

## บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานสำคัญที่จำเป็นต้องศึกษาสำหรับออกแบบวิธีการดำเนินการวิจัย ได้แก่ หลักการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ วงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณ โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคลื่นไมโครเวฟเดินทางจากตัวกลางที่ 1 คือ อากาศ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น  $\eta_0$  ไปตกกระทบกับตัวกลางที่สองที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น  $\eta$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น  $\Gamma$  ซึ่งแสดงถึงกำลังงานของที่สะท้อนกลับแสดงดังสมการที่ (2.1) (Pozar, 2012 : 29)

$$\Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (2.1)$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าประเภทหนึ่งของวัสดุ มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะหรือโครงสร้างของวัสดุ คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ประกอบด้วย ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity:  $\epsilon$ ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability:  $\mu$ ) ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของตัวกลางจึงสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ดังสมการที่ (2.2)

$$\eta = \sqrt{\mu / \epsilon} \quad (2.2)$$

ดังนั้นเมื่อคลื่นเดินทางไปตกกระทบกับตัวกลางที่ 2 คลื่นสะท้อนกลับจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่ 2 วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เรียกว่า คุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้จำแนกความแตกต่างของวัสดุได้ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นค่าที่แปรผันตามความถี่ อุณหภูมิ การจัดเรียงตัวของขั้วประจุส่วนผสม ความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกประกอบด้วยค่าสภาพยอมไฟฟ้า และความซึมซาบแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแตกต่างของวัสดุแต่ละชนิด ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต่างกัน สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่ตัวนำ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเฉพาะค่าสภาพยอมไฟฟ้า ซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant:  $\epsilon'$ ) เป็นปริมาณที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานสนามไฟฟ้า และตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor:  $\epsilon''$ ) เป็นปริมาณที่แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  เป็นค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุที่ถูกนำมาเทียบกับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศ ซึ่งค่าในรูปเชิงซ้อนแสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + \varepsilon_r'' \quad (2.3)$$

ในสารละลายที่มีปริมาณน้ำตาลแตกต่างกันส่งผลให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายแตกต่างกัน ดังนั้นกำลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับหลังจากตกกระทบกับสารละลายจึงแตกต่างกัน ปริมาณความแตกต่างที่เกิดขึ้นจึงสามารถนำมาประมวลผลเพื่อจำแนกระดับปริมาณน้ำตาลในสารละลายได้

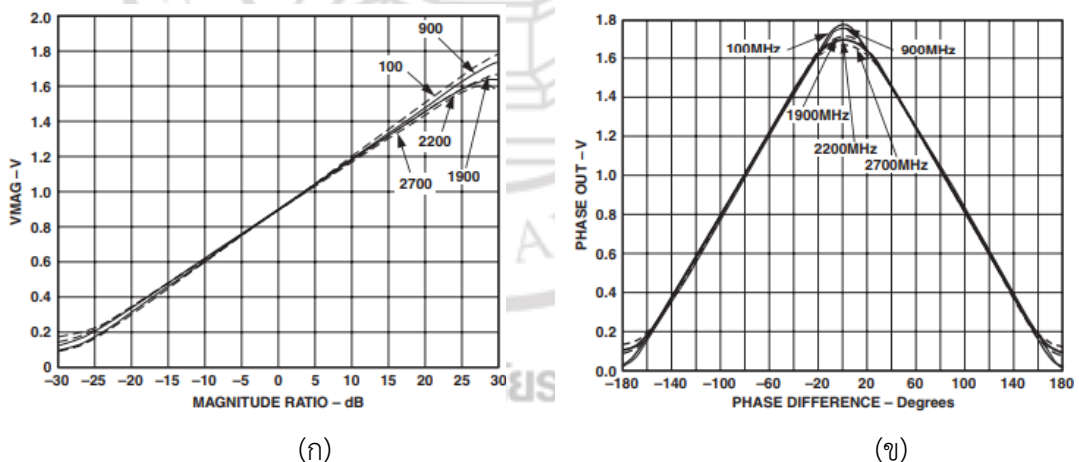
### วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบอัตราขยายและเฟสของสัญญาณ (Gain and phase detector) ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์ชนิด 4 พอร์ต โดยมีอินพุต 2 พอร์ต สำหรับรับคลื่นความถี่ ได้แก่ อินพุต A และอินพุต B ส่วนเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 พอร์ต ได้แก่  $V_{MAG}$  และ  $V_{PHS}$  เบอร์ AD8302 ทำงานได้ในช่วงความถี่ไม่เกิน 2.7 GHz การทำงานของวงจรคือการหาอัตราส่วนของอินพุต ทั้ง 2 พอร์ต ทั้งขนาด และเฟส ดังสมการที่ (2.4)-(2.5)

$$V_{MAG} = K_M \log(V_{INA}/V_{INB}) + 0.9 \quad \text{v} \quad (2.4)$$

$$V_{PHS} = K_P [\phi V_{INA} - \phi V_{INB} - 90^\circ] + 0.9 \quad \text{v} \quad (2.5)$$

โดย  $K_M$  และ  $K_P$  คือ ค่าคงที่ของอุปกรณ์ มีค่าเป็น 0.6 V/decade และ  $-0.01$  V/องศา ตามลำดับ (Mohamadou, 2018 : 304-308) ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของ AD8302 (ก) อัตราส่วนของขนาด (ข) ความต่างเฟส

ที่มา: Analog device, 2018 : 6

เมื่อขนาดอินพุตทั้ง 2 มีค่าเท่ากัน แรงดัน  $V_{MAG}$  มีค่าเท่ากับ 0.9 V แต่เมื่อขนาดแตกต่างกันมากขึ้น  $V_{MAG}$  มีค่าห่างจาก 0.9 มากขึ้น ส่วนค่าความต่างเฟสวัดได้ในช่วง  $-180$  ถึง  $180$  องศา  $V_{PHS}$  มีค่าอยู่ที่

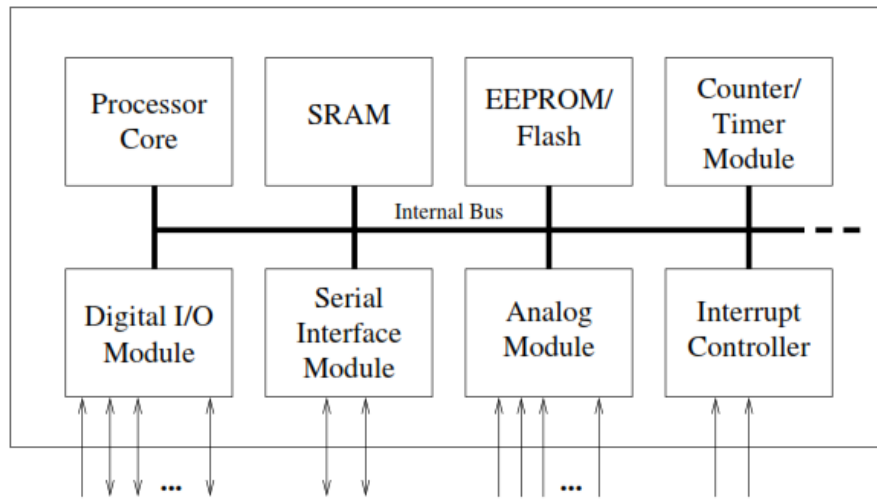
0.9 เมื่อค่าความต่างเฟสเป็นศูนย์ การใช้วงจรเปรียบเทียบอัตราขยายและเฟสของสัญญาณช่วยลดการใช้อุปกรณ์ความถี่สูงซึ่งราคาสูง เนื่องจากวงจรทำให้สัญญาณมีความถี่ต่ำลง และอยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมก่อนส่งเข้าสู่บอร์ด Arduino โครงสร้างภายนอกของ AD8302 แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างภายนอกของอุปกรณ์ AD8302

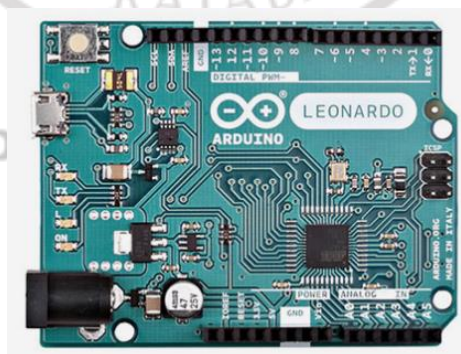
### ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างภายนอกเป็นวงจรรวม (Integrate Circuit : IC) มีโครงสร้างภายในมีลักษณะเหมือนไมโครคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วย หน่วยประมวลผล (Processor unit), หน่วยความจำ (Memory unit) และหน่วยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก มีหลายรุ่น เช่น MCS-51, PIC, AVR, ARM, Basic Stamp, PSoC และ Arduino เป็นต้น ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของงาน สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาพื้นฐาน เช่น แอสเซมบลี ภาษาเบสิก ภาษาซี เป็นต้น ที่บริษัทผู้ผลิต ไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตระกูลได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานร่วมกัน เพื่อควบคุมการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติที่นำไป ใช้ในระบบควบคุมแบบอัตโนมัติได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอา ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถึงเดียวกัน มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์  
ที่มา : Gridling & Weiss, 2007: 5

อาดูยโน (Arduino) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR ที่ถูกพัฒนาเป็นแบบโอเพ่นซอร์ซ (Open Source) ซึ่งผู้ผลิตเปิดเผยข้อมูลทั้งฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย จึงเหมาะสำหรับที่ผู้เริ่มต้นศึกษาการเขียนโปรแกรมเบื้องต้น ผู้ใช้งาน สามารถดัดแปลง พัฒนาต่อยอดฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ได้ บอร์ด Arduino นำมาใช้งานเช่นเดียวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอื่นๆ เพื่อใช้สำหรับควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานตามต้องการ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Arduino ในชีวิตประจำวัน เช่น ควบคุมการเปิด/ปิดไฟในบ้านอัตโนมัติ วงจรวัดค่าอุณหภูมิ, ควบคุมการรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ ควบคุมการเปิด/ปิดประตูอัตโนมัติควบคุมเครื่องซักผ้าหยอดเหรียญ หรือควบคุมความเร็วและทิศทาง การหมุนของมอเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการได้หลากหลาย และราคาไม่แพง ตัวอย่างโครงสร้างของบอร์ดอาดูยโน รุ่น Leonardo แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 บอร์ดอาดูยโนรุ่น Leonardo



บอร์ดอาดุโยโนรุ่น Leonardo Arduino Leonardo เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้หน่วยประมวลผล ATmega32u4 มีขาอินพุตและเอาต์พุตแบบ ดิจิตอลจำนวน 20 pin ซึ่งสามารถใช้เป็นเอาต์พุต PWM และอินพุตแบบบอานาล็อกได้ 12 ชุด เครื่องกำเนิดสัญญาณคริสตัล 16 MHz, การเชื่อมต่อแบบ micro USB, แจ็คไฟ, ส่วนหัว ICSP และปุ่มรีเซ็ต มันมีทุกอย่างที่จำเป็นในการสนับสนุนไมโครคอนโทรลเลอร์; เพียงเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิล USB หรือใช้อะแดปเตอร์หรือแบตเตอรี่ AC-to-DC เพื่อเริ่มต้นใช้งาน บอร์ดรุ่น Leonardo แตกต่างจากบอร์ดก่อนหน้านี้ทั้งหมดที่ ATmega32u4 มีการสื่อสารแบบ USB ในตัวช่วยลดความจำเป็นในการประมวลผลรองนี้ช่วยให้ Leonardo ปรากฏตัวต่อคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อเป็นเมาส์และคีย์บอร์ด, นอกเหนือจากพอร์ตอนุกรม (COM) แบบเสมือน (CDC) นอกจากนี้ยังมีความหมายอื่นๆ

### อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

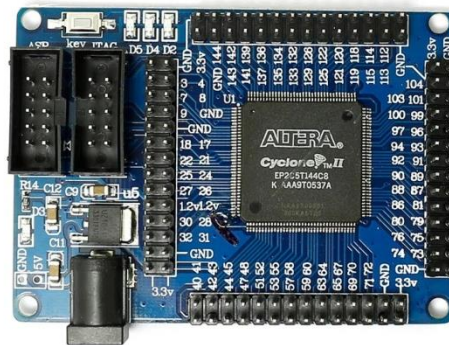
อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) เป็นชิพที่ประกอบไปด้วยหน่วยขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งสามารถโปรแกรมเพื่อให้แปลงเป็นวงจรดิจิทัล เช่น วงจรนับ (Counter) วงจรคูณ (Multiplexer) วงจรถอดรหัส (Decoder) วงจรรวม (Adder) ฟลิปฟลอป และเกต (Gate) การที่มีจำนวนหน่วยขนาดเล็กจำนวนมาก จึงทำให้เป็นจุดแข็งของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ โดย FPGA เพียงตัวเดียวสามารถแปลงเป็นวงจรดิจิทัลหลายแบบ จุดเด่นที่สำคัญ คือ ทุกวงจรสามารถทำงานได้พร้อมกัน ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้มีดังนี้

1. การสังเคราะห์วงจร (Logic synthesis) ขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ในการสังเคราะห์วงจร (Synthesis Tools) ทำการสังเคราะห์พฤติกรรม วงจรที่ได้จากการออกแบบด้วย Schematic หรือ VHDL
2. การแบ่งวงจร (Partitioning) ขั้นตอนนี้เป็นการแบ่งวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์ เป็นส่วนย่อยๆ สำหรับลงใน CLBs, IOBs หรือองค์ประกอบอื่นๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA
3. การวางอุปกรณ์ (Placement) ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกทำเลที่ตั้งของแต่ละส่วนของวงจรที่ผ่านการแบ่งวงจรมาแล้วว่าจะอยู่ตำแหน่งไหนในอุปกรณ์ FPGA เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
4. การเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing) ขั้นตอนนี้เป็นการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA ขั้นตอนนี้จะทำต่อเนื่องจากการวางอุปกรณ์
5. ความหน่วงด้านเวลา (Delay) ในการทำ FPGA นั้น ความหน่วงที่เกิดขึ้นเป็นความหน่วงที่เกิดจากการวางตำแหน่ง (Layout) ของอุปกรณ์ ซึ่งผู้ที่ออกแบบไม่สามารถเข้าไปแก้ไขได้ แต่สามารถทำให้น้อยที่สุดได้ ความหน่วงนั้นสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ
  - 5.1 ความหน่วงลอจิก (Logic delay) เป็นความหน่วงภายในองค์ประกอบของอุปกรณ์ FPGA
  - 5.2 ความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing delay) เป็นความหน่วงที่เกิดจากเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบภายในอุปกรณ์ FPGA

6. การจำลองการทำงานของวงจร (Simulation) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะเป็นขั้นตอนที่ผู้ออกแบบตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของโมเดลว่าถูกต้องหรือไม่ มีข้อผิดพลาดหรือไม่ เพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขให้ถูกต้อง

7. การโปรแกรมอุปกรณ์อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Configuration) หลังจากที่โมเดลได้ผ่านขั้นตอนต่างๆมาแล้ว ตอนนี้ก็จะสามารถที่จะดาวน์โหลดลงในอุปกรณ์ FPGA ได้แล้ว ในการดาวน์โหลดนี้ก่อนอื่นต้องแปลงแบบวงจรรวมที่ได้เป็นข้อมูลวงจร ซึ่งอยู่ในรูปของบิตสตรีมก่อน แล้วจึงดาวน์โหลดไปให้อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้

อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ สามารถทำงานง่าย ไม่มีความซับซ้อน และทำงานพร้อมกันจำนวนมาก จึงเหมาะกับการประมวลผลข้อมูลจำนวนมากในเวลาอันสั้น อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ของบริษัท Altera ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ของบริษัท Altera

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการวัดปริมาณน้ำตาลในสารละลายแบบไม่สัมผัส และแสดงผลได้ Real-time ไว้หลายเทคนิค

1. เทคนิคการวัดปริมาณน้ำตาลด้วย NIR (Near Infrared Spectroscopy) ด้วยหลักการวัดการดูดกลืนคลื่นในช่วง near-infrared เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำเสนอไว้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำ (Porep et al, 2015 : 211-230) แต่การนำเทคนิค NIR ไปประยุกต์ใช้งานจริงยังมีข้อจำกัด เนื่องจากต้องใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก และราคาสูง รวมถึงแสงสว่างจากภายนอกมีผลต่อการวัด ทำให้ผลการวิจัยที่นำเสนอเป็นผลทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ

2. เทคนิคการวัดปริมาณน้ำตาลด้วยแหล่งกำเนิดแสงและปริซึมด้วยหลักการของค่าดัชนีการหักเหของแสงของสารละลาย (Belay et al, 2018 : 1-5) วิธีการนี้ราคาถูกลง แต่ยังคงนำไปสร้างเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงยาก

3. เทคนิคการวัดปริมาณน้ำตาลในสารละลายด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ และถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหาร เนื่องจากเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส และสามารถแสดงผลได้ทันที (Sapcanin et al, 2013 : 29-32) การวัดปริมาณน้ำตาลด้วย

คลื่นไมโครเวฟอาศัยหลักการของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลายที่ซึ่งแตกต่างกันเมื่อสารมีปริมาณน้ำตาลแต่ละระดับ (Thomason et al, 2019 : 1-4) ส่งผลต่อพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟถูกนำเสนอไว้หลายลักษณะ ได้แก่ การวัดปริมาณน้ำตาลจากค่าความไวของสายอากาศ RFID ที่ช่วงความถี่ 860 – 960 เมกะเฮิร์ตซ์ (Ennasar et al, 2019 : 273-283) และการวัดปริมาณน้ำตาลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของ Resonator (Hosseini et al, 2021 : 1-10) ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นการวัดโดยไม่สัมผัส โครงสร้างของ RFID และ Resonator ที่ออกแบบสร้างง่าย และราคาถูก แต่ต้องใช้เครื่องมือวัดที่ราคาสูง จึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานจริง การวัดปริมาณน้ำตาลจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟจากสายอากาศไมโครสตริปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการนำเสนอ โดยใช้สายอากาศวางบนผิวสารละลาย (Cheng et al, 2014 : 31-36) วิธีการนี้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน รวมถึงการวัดกำลังงานคลื่นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ด้วยวงจรที่มีต้นทุนต่ำ



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี