

การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิโพรพิลีนโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความจุไฟฟ้า

Polypropylene Plastic Film Thickness Measurement Using a Capacitive Sensor

ธัญญสิริ คุณโย ดวงภัทร เดชกิจสุนทร สรณีย์ จันทสาร สมณิดา ภทรนันท์ และ จักรชัย เนตรพิศาลวนิช *

Thanyasiri Kunyo Duangpat Detkitsunthorn Sornvanee Jantasan Somnida Bhatranand and Chatchai Neatpisarnvanit *

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Salaya Campus, Thailand

*Corresponding Author E-mail: Chatchai.nea@mahidol.ac.th

Received: 6/09/25, Revised: 22/09/25, Accepted: 30/09/25

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์วัดความหนาของแผ่นฟิล์มบางสำหรับวัดความหนาแผ่นฟิล์มพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ก่อนขั้นตอนการซีลปิดถุงของการผลิตถุงพลาสติก รอยรั่วในถุงพลาสติกเป็นข้อบกพร่องทั่วไปที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีรอยซีลที่ไม่สม่ำเสมอและมักจะเป็นผลจากความหนาของแผ่นพลาสติกที่จะนำมาซีลประกอบเป็นถุงมีมากกว่า 100 ไมครอนขึ้นไป ทำให้รอยซีลของถุงไม่สมบูรณ์และเกิดการรั่วไหลของถุง บทความนี้เสนอให้ใช้เซ็นเซอร์วัดความจุไฟฟ้าและวงจรรวม AD7745 ในการตรวจวัดความหนาของแผ่นพลาสติก PP แบบไม่สัมผัสและสามารถตรวจสอบความหนาในช่วงขั้นตอนการผลิต จากการทดสอบเครื่องวัดต้นแบบด้วยการวัดความหนาแผ่นพลาสติก PP จำนวน 4 ระดับความหนา คือ 70, 80, 90, และ 100 ไมครอน โดยแผ่นพลาสติกตัวอย่าง 20 ตัวอย่างในแต่ละระดับความหนา พบว่าเครื่องวัดต้นแบบสามารถแยกแยะแผ่นพลาสติกหนา >90 ไมครอน ออกจากแผ่นพลาสติกที่ไม่หนา 80-90 ไมครอน โดยมีผิดพลาดน้อยกว่า 5% และแสดงความแปรผันแบบเป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ (ตัวแปรตาม) และความหนาของแผ่นพลาสติก (ตัวแปรอิสระ) โดยมีค่า R^2 ประมาณ 0.9 ตลอดย่านการวัดจาก 70 ถึง 100 ไมครอน

คำสำคัญ: ถุงพลาสติกพอลิโพรพิลีน เซ็นเซอร์วัดความจุไฟฟ้า วงจรรวม AD7745

Abstract

This article presents the development of a thin-film thickness measurement device for assessing the thickness of polypropylene plastic film prior to the sealing stage in plastic bag manufacturing. Leakage defects in plastic bags are commonly attributed to uneven sealing, often resulting from films with thicknesses exceeding 100 microns. To address this issue, a non-contact capacitive sensing system based on the AD7745 IC is proposed for measuring plastic film thickness during the manufacturing process. Experimental tests were

conducted using 20 samples each of film thicknesses 70, 80, 90, and 100 microns. The results show that the proposed system can effectively differentiate overly thick films (>90 microns) from those of acceptable thickness (80-90 microns), with an error margin of approximately 5%. A linear regression analysis between the measured capacitance (dependent variable) and the film thickness (independent variable) yielded an R^2 value of around 0.9 within the measurement range of 70 to 100 microns.

Keywords: Polypropylene plastic bags, Capacitive sensor, AD7745 IC

1. บทนำ

บริษัทฐานธนาทรัพย์จำกัดดำเนินการผลิตถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหารผลิตจากแผ่นฟิล์มพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) โดยในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกจะถูกหลอมและขึ้นรูปเป็นถุงทรงกระบอกด้วยเครื่องเป่าจากนั้นจะทำการรีดให้ติดกันด้วยความร้อนเพื่อเชื่อมแผ่นฟิล์มพลาสติกเข้าด้วยกัน ในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปถุงอาจทำให้ความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกในบางจุดไม่สม่ำเสมอ เป็นสาเหตุเกิดการรั่วซึมเมื่อใช้งาน บริษัทต้องการลดความเสียหายจากการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพของสินค้าและเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค โดยในปัจจุบันกระบวนการตรวจสอบการรั่วของถุงพลาสติกยังคงใช้วิธีการเป่า (ใช้ปากของผู้ตรวจ) ด้วยแรงงานมนุษย์ โดยปกติเมื่อตรวจพบการรั่วซึมซึ่งมักเกิดจากความหนาของถุงที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานจะต้องกำจัดถุงทั้งหมดในกระบวนการผลิตรอบนั้น เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบถุงทุกใบได้ ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านต้นทุนและของเสียจากกระบวนการผลิต ถ้าสามารถตรวจวัดความหนาของแผ่นฟิล์มก่อนกระบวนการซีลปิดถุง จะเพิ่มโอกาสในการหยุดกระบวนการผลิตในกรณีที่ความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกไม่อยู่ในเกณฑ์และลดความสูญเสียในระหว่างการผลิตได้



รูปที่ 1 ตัวอย่างถุงพลาสติกพอลิโพรพิลีนขนาด 6x9 นิ้ว

การออกแบบและสร้างเครื่องแบบเครื่องวัดความหนาถุงพลาสติก ในระหว่างกระบวนการผลิตจึงมีความสำคัญ โดยเครื่องวัดสามารถวัดความหนาของถุงพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนขนาด 6x9 นิ้วดังแสดงในรูปที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ใช้เทคโนโลยีการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถวัดความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกในระดับไมครอนและสามารถแยกแยะความหนาระหว่างแผ่นฟิล์มที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่สามารถนำไปรีดสร้างถุงที่ไม่รั่วไหล และแผ่นฟิล์มที่มีความหนาเกินมาตรฐานได้โดยไม่สัมผัสกับแผ่นฟิล์มพลาสติกในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้สามารถหยุดกระบวนการผลิตได้รวดเร็วว่าการไปตรวจพบได้หลังกระบวนการรีดถุงเสร็จสิ้นแล้ว ทำให้สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกจากกระบวนการผลิตรวมถึงช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิโพรพิลีนพลาสติก

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene หรือ PP) เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งมีคุณสมบัติที่คือทนทาน น้ำหนักเบา ทนทานต่อการฉีกขาดและความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลวที่ 160-180 องศาเซลเซียส) [1] เป็นสารเคมีแบบโพร่งใส (เมื่อบาง) และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ปัจจุบันนิยมนำมาแปรรูปได้หลากหลายตามประเภทการใช้งานเช่น ถุงพลาสติกหรือถุงร้อนที่คนไทยรู้จักกันทั่วไป โดยผลิตได้จากการนำเม็ดพอลิโพรพิลีนมาหลอมละลายแล้วฉีดเป่าขึ้นรูปให้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์ทั้งแบบถุงร้อนหรือถุงเย็น

2.2 การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติก

ความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกสามารถวัดได้ด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่นการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง วิธีนี้จะใช้หลักการของคลื่นเสียง Ultrasound ที่มีความถี่สูงกว่าความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยิน (>20 kHz) และเนื่องจากมีความยาวคลื่นที่สั้นทำให้คลื่นสามารถสะท้อนออกจากพื้นผิวที่มีขนาดเล็ก โดยอาศัยหลักการที่คลื่น Ultrasound ที่ถูกส่งจากเครื่องวัดเดินทางผ่านวัสดุที่ต้องการวัดความหนาและสะท้อนกลับเมื่อทราบความเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุและเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปและกลับ ก็จะสามารรถคำนวณความหนาของวัสดุดังสมการที่ (1)

$$T = \frac{vT_s}{2} \quad (1)$$

โดย T คือความหนาของวัสดุ (เมตร), v คือความเร็วของเสียงภายในวัสดุ (เมตรต่อวินาที) และ T_s คือเวลาที่คลื่นเสียงใช้ในการเดินทางไป-กลับในวัสดุ (วินาที) อย่างไรก็ตามวิธีการวัดนี้มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดความหนาได้ต่ำกว่า 150-200 มิลลิเมตร [2]

การวัดความหนาด้วยการวัดความจุไฟฟ้า (Capacitive sensing) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า [3] เนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด หรือพื้นที่ของแผ่นอิเล็กโทรด หรือคุณสมบัติความยอมให้สนามไฟฟ้า (ϵ permittivity, ฟารัด/เมตร) ผ่านวัสดุที่อยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดเป็นต้น โดยสามารถนำหลักการนี้มาใช้ในการตรวจสอบความหนาของวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าเช่นแผ่นฟิล์มพลาสติกหรือกระดาษเป็นต้น การวัดความหนาด้วยวิธีนี้มีความแม่นยำสูง เช่นเซอร์แบบตัวเก็บประจุร่วมระบบแบบแผ่นคู่ มีโครงสร้างอย่างง่ายที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดทำจากโลหะจำนวน 2 ชั้นและถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยความจุไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดจะมีค่าแปรตามความหนาของวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 2

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{D} \quad (2)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้า (ฟารัด), ϵ_0 คือค่าความยอมได้สนามไฟฟ้าในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} ฟารัด/เมตร), ϵ_r คือค่าความยอมได้สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุที่อยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด, A คือพื้นที่ของแผ่นอิเล็กโทรด (ตารางเมตร) และ D คือระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด (เมตร) เมื่อนำเทคนิคนี้ไปใช้วัดความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกแบบไม่สัมผัส โดยมีช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มและแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองด้านดังแสดงในรูปที่ 2



$$\frac{1}{C_w} = \frac{1}{C_{d1}} + \frac{1}{C_{bag}} + \frac{1}{C_{d2}}$$

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ารวมที่วัดได้ C_w และความจุไฟฟ้าเนื่องจากแผ่นฟิล์มพลาสติก C_{bag} และช่องอากาศระหว่างอิเล็กโทรด C_{d1} และ C_{d2}

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ารวม C_w (วงจรรอนุกรมดังแสดงในรูปที่ 2) เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มพลาสติก C_{bag} ที่มีความหนาของแผ่นฟิล์มเท่ากับ d_{bag} (เมตร) มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ϵ_{bag}

และค่าความจุไฟฟ้าของระยะช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด d_1 และ d_2 (เมตร) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_0 ดังแสดงในสมการที่ (3) [4]

$$\frac{1}{C_w} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \left(d_1 + d_2 + \frac{d_{bag}}{\epsilon_{bag}} \right) \quad (3)$$

จากความสัมพันธ์นี้จะพบว่าถ้าค่าความยอมได้สนามไฟฟ้าของทั้งอากาศและแผ่นฟิล์มพลาสติกมีค่าคงที่ ค่าความจุไฟฟ้ารวม C_w จะมีค่าเพิ่มขึ้น (แปรผกผันตรง) เมื่อแผ่นฟิล์มพลาสติกมีความหนา d_{bag} เพิ่มขึ้น (d_1 และ d_2 มีค่าลดลง) โดยอัตราการเพิ่มค่าของ C_w ต่อการเพิ่มค่าของความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติก d_{bag} (ความไวระหว่าง C_w และ d_{bag}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และสมมติให้ความจุไฟฟ้าเนื่องจากช่องอากาศ d_1 และ d_2 มีค่าคงที่เท่ากับ $C_{gap} = \epsilon_0 A / 0.5(D - d_{bag})$

$$\frac{\partial C_w}{\partial d_{bag}} = \frac{\frac{\epsilon_0 A}{(D - d_{bag})} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{bag} A}{d_{bag}}}{\frac{\epsilon_0 A}{(D - d_{bag})} + 2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_{bag} A}{d_{bag}}} \quad (4)$$

เมื่อกำหนดค่าความยอมได้สนามไฟฟ้าของสุญญากาศและค่าความยอมได้สนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ของฟิล์มพลาสติกพอลิโพรพิลีน และกำหนดให้พื้นที่หน้าตัด $A = 1.5 \times 10^{-3}$ ตารางเมตร ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด $D = 1.0 \times 10^{-3}$ เมตร จะพบว่าสามารถเขียนสมการที่ (4) ได้เป็น

$$\frac{\partial C_w}{\partial d_{bag}} = \frac{6.99 \times 10^{-42}}{(1.73 \times 10^{-14} \cdot d_{bag} - 3.05 \times 10^{-16})^2} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จะพบว่าค่าความไวระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้และความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกมีค่าเพิ่มจาก 7.51×10^{-11} ถึง 7.58×10^{-11} ฟารัดต่อเมตร เมื่อค่าความหนาแผ่นฟิล์มพลาสติกมีค่าเพิ่มจาก $d_{bag} = 0$ ถึง 100 ไมครอน ซึ่งอาจประมาณได้ว่าค่าความไวนี้มีค่าคงที่ในช่วงการวัด

2.3 วงจรวัดความจุไฟฟ้าโดยใช้วงจรรวม AD7745

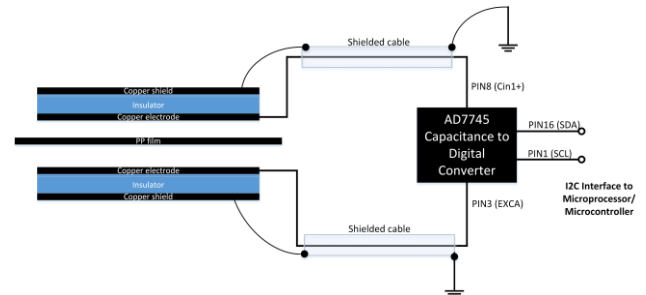
AD7745 เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบความละเอียดสูง 24 บิต ชนิด $\Sigma-\Delta$ (ซิกมา-เดลต้า) ที่พัฒนาโดยบริษัท Analog Devices ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อวัดความจุไฟฟ้าอย่างแม่นยำ และมีความละเอียดสูงสำหรับเซ็นเซอร์เช่น เซ็นเซอร์ความดัน เซ็นเซอร์ความชื้น พร็อกซิมีตี้เซ็นเซอร์ และเซ็นเซอร์วัดความหนาของวัสดุ

วงจรรวมนี้มีอินพุตสัญญาณแบบช่องเดียว โดยสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าในช่วง 4-17 พิโกฟารัด ด้วยความละเอียดในระดับเฟมโตฟารัด (fF) [5] จึงเหมาะสำหรับการตรวจจบการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กมากของความจุไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีความสามารถปรับค่าออฟเซตและอัตราขยายสัญญาณของค่าความจุได้ และมีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิภายในที่มีความแม่นยำ $\pm 1^\circ\text{C}$ เพื่อชดเชยผลเนื่องจากอุณหภูมิภายนอก

คุณสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของวงจรรวม AD7745 คือมีความเป็นเชิงเส้นและเสถียรภาพที่สูงมาก ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวัดที่แม่นยำ

ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม นอกจากนั้นวงจรรวมนี้ยังรองรับการเชื่อมต่อแบบใช้สายสัญญาณสองเส้น หรือ PC ของบริษัท Philips Semiconductors ที่สามารถใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบฝังตัวได้อย่างง่ายดาย

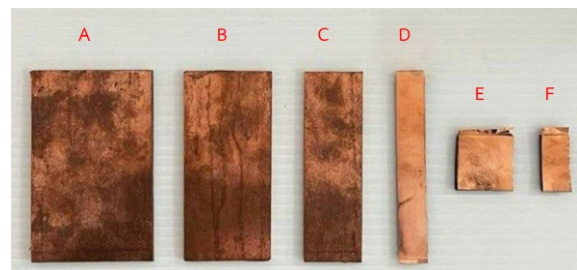
คุณลักษณะเพิ่มเติมได้แก่ระบบปรับเทียบอัตโนมัติ การรองรับการวัดแบบ Differential และแบบ Single-end และมีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายใน รูปที่ 3 แสดงวงจรการวัดความหนาแผ่นฟิล์มพลาสติกอย่างง่าย ข้อควรระวังคือจะต้องมีการกำบังสัญญาณ (Shielding) บริเวณอิเล็กโทรดเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่จะทำการวัดมีค่าน้อยมากในระดับพิโกฟารัดหรือนาโนฟารัด



รูปที่ 3 วงจรการวัดความหนาแผ่นฟิล์มพลาสติกโดยใช้ AD7745

2.4 แผ่นอิเล็กโทรด

ขนาดของแผ่นอิเล็กโทรดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพของการวัดค่าความจุไฟฟ้าและส่งผลต่อการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติก แผ่นอิเล็กโทรดหลายขนาดดังแสดงในรูปที่ 4 ถูกใช้ เพื่อกำหนดเลือกแผ่นอิเล็กโทรดที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ โดยที่ A, B, C, D, E, F คือขนาด 6x10 cm, 4.5x10 cm, 3x10 cm, 1.5x10 cm, 3x3 cm และ 1.5x3 cm ตามลำดับ จากผลการทดลองแผ่นอิเล็กโทรดขนาด (D) 1.5x10 cm ให้ผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างแผ่นฟิล์มที่อยู่ในมาตรฐานและแผ่นฟิล์มที่หนาเกินมาตรฐาน และยังสามารถครอบคลุมบริเวณที่มักเกิดการรั่วของถุงพลาสติกขนาด 6x9 นิ้วเมื่อทำการชิลปิดแล้ว



รูปที่ 4 แผ่นอิเล็กโทรดขนาดต่าง ๆ

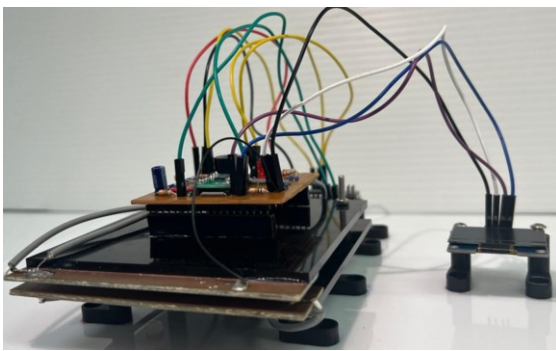
ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอิเล็กโทรด จะมีความแปรปรวนของค่าที่วัดได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนจึงได้แก้ปัญหาโดยใช้การกำบังสัญญาณ เพื่อลดผลกระทบของความจุไฟฟ้าระหว่างสายสัญญาณและกราวด์ โดยใช้แผ่นทองแดงแบบสองหน้า (Double-layer copper clad board) และเชื่อมต่อด้านนอกของแผ่นทองแดงลง

กราวด์ผ่านสายสัญญาณแบบมีก้าง (Shielded cable) ดังแสดงในรูปที่ 3 ก่อนทำการทดลองแผ่นทองแดงจะถูกขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อทำความสะอาดและทำให้ผิวหน้าของอิเล็กโทรดเรียบ ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดถูกเลือกให้มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร อาจสามารถกำหนดให้ระยะห่างมีค่าให้น้อยกว่านี้ได้เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าความจุไฟฟ้า แต่ระยะห่างนี้ถูกเลือกเพื่อความสะดวกในการทดลอง

3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดลอง

การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเส้นสอบเทียบระหว่างค่าความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิโพรพิลีนแบบมาตรฐานที่วัดโดยใช้ Dial Thickness Gauge ยี่ห้อ TECLOCK SM-114 เปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดโดยใช้เครื่องวัดต้นแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5 การติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรด วงจรวัดและแสดงผลการวัด

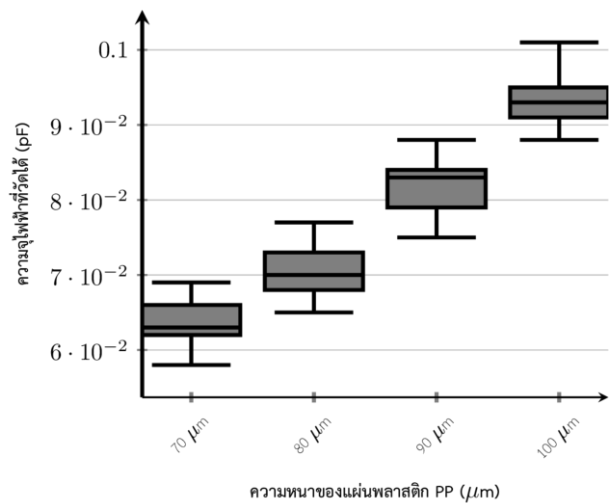
โดยจะทำการวัดแยกแผ่นฟิล์มพลาสติก PP ตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่มความหนา (70, 80, 90, 100 ไมครอน) กลุ่มละ 20 แผ่นฟิล์มโดยใช้ TECLOCK SM-114 Dial Thickness Gauge ที่มีรายละเอียดการวัด (Resolution) 0.01 มิลลิเมตรหรือ 10 ไมครอน จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละแผ่นฟิล์มตัวอย่างในแต่ละกลุ่มความหนา โดยการสอดแผ่นฟิล์มเข้าไปในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้แผ่นฟิล์มพลาสติกอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดพอดี อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลที่ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากแผ่นฟิล์มพลาสติกที่มีความหนาไม่เกิน 100 ไมครอนและมีค่า relative permittivity ประมาณ 2.2-2.4 (Polypropylene) มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าในช่องว่างอากาศประมาณ 100 เท่า (คิดที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 cm) ทำให้ตำแหน่งการวางแผ่นพลาสติกระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดมีผลน้อยต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้า

3.2 ผลการทดลอง

เมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาสร้างแผนภาพแบบ Boxplot ของแต่ละกลุ่มความหนาดังแสดงในรูปที่ 6 โดยที่ขีดบนและล่างของ Boxplot จะแสดงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดที่วัดได้ในแต่ละกลุ่มความหนา กล่อง (Box) แสดงย่าน ค่า Interquartile ระหว่าง Q1 และ Q3 (ค่าย่านความจุไฟฟ้าที่มีข้อมูลจำนวน 50% ของข้อมูลทั้งหมดในกลุ่ม

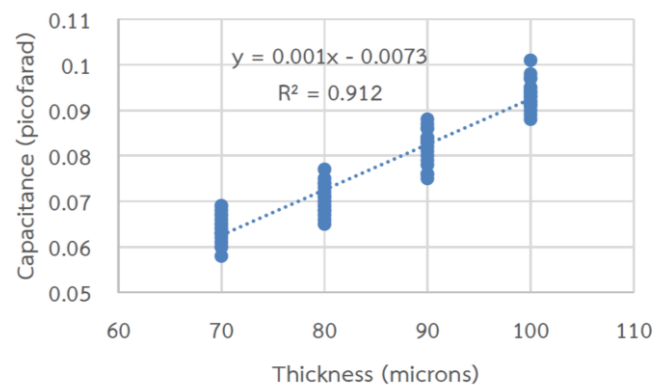
ความหนาอยู่ภายในย่านนี้) ซีดกลางในกล่องแสดงถึง Q2 หรือค่ากลาง Median ของกลุ่มข้อมูลความหนา

การกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลสามารถประมาณได้จากค่า Interquartile range (IQR) หรือ Q3-Q1 จากผลการทดลองกลุ่มข้อมูลความหนา 80 ไมครอน มีค่า IQR ของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.0055 pF (มีการกระจายตัวมากที่สุด) ในขณะที่กลุ่มข้อมูลความหนา 100 ไมครอนมีค่า IQR ของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0037 pF (การกระจายตัวน้อยสุด) จากแนวโน้มของผลการทดลองประมาณว่าการกระจายตัวของข้อมูลมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อทำการวัดแผ่นฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 Boxplot ของการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่แต่ละความหนาแผ่นฟิล์ม

รูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจากข้อมูลผลการทดลอง โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (y, pF) และความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติก (x, μm) เป็น $y = 0.001x - 0.0073$ โดยมีค่า $R^2 = 0.912$ นอกจากนั้นยังพบว่าความไวระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้และค่าความหนาของแผ่นพลาสติกมีค่าเท่ากับ 0.001 พิโกฟารัดต่อไมครอนหรือ 1×10^{-9} ฟารัดต่อเมตร



รูปที่ 7 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นหรือเส้นสอบเทียบระหว่างความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติกและค่าความจุไฟฟ้า

4. อภิปรายผลการทดลอง

จาก Boxplot ในรูปที่ 6 จะพบว่าความหนาแน่นของข้อมูล (50%) หรือค่า IQR (Q3-Q1) ของการวัดค่าความจุไฟฟ้าในแต่ละกลุ่มความหนาของแผ่นฟิล์มมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5 nF หรือคิดเป็นความเที่ยงตรง (Precision) ของการวัดความจุไฟฟ้า มีค่าประมาณ ± 2.5 nF จากค่ามัธยฐาน (Median, Q2) นอกจากนั้นยังพบว่าย่านค่า IQR ของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ของแต่ละกลุ่มข้อมูลความหนาไม่มีการทับซ้อนกันแสดงถึงความสามารถในการแยกแยะความหนาของแผ่นฟิล์มระดับ 10 ไมครอน เมื่อพิจารณาค่าที่วัดได้ต่ำสุดในกลุ่มความหนา 100 ไมครอนและค่าที่วัดได้สูงสุดในกลุ่มความหนา 90 ไมครอน จะพบว่ามีการแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้เครื่องวัดที่นำเสนอมีความสามารถแยกแยะระหว่างแผ่นฟิล์มที่มีความหนาเกินเกณฑ์มาตรฐาน (100 ไมครอนหรือมากกว่า) ที่อาจก่อให้เกิดการรั่วไหลของถุงที่ผลิตจากแผ่นฟิล์มพลาสติก และแผ่นฟิล์มที่อยู่ในเกณฑ์ (90 ไมครอนหรือน้อยกว่า) ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าความผิดพลาดในการแยกแยะระหว่างความหนาที่ผ่านเกณฑ์และไม่ผ่านคือ 5%

จากรูปที่ 7 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ (ตัวแปรตาม) ด้วยความชื้นหรือความไวเท่ากับ 1×10^{-9} ฟารัดต่อเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับความไวที่คำนวณได้จากสมการที่ 5 หรือ 7.5×10^{-11} ฟารัดต่อเมตรกับความไวที่ได้จากผลจากการทดลอง พบว่ามีค่าน้อยกว่า 13.33 เท่า ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Capacitance gain (10 เท่า) ที่ถูกโปรแกรมไว้ในวงจรรวม AD7745 จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าการวัดความจุไฟฟ้าที่นำเสนอสามารถนำไปใช้เป็นตัวแทนของค่าความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติก PP (ตัวแปรอิสระ) ได้ด้วยความมั่นใจ $R^2=0.912$ หรือ 91.2%

5. สรุป

บทความนี้เสนอการพัฒนาเครื่องตรวจจับการรั่วไหลของถุงพลาสติก PP ผ่านการวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม PP โดยใช้เซ็นเซอร์วัดความจุไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์และวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล AD7745 จากผลการทดลองพบว่า เครื่องวัดความหนาสามารถแยกแยะระหว่างความหนาของแผ่นฟิล์มที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ที่จะไม่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของถุง) ออกจากแผ่นฟิล์มที่มีความหนาเกินเกณฑ์ (>90 ไมครอน) และแสดงความเป็นเชิงเส้นระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและค่าความหนาของแผ่นฟิล์มพลาสติก PP ตลอดย่าน 70-100 ไมครอนด้วยค่า $R^2=0.912$ หรือ 91.2%

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Zhang, M. Xu, M. Ren, H. Shi, G. Liu, J. Li, X. Liu, L. Zhang, and D. Gao, "Morphology of impact polypropylene copolymer extruded cast film revealed by confocal Raman imaging, *J. Soft Matter*, Issue 19, 2024.
- [2] Olympus Industrial Resources, "Measuring Thin Single-layer Material Using a High-Frequency Thickness Gauge and Transducer (Above 20 MHz)," Application Note Olympus, <https://www.olympus-ims.com/am/applications/measuring-thin-material-using-high-frequency/> (accessed September 19, 2022).
- [3] I. Ahmad, Zaheeruddin, and T. Islam, "A Capacitive Transducer for Film Thickness Measurement," *The Physics of Semiconductor Devices (IWPSW 2021)*, Springer Proceedings in Physics, vol. 306, 2024.
- [4] P. Shetty, R.J. Meijer, J.A. Osara, and P.M. Lugt, "Measuring Film Thickness in Starved Grease-Lubricated Ball Bearings: An Improved Electrical Capacitance Method," *Tribology Transactions*, vol. 65, Issue 5, 2022.
- [5] Analog Devices, "24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor," AD7745 datasheet, Rev. B, 2005.