

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัยเรื่อง การตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือกจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านด้วยสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ ใช้หลักทฤษฎีพื้นฐานในหลายด้าน ได้แก่ การออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก การออกแบบคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดความชื้นในข้าว ดังต่อไปนี้

#### การออกแบบสายอากาศ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านข้าวเปลือก ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่ต้องการ และมีลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปติดตั้งในระบบการวัด สายอากาศที่ใช้ในระบบการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนใช้สายไมโครสตริปแพทช์ และระบบการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านใช้สายอากาศสายอากาศโมโนโพล ซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดมีวิธีการออกแบบ ดังนี้

#### 1. สายอากาศไมโครสตริปแพทช์

สายอากาศไมโครสตริปแพทช์เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นตัวนำวางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) และอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองเป็นกราวด์ โครงสร้างของส่วนแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์มีหลายรูปแบบ รูปแบบที่ง่ายต่อการออกแบบและการสร้างที่สุดคือ ส่วนแพร่กระจายคลื่นรูปสี่เหลี่ยม การออกแบบต้องกำหนดสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการเบื้องต้นก่อน ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองและกำหนดความถี่ที่ใช้ทำงานของสายอากาศ ( $f_r$ ) เริ่มต้นการคำนวณขนาดของสายอากาศด้วยการหาค่าของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ดังสมการที่ (2.1) (Balanis, 2012)

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (2.1)$$

โดย  $c$  หมายถึงความเร็วคลื่นของแสงในสุญญากาศ การออกแบบสายอากาศต้องใช้ความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง ( $\lambda_g$ ) ที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงคำนวณความยาวคลื่นในฐานรองได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\epsilon_{eff}$  คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศและวัสดุฐานรอง สามารถหาค่าได้จากสมการ (2.3)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (2.3)$$

ขนาดของสายอากาศแพทช์ที่เหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นจะมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในวัสดุฐานรอง ตามสมการที่ (2.4)

$$\text{ขนาดของสายอากาศ} = \frac{\lambda_g}{2} \quad (2.4)$$

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการคำนวณหาระยะจุดป้อนสัญญาณจากสมการที่ (2.5)

$$\text{ระยะจุดป้อนสัญญาณ} = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.5)$$

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการคำนวณระยะพลังงานที่ถูกแพร่กระจาย (Fringing field) ของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ จากค่าคงที่ทางไฟฟ้าและระยะความสูงของวัสดุฐานรอง ดังสมการที่ (2.6) – (2.10)

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.6)$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \log \left[ \frac{\left(\frac{w}{h}\right)^2 + \left(\frac{1-w}{52h}\right)^2}{\left(\frac{w}{h}\right)^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \log \left[ 1 + \left(\frac{1-w}{18.1h}\right)^3 \right] \quad (2.7)$$

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

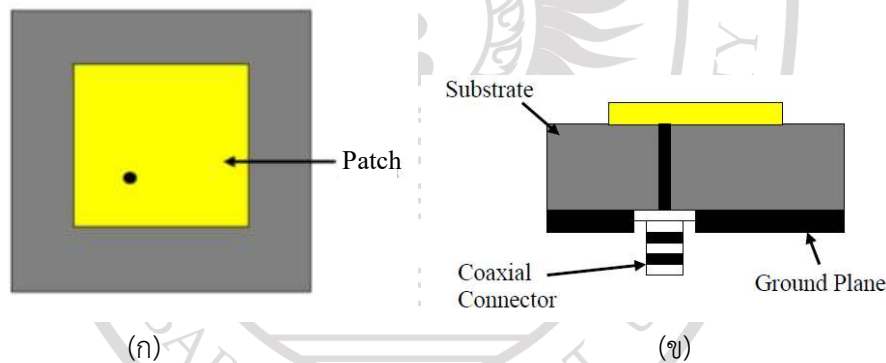
$$b = 0.564 \left( \frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 10 \frac{h}{w} \right)^{-ab} \quad (2.9)$$

$$\Delta d = 0.412h \left[ \frac{\epsilon_e + 0.300}{\epsilon_e - 0.258} \right] \left[ \frac{w/h + 0.262}{w/h + 0.813} \right] \quad (2.10)$$

จากข้อมูลทั้งหมดในการคำนวณข้างต้น ระยะความกว้าง ระยะความยาว ระยะจุดป้อนสัญญาณ และระยะพลังงานที่ถูกแพร่กระจายได้ ถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในออกแบบสายอากาศก่อนนำไปปรับแต่งและทดสอบสมรรถนะให้ได้ตามต้องการ

ส่วนป้อนสัญญาณ (Feed line) ให้กับไมโครสตริป ซึ่งส่วนนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีผลต่อการโพลาไรเซชัน (Polarization) ของสายอากาศและการแมทชิ่ง (Matching) ไมโครสตริปที่ป้อนกลับแบบโพรบ (Probe feed) วิธีนี้จะใช้สายนำสัญญาณซึ่งมีใช้กันทุกๆ ไปคือ สายแกนคู่ (Coaxial) เข้าไปต่อร่วมกับฐานของสายอากาศตามรูป ซึ่งการที่จะต่อให้สายนำสัญญาณกับแผ่นตัวนำ (Patch) อยู่ในมุมที่ตั้ง 90 องศา ซึ่งการต่อกับระนาบกราวด์ (Ground plane) เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสำหรับการป้อนสัญญาณลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารตัวกลาง เนื่องจากกรณีที่สารตัวกลางหนามากจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกมาในปริมาณมาก และจะมีการแพร่กระจายน้อยในสารตัวกลางที่มีความหนาของชั้นสารตัวกลางน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะการป้อนสัญญาณแบบโพรบของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์รูปสี่เหลี่ยม

(ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง

ที่มา: Kumar et al., 2016

ข้อดีของการป้อนสัญญาณในลักษณะนี้คือ สามารถต่อสายนำสัญญาณของสายอากาศกับสายนำสัญญาณรูปแบบอื่นได้ง่าย แต่การป้อนสัญญาณลักษณะนี้จะทำให้เกิดรูบนแผ่นตัวนำและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการโพลาไรเซชัน และการแพร่กระจายของสัญญาณ

## 2. สายอากาศโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็กเพียง 1 ใน 4 ของความยาวคลื่นในวัสดุฐานรองที่ใช้งาน การออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดแพทช์ เริ่มจากการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการ ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (Dielectric substrate) ที่นำมาใช้

สร้างสายอากาศ กำหนดความถี่ที่ใช้งาน ( $f_r$ ) และกำหนดความหนาของตัวนำที่นำมาใช้สร้างเป็นแพทช์และระนาบกราวด์ สามารถออกแบบความกว้าง ( $W$ ) ของส่วนแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ได้ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) (Balanis, 2012)

$$W = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.11)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.12)$$

### คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ข้าวเปลือกที่มีระดับความชื้นไม่เท่ากันหมายถึงมีองค์ประกอบของน้ำในเมล็ดข้าวเปลือกไม่เท่ากัน ส่งผลให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวเปลือกเปลี่ยนไป คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่สัมพันธ์การสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นหลักการของการตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากข้าวเปลือก ซึ่งมีค่าแตกต่างกันที่ความชื้นข้าวเปลือกแต่ละระดับ

คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric property) เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีอยู่ในวัสดุ ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป จึงสามารถนำคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมาใช้จำแนกวัสดุได้ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกถูกนำมาประยุกต์ใช้ในส่วนกระบวนการใช้ไมโครเวฟเพื่ออุตสาหกรรม เช่น อาหาร ผัก ผลไม้ ยาง ไม้ พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น และยังมีประโยชน์สำหรับนักพัฒนาบรรจุภัณฑ์ในการปรับปรุงสารประกอบแม่เหล็ก (Ferrite) หรือตัวดูดซับคลื่น (Absorber) คุณสมบัติไดอิเล็กตริกแปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงตัวของประจุ ส่วนผสม ความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ ดังนั้นการนำคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องผ่านการวัดที่มีความแม่นยำ (Hippel, A, von. 1954)

คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ประกอบด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity) และความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อน คือ  $\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r''$  ซึ่ง  $\epsilon_r'$  คือ ส่วนจริงหรือเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ที่เป็นค่าแสดงถึงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานของสนามไฟฟ้าของวัสดุ ส่วนของจินตภาพ ( $\epsilon_r''$ ) คือตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เป็นค่าที่แสดงถึงการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของความร้อนของวัสดุ

สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาส่งผลให้เวกเตอร์โพลาริเซชัน คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและความนำเปลี่ยนไปตามธรรมชาติของสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ ส่งผลให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกแตกต่างกันตามฟังก์ชันของความถี่ในสมการของเดอบาย (Debye equation) ผลของความถี่ที่มีต่อวัสดุสามารถจำลองด้วยวงจรสมมูลสปริงโดยรวมสัมประสิทธิ์การหน่วงและเรโซแนนซ์เข้าไปด้วยสำหรับโพลาริเซชันไดโอดิกเรโซแนนซ์ มีแนวโน้มเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำเนื่องจากมวลที่หนักขึ้นของ

ไอออน แต่ผลกระทบของความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงโพลาริซแบบคาบตามเวกเตอร์โพลาริเซชัน เนื่องจากนิวเคลียสหนักกว่าอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสเรโซแนนซ์ตรงมายังนิวเคลียส ดังนั้นสำหรับสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุจะไม่เพียงเก็บพลังงานแต่ยังดูดซับพลังงาน การดูดซับพลังงานเป็นผลมาจากความนำของวัสดุ โดยความนำเกิดจากการหมุนของเวกเตอร์โพลาริเซชันในสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุภายใต้สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังสมการ (2.13)

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j\left(\frac{\sigma e}{\omega}\right) \quad (2.13)$$

โดย  $\epsilon$  เป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของวัสดุ  $\epsilon'$  เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้า บอกถึงความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงาน  $\epsilon''$  บอกถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงาน  $\sigma_e$  เป็นความนำสมมูล และ  $\omega$  เป็นความถี่เชิงมุม คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่สัมพันธ์กับสูญญากาศแสดงดังสมการ (2.14)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (2.14)$$

โดยเทอมแทนเจนต์การสูญเสีย  $\tan \delta$  เป็นอัตราส่วนของค่าตัวประกอบสูญเสียต่อค่าสภาพยอมไฟฟ้า วัสดุที่มีค่าแทนเจนต์การสูญเสียเท่ากับศูนย์เป็นวัสดุที่ปราศจากการสูญเสีย ขณะที่  $\tan \delta \ll 1$  แสดงถึงวัสดุที่มีการสูญเสียน้อย และวัสดุที่มีค่า  $\tan \delta \gg 1$  หมายถึงวัสดุที่มีการสูญเสียมมาก การหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้มีการคิดค้นและพัฒนาวิธีการอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานาน เพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการ แต่ละเทคนิคขึ้นอยู่กับธรรมชาติของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการวัด ทั้งทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้า ความถี่ที่สนใจ และระดับของความแม่นยำที่ต้องการ

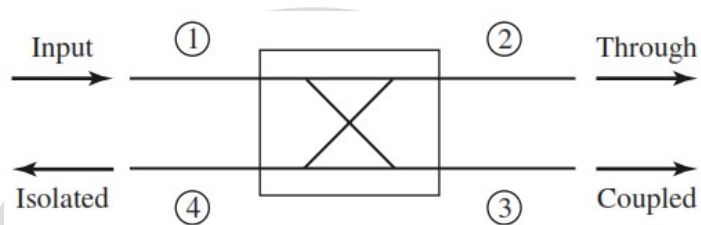
### คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง

คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง (Directional coupler) เป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ส่งเคราะห์ความถี่และสายอากาศไมโครสตริปซ์ ทำหน้าที่รับคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากขั้วเปลือก ซึ่งกำลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากขั้วเปลือกคือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

คัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง เป็นวงจรไฟฟ้าชนิด 4 พอร์ตในระบบไมโครเวฟ สำหรับแบ่งกำลังงาน การทำงานของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางอาศัยหลักการว่า เมื่อสายส่งสัญญาณ 2 เส้น วางอยู่ใกล้กันมากจะเกิดการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสายส่งเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คัปเปิลอร์แบบมีทิศทางเป็นพาสซีฟที่ใช้สำหรับแยกหรือรวมสัญญาณความถี่วิทยุ ประกอบด้วย 4 พอร์ต ได้แก่ พอร์ต

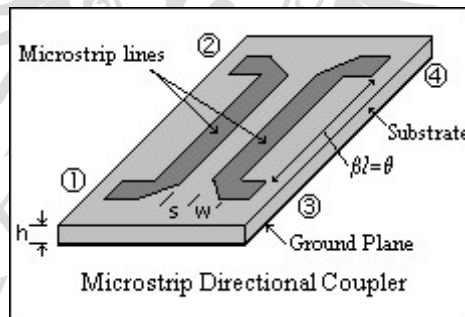


1 อินพุต (Input port) พอร์ต 2 เอ้าท์พุต (Through port/Output port) พอร์ต 3 คัปเปิลอร์ (Coupled port) และพอร์ต 4 ไอโซเลท (Isolated port) คัปเปิลอร์แบบมีทิศทางมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการดึงตัวอย่างสัญญาณส่งผ่านและสัญญาณสะท้อนในวงจรความถี่ไมโครเวฟ ลักษณะการไหลของกำลังงานในคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางแสดงดังภาพที่ 2.2



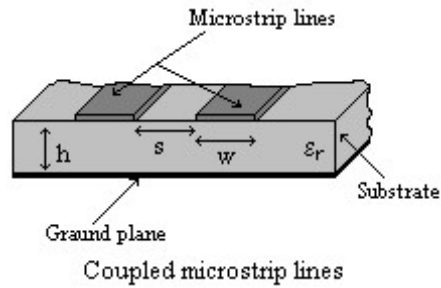
ภาพที่ 2.2 ลักษณะการไหลของกำลังงานในคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง  
ที่มา: Pozar, 2012

คัปเปิลอร์แบบมีทิศทางตอนเดียวที่สร้างมาจากสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Single section microstrip directional coupler) เป็นรูปแบบหนึ่งของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางซึ่งสร้างมาจากสายส่งแบบไมโครสตริปโครงสร้างของคัปเปิลอร์ชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 คัปเปิลอร์แบบมีทิศทางตอนเดียวที่สร้างจากไมโครสตริป  
ที่มา: Tekin, 2005

การออกแบบคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางจะใช้พารามิเตอร์เพื่อคำนวณขนาด ได้แก่  $w/h$ ,  $s/h$ ,  $\epsilon_r$  และ  $\epsilon_{eff}$  ตำแหน่งของพารามิเตอร์เหล่านี้แสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งเป็นภาคตัดขวางของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง และค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{oo}$ ,  $Z_{oe}$  และ  $Z_o$  ของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางชนิดโหมดคู่และโหมดคี่



ภาพที่ 2.4 ภาพตัดขวางของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทางตอนเดียวที่สร้างจากไมโครสตริป  
ที่มา: Tekin, 2005

ในการออกแบบสายส่งทั้งสองเส้นของคัปเปิลอร์แบบมีทิศทาง เมื่อหาค่า  $Z_{oo}$  และ  $Z_{oe}$  แล้ว นำค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง  $Z_o$  และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง  $\epsilon_r$ , ค่าการคัปปลิงของสายส่ง  $C$  เพื่อคำนวณหา อัตราส่วนของขนาดสายส่งไมโครสตริป ขั้นตอนต่อมาคือหาค่าอัตราส่วนของขนาดสายส่ง  $w/h$  และอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างสายส่ง  $s/h$  เพื่อออกแบบไมโครสตริป โดยค่า  $Z_{oo}$  และ  $Z_{oe}$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.15) – (2.17)

$$C = 10^{-C/20} \text{ dB} \quad (2.15)$$

โหมดคู่

$$Z_{oe} = Z_o \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (2.16)$$

โหมดคี่

$$Z_{oo} = Z_o \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (2.17)$$

เมื่อพิจารณาที่สายส่งเส้นเดียว

$$Z_{ose} = \frac{Z_{oe}}{2} \quad (2.18)$$

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

$$Z_{oso} = \frac{Z_{oo}}{2} \quad (2.19)$$

คำนวณหาค่าอัตราส่วนของขนาดสายส่งไมโครสตริป ได้ดังสมการที่ (2.20) – (2.22)

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}; w/h < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r}) \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]; w/h > 2 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$A = \frac{Z_o}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (2.21)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_o\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.22)$$

จากนั้นคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างไมโครสตริปได้จากสมการที่ (2.23) – (2.28)

$$\frac{s}{h} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh \{ (\pi/2)(w/h)_{se} \} + \cosh \{ (\pi/2)(w/h)_{so} \} - 2}{\cosh \{ (\pi/2)(w/h)_{so} \} - \cosh \{ (\pi/2)(w/h)_{se} \}} \right] \quad (2.23)$$

$$\left( \frac{w}{h} \right)_{se} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{2d - g + 1}{g + 1} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\epsilon_r \leq 6$

$$\left( \frac{w}{h} \right)_{so} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{2d - g - 1}{g - 1} \right) + \frac{4}{\pi(1 + \epsilon_r/2)} \cosh^{-1} \left( 1 + 2 \frac{w/h}{s/h} \right) \quad (2.25)$$

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี  
เมื่อ  $\epsilon_r \geq 6$

$$\left( \frac{w}{h} \right)_{so} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{2d - g - 1}{g - 1} \right) + \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} \left( 1 + 2 \frac{w/h}{s/h} \right) \quad (2.26)$$

$$g = \cosh \left( \frac{\pi s}{2h} \right) \quad (2.27)$$



$$d = \cosh\left(\pi \frac{w}{h} + \frac{\pi s}{2h}\right) \quad (2.28)$$

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การตรวจวัดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกหรือเมล็ดพันธุ์ชนิดอื่น เป็นที่ให้ความสนใจอย่างกว้าง ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ศึกษาถึงการวัดความชื้นไว้หลากหลายเทคนิค ดังนี้

ปี 2005 ไรและคณะได้สร้างเครื่องวัดความชื้นของธัญพืชโดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีผลมาจากความชื้นของเมล็ดธัญพืชที่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความจุประจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง รวมถึงไรและคณะยังได้ทำการทดสอบกับเมล็ดข้าวสาลี ข้าวเปลือก ถั่วเหลือง เมล็ดทานตะวันและเมล็ดมัสตาร์ด การวัดด้วยเทคนิคนี้ สามารถวัดความชื้นได้ในช่วง 5-25 % มีความแม่นยำอยู่ที่  $\pm 1\%$  (Rai et al., 2005) วิธีการนี้ต้องใส่ตัวอย่างข้าวเปลือกให้อยู่ในลักษณะที่เหมาะสมจึงสามารถวัดได้แม่นยำ และวัดได้ในปริมาณที่จำกัดจึงเป็นตัวแทนของข้าวเปลือกได้ไม่ครอบคลุม

ปี 2007 คันดาลาและคณะได้นำเสนอวิธีการหาค่าความชื้นของธัญพืชโดยใช้การวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) และมุมเฟสของระบบแผ่นขนาน (Parallel plates) แม้ว่าวิธีการนี้สามารถวัดความชื้นได้อย่างแม่นยำ แต่เนื่องจากเป็นระบบปิดทำให้เป็นข้อจำกัดของการเฝ้าตรวจแบบไม่รบกวนการใช้งาน (On-line monitoring) (Kandala et al., 2007)

ปี 2008 สุรพันธ์ ทองรังสี นักวิจัยของทีเมคได้พัฒนาหัววัดความชื้นในไซโลอบข้าว (ตู้อบข้าว) สำหรับวัดความชื้นในข้าวเปลือกแล้วบ่งบอกเป็นสัญญาณความถี่ดิจิทัล ซึ่งหากมีความถี่ต่ำแสดงว่ามีความชื้นมาก หากความถี่สูงแสดงว่าความชื้นน้อย และสามารถใช้เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกในขณะอบได้ โดยติดตั้งหัววัดความชื้นไว้กับผนังของไซโล เพื่อควบคุมให้มีความชื้นที่พอเหมาะและเป็นที่ยอมรับของตลาด คือ ประมาณ 13.72 เปอร์เซ็นต์ หรืออยู่ระหว่าง 12-15 เปอร์เซ็นต์ (สุรพันธ์ ทองรังสี, 2551) แม้ว่าต้นทุนการผลิตเครื่องวัดความชื้นนี้มีราคาสูงกว่าเครื่องวัดความชื้นที่นำเข้าจากต่างประเทศถึงครึ่งหนึ่ง แต่เครื่องวัดความชื้นนี้มีความแม่นยำอยู่ที่บวกลบ 5% ซึ่งยังต้องปรับปรุงให้แม่นยำมากขึ้น โดยผิดพลาดได้ไม่เกิดบวกลบ 1% จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้จริง และสามารถวัดความชื้นได้ในข้าวเปลือกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ปี 2012 ธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ ได้นำเสนอเซนเซอร์วัดความชื้น (In situ moisture) จากการตรวจวัดขนาดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างโพลาริเซชันแบบขนานและโพลาริเซชันแบบตั้งฉากด้วยสายอากาศเปลี่ยนโพลาริเซชันได้ ที่สร้างง่าย ราคาไม่สูง และใช้เวลาในการประมวลผลต่ำ เหมาะสำหรับระบบอบแห้งแบบปิด ในงานวิจัยนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ถูกวัดด้วยเซนเซอร์ที่นำเสนอสามารถใช้งานได้เทียบได้กับค่าที่ได้จากเทคนิคสายส่งที่เคยมีการวิจัยมาก่อนหน้า แต่ในส่วนของตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากในระบบเซนเซอร์ที่นำเสนอไม่ได้อยู่ในขอบเขตปิดเหมือนกับเทคนิคสายส่ง ดังนั้นจึงต้องทำการชดเชยความผิดพลาดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง เซนเซอร์ในระบบอบแห้งแบบปิดที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและแสดงผลตรวจวัดได้ตามเวลาจริง (Real time) (Limpiti & Krairiksh, 2012) แต่ระบบนี้ยังมีข้อจำกัดคือไม่สามารถวัดแบบต่อเนื่อง

ปี 2014 ฟาริดและคณะได้ทำการศึกษาวิธีการวัดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเทคนิคแมชชีนวิชัน โดยประมวลผลภาพถ่ายความร้อน (Thermal imaging) ของข้าวเปลือก ทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกจากความเข้มเฉลี่ยของระดับสีเทาในภาพ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคใหม่ที่ทำให้ความแม่นยำสูง (Farid et al., 2014) แต่วิธีการนี้ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการนำไปใช้งานจริง และราคาสูงซึ่งไม่เหมาะกับชาวนาที่จะนำไปใช้งาน

ปี 2015 โกลปัวและคณะได้ ศึกษาถึงการทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกโดยใช้การมองเห็นของเครื่องและโครงข่ายประสาทเทียม ทำการทดสอบในกระบวนการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin - layer dryer) โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศ ความเร็วลม และค่า  $L^*a^*b$  เป็นข้อมูลอินพุต สำหรับการประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือก ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.001 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าเป็น 0.9630 และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเป็น 0.031 (Golpour et al., 2015) ทั้งนี้ วิธีการนี้ยังคงมีราคาสูงและซับซ้อน



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี