

การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความก้าวหน้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาจริง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

DEVELOPMENT OF METHODS FOR REAL TIME MEASURING AND
EVALUATING THE PADDY MOISTURE CONTENT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering

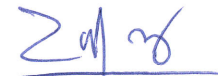
Suranaree University of Technology

Academic Year 2021

การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความก้าวหน้าเลือกตามเวลาจริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยในปีนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

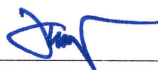
กรรมการ



(ผศ. ดร.กীরดี สุธักษณ์)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว : การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง (DEVELOPMENT OF METHODS FOR REAL TIME MEASURING AND EVALUATING THE PADDY MOISTURE CONTENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กระจวี ตรีอำรรค, 215 หน้า.

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก/ความชื้น/เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล type K และเซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับพัฒนาวิธีการวัดและการประเมินค่าความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ทดลองวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 26%w.b. ตลอดช่วงเวลาที่ถูกรอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ กำหนดอัตราการไหลของอากาศอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกคงที่ตลอดการทดสอบ วิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อสร้างแบบจำลองทำนายค่าความชื้นข้าวเปลือกด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุร่วมกับตัวแปรอุณหภูมิที่รับค่ามาจากเทอร์โมคัปเปิล type K ค่าอุณหภูมิกับความชื้นอากาศอบแห้งที่ได้จากเซ็นเซอร์ DHT22 ถูกใช้ในการประเมินหาความชื้นในข้าวเปลือกระหว่างอบแห้ง ผลพบว่าวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงที่พัฒนาขึ้นจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและเก็บประจุให้ค่าความชื้นข้าวเปลือกที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำในช่วงความชื้นข้าวระหว่าง 14%w.b. - 5%w.b. ระหว่างอบแห้ง ความชื้นดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเมล็ดพันธุ์ในระยะยาว ขณะที่การคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่รับค่ามาจากเซ็นเซอร์ DHT22 ร่วมกับการปรับแก้ค่าด้วย Factor n ให้ผลการวัดความชื้นที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำในช่วงความชื้นข้าวระหว่าง 26%w.b. - 14%w.b. ความชื้นข้าวเปลือกในช่วงนี้เหมาะสมสำหรับจัดเก็บเพื่อใช้บริโภคโดยทั่วไป ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ มีศักยภาพเพียงพอต่อการนำมาพัฒนาระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงได้ โดยช่วยให้การวัดความชื้นข้าวเปลือกมีความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำขึ้นกว่าวิธีการในปัจจุบัน

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. กระจวี ตรีอำรรค

APHISIK PAKDEEKAEW : DEVELOPMENT OF METHODS FOR REAL TIME MEASURING AND EVALUATING THE PADDY MOISTURE CONTENT. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 215 PP.

Keyword: Paddy/Moisture content/Non destructive technique

The purpose of this research was to apply an electronic sensor, namely resistive soil moisture sensor, capacitive soil moisture sensor, K-type thermocouple, and DHT22 sensor in real-time measuring method development and paddy moisture content evaluation. 26%w.b. initial moisture content of Khao Dok Mali 105 paddy was used in measuring test, while the paddy was dried by a pneumatic dryer with constant air temperature of 70°C and 80°C, respectively. The drying air flow rate and the paddy feed rate were kept constant throughout the test. Principal component analysis was applied for the analyzing of electrical signal data measured from resistive and capacitive moisture sensors with the paddy temperature measured by K-type thermocouple in experiments to create the prediction models of paddy moisture content by multiple linear regression analysis method. The humidity and temperature of drying air measured from DHT22 sensors were used to evaluate the paddy moisture content in drying process. The results showed that the developed real-time measuring and evaluating method used signals from both of resistive and capacitive soil moisture sensors provide low error prediction of paddy moisture content in the range of 14%w.b. - 5%w.b. during drying process. This moisture content range is suitable for long-term storage of paddy as a grain. Meanwhile, the real-time determination of paddy moisture content by temperature and humidity of air obtained from the DHT22 sensor combined with factor n correction give a moisture content of paddy with low error in the range of 26%w.b. - 14%w.b. The paddy moisture content in this range is suitable to storage for consumption purpose. This study indicated that the various type of sensors has the potential to be used to develop a real-time evaluation of paddy moisture content during the high temperature paddy drying process. In addition, it makes more convenient, faster, and more accurate than current measuring method.

School of Mechanical Engineering
Academic year 2021

Student's Signature Aphisik P.
Advisor's Signature Krawee Treeamnuk

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรัก ความเมตตากรุณา จากบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ทำให้ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งใจ และขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ สติปัญญา และให้คำปรึกษาด้วยความเมตตากรุณาอย่างดียิ่ง ตลอดจนเอาใจใส่ในการตรวจทานข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กীরติ สุลักษณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้ตรวจทาน แก้ไข และให้คำแนะนำอันมีประโยชน์ต่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณทินกร เพ็ญประโคน และ คุณจันทนา ลีลาน้ำเที่ยง ที่เสียสละเวลา แรงกาย แรงใจ เพื่อช่วยผู้วิจัยสร้างชุดทดลองสำหรับสอบเทียบอุปกรณ์การวัด ทำให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความราบรื่น รวมถึงรุ่นพี่และรุ่นน้องบัณฑิตศึกษาที่คอยเป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุก ๆ ฝ่ายที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือการทดลองต่าง ๆ สำหรับงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบทุนกิตติบัณฑิตให้แก่ผู้วิจัยสำหรับการสนับสนุนค่าครองชีพและค่าเล่าเรียนในระดับบัณฑิตศึกษาและการสนับสนุน การนำเสนอผลงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวภักดีแก้วทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและผลักดันด้านการศึกษาแก่ผู้วิจัยตลอดมา โดยเฉพาะ นายธนะช ภักดีแก้ว และ นางกริชฐาพัชร กวีพิสิษฐกุล บิดา - มารดาของผู้เขียน ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งทุนทรัพย์และวัสดุเกษตรสำหรับทำการทดลองตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

อภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้าวหอมมะลิไทย.....	4
2.2 การอบแห้งเมล็ดพืช	5
2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	5
2.2.2 ปริมาณความชื้นในเมล็ดพืช	7
2.2.3 การลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้ง.....	8
2.3 การตรวจสอบความชื้นในเมล็ดพืช	11
2.3.1 การวัดความชื้นด้วยวิธีตรง (Direct Method)	11
2.3.2 การวัดความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม (Indirect Method).....	12
2.4 คุณสมบัติของอากาศชื้น.....	18
2.4.1 ความดันไอของน้ำ (Vapor pressure).....	19
2.4.2 แผนภาพไซโครเมตริก (Psychrometric Chart).....	19
2.4.3 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature, T_{db})	20
2.4.4 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature, T_{wb}).....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.5	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-Point Temperature, T_{dp})	21
2.4.6	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity, RH).....	21
2.4.7	อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, ω)	22
2.4.8	เอนทาลปี (Enthalpy, H)	23
2.4.9	ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific Volume, v).....	23
2.5	กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ	24
2.6	การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบหลัก	26
2.7	การวิเคราะห์การถดถอย	28
2.7.1	การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย	28
2.7.2	การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุ	30
2.7.3	วิธีการนำตัวแปรเข้าสู่สมการสำหรับการวิเคราะห์การถดถอย	32
2.7.4	การอธิบายสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระ	33
3.	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	35
3.1	กรอบแนวคิดของการดำเนินงานวิจัย	35
3.2	วัสดุ อุปกรณ์ และการจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดลอง	36
3.2.1	วัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัย	37
3.2.1.1	การคัดแยกข้าวเมล็ดสีบและสิ่งเจือปนออกจากตัวอย่าง.....	37
3.2.1.2	การหาความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกด้วยวิธีอบลมร้อน	38
3.2.1.3	การเตรียมความชื้นข้าวสำหรับการทดลอง	39
3.2.2	เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง	40
3.2.3	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการวัด	43
3.2.4	การติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์กับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	46
3.3	การทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ วัดความชื้นในดินสำหรับวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน	48
3.3.1	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้า ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ	50
3.3.2	การศึกษารูปแบบของอุณหภูมิการวัดที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ของสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ.....	50
3.3.3 การวิเคราะห์สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีวิเคราะห์ การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ.....	50
3.3.4 การจัดการข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวเปลือก ของสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ	50
3.4 การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม	52
3.5 การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ.....	54
3.6 การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจาก เซ็นเซอร์ DHT22	55
4. ผลการดำเนินการวิจัย	60
4.1 ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน สำหรับวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน	60
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับ สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และชนิดเก็บประจุ.....	62
4.1.2 ผลของอุณหภูมิการวัดที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ของสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ	62
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีวิเคราะห์ การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ.....	64
4.1.4 ผลการจัดการข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวเปลือก ของสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ	65
4.2 ผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม.....	69
4.3 ผลการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ.....	74
4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาสมการสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากข้อมูลการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดชนิดเก็บประจุ	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C.....	78
4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาสมการสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากข้อมูลการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C.....	82
4.4 ผลการพัฒนาวีธีการวัดและประเมินประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง จากเซ็นเซอร์ DHT22.....	85
4.4.1 ผลการพัฒนาวีธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง จากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C.....	87
4.4.2 ผลการพัฒนาวีธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง จากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C.....	93
4.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพของวีธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือก ตามเวลาจริงที่พัฒนาขึ้น	97
4.5.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวีธีการวัดและประเมิน ความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C.....	99
4.5.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวีธีการวัดและประเมิน ความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C.....	100
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการวิจัย	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	103
รายการอ้างอิง	104
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รายละเอียดและการสอบเทียบเซ็นเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	109
ภาคผนวก ข โปรแกรม Arduino สำหรับระบบบันทึกข้อมูลการทดลอง.....	141
ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง.....	145
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงตัวเลขและสถิติด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics	183
ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา	197
ประวัติผู้เขียน	215

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวหอมมะลิไทย.....5
2.2	ปริมาณความชื้นสูงสุดที่แนะนำสำหรับการจัดเก็บเมล็ดพืชที่ปลอดภัย8
3.1	แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการวิเคราะห์ 53
4.1	สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากการวิเคราะห์ SLR ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ..... 62
4.2	ผลการประเมินความสามารถในการทำนายความชื้นข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิ..... 64
4.3	ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ 65
4.4	ความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบ 66
4.5	การเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายความชื้นของแบบจำลองจากวิธี PCA-MLR..... 66
4.6	การเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกระหว่างเทคนิค MLR กับ PCA-MLR..... 69
4.7	ค่าคงที่และผลความแม่นยำของแบบจำลองเอมพีริคัลแบบต่าง ๆ..... 71
4.8	ความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบ ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C..... 78
4.9	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA-MLR ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C 79
4.10	ความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบ ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C..... 82
4.11	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากการวิเคราะห์ ด้วยวิธี PCA-MLR ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C..... 83
4.12	การประเมินประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C 92
4.13	การประเมินประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C 96
4.14	ประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C..... 99
4.15	ประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C..... 100
ก.1	การสอบเทียบ K-Type Thermocouple ตัวที่ 1 111
ก.2	การสอบเทียบ K-Type Thermocouple ตัวที่ 2 112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3 สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระบบปิด.....	114
ค.1 ความชื้นข้าวเปลือกจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C.....	146
ค.2 ความชื้นข้าวเปลือกจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C.....	149
ค.3 การเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C.....	152
ค.4 การเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C.....	159
ค.5 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C.....	166
ค.6 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์ วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C.....	168
ค.7 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C.....	170
ค.8 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์ วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C.....	172
ค.9 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C.....	174
ค.10 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์ วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C.....	176
ค.11 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C.....	179
ค.12 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดยเซ็นเซอร์ วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C.....	181

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ข้าวหอมมะลิไทย.....4
2.2	การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุในกระบวนการอบแห้ง.....6
2.3	แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม.....9
2.4	เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต้นแบบ..... 10
2.5	เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอลสำหรับข้าวโพด ข้าวเปลือก..... 12
2.6	แผนภาพแสดงหลักการวัดความจุไฟฟ้า..... 13
2.7	เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก..... 14
2.8	เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบไร้สาย..... 15
2.9	เครื่องอบแห้งแบบไหลขวางและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบประเมินความชื้น..... 15
2.10	การวัดความชื้นข้าวจากกระดาษเคลือบโคบอลต์คลอไรด์..... 16
2.11	ระบบตรวจจับความชื้นด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR)..... 17
2.12	ระบบตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวในกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศภายในถัง..... 17
2.13	เครื่องมือวัดความชื้นธัญพืชในถุง..... 18
2.14	แผนภาพไซโครเมตริก..... 20
2.15	การวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก..... 20
2.16	กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นแก่อากาศ..... 24
2.17	เส้นกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อน..... 25
2.18	การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย..... 29
2.19	การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุ..... 30
3.1	การดำเนินงานวิจัย..... 35
3.2	ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105..... 36
3.3	การคัดแยกข้าวเมล็ดดีและสิ่งเจือปนออกจากตัวอย่าง ก) เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ โดยตะแกรงและแรงลม ข) สิ่งเจือปนที่ถูกแยกออกจากตัวอย่าง..... 37
3.4	การหาความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่..... 38
3.5	การเตรียมความชื้นข้าวสำหรับการทดลอง..... 39
3.6	เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในการทดลอง..... 41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	41
3.8	42
3.9	43
3.10	43
3.11	44
3.12	44
3.13	45
3.14	45
3.15	46
3.16	47
3.17	47
3.18	48
3.19	49
3.20	49
3.21	52
3.22	55
3.23	56
3.24	56
3.25	58
4.1	61
4.2	62
4.3	63
4.4	63
4.5	67
4.6	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C.....	70
4.8 ค่าเฉลี่ยของการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน	70
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกกับระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C	72
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกกับระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C	72
4.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C.....	73
4.12 การเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C.....	73
4.13 สัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งที่ 70°C.....	74
4.14 สัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งที่ 80°C.....	75
4.15 Component plot จากการวิเคราะห์ปัจจัย	77
4.16 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Calibration set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C	81
4.17 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Validation set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C.....	81
4.18 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Calibration set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C	85
4.19 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Validation set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C.....	85
4.20 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (จุดวัดที่ 1) ณ การอบแห้งที่ 70°C	86
4.21 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังอบแห้ง (จุดวัดที่ 2) ณ การอบแห้งที่ 70°C.....	86
4.22 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (จุดวัดที่ 1) ณ การอบแห้งที่ 80°C	87
4.23 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังอบแห้ง (จุดวัดที่ 2) ณ การอบแห้งที่ 80°C.....	87
4.24 ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศที่เวลาแตกต่างกัน ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C.....	88
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C.....	90
4.26 ค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C.....	90
4.27 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการวัดและประเมินจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C	91
4.28 ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศที่เวลาแตกต่างกัน ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C.....	93
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C.....	94
4.30 ค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C.....	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการวัดและระเมินจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C	95
4.32 ผลการทำนายความชื้นข้าวจากวิธีการประเมินความชื้นแบบต่าง ๆ ณ การอบแห้งที่ 70°C ...	98
4.33 ผลการทำนายความชื้นข้าวจากวิธีการประเมินความชื้นแบบต่าง ๆ ณ การอบแห้งที่ 80°C ...	98
ก.1 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	110
ก.2 การสอบเทียบ K-type Thermocouple ตัวที่ 1	113
ก.3 การสอบเทียบ K-type Thermocouple ตัวที่ 2	113
ก.4 การสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22.....	114
ก.5 ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศ.....	115
ก.6 ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	115
ข.1 Spreadsheet ของ PLX-DAQ สำหรับเก็บข้อมูล	142
ข.2 โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ	143
ข.3 โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพื่อพัฒนาวิธีประเมินความชื้นข้าวตามเวลาจริง	144
ง.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย	184
ง.2 การระบุตัวแปรที่ใช้สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์	185
ง.3 การกำหนดการแสดงผลทางสถิติ.....	185
ง.4 การตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล	186
ง.5 การบันทึกค่าผลลัพธ์จากการพยากรณ์ความชื้นข้าวด้วยแบบจำลองสมการเชิงเส้น	186
ง.6 หน้าต่างผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ SLR ด้วย IBM SPSS Statistics	187
ง.7 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ	187
ง.8 การระบุตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ MLR	188
ง.9 หน้าต่างผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ MLR ด้วย IBM SPSS Statistics.....	188
ง.10 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก.....	189
ง.11 การเลือกตัวแปรและกำหนดชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก.....	190
ง.12 การเลือกค่าสั่งแสดงค่าทางสถิติประกอบการพิจารณาข้อมูล.....	190
ง.13 การสกัดปัจจัยและเลือกวิธีหมุนแกนองค์ประกอบ.....	191
ง.14 การกำหนดให้โปรแกรมเก็บค่าขององค์ประกอบที่คำนวณได้เป็นตัวแปรใหม่	191

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.15	ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค PCA..... 192
ง.16	ผลลัพธ์ขององค์ประกอบหลักจากการวิเคราะห์ PCA..... 192
ง.17	การเลือกใช้ฟังก์ชัน Nonlinear สำหรับหาตัวแปรในแบบจำลองเอมพีริคัล..... 193
ง.18	การระบุตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข..... 194
ง.19	การกำหนดตัวแปรที่ต้องการทราบค่าและกำหนดค่าเริ่มต้นของการสุ่มตัวเลข..... 194
ง.20	การบันทึกผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากสมการเอมพีริคัล 195
ง.21	วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองเอมพีริคัล..... 195
ง.22	ผลเฉลยของการประมาณค่าตัวแปรด้วยวิธี Levenberg-Marquard..... 196



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักอันดับต้น ๆ ที่ประชากรมากกว่าครึ่งหนึ่งของโลกนิยมนำมาบริโภค นอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยที่เพาะปลูกข้าวเป็นอาชีพหลัก จากแผนการผลิตและตลาดข้าวครบวงจรในปี 2563/64 แสดงให้เห็นว่า ในปัจจุบันประเทศไทย มีแผนที่จะผลิตข้าวปริมาณ 30.865 ล้านตันข้าวเปลือก เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ข้าว โดยใช้เพื่อการบริโภคในประเทศปริมาณ 13.32 ล้านตัน ใช้ในอุตสาหกรรมและผลิตเมล็ดพันธุ์ 3.774 ล้านตัน ส่วนที่เหลือปริมาณ 11.693 ล้านตัน มีแผนที่จะส่งออกต่างประเทศเพื่อการค้าในรูปของข้าวสารและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ (กรมการข้าว, 2562) สร้างเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศไทยเป็นจำนวนมาก จึงนับได้ว่าข้าวเป็นพืชอาหารหลักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย

โดยทั่วไปการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวจะกระทำเมื่อถึงระยะเวลาที่เหมาะสม ข้าวเปลือก ซึ่งถูกเก็บเกี่ยวใหม่มักจะมีความชื้นสูงประมาณ 20 - 25% มาตรฐานเปียก จึงจำเป็นต้องดำเนินการลดความชื้นของข้าวเปลือกลงสู่ความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหาย และการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยหน่วยงาน International Rice Research Institute (IRRI) ได้ระบุถึงการลดความชื้นข้าวเปลือกให้เท่ากับหรือต่ำกว่า 14% สำหรับการจัดเก็บ ในระยะเวลา 8 - 12 เดือน นอกจากนี้ หากต้องการเก็บไว้ใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ จำเป็นต้องลดความชื้น ข้าวลงให้ต่ำกว่า 12% เพื่อให้สามารถเก็บรักษาข้าวได้โดยไม่เสื่อมคุณภาพ (IRRI, 2021)

การลดความชื้นข้าวเปลือกนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป เช่นการตากในลานกว้าง มีความเหมาะสมกับโรงสีขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตไม่มากนัก โดยส่วนใหญ่มักจะใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อน ซึ่งจำเป็นต้องมีวัสดุผ้าใบ ประกอบกับแรงงานคน และพื้นที่ในการตากแห้ง อีกวิธีหนึ่งคือการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่าง ๆ ในการลดความชื้นข้าวหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งมีข้อดีคือใช้พื้นที่ในการทำงานน้อยกว่าการตาก ในลานกว้างและสามารถควบคุมการลดความชื้นได้ในทุกฤดูกาล อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องอบแห้ง เพื่อลดความชื้นข้าว จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงในการทำงานของระบบ พลังงานนี้จึงถือเป็นปัจจัย ประการหนึ่งที่ต้องพิจารณา ทั้งนี้ เพราะเป็นต้นทุนที่สำคัญในกระบวนการผลิตข้าว ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่าง ๆ และทำการประเมินสมรรถนะ ของเครื่องเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ ตลอดจนผลกระทบที่ส่งผล ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากอบแห้ง อีกประการหนึ่งคือการควบคุมเครื่องอบแห้งให้สามารถ

ทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเพราะสามารถช่วยลดเวลาและพลังงานในการอบแห้งลงได้มาก อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาคุณภาพของข้าวเปลือกจากการที่ข้าวได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานเกินไป ในระหว่างการอบแห้งจนทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงซึ่งส่งผลต่อราคาจำหน่ายในที่สุด การควบคุมเครื่องอบแห้งในปัจจุบันนิยมใช้การประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบทางตรง โดยอาศัย การสุ่มตัวอย่างออกจากเครื่องอบแห้งมาจำนวนหนึ่งเพื่อวัดค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาต่าง ๆ ประกอบกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายหาเวลาสุดท้ายที่ความชื้นของข้าวเปลือก จะมีค่าเป็นไปตามความชื้นเป้าหมายที่กำหนด วิธีการนี้พบว่าเกิดปัญหาจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น ไม่ครอบคลุมสภาวะการทำงานจริงทั้งหมดและการสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อประเมินความชื้น ซึ่งมีความยุ่งยาก ต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานเฝ้าการทำงานของเครื่อง อีกทั้งการอ่านค่าความชื้น ของข้าวเปลือกไม่เป็นไปตามเวลาจริง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อประเมินด้วยแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ การใช้อุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์ช่วยวัดอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก หรือของอากาศอบแห้งในกระบวนการและนำมาคำนวณเป็นความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการ จึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาวิธีการวัดความชื้นข้าวทางอ้อม โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์รับรู้ค่าอุณหภูมิ กับความชื้นทั้งของข้าวเปลือกและของอากาศอบแห้งในเครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบที่มีอยู่ จากการวิจัยก่อนหน้า เพื่อวิเคราะห์และประเมินหาค่าความชื้นที่มีอยู่ในข้าวเปลือกที่เวลาต่าง ๆ ของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการประเมินความชื้นในวัสดุแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ทั้งนี้ เพื่อช่วย ลดปัญหาความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มและรอเวลาการตรวจวัด ช่วยให้การควบคุมเครื่องอบแห้ง มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลการทดลองที่เหมาะสมแก่การทำนาย ค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน
2. เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง ด้วยวิธีการทางอ้อม โดยไม่ทำลายตัวอย่างข้าว
3. เพื่อประเมินการทำงานของวิธีการตรวจวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง ที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผลิตในฤดูกาลเดียวกัน
2. ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ในการควบคุมระบบ
3. เปรียบเทียบผลการวัดความชื้นข้าวเปลือกกับวิธีการอบลมร้อนตามมาตรฐานของ

American Society of Agricultural Engineers (ASAE)

4. ทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ระดับห้องปฏิบัติการ จากงานวิจัยของจิตรารัตน์ จอกแก้ว (2559) ซึ่งผลิตอากาศอบแห้งจากพลังงานไฟฟ้า

5. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมแก่การทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือก จากการเตรียมตัวอย่างความชื้นข้าวเริ่มต้นประมาณ 26% (มาตรฐานเปียก) ที่ระดับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C

6. อัตราการไหลของอากาศอบแห้งและอัตราการป้อนข้าวเปลือกถูกกำหนดให้คงที่ตลอด การทดสอบ คือ 0.0631 m³/s (55 Hz of Inverter) และ 8.45 kg/min (30 Hz of Inverter) ตามลำดับ

7. วิธีการตรวจวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง ถูกพัฒนาโดยใช้อุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์ ต่อไปนี้

- ใช้โมดูลเซนเซอร์ DHT22 (AM2302) ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง

- ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุสำหรับวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน

- ใช้โมดูล K-Type Thermocouple (MAX6675) สำหรับวัดอุณหภูมิข้าวเปลือก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมแก่การทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2. ได้แนวทางการตรวจวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้อุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ

3. ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการตรวจวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงที่พัฒนาขึ้น

4. วิธีการตรวจวัดความชื้นเมล็ดพืชทางอ้อมที่พัฒนาขึ้น สามารถเป็นประโยชน์แก่การตรวจวัดความชื้นเมล็ดพืชระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตลอดจนเข้าไปแก้ไขข้อจำกัดบางประการในขั้นตอนดำเนินการของเครื่องอบแห้งได้ เช่นการใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับข้าวหอมมะลิไทยที่นำมาใช้ในงานวิจัย ทฤษฎีการอบแห้งวัสดุเกษตร การวัดความชื้นและการหาปริมาณความชื้นในวัสดุเกษตร อันได้แก่ ความชื้นมาตรฐานแห้งและความชื้นมาตรฐานเปียก คุณสมบัติของอากาศ กระบวนการลดอุณหภูมิ และเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ หลักการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงตัวเลขและสถิติ ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง ในกระบวนการของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ข้าวหอมมะลิไทย



รูปที่ 2.1 ข้าวหอมมะลิไทย (ไทยรัฐ ออนไลน์, 2563)

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักชนิดหนึ่งที่คนไทยนิยมนำมาแปรรูปเพื่อการบริโภค อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์กับวิถีชีวิตของคนไทยนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกข้าวเป็นหลัก และส่งออกข้าวไปยังต่างประเทศ นอกจากนี้ยังมีความโดดเด่นด้านรสชาติและกลิ่นหอม เฉกเช่น ข้าวหอมมะลิไทย (รูปที่ 2.1) มีชื่อทางการค้าว่า “ THAI HOM MALI RICE ” ตามมาตรฐานสินค้าเกษตร แบ่งข้าวหอมมะลิไทยออกเป็น 3 ประเภทตามระดับของการแปรรูปสินค้า ได้แก่ ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

การสั่งสมความรู้และวิทยาการทางชีวภาพเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของข้าวที่เพาะปลูกในแต่ละพื้นที่ พันธุ์ข้าวจึงได้ถูกปรับปรุงและทำให้เกิดพัฒนาการของพันธุ์ข้าวขึ้น (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2554) โดยในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีการเพาะปลูกข้าวหอมมะลิเป็นส่วนใหญ่ และพบมากใน 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ กข 15 ซึ่งมีลักษณะประจำพันธุ์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวหอมมะลิไทย

หัวข้อ	พันธุ์ข้าวหอมมะลิไทย	
ชื่อพันธุ์ (ไทย)	ขาวดอกมะลิ 105	กข 15
ชื่อพันธุ์ (อังกฤษ)	KHAO DAWK MALI 105	RD. 15
ปริมาณแอมิโลส (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	13.0 ถึง 18.0	13.0 ถึง 18.0
ความไวต่อช่วงแสง	ไวต่อช่วงแสง	ไวต่อช่วงแสง
สีของข้าวเปลือก	ฟาง	ฟาง
หางของข้าวเปลือก	ไม่มี	ไม่มี
ความยาวเมล็ดข้าวเปลือก (มิลลิเมตร)	9.7 ถึง 11.5	9.8 ถึง 11.6
ความยาวเมล็ดข้าวกล้อง (มิลลิเมตร)	7.0 ถึง 8.1	7.0 ถึง 8.1
อัตราส่วนความยาวต่อความ กว้างของเมล็ดข้าวกล้อง	$\geq 3.2 : 1$	$\geq 3.2 : 1$
น้ำหนักของข้าวเปลือก 100 เมล็ด (กรัม)	2.50 ถึง 2.97	2.50 ถึง 2.97
ระดับค่าการสลายเมล็ดในต่าง	6.0 ถึง 7.0	6.0 ถึง 7.0

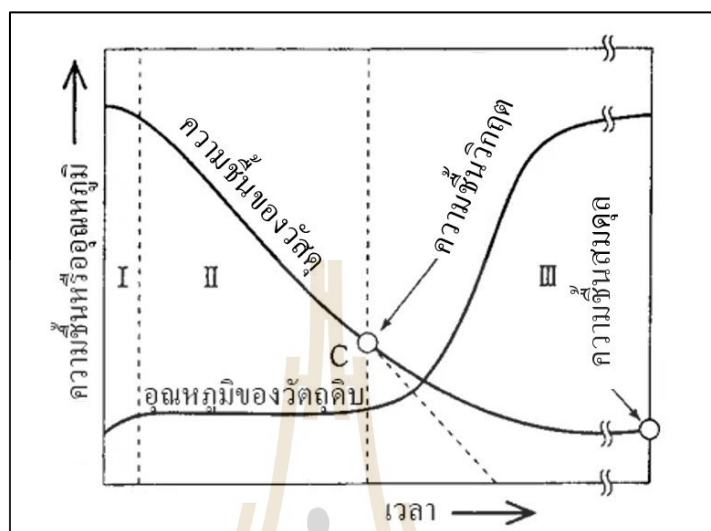
ที่มา: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2560); วิชา ธิติประเสริฐ และคณะ (2544)

2.2 การอบแห้งเมล็ดพืช

2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) เป็นกระบวนการลดปริมาณความชื้นในวัสดุลง วิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้น เพื่อกำจัดความชื้นให้ระเหยออกไปจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นผลดีในการช่วยยืดอายุหรือระยะเวลาการเก็บรักษาผลผลิตให้นานยิ่งขึ้น

การลดปริมาตรและน้ำหนักของวัสดุจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งผลิตภัณฑ์ลดลงได้ หรือแม้แต่ในบางกรณี การอบแห้งอาจช่วยให้กระบวนการผลิตดีขึ้นได้ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุในกระบวนการอบแห้ง (iEnergyGuru, 2015)

ฤทธิชัย อัครราชันย์ (2554) ได้จำแนกช่วงของอัตราการอบแห้งออกเป็น 3 ระดับ แสดงดังในรูปที่ 2.2 ประกอบไปด้วย

- I. ช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิแก่วัสดุ (Heating – up period)
- II. ช่วงของการอบแห้งคงที่ (Constant drying period)
- III. ช่วงของการอบแห้งลดลง (Falling drying period)

หัวใจหลักของกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนผ่านตัวกลางไปยังวัสดุอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิสมดุลที่เป็นเงื่อนไขการอบ (Heating – up period) จากนั้นจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลชื้นที่ผิวของวัสดุ โดยความชื้นจากภายในวัสดุที่เคลื่อนมาที่ผิวจะเท่ากับอัตราการระเหยความชื้นที่ผิวของวัสดุอบแห้ง (Constant drying period) เมื่ออบต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความชื้นในวัสดุเริ่มลดลง ส่งผลให้อัตราการแพร่ของความชื้นจากภายในวัสดุไปยังพื้นผิวช้ากว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวของวัสดุอบแห้ง จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วงของการระเหยน้ำมีค่าลดลง (Falling drying rate period) และการระเหยจะสิ้นสุดลงเมื่อถึงจุดความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ซึ่งจะสัมพันธ์กับเงื่อนไขของอากาศที่ใช้สำหรับลดความชื้นในวัสดุนั้น ๆ

ความชื้นในเมล็ดพืชนั้นมีทั้งที่เกาะอยู่กับผิวของวัสดุ ซึ่งสามารถไล่ความชื้นนี้ออกไป ได้โดยการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังมีความชื้นที่อยู่ภายในผนังด้านในท่อเล็ก ๆ (Capillaries) ที่อยู่ในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นไปได้ค่อนข้างยากที่จะไล่ความชื้นนี้ออกได้หมด

2.2.2 ปริมาณความชื้นในเมล็ดพืช

ปริมาณความชื้นภายในเมล็ดพืช (Moisture content) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณ น้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช โดยเป็นสัดส่วนต่อมวลของเมล็ดพืชหรือมวลแห้งของเมล็ดพืชนั้นๆ แสดงได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

1) ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, %w.b.) คือ อัตราส่วนมวลของ น้ำในวัสดุต่อมวลวัสดุขึ้น สามารถหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100\% \quad (2.1)$$

โดยที่ M_w คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.)

m_w คือ มวลวัสดุขึ้น (kg)

m_d คือ มวลวัสดุแห้ง (kg)

2) ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, %d.b.) คือ อัตราส่วนมวลของน้ำ ในวัสดุต่อมวลวัสดุแห้ง สามารถหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้

$$M_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (2.2)$$

โดยที่ M_d คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

m_w คือ มวลวัสดุขึ้น (kg)

m_d คือ มวลวัสดุแห้ง (kg)

โดยทั่วไปการซื้อขายสินค้าทางการเกษตรของประเทศไทย นิยมใช้ความชื้น ตามมาตรฐานเปียกเป็นเปอร์เซ็นต์ในการกำหนดราคาซื้อขายสินค้า ในขณะที่ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์การอบแห้งเชิงทฤษฎี โดย สมชาติ โสภณธรณฤทธิ (2540) ระบุถึงมวล แห้งของวัสดุที่เป็นสัดส่วนของปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง มีค่าค่อนข้างคงที่ จึงทำให้มีความ สะดวกในการคำนวณหรือการวิเคราะห์ผลในเชิงทฤษฎีเป็นอย่างมาก

2.2.3 การลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้ง

ผลผลิตทางการเกษตรหลังจากการเก็บเกี่ยวสดใหม่จะยังมีความชื้นสูง หากไม่มีการลดความชื้นวัสดุลงไปยังจุดที่เหมาะสมอย่างทันท่วงที อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อผลผลิตทางการเกษตรได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องนำผลผลิตเหล่านั้นมาอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกไปยังจุดที่เหมาะสมต่อเงื่อนไขก่อนการนำไปจัดเก็บ โดยตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณความชื้นสูงสุดที่แนะนำสำหรับการเก็บรักษาเมล็ดพืชบางชนิดอย่างปลอดภัย

ตารางที่ 2.2 ปริมาณความชื้นสูงสุดที่แนะนำสำหรับการจัดเก็บเมล็ดพืชที่ปลอดภัย

เมล็ดธัญพืช	ปริมาณความชื้น (%w.b.)	
	การจัดเก็บระยะสั้น (น้อยกว่า 6 เดือน)	การจัดเก็บระยะยาว (นานกว่า 6 เดือน)
Barley	14	12
Corn	15.5	13
Beans	16	13
Millet	10	9
Rice	13	12
Sorghum	13.5	13
Soybean	13	11
Non-Oil Sunflower	11	10
Oil Sunflower	10	8
Flex Seed	9	7
Wheat	14	13
Oats	14	13
Pea-Cowpea	15	13

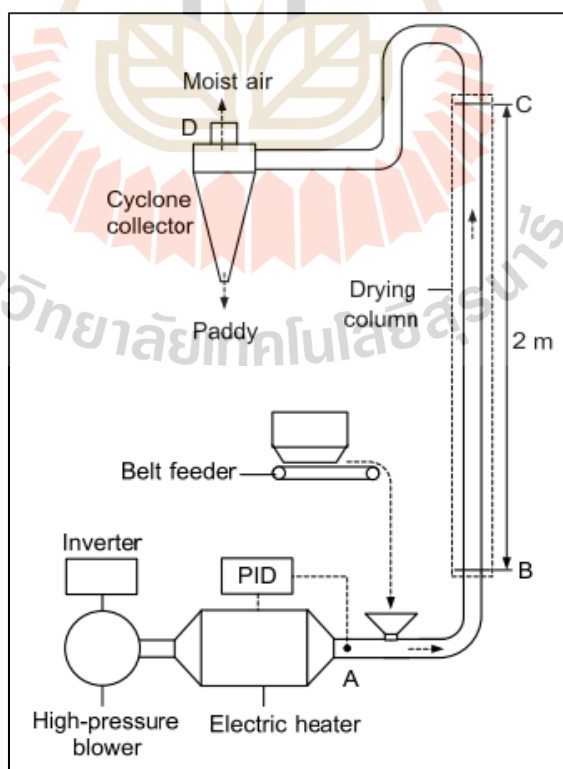
ที่มา: Sisman and Albut (2010)

สำหรับกรณีการลดความชื้นข้าวเปลือกแบบดั้งเดิม (Traditional drying method) มีข้อจำกัดบางประการที่เป็นอุปสรรคต่อการลดความชื้นของข้าว ทำให้ผู้ประกอบการบางรายหันมาลงทุนและใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก (Mechanical drying method) มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การดำเนินงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกดังกล่าว จำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบ

ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ซึ่งถือเป็นต้นทุนอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาผนวกกับราคาสินค้า ฉะนั้นความคุ้มค่าด้านพลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต่อผลได้ จึงเป็นความท้าทายของนักวิจัย ที่ต้องทำการพัฒนาระบบต่อไป

จากการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับประเภทของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช พบว่า สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2540) ได้เสนอการจำแนกชนิดของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช ตามลักษณะ ทางจลน์ของเมล็ดระหว่างกระบวนการอบแห้ง เป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (Fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving-bed dryer) โดยเครื่องอบแห้ง ที่นำมาใช้สำหรับศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) จัดอยู่ในหมวดของเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving-bed dryer) เนื่องจากขณะเครื่องอบแห้ง ทำงาน ข้าวเปลือกมีการลอยตัวเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสของอากาศอบแห้งที่มีแรงค่าหนึ่ง ที่สามารถเอาชนะน้ำหนักของข้าวเปลือกขึ้นได้

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมถูกนำมาใช้ในการลดความชื้นวัสดุที่เป็นผงหรือ ของแข็งที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งมีค่าสูง ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยและประหยัดพลังงานที่ใช้ โดยเครื่องแห้งแบบพาหะลมมีพื้นฐานและ หลักการทำงานดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธ์ และคณะ, 2559)

ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานันท์ ตันภูมิ, ฉัตรชัย นิยมมล และ กิตติ สถาพรประสาธน์ (2559) เสนอการลดความชื้นของข้าวเปลือก โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (รูปที่ 2.3) ที่มีการผลิตอากาศร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ส่งมารับความชื้นของข้าวเปลือกที่ห้องอบแห้ง (Drying column) ก่อนที่อากาศชื้นจะถูกแยกออกจากข้าวเปลือกที่ไซโคลน (Cyclone collector) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งเพียงสองรอบ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีส่วนเข้ามาเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในแง่ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)



รูปที่ 2.4 เครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบ (จิตรารัตน์ จอกแก้ว, 2559)

จิตรารัตน์ จอกแก้ว (2559) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมเครื่องอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนและไม่ติดตั้งไซโคลน สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบในการลดความชื้นข้าวเปลือก (รูปที่ 2.4) โดยเครื่องอบแห้งพาหะลมนี้ออกแบบมาเพื่อทำงานโดยการสร้างความร้อนจากเครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) โดยมีเครื่องเป่าลม (Blower) ในการขับเคลื่อนอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ในขณะที่ความชื้นของข้าวเปลือกถูกถ่ายเทจากถังเก็บข้าวโดยสกรูลำเลียงเมล็ดพืชที่มีมอเตอร์เป็นต้นกำลัง เมื่อข้าวถูกลำเลียงมายังทางเข้าของห้องอบแห้ง ข้าวจะถูกอากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำพาความชื้นในเมล็ดออกไปสู่อากาศ ส่งผลให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นและมีอุณหภูมิลดลง จากนั้นข้าวจะถูกอากาศดังกล่าวเป่าให้ลอยเข้าสู่ถังเก็บข้าวและวนรอบการทำงานใหม่เรื่อย ๆ จนกระทั่งความชื้นข้าวเปลือก

ลดลงถึงค่าประมาณความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนสามารถลดความชื้นข้าวดีกว่าแบบติดตั้งไซโคลน ที่สภาวะอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 80°C ในอัตราการไหลของอากาศ 0.0631 m³/s (55 Hz) และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 8.45 kg/min (30 Hz) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุดที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบเป็น 36.84%

2.3 การตรวจสอบความชื้นในเมล็ดพืช

โดยทั่วไปการตรวจสอบความชื้นเมล็ดพืชแบ่งได้เป็น 2 วิธีการหลักๆ คือ การตรวจสอบความชื้นด้วยวิธีตรงและการตรวจสอบความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม โดยทั้งสองวิธีการมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันออกไป ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.1 การวัดความชื้นด้วยวิธีตรง (Direct Method)

การตรวจสอบความชื้นด้วยวิธีตรง เป็นการหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช โดยทั่วไปจะอาศัยหลักการอบเมล็ดด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อไล่น้ำที่มีอยู่ในเมล็ดให้ออกไป โดยปริมาณน้ำที่ถูกไล่ออกจากเมล็ด คือความชื้นของเมล็ดนั่นเอง วิธีการตรวจสอบความชื้นที่เป็นวิธีมาตรฐานคือ วิธีการอบด้วยลมร้อนอุณหภูมิคงที่ (Hot Air Oven Method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในการนำมาใช้สำหรับการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นในเมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังถูกระบุขึ้นตอนรวมถึงวิธีการหาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพืชไว้อย่างชัดเจนในระดับสากล เช่น วิธีของหน่วยงาน Association of Official Analytical Chemists (AOAC) หรือ American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE) เป็นต้น

วิธีการอบด้วยลมร้อนอุณหภูมิคงที่ (Hot Air Oven Method) เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ตรวจหาปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือก ดังเช่นงานวิจัยของ จิตรารัตน์ จอกแก้ว (2559) ที่ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้ง 10 กรัม ลงในถ้วยอลูมิเนียมเพื่อนำข้าวเปลือกนี้เข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำที่ออกจากเมล็ดข้าว โดยอ้างอิงวิธีการของ AOAC นอกจากนี้ ในการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ในขั้นตอนของการวัดความชื้นข้าว ปิยะพล พุ่งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานันท์ ต้นภูมิ, ฉัตรชัย นิยมผล และ กิตติ สถาพรประสาธน์ (2559) ได้นำตัวอย่างข้าวเปลือกจากกระบวนการอบแห้งมาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณความชื้นในเมล็ดจากสมการที่ 2.1 หรือ 2.2 ดังที่กล่าวมา

จะเห็นว่า การวัดความชื้นมาตรฐานที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป (วิธีอบลมร้อน) ให้ผลการวัดที่แม่นยำสูงในระดับที่เป็นข้อมูลสำหรับฐานการสอบเทียบได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เวลานานในการอบไล่น้ำออกจากเมล็ดพืช อีกทั้งการทำความร้อนให้กับระบบจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง สิ่งนี้จึงเป็นข้อจำกัดในการตรวจวัดความชื้นสำหรับวิธีการดังกล่าว

2.3.2 การวัดความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม (Indirect Method)

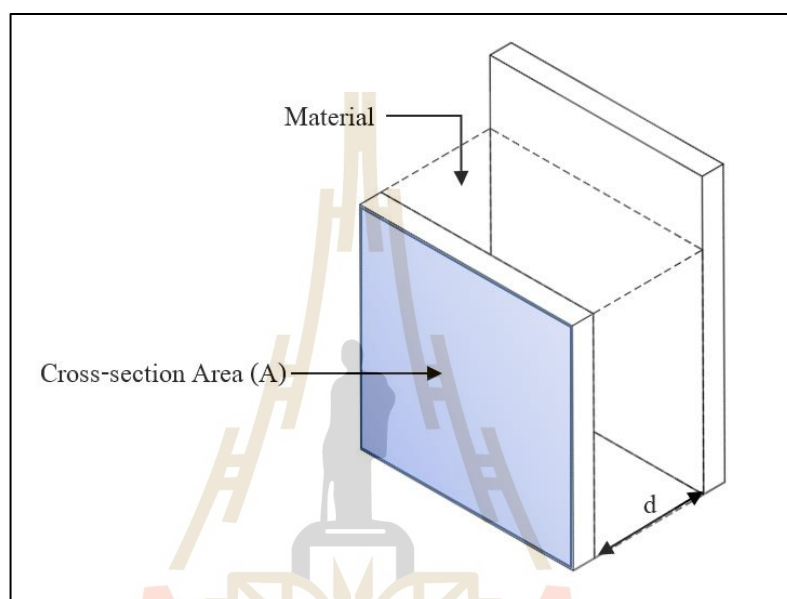
การตรวจสอบความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม เป็นการหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช โดยอาศัยหลักการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมล็ดพืช จากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การนำไฟฟ้า/ความต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่มาของเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชที่มักจะพบเห็นได้ในทางการค้าจุดเด่นของวิธีการนี้ คือความสะดวกรวดเร็วในการตรวจวัดเมื่อเทียบกับการวัดด้วยวิธีตรง แต่มีจุดด้อยคือค่าที่ได้จากการวัด เป็นค่าที่มาจากการประมาณการ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความแม่นยำในการวัด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยร่วมอย่างอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด จึงจำเป็นจะต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดอยู่เสมอก่อนนำมาใช้งาน การวัดความชื้นด้วยวิธีทางอ้อม สามารถวัดได้หลากหลายวิธี เช่น



รูปที่ 2.5 เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอลสำหรับข้าวโพด ข้าวเปลือก (Nanagarden, 2563)

1. การวัดความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ใช้หลักการของความนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้า สำหรับออกแบบเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืช มีลักษณะดังรูปที่ 2.5 โดยเครื่องมือนี้จะมีวงจรสร้างความถี่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ จ่ายให้กับโพรบโลหะที่เป็นคู่ วางห่างกันเป็นระยะคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเสียบโพรบโลหะลงในกองเมล็ดพืช สัญญาณไฟฟ้าจะไหลผ่านเมล็ดพืชได้ดีหากเมล็ดพืชมีความชื้นสูงและหากเมล็ดพืชมีความชื้นน้อยสัญญาณไฟฟ้าจะไหลผ่านได้น้อยลง ซึ่งกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับค่าความชื้น ในขณะที่ความต้านทานจะแปรผกผันกับความชื้นในเมล็ดพืช สัญญาณที่ได้จะถูกนำมาสอบเทียบและแปรค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพืชในแต่ละชนิด (ธนากร สุนทรวิวัฒน์, 2561)

2. การวัดความจุไฟฟ้า (Capacitance) ใช้หลักการของค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้น ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric material) ที่อยู่ระหว่างแผ่นคู่ขนานของตัวเก็บประจุ โดยเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) สูง เมล็ดพืชที่มีความชื้นน้อยจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน้อยตามไปด้วย รูปที่ 2.6 แสดงหลักการพื้นฐานและตัวแปรที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงหลักการวัดความจุไฟฟ้า (ดัดแปลงจาก: พิพัฒน์ อมตฉายา, 2556)

พิพัฒน์ อมตฉายา (2556) แสดงการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดความจุ (Capacitive transducer) ซึ่งความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 นอกจากนี้การใช้วงจรบริจด์เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าจากการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของความจุ จากสมการที่ 2.4

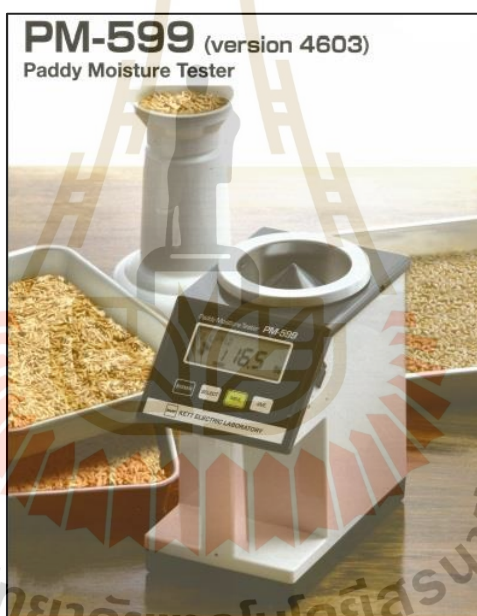
$$C = 0.0885 E_0 \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

โดยที่	C	คือ ความจุไฟฟ้า (Pico farads)
	E_0	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดที่บัพซ้อนของแผ่นโลหะคู่ขนาน (cm^2)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ (cm)

$$Z_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.4)$$

โดยที่	Z_c	คือ อิมพีแดนซ์เอาต์พุตของความจุ (Ω)
	f	คือ ความถี่ (Hz)
	C	คือ ความจุไฟฟ้า (F)

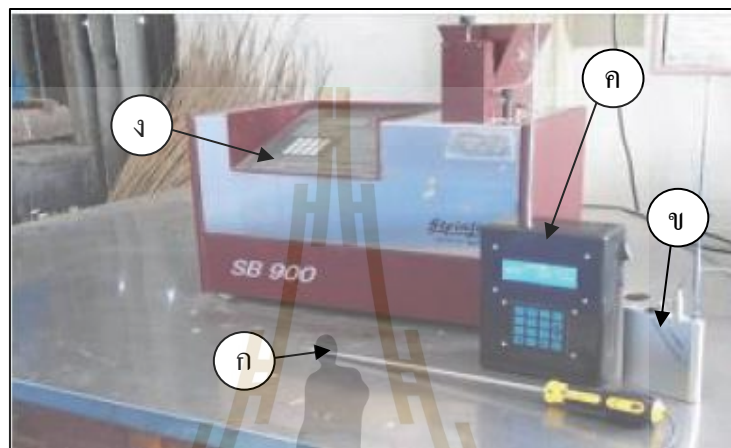
จากหลักการดังกล่าว จึงเป็นที่มาของเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชโดยอาศัยการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Dielectric Methods, Capacitance) ที่พบเห็นในปัจจุบันในทางการค้าอุปกรณ์มีลักษณะดังรูปที่ 2.7



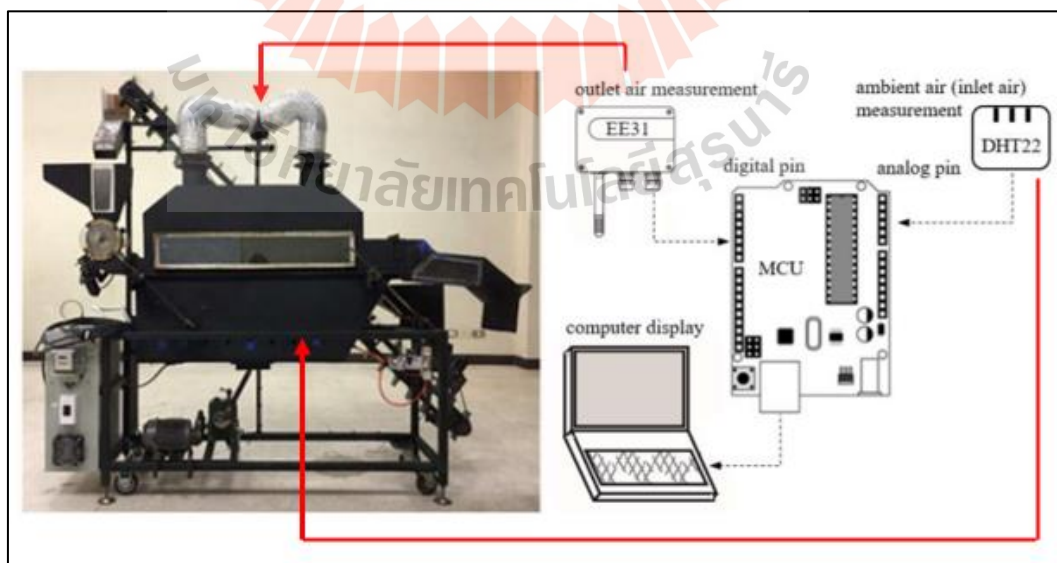
รูปที่ 2.7 เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก (เลกะ คอร์ปอเรชั่น, 2563)

3. การวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (Relative Humidity of Air) เป็นการวัดความชื้นในเมล็ดพืชจากการใช้อุปกรณ์รับรู้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพื่อแปรค่าผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความชื้น วิธีการนี้สามารถใช้เทคนิคในการวัดได้หลากหลายรูปแบบตามความเหมาะสมของอุปกรณ์ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการเสียบวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณช่องว่างของกลุ่มเมล็ดข้าวเปลือก และแปรค่าผลลัพธ์เป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกส่งไปยังแอปพลิเคชันของโทรศัพท์มือถือผ่านเครือข่ายไร้สาย (อรสุดา แทนสระน้อย และ สนั่น การค้า, 2562) นอกจากนี้ กนกศักดิ์ บุญทัน และ ประภาศิต

ต้นตอโครงการ (2558) ได้ใช้หลักการเดียวกันนี้ ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกแบบไร้สาย ดังรูปที่ 2.8 ประกอบไปด้วย (ก) แท่งเสียบวัดค่าความชื้น (ข) ภาควัดค่าความชื้น และ (ค) ภาครับค่าเพื่อแสดงผล โดยเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่อง (ง) Moisture Meter รุ่น SB900 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.5% เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำกับเครื่องวัดความชื้นข้าวทางการค้า



รูปที่ 2.8 เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบไร้สาย
(กนกศักดิ์ บุญทัน และ ประกาศิต ต้นตอโครงการ, 2558)



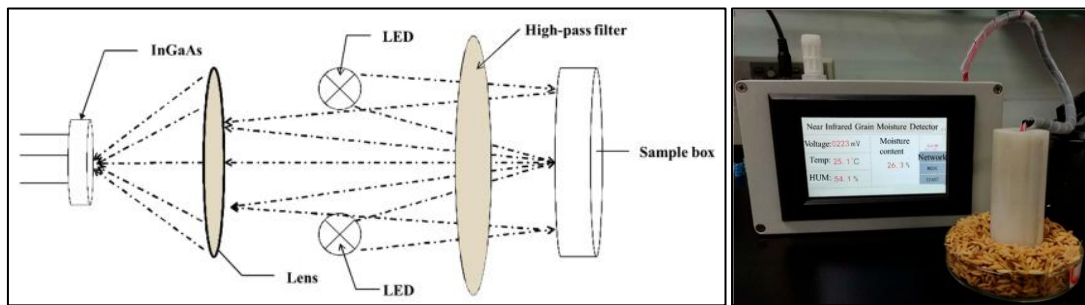
รูปที่ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวางและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบประเมินความชื้น
(ดัดแปลงจาก: Hemhirun and Bunyawanichakul, 2020)

Hemhirun and Bunyawanichakul (2020) เสนอการใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทั้งขาเข้า (DHT22-Sensor) และขาออก (EE31-Sensor) จากเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง เพื่อศึกษาการเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ (รูปที่ 2.9) อีกทั้งยังประเมินความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกด้วยวิธีสมมูลมวล และเปรียบเทียบผลการประเมินความชื้นกับเครื่องตรวจจับความชื้นข้าวเปลือก KETT (Riceter F512) ผลการศึกษาครั้งนี้ประสบความสำเร็จในการนำเอาเซนเซอร์ดังกล่าวมาใช้อ่านและบันทึกข้อมูลได้ ความชื้นสุดท้ายจากการประเมินด้วยวิธีสมมูลมวล ยังให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับเครื่องตรวจจับความชื้นโดยมีค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด 4.3 % นอกจากนี้ ผลจากการนำเสนอเทคนิคในการประเมินความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งดังกล่าวถูกต่อยอดสู่การพัฒนากระบวนการอบแห้งแบบมีสทไฟพลวในที่สุด ดังนั้นพื้นฐานความเข้าใจในคุณสมบัติของอากาศ ดังหัวข้อที่ 2.4 จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคนิคนี้ต่อไปในอนาคต (สรุชัย เหมหิรัญ, 2563)

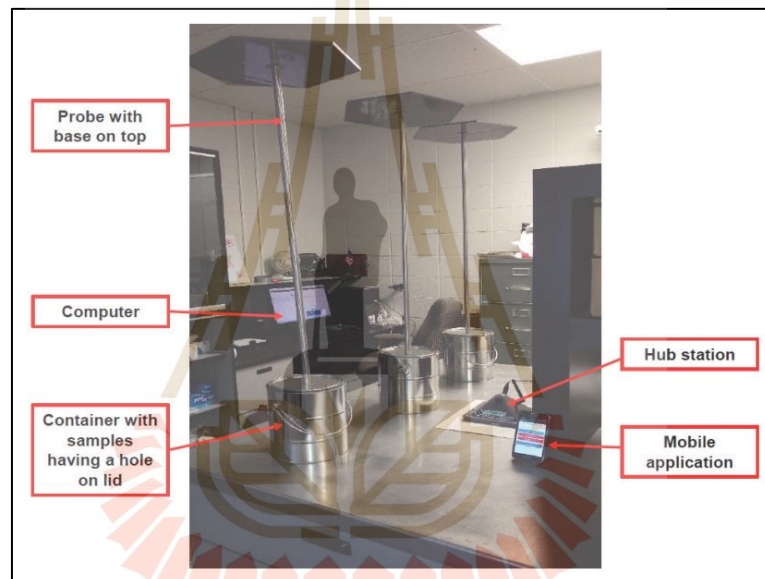
เพื่อเป็นการลดข้อจำกัดของการตรวจวัดความชื้นข้าวด้วยวิธีตรง ทำให้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งให้ความสนใจในการพัฒนาเทคนิคในการประเมินความชื้นข้าวด้วยหลักการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive Technique) เพื่อแก้ปัญหาที่พบเจอจากการที่วิธีทางตรงไม่สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างทันทั่วทั้งที่ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Pathaveerat and Pruengam (2020) พัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นในข้าวเปลือกจากการเปลี่ยนสีของกระดาษเคลือบโคบอลต์คลอไรด์ ที่มีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์สมมูลของอากาศในชวดโหลสุญญากาศ ซึ่งบรรจุข้าวเปลือกขึ้นอยู่ภายใน (รูปที่ 2.10) โดยความชื้นของข้าวเปลือกสังเกตได้จากย่านแถบสีที่เปลี่ยนแปลงไปของกระดาษ ข้อดีของอุปกรณ์ดังกล่าวคือมีต้นทุนต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้



รูปที่ 2.10 การวัดความชื้นข้าวจากกระดาษเคลือบโคบอลต์คลอไรด์
(Pathaveerat and Pruengam, 2020)



รูปที่ 2.11 ระบบตรวจจับความชื้นด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Lin et al., 2019)



รูปที่ 2.12 ระบบตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวในกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศภายในถัง (Luthra, Shafiekhani, Stephens, Sadaka, and Atungulu, 2019)

Lin et al. (2019) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นข้าวด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) ดังรูปที่ 2.11 ผลการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์เมื่อตรวจสอบกับข้าวที่มีความชื้นในช่วง 13 - 30% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.936 และ ผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด (SSE) เป็น 25.47 จุดเด่นของเทคนิคนี้คือ ให้ผลการวัดที่รวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีในการตรวจสอบคุณภาพข้าวเปลือกในระหว่างการผลิต การขนส่ง และกระบวนการจัดเก็บ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Heman and Hsieh (2019) ซึ่งได้พัฒนาระบบการวัดอัตโนมัติเพื่อกำหนดปริมาณความชื้นในข้าวเมล็ดเดียวโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ซึ่งมีส่วนประกอบ ได้แก่ เครื่องสั่น แผ่นหมุน สเปกโตรมิเตอร์ และพีซี โดยใช้การทดสอบบนวิธีพื้นผิว การตอบสนอง (RSM) ด้วยแผนการทดลองแบบ Box-Behnken สำหรับหาจุดดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดของระบบนี้ ถึงแม้ว่าวิธีการนี้สามารถให้ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกที่มีความแม่นยำในระดับที่เชื่อถือได้ แต่กลับพบว่าเครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูงและการใช้งานมีความซับซ้อนพอควร สิ่งเหล่านี้เป็นข้อจำกัดที่พบได้จากการศึกษาในปัจจุบัน ในแง่มุมของระบบอบแห้งภายในถัง พบว่า Luthra, Shafiekhani, Stephens, Sadaka, and Atungulu (2019) ได้ประเมินประสิทธิภาพหั่ววัดไร้สายสำหรับตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นของข้าวในกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศภายในถัง (On-farm in-bin drying process) ดังรูปที่ 2.12 หั่ววัดดังกล่าวมีความแม่นยำสูง โดยรายงานค่าสหสัมพันธ์ (r) ระหว่างความชื้นที่ตรวจวัดได้กับความชื้นมาตรฐาน มีค่าเป็น 0.989 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.979 อีกทั้งยังติดตั้งง่ายและมีค่าบำรุงรักษาต่ำ จึงมีประโยชน์สำหรับการตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นของข้าวภายในถังเป็นอย่างมาก ในขณะที่ Joaquin, Ramos, and Martinez (2019) มุ่งพัฒนาหั่ววัดความชื้นข้าวและข้าวโพดชนิดความจุแบบใช้ความถี่ที่สัมพันธ์กับความชื้นเมล็ดพืช ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งให้ผลความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามที่ R^2 ประมาณ 0.94 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการวัดอยู่ที่ 0.24% (Mean error) สำหรับการทดสอบภาคสนามจริง เครื่องมือนี้จัดเป็นเครื่องมือทางเลือกต้นทุนต่ำสำหรับวัดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ซึ่งเหมาะแก่การวัดความชื้นธัญพืชในถุง



รูปที่ 2.13 เครื่องมือวัดความชื้นธัญพืชในถุง (Joaquin, Ramos, and Martinez, 2019)

2.4 คุณสมบัติของอากาศชื้น

อากาศ เป็นของผสมเนื้อเดียวอยู่ในสถานะแก๊ส มีองค์ประกอบมาจากไอน้ำและแก๊สหลายชนิดปะปนกัน โดยอากาศแห้งจะเป็นอากาศที่ไม่มีไอน้ำเป็นส่วนประกอบ ฉะนั้นอากาศรอบตัวเราที่มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า อากาศชื้น ซึ่งอากาศชื้นนี้มีความจำเป็นอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตและกระบวนการต่าง ๆ ทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะกระบวนการอบแห้งที่ใช้อากาศชื้น

เป็นตัวกลางในการลดความชื้นของวัสดุ จึงมีความจำเป็นสำหรับผู้ที่สนใจศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้ง วัสดุที่ต้องทำความเข้าใจคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศขึ้นดังต่อไปนี้

2.4.1 ความดันไอของน้ำ (Vapor pressure)

ไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศจะประพฤติตัวเป็นแก๊ส ซึ่งมีความดัน เรียกว่าความดันไอ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เมื่อความดันไอน้ำอยู่ในจุดสมดุลกับสถานะของเหลวที่อุณหภูมิต่อ ๆ ความดัน ณ จุดนั้นเรียกว่า ความดันไออิ่มตัว (Saturation vapor pressure) ซึ่งจำเป็นต้องใช้เพื่อกำหนด คุณสมบัติของอากาศชื้นหรือคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยความดันไออิ่มตัว ในช่วงอุณหภูมิ 0 - 200°C คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 (ASHRAE, 2009)

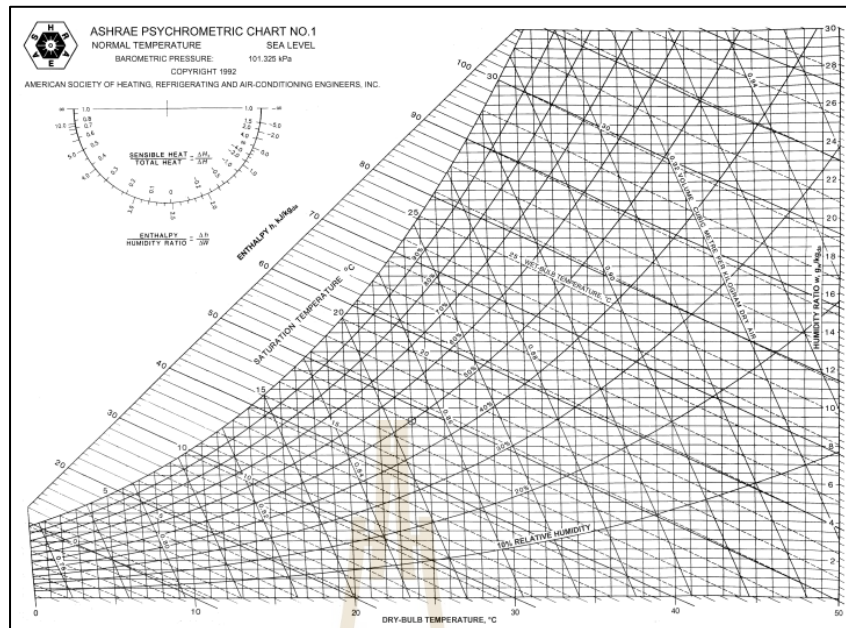
$$\ln P_{vs} = \frac{C_1}{T_{db}} + C_2 + C_3 T_{db} + C_4 T_{db}^2 + C_5 T_{db}^3 + C_6 \ln T_{db} \quad (2.5)$$

โดยที่	P_{vs}	คือ ความดันไออิ่มตัว (Pa)
	T_{db}	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (K)
	C_1	คือ -5.8002206 E+03
	C_2	คือ 1.3914993 E+00
	C_3	คือ -4.8640239 E-02
	C_4	คือ 4.1764768 E-05
	C_5	คือ -1.4452093 E-08
	C_6	คือ 6.5459673 E+00

2.4.2 แผนภาพไซโครเมตริก (Psychrometric Chart)

แผนภาพไซโครเมตริกเป็นแผนภาพที่แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของอากาศผสม ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งถูกจัดทำขึ้นจากหลายหน่วยงาน เช่น ASHRAE, Carrier เป็นต้น แผนภาพนี้ นิยมนำมาใช้ในงานปรับอากาศ เนื่องจากมีคุณสมบัติอากาศที่สำคัญรวมอยู่ในแผนภาพ ดังรูปที่ 2.14 จึงทำให้เกิดความสะดวกแก่การวิเคราะห์ระบบมากขึ้น

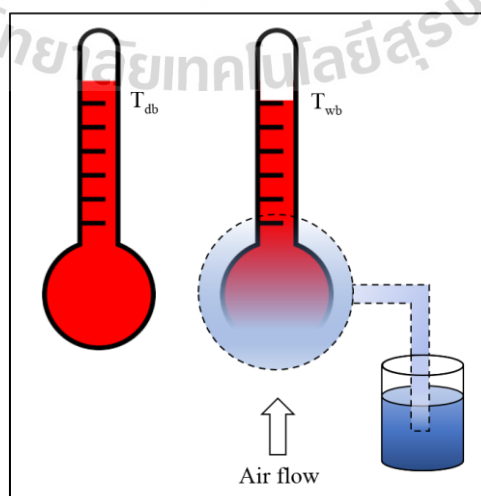
คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นของน้ำ ที่อากาศอบแห้งได้รับการพาความชื้นออกจากวัสดุอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการ ลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ แผนภาพไซโครเมตริกจะแสดงค่าคุณสมบัติของอากาศ ดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 แผนภาพไซโครเมตริก (ASHRAE, 2009)

2.4.3 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature, T_{db})

กระเปาะด้านซ้ายของรูปที่ 2.15 แสดงการวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้โดยตรงจากเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งทั่วไป การวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งควรวัดในจุดที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก เพื่อลดอิทธิพลจากการแผ่รังสีที่อาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดจากการวัดได้



รูปที่ 2.15 การวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก

2.4.4 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature, T_{wb})

เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ โดยกระเปาะวัดถูกหุ้มด้วยสำลีที่มีความชื้น และมีอากาศไม่อิ่มตัวเคลื่อนที่ผ่าน (กระเปาะด้านขวาของรูปที่ 2.15) จากความแตกต่างของความดันน้ำที่สูงกว่าความดันของอากาศ จึงทำให้น้ำที่สำลีระเหยไปสู่อากาศ ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิของน้ำลดลง เมื่อน้ำระเหยไปยังอากาศเรื่อยๆ จนอากาศไม่สามารถรับน้ำได้อีก (อากาศอิ่มตัว) ณ จุดนั้น อุณหภูมิของน้ำจะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศอิ่มตัว ซึ่งอุณหภูมิ ณ จุดดังกล่าว เรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียก

2.4.5 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-Point Temperature, T_{dp})

เป็นอุณหภูมิของอากาศชื้นที่ถูกทำให้เย็นตัวลง ภายใต้เงื่อนไขของอัตราส่วนความชื้นคงที่ ณ ความดันบรรยากาศคงที่ โดยเป็นจุดที่ไอน้ำในอากาศเริ่มเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ ASHRAE (2009) ได้ระบุถึงเงื่อนไขในการการคำนวณค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_{dp}) โดยแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่จุดน้ำค้างอยู่ระหว่าง $0 - 93^{\circ}\text{C}$ (แสดงดังสมการที่ 2.6) และ กรณีที่จุดน้ำค้างอยู่ต่ำกว่า 0°C (แสดงดังสมการที่ 2.7)

$$T_{dp} = C_7 + C_8 \alpha + C_9 \alpha^2 + C_{10} \alpha^3 + C_{11} (P_v)^{0.1984} \quad (2.6)$$

$$T_{dp} = 6.09 + 12.608\alpha + 0.4959\alpha^2 \quad (2.7)$$

โดยที่ T_{dp} คือ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ($^{\circ}\text{C}$)

α คือ $\ln P_v$

C_7 คือ 6.54

C_8 คือ 14.526

C_9 คือ 0.7389

C_{10} คือ 0.09486

C_{11} คือ 0.4569

2.4.6 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity, RH)

เป็นอัตราส่วนของมวลไอน้ำในอากาศต่อมวลของไอน้ำอิ่มตัวหรือความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน สามารถคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ตามสมการที่ 2.8 (ASHRAE, 2009)

$$RH = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.8)$$

โดยที่	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
	m_v	คือ มวลไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ (kg)
	m_{vs}	คือ มวลไอน้ำอิ่มตัว (kg)
	P_v	คือ ความดันของไอน้ำ (Pa)
	P_{vs}	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa)

2.4.7 อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, ω)

เป็นสัดส่วนของมวลไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อมวลอากาศแห้ง 1 kg ณ ขอบเขตปริมาตรที่พิจารณา แสดงเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.9 (ASHRAE, 2009)

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_{da} V}{R_{da} T}} = \frac{P_v / R_v}{P_{da} / R_{da}} = 0.621945 \frac{P_v}{P_{da}} = 0.621945 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (2.9)$$

โดยที่	ω	คือ อัตราส่วนความชื้น ($\text{kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{dryair}}$)
	m_v	คือ มวลไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ (kg)
	m_{da}	คือ มวลอากาศแห้ง (kg)
	T	คือ อุณหภูมิ (K)
	P_v	คือ ความดันของไอน้ำ (Pa)
	P_{da}	คือ ความดันของอากาศแห้ง (Pa)
	R_v	คือ ค่าคงที่ของไอน้ำ (J/kg-K)
	R_{da}	คือ ค่าคงที่ของอากาศแห้ง (J/kg-K)
	V	คือ ปริมาตรของอากาศ (m^3)
	P_{atm}	คือ ความดันบรรยากาศ (Pa)

สำหรับค่าความดันบรรยากาศโดยทั่วไปนิยมใช้การอ้างอิงความดันที่ระดับน้ำทะเล ซึ่งมีค่าเป็น 101.325 Pa ทั้งนี้ความดันบรรยากาศที่ความสูงอ้างอิงจากระดับน้ำทะเลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 (ASHRAE, 2009)

$$P_{atm} = 101.325(1 - 0.0000225577Z)^{5.2559} \quad (2.10)$$

โดยที่ Z คือ ความสูงซึ่งถูกอ้างอิงโดยระดับน้ำทะเล (m)

2.4.8 เอนทาลปี (Enthalpy, H)

เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงระดับพลังงานของของไหล (ในที่นี้คืออากาศ) ในเทอมของพลังงานภายในของไหลกับพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความดันและปริมาตร (PV) ของของไหล ดังสมการที่ 2.11 หากนำค่าเอนทาลปีจากสมการ 2.11 มาวิเคราะห์ต่อหน่วยมวล เราจะเรียกว่า เอนทาลปีจำเพาะ ดังสมการที่ 2.12 (Cengel and Boles, 2007) ซึ่งการหาค่าเอนทาลปีของอากาศแห้งและอากาศชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13 (Stoecker and Jones, 1984)

$$H = U + PV \quad (2.11)$$

$$h = u + pv \quad (2.12)$$

$$h = c_p T + \omega h_{vs} \quad (2.13)$$

โดยที่ H, h คือ เอนทาลปี (J หรือ J/kg)
 U, u คือ พลังงานภายใน (J หรือ J/kg)
 PV, pv คือ เทอมของงานเนื่องจากการไหล (J หรือ J/kg)
 T คือ อุณหภูมิ (K)
 c_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (J/kg-K)
 h_{vs} คือ พลังงานจำเพาะของไอน้ำอิ่มตัว (J/kg-K)

ASHRAE (2009) ระบุถึงความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าเอนทาลปีของอากาศเมื่อทราบค่าอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ ขณะนั้น แสดงดังสมการที่ 2.14

$$h = 1.006T_{db} + \omega(2501 + 1.805T_{db}) \quad (2.14)$$

2.4.9 ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific Volume, v)

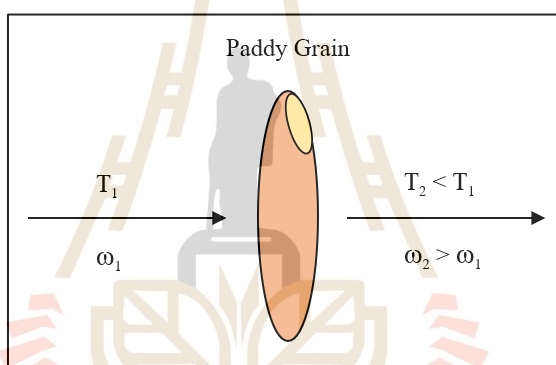
เป็นอัตราส่วนของปริมาตรอากาศต่อมวลของอากาศในขณะนั้น โดยอากาศจะมีคุณสมบัติในการขยายตัวตามอุณหภูมิที่ความดันคงที่ กล่าวคือ ในสภาวะความดันคงที่หากอากาศมีอุณหภูมิต่ำ อากาศจะมีปริมาตรจำเพาะน้อย (มวลอากาศต่อหน่วยปริมาตรมาก อากาศหนักขึ้น)

ในทางกลับกันหากอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นอากาศจะขยายตัวออกทำให้ปริมาตรจำเพาะของอากาศเพิ่มขึ้น (มวลอากาศต่อหน่วยปริมาตรลดลง อากาศเบาลง) ปริมาตรจำเพาะของอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15 (ASHRAE, 2009)

$$v = \frac{287.042T_{db}}{P_{atm} - P_v} \quad (2.15)$$

โดยที่ v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (m^3/kg)

2.5 กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ

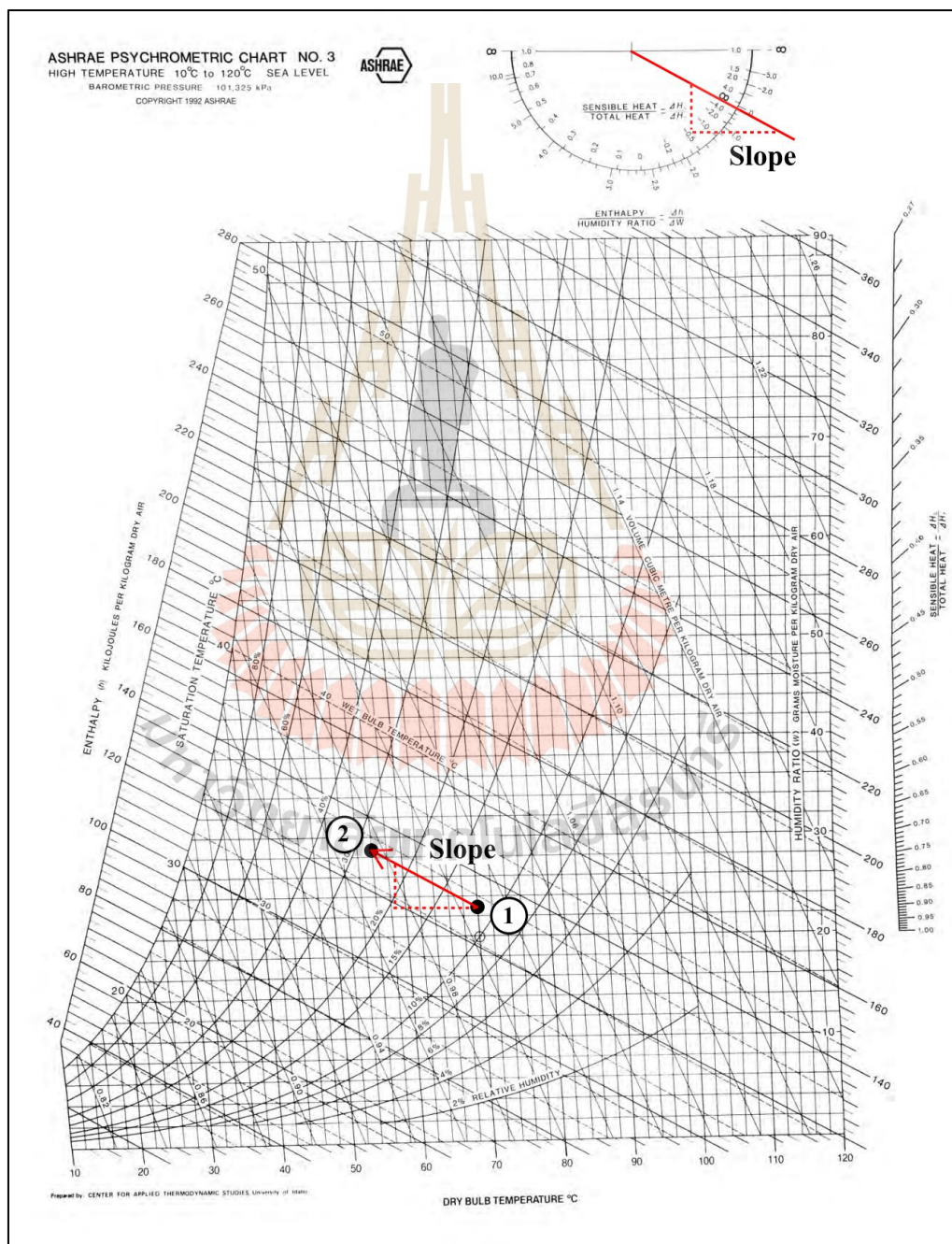


รูปที่ 2.16 กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นแก่อากาศ

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเรื่องกระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกลไกที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ทดสอบในครั้งนี้

พิจารณากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกดังรูปที่ 2.16 เมื่ออากาศอบแห้งเคลื่อนตัวผ่านเมล็ดข้าวเปลือกจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ระยะแรกของกระบวนการอบแห้งจำเป็นต้องให้ความร้อนแก่น้ำที่ผิวของเมล็ดข้าว (ความชื้น) ซึ่งความร้อนที่อากาศถ่ายโอนไปยังน้ำดังกล่าวคือความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ที่ให้น้ำในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้ความดันไอของน้ำมากขึ้นจนกระทั่งความดันไอของน้ำสูงกว่าความดันไอของอากาศ ทำให้น้ำที่ผิวของเมล็ดข้าวระเหยออกไปได้ ความร้อนที่ให้น้ำในการระเหยนี้ เรียกว่า ความร้อนแฝง (Latent heat) ในขณะที่เดียวกันอากาศอบแห้งก็จะมีอุณหภูมิลดลงจากความร้อนที่สูญเสียให้น้ำ เป็นผลให้อุณหภูมิ

ของอากาศหลังผ่านขั้วเปลือก (T_2) มีค่าต่ำกว่าก่อนผ่านขั้วเปลือก (T_1) หรือ $T_2 < T_1$ นอกจากนี้ อากาศที่ได้รับน้ำ (รับความชื้นจากขั้วเปลือก) จะมีอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนเส้นของกระบวนการบนแผนภูมิไซโครเมตริกได้ดังรูปที่ 2.17 โดยทิศทางของเส้นกระบวนการจะมีความชัน (Slope) เป็นไปตามอัตราส่วนของความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำต่อความร้อนรวมที่ใช้สำหรับกระบวนการอบแห้ง (Total heat) แสดงดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 เส้นกระบวนการอบแห้งขั้วเปลือกด้วยลมร้อน

2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

Mackiewicz and Ratajczak (1993) กล่าวถึงจุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) ว่าเป็นการลดขนาดตัวแปรหรือลดมิติของข้อมูลสังเกตที่กำหนด จากการสร้างชุดตัวแปรของผลรวมเชิงเส้นตรง (Linear Combination) ของตัวแปรที่สนใจศึกษา ชุดตัวแปรเหล่านี้เรียกว่าองค์ประกอบหลัก (Principal Component, PC) ในขณะที่ Groth, Hartmann, Klie, and Selbig (2013) และ สายชล สีนสมบูรณ์ทอง (2559) ระบุว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรเพื่อลดจำนวนมิติข้อมูลด้วยเซตตัวแปรซึ่งถูกสร้างขึ้นใหม่ ซึ่งสามารถเก็บรวบรวมความแปรปรวนของชุดตัวแปรเดิมไว้ได้มากที่สุด ความโดดเด่นของวิธีการนี้เป็นที่รู้จักถูกใช้งานสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างแพร่หลายในสาขาทางสังคมศาสตร์และวิทยาศาสตร์บางสาขา ซึ่งมักจะพบเห็นเทคนิค PCA นี้ถูกใช้สำหรับสกัดปัจจัย (Factor Extraction) ในขั้นตอนของวิธีวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis, FA) เพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น การลดจำนวนตัวแปรจากการสร้างตัวแปรใหม่ที่เป็น Factor score ซึ่งสามารถนำปัจจัยเหล่านี้ไปใช้สำหรับวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้ หรือใช้สำหรับแก้ปัญหา Multicollinearity ระหว่างตัวแปรอิสระได้ หรือใช้ในการศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา ตลอดจนการอธิบายถึงความหมายของปัจจัยแต่ละกลุ่มที่มีความสัมพันธ์กันสูง ซึ่งอาจมีประโยชน์ในด้านการวางแผนงานบางอย่างได้เป็นอย่างดี (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2554)

โดยทั่วไปการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) มักจะกำหนดตัวแปร PC เป็นตัวแปรใหม่แทนผลรวมเชิงเส้นของตัวแปรเดิม ดังสมการที่ 2.16 ขณะที่ความสัมพันธ์ตัวแปรเดิม x_j กับองค์ประกอบหลัก PC_i ซึ่งตัวแปร x_j ถูกปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน (Standardized) ของค่า Z-Score (Z_j) สำหรับการคำนวณโดยโปรแกรม IBM SPSS Statistics รูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นผลรวมเชิงเส้นขององค์ประกอบหลักถูกแสดงดังสมการที่ 2.17 (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2554)

สำหรับการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม IBM SPSS Statistics สามารถพิจารณาค่า W_{ij} ได้จากตาราง Component Score Coefficient Matrix และ L_{ij} สามารถพิจารณาได้จากตาราง Component Matrix นอกจากนี้ ค่า Eigen value (λ) ที่บ่งชี้ถึงความสำคัญของข้อมูลที่องค์ประกอบหนึ่ง ๆ สามารถอธิบายได้จากน้ำหนักองค์ประกอบ (W_{ij}) สามารถหาได้จากผลบวกกำลังสองของ W_{ij} ทุกตัวในองค์ประกอบนั้น (ยุทธ ไถยวรรณ, 2563)

$$\left. \begin{aligned} PC_1 &= W_{11}X_1 + W_{12}X_2 + W_{13}X_3 + \dots + W_{1p}X_p \\ PC_2 &= W_{21}X_1 + W_{22}X_2 + W_{23}X_3 + \dots + W_{2p}X_p \\ &\vdots \\ PC_p &= W_{p1}X_1 + W_{p2}X_2 + W_{p3}X_3 + \dots + W_{pp}X_p \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

$$\begin{array}{l}
 Z_1 = L_{11}PC_1 + L_{12}PC_2 + L_{13}PC_3 + \dots + L_{1p}PC_p \\
 Z_2 = L_{21}PC_1 + L_{22}PC_2 + L_{23}PC_3 + \dots + L_{2p}PC_p \\
 \vdots \\
 Z_p = L_{p1}PC_1 + L_{p2}PC_2 + L_{p3}PC_3 + \dots + L_{pp}PC_p
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_p \end{array}} \right\} \quad (2.17)$$

- โดยที่ PC_i คือ องค์ประกอบหลักที่ i ($i, j = 1, 2, 3, \dots, p$)
- W_{ij} คือ ค่าน้ำหนักหรือสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรเดิมลำดับที่ j ซึ่งใช้สร้าง PC หลักที่ i
- x_i คือ ตัวแปรเดิมลำดับที่ i
- Z_j, X_i คือ ตัวแปรเดิม x_i ซึ่งถูกปรับให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน จาก $x_i - x_{i, \text{average}} / S(x_i)$
- L_{ij} คือ ค่า loading ของตัวแปรเดิมลำดับที่ j กับ PC หลักที่ i
- $S(x_i)$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร x_i

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Alkhayrat, Aljnidi, and Aljoumaa (2020) ระบุถึงความสามารถที่เพียงพอของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสำหรับจัดการข้อมูลลูกค้าของบริษัทโทรคมนาคมที่มีอยู่อย่างมหาศาล โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อสำรวจการลดมิติของชุดข้อมูลโทรคมนาคมจริงและประเมินการจัดกลุ่มของลูกค้าแบบลดขนาดและพื้นที่แฝงเมื่อเทียบกับพื้นที่เดิมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การจัดกลุ่มที่มีคุณภาพดีขึ้น จากชุดข้อมูลดั้งเดิมซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติ 220 รายการที่เป็นของลูกค้าจำนวน 100,000 ราย นอกจากนี้ยังเสนอทิศทางการทำงานในอนาคตที่จะปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพโปรแกรมเข้ารหัสอัตโนมัติด้วยหลักการ PCA โดยสร้างข้อจำกัดแบบกำหนดเองสำหรับตัวเข้ารหัสอัตโนมัติ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Parhizkar, Rafieipour, and Parhizkar (2021) ที่นำเสนอการประเมินและปรับปรุงแบบจำลองการคาดการณ์พลังงานของอาคารจากแหล่งข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีความแปรปรวนของข้อมูลจำนวนมาก ในการศึกษาครั้งนี้ PCA ถูกนำมาใช้เป็นวิธีการลดข้อมูลและดำเนินการประมวลผลข้อมูลล่วงหน้าสำหรับแบบจำลองการทำนาย 5 แบบ ได้แก่ Linear regression, Support vector regression (SVR), Regression tree, Random forest และ K-nearest neighbor (KNN) algorithm ผลการวิจัย พบว่า วิธี PCA มีศักยภาพสูงสำหรับการลดจำนวนข้อมูลและลดขั้นตอนดำเนินการได้อย่างมีนัยสำคัญ วิธีการนี้สามารถเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบประสิทธิภาพออนไลน์ต่อไปได้

นอกจากนี้ PCA ยังเป็นที่นิยมสำหรับจัดการข้อมูลสเปกตรัมจากเทคนิค Visible/Near Infrared spectroscopy (VIS/NIRs) จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า Abu-Khalaf and Hmidat (2020) พัฒนาเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT) เพื่อประเมินคุณภาพของน้ำมันมะกอก (Olive oil) แทนการตรวจสอบด้วยวิธีทางเคมีวิเคราะห์แบบดั้งเดิมซึ่งใช้เวลาดำเนินการยาวนานและมีค่าใช้จ่ายสูง ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องมือวัด

ถูกวิเคราะห์โดย PCA ก่อนที่จะประเมินด้วย Partial least square (PLS) ผลการศึกษานี้พบว่า PCA สามารถจำแนกกลุ่มคุณภาพของน้ำมันมะกอกได้เป็น 4 กลุ่ม และ VIS/NIR สามารถทำนายค่าความเป็นกรดและค่าเปอร์ออกไซด์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกแยะความแตกต่างด้านคุณภาพของน้ำมันมะกอกได้เป็นอย่างดี ซึ่งมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Esquerre et al. (2020) ได้ใช้เทคนิคเดียวกันนี้สำหรับทำนายพารามิเตอร์คุณภาพของพริกไทยป่นที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยใช้ PCA เป็นเครื่องมือสำรวจการกระจายตัวของข้อมูลในการวิเคราะห์ทางเคมีจากสเปกตรัม ซึ่งจะช่วยลดชุดข้อมูลดั้งเดิม กรองสัญญาณรบกวนและลดความซ้ำซ้อนตามโครงสร้างความแปรปรวนร่วมของข้อมูลเดิม ก่อนที่จะประเมินด้วย PLS สำหรับคาดการณ์คุณภาพของพริกไทยป่น การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองซึ่งถูกพัฒนาด้วยเทคนิค PCA-PLS ที่สามารถทำนายตัวแปรบ่งชี้คุณภาพของพริกไทยป่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบนี้อาจมีประโยชน์ต่อการตรวจวัดและควบคุมคุณภาพในสายการผลิตได้

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นวิธีการที่มีจุดเด่นและได้รับความนิยมสำหรับการลดจำนวนตัวแปรต้นที่มีอยู่จำนวนมากลง มักถูกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งในส่วนของแหล่งข้อมูลขนาดใหญ่ ที่มีข้อมูลจำนวนมาก (Big data) และข้อมูลสเปกตรัมจากเครื่องมือวัด โดยตัวแปรชุดใหม่ที่ถูกสร้างขึ้น (PC) ถูกนำไปเป็นตัวแปรต้นสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติในรูปแบบที่แตกต่างกันในลำดับถัดไป ประโยชน์ที่พบได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา เป็นสัญญาณที่ดีในการนำวิธีการนี้มาใช้ปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายผลข้อมูลสำหรับเครื่องมือวัดได้

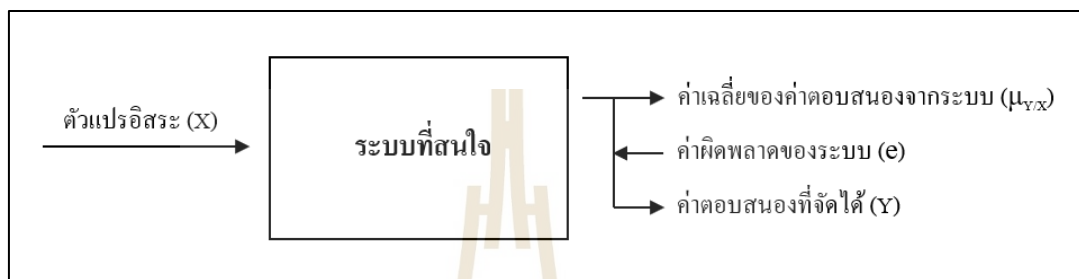
2.7 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ (Independent variable, X) กับตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม (Dependent variable, Y) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคาดการณ์ค่าของตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระ ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์ (2551) นำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจากการพิจารณาจำนวนตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ดังหัวข้อที่ 2.7.1 และ 2.7.2

2.7.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression, SLR)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัวกับตัวแปรตอบสนอง 1 ตัว ลักษณะของความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ดังสมการที่ 2.18 รูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกจำแนกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่สามารถอธิบายได้ ($\mu_{y/x}$) และส่วนที่ไม่สามารถอธิบายได้ (e) หรือค่าผิดพลาด (Residual, Error) สำหรับการประมาณค่าตัวแปรในสมการถดถอยอย่างง่ายอาศัยวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้ผลรวมกำลังสองของ

ค่าผิดพลาด (Sum Square Error, SSE) มีค่าต่ำที่สุด หลักการนี้เรียกว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) หากพิจารณาสมการที่ 2.19 จะเห็นได้ว่า ผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาดขึ้นอยู่กับรูปแบบสมการที่อธิบายได้ ($\mu_{Y/X}$) ดังนั้นรูปแบบสมการนี้ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างสมการทำนาย สำหรับการประมาณค่าตัวแปรที่ปรากฏอยู่ในสมการถดถอยนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20 - 2.21 (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551)



รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

(ดัดแปลงจาก: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551)

$$Y = \mu_{Y/X} + e = \beta_0 + \beta_1 X + e \quad (2.18)$$

$$\text{Min SSE} = \text{Min} \sum_{i=1}^n e_i^2 = \text{Min} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.19)$$

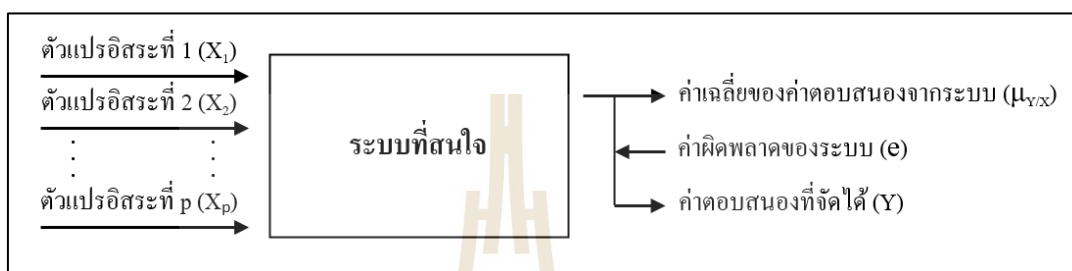
$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (2.20)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (2.21)$$

- โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่หรือจุดตัดแกน y ของสมการถดถอย
 β_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรสังเกตหรือความชันของกราฟความสัมพันธ์
 $\mu_{Y/X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม Y ที่อธิบายได้โดยตัวแปรต้น X
 x_i คือ ตัวแปรอิสระลำดับที่ i

- \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระที่รวบรวมได้
 y_i คือ ตัวแปรตามลำดับที่ i
 \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่รวบรวมได้

2.7.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุ (Multiple Linear Regression, MLR)



รูปที่ 2.19 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุ

(ดัดแปลงจาก: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุเป็นการศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระจำนวนมากกว่า 1 ตัว ($k > 1$) กับตัวแปรตอบสนอง 1 ตัว ลักษณะของความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ดังสมการที่ 2.22 เมื่อวิเคราะห์ตัวแบบสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อให้ค่าผิดพลาดกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด จะได้ว่า $\text{Min SSE} = \text{Min } \sum e_i^2 = \text{Min } e' e$ ในบางครั้งผู้ทดลองอาจเกิดความเข้าใจว่าระบบที่ทำการศึกษามีตัวแปรเพียง k ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง ($k < p$) สิ่งเหล่านี้อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าความสัมพันธ์ได้ ดังนั้นฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่ควรจะเป็นจึงอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.23 ด้วยเหตุนี้ค่าผิดพลาดในสมการถดถอยเชิงเส้นพหุจึงเกิดได้จากหลายกรณี (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551)

$$Y = \mu_{y/x_1, x_2, \dots, x_p} + e = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e \quad (2.22)$$

$$Y = f(X_1 + X_2 + \dots + X_k) + h(X_{k+1} + X_{k+2} + \dots + X_p) + e \quad (2.23)$$

- โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่ของสมการ
 $\beta_1, \beta_2, \beta_p$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ

$\mu_{Y/X_1, X_2, \dots, X_p}$	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม Y ที่อธิบายได้โดยตัวแปรต้น X_1, X_2, \dots, X_p
X	คือ ตัวแปรอิสระ
Y	คือ ตัวแปรตาม
n	คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
p	คือ จำนวนค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย

การสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นพหุ (MLR model) สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ Matrix เมื่อกำหนดให้ Y และ X เป็นไปตามสมการที่ 2.24 และ 2.25 ดังนั้นค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการสามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ 2.29

$$Y_{n \times 1} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$X_{n \times (k+1)} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{k2} \\ 1 & X_{13} & X_{23} & \cdots & X_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \cdots & X_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\beta_{(k+1) \times 1} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

สามารถเขียนรูปแบบสมการปกติได้เป็น

$$X'Y = X'X'\hat{\beta} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \vdots \\ \sum X_k Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \cdots & \sum X_k \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \cdots & \sum X_1 X_k \\ \sum X_2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_2^2 & \cdots & \sum X_2 X_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_k & \sum X_1 X_k & \sum X_2 X_k & \cdots & \sum X_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

ดังนั้น ตัวแปรของสมการถดถอยเชิงเส้นพหุ หาได้จากสมการที่ 2.29

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (2.29)$$

ในการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ อาจมีบางกรณีที่ตัวแปรต้นบางตัว ซึ่งมีความสัมพันธ์กันเอง (Collinearity or Multicollinearity) หรือแม้แต่ในทางตรงกันข้าม อาจพบกรณีที่ทำการพิจารณาการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย พบว่า ตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย แต่เมื่อนำตัวแปรต้นเหล่านั้นมาวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุ และทดสอบ Marginal t-test พบว่าตัวแปรอิสระเหล่านี้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ กรณีนี้จัดเป็นการเสริมกันหรือช่วยกันอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y นั้นเอง ดังนั้น ในการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ ผู้วิเคราะห์ส่วนใหญ่จึงเลือกใช้วิธีการนำเข้าข้อมูลที่แตกต่างกันออกไป ดังจะกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7.3

2.7.3 วิธีการนำตัวแปรเข้าสู่สมการสำหรับการวิเคราะห์การถดถอย

การนำตัวแปรเข้าสู่สมการสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยมีอยู่หลากหลายวิธี ยุทธ์ ไกยวรรณ (2563) นำเสนอวิธีการนำเข้าตัวแปรเป็น 4 วิธี ดังนี้

1. วิธี Enter เป็นการนำตัวแปรอิสระทุกตัว (X 's) เข้าสู่สมการถดถอยทั้งหมด โดยผู้วิเคราะห์จะทำการพิจารณาตัวแปรจากค่านัยสำคัญทางสถิติ (Significance, P -value < 0.05) เพื่อเลือกว่าตัวแปรใดควรอยู่จัดอยู่ในสมการ

2. วิธี Backward Elimination เป็นวิธีการนำตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการถดถอยทั้งหมด จากนั้นจึงตัดตัวแปร X_i ที่มีความสำคัญน้อยที่สุดออกไป (พิจารณาจาก t-test ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ซึ่งตัวแปร X ที่เหลือจากขั้นตอนก่อนหน้าจะถูกนำเข้าสู่สมการถดถอยในรอบที่ 2 แล้วทำการตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติออก (พิจารณาจาก t-test) โดยทำการวนซ้ำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเหลือเฉพาะสมการที่ตัวแปรต้น X มีนัยสำคัญจากการทดสอบสถิติ T เท่านั้น

3. วิธี Forward Selection เริ่มจากการสร้างสมการถดถอยก่อนที่จะทำการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการทีละตัว ซึ่งพิจารณาจากค่านัยสำคัญทางสถิติที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นตัวแปรเริ่มต้น (P -value น้อยที่สุด) จากนั้นจึงเพิ่มตัวแปรอิสระตัวถัดไปเข้าสู่สมการโดยคัดเลือกจากลำดับนัยสำคัญดังที่กล่าวมา จนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มตัวแปรได้อีกจึงหยุด

4. วิธี Stepwise Regression เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการถดถอย เนื่องจากวิธีนี้เป็นการรวมจุดเด่นของวิธี Forward Selection และ Backward Elimination เข้ามาไว้ด้วยกัน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการนำตัวแปรอิสระเข้าสมการด้วยวิธี Forward Selection หากไม่พบตัวแปรใดผ่านเกณฑ์ที่พิจารณา แสดงว่าไม่มีตัวแปรใดมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม การวิเคราะห์ก็จะยุติ ในทางตรงกันข้าม หากมีตัวแปรอิสระบางตัวผ่านเกณฑ์คัดเลือกเข้าสมการ ระบบจะนำตัวแปรอิสระทั้งหมดที่ผ่านเกณฑ์ เข้าสู่สมการพร้อมกัน แล้วจึงพิจารณาตัวแปรอิสระด้วยสถิติที่ (t-test) หากพบว่าตัวแปรใดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปรนั้นก็จะถูกคัดออกจากสมการ

2.7.4 การอธิบายสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระ

ยูทซ์ ไกยวรรณ (2563) กล่าวถึงการวิเคราะห์ถดถอยว่าเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) หรือเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า R Square สำหรับค่า R^2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ SLR เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงสัดส่วนที่ตัวแปรอิสระ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม Y ได้ สำหรับการวิเคราะห์ MLR ค่า R^2 มักถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุ (Multiple Coefficient of Determination) ซึ่งมีความหมายในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ การคำนวณค่า R^2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.30 นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ถดถอย ค่า R^2 ในกลุ่มตัวอย่างมักมีค่าที่ไม่สอดคล้องกับประชากร เพื่อให้ค่า R^2 มีความเหมาะสมมากขึ้น จึงมีการปรับค่า R^2 ขึ้นใหม่ เรียกว่า Adjust R^2 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.31

$$R^2 = \frac{SS_{\text{total}} - SS_{\text{residual}}}{SS_{\text{total}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.30)$$

$$\text{Adjust } R^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-K-1} \right) \quad (2.31)$$

โดยที่	\hat{y}_i	คือ ตัวแปรตามที่ได้จากการทำนาย
	\bar{y}	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่รวบรวมมาทั้งหมด n ตัว
	y_i	คือ ตัวแปรตามลำดับที่ i
	n	คือ จำนวนตัวอย่าง
	K	คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

นอกจากการพิจารณาความสมรูปของสมการที่พัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์ถดถอย ดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ผลการทำนายตัวแปรตามมักมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) ของการทำนายผลจากสมการถดถอย โดยแบ่งตามกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการสอบเทียบมาตรฐาน (Root Mean Square Error of Calibration, RMSEC) และกลุ่มที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.32

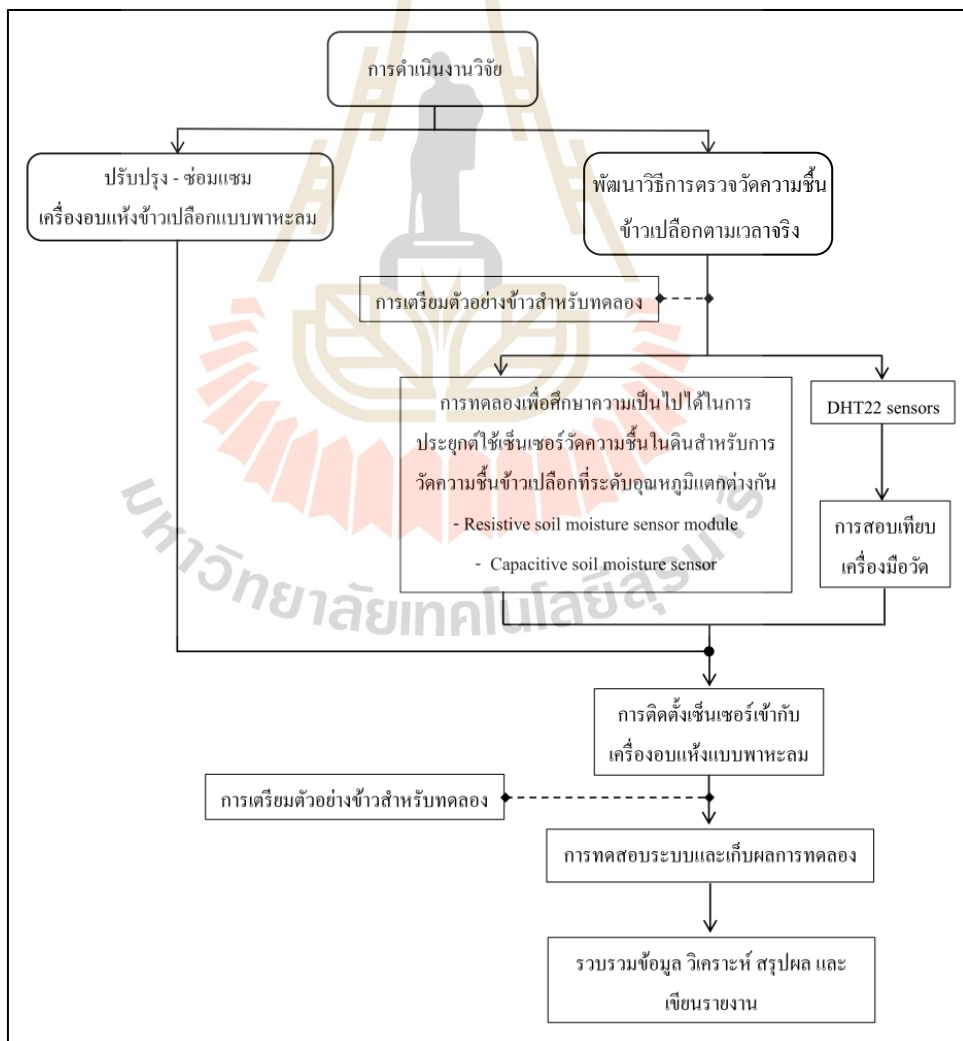
$$\text{RMSE, RMSEC, RMSEP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2.32)$$

โดยที่	\hat{y}_i	คือ ตัวแปรตามที่ได้จากการทำนาย
	y_i	คือ ตัวแปรตามลำดับที่ i
	n	คือ จำนวนตัวอย่าง
	RMSE	คือ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
	RMSEC	คือ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกลุ่ม Calibration set
	RMSEP	คือ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกลุ่ม Validation set

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ผู้วิจัยกล่าวถึงภาพรวมของกรอบแนวคิดของการดำเนินงานวิจัย รายละเอียดของวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนขั้นตอนปฏิบัติงานและการวิเคราะห์ผลการวิจัยด้วย โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางสถิติ โดยรายละเอียดของวิธีดำเนินการวิจัยแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 การดำเนินงานวิจัย

แนวคิดของการดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มจากปัญหาความไม่สะดวกในการสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกมาหาค่าความชื้นระหว่างดำเนินการอบแห้งด้วยวิธีอบด้วยลมร้อนอุณหภูมิคงที่ ค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ได้จากวิธีการดังกล่าวไม่เป็นไปตามเวลาจริงเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวในกระบวนการอบแห้งที่กำลังดำเนินการอยู่ ส่งผลให้ข้าวเปลือกได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานเกินไป และส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิตและราคาจำหน่ายในที่สุด ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการวัดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการทางอ้อม (Indirect method) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ราคาต่ำที่มีจำหน่ายทั่วไป ได้แก่ เซนเซอร์วัดความชื้นในดินนำมาเป็นตัวรับรู้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือก K-type Thermocouple นำมาเป็นตัวรับรู้อุณหภูมิของข้าวเปลือก และ DHT22 sensor นำมาเป็นอุปกรณ์รับรู้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง สำหรับพัฒนาวิธีการตรวจวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง วิธีการนี้จะช่วยให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ที่ต้องการตรวจวัดความชื้นวัสดุทางการเกษตรทั้งในต่างพื้นที่และในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้ ทั้งนี้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมถูกนำมาใช้สำหรับการทดสอบและพัฒนาวิธีการเหล่านี้ กรอบของการดำเนินการวิจัยถูกจัดวางเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.1 ทั้งนี้ วิธีปฏิบัติสำหรับการทดลองและขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผู้วิจัยได้ระบุไว้ในหัวข้อถัดไปสำหรับบทนี้

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และการจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดลอง

ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัย สิ่งที่มีความสำคัญและควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรก คือการวางแผนงาน การจัดเตรียมความพร้อมของวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินการสำเร็จตามแผนการดำเนินงานอย่างราบรื่น ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้กล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ และการจัดเตรียมเครื่องมือวิจัยก่อนนำไปทำการทดลอง โดยรายละเอียดถูกระบุไว้ในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ข้าวเปลือกพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105

3.2.1 วัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการเพาะปลูกในพื้นที่ของ อ.เทพารักษ์ จ.นครราชสีมา ในฤดูกาลเพาะปลูกเดียวกันสำหรับใช้ทำการทดลอง ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 3.2

3.2.1.1 การคัดแยกข้าวเมล็ดลีบและสิ่งเจือปนออกจากตัวอย่าง

ในระหว่างกระบวนการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรมักจะมีสิ่งแปลกปลอมเข้ามาเจือปนร่วมกับตัวอย่างอยู่เสมอ ไม่ว่าจะเป็นเศษซากของสัตว์ในท้องนา แกลบ เศษฟาง ดิน หิน หรือแม้กระทั่งข้าวเมล็ดลีบ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้กับผลผลิตข้าวจากการเพาะปลูกในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อควบคุมปัจจัยของตัวอย่างที่นำมาทดลอง จึงจำเป็นต้องทำการคัดแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากข้าวเปลือกก่อนนำมาใช้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

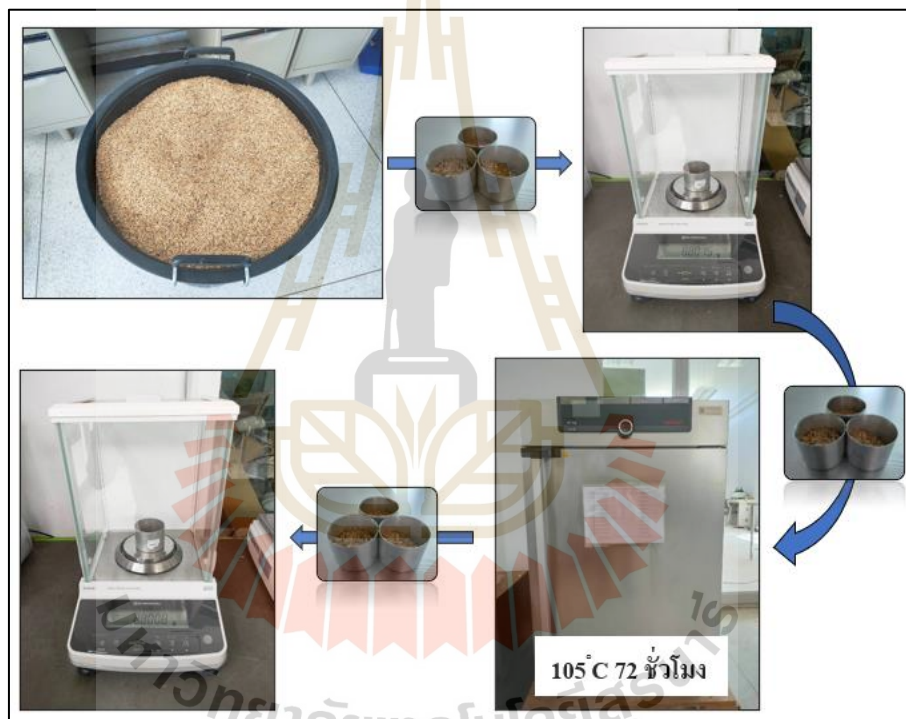
ตัวอย่างข้าวเปลือกถูกนำมาคัดแยกสิ่งเจือปนด้วยเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์โดยตะแกรงและแรงลม ยี่ห้อ SEEDBORO รุ่น LA-LS (รูปที่ 3.3 ก) ซึ่งผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากฝ่ายห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการผลิตพืช F3 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หลักการทำงานของเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ดังกล่าว จะมีการสั่นของตะแกรงโยก 2 ชั้น โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดเมล็ดพันธุ์กับสิ่งเจือปนสำหรับการแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ เมล็ดข้าวเช่น เศษฟาง เศษหิน (รูปที่ 3.3 ข) ในขณะที่ข้าวเปลือกที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงถูกส่งไปยังทางไหลของกระแสอากาศที่ขับเคลื่อนโดยพัดลม (Blower) ซึ่งกระแสอากาศดังกล่าวมีหน้าที่คัดแยกฝุ่นและแกลบออกจากเมล็ดข้าวเปลือกก่อนนำไปทำการทดลองในลำดับถัดไป (แรงลมน้อยกว่าแรงลอยตัวของข้าวเปลือก ทำให้ข้าวตกลงสู่จุดรับตามแรงโน้มถ่วงของโลก)



รูปที่ 3.3 การคัดแยกข้าวเมล็ดลีบและสิ่งเจือปนออกจากตัวอย่าง ก) เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์โดยตะแกรงและแรงลม ข) สิ่งเจือปนที่ถูกแยกออกจากตัวอย่าง

3.2.1.2 การหาความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบลมร้อน

การประเมินความชื้นของข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่เป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงในระดับที่สามารถนำไปสอบเทียบอุปกรณ์การวัดได้ (รายละเอียดถูกกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.1) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการดังกล่าวในการหาความชื้นข้าวสำหรับการสร้างแบบจำลองเอมพีริคัลเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม อีกทั้งยังถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวและเปรียบเทียบผลการทำนายผลความชื้นข้าวเปลือกจากวิธีการประเมินความชื้นตามเวลาจริงที่ถูกพัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.4 การหาความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่

งานวิจัยนี้อ้างอิงการหาความชื้นในเมล็ดพืชตามระเบียบวิธีของสมาคมวิศวกรเกษตรอเมริกัน (American Society of Agricultural Engineers, ASAE) โดยทำการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกประมาณ 10 กรัม (3 ตัวอย่าง) มาชั่งมวลของข้าวก่อนการนำเข้าตู้อบลมร้อน (m_w) ด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นถึงนำข้าวเข้าสู่ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อขจัดน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดออกไป เหลือไว้เพียงแต่มวลแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก (m_d) จากการชั่งมวลข้าวเมื่อครบกำหนดเวลา 72 ชั่วโมง (แสดงดังรูปที่ 3.4) ทั้งนี้ความชื้นข้าวเปลือกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

3.2.1.3 การเตรียมความชื้นข้าวสำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.5 การเตรียมความชื้นข้าวสำหรับการทดลอง

ข้าวเปลือกภายหลังจากกระบวนการคัดแยกสิ่งเจือปนออกแล้ว ถูกนำมาตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นของข้าว ด้วยวิธีการดังหัวข้อ 3.2.1.2 ข้อมูลความชื้นเริ่มต้น ถูกนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมไปยังข้าว (ตามสมการที่ 3.7) เพื่อให้ข้าวเปลือกตัวอย่าง มีความชื้นเป็นไปตามค่าเป้าหมายที่ผู้วิจัยกำหนด ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำสำหรับการเตรียมตัวอย่างข้าวสามารถพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบของสมการความชื้นมาตรฐาน เปียก (สมการที่ 2.1) ซึ่งมีวิธีการพิจารณาได้ดังนี้

$$M_{w,initial} = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อมวลของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมตัวอย่างมีค่าเป็น $m_{w,net}$ ดังนั้นมวลแห้งของข้าวเปลือกทั้งหมด ($m_{d,net}$) ที่นำมาเตรียมตัวอย่าง มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.2

$$m_{d,net} = m_{w,net} - \left(\frac{M_w}{100} \times m_{w,net} \right) \quad (3.2)$$

พิจารณารูปแบบของสมการที่ 2.1 เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ของความชื้นเป้าหมาย ($M_{w,target}$) สำหรับการเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก จะได้ว่า

$$M_{w,target} = \frac{m_{w,net} + m_{water,add} - m_{d,net}}{m_{w,net} + m_{water,add}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{M_{w,target}}{100} \right) (m_{w,net} + m_{water,add}) = m_{w,net} + m_{water,add} - m_{d,net} \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{M_{w,target}}{100} \times m_{water,add} \right) - m_{water,add} = m_{w,net} - m_{d,net} - \left(\frac{M_{w,target}}{100} \times m_{w,net} \right) \quad (3.5)$$

$$m_{water,add} = \frac{m_{w,net} - m_{d,net} - \left(\frac{M_{w,target}}{100} \times m_{w,net} \right)}{\left(\frac{M_{w,target}}{100} - 1 \right)} \quad (3.6)$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมไปยังข้าวเปลือกเพื่อให้ข้าวมีความชื้นเป็นไปตามที่กำหนด ($m_{water,add}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7

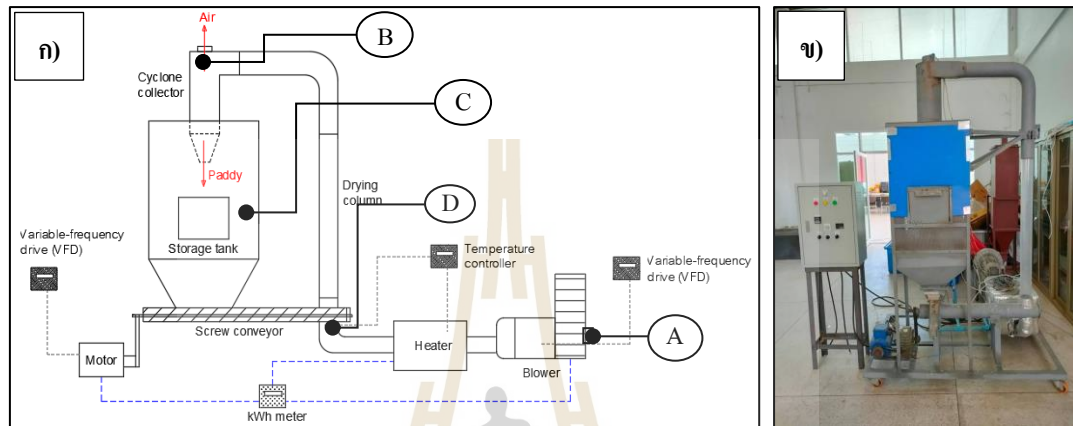
$$m_{water,add} = \frac{0.01(m_{w,net} - m_{d,net}) - (M_{w,target} \times m_{w,net})}{(M_{w,target} - 0.01)} \quad (3.7)$$

เพื่อให้การกระจายไปสู่เมล็ดข้าวอย่างทั่วถึง ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ กระบอกฉีดน้ำ (Foggy) สำหรับการฉีดพ่น และบรรจุข้าวเปลือกหลังการเติมน้ำในภาชนะปิดผนึก เก็บไว้ในห้องเย็นอุณหภูมิ 2-5°C เป็นระยะเวลากว่า 24 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 3.5) โดยทำการคลุกเคล้า ข้าวเปลือกทุก ๆ 4 - 6 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นเกิดการกระจายตัวทั่วทั้งภาชนะ อย่างไรก็ตาม การนำข้าวเปลือกมาใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3 - 3.5 มีความจำเป็นต้องนำข้าวเปลือก ซึ่งยังคงบรรจุในภาชนะปิดผนึก ออกจากห้องเย็นไปสู่แวดล้อม เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ระหว่างตัวอย่างข้าวกับแวดล้อม จนกระทั่งข้าวเปลือกเหล่านั้นมีอุณหภูมิเท่ากับสภาพแวดล้อม ก่อนนำไปทดสอบกับเครื่องอบแห้งพาหะลม

3.2.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมระดับห้องปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้นจาก

งานวิจัยของ จิตรารัตน์ จอกกิว (2559) สำหรับการพัฒนาวีธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง โดยรูปที่ 3.6 ก) เป็นแผนภาพไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง และรูปที่ 3.6 ข) เป็นภาพเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมจริงที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ไฟฟ้าจากแผนภาพดังกล่าวถูกควบคุมผ่านอุปกรณ์ควบคุมดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.7 ตู้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบจากงานวิจัยของ จิตรารัตน์ จอกกิว (2559) อาศัยการลำเลียงข้าวจากถังเก็บ (Storage tank) ด้วยชุดเกลิยวบ้อน (Screw

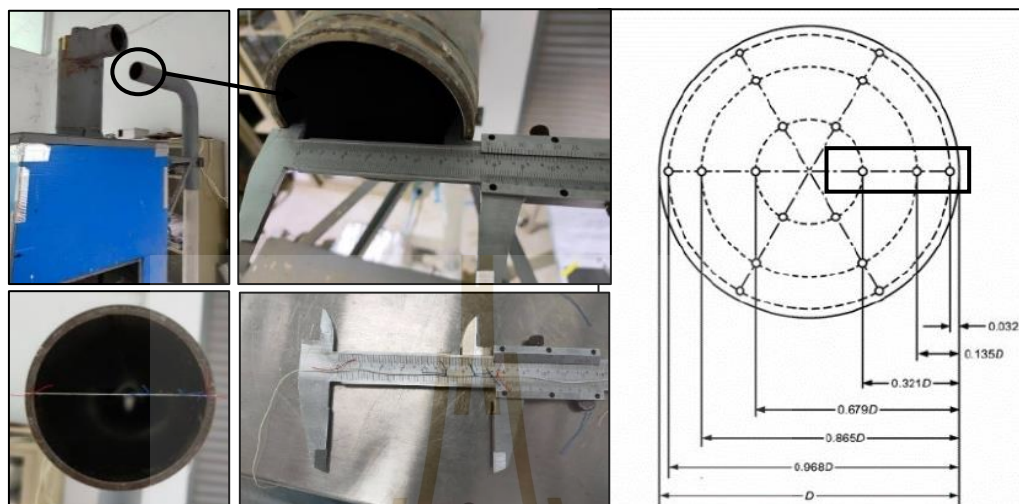
conveyor) โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนระบบ ความเร็วรอบของมอเตอร์ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ (Variable-frequency drive, VFD) จนกระทั่งข้าวเปลือกถูกลำเลียงไปยังทางเข้าหอบแห้ง (Drying column) กระแสอากาศซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยพัดลม (Blower) โดยมีอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบ จะไหลผ่านชุดทำความร้อน (Heater) ซึ่งทำหน้าที่อุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) เมื่อข้าวเปลือกได้รับแรงปะทะจากกระแสอากาศร้อนซึ่งสามารถเอาชนะน้ำหนักของข้าวเปลือกได้ ข้าวเปลือกจะลอยตัวไปกับอากาศ (มีพฤติกรรมแบบเดียวกับของไหล) เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างความชื้นของข้าวเปลือกกับอากาศอบแห้ง จนกระทั่งข้าวเปลือกเคลื่อนที่ไปถึงไซโคลน (Cyclone collector) ซึ่งทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็ง (ในที่นี้คือข้าวเปลือก) ออกจากของไหล (อากาศ) โดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้ข้าวเปลือกตกลงสู่ถังเก็บข้าวและอากาศไหลออกด้านบนดังรูปที่ 3.6 ก



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัลใบพัดแยก ยี่ห้อ BENTECH รุ่น GM9801

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การที่ข้าวได้รับความร้อนเป็นระยะเวลาานานเกินไป อาจส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งในการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถ้งหมุน โดย ภาณุวัฒน์ ทรัพย์ปรง, อนุรักษ์ ครองทรัพย์ และ ประสิทธิ์ โสภา (2556) และงานวิจัยของ เกียรติศักดิ์ ใจโต และคณะ (2561) ได้ให้คำแนะนำสำหรับการอบแห้งข้าวที่มีการรับความร้อนซ้ำเป็นระยะเวลาานานในทำนองเดียวกันนี้ โดยอุณหภูมิที่แนะนำอยู่ในช่วง 70°C - 80°C ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C สำหรับใช้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งกำหนดความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และพัดลมเป็น 30 Hz และ 55 Hz ตามลำดับ โดยรูปที่ 3.8 เป็นเครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัลใบพัดแยก (Digital Anemometer) ยี่ห้อ BENTECH รุ่น GM9801 ซึ่งถูกนำมาใช้วัดความเร็วของอากาศ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเร็วลมสำหรับวิเคราะห์หาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง

โดยใช้วิธีการกำหนดจุดวัดด้วยเส้นด้าย ดังรูปที่ 3.9 ทั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้การวัดความเร็วลมเพียง 3 จุดของหน้าตัดท่อทางออกสำหรับการคิดค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.9 การระบุจุดสำหรับวัดความเร็วลม (ดัดแปลงจาก ASHRAE, 2009)

3.2.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการวัด

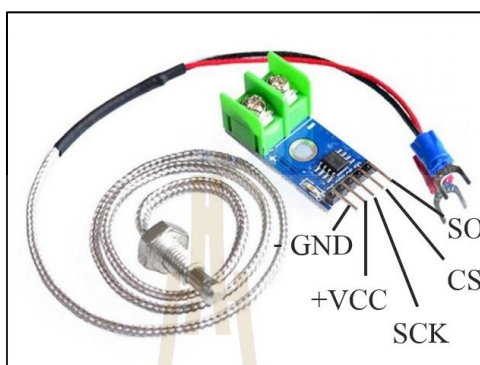
ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR อย่าง Arduino ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มสาธารณะ (Open-Source Platform) สำหรับการสร้างต้นแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ง่ายต่อการใช้งาน หาซื้อได้ง่าย และมีราคาไม่สูงมากนักในปัจจุบัน ทำให้ผู้วิจัยเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ มาใช้สำหรับเก็บข้อมูลงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. บอร์ดอะดัวโน้ (Arduino Uno R3) เป็นบอร์ดสำหรับควบคุมการทำงานของระบบการวัด จากการโปรแกรมภาษา C / C++ ผ่านซอฟต์แวร์ Arduino IDE (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 บอร์ด Arduino Uno R3

2. โมดูลเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ K-Type Thermocouple (MAX6675) Module with Temperature Sensor Probe ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.11

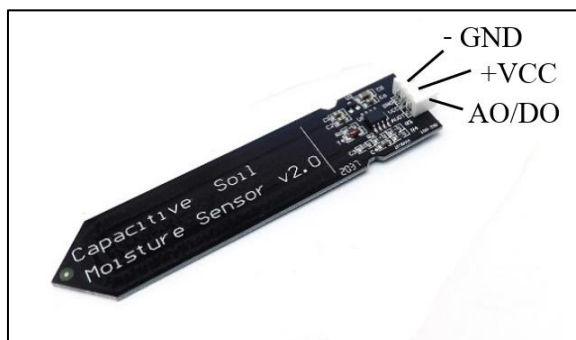


รูปที่ 3.11 K-Type Thermocouple (MAX6675) Module with Temperature Sensor Probe

3. เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน (Resistive soil moisture sensor module) แสดงดังรูปที่ 3.12 และเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ (Capacitive soil moisture sensor) แสดงดังรูปที่ 3.13 ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นอเนกานาลอกกับความชื้นข้าว ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงของกระบวนการอบแห้งในงานวิจัยนี้

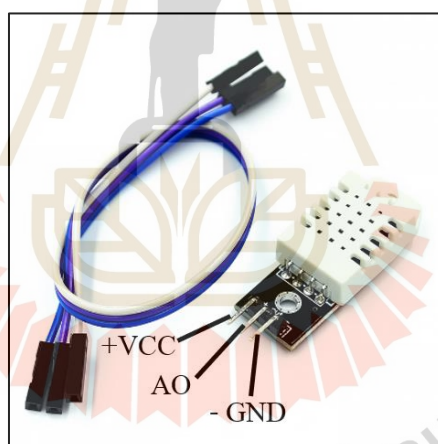


รูปที่ 3.12 เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน



รูปที่ 3.13 เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

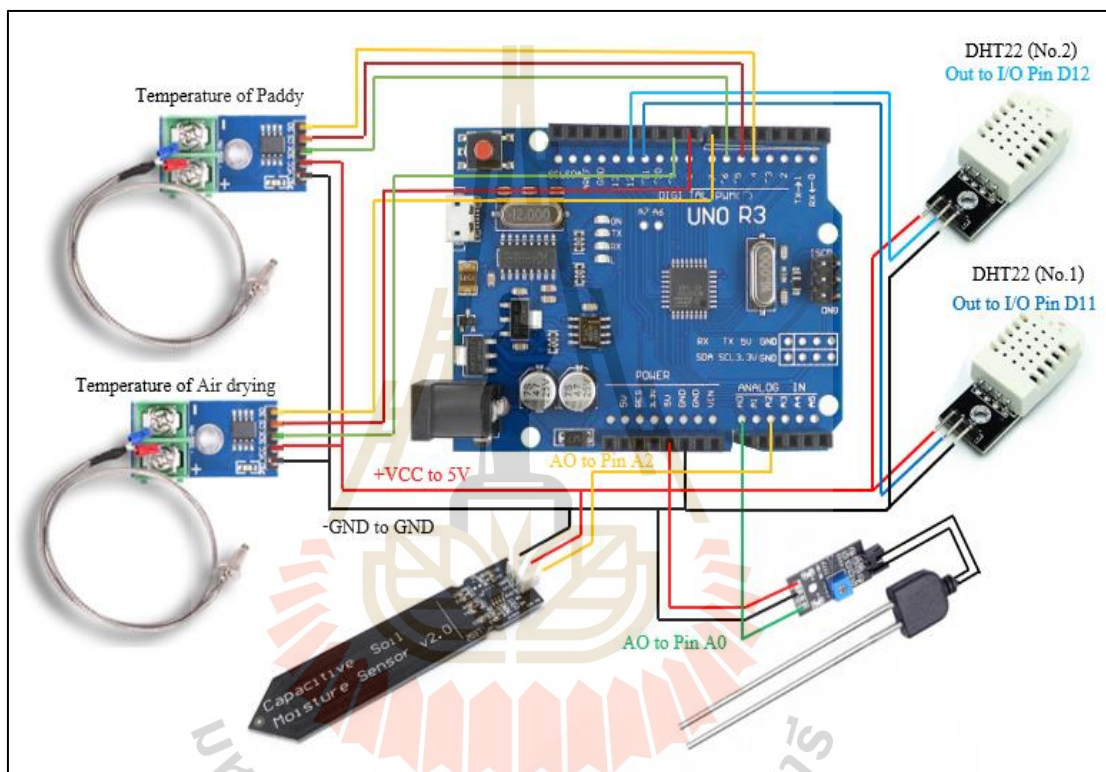
4. โมดูล DHT22 (AM2302) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
 ออบแห้งในการทำวิจัยนี้ (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 โมดูล DHT22 (AM2302)

ความน่าเชื่อถือของข้อมูลจากการวัดเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง เนื่องจากเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ถึงคุณภาพและความน่าเชื่อถือของผลงานวิจัย ทำให้ผู้สนใจสามารถนำเทคนิคต่าง ๆ รวมถึงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ได้ถูกต้อง ดังนั้นก่อนจะมีการนำเซ็นเซอร์ไปใช้งาน ผู้วิจัยจึงทำการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำของเซ็นเซอร์ที่ใช้สำหรับการทำวิจัยกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิล type K และ เซ็นเซอร์ DHT22 โดยส่วนของขั้นตอนและผลการสอบเทียบความแม่นยำของอุปกรณ์ถูกรายงานไว้ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ (ภาคผนวก ก)

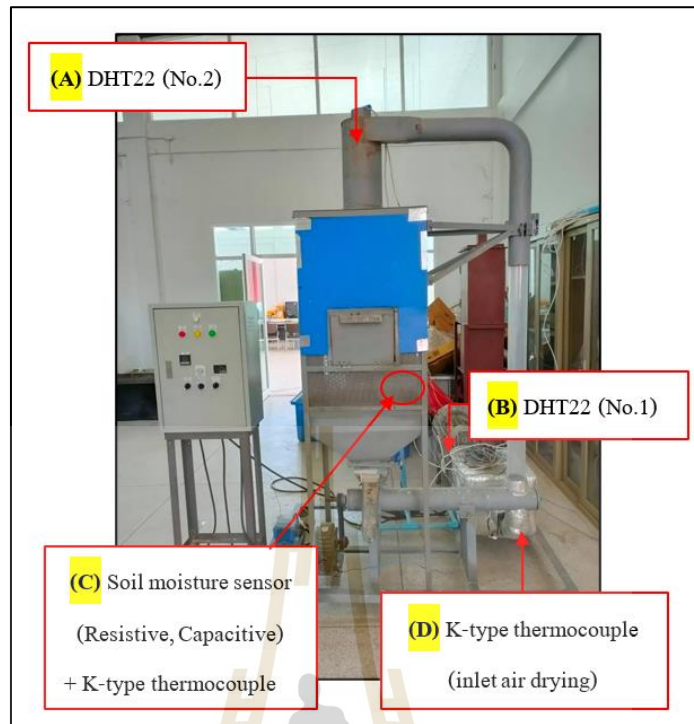
เซ็นเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบความแม่นยำจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดอะคูโน้ ดังรูปที่ 3.15 ประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน 2 ชนิด ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (DHT22) 2 ตัว และเซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ (K-type Thermocouple) 2 ตัว ในส่วนของโปรแกรมควบคุมระบบบันทึกข้อมูลการทดลอง ผู้วิจัยได้แนบรายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในภาคผนวก ข



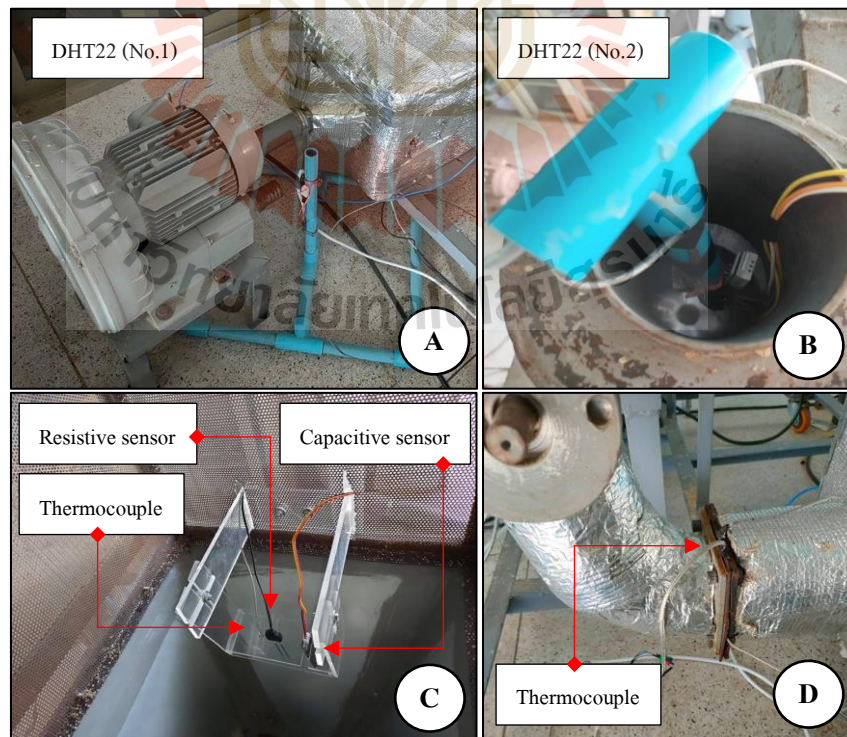
รูปที่ 3.15 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์เก็บข้อมูลการวัด

3.2.4 การติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์กับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

อุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับพัฒนาระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งพาหะลมยังจุดต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.6 ก และ 3.16 ผู้วิจัยใช้อะครีลิกใสซึ่งผ่านขั้นตอนการตัดและประกอบ สำหรับเป็นอุปกรณ์จับยึดเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินและเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของข้าวเปลือก (K-type Thermocouple) ยังจุด C ขณะที่ เซ็นเซอร์ DHT22 ถูกติดตั้งบริเวณทางเข้าของอากาศก่อนเข้าพัดลม (จุดที่ 1 หรือ A) และบริเวณทางออกอากาศของไซโคลน (จุดที่ 2 หรือ B) ซึ่งใช้ท่อ PVC สำหรับยึดจับเซ็นเซอร์ดังกล่าว และ K-type Thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหอบแห้งที่จุด D ตามรูปที่ 3.6 ก และ 3.17



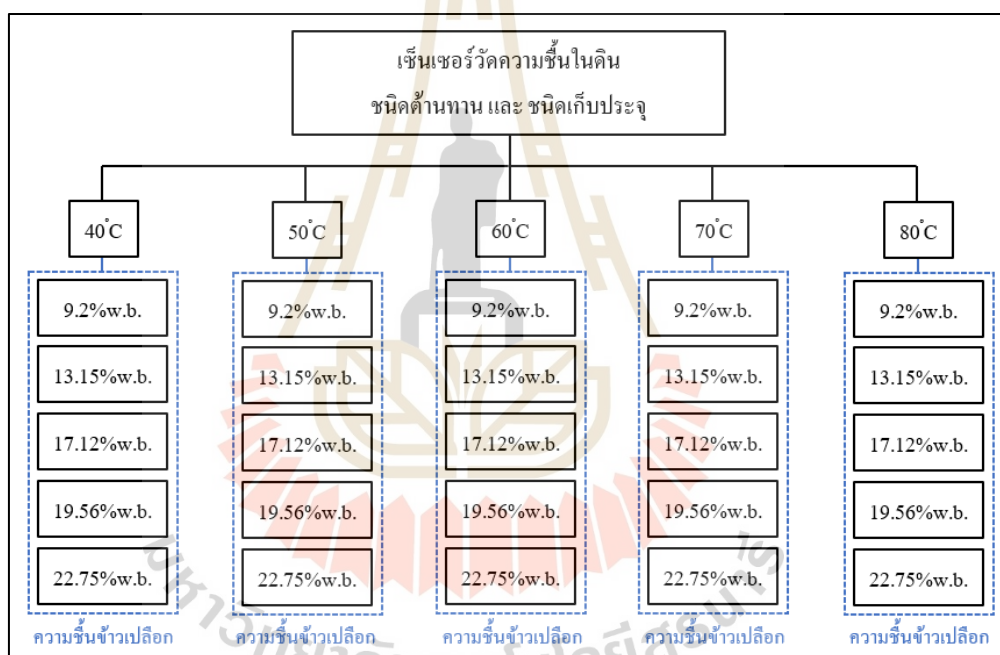
รูปที่ 3.16 จุดติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับบันทึกผลการวัด



รูปที่ 3.17 การติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง

3.3 การทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินสำหรับวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน

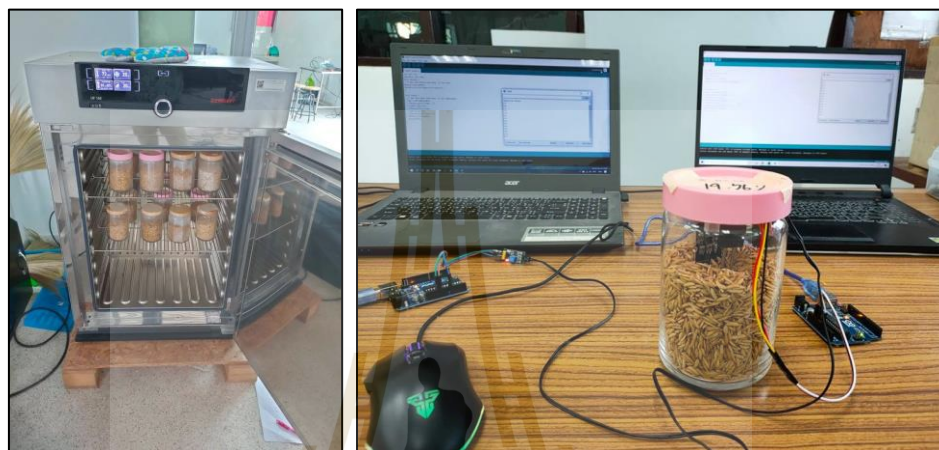
จากความพยายามที่จะประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินทั้งชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุมาใช้ในการวัดความชื้นของข้าวเปลือกในย่านอุณหภูมิการอบแห้ง ทำให้การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เป็นสิ่งสำคัญในขั้นต้นของการทำวิจัย เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์หารูปแบบของความสัมพันธ์ดังกล่าว แนวโน้มความเป็นไปได้ในการที่จะนำเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดมาใช้งาน และหาเทคนิคที่จะนำมาใช้สร้างแบบจำลองสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในลำดับถัดไป



รูปที่ 3.18 เงื่อนไขการทดลองสำหรับศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินสำหรับการวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ

ผู้วิจัยทำการออกแบบและกำหนดเงื่อนไขการทดลองโดยการเตรียมความชื้นของข้าวเปลือกให้มีความแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 9.2% 13.15% 17.12% 19.56% และ 22.75% (ความชื้นเป้าหมาย) จำลองอุณหภูมิข้าวเปลือกเป็น 40, 50, 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 3.18) จากการนำข้าวเปลือกบรรจุไว้ในขวดโหลปิดผนึกซึ่งถูกควบคุมอุณหภูมิโดยตู้อบลมร้อนเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบจะทำการแบ่งตัวอย่างข้าวเปลือกความชื้นละ 3 ตัวอย่าง

สำหรับการทำซ้ำ (3 Replications) การเก็บข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 120 วินาที ด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิด ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งตัวอย่างข้าวเปลือกภายหลังการวัดสัญญาณไฟฟ้าถูกนำมาตรวจสอบความชื้นสำหรับใช้เป็นข้อมูลความชื้นอ้างอิงด้วยวิธีการอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การเก็บข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 3.20 การตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือก

3.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุถูกนำมาพล็อตเทียบกับความชื้นข้าวเปลือกที่วัดโดยวิธีอบลมร้อน (รูปที่ 3.20) นอกจากนี้ยังถูกจัดวางตามเวลาที่ทำการวัดค่าสัญญาณ โดยข้อมูลดังกล่าวแสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1 เพื่อกำหนดช่วงของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการถดถอยเชิงเส้น ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งบ่งชี้ถึงผลของอุณหภูมิการวัดที่มีต่อการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์แต่ละชนิด ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิการวัดที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

จากการพิจารณาผลของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดโดยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด และผลของการวัดสัญญาณไฟฟ้าตามเวลาต่าง ๆ พบความผันผวนในช่วงเริ่มต้นของการเก็บข้อมูลสูง ซึ่งเห็นได้ชัดในช่วงวินาทีที่ 0 – 20 และเพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของการลดลงของอุณหภูมิข้าวเปลือก (ในช่วงปลายของการวัด) จากการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงเลือกค่าเฉลี่ยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ในช่วงวินาทีที่ 20 – 40 มาใช้สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression, SLR) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่แต่ละอุณหภูมิของการวัดและความเป็นไปได้ของการนำเซ็นเซอร์เหล่านี้ไปใช้สำหรับต่อยอดการพัฒนาวิธีการประเมินความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งต่อไป

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดด้วยเซ็นเซอร์ดังกล่าว ผู้วิจัยได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.2 อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาผลการทดสอบในเบื้องต้น พบว่า เซ็นเซอร์ชนิดต้านทานมีความสามารถในการทำนายความชื้นข้าวเปลือกแม่นยำสูงในช่วงอุณหภูมิ 60°C ถึง 80°C ในขณะที่เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุมีความสามารถในการทำนายความชื้นข้าวเปลือกแม่นยำสูงในช่วงอุณหภูมิ 40°C ถึง 60°C

3.3.3 การวิเคราะห์สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

ในการวิเคราะห์ความชื้นข้าวเปลือกจากการรับค่าสัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิจากอุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์นั้น เป็นการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการพยากรณ์ซึ่งมีตัวแปรต้น

มากกว่า 1 ตัว (รับค่าจากเซ็นเซอร์) และตัวแปรตาม 1 ตัว (ความชื้นข้าวเปลือก) ดังนั้นการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple Linear Regression, MLR) จึงถูกนำมาใช้สำหรับการหาสมการทำนายผลจากข้อมูลการทดลองในขั้นตอนนี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวเปลือกก่อนจะนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลการวัดสัญญาณไฟฟ้ากับเครื่องอบเครื่องอบแห้งพาหะลม

ทั้งนี้ ผลการทดลองทั้ง 75 ตัวอย่าง (จากแผนการทดลองดังรูปที่ 3.18) ถูกนำมาจัดเรียงลำดับและแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ในสัดส่วน 2:1 สำหรับใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set; 50 samples) และใช้สำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน (Validation set; 25 samples) โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในส่วนนี้ผู้วิจัยเลือกใช้สัญญาณในช่วงวินาทีที่ 10 – 60 เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณจากการวัดค่อนข้างคงที่ และเพื่อให้ข้อมูลมีจำนวนมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ผล

3.3.4 การจัดการข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวเปลือกของสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี MLR (จากหัวข้อ 3.3.3) ทำให้ผู้วิจัยพบข้อด้อยของวิธีดังกล่าว ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลการทดลองที่นำมาศึกษาความสัมพันธ์มีอยู่จำนวนมาก ข้อมูลดังกล่าวอาจมีการกระจายในหลายมิติ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงซ้อน (Coefficient of Multiple Determination, R^2) มีค่าที่ไม่สูงมากนักสำหรับเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ อีกทั้งยังมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงจากการทำนายผลด้วยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด เมื่อเทียบงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา ซึ่งผลการประเมินประสิทธิภาพของสมการทำนายความชื้นด้วยวิธีการนี้ ผู้วิจัยได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.3

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) เป็นวิธีการซึ่งถูกใช้สำหรับลดมิติของข้อมูลให้เหลือน้อยลง เหมาะแก่การจัดการข้อมูลก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนอื่น ๆ ที่แตกต่างกันในลำดับถัดไป ประโยชน์อย่างเห็นได้ชัดจากวิธีการนี้ทำให้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งนำวิธีการดังกล่าวมาใช้วิเคราะห์ข้อมูล (รายละเอียดถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6)

สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายผลจาก MLR และเพื่อยืนยันว่าวิธีการวิเคราะห์ PCA สามารถนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ PCA กับชุดข้อมูลการทดลองเดิม

ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics จำนวนองค์ประกอบที่สามารถรวบรวมความแปรปรวนของข้อมูลเต็มได้สูงที่สุดที่ยอมรับได้ (ไม่ต่ำกว่า 90%) ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ MLR ในลำดับถัดไป ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากเทคนิคดังกล่าวถูกเปรียบเทียบกับผลการทำนายความชื้นข้าวจากการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอน 3.3.3 เพื่อดูแนวโน้มของวิธีการในการนำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ทั้งนี้ ผลการทดสอบถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.4

3.4 การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

เครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบได้รับการปรับปรุงและติดตั้งอุปกรณ์การวัดยังจุดต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อย ตามหัวข้อ 3.2.4 ข้าวเปลือกภายหลังกระบวนการคัดแยกสิ่งเจือปน (หัวข้อ 3.2.1.1) ถูกนำมาเตรียมความชื้นสำหรับการทดสอบการอบแห้งโดยกำหนดความชื้นเป้าหมายที่ 26%w.b. (หัวข้อ 3.2.1.3) ในส่วนของขั้นตอนการทดลองและบันทึกผล ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขควบคุมและดำเนินการดังนี้

1. ON Main Circuit Braker แล้วกำหนดความเร็วรอบของพัดลม (ขับเคลื่อนอากาศที่ใช้อบแห้ง) และมอเตอร์ (ต้นกำลังขับเคลื่อนสกรูลำเลียงข้าวเปลือก) ให้คงที่ โดยวิธีการกำหนดความถี่บนอินเวอร์เตอร์เป็น 55 Hz และ 30 Hz ตามลำดับ
2. กำหนดอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งผ่านชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ฮีทเตอร์จะทำการอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ คือ 70°C และ 80°C ตามเงื่อนไขของการทดลอง



รูปที่ 3.21 การชั่งข้าวเปลือกสำหรับการทดลอง

3. ข้าวเปลือกความชื้น 26%w.b. ถูกนำไปชั่งตวงรูปที่ 3.21 เพื่อนำมาอบแห้ง โดยผู้วิจัย กำหนดมวลของข้าวเปลือกเริ่มต้นสำหรับทดสอบเป็น 20 กิโลกรัม

4. สั่งเปิดการทำงานของฮีทเตอร์และพัดลม ในขณะเดียวกัน ผู้วิจัยได้ดำเนินการบรรจุ ข้าวเปลือก 20 กิโลกรัม ไปยังถังเก็บข้าวของเครื่องอบแห้ง จนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศ ณ จุดทางเข้าหอบแห้งเป็นไปตามที่กำหนด มอเตอร์ต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนสกรูลำเลียงข้าวเปลือก จะเริ่มทำงาน ซึ่งผู้วิจัยเริ่มต้นจับเวลาการอบแห้งข้าวเมื่อข้าวเปลือกเข้าสู่หอบแห้ง

5. สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาตรวจหาความชื้น (ตามหัวข้อที่ 3.2.1.2) ทุก ๆ 10 นาที ร่วมกับการเก็บผลของอุปกรณ์รับรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย Arduino ผ่านหน้าจอ Serial monitor ของโปรแกรม Arduino IDE เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลซึ่งจะกล่าวถึง ในหัวข้อถัดไป ระยะเวลาดำเนินการอบแห้ง 650 นาที (สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C) และ 600 นาที (สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C) ทั้งนี้ในแต่ละอุณหภูมิอบแห้งที่ 70°C และ 80°C ผู้วิจัย ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 3 การทดลองต่อ 1 อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ใช้ เป็นเงื่อนไขทดสอบ

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองเอมพิริคัลสำหรับการวิเคราะห์

ชื่อแบบจำลอง	รูปแบบสมการ
Newton	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = \exp(-k.t)$
Page	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = \exp(-k.t^n)$
Henderson and Pebis	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = a.\exp(-k.t)$
Logarithmic	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = a.\exp(-k.t) + c$
Two term	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = a.\exp(-k_1.t) + b.\exp(-k_2.t)$
Midilli et.al.	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = a.\exp(-k.t^n) + b.t$
Wang and Singh	$MR = \frac{M_{w,time} - M_{w,equilibrium}}{M_{w,initial} - M_{w,equilibrium}} = 1 + a.t + b.t^2$

ที่มา: สุเนตร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัครราชันย์ (2554)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งสำหรับงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาขึ้นจากการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองเข้ากับรูปแบบสมการต้นแบบหรือสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) รูปแบบต่าง ๆ (ตารางที่ 3.1) โดยผู้วิจัยได้ทวนสอบแบบจำลอง (Validation of Model) ด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เพื่อประเมินความสอดคล้องของแบบจำลองที่ได้กับข้อมูลการทดลอง ทั้งนี้ตัวแปรของแบบจำลองเอมพิริคัลถูกวิเคราะห์โดยฟังก์ชัน Nonlinear ของโปรแกรม IBM SPSS Statistics ซึ่งรายละเอียดสำหรับการใช้งานโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ดังกล่าวถูกแนบไว้ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์นี้ (ภาคผนวก ง)

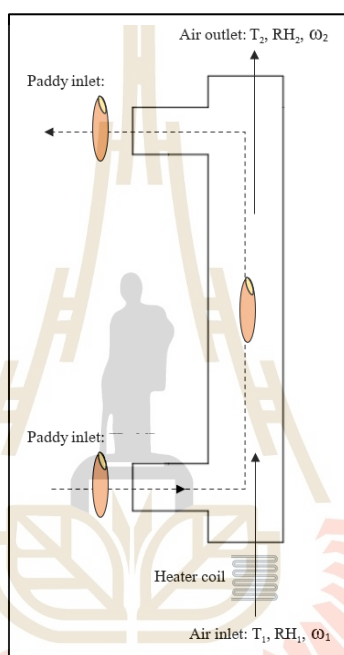
3.5 การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

ในเนื้อหาส่วนที่ 3.3 ผู้วิจัยกล่าวถึงการทดลองเพื่อศึกษาแนวทางและหาความเป็นไปได้สำหรับการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิดมาใช้ในการประเมินความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้ง โดยผู้วิจัยพบว่าเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เป็นเทคนิคที่มีความสำคัญและโดดเด่นในการนำมาวิเคราะห์ข้อมูลก่อนที่จะนำข้อมูลจากการวัดนั้นไปสร้างสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธี MLR และเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลการวัด ผู้วิจัยได้นำเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิซึ่งผ่านการสอบเทียบไปติดตั้งยังบริเวณถึงเก็บข้าวดังรูปที่ 3.17 สำหรับวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะที่ออกจากหอบแห้ง ในการทดลองผู้วิจัยทำการเก็บค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด ทุก 10 นาที โดยแต่ละช่วงเวลาได้ดำเนินการเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 จนถึงวันที่ 120 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับสร้างสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกได้จากการนำข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แต่ละตัวจัดเรียงลงใน IBM SPSS Statistics ซึ่งในการจัดทำ ผู้วิจัยอ้างอิงวิธีการในการวิเคราะห์แบบเดียวกับขั้นตอนที่ได้จากการศึกษาขั้นต้น (หัวข้อ 3.3) โดยใช้เทคนิค PCA มาใช้ลดมิติของข้อมูลแล้วนำ PC ใหม่ที่ได้มาวิเคราะห์ MLR ร่วมกับอุณหภูมิของข้าวเปลือกสำหรับพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นแบบตามเวลาจริง ซึ่งจะได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการประเมินความชื้นทั้งในชุดข้อมูลที่ใช้สร้างสมการ (Calibration set, การทดลองครั้งที่ 1 และ 2) และชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการ (Validation set, การทดลองครั้งที่ 3) โดยมีการแบ่งกรณีของการวิเคราะห์ผลดังนี้

1. วิเคราะห์หาสมการสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากข้อมูลการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C
2. วิเคราะห์หาสมการสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากข้อมูลการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

ทั้งนี้ โปรแกรม IBM SPSS Statistics ถูกนำมาใช้สำหรับช่วยวิเคราะห์ผลการทดลองดังกล่าวมาข้างต้น โดยผู้วิจัยได้แนบข้อมูลและขั้นตอนการวิเคราะห์ไว้ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ (ภาคผนวก ง)

3.6 การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์ DHT22

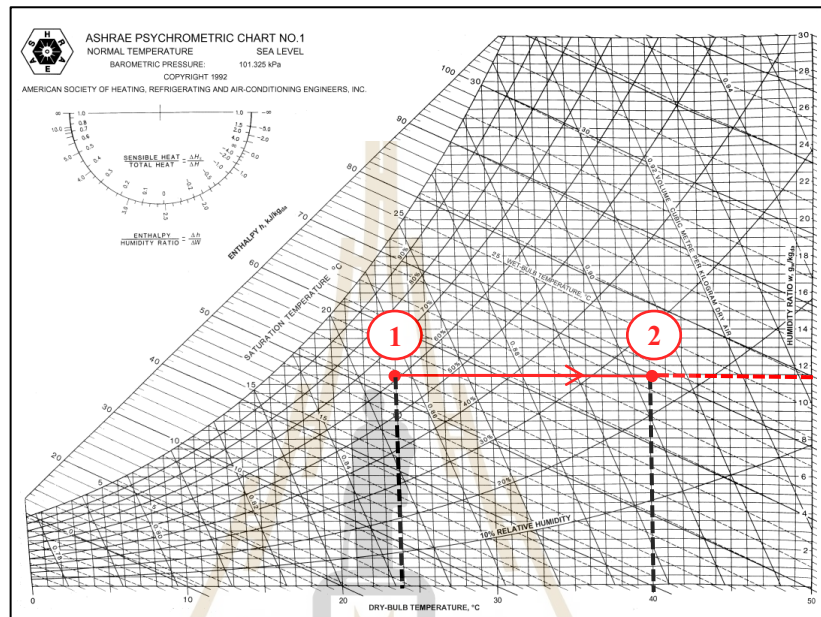


รูปที่ 3.22 การถ่ายเทความร้อนและมวลของข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Temperature of air, T_{db}) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity, RH) มาใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาและพัฒนาวิธีการประเมินความชื้นข้าวแบบตามเวลาจริง ซึ่งผู้วิจัยทำการติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับบันทึกข้อมูล 2 จุด ดังรูปที่ 3.22 ได้แก่ จุดวัดสภาพอากาศแวดล้อม ณ ทางเข้าของพัดลม (จุดที่ 1) และจุดวัดอากาศอบแห้งซึ่งได้รับความชื้นจากวัสดุ ณ ทางออกของไซโคลน (จุดที่ 2) โดยข้อมูลดังกล่าวถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของความชื้นที่อากาศอบแห้งได้รับจากข้าวเปลือกซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของมวลชื้นของข้าวเปลือกทั้งหมดที่ลดลงตามกฎสมดุลมวล จากแนวคิดดังกล่าว มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเทคนิคนี้สู่การประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงในกระบวนการอบแห้งข้าว

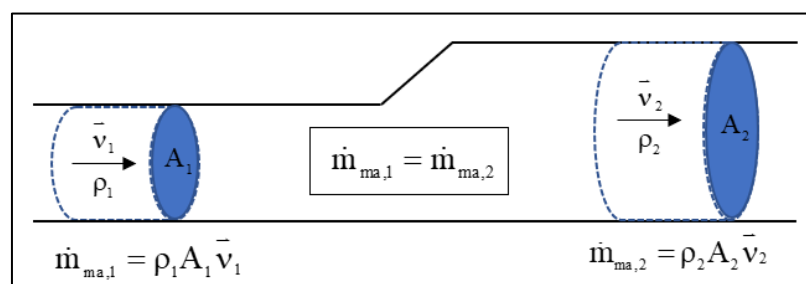
พิจารณารูปที่ 3.6 (ก) และ 3.22 อากาศแวดล้อมก่อนเข้าสู่พัดลม มีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง T_1 และความชื้นสัมพัทธ์ RH_1 ถูกเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่าหนึ่งโดยฮีตเตอร์

อัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อมจะมีค่าเท่ากับอากาศที่ถูกเพิ่มอุณหภูมิ (ผ่านฮีตเตอร์) ตามกระบวนการทำความร้อน (Heating process) ดังรูปที่ 3.23 ซึ่งเป็นตัวอย่างของกระบวนการทำความร้อนอากาศที่มีอุณหภูมิ 24°C, 65%RH เป็น 40°C สำหรับการวิเคราะห์ความชื้นข้ามเปลือกตามจุดเวลาต่าง ๆ มีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.23 กระบวนการทำความร้อน (Heating process)

สืบเนื่องจากการเก็บค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2 ผู้วิจัยได้นำข้อมูลนี้มาใช้สำหรับหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้ง โดยเลือกพิจารณาคุณสมบัติของอากาศ ณ ทางออกของอากาศอบแห้ง ทั้งนี้ผู้วิจัยมีการพิจารณาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห่งดังนี้



รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

อากาศแวดล้อมซึ่งถูกนำมาทำความร้อนสำหรับอบแห้งวัสดุเกษตรนั้นเป็นอากาศขึ้น หากพิจารณาตามรูปที่ 3.24 จะเห็นว่า อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้น (\dot{m}_{ma}) เป็นผลคูณของความหนาแน่นของอากาศ (ρ) เคลื่อนตัวด้วยความเร็ว (\bar{v}) ซึ่งไหลผ่านท่อพื้นที่หน้าตัด (A) โดยมวลของอากาศขึ้น ประกอบไปด้วย ผลรวมระหว่างมวลของอากาศแห้ง (m_{da}) กับมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ (m_{mois}) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.9

$$\dot{m}_{ma} = \rho A \bar{v} \quad (3.8)$$

$$\dot{m}_{ma} = \dot{m}_{da} + \dot{m}_{mois} \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_{mois} = \dot{m}_{da} \omega \quad (3.10)$$

เมื่อแทนสมการที่ 3.10 เข้าไปยังสมการที่ 3.9 จะได้ว่า

$$\dot{m}_{ma} = \dot{m}_{da} + \dot{m}_{da} \omega = \dot{m}_{da} (1 + \omega) \quad (3.11)$$

ดังนั้น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

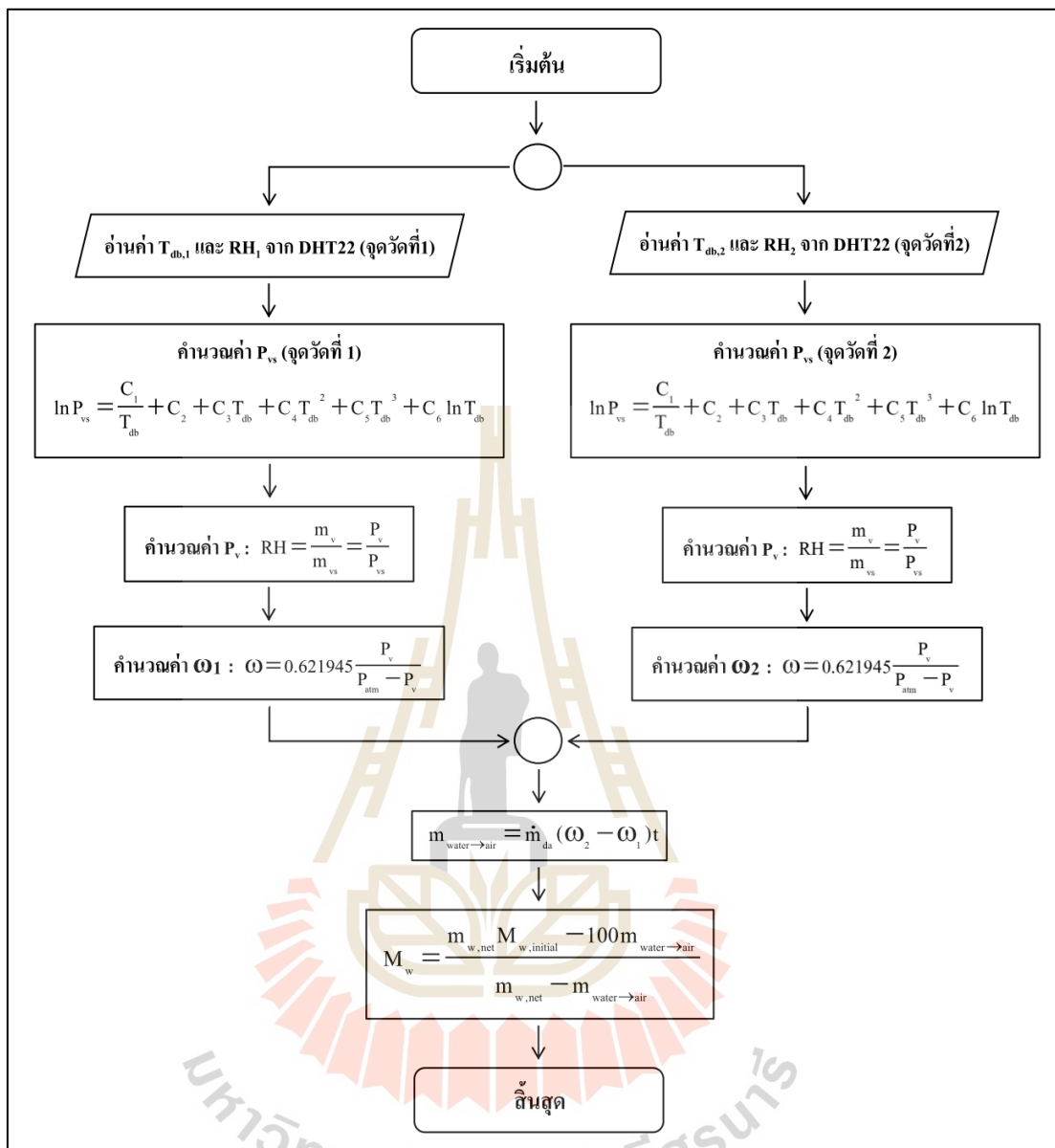
$$\dot{m}_{da} = \frac{\dot{m}_{ma}}{(1 + \omega)} \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_{da} = \frac{\rho A \bar{v}}{(1 + \omega)} \quad (3.13)$$

หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้นและอากาศแห้ง พบว่ามีข้อแตกต่างกันในพจน์ตัวส่วนซึ่งหารอยู่ในสมการ (สมการที่ 3.8 และ 3.13) จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของอัตราส่วนความชื้นอากาศซึ่งอยู่ในสมการสำหรับคำนวณค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งนั้น มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้น การศึกษาโดยทั่วไปจึงมักจะอนุมานค่าดังกล่าวนี้ให้มีค่าใกล้เคียงกันหรือเทียบเท่ากันสำหรับการคำนวณอัตราการไหลของอากาศ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เลือกพิจารณาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง

จากสมการที่ 3.13 สำหรับการพัฒนาวีธีการวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์ DHT22 ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวถึงตัวแปรนี้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความชื้นข้าวดังรูปที่ 3.25 และสมการที่ 3.14





รูปที่ 3.25 การคำนวณความชื้นข้างเปลือกที่จุดเวลาต่าง ๆ

ขั้นตอนการคำนวณความชื้นข้างเปลือกสำหรับการพัฒนาวิธีการประเมินความชื้นข้างจากเซ็นเซอร์ DHT22 เริ่มจากเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ตัวอ่านค่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและขาออกของเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิที่รับค่ามาถูกแปลงหน่วยเป็นเคลวิน (K) ก่อนนำไปคำนวณค่าความดันไออิ่มตัว (P_{vs}) ของทั้ง 2 จุดวัด ตามสมการที่ 2.5 ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศถูกรับค่ามาคำนวณต่อเนื่องจากขั้นตอนที่ผ่านมา เพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศทั้ง 2 จุดวัดตามสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของอัตราส่วนความชื้น ($\omega_2 - \omega_1$) ถูกนำไปคำนวณ

ปริมาณความชื้นที่ถ่ายเทจากข้าวเปลือกเข้าสู่อากาศอบแห้งที่เวลา (t) ใด ๆ ดังสมการที่ 3.14 โดยที่ผลรวมของปริมาณความชื้นดังกล่าวถูกนำไปคำนวณหาความชื้นสุดท้ายของข้าว ณ เวลาต่าง ๆ ดังการคำนวณความชื้นมาตรฐานเปียกจากสมการที่ 2.1 หรือหาได้จากสมการที่ 3.15

$$m_{\text{water} \rightarrow \text{air}} = \dot{m}_{\text{da}} (\omega_2 - \omega_1) t \quad (3.14)$$

$$M_w = \frac{m_{w,\text{net}} M_{w,\text{initial}} - 100 m_{\text{water} \rightarrow \text{air}}}{m_{w,\text{net}} - m_{\text{water} \rightarrow \text{air}}} \quad (3.15)$$

โดยที่	M_w	คือ ความชื้นข้าวเปลือกที่คำนวณได้จากระบบประเมินความชื้น
	$m_{w,\text{net}}$	คือ มวลวัสดุขึ้นเริ่มต้น (kg)
	$M_{w,\text{initial}}$	คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น
	$m_{\text{water} \rightarrow \text{air}}$	คือ มวลของน้ำที่ถ่ายเทสู่อากาศอบแห้ง (kg)
	t	คือ เวลา (s)

บทที่ 4

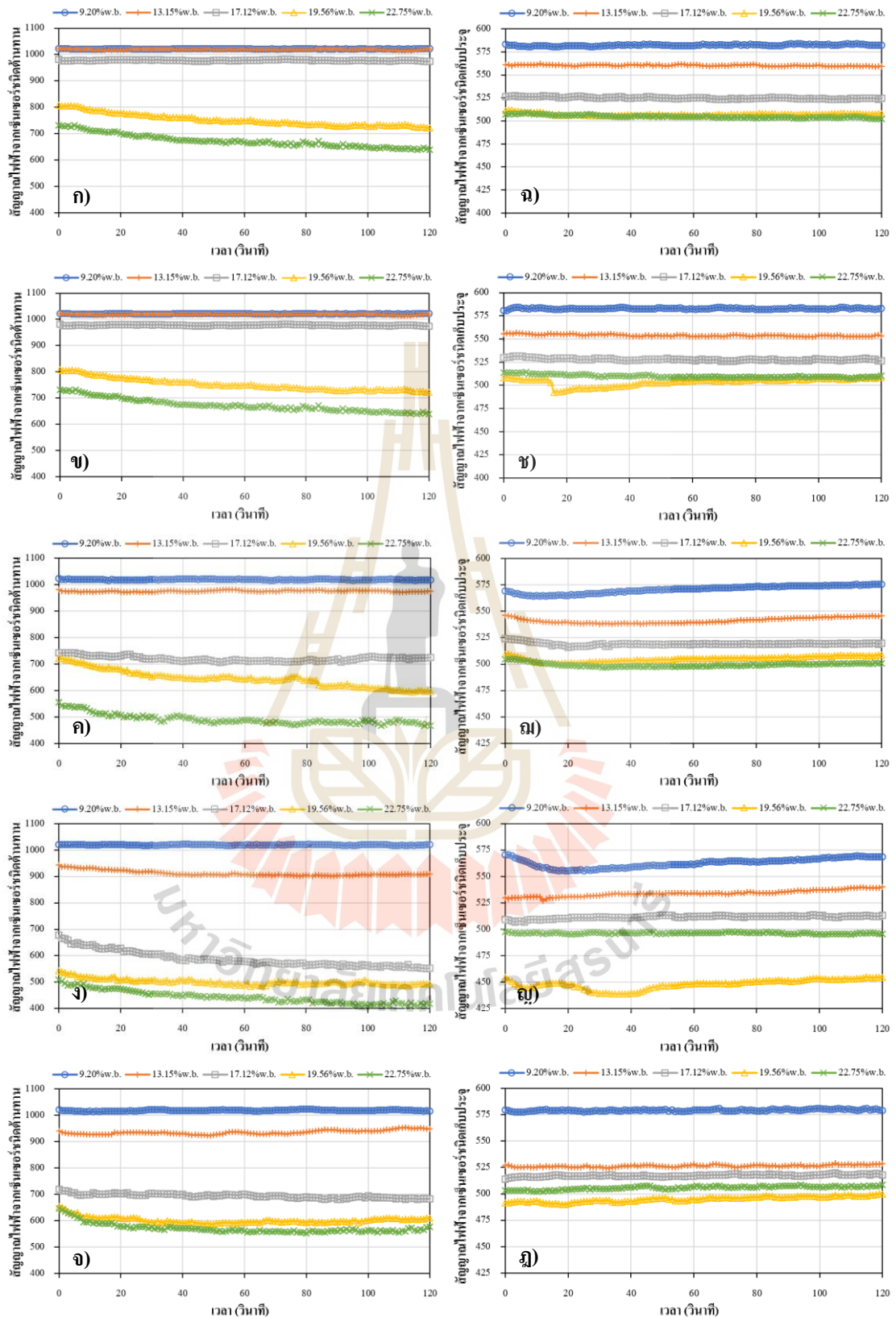
ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินสำหรับวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน

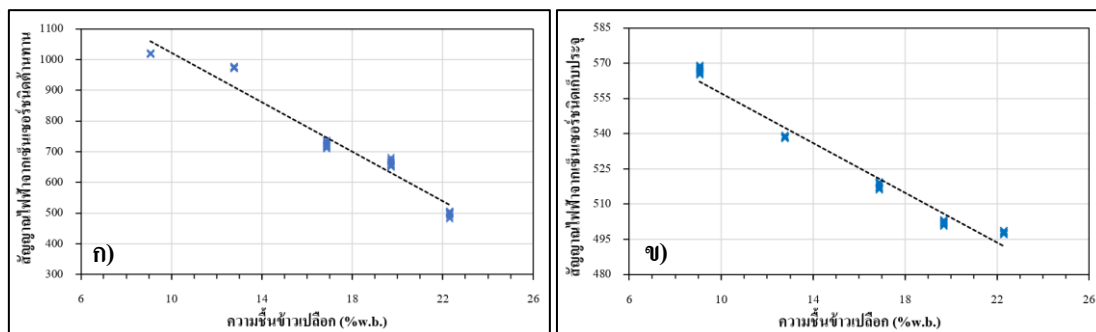
ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าตามเวลาจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่รูปถ่ายซ้ายมือ (ก) - (จ) เป็นสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน ในขณะที่รูปด้านขวามือ (ฉ) - (ญ) เป็นสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ ณ อุณหภูมิการวัดที่ 40°C, 50°C, 60°C, 70°C และ 80°C ตามลำดับ

พิจารณาค่าเฉลี่ยสัญญาณไฟฟ้างดรูปที่ 4.1 พบความไม่แน่นอนของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดในช่วงเริ่มต้น พฤติกรรมดังกล่าวมีความผันผวนสูงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงวินาทีที่ 0 - 10 อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตพฤติกรรมของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้โดยภาพรวมจากทุกอุณหภูมิการวัด ผู้วิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าค่อนข้างคงที่นับตั้งแต่วินาทีที่ 20 เป็นต้นไป เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงอิทธิพลจากการลดลงของอุณหภูมิข้าวเปลือกระหว่างการวัดที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงระยะปลายของการวัด ผู้วิจัยจึงเลือกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าในช่วงวินาทีที่ 20 - 40 มาใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลในขั้นเบื้องต้นของการศึกษา

ในขั้นต้นของการศึกษานี้ ผู้วิจัยสนใจศึกษาผลของสัญญาณไฟฟ้าจากความชื้นข้าวเปลือกที่แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ โดยการกำหนดตัวแปรต้นเป็นความชื้นข้าวซึ่งถูกวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ผลของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จึงจัดเป็นตัวแปรตามสำหรับการศึกษา เพื่อดูแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดด้วยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด (รูปที่ 4.2) ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่า ตัวแปรความชื้นข้าวกับสัญญาณไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงผกผัน ซึ่งการวัดสัญญาณไฟฟ้าในแต่ละอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกส่งผลต่อการลดลงของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด ในสัดส่วนการลดลงแบบเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างของแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้า ณ อุณหภูมิการวัดที่ 60°C



รูปที่ 4.1 สัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ณ อุณหภูมิการวัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ก) ชนิดต้านทาน ข) ชนิดเก็บประจุ ณ อุณหภูมิ 60°C

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression, SLR) จากข้อมูลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้รูปแบบสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงผกผันที่ระดับอุณหภูมิการวัดต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

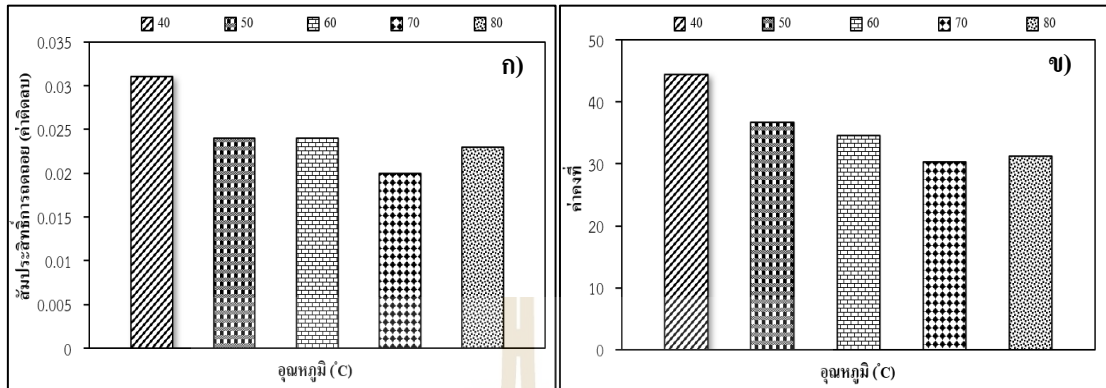
ตารางที่ 4.1 สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากการวิเคราะห์ SLR ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	รูปแบบความสัมพันธ์	
	เซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน	เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ
40°C	$Y = -0.031 (X) + 44.410$	$Y = -0.155 (X) + 99.931$
50°C	$Y = -0.024 (X) + 36.670$	$Y = -0.150 (X) + 96.828$
60°C	$Y = -0.024 (X) + 34.526$	$Y = -0.182 (X) + 111.848$
70°C	$Y = -0.020 (X) + 30.269$	$Y = -0.096 (X) + 64.971$
80°C	$Y = -0.023 (X) + 31.204$	$Y = -0.121 (X) + 77.260$

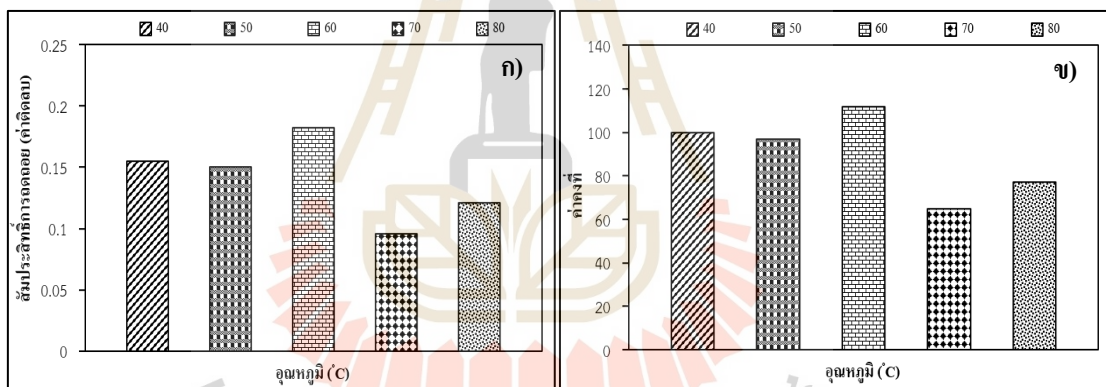
4.1.2 ผลของอุณหภูมิการวัดที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

ค่าสัมประสิทธิ์หรือความชันของเส้นแนวโน้ม (Coefficient) และค่าคงที่ (Constant) ของสมการเชิงเส้นจากการวิเคราะห์ SLR ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับ

ข้อมูลของเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน และรูปที่ 4.4 สำหรับข้อมูลของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ



รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการทำนายความชื้นข้าวสำหรับเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการทำนายความชื้นข้าวสำหรับเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ

พิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นว่าแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นสำหรับเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (ค่าติดลบน้อยลง) ในช่วงอุณหภูมิ 40°C ถึง 50°C และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ค่อนข้างคงที่) ในช่วงอุณหภูมิ 50°C ถึง 80°C ในขณะที่ค่าคงที่ของสมการมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40°C ถึง 70°C และเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วงอุณหภูมิ 70°C ถึง 80°C เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 40°C ถึง 50°C ค่าสัมประสิทธิ์มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ค่าต่ำสุดถูกพบที่อุณหภูมิ 60°C (ค่าติดลบสูงสุด) ก่อนที่จะมีการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์ในช่วงอุณหภูมิ 70°C ถึง 80°C (ค่าติดลบสูงขึ้น) นอกจากนี้ ค่าคงที่ของสมการมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 40°C ถึง 50°C และเพิ่มสูงสุดที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งในภายหลังพบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 70°C ถึง 80°C

รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นจากตารางที่ 4.1 ถูกนำไปทดสอบการคำนวณหา ค่าความชันซ้ำซ้อนในแต่ละอุณหภูมิของการทดลอง โดยค่า R^2 Adjust R^2 และ RMSEC ถูกใช้สำหรับประเมินความสามารถในการทำนายความชันซ้ำซ้อนในแต่ละอุณหภูมิการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินความสามารถในการทำนายความชันซ้ำซ้อนในแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	เซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน			เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ		
	R^2	Adjust R^2	RMSEC	R^2	Adjust R^2	RMSEC
40°C	0.802	0.800	2.156	0.974	0.948	1.130
50°C	0.869	0.868	1.785	0.903	0.902	1.534
60°C	0.958	0.958	0.993	0.969	0.968	0.865
70°C	0.951	0.950	1.067	0.637	0.633	2.839
80°C	0.958	0.958	0.912	0.750	0.747	2.070

การเปลี่ยนแปลงค่าความชันและค่าคงที่ของความสัมพันธ์สำหรับเซ็นเซอร์ ชนิดต้านทานเพียงเล็กน้อยพบได้จากผลการวัดที่อุณหภูมิปานกลางไปถึงสูง (60°C - 80°C) ในขณะที่ ความชันและค่าคงที่จากข้อมูลของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยในช่วงอุณหภูมิต่ำ จนถึงปานกลาง (40°C - 60°C) การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรดังกล่าวสอดคล้องกับผลการประเมิน ความสามารถในการทำนายความชันซ้ำซ้อนในแต่ละอุณหภูมิ ตามตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าเซ็นเซอร์ ชนิดต้านทานมีความแม่นยำสูงในการทำนายความชันซ้ำซ้อนระหว่างอุณหภูมิ 60°C - 80°C ในทางตรงกันข้าม เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุมีความแม่นยำสูงในการทำนายความชันซ้ำซ้อน ระหว่างอุณหภูมิ 40°C - 60°C ผลจากการทดลองนี้ พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ และส่งผลต่อการทำนายความชันซ้ำซ้อนจากเซ็นเซอร์วัดความชันในดินทั้ง 2 ชนิด อย่างชัดเจน

4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมการทำนายความชันซ้ำซ้อนด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย เชิงเส้นแบบพหุ

จากการศึกษาที่ผ่านมาผู้วิจัยเลือกผลของสัญญาณไฟฟ้าตั้งแต่วันที่ 20 ถึง วันที่ 40 มาใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง ช่วงเวลาดังกล่าวจัดได้ว่าเป็นช่วงที่ข้อมูลผันผวน ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาอื่น แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนของข้อมูลซึ่งเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ผลก็เป็นอีกปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงความสำคัญ เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้จะเป็นผลโดยตรง ต่อสมการซึ่งใช้ทำนายผลทั้งในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ ทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน ดังนั้นในส่วนนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า ในช่วงเวลาตั้งแต่วันที่ 10 ถึงวันที่ 60 ร่วมกับค่าอุณหภูมิของการวัดสำหรับการวิเคราะห์ MLR

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

เซ็นเซอร์	รูปแบบสมการ	R ²	RMSEC	RMSEP
ชนิดด้านทาน	$Y = 41.070 - 0.133 \beta_1 - 0.022 \beta_2$	0.815	2.065	1.932
ชนิดเก็บประจุ	$Y = 74.072 - 0.116 \beta_1 - 0.098 \beta_2$	0.631	2.917	2.653

หมายเหตุ: β_1 คือ อุณหภูมิ (°C), β_2 คือ สัญญาณไฟฟ้าจากการวัด

พิจารณาผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าการทำงานนายความขึ้นจากสมการของเซ็นเซอร์ชนิดด้านทาน มีค่า R² เท่ากับ 0.815 ในขณะที่การทำงานนายความขึ้นจากสมการของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ มีค่า R² เท่ากับ 0.631 นอกจากนี้ เมื่อนำผลการทำนายความชื้นข้าวไปเปรียบเทียบกับค่าความชื้นข้าวอ้างอิง (ได้มาจากวิธีอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่) เพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย พบว่า เซ็นเซอร์ชนิดด้านทานมีค่า RMSEC เท่ากับ 2.065 และ RMSEP เท่ากับ 1.932 สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน ตามลำดับ ในขณะที่ เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุมีค่า RMSEC เท่ากับ 2.917 และ RMSEP เท่ากับ 2.653

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงสำหรับการทำนายความชื้นข้าวจากรูปแบบสมการซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ ดังนั้นการมุ่งหาวิธีการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายผลความชื้นข้าวด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (MLR) จึงเป็นสิ่งสำคัญในขั้นตอนของการทบทวนวรรณกรรม ดังที่ผู้วิจัยได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6 และหัวข้อ 3.3.4 ก่อนหน้านี้

4.1.4 ผลการจัดการข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวเปลือกของสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ

เพื่อพัฒนาการวัดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความแม่นยำ สำหรับแก้ไขปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.3 งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมาใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของสัญญาณไฟฟ้าที่รับค่ามาจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดด้านทานและชนิดเก็บประจุ โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics ในการช่วยวิเคราะห์เชิงตัวเลขและสถิติ

ข้อมูลถูกจัดเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกประกอบด้วยข้อมูลจากเซ็นเซอร์ชนิดด้านทาน กลุ่มที่สองประกอบด้วยข้อมูลจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อลดทอนจำนวนข้อมูลลงด้วยการสร้างตัวแปรใหม่ (PC) ขึ้นจากข้อมูล 51 ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณการวัดด้วยเซ็นเซอร์แต่ละตัว โดยตารางที่ 4.4 ระบุถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลเดิมที่แต่ละองค์ประกอบ (PC) สามารถรวบรวมไว้ได้ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า การใช้ PC เพียง 2 ตัวสามารถเก็บรวบรวมความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 99.943% และ 99.699% สำหรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ชนิดด้านทานและชนิดเก็บประจุ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบ

องค์ประกอบ (PC _i)	เซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน		เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ	
	ความแปรปรวน	ความแปรปรวน	ความแปรปรวน	ความแปรปรวน
	(%)	สะสม (%)	(%)	สะสม (%)
PC ₁	99.779	99.779	99.399	99.399
PC ₂	0.164	99.943	0.300	99.699
PC ₃	0.016	99.959	0.177	99.876
PC ₄	0.010	99.969	0.061	99.938
PC ₅	0.006	99.975	0.011	99.948

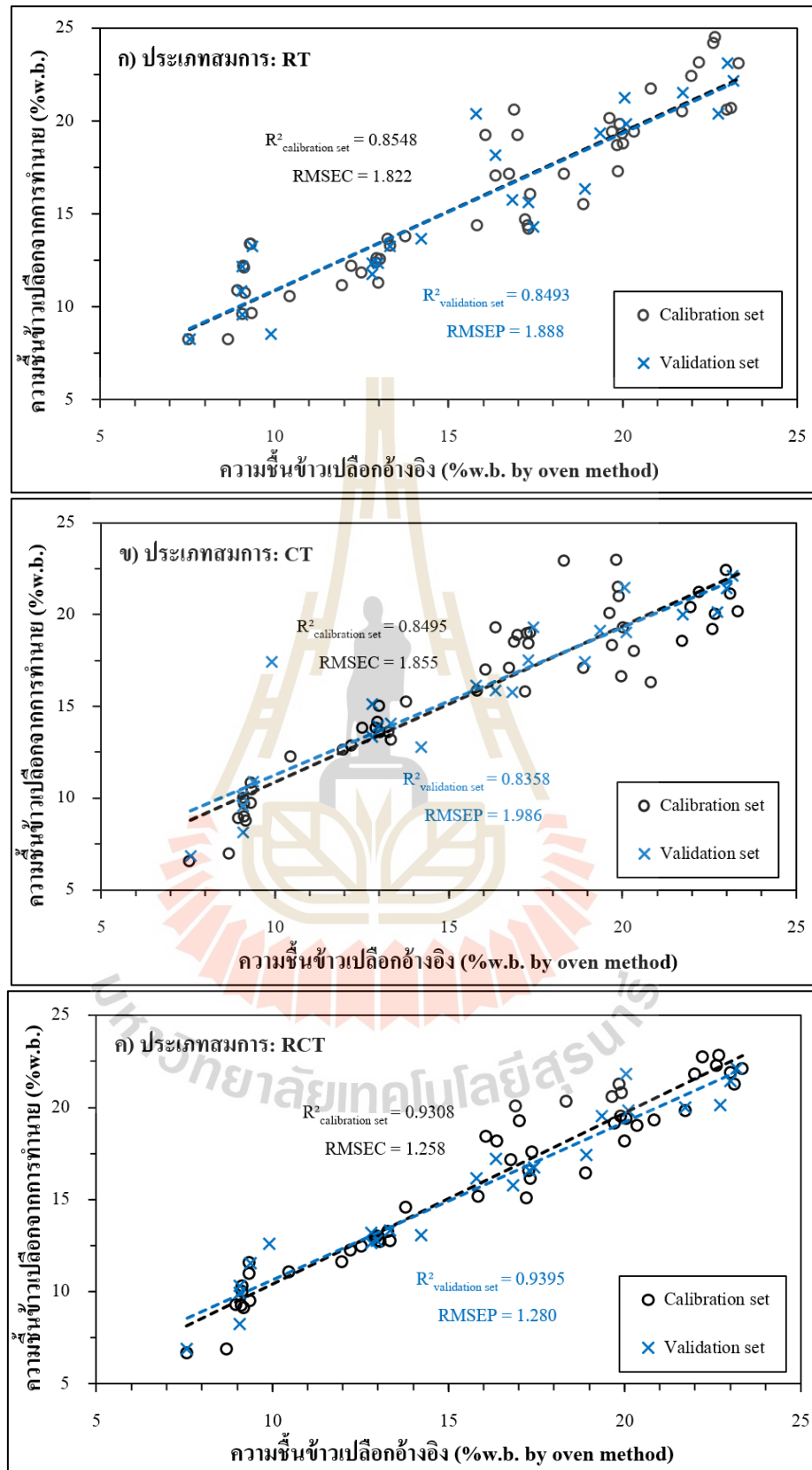
องค์ประกอบหลัก (PC) จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์แต่ละชนิดด้วยเทคนิค PCA และตัวแปรอุณหภูมิการวัด ถูกใช้สำหรับสร้างสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยเทคนิค MLR โดยแบ่งการสร้างแบบจำลองออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1. แบบจำลองที่ใช้ PC จากข้อมูลเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานร่วมกับค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือก (ประเภทสมการ: RT)
2. แบบจำลองที่ใช้ PC จากข้อมูลเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุร่วมกับอุณหภูมิของข้าวเปลือก (ประเภทสมการ: CT)
3. แบบจำลองที่ได้จากการใช้ PC จากเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกับค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือก (ประเภทสมการ: RCT)

สำหรับการสร้างแบบจำลองด้วย PC จากตารางที่ 4.4 ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธี Enter method (Use probability of F; Entry: 0.05, Removal: 0.1) แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5 และผลการเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายความชื้นแสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายความชื้นของแบบจำลองจากวิธี PCA-MLR

ประเภทสมการ	ตัวแปรที่ใช้สร้างสมการ	R ²	Adjust R ²	RMSEC	RMSEP
RT	3 (PC _{1R} , PC _{2R} , Temperature)	0.855	0.845	1.822	1.888
CT	3 (PC _{1C} , PC _{2C} , Temperature)	0.850	0.840	1.855	1.986
RCT	5 (PC _{1R} , PC _{2R} , PC _{1C} , PC _{2C} , Temperature)	0.931	0.923	1.258	1.280



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวด้วยแบบจำลองแต่ละประเภท

ผลการคัดเลือกตัวแปรพบว่าการใช้ PC เพียง 2 ตัวแรกให้ผลการสร้างสมการ จาก PC_1 และ PC_2 ของเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุร่วมกับตัวแปร อุณหภูมิด้วยเทคนิค MLR ได้แม่นยำเพียงพอ แบบจำลองดังกล่าว มีค่า R^2_{RT} เท่ากับ 0.855 และ R^2_{CT} เท่ากับ 0.850 นอกจากนี้ความสามารถในการทำนายความชื้นข้าวถูกประเมินจากกลุ่มตัวอย่าง ที่แตกต่างกัน คือ Calibration set และ Validation set จากผลการประเมิน พบว่า RMSEC ของสมการประเภท RT และประเภท CT มีค่าเป็น 1.822 และ 1.855 ในขณะที่ RMSEP มีค่าเป็น 1.888 และ 1.986 ตามลำดับ

การทำนายความชื้นข้าวเปลือกในช่วงอุณหภูมิ $40^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ ด้วยเซ็นเซอร์ วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานให้ผลความคลาดเคลื่อนของการทำนายน้อยกว่าเซ็นเซอร์ชนิด เก็บประจุ ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่สูงกว่าในการประเมินความชื้นข้าวเปลือกด้วยเซ็นเซอร์ชนิด ต้านทาน สำหรับกรณีที่ใช้เซ็นเซอร์เพียงตัวเดียวทำนายความชื้นในเงื่อนไขการทดสอบนี้ อย่างไรก็ตาม หากนำเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดมาใช้วัดค่าสัญญาณไฟฟ้าเพื่อประเมินความชื้นข้าวเปลือก ร่วมกัน มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มความสามารถของแบบจำลองในการทำนายความชื้นข้าวเปลือกได้

สมการประเภท RCT จึงถูกสร้างขึ้นจากการนำเอา PC_1 และ PC_2 จากข้อมูล ของเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกับอุณหภูมิของการวัดมาใช้สำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือก ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง พบว่า ค่า R^2_{RCT} ที่ได้มีค่าสูงถึง 0.931 และค่า RMSEC มีค่าเป็น 1.258 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายกับ Validation set พบว่าแบบจำลองมีค่า RMSEP เป็น 1.280 ผลการตรวจสอบแบบจำลองนี้ให้ผลความแม่นยำที่สูงขึ้น ดังนั้นการใช้เซ็นเซอร์ 2 ชนิดร่วมกันสำหรับ ทำนายความชื้นข้าวเปลือก จะช่วยลดเขยี่ยานการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์แต่ละตัวที่มีความ คลาดเคลื่อนแตกต่างกันตามอุณหภูมิของวัด ซึ่งเป็นการนำเอาข้อดีของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุที่ มีย่านความคลาดเคลื่อนต่ำในช่วงของอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Joaquin, Ramos, & Martinez (2019) และ Abdullah, Rahiman, Zakaria, Kamarudin, & Mohamed (2019) มาใช้ร่วมกับเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานซึ่งเหมาะสำหรับการวัดในย่านอุณหภูมิปาน กลางถึงอุณหภูมิสูง (จากผลการศึกษาก่อนหน้า)

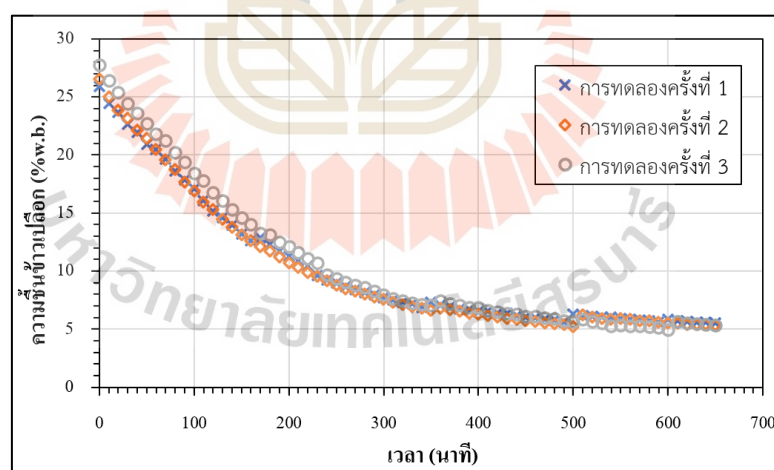
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นระหว่างแบบจำลองซึ่งได้จาก การวิเคราะห์ MLR (หัวข้อ 4.1.3) กับแบบจำลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักร่วมกับการ วิเคราะห์ถดถอยพหุ (PCA-MLR) สำหรับกรณีทำนายผลจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์เพียงชนิดเดียว พบว่า แบบจำลองที่ได้จากเทคนิค PCA-MLR ให้ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกแม่นยำสูงกว่า แบบจำลองที่ได้จากเทคนิค MLR ผลดังกล่าวสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า R^2 และการลดลงของค่า RMSE แนวโน้มเหล่านี้พบได้จากการวิเคราะห์ชุดข้อมูลทั้งเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ แสดงการเปรียบเทียบผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกระหว่างเทคนิค MLR กับ PCA-MLR

ตัวแปร	เทคนิค MLR		เทคนิค PCA-MLR	
	Resistive sensor	Capacitive sensor	Resistive sensor	Capacitive sensor
R ²	0.815	0.631	0.855	0.850
Adjust R ²	0.815	0.631	0.845	0.840
RMSEC	2.065	2.917	1.822	1.855
RMSEP	1.932	2.653	1.888	1.986

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สำหรับการลดมิติของข้อมูลจากการเก็บผลด้วยเครื่องมือวัด จัดได้ว่าเป็นเทคนิคที่มีความสำคัญที่ช่วยส่งเสริมให้การทำนายผลด้วย MLR มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และจากผลการทดสอบในครั้งนี้ ทำให้เห็นความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด สำหรับการประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ในระหว่างกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูงต่อไป

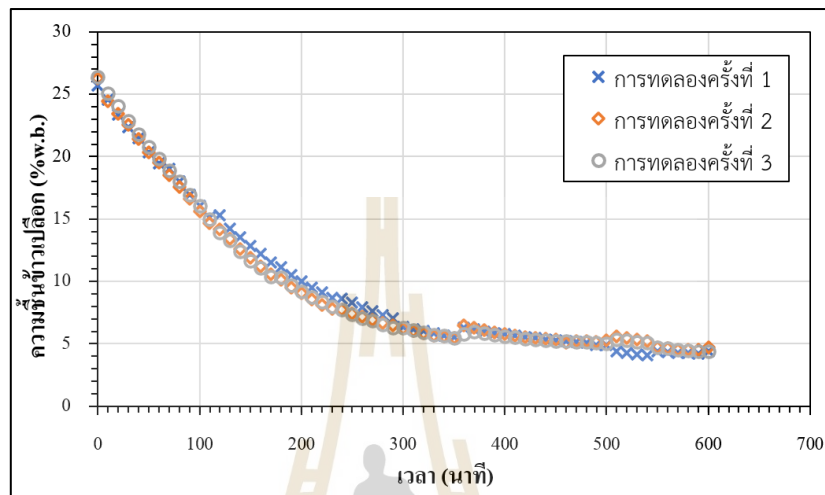
4.2 ผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม



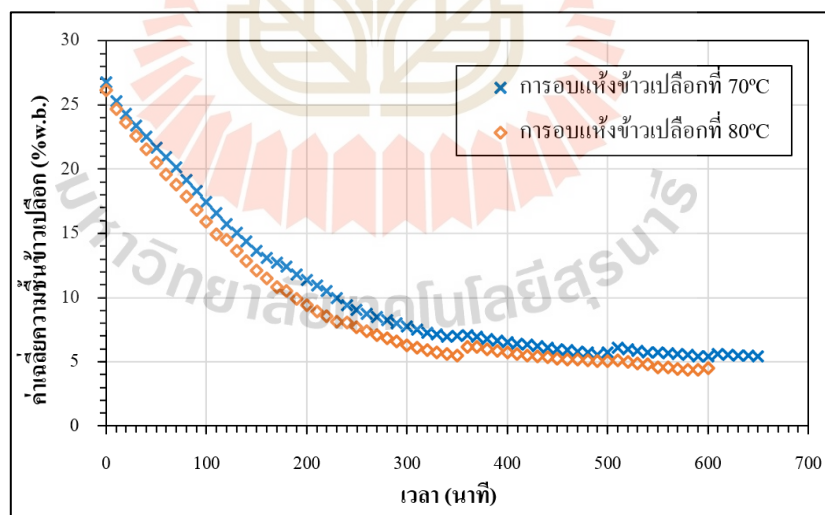
รูปที่ 4.6 การอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26%w.b. ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ภายใต้เงื่อนไขควบคุมอากาศอบแห้งที่ 70°C และ 80°C การสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกทุก 10 นาที สำหรับประเมินความชื้นด้วยวิธีอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่ ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาต่าง ๆ จากแต่ละเงื่อนไข

การทดลองถูกรายงานโดยรูปที่ 4.8 ซึ่งผลการทดลองนี้ถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายคุณลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมนี้



รูปที่ 4.7 การอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน

รูปแบบสมการจากตารางที่ 3.1 ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) ในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง เพื่อหาค่าคงที่ของแบบจำลองในสมการ โดยตารางที่ 4.7 นำเสนอผลลัพธ์ค่าคงที่ของแบบจำลองที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics

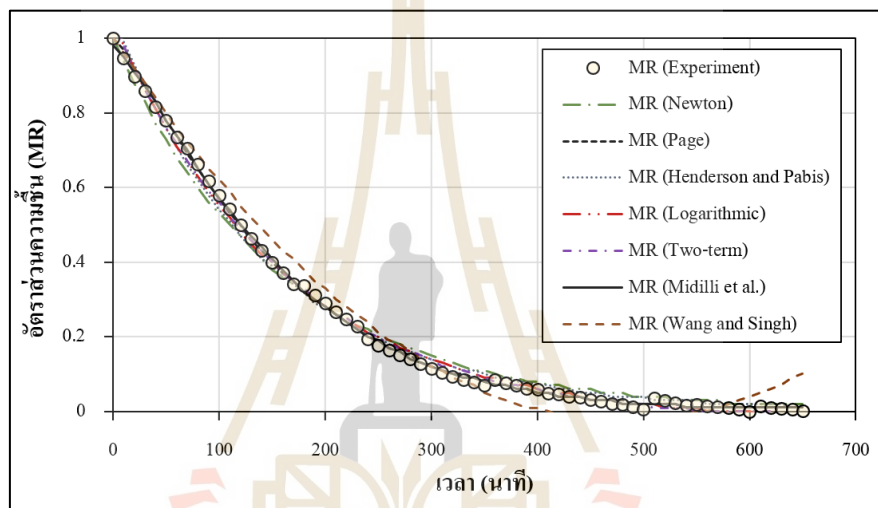
แบบจำลองที่ที่ความเหมาะสมแก่การทำนายคุณลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C พิจารณาได้จากค่า R² ของข้อมูลซึ่งเข้าใกล้ 1 มากที่สุด และ RMSE ซึ่งที่ค่าเข้าใกล้ 0 มากที่สุด

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่และผลความแม่นยำของแบบจำลองเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ

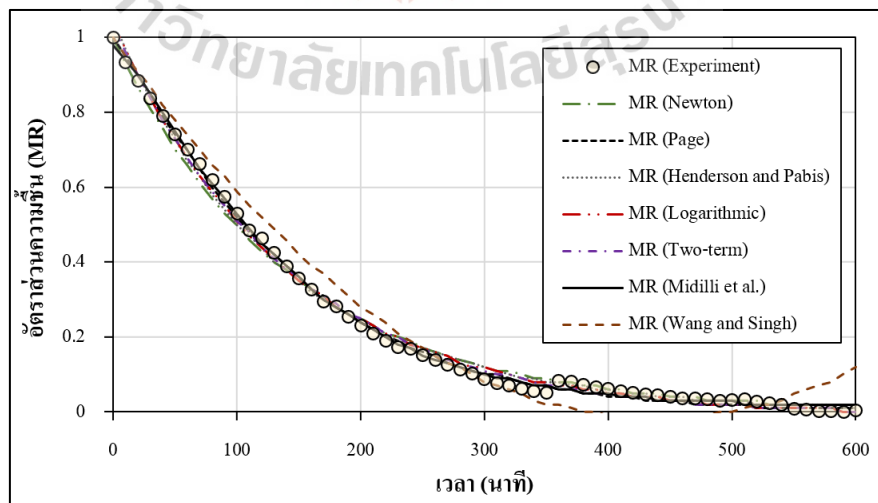
ชื่อแบบจำลอง	อุณหภูมิ	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R ²	RMSE
Newton	70°C	k = 0.006	0.990	0.0277
	80°C	k = 0.007	0.994	0.0222
Page	70°C	k = 0.002, n = 1.200	0.999	0.0093
	80°C	k = 0.003, n = 1.135	0.998	0.0127
Henderson and Pebis	70°C	k = 0.007, a = 1.064	0.994	0.0221
	80°C	k = 0.007, a = 1.046	0.995	0.0192
Logarithmic	70°C	k = 0.006, a = 1.077, c = -0.031	0.996	0.0178
	80°C	k = 0.007, a = 1.051, c = -0.013	0.996	0.0179
Two term	70°C	k ₁ = 0.004, k ₂ = 0.004, a = 43.594, b = -42.556	0.997	0.0161
	80°C	k ₁ = 0.005, k ₂ = 0.005, a = 43.228, b = -42.196	0.996	0.0167
Midilli et al.	70°C	k = 0.002, a = 0.980, b = 0.00000374, n = 1.241	0.999	0.0083
	80°C	k = 0.003, a = 0.982, b = 0.00002440, n = 1.200	0.998	0.0115
Wang and Singh	70°C	a = -0.004, b = 0.000004398	0.979	0.0411
	80°C	a = -0.005, b = 0.000005259	0.966	0.0509

จากการหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลรูปแบบต่าง ๆ ให้ผลดังตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาความสมบูรณ์ระหว่างผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นข้าวจากแบบจำลองที่วิเคราะห์ได้กับผลการทดลองจริง พบว่า แบบจำลองของ Page และ แบบจำลองของ Midilli et al. ให้ R² สูงถึง 0.998 - 0.999 สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงอุณหภูมิ 70°C ถึง 80°C และมีค่า RMSE ต่ำกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลแบบอื่น ๆ ผลที่กล่าวมานี้มีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.9 และ 4.10 ถึงแม้ว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบ สามารถให้ผลการทำนายที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูงในระดับที่ยอมรับได้

แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาค่า R^2 ประกอบกับ RMSE จะเห็นว่า แบบจำลองของ Midilli et al. มีความเหมาะสมแก่การทำนายคุณลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C และ 80°C มากที่สุด เนื่องจากลักษณะกราฟของผลการทดลอง (การลดลงของ MR) มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างคงที่ในช่วงตั้งแต่ 0 – 100 นาที สำหรับการอบแห้งข้าวที่ 70°C และช่วงตั้งแต่ 0 – 50 นาที สำหรับการอบแห้งข้าวที่ 80°C ภายหลังจากระยะเวลาดังกล่าว การถ่ายเทความชื้นจากผิวของเมล็ดข้าวเปลือกจะถ่ายเทได้น้อยลง ทำให้เส้นกราฟอัตราส่วนความชื้นกับเวลา มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น

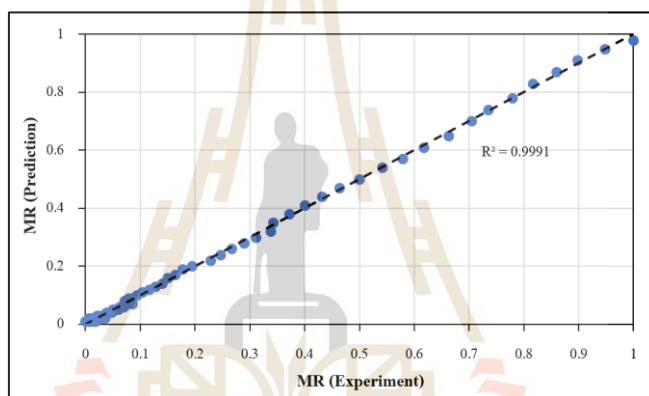


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกกับระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C

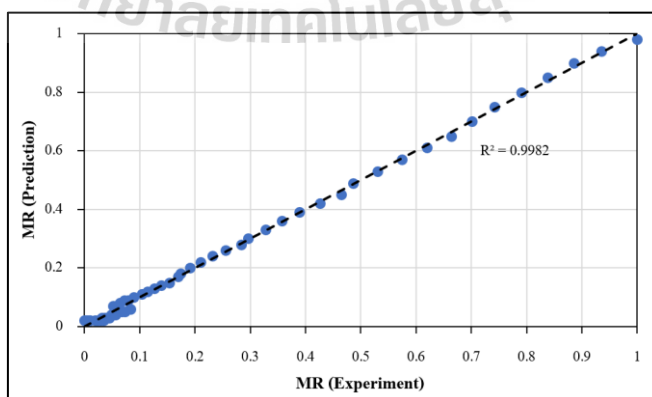


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกกับระยะเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการของ Midilli et al. ($MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$) พบว่ารูปแบบดังกล่าวเป็นผลรวมระหว่างความสัมพันธ์แบบ Exponential (พจน์ $a \cdot \exp(-k \cdot t^n)$) กับความสัมพันธ์เชิงเส้น (พจน์ $b \cdot t$) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แบบจำลองดังกล่าวเหมาะสมแก่การอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมจากการทดลอง นอกจากนี้ยังให้ค่า R^2 สูงถึง 0.999 และ 0.998 สำหรับการอบแห้งที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ และค่า RMSE ต่ำที่สุด (0.0083 และ 0.0115 สำหรับการอบแห้งที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบอื่นที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการศึกษานี้ สำหรับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ถูกเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



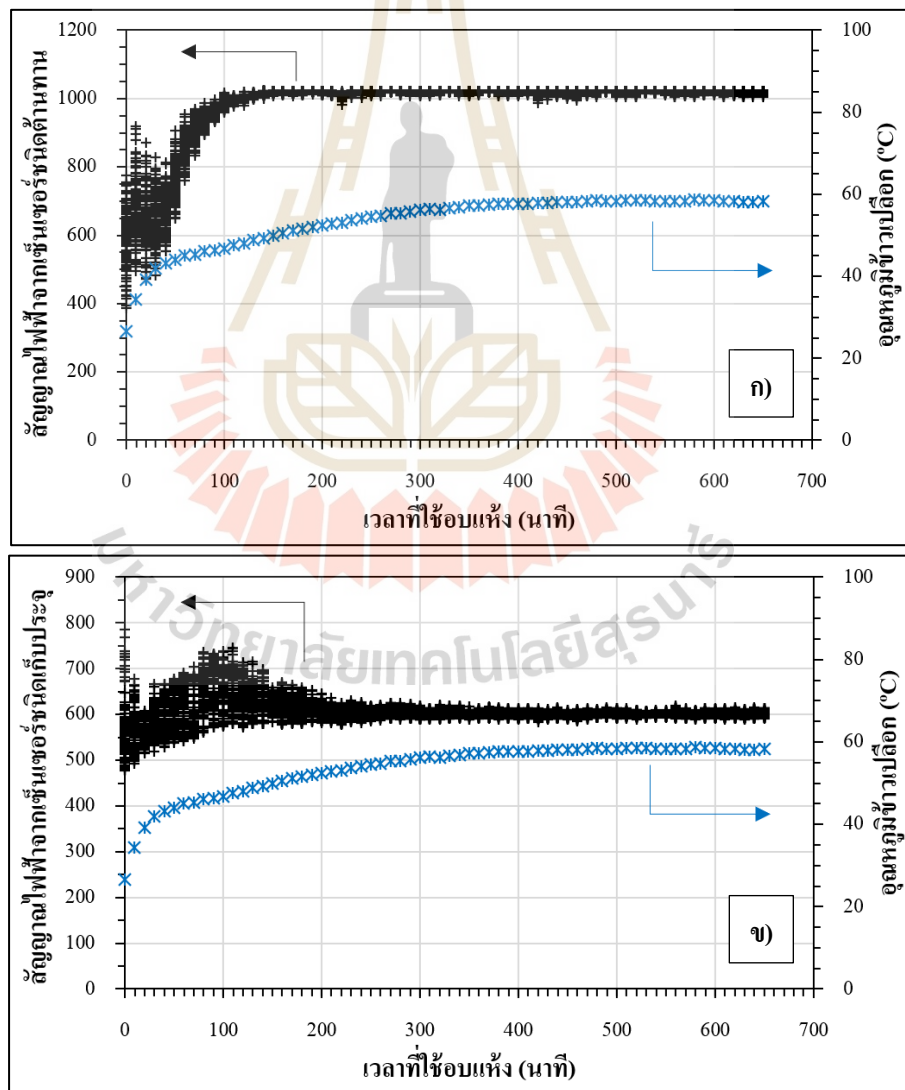
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli et al. กับอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกจากการทดลอง ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

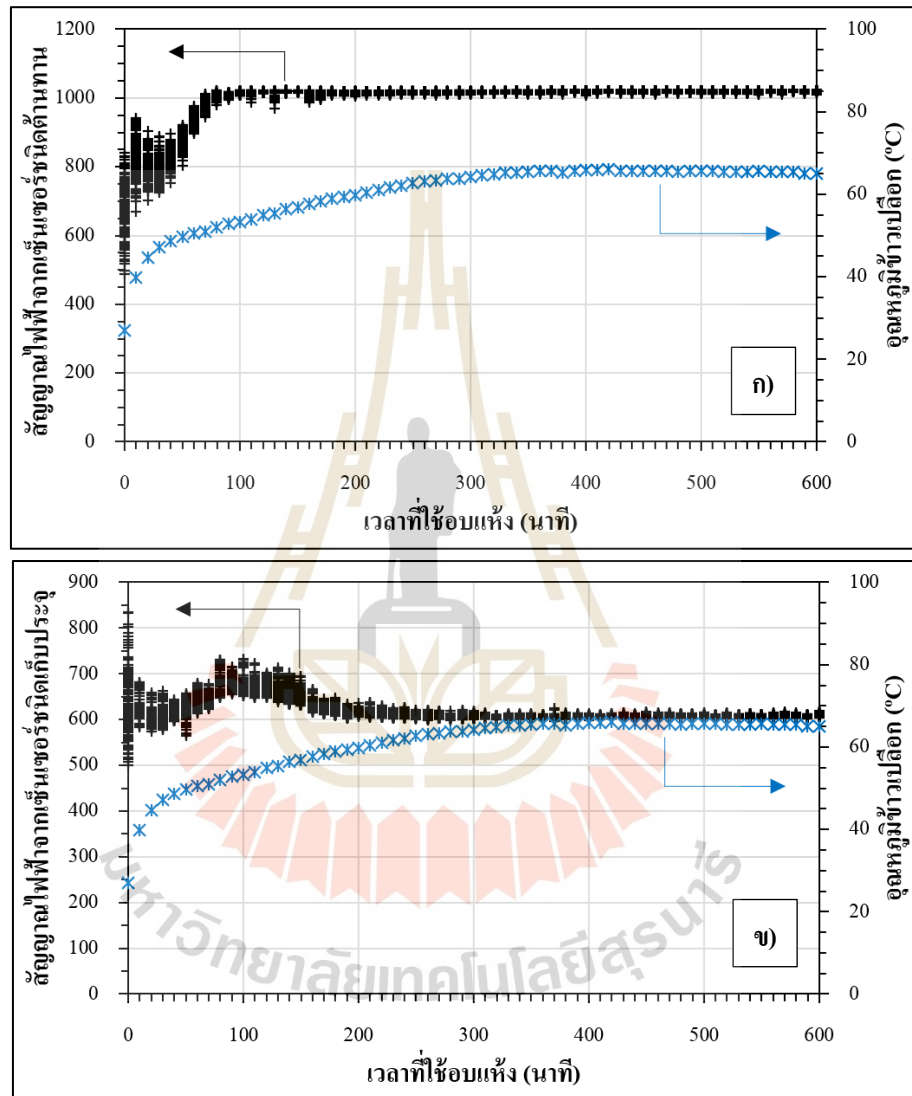
4.3 การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทานจากการทดลอง 3 ครั้ง (เงื่อนไขการทดลองที่ 70°C) ถูกรายงานโดยรูปที่ 4.13 ก และสัญญาณไฟฟ้าจากการอ่านค่าด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดเก็บประจุถูกรายงานโดยรูปที่ 4.13 ข ในแต่ละช่วงเวลากการอบแห้งค่าสัญญาณไฟฟ้าจำนวน 121 ข้อมูลถูกจัดวางโดยอ้างอิงค่าบนแกนปฐมภูมิ (Primary axis) ในขณะที่อุณหภูมิพื้นผิวของข้าวเปลือกถูกวัดโดย K-type Thermocouple ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิข้าวเปลือกถูกรายงานไว้ในรูปที่ 4.13 โดยอ้างอิงค่าบนแกนทุติยภูมิ (Secondary axis)



รูปที่ 4.13 สัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งที่ 70°C

ในส่วนของข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิของข้าวเปลือก ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C ถูกรายงานด้วยรูปที่ 4.14 โดยที่ ก เป็นข้อมูลจากกลุ่มของเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทาน และ ข เป็นข้อมูลจากกลุ่มของเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดเก็บประจุ



รูปที่ 4.14 สัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งที่ 80°C

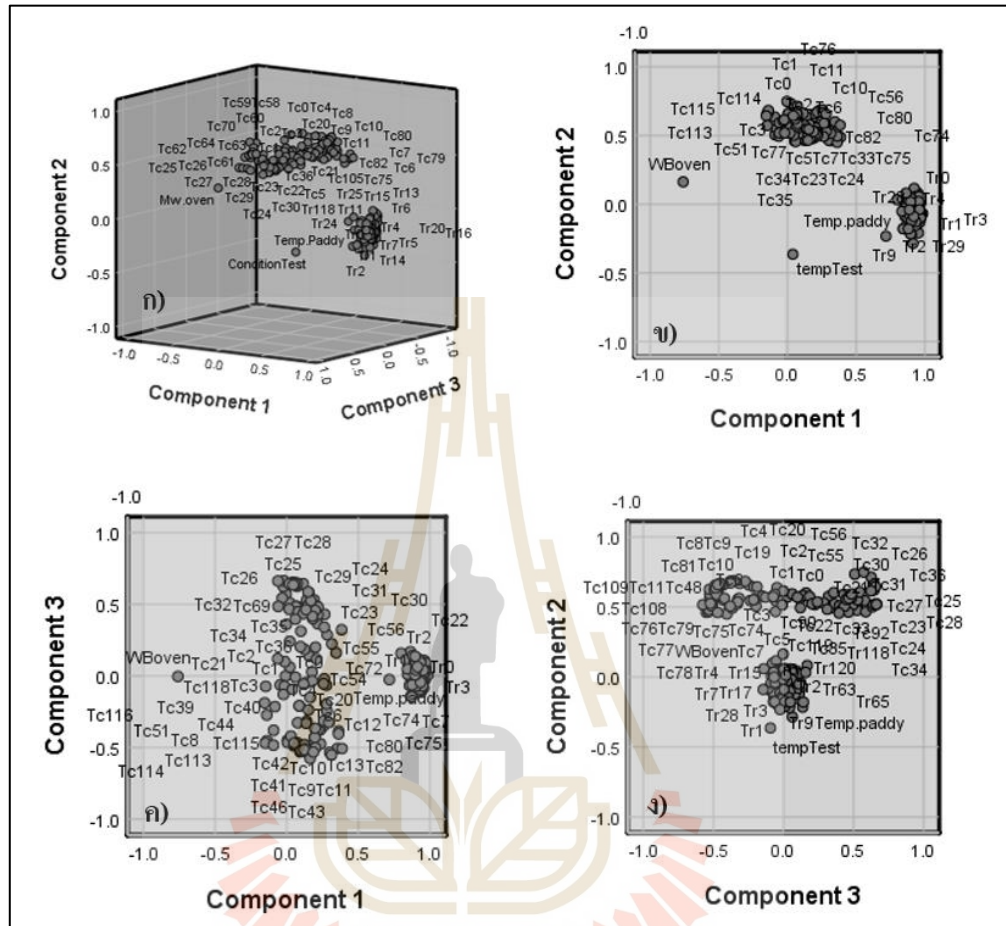
พิจารณาพฤติกรรมของสัญญาณไฟฟ้าที่รับค่ามาจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทาน ดังรูปที่ 4.13 ก และ 4.14 ก พบว่า ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดในแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการอบแห้งข้าวมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นของกระบวนการ พฤติกรรมดังกล่าวเห็นได้ชัดเจนในช่วงนาที่ที่ 0 ถึงนาที่ที่ 50 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทมวล

ของข้าวเปลือกเข้าสู่อากาศค่อนข้างจะคงที่ (รูปที่ 4.9 และ 4.10) การกระจายตัวของข้อมูลจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์ชนิดนี้มีพฤติกรรมลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิข้าวเปลือกและระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น (ความชื้นข้าวลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง) ข้อมูลจากการวัดมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเป็นข้อสังเกตที่พบเห็นได้ตั้งแต่ระยะเวลาอบแห้ง ณ นาทีที่ 100 เป็นต้นไป ในขณะที่ข้าวเปลือก ณ อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28°C) ในตอนเริ่มต้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงนาทีที่ 0 ถึง 50 จากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิดังกล่าวเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งขาออกจากไซโคลน ลักษณะการกระตัวสูงในช่วงแรกนี้พบเห็นได้จากการวัดที่เงื่อนไขการอบแห้งทั้ง 2 อุณหภูมิ โดยการอบแห้งที่ 70°C พบการกระจายตัวของสัญญาณไฟฟ้าจากการวัดในช่วงเริ่มต้นสูงกว่าการอบแห้งที่ 80°C

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดเก็บประจุดังรูปที่ 4.13 ข และ 4.14 ข พบว่า มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นสูงในช่วงระยะแรกของการอบแห้งเช่นกัน ซึ่งเป็นพฤติกรรมของสัญญาณไฟฟ้าซึ่งวัดได้จากข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงและมีอุณหภูมิต่ำ ความผันแปรของข้อมูลจากการวัดนี้มีพฤติกรรมสอดคล้องไปกับการผันแปรของอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (อุณหภูมิข้าวสูงขึ้นขณะที่ความชื้นข้าวลดลงตามเวลา) ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า การเปลี่ยนแปลงทั้งความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือก ณ เวลาต่าง ๆ ล้วนส่งผลกระทบต่อสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด อิทธิพลนี้ทำให้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือก

การวิเคราะห์ปัจจัยถูกใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างและแนวโน้มความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยสำหรับวิธานิพนธ์ฉบับนี้ โดยใช้เทคนิค PCA ในการสกัดปัจจัยให้ตัวแปรแต่ละตัวไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันตามแกนองค์ประกอบ ผลจากการสกัดปัจจัยพบว่า การอธิบายความสัมพันธ์ของชุดข้อมูล ได้แก่ ความชื้นข้าวเปลือกอ้างอิง (Mw.oven) อุณหภูมิของข้าวเปลือก (Temp.Paddy) เงื่อนไขการทำทดสอบ (Condition Test) สัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน (Tr) สัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน (Tc) ด้วย 3 องค์ประกอบ สามารถอธิบายความแปรปรวนของชุดข้อมูลเดิมได้กว่า 70% ดังนั้นในภาพรวมของการวิเคราะห์ปัจจัยจึงได้แสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนองค์ประกอบใน 3 แกนปัจจัยดังรูปที่ 4.15 ก และเพื่อเป็นการบ่งชี้ถึงคุณลักษณะที่สำคัญที่มีความเด่นชัดของปัจจัย ผู้วิจัยจึงแสดง Component plot ระหว่าง Component 1 และ Component 2 ดังรูปที่ 4.15 ข ทั้งนี้ หากพิจารณาเปรียบเทียบผลในมุมมอง

ที่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.15 ค และ ง) พบว่า ปัจจัยเหล่านี้มีทิศทางความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันทั้งหมด



รูปที่ 4.15 Component plot จากการวิเคราะห์ปัจจัย

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนปัจจัยขององค์ประกอบหลักที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.15 ข เมื่อพิจารณาตามแกนองค์ประกอบหลักที่ 1 จะเห็นว่ากลุ่มของตัวแปร Tc Tr และ Temp.Paddy มีทิศทางของความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน ถึงแม้ว่า Tc จะวางตัวอยู่ใกล้ค่า 0 ก็ตาม ตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์ผกผันกับค่า Mw.oven ผลการทดสอบนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาในหัวข้อ 4.1 ในขณะที่กลุ่มของตัวแปร Tc และ Tr วางตัวรวมกลุ่มกันอยู่บนแกนองค์ประกอบที่มีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน แสดงถึงความเป็นอิสระระหว่างตัวแปรทั้ง 2 (ไม่มีความสัมพันธ์กัน) เมื่อ Condition Test เป็นเงื่อนไขการทดลองอบแห้งข้าวที่ 70°C และ 80°C แสดงถึงการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาจมีผลต่อการรบกวนการอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้า (Noise) จากเซ็นเซอร์ ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งพบว่าตัวแปรดังกล่าวมีความโดดเด่นบนแกนองค์ประกอบหลักที่ 2 ซึ่งอยู่ตรงข้ามกับตัวแปร Tc ข้อมูลทางสถิติเหล่านี้จึงบ่งชี้ว่า Tc และ Condition Test มีความสัมพันธ์ในทิศทาง

ผกผันกัน อย่างชัดเจน ข้อสังเกตที่พบจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย ทำให้พบว่า ตัวแปร Condition Test มีอิทธิพลต่อค่าสัญญาณไฟฟ้าจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานค่อนข้างน้อยหรืออาจกล่าวได้ว่า Condition Test ไม่มีอิทธิพลต่อค่า Tr เนื่องจากตัวแปรทั้งสองวางตัวแบบแกนองค์ประกอบที่มีทิศทางค่อนข้างตั้งฉากกัน หากพิจารณาอิทธิพลของการรบกวนที่เกิดขึ้นนี้ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือกซึ่งถูกวัดด้วยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิด สิ่งเหล่านี้เป็นข้อมูลยืนยันผลของพฤติกรรมสัญญาณไฟฟ้าจากการวัดตามรูปที่ 4.13 และ 4.14 ได้อย่างชัดเจน

สำหรับการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวแปร Tr (จำนวน 61 ข้อมูลแรก) และ Tc (จำนวน 61 ข้อมูลแรก) มาใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบหลักโดยแบ่งการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวตามชนิดของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และจัดแบ่งประเภทของสมการให้มีความสอดคล้องกับการศึกษาในหัวข้อ 4.1.4 ผลการวิเคราะห์เหล่านี้จะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาสมการสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากข้อมูลการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดชนิดเก็บประจุ ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C

ตารางที่ 4.8 ความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบ ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C

องค์ประกอบ (PC _i)	เซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน		เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ	
	ความแปรปรวน (%)	ความแปรปรวน สะสม (%)	ความแปรปรวน (%)	ความแปรปรวน สะสม (%)
PC ₁	86.189	86.189	30.847	30.847
PC ₂	2.434	88.623	22.742	53.590
PC ₃	2.227	90.850	20.948	74.538
PC ₄	1.825	92.675	6.284	80.821
PC ₅	1.446	94.121	4.250	85.072
PC ₆	1.229	95.350	2.786	87.857
PC ₇	0.841	96.191	2.647	90.505
PC ₈	0.721	96.912	2.137	92.642
PC ₉	0.633	97.545	1.079	93.721
PC ₁₀	0.608	98.153	0.942	94.663

ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่วัดโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทาน จำนวน 61 ข้อมูล และจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ จำนวน 61 ข้อมูล ตามระยะเวลาอบแห้งต่าง ๆ ทั้ง 3 การทดลอง

ถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อลดจำนวนตัวแปร โดยจำแนกข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มตามข้อมูลของเซ็นเซอร์แต่ละชนิด ในสัดส่วน 2:1 สำหรับใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set; 122 samples) และใช้สำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน (Validation set; 61 samples) ซึ่งทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักออกมาเป็น PC ทั้งหมด 10 PC ความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของชุดข้อมูลเดิมสำหรับแต่ละ PC อธิบายดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA-MLR ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C

ตัวแปร	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของตัวแปร		
	ประเภท RT	ประเภท CT	ประเภท RCT (PC _R / PC _C)
PC ₁	0.516	0.378	-0.067 / 0.201
PC ₂	0.149	0.263	-0.086 / 0.248
PC ₃	0.474	-0.123	0.315 / 0.081
PC ₄	0.548	-0.496	0.433 / -0.213
PC ₅	0.300	0.406	0.113 / 0.293
PC ₆	0.150	0.029	0.248 / -0.002
PC ₇	0.060	0.352	0.115 / 0.400
PC ₈	-0.913	0.032	-0.848 / -0.301
PC ₉	0.271	0.158	-0.046 / 0.179
PC ₁₀	-0.015	-0.082	0.095 / -0.095
อุณหภูมิ	-1.019	-0.951	-0.962
ค่าคงที่ของสมการ	64.911	61.298	61.887

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสำหรับพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นแต่ละชนิด ชนิดละ 10 PC พบว่า PC เพียง 3 ตัวของเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทาน สามารถเก็บรวบรวมความแปรปรวนของข้อมูลเดิมได้สูงกว่า 90% ในขณะที่ชุดข้อมูลของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุจำเป็นต้องใช้ PC จำนวนกว่า 7 ตัว ในการอธิบายความแปรปรวนของชุดข้อมูลเดิม เพื่อให้ได้ความแปรปรวนสะสมที่สูงกว่า 90% ผลการวิเคราะห์นี้เป็นข้อสังเกตที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของการวัดสัญญาณไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ ซึ่งสอดคล้องกับผล

การวิเคราะห์ปัจจัยในหัวข้อก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม จำนวนองค์ประกอบหลักทั้ง 10 ตัว จากข้อมูลของเซ็นเซอร์แต่ละชนิด ต่างถูกนำไปวิเคราะห์ MLR ร่วมกับตัวแปรอุณหภูมิข้าวเปลือกสำหรับสร้างสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการจากการวิเคราะห์ MLR ตามการแบ่งประเภทดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.4 (แสดงดังตารางที่ 4.9) ผลการวิเคราะห์ตัวแบบสมการในตารางที่ 4.9 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์สำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{(Model RT)} \quad M_w = & 0.516 PC_1 + 0.149 PC_2 + 0.474 PC_3 + 0.548 PC_4 + 0.3 PC_5 \\ & + 0.15 PC_6 + 0.060 PC_7 - 0.913 PC_8 + 0.271 PC_9 - 0.015 PC_{10} \\ & - 1.019 \text{ Temperature} + 64.91 \end{aligned} \quad (4.1)$$

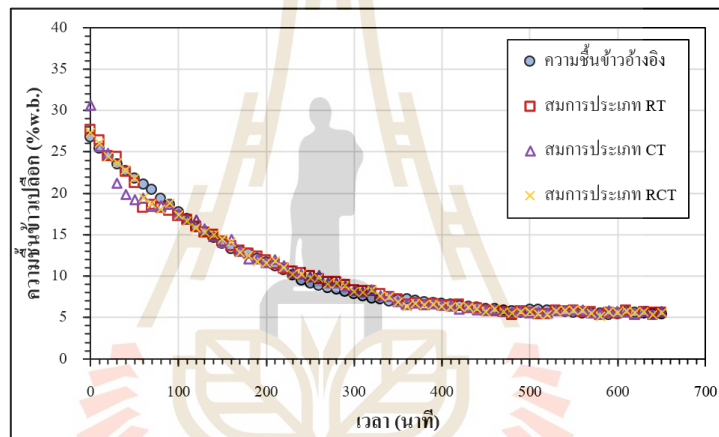
$$\begin{aligned} \text{(Model CT)} \quad M_w = & 0.378 PC_1 + 0.263 PC_2 - 0.123 PC_3 - 0.496 PC_4 + 0.046 PC_5 \\ & + 0.029 PC_6 + 0.352 PC_7 + 0.032 PC_8 + 0.158 PC_9 - 0.082 PC_{10} \\ & - 0.951 \text{ Temperature} + 61.298 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{(Model RCT)} \quad M_w = & -0.067 PC_{R,1} - 0.086 PC_{R,2} + 0.315 PC_{R,3} + 0.433 PC_{R,4} \\ & + 0.113 PC_{R,5} + 0.028 PC_{R,6} + 0.115 PC_{R,7} - 0.848 PC_{R,8} \\ & - 0.046 PC_{R,9} + 0.095 PC_{R,10} + 0.201 PC_{C,1} + 0.248 PC_{C,2} \\ & + 0.081 PC_{C,3} - 0.213 PC_{C,4} + 0.293 PC_{C,5} - 0.002 PC_{C,6} \\ & + 0.400 PC_{C,7} - 0.301 PC_{C,8} + 0.179 PC_{C,9} - 0.095 PC_{C,10} \\ & - 0.962 \text{ Temperature} + 61.887 \end{aligned} \quad (4.3)$$

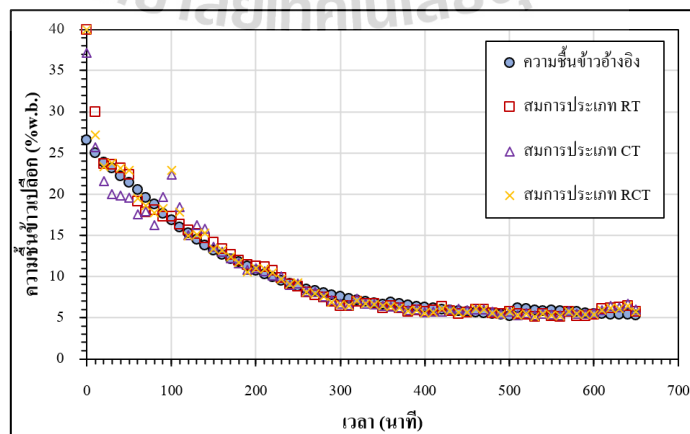
ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยสมการทำนายทั้ง 3 ประเภท ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน (Validation set) แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17

พิจารณาผลการทำนายความชื้นในกลุ่ม Calibration set จากรูปที่ 4.16 พบว่าสมการประเภท RT และ RCT สามารถทำนายความชื้นได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิงเมื่อเทียบกับการทำนายความชื้นด้วยสมการประเภท CT การที่ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้ามีความแปรปรวนสูงในระยะแรกของการอบแห้ง ส่งผลให้การทำนายความชื้นจากสมการทั้ง 3 ประเภทเกิดค่าผิดพลาดขึ้น

ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนในช่วง 100 นาทีแรกของการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายความชื้นในกลุ่มของ Validation set พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงในช่วง 100 นาทีแรกของการอบแห้งเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าสมการประเภท RCT จะมีความสามารถในการชดเชยงานการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ แต่ละตัวที่มีความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันตามอุณหภูมิของวัดก็ตาม แต่ด้วยการผันแปรที่ค่อนข้างสูงจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุในระยะเริ่มต้น ทำให้สมการ RCT เกิดความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลการทำนายในช่วงเวลาตั้งแต่ 100 นาทีเป็นต้นไป จะเห็นว่าผลจากการทำนายความชื้นด้วยสมการทั้ง 3 ประเภท ให้ค่าคลาดเคลื่อนต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากข้อมูลที่ลู่เข้าสู่ความชื้นอ้างอิง ทั้งในกลุ่ม Calibration set และ Validation set



รูปที่ 4.16 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Calibration set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C



รูปที่ 4.17 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Validation set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาสมการสำหรับทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากข้อมูลการวัดด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

ข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่วัดโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทาน จำนวน 61 ข้อมูล และจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ จำนวน 61 ข้อมูล ตามระยะเวลาการอบแห้งที่แตกต่างกัน ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C ถูกนำไปวิเคราะห์ PCA ตามวิธีการเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 ความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของชุดข้อมูลเดิมจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์แต่ละชนิด ถูกรวบรวมโดยองค์ประกอบหลักซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละองค์ประกอบ ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C

องค์ประกอบ (PC _i)	เซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน		เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ	
	ความแปรปรวน (%)	ความแปรปรวน สะสม (%)	ความแปรปรวน (%)	ความแปรปรวน สะสม (%)
PC ₁	89.675	89.675	79.455	79.455
PC ₂	2.131	91.806	7.766	87.222
PC ₃	2.056	93.862	3.757	90.978
PC ₄	1.456	95.318	2.971	93.950
PC ₅	1.133	96.451	1.870	95.820
PC ₆	0.991	97.442	0.947	96.767
PC ₇	0.752	98.193	0.771	97.538
PC ₈	0.499	98.692	0.515	98.052
PC ₉	0.344	99.036	0.403	98.455
PC ₁₀	0.232	99.269	0.273	98.728

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสำหรับวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นแต่ละชนิด ชนิดละ 10 PC พบว่า PC เพียง 2 ตัวของเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทาน สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลเดิมได้สูงกว่า 90% ในขณะที่ชุดข้อมูลของเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุจำเป็นต้องใช้ PC กว่า 3 ตัว เพื่อเก็บรวบรวมความแปรปรวนสะสมให้สูงกว่า 90% อย่างไรก็ตาม PC ทั้ง 10 ตัว ซึ่งถูกวิเคราะห์จากเซ็นเซอร์แต่ละชนิด ต่างถูกนำไปวิเคราะห์ MLR ร่วมกับตัวแปรอุณหภูมิข้าวเปลือกสำหรับสร้างสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกตั้ง

การวิเคราะห์ในเงื่อนไขการอบแห้งก่อนหน้า โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรและค่าคงที่ของสมการ ถูกพัฒนาขึ้นตามการแบ่งประเภทของสมการดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.4 แสดงผลการวิเคราะห์ดัง ตารางที่ 4.11 ทั้งนี้ สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกทั้ง 3 ประเภท แสดงดังสมการที่ 4.4 – 4.6 ตามลำดับ และผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยสมการทั้ง 3 ประเภท ฎกรายงานโดยรูปที่ 4.18 และ 4.19 สำหรับข้อมูล Calibration set และ Validation set ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการทำนายความชื้นข้าวเปลือก จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA-MLR ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

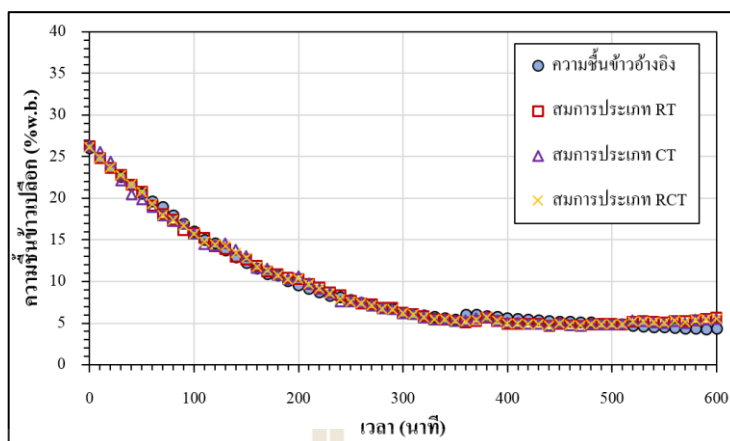
ตัวแปร	สัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของตัวแปร		
	ประเภท RT	ประเภท CT	ประเภท RCT (PC _R / PC _C)
PC ₁	0.696	-0.066	0.112 / 0.123
PC ₂	-0.448	-1.374	-0.257 / -0.634
PC ₃	-1.256	0.214	-0.714 / 0.120
PC ₄	-0.659	0.124	-0.371 / 0.118
PC ₅	-0.090	0.477	0.020 / 0.278
PC ₆	-0.090	0.086	-0.048 / 0.081
PC ₇	-0.280	-0.505	-0.168 / -0.241
PC ₈	-0.081	-0.283	0.042 / -0.176
PC ₉	-0.142	-0.088	-0.148 / -0.034
PC ₁₀	0.011	-0.671	0.041 / -0.332
อุณหภูมิ	-0.858	-0.875	-0.841
ค่าคงที่ของสมการ	61.140	62.145	60.106

$$\begin{aligned}
 (\text{Model RT}) \quad M_w = & 0.696 PC_1 - 0.448 PC_2 - 1.256 PC_3 - 0.659 PC_4 - 0.090 PC_5 \\
 & - 0.090 PC_6 - 0.280 PC_7 - 0.081 PC_8 - 0.142 PC_9 + 0.011 PC_{10} \quad (4.4) \\
 & - 0.858 \text{ Temperature} + 61.140
 \end{aligned}$$

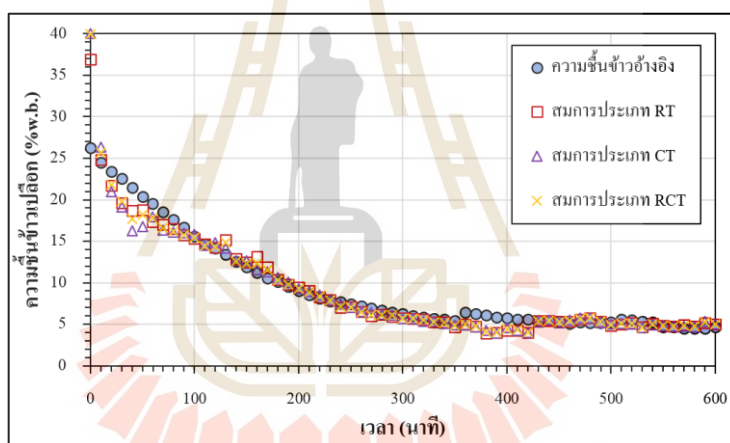
$$\begin{aligned}
 (\text{Model CT}) M_w = & -0.066 PC_1 - 1.374 PC_2 + 0.214 PC_3 + 0.124 PC_4 + 0.477 PC_5 \\
 & + 0.086 PC_6 - 0.505 PC_7 - 0.283 PC_8 - 0.088 PC_9 - 0.671 PC_{10} \\
 & - 0.875 \text{ Temperature} + 62.145
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
 (\text{Model RCT}) M_w = & 0.112 PC_{R,1} - 0.257 PC_{R,2} - 0.714 PC_{R,3} - 0.371 PC_{R,4} \\
 & + 0.020 PC_{R,5} - 0.048 PC_{R,6} - 0.168 PC_{R,7} + 0.042 PC_{R,8} \\
 & - 0.148 PC_{R,9} + 0.041 PC_{R,10} + 0.123 PC_{C,1} - 0.634 PC_{C,2} \\
 & + 0.012 PC_{C,3} + 0.118 PC_{C,4} + 0.278 PC_{C,5} + 0.081 PC_{C,6} \\
 & - 0.241 PC_{C,7} - 0.176 PC_{C,8} - 0.034 PC_{C,9} - 0.332 PC_{C,10} \\
 & - 0.841 \text{ Temperature} + 60.106
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

จากการเปรียบเทียบผลการทำนายความขึ้นดังรูปที่ 4.18 พบว่า สมการทำนายความขึ้นที่พัฒนาขึ้นทั้ง 3 ประเภท มีความสามารถในการทำนายผลที่มีความแม่นยำสูงในกลุ่ม Calibration set ซึ่งสังเกตได้จากผลการทำนายที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับความขึ้นอ้างอิง จนกระทั่งเวลาอบแห้งนาที่ที่ 500 เป็นต้นไป ผลการทำนายความขึ้นทั้ง 3 รูปแบบ เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น (โค้งขึ้นเล็กน้อย) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง ซึ่งเกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หากพิจารณาถึงผลการทำนายคุณลักษณะการอบแห้งที่ผู้วิจัยได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 (รูปที่ 4.9 และ 4.10) ประกอบการอธิบายนี้สามารถสังเกตได้ว่า แม้แต่แบบจำลองเอมพิริคัลบางตัวที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายก็ไม่สามารถที่จะอธิบายผลการทำนายได้อย่างครอบคลุมทั้งหมด อย่างไรก็ตาม การทำนายผลความขึ้นข้าวโดยทั่วไปมักถูกนำมาใช้จริงในช่วงของการอบแห้งสำหรับการเก็บรักษาเพื่อใช้บริโภคหรือใช้เป็นเมล็ดพันธุ์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาการทำนายผลในกลุ่ม Validation set พบว่า สัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าจากเซ็นเซอร์ซึ่งมีการกระจายตัวสูงในระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง เป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการทำนายขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วง 100 นาที่แรกของการอบแห้ง ทั้งนี้ เนื่องจากผลการทำนายด้วยสมการประเภท RCT ให้ความแม่นยำที่มีความใกล้เคียงกับสมการประเภท RT ค่อนข้างมาก ดังนั้นในการเปรียบเทียบผลในหัวข้อ 4.5 ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายผลจากวิธีการประเมินความขึ้นข้าวที่พัฒนาขึ้นตามชนิดของเซ็นเซอร์เท่านั้น เพื่อแสดงถึงจุดเด่นของวิธีการประเมินความขึ้นตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.18 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Calibration set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

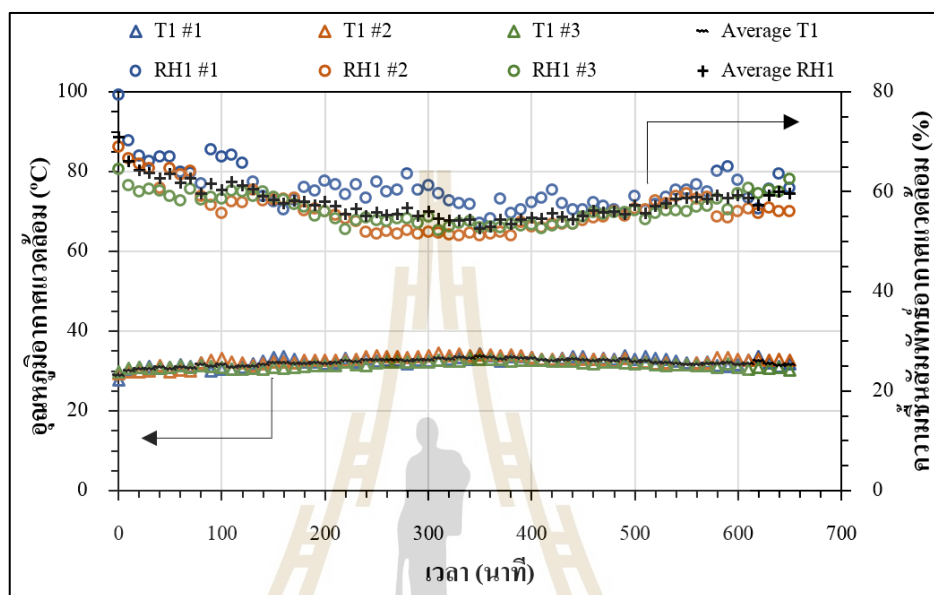


รูปที่ 4.19 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจาก Validation set ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

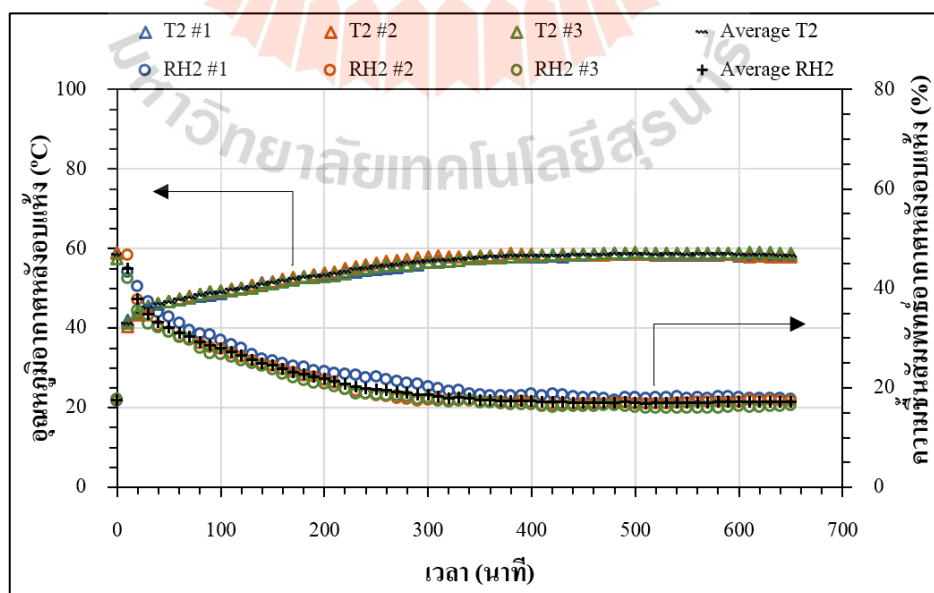
4.4 ผลการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์ DHT22

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมก่อนเข้าสู่พัดลม (จุดวัดที่ 1) ถูกวัดด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 ตัวที่ 1 ก่อนที่จะถูกทำความร้อนและนำไปลดความชื้นข้าวเปลือกตามการทดลองในหัวข้อที่ 3.4 ก่อนที่อากาศซึ่งได้รับความชื้นจากข้าว ถูกแยกออกสู่บรรยากาศด้วยไซโคลน ผู้วิจัยได้ทำการเก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ณ ทางออกของไซโคลนดังกล่าว (จุดที่ 2) ด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 ตัวที่ 2 ผลการเก็บบันทึกข้อมูลเหล่านี้รายงานโดยรูปที่ 4.20 - 4.21 สำหรับการทดลอง ณ การอบแห้งที่ 70°C และรูปที่ 4.22 - 4.23 สำหรับการทดลอง ณ การอบแห้งที่ 80°C

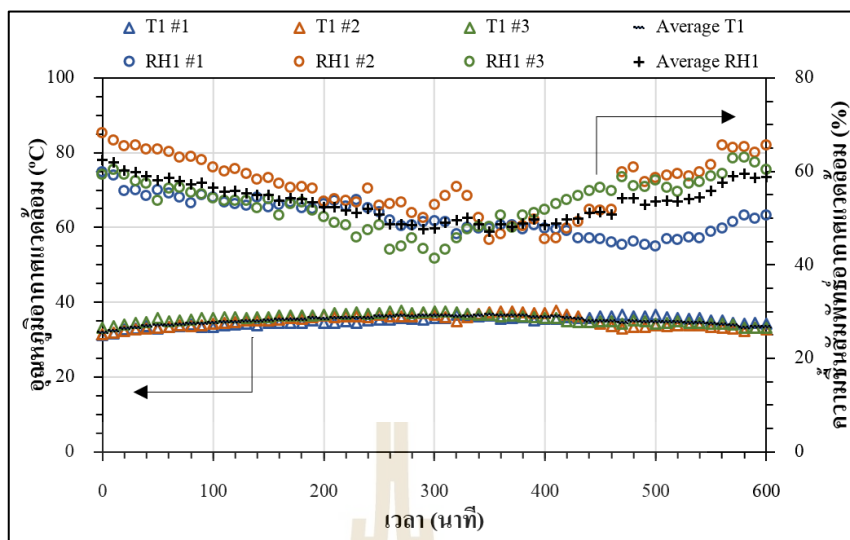
ทั้งนี้ อุณหภูมิของอากาศตามระยะเวลาที่ดำเนินการอบแห้งถูกรายงานโดยอ้างอิงค่าจากแกนปฐมภูมิ ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตามระยะเวลาที่ดำเนินการอบแห้งถูกรายงานโดยอ้างอิงค่าจากแกนทุติยภูมิของรูปเหล่านี้



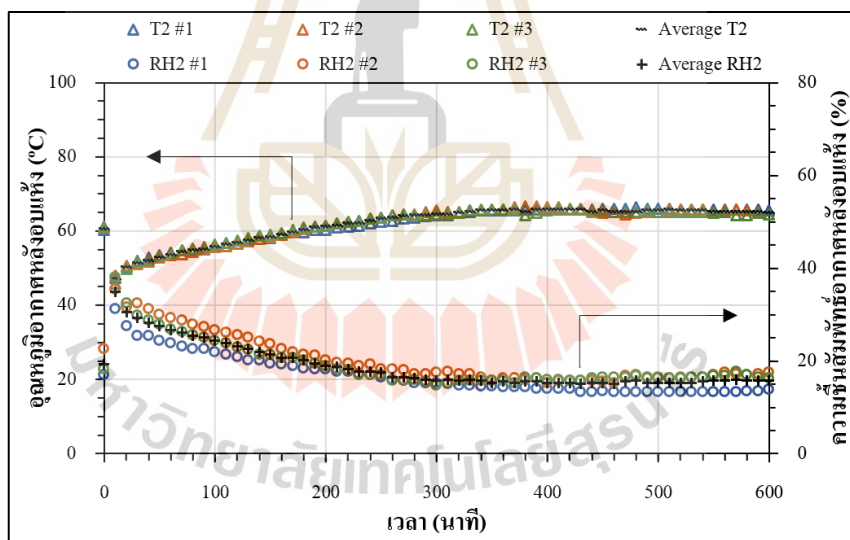
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (จุดวัดที่ 1) ณ การอบแห้งที่ 70°C



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังอบแห้ง (จุดวัดที่ 2) ณ การอบแห้งที่ 70°C



รูปที่ 4.22 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (จุดวัดที่ 1) ณ การอบแห้งที่ 80°C

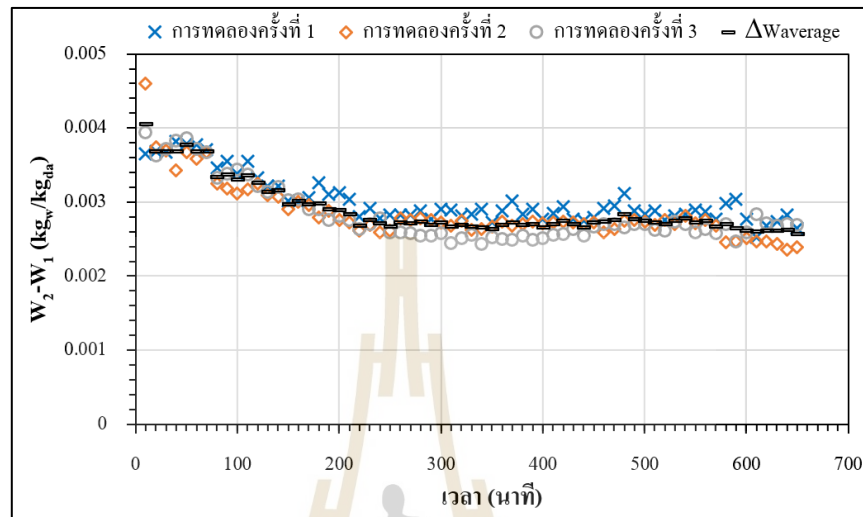


รูปที่ 4.23 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังอบแห้ง (จุดวัดที่ 2) ณ การอบแห้งที่ 80°C

4.4.1 ผลการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง จากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C

ข้อมูลการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจากรูปที่ 4.20 ถูกใช้สำหรับ คำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ จุดที่ 1 (Humidity ratio, W_1) ขณะที่ข้อมูลการวัดจากรูปที่ 4.21 ถูกใช้สำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ จุดที่ 2 (Humidity ratio, W_2)

ในแต่ละระยะเวลาการอบแห้ง ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ในระยะเวลาต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24



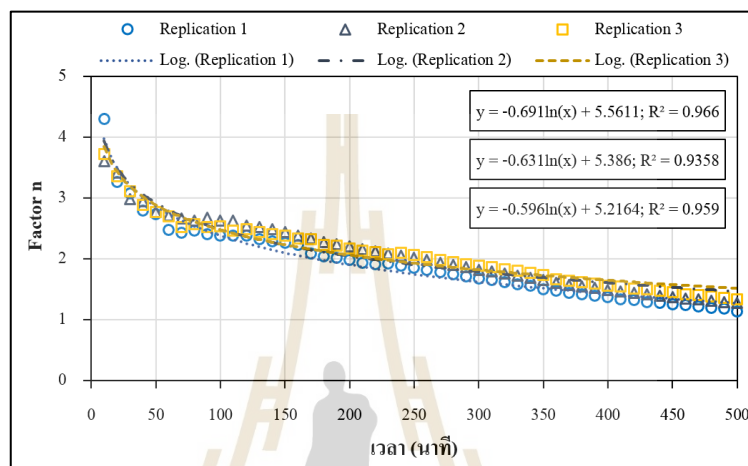
รูปที่ 4.24 ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศที่เวลาแตกต่างกัน ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C

พิจารณาผลต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศระหว่างจุดวัดที่ 1 (อากาศแวดล้อม) กับจุดวัดที่ 2 (อากาศซึ่งถูกแยกออกโดยไซโคลน) ตามระยะเวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.24 ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงสัดส่วนของมวลน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหน่วยมวลของอากาศแห้งที่คำนวณได้จากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 ในระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม จุดสังเกตที่พบได้อย่างชัดเจน คือ ในช่วงแรกของการอบแห้ง ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นในอากาศมีค่าสูงและค่อนข้างเปลี่ยนแปลงน้อย (นาทีที่ 1 ถึง 70) เนื่องมาจากการถ่ายเทความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกไปสู่อากาศอบแห้งดำเนินไปในสัดส่วนคงที่ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.6 พลังงานความร้อนของอากาศในส่วนนี้ถูกใช้ไปกับการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำกับเมล็ดข้าวเปลือก (Sensible heat) ความร้อนสัมผัสไม่เพียงแต่จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิของมวลสารของเมล็ดข้าวเปลือกเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่ออัตราการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดออกมาสู่พื้นผิวของข้าวเปลือกด้วย (ปรีดา ปราบกาน, 2557) ขณะเดียวกันความร้อนบางส่วนถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (Latent heat) สมดุลระหว่างการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดออกมาสู่พื้นผิวของข้าวเปลือกกับการถ่ายเทความร้อนและมวลของความชื้นกับอากาศอบแห้ง ทำให้เกิดช่วงของการลดความชื้นข้าวในสัดส่วนคงที่ดังกล่าวขึ้น ซึ่งมีผลเป็นไปตามรูปที่ 4.6

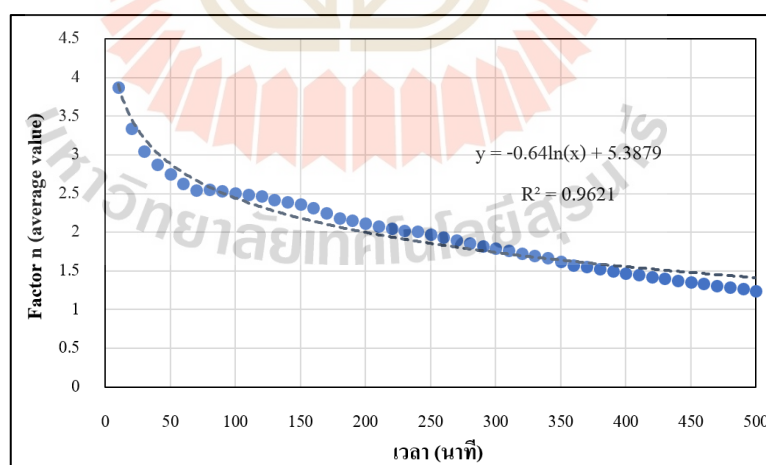
และ 4.8 หลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นของอากาศจะมีพฤติกรรมลดลงตามเวลาจนกระทั่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงนาที่ที่ 300 เป็นต้นไป ข้อสังเกตที่พบ คือ การเปลี่ยนแปลงผลต่างของอัตราส่วนความชื้นในช่วงนี้บ่งชี้ถึงการที่อากาศอบแห้งยังคงได้รับมวลของความชื้นจากข้าวเปลือกอยู่ เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทำการวัดคุณสมบัติอากาศดังรูปที่ 4.21 ประกอบกับผลการประเมินความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่ตามรูปที่ 4.6 และ 4.8 จะเห็นว่าผลต่างของอัตราส่วนความชื้นที่ประเมินได้ไม่สอดคล้องกับความชื้นข้าวที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงกว่าเซ็นเซอร์ DHT22 มีข้อจำกัดในเรื่องของการวัดคุณสมบัติของอากาศที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้ยังพบข้อมูลตกค้างจากการวัดอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่นาที่ที่ 400 ถึงนาที่ที่ 650 (Residual data) ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ข้าวเปลือกเข้าสู่ความชื้นสมดุลและโดยหลักการสมดุลมวลสารแล้วจะต้องไม่มีการถ่ายเทความชื้นมายังอากาศอบแห้ง นอกจากนี้ขณะทำการทดลองพบว่ามีความชื้นบางส่วนเล็ดลอดออกมาพร้อมกับข้าวเปลือก ณ ทางออกเดียวกันซึ่งเป็นการทำงานที่ไม่เต็มประสิทธิภาพของไซโคลนในในทางปฏิบัติ และเนื่องจากในแต่ละรอบของการอบแห้ง ข้าวเปลือกซึ่งออกจากหอบแห้งจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามเวลา มีความเป็นไปได้ว่าข้าวเปลือกเหล่านั้นจะมีการถ่ายเทความชื้นบางส่วนออกสู่บรรยากาศขณะอยู่ในถังเก็บระหว่างรอบการอบแห้งในวัฏจักรถัดไป สิ่งเหล่านี้เป็นสมมติฐานและข้อสังเกตที่พบเห็นได้จากการทำการทดลองในครั้งนี้ ซึ่งผลการประเมินด้วยวิธีสมดุลมวลจากขั้นตอนในหัวข้อ 3.5 (วิธี DHT-Prediction) ในขั้นแรกมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูง (รูปที่ 4.27) ผู้วิจัยจึงทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อหาแนวทางแก้ไขข้อผิดพลาดของการทำนายความชื้นด้วยวิธีการดังกล่าวสำหรับเงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สุรชัย เหมหิรัญ (2563) นำเสนอการประเมินความชื้นในลักษณะเดียวกันกับเครื่องอบแห้งแบบมัสท์โฟลว (หอบแห้งเป็นระบบปิด) รายละเอียดของงานดังกล่าวระบุถึงตัวประกอบการระเหยไอน้ำออกจากเมล็ดพืช (n) ที่เป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นผลคูณอยู่กับอัตราการระเหยน้ำจากข้าวเปลือกสู่อากาศ ($m_{\text{water} \rightarrow \text{air}}$) นอกจากนี้ Ashfaq, Ahmad, and Munir (2016) ระบุว่า ความชื้นไม่สามารถถ่ายเทได้อย่างสมบูรณ์สำหรับการทำแห้งในทางปฏิบัติของอาหารและวัสดุชีวภาพ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ดังกล่าว โดยนำเสนอ Factor n ในรูปแบบของความสัมพันธ์ตามเวลาที่ใช้ออบแห้งข้าวเปลือก เพื่อใช้สำหรับแปรผลการทำนายความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมนี้ ตลอดจนอธิบายความไม่สอดคล้องของข้อมูลที่ประเมินได้ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

Factor n ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ถูกคำนวณจากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นข้าวเปลือกอ้างอิงกับข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากการคำนวณคุณสมบัติอากาศชื้นซึ่งถูกวัดด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 (สมการปรากฏในรูปที่ 3.27) ผลการคำนวณ Factor n ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C จากการทำซ้ำ 3 ทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.25



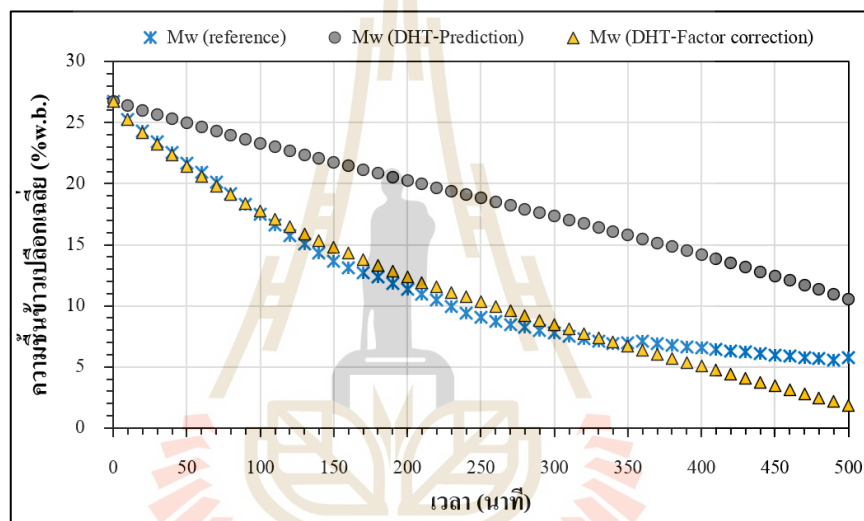
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C



รูปที่ 4.26 ค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C

ข้อมูล Factor n จากการคำนวณสำหรับ 3 การทดลองที่ปรากฏในรูปที่ 4.25 มีความสัมพันธ์กับเวลาในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic Function) จากการฟิต

ข้อมูลด้วย Microsoft Excel พบว่าเส้นการถดถอยของข้อมูลมีความสอดคล้องกับฟังก์ชันดังที่กล่าวมา โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.936 – 0.966 เมื่อพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์จากสมการที่ปรากฏ พบว่า สัมประสิทธิ์หน้าลอการิทึมธรรมชาติมีค่าที่ใกล้เคียงกันสำหรับการทดลอง 3 ครั้ง และค่าคงที่ของสมการทั้ง 3 มีการเปลี่ยนแปลงค่าค่อนข้างน้อย จากแนวโน้มและความสัมพันธ์ที่มีความสอดคล้องกันในแต่ละการทดลอง ผู้วิจัยจึงนำเสนอการใช้งาน Factor n ในรูปของค่าเฉลี่ย (แสดงดังรูปที่ 4.26) สำหรับปรับปรุงและลดข้อจำกัดบางประการดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้า ทั้งนี้ ผลการประเมินความชื้นข้าวเปลือก (M_w) จากวิธีการต่าง ๆ ถูกนำเสนอด้วยรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการวัดและประเมินจากเซ็นเซอร์ DHT22

ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C

จากรูปที่ 4.27 แสดงผลการประเมินความชื้นข้าวเปลือกจากการวัดคุณสมบัติของอากาศด้วย DHT22 (DHT-Prediction) และจากการประยุกต์ใช้ Factor n ในการปรับปรุงผลการทำนายความชื้น (DHT-Factor correction) โดยที่ความชื้นข้าวจากการประเมินด้วยวิธีอบร้อนอุณหภูมิคงที่ ถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบผลในครั้งนี้ (Reference) จากรูปที่ 4.27 ผู้วิจัยทำการรายงานผลการประเมินตั้งแต่ความชื้นข้าวเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นข้าวเปลือกเข้าสู่ความชื้นสมดุล ระยะเวลาที่ใช้อบแห้งรวม 500 นาที เมื่อพิจารณาผลดังกล่าว พบว่า การประเมินความชื้นข้าวโดย DHT-Prediction ให้ผลการทำนายความชื้นที่มีค่าสูงกว่าความชื้นอ้างอิงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ผลการทำนายความชื้นข้าวด้วย DHT-Factor correction ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับ

ความชื้นข้าวอ้างอิง วิธีการนี้สามารถทำนายความชื้นข้าวเปลือกได้ดีในช่วงของการลดความชื้นข้าว สำหรับการเก็บรักษาตามคำแนะนำของหน่วยงาน IRRI ($\leq 14\%w.b.$) การประเมินผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากวิธีการทั้ง 2 แนวทาง ถูกเปรียบเทียบโดยแบ่งช่วงเวลาอบแห้งออกเป็น 30% 60% และ 100% ของระยะเวลาทั้งหมดที่รายงานในรูปที่ 4.27 (500 นาที) โดยค่า R^2 และ RMSE ถูกใช้สำหรับอธิบายความสอดคล้องและความคลาดเคลื่อนของข้อมูลดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การประเมินประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C

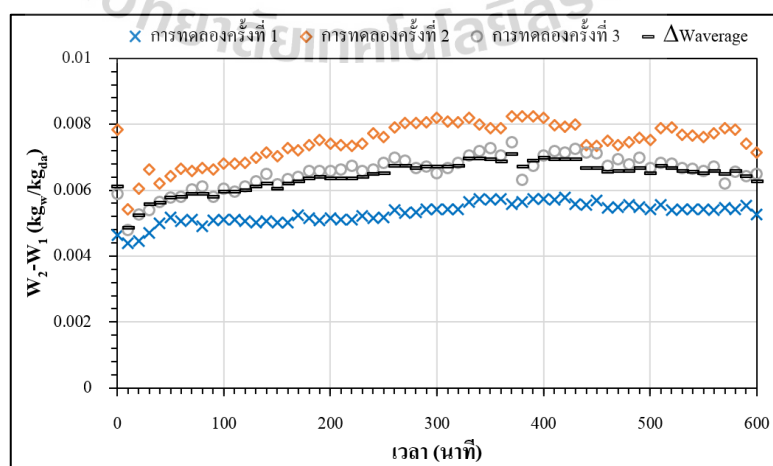
การแบ่งช่วงเวลา	ระยะเวลา (นาที)	การตรวจสอบความแม่นยำ	วิธีการทำนายความชื้นข้าวเปลือก	
			DHT-Prediction	DHT-Factor correction
30%	150	R^2	0.274	0.987
		RMSE	5.077	0.515
60%	300	R^2	0.301	0.979
		RMSE	7.390	0.824
100%	500	R^2	0.359	0.945
		RMSE	7.465	1.433

จากข้อมูลการอบแห้งดังรูปที่ 4.25 และการแบ่งช่วงเวลาสำหรับประเมินผลดังตารางที่ 4.12 การอบแห้งข้าวเปลือก ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศที่ 70°C สามารถลดความชื้นข้าวจากความชื้นเริ่มต้น 26% ลงมาถึงประมาณ 14% ได้ภายใน 150 นาที ซึ่งจัดเป็นความชื้นข้าวที่เหมาะสมแก่การจัดเก็บเพื่อการบริโภคดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธี DHT-Prediction ให้ค่า R^2 และ RMSE อยู่ที่ 0.274 และ 5.077 ตามลำดับ ส่วนวิธี DHT-Factor correction ให้ค่า R^2 และ RMSE อยู่ที่ 0.987 และ 0.515 ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 300 นาที สามารถลดความชื้นข้าวลงได้ต่ำกว่า 8% ซึ่งเป็นความชื้นที่ความเหมาะสมแก่การจัดเก็บข้าวสำหรับเป็นเมล็ดพันธุ์ โดยวิธี DHT-Prediction ให้ค่า R^2 และ RMSE อยู่ที่ 0.301 และ 7.390 ตามลำดับ แต่วิธี DHT-Factor correction กลับให้ค่า R^2 และ RMSE อยู่ที่ 0.979 และ 0.824 ตามลำดับ กรณีของการลดความชื้นข้าวสำหรับใช้เป็นเมล็ดพันธุ์นั้น มีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกับอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ ทำให้การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งนี้

ตามเงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งกว่า 70°C อาจเป็นข้อจำกัดของเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมแก่การลดความชื้นข้าวสำหรับใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ (กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์, ณัฐมล ภูมิสะอาด และ ละมุล วิเศษ, 2556) เมื่อพิจารณาการอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นข้าวเข้าสู่สมดุลกับสภาพอากาศอบแห้ง (500 นาที) จะเห็นว่า การทำนายผลในช่วงเวลาที่ 350 ถึงนาทีที่ 500 เห็นได้ชัดว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากการทำนายด้วยวิธี DHT-Factor correction ทำให้ผลการวิเคราะห์ในภาพรวมมีค่า R^2 เป็น 0.945 และ RMSE มีค่าเท่ากับ 1.433 ขณะที่ผลจากการทำนายด้วยวิธี DHT-Prediction ให้ค่า R^2 และ RMSE อยู่ที่ 0.359 และ 7.465 ตามลำดับ ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า การทำนายความชื้นข้าวด้วยวิธี DHT-Factor correction สามารถใช้ทำนายความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถประเมินความชื้นข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้งได้แม่นยำสูงในช่วงการลดความชื้นสำหรับจัดเก็บเพื่อการบริโภค

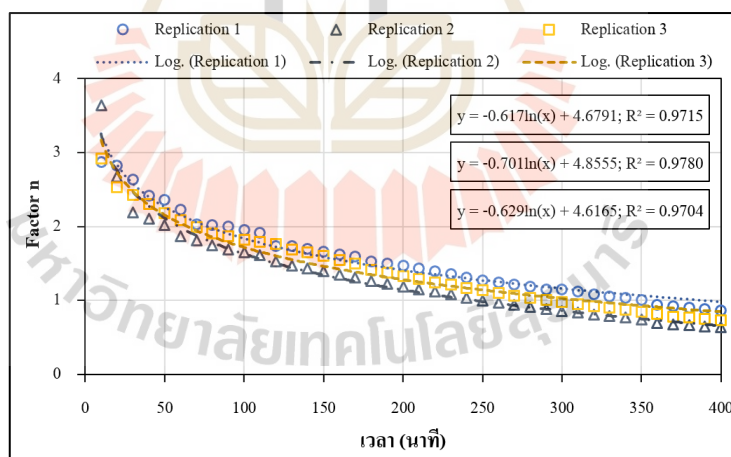
4.4.2 ผลการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C

ข้อมูลการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจากรูปที่ 4.22 ถูกใช้สำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ จุดที่ 1 (Humidity ratio, W_1) ขณะที่ข้อมูลการวัดจากรูปที่ 4.23 ถูกใช้สำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ จุดที่ 2 (Humidity ratio, W_2) ในแต่ละระยะเวลาการอบแห้ง ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ณ จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ตามเวลาที่ใช้ออบแห้ง แสดงได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศที่เวลาแตกต่างกัน ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C

พิจารณาผลต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศที่เวลาต่าง ๆ สำหรับเงื่อนไขอบแห้งที่ 80°C (รูปที่ 4.28) พบว่า การทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ให้ผลการวัดคุณสมบัติของอากาศเป็นพฤติกรรมที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยเซ็นเซอร์ DHT22 ตรวจวัดได้ว่ามวลของน้ำต่อหน่วยมวลของอากาศแห้ง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาอบแห้งในช่วง 300 นาทีแรก และพบการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ สำหรับสัดส่วนมวลของน้ำในอากาศแห้งในระยะเวลาอบแห้งตั้งแต่ 300 นาทีเป็นต้นไป ข้อมูลดังกล่าวเป็นผลที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับการประเมินความชื้นข้าวเปลือกดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงว่าในสภาวะการอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงชันมีผลต่อการทำงานของเซ็นเซอร์ DHT22 ทำให้การอ่านค่าในระยะเวลาตั้งแต่ 500 ถึง 600 นาที (ข้าวเปลือกเข้าสู่ความชื้นสมดุล) ยังคงมีเศษเหลือค้างของข้อมูล (Residual data) จากการวัดอยู่ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการทำงานของไซโคลนที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลสำคัญต่อผลการวัดดังรูปที่ 4.28 อย่างไรก็ตาม การกำหนด Factor n ที่มีความสัมพันธ์ตามเวลาสำหรับการอบแห้งที่เงื่อนไขอากาศ 80°C เป็นวิธีการที่มีศักยภาพในการปรับปรุงผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกได้จากเซ็นเซอร์ชนิดนี้ จากการรายงานผลในเงื่อนไขที่ทดสอบไปก่อนหน้านี้

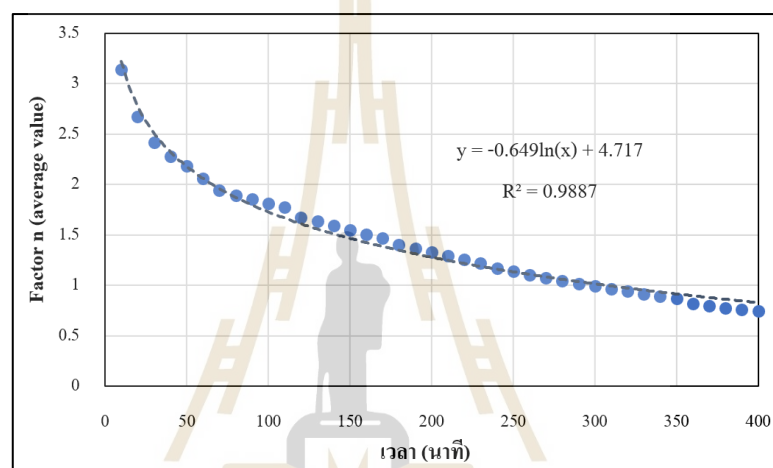


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C

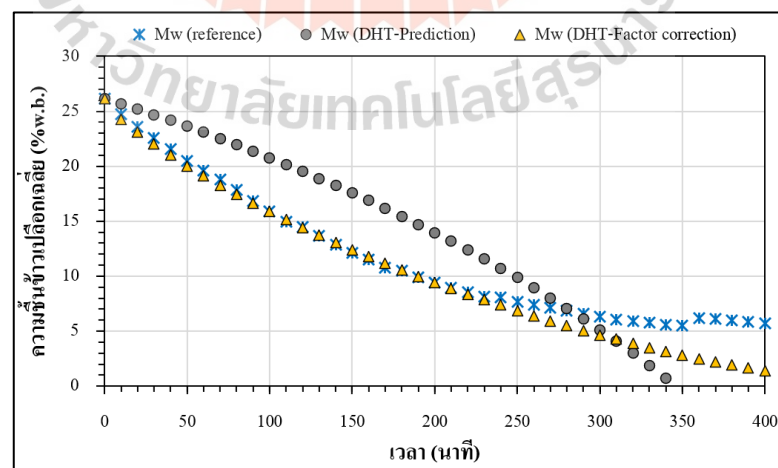
เมื่อนำข้อมูลการทดลองทั้ง 3 ครั้งมาเปรียบเทียบกับผลทฤษฎีจากการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 โดยวิเคราะห์หา Factor n ตามระยะเวลาที่ใช้สำหรับอบแห้งข้าวเปลือก ความสัมพันธ์ดังกล่าว ถูกแสดงโดยดังรูปที่ 4.29 โดยที่ทั้ง 3 การทดลองให้ผลที่มีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นลอการิทึม จากการพิตข้อมูลด้วย Microsoft Excel ทั้งนี้

ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์จากทั้ง 3 การทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมาก และสมการดังกล่าวสามารถอธิบายข้อมูลได้สูงโดยที่ R^2 อยู่ในช่วง 0.9704 – 0.9780

จากความสอดคล้องของแนวโน้มความสัมพันธ์ทั้ง 3 การทดลองดังที่กล่าวมาทำให้ผู้วิจัยรายงานผลของ Factor n ในรูปแบบค่าเฉลี่ยดังรูปที่ 4.30 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นลอการิทึมฟังก์ชันของเวลา ที่สามารถอธิบายข้อมูลได้ที่ R^2 เท่ากับ 0.9887 โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกใช้สำหรับการทำนายผลความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธี DHT-Factor correction ในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.30 ค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่าง Factor n กับเวลา ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C



รูปที่ 4.31 ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการวัดและประเมินจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C

การทำนายความชื้นข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งที่เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 80°C ถูกแสดงดังรูปที่ 4.31 โดยที่ Mw (reference) เป็นความชื้นข้าวเปลือกอ้างอิงซึ่งถูกประเมินโดยวิธีอบลมร้อน ซึ่งรายงานการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 26% จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นสมดุล ณานาทีที่ 400 การรายงานผลความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งทำนายด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 ถูกแบ่งเป็น 2 วิธี คือ DHT-Prediction เป็นวิธีทำนายความชื้นข้าวจากการคำนวณตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.27 (ไม่มี Factor n) และวิธี DHT-Factor correction เป็นวิธีที่มีการเพิ่ม Factor n เข้าไปยังการคำนวณจากวิธีก่อนหน้า ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของการทำนายผล ถูกรายงานตามการแบ่งช่วงเวลาการอบแห้งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 30% 60% และ 100% ของเวลาทั้งหมดที่รายงานโดยรูปที่ 4.29 การรายงานผลดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การประเมินประสิทธิภาพการทำนายความชื้นข้าวจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C

การแบ่ง ช่วงเวลา	ระยะเวลา (นาทีก)	การตรวจสอบ ความแม่นยำ	วิธีการทำนายความชื้นข้าวเปลือก	
			DHT-Prediction	DHT-Factor correction
30%	120	R ²	0.457	0.998
		RMSE	3.552	0.409
60%	240	R ²	0.624	0.996
		RMSE	4.137	0.354
100%	400	R ²	0.333	0.925
		RMSE	5.069	1.715

พิจารณาผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากตารางที่ 4.13 เห็นได้ว่าวิธีการวัดและประเมินความชื้นตามเวลาจริง ด้วยวิธี DHT-Factor correction สามารถทำนายความชื้นข้าวได้อย่างแม่นยำในช่วงของการลดความชื้นเพื่อการจัดเก็บสำหรับบริโภค ผลการประเมินด้วยวิธีนี้ให้ความแม่นยำสูงสำหรับช่วง 30% และ 60% (ของ 400 นาที) ซึ่งให้ค่า R² เป็น 0.998 และ 0.996 ตามลำดับ นอกจากนี้ รากของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีค่าเป็น 0.409 (สำหรับกรณี 30%) และ 0.354 (สำหรับกรณี 60%) เมื่อพิจารณาผลการทำนายในภาพรวมของการลดความชื้นข้าวตั้งแต่ความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งข้าวเปลือกเข้าสู่ความชื้นสมดุล การพยากรณ์ความชื้น

ด้วยวิธี DHT-Prediction มีค่า R^2 อยู่ที่ 0.333 และ RMSE อยู่ที่ 5.069 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูง ขณะที่วิธี DHT-Factor correction ให้ผลการทำนายที่ R^2 เท่ากับ 0.925 และ RMSE เท่ากับ 1.715

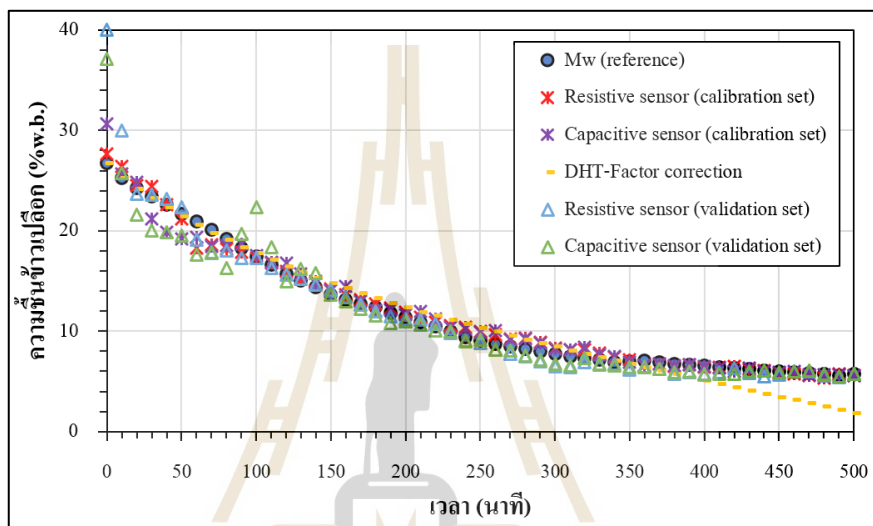
เมื่อวิเคราะห์ผลการทำนายความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งในช่วงความชื้น 13% – 26% มาตรฐานเปียก พบว่า ผลดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ สุรชัย เหมหิรัญ (2563) ซึ่งนำเสนอการประเมินความชื้นข้าวในลักษณะเดียวกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error, %Error) อยู่ที่ 4.3% โดยวิธีการตรวจวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ผู้วิจัยทำการพัฒนาขึ้นมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน เป็น 2.75% สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C และ 1.65% สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C ซึ่งเป็นข้อมูลบ่งชี้ได้ว่าวิธีการนี้มีความแม่นยำสูงและมีศักยภาพเพียงพอต่อการพัฒนาระบบประเมินความชื้นข้าวตามเวลาจริงต่อไปได้ในอนาคต

วิธี DHT-Factor correction สามารถปรับปรุงผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการอบแห้งข้าวเพื่อจัดเก็บสำหรับการบริโภค ข้อสังเกตที่พบเห็นได้จากพฤติกรรมของ Factor n ณ เวลาต่าง ๆ คือ การลดลงที่มีลักษณะเป็นลอการิทึม ทั้งจากเงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C และ 80°C เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ จิตรารัตน์ จอกแก้ว (2559) ซึ่งได้ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในรูปแบบเดียวกัน ถึงแม้ว่าการทำงานของไซโคลนในการคัดแยกอนุภาคออกจากอากาศในระบบจริงจะไม่เป็นไปตามอุดมคติก็ตาม แต่การตั้งข้อสังเกตจากผลการอบแห้งของงานวิจัยดังกล่าวที่ระบุถึงความเป็นไปได้ของอิทธิพลในการอบแห้งต่อเนื่องในถังเก็บข้าว ภายหลังจากที่ข้าวออกจากหอบแห้ง (มีความชื้นบางส่วนคายออกจากข้าวเปลือกขณะอยู่ในถัง) ประเด็นนี้สามารถที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปได้ในอนาคต เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและยืนยันข้อสมมติฐานต่าง ๆ ที่พบเห็นได้จากงานวิจัยนี้ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นต่อไป

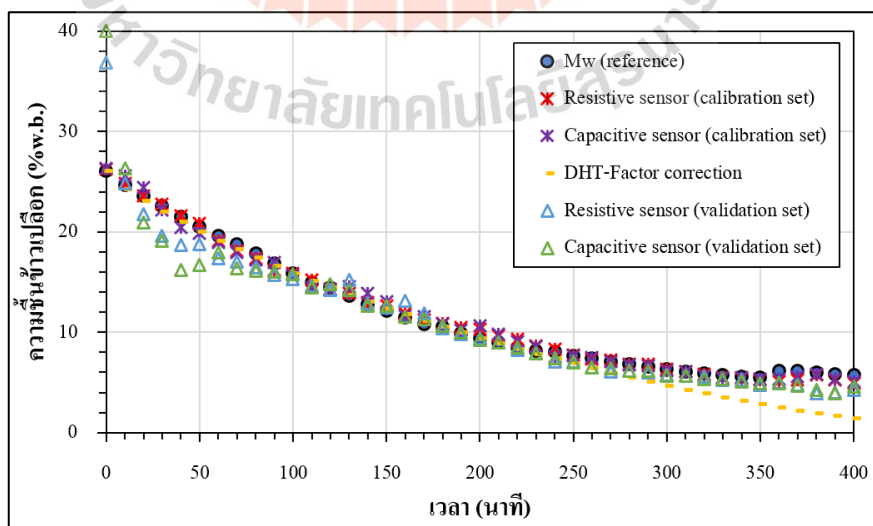
4.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงที่พัฒนาขึ้น

ผลการทำนายด้วยวิธีการประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงที่พัฒนาขึ้นจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ และเซ็นเซอร์ DHT22 ถูกเปรียบเทียบกับความชื้นอ้างอิงจากวิธีอบลมร้อนตามมาตรฐานของ ASAE โดยแบ่งการทำนายผลตามเงื่อนไขการอบแห้งที่ทำการทดลองได้แก่ เงื่อนไขการอบแห้งที่ 70°C รายงานผลที่ 500 นาที และเงื่อนไขการอบแห้งที่ 80°C รายงานผลที่ 400 นาที ดังรูปที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากวิธีการประเมินความชื้นทั้ง 3 แบบ ผู้วิจัยได้แบ่งช่วงเวลาออกเป็น 4 ช่วง เพื่อแสดงถึงจุดเด่นของการประเมินความชื้นข้าวเปลือกที่มีความแม่นยำแตกต่างกันตามแต่ละช่วงเวลาสำหรับวิธีการประเมินความชื้นตามเวลาจริงที่ถูกพัฒนาขึ้นจากเซ็นเซอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ 0 – 30%, 30 – 60%, 60 – 100% และ 0 – 100% ของเวลาอบแห้งทั้งหมดที่รายงาน



รูปที่ 4.32 ผลการทำนายความชื้นข้าวจากวิธีการประเมินความชื้นแบบต่าง ๆ ณ การอบแห้งที่ 70°C



รูปที่ 4.33 ผลการทำนายความชื้นข้าวจากวิธีการประเมินความชื้นแบบต่าง ๆ ณ การอบแห้งที่ 80°C

4.5.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 70°C

การแบ่ง ช่วงเวลา	การตรวจสอบ ความแม่นยำ	Resistive sensor		Capacitive sensor		DHT22
		Calibration	Validation	Calibration	Validation	
0 - 30%	R ²	0.930	0.251	0.820	0.249	0.987
	RMSE	1.028	3.539	1.660	3.669	0.515
30 - 60%	R ²	0.916	0.868	0.876	0.937	0.730
	RMSE	0.547	0.581	0.666	0.399	1.060
60 - 100%	R ²	0.918	0.916	0.892	0.937	0.516
	RMSE	0.389	0.420	0.397	0.403	2.045
0 - 100%	R ²	0.987	0.880	0.972	0.889	0.945
	RMSE	0.692	2.096	1.028	2.010	1.433

พิจารณาผลการทำนายความชื้นข้าวจากวิธีการวัดและประเมินความชื้นแบบต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นในรูปที่ 4.32 สามารถสังเกตเห็นถึงความแม่นยำสูงของวิธีการประเมินความชื้นแบบ DHT-Factor correction ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิงสูงสุด ในช่วง 150 นาทีแรกของการอบแห้ง (0 - 30%) ขณะที่วิธีการประเมินความชื้นซึ่งถูกพัฒนาโดยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุซึ่งมีความผันผวนสูงของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ทำให้ผลการทำนายความชื้นข้าวมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น ผลการคำนวณค่า R² และ RMSE จากตารางที่ 4.14 พบว่าวิธีการประเมินความชื้นแบบ DHT-Factor correction มีค่า R² สูงถึง 0.987 ขณะที่พบค่าผิดพลาดเป็น RMSE เท่ากับ 0.515 เมื่อพิจารณาการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงเวลาถัดไป (30 - 60%) พบว่า การทำนายผลด้วย DHT-Factor correction เริ่มเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ขณะที่ผลการทำนายความชื้นจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุเริ่มที่จะให้ผลการทำนายเข้าใกล้ค่าอ้างอิงมากขึ้นจากช่วงแรก ซึ่งแนวโน้มของการทำนายผลด้วยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดให้ค่าผิดพลาดค่อนข้างต่ำทั้งในช่วงเวลาที่ 30 - 60% และ 60 - 100% ผลการทำนายนี้ให้ผลดีทั้งในกลุ่มของ Calibration set

และ Validation set อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาภาพรวมของระบบซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้พบว่า ในช่วงเวลาของการอบแห้งตั้งแต่ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเข้าสู่เครื่องอบแห้งและถูกลดความชื้นลงจนกระทั่งความชื้นเข้าสู่ความชื้นสมดุล ณ เงื่อนไขอากาศอบแห้งที่ 70°C (0 – 100%) พบว่า การทำนายผลจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน จากการวัดความชื้นข้าวในกลุ่ม Validation set มีความแม่นยำอยู่ที่ R² เท่ากับ 0.880, RMSE เท่ากับ 2.096 และการทำนายผลจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ กับกลุ่ม Validation set มีความแม่นยำอยู่ที่ R² เท่ากับ 0.889, RMSE เท่ากับ 2.010 ขณะที่การทำนายผลจากเซ็นเซอร์ DHT22 มีความแม่นยำอยู่ที่ R² เท่ากับ 0.945, RMSE เท่ากับ 1.433 ซึ่งเป็นความแม่นยำที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อใช้เป็นอุปกรณ์รับค่าข้อมูลสำหรับระบบควบคุมกระบวนการอบแห้งได้ต่อไป

4.5.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพของวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริง ณ เงื่อนไขการอบแห้ง 80°C

การแบ่ง ช่วงเวลา	การตรวจสอบ ความแม่นยำ	Resistive sensor		Capacitive sensor		DHT22
		Calibration	Validation	Calibration	Validation	
0 - 30%	R ²	0.986	0.203	0.965	0.445	0.998
	RMSE	0.419	3.322	0.668	4.476	0.409
30 - 60%	R ²	0.956	0.865	0.883	0.931	0.975
	RMSE	0.375	0.911	0.618	0.493	0.281
60 - 100%	R ²	0.931	0.969	0.902	0.972	0.634
	RMSE	0.417	1.060	0.325	0.994	2.709
0 - 100%	R ²	0.996	0.889	0.992	0.820	0.925
	RMSE	0.406	2.045	0.542	2.610	1.715

เมื่อพิจารณาผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากรูปที่ 4.33 พบความคลาดเคลื่อนจากวิธีการวัดและประเมินความชื้นจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุเกิดขึ้นจากกลุ่ม Validation set ซึ่งเป็นผลมาจากความผันแปรสูงในช่วงเริ่มต้นของสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านค่าจาก

เซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดที่พบเห็นได้จากรูปที่ 4.14 ถึงแม้ว่าเทคนิค PCA จะช่วยลดมิติของข้อมูลจากการวัดในขั้นต้นแล้ว แต่ด้วยอิทธิพลของความไม่แน่นอนของสัญญาณดังกล่าว ทำให้องค์ประกอบจำนวน 10 PC (ในแต่ละชนิดของเซ็นเซอร์) ไม่สามารถที่จะอธิบายชุดข้อมูลเดิมได้ 100% ทำให้ผลการพยากรณ์ความชื้นจากเซ็นเซอร์ชนิดด้านทานในช่วง 0 – 30% มีค่า R^2 เท่ากับ 0.203, RMSE เท่ากับ 3.322 และผลการพยากรณ์ความชื้นจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุมีค่า R^2 เท่ากับ 0.445, RMSE เท่ากับ 4.476 สำหรับกลุ่มที่ใช้ทวนสอบการทำนาย (Validation set) ถึงแม้ว่ากลุ่ม Calibration set จะให้ผลการทำนายความชื้นสูงเพียงใดก็ตาม แต่เมื่อผลการทำนายความชื้นดังกล่าวถูกเปรียบเทียบกับการทำนายผลด้วย DHT22 พบว่า DHT22 กลับให้ความแม่นยำที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าความชื้นอ้างอิงในช่วง 0 – 30% โดยมีค่า R^2 เป็น 0.998 และ RMSE เป็น 0.409 เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาถัดไป (30 – 60%) วิธีการวัดและประเมินความชื้นจาก DHT22 ก็สามารถที่จะทำนายผลความชื้นข้าวได้ดีไม่แพ้กัน จนกระทั่งในช่วงนาที่ที่ 240 – 400 (60 – 100%) พบความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นสำหรับวิธีประเมินความชื้นจาก DHT22 ซึ่งมีค่า RMSE อยู่ที่ 2.709 ขณะที่ผลการประเมินความชื้นจากเซ็นเซอร์ชนิดด้านทานให้ความแม่นยำจากการทำนายที่ R^2 อยู่ในช่วง 0.931 – 0.969, RMSE อยู่ในช่วง 0.417 – 1.060 และผลการประเมินความชื้นจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุให้ความแม่นยำจากการทำนายที่ R^2 อยู่ในช่วง 0.902 – 0.972, RMSE อยู่ในช่วง 0.325 – 0.994 สำหรับกลุ่ม Calibration set - Validation set

หากพิจารณาถึงภาพรวมของการทำนายความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง จะเห็นได้ว่า วิธีการประเมินความชื้นทั้ง 3 แบบนั้น สามารถทำนายผลความชื้นได้ดีและให้ความแม่นยำในระดับที่มีความน่าเชื่อถือสูงในระดับการวัดความชื้นทางการค้า โดยจุดเด่นที่ปรากฏชัดเจน คือ การทำนายผลจากเซ็นเซอร์ DHT22 ค่อนข้างให้ค่าที่มีความแน่นอนและแม่นยำสูงในช่วง 0 – 30% แรกของระยะเวลาการอบแห้งที่งานวิจัยนี้นำเสนอ ขณะที่การทำนายผลจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิดสามารถทำนายผลความชื้นข้าวได้แม่นยำสูงในช่วงระยะตั้งแต่ 30% เป็นต้นไป อย่างไรก็ตามวิธีการประเมินความชื้นเหล่านี้ต่างมีศักยภาพการทำนายผลที่ดีและสามารถใช้งานได้ตามแต่ความเหมาะสมของการติดตั้งกับเครื่องอบแห้งในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้อุปกรณ์รับรู้ค่าอุณหภูมิกับความชื้นทั้งของข้าวเปลือกและของอากาศอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เพื่อวิเคราะห์และประเมินหาค่าความชื้นที่มีอยู่ในข้าวเปลือกที่เวลาต่าง ๆ ผลจากการศึกษาความเป็นไปได้ในขั้นต้นสำหรับการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุสำหรับประเมินความชื้นข้าวเปลือกร่วมกับตัวแปรอุณหภูมิ บ่งชี้ถึงศักยภาพของการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการหลักสำหรับลดมิติข้อมูลจากการเก็บผลด้วยเครื่องมือวัดทั้ง 2 ชนิด ที่ช่วยส่งเสริมให้การทำนายผลด้วย MLR มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เมื่อนำมาเทคนิคนี้มาใช้กับข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าและอุณหภูมิข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก จากความชื้นเริ่มต้น 26%w.b. จนกระทั่งความชื้นข้าวเข้าสู่ความชื้นสมดุล พบว่า ณ เงื่อนไขอากาศอบแห้ง 70°C วิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทานให้ผลการทำนายความชื้นที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นอ้างอิงค่อนข้างสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุ (R²) เท่ากับ 0.987 (สำหรับ Calibration set), 0.880 (สำหรับ Validation set) และมีค่ารากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.692 (สำหรับ Calibration set), 2.096 (สำหรับ Validation set) ขณะที่วิธีการประเมินความชื้นที่พัฒนาขึ้นจากเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุมีค่า R² เป็น 0.972 (สำหรับ Calibration set), 0.889 (สำหรับ Validation set) และ RMSE เป็น 1.028 (สำหรับ Calibration set), 2.010 (สำหรับ Validation set) นอกจากนี้ วิธีการประเมินความชื้นข้าวซึ่งพัฒนาจากข้อมูลการวัดด้วย DHT22 ให้ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือก โดยที่ R² เท่ากับ 0.945 และ RMSE เท่ากับ 1.433 เมื่อระบบเหล่านี้ถูกใช้สำหรับประเมินความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง ณ เงื่อนไขอากาศคงที่ 80°C วิธีการประเมินความชื้นที่พัฒนาโดยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุให้ค่า R² เป็น 0.996 และ 0.992 (สำหรับ Calibration set) 0.889 และ 0.820 (สำหรับ Validation set) ตามลำดับ โดยมี RMSE เป็น 0.406 และ 0.542 (สำหรับ Calibration set) 2.045 และ 2.610 (สำหรับ Validation set) ตามลำดับ อีกทั้ง วิธีการประเมินความชื้นซึ่งถูกพัฒนาจากข้อมูลของ DHT22 ยังให้ผลการทำนายความชื้นที่มีความสัมพันธ์สูงกับชุดข้อมูลอ้างอิง โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.925 และ RMSE เท่ากับ 1.715 อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือก โดยแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 3 ช่วง ตามเปอร์เซ็นต์ของเวลาทั้งหมด ได้แก่ 0% - 30% และ 60% - 100% พบว่า วิธีการประเมินความชื้นข้าวที่พัฒนามาจาก DHT22 มีความโดดเด่นและให้ผลการประเมินความชื้นตามเวลาจริง

ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำในช่วง 0% - 30% ซึ่งเป็นช่วงของการลดความชื้นข้าวสำหรับการจัดเก็บเพื่อการบริโภค ($\leq 14\%w.b.$) ขณะที่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิด ให้ผลการทำนายความชื้นที่มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างน้อยในช่วงเวลาตั้งแต่ 30% เป็นต้นไป ผลการทดสอบนี้ ชี้ให้เห็นว่า เซ็นเซอร์ทั้ง 3 ชนิด มีศักยภาพเพียงพอต่อการนำมาใช้พัฒนาระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงในระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีอุณหภูมิสูงได้ และไม่เพียงแต่จะช่วยให้การวัดมีความสะดวกรวดเร็ว และแม่นยำขึ้นแล้ว ระบบเหล่านี้ยังมีต้นทุนต่ำ ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดทางเลือกที่สามารถเข้าถึงได้สำหรับเกษตรกร ตลอดจนธุรกิจขนาดกลางและขนาดเล็กต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบเซ็นเซอร์วัดความชื้นชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ทำให้ทราบว่าการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เงื่อนไขการอบแห้งแตกต่างกัน มีผลต่อการอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ต่อการทำนายความชื้นข้าว (จากการวิเคราะห์ปัจจัยทางสถิติ) ซึ่งมีความเด่นชัดสำหรับเซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ การศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ของปัจจัยแฝงที่มีผลต่อสัญญาณไฟฟ้าและตัวแปรตอบสนอง ตลอดจนการพัฒนาวิธีทางคณิตศาสตร์สำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายความชื้นข้าวเปลือก เป็นวิธีหนึ่งที่จะทำให้ผลการทำนายมีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ในอนาคต

2. ข้อสังเกตระหว่างการทดลอง ในส่วนของการวัดคุณสมบัติอากาศด้วย DHT22 ที่ปลายทางออกของอากาศด้านบนไซโคลน พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของไซโคลนไม่เป็นไปตามอุดมคติ ทำให้มีอากาศบางส่วนถูกปล่อยออกมาพร้อมกับข้าวเปลือก ขณะเดียวกันข้าวบางส่วนยังคงคายความชื้นจากเมล็ดออกสู่อากาศอยู่ ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดขึ้น เพื่อยืนยันผลการวัดที่มีความถูกต้องมากขึ้น ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดที่ปลายทางออกของข้าวเปลือกพร้อมด้วย

3. ในการทดลอง ผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดใบพัดแยก เพื่อวัดความเร็วของอากาศรอบแห้งสำหรับวิเคราะห์อัตราการไหลอากาศ ณ ปลายทางออกอากาศก่อนเข้าสู่ไซโคลน โดยทำการระบุจุดวัดตาม ASHRAE อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องมือวัดที่สามารถระบุจุดวัดที่ชัดเจน เช่น Pitot tube หรือ Hot-wire anemometer หรือการใช้แผ่นออริฟิส (Orifice plate) สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหล เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถวัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

4. ถึงแม้ว่าการวัดคุณสมบัติอากาศของเครื่องอบแห้งด้วย DHT22 จะมีเศษเหลือค้างของข้อมูล (Residual data) ทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจริง แต่อย่างไรก็ตาม หากวิเคราะห์ถึงการถ่ายเทมวลของน้ำจากเมล็ดข้าวที่เข้าสู่อากาศตามทฤษฎีสมดุลมวลเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ค่าผิดพลาดนี้มีส่วนต่างที่ค่อนข้างมากอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เกิดข้อสมมติฐานและข้อสังเกตจากการทดลองนี้ว่า ความชื้นของข้าวเปลือกอาจถูกคายออกจากภายในถังเก็บสู่อากาศแวดล้อมสำหรับระบบอบแห้งลักษณะนี้ ประเด็นดังกล่าวสามารถทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันข้อสมมติฐานนี้ได้ต่อไปในอนาคต



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- กนกศักดิ์ บุญทัน และ ประภาศิต ตันตือลงกร. (พฤษภาคม 2558). เครื่องวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกไร้สาย. ใน การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 8 (หน้า 7-12). กรุงเทพฯ: คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- กรมการข้าว. (2563). แผนปฏิบัติการ แผนการผลิตและแผนการตลาดข้าวครบวงจรปี 2563/2564 [ออนไลน์]. ได้จาก: https://www.ricethailand.go.th/web/images/AW%20Rice_V63-64.pdf
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4000 - 2560 ข้าวหอมมะลิไทย. กรุงเทพฯ: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2554). การวิเคราะห์สถิติขั้นสูงด้วย SPSS for Windows. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: ธรรมสาร.
- กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์, ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ละมุล วิเศษ. (2556). การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกโดยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 32(5): 622-625.
- เกียรติศักดิ์ใจโต, นาฏชนก ปรางปรู, เทวรัตน์ตรีอำนาจ, จิตรารัตน์จอกแก้ว, กระจวีตรีอำนาจ และ อีร์วัฒน์ขึ้นอัศตงคต. (เมษายน 2561). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 (หน้า 185-188). กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
- จิตรารัตน์ จอกแก้ว. (2559). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ไทยรัฐ ออนไลน์. (2563). ไฮโย! ข้าวหอมมะลิไทย ได้ครอง “แชมป์โลก” อีกครั้ง [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.thairath.co.th/news/business/1989740?cx_testId=7&cx_testVariant=cx_1&cx_artPos=0&cx_rec_section=news&cx_rec_topic=politic#cxrecs_s
- ธนกร สุนทรวัฒน์. (2557). เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช (รายงานการวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง = Design and analysis of experiments. กรุงเทพฯ: ท้อป
- ปรีดา ปราบกุ่มมาก. (2557). แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งข้าวกล้องเมล็ดเดียว.

- วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24 (3): 634-643.
- ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานันท์ ตันภูมิ, ฉัตรชัย นิยมผล และกิตติ สถาพรประสาธน์. (2559). อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ** 11 (1): 1-9.
- พิพัฒน์ อมตฉายา. (2556). การวัดและเครื่องมือวัด. นครราชสีมา: ศูนย์ปฏิบัติการสื่อสิ่งพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554). การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. **วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต** 1 (2): 31-42.
- ภาณุวัฒน์ทรัพย์ประุง, อนุรักษครองทรัพย์ และ ประสิทธิ์โสภณ. (2556). การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถ้งหมุนประหยัดพลังงานโดยระบบนำอากาศร้อนเวียนกลับมาใช้ใหม่. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร**. (ฉบับพิเศษ): 201-207.
- ยุทธ ไกยวรรณ. (2563). การวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรด้วย SPSS. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เลกะ คอร์ปอเรชั่น. (2563). **เครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก** [ออนไลน์]. ได้จาก: <https://legatool.com/wp/4549/>
- วิชา ธิติประเสริฐ และคณะ. (2544). **ฐานข้อมูลเชื้อพันธุ์พืช : ข้าว**. กรุงเทพฯ: ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- สมชาติ โสภณธรณฤทธิ. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สายชล สีนสมบูรณ์ทอง. (2559). การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวโดยใช้ SPSS และ MINITAB = **Multivariate Analysis by Using SPSS and MINITAB**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จามจุรีโปรดักส์.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2554). **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับข้าวไทย**. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- สุนทร สืบคำ และ ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพรุณ. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย** 17 (1): 59-66.
- สุพจน์ ตุงคเศรษฐ์. (2550). การวัดอุณหภูมิและการสอบเทียบมาตรฐาน. ใน สมาคมเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น (บรรณาธิการ), **การสอบเทียบเครื่องมือวัด Fundamental Parameter and Application** (หน้า 159-187). กรุงเทพฯ: สมาคมเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น.
- สุรัชย์ เหมหิรัญ. (2563). **การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลท์โฟล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อรสุตา แทนสร้อย และ สนั่น การค้า. (มีนาคม 2562). พัฒนาเครื่องต้นแบบวัดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย. ในรายงานการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10: **Global Goals, Local Actions: Looking Back and Moving Forward** (หน้า 1150-1159). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

Abdullah, M. S. M., Rahiman, M. H. F., Zakaria, A., Kamarudin, L. M., & Mohamed, L. (2019, November). A review on moisture measurement technique in agricultural silos. In **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** (Vol. 705, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

Abu-Khalaf, N., & Hmidat, M. (2020). Visible/Near Infrared (VIS/NIR) spectroscopy as an optical sensor for evaluating olive oil quality. **Computers and Electronics in Agriculture**. 173: 105445.

Alkhayrat, M., Aljnidi, M., & Aljoumaa, K. (2020). A comparative dimensionality reduction study in telecom customer segmentation using deep learning and PCA. **Journal of Big Data**. 7(1): 1-23.

Ashfaq, S., Ahmad, M., & Munir, A. (2016). Design, development and performance evaluation of a small-scale solar assisted paddy dryer for on farm processing. **Mehran University Research Journal of Engineering & Technology**. 35(2): 217-228.

ASHRAE. (2009). **2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.

Cengel, Y. A. and Boles, M. A. (2007). **Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Editon (SI Units)**. New York: The McGraw-Hill.

Esquerre, C. A., Achata, E. M., García-Vaquero, M., Zhang, Z., Tiwari, B. K., & O'Donnell, C. P. (2020). Use of an NIR MEMS spectrophotometer and visible/NIR hyperspectral imaging systems to predict quality parameters of treated ground peppercorns. **LWT**. 131: 109761.

Groth, D., Hartmann, S., Klie, S., & Selbig, J. (2013). **Principal components analysis**. In *Computational Toxicology* (pp. 527-547): Springer.

Hemhirun, S., and Bunyawanichakul, P. (2020). The use of Temperature and Relative Humidity Sensors to Estimate the Final Moisture Content of the Drying Process. **International Journal of Engineering Research & Technology**. 9 (5): 926-932.

- iEnergyGuru. (2015). การอบแห้ง (DRYING) [ออนไลน์]. ได้จาก: <https://ienergyguru.com/2015/09/drying/>
- IRRI. (2021). **Storage** [On-line]. Available: <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/storage#guidelines-for-safe-storage>
- Joaquin, A. C., Ramos, M. E. V., & Martinez, R. C. (2019). Development and Performance Evaluation of a Grain Probe Moisture Meter for Paddy. **International Journal of Environmental Science and Development**. 10(10): 350-355.
- Lin, L., He, Y., Xiao, Z., Zhao, K., Dong, T., & Nie, P. (2019). Rapid-detection sensor for rice grain moisture based on NIR spectroscopy. **Applied Sciences**. 9(8): 1654.
- Luthra, K., Shafiekhani, S., Stephens, B., Sadaka, S., & Atungulu, G. G. (2019). Evaluation of the Performance of a Newly Developed Wireless Temperature and Moisture Sensor for Rice under Various Levels of Temperature, Moisture Content, and Dockage. **Applied Engineering in Agriculture**. 35(3): 311-318.
- Maćkiewicz, A., & Ratajczak, W. (1993). Principal components analysis (PCA). **Computers & Geosciences**. 19(3): 303-342.
- Nanagarden. (2020). เครื่องวัดความชื้น [ออนไลน์]. ได้จาก: <https://www.nanagarden.com/shop/1348/moisture-meter/30003>
- Parhizkar, T., Rafieipour, E., & Parhizkar, A. (2021). Evaluation and improvement of energy consumption prediction models using principal component analysis based feature reduction. **Journal of Cleaner Production**. 279: 123866.
- Pathaveerat, S., & Pruengam, P. (2020). Low cost measurement of moisture content in long grain paddy. **Journal of Stored Products Research**. 89: 101728.
- Sisman, C.B. and Albut, S. (2010). Grain storage management. In **Proceedings of 3rd Annual International Symposium on Agriculture Research** (pp 15-18). Athens: Greece
- WF, S. and Jones, J. (1984). **Refrigeration and air conditioning**. New York: McGraw-Hill.

ภาคผนวก ก

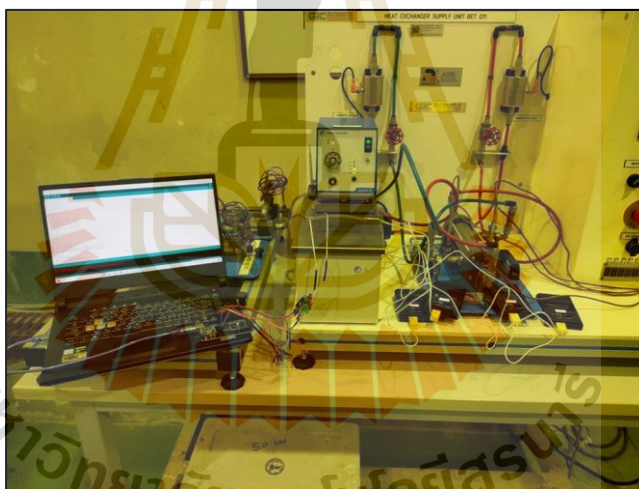
รายละเอียดและการสอบเทียบเซ็นเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

งานวิจัยนี้ดำเนินการเก็บข้อมูลการทดลองและพัฒนาวิธีการวัดความชื้นข้าวโดยใช้บอร์ด Arduino Uno R3 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน (Resistive soil moisture module) เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ (Capacitive soil moisture) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (K-Type Thermocouple) และ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (DHT22) ข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์เหล่านี้ (Specifications) ถูกแนบไว้ในส่วนท้ายของภาคผนวก ก

งานวิจัยทำการสอบเทียบเซ็นเซอร์ 2 ชนิด ได้แก่ K-Type Thermocouple (MAX6675) Module with Temperature Sensor Probe และ เซ็นเซอร์ DHT22 (AM2302) สำหรับการสอบเทียบอุปกรณ์ดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์เข้ากับบอร์ดอะดิวโน้ ผ่านการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการบันทึกค่าจากเซ็นเซอร์ ข้อมูลการสอบเทียบเซ็นเซอร์ไว้ดังต่อไปนี้

ก.2 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (K-Type Thermocouple)



รูปที่ ก.1 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

สุพจน์ ตุงคเศรวงค์ (2550) เสนอแนวทางการสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิด้วยอ่างทำน้ำร้อนซึ่งถูกควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิความแม่นยำสูง งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ณ ศูนย์เครื่องมือ 5 ทำการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิกับอ่างทำน้ำร้อน (Hot water bath) โดยดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 70 และ 80°C ค่าที่ได้จากการวัดด้วย K-Type Thermocouple (MAX6675) Module ถูกบันทึกผลผ่านหน้าต่าง Serial monitor ของโปรแกรม Arduino IDE ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำได้รับการอ้างอิงโดย K-Type Thermocouple มาตรฐานซึ่งมีความแม่นยำสูง ผลการสอบเทียบ K-Type Thermocouple

ตัวที่ 1 และ 2 แสดงดังตารางที่ ก.1 และ ก.2 ตามลำดับ สมการที่ปรากฏภายในรูปที่ ก.2 และ ก.3 ถูกใช้สำหรับปรับค่าอุณหภูมิซึ่งอ่านได้จาก K-type Thermocouple ทั้ง 2 ตัว ในงานวิจัยนี้ เมื่อ x คือ ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ ($^{\circ}\text{C}$) และ y คือ อุณหภูมิซึ่งได้รับการปรับแก้ค่าแล้ว ($^{\circ}\text{C}$)

$$\text{ตัวที่ 1: } y_1 = 0.9982x_1 - 0.5501 \quad (\text{ก.1})$$

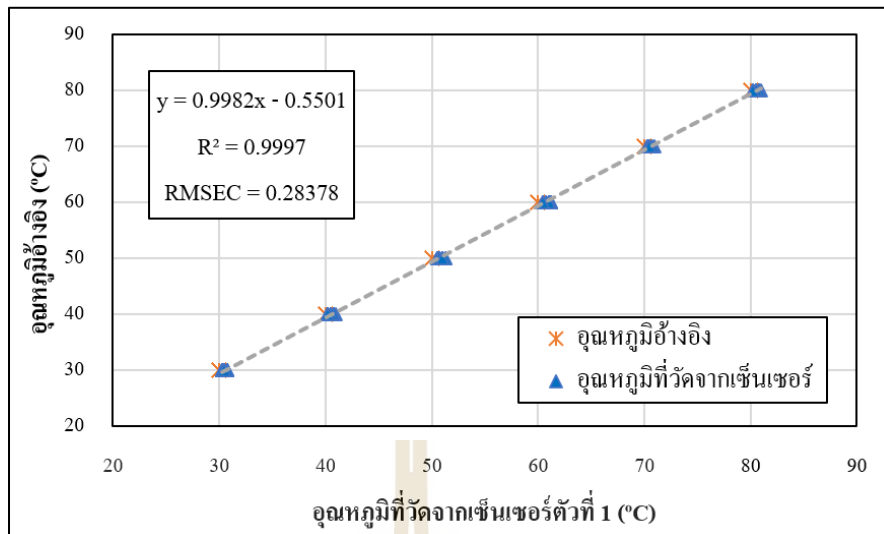
$$\text{ตัวที่ 2: } y_2 = 1.0021x_2 - 0.6424 \quad (\text{ก.2})$$

ตารางที่ ก.1 การสอบเทียบ K-Type Thermocouple ตัวที่ 1

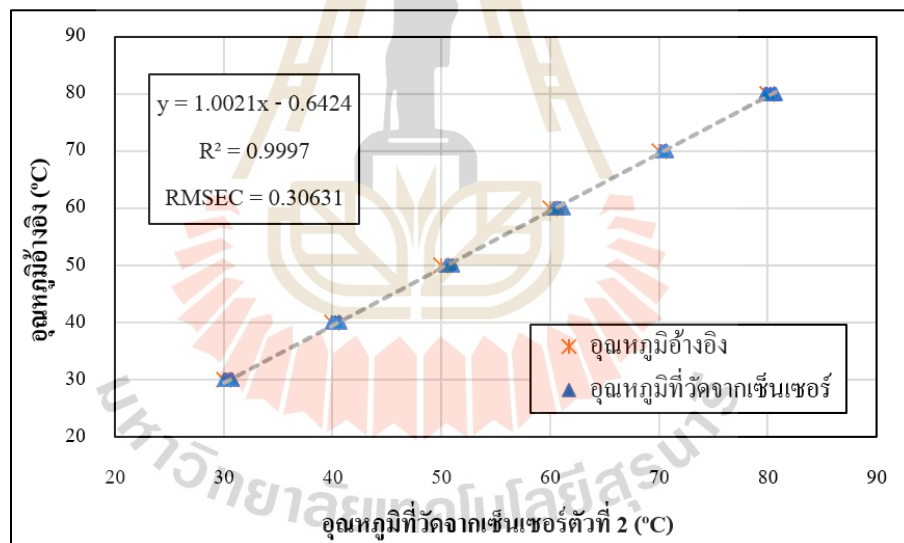
ครั้งที่ทดสอบ	อุณหภูมิควบคุม ($^{\circ}\text{C}$)					
	30 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	70 $^{\circ}\text{C}$	80 $^{\circ}\text{C}$
1	30.50	40.25	51.00	61.00	70.25	80.50
2	30.50	40.25	50.50	61.25	70.50	80.50
3	30.75	40.25	50.75	60.75	71.00	80.75
4	30.50	40.50	50.50	61.00	70.50	80.75
5	30.75	40.25	50.75	61.25	70.50	81.00
6	30.25	40.50	50.50	60.75	70.50	80.75
7	30.75	41.00	51.00	60.75	70.50	80.75
8	30.25	40.75	50.75	61.00	70.50	80.50
9	30.75	40.50	51.00	61.25	70.50	80.50
10	30.50	40.75	51.00	61.00	70.75	80.75
11	30.50	40.75	51.25	60.50	70.50	80.75
12	30.25	40.50	50.75	61.25	70.50	80.25
13	30.25	40.25	51.00	61.00	70.25	80.50
14	30.75	40.50	51.25	61.00	70.25	80.50
15	30.50	40.25	51.00	60.50	70.50	80.25
Means	30.52	40.48	50.87	60.95	70.50	80.60
S.D.	0.20	0.24	0.25	0.25	0.19	0.21

ตารางที่ ก.2 การสอบเทียบ K-Type Thermocouple ตัวที่ 2

ครั้งที่ทดสอบ	อุณหภูมิควบคุม (°C)					
	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
1	30.50	40.50	51.00	61.00	70.50	80.75
2	30.75	40.50	51.00	61.00	70.25	80.00
3	30.50	40.50	50.75	60.75	70.75	80.50
4	30.25	40.25	51.00	61.00	70.50	80.50
5	30.25	40.00	50.75	61.25	70.75	80.25
6	30.25	40.25	51.00	61.00	70.50	80.25
7	30.50	40.00	50.75	60.75	70.50	79.75
8	30.25	40.50	50.75	61.00	70.50	80.25
9	30.50	40.50	50.50	60.25	70.50	80.25
10	30.50	40.75	50.75	60.75	70.75	80.25
11	30.75	40.50	50.50	60.75	70.50	79.75
12	30.25	40.50	50.50	60.75	70.50	80.25
13	30.50	40.25	51.00	60.75	70.25	80.25
14	30.75	40.50	51.00	60.50	70.50	80.25
15	30.00	40.50	51.00	60.50	70.50	79.75
Means	30.43	40.40	50.82	60.80	70.52	80.20
S.D.	0.22	0.21	0.20	0.25	0.15	0.29



รูปที่ ก.2 การสอบเทียบ K-type Thermocouple ตัวที่ 1



รูปที่ ก.3 การสอบเทียบ K-type Thermocouple ตัวที่ 2

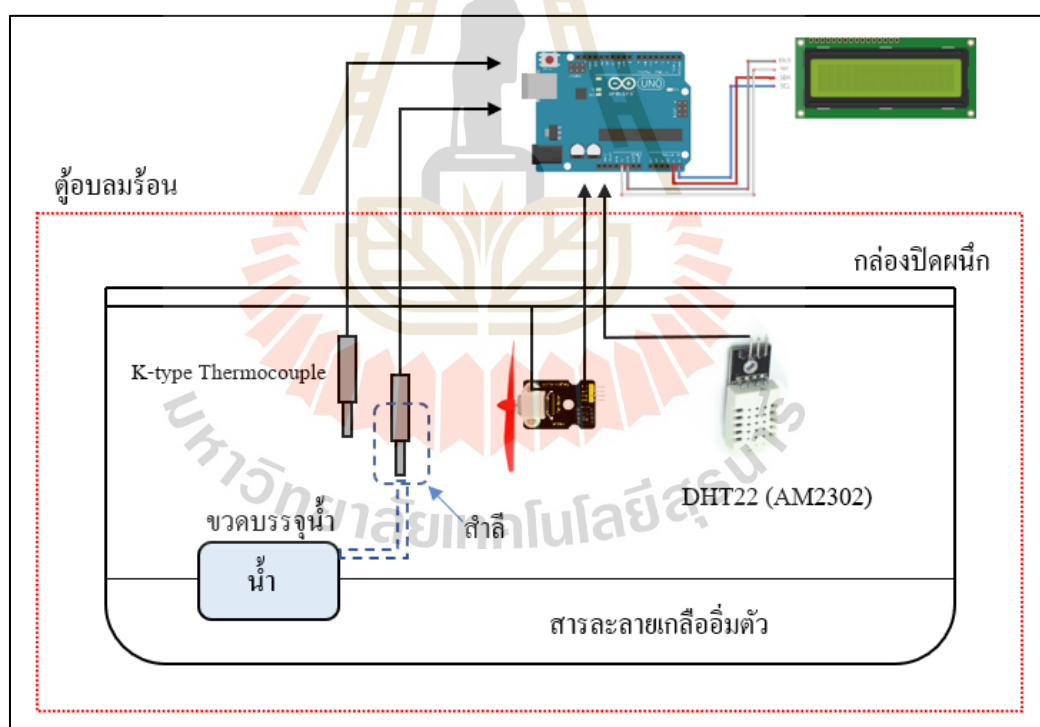
ก.2 การสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 (AM2302)

ทำการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศโดยอาศัยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยสารละลายเกลืออิมิตัวที่แตกต่างกัน การจำลองอุณหภูมิของระบบถูกควบคุมโดยตู้อบลมร้อนดังรูปที่ ก.4 (เส้นประสีแดง) เซ็นเซอร์ DHT22, พัดลมสำหรับเร่งความเร็วอากาศ, K-type Thermocouple (ห่อหุ้มสำลีสุบน้ำ) และ K-type Thermocouple (ไม่ห่อหุ้มสำลีสุบน้ำ) ถูกติดตั้งอยู่ภายในกล่องปิดผนึกซึ่งเป็นระบบของการทดลอง โดยมีสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่าง ๆ

เป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่แตกต่างกันภายในระบบ ดังตารางที่ ก.3 ผลของอุณหภูมิ กระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งจากการบันทึกข้อมูล ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกใช้สำหรับการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22

ตารางที่ ก.3 สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระบบปิด

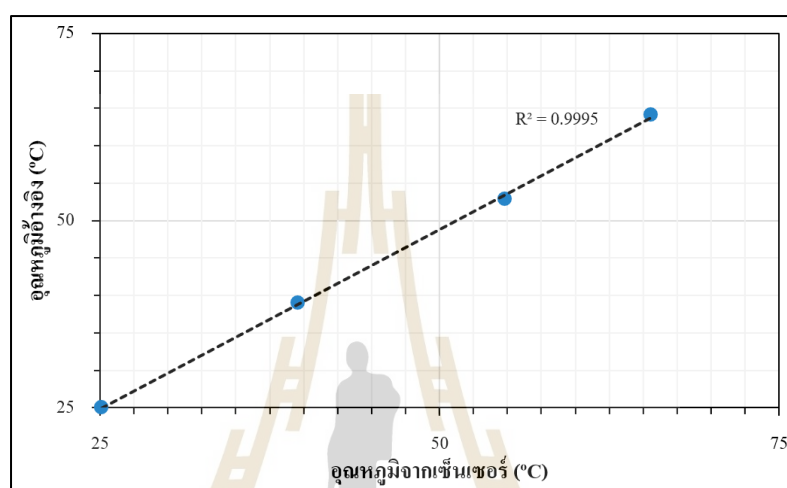
สารละลายเกลืออิ่มตัว	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (%)
Potassium hydroxide (KOH)	8.0
Magnesium chloride (MgCl ₂)	32.8
Sodium bromide (NaBr)	57.6
Sodium chloride (NaCl)	75.3
Potassium chloride (KCl)	84.3



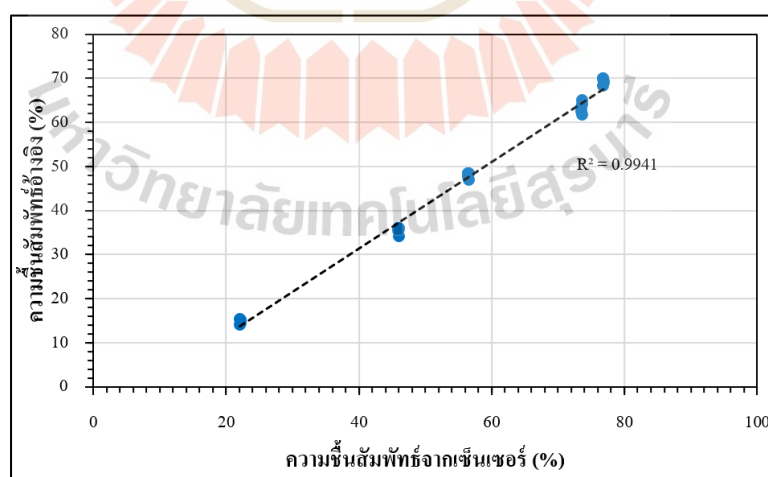
รูปที่ ก.4 การสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้จำลองอุณหภูมิของระบบเป็น 25, 40, 55 และ 65°C สำหรับบันทึกข้อมูล การอ่านค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ DHT22 (รูปที่ ก.5) ผลการทดสอบพบว่า เซ็นเซอร์ DHT22 สามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่า R^2 สูงถึง 0.9995 นอกจากนี้ ผลการตรวจวัดความชื้น

สัมพัทธ์ของอากาศโดยเซ็นเซอร์ DHT22 เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์อ้างอิง ให้ผลความคลาดเคลื่อนต่ำ แม้ในระบบที่มีอุณหภูมิสูง โดยรูปที่ ก.6 แสดงผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจากระบบที่จำลองขึ้น และเพื่อลดความซับซ้อนของระบบประเมินความชื้นที่กำลังพัฒนา ผู้วิจัยจึงใช้เซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับการวัดคุณสมบัติอากาศได้โดยตรง (ไม่มีสมการปรับค่า)



รูปที่ ก.5 ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศ



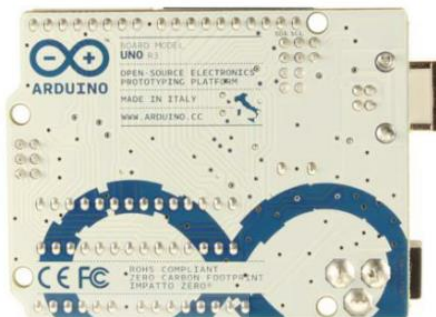
รูปที่ ก.6 ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์ DHT22 สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง แสดงได้ดังเอกสารแนบต่อไปนี้

Arduino Uno



Arduino Uno R3 Front



Arduino Uno R3 Back



Arduino Uno R2 Front



Arduino Uno SMD



Arduino Uno Front



Arduino Uno Back

Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz ceramic resonator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega16U2 (Atmega8U2 up to version R2) programmed as a USB-to-serial converter.

| [Revision 2](#) of the Uno board has a resistor pulling the 8U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

| [Revision 3](#) of the board has the following new features:

- 1.0 pinout: added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible both with the board that use the AVR, which operate with 5V and with the Arduino Due that operate with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- Stronger RESET circuit.
- Atmega 16U2 replace the 8U2.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the [index of Arduino boards](#).

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V

Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-uno-Rev3-reference-design.zip](#) (NOTE: works with Eagle 6.0 and newer)

Schematic: [arduino-uno-Rev3-schematic.pdf](#)

Note: The Arduino reference design can use an Atmega8, 168, or 328, Current models use an ATmega328, but an Atmega8 is shown in the schematic for reference. The pin configuration is identical on all three processors.

Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Memory

The ATmega328 has 32 KB (with 0.5 KB used for the bootloader). It also has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.

- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#).
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Uno has 6 analog inputs, labeled A0 through A5, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **TWI: A4 or SDA pin and A5 or SCL pin.** Support TWI communication using the [Wire library](#).

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and ATmega328 ports](#). The mapping for the Atmega8, 168, and 328 is identical.

Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega16U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '16U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, [on Windows, a .inf file is required](#). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Uno's digital pins. The ATmega328 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the [documentation](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Uno from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also [bypass](#) the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available. The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

- On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2.
- On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Uno is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2/16U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data. The Uno contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

USB Overcurrent Protection

The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

Physical Characteristics

The maximum length and width of the Uno PCB are 2.7 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Four screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

EVALUATION KIT AVAILABLE

Click [here](#) to ask about the production status of specific part numbers.**MAX6675****Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)****General Description**

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8 LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Applications

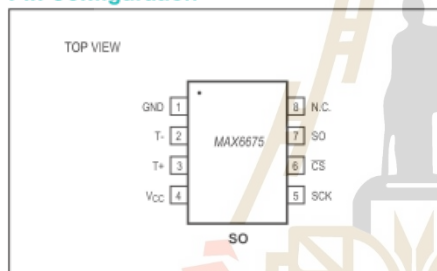
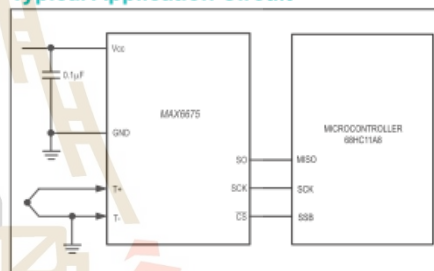
- Industrial
- Appliances
- HVAC

Features

- Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- Cold-Junction Compensation
- Simple SPI-Compatible Serial Interface
- 12-Bit, 0.25°C Resolution
- Open Thermocouple Detection

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

Pin Configuration**Typical Application Circuit**

19-2235; Rev 3; 6/21

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage (V_{CC} to GND) -0.3V to +6V
 SO, SCK, CS, T-, T+ to GND -0.3V to $V_{CC} + 0.3V$
 SO Current 50mA
 ESD Protection (Human Body Model) $\pm 2000V$
 Continuous Power Dissipation ($T_A = +70^\circ C$)
 8-Pin SO (derate 5.88mW/ $^\circ C$ above +70°C) 471mW
 Operating Temperature Range -20°C to +85°C

Storage Temperature Range -65°C to +150°C
 Junction Temperature +150°C
 SO Package
 Vapor Phase (60s) +215°C
 Infrared (15s) +220°C
 Lead Temperature (soldering, 10s) +300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Electrical Characteristics

($V_{CC} = +3.0V$ to +5.5V, $T_A = -20^\circ C$ to +85°C, unless otherwise noted. Typical values specified at +25°C.) (Note 1)

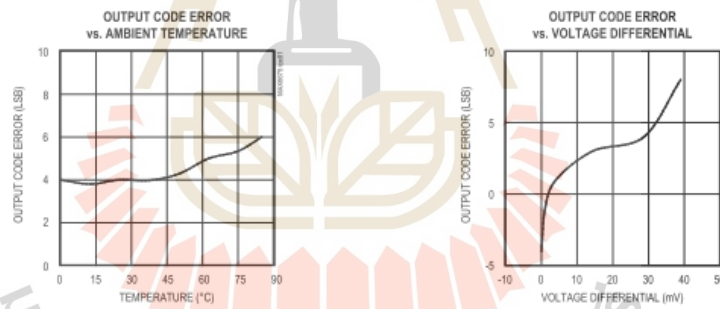
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Error		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-5	+5	LSB
			$V_{CC} = +5V$	-6	+6	
		$T_{THERMOCOUPLE} = 0^\circ C$ to $+700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-8	+8	
			$V_{CC} = +5V$	-9	+9	
Thermocouple Conversion Constant		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$ to +1000°C, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-17	+17	
			$V_{CC} = +5V$	-19	+19	
Thermocouple Input Impedance				10.25		$\mu V/LSB$
Cold-Junction Compensation Error		$T_A = -20^\circ C$ to $+85^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-3.0	+3.0	°C
			$V_{CC} = +5V$	-3.0	+3.0	
Resolution				0.25		°C
Thermocouple Input Impedance				60		k Ω
Supply Voltage	V_{CC}		3.0		5.5	V
Supply Current	I_{CC}			0.7	1.5	mA
Power-On Reset Threshold		V_{CC} rising	1	2	2.5	V
Power-On Reset Hysteresis				50		mV
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22	s
SERIAL INTERFACE						
Input Low Voltage	V_{IL}				$0.3 \times V_{CC}$	V
Input High Voltage	V_{IH}				$0.7 \times V_{CC}$	V
Input Leakage Current	I_{LEAK}	$V_{IN} = GND$ or V_{CC}			± 5	μA
Input Capacitance	C_{IN}			5		pF

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Electrical Characteristics (continued)(V_{CC} = +3.0V to +5.5V, T_A = -20°C to +85°C, unless otherwise noted. Typical values specified at +25°C.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Output High Voltage	V _{OH}	I _{SOURCE} = 1.6mA	V _{CC} - 0.4			V
Output Low Voltage	V _{OL}	I _{SINK} = 1.6mA			0.4	V
TIMING						
Serial Clock Frequency	f _{SCL}				4.3	MHz
SCK Pulse High Width	t _{CH}		100			ns
SCK Pulse Low Width	t _{CL}		100			ns
CSB Fall to SCK Rise	t _{CSS}	C _L = 10pF	100			ns
CSB Fall to Output Enable	t _{DV}	C _L = 10pF			100	ns
CSB Rise to Output Disable	t _{TR}	C _L = 10pF			100	ns
SCK Fall to Output Data Valid	t _{DO}	C _L = 10pF			100	ns

Note 1: All specifications are 100% tested at T_A = +25°C. Specification limits over temperature (T_A = T_{MIN} to T_{MAX}) are guaranteed by design and characterization, not production tested.**Note 2:** Guaranteed by design. Not production tested.**Typical Operating Characteristics**(V_{CC} = +3.3V, T_A = +25°C, unless otherwise noted.)

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	GND	Ground
2	T-	Alumel Lead of Type-K Thermocouple. Should be connected to ground externally.
3	T+	Chromel Lead of Type-K Thermocouple
4	V _{CC}	Positive Supply. Bypass with a 0.1μF capacitor to GND.
5	SCK	Serial Clock Input
6	\overline{CS}	Chip Select. Set \overline{CS} low to enable the serial interface.
7	SO	Serial Data Output
8	N.C.	No Connection

Detailed Description

The MAX6675 is a sophisticated thermocouple-to-digital converter with a built-in 12-bit analog-to-digital converter (ADC). The MAX6675 also contains cold-junction compensation sensing and correction, a digital controller, an SPI-compatible interface, and associated control logic.

The MAX6675 is designed to work in conjunction with an external microcontroller (μC) or other intelligence in thermostatic, process-control, or monitoring applications.

Temperature Conversion

The MAX6675 includes signal-conditioning hardware to convert the thermocouple's signal into a voltage compatible with the input channels of the ADC. The T+ and T- inputs connect to internal circuitry that reduces the introduction of noise errors from the thermocouple wires.

Before converting the thermoelectric voltages into equivalent temperature values, it is necessary to compensate for the difference between the thermocouple cold-junction side (MAX6675 ambient temperature) and a 0°C virtual reference. For a type-K thermocouple, the voltage changes by 41μV/°C, which approximates the thermocouple characteristic with the following linear equation:

$$V_{OUT} = (41\mu\text{V} / ^\circ\text{C}) \times (T_R - T_{AMB})$$

Where:

V_{OUT} is the thermocouple output voltage (μV).

T_R is the temperature of the remote thermocouple junction (°C).

T_{AMB} is the ambient temperature (°C).

Cold-Junction Compensation

The function of the thermocouple is to sense a difference in temperature between two ends of the thermocouple wires. The thermocouple's hot junction can be read from 0°C to +1023.75°C. The cold end (ambient temperature of the board on which the MAX6675 is mounted) can only range from -20°C to +85°C. While the temperature at the cold end fluctuates, the MAX6675 continues to accurately sense the temperature difference at the opposite end.

The MAX6675 senses and corrects for the changes in the ambient temperature with cold-junction compensation. The device converts the ambient temperature reading into a voltage using a temperature-sensing diode. To make the actual thermocouple temperature measurement, the MAX6675 measures the voltage from the thermocouple's output and from the sensing diode. The device's internal circuitry passes the diode's voltage (sensing ambient temperature) and thermocouple voltage (sensing remote temperature minus ambient temperature) to the conversion function stored in the ADC to calculate the thermocouple's hot-junction temperature.

Optimal performance from the MAX6675 is achieved when the thermocouple cold junction and the MAX6675 are at the same temperature. Avoid placing heat-generating devices or components near the MAX6675 because this may produce cold-junction-related errors.

Digitization

The ADC adds the cold-junction diode measurement with the amplified thermocouple voltage and reads out the 12-bit result onto the SO pin. A sequence of all zeros means the thermocouple reading is 0°C. A sequence of all ones means the thermocouple reading is +1023.75°C.

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Applications Information

Serial Interface

The *Typical Application Circuit* shows the MAX6675 interfaced with a microcontroller. In this example, the MAX6675 processes the reading from the thermocouple and transmits the data through a serial interface. Force \overline{CS} low and apply a clock signal at SCK to read the results at SO. Forcing \overline{CS} low immediately stops any conversion process. Initiate a new conversion process by forcing \overline{CS} high.

Force \overline{CS} low to output the first bit on the SO pin. A complete serial interface read requires 16 clock cycles. Read the 16 output bits on the falling edge of the clock. The first bit, D15, is a dummy sign bit and is always zero. Bits D14–D3 contain the converted temperature in the order of MSB to LSB. Bit D2 is normally low and goes high when the thermocouple input is open. D1 is low to provide a device ID for the MAX6675 and bit D0 is three-state.

[Figure 1a](#) is the serial interface protocol and [Figure 1b](#) shows the serial interface timing. [Figure 2](#) is the SO output.

Open Thermocouple

Bit D2 is normally low and goes high if the thermocouple input is open. In order to allow the operation of the open thermocouple detector, T₋ must be grounded. Make the ground connection as close to the GND pin as possible.

Noise Considerations

The accuracy of the MAX6675 is susceptible to power-supply coupled noise. The effects of power-supply noise can be minimized by placing a 0.1 μ F ceramic bypass capacitor close to the supply pin of the device.

Thermal Considerations

Self-heating degrades the temperature measurement accuracy of the MAX6675 in some applications. The magnitude of the temperature errors depends on the thermal conductivity of the MAX6675 package, the mounting technique, and the effects of airflow. Use a large ground plane to improve the temperature measurement accuracy of the MAX6675.

The accuracy of a thermocouple system can also be improved by following these precautions:

- Use the largest wire possible that does not shunt heat away from the measurement area.
- If small wire is required, use it only in the region of the measurement and use extension wire for the region with no temperature gradient.
- Avoid mechanical stress and vibration, which could strain the wires.
- When using long thermocouple wires, use a twisted-pair extension wire.
- Avoid steep temperature gradients.
- Try to use the thermocouple wire well within its temperature rating.
- Use the proper sheathing material in hostile environments to protect the thermocouple wire.
- Use extension wire only at low temperatures and only in regions of small gradients.
- Keep an event log and a continuous record of thermocouple resistance.

Reducing Effects of Pick-Up Noise

The input amplifier (A1) is a low-noise amplifier designed to enable high-precision input sensing. Keep the thermocouple and connecting wires away from electrical noise sources.

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

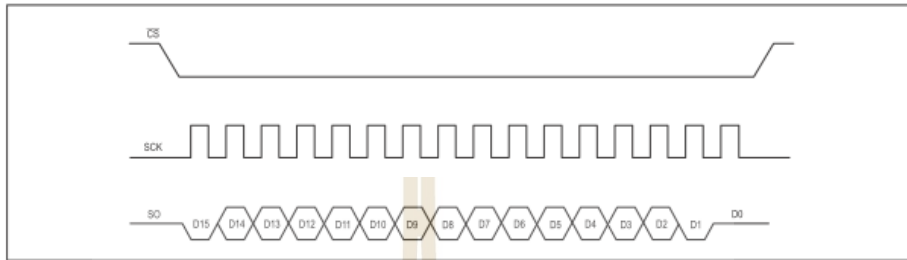


Figure 1a. Serial Interface Protocol

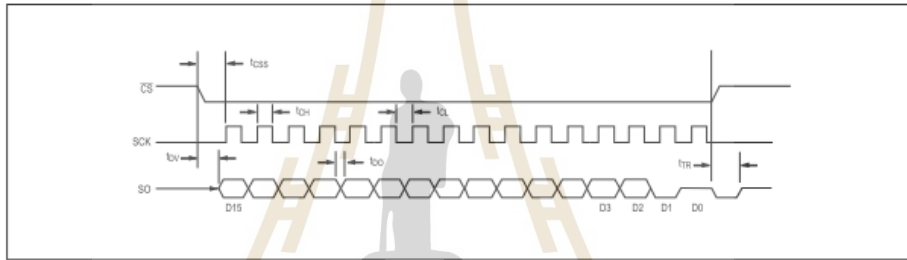


Figure 1b. Serial Interface Timing

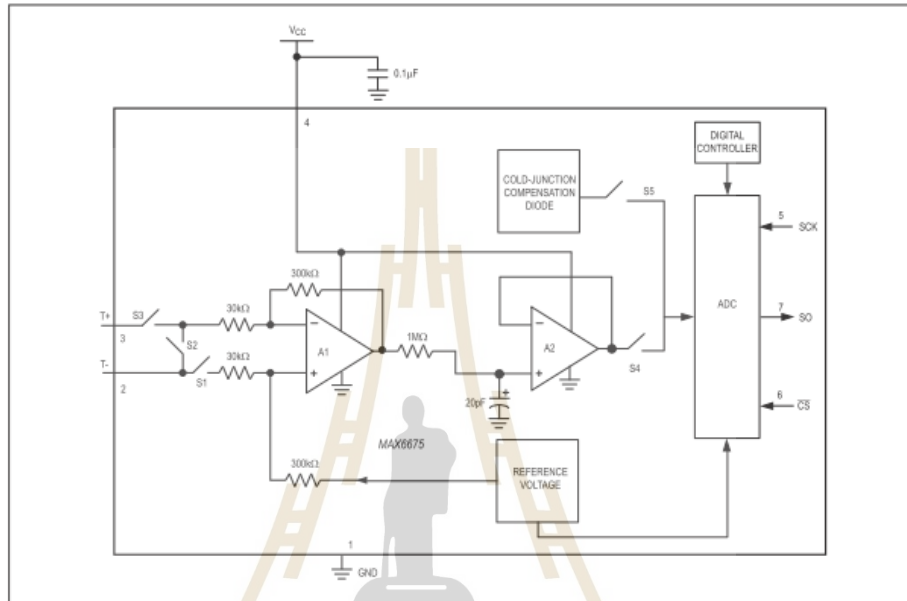
BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING												THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	MSB											LSB		0	Three-state

Figure 2. SO Output

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

Block Diagram



Chip Information

TRANSISTOR COUNT: 6720
PROCESS: BiCMOS

Package Information

For the latest package outline information and land patterns (footprints), go to www.maximintegrated.com/packages. Note that a "+", "#", or "-" in the package code indicates RoHS status only. Package drawings may show a different suffix character, but the drawing pertains to the package regardless of RoHS status.

PACKAGE TYPE	PACKAGE CODE	OUTLINE NO.	LAND PATTERN NO.
8 SO	S8+2	21-0041	90-0096

MAX6675

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-
to-Digital Converter (0°C to +1024°C)**Revision History**

REVISION NUMBER	REVISION DATE	DESCRIPTION	PAGES CHANGED
2	4/14	Removed automotive reference	1
3	6/21	Updated equation in <i>Temperature Compensation</i> section.	4



For pricing, delivery, and ordering information, please visit Maxim Integrated's online storefront at <https://www.maximintegrated.com/en/storefront/storefront.html>.

Maxim Integrated cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim Integrated product. No circuit patent licenses are implied. Maxim Integrated reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time. The parametric values (min and max limits) shown in the Electrical Characteristics table are guaranteed. Other parametric values quoted in this data sheet are provided for guidance.

Maxim Integrated and the Maxim Integrated logo are trademarks of Maxim Integrated Products, Inc. © 2021 Maxim Integrated Products, Inc. | 8





เซ็นเซอร์ความชื้นและดินเครื่องตรวจจับโมดูลดินทดสอบความชื้นดินทดสอบความ
ต้านทานการกัดกร่อนสำหรับArduino

★★★★★ 4.8 ~ 12 รีวิว 28 คำสั่งซื้อ

ลด US \$3 สำหรับทุกการใช้จ่าย \$30

Enjoy special discounts!

US \$3.71
US \$4.58 -19%

ส่วนลดขั้นสุดใจเดียว: ลด US \$1.00 ต่อ US \$40.00 ~

US \$3.00 สูงลงสำหรับคุณ ลด US \$1.00 เมื่อครบ US \$20.00 [การได้รับรูปลง](#)

จำนวน:



- 1 + [เพิ่มสินค้า](#) ส่วนลด 1% (2 ชิ้น หรือมากกว่า)
2695 ชิ้น พร้อมใช้งานได้

Delivery @ Thailand

จัดส่งสินค้าฟรี
ถึง Thailand ผ่าน Cainiao Super Economy Global
การจัดส่งโดยประมาณใน 1/11 [More options](#) ▾

ชื่อทันที [ดูประวัติการสั่งซื้อ](#) [หัวใจ](#) 1567

การคุ้มครองผู้ซื้อ 75 วัน
การรับประกันคืนเงิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

★ **Description** ★

ข้อมูลจำเพาะ:

แรงดันไฟฟ้าทำงาน: DC 3.3-12V
 ีจจุบันทำงาน: <20mA
 Output Current: <30mA
 I/O: + - DO AO
 ขนาด: 36x15x7mm

แพคเกจรวม:

1 x ความชื้นดินเครื่องตรวจจับโมดูล

Capacitive Soil Moisture Sensor SKU:SEN0193

Contents

- 1 Introduction
- 2 Specification
- 3 Tutorial
 - 3.1 Requirements
 - 3.2 Connection Diagram
 - 3.3 Calibration Code
 - 3.4 Calibration
 - 3.4.1 Calibration Range
 - 3.4.2 Section Settings
 - 3.5 Test Code
- 4 FAQ
- 5 More



(<https://www.dfrobot.com/product-1385.html>)
Capacitive Soil Moisture Sensor
(<https://www.dfrobot.com/product-1385.html>)

Introduction

Our **soil moisture sensor** (<https://www.dfrobot.com/product-1385.html>) measures soil moisture levels by capacitive sensing rather than resistive sensing like other sensors on the market. It is made of corrosion resistant material which gives it an excellent service life.

Insert it in to the soil around your plants and impress your friends with real-time soil moisture data!

This module includes an on-board voltage regulator which gives it an operating voltage range of 3.3 ~ 5.5V. It is perfect for low-voltage MCUs, both 3.3V and 5V. For compatibility with a Raspberry Pi it will need an ADC converter.

This soil moisture sensor is compatible with our 3-pin "Gravity" interface, which can be directly connected to the Gravity I/O expansion shield.

Specification

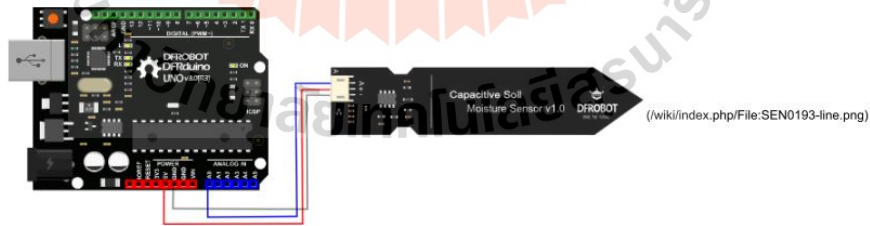
- Operating Voltage: 3.3 ~ 5.5 VDC
- Output Voltage: 0 ~ 3.0VDC
- Operating Current: 5mA
- Interface: PH2.0-3P
- Dimensions: 3.86 x 0.905 inches (L x W)
- Weight: 15g

Tutorial

Requirements

- **Hardware**
 - DFRduino UNO x1
 - Capacitive Soil Moisture Sensor x1
 - Jumper Cable x3
- **Software**
 - Arduino IDE V1.6.5 [Click to Download Arduino IDE \(https://www.arduino.cc/en/Main/Software\)](https://www.arduino.cc/en/Main/Software)

Connection Diagram

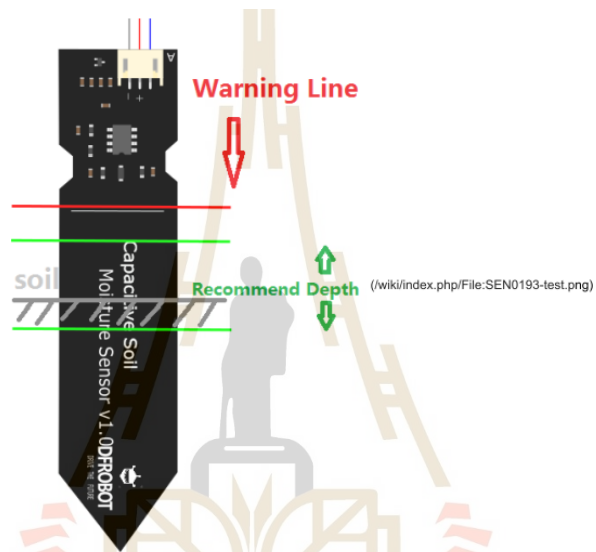


Calibration Code

```
void setup() {
  Serial.begin(9600); // open serial port, set the baud rate as 9600 bps
}
void loop() {
  int val;
  val = analogRead(0); //connect sensor to Analog 0
  Serial.print(val); //print the value to serial port
  delay(100);
}
```

Calibration

Calibration Range



1. Open the serial port monitor and set the baud rate to 9600
2. Record the sensor value when the probe is exposed to the air as "Value 1". This is the boundary value of dry soil "Humidity: 0%RH"
3. Take a cup of water and insert the probe into it no further than the red line in the diagram
4. Record the sensor value when the probe is exposed to the water as "Value 2". This is the boundary value of moist soil "Humidity: 100%RH"

 (/wiki/index.php/File:Warning_yellow.png)

- The components on this board are NOT waterproof, do not expose to moisture further than the red line. (If you want to protect components from the elements, try using a length of wide heat shrink tubing around the upper-section of the board.)
- There is an inverse ratio between the sensor output value and soil moisture.

Section Settings

The final output value is affected by probe insertion depth and how tight the soil packed around it is. We regard "value_1" as dry soil and "value_2" as soaked soil. This is the sensor detection range.

For example: Value_1 = 520; Value_2 = 260.

The range will be divided into three sections: dry, wet, water. Their related values are:

- Dry: (520 430]
- Wet: (430 350]
- Water: (350 260]

Test Code

```

/*****
This example reads Capacitive Soil Moisture Sensor.

Created 2015-10-21
By bernie Chen <bernie.chen@dfrobot.com>

GNU Lesser General Public license.
See <http://www.gnu.org/licenses/> for details.
All above must be included in any redistribution
*****/

/*****Notice and Trouble shooting*****/
1.Connection and Diagram can be found here: https://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU:SEN0193
2.This code is tested on Arduino Uno.
3.Sensor is connect to Analog 0 port.
*****/

const int AirValue = 520; //you need to replace this value with Value_1
const int WaterValue = 260; //you need to replace this value with Value_2
int intervals = (AirValue - WaterValue)/3;
int soilMoistureValue = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600); // open serial port, set the baud rate to 9600 bps
}
void loop() {
  soilMoistureValue = analogRead(A0); //put Sensor insert into soil
  if(soilMoistureValue > WaterValue && soilMoistureValue < (WaterValue + intervals))
  {
    Serial.println("Very Wet");
  }
  else if(soilMoistureValue > (WaterValue + intervals) && soilMoistureValue < (AirValue - intervals))
  {
    Serial.println("Wet");
  }
  else if(soilMoistureValue < AirValue && soilMoistureValue > (AirValue - intervals))
  {
    Serial.println("Dry");
  }
  delay(100);
}

```

FAQ

There are no questions about this product yet.

For any questions/advice/cool ideas to share with us, please visit **DFRobot Forum** (<http://www.dfrobot.com/forum/>).

More

- **Documents**
 - Schematic (https://github.com/ArduinoLibrary/DFRobot_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor/raw/master/SEN0193%20%20Capacitive%20Soil%20Moisture%20SensorV1.0.PDF)
 - Product SVGs (https://github.com/ArduinoLibrary/DFRobot_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor/raw/master/SEN0193.zip)
- **Share**
 - Relative humidity to absolute humidity calculator (<http://planetcalc.com/2167/>)

 (http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product_id=1385&search=sen0193&description=true#.VnJZsvmqAw) Get it from **Gravity Analog Capacitive Soil Moisture Sensor- Corrosion Resistant** (<https://www.dfrobot.com/product-1385.html>) or **DFRobot Distributor** (<http://www.dfrobot.com/index.php?route=information/distributorslogo>).

Category: DFRobot (<https://www.dfrobot.com/>) > Sensors & Modules (<https://www.dfrobot.com/category-156.html>) > Sensors (<https://www.dfrobot.com/category-36.html>) > Temperature & Humidity Sensor (<https://www.dfrobot.com/category-64.html>)

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

Digital-output relative humidity & temperature sensor/module

DHT22 (DHT22 also named as AM2302)



Capacitive-type humidity and temperature module/sensor

1

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

1. Feature & Application:

- * Full range temperature compensated * Relative humidity and temperature measurement
- * Calibrated digital signal *Outstanding long-term stability *Extra components not needed
- * Long transmission distance * Low power consumption *4 pins packaged and fully interchangeable

2. Description:

DHT22 output calibrated digital signal. It utilizes exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability. Its sensing elements is connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.

Small size & low consumption & long transmission distance(20m) enable DHT22 to be suited in all kinds of harsh application occasions.

Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

3. Technical Specification:

Model	DHT22
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer capacitor
Operating range	humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH); temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+ -0.3%RH
Long-term Stability	+ -0.5%RH/year
Sensing period	Average: 2s
Interchangeability	fully interchangeable
Dimensions	small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm

4. Dimensions: (unit---mm)

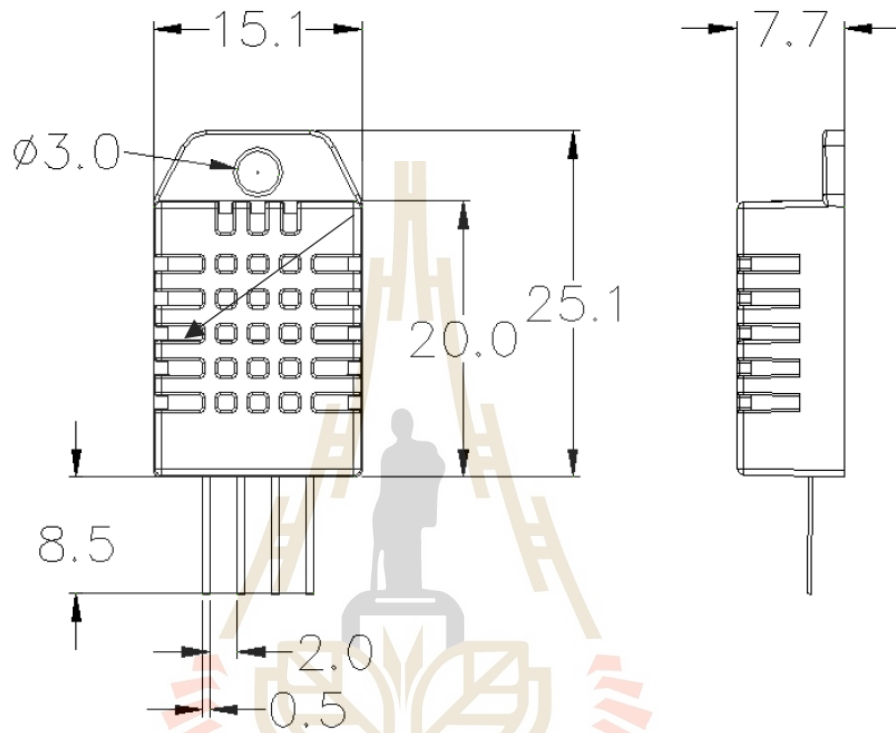
1) Small size dimensions: (unit---mm)

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



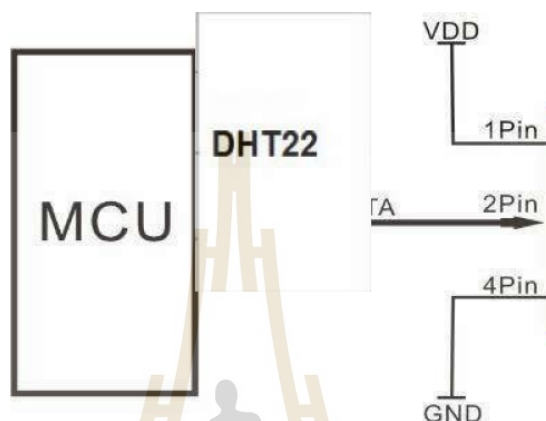
Pin sequence number: 1 2 3 4 (from left to right direction).

Pin	Function
1	VDD—power supply
2	DATA—signal
3	NULL
4	GND

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

5. Electrical connection diagram:



3Pin---NC, AM2302 is another name for DHT22

6. Operating specifications:

(1) Power and Pins

Power's voltage should be 3.3-6V DC. When power is supplied to sensor, don't send any instruction to the sensor within one second to pass unstable status. One capacitor valued 100nF can be added between VDD and GND for wave filtering.

(2) Communication and signal

Single-bus data is used for communication between MCU and DHT22, it costs 5mS for single time communication.

Data is comprised of integral and decimal part, the following is the formula for data.

DHT22 send out higher data bit firstly!

DATA=8 bit integral RH data+8 bit decimal RH data+8 bit integral T data+8 bit decimal T data+8 bit check-sum
If the data transmission is right, check-sum should be the last 8 bit of "8 bit integral RH data+8 bit decimal RH data+8 bit integral T data+8 bit decimal T data".

When MCU send start signal, DHT22 change from low-power-consumption-mode to running-mode. When MCU finishes sending the start signal, DHT22 will send response signal of 40-bit data that reflect the relative humidity

5

Thomas Liu (Business Manager)

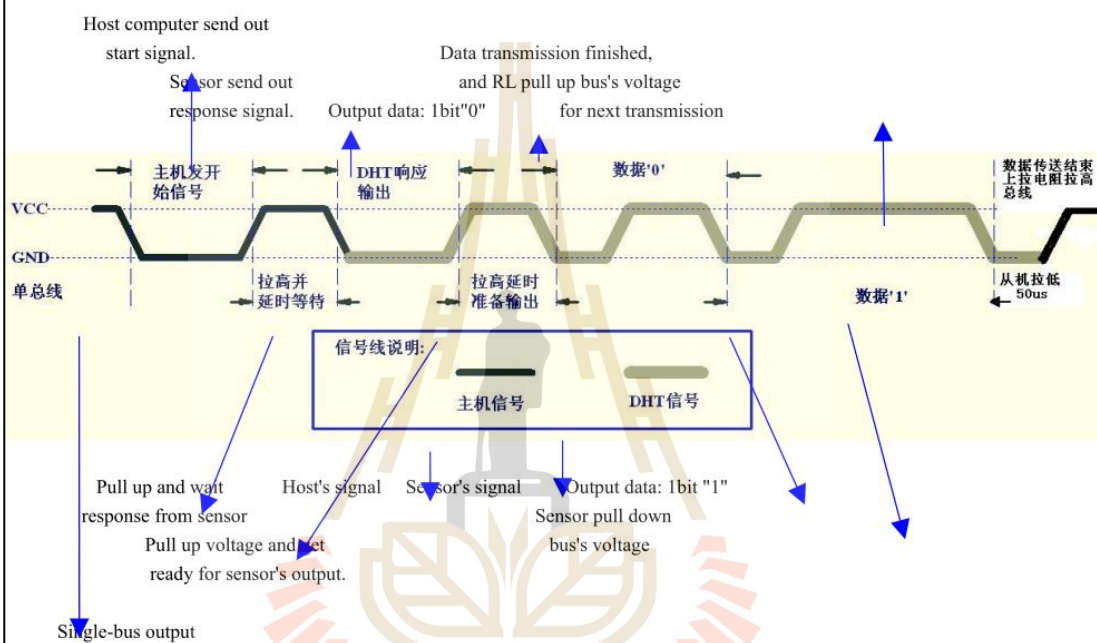
Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

and temperature information to MCU. Without start signal from MCU, DHT22 will not give response signal to MCU. One start signal for one time's response data that reflect the relative humidity and temperature information from DHT22. DHT22 will change to low-power-consumption-mode when data collecting finish if it don't receive start signal from MCU again.

1) Check bellow picture for overall communication process:



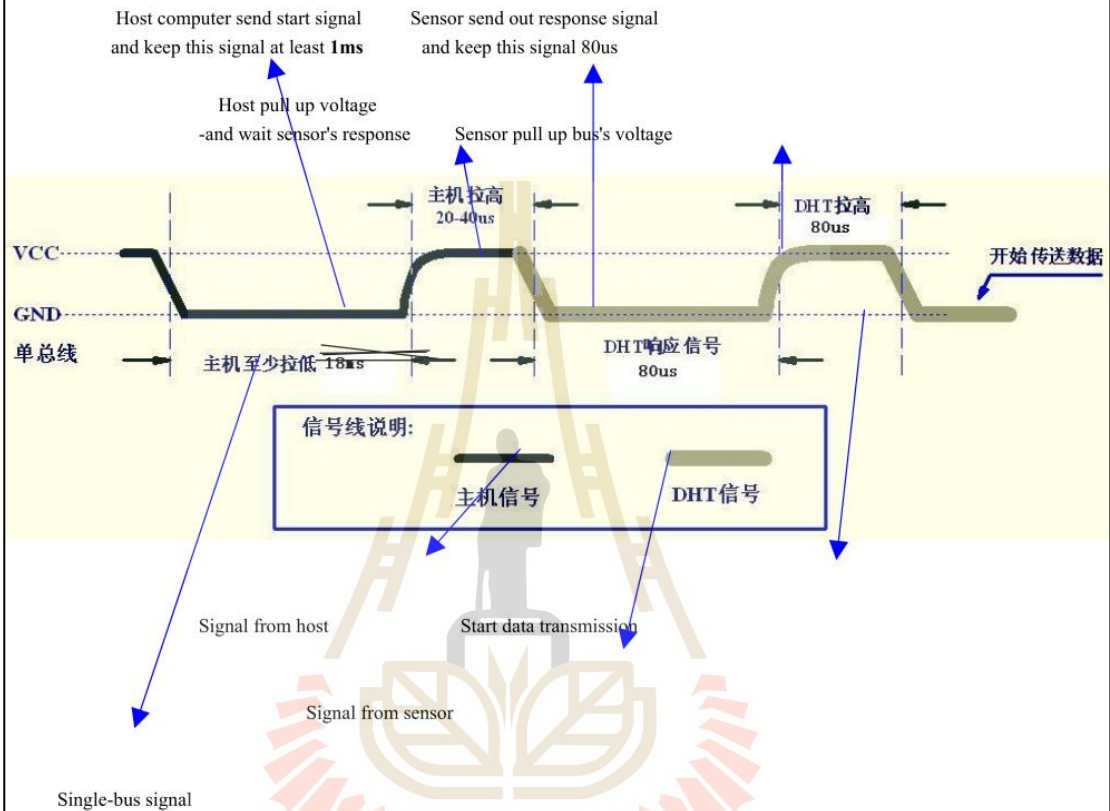
2) Step 1: MCU send out start signal to DHT22

Data-bus's free status is high voltage level. When communication between MCU and DHT22 begin, program of MCU will transform data-bus's voltage level from high to low level and this process must beyond at least 1ms to ensure DHT22 could detect MCU's signal, then MCU will wait 20-40us for DHT22's response.

Check bellow picture for step 1:

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



Step 2: DHT22 send response signal to MCU

When DHT22 detect the start signal, DHT22 will send out low-voltage-level signal and this signal last 80us as response signal, then program of DHT22 transform data-bus's voltage level from low to high level and last 80us for DHT22's preparation to send data.

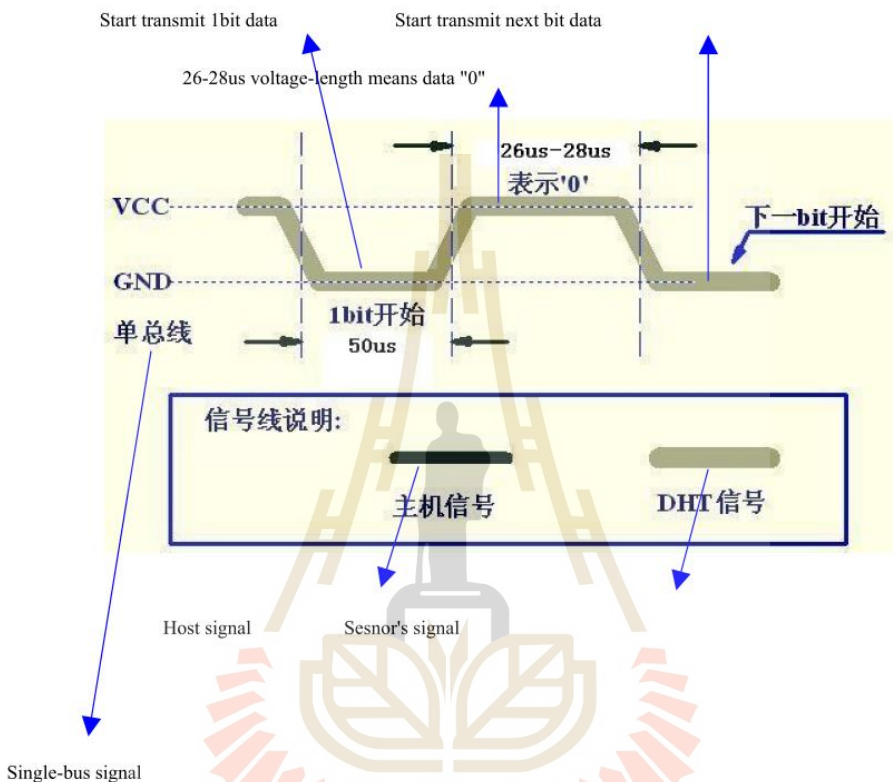
Check bellow picture for step 2:

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



Step 3: DHT22 send data to MCU

When DHT22 is sending data to MCU, every bit's transmission begin with low-voltage-level that last 50us, the following high-voltage-level signal's length decide the bit is "1" or "0".

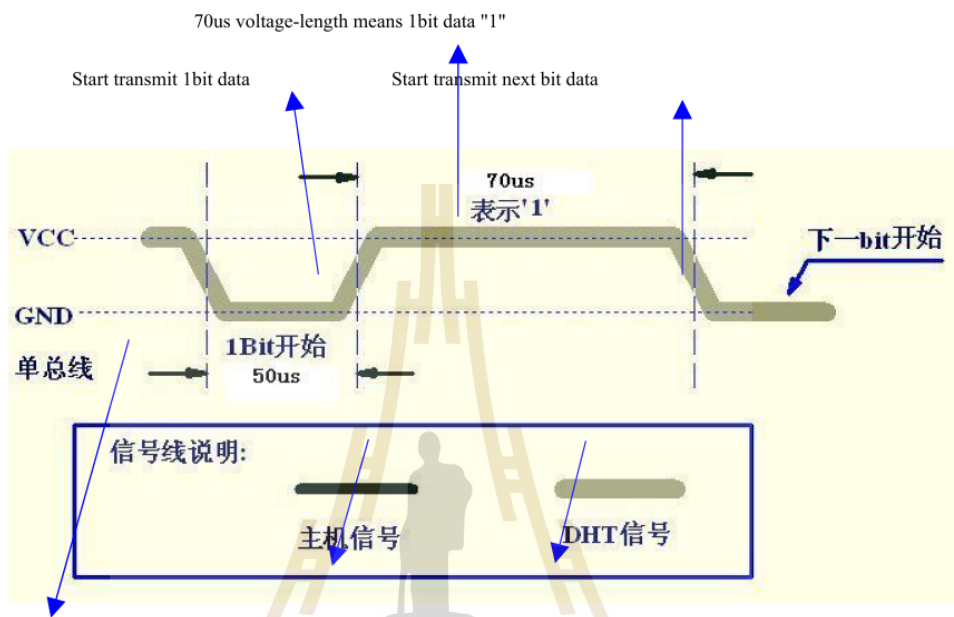
Check bellow picture for step 3:

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



Host signal Sensor's signal

Single-bus signal

If signal from DHT22 is always high-voltage-level, it means DHT22 is not working properly, please check the electrical connection status.

7. Electrical Characteristics:

Item	Condition	Min	Typical	Max	Unit
Power supply	DC	3.3	5	6	V
Current supply	Measuring	1		1.5	mA
	Stand-by	40	Null	50	uA
Collecting period	Second		2		Second

*Collecting period should be : >2 second.

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

8. Attentions of application:

(1) Operating and storage conditions

We don't recommend the applying RH-range beyond the range stated in this specification. The DHT22 sensor can recover after working in non-normal operating condition to calibrated status, but will accelerate sensors' aging.

(2) Attentions to chemical materials

Vapor from chemical materials may interfere DHT22's sensitive-elements and debase DHT22's sensitivity.

(3) Disposal when (1) & (2) happens

Step one: Keep the DHT22 sensor at condition of Temperature 50~60Celsius, humidity <10%RH for 2 hours;

Step two: After step one, keep the DHT22 sensor at condition of Temperature 20~30Celsius, humidity >70%RH for 5 hours.

(4) Attention to temperature's affection

Relative humidity strongly depend on temperature, that is why we use temperature compensation technology to ensure accurate measurement of RH. But it's still be much better to keep the sensor at same temperature when sensing.

DHT22 should be mounted at the place as far as possible from parts that may cause change to temperature.

(5) Attentions to light

Long time exposure to strong light and ultraviolet may debase DHT22's performance.

(6) Attentions to connection wires

The connection wires' quality will effect communication's quality and distance, high quality shielding-wire is recommended.

(7) Other attentions

* Welding temperature should be bellow 260Celsius.

* Avoid using the sensor under dew condition.

* Don't use this product in safety or emergency stop devices or any other occasion that failure of DHT22 may cause personal injury.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



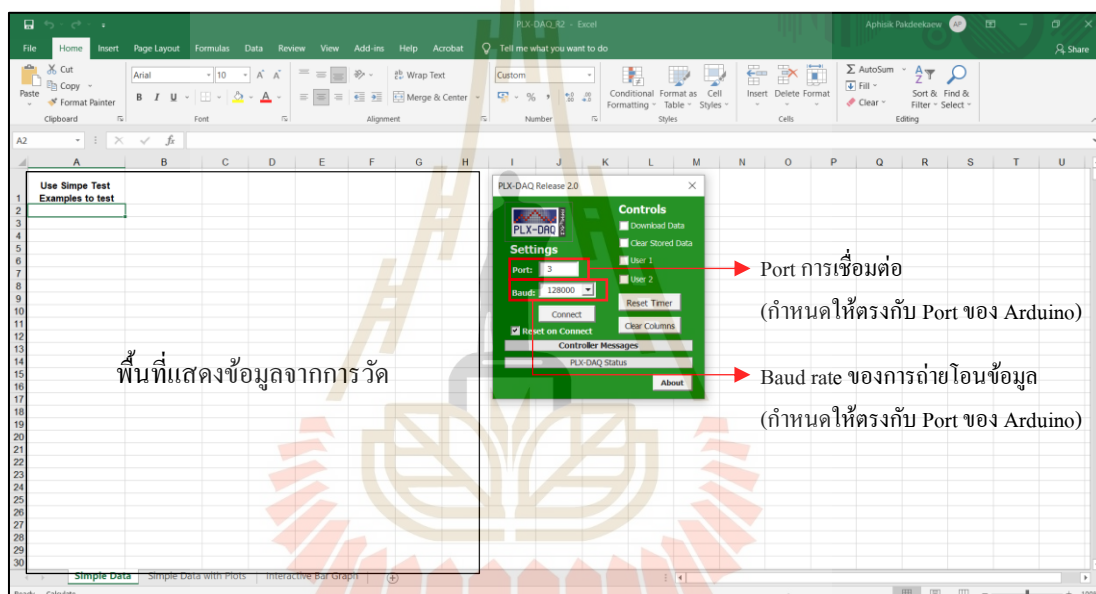
ภาคผนวก ข

โปรแกรม Arduino สำหรับระบบบันทึกข้อมูลการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในส่วนนี้ผู้วิจัยระบุถึงภาษาซีสำหรับฮาร์ดแวร์และสั่งการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3) ซึ่งหัวข้อ 3.2.3 ผู้วิจัยได้กล่าวถึงการต่ออุปกรณ์เบื้องต้นสำหรับการทดลอง ดังนั้นในบทความนี้ ผู้วิจัยจึงได้แสดงภาพหลังของโปรแกรมดังกล่าว เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจศึกษาและนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

ในขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อบันทึกผล ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการเชื่อมต่อระบบการสื่อสารระหว่างโปรแกรม PLX-DAQ ซึ่งเป็นฟรีแวร์จากค่าย Parallax กับพอร์ตแสดงผลของ Arduino IDE โดยข้อมูลการทดลองจะถูกส่งเข้ามายัง Microsoft Excel อัตโนมัติ ในลักษณะข้อมูลตามเวลาจริง ลักษณะหน้าตาของโปรแกรม แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 Spreadsheet ของ PLX-DAQ สำหรับเก็บข้อมูล

ข.1 ภาษาซีสำหรับสั่งการบันทึกสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นดินชนิด
ต้านทานและชนิดเก็บประจุ



```

Resis_Capacitive_collection | Arduino 1.8.12
File Edit Sketch Tools Help

Resis_Capacitive_collection

int resistive = 0;
int capacitive = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  //กำหนดหัวตาราง excel
  Serial.println("LABEL, Time, Resistive Signal, Capacitive Signal");
}

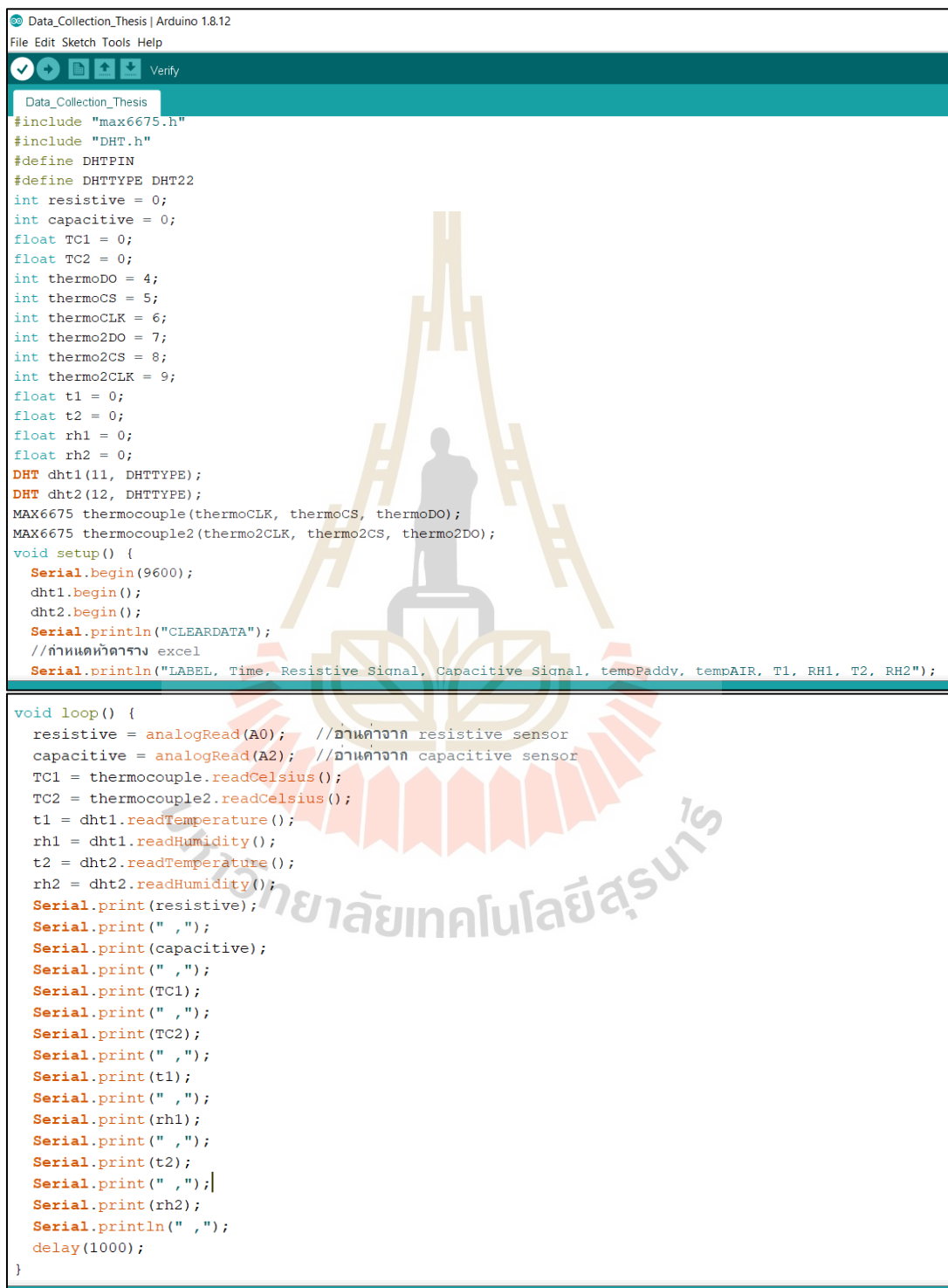
void loop() {
  resistive = analogRead(A0); //อ่านค่าจาก resistive sensor
  capacitive = analogRead(A2); //อ่านค่าจาก capacitive sensor

  Serial.print(resistive);
  Serial.print(" ,");
  Serial.print(capacitive);
  Serial.println(" ,");
  delay(1000);
}

Done compiling
  
```

รูปที่ ข.2 โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ

ข.2 ภาษาซีสำหรับสั่งบันทึกข้อมูลการทดลองเพื่อพัฒนาวิธีการประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง



```

Data_Collection_Thesis | Arduino 1.8.12
File Edit Sketch Tools Help
Verify
Data_Collection_Thesis
#include "max6675.h"
#include "DHT.h"
#define DHTPIN
#define DHTTYPE DHT22
int resistive = 0;
int capacitive = 0;
float TC1 = 0;
float TC2 = 0;
int thermoDO = 4;
int thermoCS = 5;
int thermoCLK = 6;
int thermo2DO = 7;
int thermo2CS = 8;
int thermo2CLK = 9;
float t1 = 0;
float t2 = 0;
float rh1 = 0;
float rh2 = 0;
DHT dht1(11, DHTTYPE);
DHT dht2(12, DHTTYPE);
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
MAX6675 thermocouple2(thermo2CLK, thermo2CS, thermo2DO);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht1.begin();
  dht2.begin();
  Serial.println("CLEARDATA");
  //กำหนดหัวตาราง excel
  Serial.println("LABEL, Time, Resistive Signal, Capacitive Signal, tempPaddv, tempAIR, T1, RH1, T2, RH2");
}

void loop() {
  resistive = analogRead(A0); //ค่าจาก resistive sensor
  capacitive = analogRead(A2); //ค่าจาก capacitive sensor
  TC1 = thermocouple.readCelsius();
  TC2 = thermocouple2.readCelsius();
  t1 = dht1.readTemperature();
  rh1 = dht1.readHumidity();
  t2 = dht2.readTemperature();
  rh2 = dht2.readHumidity();
  Serial.print(resistive);
  Serial.print(",");
  Serial.print(capacitive);
  Serial.print(",");
  Serial.print(TC1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(TC2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(t1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(rh1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(t2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(rh2);
  Serial.println(",");
  delay(1000);
}

```

รูปที่ ข.3 โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินความชื้นข้าวตามเวลาจริง



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ตารางผลการทดลอง

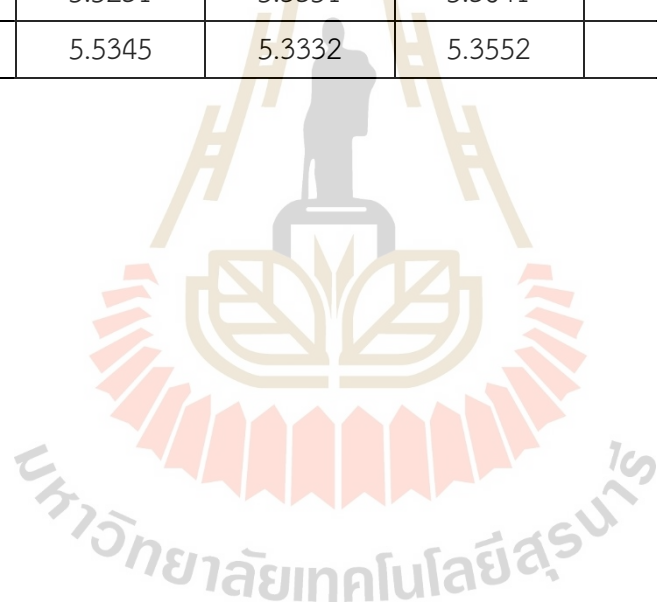
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ความชื้นข้าวเปลือกจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C

เวลา (นาที)	ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกในแต่ละครั้งของการทดสอบ (%w.b.)			ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือก (%w.b.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	25.9216	26.5703	27.7384	26.7434
10	24.4415	23.8603	25.3669	24.5562
20	23.6439	23.1411	24.4347	23.7399
30	22.6704	22.1603	23.5901	22.8069
40	21.9266	21.4055	22.7032	22.0118
50	20.9419	20.5020	21.7904	21.0781
60	20.4739	19.5593	21.2395	20.4242
70	19.6395	18.7360	20.1906	19.5220
80	18.6178	17.6501	19.4198	18.5626
90	17.8594	16.8830	18.4246	17.7223
100	17.0794	15.9396	17.7949	16.9380
110	16.0749	15.3026	16.7440	16.0405
120	15.1873	14.4995	16.0673	15.2514
130	14.6133	13.7949	15.3190	14.5757
140	13.9386	13.1543	14.6024	13.8985
150	13.2114	12.6393	14.0540	13.3016
160	12.6385	12.0989	13.2574	12.6649
170	12.8449	11.7551	13.1453	12.5817
180	12.3057	11.2416	12.4764	12.0079
190	11.7568	10.7276	12.1324	11.5389
200	11.2938	10.3165	11.5739	11.0614
210	10.8769	9.9001	11.1050	10.6273
220	10.4647	9.5234	10.6951	10.2277
230	9.6233	9.1811	9.7003	9.5016
240	9.2626	8.8156	9.3540	9.1441
250	8.9953	8.4931	9.0622	8.8502
260	8.6599	8.2547	8.7865	8.5670

เวลา (นาที)	ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกในแต่ละครั้งของ การทดสอบ (%w.b.)			ความชื้นเฉลี่ยของ ข้าวเปลือก (%w.b.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
270	8.4144	8.0273	8.5779	8.3399
280	8.1688	7.7531	8.3052	8.0757
290	7.9500	7.5556	7.9850	7.8302
300	7.7036	7.3179	7.6579	7.5598
310	7.4794	7.1414	7.4415	7.3541
320	7.2909	6.9522	7.2453	7.1628
330	7.2203	6.7958	7.1039	7.0400
340	6.8983	6.6381	7.0422	6.8595
350	7.2942	6.8324	7.4197	7.1821
360	7.0595	6.6943	7.1910	6.9816
370	6.9179	6.5494	7.0335	6.8336
380	6.7381	6.3772	6.8915	6.6689
390	6.6880	6.3020	6.8910	6.6270
400	6.4733	6.1400	6.6165	6.4099
410	6.5357	6.0447	6.5160	6.3655
420	6.3911	5.8949	6.3436	6.2099
430	6.3669	5.8603	6.2668	6.1647
440	6.1458	5.7502	6.1286	6.0082
450	6.0571	5.6492	6.1365	5.9476
460	5.9492	5.5347	5.9578	5.8139
470	5.8720	5.4834	5.8942	5.7499
480	5.7614	5.3860	5.7128	5.6201
490	5.5919	5.2295	5.6559	5.4924
500	6.2937	6.2093	5.8338	6.1123
510	6.1701	6.0564	5.6718	5.9661
520	6.1147	5.9289	5.5384	5.8607
530	6.0126	5.8304	5.3039	5.7156
540	6.0413	5.9159	5.3291	5.7621

เวลา (นาทีก)	ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกในแต่ละครั้งของ การทดสอบ (%w.b.)			ความชื้นเฉลี่ยของ ข้าวเปลือก (%w.b.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
560	5.8470	5.7486	5.2664	5.6207
570	5.7677	5.7421	5.2168	5.5755
580	5.7537	5.6019	5.1270	5.4942
590	5.5821	5.5147	4.9701	5.3556
600	5.8648	5.5043	5.6656	5.6782
610	5.7418	5.4081	5.5465	5.5655
620	5.6726	5.3873	5.4786	5.5129
630	5.5878	5.3846	5.4008	5.4577
640	5.5231	5.3351	5.3641	5.4074
650	5.5345	5.3332	5.3552	5.4076

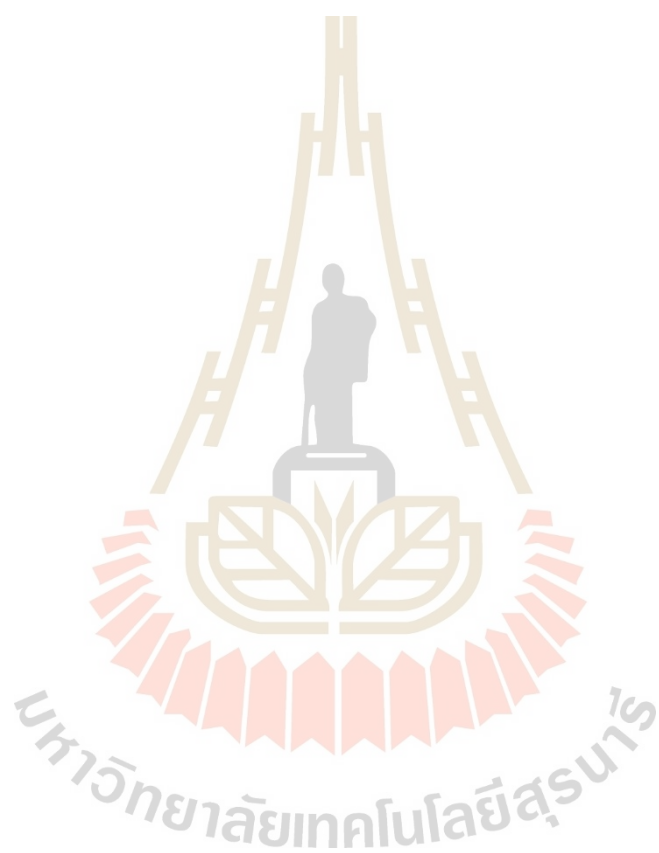


ตารางที่ ค.2 ความชื้นข้าวเปลือกจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (นาที)	ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกในแต่ละครั้ง ของการทดสอบ (%w.b.)			ความชื้นเฉลี่ยของ ข้าวเปลือก (%w.b.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0	25.7215	26.2592	26.3899	26.1235
10	24.5559	24.4490	25.1031	24.7026
20	23.3868	23.4279	24.0384	23.6177
30	22.3538	22.5611	22.8829	22.5993
40	21.4540	21.4343	21.7891	21.5591
50	20.3339	20.3353	20.8078	20.4924
60	19.4832	19.5309	19.8132	19.6091
70	18.9967	18.5166	18.8962	18.8031
80	17.9941	17.5567	17.9906	17.8472
90	16.9555	16.6383	16.9675	16.8538
100	16.0394	15.6102	16.0307	15.8934
110	15.1320	14.6700	15.0119	14.9380
120	15.2850	14.1899	13.9380	14.4710
140	13.5034	12.5812	12.4003	12.8283
150	12.8526	11.8983	11.6450	12.1319
160	12.2032	11.1858	11.0611	11.4834
170	11.4881	10.5388	10.3668	10.7979
180	11.1411	10.1103	10.3268	10.5261
190	10.5244	9.5026	9.7012	9.9094
200	9.9961	9.0334	9.1928	9.4075
210	9.5291	8.5656	8.7323	8.9423
220	9.1015	8.0801	8.3819	8.5211
230	8.6582	7.7951	7.9685	8.1406
240	8.6364	7.7348	7.7423	8.0378
250	8.2726	7.4282	7.3775	7.6928
260	7.9415	7.1540	7.0670	7.3875
270	7.5894	6.8992	6.8210	7.1032

เวลา (นาที)	ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกในแต่ละครั้ง ของการทดสอบ (%w.b.)			ความชื้นเฉลี่ยของ ข้าวเปลือก (%w.b.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
280	7.2975	6.6482	6.5491	6.8316
290	7.0570	6.4584	6.3131	6.6095
300	6.3571	6.2386	6.2836	6.2931
310	6.1312	6.0130	6.0639	6.0694
320	6.0027	5.8704	5.9152	5.9294
330	5.8228	5.6820	5.7396	5.7481
340	5.6298	5.5694	5.6228	5.6073
350	5.4965	5.4458	5.4868	5.4764
360	6.2948	6.4502	5.7926	6.1792
370	6.1407	6.3034	5.9972	6.1471
380	5.9897	6.0654	5.8118	5.9556
390	5.8704	5.8804	5.7397	5.8302
400	5.7528	5.7801	5.5932	5.7087
410	5.6214	5.6304	5.5218	5.5912
430	5.4329	5.4403	5.3509	5.4080
440	5.3595	5.4259	5.2523	5.3459
450	5.2480	5.3141	5.2172	5.2598
460	5.2292	5.1082	5.2037	5.1804
470	5.1181	5.2371	5.1525	5.1692
480	5.0780	5.1890	5.1373	5.1347
490	4.9064	5.1488	5.0581	5.0378
500	4.9206	5.2781	5.0076	5.0688
510	4.3875	5.6108	5.3277	5.1087
520	4.2404	5.4784	5.2416	4.9868
530	4.1396	5.3418	5.1448	4.8754
540	4.0597	5.2248	5.0644	4.7830
550	4.3804	4.6891	4.6911	4.5869
560	4.3578	4.6423	4.6148	4.5383

เวลา (นาที)	ความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกในแต่ละครั้ง ของการทดสอบ (%w.b.)			ความชื้นเฉลี่ยของ ข้าวเปลือก (%w.b.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
570	4.2931	4.5064	4.5102	4.4366
580	4.2614	4.5024	4.4568	4.4069
590	4.2042	4.5144	4.3640	4.3609
600	4.3765	4.6886	4.3673	4.4775



ตารางที่ ค.3 การเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
0	25.92	1	27.80	79.40	39.80	50.68
10	25.47	1	29.90	70.18	41.86	43.20
20	24.44	1	30.98	67.14	43.46	40.38
30	23.64	1	31.12	66.14	44.86	37.32
40	22.67	1	30.68	67.02	45.96	35.14
50	21.93	1	30.86	66.96	46.62	34.20
60	20.94	1	31.52	63.90	47.20	32.94
70	20.47	1	31.22	63.76	47.65	31.60
80	19.64	1	32.00	61.62	48.05	30.90
90	18.62	1	30.08	68.46	48.25	30.60
100	17.86	1	30.54	66.94	48.78	29.68
110	17.08	1	30.38	67.40	49.53	28.73
120	16.07	1	30.96	65.64	50.00	27.96
130	15.19	1	31.82	61.96	50.63	26.77
140	14.61	1	32.56	59.00	51.30	25.74
150	13.94	1	33.30	57.94	51.68	25.55
160	13.21	1	33.60	56.34	51.96	24.94
170	12.64	1	33.02	58.42	52.53	24.40
180	12.84	1	32.16	60.86	52.75	24.20
190	12.31	1	32.26	60.22	53.12	23.50
200	11.76	1	31.80	62.16	53.38	23.35
210	11.29	1	32.06	61.44	53.68	22.98
220	10.88	1	33.12	59.44	54.08	22.83
230	10.46	1	32.32	61.48	54.16	22.62
240	9.62	1	33.18	58.74	54.58	22.10
250	9.26	1	32.42	61.92	54.70	22.20
260	9.00	1	32.72	59.96	54.98	21.62
270	8.66	1	32.70	60.32	55.33	21.35
280	8.41	1	31.88	63.52	55.78	21.05

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
290	8.17	1	32.76	60.38	55.85	20.85
300	7.95	1	32.48	61.28	56.52	20.30
310	7.70	1	32.68	59.56	56.72	19.80
320	7.48	1	32.86	58.20	56.90	19.35
330	7.29	1	33.32	57.64	57.05	19.50
340	7.22	1	32.90	57.44	57.40	18.80
350	6.90	1	34.28	53.70	57.67	18.57
360	7.29	1	33.78	54.64	57.86	18.36
370	7.06	1	32.46	58.46	57.87	18.37
380	6.92	1	33.68	55.68	57.90	18.50
390	6.74	1	33.50	56.40	58.10	18.43
400	6.69	1	33.46	57.86	57.93	18.85
410	6.47	1	32.84	58.66	57.98	18.53
420	6.54	1	32.65	60.40	58.18	18.73
430	6.39	1	33.22	57.66	57.95	18.55
440	6.37	1	33.68	56.34	58.27	18.30
450	6.15	1	33.50	56.40	58.40	18.08
460	6.06	1	32.94	57.84	58.50	18.00
470	5.95	1	33.12	57.04	58.55	17.93
480	5.87	1	32.98	56.34	58.80	17.55
490	5.76	1	33.90	55.68	58.63	18.10
500	5.59	1	32.85	59.00	58.58	18.10
510	6.29	1	33.56	56.24	58.65	17.95
520	6.17	1	33.08	57.52	58.34	18.04
530	6.11	1	32.86	58.80	58.48	18.13
540	6.01	1	32.46	60.26	58.33	18.30
550	6.04	1	32.00	60.30	58.33	17.95
560	5.93	1	32.02	61.36	58.47	18.10
570	5.85	1	32.32	59.90	58.43	17.95
580	5.77	1	31.42	64.04	58.48	18.32

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
590	5.75	1	31.08	64.96	58.53	18.25
600	5.58	1	31.66	62.30	58.25	18.13
610	5.86	1	32.74	58.76	58.33	17.90
620	5.74	1	33.52	56.48	58.58	17.88
630	5.67	1	32.12	60.56	58.40	17.93
640	5.59	1	31.02	63.56	58.30	17.88
650	5.52	1	31.90	60.60	58.25	17.80
0	26.57	2	29.38	69.00	58.84	17.58
10	25.01	2	29.78	66.56	40.28	46.63
20	23.86	2	29.80	65.62	43.38	37.73
30	23.14	2	30.08	64.62	45.13	34.40
40	22.16	2	31.46	60.60	46.20	32.57
50	21.41	2	29.82	64.58	46.74	31.26
60	20.50	2	30.28	63.42	47.42	30.28
70	19.56	2	30.10	64.06	47.95	29.60
80	18.74	2	31.96	59.12	48.46	28.90
90	17.65	2	32.62	57.22	49.02	28.12
100	16.88	2	33.26	55.68	49.33	27.80
110	15.94	2	32.32	57.96	49.88	26.84
120	15.30	2	32.00	57.80	50.14	26.12
130	14.50	2	31.44	60.28	50.62	25.54
140	13.79	2	31.90	58.24	51.08	24.78
150	13.15	2	32.32	58.38	51.68	24.40
160	12.64	2	32.18	58.44	52.25	23.70
170	12.10	2	32.06	58.74	52.72	23.08
180	11.76	2	32.70	56.18	53.02	22.40
190	11.24	2	32.70	56.58	53.44	22.18
200	10.73	2	32.80	56.00	53.82	21.56
210	10.32	2	32.68	55.34	54.10	20.90
220	9.90	2	32.70	54.48	54.92	19.74

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
230	9.52	2	32.82	53.98	55.45	19.28
240	9.18	2	33.68	51.94	55.98	18.86
250	8.82	2	33.84	51.44	56.46	18.44
260	8.49	2	33.66	52.00	56.90	18.22
270	8.25	2	33.54	51.48	57.02	17.84
280	8.03	2	33.48	52.22	57.33	17.78
290	7.75	2	33.64	51.46	57.68	17.38
300	7.56	2	33.86	51.84	57.88	17.48
310	7.32	2	34.40	51.72	58.10	17.68
320	7.14	2	33.90	51.30	57.94	17.32
330	6.95	2	34.32	51.12	57.90	17.55
340	6.80	2	33.88	51.72	57.95	17.33
350	6.64	2	34.08	51.10	58.12	17.20
360	6.83	2	33.94	51.44	58.23	17.15
370	6.69	2	33.92	51.92	58.36	17.12
380	6.55	2	34.16	51.16	58.76	16.80
390	6.38	2	33.78	53.86	58.70	17.33
400	6.30	2	33.44	52.94	58.50	16.93
410	6.14	2	32.90	52.74	58.48	16.46
420	6.04	2	32.92	53.54	58.46	16.72
430	5.89	2	32.92	53.40	58.50	16.64
440	5.86	2	32.94	53.50	58.55	16.63
450	5.75	2	32.84	54.16	58.52	16.76
460	5.65	2	32.88	54.70	58.43	16.90
470	5.53	2	32.82	54.88	58.48	16.90
480	5.48	2	32.54	56.02	58.60	16.96
490	5.39	2	33.04	55.08	58.78	17.00
500	5.23	2	32.12	56.58	58.58	16.78
510	6.21	2	32.30	56.40	58.63	16.80
520	6.06	2	31.73	58.15	58.56	16.88

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
530	5.93	2	32.00	57.64	58.60	16.90
540	5.83	2	31.60	59.02	58.58	17.03
550	5.92	2	31.58	59.62	58.62	17.04
560	5.83	2	31.94	58.60	58.55	17.18
570	5.75	2	31.94	58.80	58.58	17.14
580	5.74	2	33.48	54.96	58.60	17.23
590	5.60	2	33.42	54.68	58.58	17.12
600	5.51	2	32.90	55.94	58.34	17.26
610	5.50	2	32.70	56.58	58.03	17.48
620	5.41	2	32.98	55.66	58.08	17.42
630	5.39	2	32.64	56.80	57.98	17.50
640	5.38	2	32.84	56.04	57.93	17.43
650	5.34	2	32.76	56.00	57.98	17.35
0	27.74	3	29.74	64.38	57.42	17.68
10	26.38	3	30.68	61.30	41.22	42.02
20	25.37	3	30.88	60.02	44.00	35.54
30	24.43	3	30.58	60.48	45.45	32.85
40	23.59	3	30.72	60.12	46.03	32.13
50	22.70	3	31.00	59.00	46.62	31.14
60	21.79	3	31.30	58.14	47.16	30.16
70	21.24	3	30.80	60.42	47.50	29.83
80	20.19	3	31.40	58.30	48.45	27.93
90	19.42	3	31.08	58.82	49.10	26.90
100	18.42	3	30.96	58.48	49.08	26.72
110	17.79	3	30.50	60.22	49.40	26.28
120	16.74	3	30.54	60.00	49.80	25.53
130	16.07	3	30.74	59.06	50.15	24.90
140	15.32	3	30.44	60.04	50.70	24.30
150	14.60	3	30.92	58.88	51.18	23.68
160	14.05	3	30.62	58.26	51.60	22.68

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
170	13.26	3	30.82	57.42	52.03	22.00
180	13.15	3	31.08	56.98	52.65	21.48
190	12.48	3	31.42	55.02	52.66	21.02
200	12.13	3	31.26	55.96	53.03	20.85
210	11.57	3	31.46	54.64	53.30	20.30
220	11.11	3	32.16	52.50	53.74	19.74
230	10.70	3	31.62	54.24	54.80	18.85
240	9.70	3	31.46	54.82	55.05	18.73
250	9.35	3	32.06	54.24	55.34	18.66
260	9.06	3	32.22	53.98	55.60	18.50
270	8.79	3	32.32	54.54	55.88	18.50
280	8.58	3	32.18	54.52	56.00	18.23
290	8.31	3	32.18	53.60	56.25	17.75
300	7.99	3	32.28	54.88	56.66	17.88
310	7.66	3	32.70	52.32	56.63	17.43
320	7.44	3	32.48	53.04	56.90	17.28
330	7.25	3	32.52	53.68	57.10	17.36
340	7.10	3	33.04	54.00	57.40	17.54
350	7.04	3	32.90	52.78	57.50	17.08
360	7.42	3	32.96	52.98	57.70	17.00
370	7.19	3	32.96	52.78	57.78	16.88
380	7.03	3	32.56	53.56	57.92	16.70
390	6.89	3	32.72	53.14	57.98	16.63
400	6.89	3	32.78	53.26	58.18	16.56
410	6.62	3	32.70	52.54	58.18	16.34
420	6.52	3	32.40	53.16	58.33	16.18
430	6.34	3	32.42	53.62	58.48	16.24
440	6.27	3	32.46	53.50	58.44	16.20
450	6.13	3	32.14	54.86	58.57	16.30
460	6.14	3	31.88	55.88	58.68	16.30

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
470	5.96	3	32.18	55.44	58.74	16.38
480	5.89	3	32.26	55.76	58.85	16.40
490	5.71	3	31.96	55.84	58.88	16.20
500	5.66	3	31.80	56.12	58.96	16.08
510	5.83	3	32.10	54.30	58.82	15.90
520	5.67	3	31.68	55.68	58.78	15.95
530	5.54	3	31.40	56.20	58.90	15.87
540	5.30	3	31.52	56.16	58.90	15.92
550	5.33	3	31.54	55.96	58.80	15.87
560	5.26	3	31.30	56.86	58.85	15.90
570	5.27	3	31.34	57.00	58.82	15.94
580	5.22	3	30.88	58.58	58.90	16.00
590	5.13	3	31.74	56.40	58.78	16.05
600	4.97	3	30.84	59.68	58.78	16.22
610	5.67	3	30.50	60.66	59.12	16.12
620	5.55	3	30.96	59.56	59.10	16.15
630	5.48	3	30.76	60.38	58.96	16.26
640	5.40	3	30.84	60.02	58.88	16.33
650	5.36	3	30.22	62.44	58.76	16.46

ตารางที่ ค.4 การเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ การอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
0	25.72	1	31.20	59.88	60.24	17.02
10	24.56	1	31.60	59.12	47.56	31.30
20	23.39	1	32.82	55.86	50.35	27.58
30	22.35	1	32.88	56.08	52.30	25.48
40	21.45	1	33.52	54.82	52.80	25.43
50	20.33	1	33.02	56.00	53.58	24.54
60	19.48	1	33.34	55.34	54.18	23.84
70	19.00	1	33.64	54.38	54.82	23.16
80	17.99	1	34.06	53.26	55.03	22.78
90	16.96	1	33.36	54.90	55.18	22.63
100	16.04	1	33.46	54.40	55.70	22.03
110	15.13	1	33.90	53.38	56.24	21.56
120	15.29	1	34.14	53.00	56.80	21.06
130	14.24	1	34.34	52.62	57.52	20.40
140	13.50	1	33.92	54.42	57.88	20.25
150	12.85	1	34.50	52.36	58.35	19.68
160	12.20	1	34.44	52.86	58.90	19.28
170	11.49	1	34.52	53.42	59.56	19.06
180	11.14	1	34.56	52.24	59.77	18.53
190	10.52	1	35.08	52.00	60.33	18.35
200	10.00	1	34.42	53.08	60.33	18.17
210	9.53	1	34.52	53.82	60.90	17.95
220	9.10	1	34.84	52.52	61.14	17.64
230	8.66	1	34.42	53.98	61.60	17.40
240	8.64	1	35.20	52.14	62.12	17.06
250	8.27	1	35.40	51.32	62.48	16.75
260	7.94	1	35.42	49.54	63.00	16.08
270	7.59	1	35.88	48.40	63.48	15.70
280	7.30	1	35.58	48.58	63.75	15.38

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
290	7.06	1	35.40	49.24	63.96	15.32
300	6.36	1	35.76	49.42	64.38	15.32
310	6.13	1	35.70	49.14	64.58	15.08
320	6.00	1	36.66	46.62	64.85	14.88
330	5.82	1	36.38	47.94	65.23	14.93
340	5.63	1	36.18	47.80	65.50	14.63
350	5.50	1	36.54	47.74	65.62	14.74
360	6.29	1	35.48	48.58	65.48	14.40
370	6.14	1	35.72	48.58	65.58	14.40
380	5.99	1	36.10	47.60	65.80	14.30
390	5.87	1	35.20	48.52	65.73	14.08
400	5.75	1	35.52	47.86	65.90	14.00
410	5.62	1	35.68	47.56	66.00	13.95
420	5.53	1	35.92	47.34	66.08	14.02
430	5.43	1	35.88	45.80	66.10	13.53
440	5.36	1	35.86	45.66	65.98	13.55
450	5.25	1	36.20	45.58	66.30	13.60
460	5.23	1	36.24	44.78	66.18	13.40
470	5.12	1	36.60	44.28	66.30	13.43
480	5.08	1	36.28	44.94	66.38	13.38
490	4.91	1	36.20	44.24	66.23	13.25
500	4.92	1	36.58	43.92	66.30	13.30
510	4.39	1	35.94	45.54	66.25	13.40
520	4.24	1	35.74	45.40	66.00	13.33
530	4.14	1	35.50	45.86	65.98	13.33
540	4.06	1	35.74	45.80	66.08	13.38
550	4.38	1	35.22	47.16	66.00	13.44
560	4.36	1	35.06	47.82	65.94	13.50
570	4.29	1	34.58	49.20	65.95	13.55
580	4.26	1	34.20	50.58	65.70	13.75

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
590	4.20	1	34.44	49.84	65.83	13.73
600	4.38	1	34.32	50.64	65.58	13.83
0	26.26	2	31.34	68.20	60.96	22.64
10	24.45	2	31.90	66.60	48.10	35.36
20	23.43	2	32.30	65.36	50.90	31.58
30	22.56	2	32.76	65.62	51.20	32.52
40	21.43	2	33.06	64.78	51.80	31.20
50	20.34	2	33.28	64.64	52.76	30.22
60	19.53	2	33.30	64.20	53.40	29.40
70	18.52	2	33.80	63.04	53.86	28.90
80	17.56	2	33.70	63.10	54.60	27.90
90	16.64	2	33.88	62.40	54.94	27.36
100	15.61	2	34.26	60.82	55.60	26.58
110	14.67	2	34.44	59.96	55.90	26.12
120	14.19	2	34.70	60.58	56.70	25.66
130	13.43	2	35.04	59.42	57.32	25.04
140	12.58	2	35.10	58.34	57.84	24.28
150	11.90	2	35.24	58.68	58.50	23.68
160	11.19	2	35.40	57.46	59.30	22.80
170	10.54	2	35.70	56.50	59.88	22.16
180	10.11	2	35.66	56.66	60.60	21.56
190	9.50	2	35.92	56.28	61.24	21.14
200	9.03	2	36.36	53.60	61.64	20.32
210	8.57	2	36.00	54.02	62.00	19.80
220	8.08	2	36.20	53.72	62.50	19.40
230	7.80	2	36.28	53.44	62.88	19.10
240	7.73	2	35.92	56.34	63.40	19.30
250	7.43	2	36.70	52.70	63.90	18.50
260	7.15	2	36.30	53.08	64.20	18.22
270	6.90	2	36.30	53.46	64.68	18.00

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
280	6.65	2	36.20	51.20	64.80	17.30
290	6.46	2	37.00	50.14	65.10	17.36
300	6.24	2	36.60	52.80	65.50	17.50
310	6.01	2	36.08	54.72	65.36	17.64
320	5.87	2	34.82	56.66	65.20	17.32
330	5.68	2	35.92	54.74	65.60	17.40
340	5.57	2	36.80	50.14	65.74	16.70
350	5.45	2	37.34	45.30	65.80	15.78
360	6.45	2	37.64	46.66	65.82	16.28
370	6.30	2	37.60	48.08	66.44	16.36
380	6.07	2	37.30	48.34	66.62	16.10
390	5.88	2	37.20	49.66	66.66	16.32
400	5.78	2	37.20	45.56	66.44	15.50
410	5.63	2	37.72	45.80	66.36	15.78
420	5.55	2	36.60	47.84	66.20	15.70
430	5.44	2	36.32	49.18	66.20	15.86
440	5.43	2	34.70	51.80	65.04	15.90
450	5.31	2	34.20	51.66	64.96	15.60
460	5.11	2	33.56	51.90	65.20	15.20
470	5.24	2	33.00	59.92	64.62	16.80
480	5.19	2	33.46	60.84	64.86	17.18
490	5.15	2	33.50	57.68	65.30	16.30
500	5.28	2	33.78	58.64	65.40	16.56
510	5.61	2	33.60	59.22	65.90	16.40
520	5.48	2	33.86	59.50	65.96	16.60
530	5.34	2	33.90	59.00	65.80	16.52
540	5.22	2	33.84	59.86	65.70	16.70
550	4.69	2	33.40	61.44	65.30	17.00
560	4.64	2	33.10	65.52	65.50	17.50
570	4.51	2	33.00	65.10	65.70	17.28

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
580	4.50	2	32.40	65.20	65.54	17.00
590	4.51	2	33.12	64.04	65.06	17.38
600	4.69	2	32.80	65.52	64.72	17.56
0	26.39	3	33.20	59.28	61.36	18.42
10	25.10	3	33.70	60.30	46.10	38.28
20	24.04	3	34.16	59.38	49.84	32.54
30	22.88	3	34.54	57.88	51.70	29.74
40	21.79	3	34.62	57.32	52.50	28.76
50	20.81	3	35.84	53.68	53.24	27.90
60	19.81	3	35.00	56.40	54.14	26.82
70	18.90	3	35.10	56.46	54.80	26.32
80	17.99	3	35.40	55.54	55.40	25.66
90	16.97	3	35.70	55.18	55.80	25.10
100	16.03	3	35.86	54.30	56.46	24.40
110	15.01	3	36.12	53.74	56.98	23.80
120	13.94	3	35.94	53.74	57.66	23.00
130	13.26	3	35.86	53.78	58.32	22.38
140	12.40	3	36.10	52.14	58.88	21.66
150	11.64	3	36.00	54.00	59.20	21.58
160	11.06	3	36.38	50.68	59.52	20.70
170	10.37	3	36.52	53.04	60.26	20.88
180	10.33	3	36.50	53.32	60.96	20.42
190	9.70	3	36.40	51.64	61.40	19.46
200	9.19	3	36.60	50.18	61.68	18.94
210	8.73	3	37.04	48.96	62.22	18.50
220	8.38	3	36.92	48.48	62.60	18.04
230	7.97	3	37.30	45.90	63.00	17.20
240	7.74	3	36.90	47.38	63.30	17.10
250	7.38	3	37.10	48.54	63.92	17.20
260	7.07	3	37.46	43.22	64.40	15.80

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
270	6.82	3	37.70	43.98	64.60	15.94
280	6.55	3	37.16	45.74	64.26	16.16
290	6.31	3	37.30	43.46	64.44	15.56
300	6.28	3	37.50	41.30	64.60	14.90
310	6.06	3	37.60	43.20	64.74	15.44
320	5.92	3	37.40	45.64	64.98	15.88
330	5.74	3	36.92	47.60	65.48	15.84
340	5.62	3	36.64	48.18	65.60	15.78
350	5.49	3	36.60	48.20	65.76	15.70
360	5.79	3	36.34	50.56	65.70	16.00
370	6.00	3	36.40	48.02	66.04	15.46
380	5.81	3	36.26	50.62	64.20	16.60
390	5.74	3	36.10	51.14	65.00	16.30
400	5.59	3	35.80	51.90	65.50	16.10
410	5.52	3	35.80	53.00	65.80	16.20
420	5.40	3	34.90	53.92	65.76	15.84
430	5.35	3	34.80	54.84	65.82	15.98
440	5.25	3	34.78	55.88	65.60	16.30
450	5.22	3	34.90	56.60	65.60	16.50
460	5.20	3	35.00	55.90	65.20	16.50
470	5.15	3	34.20	58.74	65.30	16.60
480	5.14	3	35.20	56.80	65.26	16.80
490	5.06	3	35.00	56.74	65.50	16.60
500	5.01	3	34.30	58.08	65.42	16.30
510	5.33	3	34.60	56.44	65.36	16.28
520	5.24	3	34.86	55.72	65.38	16.26
530	5.14	3	34.56	57.48	65.20	16.50
540	5.06	3	34.50	57.72	65.10	16.56
550	4.69	3	34.30	58.90	64.90	16.80
560	4.61	3	34.34	59.54	65.20	16.80

Time (min)	Mw (%)	Replications	T ₁ (°C)	RH ₁ (%)	T ₂ (°C)	RH ₂ (%)
570	4.51	3	34.00	62.78	64.30	17.64
580	4.46	3	33.10	62.92	64.50	17.06
590	4.36	3	33.16	61.98	64.90	16.54
600	4.37	3	33.28	60.30	64.80	16.40



ตารางที่ ค.5 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน
ชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr0	0.956	-0.169	0.139	0.064	-0.1	-0.091	0.054	0.01	0.055	-0.057
Tr1	0.909	-0.316	0.061	-0.087	0.155	-0.069	0.015	0.099	0.036	0.064
Tr2	0.924	-0.264	-0.222	0.001	-0.005	-0.047	0.019	-0.016	0.035	0
Tr3	0.926	-0.22	-0.134	-0.089	-0.15	0.023	0.045	-0.028	0.148	-0.041
Tr4	0.94	-0.191	-0.094	-0.195	-0.05	0.018	-0.04	-0.088	-0.015	0.028
Tr5	0.927	-0.273	-0.011	0.093	-0.139	0.065	-0.05	-0.031	-0.049	0.136
Tr6	0.892	-0.22	0.353	0.051	0.006	0.034	-0.016	-0.072	-0.068	-0.071
Tr7	0.934	-0.264	0.135	-0.07	0.013	0.028	-0.1	-0.026	-0.101	0.015
Tr8	0.907	-0.255	0.171	0.136	0.075	-0.017	0.147	-0.119	0.097	-0.038
Tr9	0.869	-0.184	0.166	-0.361	-0.011	-0.063	0.12	0.025	0.081	0.118
Tr10	0.892	-0.042	-0.213	-0.18	0.071	0.301	-0.016	-0.036	-0.041	-0.112
Tr11	0.92	-0.197	0.081	0.034	-0.025	0.289	-0.073	0.019	0.093	-0.055
Tr12	0.943	0.018	0.027	-0.034	0.114	0.063	0.004	0.105	-0.187	0.034
Tr13	0.907	0.083	0.161	-0.083	0.267	0.069	-0.052	-0.109	0.086	-0.061
Tr14	0.958	0.059	-0.104	-0.139	0.043	0.079	-0.076	-0.096	0.064	0.088
Tr15	0.945	0.121	0.009	0.075	-0.173	0.004	-0.107	-0.081	0.032	0.004
Tr16	0.963	0.103	-0.068	-0.012	-0.139	0.084	-0.051	-0.025	0.004	0.053
Tr17	0.932	-0.021	-0.207	0.16	0.016	-0.078	-0.173	0.094	-0.024	0.041
Tr18	0.916	0.087	0.182	0.282	0.01	-0.079	-0.067	0.017	0.104	0.029
Tr19	0.933	0.211	0.049	-0.056	-0.078	-0.028	-0.011	-0.144	0.106	0.016
Tr20	0.956	0.167	0.122	0.014	0.007	0.019	-0.045	-0.093	0.037	0.022
Tr21	0.945	0.125	0.009	-0.127	0.194	-0.066	-0.104	-0.037	0.004	0.036
Tr22	0.93	0.037	-0.22	-0.135	0.141	0.1	-0.025	-0.026	0.002	0.032
Tr23	0.959	0.14	-0.013	0.02	-0.179	-0.048	-0.056	-0.028	-0.016	0.006
Tr24	0.915	0.213	0.127	-0.053	0.042	0.078	0.135	-0.038	0.158	-0.106
Tr25	0.909	0.231	0.15	0.21	-0.067	-0.113	0.016	0.046	0.029	-0.054
Tr26	0.872	0.147	-0.199	0.319	-0.177	0.14	0.062	-0.091	0.006	0.064
Tr27	0.949	0.068	-0.19	0.114	0.02	-0.027	-0.039	0.024	0.174	-0.034
Tr28	0.974	0.053	-0.039	0.084	-0.003	0.045	-0.124	0.08	0.012	0.056
Tr29	0.937	0.151	-0.166	-0.167	-0.087	-0.006	-0.069	0.088	0.11	-0.019
Tr30	0.9	0.155	0.122	-0.256	0.057	-0.2	-0.087	-0.034	-0.026	0.055

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr31	0.907	0.209	0.192	-0.123	-0.076	-0.166	-0.156	-0.035	0.035	0.097
Tr32	0.95	0.12	-0.003	-0.157	-0.105	0.057	0.055	-0.03	-0.156	-0.04
Tr33	0.939	-0.066	-0.06	0.103	0.191	-0.132	-0.125	-0.015	-0.102	0.028
Tr34	0.897	-0.086	-0.254	0.182	0.208	0.07	0.024	-0.023	-0.026	0.092
Tr35	0.926	0.084	-0.247	-0.085	-0.153	-0.095	0.084	-0.062	-0.063	-0.042
Tr36	0.893	0.259	0.007	-0.062	0.022	0.075	0.227	0.199	0.093	-0.099
Tr37	0.889	0.107	-0.128	0.269	0.283	-0.046	0.103	0.084	0.036	-0.023
Tr38	0.93	-0.014	0.024	0.198	0.19	-0.06	0.029	0.041	0.041	0.196
Tr39	0.871	0.224	0.077	-0.065	-0.065	0.058	0.241	0.118	-0.07	0.267
Tr40	0.932	-0.016	-0.199	-0.104	-0.195	0.032	-0.001	0.153	-0.039	-0.036
Tr41	0.934	-0.028	0.06	0.003	-0.012	0.319	0.003	0.021	-0.008	0.084
Tr42	0.951	-0.207	-0.01	-0.018	-0.042	-0.026	0.041	-0.132	0.104	0.036
Tr43	0.957	-0.171	-0.006	0.065	-0.173	0.052	0.004	0.009	0.016	0.077
Tr44	0.914	-0.114	0.3	-0.041	-0.064	-0.113	0.064	0.091	-0.02	-0.098
Tr45	0.914	-0.069	0.228	-0.128	0.071	0.022	-0.055	0.258	0.049	0.023
Tr46	0.964	0.003	0.11	-0.039	0.029	0.103	-0.031	0.061	-0.098	-0.129
Tr47	0.945	-0.094	0.05	-0.02	-0.063	0.064	-0.125	0.21	-0.019	-0.073
Tr48	0.944	-0.019	0.006	0.03	0.106	-0.099	0.117	-0.103	-0.121	-0.093
Tr49	0.928	-0.129	0.217	0.174	-0.014	-0.011	-0.041	-0.111	-0.023	-0.087
Tr50	0.946	-0.084	-0.004	0.151	-0.177	-0.001	0.025	0.002	-0.149	-0.066
Tr51	0.939	-0.002	-0.192	-0.133	0.167	-0.093	-0.019	-0.018	-0.062	-0.093
Tr52	0.969	0.117	-0.043	0.009	0.142	-0.039	0.094	-0.034	-0.017	0.05
Tr53	0.942	0.118	-0.085	-0.181	-0.014	-0.136	0.043	-0.12	-0.133	0.014
Tr54	0.9	0.334	0.151	-0.065	0.049	0.143	0.012	-0.069	-0.035	-0.084
Tr55	0.894	0.23	0.207	0.215	0.05	0.115	-0.113	0.015	-0.13	-0.004
Tr56	0.925	-0.079	-0.271	0.051	0.179	-0.04	0.052	0.003	-0.01	-0.124
Tr57	0.911	0.035	-0.208	0.022	-0.124	-0.203	-0.149	0.098	0.078	-0.119
Tr58	0.927	-0.044	-0.036	0.082	-0.161	-0.261	0.147	0.048	-0.075	-0.029
Tr59	0.972	-0.1	-0.006	-0.032	0.088	-0.134	0.053	-0.013	0.02	0.018
Tr60	0.961	-0.045	-0.018	0.088	-0.077	0.051	0.2	-0.015	-0.045	0.017

ตารางที่ ค.6 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดย
เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr0	0.018	-0.114	0.102	0.057	-0.113	-0.121	0.105	0.022	0.142	-0.153
Tr1	0.017	-0.213	0.045	-0.078	0.176	-0.092	0.028	0.226	0.094	0.173
Tr2	0.018	-0.178	-0.163	0	-0.005	-0.063	0.036	-0.036	0.091	0.001
Tr3	0.018	-0.148	-0.099	-0.08	-0.17	0.03	0.087	-0.065	0.382	-0.11
Tr4	0.018	-0.129	-0.069	-0.175	-0.056	0.024	-0.078	-0.2	-0.038	0.076
Tr5	0.018	-0.184	-0.008	0.083	-0.157	0.087	-0.097	-0.071	-0.126	0.368
Tr6	0.017	-0.148	0.26	0.046	0.007	0.045	-0.032	-0.164	-0.176	-0.192
Tr7	0.018	-0.178	0.099	-0.063	0.014	0.038	-0.194	-0.059	-0.262	0.04
Tr8	0.017	-0.172	0.126	0.123	0.085	-0.023	0.287	-0.27	0.25	-0.103
Tr9	0.017	-0.124	0.122	-0.324	-0.012	-0.084	0.235	0.057	0.209	0.319
Tr10	0.017	-0.028	-0.157	-0.162	0.08	0.402	-0.031	-0.083	-0.105	-0.302
Tr11	0.017	-0.133	0.06	0.031	-0.028	0.386	-0.142	0.043	0.24	-0.148
Tr12	0.018	0.012	0.02	-0.031	0.129	0.084	0.007	0.239	-0.485	0.091
Tr13	0.017	0.056	0.118	-0.074	0.303	0.092	-0.1	-0.247	0.223	-0.164
Tr14	0.018	0.04	-0.076	-0.124	0.049	0.105	-0.148	-0.219	0.166	0.236
Tr15	0.018	0.081	0.007	0.067	-0.196	0.005	-0.209	-0.185	0.083	0.012
Tr16	0.018	0.069	-0.05	-0.011	-0.158	0.112	-0.1	-0.056	0.01	0.142
Tr17	0.018	-0.014	-0.152	0.144	0.019	-0.103	-0.337	0.214	-0.063	0.111
Tr18	0.017	0.059	0.134	0.253	0.011	-0.105	-0.13	0.038	0.269	0.077
Tr19	0.018	0.142	0.036	-0.05	-0.088	-0.037	-0.022	-0.328	0.275	0.043
Tr20	0.018	0.112	0.09	0.013	-0.08	0.026	-0.088	-0.213	0.097	0.059
Tr21	0.018	0.084	0.006	-0.114	0.22	-0.088	-0.202	-0.084	0.011	0.097
Tr22	0.018	0.025	-0.162	-0.121	0.16	0.133	-0.048	-0.058	0.005	0.086
Tr23	0.018	0.094	-0.009	0.018	-0.202	-0.064	-0.11	-0.064	-0.04	0.017
Tr24	0.017	0.143	0.093	-0.047	0.047	0.105	0.263	-0.087	0.408	-0.285
Tr25	0.017	0.156	0.11	0.189	-0.076	-0.15	0.03	0.104	0.074	-0.147
Tr26	0.017	0.099	-0.146	0.286	-0.201	0.187	0.12	-0.207	0.015	0.172
Tr27	0.018	0.046	-0.14	0.102	0.022	-0.036	-0.076	0.055	0.451	-0.09
Tr28	0.019	0.036	-0.029	0.076	-0.004	0.06	-0.241	0.183	0.032	0.151
Tr29	0.018	0.102	-0.122	-0.15	-0.099	-0.007	-0.134	0.201	0.285	-0.052
Tr30	0.017	0.105	0.09	-0.23	0.065	-0.267	-0.17	-0.077	-0.068	0.147

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr31	0.017	0.141	0.142	-0.111	-0.087	-0.222	-0.305	-0.08	0.09	0.262
Tr32	0.018	0.081	-0.002	-0.141	-0.119	0.076	0.108	-0.069	-0.404	-0.109
Tr33	0.018	-0.045	-0.044	0.093	0.216	-0.176	-0.244	-0.033	-0.264	0.074
Tr34	0.017	-0.058	-0.187	0.164	0.236	0.094	0.047	-0.051	-0.068	0.249
Tr35	0.018	0.056	-0.182	-0.076	-0.173	-0.127	0.163	-0.141	-0.164	-0.112
Tr36	0.017	0.174	0.005	-0.055	0.025	0.101	0.442	0.452	0.24	-0.267
Tr37	0.017	0.072	-0.094	0.241	0.32	-0.062	0.202	0.19	0.093	-0.061
Tr38	0.018	-0.009	0.018	0.177	0.215	-0.081	0.057	0.093	0.107	0.527
Tr39	0.017	0.151	0.057	-0.058	-0.074	0.077	0.469	0.269	-0.181	0.721
Tr40	0.018	-0.011	-0.146	-0.093	-0.221	0.042	-0.001	0.348	-0.101	-0.097
Tr41	0.018	-0.019	0.044	0.003	-0.014	0.426	0.006	0.047	-0.02	0.226
Tr42	0.018	-0.14	-0.007	-0.016	-0.048	-0.035	0.079	-0.3	0.27	0.097
Tr43	0.018	-0.115	-0.005	0.059	-0.196	0.07	0.007	0.02	0.041	0.209
Tr44	0.017	-0.077	0.221	-0.037	-0.072	-0.151	0.125	0.207	-0.051	-0.263
Tr45	0.017	-0.047	0.168	-0.115	0.081	0.03	-0.108	0.587	0.127	0.061
Tr46	0.018	0.002	0.081	-0.035	0.032	0.137	-0.06	0.139	-0.255	-0.347
Tr47	0.018	-0.063	0.037	-0.018	-0.071	0.086	-0.244	0.477	-0.048	-0.198
Tr48	0.018	-0.013	0.005	0.027	0.12	-0.131	0.228	-0.233	-0.314	-0.252
Tr49	0.018	-0.087	0.16	0.156	-0.016	-0.014	-0.081	-0.251	-0.06	-0.233
Tr50	0.018	-0.056	-0.003	0.135	-0.2	-0.002	0.049	0.004	-0.386	-0.178
Tr51	0.018	-0.001	-0.141	-0.12	0.19	-0.124	-0.037	-0.04	-0.16	-0.251
Tr52	0.018	0.079	-0.031	0.008	0.161	-0.052	0.183	-0.078	-0.043	0.134
Tr53	0.018	0.08	-0.063	-0.162	-0.016	-0.181	0.084	-0.274	-0.345	0.039
Tr54	0.017	0.225	0.111	-0.059	0.056	0.191	0.023	-0.157	-0.092	-0.226
Tr55	0.017	0.155	0.152	0.193	0.056	0.154	-0.22	0.033	-0.336	-0.012
Tr56	0.018	-0.053	-0.199	0.046	0.203	-0.054	0.101	0.008	-0.026	-0.335
Tr57	0.017	0.023	-0.153	0.02	-0.141	-0.271	-0.291	0.222	0.201	-0.321
Tr58	0.018	-0.03	-0.027	0.073	-0.182	-0.348	0.286	0.109	-0.195	-0.078
Tr59	0.018	-0.067	-0.005	-0.028	0.1	-0.179	0.103	-0.031	0.052	0.047
Tr60	0.018	-0.03	-0.013	0.079	-0.088	0.067	0.39	-0.033	-0.117	0.045

ตารางที่ ค.7 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc0	0.209	0.696	0.345	-0.112	-0.237	-0.084	0.411	0.024	-0.147	-0.124
Tc1	0.265	0.662	0.428	-0.165	-0.185	-0.176	0.404	0.025	-0.139	-0.08
Tc2	0.277	0.585	0.528	-0.127	-0.3	-0.205	0.335	0.047	-0.118	-0.019
Tc3	0.308	0.479	0.588	-0.252	-0.274	-0.152	0.288	0.146	-0.079	-0.018
Tc4	0.49	0.322	0.685	-0.202	-0.223	0.078	0.112	0.114	-0.064	-0.097
Tc5	0.329	0.188	0.739	-0.217	-0.121	0.309	-0.2	0.067	0.056	0.045
Tc6	0.509	0.164	0.717	-0.187	-0.159	0.28	-0.079	0.073	0.019	-0.045
Tc7	0.558	0.141	0.71	-0.066	-0.196	0.259	-0.036	-0.014	0.022	-0.123
Tc8	0.581	0.052	0.562	0.282	-0.36	0.143	-0.142	-0.137	0.019	-0.062
Tc9	0.668	-0.046	0.371	0.458	-0.328	0.11	-0.081	-0.126	-0.051	0.061
Tc10	0.744	-0.095	0.235	0.508	-0.21	0.093	-0.036	-0.095	-0.122	0.099
Tc11	0.813	-0.103	0.115	0.483	-0.113	0.047	-0.053	-0.057	-0.138	0.102
Tc12	0.877	-0.124	-0.085	0.317	0.051	-0.079	-0.044	-0.123	-0.107	0.109
Tc13	0.877	-0.204	-0.202	0.141	0.125	-0.1	-0.014	-0.178	-0.084	0.05
Tc14	0.885	-0.186	-0.27	0.095	0.142	-0.097	-0.033	-0.117	-0.095	-0.009
Tc15	0.854	-0.142	-0.298	-0.02	0.296	-0.1	0.013	-0.096	-0.096	-0.094
Tc16	0.847	-0.137	-0.323	-0.01	0.285	-0.075	0.048	-0.04	-0.071	-0.117
Tc17	0.823	-0.089	-0.407	-0.024	0.231	-0.065	0.117	-0.077	-0.078	-0.098
Tc18	0.764	-0.06	-0.491	-0.03	0.198	-0.075	0.193	-0.056	-0.011	-0.07
Tc19	0.697	-0.025	-0.565	-0.064	0.19	-0.043	0.203	-0.054	0.052	-0.019
Tc20	0.574	0.159	-0.678	-0.123	0.104	0.072	0.25	-0.054	0.087	0.117
Tc21	0.333	0.323	-0.697	-0.107	0.11	0.26	0.318	-0.135	0.084	0.063
Tc22	0.156	0.458	-0.708	-0.032	0.074	0.331	0.268	-0.07	0.106	0.025
Tc23	0.028	0.537	-0.672	-0.041	0.039	0.363	0.211	0.075	0.108	0.026
Tc24	-0.067	0.586	-0.615	0.013	0.025	0.31	0.144	0.229	0.086	0.025
Tc25	-0.139	0.748	-0.412	0.281	0.024	0.1	-0.015	0.332	0.033	0.039
Tc26	-0.155	0.766	-0.308	0.384	0.016	0.027	-0.088	0.327	-0.002	0.034
Tc27	-0.156	0.814	-0.241	0.384	0.114	-0.004	-0.01	0.222	0.012	-0.025
Tc28	-0.173	0.835	-0.159	0.423	0.078	-0.037	0.016	0.119	0.032	-0.037
Tc29	-0.138	0.841	-0.056	0.46	-0.087	-0.071	-0.037	-0.064	0.124	-0.072
Tc30	-0.118	0.809	0.018	0.434	-0.176	-0.138	-0.078	-0.169	0.164	-0.09

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc31	-0.118	0.826	0.09	0.365	-0.142	-0.178	-0.042	-0.202	0.146	-0.081
Tc32	-0.111	0.858	0.234	0.273	-0.021	-0.196	0.024	-0.151	0.098	0.074
Tc33	-0.052	0.801	0.358	-0.152	0.246	-0.239	0.11	0.02	0.015	0.141
Tc34	-0.068	0.735	0.464	-0.045	0.201	-0.312	0.043	-0.085	0.035	0.174
Tc35	0.039	0.633	0.536	-0.16	0.369	-0.269	-0.04	-0.095	0.042	0.135
Tc36	0.167	0.536	0.633	-0.178	0.377	-0.128	-0.134	-0.088	0.052	0.095
Tc37	0.244	0.407	0.699	-0.226	0.373	0.056	-0.141	-0.031	0.069	0.036
Tc38	0.324	0.289	0.688	-0.288	0.351	0.153	-0.167	-0.058	0.166	0.031
Tc39	0.522	0.206	0.682	-0.229	0.162	0.196	-0.02	-0.039	0.144	-0.095
Tc40	0.64	0.093	0.661	-0.089	0.016	0.197	0.023	0.023	0.112	-0.047
Tc41	0.786	-0.03	0.493	-0.044	0.098	0.074	0.032	0.101	0.079	0.077
Tc42	0.843	-0.097	0.353	0.049	0.176	0.074	0.072	0.113	-0.017	0.099
Tc43	0.868	-0.131	0.287	0.129	0.109	0.095	0.104	0.142	-0.061	0.152
Tc44	0.883	-0.125	0.223	0.155	0.114	0.111	0.102	0.146	-0.067	0.112
Tc45	0.847	-0.137	0.09	0.385	-0.056	0.086	-0.011	0.153	0.088	0.053
Tc46	0.841	-0.153	-0.116	0.418	0	-0.075	-0.04	-0.049	0.138	-0.04
Tc47	0.894	-0.175	-0.208	0.148	0.13	-0.078	0.021	0.023	0.098	-0.081
Tc48	0.876	-0.074	-0.213	-0.115	-0.071	-0.172	-0.1	-0.035	0.178	-0.2
Tc49	0.834	-0.049	-0.296	-0.182	-0.065	-0.221	-0.119	0.117	0.177	-0.2
Tc50	0.777	-0.035	-0.337	-0.228	-0.151	-0.256	-0.148	0.253	0.124	-0.098
Tc51	0.673	-0.052	-0.4	-0.297	-0.232	-0.27	-0.188	0.301	0.04	0.024
Tc52	0.588	0.122	-0.498	-0.322	-0.303	-0.177	-0.2	0.255	0.017	0.186
Tc53	0.507	0.276	-0.563	-0.314	-0.33	-0.084	-0.209	0.11	-0.02	0.196
Tc54	0.4	0.384	-0.542	-0.334	-0.366	-0.029	-0.104	-0.249	0.028	0.184
Tc55	0.312	0.562	-0.506	-0.273	-0.318	0.091	-0.097	-0.298	0.027	0.09
Tc56	0.192	0.668	-0.464	-0.252	-0.207	0.147	-0.107	-0.323	-0.034	-0.017
Tc57	0.124	0.714	-0.429	-0.363	-0.065	0.148	-0.123	-0.173	-0.122	-0.072
Tc58	0.169	0.791	-0.31	-0.196	0.172	0.122	-0.287	0.015	-0.201	-0.122
Tc59	0.153	0.826	-0.227	-0.004	0.227	0.089	-0.302	0.065	-0.236	-0.092
Tc60	0.147	0.809	-0.187	0.081	0.258	0.087	-0.288	0.087	-0.253	-0.085

ตารางที่ ค.8 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดยเซ็นเซอร์ความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 70°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc0	0.011	0.05	0.027	-0.029	-0.091	-0.049	0.254	0.018	-0.223	-0.216
Tc1	0.014	0.048	0.034	-0.043	-0.071	-0.104	0.25	0.019	-0.212	-0.14
Tc2	0.015	0.042	0.041	-0.033	-0.116	-0.12	0.208	0.036	-0.179	-0.033
Tc3	0.016	0.035	0.046	-0.066	-0.106	-0.09	0.178	0.112	-0.119	-0.032
Tc4	0.026	0.023	0.054	-0.053	-0.086	0.046	0.069	0.088	-0.097	-0.17
Tc5	0.017	0.014	0.058	-0.057	-0.047	0.182	-0.124	0.052	0.085	0.079
Tc6	0.027	0.012	0.056	-0.049	-0.061	0.164	-0.049	0.056	0.028	-0.079
Tc7	0.03	0.01	0.056	-0.017	-0.076	0.153	-0.022	-0.011	0.034	-0.214
Tc8	0.031	0.004	0.044	0.074	-0.139	0.084	-0.088	-0.105	0.029	-0.109
Tc9	0.036	-0.003	0.029	0.12	-0.126	0.065	-0.05	-0.097	-0.078	0.106
Tc10	0.04	-0.007	0.018	0.133	-0.081	0.055	-0.023	-0.073	-0.185	0.172
Tc11	0.043	-0.007	0.009	0.126	-0.044	0.027	-0.033	-0.043	-0.21	0.178
Tc12	0.047	-0.009	-0.007	0.083	0.02	-0.046	-0.027	-0.094	-0.163	0.19
Tc13	0.047	-0.015	-0.016	0.037	0.048	-0.059	-0.008	-0.137	-0.127	0.087
Tc14	0.047	-0.013	-0.021	0.025	0.055	-0.057	-0.021	-0.09	-0.145	-0.016
Tc15	0.045	-0.01	-0.023	-0.005	0.114	-0.059	0.008	-0.074	-0.145	-0.164
Tc16	0.045	-0.01	-0.025	-0.003	0.11	-0.044	0.03	-0.03	-0.108	-0.203
Tc17	0.044	-0.006	-0.032	-0.006	0.089	-0.038	0.073	-0.059	-0.119	-0.17
Tc18	0.041	-0.004	-0.038	-0.008	0.076	-0.044	0.12	-0.043	-0.017	-0.122
Tc19	0.037	-0.002	-0.044	-0.017	0.073	-0.025	0.126	-0.041	0.079	-0.034
Tc20	0.031	0.011	-0.053	-0.032	0.04	0.042	0.155	-0.041	0.132	0.204
Tc21	0.018	0.023	-0.055	-0.028	0.042	0.153	0.197	-0.103	0.128	0.11
Tc22	0.008	0.033	-0.055	-0.008	0.028	0.195	0.166	-0.054	0.161	0.043
Tc23	0.001	0.039	-0.053	-0.011	0.015	0.214	0.13	0.057	0.164	0.045
Tc24	-0.004	0.042	-0.048	0.003	0.01	0.183	0.089	0.176	0.131	0.044
Tc25	-0.007	0.054	-0.032	0.073	0.009	0.059	-0.009	0.254	0.05	0.068
Tc26	-0.008	0.055	-0.024	0.1	0.006	0.016	-0.054	0.251	-0.003	0.06
Tc27	-0.008	0.059	-0.019	0.1	0.044	-0.002	-0.006	0.17	0.018	-0.043
Tc28	-0.009	0.06	-0.012	0.11	0.03	-0.022	0.01	0.092	0.048	-0.064
Tc29	-0.007	0.061	-0.004	0.12	-0.034	-0.042	-0.023	-0.049	0.188	-0.125
Tc30	-0.006	0.058	0.001	0.113	-0.068	-0.081	-0.048	-0.13	0.25	-0.157

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc31	-0.006	0.06	0.007	0.095	-0.055	-0.105	-0.026	-0.155	0.222	-0.142
Tc32	-0.006	0.062	0.018	0.071	-0.008	-0.115	0.015	-0.116	0.148	0.129
Tc33	-0.003	0.058	0.028	-0.04	0.095	-0.141	0.068	0.015	0.023	0.245
Tc34	-0.004	0.053	0.036	-0.012	0.077	-0.184	0.026	-0.065	0.053	0.302
Tc35	0.002	0.046	0.042	-0.042	0.142	-0.158	-0.025	-0.073	0.064	0.235
Tc36	0.009	0.039	0.05	-0.046	0.145	-0.075	-0.083	-0.068	0.079	0.165
Tc37	0.013	0.029	0.055	-0.059	0.144	0.033	-0.087	-0.024	0.104	0.063
Tc38	0.017	0.021	0.054	-0.075	0.135	0.09	-0.104	-0.044	0.252	0.054
Tc39	0.028	0.015	0.053	-0.06	0.063	0.115	-0.012	-0.03	0.218	-0.165
Tc40	0.034	0.007	0.052	-0.023	0.006	0.116	0.014	0.017	0.17	-0.082
Tc41	0.042	-0.002	0.039	-0.011	0.038	0.043	0.02	0.078	0.12	0.134
Tc42	0.045	-0.007	0.028	0.013	0.068	0.044	0.045	0.086	-0.025	0.172
Tc43	0.046	-0.009	0.022	0.034	0.042	0.056	0.065	0.109	-0.092	0.265
Tc44	0.047	-0.009	0.017	0.04	0.044	0.065	0.063	0.112	-0.102	0.194
Tc45	0.045	-0.01	0.007	0.1	-0.022	0.051	-0.007	0.118	0.133	0.092
Tc46	0.045	-0.011	-0.009	0.109	0	-0.044	-0.025	-0.037	0.21	-0.07
Tc47	0.047	-0.013	-0.016	0.039	0.05	-0.046	0.013	0.018	0.149	-0.141
Tc48	0.047	-0.005	-0.017	-0.03	-0.027	-0.101	-0.062	-0.027	0.271	-0.348
Tc49	0.044	-0.004	-0.023	-0.047	-0.025	-0.13	-0.074	0.09	0.269	-0.348
Tc50	0.041	-0.003	-0.026	-0.059	-0.058	-0.15	-0.092	0.194	0.188	-0.17
Tc51	0.036	-0.004	-0.031	-0.078	-0.09	-0.159	-0.116	0.231	0.06	0.043
Tc52	0.031	0.009	-0.039	-0.084	-0.117	-0.104	-0.124	0.196	0.025	0.324
Tc53	0.027	0.02	-0.044	-0.082	-0.127	-0.05	-0.13	0.084	-0.03	0.341
Tc54	0.021	0.028	-0.042	-0.087	-0.141	-0.017	-0.064	-0.191	0.042	0.321
Tc55	0.017	0.04	-0.04	-0.071	-0.123	0.054	-0.06	-0.228	0.041	0.157
Tc56	0.01	0.048	-0.036	-0.066	-0.08	0.086	-0.066	-0.248	-0.051	-0.029
Tc57	0.007	0.051	-0.034	-0.095	-0.025	0.087	-0.076	-0.133	-0.185	-0.125
Tc58	0.009	0.057	-0.024	-0.051	0.066	0.072	-0.178	0.012	-0.305	-0.212
Tc59	0.008	0.06	-0.018	-0.001	0.087	0.052	-0.187	0.05	-0.359	-0.16
Tc60	0.008	0.058	-0.015	0.021	0.1	0.051	-0.178	0.067	-0.384	-0.148

ตารางที่ ค.9 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน
ชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr0	0.955	-0.231	-0.054	-0.099	0.027	-0.006	0.002	0.023	0.102	-0.008
Tr1	0.964	-0.117	-0.101	-0.025	-0.155	0.092	-0.044	0.002	-0.032	0.029
Tr2	0.925	0.009	0.226	-0.147	0.098	-0.115	0.145	-0.124	0.029	0.061
Tr3	0.924	-0.085	0.306	0.128	-0.042	0.077	-0.094	0.039	0	-0.01
Tr4	0.946	0.185	0.113	-0.136	0.117	0.111	-0.028	-0.065	0.033	0.032
Tr5	0.93	0.042	0.301	-0.002	-0.078	0.011	-0.129	-0.071	0.089	-0.023
Tr6	0.951	0.192	0.036	-0.101	0.023	0.149	-0.113	0.011	0.074	-0.047
Tr7	0.888	0.273	0.189	0.28	0.082	0.062	-0.049	-0.04	0.011	0.006
Tr8	0.95	0.261	0.063	-0.008	-0.015	0.076	-0.076	0.018	0.043	-0.054
Tr9	0.873	0.253	0.105	0.297	0.182	0.161	0.097	-0.004	-0.005	0.014
Tr10	0.989	0.06	-0.086	-0.022	-0.018	0.012	0.017	-0.045	-0.021	-0.03
Tr11	0.918	0.11	-0.067	0.271	0.165	0.164	0.094	0.028	0.011	0.004
Tr12	0.96	-0.123	-0.143	0.068	-0.021	-0.094	0.045	-0.149	-0.029	-0.001
Tr13	0.962	-0.124	0.027	0.149	0.064	0.119	-0.103	-0.033	0.032	-0.021
Tr14	0.957	-0.021	-0.07	0.103	-0.051	-0.191	0.04	-0.122	-0.034	-0.069
Tr15	0.944	-0.149	0.092	0.123	0.042	-0.013	-0.214	-0.022	0.04	-0.078
Tr16	0.949	0.028	-0.051	0.135	-0.193	-0.147	-0.05	0.071	-0.04	-0.073
Tr17	0.96	-0.166	0.128	0.044	-0.03	-0.064	-0.127	0.041	-0.047	0.02
Tr18	0.928	0.155	0.09	0.052	-0.254	-0.109	-0.029	0.154	-0.02	-0.017
Tr19	0.962	-0.093	-0.109	-0.114	-0.095	-0.071	0.09	0.015	-0.102	0.068
Tr20	0.934	0.19	0.149	0.106	-0.121	-0.138	0.069	-0.031	-0.078	0.082
Tr21	0.884	-0.165	0.366	-0.083	0.05	-0.16	0.074	0.084	0.067	-0.038
Tr22	0.97	0.155	-0.036	-0.008	-0.081	-0.027	0.071	0.068	0.094	-0.003
Tr23	0.912	-0.111	0.32	-0.008	0.108	-0.057	0.155	0.08	-0.034	-0.07
Tr24	0.96	0.075	-0.173	0.02	0.137	0.036	0.078	0.007	0.005	-0.1
Tr25	0.97	-0.059	0.165	-0.049	0.012	-0.024	0.024	0.112	-0.029	0.06
Tr26	0.945	0.077	-0.236	-0.108	0.093	-0.007	-0.034	-0.012	-0.088	-0.02
Tr27	0.948	-0.147	0.002	-0.188	0.019	0.062	-0.09	0.146	-0.004	0.076
Tr28	0.926	0.064	-0.238	-0.145	0.103	-0.033	-0.194	-0.012	-0.018	-0.011
Tr29	0.953	-0.101	-0.005	-0.127	0.071	0.167	-0.038	0.114	-0.121	0.007
Tr30	0.96	0.117	-0.172	-0.12	0.079	-0.033	-0.054	0.061	-0.024	-0.005

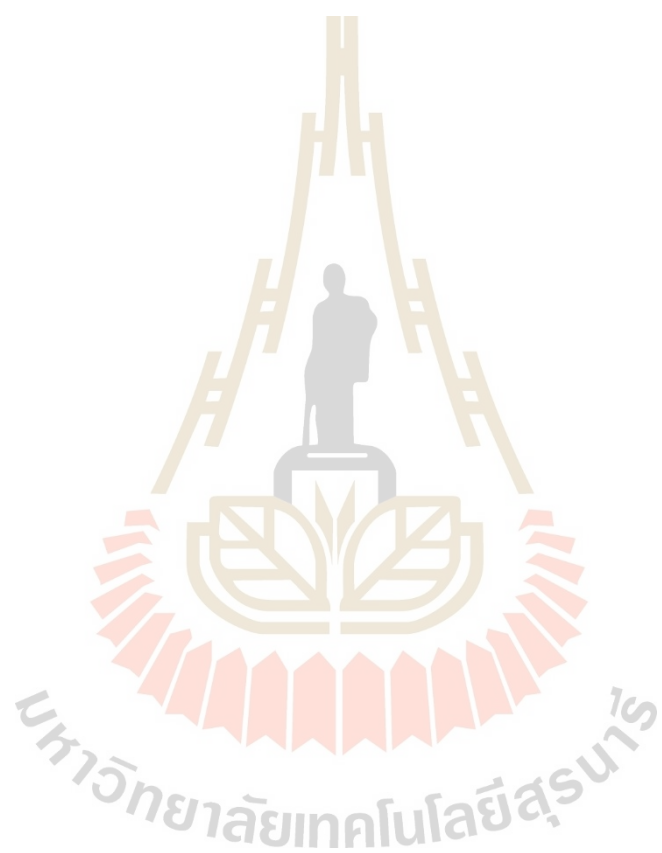
Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr31	0.962	-0.115	-0.029	-0.043	0.028	0.189	0.016	0.005	-0.124	0.021
Tr32	0.964	0.031	-0.037	0.032	0.164	-0.113	-0.084	-0.049	-0.07	0.059
Tr33	0.947	-0.245	-0.046	-0.03	0.062	0.109	-0.093	-0.066	0.045	0.035
Tr34	0.952	0.064	-0.105	0.057	0.097	-0.179	-0.053	0.071	0.098	0.105
Tr35	0.947	-0.236	-0.096	0.027	-0.006	0.014	-0.027	-0.08	0.117	0.037
Tr36	0.943	-0.015	-0.161	0.093	0.063	-0.137	-0.037	0.185	0.094	-0.025
Tr37	0.923	-0.263	-0.054	0.215	-0.062	0.015	0.088	-0.057	0.005	0.031
Tr38	0.937	-0.052	-0.095	0.264	0.116	-0.04	0.067	0.093	-0.074	-0.022
Tr39	0.921	-0.225	-0.118	0.199	-0.156	0.03	0.113	0.005	0	0.018
Tr40	0.929	0.318	0.01	0.082	-0.064	-0.013	-0.019	0	-0.026	0.141
Tr41	0.955	0.098	0.083	-0.02	-0.244	0.01	-0.007	0.062	0.032	0.033
Tr42	0.929	0.241	-0.123	0.019	-0.121	-0.006	-0.165	-0.128	0.008	0.045
Tr43	0.96	0.101	0.136	-0.151	0.065	0.027	0.037	-0.01	-0.098	-0.05
Tr44	0.955	0.161	-0.095	-0.038	0.081	-0.186	-0.055	0.016	-0.062	-0.01
Tr45	0.966	0.021	0.059	-0.036	-0.058	-0.186	-0.008	-0.098	-0.052	-0.086
Tr46	0.985	-0.072	-0.052	-0.057	0.006	0.056	-0.042	-0.009	-0.056	-0.029
Tr47	0.952	-0.096	-0.192	0.079	-0.161	-0.014	-0.047	-0.048	0.023	-0.073
Tr48	0.915	0.119	0.042	-0.131	-0.247	0.216	0.084	0.054	0.028	-0.049
Tr49	0.938	0.146	-0.078	-0.059	-0.147	0.128	0.207	-0.047	0.024	0.004
Tr50	0.958	-0.106	-0.159	0.038	-0.119	0.113	0.033	-0.048	0.061	0.044
Tr51	0.963	-0.044	-0.205	0.012	0.076	0.059	0.087	0.058	-0.007	-0.041
Tr52	0.985	-0.085	0.024	-0.028	-0.002	-0.02	0.079	-0.069	0.021	-0.026
Tr53	0.964	0.014	-0.206	-0.03	0.051	-0.051	0.084	0.066	0.068	0.042
Tr54	0.953	0.172	-0.048	-0.12	0.124	-0.023	0.088	-0.043	0.025	-0.053
Tr55	0.959	0.014	-0.054	-0.223	-0.09	0.07	0.065	-0.013	-0.008	-0.034
Tr56	0.954	0.053	0.058	-0.193	0.067	-0.083	0.105	-0.042	0.118	0.007
Tr57	0.924	-0.173	0.294	0.008	-0.035	0.082	-0.04	-0.08	-0.093	0.01
Tr58	0.972	-0.147	0.031	-0.033	0.111	-0.021	0.061	-0.036	0.023	0.035
Tr59	0.973	0.002	0.103	-0.149	-0.006	-0.053	-0.042	-0.062	-0.03	0.018
Tr60	0.968	-0.189	0.064	0.003	0.095	0.012	-0.017	0.033	0.012	0.032

ตารางที่ ค.10 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บ้านทีกค่าโดย
เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr0	0.017	-0.178	-0.043	-0.111	0.039	-0.01	0.004	0.077	0.485	-0.054
Tr1	0.018	-0.09	-0.081	-0.028	-0.224	0.153	-0.096	0.007	-0.152	0.202
Tr2	0.017	0.007	0.18	-0.166	0.143	-0.19	0.317	-0.408	0.138	0.433
Tr3	0.017	-0.065	0.244	0.144	-0.06	0.128	-0.204	0.129	0	-0.069
Tr4	0.017	0.142	0.09	-0.153	0.17	0.183	-0.061	-0.214	0.155	0.228
Tr5	0.017	0.032	0.24	-0.002	-0.113	0.019	-0.282	-0.232	0.425	-0.164
Tr6	0.017	0.148	0.029	-0.113	0.034	0.247	-0.247	0.035	0.353	-0.331
Tr7	0.016	0.21	0.151	0.315	0.119	0.102	-0.106	-0.131	0.053	0.04
Tr8	0.017	0.201	0.05	-0.009	-0.021	0.126	-0.165	0.058	0.204	-0.379
Tr9	0.016	0.195	0.084	0.334	0.263	0.266	0.212	-0.014	-0.026	0.096
Tr10	0.018	0.046	-0.068	-0.025	-0.026	0.019	0.037	-0.147	-0.101	-0.212
Tr11	0.017	0.084	-0.053	0.305	0.238	0.271	0.204	0.093	0.052	0.026
Tr12	0.018	-0.095	-0.114	0.077	-0.031	-0.155	0.099	-0.49	-0.138	-0.004
Tr13	0.018	-0.095	0.021	0.167	0.093	0.198	-0.225	-0.108	0.152	-0.15
Tr14	0.017	-0.016	-0.056	0.116	-0.074	-0.315	0.088	-0.401	-0.16	-0.489
Tr15	0.017	-0.115	0.074	0.139	0.06	-0.022	-0.467	-0.072	0.191	-0.55
Tr16	0.017	0.021	-0.041	0.152	-0.279	-0.244	-0.11	0.235	-0.193	-0.514
Tr17	0.018	-0.128	0.102	0.049	-0.044	-0.106	-0.278	0.134	-0.224	0.142
Tr18	0.017	0.119	0.072	0.058	-0.368	-0.18	-0.064	0.507	-0.097	-0.122
Tr19	0.018	-0.071	-0.087	-0.128	-0.138	-0.118	0.197	0.049	-0.484	0.481
Tr20	0.017	0.147	0.118	0.119	-0.174	-0.228	0.151	-0.102	-0.369	0.576
Tr21	0.016	-0.127	0.291	-0.094	0.073	-0.264	0.162	0.276	0.321	-0.266
Tr22	0.018	0.12	-0.029	-0.009	-0.118	-0.045	0.154	0.225	0.449	-0.022
Tr23	0.017	-0.085	0.255	-0.009	0.157	-0.095	0.339	0.261	-0.161	-0.492
Tr24	0.018	0.058	-0.138	0.022	0.198	0.06	0.171	0.024	0.024	-0.704
Tr25	0.018	-0.046	0.131	-0.055	0.017	-0.04	0.051	0.368	-0.137	0.423
Tr26	0.017	0.059	-0.188	-0.122	0.134	-0.011	-0.073	-0.041	-0.417	-0.142
Tr27	0.017	-0.113	0.001	-0.212	0.027	0.103	-0.195	0.481	-0.017	0.539
Tr28	0.017	0.05	-0.189	-0.163	0.149	-0.055	-0.424	-0.04	-0.084	-0.08

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr29	0.017	-0.078	-0.004	-0.142	0.103	0.276	-0.084	0.375	-0.575	0.052
Tr30	0.018	0.09	-0.138	-0.135	0.114	-0.054	-0.119	0.202	-0.113	-0.034
Tr31	0.018	-0.088	-0.023	-0.049	0.041	0.312	0.034	0.016	-0.593	0.151
Tr32	0.018	0.023	-0.029	0.036	0.238	-0.187	-0.184	-0.162	-0.333	0.414
Tr33	0.017	-0.188	-0.036	-0.034	0.089	0.181	-0.202	-0.216	0.215	0.249
Tr34	0.017	0.049	-0.083	0.064	0.14	-0.297	-0.116	0.232	0.466	0.741
Tr35	0.017	-0.182	-0.077	0.031	-0.009	0.023	-0.059	-0.264	0.559	0.264
Tr36	0.017	-0.012	-0.128	0.104	0.091	-0.226	-0.08	0.607	0.448	-0.18
Tr37	0.017	-0.202	-0.043	0.243	-0.09	0.025	0.192	-0.187	0.026	0.217
Tr38	0.017	-0.04	-0.076	0.297	0.168	-0.067	0.146	0.306	-0.354	-0.156
Tr39	0.017	-0.173	-0.094	0.224	-0.226	0.049	0.247	0.018	0	0.129
Tr40	0.017	0.245	0.008	0.092	-0.092	-0.021	-0.041	0.001	-0.124	0.994
Tr41	0.017	0.075	0.066	-0.023	-0.353	0.017	-0.015	0.205	0.151	0.236
Tr42	0.017	0.185	-0.098	0.022	-0.175	-0.01	-0.361	-0.42	0.038	0.32
Tr43	0.018	0.078	0.108	-0.17	0.094	0.044	0.08	-0.033	-0.469	-0.353
Tr44	0.017	0.124	-0.075	-0.042	0.117	-0.308	-0.12	0.051	-0.297	-0.07
Tr45	0.018	0.016	0.047	-0.04	-0.083	-0.308	-0.016	-0.323	-0.248	-0.61
Tr46	0.018	-0.055	-0.041	-0.065	0.008	0.093	-0.091	-0.03	-0.266	-0.206
Tr47	0.017	-0.074	-0.153	0.089	-0.233	-0.023	-0.103	-0.157	0.107	-0.515
Tr48	0.017	0.091	0.033	-0.147	-0.358	0.358	0.182	0.178	0.135	-0.344
Tr49	0.017	0.112	-0.062	-0.067	-0.213	0.212	0.451	-0.155	0.116	0.031
Tr50	0.018	-0.081	-0.127	0.043	-0.172	0.187	0.072	-0.157	0.29	0.313
Tr51	0.018	-0.034	-0.163	0.013	0.109	0.097	0.19	0.19	-0.032	-0.288
Tr52	0.018	-0.066	0.02	-0.032	-0.003	-0.032	0.173	-0.226	0.1	-0.181
Tr53	0.018	0.011	-0.164	-0.033	0.073	-0.085	0.184	0.217	0.325	0.294
Tr54	0.017	0.132	-0.038	-0.135	0.179	-0.038	0.193	-0.142	0.12	-0.376
Tr55	0.018	0.011	-0.043	-0.251	-0.13	0.116	0.142	-0.044	-0.037	-0.237
Tr56	0.017	0.041	0.046	-0.217	0.097	-0.138	0.229	-0.137	0.56	0.052
Tr57	0.017	-0.133	0.234	0.009	-0.05	0.136	-0.088	-0.265	-0.442	0.073
Tr58	0.018	-0.113	0.025	-0.037	0.161	-0.035	0.132	-0.118	0.111	0.245
Tr59	0.018	0.002	0.082	-0.168	-0.009	-0.088	-0.091	-0.204	-0.144	0.124

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tr60	0.018	-0.145	0.051	0.003	0.138	0.02	-0.038	0.108	0.057	0.224



ตารางที่ ค.11 Component Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้น
ในดินชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc0	0.874	-0.037	-0.205	-0.34	0.046	-0.081	-0.163	0.048	0.081	0.03
Tc1	0.881	-0.018	-0.219	-0.371	0.021	-0.078	-0.088	0	0.112	0.056
Tc2	0.904	0.041	-0.188	-0.327	0.012	-0.06	-0.021	-0.05	0.154	0.013
Tc3	0.913	-0.011	-0.143	-0.317	0.031	-0.073	-0.02	-0.102	0.136	-0.001
Tc4	0.955	-0.041	-0.117	-0.149	-0.041	-0.121	0.079	-0.093	0.025	-0.051
Tc5	0.961	-0.056	-0.065	-0.083	-0.052	-0.153	0.085	-0.112	-0.038	-0.043
Tc6	0.959	-0.086	-0.03	-0.078	-0.033	-0.166	0.069	-0.126	-0.064	-0.041
Tc7	0.947	-0.078	0.121	-0.077	0.022	-0.163	0.191	-0.018	-0.056	-0.012
Tc8	0.942	-0.109	0.171	-0.053	0.035	-0.164	0.158	-0.044	-0.08	-0.033
Tc9	0.939	-0.127	0.197	-0.003	0.032	-0.159	0.144	-0.011	-0.067	-0.003
Tc10	0.93	-0.23	0.17	-0.015	0.035	-0.155	0.111	0.007	-0.058	-0.005
Tc11	0.935	-0.18	0.236	0.028	-0.01	-0.089	0.077	0.07	-0.05	0.024
Tc12	0.932	-0.224	0.227	0.026	-0.032	-0.047	0.054	0.072	-0.053	0.01
Tc13	0.952	-0.217	0.125	0.028	-0.11	-0.001	-0.066	-0.008	-0.067	0.001
Tc14	0.947	-0.212	0.096	0.05	-0.124	0.025	-0.122	-0.008	-0.071	-0.015
Tc15	0.939	-0.233	0.088	0.039	-0.142	0.044	-0.142	-0.025	-0.072	-0.017
Tc16	0.935	-0.231	0.097	0.051	-0.133	0.047	-0.152	-0.031	-0.087	0.001
Tc17	0.938	-0.231	0.071	0.037	-0.148	0.06	-0.141	-0.015	-0.085	0.008
Tc18	0.952	-0.158	0.06	0.059	-0.161	0.053	-0.125	-0.006	-0.054	0.031
Tc19	0.947	-0.205	-0.002	-0.002	-0.165	0.053	-0.11	0.03	-0.041	0.042
Tc20	0.922	-0.072	-0.17	-0.072	-0.242	0.122	0.028	0.104	-0.013	0.049
Tc21	0.913	-0.066	-0.231	-0.072	-0.212	0.151	0.065	0.119	0.027	-0.036
Tc22	0.922	-0.091	-0.238	-0.055	-0.181	0.12	0.088	0.076	0.043	-0.07
Tc23	0.916	-0.069	-0.289	-0.013	-0.079	0.14	0.135	0.041	0.007	-0.112
Tc24	0.906	-0.18	-0.279	-0.021	0.019	0.136	0.12	0.04	-0.02	-0.095
Tc25	0.917	-0.163	-0.284	0.051	0.057	0.129	0.124	-0.013	-0.01	-0.029
Tc26	0.891	-0.233	-0.301	0.069	0.13	0.137	0.102	0.007	-0.014	-0.025
Tc27	0.9	-0.193	-0.274	0.129	0.164	0.108	0.073	-0.028	-0.002	0.05
Tc28	0.894	-0.219	-0.267	0.122	0.179	0.106	0.067	-0.017	-0.002	0.048
Tc29	0.916	-0.17	-0.199	0.159	0.192	0.029	0.017	-0.038	-0.007	0.114
Tc30	0.907	-0.245	-0.139	0.18	0.22	0.001	-0.037	-0.034	-0.033	0.088

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc31	0.914	-0.2	-0.133	0.199	0.209	-0.012	-0.052	-0.036	-0.031	0.101
Tc32	0.919	-0.182	-0.135	0.197	0.219	-0.031	-0.047	0.001	-0.01	0.065
Tc33	0.899	-0.158	-0.067	0.276	0.25	-0.047	-0.096	-0.015	0.022	-0.029
Tc34	0.882	0.174	-0.021	0.362	0.187	-0.059	-0.059	0.022	0.067	-0.049
Tc35	0.876	0.195	0.009	0.34	0.149	-0.088	-0.093	0.055	0.097	-0.122
Tc36	0.922	0.034	-0.005	0.216	0.155	-0.133	-0.15	0.091	0.043	-0.124
Tc37	0.802	0.522	-0.12	0.159	-0.032	-0.124	-0.017	0.143	0.01	0.003
Tc38	0.741	0.599	-0.158	0.098	-0.063	-0.138	0.002	0.165	-0.028	0.026
Tc39	0.723	0.616	-0.178	0.056	-0.091	-0.14	0.006	0.153	-0.043	0.042
Tc40	0.862	0.311	-0.209	-0.285	0.01	-0.085	-0.064	0.065	-0.065	0.023
Tc41	0.831	0.488	-0.113	-0.201	0.031	-0.009	-0.049	-0.034	-0.07	0.006
Tc42	0.785	0.593	-0.057	-0.114	0.028	0.038	-0.015	-0.075	-0.038	-0.009
Tc43	0.743	0.64	-0.003	-0.069	0.065	0.09	-0.027	-0.097	-0.06	-0.04
Tc44	0.885	0.048	-0.02	-0.338	0.161	0.069	-0.163	-0.055	-0.115	-0.097
Tc45	0.854	0.34	0.216	-0.206	0.177	0.132	-0.018	0.036	-0.08	-0.017
Tc46	0.76	0.538	0.274	-0.06	0.129	0.159	0.024	0.016	-0.051	0.021
Tc47	0.669	0.632	0.31	0.016	0.11	0.165	0.064	0.019	-0.005	0.034
Tc48	0.85	0.278	0.346	-0.143	0.143	0.116	0.062	-0.004	0.033	0.046
Tc49	0.875	-0.109	0.348	-0.216	0.172	0.076	0.009	-0.005	0.092	0.001
Tc50	0.874	-0.161	0.353	-0.197	0.139	0.068	-0.017	-0.013	0.102	-0.006
Tc51	0.885	-0.229	0.356	-0.082	0.059	0.016	0.031	0.089	0.079	0.021
Tc52	0.891	-0.251	0.325	-0.003	-0.031	0.01	0.056	0.127	0.063	0.022
Tc53	0.887	-0.265	0.311	-0.009	-0.064	0.006	0.037	0.131	0.071	0.02
Tc54	0.932	-0.195	0.168	0.07	-0.152	0.027	-0.09	-0.022	0.064	-0.061
Tc55	0.95	-0.123	0.111	0.101	-0.182	0.01	-0.088	-0.063	0.043	-0.03
Tc56	0.898	0.242	0.113	0.241	-0.186	0.016	0.008	-0.122	0.073	-0.016
Tc57	0.812	0.411	0.111	0.28	-0.203	0.029	0.059	-0.136	0.087	0.036
Tc58	0.929	-0.112	-0.129	-0.104	-0.222	-0.081	0.003	-0.028	0.017	0.086
Tc59	0.895	0.302	-0.065	0.123	-0.231	-0.009	0.046	-0.06	0.049	0.113
Tc60	0.809	0.398	0.102	0.329	-0.159	0.06	0.039	-0.124	0.058	-0.015

ตารางที่ ค.12 Component Score Coefficient Matrix จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกค่าโดย
เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ณ การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ 80°C

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc0	0.018	-0.008	-0.089	-0.188	0.04	-0.14	-0.347	0.154	0.33	0.181
Tc1	0.018	-0.004	-0.096	-0.205	0.018	-0.135	-0.187	-0.001	0.456	0.337
Tc2	0.019	0.009	-0.082	-0.181	0.01	-0.104	-0.044	-0.158	0.628	0.08
Tc3	0.019	-0.002	-0.062	-0.175	0.027	-0.126	-0.042	-0.325	0.555	-0.007
Tc4	0.02	-0.009	-0.051	-0.082	-0.036	-0.21	0.168	-0.295	0.103	-0.309
Tc5	0.02	-0.012	-0.029	-0.046	-0.046	-0.264	0.18	-0.358	-0.155	-0.261
Tc6	0.02	-0.018	-0.013	-0.043	-0.029	-0.288	0.147	-0.4	-0.259	-0.249
Tc7	0.02	-0.016	0.053	-0.043	0.02	-0.283	0.407	-0.058	-0.228	-0.075
Tc8	0.019	-0.023	0.075	-0.029	0.031	-0.285	0.335	-0.141	-0.326	-0.198
Tc9	0.019	-0.027	0.086	-0.002	0.028	-0.275	0.307	-0.035	-0.272	-0.016
Tc10	0.019	-0.048	0.074	-0.009	0.031	-0.269	0.235	0.022	-0.235	-0.029
Tc11	0.019	-0.038	0.103	0.015	-0.009	-0.153	0.164	0.224	-0.204	0.143
Tc12	0.019	-0.047	0.099	0.014	-0.028	-0.082	0.114	0.23	-0.215	0.058
Tc13	0.02	-0.046	0.055	0.015	-0.097	-0.002	-0.14	-0.025	-0.274	0.009
Tc14	0.02	-0.045	0.042	0.027	-0.109	0.043	-0.26	-0.026	-0.291	-0.093
Tc15	0.019	-0.049	0.038	0.021	-0.124	0.077	-0.301	-0.079	-0.293	-0.101
Tc16	0.019	-0.049	0.043	0.028	-0.116	0.082	-0.322	-0.098	-0.356	0.005
Tc17	0.019	-0.049	0.031	0.021	-0.13	0.103	-0.301	-0.047	-0.344	0.046
Tc18	0.02	-0.033	0.026	0.033	-0.142	0.091	-0.265	-0.018	-0.219	0.189
Tc19	0.02	-0.043	-0.001	-0.001	-0.144	0.092	-0.234	0.096	-0.166	0.255
Tc20	0.019	-0.015	-0.074	-0.04	-0.212	0.212	0.06	0.33	-0.054	0.297
Tc21	0.019	-0.014	-0.101	-0.04	-0.186	0.262	0.138	0.378	0.108	-0.216
Tc22	0.019	-0.019	-0.104	-0.031	-0.158	0.208	0.187	0.241	0.175	-0.42
Tc23	0.019	-0.015	-0.126	-0.007	-0.07	0.243	0.287	0.132	0.028	-0.67
Tc24	0.019	-0.038	-0.122	-0.012	0.017	0.236	0.256	0.127	-0.08	-0.568
Tc25	0.019	-0.034	-0.124	0.028	0.05	0.223	0.265	-0.041	-0.039	-0.172
Tc26	0.018	-0.049	-0.131	0.038	0.114	0.237	0.216	0.024	-0.055	-0.15
Tc27	0.019	-0.041	-0.119	0.071	0.144	0.187	0.156	-0.09	-0.008	0.301
Tc28	0.018	-0.046	-0.117	0.067	0.157	0.183	0.142	-0.055	-0.008	0.286
Tc29	0.019	-0.036	-0.087	0.088	0.169	0.05	0.037	-0.12	-0.03	0.683
Tc30	0.019	-0.052	-0.061	0.099	0.193	0.002	-0.078	-0.109	-0.135	0.525

Signal	Component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tc31	0.019	-0.042	-0.058	0.11	0.184	-0.021	-0.11	-0.114	-0.127	0.604
Tc32	0.019	-0.038	-0.059	0.109	0.192	-0.053	-0.099	0.003	-0.042	0.392
Tc33	0.019	-0.033	-0.029	0.152	0.219	-0.082	-0.205	-0.049	0.09	-0.174
Tc34	0.018	0.037	-0.009	0.2	0.164	-0.103	-0.125	0.069	0.274	-0.292
Tc35	0.018	0.041	0.004	0.188	0.13	-0.152	-0.197	0.175	0.395	-0.731
Tc36	0.019	0.007	-0.002	0.119	0.136	-0.23	-0.319	0.288	0.176	-0.744
Tc37	0.017	0.11	-0.052	0.088	-0.028	-0.215	-0.036	0.455	0.042	0.019
Tc38	0.015	0.126	-0.069	0.054	-0.055	-0.238	0.005	0.525	-0.113	0.153
Tc39	0.015	0.13	-0.078	0.031	-0.08	-0.242	0.012	0.487	-0.176	0.249
Tc40	0.018	0.066	-0.091	-0.157	0.009	-0.147	-0.136	0.206	-0.263	0.139
Tc41	0.017	0.103	-0.049	-0.111	0.027	-0.016	-0.104	-0.108	-0.286	0.037
Tc42	0.016	0.125	-0.025	-0.063	0.025	0.066	-0.031	-0.24	-0.154	-0.055
Tc43	0.015	0.135	-0.001	-0.038	0.057	0.157	-0.058	-0.309	-0.245	-0.24
Tc44	0.018	0.01	-0.009	-0.186	0.141	0.12	-0.347	-0.176	-0.467	-0.582
Tc45	0.018	0.072	0.094	-0.113	0.156	0.228	-0.038	0.116	-0.324	-0.101
Tc46	0.016	0.113	0.119	-0.033	0.113	0.276	0.052	0.05	-0.21	0.128
Tc47	0.014	0.133	0.135	0.009	0.096	0.285	0.135	0.059	-0.022	0.202
Tc48	0.018	0.059	0.151	-0.079	0.125	0.2	0.133	-0.012	0.134	0.277
Tc49	0.018	-0.023	0.152	-0.119	0.151	0.131	0.019	-0.014	0.373	0.009
Tc50	0.018	-0.034	0.154	-0.108	0.122	0.118	-0.036	-0.04	0.415	-0.036
Tc51	0.018	-0.048	0.155	-0.045	0.052	0.027	0.067	0.284	0.323	0.127
Tc52	0.018	-0.053	0.142	-0.001	-0.027	0.018	0.12	0.405	0.257	0.135
Tc53	0.018	-0.056	0.136	-0.005	-0.056	0.01	0.08	0.416	0.289	0.121
Tc54	0.019	-0.041	0.073	0.039	-0.133	0.047	-0.192	-0.069	0.261	-0.367
Tc55	0.02	-0.026	0.048	0.056	-0.16	0.018	-0.188	-0.201	0.175	-0.182
Tc56	0.019	0.051	0.049	0.133	-0.163	0.028	0.018	-0.389	0.295	-0.098
Tc57	0.017	0.087	0.048	0.154	-0.178	0.05	0.125	-0.435	0.355	0.215
Tc58	0.019	-0.024	-0.056	-0.057	-0.195	-0.14	0.007	-0.089	0.069	0.517
Tc59	0.018	0.064	-0.028	0.068	-0.202	-0.016	0.099	-0.191	0.2	0.68
Tc60	0.017	0.084	0.045	0.182	-0.14	0.103	0.082	-0.394	0.237	-0.091



ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงตัวเลขและสถิติด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

กรณีตัวอย่างนี้เป็นกรณีวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นต้นของการศึกษาความสัมพันธ์ข้อมูลการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ (กรณีอื่นใช้หลักการเดียวกัน) ผู้วิจัยเลือกผลการวัดในช่วงวินาทีที่ 20 ถึงวินาทีที่ 40 มาวิเคราะห์ผล โดยนำข้อมูลเข้ามาไว้ยังโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางสถิติ ดังรูปที่ ง.1 โดยที่ MCavg เป็นความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกซึ่ง capacitive เป็นค่าสัญญาณไฟฟ้าเฉลี่ยที่วัดด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ ณ จุดเวลาต่าง ๆ (time) ขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงได้ดังต่อไปนี้

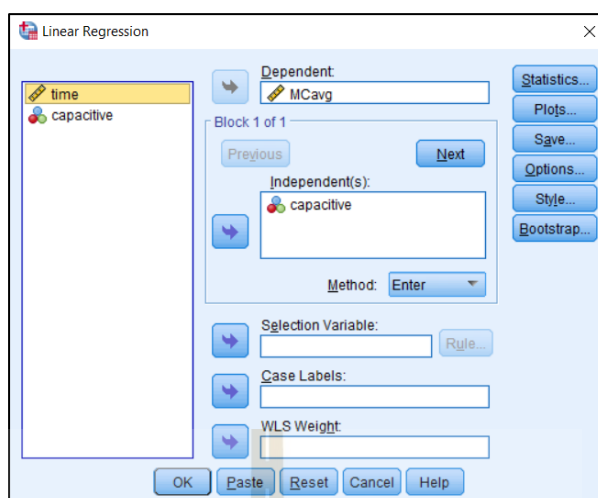
ขั้นตอนที่ 1 เลือก Analyze ที่แถบเมนูบาร์ จากนั้นเลือก Regression และเลือก Linear ซึ่งโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ง.1 ในส่วนของ Dependent ให้ระบุตัวแปรตามที่ศึกษา (ในที่นี้คือ MCavg) และส่วนของ Independent(s) ให้ระบุตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา (ในที่นี้คือ capacitive) โดยผู้วิจัยเลือกวิธีการนำตัวแปรทุกตัวเข้าสู่สมการเชิงเส้นด้วยวิธี Enter method ดังรูปที่ ง.2

	MCavg	time	capacitive
1	9.35	20	581.33
2	9.35	21	581.33
3	9.35	22	581.33
4	9.35	23	581.67
5	9.35	24	581.33
6	9.35	25	581.33
7	9.35	26	581.00
8	9.35	27	580.67
9	9.35	28	580.67
10	9.35	29	581.00
11	9.35	30	581.00
12	9.35	31	581.67
13	9.35	32	581.33
14	9.35	33	582.00
15	9.35	34	581.67
16	9.35	35	582.00
17	9.35	36	582.67
18	9.35	37	582.33
19	9.35	38	582.33
20	9.35	39	582.67
21	9.35	40	582.33
22	13.32	20	560.33
23	13.32	21	560.00
24	13.32	22	559.33
25	13.32	23	559.67
26	13.32	24	560.33
27	13.32	25	560.33

The Linear Regression dialog box shows:

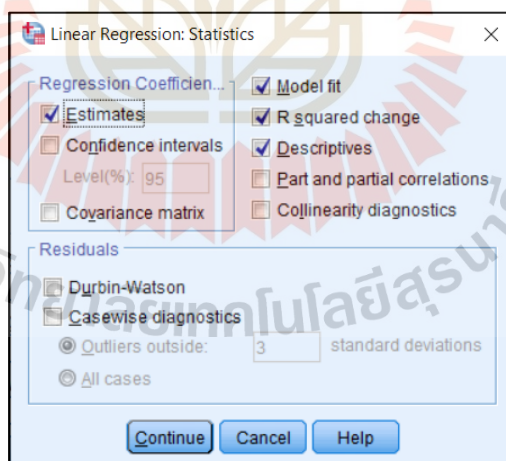
- Dependent: MCavg
- Independent(s): capacitive
- Method: Enter
- Buttons: OK, Paste, Reset, Cancel, Help

รูปที่ ง.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย



รูปที่ ง.2 การระบุตัวแปรที่ใช้สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์

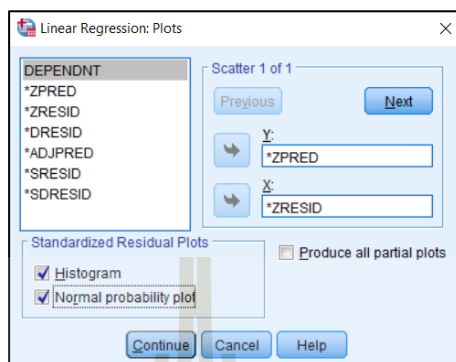
ขั้นตอนที่ 2 เลือก Statistics เพื่อกำหนดให้โปรแกรมแสดงค่าที่ต้องการทราบ ดังรูปที่ ง.3 ซึ่งผู้วิจัยเลือกให้แสดงค่าพารามิเตอร์ของสมการเชิงเส้นที่ได้จากการประมาณของโปรแกรม SPSS และค่าทางสถิติอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ผล



รูปที่ ง.3 การกำหนดการแสดงผลทางสถิติ

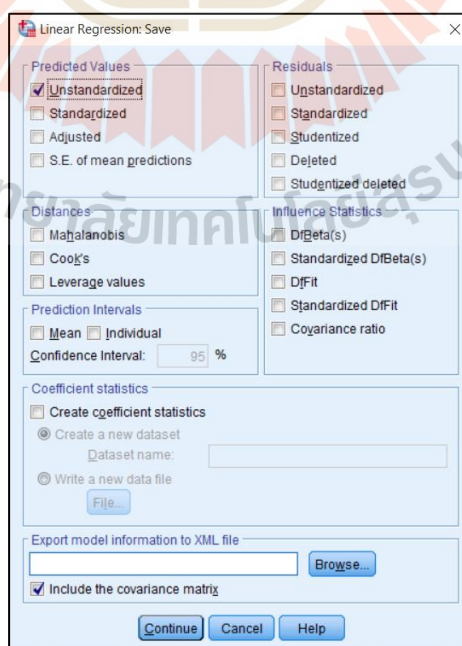
ขั้นตอนที่ 3 หากผู้ศึกษาต้องการดูการกระจายตัวของข้อมูลและตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลเพิ่มเติม สามารถเลือกในส่วนของ Plot เพื่อเลือก Plot แกน Y เป็น ZPRESID และแกน X เป็น ZPRED สำหรับการตรวจสอบผลลัพธ์ของ Scatter Plot ระหว่าง Regression Standardize Residual กับ Regression Standardize Predicted Value นอกจากนี้ในส่วนของ Standardize

Residual Plots สามารถที่จะตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลจากการเลือกให้แสดง Histogram และ Normal probability plot ได้ ดังรูปที่ ๓.4

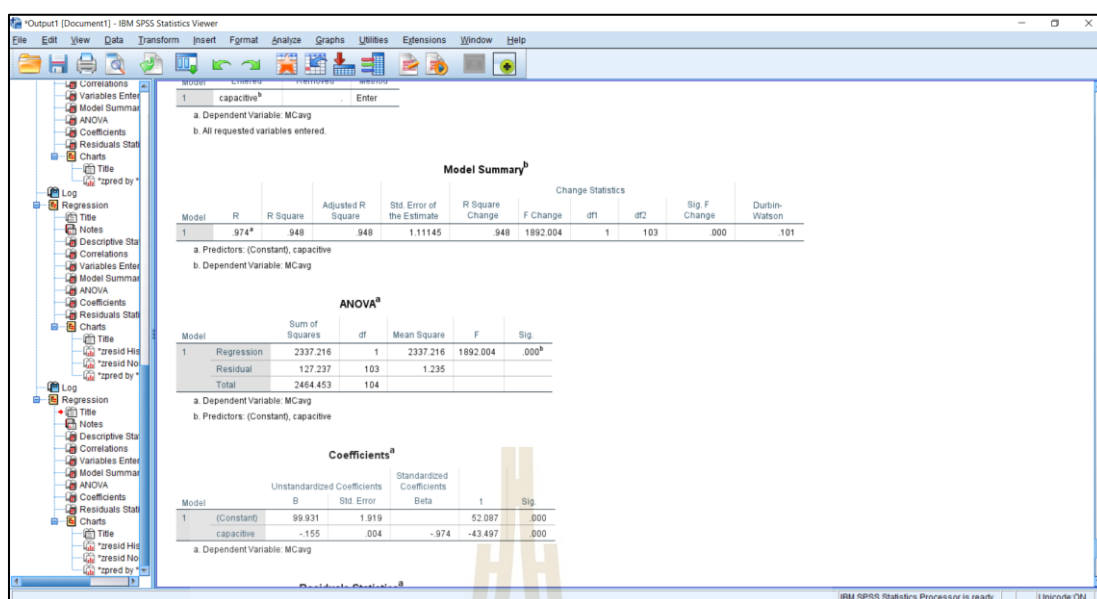


รูปที่ ๓.4 การตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล

ขั้นตอนที่ 4 เลือก Save เพื่อบันทึกค่าผลการทำนายความขึ้นซ้ำแบบเลือกที่อุณหภูมินั้น ๆ หากต้องการผลลัพธ์ไปใช้งาน โดยผู้วิจัยเลือกค่า Unstandardized (ดังรูปที่ ๓.5) สำหรับใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์และความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายในลำดับถัดไป จากนั้นจึงกด Continue และเลือก OK เพื่อแสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ดังรูปที่ ๓.6



รูปที่ ๓.5 การบันทึกค่าผลลัพธ์จากการพยากรณ์ความขึ้นซ้ำด้วยแบบจำลองสมการเชิงเส้น



รูปที่ ๑.6 หน้าต่างผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ SLR ด้วย IBM SPSS Statistics

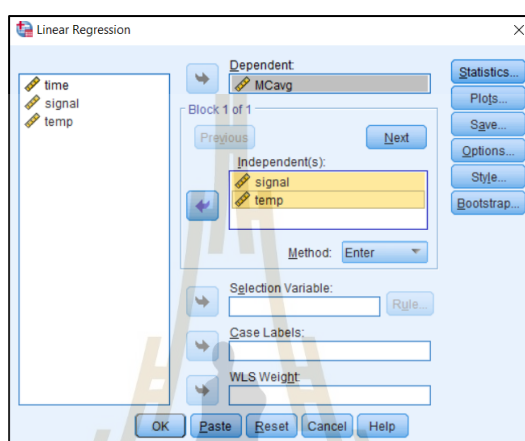
๑.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ

ในการวิเคราะห์ผลการทำนายความชื้นข้าวเปลือกจากการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ซึ่งรับค่าสัญญาณไฟฟ้าร่วมกับอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาสมการทำนายความชื้นด้วยเทคนิค MLR โดยศึกษาผลของการทำนายความชื้นข้าวเปลือก (ตัวแปรตาม 1 ตัว) และใช้ตัวแปรทำนายหรือตัวแปรต้น มากกว่า 1 ตัว คือ อุณหภูมิของข้าวเปลือก และสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

	MCavg	time	signal	temp	var	var
88	23.10	23.00	506.67	40.00		
89	23.10	24.00	506.33	40.00		
90	23.10	25.00	506.33	40.00		
91	23.10	26.00	507.00	40.00		
92	23.10	27.00	507.00	40.00		
93	23.10	28.00	506.67	40.00		
94	23.10	29.00	506.33	40.00		
95	23.10	30.00	505.67	40.00		
96	23.10	31.00	505.67	40.00		
97	23.10	32.00	505.67	40.00		
98	23.10	33.00	505.67	40.00		
99	23.10	34.00	505.00	40.00		
100	23.10	35.00	504.67	40.00		
101	23.10	36.00	504.67	40.00		

รูปที่ ๑.7 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ

ขั้นตอนที่ 1 นำเข้าข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ MLR (แสดงดังรูปที่ ง.7) MCavg คือ ความขึ้น
 เหลี่ยของข้าวเปลือกซึ่งได้มาจากวิธีอบลมร้อนอุณหภูมิคงที่, time คือ จุดเวลาที่ทำการเก็บค่า
 สัญญาณไฟฟ้า (signal) และ temp คือ อุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะทำการวัด จากนั้นจึงเลือก
 Analyze ที่แถบเมนูบาร์ เลือก Regression และเลือก Linear จะมีหน้าต่างโปรแกรมสำหรับระบุตัว
 แปรที่ต้องการศึกษาดังรูปที่ ง.8 ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ ง.8 การระบุตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ MLR

Model Summary^a

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.895 ^a	.802	.801	2.12825	.802	1056.175	2	522	.000

a. Predictors: (Constant), temp, signal
 b. Dependent Variable: MCavg

ANOVA^a

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
1	Regression	9507.775	2	4753.887	1056.175	.000 ^b
	Residual	2364.371	522	4.529		
	Total	11932.146	524			

a. Dependent Variable: MCavg
 b. Predictors: (Constant), temp, signal

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		t	Sig.
		B	Std. Error	Beta			
1	(Constant)	91.746	1.896			48.393	.000
	signal	-.130	.003	-.901		-45.121	.000
	temp	-.124	.007	-.368		-18.450	.000

a. Dependent Variable: MCavg

รูปที่ ง.9 หน้าต่างผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ MLR ด้วย IBM SPSS Statistics

ขั้นตอนที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุ สำหรับโปรแกรม IBM SPSS Statistics
 จะใช้ฟังก์ชันเดียวกับการวิเคราะห์แบบ SLR ดังนั้นเมื่อตัวแปรทำนาย (ตัวแปรต้น) มีมากกว่า 1 ตัว

ผู้วิจัยจึงเลือกนำเข้าตัวแปรต้นไปยังส่วนของ Independent ดังรูปที่ 8 โดยในส่วนอื่นจะใช้ค่ามาตรฐานของโปรแกรมและกำหนดในรูปแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์ SLR ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ MLR แสดงดังรูปที่ ง.9

ง.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้สำหรับการสกัดตัวแปรจำนวนมาก เพื่อศึกษาถึงการลดมิติของข้อมูลให้เหลือน้อยลง ในขณะที่การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis, FA) เป็นการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมาประมวลผลในลำดับถัดไป โดยมักจะพบเห็นวิธีการดังกล่าวถูกใช้สำหรับการศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร การลดจำนวนตัวแปร หรือแม้แต่การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ใหม่ซึ่งอาจซ่อนอยู่ในชุดข้อมูลที่ถูกวิเคราะห์ สำหรับโปรแกรม IBM SPSS Statistics สามารถที่จะวิเคราะห์ PCA/FA ได้ในขั้นตอนเดียว โดยมีวิธีการดังนี้

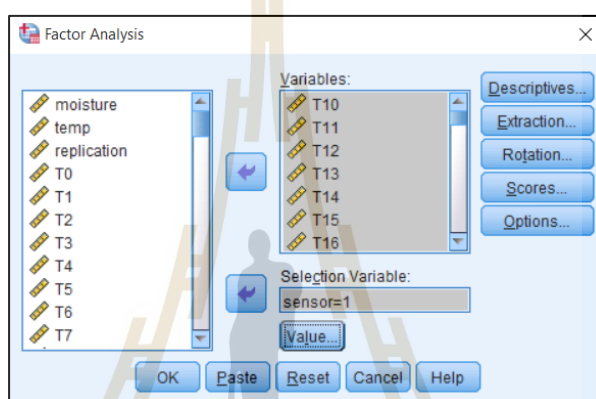
	sensor	moisture	temp	replication	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
1	2	9.37	40	1	581	579	580	580	578	578	578	578	578	581	580	580	580
2	1	9.33	40	2	587	586	586	586	585	585	585	585	585	585	585	585	585
3	1	9.34	40	3	581	581	581	581	580	580	579	580	579	579	579	579	579
4	2	9.08	50	1	580	581	581	581	581	584	584	583	583	584	583	582	581
5	1	9.14	50	2	582	581	582	585	585	585	584	584	583	584	584	585	585
6	1	9.13	50	3	580	581	585	585	583	584	582	582	582	582	582	584	584
7	2	9.06	60	1	556	555	555	554	555	555	555	555	555	555	556	556	557
8	1	9.18	60	2	581	582	582	581	582	581	581	581	581	581	581	581	581
9	1	8.97	60	3	570	569	567	565	563	561	560	559	558	557	557	556	556
10	2	9.08	70	1	577	577	577	577	577	578	578	577	576	575	575	576	575
11	1	9.36	70	2	558	558	555	552	549	546	543	542	540	538	535	534	533
12	1	9.11	70	3	576	576	576	574	574	573	572	571	570	569	568	567	567
13	2	7.57	80	1	576	574	574	574	574	574	574	574	574	574	575	577	576
14	1	8.70	80	2	580	582	579	578	578	578	579	580	580	580	579	580	580
15	1	7.56	80	3	582	581	581	581	581	581	581	581	581	581	582	583	583
16	2	13.33	40	1	559	559	558	558	559	557	557	557	557	557	560	558	558
17	1	13.28	40	2	557	558	558	558	559	560	560	559	559	559	559	559	559
18	1	13.35	40	3	566	565	564	565	565	565	566	566	566	566	566	567	565
19	2	12.97	50	1	556	557	557	555	556	555	555	554	554	555	554	554	555
20	1	13.05	50	2	557	556	558	558	560	559	559	559	560	558	558	558	557
21	1	12.96	50	3	553	553	553	553	554	554	554	553	552	552	552	552	551
22	2	12.81	60	1	548	548	548	548	547	547	546	545	544	544	544	544	543
23	1	13.01	60	2	549	549	549	549	548	548	548	548	548	547	547	547	546
24	1	12.53	60	3	541	540	539	537	535	534	533	532	532	531	531	532	531
25	1	12.93	70	2	548	547	547	546	546	545	544	543	542	541	540	540	540
26	1	12.22	70	3	543	543	543	543	548	548	547	547	546	546	546	546	546
27	2	9.91	80	1	502	502	503	502	503	504	505	503	501	501	501	501	500

รูปที่ ง.10 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

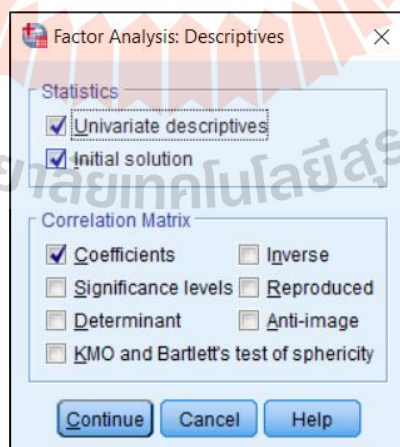
ขั้นตอนที่ 1 ที่แถบเมนูบาร์ เลือก Analyze จากนั้นไปที่ Dimension Reduction เลือก Factor โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Factor Analysis เพื่อเล็งความผันผวนของข้อมูลจากการวัดในช่วงแรกและลดข้อผิดพลาดจากการลดลงของอุณหภูมิข้าวเปลือกเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในการศึกษานี้ผู้วิจัยจึงเลือกข้อมูลการวัดในระหว่างวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 60 มาใช้สำหรับการวิเคราะห์ PCA ดังรูปที่ ง.11 โดยกำหนด Selection Variable เป็นตัวแปร sensor = 1 (ตามการ

แบ่งกลุ่มข้อมูล, 1 คือ Calibration set, 2 คือ Validation set) ทั้งนี้ ข้อมูล T10 ถึง T60 ในภาพ เป็นเพียงตัวอย่างของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน

ขั้นตอนที่ 2 ในหน้าของ Descriptives จะมีคำสั่งย่อยอยู่ 2 ส่วน คือ Statistics และ Correlation matrix ดังรูปที่ ง.3.3 ซึ่งผู้วิจัยเลือกคำสั่งย่อย Univariate descriptives เพื่อให้แสดงผลลัพธ์ของสถิติเชิงพรรณนา (Mean, Standard Deviation) ของตัวแปรแต่ละตัวที่นำมาวิเคราะห์, Initial Solution สำหรับแสดงค่าร่วมกันก่อนหมุนแกนปัจจัย และเลือก Coefficients เพื่อแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของทุกคู่ตัวแปร



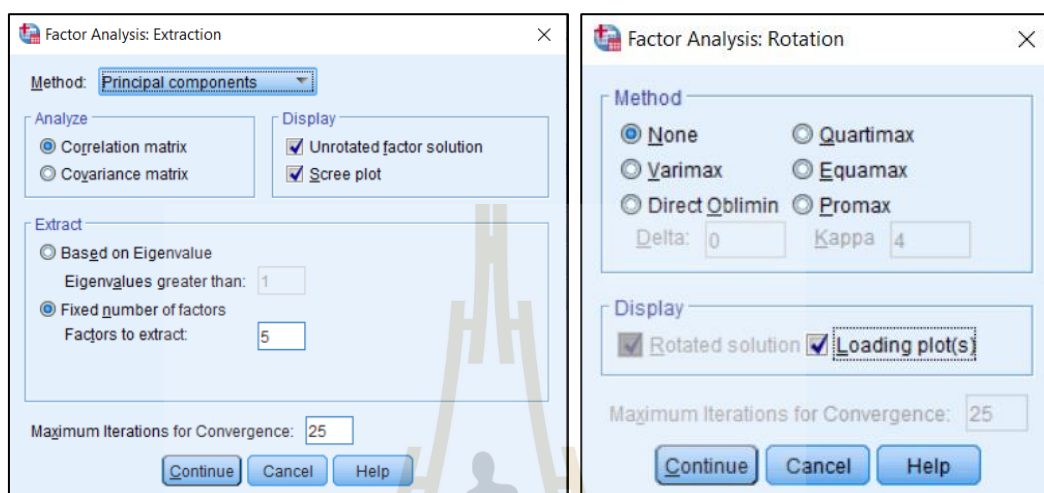
รูปที่ ง.11 การเลือกตัวแปรและกำหนดชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก



รูปที่ ง.12 การเลือกคำสั่งแสดงค่าทางสถิติประกอบการพิจารณาข้อมูล

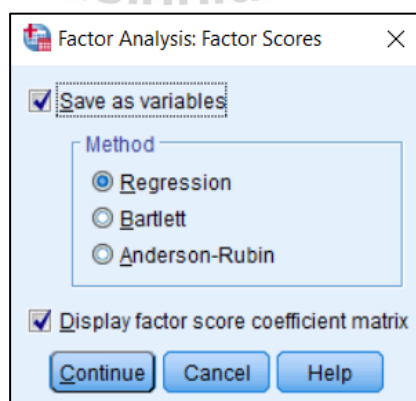
ขั้นตอนที่ 3 เลือก Extraction เพื่อเลือกวิธีการสกัดปัจจัย โดยวิธีการที่เป็นค่ามาตรฐานของโปรแกรม SPSS จะใช้วิธี PCA ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้โปรแกรมแสดงผลของ Scree plot

ซึ่งแสดงค่าไอเก็นแวลิว (Eigenvalue) ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญของข้อมูลที่องค์ประกอบหลักนั้น ๆ สามารถอธิบายได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ระบุ Number of Factor เป็น 5 เพื่อดูความแปรปรวนที่แต่ละองค์ประกอบหลักสามารถเก็บรวบรวมได้



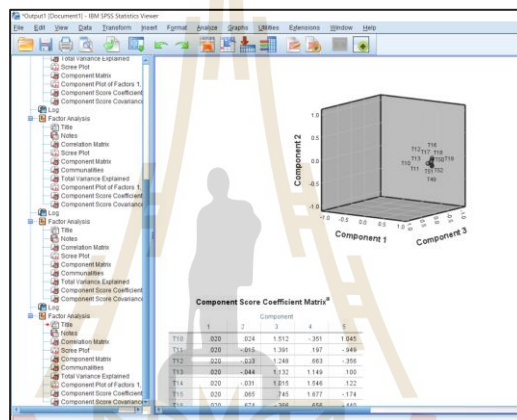
รูปที่ ง.13 การสกัดปัจจัยและเลือกวิธีหมุนแกนองค์ประกอบ

ขั้นตอนที่ 4 ในส่วนของ Rotation ผู้วิจัยเลือกใช้ None เป็นกรณีที่ไม่มีการหมุนแกนองค์ประกอบ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวเพียงพอต่อการดึงลักษณะของข้อมูลออกมาอย่างเด่นชัด และกำหนดให้แสดงกราฟน้ำหนักองค์ประกอบของตัวแปรต่าง ๆ (Loading Plot(s)) เพื่อใช้ในการจัดหมู่และดูความโดดเด่นของตัวแปรนั้น ๆ ในแต่ละแกนองค์ประกอบ (ยุทธ ไทยวรรณ, 2563) ตัวอย่างของผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ ง.15



รูปที่ ง.14 การกำหนดให้โปรแกรมเก็บค่าขององค์ประกอบที่คำนวณได้เป็นตัวแปรใหม่

ขั้นตอนที่ 5 เลือกคำสั่ง Factor Score ซึ่งเป็นการกำหนดให้โปรแกรมเก็บค่าขององค์ประกอบที่คำนวณได้เป็นตัวแปรใหม่ (ในที่นี้คือ PC) โดยเลือก Save as variables และเลือก Display factor score coefficient matrix โดยที่ Factor Score Coefficient Matrix จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักองค์ประกอบ (W) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า Standardize ของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดของงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ จำนวน PC ที่เหมาะสมถูกพิจารณาจากความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของชุดข้อมูลเดิมได้ไม่ต่ำกว่า 90% ซึ่ง PC เหล่านี้ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ MLR ในลำดับถัดไป รูปที่ ง.15 และ ง.16 แสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA จากโปรแกรม IBM SPSS Statistics



รูปที่ ง.15 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค PCA

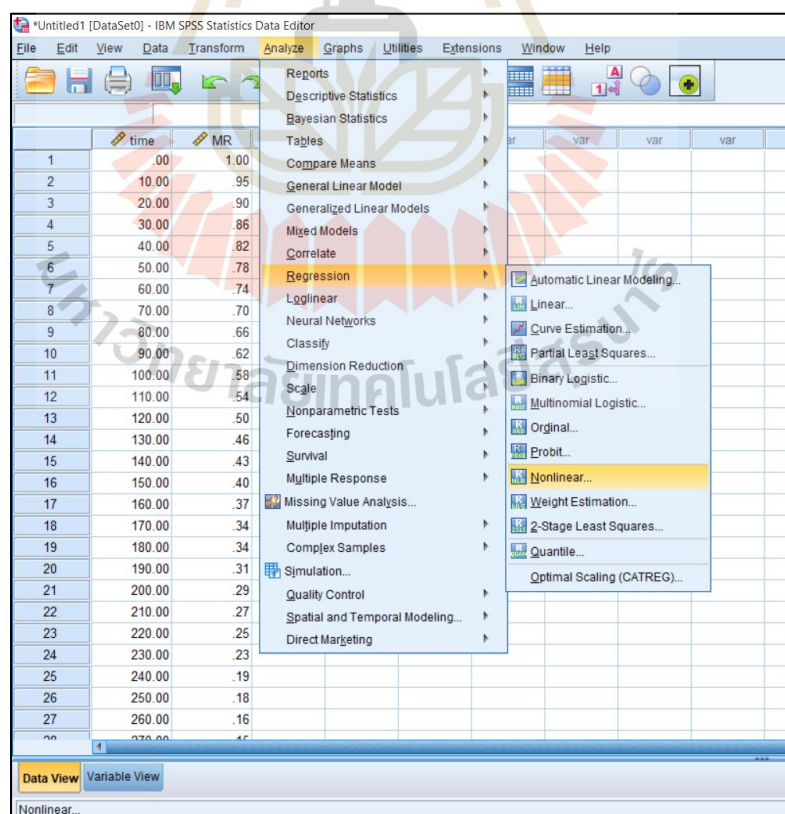
	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1	582	583	583	583	582	580	581	580	580	580	1.63603	-1.01476	-.60579	.46524	-.34715
2	586	586	587	587	587	586	585	585	585	585	1.80269	-1.03562	-.36783	10448	82004
3	581	582	580	580	579	580	581	581	581	581	1.62307	-1.05749	-.40659	-15810	53403
4	583	583	583	582	581	581	581	581	581	581	1.87533	-.39263	-.03259	58879	16033
5	583	584	584	584	583	582	581	581	581	582	1.69378	-.40793	.09236	-42560	13642
6	583	583	583	584	584	586	585	584	585	586	1.72930	-.34682	-.20529	64428	55553
7	570	571	570	570	570	570	571	571	571	571	1.18364	.41108	-.98851	-.52358	-.47920
8	581	581	581	581	581	581	581	581	581	581	1.62147	.31320	.01861	47820	-.00223
9	574	574	573	574	574	574	574	574	574	574	1.25888	.57685	-.184292	-.30124	1.03285
10	577	577	576	575	575	575	575	575	575	575	1.45900	.94734	.30169	81166	80884
11	558	559	558	559	558	558	559	559	559	559	1.31627	-2.83176	-2.29114	-1.01352	
12	572	572	573	573	573	573	572	572	572	572	1.20523	1.12829	-.89140	37294	-2.54555
13	579	579	580	580	581	578	578	578	578	578	1.53448	1.67786	.34251	23372	40214
14	578	577	578	578	578	578	578	578	578	578	1.55575	1.65657	.54152	73696	-.10411
15	581	581	581	583	584	583	584	585	582	581	1.68192	1.67382	.56848	30830	26109
16	557	557	556	556	557	556	557	556	556	557	.90580	-1.26838	-.00890	64551	52251
17	556	557	556	556	557	556	556	556	557	558	.93098	-1.20420	.06636	19195	1.59728
18	565	565	565	565	565	566	565	564	564	563	1.14287	-1.19860	-.15085	39667	31563
19	552	552	552	552	552	552	552	553	554	554	.77436	-.62202	.27863	63887	-.18493
20	556	556	556	557	557	557	558	558	558	556	.89590	-.57894	.18851	-.01065	-.47333
21	550	551	550	550	549	549	549	550	551	550	.70200	-.65970	.39786	85816	-.00136
22	544	544	544	544	544	544	545	544	544	544	.38365	.14878	-.35989	07983	-2.65503
23	544	544	544	544	544	544	544	544	544	545	.42039	.04263	.25731	15628	-2.14161
24	547	548	548	548	548	548	548	548	548	548	.40371	.37018	-.156750	.91487	-1.87705
25	539	539	540	540	539	539	539	538	538	539	.26470	.70627	.36180	-.18736	-.29967
26	546	546	545	545	545	545	545	545	545	547	.51962	.79809	.45713	56823	-.28653
27	546	547	547	549	546	546	544	544	546	547	-.74781	1.16298	.72496	-.57882	-.20842

รูปที่ ง.16 ผลลัพธ์ขององค์ประกอบหลักจากการวิเคราะห์ PCA

หมายเหตุ: การวิเคราะห์หาค่าตัวแปร (FA) เป็นการศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ซึ่งจะทำให้แต่ละตัวแปรที่นำมาศึกษานั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน ตัวแปรซึ่งถูกลดมิติลงแล้วจะถูกพล็อตลงบนแกนปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ผู้วิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ถึงโครงสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ สำหรับเทคนิคในการวิเคราะห์ FA ด้วย SPSS ใช้หลักการเดียวกับวิธีการ PCA เพียงแต่ในขั้นตอนแรก ให้ระบุตัวแปรที่สนใจศึกษาทั้งหมดเข้าสู่การสกัดปัจจัย

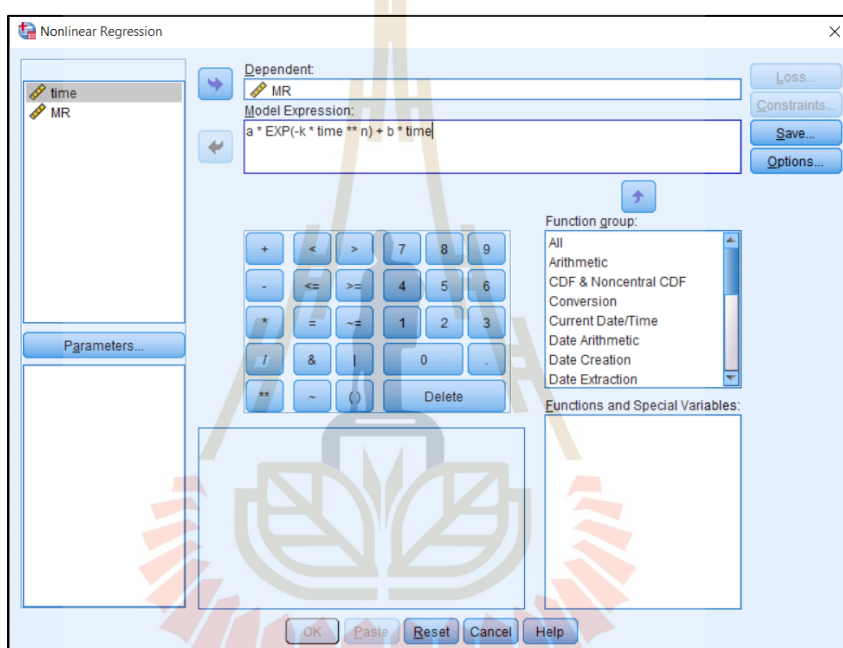
ง.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทางทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกสำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลม
สืบเนื่องจากรูปแบบสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) ซึ่งปรากฏในตารางที่ 3.1 สมการทั้งหมดถูกใช้สำหรับหาค่าตัวแปรของแบบจำลองเอมพิริคัล โดยผู้วิจัยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางสถิติ (SPSS) ผ่านฟังก์ชัน Nonlinear ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ณ เวลาต่าง ๆ (time) จากข้อมูลการทดลอง มาใส่ในโปรแกรม SPSS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข จากนั้นเลือก Analyze ที่แถบเมนูบาร์ เลือก Regression และเลือก Nonlinear สำหรับการฟิตข้อมูลดังรูปที่ ง.17

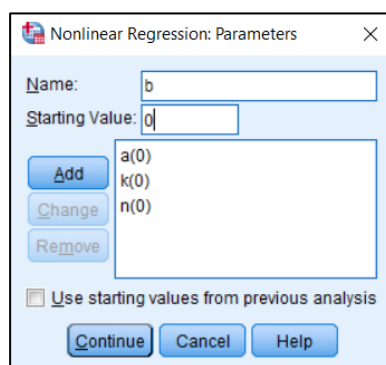


รูปที่ ง.17 การเลือกใช้ฟังก์ชัน Nonlinear สำหรับหาตัวแปรในแบบจำลองเอมพิริคัล

ขั้นตอนที่ 2 นำเข้าตัวแปรตามสำหรับใช้เปรียบเทียบข้อมูลกับแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบต่าง ๆ ในช่อง Dependent ส่วนช่อง Model Expression ให้ระบุสมการเอมพิริคัลที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบตัวแปรเข้าไป ดังรูปที่ ง.18 ในตัวอย่างนี้คือสมการอเบซันข้างบนของ Midilli et al. จากนั้นจึงกำหนดตัวแปรเริ่มต้นสำหรับการสุ่มตัวเลข โดยเลือกที่ Parameters จะมีหน้าต่างให้ระบุตัวแปรและค่าเริ่มต้นดังรูปที่ ง.19 ในสมการของ Midilli et al. จะมีตัวแปรที่ต้องการประมาณค่าคือ a , k , n และ b ผู้วิจัยจึงทำการระบุชื่อตัวแปร โดยกำหนดค่าเริ่มต้นในการสุ่มเป็น 0 จึงกด Add ตัวแปรจนครบถ้วนก่อนที่จะเลือก Continue เพื่อกำหนดเงื่อนไขให้กับโปรแกรมในลำดับถัดไป

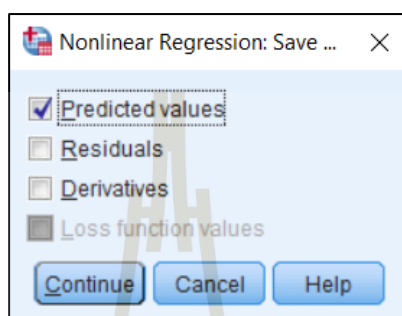


รูปที่ ง.18 การระบุตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

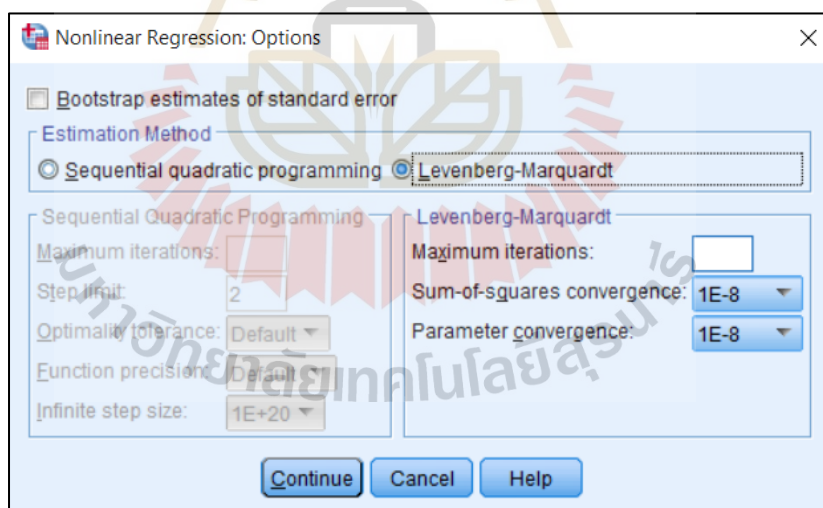


รูปที่ ง.19 การกำหนดตัวแปรที่ต้องการทราบค่าและกำหนดค่าเริ่มต้นของการสุ่มตัวเลข

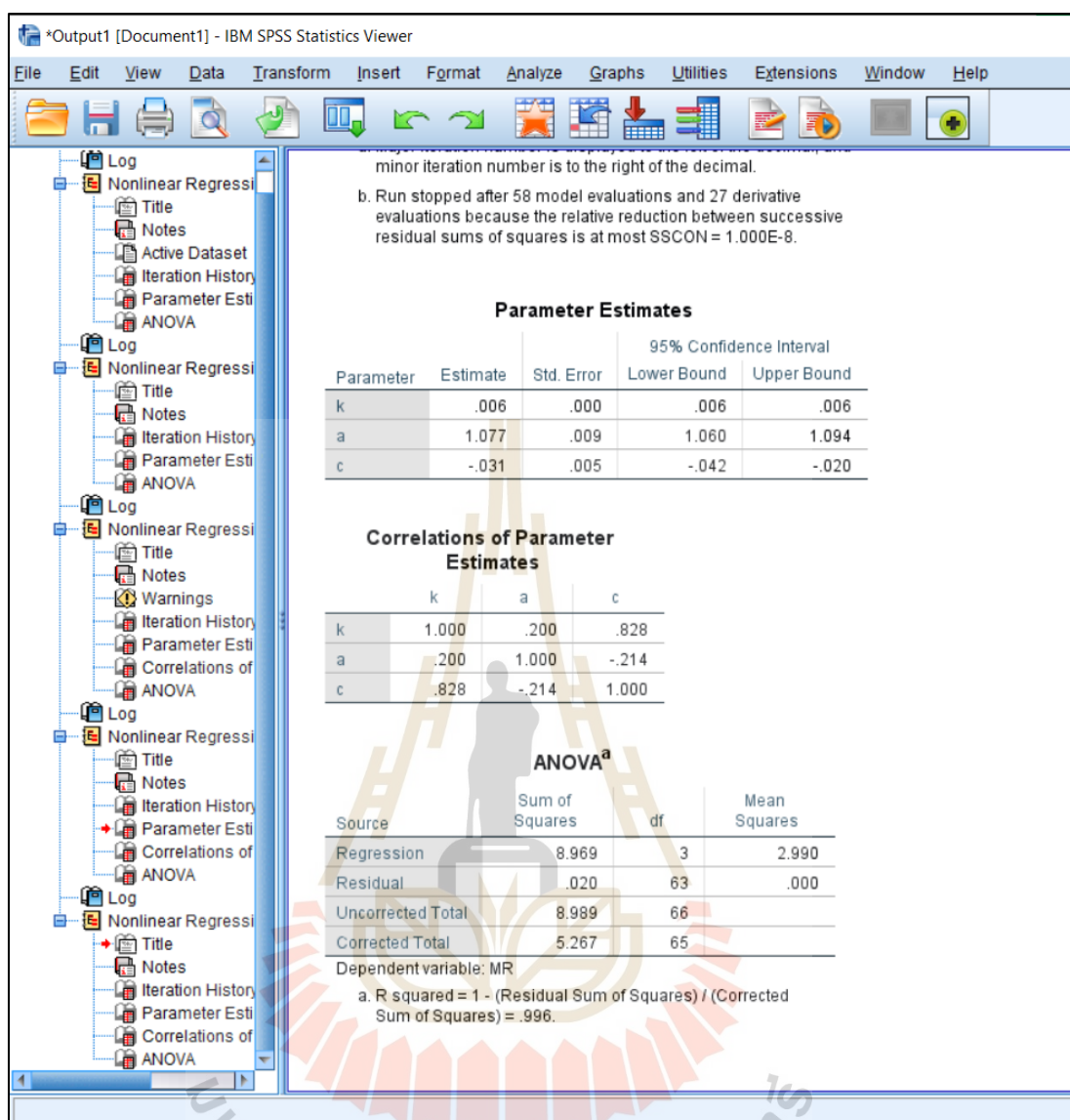
ขั้นตอนที่ 3 เลือก Save ค่า Predicted values เพื่อความสะดวกในการนำค่าที่ได้ไปใช้สำหรับทวนสอบแบบจำลองต่อไป (รูปที่ ง.20) จากนั้นเลือก Continue และกด OK เพื่อให้โปรแกรมประมวลผล โดยในส่วนของ Options งานวิจัยนี้เลือกใช้ Estimation Method: Levenberg-Marquardt ซึ่งเป็นอัลกอริทึมสำหรับหาผลเฉลยที่เป็นค่ามาตรฐานของโปรแกรม (รูปที่ ง.21) ตัวอย่างผลเฉลยของการประมาณค่าตัวแปร แสดงได้ดังหน้าต่างผลลัพธ์ของโปรแกรมดังรูปที่ ง.22



รูปที่ ง.20 การบันทึกผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากสมการเอมพีริคัล



รูปที่ ง.21 วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองเอมพีริคัล



รูปที่ ง.22 ผลเฉลยของการประมาณค่าตัวแปรด้วยวิธี Levenberg-Marquard



ภาคผนวก จ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, (2021). การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13 : Electrical Engineering Network 2021 (EENET2021). ออนไลน์, 12-14 พฤษภาคม 2564.

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช. (2564). ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2565. (อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

Study of Relationship Between Electrical Property and Moisture Content of

KHAO DAWK MALI 105 Paddy

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว^{1*}, เทวรัตน์ ศรีอำนาจ² และ กระวี ศรีอำนาจ³¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โทรศัพท์ 06-1114-7950 E-mail: *aphisik.pdk@gmail.com, krawee@sut.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โทรศัพท์ 0-4422-4583 E-mail: tawarat@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกในช่วง 9.20 %w.b. - 22.75 %w.b. กับสัญญาณทางไฟฟ้าที่อ่านค่ามาจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน ที่อุณหภูมิข้าวเปลือก 40 50 60 70 และ 80°C โดยนำค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือก ที่แต่ละอุณหภูมิ พบว่า ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และค่อนข้างคงที่ในช่วง 50 - 80°C ส่วนค่าคงที่ของความสัมพันธ์มีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 70°C และค่อนข้างคงที่ในช่วง 70 - 80°C โดยที่สมการทำนายความชื้นข้าวเปลือกแม่นยำสูงในย่านการวัดที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C (Adjust R² = 0.958, 0.950, 0.958 และ RMSEC = 0.990, 1.060, 0.910 ตามลำดับ) นอกจากนี้ อุณหภูมิการวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ 40 และ 50°C ให้ผลลัพธ์ที่ค่า Adjust R² = 0.800 และ 0.868 และ RMSEC = 2.156 และ 1.785 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ความชื้นข้าวเปลือก, การวัด, เซ็นเซอร์วัดความชื้นแบบต้านทาน

Abstract

This research proposes the study of relationship between the electrical signal from the resistance moisture sensor and the moisture of paddy in range of 9.2 %w.b. - 22.75 %w.b. under the paddy temperature at 40, 50, 60, 70 and 80°C. The electrical signal from the experiment is analyzed by simple linear regression technique to determine the correlation with the moisture content of paddy at each temperature. The result found that the electrical signal was inversely related to the

moisture content of the paddy. The trend of regression Angsana New # 14 increase in the 40 - 50°C range and almost constant in the 50 - 80°C range of temperature. The constant value of regression are decrease over the 40 - 70°C range and slightly change in the 70 - 80°C range of temperature. The prediction equation of moisture content in paddy was highly accurate in the measuring ranges at temperatures of 60, 70 and 80°C (Adjust R² = 0.958, 0.95, 0.958 and RMSEC = 0.99, 1.060, 0.910 respectively). Additionally, temperatures of 40 and 50°C yielded results at Adjust R² = 0.800 and 0.868 and RMSEC = 2.156 and 1.785 respectively.

Keywords: paddy moisture content, measurement, resistance moisture sensor

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีจุดเด่นทางด้านเกษตรกรรมจากการที่มีภูมิประเทศที่เอื้ออำนวยต่อการเพาะปลูก ส่งผลให้ในแต่ละปีมีผลผลิตทางการเกษตรถูกส่งออกไปยังต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะข้าวหอมมะลิของไทย ในช่วงเดือน มกราคม-มิถุนายน 2563 พบว่ามีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 25.46 พันล้านบาท [1] ข้าวจึงเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวใหม่จะยังคงมีความชื้นสูง จำเป็นต้องทำการลดความชื้นให้ต่ำลงถึงค่าที่เหมาะสมก่อนนำมาจัดเก็บ เพื่อป้องกันการสูญเสียของผลผลิตที่อาจเกิดขึ้นได้

การวัดความชื้นข้าว เป็นอีกส่วนที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าว แบ่งออกเป็น การวัดโดยตรง ซึ่งจะพบมากในงานวิจัยส่วนใหญ่ จากการนำตัวอย่างข้าวไปอบลดความชื้น ด้วยวิธีการ Hot air oven method ตามมาตรฐานต่างๆ เพื่อคำนวณหาความชื้น

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)



ในข้าวเปลือก อีกวิธีการหนึ่งคือการวัดทางอ้อม ซึ่งอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของข้าวเปลือกมาใช้ในการออกแบบเครื่องมือวัด

ปัจจุบันมีผู้พัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบความชื้นข้าวของเกษตรกรในการขายข้าว ตลอดจนใช้ประเมินความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้ง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Hembirun and Bunyawanichakul [2] ได้พัฒนาระบบการประมาณความชื้นขั้นสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้เซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ สำหรับวัดอากาศอบแห้งข้าว (เซ็นเซอร์ DHT22) และจุดระเหยอากาศออก (เซ็นเซอร์ EE31) เพื่ออ่านและส่งค่าข้อมูล Arduino ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลข้อมูลคุณสมบัติอากาศจนได้ค่าความชื้นขั้นสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีสมดุลมวล Klomkiao, Kuntinungnetanon and Wongkokua [3] ได้พัฒนาการวัดความชื้นข้าวเปลือก ด้วยเซ็นเซอร์แบบ capacitive ชนิดแผ่นขนานโดยใช้สมบัติคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของความชื้น สร้างความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นอยู่กับความชื้นของเซ็นเซอร์ จากผลการกำหนดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างช่วงเวลาและปริมาณความชื้น มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.23% ของความชื้นในช่วง 14% ถึง 20% จากหลักการของมวลจุไฟฟ้า ดังกล่าว Song, Wei, Sun, Lu, and Tao [4] จึงออกแบบเซ็นเซอร์ความชื้นข้าวเปลือกแบบ Capacitive โดยอาศัยการวิเคราะห์สเปกโตรสโกปีอิมพีแดนซ์ไฟฟ้า เพื่อช่วยในการตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกอย่างแม่นยำสำหรับการควบคุมขั้นตอนการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพและลดการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง [5]

จากข้อดีของการพัฒนาระบบการวัดความชื้นที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพการอบแห้งและลดการใช้พลังงานเครื่องอบแห้งได้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าที่รับค่ามาจากเซ็นเซอร์ชนิดความต้านทานกับความชื้นข้าวเปลือกในช่วง 9.2%w.b. - 22.75%w.b. ที่อุณหภูมิ 40°C - 80°C เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลา (Real time) สำหรับวัดความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้งต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับการทดลอง

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองถูกนำมามีความชื้นเริ่มต้นตามสมการที่ 1 โดยใช้การอบไล่ความชื้นข้าวในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาปริมาณน้ำที่คงเดิมให้กับตัวอย่างข้าวเพื่อแปรค่าความชื้นฐานเป็ยกออกเป็น 5 ค่า ได้แก่ 9.20%w.b., 13.15%w.b., 17.12%w.b., 19.56%w.b. และ 22.75%w.b. ตามลำดับ บรรจุข้าวเปลือกที่ผสมน้ำแล้วด้วยกล่องเก็บแบบปิดสนิทไว้

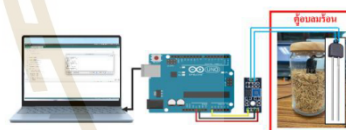
ในห้องเย็นอุณหภูมิ 2 - 5°C เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของความชื้นให้สม่ำเสมอทั้งภาชนะ [6]

$$M_{wb} = \left[\frac{W_{water}}{W_1} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = \frac{W_{water} + W_{wateradd}}{W_{water} + W_{dry} + W_{wateradd}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ M_{wb} คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก, W_{water} คือ มวลของน้ำที่มีอยู่ในข้าวเปลือก, W_1 คือ มวลของข้าวเปลือกก่อนอบไล่ความชื้น, W_2 คือ มวลของข้าวเปลือกหลังอบไล่ความชื้นหรือมวลแห้งของข้าวเปลือก (W_{dry}), $W_{wateradd}$ คือ มวลของน้ำที่เติมให้แก่ข้าวเปลือกสำหรับการเตรียมความชื้น

2.2 การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทาน

การทดลองนี้ใช้โมดูลวัดความชื้นชนิดต้านทาน (Resistance moisture sensor module) ยี่ห้อ diymore ผลิตโดย Worldchips ประเทศจีน โดยทำการต่อเข้ากับบอร์ด Arduino เพื่อรับค่าสัญญาณไฟฟ้า มาแสดงผลที่หน้าจอ Serial monitor ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การต่อเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานเพื่อรับค่าสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 2 การตรวจสอบปริมาณความชื้นข้าวเปลือก

นำข้าวเปลือกความชื้นทั้ง 5 ค่า ใส่ในขวดโหลปิดสนิท (ค่าความชื้นละ 3 ตัวอย่าง) ใส่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวในขวดมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ จากนั้นจึงนำข้าวออกจากตู้อบลมร้อน เปิดฝาออกแล้วใช้เซ็นเซอร์ชนิดต้านทานวัดและเก็บค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ส่งออกมา เป็นเวลา 120 วินาที ดังการทดลองในรูปที่ 1 จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างข้าวหลังการวัดด้วยเซ็นเซอร์ไปอบในตู้อบลมร้อน (รูปที่ 2) เพื่อตรวจสอบความชื้นข้าวที่แท้จริง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)

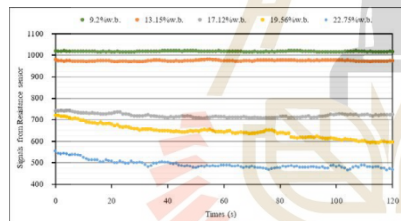


2.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือก

ข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บค่าการทดลอง ถูกนำมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression, SLR) ด้วยโปรแกรม SPSS โดยใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระแบบเลือกทั้งหมดเข้าสมการถดถอยเชิงเส้น (Enter method) เพื่อหาค่าตัวแปรที่ใช้สำหรับการทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือก ที่แต่ละอุณหภูมิ

3. ผลและวิจารณ์

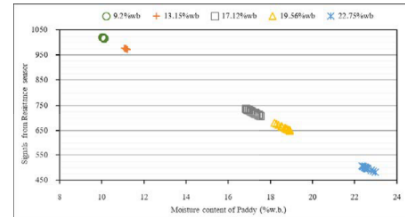
จากการทดลองวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานในช่วงเวลา 120 s พบว่า สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงแรกมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนสัญญาณในช่วงต้น โดยลักษณะของค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เก็บค่าในช่วง 0 - 120 s แสดงดังรูปที่ 3 (พฤติกรรมของสัญญาณมีความคล้ายคลึงกันในแต่ละอุณหภูมิการทดลอง) และเนื่องจากความไม่แน่นอนของสัญญาณไฟฟ้าดังกล่าวที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงทำการเลือกข้อมูลในช่วงวินาทีที่ 20 ถึงวินาทีที่ 40 มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าความชื้นของข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิเป็นลำดับถัดไป



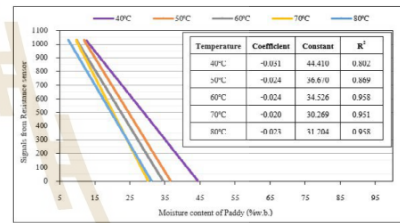
รูปที่ 3 ตัวอย่างสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 60°C

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดโดยเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานกับค่าความชื้นของข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิ พบว่า ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือกจากสมการทำนายที่ทุกอุณหภูมิของข้าวเปลือก รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณไฟฟ้ากับความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60°C จะเห็นได้ว่าเมื่อความชื้นข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ชนิดต้านทานตรวจวัดได้จะมีค่าสูง ในทางกลับกัน หากค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ชนิดต้านทานวัดมีค่าต่ำ ผลของความชื้นข้าวเปลือกที่วัดได้จะมีค่าสูง โดยการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80°C มีแนวโน้มของ

ความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์แบบ SLR แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณทางไฟฟ้ากับความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60°C



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณทางไฟฟ้ากับความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 40 - 80°C

จากผลการทดลองในรูปที่ 5 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือความชันของกราฟ มีค่าน้อยกว่าศูนย์ทุกอุณหภูมิที่ทดลอง ซึ่งให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ จะลดลงด้วยสัดส่วนคงที่ เมื่อค่าความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิการทดลองที่แตกต่างกัน สัมประสิทธิ์การถดถอยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ติดลบน้อยลง) ในช่วง 40 - 50°C และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนค่อนข้างคงที่ในช่วง 50 - 80°C ส่วนค่าคงที่ (Constant) หรือค่าจุดตัดแกนของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ มีแนวโน้มลดลงในช่วง 40 - 70°C และค่อนข้างคงที่ในช่วง 70 - 80°C

จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอจะเห็นได้ว่า ค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเซ็นเซอร์ชนิดต้านทานมีความสัมพันธ์ที่ดียิ่ง (R²>0.802) กับค่าความชื้นในข้าวเปลือก โดยเมื่ออุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าค่อนข้างสูง (70 - 80°C) ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เซ็นเซอร์ชนิด

CT-502

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13

13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021)



ด้านทานประยุกต์เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาในกระบวนการอบแห้ง

เมื่อทำการทดสอบสมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณไฟฟ้าด้วยความชื้นที่ใช้สร้างความสัมพันธ์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Adjust R²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error of calibration, RMSEC) ของความสัมพันธ์มีความแม่นยำสูงในด้านการวัดอุณหภูมิ 60 70 และ 80°C (Adjust R² = 0.958, 0.950, 0.958 และ RMSEC = 0.990, 1.060, 0.910 ตามลำดับ) นอกจากนี้ อุณหภูมิการวัดความชื้นข้าวเปลือกที่ 40 และ 50°C ให้ผลลัพธ์ที่ค่า Adjust R² = 0.800, 0.868 และ RMSEC = 2.156, 1.785 ตามลำดับ

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิกับสัญญาณไฟฟ้าที่วัดโดยเซ็นเซอร์ชนิดด้านทาน พบว่า ค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก จากสมการเชิงเส้นที่ใช้ทำนายความชื้นของข้าว ค่าสัมประสิทธิ์การลดอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และค่อนข้างคงที่ในช่วง 50 - 80°C และค่าคงที่ของความสัมพันธ์จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 70°C และค่อนข้างคงที่ในช่วง 70 - 80°C และมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ชนิดด้านทานเป็นอุปกรณ์วัดความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการค้าต่างประเทศ. (2563, กันยายน 12). สถิติการนำเข้า - ส่งออก [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.dft.go.th/th-th/dft-service-data-statistic/cid/604> วันที่เข้าถึงข้อมูล 12 กันยายน 2563.
- [2] Hemhirun, S., Bunyawanchakul, P. The use of Temperature and Relative Humidity Sensors to Estimate the Final Moisture Content of the Drying Process. *International Journal of Engineering Research and Technology*, Vol. 9, Issue 05, pp. 926-932, May 2020.
- [3] Klomkiao, P., Kuntinuguetanon, S., Wongkokua, W. Moisture content measurement in paddy. *Paper presented at the J. Phys. Conf. Ser.*, 2017, pp. 1-5.
- [4] Song, Q., Wei, X., Sun, W., Lu, Z., Tao, T. Design of Capacitive Paddy Moisture Sensor Based on Electrical Impedance

Spectroscopy Analysis. *Appl. Sci.*, Vol. 10, Issue 11, pp. 3968, May-June 2020.

- [5] Li, C., Li, B., Huang, J., Li, C. Developing an online measurement device based on resistance sensor for measurement of single grain moisture content in drying process. *Sensors*, Vol. 20, Issue 15, pp. 4102, June-July 2020.
- [6] ประชา บุญวานิชกุล. การประเมินกระบวนการเตรียมตัวอย่างอ้างอิงสำหรับเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 9, หน้า 47-55, มกราคม-มิถุนายน 2556.



อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว ผู้เขียน จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก ม.เทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2562 ปัจจุบันกำลังศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ระดับปริญญาโทที่ ม.เทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การวัดความชื้นในเมล็ดพืช การจัดการพลังงานสำหรับเครื่องอบแห้ง และระบบควบคุมอัตโนมัติ



กระวี ตรีอำนาจ ผู้เขียนร่วม จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก ม.เกษตรศาสตร์ ในปี 2554 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจได้แก่ การพัฒนาเครื่องจักรกลและกระบวนการในการเพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลผลิตเกษตร



เพชรรัตน์ ตรีอำนาจ ผู้เขียนร่วม จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเกษตร จาก ม.เกษตรศาสตร์ ในปี 2551 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ในสาขาวิศวกรรมเกษตร ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจได้แก่ การพัฒนาเครื่องจักรกลและกระบวนการในการเพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลผลิตเกษตร และเทคโนโลยีการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร

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

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน

อภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว¹ กระวี ตรีอำรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย, ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 3000

³ เลขที่ 17/1 หมู่ 6 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

รับบทความ แก้ไขบทความ..... ตอบรับบทความ (ผู้เขียนไม่ต้องกำหนด)

บทคัดย่อ

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

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

¹School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

²School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

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

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

³17/1 Chum Kho, Pathiu, Chumphon, 86160, Thailand

Received; Revised.....; Accepted (Do not assign)

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. R², Adjust R² (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.) เป็นพืชอาหารหลักที่ประชากรมากกว่าครึ่งของโลกนิยมนำมาบริโภค [1-3] นอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรไทยที่เพาะปลูกข้าวเป็นอาชีพหลัก จากยอด

รวมสถิติการส่งออกสินค้ามาตรฐานข้าวหอมมะลิไทยตามใบรับรองมาตรฐานสินค้าที่ออกโดยสภาหอการค้าแห่งประเทศไทย ในปี 2563 มีปริมาณ 1,334.036 พันเมตริกตัน คิดเป็นมูลค่ารวม 42,486.98 ล้านบาท [4] สร้างเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก ข้าวจึงเป็น

พืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ข้าวหลังการเก็บเกี่ยวใหม่นั้นจะมีความชื้นสูงอยู่ในช่วง 22-26% มาตรฐานเปียก จึงจำเป็นต้องทำการลดความชื้นในข้าวลงประมาณ 12-14% เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก เนื่องมาจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา [5-7] และเพื่อลดข้อจำกัดของการอบแห้งแบบดั้งเดิม ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านแรงงานคน พื้นที่ในการดำเนินการ วัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการลดความชื้นข้าว ในระดับอุตสาหกรรม จึงมีการนำเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบต่างๆ มาใช้เพื่อให้สามารถดำเนินการบนข้อจำกัดดังกล่าวได้

ในขณะที่อบแห้งข้าวเปลือกการประเมินความชื้นข้าวที่อยู่ในกระบวนการลดความชื้นนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะจะทำให้ทราบค่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการและยุติกระบวนการได้ทันที่ หากทราบค่าความชื้นเข้าเกินไปจะทำให้ข้าวเปลือกแห้งมากเกินไป เมื่อนำไปกะเทาะเปลือกจะเกิดการแตกหักสูงและยังเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ในทางกลับกันหากยุติกระบวนการอบแห้งเร็วเกินไปย่อมได้ข้าวที่มีความชื้นสูงเกินมาตรฐานเช่นกัน การวัดปริมาณความชื้นข้าวเปลือก สามารถทำได้ทั้งวิธีการวัดทางตรงและวิธีการวัดทางอ้อม การวัดทางตรงอาศัยการคำนวณความชื้นในเมล็ดข้าวด้วยน้ำหนักจากการนำข้าวตัวอย่างไปอบด้วยอุณหภูมิสูงตามมาตรฐานต่างๆ วิธีการนี้สามารถนำมาใช้เป็นวิธีการอ้างอิงมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบได้ [8] แต่มีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาในการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในข้าวที่ต้องใช้เวลานานเพื่อที่จะสามารถวัดความชื้นข้าวได้อย่างทันที่จึงมีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก เช่น การนำไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า คุณสมบัติทางแม่เหล็ก และอื่นๆ มาใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์การวัดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งวิธีการดังกล่าว เรียกว่า วิธีการวัดทางอ้อม [9-14] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืชขึ้น จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Nath and Ramanathan [15] ได้พัฒนาจอร์จนีเทอร์เฟซ ซึ่งใช้หลักการวัดความจุของตัวเก็บประจุเซรามิกที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความชื้นข้าวออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว แม่นยำ และเชื่อถือได้ Joaquin, et al. [8] ได้ประเมิน

สมรรถนะของเครื่องมือวัดความชื้นที่พัฒนาขึ้นโดยหลักการความจุไฟฟ้า 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 ใช้กับการตรวจสอบความชื้นแบบออนไลน์สำหรับการทำแห้งผงแคดเตอรีลิเทียมไอออนแบบสุญญากาศ [19] ใช้ในการวิเคราะห์ความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องแบบแห้งแบบไหลขวาง [20] ใช้ประเมินความชื้นแบบตามเวลาจริงในเค้กเปียกของส่วนผสมทางเภสัชกรรมสำหรับกระบวนการทำแห้งแบบกระเทาะ [21] เป็นต้น

การพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นด้วยวิธีการทางอ้อม ไม่เพียงแต่จะสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งและเป็นผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพการอบแห้งแล้ว ยังช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินการของเครื่องอบแห้งได้ งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่มีต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่รับค่าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ เมื่อนำมาทดสอบวัดสัญญาณทางไฟฟ้ากับข้าวเปลือกที่มีความชื้นในช่วง 9.2 - 22.75% (wet basis, wb) ที่อุณหภูมิ 40 - 80°C ทั้งนี้เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับสัญญาณทางไฟฟ้า ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาไปสู่ระบบประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงสำหรับวัดความชื้นข้าวในกระบวนการอบแห้งต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับการทดลอง

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

ข้าวเปลือกพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ถูกนำมาตรวจสอบความชื้นเริ่มต้น ตามสมการที่ 1 ด้วยวิธีการอบลมร้อน อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (รูปที่ 1) [22] เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมกลับเข้าไปยังข้าวเปลือก โดยใช้กระบอกฉีดย้ำให้ทั่วถึงเมล็ดข้าวเปลือกมากที่สุด 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

$MC_{wb,initial}$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้น (เริ่มต้น)

MC_{target} = เปอร์เซ็นต์ความชื้น (เป้าหมาย)

W_w = มวลของตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนอบไล่ความชื้น (g)

W_d = มวลของตัวอย่างข้าวเปลือกหลังอบไล่ความชื้น (g)

W_{net} = มวลของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมความชื้น (g)

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

หลังจากนั้นจึงนำข้าวเปลือกที่ถูกเติมน้ำแล้วบรรจุในภาชนะปิดสนิทตามรูปที่ 2 และนำไปเก็บในห้องเย็นอุณหภูมิ 2 - 5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และพยายามคลุกเคล้าตัวอย่างด้วยวิธีเขย่าภาชนะ เพื่อให้เกิดการแพร่กระจายตัวของความชื้นข้าวทั่วกลองเก็บทุกๆ 6 ชั่วโมง [23]



รูปที่ 1 ก) ข้าวเปลือกตัวอย่างที่บรรจุในถ้วยชั่งน้ำหนัก ข) เครื่องอบความชื้นแบบ Hot air oven



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกสำหรับการทดลอง

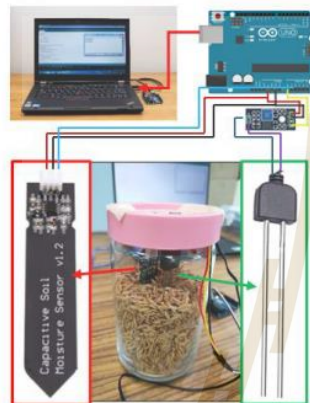
2.1.2 การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

ในการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้โมดูลเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นในดินเป็นอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าของข้าวเปลือก โดยเลือกใช้โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน (Resistive soil moisture sensor module) ยี่ห้อ diymore ผลิตโดย Worldchips ประเทศจีน มีขนาด 36 mm x 15 mm x 7 mm 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



รูปที่ 3 ก) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน ข) เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

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 4 แผนภาพการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน



รูปที่ 5 การบรรจุข้าวเปลือกและวิธีการอบข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ

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

2.1.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้ได้นำค่าสัญญาณที่รับค่าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุ ตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึง 120 มาใช้ในการวิเคราะห์ ช่วงข้อมูลที่มีค่าค่อนข้างคงที่ที่สุดถูกเลือกมาวิเคราะห์ด้วยรูปแบบความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) (สมการที่ 3) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการแบบเลือกทั้งหมด (Enter method) เพื่อทำนายค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่แต่ละอุณหภูมิ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 4 [26]

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

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

โดยที่

Y, WB_p = เปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวฐานเปียกที่ทำนายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

$M, Coefficient$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

$X, signal$ = ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากโมดูลวัดความชื้นในดิน

$C, Constant$ = 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} = ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้า (X) ที่รวบรวมมา n จำนวน

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

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เป็นค่าทางสถิติ สำหรับวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ 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]

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

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

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

โดยที่

n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

p = จำนวนค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเชิงเส้น

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ตัวอย่างข้าวในการทดลอง

ผลการเตรียมความชื้นถูกเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ณ เงื่อนไขของอุณหภูมิการทดสอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

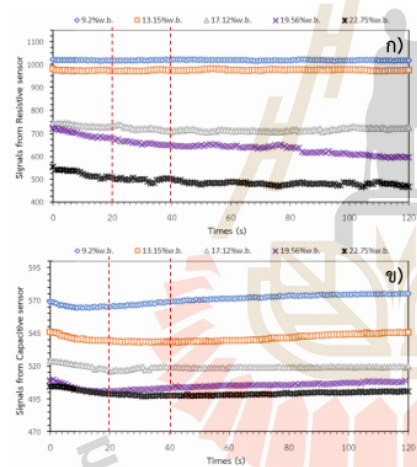
ตารางที่ 1 ผลของการเตรียมความชื้นข้าวเปลือกสำหรับใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ

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

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเตรียมความชื้นข้าวเปลือกกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ด้วยค่าเฉลี่ยของความชื้นเปลือกที่ถูกเติมน้ำกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Standard Deviation; S.D.) พบว่า ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 40°C - 70°C มีค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวใกล้เคียงกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนของ

ข้อมูลน้อยมาก (ในช่วง 0.02-0.93) ในขณะที่ข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ อุณหภูมิ 80 °C มีค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวคลาดเคลื่อนกับค่าความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ ตั้งแต่ 1.26% - 3.2% (wet basis) และส่วนเบี่ยงเบนของข้อมูลอยู่ในช่วง 0.66 - 1.45 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นสำหรับการควบคุมเงื่อนไขของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของส่วนเบี่ยงเบนความชื้นข้าวจากการเตรียมตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม ความชื้นที่แท้จริงของข้าวเปลือกถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิใดๆ ในการทดลองนี้

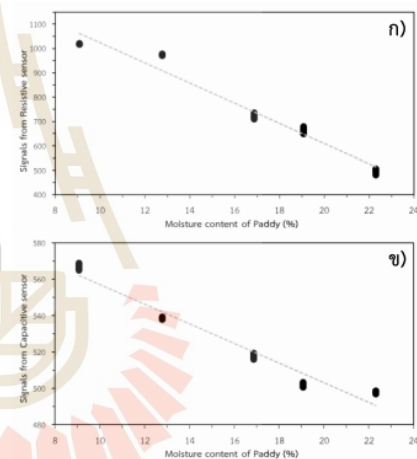
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้า



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

รูปที่ 6 แสดงค่าตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าเฉลี่ยได้จากโมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 60 °C ตั้งแต่วินาทีที่ 0 - 120 โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสองมีค่าในช่วงการวัด 0 - 1,023

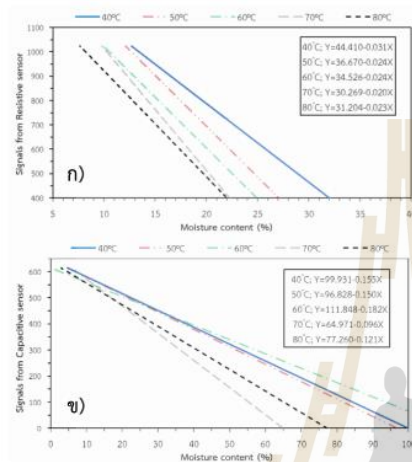
ระดับ (ที่การแปลงค่าสัญญาณ 8 บิต) ในช่วงเริ่มต้นของการวัดมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นชัดเจนในช่วงวินาทีที่ 0 - 20 ซึ่งเป็นพฤติกรรมของข้อมูลที่ลดลงตามเวลาในช่วงแรกจนกระทั่งข้อมูลค่อนข้างคงที่ตามแกนนอนในช่วงวินาทีที่หลัง เพื่อป้องกันการลดลงของอุณหภูมิของข้าวเปลือกจากการถ่ายเทความร้อนกับแวดล้อมตั้งแต่วินาทีที่ 40 - 120 และเพื่อหลีกเลี่ยงความไม่แน่นอนของข้อมูลจากการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้น ผู้วิจัยจึงเลือกข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ตั้งแต่วินาทีที่ 20 ถึงวินาทีที่ 40 มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกจากการเตรียมความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 1) เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบและหาตัวแบบของสมการเชิงเส้นถดถอย



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

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดกับค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิการวัด 60 °C พบว่า ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก กล่าวคือ การเพิ่มขึ้น

ของค่าความชื้นข้าวเปลือกจะทำให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเซนเซอร์ชนิดต้านทานและชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มลดลง โดยที่ ที่อุณหภูมิ 40 50 60 70 และ 80°C มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 8

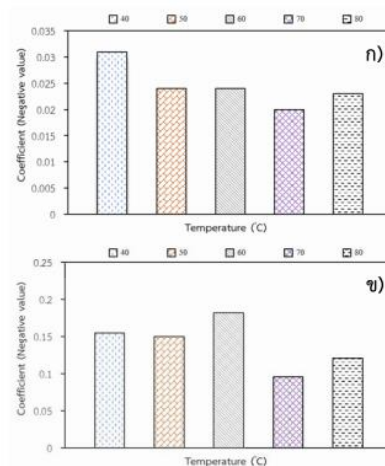


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกกับค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จาก ก) โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทาน และ ข) ค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุที่แต่ละอุณหภูมิการทดลอง

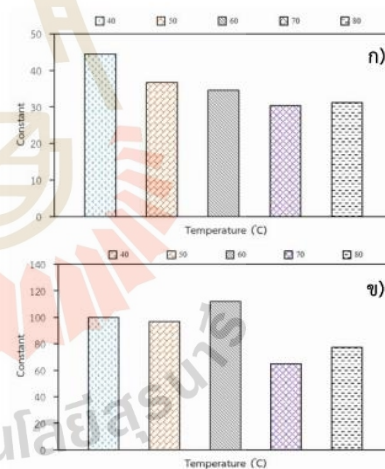
3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและค่าสัญญาณไฟฟ้า

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

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



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



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

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

จากรูปที่ 10 ก) ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 70°C และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 70 - 80°C ในขณะที่ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (รูปที่ 10 ข) มีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 40 - 50°C และมีค่าสูงที่สุดที่ 60°C จากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลงในช่วงอุณหภูมิ 70 - 80°C แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าคงที่นี้จะมีผลสอดคล้องกับรูปที่ 8 ก) และ ข) โดยเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มลดความชื้นลงในช่วงอุณหภูมิต่ำ จากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าดังกล่าวจากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีแนวโน้ม

คงที่ได้ช่วงอุณหภูมิต่ำ และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ซึ่งคือจุดตัดแกนตั้งของเส้นกราฟความสัมพันธ์จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ค่าคงที่ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานที่ช่วงอุณหภูมิสูงการทดลองค่าสูงมีค่าเกือบจะคงที่ ในขณะที่ค่าคงที่ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นข้าวเปลือกและสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุจะมีค่าเกือบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิการทดลองค่าต่ำ

3.4 ความสามารถของแบบจำลองความสัมพันธ์ในการคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกในแต่ละอุณหภูมิการทดลอง

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

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรเปรียบเทียบระหว่างเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานกับชนิดเก็บประจุ

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 อุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะทำการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดความชื้นทั้ง 2 ชนิด ล้วนส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ในสมการคำนวณความชื้นข้าวเปลือกทั้งสิ้น อาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความ

ถูกต้องของผลการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการนี้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การตัดสินใจ (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 ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 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 [9-10, 31-33] ดังนั้นโมดูลเซนเซอร์ชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ในการวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าไม่มาก และจากผลการทดลองนี้ การประยุกต์ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูง โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่า

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของข้าวเปลือกกับสัญญาณไฟฟ้าจากโมดูลเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันกับค่าความชื้นของข้าวเปลือก โดยโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ลดลงในช่วงอุณหภูมิต่ำจากนั้นค่าจะค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีแนวโน้มคงที่ได้ช่วงอุณหภูมิต่ำ และค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทานในช่วงอุณหภูมิสูงมีค่าเกือบจะคงที่ ในขณะที่ค่าคงที่จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีค่า

เกือบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิการทดลองค่าต่ำ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของความสัมพันธ์ดังกล่าว สรุปได้ว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกของแบบจำลองที่ถูกพัฒนาด้วยวิธีการนี้ จากการพิจารณาความสัมพันธ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า Adjust R^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ประกอบกับค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSEC) พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ชนิดต้านทาน มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลางถึงสูง คือ 60 - 80°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ (40 และ 50°C) ในขณะที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ มีความแม่นยำในการคำนวณค่าความชื้นข้าวเปลือกช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง คือ 40 - 60°C มากกว่าช่วงอุณหภูมิสูง (70 และ 80°C) ดังนั้นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูง โมดูลเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดต้านทานจึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากกว่าเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดเก็บประจุ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัย Agricultural Machinery Research Laboratory และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Li, X.-j., 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, September 2016.
- [2] Doungporn, S., 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, February 2012.
- [3] Echaroj, S., 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] Tian, T., 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, July 2020.
- [6] Das, H.J., 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, September 2020.
- [7] Jittanit, W., N. Saeteaw, and A. Charoenchaisri, "Industrial paddy drying and energy saving options," *Journal of stored products research*, vol. 46, no. 4, pp. 209-213, April 2010.
- [8] Joaquin, A.C., 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, October 2019.
- [9] Jitsom, B., S. Sungnul, and E. Kunnawuttipreechachan, "Numerical Solutions of the Moisture Transport in Rough Rice," *Engineering Letters*, vol. 28, no. 3, 2020.
- [10] Song, Q., et al., "Design of Capacitive Paddy Moisture Sensor Based on Electrical Impedance Spectroscopy Analysis," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3968, June 2020.
- [11] Klomkiao, P., S. Kuntinugunetanon, and W. Wongkokua, "Moisture content measurement in paddy," *JPhCS*, vol. 901, no. 1, p. 012068, 2017.
- [12] Abdullah, M., 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] Ramli, N.A.M., et al., "A Review on Frequency Selection in Grain Moisture Content Detection," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 012002.
- [14] Nath, D. 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] Nath, D. and P. Ramanathan, "Interfaced circuit using a non-destructive method for moisture measurement," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 73, p. 102951, December 2020.
- [16] Makky, M., 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] Lin, L., et al., "Rapid-detection sensor for rice grain moisture based on NIR spectroscopy," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1654, April 2019.
- [18] Li, C., 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, July 2020.

- [19] Zhao, F., et al., "A novel online moisture monitoring method for vacuum drying of lithium ion battery powder," *Powder Technology*, vol. 375, pp. 244-248. July 2020.
- [20] Hemhirun, S. 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] Wang, Z., 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] Sotong S. and Ruaypom K., "Germinated Rice Drying by Fluidized Bed Technique using Superheated Steam," *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 88-97, 2016.
- [23] Bunyawanichakul, P., "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] Sudasna-na-Ayudhya, P. and Luangpaiboon, P., "Design and Analysis of Experiments," Bangkok: Top Publishing, 2008.
- [27] Puttipipatkajorn, A. and Puttipipatkajorn, A., "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. Hermek, 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] Waramit P., Weerayuth N. and Teeboonma U., "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," in *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, 09/01 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1074/1/012120.
- [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, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112513>.

ประวัติผู้เขียน

นายอภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ.2539 เริ่มต้นเข้าศึกษาในระดับปฐมวัยจนถึงมัธยมศึกษาตอนต้น ณ โรงเรียนพงษ์ศิริวิทยา และเข้าศึกษาต่อระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนมัธยมด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2562

ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าร่วมทำงานในบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งในประเทศไทยเป็นระยะเวลารวม 1 ปี ซึ่งได้นำองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรม ผสมผสานกับทักษะด้านการบริหารจัดการที่ได้รับจากการทำกิจกรรมระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาตรีมาปรับใช้ในวิชาชีพการทำงานในตำแหน่ง Site Engineer ทำให้การทำงานสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี พ.ศ.2563 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับการสนับสนุนทุนกิตติบัณฑิต เป็นระยะเวลา 2 ปี ในระหว่างการศึกษาได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา ENG25 2140/ 525206 การเขียนแบบทางวิศวกรรม 2, 525301 การเขียนแบบทางกล และรายวิชา 536342 ปฏิบัติการด้านความร้อนและของไหลสำหรับยานยนต์ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำความรู้ที่ได้รับ ทั้งจากประสบการณ์การทำงานที่ผ่านมา การสอน และการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย และมีโอกาสได้ร่วมทำวิจัยกับคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ จนได้รับการเผยแพร่ผลงานจำนวนทั้งสิ้น 2 งาน ได้แก่

1. อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2564). **การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13 : Electrical Engineering Network 2021 (EENET2021).** ออนไลน์, 12-14 พฤษภาคม 2564.
2. อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช. (2564). ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,** ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2565. (อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่)