

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว¹ กระวี ตรีอำรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

รับบทความ 24 พฤษภาคม 2564 แก้ไขบทความ 27 มิถุนายน 2564 ตอรับบทความ 30 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุมาใช้ในการทดสอบหาอิทธิพลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่มีต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่รับค่ามาจากเซนเซอร์ดังกล่าว เมื่อทดสอบกับข้าวเปลือกที่มีความชื้นในช่วง 9.2 - 22.75% มาตรฐานเปียก ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณทางไฟฟ้า พบว่าค่าสัญญาณเฉลี่ยในช่วงวินาทีที่ 20 ถึง 40 จากการวัดด้วยเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่า Adjust R^2 (ระดับความเชื่อมั่น 95%) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSEC) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C ดังนั้นโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงมากกว่าเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

คำสำคัญ : ความชื้นข้าวเปลือก; เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน; เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ; การอบแห้ง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +664 4224 766, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: krawee@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Temperature on Electrical Resistivity and Capacitive Signal of Various Moisture Paddy

Aphisik Pakdeekaew¹ Krawee Treeamnu^{1*} Tawarat Treeamnu² and Nuttapon Ruttanadech³

¹ School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

² School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ 17/1 Chum Kho, Pathiu, Chumphon, 86160, Thailand

Received 24 May 2021; Revised 27 June 2021; Accepted 30 June 2021

Abstract

This research proposes an application of resistive and capacitive soil moisture sensors to investigate the influences of paddy temperature on the electrical signal received from sensors when tested with paddy moisture in the range 9.2 - 22.75%wb at 40 - 80°C to determine the relationship between paddy moisture and electrical signals. It was found that the mean signal values between 20 - 40 seconds from both sensors were inversely linear correlation with the moisture content of the paddy. Temperature is the factors that influence the measured electrical signal. R^2 , Adjust R^2 (95% confidence interval), and RMSEC showed that the model developed from the resistive sensor signals was accurate in calculating the moisture content of paddy between medium to high temperature in range 60 - 80°C more than the low temperature range. While the capacitive sensor signals model is accurate in calculating paddy moisture between low to medium temperature in range 40 - 60 °C. Therefore, the resistive soil moisture sensor is possible and more suitable for applying as a paddy moisture sensor in the high temperature drying processes than a capacitor soil moisture sensor.

Keywords : Moisture Content of Paddy; Resistive Soil Moisture Sensor; Capacitive Soil Moisture Sensor; Drying

** Corresponding Author. Tel.: +664 4224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa L.*) เป็นพืชธัญหารหลักที่ประชากรมากกว่าครึ่งของโลกนิยมนำมาบริโภค [1]-[3] นอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยที่เพาะปลูกข้าวเป็นอาชีพหลัก จากยอดรวมสถิติการส่งออกสินค้ามาตรฐานข้าวหอมมะลิไทยตามใบรับรองมาตรฐานสินค้าที่ออกโดยสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย ในปี 2563 มีปริมาณ 1,334.036 พันเมตริกตัน คิดเป็นมูลค่ารวม 42,486.98 ล้านบาท [4] สร้างเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก ข้าวจึงเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ข้าวหลังการเก็บเกี่ยวใหม่จะมีความชื้นสูงอยู่ในช่วง 22-26% มาตรฐานเปียก จึงจำเป็นต้องทำการลดความชื้นในข้าวลงประมาณ 12-14% เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก เนื่องมาจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา [5]-[7] และเพื่อลดข้อจำกัดของการอบแห้งแบบดั้งเดิม ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านแรงงานคน พื้นที่ในการดำเนินการ วัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการลดความชื้นข้าว ในระดับอุตสาหกรรม จึงมีการนำเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบต่างๆ มาใช้เพื่อให้สามารถดำเนินการบนข้อจำกัดดังกล่าวได้

ในขณะอบแห้งข้าวเปลือกการประเมินความชื้นข้าวที่อยู่ในกระบวนการลดความชื้นนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะจะทำให้ทราบค่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการและยุติกระบวนการได้ทันที่ หากทราบค่าความชื้นเข้าเกินไปจะทำให้ข้าวเปลือกแห้งมากเกินไปเมื่อนำไปกะเทาะเปลือกจะเกิดการแตกหักสูงและยังเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ในทางกลับกันหากยุติกระบวนการอบแห้งเร็วเกินไปย่อมได้ข้าวที่มีความชื้นสูงเกินมาตรฐานเช่นกัน การวัดปริมาณความชื้นข้าวเปลือก สามารถทำได้ทั้งวิธีการวัดทางตรงและวิธีการวัดทางอ้อม การวัดทางตรงอาศัยการคำนวณความชื้นในเมล็ดข้าวด้วยน้ำหนักจากการนำข้าวตัวอย่างไปอบด้วยอุณหภูมิสูงตามมาตรฐานต่างๆ วิธีการนี้

สามารถนำมาใช้เป็นวิธีการอ้างอิงมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบได้ [8] แต่มีข้อจำกัดเรื่องของเวลาในการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในข้าวที่ต้องใช้เวลานานเพื่อที่จะสามารถวัดความชื้นข้าวได้อย่างทันที่ซึ่งมีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก เช่น การนำไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า คุณสมบัติทางแม่เหล็ก และอื่นๆ มาใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์การวัดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งวิธีการดังกล่าว เรียกว่า วิธีการวัดทางอ้อม [9]-[14] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชขึ้น จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Nath and Ramanathan [15] ได้พัฒนาจรรยาอินเทอร์เฟซ ซึ่งใช้หลักการวัดความจุของตัวเก็บประจุเซรามิกที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความชื้นข้าวออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว แม่นยำ และเชื่อถือได้ Joaquin, et al. [8] ได้ประเมินสมรรถนะของเครื่องมือวัดความชื้นที่พัฒนาขึ้นโดยหลักการความจุไฟฟ้า เพื่อเป็นเครื่องมือทางเลือกราคาประหยัดสำหรับการวัดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกภายในถุง Makky, et al. [16] ทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคการประเมินสเปกตรัมอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR) ช่วง 1,000-2,500 นาโนเมตร เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวพื้นเมือง 2 ชนิดจากสุมาตราตะวันตก อินโดนีเซีย Lin, et al. [17] ทำการออกแบบและพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นเมล็ดข้าว ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) โดยมีเป้าหมายเพื่อประเมินความชื้นที่แม่นยำและเป็นระบบออนไลน์ นอกจากนี้วิธีการวัดความชื้นทางอ้อมยังถูกนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการวัดแบบตามเวลาจริงเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง และสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งได้ [18] ตัวอย่างการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้กับเครื่องอบแห้ง เช่น ใช้กับการตรวจสอบความชื้นแบบออนไลน์สำหรับ

การทำแห้งผงแบดเตอร์ลีเจียมไอออนแบบสูญญากาศ [19] ใช้ในการวิเคราะห์ความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องแบบแห้งแบบไหลขวาง [20] ใช้ประเมินความชื้นแบบตามเวลาจริงในส่วนผสมเปียก (Wet cake) ทางเกษตรกรรม สำหรับกระบวนการทำแห้งแบบกระแทกวน [21] เป็นต้น

การพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม ไม่เพียงแต่จะสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งและเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพการอบแห้งแล้ว ยังช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินการของเครื่องอบแห้งได้ งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่มีต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่รับค่ามาจากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุเมื่อนำมาทดสอบวัดสัญญาณทางไฟฟ้ากับข้าวเปลือกที่มีความชื้นในช่วง 9.2 - 22.75% (wet basis, wb) ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ทั้งนี้เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณทางไฟฟ้า ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการเลือกใช้เซนเซอร์วัดความชื้นที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาไปสู่ระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงสำหรับวัดความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้งต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับการทดลอง

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ถูกนำมาตรวจสอบความชื้นเริ่มต้น ตามสมการที่ 1 ด้วยวิธีการอบลมร้อน อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลากว่า 72 ชั่วโมง (รูปที่ 1) [22] เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมกลับเข้าไปยังข้าวเปลือก โดยใช้กระบอกพ่นละอองน้ำให้ทั่วถึงเมล็ดข้าวเปลือกมากที่สุด ทำการคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้ผสมกับละอองน้ำอย่างทั่วถึงกัน เพื่อให้ได้ความชื้นตามต้องการด้วยสมการที่ 2 โดยมีเป้าหมายในการเตรียมความชื้นข้าวเปลือก 5 ค่า ได้แก่

9.2%wb 13.15%wb 17.12%wb 19.56%wb และ 22.75%wb ตามลำดับ

$$MC_{wb,initial} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{water,add} = \frac{W_{net} \times MC_{target}}{(W_{net} \times MC_{initial}) - MC_{target}} \quad (2)$$

โดยที่

$MC_{wb,initial}$ คือ เปอร์เซนต์ความชื้น (เริ่มต้น)

MC_{target} คือ เปอร์เซนต์ความชื้น (เป้าหมาย)

W_w คือ มวลของตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนอบไล่ความชื้น (g)

W_d คือ มวลของตัวอย่างข้าวเปลือกหลังอบไล่ความชื้น (g)

W_{net} คือ มวลของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมความชื้น (g)

$W_{water,add}$ คือ มวลของน้ำที่ต้องเติมให้แก่ข้าวเปลือกสำหรับการเตรียมความชื้น (g)



รูปที่ 1 ก) ข้าวเปลือกตัวอย่างที่บรรจุในถ้วยชั่งน้ำหนัก
ข) เครื่องอบหาความชื้นแบบ Hot air oven



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกสำหรับการทดลอง

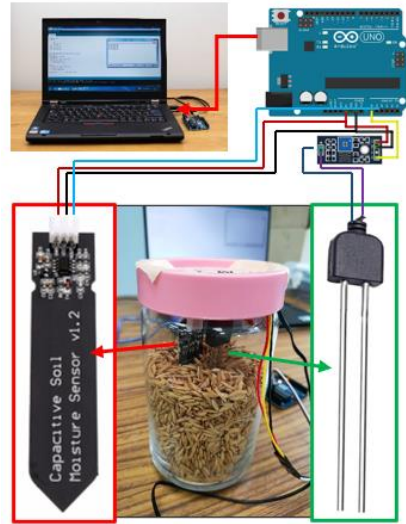
หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกที่ถูกเติมน้ำแล้วบรรจุในภาชนะปิดสนิทตามรูปที่ 2 และนำไปเก็บในห้องเย็น อุณหภูมิ 2 - 5°C เป็นเวลากว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแพร่กระจายตัวของความชื้นข้าวทั่วกล่อง [23]

2.1.2 การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

ในการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้โมดูลเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นในดินเป็นอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าของข้าวเปลือก โดยเลือกใช้โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน (Resistive soil moisture sensor module) ยี่ห้อ diymore ผลิตโดย Worldchips จากประเทศจีน มีขนาด 36mm x 15mm x 7mm แรงดันไฟฟ้าทำงาน: 3.3 - 12 VDC กระแสไฟฟ้าทำงาน: < 20 mA กระแสไฟฟ้าขาออก: < 30 mA [24] และโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ (Capacitive soil moisture sensor) ยี่ห้อ SZYTF ผลิตโดย YX Electronic Components ประเทศจีน มีขนาด 98 mm x 23 mm แรงดันไฟฟ้าทำงาน: 3.3 - 5.5 VDC แรงดันไฟฟ้าขาออก: 0 - 3.0 VDC [25] ตามรูปที่ 3 และใช้ Microcontroller Arduino Uno R3 ในการรับค่าสัญญาณจากโมดูลวัดความชื้นทั้งสองชนิดประมวลผลและแสดงค่าสัญญาณดังกล่าวผ่านจอ Serial monitor ของ Personal Laptop ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทำการวัดกับตัวอย่างข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ในขวดโหลแก้วปิดสนิทที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80°C ตามลำดับด้วยตู้อบลมร้อน ตามรูปที่ 5



รูปที่ 3 ก) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน
ข) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ



รูปที่ 4 แผนภาพการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน



รูปที่ 5 การบรรจุข้าวเปลือกและวิธีการอบข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ

ใน 1 การทดลอง จะใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่างสำหรับทำการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วจึงเก็บตัวอย่างข้าวหลังการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้านำไปอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกที่มีอยู่ตามสมการ 1 สำหรับการเปรียบเทียบในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.1.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้ได้นำค่าสัญญาณที่รับค่าจากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึง 120 มาใช้ในการวิเคราะห์ ช่วงข้อมูลที่มีค่าค่อนข้างคงที่ที่สุดถูกเลือกมาวิเคราะห์ด้วยรูปแบบ

ความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) (สมการที่ 3) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการแบบเลือกทั้งหมด (Enter Method) เพื่อทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่แต่ละอุณหภูมิ ซึ่งจจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 4 [26]

$$Y = MX + C \quad (3)$$

$$WB_p = \text{Coefficient}(\text{signal}) + \text{Constant} \quad (4)$$

โดยที่

Y, WB_p คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวฐานเปียกที่ถูกทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

$M, \text{Coefficient}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

X, signal คือ ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากโมดูลวัดความชื้นในดิน

$C, \text{Constant}$ คือ ค่าคงที่ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

การประมาณค่าตัวแปรของสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายอาศัยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ค่าประมาณดังกล่าวส่งผลให้ผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาด (Sum Square Error; SSE) ต่ำที่สุด โดยค่าความชัน (M) หาได้จากสมการที่ 5 และค่าคงที่ (C) หาได้จากสมการที่ 6 [26]

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (5)$$

$$C = \bar{Y} - M \bar{X} \quad (6)$$

โดยที่

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้า (X) ที่รวบรวมมา n จำนวน

\bar{Y} คือ ค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวเปลือก (Y) ที่รวบรวมมา n จำนวน

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นค่าทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ คำนวณได้จากสมการที่ 7 ซึ่งบ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (Y) ที่อธิบายได้จากสมการถดถอยที่ประมาณขึ้น [27] และ R^2 ที่ทำการปรับค่าให้สอดคล้องกับจำนวนตัวแปรทำนายในสมการ (Adjust R^2) คำนวณได้จากสมการที่ 8 [28] นอกจากนี้ การประเมินประสิทธิภาพของการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น อธิบายได้จากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error of Collection, RMSEC) แสดงดังสมการที่ 9 [29, 30]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

$$\text{Adjust } R^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \cdot (1 - R^2) \right] \quad (8)$$

$$\text{RMSEC} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (9)$$

โดยที่

n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

p คือ จำนวนค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเชิงเส้น

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ตัวอย่างข้าวในการทดลอง

ผลการเตรียมความชื้นถูกเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ณ เงื่อนไขของอุณหภูมิการทดสอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเตรียมความชื้นข้าวเปลือกกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ด้วยค่าเฉลี่ยของความชื้นเปลือกที่ถูกเติมน้ำกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Standard Deviation; S.D.) พบว่า ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 40°C -70°C มีค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวใกล้เคียงกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนของข้อมูลน้อยมาก (ในช่วง 0.02-0.93) ในขณะที่ข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 80°C มีค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวคลาดเคลื่อนกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ตั้งแต่ 1.26% - 3.2% (wet basis) และส่วนเบี่ยงเบนของข้อมูลอยู่ในช่วง 0.66 - 1.45 ซึ่งเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นสำหรับการควบคุมเงื่อนไขของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของส่วนเบี่ยงเบนความชื้นข้าวจากการเตรียมตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม ความชื้นที่แท้จริงของข้าวเปลือกถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิใดๆ ในการทดลองนี้

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้า

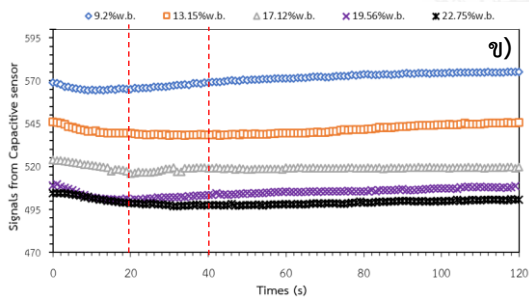
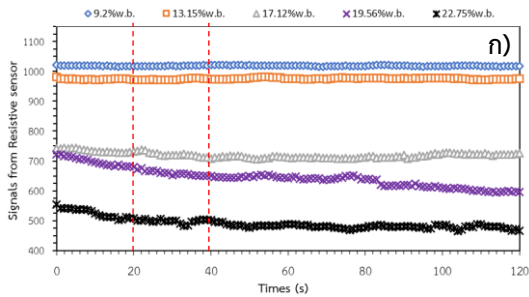
รูปที่ 6 แสดงค่าตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าเฉลี่ยได้จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 60°C ตั้งแต่วินาทีที่ 0 - 120 โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสองมีค่าในช่วงการวัด 0 - 1,023 ระดับ (ที่การแปลงค่าสัญญาณ 8 บิต) ในช่วงเริ่มต้นของการวัดมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นชัดเจนในช่วงวินาทีที่ 0 - 20 ซึ่งเป็นพฤติกรรมของข้อมูลที่ลดลงตามเวลาใน

ตารางที่ 1 ผลของการเตรียมความชื้นข้าวเปลือกสำหรับใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	ความชื้นเป้าหมาย (%)	ความชื้นจากการทดลอง (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
40°C	9.20	9.35	0.02
	13.15	13.32	0.03
	17.12	17.35	0.08
	19.56	19.95	0.09
	22.75	23.10	0.09
50°C	9.20	9.12	0.03
	13.15	12.99	0.05
	17.12	17.29	0.07
	19.56	20.03	0.36
	22.75	22.76	0.21
60°C	9.20	9.07	0.10
	13.15	12.78	0.24
	17.12	16.87	0.13
	19.56	19.70	0.35
	22.75	22.31	0.38
70°C	9.20	9.18	0.15
	13.15	12.65	0.38
	17.12	16.44	0.42
	19.56	19.63	0.51
	22.75	22.26	0.93
80°C	9.20	7.94	0.66
	13.15	10.78	1.07
	17.12	14.80	1.39
	19.56	16.66	1.45
	22.75	19.55	1.11

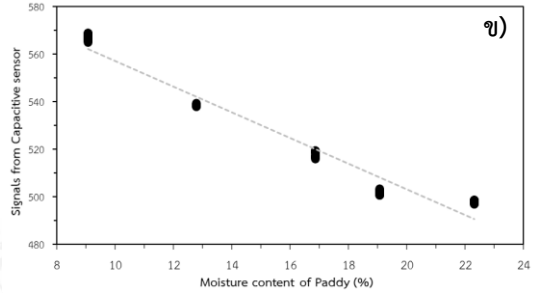
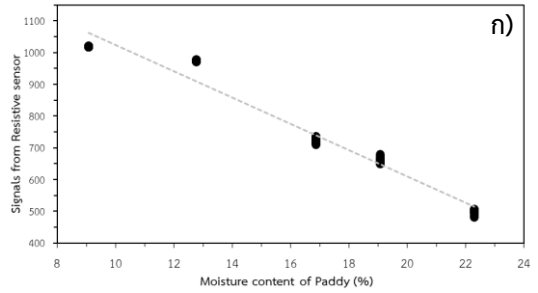
ช่วงแรกจนกระทั่งข้อมูลค่อนข้างคงที่ตามแกนนอนในช่วงวินาทีที่หลัง เพื่อป้องกันการลดลงของอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการถ่ายเทความร้อนกับแวดล้อมตั้งแต่วินาทีที่ 40 - 120 และเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่แน่นอน

ของข้อมูลจากการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้น ผู้วิจัยจึงเลือกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ ตั้งแต่วินาทีที่ 20 ถึงวินาทีที่ 40 มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกจากการเตรียมความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 1) เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบและหาตัวแบบของสมการเชิงเส้นถดถอย

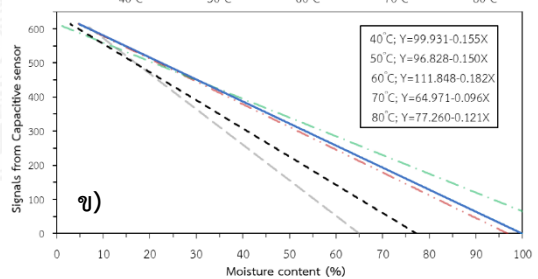
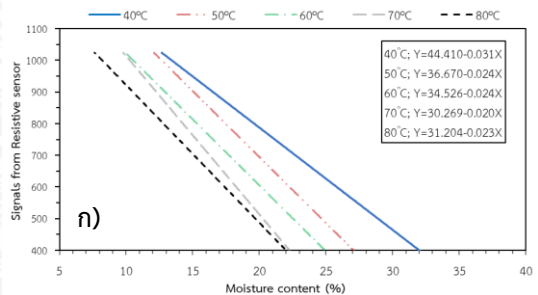


รูปที่ 6 ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C ก) ค่าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ข) ค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดกับค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการวัด 60°C พบว่า ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นข้าวเปลือกจะทำให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเซนเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มลดลง โดยที่ ที่อุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80°C มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ก) จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จาก ก) โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) ค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุที่แต่ละอุณหภูมิการทดลอง

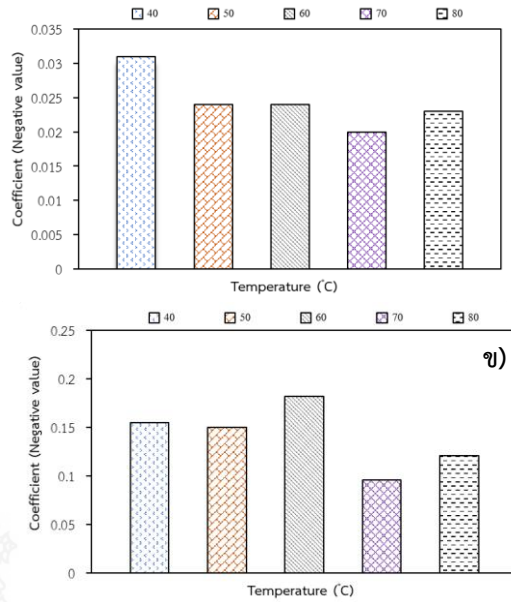
3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นข้าวเปลือกและค่าสัญญาณไฟฟ้า

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือความชันของเส้นแนวโน้ม มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เมื่อตัวแปรต้น (ค่าความชื้นข้าวเปลือก) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย หรือความชันของกราฟ แสดงดังรูปที่ 9

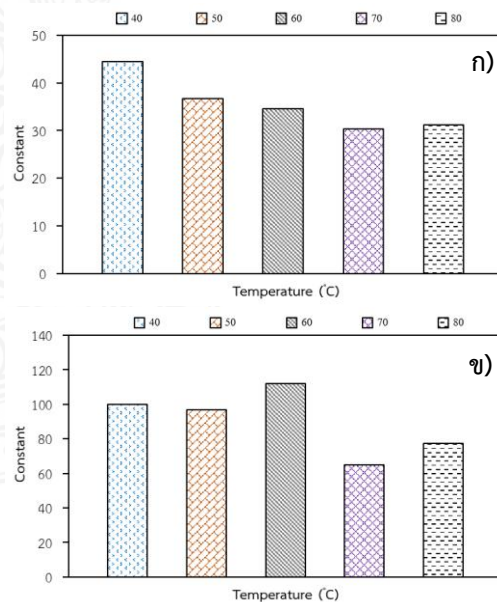
จากรูปที่ 9 ก) ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่าเป็นลบน้อยลง) ในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 50 - 80°C

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความสัมพัทธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (รูปที่ 9 ข) มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และมีต่ำสุด (ค่าเป็นลบมากที่สุด) ที่ 60°C ก่อนที่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ค่าเป็นลบน้อยลง) ในช่วง 70 - 80°C นอกจากนี้ค่าคงที่จากรูปแบบความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นนี้มีค่าแตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดสอบซึ่งแสดงดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 ก) ค่าคงที่ของความสัมพัทธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 70°C และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 70 - 80°C ในขณะที่ค่าคงที่ของความสัมพัทธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (รูปที่ 10 ข) มีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และมีค่าสูงสุดที่ 60°C จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 70 - 80°C แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย และค่าคงที่นี้จะมีความสอดคล้องกับรูปที่ 8 ก) และ ข) โดยเส้นกราฟ



รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพัทธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ก) จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ข) จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ



รูปที่ 10 ค่าคงที่ของความสัมพัทธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ที่ได้จาก ก) โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

ความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มลดความชื้นลงในช่วงอุณหภูมิต่ำ จากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าดังกล่าวจากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มคงที่ได้ช่วงอุณหภูมิต่ำ และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ซึ่งคือจุดตัดแกนตั้งของเส้นกราฟความสัมพันธ์จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ค่าคงที่ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานในช่วงอุณหภูมิสูงการทดลองค่าสูงมีค่าเกือบจะคงที่ ในขณะที่ค่าคงที่ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุจะมีค่าเกือบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิการทดลองค่าต่ำ

3.4 ความสามารถของแบบจำลองความสัมพันธ์ในการคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกที่แต่ละอุณหภูมิการทดลอง

ความสัมพันธ์ในรูปการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุได้ถูกสร้างเป็นแบบจำลองขึ้น จากนั้นได้ทดสอบการคำนวณหาความชื้นของแบบจำลองที่แต่ละอุณหภูมิของการทดลอง โดยประเมินความสามารถในการคำนวณค่าจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error of Collection, RMSEC) ค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่และค่าการประเมิน แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรเปรียบเทียบระหว่างเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานกับชนิดเก็บประจุ

Type of sensor	Resistive soil moisture sensor module					Capacitive soil moisture sensor				
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
Coefficient	-0.031	-0.024	-0.024	-0.02	-0.023	-0.155	-0.15	-0.182	-0.096	-0.121
Constant	44.410	36.670	34.526	30.269	31.204	99.931	96.828	111.848	64.971	77.260
R^2	0.802	0.869	0.958	0.951	0.958	0.974	0.903	0.969	0.637	0.750
Adjust R^2	0.800	0.868	0.958	0.950	0.958	0.948	0.902	0.968	0.633	0.747
RMSEC	2.156	1.785	0.993	1.067	0.912	1.130	1.534	0.865	2.839	2.070

หมายเหตุ : ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 2 พบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะทำการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นทั้ง 2 ชนิด ล้วนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ในสมการคำนวณความชื้นข้าวเปลือกทั้งสิ้น อาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการนี้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Adjust R^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทาง

ไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ (40 และ 50°C) โดยมีค่า R^2 Adjust R^2 เท่ากับ 0.958 0.951 0.958 และ 0.958 0.950 0.958 ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ตามลำดับ และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุดโดยมีค่าเป็น 0.993 1.067 และ 0.912 ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วง

อุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิสูง (70 และ 80°C) โดยมีค่า R^2 , Adjust R^2 เท่ากับ 0.974 0.903 0.969 และ 0.948 0.902 0.968 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60°C ตามลำดับ และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุดโดยมีค่าเป็น 1.130 1.534 และ 0.865 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60°C ตามลำดับ ซึ่งค่าความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้สัญญาณไฟฟ้าจากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุนี้มีผลสอดคล้องกับการทดสอบของ Jitsom, et. al. [9] Song, Q. [10] S. Wu. et. al. [31], [32] และ B. Besharati [33] ดังนั้นโมดูลเซนเซอร์ชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าไม่มาก และจากผลการทดลองนี้ การประยุกต์ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูง โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่า

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าจากโมดูลเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก โดยโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ลดลงในช่วงอุณหภูมิต่ำจากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มคงที่ได้ช่วงอุณหภูมิต่ำ และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานในช่วงอุณหภูมิสูงมีค่าเกือบจะคงที่ ในขณะที่ค่าคงที่จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีค่าเกือบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของความสัมพันธ์ดังกล่าว สรุปได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการคำนวณค่า

ความชื้นข้าวเปลือกของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการนี้ จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Adjust R^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ประกอบกับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSEC) พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ (40 และ 50°C) ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิสูง (70 และ 80°C) ดังนั้นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูง โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากกว่าเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] X.-j. Li, et al., "Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during drying," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 128, pp. 112-119, Sep. 2016.
- [2] S. Doungporn, N. Poomsa-ad and L. Wiset, "Drying equations of Thai Hom Mali paddy by using hot air, carbon dioxide and nitrogen gases as drying media," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, no. 2, pp. 187-198, Feb. 2012.

- [3] S. Echaroj, et al., "Effect of Geometric Design on Airflow Simulation Inside the Storage Room for Paddy," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, p. 012040.
- [4] Department of Foreign Trade, (2021, April 27). Export statistics of Thai jasmine rice (by country / yearly comparison) on February 2021. [Online]. Available: <http://www.dft.go.th>
- [5] T. Tian, et al., "Characterization of differences between microwave and traditional thermal sterilization to prevent fungal spoilage during storage of high-moisture paddy rice," *Cereal Chemistry*, pp. 1-10, Jul. 2020.
- [6] H.J. Das, R. Saikia and P. Mahanta, "Effects of spiral and cone angles on drying characteristics and energy consumption of fluidized bed paddy dryer," *Drying Technology*, pp. 1-12, Sep. 2020.
- [7] W. Jittanit, N. Saeteaw and A. Charoenchaisri, "Industrial paddy drying and energy saving options," *Journal of stored products research*, vol. 46, no. 4, pp. 209-213, Apr. 2010.
- [8] A.C. Joaquin, M.E.V. Ramos and R.C. Martinez, "Development and Performance Evaluation of a Grain Probe Moisture Meter for Paddy," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 10, no. 10, pp. 350-355, Oct. 2019.
- [9] B. Jitsom, S. Sungnul and E. Kunawuttipreechachan, "Numerical Solutions of the Moisture Transport in Rough Rice," *Engineering Letters*, vol. 28, no. 3, 2020.
- [10] Q. Song, et al., "Design of Capacitive Paddy Moisture Sensor Based on Electrical Impedance Spectroscopy Analysis," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3968, Jun. 2020.
- [11] P. Klomkiao, S. Kuntinugunetanon and W. Wongkokua, "Moisture content measurement in paddy," *JPhCS*, vol. 901, no. 1, p. 012068, 2017.
- [12] M. Abdullah, et al. "A Review on Moisture Measurement Technique in Agricultural Silos," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, p. 012068.
- [13] N.A.M. Ramli, et al., "A Review on Frequency Selection in Grain Moisture Content Detection," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 012002.
- [14] D. Nath and P. Ramanathan, "Non-destructive methods for the measurement of moisture contents—a review," *Sensor Review*, vol. 37, no. 1, pp. 71-77, 2017.
- [15] D. Nath and P. Ramanathan, "Interfaced circuit using a non-destructive method for moisture measurement," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 73, p. 102951, December 2020.
- [16] M. Makky, et al. "Determination of moisture content in rice using non-destructive short-wave near infrared spectroscopy," in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2019, p. 020014.

- [17] L. Lin, et al., "Rapid-detection sensor for rice grain moisture based on NIR spectroscopy," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1654, Apr. 2019.
- [18] C. Li, et al., "Developing an online measurement device based on resistance sensor for measurement of single grain moisture content in drying process," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4102, Jul. 2020.
- [19] F. Zhao, et al., "A novel online moisture monitoring method for vacuum drying of lithium ion battery powder," *Powder Technology*, vol. 375, pp. 244-248. Jul. 2020.
- [20] S. Hemhirun and P. Bunyawanichakul, "The use of Temperature and Relative Humidity Sensors to Estimate the Final Moisture Content of the Drying Process," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, no. 5, pp. 926-932, May 2020.
- [21] Z. Wang, et al., "Moisture soft sensor for agitated pan dryers using a hybrid modeling approach," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 586, p. 119518, June 2020.
- [22] S. Sotong and K. Ruaypom, "Germinated Rice Drying by Fluidized Bed Technique using Superheated Steam," *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 88-97, 2016.
- [23] P. Bunyawanichakul, "Evolution of preparation process of reference sample for paddy moisture meter," *Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)*, vol. 5, no. 9, pp. 47-55, 2013.
- [24] Worldchips. (2021, June 25). Soil Moisture Sensor and Detector Module Soil Moisture Tester Soil Moisture Corrosion Resistance Tester for Arduino. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com>
- [25] YX Electronic Components. (2021, June 25). Capacitive Soil Moisture Sensor Not Easy to Corrode Wide Voltage for Arduino. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com>
- [26] P. Sudasna-na-Ayudhya and P. Luangpailoon, "Design and Analysis of Experiments," Bangkok: Top Publishing, 2008.
- [27] A. Puttipipatkajorn and A. Puttipipatkajorn, "Development of Portable Device for Moisture Content Determination of Para Rubber Sheet Based on Near Infrared Spectroscopy," *Thai Science and Technology Journal*, pp. 1845-1856, 2020.
- [28] A.-N. Spiess and N. Neumeyer, "An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach," *BMC pharmacology*, vol. 10, no. 1, pp. 1-11, 2010.
- [29] C. Patcharachoenwong, K. Hemmek, and W. Kimpan, "Arrival Time Prediction Model to a Pier for Public Transportation Boats," *Journal of Science Ladkrabang*, vol. 29, no. 2, pp. 31-44, 2020.
- [30] P. Waramit, N. Weerayuth and U.Teeboonma, "Comparison of Hot Air Drying Model between Empirical Model and Artificial Neural Network Model," *Journal of*

- Science & Technology, Ubonratchathani University*, vol. 3, no. 1, pp. 60-68, 2016.
- [31] S. Wu, B. Zhang, Y. Tian, S. Zhou and H. Ma, "A grain moisture model based on capacitive sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1074, p. 012120, 2018.
- [32] S. Wu, B. Zhang, Y. Tian, S. Zhou and H. Ma, "A grain moisture model based on capacitive sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1074, p. 012120.
- [33] B. Besharati, A. Lak, H. Ghaffari, H. Karimi and M. Fattahzadeh, "Development of a model to estimate moisture contents based on physical properties and capacitance of seeds," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 318, p. 112513.

