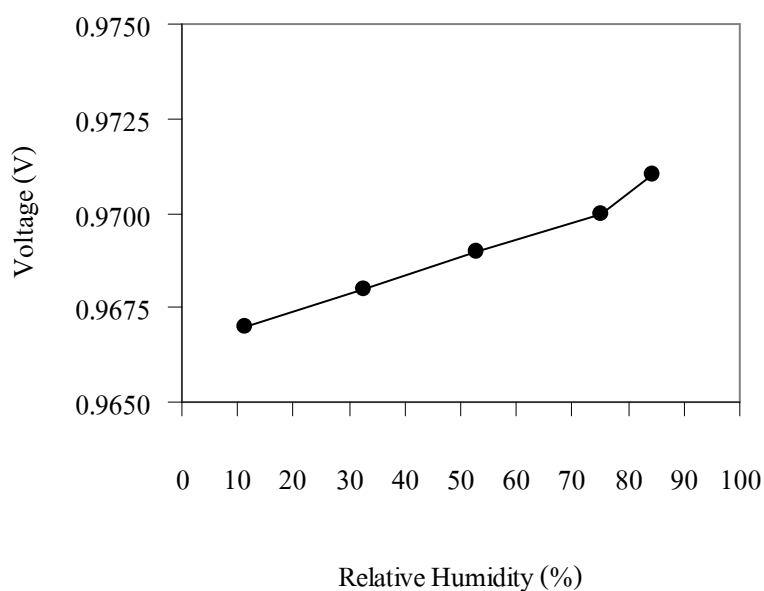
รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นโวลุ่มความชื้น



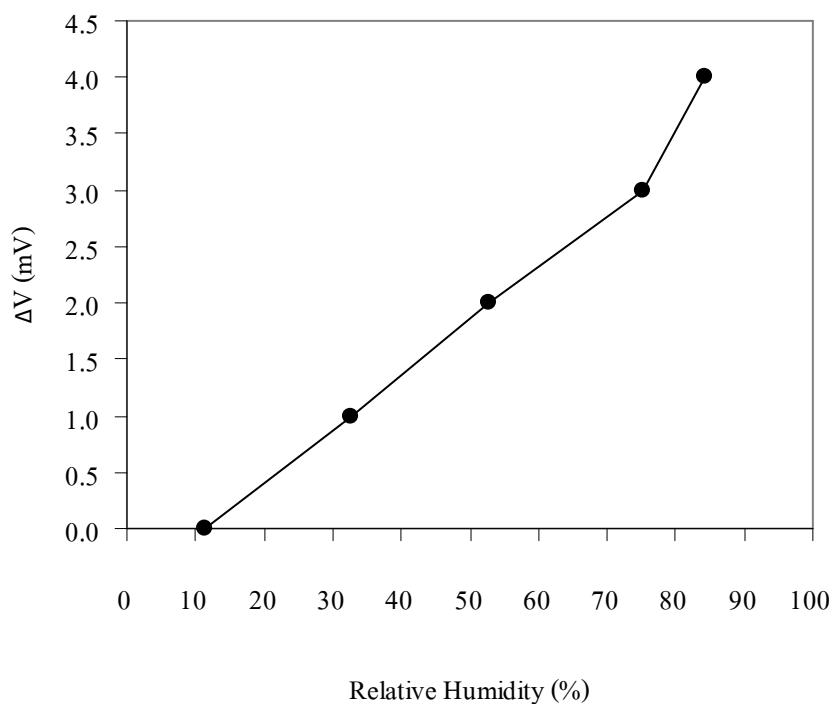
รูปที่ 5.13 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดหนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 5.14 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.15 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

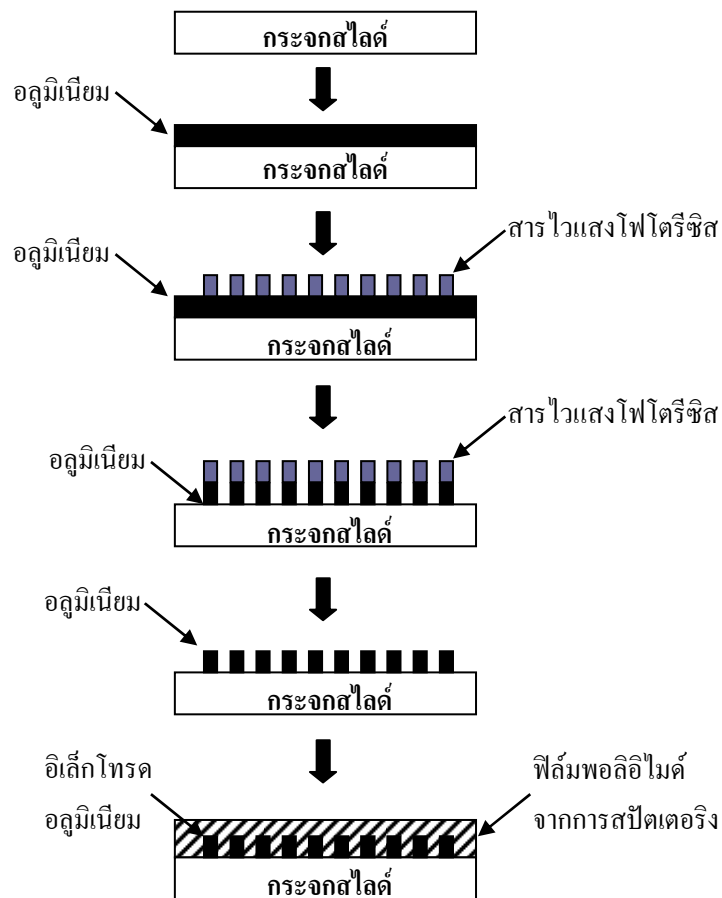


รูปที่ 5.16 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดหนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

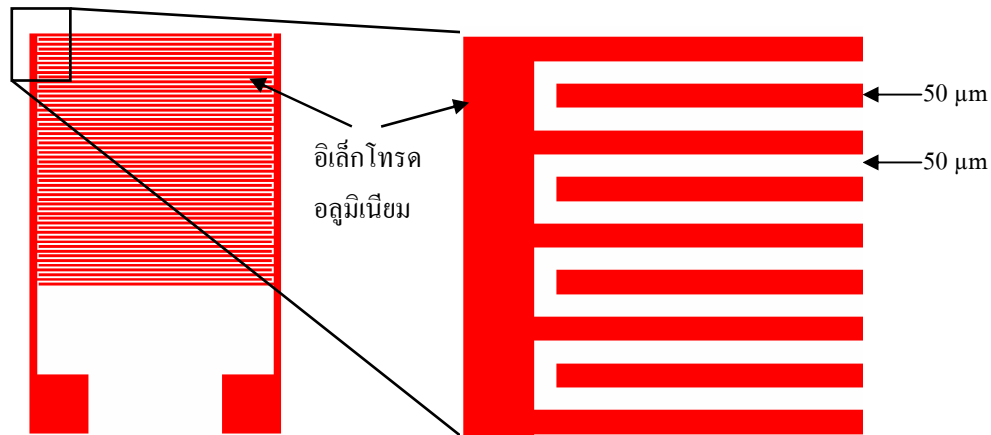
5.6 การใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นโดยสร้างด้วยฐานรองกระจกสไลด์

ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงการสร้างต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้การสปีดเตอริงในการเคลือบวัสดุไวความชื้น โดยออกแบบให้เส้นตัวของอิเล็กโทรดอลูมิเนียมมีขนาด 50 ไมโครเมตร บนฐานรองกระจกสไลด์ สำหรับชั้นอลูมิเนียมด้านบนนั้นจะถูกกัดให้เกิดลวดลายอิเล็กโทรดแบบซี่หวีด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน รูปที่ 5.17 แสดงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งจากลวดลายและขนาดอิเล็กโทรดอลูมิเนียมของตัวตรวจรู้ดังรูปที่ 5.18 ประกอบด้วยอิเล็กโทรด 54 ซี่ ยาว 5,000 ไมโครเมตร กว้าง 50 ไมโครเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรดมีขนาด 5×5 ตารางมิลลิเมตร อธิบายกระบวนการสร้างเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้คือ เริ่มกระบวนการสร้างโดยทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน เคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร จากนั้นทำการกัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กโทรดด้วยกระบวนการ

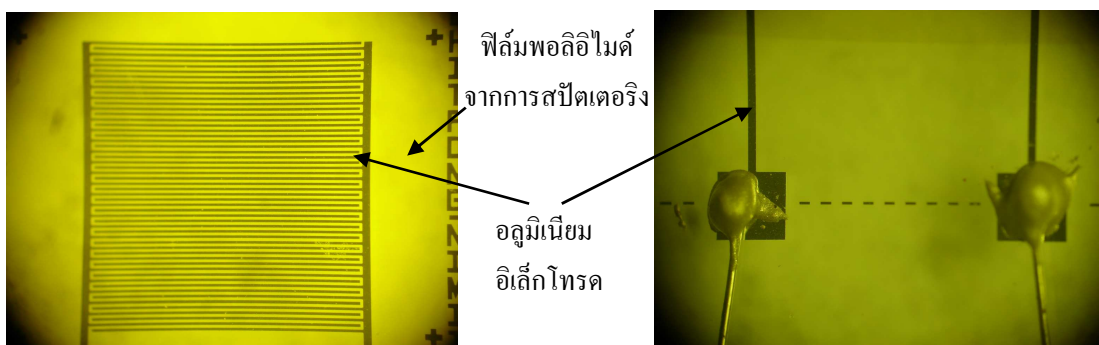
โฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน โดยใช้สารไวแสงโฟโตริซิส AZ1350 หยอดลงบนชั้นอลูมิเนียมและนำเข้าเครื่องหมุนเคลือบที่ตั้งความเร็วรอบหมุนต่อเนื่องได้สองระดับคือ ความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที และ ความเร็วรอบ 2,500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน นาน 30 วินาที ล้างสารไวแสงโฟโตริซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่ง นาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สอง นาน 15 วินาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยากัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วย กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน เคลือบชั้นพอลิอิมิดด้วยการสปัตเตอร์ริงนาน 45 นาที (หนา 45 Å) นำตัวตรวจรูที่สร้างเสร็จแล้วไปเชื่อมต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมด้วยกาวตัวนำอิพอกซีโลหะเงิน ของบริษัท Chemtronic ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.17 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรูความถี่ขึ้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์



รูปที่ 5.18 ลวดลายและขนาดอินเดียมทินออกไซด์อลูมิเนียมไนไตรด์ของตัวตรวจรู้

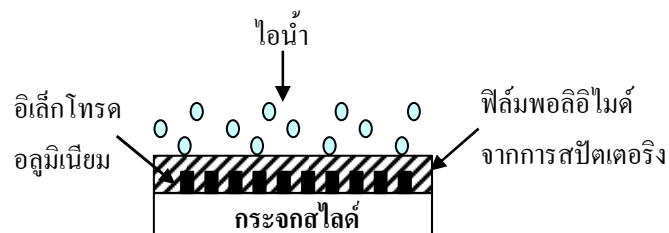


รูปที่ 5.19 ภาพถ่ายตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์ โดยมีเส้นตัวนำขนาด 50 μm

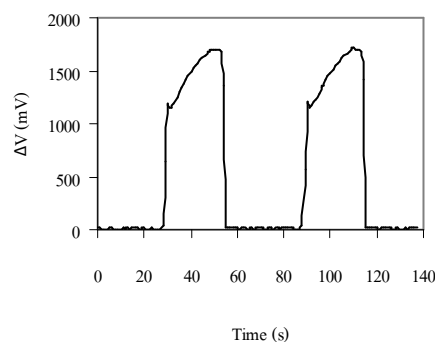
5.7 ผลการทดลองการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นโดยสร้างด้วยฐานรองกระจกสไลด์

ทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้นดังรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 แสดงการวัดช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่อัตราการชั่งตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที ให้ค่าแรงดันฐาน 1.3 โวลต์ พบว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90% ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 0-1.7 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 23 วินาที และระยะเวลาการคาย

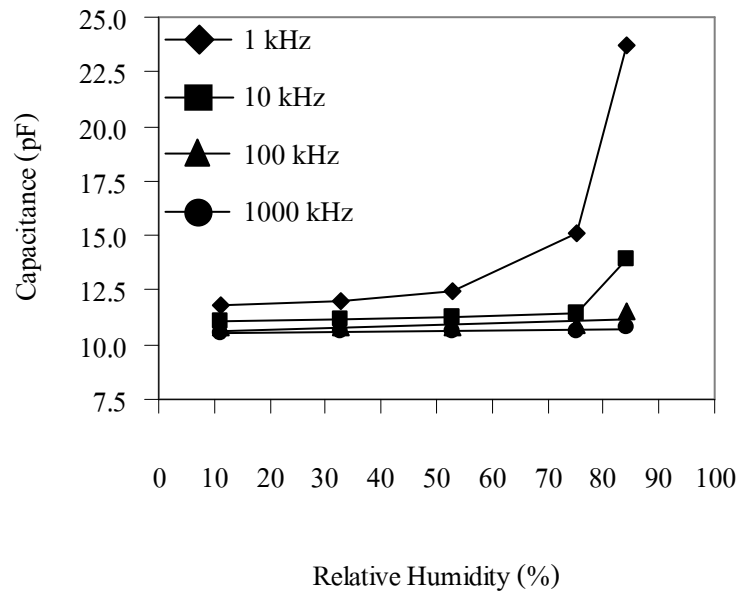
ความถี่ 7 วินาที ทำการเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 5.23 พบว่าเมื่อความถี่การวัดสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้า ณ ความถี่ที่ใด ๆ จะลดลง ผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงในทุก ๆ ความถี่ที่ทำการทดลองในช่วงความถี่สัมพัทธ์ประมาณ 10-85% ยกเว้นที่ความถี่ 1 kHz และ 10 kHz มีความไม่เป็นเชิงเส้น ในช่วงความถี่สัมพัทธ์ 75-85% รูปที่ 5.24 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความถี่สัมพัทธ์เมื่อต่อตัวตรวจรู้เข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวนเตอร์ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ พบว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่สัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่สัมพัทธ์ 75-85% ต่อจากผลการทดลองดังรูปที่ 5.24 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความถี่สัมพัทธ์ดังรูปที่ 5.25 ทำให้ทราบว่าในช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่สัมพัทธ์ 10-75% อยู่ที่ประมาณ 0-45 มิลลิโวลต์ และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่สัมพัทธ์ 75-85% อยู่ที่ประมาณ 45-100 มิลลิโวลต์



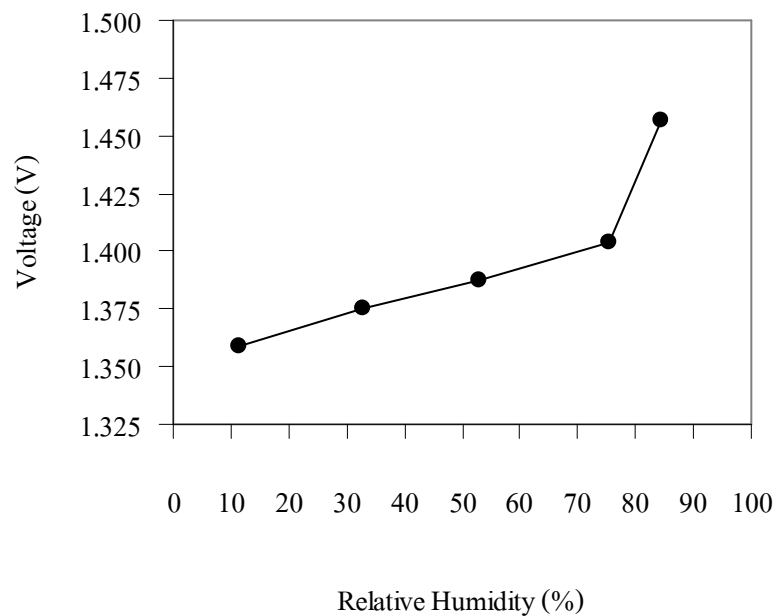
รูปที่ 5.20 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความถี่ชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความถี่เข้าสู่ชั้นไวความถี่



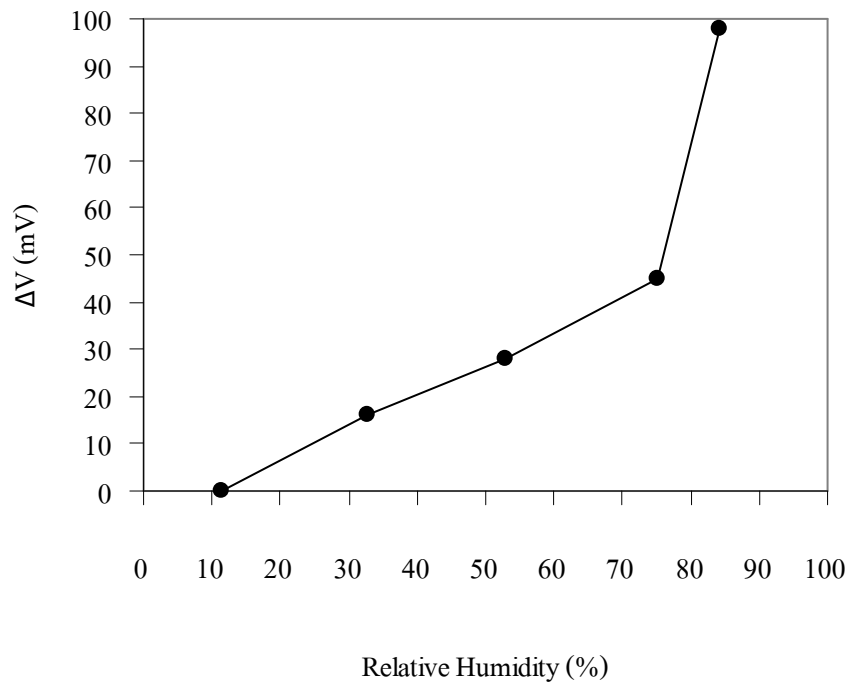
รูปที่ 5.21 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความถี่ของตรวจรู้ความถี่ชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 5.22 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอีไมด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.23 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอีไมด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

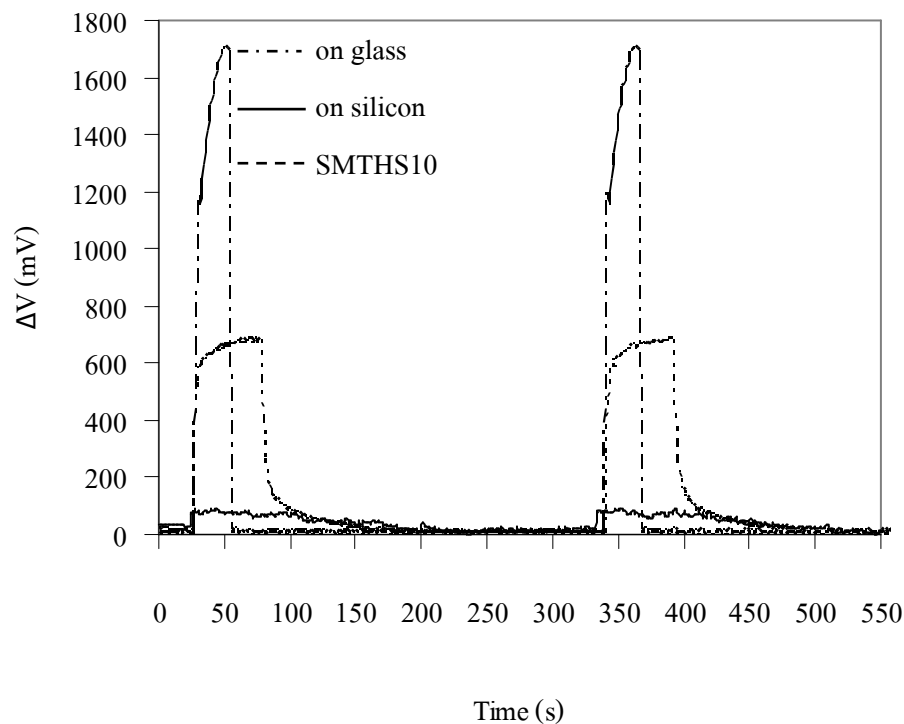


รูปที่ 5.24 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจวัดความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิด์หนา 45 Å ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

5.8 เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้ฐานรองซิลิคอนกับฐานรองกระจกสไลด์โดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น

ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจวัดทั้งสองประเภทที่ใช้ชั้นไวความชื้นเหมือนกันคือ พอลิอิมิด์จากการสปัตเตอริงหนา 45 อังสตรอม แต่ต่างกันตรงที่ใช้ฐานรองซิลิคอนกับฐานรองกระจกสไลด์และการเคลือบพอลิอิมิด์จากการสปัตเตอริงแตกต่างกันคือแบบฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีโครงสร้างของขั้วอิเล็กโทรดอยู่บนพอลิอิมิด์จากการสปัตเตอริง ส่วนแบบฐานรองกระจกสไลด์นั้นมีโครงสร้างของขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกเคลือบทับด้วยพอลิอิมิด์จากการสปัตเตอริง ทำการให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดโดยเริ่มจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 จนถึง 90% แสดงดังรูปที่ 5.25 พบว่าตัวตรวจวัดที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมใช้ระยะเวลาในการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจวัดที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจวัดที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมใช้ระยะเวลาในการคายความชื้นมากกว่าตัวตรวจวัดที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ แต่ตัวตรวจวัดทั้งสองประเภทดังกล่าวใช้ระยะเวลาการดูดความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจวัดเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ของบริษัท Smartec

แต่ระยะเวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมมากกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนของตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมอยู่ที่ 0-90 มิลลิโวลต์ ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์อยู่ที่ 0-1.7 โวลต์ และตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 อยู่ที่ 0-700 มิลลิโวลต์ พบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมประมาณ 18.9 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าประมาณ 7.8 เท่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีค่ามากกว่าประมาณ 2.4 เท่า นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 กับตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์



รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมระหว่างการสร้างบนฐานรองซิลิคอนกับการสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบช่วงเวลากการตอบสนองของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภท

ประเภทตัวตรวจรู้	เวลาการดูดซึ่มความชื้น (วินาที)	เวลาการคายความชื้น (วินาที)
วงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์ (PI sputtered 45 Å)	23	7
วงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนมีแผ่น กราวด์อลูมิเนียม (PI sputtered 45 Å)	1.3	247.1
SMTHS10	54	110

จากการทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว ดังรูปที่ 5.26 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ที่มีความกว้างและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 50 ไมโครเมตร แตกต่างกับตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมที่มีความกว้างและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 30 ไมโครเมตร สำหรับตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz เพราะเป็นความถี่ที่ตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความถี่อื่น ๆ เนื่องจากตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทใช้วัสดุฐานรองและโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันทำให้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ให้ค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อันเนื่องมาจากตัวตรวจรู้ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเคลือบทับขั้วอิเล็กโทรดอลูมิเนียมบนฐานรองกระจกสไลด์ ซึ่งแตกต่างกับตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์ซึ่งสร้างขั้วอิเล็กโทรดอลูมิเนียมบนฟิล์มพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริงนั่นเอง พบว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์อยู่ที่ 0.163 pF/%RH คิดเป็น 1.379% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เร็วกว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมอยู่ที่ 0.005 pF/%RH คิดเป็น 0.262% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ดังกล่าวกับตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรอง

กระจกสไลด์ ตารางที่ 5.2 แสดงความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5-1) และสมการที่ (5-2)

$$sensitivity (S) = \frac{\Delta C}{\Delta RH} \quad (5-1)$$

$$sensitivity (S) = \frac{\Delta C}{C_{11.3\%RH} \Delta RH} \times 100 \quad (5-2)$$

โดยที่ S คือ ความไว (pF/%RH หรือ %)

ΔC คือ ผลต่างของค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% กับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 84.3% (pF)

ΔRH คือ ผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ 84.3% (%)

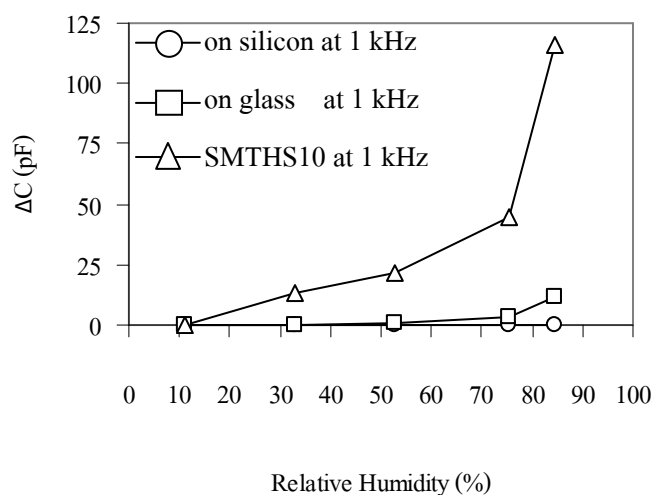
$C_{11.3\%RH}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% (pF)

ตารางที่ 5.2 สรุปค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz

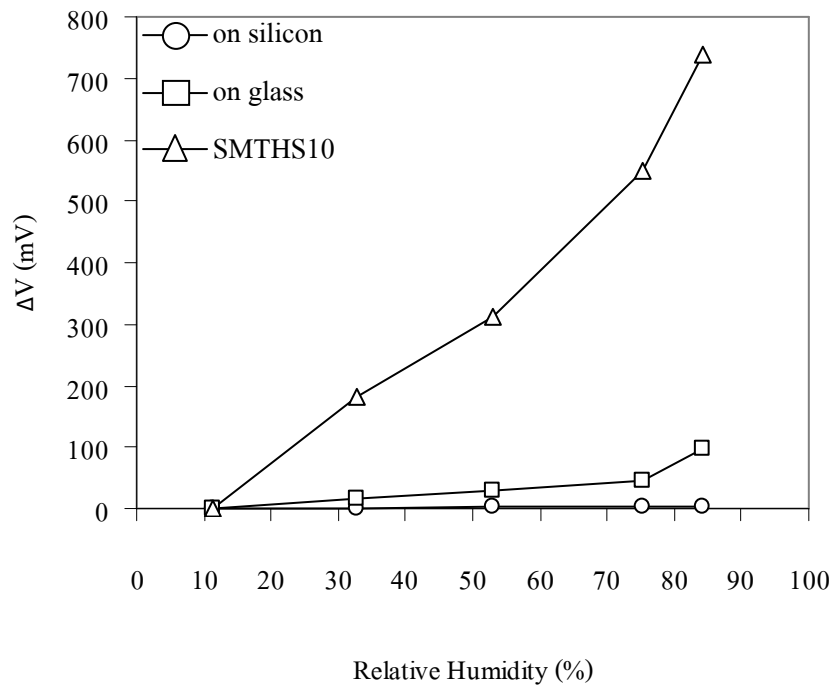
ประเภทตัวตรวจรู้	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 11.3%RH (pF)	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 84.3%RH (pF)	ความไว (pF/%RH)	ความไว (%)
วงจรรวมบนฐานรองกระจก สไลด์ (PI sputtered 45 Å)	11.798	23.682	0.163	1.379
วงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนมี แผ่นกราวด์ออลูมิเนียม (PI sputtered 45 Å)	2.086	2.485	0.005	0.262
SMTHS10	161.815	277.436	1.583	0.978

จากการทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อสอบเทียบความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จึงได้นำตัวตรวจรู้มาประกอบเข้ากับวงจระะสเทเบิลมัลติไวเบรเตอร์เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 5.27 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์

อลูมิเนียม ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่ให้ผลตอบสนองค่อนข้างเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันดังกล่าวมาแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่วัดค่าความจุไฟฟ้า นั่นคือเมื่อนำตัวตรวจรู้ประกอบเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมีลิตีไวเบรเตอร์ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่เปลี่ยนแปลงต่อความชื้นแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเอาต์พุตของวงจร เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% ตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ที่ 0-4 มิลลิโวลต์ น้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-100 มิลลิโวลต์ ประมาณ 25 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-750 มิลลิโวลต์ พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมและตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีค่าน้อยกว่าประมาณ 187.5 เท่า และ 7.5 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมระหว่างการสร้างบนฐานรองซิลิคอนกับการสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมระหว่างการสร้างบนฐานรองซิลิคอนกับการสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

5.9 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้วัสดุไวความชื้นที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ เทปกาวพอลิอิมิด และพอลิอิมิดจากการสปีดเตอริงที่ใช้ฐานรอง 2 ประเภทคือ ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียม และฐานรองกระจกสไลด์ พร้อมทั้งทำการทดลองเพื่อทดสอบการตอบสนอง หาความไว ช่วงเวลาการตอบสนอง และการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ จากข้อมูลการวัดตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นพบว่าความถี่เอาต์พุตของวงจรกำเนิดความถี่มีแนวโน้มลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสังเกตได้ว่าตัวตรวจรู้ขนาดใหญ่มีความเป็นเชิงเส้นและมีเสถียรภาพมากกว่าตัวตรวจรู้ขนาดเล็กและไม่มีความแตกต่างกันระหว่างแบบเขาวงกตและแบบซี่หวี สำหรับตัวตรวจรู้ที่มีขนาดเล็กพบว่ามีความไวต่อการกระเพื่อมของอุณหภูมิมากกว่าตัวตรวจรู้ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงการควบคุมอุณหภูมิของระบบการวัดให้คงที่มากขึ้น

จากข้อมูลการวัดช่วงเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น โดยทำการให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดโดยเริ่มจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% จนถึง 90% และลดลงจนเป็น 0% อีกครั้ง พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีเวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นคือ 23 วินาที และ 7 วินาที ตามลำดับ ซึ่งเวลาการดูดซึมความชื้นมากกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมที่มีเวลาการดูดซึมความชื้น 1.3 วินาที แต่เวลาการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมที่มีเวลาการคายความชื้น 247.1 วินาที แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีเวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นคือ 54 วินาที และ 110 วินาที เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทดังกล่าวใช้เวลาการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ดังกล่าว แต่เวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมากกว่าตัวตรวจรู้ SMTHS10 ส่วนเวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์นั้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ SMTHS10 และพบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมประมาณ 18.9 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าประมาณ 7.8 เท่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีค่ามากกว่าประมาณ 2.4 เท่า นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 กับตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมจะมีความไวน้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์

ผลการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz พบว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์อยู่ที่ 0.163 pF/%RH คิดเป็น 1.378% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เร็วกว่าความไวจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมอยู่ที่ 0.005 pF/%RH คิดเป็น 0.262% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ดังกล่าว ส่วนการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของ

ตัวตรวจรู้ที่ใช้ที่ฐานรองกระจกสไลด์มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราฟต์
อลูมิเนียม ประมาณ 25 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่า
ตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราฟต์อลูมิเนียมและตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีค่า
น้อยกว่าประมาณ 187.5 เท่า และ 7.5 เท่า ตามลำดับ จากการทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่า
สามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดี แสดงว่าเทปทาวพอลิอิมิดและฟิล์มที่ได้จาก
การสปีตเตอริงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นได้ทั้งสองกรณี

บทที่ 6

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

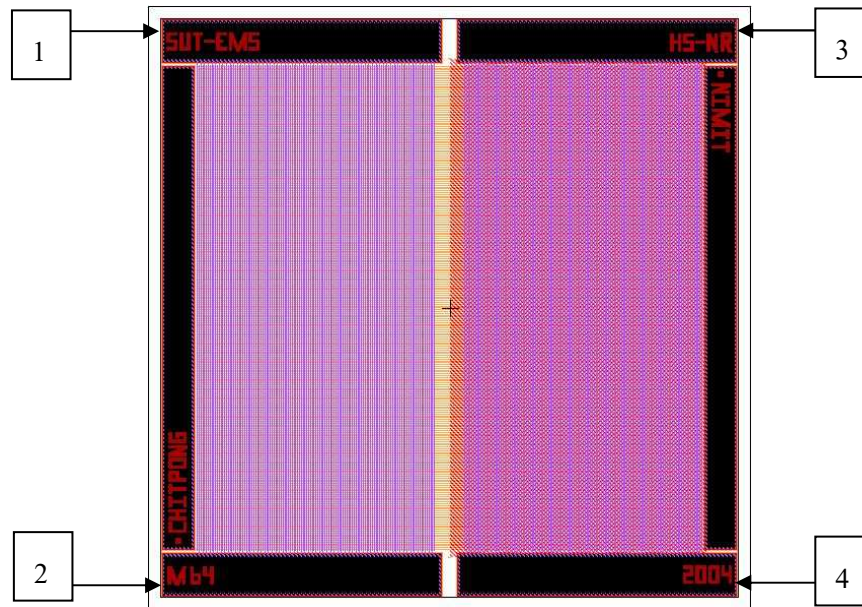
6.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเข้ามามีบทบาทในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้และตัวขับเคลื่อนขนาดเล็ก ประกอบกับเทคนิคและวิธีการสร้างที่หลากหลายซึ่งคล้ายกับเทคนิคและวิธีการสร้างวงจรรวมซึ่งช่วยให้สร้างได้ครั้งละปริมาณมาก ๆ ลดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการผลิต แต่ยังมีอีกเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งเรียกว่า Multi User MEMS Process (MUMPs) ซึ่งเป็นการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (surface micromachining) ที่มีระบบการสร้างที่เป็นมาตรฐานระบบหนึ่งซึ่งได้ถูกออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาค (micromachining) ทั่วไปทำให้ผู้ใช้ภายนอกสามารถออกแบบอุปกรณ์กลไฟฟ้าจุลภาคที่ต้องการโดยส่งสร้างไปยังบริษัท ก่อนที่จะนำมาทำกระบวนการหลังการสร้างเพื่อปลดโครงสร้างโดยการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก ซึ่งถูกใช้เป็นการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่จะนำเสนอในบทนี้ต่อไป

6.2 การออกแบบโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี Multi User MEMS Process (MUMPs)

ในการศึกษาออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ โครงสร้างกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งออกแบบด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น (PolyMUMPs) มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบซี่หวีเรียงสลับกัน และมีขั้วไฟฟ้าที่จะใช้ประกอบเข้ากับวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ภายนอกชิพ การออกแบบลวดลายของชิพนี้ ทำด้วยซอฟต์แวร์ L-Edit student version ดังรูปที่ 6.1 ขั้วอิเล็กโทรดหมายเลข 1 และ 2 เป็นขั้วตัวเก็บประจุตัวแรก และขั้วอิเล็กโทรดหมายเลข 3 และ 4 เป็นขั้วตัวเก็บประจุตัวที่สอง ซึ่งมีพื้นที่ตรวจรู้ขนาด $783 \times 1,616$ ตารางไมโครเมตร เท่ากันทั้งสองด้าน โดยคำนึงถึงกฎการออกแบบสำหรับเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น และออกแบบให้ตัวตรวจรู้ความชื้นประกอบด้วยซี่อิเล็กโทรดยาว 1,605 ไมโครเมตร กว้าง 3 ไมโครเมตร และจำนวน 131 ซี่ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 อุปกรณ์ที่สร้างด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs อาจประกอบด้วยชั้นของวัสดุบนแผ่นซิลิคอน ได้ทั้งหมด 7 ชั้น ดังตารางที่ 6.1 วัสดุในแต่ละชั้นสามารถกำหนดลวดลายได้ตามต้องการภายใต้ข้อจำกัดของกฎการออกแบบ

การสร้างชั้นวัสดุแต่ละชั้นจะมีวัสดุเกิดขึ้นทั้งสองด้านของแผ่นซิลิคอน เมื่อแบบถูกส่งไปยังผู้ผลิตชิปตามกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น



รูปที่ 6.1 ภาพร่างสองมิติของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่ออกแบบด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น

ตารางที่ 6.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs

ชนิดวัสดุ	ความหนา (นาโนเมตร)
ไนไตรด์ (Nitride)	600
พอลิ 0 (Poly 0)	500
ออกไซด์ 1 (First oxide)	2,000
พอลิ 1 (Poly 1)	2,000
ออกไซด์ 2 (Second oxide)	750
พอลิ 2 (Poly 2)	1,500
โลหะทองคำ (Metal)	500

กระบวนการสร้างอุปกรณ์ด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้คือ เริ่มกระบวนการโดยเคลือบชั้น Nitride ความหนา 600 นาโนเมตร ลงบน

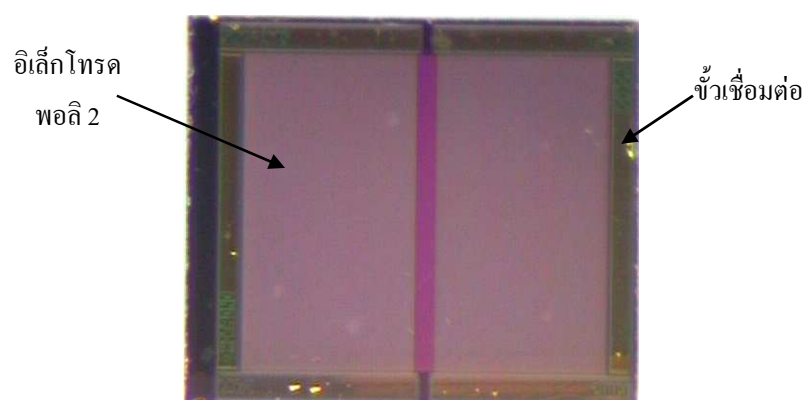
แผ่นซิลิคอนระนาบ (100) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความหนา 500 นาโนเมตร เจือสารชนิดอื่น ความต้านทาน 1-2 โอห์ม-ซ.ม. ต่อมาทำการเคลือบชั้น Poly0 ความหนา 500 นาโนเมตร แล้วกัดลวดลายตามภาพร่างสองมิติ (POLY0/CPZ/13) เพื่อสร้างลายเส้นของวัสดุ Poly0 หรือ (HOLE0/CHZ/41) เพื่อสร้างรูในวัสดุ Poly0 จากนั้นทำการเคลือบชั้น First oxide ความหนา 2 ไมโครเมตร แล้วกัดลวดลายตามภาพร่างสองมิติ (DIMPLE/COS/50) เพื่อสร้างรูลึก 750 นาโนเมตร เพื่อให้ Poly1 ซึ่งเป็นวัสดุชั้นถัดไปก่อตัวในรูกลายเป็นโครงสร้าง dimple ซึ่งใช้ป้องกันไม่ให้โครงสร้างของ Poly1 และ Poly0 เชื่อมติดกันในภายหลัง แล้วกัดรูทะลุวัสดุ First oxide สำหรับ Anchor1 ซึ่งเป็นช่องให้ วัสดุ Poly1 หยั่งลงไปยึดบนพื้นผิวของ Poly0 หรือ Nitride แล้วแต่กรณีดังนี้ ได้แก่ บริเวณที่ First oxide วางอยู่บน Poly0 การกัด Anchor1 จะหยุดที่ Poly0 และบริเวณที่ First oxide วางอยู่บน Nitride การกัด Anchor1 จะหยุดที่ Nitride จากนั้นเคลือบชั้น Poly1 ความหนา 2 ไมโครเมตร ในขั้นตอนนี้ Poly1 จะเติมลงในรูของ Dimple และ Anchor1

กระบวนการต่อมาทำการเคลือบผิวของ Poly1 ด้วย PSG หนา 200 นาโนเมตร และ anneal ที่ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำให้ อะตอมของฟอสฟอรัสใน PSG แพร่เข้าสู่ Poly1 ทำให้ความนำไฟฟ้าของ Poly1 เพิ่มขึ้น กัดลวดลายตามภาพร่างสองมิติ (POLY1/CPS/45) เพื่อเป็นแบบสำหรับลายเส้นของ Poly1 หรือ (HOLE1/CHO/0) เพื่อเป็นแบบสำหรับรูของ Poly1 แล้วกัด Poly1 ในส่วนที่อยู่นอก PSG ออกไป จากนั้นกัด PSG ที่ เคลือบชั้น Second oxide ความหนา 750 นาโนเมตร แล้วกัดลวดลายตามภาพร่างสองมิติ (POLY1_POLY2_VIA/COT/47) เพื่อให้ Poly2 เชื่อมกันกับ Poly1 ที่ช่องนี้ การกัด Second oxide นี้จะหยุดลงที่ชั้น Poly1 แล้วกัดลวดลายตามภาพร่างสองมิติ (ANCHOR2/COL/52) ทะลุชั้น Second oxide และ First oxide ซึ่งเชื่อมติดต่อกัน ให้ทะลุลงไปยังชั้น Poly0 หรือ Nitride แล้วแต่กรณี เพื่อให้ชั้น Poly2 หยั่งลงถึงชั้น Poly0 หรือ Nitride จากนั้นเคลือบชั้น Poly2 ความหนา 1.5 ไมโครเมตร ในขั้นตอนนี้ Poly2 จะเติมลงในรูของ Anchor2 เคลือบผิวของ Poly2 ด้วย PSG หนา 200 นาโนเมตร และ anneal ที่ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำให้อะตอมของฟอสฟอรัสใน PSG แพร่เข้าสู่ Poly2 ทำให้ความนำไฟฟ้าของ Poly2 เพิ่มขึ้นกัดลวดลายตามภาพร่างสองมิติ (POLY2/CPT/49) เพื่อเป็นแบบสำหรับลายเส้นของ Poly2 หรือ (HOLE2/CHT/1) เพื่อเป็นแบบสำหรับรูของ Poly2 แล้วกัด Poly2 ในส่วนที่อยู่นอก PSG ออกไป จากนั้นกัด PSG ที่ ต่อมาเคลือบชั้น Metal (ทองคำ) ความหนา 500 นาโนเมตร ด้วยกระบวนการใช้สารไอแสงโฟโตริซิสเป็นวัสดุชั่วคราวปกปิดบริเวณที่ไม่ต้องการเคลือบด้วยโลหะไว้ซึ่งจะสกัดทิ้งในภายหลัง โดยใช้ภาพร่างสองมิติ (METAL/CCM/51) สำหรับเส้นโลหะ หรือ (HOLEM/CHM/48) สำหรับรูของโลหะแล้วทำการตัดแยกชิพ, คัดแยก และจัดส่งให้ผู้ออกแบบ นำไปทำกระบวนการ post-processing ซึ่งอาจเป็นการกัดวัสดุ oxide ทิ้งเพื่อให้โครงสร้างที่เหลือสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ หรืออาจเป็นกระบวนการกัดช่องทะลุแผ่นซิลิคอน

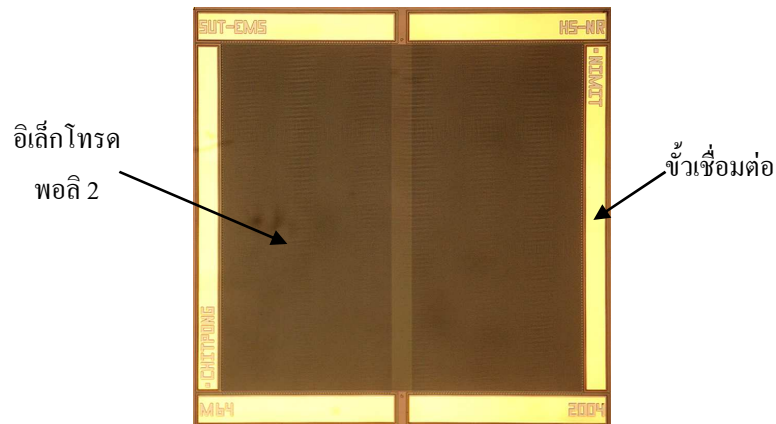
ชิฟจากกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น ที่ได้รับกลับมามีลักษณะดังรูปที่ 6.2 และมีรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นซึ่งรอบของการผลิตแต่ละครั้งจะแตกต่างกันดังตารางที่ 6.1 ชิฟที่ได้รับกลับมายังไม่ผ่านกระบวนการกัดชั้นผิวเคลือบป้องกันชิฟและออกไซด์ ในการออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้น จะใช้ชั้นวัสดุพอลิซิลิคอน 2 ทำเป็นอิเล็กโทรดแบบชี้หัว ให้ครอบคลุมพื้นที่ประมาณครึ่งหนึ่งของชิฟขนาด 2×2 ตารางมิลลิเมตร โดยที่หนึ่งชิฟประกอบด้วยตัวตรวจรู้ 2 ตัว เมื่อได้รับชิฟที่สร้างเสร็จแล้ว กลับมาจะต้องทำการเคลือบชั้นวัสดุไวความชื้น ด้วยการสปีด-เตอริงพอลิอิมิดที่ตกลงบนอิเล็กโทรด โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นแสดงในรูปที่ 6.2-6.3

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดคุณสมบัติของกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นที่ส่งไปสร้าง

ฟิล์ม	ความหนา (Å)	ความเบี่ยงเบน มาตรฐาน (Å)	ความต้านทาน แผ่นบาง (Ω/sq)	สภาพต้านทาน (Ω-cm)	ความเค้น (MPa)
Nitride	5,977	206	-	-	60 T
Poly0	5,018	50	30.7	0.00154	24 C
Oxide1	19,123	857	-	-	-
Poly1	19,977	72	11.2	0.00224	7 C
Oxide2	7,304	267	-	-	-
Poly2	14,986	130	19.7	0.00295	8 C
Metal	5,150	-	0.06	0.00000309	18 T

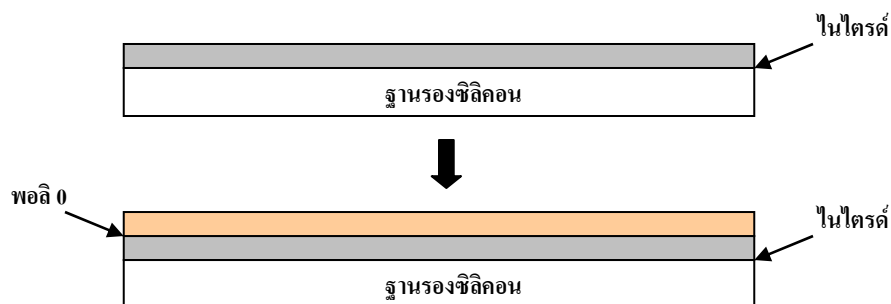


รูปที่ 6.2 ภาพถ่ายชิฟของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่ได้รับกลับมา

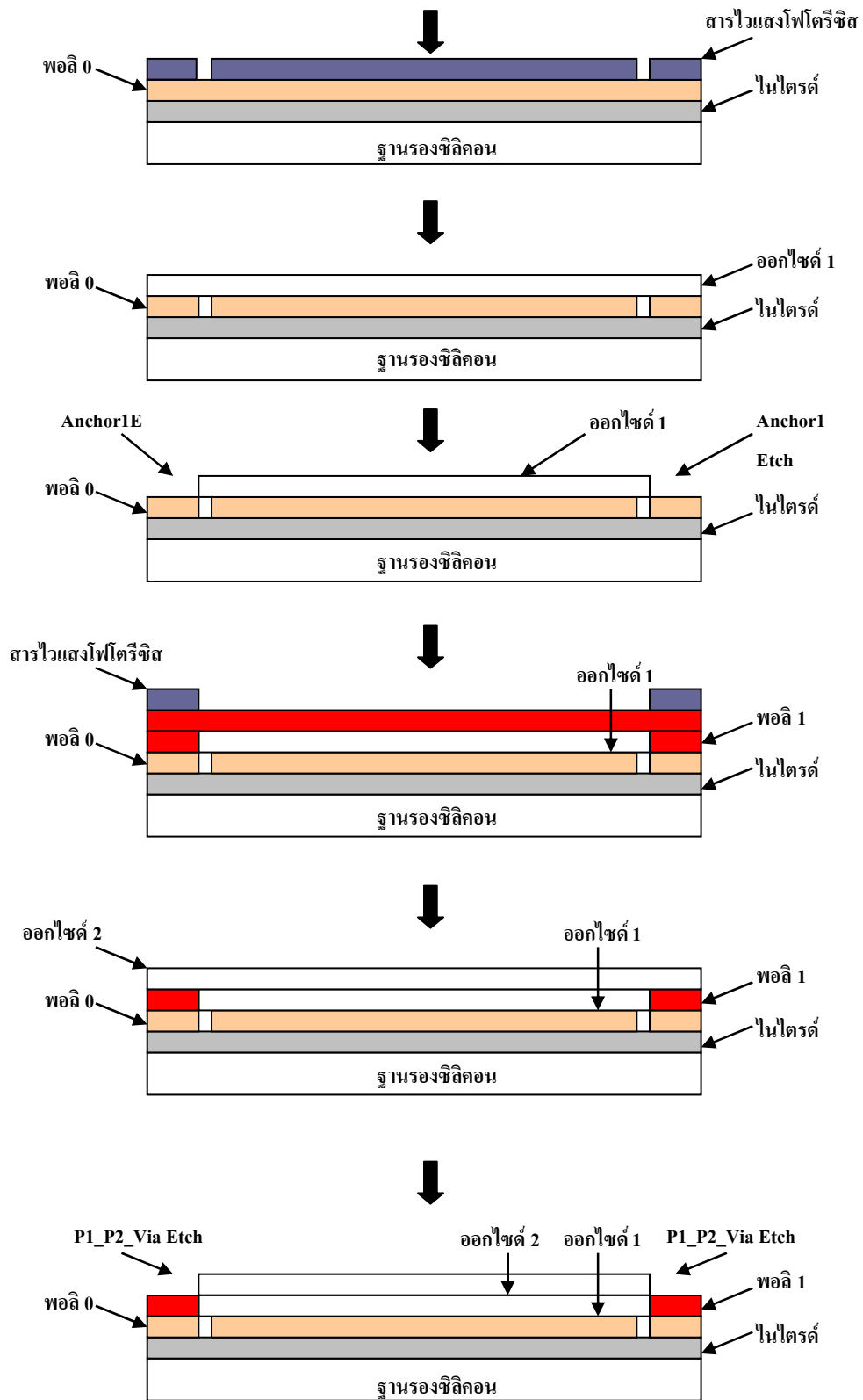


รูปที่ 6.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสดงชิปตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ผ่านกระบวนการกัดชั้นผิวเคลือบป้องกันชิป

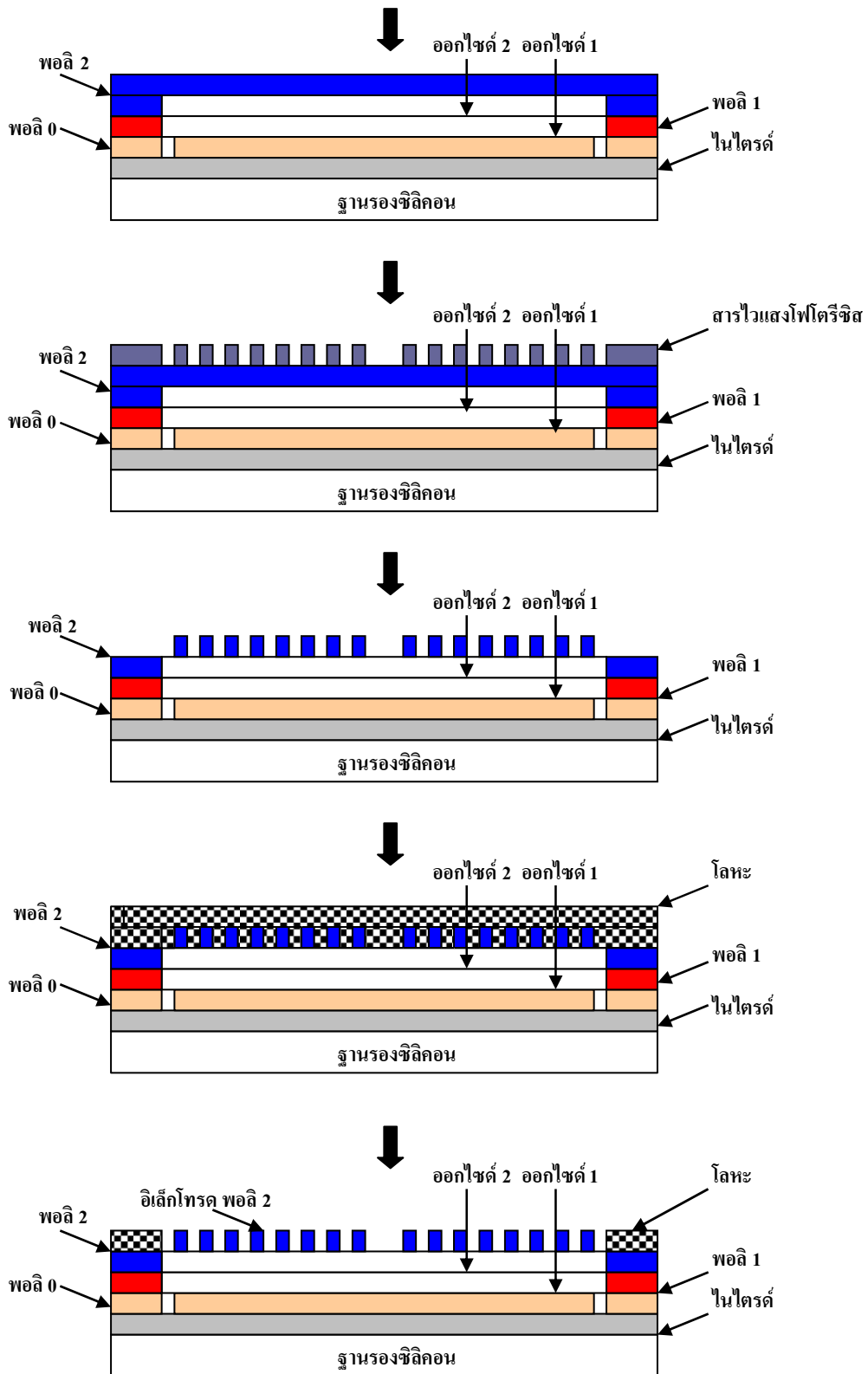
ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงการสร้างต้นแบบตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้การสปีดเตอริงในการเคลือบวัสดุไวความชื้นให้ดีขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น แทนการสร้างด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม การออกแบบจะใช้เส้นตัวของอเล็กโทรดขนาด 3 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดของเทคโนโลยีนี้ โครงสร้างแบบกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นประกอบด้วยชั้นวัสดุคือ ไนไตรด์ (nitride), พอลิซิลิคอน0 (polysilicon0), ออกไซด์1 (oxide1), พอลิซิลิคอน1 (polysilicon1), ออกไซด์2 (oxide2), พอลิซิลิคอน2 (polysilicon2) และ โลหะ (metal) รายละเอียดเกี่ยวกับเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นได้กล่าวไว้แล้ว และลำดับแผนภาพการสร้างแสดงดังรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5-6.7 แสดงภาพถ่ายชิปของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ TO-5



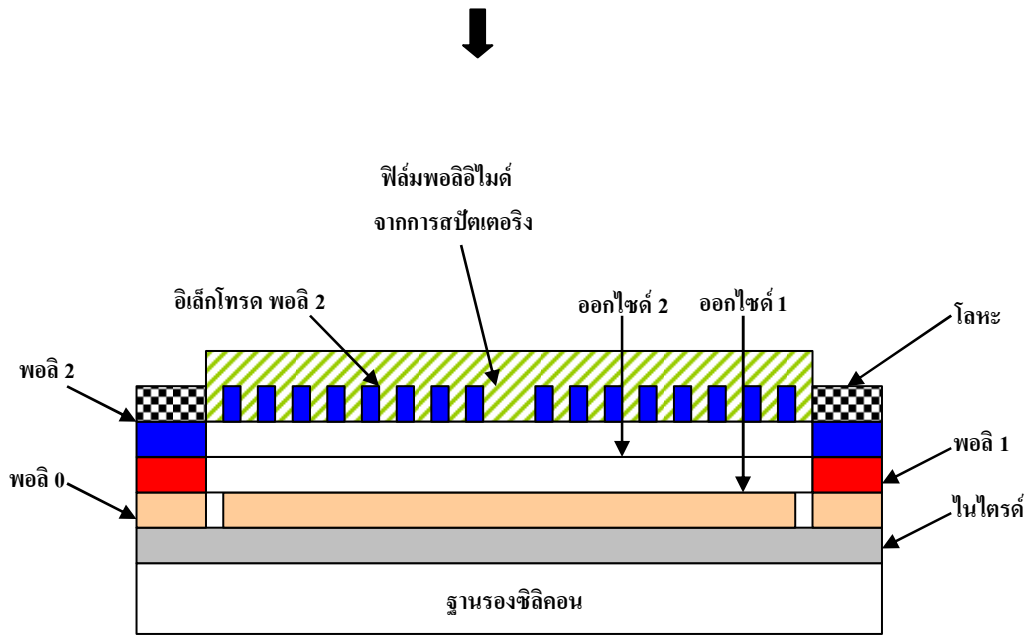
รูปที่ 6.4 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิไมด์เป็นชั้นไวความชื้น



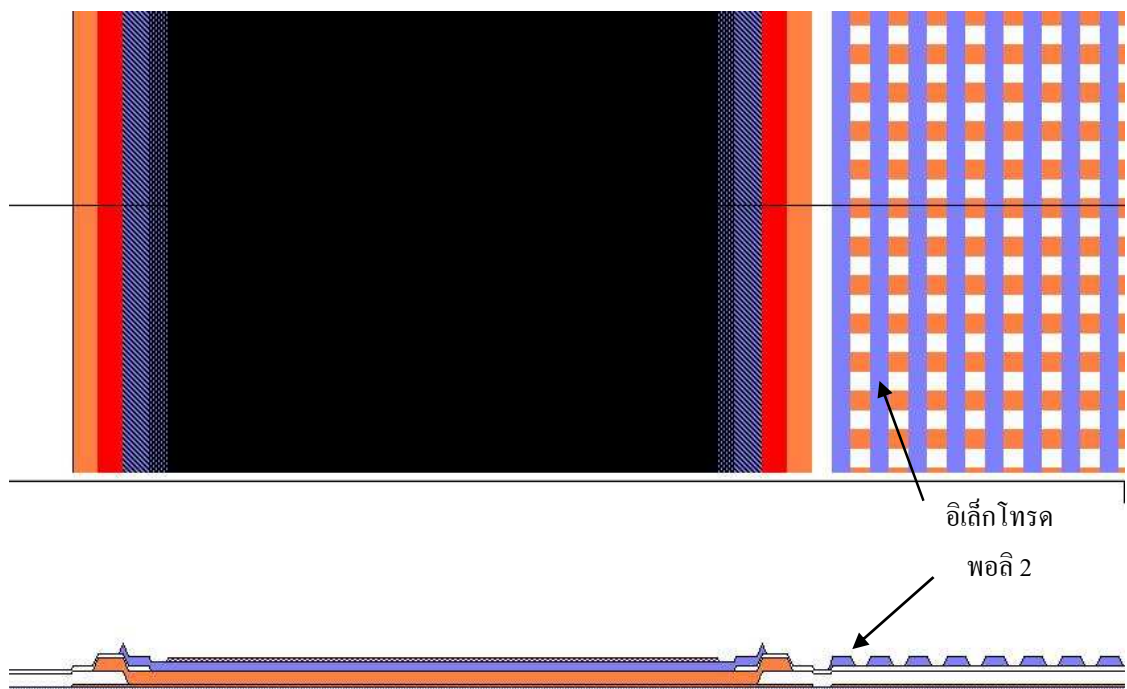
รูปที่ 6.4 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีตเตอร์ิงพอลิอิมิดเป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น (ต่อ)



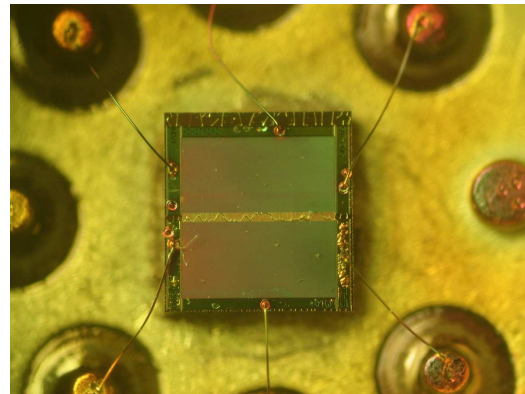
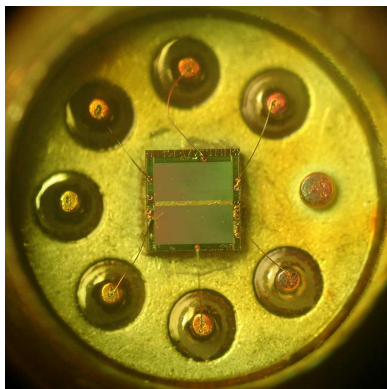
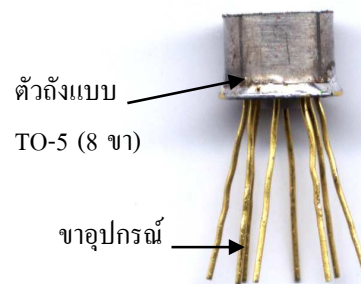
รูปที่ 6.4 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น (ต่อ)



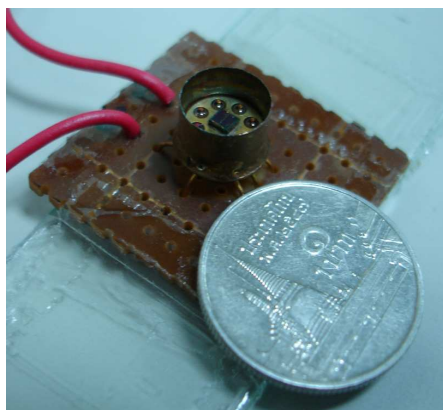
รูปที่ 6.4 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นฟิล์มวัสดุไวความชื้น (ต่อ)



รูปที่ 6.5 ภาพร่างสองมิติตัดขวางตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs จากโปรแกรม L-Edit student version มีความกว้างและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด Poly2 เท่ากับ 3 μm



รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายซิปของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ TO-5 (8 ขา)



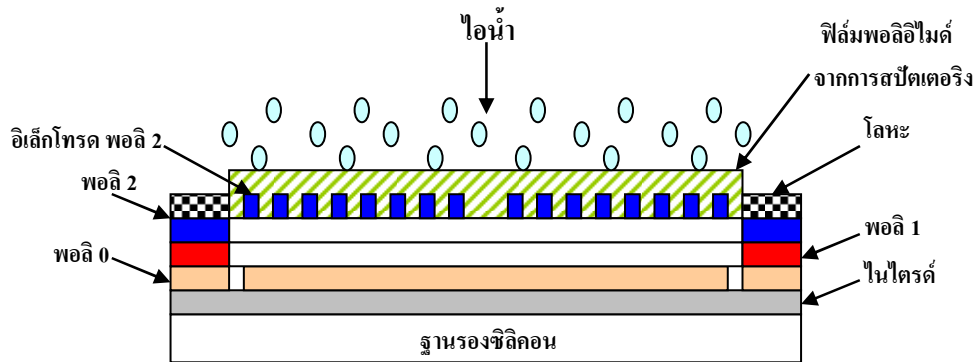
รูปที่ 6.7 ภาพถ่ายเปรียบเทียบขนาดซิปของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ TO-5 เทียบกับเหรียญหนึ่งบาทไทย

6.3 ผลการทดลองโดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

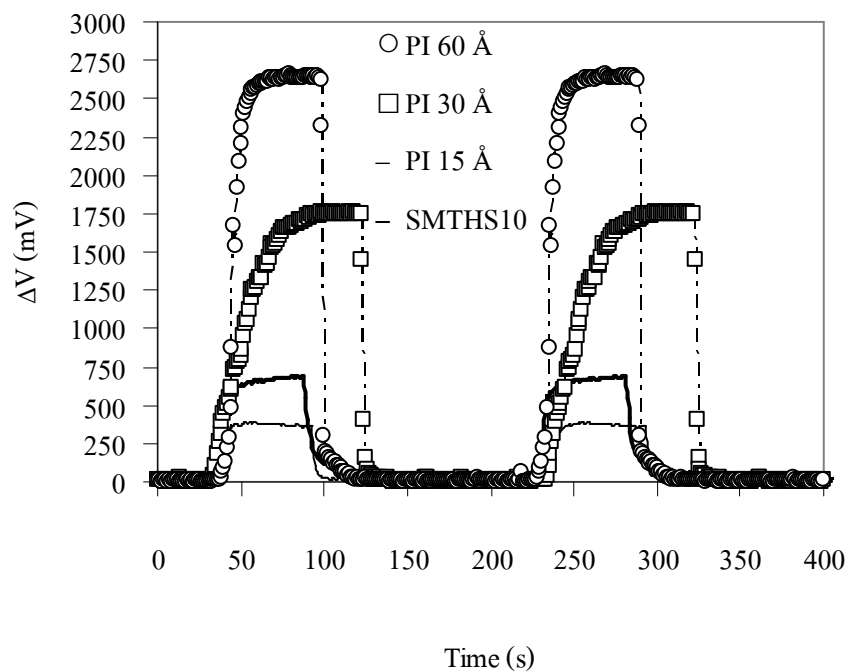
ทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความชื้นเข้าสู่ชั้นไวความชื้นดังรูปที่ 6.8 ผลการทดลองช่วงเวลากการตอบสนองและการปรับเทียบกับสารละลายเกลืออิมิตัวต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยค่อย ๆ เพิ่มระยะเวลาการสปัตเตอริงพอลิอิมิดซึ่งได้ทำการสปัตเตอริงที่เวลา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที ซึ่งเมื่อวัดเป็นความหนาจะได้ 15 Å, 30 Å และ 60 Å ตามลำดับ เพื่อที่จะเปรียบเทียบระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางให้ได้ตัวตรวจรู้ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลากการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทที่ใช้ชั้นไวความชื้นเหมือนกัน โดยทำการให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยเริ่มจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 จนถึง 90% โดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่อัตราการช้กตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที สำหรับการสปัตเตอริงพอลิอิมิด 15 Å ให้ค่าแรงดันฐาน 2.17 โวลต์ การสปัตเตอริงพอลิอิมิด 30 Å ให้ค่าแรงดันฐาน 1.97 โวลต์ และการสปัตเตอริงพอลิอิมิด 60 Å ให้ค่าแรงดันฐาน 1.98 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 6.9 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 60 Å ใช้ระยะเวลาในการดูดซึมและเวลาการคายความชื้นมากที่สุดในบรรดาตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น และตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 15 Å ใช้ระยะเวลาในการดูดซึมและเวลาการคายความชื้นน้อยที่สุดในบรรดาตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น แต่ตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวใช้ระยะเวลาการดูดความชื้นและการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ของบริษัท Smartec ดังแสดงในตารางที่ 6.3

วิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนของตัวตรวจรู้ที่ชั้นไวความชื้นหนา 15 Å อยู่ที่ 0-400 มิลลิโวลต์ ตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 30 Å อยู่ที่ 0-1.75 โวลต์ ตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 60 Å อยู่ที่ 0-2.65 โวลต์ และตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 อยู่ที่ 0-700 มิลลิโวลต์ พบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 60 Å มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 15 Å ประมาณ 6.6 เท่า และมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 30 Å ประมาณ 1.5 เท่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 30 Å มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 15 Å ประมาณ 4.4 เท่า ซึ่งบ่งบอกว่าตัวตรวจรู้ที่มีชั้นไวความชื้นหนายิ่งมีความไวมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 15 Å ประมาณ 1.75 เท่า แต่น้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 30 Å และ 60 Å ประมาณ 2.5 เท่า และ 3.9 เท่า ตามลำดับ นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 60 Å จะมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไว

ความถี่ 15 Å และ 30 Å ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความถี่เชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความถี่ 30 Å และ 60 Å จะมีความไวมากกว่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความถี่ 15 Å จะมีความไวต่ำกว่า



รูปที่ 6.8 ภาพตัดขวางตัวตรวจรู้ความถี่ชนิดเก็บประจุที่มีการแพร่ความถี่เข้าสู่ชั้นไวความถี่



รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบช่วงเวลาในการตอบสนองต่อความถี่ของตรวจรู้ความถี่ชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิไมด์หนา 15 Å 30 Å และ 60 Å กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบเวลาการดูดซึมความชื้น และเวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ทั้งสี่ประเภท

ประเภทตัวตรวจรู้	เวลาการดูดความชื้น (วินาที)	เวลาการคายความชื้น (วินาที)
PolyMUMPs (PI sputtered 15 Å)	16	9
PolyMUMPs (PI sputtered 15 Å)	33	11
PolyMUMPs (PI sputtered 15 Å)	47	22
SMTHS10	54	110

ผลการทดลองการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อปรับเทียบมาตรฐานความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าโดยทำการวิเคราะห์เป็นการเลื่อนของความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz เพราะเป็นความถี่ที่ตัวตรวจรู้ทั้งสี่ประเภทมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความถี่อื่น ๆ ดังรูปที่ 6.10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวกวามชื้นหนา 15 Å, 30 Å และ 60 Å รวมทั้งตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ พบว่าความไวของตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวกวามชื้นหนา 15 Å อยู่ที่ 0.114 pF/%RH คิดเป็น 0.274% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวกวามชื้นหนา 30 Å อยู่ที่ 0.705 pF/%RH คิดเป็น 2.21% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวกวามชื้นหนา 60 Å อยู่ที่ 0.267 pF/%RH คิดเป็น 0.841% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH และความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ตารางที่ 6.4 แสดงความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (6-1) และสมการที่ (6-2)

$$\text{sensitivity } (S) = \frac{\Delta C}{\Delta RH} \quad (6-1)$$

$$sensitivity (S) = \frac{\Delta C}{C_{11.3\%RH} \Delta RH} \times 100 \quad (6-2)$$

โดยที่ S คือ ความไว (pF/%RH หรือ %)

ΔC คือ ผลต่างของค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% กับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 84.3% (pF)

ΔRH คือ ผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ 84.3% (%)

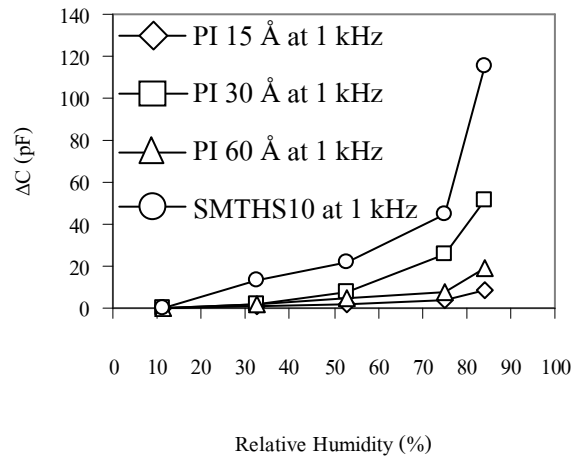
$C_{11.3\%RH}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 11.3% (pF)

ตารางที่ 6.4 สรุปค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz

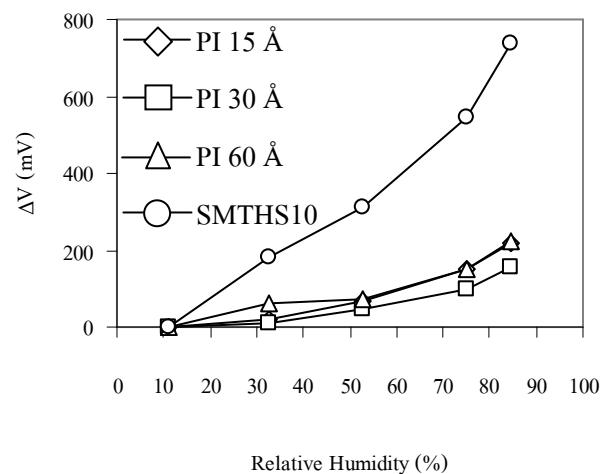
ประเภทตัวตรวจรู้	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 11.3%RH (pF)	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 84.3%RH (pF)	ความไว (pF/%RH)	ความ ไว (%)
PolyMUMPs (PI sputtered 15 Å)	41.000	49.300	0.114	0.274
PolyMUMPs (PI sputtered 30 Å)	31.900	83.400	0.705	2.210
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å)	30.490	49.970	0.267	0.875
SMTHS10	161.815	277.436	1.583	0.978

จากการทดลองการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อสอบเทียบความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จึงได้นำตัวตรวจรู้มาประกอบเข้ากับวงจรรอเสตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนไป พบว่าการตอบสนองของตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเทอริงพอลิไมด์เป็นชั้นไวความชื้นหนา 15 Å, 30 Å และ 60 Å รวมทั้งตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ให้ผลตอบสนองค่อนข้างเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยประมาณซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่วัดค่าความจุไฟฟ้า นั่นคือเมื่อนำตัวตรวจรู้ประกอบเข้ากับวงจรรอเสตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่เปลี่ยนแปลงต่อความชื้นแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเอาต์พุตของวงจรร จึงได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 6.11 พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% ตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิไมด์จากการสปีดเทอริงเป็นชั้นไวความชื้นหนา 15 Å, 30 Å และ 60 Å มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 0-200 มิลลิโวลต์ 0-150 มิลลิโวลต์ 0-220 มิลลิโวลต์ และตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ประมาณ 0-750 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ

ตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิอิมิด์จากการสปีดเตอริงเป็นชั้นไวความชื้นหนา 15 Å, 30 Å และ 60 Å มีค่าน้อยกว่า 3.75 เท่า 5 เท่า และ 3.4 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 15 Å 30 Å และ 60 Å กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ ที่ความถี่ 1 kHz



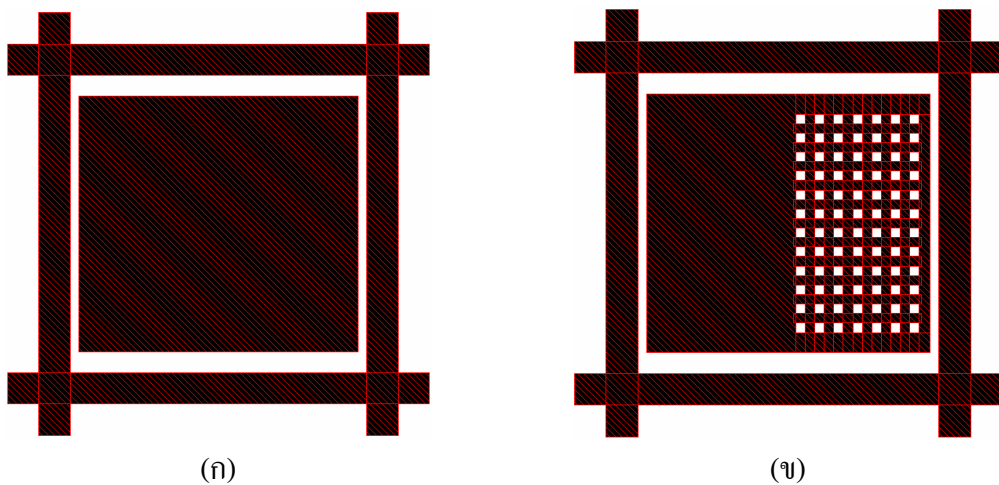
รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบช่วงเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 15 Å 30 Å และ 60 Å กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

6.4 การใช้การสเป็คเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นและมีแผ่นกราฟออลูมิเนียม

จากหัวข้อ 6.2 ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างดังกล่าวโดยการเพิ่มขึ้นแผ่นระนาบกราฟออลูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนชั้นของพอลิอิมิดจากการสเป็คเตอริงซึ่งชั้นออลูมิเนียมที่ใช้ได้จากกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ ซึ่งมีความหนาประมาณ 50 นาโนเมตร แบ่งลักษณะของชั้นออลูมิเนียมเป็นสองด้านคือ ด้านหนึ่งไม่มีการเจาะรู ส่วนอีกด้านหนึ่งเจาะรูขนาด 60×60 ตารางไมโครเมตร และมีระยะห่างระหว่างรู 60 ไมโครเมตร จำนวน 84 รู ดังรูปที่ 6.12 ส่วนกระบวนการสร้าง แสดงดังรูปที่ 6.13 ขั้นตอนการสร้างมีดังต่อไปนี้คือ เริ่มจากนำตัวตรวจรู้จุ่มล้างสารเคลือบป้องกันออกด้วยอะซิโตนจนหลุดออกหมดจากผิวหน้าของตัวตรวจรู้โดยสังเกตจากความมันวาวของผิวตัวตรวจรู้ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ นำตัวตรวจรู้แช่ทิ้งไว้ในเมทิลแอลกอฮอล์ (CH_3OH) นาน 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ น้ำออก อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวตรวจรู้แห้งสนิท นำเข้าเครื่องออกซิเจนพลาสมานาน 10 นาที ใช้พลังงาน 50% (100 W) ความดันแก๊สออกซิเจน 0.3 mbar เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าชิพ นำตัวตรวจรู้ที่ได้ทำการเคลือบพอลิอิมิดด้วยการสเป็คเตอริงด้วยความถี่วิทยุ นาน 60 นาที เคลือบชั้นออลูมิเนียมด้วยวิธีการระเหยโลหะในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร จากนั้นฉีดชิพลงบนกระจกสไลด์ด้วยสารไวแสงโฟโตริซิส AZ1512 เพียงเล็กน้อย อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หยอดสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ1512 ลงบนตัวตรวจรู้ให้ทั่ว นำเข้าเครื่องหมุนความเร็วรอบสูงที่ความเร็ว 500 rpm นาน 5 วินาที และ 2,500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นทำการฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายนาน 30 วินาที (เพื่อเปิดช่องสำหรับกัคออลูมิเนียม โดยใช้หน้ากากลวดลายดังรูปที่ 6.15 (ก))

ล้างสารไวแสงโฟโตริซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่ง นาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สอง นาน 15 วินาที ตรวจสอบลวดลายว่าถูก developer ออกหมดหรือไม่ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ถ้ายังออกไม่หมดให้ล้างในน้ำยา developer อีกครั้งหนึ่ง ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กัคออลูมิเนียมด้วยน้ำยากัคออลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ จากนั้นล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสารไวแสงโฟโตริซิส AZ1512 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที หยอดสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ1512 ลงบนตัวตรวจรู้ให้ทั่ว นำเข้าเครื่องหมุนความเร็วรอบสูงที่ความเร็ว 500 rpm นาน 5 วินาที และ 2,500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นทำการฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายนาน 30 วินาที (เพื่อเปิดช่องสำหรับเจาะรูออลูมิเนียม โดยใช้หน้ากากลวดลายดังรูปที่ 6.15 (ข)) ล้างสารไวแสงโฟโตริซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่ง นาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สอง นาน 15 วินาที

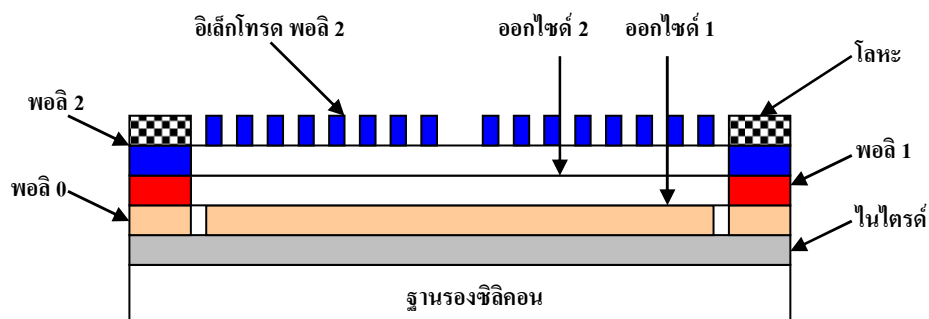
ตรวจสอบผลลบลายว่าถูก developer ออกหมดหรือไม่ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ถ้ายังออกไม่หมดให้ล้างในน้ำยา developer อีกครั้งหนึ่ง ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยากัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วย กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ จากนั้นล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสารไวแสงโฟโตริซิส AZ1512 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน รูปที่ 6.25 แสดงภาพถ่ายซีพของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่ทำการบรรจุลงในตัวถังแบบ Dual Inline Package (DIP) 8 ขา



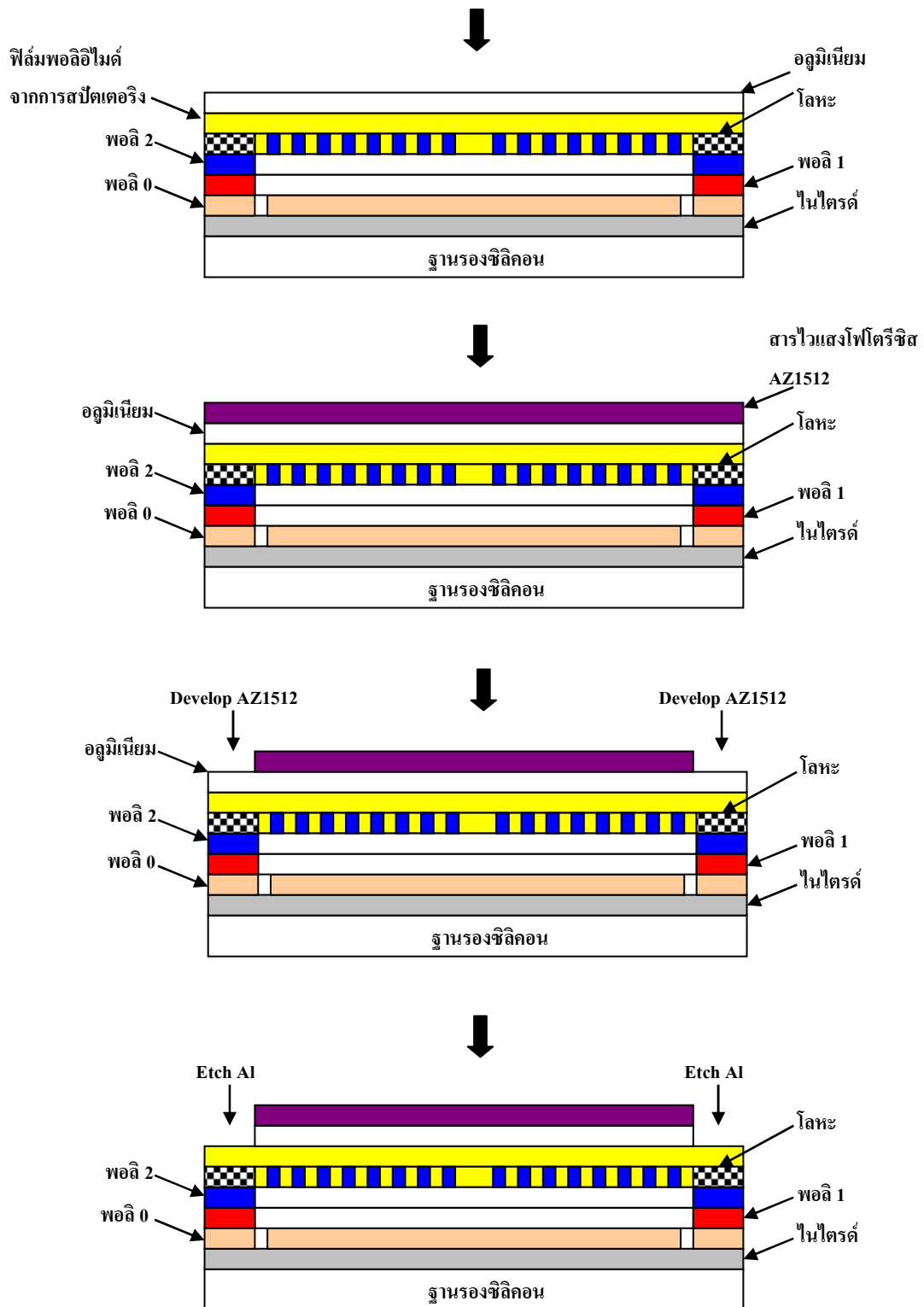
รูปที่ 6.12 ภาพร่างสองมิติของหน้ากากสำหรับสร้างลวดลายฟิล์มบางอลูมิเนียม

(ก) หน้ากากลวดลายเพื่อกัดชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียม

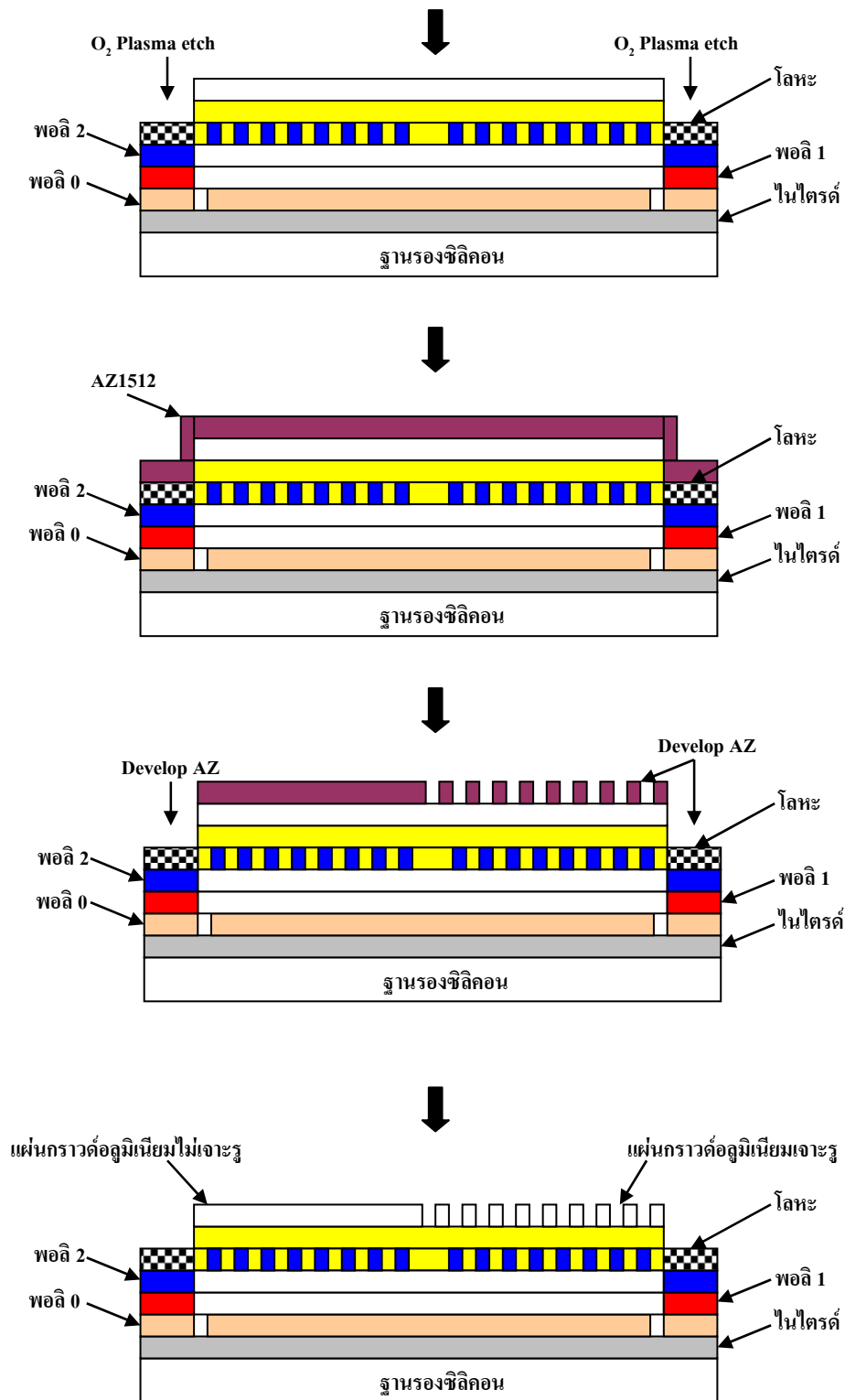
(ป) หน้ากากลวดลายเพื่อเจาะรูแผ่นกราวด์อลูมิเนียม



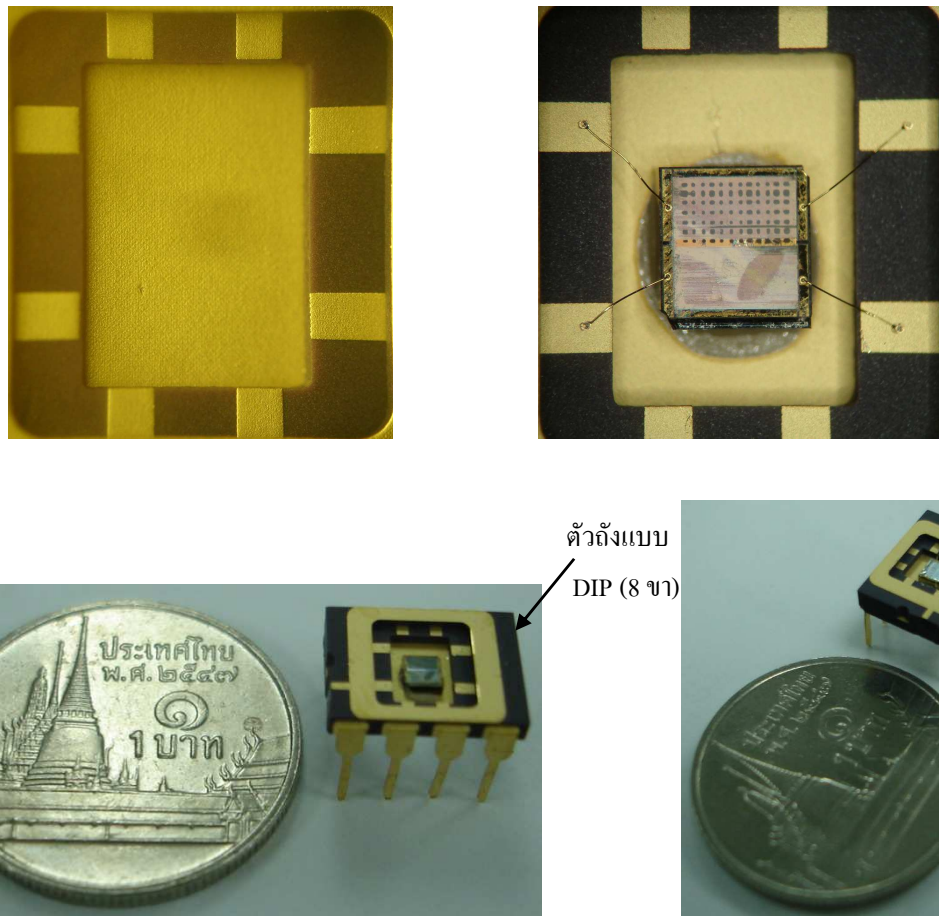
รูปที่ 6.13 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีตเตอร์ิงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู



รูปที่ 6.13 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู (ต่อ)



รูปที่ 6.13 แผนภาพลำดับการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การ สปีตเตอร์ริงพอลิอีไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู (ต่อ)

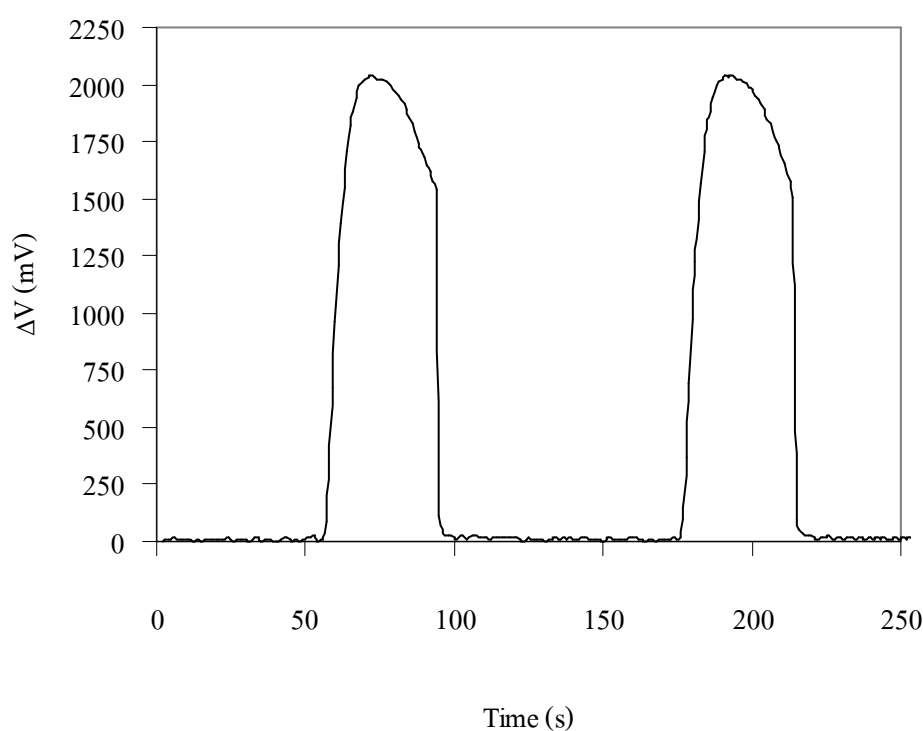


รูปที่ 6.13 ภาพถ่ายซัพของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs ที่บรรจุในตัวถังแบบ DIP 8 ขา

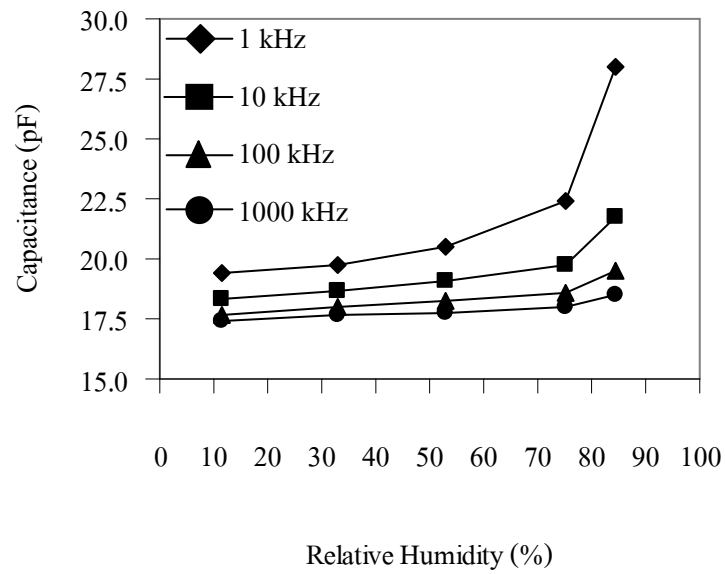
6.5 ผลการทดลองการใช้การสปีดเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นและมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม

ผลการทดลองช่วงเวลากการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs เคลือบพอลิอิมิดด้วยการสปีดเตอร์ริงหนา 60 \AA และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูเคลือบทับวัสดุไวความชื้น แสดงในรูปที่ 6.14 โดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่อัตราการชั่งตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที สำหรับตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ให้ค่าแรงดันฐาน 1.68 โวลต์ พบว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90% ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 0-2 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 17 วินาที

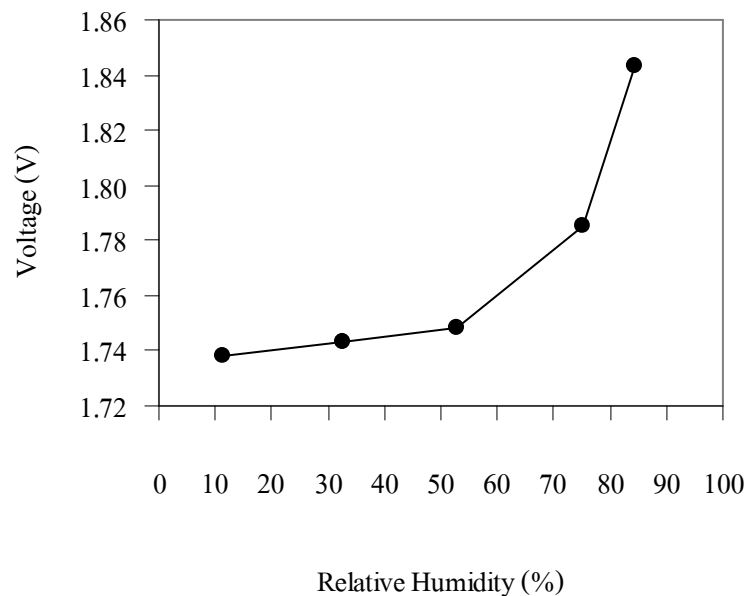
และระยะเวลาการคายความชื้น 25 วินาที ทำการเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 6.15 พบว่าเมื่อความถี่การวัดสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้า ณ ความชื้นคงที่ใด ๆ จะลดลง ผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงในทุก ๆ ความถี่ที่ทำการทดลองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ รูปที่ 6.16 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์เมื่อต่อตัวตรวจรู้เข้ากับ วงจรอะสเตเบิลมัลติไวยเบรเตอร์ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ พบว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-85% ต่อจากผลการทดลองดังรูปที่ 6.16 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 6.17 ทำให้ทราบว่า ในช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% อยู่ที่ประมาณ 0-10 มิลลิโวลต์ และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-85% อยู่ที่ ประมาณ 10-110 มิลลิโวลต์



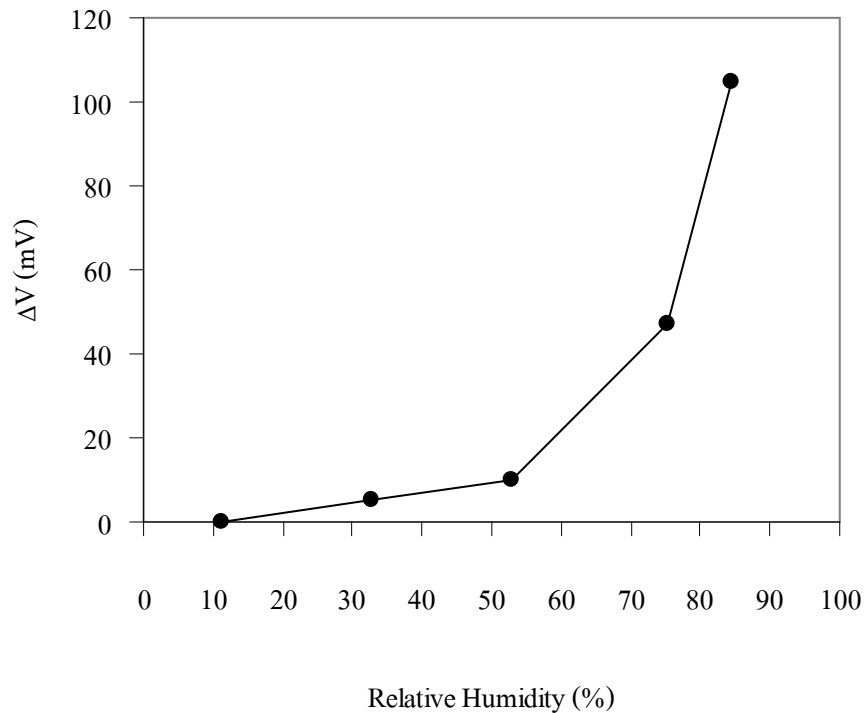
รูปที่ 6.14 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วย เทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์ อลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 6.15 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ



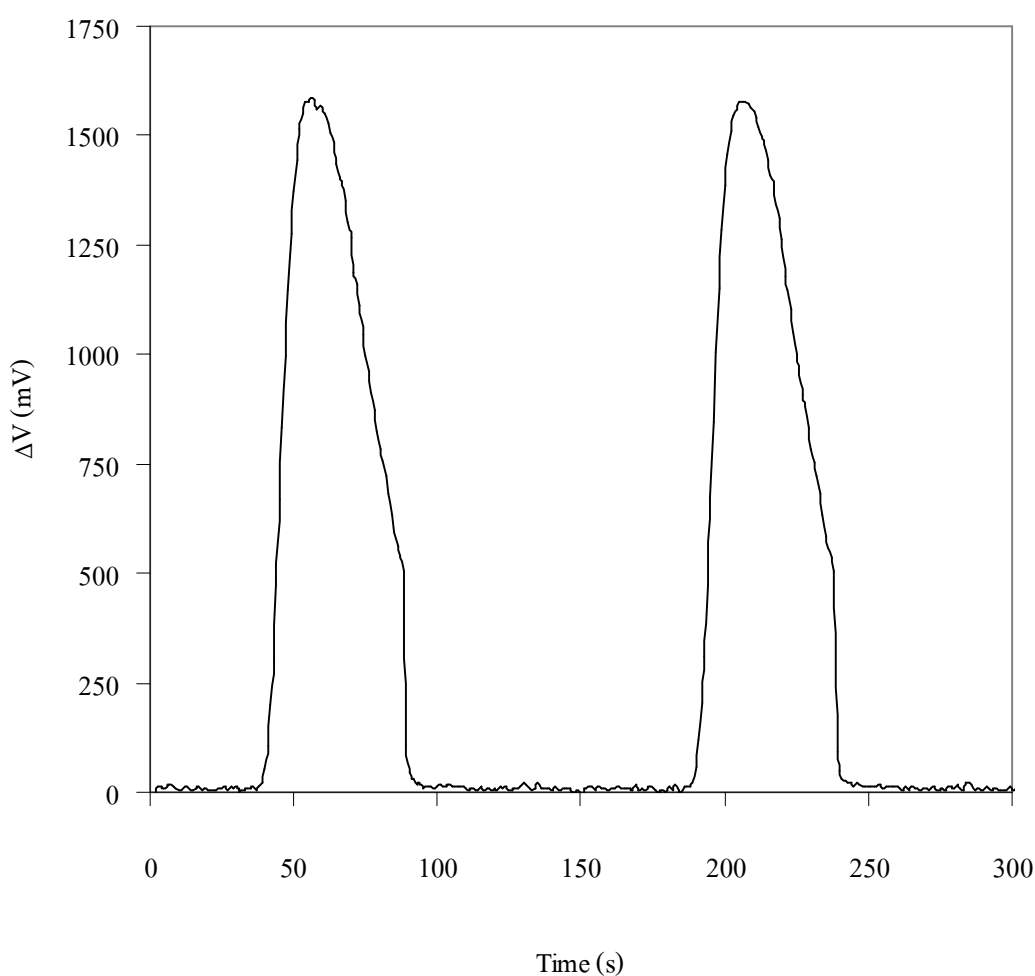
รูปที่ 6.16 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



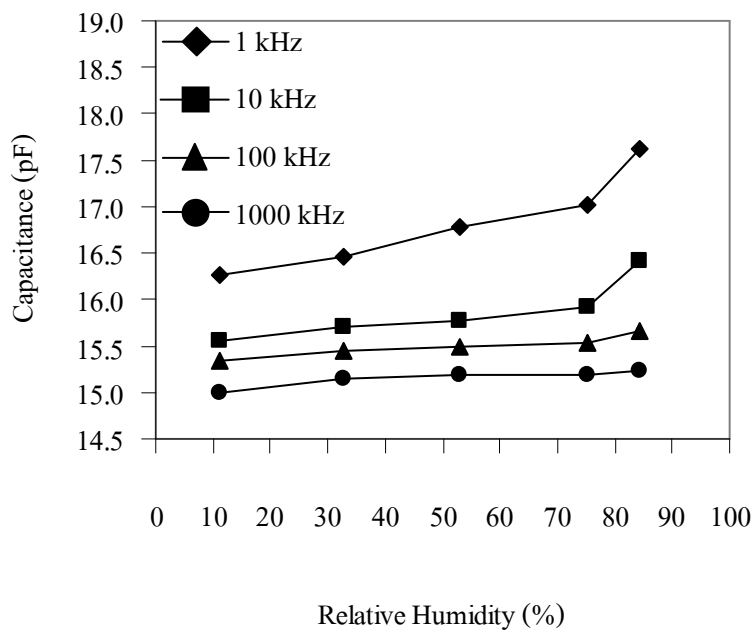
รูปที่ 6.17 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง

ผลการทดลองช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs เคลือบพอลิอิมิดด้วยการสปีดเตอริงหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู แสดงในรูปที่ 6.18 โดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่อัตราการซีกตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที สำหรับตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรู ให้ค่าแรงดันฐาน 1.81 โวลต์ พบว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-90% ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงจาก 0-1.6 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 18 วินาที และระยะเวลาการคายความชื้น 37 วินาที ทำการปรับเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 6.19 พบว่าเมื่อความถี่การวัดสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้า ณ ความชื้นคงที่ใด ๆ จะลดลง ผลลัพธ์ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงในทุก ๆ ความถี่ที่ทำกรทดลองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ รูปที่ 6.20 แสดงผลการตอบสนองของ

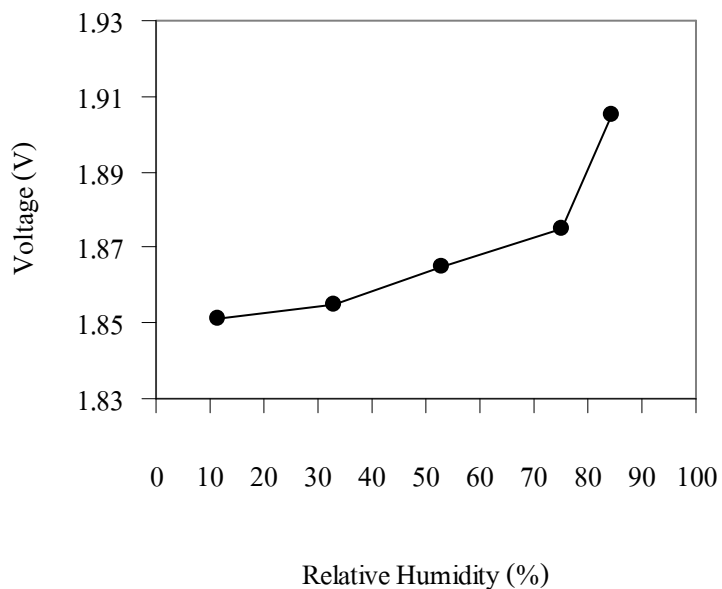
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์เมื่อต่อตัวตรวจรู้เข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ พบว่ากราฟ ที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ ต่อจากผลการทดลองดังรูปที่ 6.20 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ดังรูปที่ 6.21 ทำให้ทราบว่าในช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% อยู่ที่ประมาณ 0-25 มิลลิโวลต์ และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% อยู่ที่ประมาณ 25-55 มิลลิโวลต์



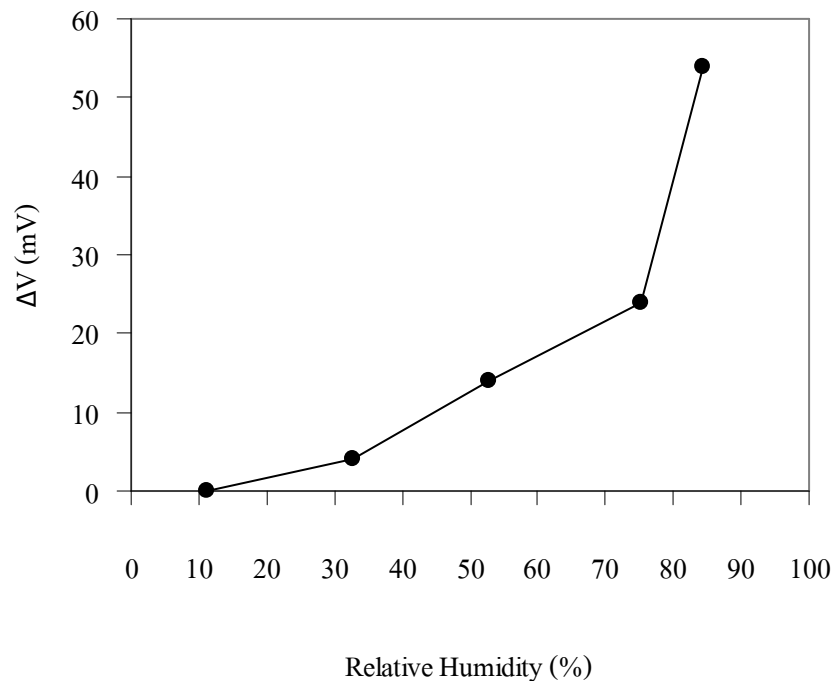
รูปที่ 6.18 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 6.19 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีตเตอร์ริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ



รูปที่ 6.20 การตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีตเตอร์ริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

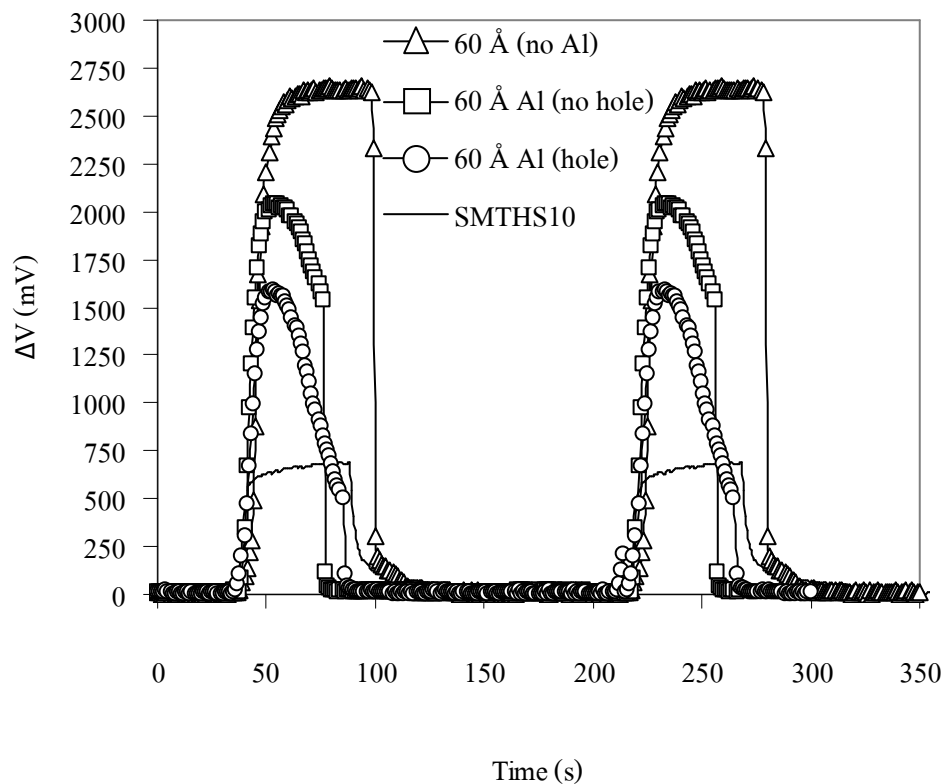


รูปที่ 6.21 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจวัดความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปัตเตอร์ของพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมเจาะรู ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

6.6 เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้การสปัตเตอร์ของพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้นแบบไม่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียม และแบบมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู

จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจวัดทั้งสามประเภทที่ใช้ชั้นไวความชื้นเหมือนกันคือ พอลิอิมิด์จากการสปัตเตอร์หนา 60 Å แต่ต่างกันตรงที่เป็นโครงสร้างแบบไม่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียม และแบบมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู ทำการให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยเริ่มจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 จนถึง 90% ดังรูปที่ 6.22 พบว่าตัวตรวจวัดที่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียมไม่เจาะรูใช้ระยะเวลาในการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจวัดที่ไม่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียมและแบบมีแผ่นกรวดออลูมิเนียมเจาะรู และตัวตรวจวัดที่ไม่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียมใช้ระยะเวลาในการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจวัดที่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู แต่ตัวตรวจวัดทั้งสามประเภทดังกล่าวใช้ระยะเวลาการดูดความชื้นและระยะเวลาการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจวัดเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ของบริษัท Smartec ดังแสดงในตารางที่ 6.5 โดยมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนของตัวตรวจวัดที่ไม่มีแผ่นกรวดออลูมิเนียมอยู่ที่

0-2.65 โวลต์ ส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูอยู่ที่ 0-2 โวลต์ ตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูอยู่ที่ 0-1.6 โวลต์ และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 อยู่ที่ 0-700 มิลลิโวลต์ พบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูประมาณ 1.3 เท่า และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูประมาณ 1.7 เท่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูมีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู 1.25 เท่า เมื่อเปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 3.8 เท่า ตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูมีค่ามากกว่า 2.9 เท่า และตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูมากกว่า 2.3 เท่า นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู รวมทั้งมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 อีกด้วย



รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบช่วงเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้ทั้งสี่ประเภท

ประเภทตัวตรวจรู้	เวลาการดูดซึมความชื้น (วินาที)	เวลาการคายความชื้น (วินาที)
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å)	47	22
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมไม่เจาะรู	17	25
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมเจาะรู	18	37
SMTHS10	54	110

ผลการทดลองการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อปรับเทียบมาตรฐานความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs เมื่อการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าโดยทำการวิเคราะห์เป็นการเลื่อนของความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz เพราะเป็นความถี่ที่ตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความถี่อื่น ๆ ดังรูปที่ 6.23 โดยตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เหมือนกันทุกประการ สำหรับตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียม ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมไม่เจาะรูให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ และส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมเจาะรูให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ ซึ่งทำการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz เพราะเป็นความถี่ที่ตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าที่ความถี่อื่น ๆ เนื่องจากตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทมีโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันทำให้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกันโดยตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียม ให้ค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู เนื่องมาจากตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมชั้นไวความชื้นสามารถสัมผัสกับอากาศได้โดยตรงซึ่งแตกต่างกับตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียม พบว่าความไวของตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมอยู่ที่ 0.267 pF/%RH คิดเป็น 0.875% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมไม่เจาะรูอยู่ที่ 0.118 pF/%RH คิดเป็น 0.610% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมเจาะรูอยู่ที่ 0.018 pF/%RH คิดเป็น 0.114%

เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH และความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ตารางที่ 6.6 แสดงความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภท เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (6-3) และสมการที่ (6-4)

$$\text{sensitivity } (S) = \frac{\Delta C}{\Delta RH} \quad (6-3)$$

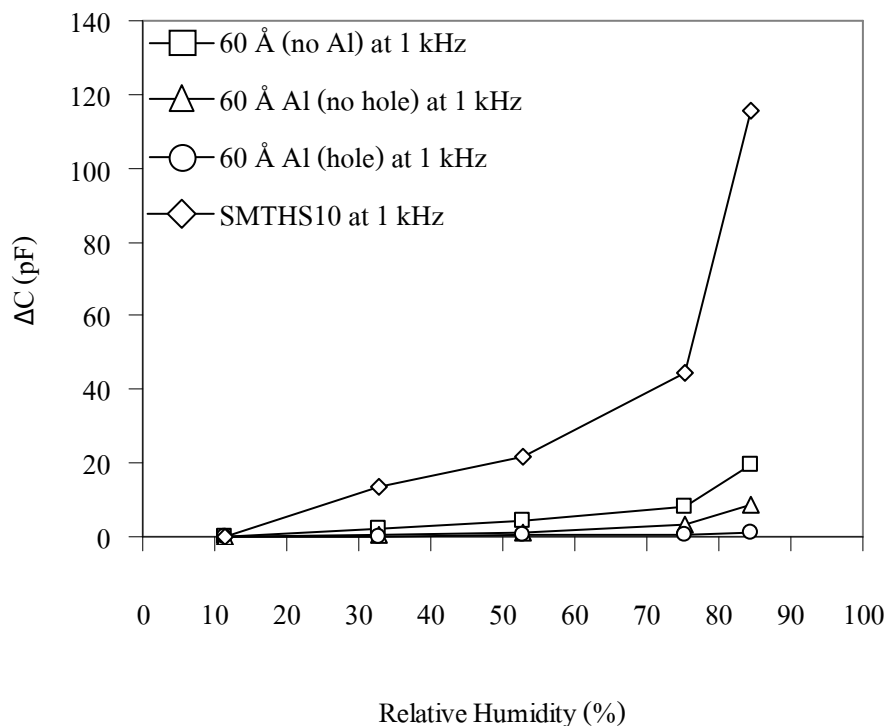
$$\text{sensitivity } (S) = \frac{\Delta C}{C_{11.3\%RH} \Delta RH} \times 100 \quad (6-4)$$

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz

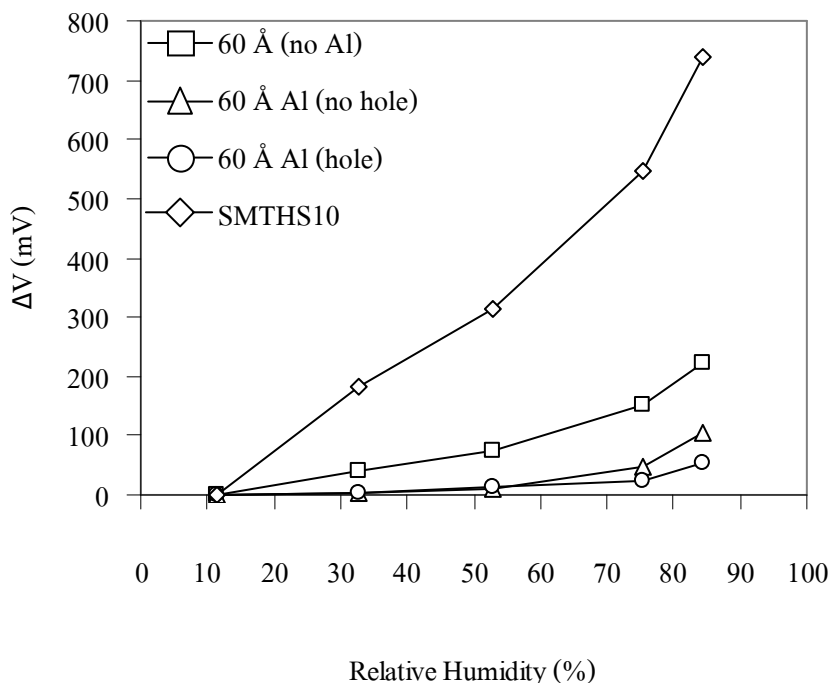
ประเภทตัวตรวจรู้	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 11.3%RH (pF)	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 84.3%RH (pF)	ความไว (pF/%RH)	ความไว (%)
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å)	30.490	49.970	0.267	0.875
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมไม่เจาะรู	19.386	28.021	0.118	0.610
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมเจาะรู	16.263	17.613	0.018	0.114
SMTHS10	161.815	277.436	1.583	0.978

จากการทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อสอบเทียบความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จึงได้นำตัวตรวจรู้มาประกอบเข้ากับวงจระอะสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 6.24 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียม ให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% โดยประมาณ ส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมไม่เจาะรูให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-50% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-85% และส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราฟต์ออลูมิเนียมเจาะรูให้ผลการตอบสนองเป็นเชิงเส้นในช่วง

ความชื้นสัมพัทธ์ 10-75% และไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่วัดค่าความจุไฟฟ้า นั่นคือเมื่อนำตัวตรวจรู้ประกอบเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่เปลี่ยนแปลงต่อความชื้นแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเอาต์พุตของวงจร จึงได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-90% ตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-220 มิลลิโวลต์ มากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-110 มิลลิโวลต์ และ 0-55 มิลลิโวลต์ ประมาณ 2 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-750 มิลลิโวลต์ ซึ่งมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู ประมาณ 3.4 เท่า 6.8 เท่า และ 13.6 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 6.23 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์หนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วย LCR มิเตอร์ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 6.24 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อความชื้นของตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี PolyMUMPs โดยใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดหนา 60 Å และมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู กับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ทดลอง ณ อุณหภูมิ 25°C เมื่อวัดด้วยวงจรที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

6.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยใช้พอลิอิมิดจากการสปัตเตอร์ริงเป็นวัสดุไวความชื้นชนิดเดียวกันที่ความหนาแตกต่างกันคือ 15 Å, 30 Å และ 60 Å ตามลำดับ และมีการเพิ่มเติมโครงสร้างชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียมที่มีการเจาะรูและไม่เจาะรู เพื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 พร้อมทั้งทำการทดลองเพื่อทดสอบการตอบสนอง หากความไว ช่วงเวลาการตอบสนอง และการปรับเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ ตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 60 Å ใช้ระยะเวลาในการดูดซึมความชื้น 47 วินาที และเวลาการคายความชื้น 22 วินาที ซึ่งมากที่สุดในการบรรดาตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น และตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 15 Å ใช้ระยะเวลาในการดูดซึมความชื้น 16 วินาที และเวลาการคายความชื้น 9 วินาที ซึ่งน้อยที่สุดในการบรรดาตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปัตเตอร์ริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น และตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวใช้ระยะเวลาการดูด

ความชื้นและการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 60 Å มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å ประมาณ 6.6 เท่า และมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 30 Å ประมาณ 1.5 เท่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 30 Å มีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å ประมาณ 4.4 เท่า ซึ่งบ่งบอกว่าตัวตรวจรู้ที่มีชั้นไวกความชื้นหนาจะยิ่งมีความไวมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å ประมาณ 1.75 เท่า แต่น้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 30 Å และ 60 Å ประมาณ 2.5 เท่า และ 3.9 เท่า ตามลำดับ นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 60 Å จะมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å และ 30 Å ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 30 Å และ 60 Å จะมีความไวมากกว่า ส่วนตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å จะมีความไวต่ำกว่า

ผลการทดลองการตอบสนองต่อความชื้นเมื่อปรับเทียบมาตรฐานความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz พบว่าความไวของตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิโอดีเป็นชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å อยู่ที่ 0.114 pF/%RH คิดเป็น 0.274% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิโอดีเป็นชั้นไวกความชื้นหนา 30 Å อยู่ที่ 0.705 pF/%RH คิดเป็น 2.210% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีการสปีดเตอริงพอลิโอดีเป็นชั้นไวกความชื้นหนา 60 Å อยู่ที่ 0.267 pF/%RH คิดเป็น 0.841% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH และความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH และเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% ตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิโอดีจากการสปีดเตอริงเป็นชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å, 30 Å และ 60 Å มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณ 0-200 มิลลิโวลต์ 0-150 มิลลิโวลต์ 0-220 มิลลิโวลต์ และตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ประมาณ 0-750 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้พอลิโอดีจากการสปีดเตอริงเป็นชั้นไวกความชื้นหนา 15 Å, 30 Å และ 60 Å มีค่าน้อยกว่า 3.75 เท่า 5 เท่า และ 3.4 เท่าตามลำดับ

ช่วงเวลาการตอบสนองโดยทำการให้ความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยเริ่มจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0% จนถึง 90% และลดลงจนเป็น 0% อีกครั้ง ตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นคือ 47 วินาที และ 22 วินาที ซึ่งเวลาการดูดซึมความชื้น

มากกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูที่มีเวลาการดูดซึมความชื้น 17 วินาที แต่เวลาการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูที่มีเวลาการคายความชื้น 25 วินาที ส่วนตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูมีเวลาการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมแต่มากกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูโดยมีเวลาการดูดซึมความชื้น 18 วินาที และเวลาการคายความชื้นมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมและตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูซึ่งมีเวลาการคายความชื้น 37 วินาที แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีเวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นคือ 54 วินาที และ 110 วินาที เห็นได้ชัดเจนว่าตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวใช้เวลาการดูดซึมและเวลาการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ดังกล่าว

ส่วนการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดของตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูประมาณ 1.3 เเท และมิแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูประมาณ 1.7 เเท ส่วนตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูมีค่ามากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรู 1.25 เเท เมื่อเปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 พบว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 3.8 เเท ตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูมีค่ามากกว่า 2.9 เเท และตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูมากกว่า 2.3 เเท นั่นคือตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูและไม่เจาะรู รวมทั้งมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 อีกด้วย

ผลการปรับเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% เมื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz พบว่าความไวของตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมอยู่ที่ 0.267 pF/%RH คิดเป็น 0.875% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูอยู่ที่ 0.118 pF/%RH คิดเป็น 0.610% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเจาะรูอยู่ที่ 0.018 pF/%RH คิดเป็น 0.114% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH และความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีค่าความไว 1.583 pF/%RH คิดเป็น 0.978% เมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้น 11.3%RH และเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-85% ตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-220 มิลลิโวลต์ มากกว่าตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู ซึ่งมีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-110

มิลลิโวลต์ และ 0-55 มิลลิโวลต์ ประมาณ 2 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ทั้งสามประเภทดังกล่าวกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 ที่มีการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 0-750 มิลลิโวลต์ ซึ่งมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกรวดคัลลูมิเนียม มีแผ่นกรวดคัลลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู ประมาณ 3.4 เท่า 6.8 เท่า และ 13.6 เท่า ตามลำดับ

จากการทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดี แสดงว่าฟิล์มที่ได้จากการสปีดเทอริงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นได้ และในการออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้นให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานตามที่ได้จากการทดลองพบว่าถ้าต้องการให้ตัวตรวจรู้มีความเร็วมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นควรใช้การสปีดเทอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นวัสดุไวความชื้นให้มีความบางมากขึ้น แต่ถ้าต้องการให้ตัวตรวจรู้มีความไวมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นควรใช้การสปีดเทอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นวัสดุไวความชื้นให้มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นแผ่นกรวดคัลลูมิเนียมเคลือบทับลงบนวัสดุไวความชื้นโดยมีการเจาะรูและไม่เจาะรูลูมิเนียม นั้นจะช่วยให้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้นของตัวตรวจรู้ลดน้อยลงแต่จะทำให้ระยะเวลาการคายความชื้นเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 7

ต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์

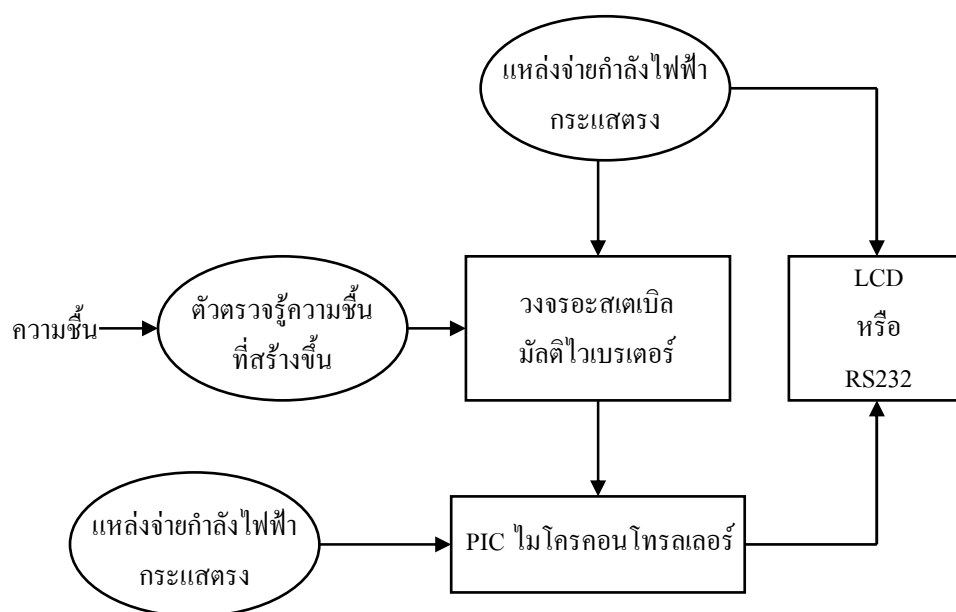
7.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันการวัดความชื้นมีความสำคัญกับงานหลาย ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นการควบคุมความชื้นในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตยาและเวชภัณฑ์ การควบคุมความชื้นในโรงเรือน การควบคุมความชื้นในตู้แช่ การตรวจวัดความชื้นของอากาศ เป็นต้น เหล่านี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์สำหรับวัดความชื้น เพื่อช่วยในการบ่งชี้ถึงปริมาณความชื้นที่พอเหมาะกับการงานด้านต่าง ๆ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำตัวตรวจวัดความชื้นที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นมาประกอบกับวงจรอะแดปเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนแสดงผล ดังจะกล่าวต่อไป

7.2 การออกแบบและสร้าง

จากบทที่ 6 ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจวัดความชื้นชนิดเก็บประจุ โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่เรียกว่า กระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น (PolyMUMPs) โดยใช้เทคนิคการสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นที่มีพอลิอิมิดหนาประมาณ 60 Å และได้นำตัวตรวจวัดความชื้นดังกล่าวมาประกอบเข้ากับวงจรส่วนต่าง ๆ แผนภาพรูปที่ 7.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง 9 โวลต์ ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ จอแสดงผล และวงจรอะแดปเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการปรับเทียบกับสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งเป็นสัญญาณจากวงจรอะแดปเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (10 bit) แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกไปคำนวณเพื่อแปลงเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ และส่งข้อมูลออกทางจอแสดงผล LCD หรือพอร์ตอนุกรม RS232 ต่อไปเพื่อแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์ (โปรแกรมภาษาซีที่ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ดูภาคผนวก ค) จอแสดงผล LCD ทำหน้าที่แสดงผลค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ขณะนั้น ๆ วงจรอะแดปเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่แปลงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นจากตัวตรวจวัดความชื้นที่สร้างขึ้น โดยวงจรให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเป็นสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) และตัวตรวจวัดความชื้นทำหน้าที่ตรวจวัดความชื้นที่

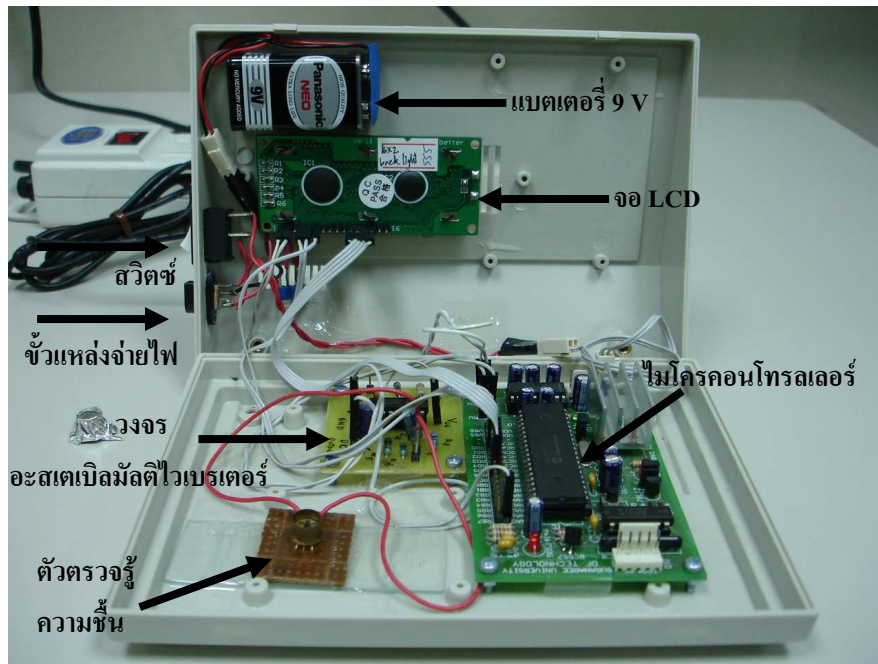
เปลี่ยนแปลงซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้โดยในการสร้างต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์นั้นสามารถวัดได้ถูกต้องที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่านั้นเนื่องจากตัวตรวจรู้ที่นำมาใช้ยังไม่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิอื่น ๆ เพื่อหาสมการชดเชยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์ รูปที่ 7.1-7.4 แสดงต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่สร้างขึ้น



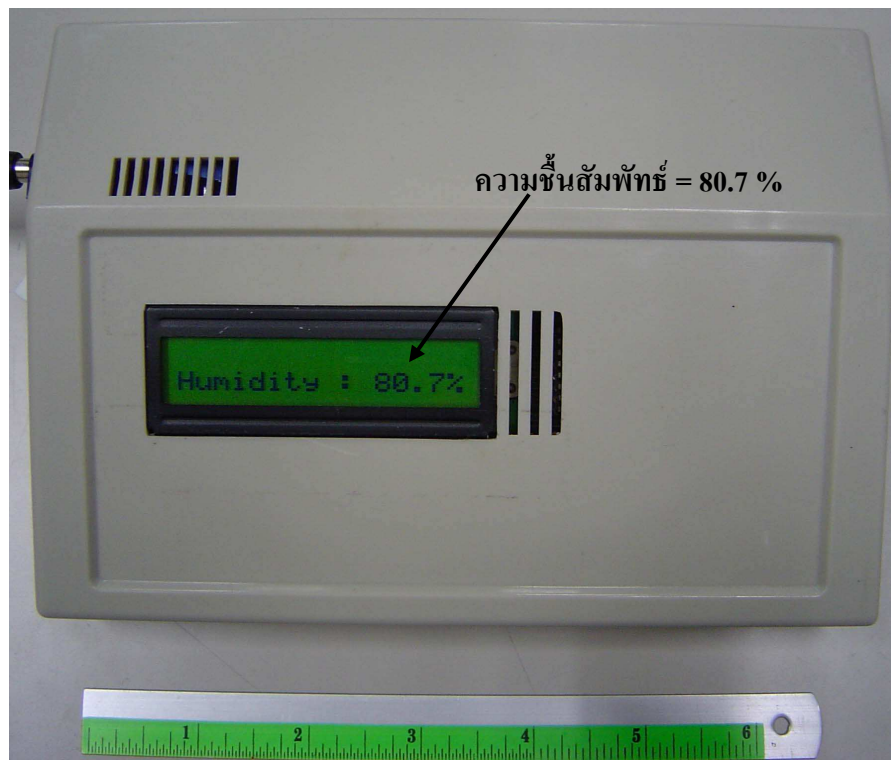
รูปที่ 7.1 แผนภาพการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ในการสร้างเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 7.2 ต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 7.3 โครงสร้างภายในต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 7.4 ความชื้นที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แสดงผลบนจอ LCD

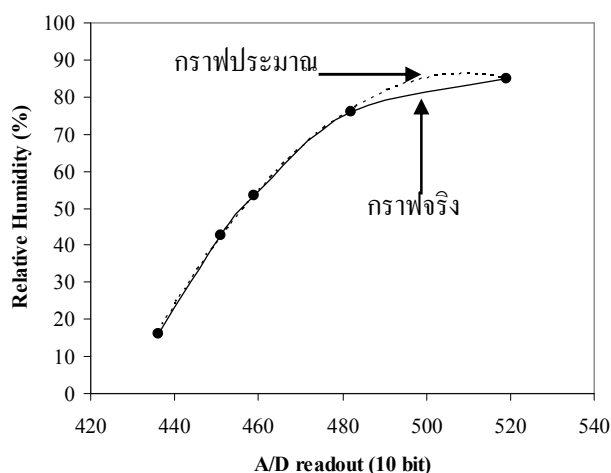
7.3 การทดสอบวัดความชื้นอากาศ

จากการเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์กับสารละลายเกลืออิ่มตัวได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 7.5 จากนั้นจึงทำการประมาณค่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้โดยวิธีพหุนามกำลังสองน้อยที่สุด (polynomial least squares fitting) ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลได้สมการที่ (7-1) และ (7-2) โดยกราฟการประมาณที่ได้จากการคำนวณมีค่าผลรวมยกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแนวตั้งของจำนวนจุดข้อมูล (R^2) เท่ากับ 0.9997 แล้วจึงนำสมการที่ได้ไปเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อกำหนดค่าความชื้นสัมพัทธ์จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นสัญญาณจากวงจระสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (10 bit) ซึ่งแปลงให้อยู่ในรูปของเลขฐานสิบ ซึ่งสามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศในช่วง 0-84.8% โดยประมาณที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์จากกราฟจริงเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟจากการประมาณมีความคลาดเคลื่อน $\pm 1.1\%RH$ โดยเฉลี่ย และรูปที่ 7.6 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แสดงผลด้วยโปรแกรม Hyper Terminal ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232

$$\%RH = -0.0130(A/D)^2 + 13.2352(A/D) - 3283.7738 \quad (7-1)$$

โดยที่ $\%RH$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

A/D คือ สัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (10 bit) ซึ่งแปลงให้อยู่ในรูปของเลขฐานสิบ



รูปที่ 7.5 กราฟการเปรียบเทียบมาตรฐานของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์กับสารละลายเกลืออิ่มตัว แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเลขฐานสิบ

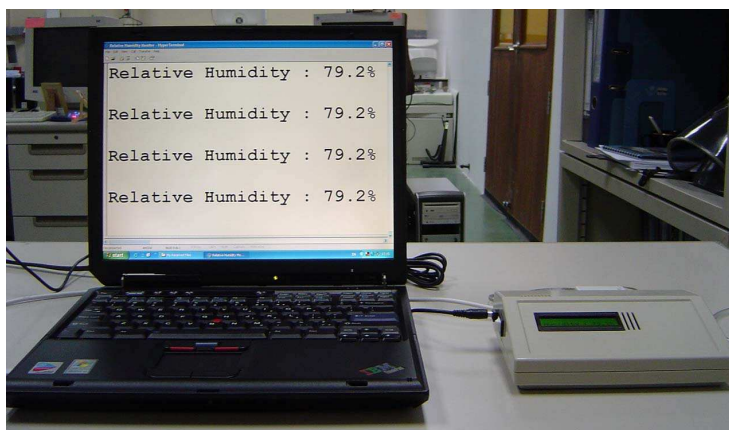
$$R^2 = \sum_{i=1}^n \left[\%RH_i - \left(-0.0130(A/D)_i^2 + 13.2352(A/D)_i - 3283.7738 \right) \right]^2 \quad (7-2)$$

โดยที่ R^2 คือ ผลรวมยกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในแนวตั้งของจำนวนจุดข้อมูล

$\%RH_i$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ข้อมูลที่ i

$(A/D)_i$ คือ สัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (10 bit) ซึ่งแปลงให้อยู่ในรูปของเลขฐานสิบ
ข้อมูลที่ i

n คือ จำนวนข้อมูล

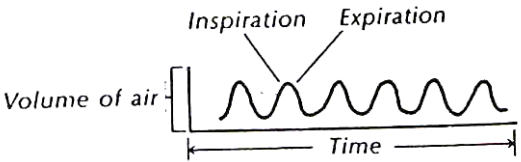
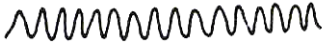



รูปที่ 7.6 ความชื้นที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แสดงผลด้วยโปรแกรม Hyper Terminal ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232

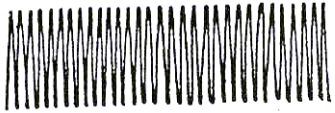


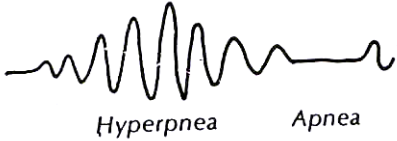
7.4 การทดสอบวัดอัตราการหายใจ

อัตราการหายใจควรนับให้ครบ 1 นาที เพราะรูปแบบการหายใจอาจไม่คงที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ สาเหตุที่พบบ่อยของการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจ เช่น ความสามารถในการยืดหยุ่นของปอดลดลง การเพิ่มงานในการหายใจ การกระตุ้น central และ peripheral chemoreceptors ผลของ reflexes อาการปวด หรือวิตกกังวล สัดส่วนระหว่างระยะเวลาการหายใจเข้า การหายใจออก ปกติจะมีค่า 1:2 ในโรคปอดพบมีการหายใจเข้าสั้นลงหรือหายใจออกยาวขึ้น ในผู้ป่วยโรคปอดอุดกั้น (obstructive lung disease) สัดส่วนจะลดลงเป็น 1:4 ส่วนรูปแบบการหายใจ (breathing pattern) จะแสดงออกทั้งอัตรา ความถี่ และความสม่ำเสมอ (regularity) ของวงจรการหายใจ (respiratory cycle) รูปแบบการหายใจที่สามารถสังเกตได้มีหลายชนิดดังตารางที่ 7.1 ลักษณะที่สำคัญของการหายใจแต่ละรูปแบบจะแสดงออกที่จังหวะและความถี่ของการหายใจที่แตกต่างกัน



ตารางที่ 7.1 รูปแบบ (pattern) การหายใจแบบต่าง ๆ

รูปแบบการหายใจ	รายละเอียด
<p>การหายใจปกติ (eupnea)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราเร็วและความลึกของการหายใจปกติ จึงหว่าสม่าเสมอ - ในผู้ใหญ่ปกติ อัตราการหายใจปกติประมาณ 12-20 ครั้ง/นาที - ในเด็กทารก อัตราการหายใจปกติประมาณ 44 ครั้ง/นาที
<p>หายใจเร็ว (rapid shallow breathing (tachypnea))</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจตื้น และอัตราการหายใจเร็วกว่าปกติ (> 20 ครั้ง/นาที) จึงหว่าสม่าเสมอ เกิดจากหลายสาเหตุ รวมถึง : - restrictive lung diseases - การเกร็งให้ทรวงอกอยู่นิ่ง (splinting) เพื่อลดปวดจากซี่โครงหัก , เยื่อหุ้มปอดอักเสบ (pleuritis) - diaphragm ถูกยกสูงกว่าปกติ หรือถูกจำกัดการเคลื่อนลงจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ตับโต , ท้องมาน (ascites)
<p>หายใจแรง (rapid deep breathing (hyperpnea, hyperventilation))</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจลึก และอัตราการหายใจเร็วกว่าปกติ (> 20 ครั้ง/นาที) จึงหว่าสม่าเสมอ เกิดจากหลายสาเหตุ รวมถึง : - การออกกำลังกาย - ความวิตกกังวล (anxiety) - metabolic acidosis ในผู้ป่วยโคม่า (comatose patient) ที่มีภาวะ infarction, hypoxia หรือ hypoglycemia ที่บริเวณ midbrain หรือ pons - สามารถทำให้เกิด respiratory alkalosis, paresthesia, tetany, confusion

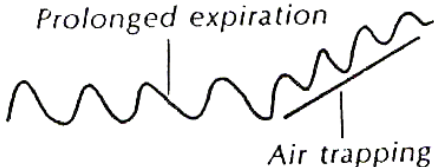

ตารางที่ 7.1 รูปแบบ (pattern) การหายใจแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รูปแบบการหายใจ	รายละเอียด
<p>Kussmaul breathing</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจลึกและเร็วกว่าปกติโดยไม่มีช่วงพัก (มักจะมากกว่า 35 ครั้ง/ นาที) หายใจหอบ (panting, labored breathing) - เกิดจากภาวะ metabolic acidosis, diabetic ketoacidosis หรือ renal failure
<p>slow breathing (bradypnea)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจช้า, จังหวะสม่ำเสมอ (< 12 ครั้ง/นาที) อาจจะเป็นผลที่เกิดตามมาจากสาเหตุอื่นๆ เช่น diabetic coma, ผลจากยาที่กดการหายใจ, การเพิ่มขึ้นของ intracranial pressure, CNS lesion - พบได้เป็นปกติขณะหลับ
<p>Apnea</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หยุดหายใจเป็นระยะเวลาสั้นกว่า 15 วินาที อาจเป็นแบบชั่วคราวเป็นช่วงๆ (intermittent) เช่น ใน sleep apnea - อาจเกิดจากการคลอดก่อนกำหนด (prematurity); CNS dysfunction; การอุดกั้น หลอดลมส่วนบน (upper airway); respiratory arrest
<p>Cheyne-Stokes respiration (periodic breathing)</p>  <p style="text-align: center;">Hyperpnea Apnea</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ความแรงและความถี่ไม่สม่ำเสมอแต่ค่อนข้างเป็นระเบียบ โดยความลึกและอัตราเร็วในการหายใจค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แล้วกลับเป็นต้นและซ้ำ สลับด้วยการหยุดหายใจ (apnea) - เด็ก และผู้สูงอายุปกติ อาจมีรูปแบบการหายใจแบบนี้ได้ - อาจเกิดจาก heart failure, uremia, ได้รับความผิดปกติการหายใจ, brain damage (โดยเฉพาะที่บริเวณ hemisphere 2 ข้าง หรือ diencephalon)


ตารางที่ 7.1 รูปแบบ (pattern) การหายใจแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รูปแบบการหายใจ	รายละเอียด
<p>Biot's breathing</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - การหายใจที่ความแรงและความถี่ไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นระเบียบ จังหวะการหายใจไม่สม่ำเสมอ (irregular) อาจจะหายใจถี่หรือลึกและสลับด้วยช่วงหยุดหายใจที่เกิดขึ้นโดยไม่เป็นรูปแบบแน่นอน - อาจเกิดจากการกดการหายใจ (respiratory depression) เช่น จากการเพิ่มขึ้นของ intracranial pressure ; brain damage; meningitis
<p>sighing respiration</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - การหายใจปกติสลับกับการถอนหายใจที่เกิดขึ้นถี่กว่าปกติ - อาจเกิดจากความผิดปกติทางอารมณ์ (emotional distress), severe hyperventilation syndrome
<p>dyspnea</p>	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจลำบากต้องใช้ความพยายามในการหายใจ หรือหายใจหอบ (labored breathing) ที่อาจเกิดขณะพัก เกิดขึ้นได้เองโดยไม่ได้ออกกำลังกาย หรือเกิดขณะออกกำลังกาย เกิดขึ้นจากความต้องการในการระบายอากาศไม่ได้ สัดส่วนกับความสามารถในการตอบสนองของผู้ป่วย ถ้าพบร่วมกับอาการเท้าบวมอาการ dyspnea นี้้อาจเกิดจากหัวใจห้องขวาล้มเหลว (right heart failure)
<p>paradoxical breathing</p>	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นคำทั่วไป ที่หมายถึง การเคลื่อนที่ของผนังทรวงอกขณะหายใจมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไปจากปกติ

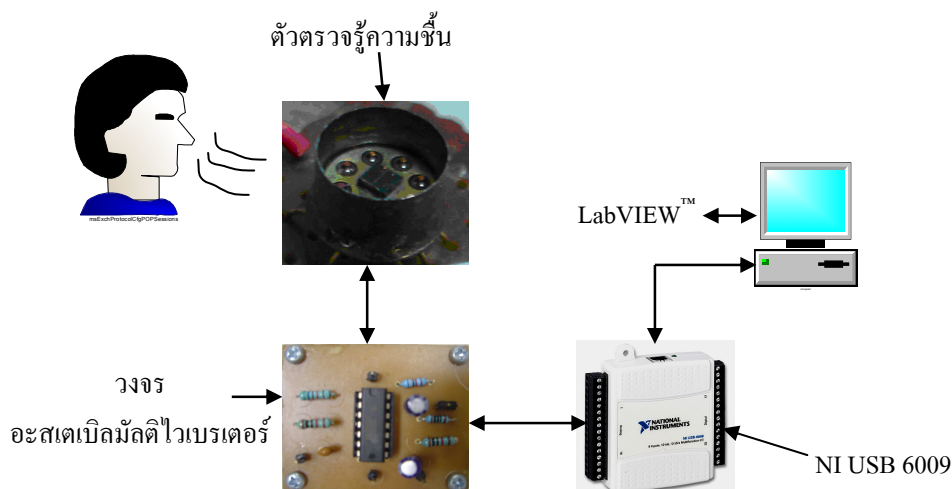
ตารางที่ 7.1 รูปแบบ (pattern) การหายใจแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รูปแบบการหายใจ	รายละเอียด
<p>orthopnea</p>	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจลำบากเมื่อนอนราบ มักจะบรรเทา ความรุนแรงด้วยจำนวนหมอนที่ผู้ป่วยต้องใส่ เพื่อให้หายใจได้สะดวกขึ้น - บ่งชี้ว่ามีหัวใจห้องซ้ายล้มเหลว (left heart failure) - มักมีสาเหตุจากหัวใจวาย ในท่านอนจะมีน้ำในทรวงอกมากกว่าในท่านั่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การมีน้ำในทรวงอกมากจะกระตุ้น J receptor รอบ ๆ ถุงลม ทำให้หายใจเร็วและเกิดความรู้สึกเหนื่อยในท่านอนมากกว่าท่านั่ง
<p>obstructive breathing</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจเข้าเร็ว หายใจออกช้าและยาว เป็นผลมาจากการอุดกั้นทางเดินอากาศ หรือมีการเพิ่มขึ้นของ airway resistance ถ้าอัตราเร็วของการหายใจเพิ่มขึ้น ผู้ป่วยจะมีเวลาไม่เพียงพอสำหรับการหายใจเอาอากาศออกจากปอดได้เต็มที่ (มีการกักอากาศไว้ในปอด) จะทำให้หายใจตื้นขึ้น
<p>apneustic breathing</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจเข้ายาว และหอบเหนื่อย (gasping) ตามด้วยหายใจออกสั้นและไม่เต็มที่พอ - มักพบในผู้ป่วยโรคหอบหืด (asthma), CNS lesion บริเวณ respiratory center
<p>pursed lip breathing</p>	<ul style="list-style-type: none"> - หายใจเข้าช้า และหายใจออกช้า ขณะห่อปาก (pursed lip)
<p>door stop</p>	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราเร็วและจังหวะปกติ แต่จะมีการหยุดหายใจทันทีทันใด เมื่อมีการจำกัด (restriction) เกิดขึ้น มักเกิดร่วมกับ pleurisy

ตารางที่ 7.1 รูปแบบ (pattern) การหายใจแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รูปแบบการหายใจ	รายละเอียด
ataxic breathing 	- จังหวะการหายใจไม่สม่ำเสมอ มีทั้งช่วงที่หายใจลึกและตื้นโดยเกิดแบบไม่สม่ำเสมอ (random) มักเกิดจากรอยโรคที่ medulla

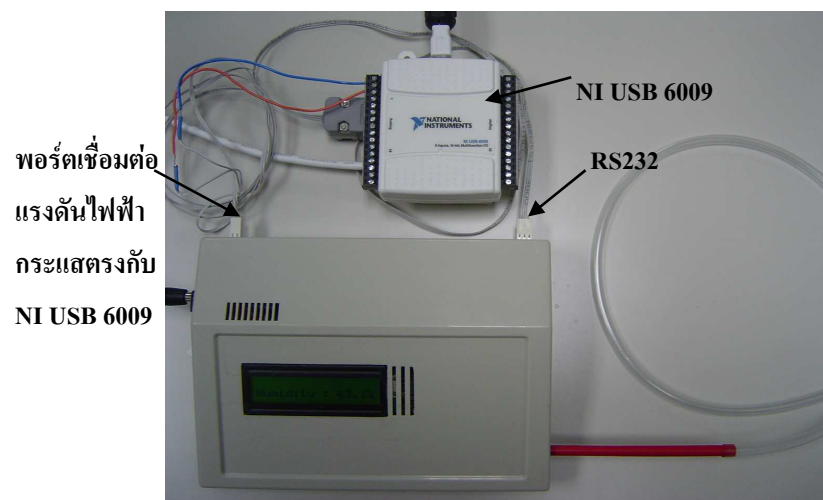
จากการทดลองวัดการตอบสนองต่อความชื้นกับลมหายใจของมนุษย์ดังรูปที่ 7.7 โดยใช้โปรแกรม LabVIEW™ รับค่าเอาต์พุตจากวงจรแอนะล็อกและจัดเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่อัตราการชักตัวอย่าง 20 ครั้งต่อวินาที ที่ค่าแรงดันฐาน 2.13 โวลต์ พบว่าการเลื่อนของแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงตามความชื้นที่ลมหายใจสัมผัสกับตัวตรวจรู้ โดยในการทดสอบนั้นได้ทำการวัดระยะเวลาการหายใจของมนุษย์ซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3 วินาที สำหรับการหายใจเข้าและหายใจออกหนึ่งรอบ รูปที่ 7.8 และ 7.9 แสดงการดัดแปลงเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์เป็นเครื่องวัดอัตราการหายใจจากนั้นทดลองหายใจลงบนตัวตรวจรู้ความชื้นที่ทำการสปัดเตอริงพอลิอิมิดหนา 60 Å ได้ผลแสดงดังรูปที่ 7.10 พบว่าระยะเวลาการดูดซึมความชื้น 1 วินาที และ ระยะเวลาการคายความชื้น 9 วินาที ความชื้นเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่าง 55-70%RH ที่อุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการทดสอบโดยหายใจจำนวน 14 รอบ พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นสามารถตรวจรู้การเปลี่ยนแปลงความชื้นของลมหายใจได้ทั้ง 14 รอบ ซึ่งหายใจด้วยอัตรา 19 ครั้งต่อนาที ดังรูปที่ 7.11



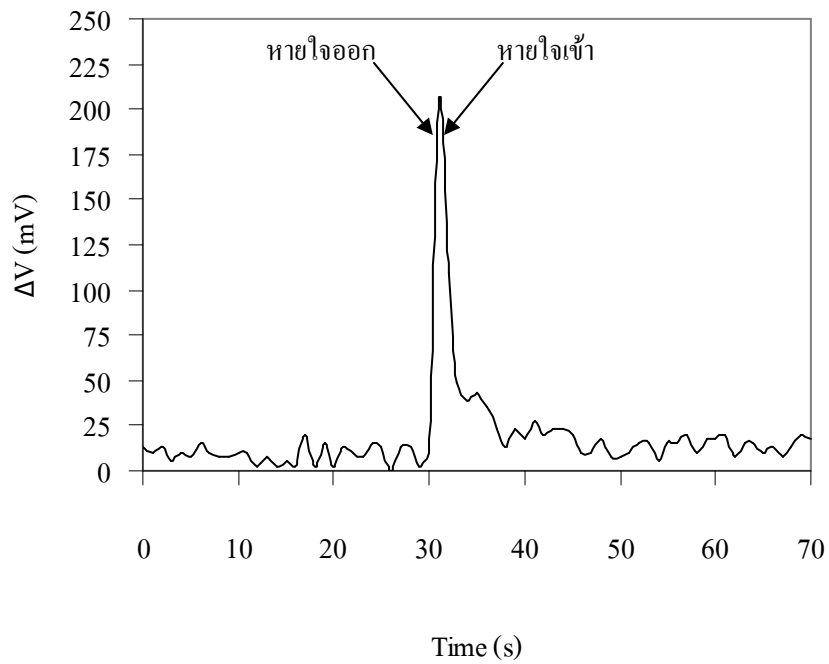
รูปที่ 7.7 การตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อทดสอบกับลมหายใจมนุษย์



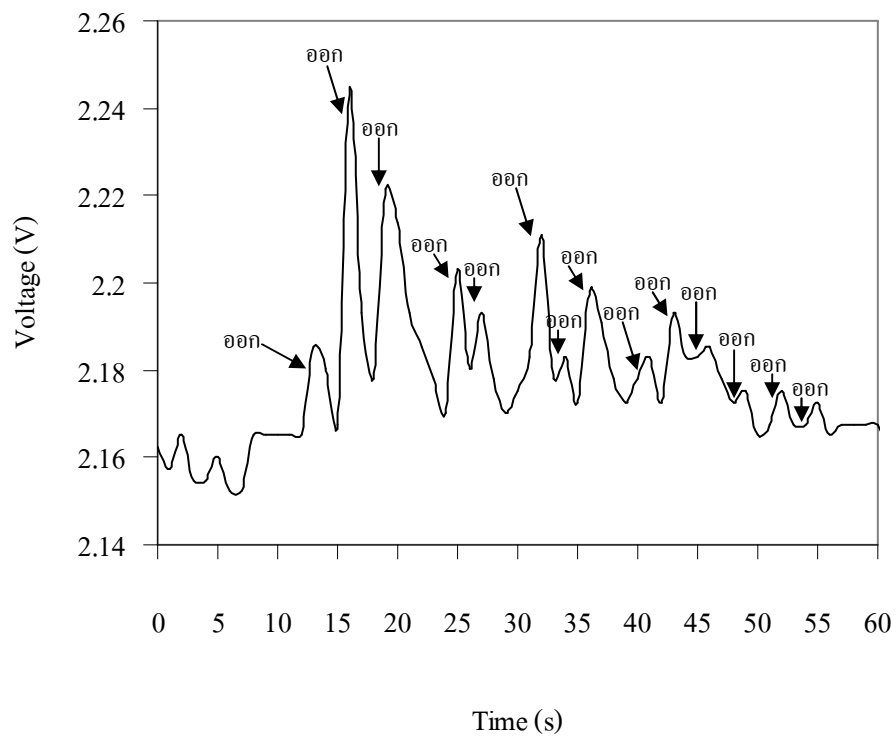
รูปที่ 7.8 ดัดแปลงเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์เป็นเครื่องวัดอัตราการหายใจ



รูปที่ 7.9 การเชื่อมต่อเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์กับคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องวัดอัตราการหายใจ



รูปที่ 7.10 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อทดสอบกับลมหายใจมนุษย์ 1 รอบ



รูปที่ 7.11 ช่วงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อทดสอบกับลมหายใจมนุษย์ขณะหายใจด้วยอัตรา 19 ครั้งต่อนาที

7.5 สรุป

เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่สร้างขึ้นจากตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่ออกแบบและสร้างด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยการใช้การสปัตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น แล้วประกอบเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมต่อออกส่วนแสดงผลได้ทั้งจอแสดงผล LCD และพอร์ตอนุกรม RS232 ของคอมพิวเตอร์ สามารถทำงานเป็นเครื่องวัดความชื้นในสภาพอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังสามารถวัดอัตราการหายใจของมนุษย์โดยอาศัยความชื้นที่ออกมาจากการหายใจในแต่ละรอบได้ ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันว่าตัวตรวจรู้ที่ได้พัฒนาขึ้นมีผลตอบสนองทางเวลาเป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 ข้อสรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพี เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ทำการทดสอบและวัดคุณสมบัติตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นตลอดจนการพัฒนาต้นแบบของเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ที่สร้างได้ การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้ คือ ผลการปฏิสัมพันธ์วรรณกรรมทำให้ทราบถึงแนวทางวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ใช้ กลไกการตรวจรู้ความชื้นของวัสดุหลายชนิดและผลการดำเนินงานจากคณະนักวิจัยต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมไปถึงเกริ่นนำลักษณะตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบและสร้างในงานวิจัยนี้ และกล่าวถึงหลักการวัดความชื้นที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ได้แก่ ความชื้น ความชื้นสัมบูรณ์ ความชื้นสัมพัทธ์ จุดน้ำค้าง การแพร่ การแพร่ในสภาวะคงตัว การแพร่ในสภาวะไม่คงตัว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ และการปรับเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดความชื้น อันจะเป็นฐานความรู้ที่สำคัญในการวิเคราะห์อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของตัวตรวจรู้อันจะนำไปสู่แนวทางการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุประเภทต่าง ๆ ได้แก่ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพีโดยใช้วัสดุไวความชื้นที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ เทปกาวพอลิอิไมด์ และพอลิอิไมด์จากการสปีดเตอริง จากการทดลองพบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปีดเตอริงพอลิอิไมด์เป็นชั้นไวความชื้นมีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้เทปกาวพอลิอิไมด์เป็นชั้นไวความชื้น และตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทใช้เวลาการดูดซึมความชื้นและเวลาการคายความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 นั่นคือต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดีและมีราคาถูก แสดงว่าเทปกาวพอลิอิไมด์และฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอริงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นได้ทั้งสองกรณี เนื่องจากเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีพีตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้มีขนาดใหญ่

ดังนั้นเพื่อลดขนาดของตัวตรวจรู้ความชื้นจึงได้ทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้วัสดุไวความชื้นที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ

เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้นพบว่าความถี่เอาต์พุตของวงจรกำเนิดความถี่มีแนวโน้มลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าตัวตรวจรู้ขนาดใหญ่มีความเป็นเชิงเส้นและมีเสถียรภาพมากกว่าตัวตรวจรู้ขนาดเล็ก และไม่มี ความแตกต่างกันระหว่างแบบแขวงกตและแบบซีหิว สำหรับตัวตรวจรู้ที่มีขนาดเล็กพบว่ามีความไวต่อการกระเพื่อมของอุณหภูมิมากกว่าตัวตรวจรู้ขนาดใหญ่ และพอลิอิมิดจากการสปิตเตอริงที่ใช้ฐานรอง 2 ประเภทคือ ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม และฐานรองกระจกสไลด์ จากการทดลองพบว่าตัวตรวจรู้ทั้งสองประเภทใช้เวลาการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 แต่เวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมมากกว่าตัวตรวจรู้ SMTHS10 ส่วนเวลาการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์นั้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ SMTHS10 และตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองกระจกสไลด์มีความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ฐานรองซิลิคอนมีแผ่นกราวด์อลูมิเนียม นั่นคือต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากยังมีเทคโนโลยีที่สามารถทำให้ตัวตรวจรู้มีขนาดเล็กลงมากยิ่งขึ้นจึงใช้การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นโดยใช้พอลิอิมิดจากการสปิตเตอริงเป็นวัสดุไวความชื้นชนิดเดียวกันที่ความหนาแตกต่างกันคือ 15Å, 30Å และ 60Å ตามลำดับ และมีการเพิ่มเติมโครงสร้างชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียมที่มีการเจาะรูและไม่เจาะรู เพื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 จากการทดลองพบว่าตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 60 Å ใช้ระยะเวลาในการดูดซึมและเวลาการคายความชื้นมากที่สุดในบรรดาตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปิตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น และตัวตรวจรู้ที่ใช้ชั้นไวความชื้นหนา 15Å ใช้ระยะเวลาในการดูดซึมและเวลาการคายความชื้นน้อยที่สุดในบรรดาตัวตรวจรู้ที่ใช้การสปิตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นไวความชื้น อีกทั้งยังเร็วกว่าตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ SMTHS10 อีกด้วย และตัวตรวจรู้ที่ไม่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมและตัวตรวจรู้ที่มีแผ่นกราวด์อลูมิเนียมไม่เจาะรูและเจาะรู ทั้งสามประเภทใช้เวลาการดูดซึมความชื้นน้อยกว่าตัวตรวจรู้ความชื้นเชิงพาณิชย์ SMTHS10 นั่นคือต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถทำงานเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นได้เป็นอย่างดี แสดงว่าฟิล์มที่ได้จากการสปิตเตอริงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุไวความชื้นได้ทั้งสามกรณี

ในการออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้นให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานตามที่ได้จากการทดลองพบว่าถ้าต้องการให้ตัวตรวจรู้มีความเร็วมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นควรใช้การสปิตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นวัสดุไวความชื้นให้มีความบางมากขึ้น แต่ถ้าต้องการให้ตัวตรวจรู้มีความไวมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นควรใช้การสปิตเตอริงพอลิอิมิดเป็นชั้นวัสดุไวความชื้นให้มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มชั้นแผ่นกราวด์อลูมิเนียมเคลือบทับลงบนวัสดุไวความชื้นโดยมีการเจาะรูและไม่เจาะรูอลูมิเนียมนั้นจะช่วยให้ระยะเวลาการดูดซึมความชื้นของตัวตรวจรู้ลดน้อยลงแต่จะทำให้ระยะเวลาการคายความชื้นเพิ่มมากขึ้น จากบทที่ 4-6 สามารถสรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้

แต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 8.1 และ 8.2 ซึ่งนำไปสู่การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์จากตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิกอนสามชั้นโดยใช้การสเปคเตอริงพอลิไอไมด์เป็นชั้นไวความชื้น แล้วประกอบเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมต่อออกส่วนแสดงผลได้ทั้งจอแสดงผล LCD และพอร์ตอนุกรม RS232 ของคอมพิวเตอร์ สามารถทำงานเป็นเครื่องวัดความชื้นในสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่เนื่องจากตัวตรวจรู้ความชื้นที่นำมาใช้ในต้นแบบเครื่องวัดความชื้นนั้นทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่านั้น ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องอุณหภูมิการใช้งาน งานในอนาคตจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ของตัวตรวจรู้ความชื้นเพื่อที่จะชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ อีกทั้งยังสามารถวัดอัตราการหายใจของมนุษย์โดยอาศัยความชื้นที่ออกมาจากการหายใจในแต่ละรอบได้ดีพอสมควรอีกด้วย

ตารางที่ 8.1 เปรียบเทียบช่วงเวลากการตอบสนองของตัวตรวจรู้ที่ออกแบบและสร้างขึ้น

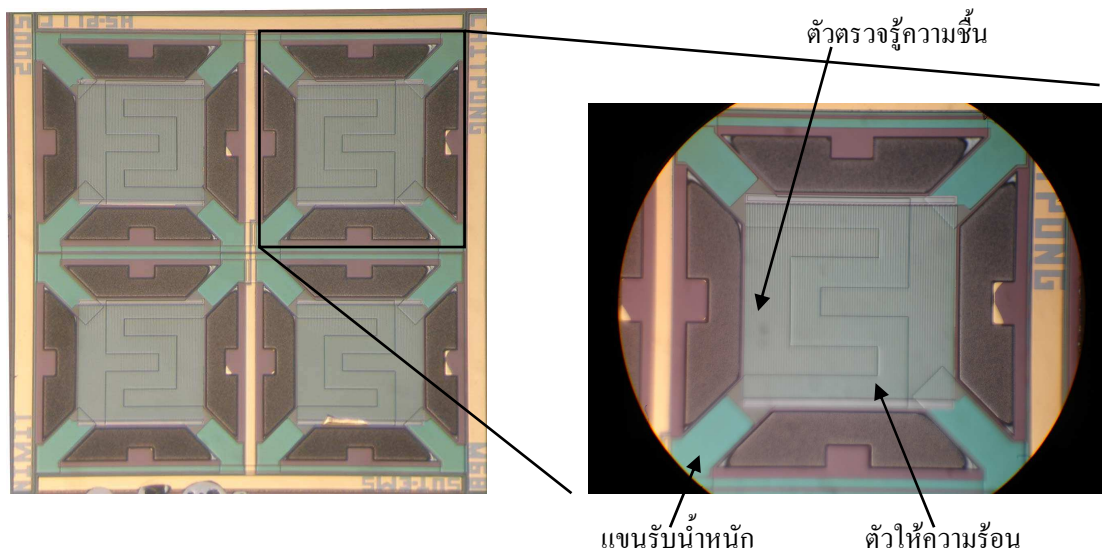
ประเภทตัวตรวจรู้	เวลาการดูดซึมความชื้น (วินาที)	เวลาการคายความชื้น (วินาที)
แผ่นวงจรพิมพ์ (PI tape)	40	80
แผ่นวงจรพิมพ์ (PI sputtered 45 Å)	39	62
วงจรรวมบนฐานรองซิลิกอน (PI sputtered 45 Å)	1.3	247.1
วงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์ (PI sputtered 45 Å)	23	7
PolyMUMPs (PI sputtered 15 Å)	16	9
PolyMUMPs (PI sputtered 30 Å)	33	11
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å)	47	22
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมี แผ่นกรวดอัลูมิเนียมไม่เจาะรู	17	25
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมี แผ่นกรวดอัลูมิเนียมเจาะรู	18	37
SMTHS10	54	110

ตารางที่ 8.2 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด สูงสุด และความไวของตัวตรวจรู้ที่ความถี่ 1 kHz

ประเภทตัวตรวจรู้	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 11.3%RH (pF)	ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 84.3%RH (pF)	ความไว (pF/%RH)	ความไว (%)
แผ่นวงจรพิมพ์ (PI tape)	47.500	48.870	0.019	0.039
แผ่นวงจรพิมพ์ (PI sputtered 45 Å)	37.300	38.900	0.022	0.059
วงจรรวมบนฐานรองซิลิคอน (PI sputtered 45 Å)	2.086	2.485	0.005	0.262
วงจรรวมบนฐานรองกระจกสไลด์ (PI sputtered 45 Å)	11.798	23.682	0.163	1.379
PolyMUMPs (PI sputtered 15 Å)	41.000	49.300	0.114	0.274
PolyMUMPs (PI sputtered 30 Å)	31.900	83.400	0.705	2.210
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å)	30.490	49.970	0.267	0.875
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมีแผ่นกรวดคอลลูมิเนียมไม่ เจาะรู	19.386	28.021	0.118	0.610
PolyMUMPs (PI sputtered 60 Å) และมีแผ่นกรวดคอลลูมิเนียมเจาะรู	16.263	17.613	0.018	0.114
SMTHS10	161.815	277.436	1.583	0.978

8.2 ข้อเสนอแนะ

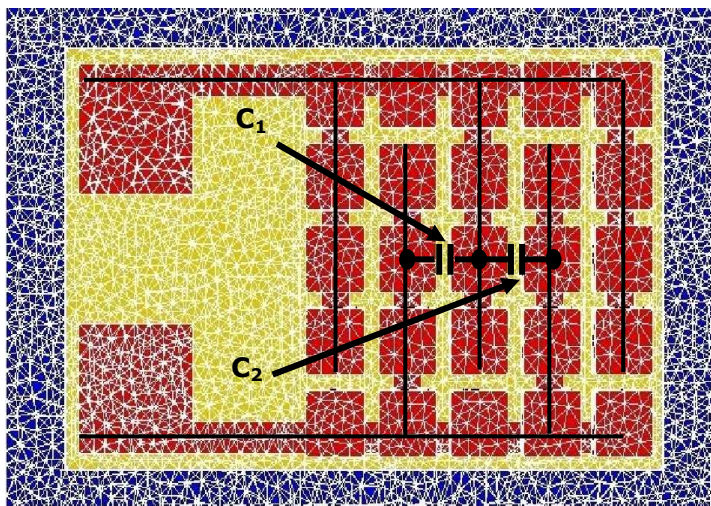
จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้คือ การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้น โดยมีโครงสร้างแบบอะเรย์ของตัวตรวจรู้ความชื้นแขวนลอยอยู่ในอากาศ พร้อมทั้งมีตัวให้ความร้อนบนชิพเดียวกัน เพื่อที่จะทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นคืนสภาพได้อย่างรวดเร็วเมื่อวัดความชื้น อันจะเป็นการทำให้ช่วงเวลาการตอบสนองของตัวตรวจรู้เร็วขึ้น และจำเป็นต้องมีการทำกระบวนการกัดซิลิคอนเพื่อให้โครงสร้างลอยอยู่ในอากาศหลังจากได้รับชิพจากต่างประเทศกลับมาแล้ว เพื่อที่จะทำให้ความชื้นแพร่กระจายออกจากตัวตรวจรู้ได้อย่างรวดเร็วทั้งด้านบนและด้านล่างของโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 8.1



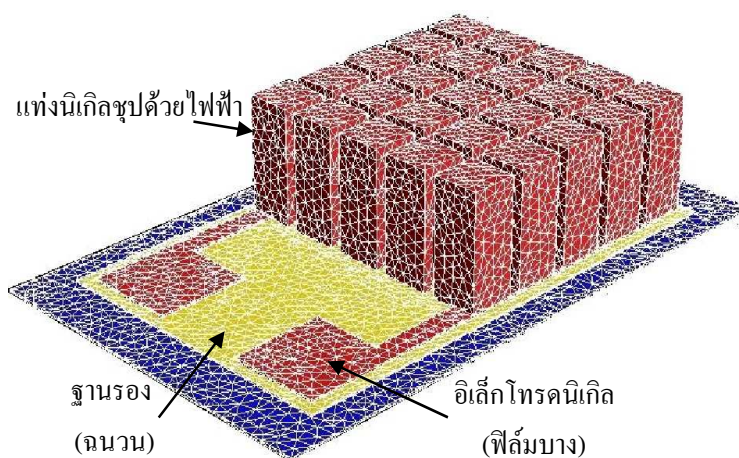
รูปที่ 8.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุแบบมีโครงสร้างแขวนลอยอยู่ในอากาศ พร้อมทั้งมีตัวให้ความร้อนบนชิพเดียวกัน

อีกแนวความคิดหนึ่งคือ ตัวตรวจรู้ความชื้นซึ่งมีอิเล็กโทรดในแนวตั้ง (Vertical-electrode humidity sensor) ซึ่ง โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีขั้วอิเล็กโทรดในแนวแกนตั้ง มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ข้อดีข้อเสียของโครงสร้างแบบใหม่ ซึ่งอาจนำไปสู่ตัวตรวจรู้ที่มีความไวสูงขึ้นและใช้เนื้อที่ของแผ่นฐานรองน้อยลง โครงสร้างที่น่าเสนอนี้ มีอิเล็กโทรดรูปร่างคล้ายแท่งหอคอยที่ทำจากโลหะนิเกิล แท่งโลหะแต่ละแท่งถูกเชื่อมโยงด้วยสายเส้นของฟิล์มโลหะ เพื่อให้เกิดเป็น โครงสร้างของตัวเก็บประจุ เมื่อเคลือบ โครงสร้างนี้ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกแปรเปลี่ยนไปตามความชื้น จะทำให้ความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นด้วยการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาโครงสร้างแบบนี้ ทำโดยการใช้ซอฟต์แวร์ CoventorWare™ ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เพื่อการจำลองโครงสร้าง MEMS เริ่มต้นด้วยการออกแบบภาพร่างสองมิติ (layout) ของโครงสร้างแยกเป็นชั้น ๆ โดยใช้ซอฟต์แวร์ LASI จากนั้นนำเข้าไปใน CoventorWare™ แล้วกำหนดความหนา และชนิดของวัสดุ ในแต่ละชั้น จากนั้นทำการสร้าง solid model และสร้าง mesh ซึ่งกำหนดขอบเขตของการจำลองการทำงานในส่วนย่อย ๆ ของโครงสร้าง จากนั้นทำการคำนวณตามวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าของโครงสร้างกับความสูงของแท่งโลหะระยะห่างระหว่างแท่งโลหะ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวน (polyimide) ในงานนี้ได้ศึกษารูปแบบการจัดเรียงแท่งอิเล็กโทรดโลหะเป็นอะเรย์ (array) หรือแถวแท่งโลหะในสองลักษณะ คือแบบที่ทำให้เกิดความจุไฟฟ้าระหว่างแท่งโลหะใด ๆ กับแท่งอื่นๆที่อยู่ติดกันจำนวน 2 แท่ง หรือเรียกว่า two-capacitor type tower array และอีกแบบหนึ่งคือ

แบบที่ทำให้เกิดความจุไฟฟ้าจำนวน 4 แห่ง หรือเรียกว่า four-capacitor type tower array ดังแสดงในรูปที่ 8.2 และ 8.3 ตามลำดับ ขนาดทางเรขาคณิตของแท่งโลหะเป็นดังนี้คือ แท่งโลหะทำด้วยนิกเกิล มีขนาดหน้าตัด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ หรือ $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ ความสูงของแท่งโลหะ $10 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ และ $100 \mu\text{m}$ กำหนดให้แท่งโลหะ 5×5 แท่ง วางห่างกันด้วยระยะ $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ และ $20 \mu\text{m}$

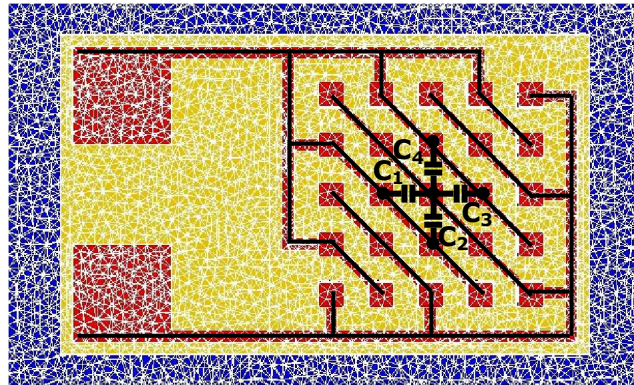


(ก) ภาพด้านบนของ two-capacitor type tower array

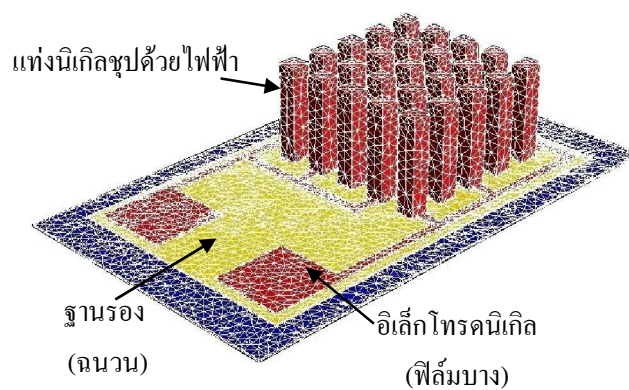


(ข) ภาพสามมิติของ two-capacitor type tower array

รูปที่ 8.2 (ก) และ (ข) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีอิเล็กโทรดในแนวตั้งแบบ two-capacitor type tower array



(ก) ภาพด้านบนของ four-capacitor type tower array

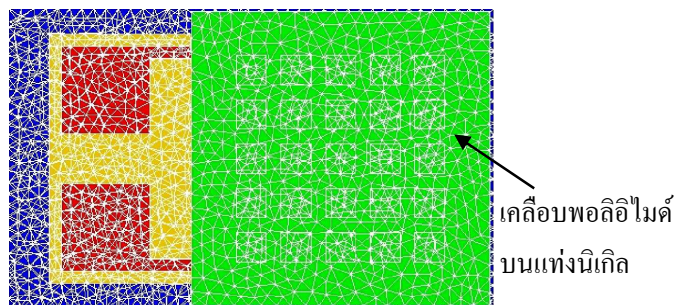


(ข) ภาพสามมิติของ four-capacitor type tower array

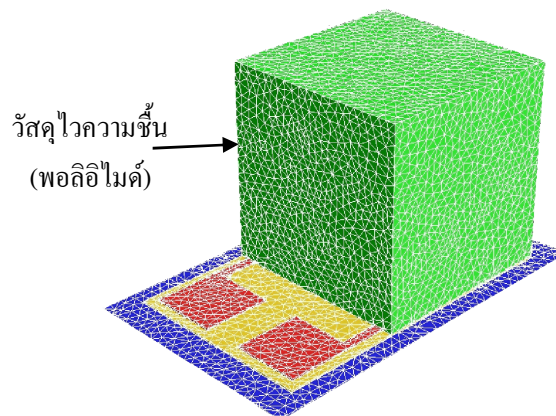
รูปที่ 8.3 (ก) และ (ข) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีอิเล็กโทรดในแนวตั้งแบบ four-capacitor type tower array

ความจุไฟฟ้าระหว่างแท่งโลหะทั้งสองขั้ว มีค่าเท่ากับผลรวมของความจุไฟฟ้าระหว่างแท่งตัวนำแต่ละแท่งกับแท่งอื่น ๆ ค่าของความจุไฟฟ้า มีค่าขึ้นอยู่กับตัวกลางระหว่างแท่งตัวนำ ซึ่งในการวิจัยนี้จะจำลองให้เป็นอากาศหรือวัสดุพอลิอิมไค์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สำหรับอากาศนั้นมีเท่ากับ 1 ส่วนของพอลิอิมไค์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความชื้นในอากาศ คือมีค่า 3.0 ในอากาศแห้งไปจนถึง 4.2 ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100% รูปที่ 8.4 แสดงโครงสร้างของอะเรย์ ของแท่งตัวนำที่มีพอลิอิมไค์เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก จากการจำลองโครงสร้างดังกล่าวมาด้วย CoventorWare™ พบว่า ความจุไฟฟ้าของโครงสร้างที่ฉนวนทำด้วยพอลิอิมไค์มีค่ามากกว่าที่ทำด้วยอากาศ ที่ระดับ

ความสูงของแท่งโลหะเท่ากัน รูปที่ 8.5 แสดงความจุไฟฟ้าของโครงสร้างของแท่งโลหะขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ที่วางห่างกัน $5 \mu\text{m}$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 2.8 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 12 fF ถึง 120 fF เมื่อทำการจำลองการทำงานเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างชนิด two-capacitor และชนิด four-capacitor แสดงดังรูปที่ 8.6 และ 8.7 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทั้งสองนี้ พบว่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง four-capacitor type มีค่ามากกว่าโครงสร้าง two-capacitor type ประมาณ 1.57 เท่า หรือมีค่ามากขึ้น 57% ทำให้สามารถประหยัดพื้นที่ของชิพเพื่อให้ได้ความจุไฟฟ้าที่เท่ากัน ทำให้โครงสร้างแบบ four-capacitor type เป็น โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ในแนวแกนตั้ง

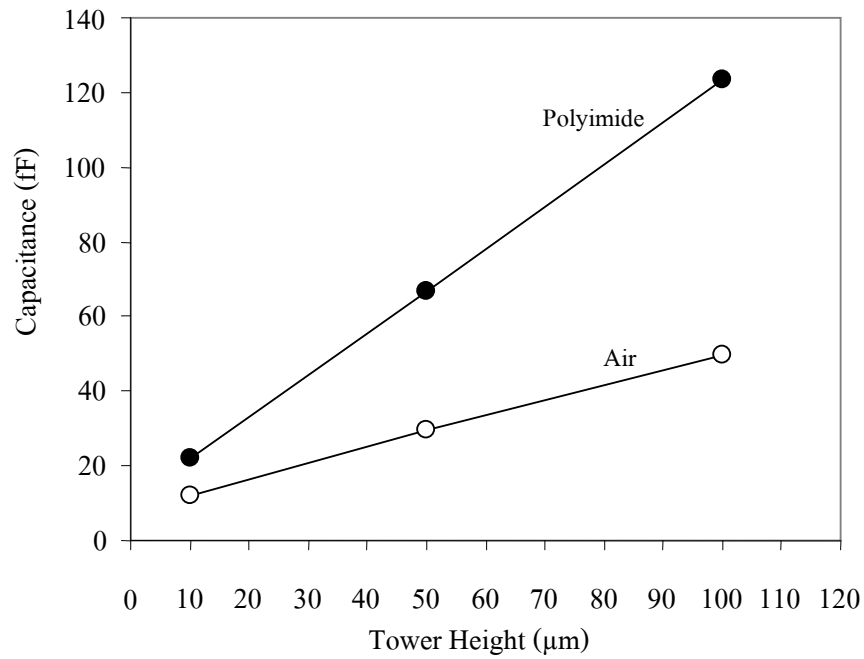


(ก) ภาพด้านบนแสดงอะเรย์ของแท่งโลหะที่เคลือบด้วยพอลิอิมิด

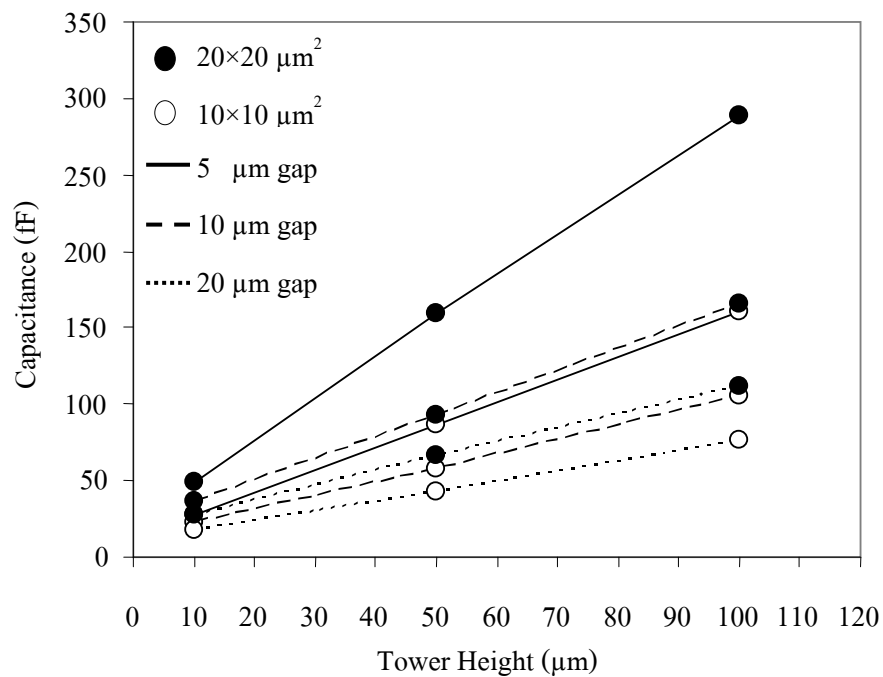


(ข) ภาพสามมิติแสดงอะเรย์ของแท่งโลหะที่เคลือบด้วยพอลิอิมิด

รูปที่ 8.4 (ก) และ (ข) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุที่มีอิเล็กทรอนิกส์ในแนวตั้งที่มีพอลิอิมิดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก

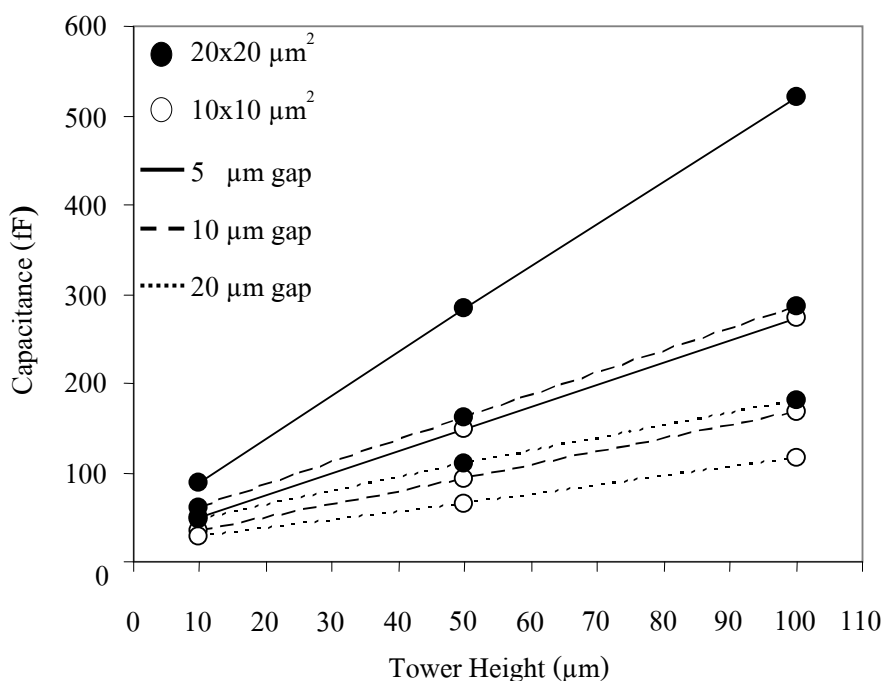


รูปที่ 8.5 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แบบ two-capacitor type ที่มีพอลิไมด์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 2.8 เปรียบเทียบกับไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก (อากาศ) วางห่างกัน $5 \mu\text{m}$

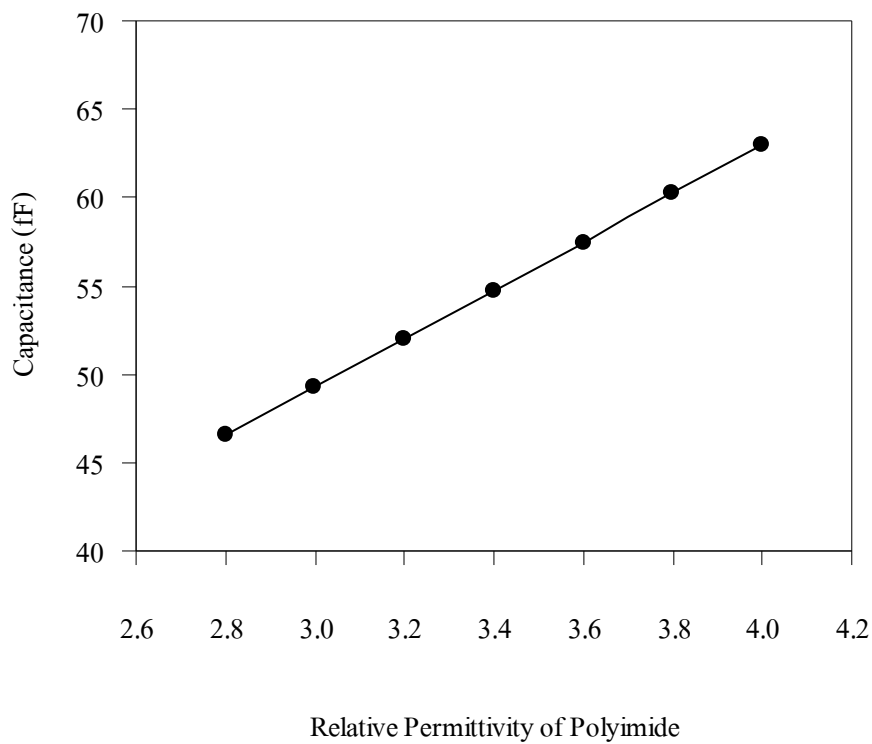


รูปที่ 8.6 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะแบบต่างๆ ในโครงสร้างแบบ two-capacitor type

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในอากาศ ต่อความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง พบว่า โครงสร้างมีความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8.8 ซึ่งเป็นผลการจำลองการทำงานของโครงสร้างแบบ four-capacitor type ความสูง 10 μm ขนาดแท่งโลหะ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และระยะห่างระหว่างแท่งโลหะ 5 μm โดยให้ความจุไฟฟ้าในย่าน 45 fF ถึง 60 fF เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงในช่วง 2.8 ถึง 4.0 หรือประมาณความชื้นในช่วง 0-90%RH จากการศึกษาทำให้เราทราบแนวโน้มของผลที่คาดว่าจะได้รับซึ่งจะได้นำไปใช้เป็นข้อพิจารณาการออกแบบและสร้างเซนเซอร์ในโครงสร้างนี้ต่อไป จากการศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีอิเล็กโทรดในแกนแนวตั้ง พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้โครงสร้างแบบนี้มาสร้างจริง แต่ในขณะนี้ยังมีอุปสรรคทางเทคนิคในการทำแกนอิเล็กโทรดประเภทนี้ โดยใช้เทคนิคการสร้างด้วยกระบวนการ LIGA จากรังสีเอกซ์ที่ได้จากแสงซินโครตรอน จะได้ทดลองสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดนี้ต่อไป



รูปที่ 8.7 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะแบบต่าง ๆ ในโครงสร้างแบบ four-capacitor type



รูปที่ 8.8 ความจุไฟฟ้าของอะเรย์ของแท่งโลหะแบบ four-capacitor type ความสูง $10\ \mu\text{m}$ ขนาดแท่งโลหะ $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$ และระยะห่างระหว่างแท่งโลหะ $5\ \mu\text{m}$ ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่าง ๆ

รายการอ้างอิง

- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). ระบบเครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม. ใน: หนังสือก้าวทันโลกอิเล็กทรอนิกส์. ครั้งที่ 1. ฝ่ายพัฒนาศักยภาพเยาวชนด้านไอซีที สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร. หน้า 164-180.
- ธีระชัย พรสินศิริรักษ์. (3 เมษายน 2549). ทันโลกเทคโนโลยี. ไทยโพสต์: Excite ไทยโพสต์
- วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. แปลโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์และคณะ. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- สุราษฎร์ สุทธิเนตร. (2546). การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้น. ใน: คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. ครั้งที่ 1. ส่วนวารสารวิชาการสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร. หน้า 100-117.
- Bearzotti, A., D'Amico, A., Furlani, A., Iucci, G., and Russo, M. V. (1992). Fast humidity response of a metal halide-doped novel polymer. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 7 (1-3) : 451-454.
- Biederman, H. (2000). RF sputtering of polymers and its application. **Vacuum**. 59 (2-3): 594-599.
- Biederman, H., Stelmashuk, V., Kholodkov, I., Choukourov, A., and Slavinska, D. (2003). RF sputtering of hydrocarbon polymers and their derivatives. **Surface and Coatings Technology**. 174-175 : 27-32.
- Boisen, A., Thaysen, J., Jensenius, H., and Hansen, O. (2000). Environmental sensors based on micromachined cantilevers with integrated read-out. **Ultramicroscopy**. 82 (1-4) : 11-16.
- 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.

- Caliendo, C., Verona, E., D'Amico, A., Furlani, A., Iucci, G., and Russo, M.V. (1993). Surface acoustic wave humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 16 (1-3): 288-292.
- Caliendo, C., Verona, E., D'Amico, A., Furlani, A., Iucci, G., and Russo, M.V. (1994). A new surface acoustic wave humidity sensor based on a polyethynylfluorene membrane. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 18 (1-3):82-84.
- Chomnawang, N., Cheirsirikul, S., Pengchan, W., Niemchareon, S., and Ketthanom, Ch. (2005). Application of RF Sputtered Polyimide Film in Capacitive Humidity Sensing. **Proceedings of the 19th European conference on solid-state transducers (Euroensors XIX)**. 2(W) : (pp. WPb71). Spain, Barcelona.
- Crank, J. (1975). **The Mathematics of Diffusion**. London: Oxford University Press, Ely House.
- Das, J., Hossain, S.M., Chakraborty, S., and Saha, H. (2001). Role of parasitics in humidity sensing by porous silicon. **Sensors and Actuators A: Physical**. 94 (1-2): 44-52.
- Erson, R. C., Muller, R. S., and Tobias, C. W. (1990). Investigations of porous silicon for vapor sensing. **Sensors and Actuators A: Physical**. 23(1-3): 835-839.
- Fenner, R., Zdankiewicz, E. (2001). Micromachined water vapor sensors: a review of sensing technologies. **IEEE Sensors Journal**. 1 (4): 309-317.
- Feynman, R. P. (1992). There's plenty of room at the bottom. **Journal of Microelectromechanical Systems**. 1 (1) : 60 – 66.

- Fürjes, P., Kovács, A., Dücső, C.s., Ádám, M., Müller, B., and Mescheder, U. (2003). Porous silicon-based humidity sensor with interdigitated electrodes and internal heaters. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 95 (1-3): 140-144.
- Gerlach, G., and Sager, K. (1994). A piezoresistive humidity sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**. 43 (1-3): 181-184.
- Grange, H., Bieth, C., Boucher, H., and Delapierre, G. (1987). A capacitive humidity sensor with every fast response time and very low hysteresis. **Sensors and Actuators**. 12 (3): 291-296.
- Harrey, P.M., Ramsey, B.J., Evans, P.S.A., and Harrison, D.J. (2002). Capacitive-type humidity sensors fabricated using the offset lithographic printing process. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 87 (2) : 226-232.
- Hijikagawa, M., Miyoshi, S., Sugihara, T. and Jinda, A. (1983). A thin-film resistance humidity sensor. **Sensors and Actuators**. 4 : 307-315.
- Jahori, H. (2003). **Development of MEMS Sensors for Measurements of Pressure, Relative Humidity, and Temperature**. Master Thesis, Faculty of Mechanical Engineering Worcester Polytechnic Institute, Worcester, United State of America.
- Kalkan, A. K., Handong, Li., O'Brien, C. J., and Fonash, S. J. (2004). A rapid-response, high-sensitivity nanophase humidity sensor for respiratory monitoring. **IEEE Electron Device Letters**. 25 (8): 526 – 528.
- Kang, U., and Wise, K.D.(2000). A high-speed capacitive humidity sensor with on-chip thermal reset. **IEEE Tran. Electron Devices**. 10 (2) : 702-710.
- Ketthanom, Ch., Chomnawang, N., Klaitabtim, D., and Tuantranont, A. (2004). Capacitance simulation of interdigitated metallic towers for humidity sensing

- applications. **Proceedings of the 27th Electrical Engineering Conference.** 2: (pp.297-300). Thailand, Khonkaen.
- Ketthanom, Ch., Pengchan, W., Cheirsirikul, S., Niemchareon, S., and Chomnawang, N. (2005). Novel Low-Cost Humidity Sensors Based on Moisture Sensitive Polyimide Adhesive Tape. **Proceedings of the 2005 Electrical/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference.** 1: (pp. 119-122). Thailand, Pattaya.
- Kim, S-J., Park, J-Y., Lee, S-H., and Yi, S-H. (2000). Humidity sensors using porous silicon layer with mesa structure. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 33: 1781-1784.
- Kinbara, A., Hayashi, T., Wakahara, K., Kikuchi, N., Kusano, E., and Nanto, H. (2003). Polyimide-based organic thin films prepared by rf magnetron sputtering. **Thin Solid Films.** 433 (1-2): 274-276.
- Kitoh, M., and Honda, Y. (1995). Preparation and tribological properties of sputtered polyimide film. **Thin Solid Films.** 271 (1-2): 92-95.
- Koester, D., Cowen, A., Mahadevan, R., Stonefield, M., and Hardy, B. (2003). **PolyMUMPs Design Handbook (revision 10.0).** Copyright © by MEMSCAP. All rights reserved.
- Kupta, B.D., and Ratnanjali. (2001). A novel probe for a fiber optic humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical.** 80 (2): 132-135.
- Kuroiwa, T., Miyagishi, T., Ito, A., Matsuguchi, M., Sadaoka, Y., and Sakai, Y. (1995). A thin-film polysulfone-based capacitive-type relative-humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical.** 25 (1-3): 692-695.
- Lang, W., Sandmaier, H., and Steiner, P. (1995). Porous silicon: A novel material for Microsystems. **Sensors and Actuators A: Physical.** 51(1) : 31-36.

- 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.
- Lee, S.P., and Park, K.J. (1996). Humidity sensitive field effect transistors. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 35 (1-3): 80-84.
- Li, G. Q., Lai, P. T., Zeng, S. H., Huang, M. Q., and Cheng, Y. C. (1997). Photo-, thermal and humidity sensitivity characteristics of $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ film on SiO_2/Si substrate. **Sensors and Actuators A: Physical**. 63 (3): 223-226.
- Li, G. Q., Lai, P. T., Zeng, S. H., Huang, M. Q., and Li, B. (1999). A new thin-film humidity and thermal micro-sensor with $\text{Al}/\text{SrNb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ structure. **Sensors and Actuators A: Physical**. 75 (1): 70-74.
- Lukosz, W., and Stamm, Ch. (1991). Integrated optical interferometer as relative humidity sensor and differential refractometer. **Sensors and Actuators A: Physical**. 25 (1-3) : 185-188.
- Nahar, R. K., and Khanna, V. K. (1998). Ionic doping and inversion of the characteristic of thin film porous Al_2O_3 humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 46 (1): 35-41.
- O'Halloran, G.M., Sarro, P.M., Groeneweg, J., Trimp, P.J., and French, P.J. (1997). **A bulk micromachined humidity sensor based on porous silicon.** Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97, International Conference. 1:563 – 566.
- OIML R121-EN. (1996). **The scale of relative humidity of air certified against saturated salt solutions.**

- Penza, M., and Anisimkin, V. I. (1999). Surface acoustic wave humidity sensor using polyvinyl-alcohol film. **Sensors and Actuators A: Physical**. 76 (1-3) : 162-166.
- Pérez, J. M. M., and Freyre, C. (1997). A poly(ethyleneterephthalate)-based humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 42 (1): 27-30.
- Patissier, B. (1999). Humidity sensors for automotive, appliances and consumer applications. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 59 (2-3): 231-234.
- Qiu, Y.Y., Leme, C.A., Alcacer, L.R., and Franca, J.E. (2001). A CMOS humidity sensor with on-chip calibration. **Sensors and Actuators A: Physical**. 92 (1-3): 80-87.
- Qu, W., and Meyer, J. (1997). Novel thick-film ceramic humidity sensor **Sensors and Actuators B: Chemical**. 40 (2-3): 175-182.
- 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.
- Rittersma, Z.M. (2002). Recent achievements in miniaturized humidity sensors - a review of transduction techniques. **Sensors and Actuators A: Physical**. 96 (2-3): 196-210.
- Rittersma, Z.M., Splinter, A., Bödecker, A., and Benecker, W. (2000). A novel surface-micromachined capacitive porous silicon humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 68 (1-3): 210-217.
- Ralston, A. R. K., Tobin, J. A., Bajikar, S. S. and Denton, D. D. (1994). Comparative performance of linear, cross-linked, and plasma-deposited PMMA capacitive humidity sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 22 (2): 139-147.

- Sakai, Y., Sadaoka, Y., and Ikeuchi, K. (1986). Humidity sensors composed of grafted copolymers. **Sensors and Actuators**. 9 (2):125-131.
- Sakai, Y., Sadaoka, Y., and Matsuguchi, M. (1996). Humidity sensors based on polymer thin films. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 35 (1-3): 85-90.
- Schroth, A., Sager, K., Gerlach, G., Häberli, A., Boltshauser, T., and Baltes, H. (1996). A resonant polyimide-based humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 34 (1-3): 301-304.
- Shuk, P., and Greenblatt, M. (1998). Solid electrolyte film humidity sensor. **Solid State Ionics**. (113-115): 229-233.
- Story, P. R., Galipeau, D. W., and Mileham R. D. (1995). A study of low-cost sensors for measuring low relative humidity. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 25 (1-3) : 681-685.
- Suzuki, T. (2004). **Integrated, Intelligent, sensor fabrication strategies for environmental monitoring**. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering and Information Technology Griffith University Brisbane, Queensland, Australia.
- Tetelin, A., Pellet, C., Laville, C., and N'Kaoua, G. (2003). Fast response humidity sensors for a medical microsystem. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 91 (1-3): 211-218.
- Tiefenthaler, K., and Lukosz, W. (1985). Grating couplers as integrated optical humidity and gas sensors. **Thin Solid Films**. 126 : 205-211.
- Traversa, E. (1995). Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 23 (2-3): 135-156.

- Tsuchitani, S., Sugawara, T., Kinjo, N., and Ohara T. Tsunoda, S. (1988). A humidity sensor using ionic copolymer and its application to a humidity-temperature sensor module. **Sensors and Actuators**. 15 (4): 375-386.
- Vergnaud, J. M. (1991). **Liquid Transport Processes in Polymeric Materials**. New Jersey, Prentice Hall.
- Walker, C. S. (1990). **Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis**. Boston, Artech House.
- Yamazoe, N. (1986). Humidity sensors: principles and applications. **Sensors and Actuators**. 10 : 379-398.
- Yang, M. J., Li, Y., Camaioni, N., Casalbore-Miceli, G., Martelli, A., and Ridolfi, G. (2002). Polymer electrolytes as humidity sensors: progress in improving an impedance device. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 86 (2-3): 229-234.
- Yuk, J., and Troczynski, T. (2003). Sol-gel BaTiO₃ thin film for humidity sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 94 (3) : 290-293.

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว

ขั้นตอนการเปรียบเทียบมาตรฐานตัวตรวจรู้ความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว

1. นำเกลือใส่ลงในภาชนะที่เป็นแก้ว เช่น บีกเกอร์ เติมน้ำบริสุทธิ์ลงในภาชนะจนเกลือเปียก คนให้เกลือละลายในน้ำ เติมเกลือพร้อมคนจนกระทั่งเกลือไม่สามารถละลายได้อีก
2. นำบีกเกอร์ไปอุ่นด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์เพื่อให้เกลือละลายพร้อมทั้งเติมเกลือจนกระทั่งไม่สามารถละลายได้อีก ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จนสารละลายเกลือตกผลึก
3. เทสารละลายเกลือที่ได้ลงในภาชนะที่เป็นแก้ว จากนั้นนำตัวตรวจรู้ความชื้นวางไว้ด้านบนของภาชนะ ข้อควรระวังอย่าให้ตัวตรวจรู้สัมผัสกับสารละลาย หุ้มภาชนะพร้อมกับตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง และตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นด้วยพลาสติกห่อหุ้มอาหาร
4. ทิ้งไว้ประมาณ 2-6 ชั่วโมง ความชื้นภายในภาชนะจะมีค่าเท่ากับความชื้นของสารละลายเกลือ นั้น ๆ โดยความชื้นจะแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งตรวจสอบได้จากตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง
5. ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าหรือต่อตัวตรวจรู้ความชื้นเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 เพียงแต่เปลี่ยนชนิดของเกลือที่ให้ค่าความชื้นแตกต่างกันออกไป ณ อุณหภูมิคงที่

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยี
แผ่นวงจรมพิมพ์ เทคโนโลยีวงจรรวม และเทคโนโลยีระบบกึ่งไฟฟ้าจุลภาค

ข.1 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้เทปกาวพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น

1. ทำความสะอาดแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำดีไอออไนซ์ (de-ionized water) คือ น้ำที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการไหลผ่านเรซินที่กักประจุไว้
2. ทำความสะอาดผิวทองแดงด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5% (เพื่อให้ฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสยึดติดแน่น) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
3. ติดฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสชนิดแห้งลงบนผิวทองแดง นำเข้าเครื่องรีดฟิล์ม LAM-150 ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่อง EXP-152 dryfilm exposure unit ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด เพื่อถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มขาวดำต้นแบบไปยังโฟโตริซีสชนิดแห้งนาน 3 นาที
5. ลอกพลาสติกบนผิวฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสออก ล้างฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
6. กัดลวดลายทองแดงด้วยน้ำยากัดแผ่นวงจรพิมพ์จนกระทั่งเหลือลวดลายทองแดงตามแบบ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
7. ลอกฟิล์มไวแสงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (ในกระบวนการกัดแผ่นวงจรพิมพ์ให้เป็นลวดลายตามแบบด้วยน้ำยากัดแผ่นวงจรพิมพ์นั้น ควรระมัดระวังไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณลวดลายบนผิวทองแดง เพราะจะทำให้น้ำยากัดไม่สามารถกัดทองแดงออกได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีช่องว่างระหว่างลวดลายเล็กมาก ๆ)
8. ขั้นตอนสุดท้ายติดเทปกาวพอลิอิมิด์ลงบนลวดลายทองแดง นำเข้าเครื่องรีดพิมพ์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปบัดกรีด้วยตะกั่วพร้อมต่อสายไฟ

ข.2 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้การสเป็คเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น

1. ทำความสะอาดแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำดีไอออไนซ์ (de-ionized water) คือ น้ำที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการไหลผ่านเรซินที่กักประจุไว้
2. ทำความสะอาดผิวทองแดงด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5% (เพื่อให้ฟิล์มไวแสงโฟโตริซีสยึดติดแน่น) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

3. ติดฟิล์มไวแสงโพโตริชชนิดแห้งลงบนผิวทองแดง นำเข้าเครื่องรีดฟิล์ม LAM-150 ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด ที่อุณหภูมิตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่อง EXP-152 dryfilm exposure unit ของบริษัท วราไมโครเซอร์กิต จำกัด เพื่อถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มขาวดำต้นแบบไปยังโพโตริชชนิดแห้งนาน 3 นาที
5. ลอกพลาสติกบนผิวฟิล์มไวแสงโพโตริชออก ล้างฟิล์มไวแสงโพโตริชด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
6. กัดลวดลายทองแดงด้วยน้ำยากัดแผ่นวงจรพิมพ์จนกระทั่งเหลือลวดลายทองแดงตามแบบ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
7. ลอกฟิล์มไวแสงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (ในกระบวนการกัดแผ่นวงจรพิมพ์ให้เป็นลวดลายตามแบบด้วยน้ำยากัดแผ่นวงจรพิมพ์นั้น ควรระมัดระวังไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณลวดลายบนผิวทองแดง เพราะจะทำให้ น้ำยากัดไม่สามารถกัดทองแดงออกได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีช่องว่างระหว่างลวดลายเล็กมาก ๆ)
8. ขั้นตอนสุดท้ายทำการเคลือบพอลิอิมิดลงบนลวดลายทองแดงด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์ เริ่มจากเทปกาวพอลิอิมิด (Kapton) ลงบนผิวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิลิกอน (หรือโลหะอื่น ๆ) ให้ทั่วบริเวณพื้นที่วงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร แล้วติดตั้งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องสปัตเตอร์ Anelva SPF210A
9. วางชิ้นงานลงบนฐานรองรับภายใต้ อิเล็กโตรดดังกล่าว และดูดอากาศออกจากเครื่องจนได้ความดัน 1×10^{-6} torr จากนั้นทำการป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าไปในเครื่องและรักษาระดับความดันไว้ที่ 1.2 Pa แล้วป้อนคลื่นความถี่วิทยุแรงดันสูงความถี่ 13.5 MHz โดยใช้ความหนาแน่นกำลังงาน 1.2 W/cm^2 (forward power 100 W และ reverse power 40 W)
10. ทำการสปัตเตอร์โดยไม่เปิดชัตเตอร์เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของพอลิอิมิดก่อนทำการเคลือบจริงประมาณ 30 นาที แล้วจึงทำการเปิดชัตเตอร์เพื่อทำการสปัตเตอร์จริง 45 นาที แล้วจึงนำตัวตรวจรูที่สร้างเสร็จไปบัดกรีด้วยตะกั่วพร้อมต่อสายไฟ

ข.3 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรูความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้เทปกาวพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

1. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
2. ติดเทปกาวพอลิอิมิดลงบนผิวกระจกสไลด์ รีดให้เรียบด้วยมือ เคลือบด้วยชั้นอนุเมเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร

3. กัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ เช่น แบบซี่หวี และแบบเขาวงกต ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิส AZ1350 หยอดลงบนชั้นอลูมิเนียมและนำเข้าเครื่องหมุนที่ด้วยความเร็วรอบการหมุนต่อเนื่องได้สองระดับคือ ความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที และความเร็วรอบ 2500 rpm นาน 30 วินาที
4. อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐานนาน 30 วินาที
5. ล้างสารไวแสงโฟโตรีซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่งนาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สองนาน 15 วินาที ล้างด้วยน้ำด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
6. กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยาคัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
7. นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปเชื่อมต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมด้วยกาวตัวนำไฟฟ้าโลหะเงิน (silver conductive epoxy CW2400) ของบริษัท Chemtronic

ข.4 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยสร้างบนฐานรองซิลิคอนและใช้การสปีดเตอริงพอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้น

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
2. สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ห่อหุ้มแผ่นซิลิคอนสะอาดด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อนจากนั้นเคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร
3. เคลือบชั้นพอลิอิมิด์ด้วยการสปีดเตอริงนาน 45 นาที (หนา 45 Å) เคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร
4. กัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิส AZ1350 หยอดลงบนชั้นอลูมิเนียมและนำเข้าเครื่องหมุนเคลือบที่ด้วยความเร็วรอบการหมุนต่อเนื่องได้สองระดับคือ ความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที และความเร็วรอบ 2500 rpm นาน 30 วินาที
5. อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐานนาน 30 วินาที
6. ล้างสารไวแสงโฟโตรีซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่งนาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สองนาน 15 วินาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

7. กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยากัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 จากนั้นล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปเชื่อมต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมด้วยกาวตัวนำอิมพอกซ์โลหะเงินของบริษัท Chemtronic

ข.5 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมโดยสร้างบนฐานรองกระจกสไลด์และใช้การสปัตเตอร์ิงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
2. เคลือบทับด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยกระบวนการระเหยในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร
3. กัดชั้นอลูมิเนียมให้เป็นลวดลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิส AZ1350 หยอดลงบนชั้นอลูมิเนียมและนำเข้าเครื่องหมุนเคลือบที่ตั้งความเร็วรอบหมุนต่อเนื่องได้สองระดับคือ ความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที และความเร็วรอบ 2500 rpm นาน 30 วินาที
4. อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐานนาน 30 วินาที
5. ล้างสารไวแสงโฟโตรีซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่งนาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สองนาน 15 วินาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
6. กัดอลูมิเนียมด้วยน้ำยากัดอลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
7. เคลือบชั้นพอลิอิมิดด้วยการสปัตเตอร์ิงนาน 45 นาที (หนา 45 Å)
8. นำตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้วไปเชื่อมต่อสายเส้นลวดอลูมิเนียมด้วยกาวตัวนำอิมพอกซ์โลหะเงินของบริษัท Chemtronic

ข.6 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นโดยใช้การสปัตเตอร์ิงพอลิอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น

1. เคลือบชั้น Nitride ความหนา 600 นาโนเมตร ลงบนแผ่นซิลิคอนระนาบ (100) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความหนา 500 ไมโครเมตร เจือสารชนิดเอ็นความต้านทาน 1-2 โอห์ม-ซ.ม.

2. เคลือบชั้น Poly0 ความหนา 500 นาโนเมตร แล้วกัดลวดลายตาม layout (POLY0/CPZ/13) เพื่อสร้างลายเส้นของวัสดุ Poly0 หรือ (HOLE0/CHZ/41) เพื่อสร้างรูในวัสดุ Poly0
3. เคลือบชั้น First oxide ความหนา 2 ไมโครเมตร แล้วกัดลวดลายตาม layout (DIMPLE/COS/50) เพื่อสร้างรูลึก 750 นาโนเมตร เพื่อให้ Poly1 ซึ่งเป็นวัสดุชั้นถัดไปก่อตัวในรูกลายเป็นโครงสร้าง dimple ซึ่งใช้ป้องกันไม่ให้โครงสร้างของ Poly1 และ Poly0 เชื่อมติดกันในภายหลัง
4. กัดรูทะลุวัสดุ First oxide สำหรับ Anchor1 ซึ่งเป็นช่องให้วัสดุ Poly1 หยั่งลงไปยึดบนพื้นผิวของ Poly0 หรือ Nitride แล้วแต่กรณีดังนี้ บริเวณที่ First oxide วางอยู่บน Poly0 การกัด Anchor1 จะหยุดที่ Poly0 และบริเวณที่ First oxide วางอยู่บน Nitride การกัด Anchor1 จะหยุดที่ Nitride
5. เคลือบชั้น Poly1 ความหนา 2 ไมโครเมตร ในขั้นตอนนี้ Poly1 จะเติมลงในรูของ Dimple และ Anchor1
6. เคลือบผิวของ Poly1 ด้วย PSG หนา 200 นาโนเมตร และ anneal ที่ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำให้อะตอมของฟอสฟอรัสใน PSG แพร่เข้าสู่ Poly1 ทำให้ความนำไฟฟ้าของ Poly1 เพิ่มขึ้น
7. กัดลวดลายตาม layout (POLY1/CPS/45) เพื่อเป็นแบบสำหรับลายเส้นของ Poly1 หรือ (HOLE1/CHO/0) เพื่อเป็นแบบสำหรับรูของ Poly1 แล้วกัด Poly1 ในส่วนที่อยู่นอก PSG ออกไป จากนั้นกัด PSG ที่
8. เคลือบชั้น Second oxide ความหนา 750 นาโนเมตร แล้วกัดลวดลายตาม layout (POLY1_POLY2_VIA/COT/47) เพื่อให้ Poly2 เชื่อมกันกับ Poly1 ที่ช่องนี้ การกัด Second oxide นี้จะหยุดลงที่ชั้น Poly1
9. กัดลวดลายตาม layout (ANCHOR2/COL/52) ทะลุชั้น Second oxide และ First oxide ซึ่งเชื่อมติดต่อกัน ให้ทะลุลงไปยังชั้น Poly0 หรือ Nitride แล้วแต่กรณีเช่นเดียวกับข้อ 4. เพื่อให้ชั้น Poly2 หยั่งลงถึงชั้น Poly0 หรือ Nitride
10. เคลือบชั้น Poly2 ความหนา 1.5 ไมโครเมตร ในขั้นตอนนี้ Poly2 จะเติมลงในรูของ Anchor2
11. เคลือบผิวของ Poly2 ด้วย PSG หนา 200 นาโนเมตร และ anneal ที่ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำให้อะตอมของฟอสฟอรัสใน PSG แพร่เข้าสู่ Poly2 ทำให้ความนำไฟฟ้าของ Poly2 เพิ่มขึ้น
12. กัดลวดลายตาม layout (POLY2/CPT/49) เพื่อเป็นแบบสำหรับลายเส้นของ Poly2 หรือ (HOLE2/CHT/1) เพื่อเป็นแบบสำหรับรูของ Poly2 แล้วกัด Poly2 ในส่วนที่อยู่นอก PSG ออกไป จากนั้นกัด PSG ที่
13. เคลือบชั้น Metal (ทองคำ) ความหนา 500 นาโนเมตร ด้วยกระบวนการ lift-off โดยใช้ layout (METAL/CCM/51) สำหรับเส้นโลหะหรือ (HOLEM/CHM/48) สำหรับรูของโลหะ

14. ตัดแยกชิพ คัดแยก และจัดส่งให้ผู้ออกแบบ นำไปทำกระบวนการ post-processing
15. ล้างสารเคลือบป้องกันออกด้วยอะซิโตนจนหลุดออกหมดจากผิวหน้าของตัวตรวจรู้โดยสังเกตจากความมันวาวของผิวตัวตรวจรู้ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ นำตัวตรวจรู้แช่ทิ้งไว้ในเมธิวแอลกอฮอล์นาน 1 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออก อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวตรวจรู้แห้งสนิท
16. ทำความสะอาดผิวหน้าชิพด้วยเครื่องออกซิเจนพลาสมานาน 10 นาที ใช้พลังงาน 50% (100 W) ความดันแก๊สออกซิเจน 0.3 mbar
17. นำตัวตรวจรู้ที่ได้ทำการเคลือบพอลิอิมิด์ด้วยการสปัตเตอร์ด้วยความถี่วิทยุ 60 นาที
18. บรรจุตัวตรวจรู้ลงในตัวถังแบบ TO-5 (8 ขา) พร้อมทั้งเชื่อมต่อลวดตัวนำด้วยเครื่องเชื่อมต่อสาย (wire bonder)

ข.7 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีกระบวนการสร้างพอลิซิลิคอนสามชั้นโดยใช้การสปัตเตอร์พอลิอิมิด์เป็นวัสดุไวความชื้นและมีแผ่นกราฟต์อลูมิเนียม

1. จากหัวข้อ ข.6 ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-14 นำตัวตรวจรู้จุ่มล้างสารเคลือบป้องกันออกด้วยอะซิโตนจนหลุดออกหมดจากผิวหน้าของตัวตรวจรู้โดยสังเกตจากความมันวาวของผิวตัวตรวจรู้ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
2. แช่ทิ้งไว้ในเมธิวแอลกอฮอล์นาน 1 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออก อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวตรวจรู้แห้งสนิท
3. ทำความสะอาดผิวหน้าชิพด้วยเครื่องออกซิเจนพลาสมานาน 10 นาที ใช้พลังงาน 50% (100 W) ความดันแก๊สออกซิเจน 0.3 mbar
4. เคลือบพอลิอิมิด์ด้วยการสปัตเตอร์ด้วยความถี่วิทยุ 60 นาที
5. เคลือบชั้นอลูมิเนียมด้วยวิธีการระเหยโลหะในสุญญากาศหนาประมาณ 50 นาโนเมตร
6. ติดชิพลงบนกระจกสไลด์ด้วยสารไวแสงโฟโตริซิส AZ1512 เพียงเล็กน้อย อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
7. หยอดสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ1512 ลงบนตัวตรวจรู้ให้ทั่ว นำเข้าเครื่องหมุนความเร็วรอบสูงที่ความเร็ว 500 rpm นาน 5 วินาที และ 2500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นทำการฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายนาน 30 วินาที (เพื่อเปิดช่องสำหรับกัคอลูมิเนียม)
8. ล้างสารไวแสงโฟโตริซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่งนาน 15 วินาที และ AZ 400K developer ครั้งที่สองนาน 15 วินาที ตรวจสอบลวดลายว่าถูก developer ออกหมดหรือไม่ด้วย

- กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ถ้ายังออกไม่หมดให้ล้างในน้ำยา developer อีกครั้งหนึ่ง ล้างด้วยน้ำ
 บริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
9. กัดลุมิเนียมด้วยน้ำยากัดลุมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก
 (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำ บริสุทธิ์
 10. ล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสารไวแสงโฟโตริซิส AZ1512 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง แล้วเป่าให้
 แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
 11. หยอดสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ1512 ลงบนตัวตรวจรู้ให้ทั่ว นำเข้าเครื่องหมุนความเร็ว
 รอบสูงที่ความเร็ว 500 rpm นาน 5 วินาที และ 2500 rpm นาน 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ
 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ฉายแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลายนาน 30 วินาที (เพื่อเปิดช่อง
 สำหรับเจาะรูลุมิเนียม)
 12. ล้างสารไวแสงโฟโตริซิสด้วย AZ 400K developer ครั้งที่หนึ่งนาน 15 วินาที และ AZ 400K
 developer ครั้งที่สองนาน 15 วินาที ตรวจสอบลวดลายว่าถูก developer ออกหมดหรือไม่ด้วย
 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ถ้ายังออกไม่หมดให้ล้างในน้ำยา developer อีกครั้งหนึ่ง ล้างด้วย
 น้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
 13. กัดลุมิเนียมด้วยน้ำยากัดลุมิเนียมซึ่งประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : กรดไนตริก
 (HNO_3) : กรดอะซิติก (CH_3COOH) : น้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 ล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสารไวแสงโฟโตริซิส AZ1512 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วย
 แก๊สไนโตรเจน
 15. บรรจุตัวตรวจรู้ลงในตัวถังแบบ DIP (8 ขา) พร้อมทั้งเชื่อมต่อลวดตัวนำด้วยเครื่องเชื่อมต่อสาย
 (wire bonder)

ภาคผนวก ค

โปรแกรมภาษาซีที่ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในต้นแบบ
เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์

```

/*****

* File      : HS_NR_sensor.c
* Purpose   : Drive LCD 4-bit mode using D to digital output port and convert analog voltage
              to digital for humidity equation
* Author    : Chitphong Ketthanom
* E-mail    : chitpong.k@gmail.com
* Release   : PCW Compiler 3.210
* Copyright (c) 2006 EMS LAB SUT.

*****/

#include <18F458.h>          // Standard Header file for the PIC18F458 device
#define adc=10              // ADC 10 Bit (111111111 = 1,023)
#define delay(clock=2000000) // Clock Speed(Hz)
#define fuses NOWDT,WDT128,HS, NOPROTECT, NOOCSSEN, NOBROWNOUT, BORV20,
NOPUT, NOCPD, NOSTVREN, NODEBUG, NOLVP, NOWRT, NOWRTD, NOWRTB,
NOCPB, NOWRTC, NOEBTR, NOEBTRB
#define rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
#define fast_io(A)         // Programming of the direction register
#include "LCD.C"           // use module function

/** LCD.C : Driver for commom LCD modules*****/

// As defined in the following structure the pin connection is as follows:
// B0 = E(enable), B1 =RS, B2 = R/W
// B4 = D4, B5 = D5, B6 = D6
// B7 = D7

// LCD pins D0-D3 are not used and PIC D3 is not used.

/*****

#define STRING_SIZE 17

/*****

* Functions prototypes

*****/

```

```

void LCD_Command(int cm);

void CAL_Humidity(void);

void LCD_Show(void);

/*****

* FUNCTION      : LCD_Command
* DESCRIPTION   : LCD Command
* PARAMETERS    : cm
* RETURNED     : nothing
*****/

void LCD_Command(int cm)
{
    lcd_send_byte(0,cm);
}

/*****

* FUNCTION      : Calculate Relative Humidity
* DESCRIPTION   : Convert analog voltage to digital with ADC 10 bit and calculate %RH
* PARAMETERS    : nothing
* RETURNED     : nothing
*****/

void CAL_Humidity(void)
{
    float value;
    float humidity;
    setup_port_a(ALL_ANALOG);          // A0 A1 A2 A3 A4 A5 E0 E1 E2 Ref=Vdd
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);    // Clock RC
    set_adc_channel(0);                // Read Analog input RA0(channel=0)
    do{
        value = Read_ADC();
        humidity = (-0.0130*value*value)+(13.2352*value)-3283.7738;
        if (humidity > 84.762)
            { humidity = 84.762;}
        else if (humidity < 0)

```

```

    { humidity = 0;}

    printf(lcd_putc, "\nHumidity : %4.1f%%\n", (float) humidity);
    printf("\n\rRelative Humidity : %4.1f%%\n", (float) humidity);
    delay_ms(500);
}

while(TRUE);
}

/*****
* FUNCTION      : LCD_Show
* DESCRIPTION   : LCD Show
* PARAMETERS   : nothing
* RETURNED     : nothing
*****/

void LCD_Show(void)
{
    LCD_Command(0x80);           // start 1st line
    CAL_Humidity();
}

/*****
* FUNCTION      : Main
* DESCRIPTION   : This is the main entry point for the program
* PARAMETERS   : nothing
* RETURNED     : nothing
*****/

void main(void)
{ lcd_init();                   // LCD initialize
  while(TRUE)
  {LCD_Show();
  };}

```


ภาคผนวก ง

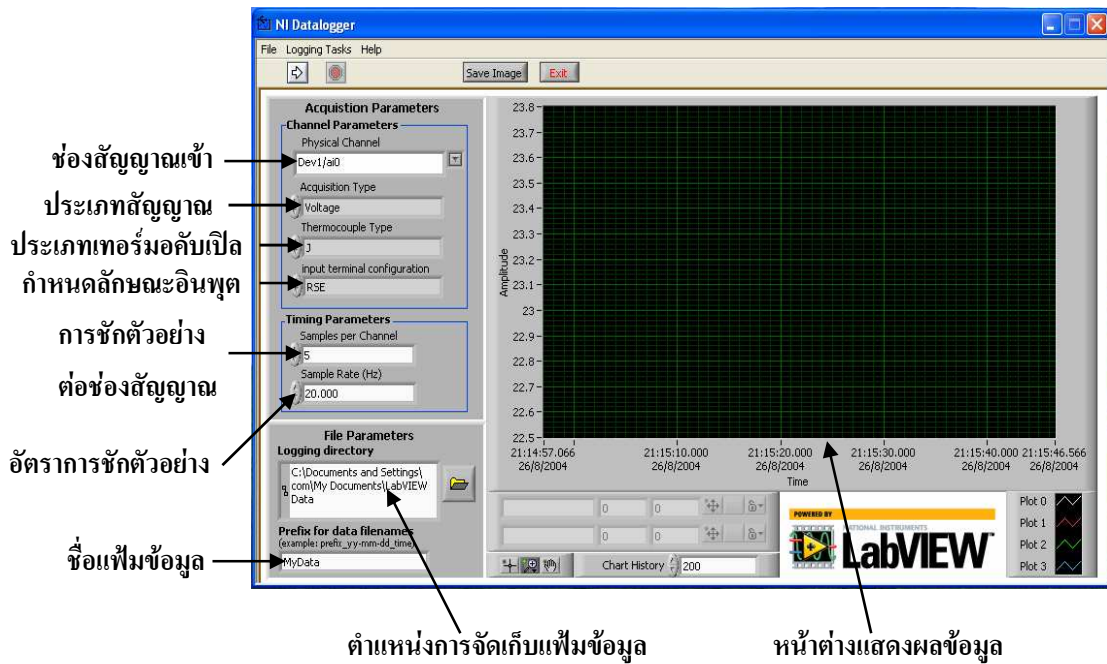
การเชื่อมต่อตัวตรวจรู้ความชื้นเข้ากับโปรแกรม LabVIEW™



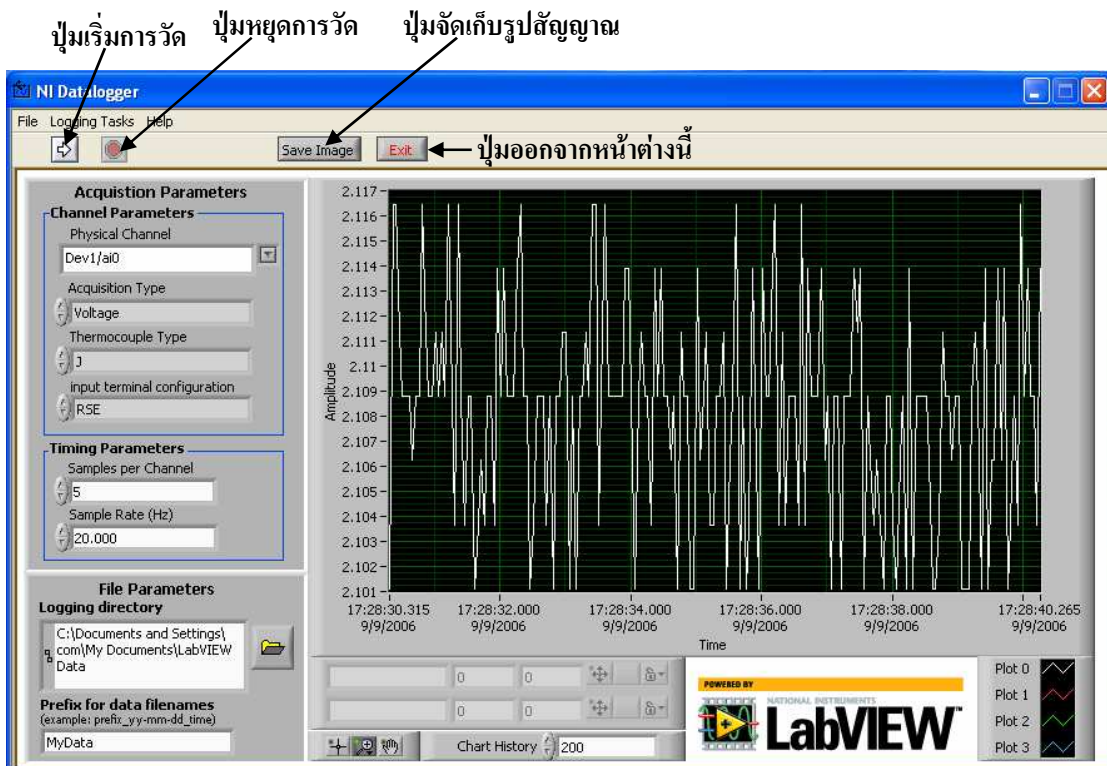
รูปที่ ง.1 การเชื่อมต่อต้นแบบเครื่องวัดความชื้นกับโปรแกรม LabVIEW™



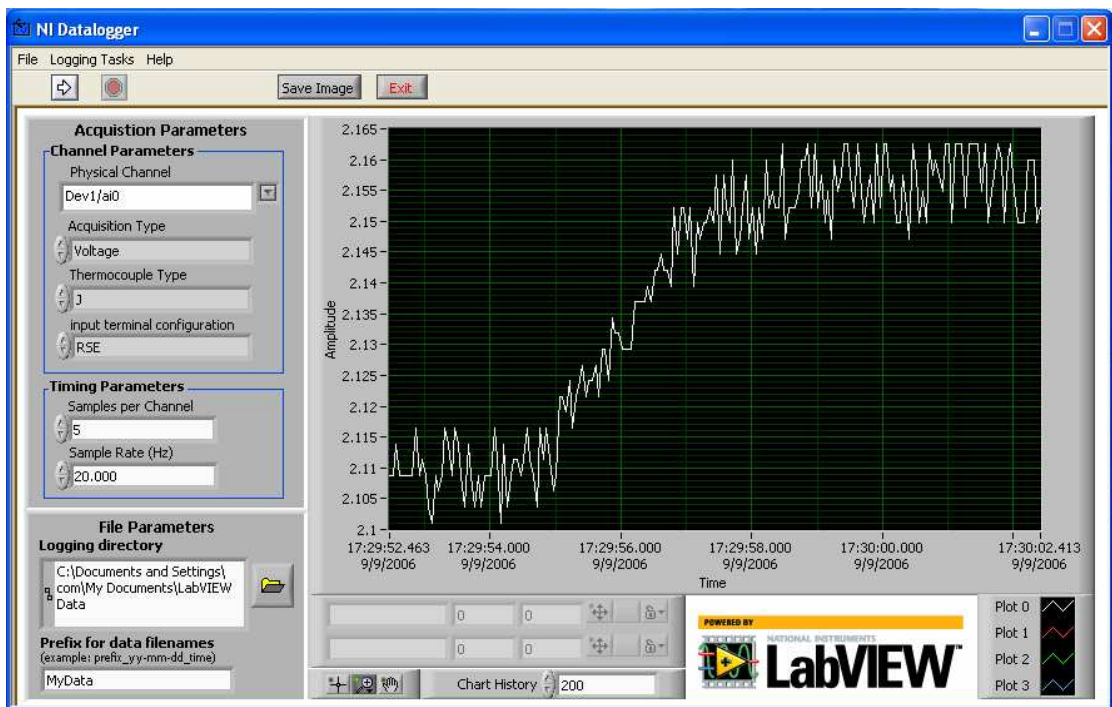
รูปที่ ง.2 การเชื่อมต่อต้นแบบเครื่องวัดความชื้นกับอุปกรณ์ NI USB 6009 เพื่อติดต่อกับโปรแกรม LabVIEW™



รูปที่ ๓.3 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW™ ในส่วนของ NI data logger



รูปที่ ๓.4 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW™ ในส่วนของ NI data logger เมื่อวัดสัญญาณ



รูปที่ ๓.5 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW™ ในส่วนของ NI data logger เมื่อวัดสัญญาณขณะความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับบริการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. "Capacitance simulation of interdigitated metallic towers for humidity sensing applications" Proceedings of the 27th Electrical Engineering Conference. pp.297-300, 11-12 November 2004.
2. "Novel Low-Cost Humidity Sensors Based on Moisture Sensitive Polyimide Adhesive Tape" Proceedings of the 2005 Electrical/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference. pp. 119-122, 12-13 May 2005.
3. "Application of RF Sputtered Polyimide Film in Capacitive Humidity Sensing" Proceedings of the 19th European conference on solid-state transducers (Eurosensors XIX). pp. WPb71, 11-14 September 2005.

ประวัติผู้เขียน

นายชิตพงษ์ เกตุถนอม เกิดเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2522 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2544 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับบริษัท โทโยนาคา (ประเทศไทย) จำกัด หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2546 จึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาระดับปริญญาโท เคยสอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 และปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา 3 บทความ ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก จ มีความสนใจทางด้านระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม ตัวตรวจรู้คุณภาพ ตัวขับเร้าคุณภาพ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการนำไปประยุกต์ใช้งาน