

การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

PADDY TEMPERATURE CONTROL IN PNEUMATIC DRYER

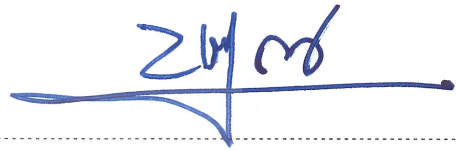


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctoral of Philosophy in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



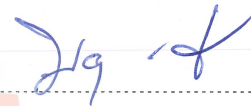
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พญงค์ดี จุลยุเสนา)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ ฝั่งสุวรรณรักษ์)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรี จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว : การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Paddy temperature control in pneumatic dryer)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ, 229 หน้า

คำสำคัญ: กระบวนการอบแห้ง/ข้าวเปลือก/อุณหภูมิข้าวเปลือก/การวิเคราะห์ปัจจัย/การวิเคราะห์ความไว/การควบคุมแบบพีไอดี/วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์/การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมสถานะการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งพาหะลมซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ส่วน ได้แก่ 1. การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับ 2. การศึกษาอิทธิพลของการหมุนเวียนอากาศอบแห้งมาใช้ใหม่ต่อการใช้พลังงานในระบบอบแห้ง 3. การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 4. การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อค้นหาความสำคัญของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้ง และ 5. การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าวในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งทั้งหมดเป็นการดำเนินงานอย่างต่อเนื่องสัมพันธ์กัน ผลจากการดำเนินงานพบว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถกำจัดข้อผิดพลาดในกระบวนการได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้การคำนวณทางทฤษฎีโดยตรง ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้งผสมที่พัฒนาขึ้นจากวาล์วปีกผีเสื้อสามารถเวียนอากาศกลับได้สูงถึง 83.33% มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในสถานะคงตัวต่ำกว่า 2% และเมื่อนำระบบควบคุมการหมุนเวียนอากาศและวาล์วปีกผีเสื้อไปติดตั้งกับเครื่องอบแห้งพาหะลมพบว่าที่อุณหภูมิอากาศ 80 °C สามารถลดการใช้พลังงานในระบบลงได้ 3.38% การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัยและการวิเคราะห์ความไวผ่านแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้เข้าใจโครงสร้างและทิศทางความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งได้ดีขึ้นและพบว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งและส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงาน อัตราการอบแห้งและคุณภาพข้าวในกระบวนการอบแห้ง การศึกษาในส่วนสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์เข้ามาปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีเพื่อให้ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งได้ ซึ่งพบว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการทำงานในสถานะคงตัวมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2% ผลการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 45 °C พบว่ามีอัตราการอบแห้งและร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสูงกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 60 °C อยู่ 71.74% และ 8.96% ตามลำดับ แม้ว่าจะมีข้อเสียเปรียบด้านพลังงานอยู่ประมาณ 13.88% อย่างไรก็ตาม นับว่าสำคัญด้านอัตราอบแห้งที่โดดเด่นประกอบกับปริมาณข้าวหักที่ลดลงอย่างมากจึงทำให้การอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 45 °C ยังคงเป็นรูปแบบการอบแห้งที่มีความเหมาะสมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กระวี ตรีอำนาจ

APHISIK PAKDEEKAEW : PADDY TEMPERATURE CONTROL IN PNEUMATIC DRYER.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 229 PP.

Keyword: Drying Process/ Paddy/ Paddy Temperature/ Factor Analysis/ Sensitivity Analysis/ PID Control/ Ziegler–Nichols Method/ Paddy Temperature Control

This thesis aims to develop a control system for the drying conditions of paddy rice in a pneumatic dryer and to evaluate the dryer's performance and rice quality resulting from different drying methods. The research consists of five key stages: 1. developing a humidity ratio control system by adjusting the proportion of recirculated drying air, 2. studying the impact of recirculating drying air on energy consumption, 3. experimentally drying paddy rice with constant temperature hot air, 4. analyzing data to identify the significance of independent variables on the drying system's performance, and 5. experimentally drying paddy rice with controlled rice temperature. All operations were continuous and interrelated. The results indicate that the feedback control system is more effective in reducing process errors than systems relying on theoretical calculations. The mixed air humidity ratio control system, implemented with a butterfly valve, achieved a return air rate as high as 83.33%, with an average steady-state error of less than 2%. Upon integrating this butterfly valve-based air circulation system with a pneumatic dryer, energy savings of 3.38% were observed at an air temperature of 80 °C. Utilizing factor analysis and sensitivity analysis techniques through artificial neural network models enabled a deeper understanding of the structure and relationships between variables associated with the drying process. It was determined that paddy temperature significantly influences energy consumption, drying rate, and rice quality in the drying. The final phase of the study applied the Ziegler-Nichols method to adjust the PID controller, enabling effective control of paddy temperature during the drying process. The system demonstrated an approximate 2% steady-state error during operation. Drying experiments conducted at a controlled paddy temperature of 45 °C revealed a 71.74% higher drying rate and an 8.96% higher yield of brown rice compared to drying with a constant drying air temperature of 60 °C. Despite an energy disadvantage of approximately 13.88%, the significant increase in drying rate and reduced amount of broken rice highlight drying with paddy temperature control at 45 °C as the preferred method for pneumatic dryers.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2023

Student's Signature Aphisik Pakdeekaew.

Advisor's Signature Krawee Treeamnuh.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรัก ความเมตตา จากบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือ ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ทำให้ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งใจ และขอขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค ผู้ซึ่งเอาใจใส่ในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ สติปัญญา และให้คำปรึกษาทางวิชาการและการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตากรุณาอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์กิติ จุลยุเสน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พังสุวรรณรักษ์ ที่เอาใจใส่ในการตรวจทานเนื้อหา แก้ไข ชี้แนะ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกฝ่ายที่เอื้อเพื่อ สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้มอบทุนกิตติบัณฑิตให้แก่ผู้วิจัยในการสนับสนุน ค่าเล่าเรียน ค่าครองชีพรายเดือน และอุดหนุนการนำเสนอผลงานในระดับบัณฑิตศึกษา

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม (ววน.) รหัสโครงการ FF7-707-66-12-80(S)

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวรักดีแก้วทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและมีส่วนผลักดันด้าน การศึกษาแก่ผู้วิจัย โดยเฉพาะ นายธนัช รักดีแก้ว (บิดา) และ นางกริชฐาพัชร์ กวีพิสิฐกุล (มารดา - ครั้งที่ยังมีชีวิตอยู่) ผู้ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ทั้งทุนทรัพย์และจัดหาวัสดุเกษตรสำหรับใช้ทำการทดลอง ตลอดการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

อภิสิทธิ์ รักดีแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105	5
2.2 ความชื้นในเมล็ดพืช	6
2.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก	6
2.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง	7
2.3 การอบแห้งเมล็ดพืช	7
2.4 การลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้ง	12
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอบแห้งพาหะลม	14
2.2.2 อิทธิพลของการเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำ ต่อการใช้พลังงานในระบบอบแห้ง	17
2.5 บทบาทของปัญญาประดิษฐ์กับระบบอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหาร	19
2.5.1 โครงข่ายประสาทเทียม	19
2.5.2 ตรรกศาสตร์คลุมเครือ	22
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ ในกระบวนการอบแห้ง	23
2.6 การวิเคราะห์ความไว	27
2.7 ระบบควบคุมในกระบวนการอบแห้ง	30
2.7.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.2	ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า	33
2.7.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมในระบบบอบแห้ง	34
2.7.4	การปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี.....	37
2.7.4.1	ผลตอบสนองของกระบวนการในโดเมนเวลา	37
2.7.4.2	การปรับแต่งตัวควบคุมด้วยมือ	39
2.7.4.3	การปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์	41
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	46
3.1	ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	46
3.2	สถานที่ทำวิจัย	46
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.3.1	เครื่องสาดิการถ่ายเทความร้อนและมวล.....	46
3.3.2	เครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบ.....	48
3.3.3	อุปกรณ์สำหรับจัดเตรียมตัวอย่างข้าว	49
3.3.4	อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความชื้นและคุณภาพข้าว	51
3.3.5	เซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัย	51
3.3.6	โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	52
3.4	การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	53
3.5	การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด	54
3.5.1	การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	54
3.5.2	การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ	55
3.5.3	ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวทური	56
3.6	การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด	58
3.6.1	การตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือก	58
3.6.2	การเตรียมความชื้นข้าวเปลือก	59
3.6.3	การเตรียมตัวอย่างควบคุม.....	60
3.7	การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง.....	60
3.7.1	อัตราการอบแห้ง	60
3.7.2	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	60
3.8	การตรวจสอบคุณภาพข้าว	61
3.8.1	ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง	61
3.8.2	ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9	ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย.....	62
3.10	การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้ง จากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับด้วยวาล์วควบคุมการไหล.....	65
3.10.1	กระบวนการผสมอากาศ.....	65
3.10.2	การประเมินค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศจากเซ็นเซอร์ วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (DHT22).....	67
3.10.3	การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์.....	68
3.10.3.1	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของสัญญาณพัลส์ ที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ.....	70
3.10.3.2	การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ ด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี.....	71
3.10.3.3	การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ แบบป้อนกลับตามวิธีการของ Ziegler – Nichols.....	71
3.10.3.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วน ความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์.....	72
3.10.4	การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ.....	74
3.10.4.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมอัตราส่วน ความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ.....	74
3.10.4.2	การระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ.....	80
3.10.4.3	การออกแบบตัวควบคุมพีไอ.....	81
3.11	การศึกษาผลของการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำ ต่อการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก.....	83
3.12	การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่.....	84
3.13	การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามในงานวิจัย.....	84
3.13.1	การวิเคราะห์ปัจจัยของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก.....	84
3.13.2	การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	85
3.13.3	การวิเคราะห์ความไวของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก.....	86
3.14	การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือก.....	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	ผลการดำเนินงานวิจัย.....	89
4.1	ผลการพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้ง จากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับด้วยวาล์วควบคุมการไหล.....	89
4.1.1	ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหล ชนิดโซลินอยด์.....	89
4.1.1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของสัญญาณพัลส์ ที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ.....	89
4.1.1.2	ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี.....	91
4.1.1.3	ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับ ตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์.....	92
4.1.2	ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหล ชนิดปีกผีเสื้อ.....	95
4.1.2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการเปิดวาล์ว ต่ออัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ.....	96
4.1.2.2	ผลการระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมอัตราส่วน ความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ.....	97
4.1.2.3	ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอ.....	99
4.1.2.4	สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ.....	101
4.1.3	ผลเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์และชนิดปีกผีเสื้อ.....	102
4.2	ผลของการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำต่อการใช้พลังงาน ในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก.....	103
4.3	ผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่.....	107
4.3.1	จลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิคงที่.....	107
4.3.2	สมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม ด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่.....	109
4.3.3	คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่.....	111
4.4	ผลกระทบของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามในกระบวนการอบแห้งพาหะลม.....	114
4.4.1	ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก.....	114
4.4.2	ความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	116
4.4.3	ผลการวิเคราะห์ความไวของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก.....	118

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4	ผลการตรวจสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง โดยคำนึงถึงอุณหภูมิข้าวเปลือก.....	119
4.5	ผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือก	123
4.5.1	ค่าอัตราขยายพีไอดีจากการประเมินตามวิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์..	124
4.5.2	สมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยตัวควบคุมพีไอดี.....	124
4.5.2.1	ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 42 °C	124
4.5.2.2	ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 45 °C	127
4.5.2.3	ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 48 °C	130
4.5.3	จลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าว.....	132
4.5.4	สมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม ด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าว.....	134
4.5.5	คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าว.....	136
5	สรุปผลการวิจัย.....	139
5.1	บทสรุป.....	139
5.1.1	ผลการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น.....	139
5.1.2	ผลการควบคุมสภาวะการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งพาหะลม.....	139
5.1.3	ผลการประเมินเปรียบเทียบการใช้พลังงานและคุณภาพข้าวเปลือก หลังการอบแห้ง.....	140
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	140
	รายการอ้างอิง	142
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย	148
	ภาคผนวก ข. พื้นฐานการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป.....	205
	ภาคผนวก ค. ผลงานทางวิชาการในระหว่างการศึกษา.....	221
	ประวัติผู้เขียน	227

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวหอมมะลิ 105.....6
2.2	ความชื้นสำหรับจัดเก็บเมล็ดพืชอย่างปลอดภัย (ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก) 13
2.3	การประยุกต์ใช้ AI ในกระบวนการอบแห้ง 25
2.4	ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรพีไอได้อย่างอิสระ 39
2.5	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมโดยวิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์ 42
2.6	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมโดยวิธีการที่สองของซีเกลอร์-นิโคลส์..... 43
2.7	ผลกระทบของตัวควบคุมพีไอต่อตัวแปรสมรรถนะของระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุด 45
3.1	เซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัย 51
3.2	เงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่เวียนอากาศกลับและแบบเวียนอากาศกลับ 83
3.3	ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 85
4.1	สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี 92
4.2	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ 93
4.3	สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ 94
4.4	สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลแต่ละชนิด . 102
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 117
4.6	ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 117

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ข้าวหอมมะลิ 1055
2.2	การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุในกระบวนการอบแห้ง8
2.3	กลไกการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศในกระบวนการอบแห้ง9
2.4	แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 14
2.5	แผนภาพเครื่องอบแห้งพาหะลมสำหรับข้าวเปลือกความชื้นสูง..... 15
2.6	เซลล์ประสาทเทียมจำลอง..... 20
2.7	โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว 21
2.8	โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น..... 21
2.9	โครงสร้างพื้นฐานของการอนุมานแบบฟัซซีลอจิก..... 22
2.10	แผนภาพการวิเคราะห์ความไว 29
2.11	แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับ..... 31
2.12	แผนภาพบล็อกสำหรับการควบคุมแบบพีไอดี..... 31
2.13	แผนภาพการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า 33
2.14	แผนภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดชนิดไหลขวาง 34
2.15	แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมตรรกะคลุมเครือแบบปรับตัวได้ 35
2.16	การตอบสนองของระบบต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยในโดเมนเวลา 38
2.17	การพิจารณาผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองด้วยการปรับแต่งตัวควบคุม PID ... 39
2.18	การตอบสนองของระบบจากการเพิ่มค่าอัตราขยายพี (k_p)..... 40
2.19	การตอบสนองของระบบจากการเพิ่มค่าอัตราขยายไอ (k_i)..... 40
2.20	การตอบสนองของระบบจากการเพิ่มค่าอัตราขยายดี (k_d)..... 41
2.21	การตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณเข้าแบบขั้นบันได 41
2.22	การวัดค่าตัวแปรจากเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการ 42
2.23	การแกว่งแบบสมมูลขออย่างต่อเนื่อง..... 43
2.24	การเปรียบเทียบผลตอบสนองของอุณหภูมิน้ำร้อนระหว่างระบบที่มีและไม่มีตัวควบคุม 44
3.1	เครื่องสาธิตการถ่ายเทความร้อนและมวล 47
3.2	แผนภาพเครื่องสาธิตการถ่ายเทความร้อนและมวล 47
3.3	เครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบ..... 48
3.4	แผนภาพเครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบ 49
3.5	เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ด้วยตะแกรงและแรงลม..... 49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 อุปกรณ์สำหรับจัดเตรียมตัวอย่างข้าว.....	50
3.7 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความชื้นและคุณภาพข้าว	50
3.8 เครื่องวัดอุณหภูมิ TM-902C.....	55
3.9 แผนภาพของระบบสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	55
3.10 สมการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	56
3.11 การสอบเทียบชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวทური	57
3.12 สมการสอบเทียบความเร็วลม.....	57
3.13 การตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือก.....	58
3.14 การเตรียมตัวอย่างควบคุม	59
3.15 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย.....	63
3.16 การผสมอากาศชื้น	65
3.17 แผนภาพกระบวนการผสมอากาศชื้น	66
3.18 แผนภาพบล็อกสำหรับการคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศ	67
3.19 การติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นด้วยโซลินอยด์วาล์ว.....	69
3.20 ลักษณะของสัญญาณแบบ PWM	69
3.21 แผนภาพบล็อกสำหรับสั่งการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว.....	70
3.22 แผนภาพระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี.....	71
3.23 แผนภาพระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับ.....	72
3.24 อัตราส่วนความชื้นอ้างอิงแบบขั้นบันได.....	73
3.25 วาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์.....	73
3.26 การติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นด้วยวาล์วปีกผีเสื้อ	74
3.27 การทำงานของวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ	75
3.28 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ	75
3.29 แผนภาพของระบบควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง.....	75
3.30 การไหลผ่านท่อของของไหล.....	78
3.31 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ	80
3.32 การปรับเส้นทางเดินรากของระบบ.....	81
3.33 แผนภาพระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ	82
3.34 ค่าอ้างอิงในการทดสอบระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ	83
3.35 โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	85
3.36 แผนภาพเครื่องอบแห้งและการติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิ RKC รุ่น REX-C100	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.37	87
4.1	90
4.2	91
4.3	91
4.4	93
4.5	96
4.6	97
4.7	98
4.8	99
4.9	100
4.10	100
4.11	101
4.12	102
4.13	104
4.14	104
4.15	105
4.16	108
4.17	108
4.18	109
4.19	110
4.20	111
4.21	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.22	สมรรถนะเชิงเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งพาหะลมกับเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น.....	113
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนปัจจัยขององค์ประกอบหลักที่ 1 และ 2	114
4.24	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการศึกษาสมรรถนะระบบอบแห้งพาหะลม	116
4.25	ความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	118
4.26	ความสำคัญของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก.....	118
4.27	ภาวะการณ์ของอากาศอบแห้งแบบชั้นบันได	120
4.28	พฤติกรรมของการเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ	120
4.29	การเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวและการใช้พลังงานในระบบอบแห้งแบบต่าง ๆ	121
4.30	สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไขอบแห้งแบบชั้นบันได	121
4.31	อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง ด้วยรูปแบบการอบแห้งต่างกัน	122
4.32	ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากเงื่อนไขอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	123
4.33	อุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไข T_{paddy} 42 °C.....	125
4.34	ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เวลาต่าง ๆ จากเงื่อนไข T_{paddy} 42 °C	125
4.35	สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข T_{paddy} 42 °C.....	126
4.36	อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข T_{paddy} 42 °C	127
4.37	อุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไข T_{paddy} 45 °C.....	128
4.38	ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เวลาต่าง ๆ จากเงื่อนไข T_{paddy} 45 °C	128
4.39	สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข T_{paddy} 45 °C.....	129
4.40	อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข T_{paddy} 45 °C	129
4.41	อุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไข T_{paddy} 48 °C.....	130
4.42	ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เวลาต่าง ๆ จากเงื่อนไข T_{paddy} 48 °C	131
4.43	สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข T_{paddy} 48 °C.....	131
4.44	อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข T_{paddy} 48 °C	132
4.45	ความชื้นข้าวเปลือกที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าว	133
4.46	การใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าว	133
4.47	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเชิงเปรียบเทียบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	135
4.48	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยเชิงเปรียบเทียบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	135
4.49	ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าว	136
4.50	ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์เฉลี่ยเชิงเปรียบเทียบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	137
5.1	จุดที่ควรพึงระวังในการหาค่าเหมาะสมที่สุดเกี่ยวกับฟังก์ชันการแตกหักของข้าว.....	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 การนำเข้าข้อมูลมายังโปรแกรม MATLAB	206
ข.2 การนำเข้าข้อมูลโดเมนเวลามายังหน้า System Identification.....	206
ข.3 การเตรียมข้อมูลก่อนกระบวนการระบุเอกลักษณ์	207
ข.4 การกำหนดรูปแบบฟังก์ชันในการประมาณค่า.....	207
ข.5 การระบุจำนวนโพลและซีโรของฟังก์ถ่ายโอน	208
ข.6 ผลลัพธ์จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (ความแม่นยำของแบบจำลอง).....	208
ข.7 การระบุจำนวนโพลและซีโรของฟังก์ถ่ายโอน	209
ข.8 การกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนและเรียกใช้คำสั่ง sisotool บนโปรแกรม MATLAB.....	210
ข.9 หน้าต่างสำหรับปรับเส้นทางเดินรากของระบบ	210
ข.10 การจำลองผลตอบสนองของระบบควบคุม PID	211
ข.11 หน้าต่าง Block Parameters สำหรับปรับแต่งค่า PID.....	211
ข.12 หน้าต่าง PID Tuner สำหรับปรับแต่งผลตอบสนอง	212
ข.13 การเตรียมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปัจจัย.....	213
ข.14 การเลือกตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ปัจจัย.....	213
ข.15 การเลือกวิธีสกัดปัจจัย.....	214
ข.16 การเลือกวิธีหมุนแกนองค์ประกอบ.....	214
ข.17 การบันทึกค่าตัวแปรและแสดงค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักองค์ประกอบ	215
ข.18 หน้าต่างผลลัพธ์ของโปรแกรม IBM SPSS Statistics	215
ข.19 การเข้าสู่ฟังก์ชัน Neural Networks	216
ข.20 การจัดประเภทของตัวแปรสำหรับวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม	217
ข.21 การกำหนดสัดส่วนข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทวนสอบโครงข่ายประสาทเทียม	217
ข.22 การกำหนดสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม	218
ข.23 การกำหนดวิธีฝึกสอนและวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	218
ข.24 การเลือกค่าที่ต้องการแสดงในหน้าต่างผลลัพธ์.....	219
ข.25 หน้าต่างผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม.....	220

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักที่มีประชากรกว่าครึ่งโลกนิยมบริโภค อีกทั้งยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยซึ่งมีการเพาะปลูกกว่า 62 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 42 ของพื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตรในประเทศไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) ตามรายงานยอดรวมสถิติการส่งออกสินค้ามาตรฐานข้าวหอมมะลิไทย ปี 2565 ที่ผ่านมามีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 39,324 ล้านบาท เพิ่มขึ้น 3.5% จากปีที่ผ่านมา (กรมการค้าต่างประเทศ, 2566) ซึ่งสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรไทยและมีส่วนช่วยส่งเสริมเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก

โดยทั่วไปข้าวเปลือกหลังเก็บเกี่ยวใหม่จะมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 22 ถึง 26 มาตรฐานเปียก ขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่การเก็บเกี่ยว ในสถานะที่ข้าวมีความชื้นสูงมีความเสี่ยงอย่างมากต่อการเข้าทำลายของสัตว์และการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องลดความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหาที่จะนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพของผลผลิตในท้ายที่สุด (Vinod, Raghuraman, and Chakravarthi, 2020) การลดความชื้นวัสดุเกษตรและอาหารโดยทั่วไปมักนิยมใช้การตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ วิธีการนี้จัดเป็นการอบแห้งแบบดั้งเดิม มีข้อดีคือใช้ต้นทุนทางพลังงานน้อยในการลดความชื้น อันเนื่องมาจากการใช้รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการขับไล่ความชื้นออกจากตัววัสดุเกษตร อย่างไรก็ตามวิธีการนี้กลับถูกจำกัดด้วยสภาพภูมิอากาศที่อาจไม่เอื้ออำนวย ปัจจุบันเครื่องอบแห้งทางกลจึงได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกลช่วยลดการใช้แรงงานและพื้นที่ตากแห้งลงได้นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการได้ในทุกฤดูกาลตลอดปีและมีศักยภาพในการจัดการเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพของผลผลิตได้

เครื่องอบแห้งพาหะลมเป็นเครื่องอบแห้งรูปแบบหนึ่งซึ่งได้รับการวิจัยและพัฒนาต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน นิยมใช้ทำแห้งวัสดุความชื้นสูงที่มีลักษณะเป็นอนุภาค เนื่องจากเทคนิคการอบแห้งรูปแบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง ทำให้การลดความชื้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว (สมชาติโสภณธนฤทธิ์, 2565) ถึงแม้ว่าเทคนิคการอบแห้งแบบพาหะลมจะมีข้อดีที่สามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว แต่การดำเนินการของเครื่องอบแห้งยังจำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบที่ค่อนข้างสูงและคุณภาพข้าวหลังการทำแห้งมีการแตกหักสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตากแห้งแบบดั้งเดิม ค่าใช้จ่ายทางพลังงานเหล่านี้ถือเป็นค่าใช้จ่ายส่วนสำคัญที่กระทบต่อต้นทุนการผลิตและเป็นโจทย์วิจัยที่นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

วันชัย สุตะพันธ์, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2555) ได้ประเมินการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้าของโรงสีข้าวพรเจริญ โดยรายงานถึงการใช้พลังงานในการผลิตความร้อนกว่า 90% เป็นต้นทุนหลักสำหรับระบบอบแห้งข้าวเปลือก ต่อมาอมร ตอนเมือง, นิรุต อ่อนสลุง และ สุรียา โชคเพิ่มพูน (2563) ได้พัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ

ร้อนสำหรับหมუნเวียนอากาศทั้งกลับมาใช้ซ้ำในโรงสีเดียวกัน ซึ่งทำให้ประหยัดพลังงานลงได้ถึง 12% วิธีการนี้เป็นแนวทางการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่น่าสนใจและมีศักยภาพสูงในการลดการใช้พลังงานลงได้ แต่อย่างไรก็ตามข้าวเปลือกเป็นวัสดุชีวภาพโดยธรรมชาติ จึงมีความอ่อนไหวง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ โดยเฉพาะในสภาวะของการอบแห้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Chayjan, Ghasemi, and Sadeghi, 2019; Tohidi, Sadeghi, and Torki-Harchegani, 2017) การหมუნเวียนอากาศทั้งกลับมาใช้ซ้ำจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการผสมอากาศอย่างแม่นยำเพื่อให้ได้ความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้งซึ่งอาจจะต้องพิสูจน์ถึงความเหมาะสมในการปรับปรุงสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมต่อไป

สุชาติ ธนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และ สมชาติ โสภณธรรณฤทธิ์ (2555) รายงานผลการใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสนในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้อากาศร้อนเป็นพาหะขับเคลื่อนข้าว ที่อุณหภูมิอากาศ 130 150 และ 170 °C ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s ระยะห่างกระแสนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อน เท่ากับ 90 kg/h จากการทดลองพบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น และพบการแตกหักของข้าวเปลือกระหว่าง 44.06% ถึง 56.62% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมจากการทดลองอบแห้งรอบแรกและรอบที่สอง เช่นเดียวกับ C. Nimmol (2019) ซึ่งรายงานถึงการใช้พลังงานและคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลม ในสภาวะอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 120 150 และ 180 °C จำนวน 2 รอบ พบว่า อัตราการอบแห้งสูงในรอบแรกของการอบ และลดลงในรอบที่สอง การใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำต่ำที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงและพบการใช้พลังงานสูงขึ้นในรอบการอบแห้งที่สอง มีค่าระหว่าง 4.3 ถึง 16.8 MJ/kg_{water} ซึ่งมีการใช้พลังงานผกผันกับการทำแห้งในรอบแรก นอกจากนี้ อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงยังส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันมีค่าระหว่าง 30.3% ถึง 49.4% (ตัวอย่างควบคุม 54.4%) วิธีการที่กล่าวมาเป็นเพียงการศึกษาแนวทางการใช้เครื่องอบแห้งเพื่อลดความชื้นข้าวในระยะเริ่มต้นเท่านั้น เพื่อที่จะลดกระบวนการทำแห้งให้กระชับขึ้นด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมในขั้นตอนเดียว ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา (2557) จึงได้สร้างเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นขึ้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของหอบแห้งแบบช่องอที่สร้างความปั่นป่วนในระบบอบแห้งในช่วงอุณหภูมิอากาศคงที่ 80 100 และ 120 °C ผลการศึกษาพบว่า การสร้างความปั่นป่วนในระบบอบแห้งเป็นผลดีต่ออัตราการอบแห้งซึ่งสามารถลดพลังงานรวมจำเพาะลงได้อย่างมีนัยสำคัญ (ค่าพลังงานจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.87 ถึง 8.13 MJ/kg_{water}) นอกจากนี้ยังพบรายงานว่าการที่ข้าวเปลือกได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลาสั้น ส่งผลต่อการแตกหักของข้าวหลังการขัดสีตามมา อิทธิพลนี้ยังพบในกรณีของการใช้ความเร็วอากาศสูงร่วมด้วย ตามรายงานพบการแตกหักของข้าวเปลือกระหว่าง 37.27% ถึง 93.21% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม อิทธิพลเดียวกันนี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ จิตรรัตน์ จอกแก้ว (2559) ซึ่งได้ประเมินสมรรถนะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเช่นเดียวกัน จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการควบคุมสภาวะการทำแห้ง โดยเฉพาะการควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งให้คงที่ตลอดการทดสอบ ซึ่งพบการอธิบายถึงผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อระยะเวลาการอบ การใช้พลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทิศทางเดียวกัน

ถึงแม้ว่าผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงจะทำให้การลดความชื้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว แต่กลับให้ผลลัพธ์ในแง่ของคุณภาพผลผลิตที่ไม่สูงมากนัก การลดความชื้นข้าวด้วยอุณหภูมิอากาศสูงคงที่ตลอดการดำเนินการจึงอาจจะยังขาดความเหมาะสมแก่การนำระบบเหล่านี้มาใช้งานจริงในระบบอุตสาหกรรม ทั้งนี้ ยังไม่พบเอกสารที่รายงานถึงผลของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิอากาศที่แปรเปลี่ยนตามเวลาซึ่งสัมพันธ์กันกับตัวแปรต่าง ๆ ที่สนใจศึกษาอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้ประเด็นดังกล่าวเป็นปัญหาใหม่ที่จำเป็นต้องได้รับการพิสูจน์สมมติฐานและพิจารณาถึงความเหมาะสมแก่การประยุกต์ใช้ในระบบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต่อไป

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า สุชาติ ธนสุขประเสริฐ และคณะ (2555) และ C. Nimmol (2019) ได้นำเสนอความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องอบแห้งพาหะลมมาใช้ลดความชื้นข้าวในขั้นต้น ซึ่ง ญัฐพงษ์ วงศ์บัพพา (2557) และ จิตรรัตน์ จอกแก้ว (2559) ต้องการพัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ให้สามารถลดความชื้นข้าวลงสู่ค่าที่ใช้จัดเก็บได้ในขั้นตอนเดียวซึ่งพบว่ามีการใช้พลังงานใกล้เคียงกับการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งในโรงสีแต่ยังพบปัญหาการแตกร้าวของข้าวเปลือกที่ค่อนข้างสูงเพื่อที่จะพัฒนาสมรรถนะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมและลดการแตกหักของข้าวเปลือกจากกระบวนการอบแห้ง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการตรวจสอบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับบทบาทของการหมุนเวียนอากาศที่งกลับมาใช้ซ้ำและการอบแห้งข้าวเปลือกในกรณีที่อากาศร้อนทำงานอย่างสัมพันธ์กับตัวแปรใด ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานและคุณภาพข้าวจากกระบวนการอบแห้งโดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีควบคุมสำหรับพัฒนาแนวทางควบคุมกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งจะได้กล่าวถึงในแต่ละส่วนต่อไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมสถานะการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งพาหะลม
- 1.2.3 เพื่อประเมินเปรียบเทียบการใช้พลังงานและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 การอบแห้งในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนหลักการอบแห้งแบบชั้นบาง
- 1.3.2 ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นวัสดุในการทดลอง
- 1.3.3 วิเคราะห์ความชื้นของข้าวเปลือกตามวิธีมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC)
- 1.3.4 เครื่องอบแห้งพาหะลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีการทำงานเป็นงวดงาน (Batch type) โดยทดลองอบแห้งงวดละ 20 กิโลกรัม
- 1.3.5 กำหนดความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ร้อยละ 24 ± 0.5 มาตรฐานเปียก
- 1.3.6 กำหนดความเร็วอากาศร้อนคงที่ 8.5 m/s ตลอดการทดสอบ
- 1.3.7 กำหนดอัตราการป้อนข้าวคงที่ 3.3 kg_{dry-solid}/min ตลอดการทดสอบ

- 1.3.8 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยร้อนอุณหภูมิกองที่ 60 และ 80 °C ภายใต้เงื่อนไขที่มีการเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำ 56.52% ของอัตราการไหลที่ใช้ในกระบวนการ และเงื่อนไขที่ไม่มีการเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำ
- 1.3.9 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิกองที่ 60 80 และ 100 °C
- 1.3.10 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวคองที่ 42 45 และ 48 °C
- 1.3.11 สมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้ง ได้แก่ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)
- 1.3.12 ดัชนีบ่งชี้คุณภาพข้าวเปลือกพิจารณาในรูปแบบของร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (Brown rice yield, BRY)
- 1.3.13 สภาวะการอบแห้งข้าวเปลือก ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ อัตราส่วนความชื้นอากาศ และอุณหภูมิข้าวเปลือก
- 1.3.14 ใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทางพลศาสตร์ตลอดจนจำลองผลตอบสนองของระบบ
- 1.3.15 ใช้โปรแกรม IBM SPSS สำหรับวิเคราะห์ปัจจัย วิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และวิเคราะห์ความไวของข้อมูลจากการทดลอง
- 1.3.16 ใช้ Arduino Due เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบ
- 1.3.17 วัดอุณหภูมิข้าวด้วย K-type thermocouple ใช้งานร่วมกับ MAX6675 module
- 1.3.18 วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยเซ็นเซอร์ DHT22
- 1.3.19 วัดความดันอากาศด้วย HX710B air pressure sensor module

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้วิธีควบคุมสภาวะการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวหลังกระบวนการอบแห้ง
- 1.4.2 กลยุทธ์ในการควบคุมกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะสามารถเพิ่มศักยภาพการอบแห้งและลดการใช้พลังงานของกระบวนการได้

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงลักษณะของข้าวหอมมะลิ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พื้นฐานทฤษฎี
อบแห้ง ความชื้นในเมล็ดพืช การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบ
ควบคุมในกระบวนการอบแห้งซึ่งเป็นปัญหาที่นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจในยุคปัจจุบัน

2.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นหนึ่งในพันธุ์ข้าวที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศ
และต่างประเทศ รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเมล็ดซึ่งมีรูปร่างเรียวยาวและมีกลิ่นหอม
ที่เป็นเอกลักษณ์ ข้าวชนิดนี้มีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย ทำให้ได้รับความนิยม
ในการเพาะปลูกในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) ลักษณะ
ประจำพันธุ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

หมายเหตุ จาก “ข้าวอะไรที่คนไทยไม่เคยได้กิน,” โดย Kasetorganic, 2566

ประเทศไทยส่งออกข้าวหอมมะลิไปค้าขายยังต่างประเทศเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ดังเช่น
ในช่วงต้นปีที่ผ่านมา สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย (2567) ระบุว่า “กระทรวงพาณิชย์รายงานผล
การส่งออกข้าวเดือน มกราคม ถึง มีนาคม 2567 มีปริมาณ 2,464,585 ตัน คิดเป็นมูลค่า 56,730.36
ล้านบาท (1,611.2 ล้านเหรียญสหรัฐฯ) โดยมีปริมาณการส่งออกเพิ่มขึ้น 19.4% ทำให้มูลค่า

การส่งออกสูงขึ้น 49% เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเดียวกันในปี 2566 ที่มีปริมาณการส่งออก 2,063,910 ตัน มูลค่า 38,066.54 ล้านบาท (1,125.3 ล้านเหรียญสหรัฐฯ)” จากมูลค่าการส่งออกข้าวที่ได้รายงานมา หากเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ส่งออกอื่น ๆ ของประเทศไทย จะเห็นได้ว่า มูลค่าการส่งออกข้าวติดอยู่ในรายชื่อ 15 อันดับมูลค่าสินค้าส่งออกสูงสุดของไทยอีกด้วย (กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, 2566) ดังนั้น ผลผลิตข้าวหอมมะลิไทยจึงมีบทบาทสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของเกษตรกรและระบบเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 2.1 ลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ลักษณะประจำพันธุ์ข้าว	ข้อมูล
ชื่อพันธุ์ (ไทย)	ขาวดอกมะลิ 105
ชื่อพันธุ์ (อังกฤษ)	KHAO DAWK MALI 105
ความไวต่อช่วงแสง	ไวต่อช่วงแสง
สีของข้าวเปลือก	ฟาง
หางของข้าวเปลือก	ไม่มี
ความยาวเมล็ดข้าวเปลือก (มิลลิเมตร)	9.7 ถึง 11.5
ความยาวเมล็ดข้าวกล้อง (มิลลิเมตร)	7.0 ถึง 8.1
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเมล็ดข้าวกล้อง	มากกว่าหรือเท่ากับ 3.2 : 1
น้ำหนักของข้าวเปลือก 100 เมล็ด (กรัม)	2.50 ถึง 2.97

หมายเหตุ จาก มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4000 - 2560 ข้าวหอมมะลิไทย, โดย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560, กรุงเทพฯ: ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

2.2 ความชื้นในเมล็ดพืช

ปริมาณความชื้นภายในเมล็ดพืช (Moisture content, MC) เป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืชต่อหน่วยมวลของเมล็ดพืชชนิดนั้น ๆ แสดงได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

2.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis moisture content, MC_{wb}) เป็นความชื้นที่อยู่ในเมล็ดพืชต่อหน่วยมวลชื้นของวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2565)

$$MC_{wb} = \left(\frac{m_w - m_d}{m_w} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่ MC_{wb} คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b)
 m_w คือ มวลข้าวเปลือกชื้น (g)
 m_d คือ มวลแห้งของข้าวเปลือก (g)

2.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis moisture content, MC_{db}) เป็นความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพืชต่อหน่วยมวลแห้งของวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2565)

$$MC_{db} = \left(\frac{m_w - m_d}{m_d} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

โดยที่ MC_{db} คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)
 m_w คือ มวลข้าวเปลือกชื้น (g)
 m_d คือ มวลแห้งของข้าวเปลือก (g)

โดยทั่วไปการซื้อขายสินค้าทางการเกษตรของประเทศไทยนิยมใช้ความชื้นตามมาตรฐานเปียกเป็นเกณฑ์ในการกำหนดราคาซื้อขายสินค้า ในทางตรงกันข้าม ความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมนำไปใช้วิเคราะห์การอบแห้งเชิงทฤษฎี เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุซึ่งเป็นสัดส่วนของปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระบบ จึงทำให้มีความสะดวกในการคำนวณหรือการวิเคราะห์ผลในเชิงทฤษฎีเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม หากผู้อ่านต้องการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง จะเห็นว่าความชื้นทั้ง 2 รูปแบบนี้มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2565)

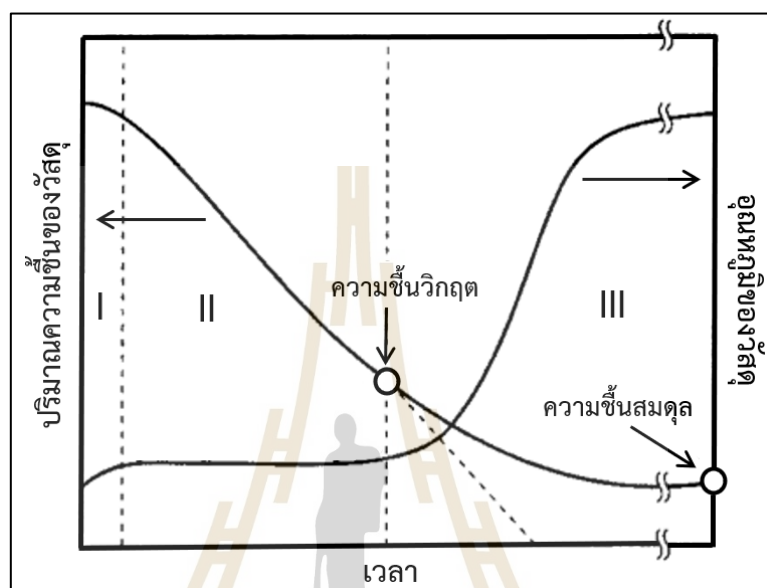
$$MC_{wb} = \left(\frac{MC_{db}}{100 + MC_{db}} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

$$MC_{db} = \left(\frac{MC_{wb}}{100 - MC_{wb}} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

2.3 การอบแห้งเมล็ดพืช

กระบวนการอบแห้ง (Drying process) เป็นกระบวนการลดความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุลงให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา การเน่าเสีย ช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนาน และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2565) ซึ่งการลดความชื้นในเมล็ดพืชมีอยู่หลากหลายวิธีการ โดยทั่วไประบบอบแห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นสื่อกลางในการถ่ายเท

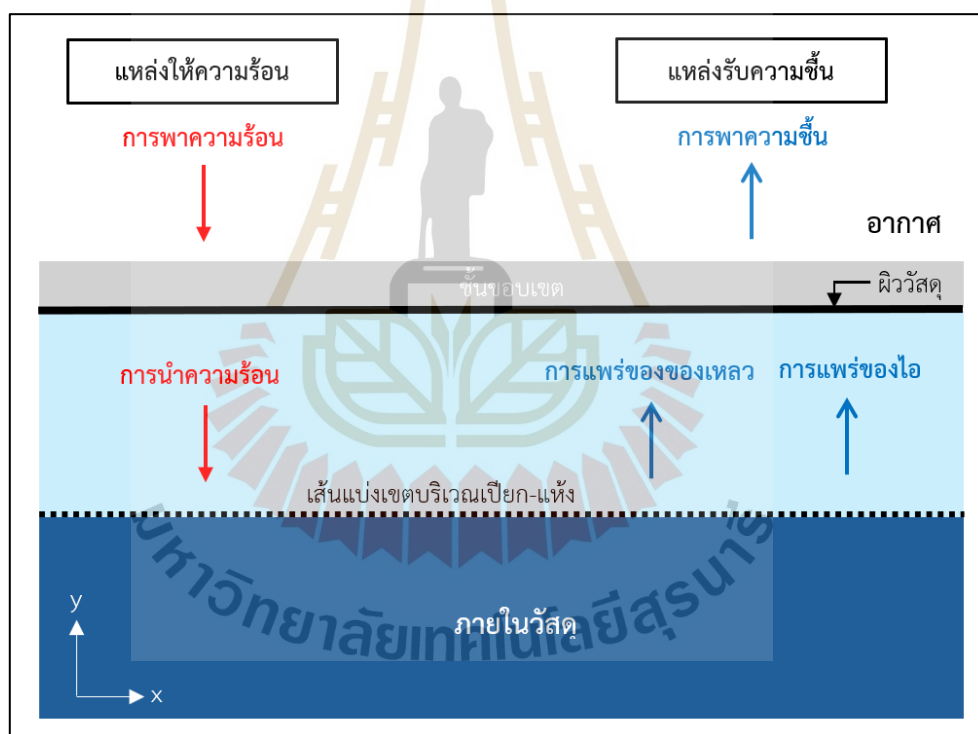
ความร้อนและมวลระหว่างอากาศกับความชื้นของเมล็ดพืช Bala (1997) อธิบายกลไกการอบแห้งเมล็ดพืชออกเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.2 ประกอบด้วย ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (Heating – up period, I) ถัดมาเป็นช่วงอบแห้งคงที่ (Constant drying period, II) และสุดท้ายเป็นช่วงอบแห้งลดลง (Falling drying period, III)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุในกระบวนการอบแห้ง

ในช่วงแรกความร้อนจากแหล่งกำเนิดถูกส่งผ่านตัวกลางไปยังเมล็ดพืชทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชเพิ่มสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิสมดุลที่เป็นเงื่อนไขการอบ ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ ซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลขึ้นที่ผิวของเมล็ด เมื่อความชื้นจากภายในเมล็ดพืชเคลื่อนตัวมายังผิววัสดุเท่ากับการระเหยความชื้นที่ผิวของวัสดุอบแห้งไปยังตัวกลาง ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบแห้งคงที่ สังเกตได้จากกราฟในช่วงที่ 2 ซึ่งมีความชันคงที่ตลอดช่วงที่พิจารณา และอุณหภูมิของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความชื้นที่ผิวของเมล็ดพืชเริ่มลดลงและอัตราการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดพืชไปยังพื้นผิวเมล็ดช้ากว่าอัตราการระเหยความชื้นที่ผิวของเมล็ดไปยังตัวกลาง พฤติกรรมนี้ทำให้เกิดจุดเปลี่ยนความชันของกราฟเกิดขึ้น เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) หากพิจารณาการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดพืชตามแนวยาวหรือตัวแปรมิติของรูปทรง ในกรณีที่มีอากาศร้อนอุณหภูมิคงที่ที่พัดผ่าน ช่วงนี้จะเกิดความแตกต่างสูงระหว่างความชื้นที่ผิวและแกนกลางเมล็ดพืช และจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา เรียกว่า เกรเดียนต์ความชื้น (Moisture gradient) หลังจากนั้นการระเหยน้ำจะมีค่าลดลงและอุณหภูมิของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเวลา ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบแห้งลดลง และการระเหยจะสิ้นสุดลงเมื่อถึงจุดความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) ซึ่งสัมพันธ์กับเงื่อนไขของอากาศที่ใช้สำหรับลดความชื้นในวัสดุนั้น ๆ

ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล (2564) กล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลของวัสดุในกระบวนการอบแห้งว่า การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้จากการนำ การพา และการแผ่รังสี ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อน โดยที่ความร้อนจากตัวกลางจะถ่ายโอนมาอย่างผิวของวัสดุ และถ่ายโอนต่อมายังภายในวัสดุโดยการนำและการแผ่รังสีความร้อน ความร้อนที่ได้รับถูกใช้เป็นการแผ่รังสีของการระเหย ซึ่งโดยทั่วไปจะผ่านกลไกการแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion) และการแพร่ของไอ (Vapor diffusion) ไปยังแหล่งรับความชื้น กลไกที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากผลต่างของความดันอุทกสถิต (Hydrostatic pressure) กรณีที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated steam) เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ในปัจจุบันยังคงเป็นเครื่องอบแห้งลมร้อน ซึ่งใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ดังนั้นในบทความต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายหลักการพื้นฐานของการถ่ายโอนความร้อนและมวลของระบบอบแห้งแบบลมร้อนดังรูปที่ 2.3 เป็นหลัก



รูปที่ 2.3 กลไกการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศในกระบวนการอบแห้ง
หมายเหตุ จาก การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ (หน้า 26), ชัยวัฒน์
รัตนมีชัยสกุล, 2564, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.

รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศในกระบวนการ
อบแห้ง เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านผิวของวัสดุ บริเวณดังกล่าวจะมีชั้นขอบเขตอยู่โดยรอบผิววัสดุนั้น
ความหนาของชั้นขอบเขตขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศ และอุณหภูมิของชั้นขอบเขตจะมีค่าเท่ากับ

อุณหภูมิของอากาศร้อน การพาความร้อนเกิดขึ้นผ่านชั้นขอบเขตสุ่มผิวของวัสดุตั้งสมการที่ 2.5 พิจารณาได้จากทิศทางลูกศรสีแดงของรูปที่ 2.3 (ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล, 2564)

$$q = h_T A (T_\infty - T_s) \quad (2.5)$$

โดยที่	q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	h_T	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	A	คือ พื้นที่ผิวของการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
	T_∞	คือ อุณหภูมิของอากาศร้อน ($^\circ C$)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ ($^\circ C$)

หลังจากนั้นความร้อนที่ผิวของวัสดุจะถูกถ่ายโอนเข้ามายังภายในวัสดุโดยการนำความร้อน เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนแบบหนึ่งมิติในแนวแกน y ของรูปที่ 2.3 อัตราการนำความร้อนสามารถคำนวณได้ตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ตั้งสมการที่ 2.6 (ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล, 2564)

$$q = -kA \frac{dT}{dy} \quad (2.6)$$

โดยที่	k	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	T	คือ อุณหภูมิของวัสดุ ($^\circ C$)
	y	คือ ระยะตามแนวแกน (m)

เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากอากาศ พลังงานความร้อนเหล่านี้จะถูกใช้ในการขับเคลื่อนมวลโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ภายในวัสดุสำหรับการระเหย หากกำหนดสมมติฐานให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของวัสดุ มีค่าเท่ากันตลอดแนวแกน วัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุเป็นไปโดยการแพร่ในทิศทางเดียว สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นค่าคงที่ และไม่มีการหดหรือขยายตัวของวัสดุ อัตราการถ่ายเทมวลจึงสามารถเขียนได้โดยใช้หลักการแพร่ตามกฎของฟิกซ์ (Fick's law of diffusion) ตั้งสมการที่ 2.7 (ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล, 2564)

$$N = -DA \frac{dC}{dy} \quad (2.7)$$

โดยที่	N	คือ อัตราการถ่ายเทมวล (mol/s)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m ² /s)
	A	คือ พื้นที่ของการถ่ายเทมวล (m ²)
	C	คือ ความเข้มข้นของน้ำ (mol/m ³)

เมื่อเกิดความแตกต่างของความชื้นในวัสดุขึ้น ความชื้นจากภายในวัสดุที่มีค่าสูงจะเกิดการแพร่ไปยังบริเวณที่มีความชื้นต่ำกว่า หากพิจารณาการอบแห้งข้าวเปลือก โดยทั่วไปแล้วความชื้นจะแพร่จากแกนกลางของเมล็ดออกมาตามแนวแกนต่าง ๆ จนกระทั่งถึงเปลือกข้าว (ผิวรอบนอก) จากนั้นความชื้นที่ผิวของวัสดุจะถ่ายเทสู่ชั้นขอบเขตโดยการพาความชื้น ความสามารถในการพาความชื้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพามวลและความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของน้ำที่ผิวของวัสดุกับความเข้มข้นของน้ำที่ชั้นขอบเขต โดยความเข้มข้นของน้ำที่ชั้นขอบเขตจะมีค่าเท่ากับ ความเข้มข้นของน้ำที่สถานะสมดุลของวัสดุ กลไกการพาความชื้นอธิบายได้โดยสมการที่ 2.8 (ชัยวัฒน์ รัตน์มีชัยสกุล, 2564)

$$N = h_M A (C_s - C_e) \quad (2.8)$$

โดยที่	h_M	คือ สัมประสิทธิ์การพามวล (m/s)
	C_s	คือ ความเข้มข้นของน้ำที่ผิวของวัสดุ (mol/m ³)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของน้ำที่สถานะสมดุล (mol/m ³)

ความสัมพันธ์ที่ 2.5 ถึง 2.8 อธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวล ตั้งแต่อากาศร้อนจากในห้องอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงถ่ายโอนพลังงานมายังผิวของวัสดุโดยการพาความร้อนและความชื้นที่ผิวของวัสดุจะระเหยออกสู่อากาศร้อนโดยการพาความชื้น จากนั้นจะเกิดความแตกต่างของความชื้นหรือความเข้มข้นของน้ำในวัสดุ ส่งผลให้เกิดกลไกการแพร่ความชื้นจากภายในวัสดุ ออกมายังผิววัสดุ ขณะเดียวกัน ความร้อนที่ผิวของวัสดุซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะแพร่ไปสู่ภายใน ยกเว้นการนำความร้อนเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์และกฎของฟิกซ์ กฎเหล่านี้ถูกใช้เป็นสมการควบคุม (Governing equation) ของแบบจำลองการอบแห้ง โดยเขียนในรูปของอนุพันธ์ย่อยตามระบบพิกัดฉาก พิกัดทรงกระบอก และพิกัดทรงกลม ได้ตั้งสมการที่ 2.9 ถึงสมการที่ 2.11 ตามลำดับ (ชัยวัฒน์ รัตน์มีชัยสกุล, 2564)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D_{eff}}{r} \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} r \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D_{eff} \sin \theta \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) + \frac{D_{eff}}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 M}{\partial \varphi^2} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่	D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
	M	คือ	ความชื้นของวัสดุ (kg/kg dry basis)
	r, x, y, z, θ และ φ	คือ	ระยะตามแนวแกนของระบบพิกัดต่าง ๆ (m)

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.12

$$D_{eff} = D_o e^{\left(\frac{-E_a}{R_g T} \right)} \quad (2.12)$$

โดยที่	D_o	คือ	ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส (m^2/s)
	E_a	คือ	พลังงานกระตุ้น (J/mol)
	R_g	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ ($J/mol \cdot ^\circ C$)
	T	คือ	อุณหภูมิของวัสดุ ($^\circ C$)

2.4 การลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้ง

โดยทั่วไปแล้วผลผลิตทางการเกษตรซึ่งถูกเก็บเกี่ยวใหม่มักจะมีน้ำสูง หากเมล็ดพืชไม่ได้รับการลดความชื้นวัสดุลงไปยังจุดที่เหมาะสมอย่างทันท่วงที อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อผลผลิตทางการเกษตรได้ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องนำผลผลิตเหล่านั้นมาอบแห้งเพื่อลดความชื้นก่อนนำไปจัดเก็บ โดยที่ Sisman and Albut (2010) ได้แนะนำถึงค่าปริมาณความชื้นสูงสุดสำหรับเก็บรักษาเมล็ดพืชบางชนิดอย่างปลอดภัยภายใต้ระยะเวลาต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งข้าวเปลือกควรจะมีน้ำชื้นต่ำอย่างน้อย 14%w.b. สำหรับการจัดเก็บในช่วงเวลา 6 เดือน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าดังกล่าวเป็นตัวชี้วัดสำหรับปฏิบัติการทดลองในบทที่ 3

การลดความชื้นข้าวเปลือกแบบดั้งเดิม (Traditional drying method) มีข้อจำกัดบางประการที่เป็นอุปสรรคต่อการลดความชื้นของข้าว ทำให้ผู้ประกอบการบางรายหันมาลงทุนและใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก (Mechanical drying method) มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การดำเนินงาน

ของเครื่องอบแห้งดังกล่าวจำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบ ทำให้มีค่าใช้จ่ายส่วนนี้เกิดขึ้นในการดำเนินงาน ซึ่งเป็นต้นทุนอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาผนวกกับราคาสินค้า ฉะนั้นประเด็นเกี่ยวกับความคุ้มค่าด้านพลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต่อผลผลิตข้าวจึงเป็นความท้าทายของนักวิจัยที่ต้องทำการพัฒนาระบบต่อไป

ตารางที่ 2.2 ความชื้นสำหรับจัดเก็บเมล็ดพืชอย่างปลอดภัย (ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก)

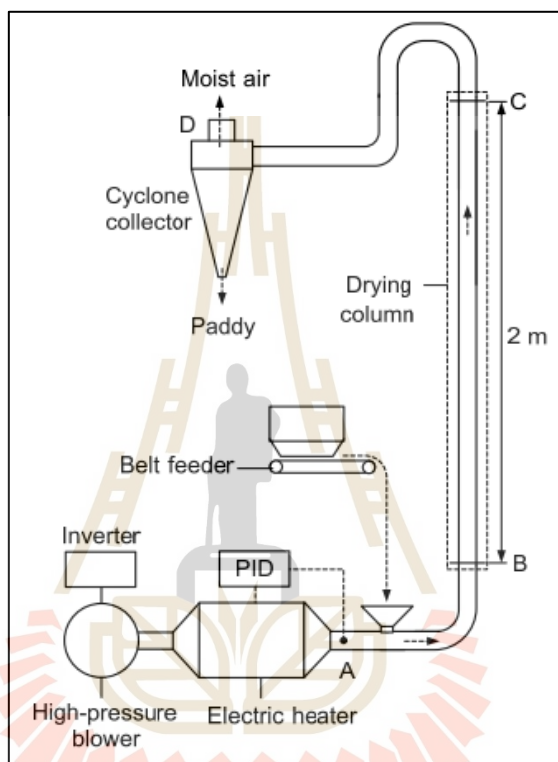
เมล็ดพืช	ระยะเวลาจัดเก็บ	
	ต่ำกว่า 6 เดือน	นานกว่า 6 เดือน
ข้าวบาร์เลย์ (Barley)	14	12
ข้าวโพด (Corn)	15.5	13
ถั่ว (Beans)	16	13
ข้าวฟ่าง (Millet)	10	9
ข้าวเปลือก (rough rice)	14	12
ข้าวฟ่างหางช้าง (Sorghum)	13.5	13
ถั่วเหลือง (Soybean)	13	11
เมล็ดแฟลกซ์ (Flax Seed)	9	7
ข้าวสาลี (Wheat)	14	13
ข้าวโอ๊ต (Oats)	14	13

หมายเหตุ จาก “Grain storage management,” โดย Sisman and Albut, 2010, *Annual International Symposium on Agriculture Research*, 15-18

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับประเภทของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช พบว่า สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2565) ได้เสนอการจำแนกชนิดของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช โดยแบ่งตามลักษณะทางจลน์ของเมล็ดในกระบวนการอบแห้งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (Fixed-bed dryer) และ 2. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving-bed dryer) เครื่องอบแห้งซึ่งถูกนำมาใช้สำหรับศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นเครื่องอบแห้งพาหะลม (Pneumatic dryer) จัดอยู่ในหมวดหมู่ของเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล เนื่องจากในกระบวนการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการลอยตัวเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกระแสของอากาศ นอกจากนี้ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2565) ยังได้อธิบายข้อได้เปรียบของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้ได้รับความนิยมนำมาลดความชื้นวัสดุที่เป็นผงหรือของแข็งขนาดเล็กที่มีความชื้นสูง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสูง จึงส่งผลให้ลดเวลาในการอบแห้งในวัสดุลงได้อย่างรวดเร็ว เครื่องอบแห้งพาหะลมมีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 2.4

หลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งพาหะลม ใช้เครื่องเป่าลมความดันสูง (High-pressure blower) สร้างการไหลอากาศผ่านอุปกรณ์ทำความร้อน (Electric heater) ทำงานร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิพีไอดี (PID – Temperature controller) เพื่อผลิตอากาศร้อน อัตราการไหลของอากาศกำหนดโดยควบคุมความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งทำงานสัมพันธ์กับ

ความเร็วรอบของเครื่องเป่าลม ขณะที่ข้าวเปลือกจากถังเก็บถูกขับโดยสายพานลำเลียง (Belt feeder) เมื่อข้าวปะทะกับอากาศร้อนซึ่งมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก (Terminal velocity) ส่งผลให้เมล็ดข้าวเหล่านั้นลอยขึ้นและมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับของไหล เข้าสู่หอบแห้ง (Drying column) และไหลเข้าสู่ไซโคลน (Cyclone collector) เพื่อแยกเมล็ดข้าวเปลือกและอากาศออกจากกัน



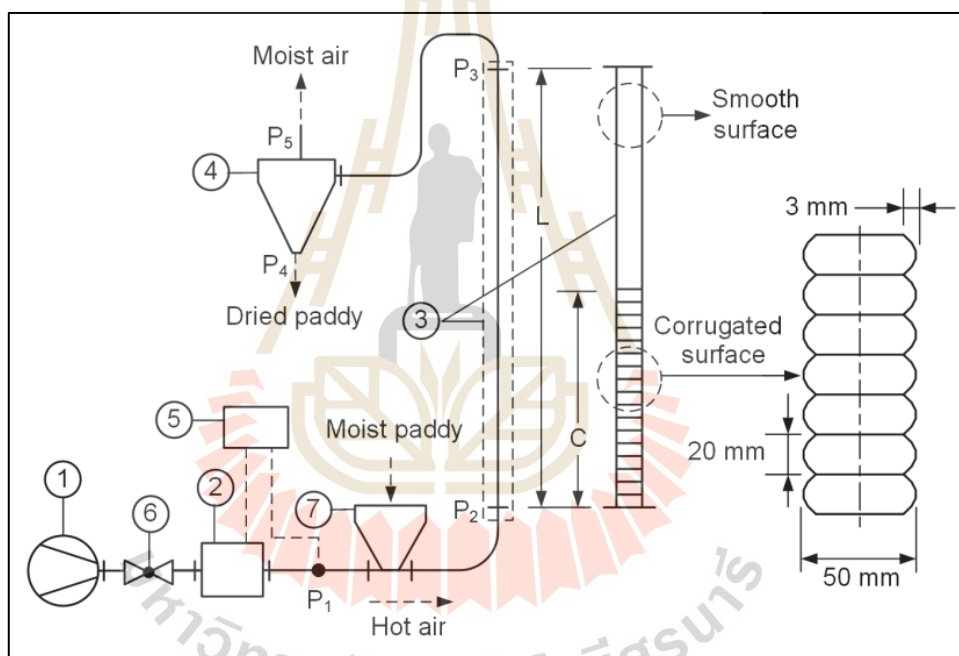
รูปที่ 2.4 แผนภาพเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

หมายเหตุ จาก “อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม,” โดย ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไพทโสภณ, อานันท์ ตันภูมิ, ฉัตรชัย นิยมมล และ กิตติ สถาพรประสาธน์, 2559, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 11, 1-9.

2.4.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอบแห้งพาหะลม

ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไพทโสภณ, อานันท์ ตันภูมิ, ฉัตรชัย นิยมมล และ กิตติ สถาพรประสาธน์ (2559) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดของหอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการป้อนวัสดุ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (แสดงในพจน์ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, SEC) ที่มีการป้อนวัสดุเข้าระบบหลายรอบโดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30 %d.b. เป็นวัสดุในการทดสอบการทดลองอบแห้งจะแบ่งออกเป็นสองส่วน

กล่าวคือ การอบแห้ง 1 รอบ และการอบแห้ง 2 รอบ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มทั้งอุณหภูมิอบแห้ง อัตราการป้อนข้าวเปลือก และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง มีผลทำให้ SEC ของกระบวนการอบแห้งมีค่าลดลงโดยค่า SEC ต่ำสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ $1.6 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งรอบที่ 1 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง 50 mm ที่อุณหภูมิอบแห้ง $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 20 kg/h ในขณะที่ความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งมีค่า 19.3 \%d.b. ซึ่งเกิดขึ้นหลังการอบแห้งรอบที่ 2 โดยใช้หอบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ที่อุณหภูมิ $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการป้อน 20 kg/h เช่นเดียวกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงและเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือก โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ แต่ยังไม่พบรายงานเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจากงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.5 แผนภาพเครื่องอบแห้งพาหะลมสำหรับข้าวเปลือกความชื้นสูง

หมายเหตุ จาก “Performance, energy, and product quality aspects of a modified pneumatic dryer for rapid drying of high-moisture paddy,” โดย C. Nimmol, 2019, *Transactions of the ASABE*, 62, 1531-1539.

C. Nimmol (2019) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอากาศอบแห้งระหว่าง $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่าสัดส่วนความยาวต่อความขรุขระของหอบแห้ง (C/L) เท่ากับ 0, 0.5 และ 1.0 ตามรูปที่ 2.5 ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการทำแห้งและคุณภาพข้าวหลังกระบวนการสี จากการศึกษาพบว่า หอบแห้งที่มีค่า C/L สูงสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้

พลังงานของเครื่องอบแห้งได้ สำหรับการอบแห้งรอบแรก หอบแห้งที่มีค่า C/L เป็น 0.5 และ 1.0 สามารถลดการใช้พลังงานได้ 14% ถึง 17% และ 41% ถึง 44% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ หอบแห้งแบบผิวเรียบ ($C/L = 0$) สำหรับการอบแห้งรอบที่สอง พบทิศทางการผกผันของการใช้พลังงาน โดยที่ความขรุขระของหอบแห้งไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งรอบแรก แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้สามารถลดความชื้นข้าวลงได้อย่างรวดเร็ว มีการใช้พลังงานในช่วง 4.3 ถึง 16.8 MJ/kg_{water} นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งและค่า C/L ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 30.3% ถึง 49.4% (ตัวอย่างควบคุม 54.4%) ในขณะที่ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและค่า C/L ไม่ส่งผลต่อค่าความยาวของข้าวสารแต่อย่างใด

วิธีการที่กล่าวมานี้ เป็นเพียงการศึกษาถึงแนวทางการใช้เครื่องอบแห้งเพื่อลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงในขั้นเริ่มต้นเท่านั้น และภายหลังจากอบแห้งเพียง 1 หรือ 2 รอบ ข้าวเหล่านี้จะถูกนำไปเข้ากระบวนการอบแห้งรูปแบบอื่นในขั้นต่อไป เพื่อที่จะลดกระบวนการทำแห้งให้กระชับขึ้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในขั้นตอนเดียว ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบูรณ์ (2565) จึงศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา โดยอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 น้ำหนัก 4 kg ที่อุณหภูมิอากาศ 80 100 และ 120 °C ความเร็วอากาศอบแห้ง 16 m/s หอบแห้งทำจากข้องอ มุม 90 องศา แบบ 8 ข้องอ และแบบ 16 ข้องอ ผลการทดสอบ พบว่า การอบแห้งในท่อแบบ 16 ข้องอ ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบ 8 ข้องอ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนข้องอช่วยเพิ่มความปั่นป่วนในระบบอบแห้งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงขึ้นไป นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งยังช่วยส่งเสริมให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นไปด้วย ระบบนี้สามารถลดการใช้พลังงานรวมจำเพาะลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.87 ถึง 8.13 MJ/kg_{water} ถึงแม้ว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศสูงและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในระบบอบแห้งจะส่งผลดีในแง่ของอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น แต่พบว่าการที่ข้าวเปลือกได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลาสั้น ส่งผลให้ข้าวมีการแตกหักสูงอย่างมีนัยสำคัญ อิทธิพลนี้ยังพบในกรณีของการใช้ความเร็วอากาศสูงร่วมด้วย ซึ่งพบการแตกหักของข้าวเปลือกอยู่ระหว่าง 37.27% ถึง 93.21% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, 2557)

ศิวกร ศรีธัญญากร (2562) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 60 80 100 120 และ 150 °C ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ 19 22 และ 25 m/s และ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นคงที่ 5 10 และ 15 kg ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ ผลจากการลดความชื้นจาก 24%w.b. จนถึง 14%w.b. พบว่า อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าอิทธิพลอื่น การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นไป ช่วยลดเวลาอบแห้งและลดการใช้พลังงานลงตามไปด้วย อีกนัยหนึ่ง การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกลับส่งผลให้ข้าวเสียหายสูงตามไปด้วย การเพิ่มความเร็วลมส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นไปเล็กน้อยแต่ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้นไปอย่างมาก อิทธิพลถัดมาเป็นมวลเริ่มต้นของข้าวเปลือก ซึ่งการเพิ่มมวลเริ่มต้นของข้าวเปลือกส่งผลดีต่อการใช้พลังงานและเพิ่มเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นให้สูงขึ้น ขณะที่ดัชนี

ความขาวข้าวไม่มีความแตกต่างกับตัวอย่างควบคุมในทุกเงื่อนไขการทดลอง การทดลองนี้ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของตัวแปรต้นแต่ละตัวที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตาม แต่ยังขาดข้อสรุปที่ชัดเจนถึงตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจำเป็นจะต้องทำการศึกษาต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้ให้คำแนะนำถึงตัวแปรดำเนินการที่ให้ความสำคัญของข้อแลกเปลี่ยนระหว่างตัวแปรตามที่น่าสนใจ โดยยกตัวอย่างกรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิร้อนสูงสุด $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้ความเร็วลมต่ำสุด 19 m/s มวลข้าวเปลือกเริ่มต้นสูงสุด 15 kg ซึ่งทำให้อัตราการอบแห้งสูง ใช้พลังงานรวมจำเพาะรวมต่ำสุดที่ $7.84\text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันเป็น 29.1% และ ค่าดัชนีความขาวข้าวอยู่ที่ 67.7% โดยตัวอย่างควบคุมที่ศึกษามีเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน เท่ากับ 46.4% และ ค่าดัชนีความขาวข้าว เท่ากับ 68.4%

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เครื่องอบแห้งพาสเจอร์มีการใช้พลังงานจำเพาะระหว่าง 3.87 ถึง $8.13\text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ (พิจารณาการอบแห้งข้าวความชื้นสูงจนถึง $14\%w.b.$) ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้พลังงานของระบบอบแห้งในโรงสีข้าวเขตภาคกลางของประเทศไทย จากรายงานของ มนตรี หวังจิ, สมชาติ โสภณธฤทธิ และ วทีญญ รอดประพัฒน์ (2542) ซึ่งได้ประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งข้าวในโรงสีขนาดใหญ่ 3 แห่ง โรงสีเหล่านี้สามารถลดความชื้นข้าวจาก $20\%w.b.$ ถึง $14\%w.b.$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีการใช้พลังงานจำเพาะรวมอยู่ในช่วง 4.25 ถึง $4.33\text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ หากพิจารณาในแง่ของคุณภาพข้าว พบว่า ข้าวเปลือกหลังการอบแห้งจากทั้ง 3 แห่ง มีการแตกหักค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกอ้างอิง โดยมีการแตกหักประมาณ 15% ในขณะที่การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาสเจอร์ในปัจจุบันมีการแตกหักสูงกว่า 37% (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, 2557) แต่อย่างไรก็ตาม ระบบอบแห้งขนาดใหญ่เหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการในการพักตัว (Tempering) ซึ่งต้องใช้เวลากว่า 3 ชั่วโมงขึ้นไป ทำให้ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเกิดความล่าช้าเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งแบบพาสเจอร์ นอกจากนี้ มนตรี หวังจิ และคณะ (2542) ยังได้ให้คำแนะนำถึงแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและเพิ่มร้อยละต้นข้าว โดยข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำกว่า $17\%w.b.$ ไม่ควรได้รับอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงมาก เนื่องจากจะทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงและเกิดความเค้นสูงตามไปด้วย จึงแนะนำให้มีการพักข้าว 4 ถึง 5 ชั่วโมง เพื่อลดความเค้นที่เกิดจากอุณหภูมิของเมล็ดข้าว และมีระยะเวลาให้ความชื้นจากภายในเมล็ดเคลื่อนตัวมาที่ผิวเมล็ดสำหรับอบแห้งในรอบถัดไป รายงานนี้ยังขาดข้อสรุปที่ชัดเจนในแง่ของอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวต่อการเพิ่มสมรรถนะการทำแห้งด้วยเทคนิคพาสเจอร์ ปมปัญหานี้เป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจแก่การศึกษาและพิสูจน์ข้อเท็จจริงต่อไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.4.2. อิทธิพลของการเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำต่อการใช้พลังงานในระบบอบแห้ง

วันชัย สุตะพันธ์, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ อำไพศักดิ์ ทิบุญมา (2555) ศึกษาและประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลคลุกเคล้า ณ โรงสีข้าวพรเจริญ เพื่อเป็นข้อมูลในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า แหล่งผลิตความร้อนในระบบอบแห้งใช้พลังงานสูงถึง 93.89% ของพลังงานทั้งหมดที่ผลิตแก่ระบบ พลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้ง เท่ากับ $7,678.08\text{ MJ/h}$ และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย เท่ากับ $6.13\text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ มีต้นทุนการอบแห้ง เท่ากับ $0.64\text{ Bath/kg}_{\text{water}}$ เมื่อพิจารณาสัดส่วนการใช้พลังงาน

ในระบบอบแห้ง จะเห็นว่า ระบบอบแห้งมีการใช้พลังงานในการผลิตอากาศร้อนสูงกว่า 90% ซึ่งจุดนี้เป็นตัวแปรหลักที่ควรให้ความสำคัญและพัฒนาแนวทางการปรับปรุงระบบเพื่อลดต้นทุนในระบบอบแห้ง ต่อมา อมร ดอนเมือง, นิรุต อ่อนสูง และ สุรียา โชคเพิ่มพูน (2562) ได้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งในระบบอุ่นอากาศอบแห้งของโรงสีพรเจริญที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นสามารถประหยัดเชื้อเพลิงแอลบได้ 12.88% เมื่อเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบเดิม ช่วยให้ประหยัดพลังงานลงได้ 1,837,080 MJ/year คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ 145,800 Bath/year (คิดที่การซื้อขายแอลบ กิโลกรัมละ 8 บาท) โดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 237,260.87 บาท และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 17.32% มีระยะเวลาในการคืนทุน 6 ปี

บุญพริกา ศิลา, อภิสสิทธ์ ภักดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ (2565) ศึกษาการใช้พลังงานในรูปแบบไฟฟ้าของระบบทำความร้อนให้กับอากาศอบแห้ง เมื่อมีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 70% ที่การผลิตอากาศอุณหภูมิ 80 °C ความเร็วลมคงที่ 6 m/s ผลการทดลองพบว่า การใช้อากาศหมุนเวียนส่งผลให้การใช้พลังงานของแหล่งผลิตอากาศร้อนลดลงโดยอากาศยังคงความสามารถในการรับความชื้นจากวัสดุได้ดี การหมุนเวียนอากาศที่ 70% สามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 8.57% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเวียนอากาศ วิธีนี้เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งให้สูงขึ้นได้

Darvishi, Azadbakht, and Noralahi (2018) ได้ประเมินผลของการเตรียมตัวอย่างและการหมุนเวียนอากาศต่อการวิเคราะห์พลังงาน (Energetic analysis) และ เอ็กเซอร์ยี (Exergy) ของการทำแห้งเห็ดหั่นด้วยฟลูอิดไคซ์เบตในสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน ผลการศึกษานี้บ่งชี้อย่างชัดเจนว่าการใช้พลังงานลดลงด้วยการเตรียมตัวอย่างและการหมุนเวียนอากาศ โดยการสูญเสียเอ็กเซอร์ยี (Exergy loss) ลดลงอย่างมากเมื่อนำอากาศเสียกลับมาใช้ใหม่ ต่อมา Afzali, Darvishi, and Behrooz-Khazaei (2019) สร้างแบบจำลองและเพิ่มผลงานของเอ็กเซอร์ยี (Exergetic performance) ของเครื่องอบแห้งขึ้นเห็ดด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดแบบสายพานลำเลียง โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) ปรับปรุงกระบวนการปัจจัยการปรับให้เหมาะสม ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ อุณหภูมิอากาศ และพลังงานอินฟราเรด ในขณะที่ตัวแปรตอบสนอง (ตัวแปรตาม) ได้แก่ เวลาที่ใช้อบแห้ง ผลงานของเอ็กเซอร์ยี และการปรับปรุงศักยภาพ งานวิจัยนี้รายงานผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเพิ่มการหมุนเวียนของอากาศเป็น 50% จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนของอากาศ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และพลังงานอินฟราเรด ยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยีอีกด้วย ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง คือ อุณหภูมิของอากาศ 90 °C, พลังงานอินฟราเรด 839.13 W, การหมุนเวียนอากาศ 90% ที่ความเร็วลม 1 m/s นอกจากนี้ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงทดลองยังแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมระหว่างค่าที่คาดการณ์ไว้กับค่าการทดลองจริงเป็นอย่างมาก

Tohidi, Sadeghi, and Torki-Harchegani (2017) ศึกษาการใช้พลังงานและคุณภาพข้าวด้วยเครื่องอบแห้งแบบ Fixed deep bed ในสภาวะอากาศอบแห้งต่าง ๆ กำหนด

อุณหภูมิอากาศคงที่ 40 50 60 70 และ 80 °C ความเร็วอากาศคงที่ 0.5 0.8 และ 1.1 m/s ความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ 40 50 60 และ 70% ตามลำดับ ตัวแปรทั้งสามได้รับการตรวจสอบด้วยการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) ทำการอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้น 20.4%w.b. ลงมาจนถึง 14%w.b. ผลการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นและลดลงเมื่อความเร็วอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การแตกตัวของเมล็ดสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศสูงและความเร็วอากาศสูง การแตกตัวลดลงเมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ซึ่งพบแนวโน้มของอิทธิพลนี้ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ

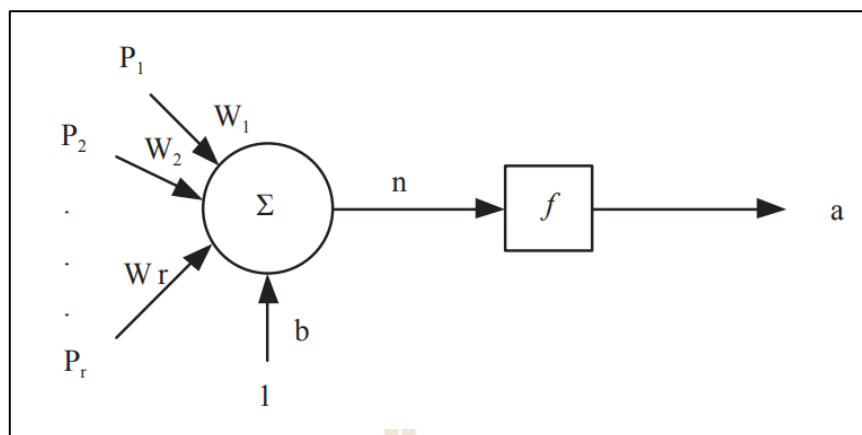
จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลมจากวิธีหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งมีแนวโน้มในการลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งซึ่งจัดได้ว่าเป็นตัวแปรหลักสำคัญกว่า 90% ของการบริโภคพลังงานในระบบอบแห้ง และถึงแม้ว่าการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้งานใหม่จะสามารถลดพลังงานในระบบทำความร้อนได้ แต่อย่างไรก็ตาม ข้าวเปลือกเป็นวัสดุชีวภาพที่อ่อนไหวง่ายต่ออุณหภูมิและความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลผลิต ตามรายงานของ Tohidi et al. (2017) ที่ได้บ่งชี้ถึงอิทธิพลเหล่านี้ อย่างชัดเจน และจากงานวิจัยที่ผ่านมา การหมุนเวียนอากาศร้อนกลับมาใช้ซ้ำส่วนมากเป็นการหมุนเวียนอากาศในสัดส่วนคงที่ ดังนั้น หากเราประยุกต์ใช้ระบบควบคุมมาใช้ในการปรับสัดส่วนอากาศตามเวลาโดยอ้างอิงถึงความต้องการอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (สภาวะอากาศอบแห้ง) ที่ต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้งข้าวเปลือก วิธีการนี้อาจจะสามารถทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและคุณภาพผลิตภัณฑ์สูงขึ้นได้ ข้อสมมติฐานนี้จึงมีความจำเป็นจะต้องตรวจสอบและศึกษาถึงความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้หลักการนี้ต่อไปในวิทยานิพนธ์นี้

2.5 บทบาทของปัญญาประดิษฐ์กับระบบอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหาร

Sun, Zhang, and Mujumdar (2019) ได้เขียนบทความปริทัศน์เกี่ยวกับทิศทางสำคัญของการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นการตรวจจบบรูปแบบ การอ่านข้อมูล การปรับแต่ง การจำลอง การวินิจฉัย การเรียงลำดับข้อมูล การจัดกลุ่ม การควบคุม และการลดสัญญาณรบกวนในเทคโนโลยีการอบแห้งอาหารต่าง ๆ ด้วยความสามารถในการเรียนรู้เอง ความสามารถในการปรับตัว การยอมรับข้อผิดพลาด และทนทานต่อการสร้างรูปแบบของระบบพลวัตไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปัญญาประดิษฐ์ที่ได้รับความนิยมในงานอบแห้งผลผลิตเกษตร ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม ตรรกศาสตร์คลุมเครือ และระบบผู้เชี่ยวชาญ เป็นต้น

2.5.1. โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) คือแบบจำลองสำหรับประมวลผลข้อมูลด้วยการคำนวณแบบเชื่อมโยง (Connectionist) เกิดขึ้นจากแรงบันดาลใจที่จะสร้างเครื่องมือที่มีความสามารถเรียนรู้ (Learning) จัดจำรูปแบบ (Pattern recognition) และสร้างความรู้ใหม่ (Knowledge extraction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีอยู่ในสมองของมนุษย์



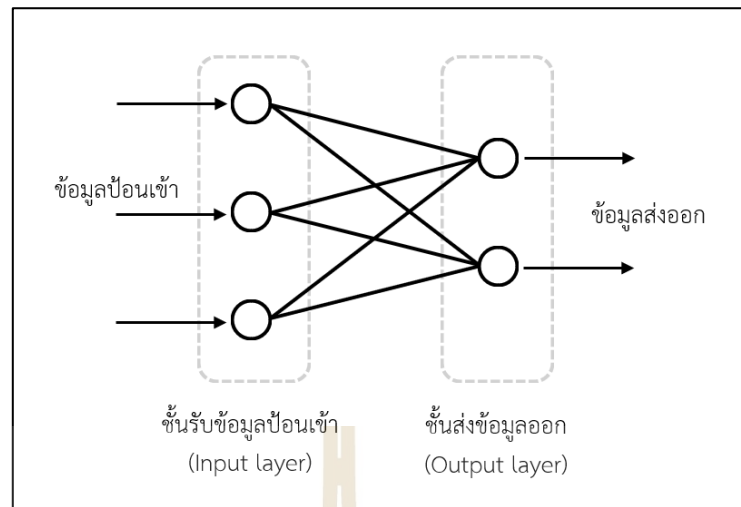
รูปที่ 2.6 เซลล์ประสาทเทียมจำลอง

การประมวลผลเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อยจำนวนมากที่เชื่อมต่อถึงกัน เรียกว่า โหนด (Node) ซึ่งเป็นการจำลองลักษณะการทำงานมาจากเซลล์ที่ใช้ส่งสัญญาณ (Signal) ระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อถึงกัน (Connection) ภายในจะมีฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function, f) ทำหน้าที่กำหนดสัญญาณส่งออกเสมือนการทำงานในเซลล์สมองของมนุษย์ ดังรูปที่ 2.6 การคำนวณภายในเซลล์ประสาทเทียมจำลองเริ่มจากการนำข้อมูลเข้า (P) คูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก (W) แล้วนำมารวมกับผลคูณของไบอัส (Bias, b) กับตัวแปรต้นของไบอัส โดยที่ตัวแปรต้นสุทธิ (Net input, n) คำนวณได้จากสมการที่ 2.13 และตัวแปรตามของเซลล์ประสาทเทียม (Neural output, a) คำนวณได้จากสมการที่ 2.14

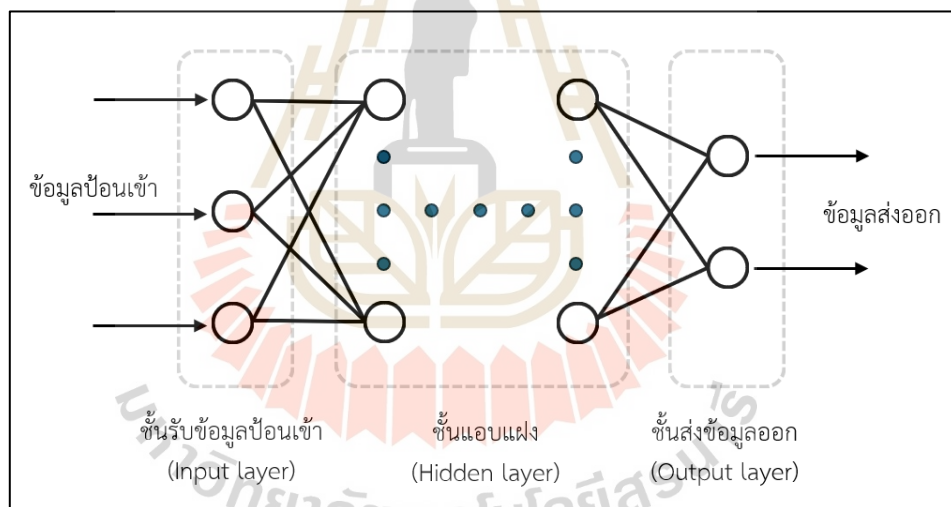
$$n = \sum(WP) + b \quad (2.13)$$

$$a = f(\sum WP + b) \quad (2.14)$$

การเชื่อมต่อเซลล์ประสาทเทียมแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย เรียกว่า ชั้น (Layer) ประกอบด้วย ชั้นรับข้อมูลเข้า (Input layer) ชั้นแอบแฝง (Hidden layer) และชั้นส่งข้อมูลออก (Output layer) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมที่แตกต่างกัน ศุภโชค แสงสว่าง (2559) ได้จำแนกประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมตามจำนวนชั้นของโครงข่าย ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single layer) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการรับข้อมูลเข้าและส่งข้อมูลผ่านเส้นเชื่อมโยงไปยังจุดส่งข้อมูลออกดังรูปที่ 2.7 และโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-layer) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงสร้างของชั้นแอบแฝงตั้งแต่ 1 ชั้นเพิ่มเข้ามาจากโครงสร้างแบบเดิม เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่มีความซับซ้อนซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวไม่สามารถแก้ได้ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



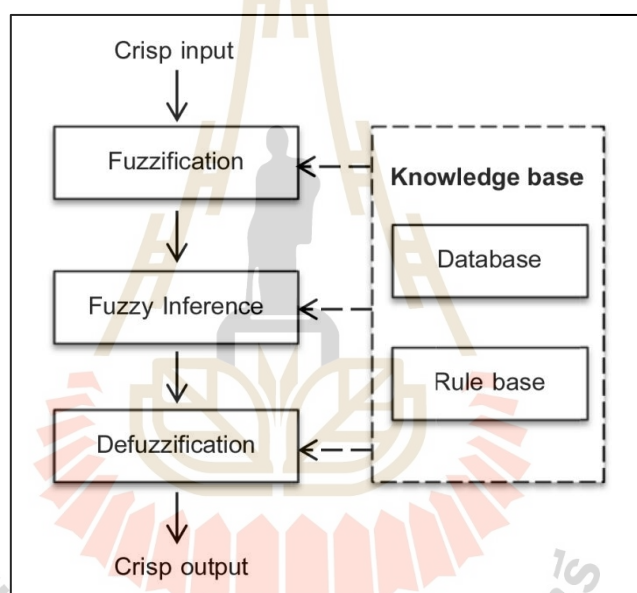
รูปที่ 2.8 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้โดยมีหรือไม่มีผู้ฝึกสอนก็ได้ ศุภโชค แสงสว่าง (2559) ได้อธิบายการเรียนรู้ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1. การเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised learning) เป็นการเรียนแบบมีการตรวจคำตอบเพื่อให้โครงข่ายเกิดการปรับตัว 2. การเรียนแบบไม่มีการสอน (Unsupervised learning) เป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบ โดยโครงข่ายจะจัดโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูลที่ได้รับ และ 3. การเรียนรู้แบบถูกบังคับ (Reinforcement learning) เป็นการเรียนรู้ที่คล้ายจะมีครูฝึกคอยกำกับการทำงานอยู่ แต่เป้าหมายไม่ได้ถูกนำมาแสดงในโครงข่าย ผลการคำนวณจึงออกมาในรูปแบบถูกหรือผิด โครงข่ายจึงต้อง

ใช้ประโยชน์จากข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้น ตามผลการคำนวณค่าถูกรางวัล (Reward) หรือคำนวณค่าผิดก็จะได้รับบทลงโทษ (Penalty) ซึ่งมีผลต่อการเพิ่ม/ลดค่าถ่วงน้ำหนักของการป้อนข้อมูล

2.5.2. ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือ ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูล เป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณคล้ายกับการเลียนแบบวิธีความคิดและตัดสินใจที่ซับซ้อนของมนุษย์ (พรจิต ประทุมสุวรรณ, 2561) มีโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนการทำฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) ฐานความรู้ (Knowledge base) การอนุมานหรือการตีความ (Fuzzy inference) และการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของการอนุมานแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนในการอนุมานด้วยฟัซซีลอจิกเริ่มต้นจากการทำฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) คือ การแปลงค่าของข้อมูลนำเข้าเป็นค่าฟัซซีนำเข้า โดยรับข้อมูลอินพุตแบบดั้งเดิมหรือเซตทวินัย (Crisp input) ที่มีค่าเป็น 0 และ 1 แล้วแปลงให้เป็นฟัซซีเซตที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ขั้นตอนที่ 2 การอนุมานหรือการตีความ เป็นการนำค่าฟัซซีนำเข้าไปตีความหรืออนุมานผ่านกฎฟัซซีที่ตั้งขึ้นมา และได้ผลลัพธ์เป็นค่าฟัซซีส่งออก โดยกฎฟัซซีที่นิยมใช้ คือ กฎฟัซซีแบบ ถ้า – แล้ว (Fuzzy IF – THEN rule) อาศัยหลักการของเหตุและผล และในขั้นตอนสุดท้าย คือ การทำดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) ให้เป็นค่าปกติ (Crisp output) โดยการนำค่าฟัซซีส่งออกมาแปลงเป็นค่าปกติที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีถ่วงน้ำหนัก วิธีหาจุดศูนย์กลาง เป็นต้น (พรจิต ประทุมสุวรรณ, 2561)

2.5.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในกระบวนการอบแห้ง

ในส่วนี้เป็นการสรุปสาระสำคัญจากบทความปริทัศน์ของ Sun, Zhang, and Mujumdar (2019) ซึ่งกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) กับกระบวนการอบแห้งอาหารในแต่ละแง่มุมดังต่อไปนี้

Sun et al. (2019) กล่าวถึงเทคโนโลยีการเลียนแบบทางชีวภาพประดิษฐ์ (Artificial biomimetic technology) เป็นวิธีการอันชาญฉลาดโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของกลิ่น รสชาติ และรูปลักษณะ ประกอบด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose) ระบบตรวจจับรสชาติ (Electronic tongue) และการประมวลผลภาพ (Computer vision) ซึ่งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive technique) สามารถประมวลผลได้แบบเรียลไทม์ ประสิทธิภาพสูง เทคโนโลยีนี้กำลังได้รับการพิจารณามากขึ้นสำหรับการประยุกต์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ที่ซับซ้อน มีความเป็นพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงและไร้ค่าจำกัดความ กับปัญหาทางวิศวกรรมในการแปรรูปอาหาร เช่น การอบแห้ง การคัดแยกแบบแช่แข็ง การจัดเก็บ และการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose, E-nose) บางครั้งเรียกว่า จมุกเทียม (Artificial nose) เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่พยายามเลียนแบบโครงสร้างของจมูกชีวภาพและได้รับการพัฒนาเพื่อตรวจจับและแยกแยะกลิ่นที่ซับซ้อนโดยใช้ชุดเซ็นเซอร์และเทคนิคการจดจำรูปแบบ ประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก คือ ระบบส่งไอ (Vapor delivery system) ชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับ (Array sensor) และขั้นตอนวิธีจดจำรูปแบบ (Pattern recognition algorithm) ชุดเซ็นเซอร์ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ที่ไม่เฉพาะเจาะจงซึ่งใช้สารเคมี วัสดุและองค์ประกอบหลากหลายชนิด องค์ประกอบแต่ละอย่างจะวัดคุณสมบัติที่แตกต่างกันของสารเคมีที่สัมผัสได้ ทันทีที่ชุดเซ็นเซอร์สัมผัสกับโมเลกุลที่ระเหยได้ กลิ่นจะถูกสร้างขึ้นจากเซ็นเซอร์ รูปแบบจากกลิ่นที่รู้จักถูกใช้เพื่อสร้างฐานข้อมูลและฝึกกระบวนการจดจำรูปแบบเพื่อให้สามารถจำแนกและระบุกลิ่นที่ไม่รู้จักได้ Wang et al. (2018) ศึกษาผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยอัลตราซาวนด์ความถี่ต่ำก่อนอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดคลื่นกลางบนสารประกอบระเหย โดยนำจมูกเทียมมาใช้กับงานนี้ พบว่า จมุกเทียมสามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างแคโรทีนอบแห้งได้ เพื่อปรับปรุงขอบเขตการใช้งานและความแม่นยำของ E-nose ทำให้ Barie et al. (2006) ได้ออกแบบ E-nose แบบใหม่โดยอาศัยอาร์เรย์เซ็นเซอร์คลื่นเสียงบนพื้นผิวขนาดเล็กควบคู่กับกระบวนการ Solid phase micro extraction process ช่วยปรับปรุงการวิเคราะห์ส่วนหัวและดำเนินการทดสอบต่าง ๆ ได้สำเร็จ เช่น การแยกความแตกต่างระหว่างพันธุ์แอปเปิ้ล สับปะรดสุกและสับปะรดไม่สุก เป็นต้น นอกจากนี้ Sun et al. (2019) ยังให้ความเห็นว่า ปัจจุบันการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้จมูกเทียมร่วมกับการวิเคราะห์ภาพด้วยตรรกะคลุมเครือ และระบบผู้เชี่ยวชาญมีน้อย ส่วนมากเน้นไปที่การตรวจสอบและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำให้แห้งและการควบคุมอัตโนมัติเป็นหลัก

การประมวลผลภาพ (Computer vision) เป็นหนึ่งในเทคนิคแรก ๆ ที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหารเพื่อระบุคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์แบบเรียลไทม์ รวมถึงขนาด และรูปร่าง ตลอดจนตัวแปรบ่งบอกคุณภาพและมีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในด้านการตรวจสอบคุณภาพ การจำแนกประเภท และการประเมินผลในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารจำนวนมากในฐานะที่เป็นเทคโนโลยีอัจฉริยะชนิดหนึ่งที่ใช้ตาเทียม (Artificial eye) ข้อดีของการประมวลผลภาพ เช่น

ความรวดเร็ว ความน่าเชื่อถือ และไม่ทำลายสำหรับการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง การประกันคุณภาพ และใช้กับการควบคุมในกระบวนการอบแห้ง เทคโนโลยีนี้ถูกใช้โดย Nadian et al. (2016) สำหรับติดตามการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงสีของผลึกกีวีแห้งเป็นชั้นแบบเรียลไทม์ด้วยระบบประมวลผลภาพ (Computer vision system, CVS) และเสนอวิธีการแบบผสมผสานกับการอบแห้งด้วยลมร้อน ในขั้นตอนแรก และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนแบบไฮบริดในขั้นตอนที่สอง ซึ่งเป็นการประนีประนอมที่สมเหตุสมผลระหว่างเวลาในการอบแห้งและคุณภาพผลิตภัณฑ์ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ที่มีเลเยอร์อินพุตประกอบด้วยเซลล์ 3 เซลล์ 2 เลเยอร์ ที่ซ่อนอยู่ (18 เซลล์ประสาท) และ 5 เซลล์สำหรับเลเยอร์เอาต์พุต ถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถตรวจสอบ ควบคุม และคาดการณ์พารามิเตอร์การหดตัวและความชื้นของชั้นมันเทศภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน ในการศึกษาของ Mohammad (2017) ได้ผสมผสานเทคโนโลยี ANN เข้ากับระบบควบคุมอัจฉริยะของระบบวิเคราะห์ภาพแบบคลุ่มเครือ เพื่อควบคุมตัวแปรการทำงานในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้ CVS ในการติดตามการเปลี่ยนสีและการหดตัวของกีวีแผ่นบางแบบเรียลไทม์ ข้อมูลภาพถูกป้อนเข้าสู่ ANN เพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้น และป้อนเข้าสู่กรอบงานวิธิตางพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) เพื่อปรับระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิกให้เหมาะสมที่สุด

เทคโนโลยี AI โดยเฉพาะเทคนิค ANN ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหา การประมาณค่าฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น การตรวจจบบรูปแบบ การตีความข้อมูล การเพิ่มประสิทธิภาพ การจำลอง การวินิจฉัย การติดตาม การควบคุม การเรียงลำดับข้อมูล การจัดกลุ่ม และการลดสัญญาณรบกวนในเทคโนโลยีการอบแห้ง เช่น การพาความร้อนชั้นบางแบบงวด (Batch convective thin layer drying) การทำแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed drying) การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic dehydration) อินฟราเรด (Infrared) ไมโครเวฟ (Microwave) และอื่น ๆ Sun et al. (2019) นำเสนอการทบทวนเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ AI ในการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายและการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนและมวล ทำนายตัวแปรประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ และตัวแปรบ่งชี้คุณภาพ รวมถึงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ในช่วงปี 2012 ถึง 2017 ที่ผ่านมามีตารางที่ 2.3 จะเห็นว่า ANN สามารถสร้างแบบจำลองและทำนายค่าตัวแปรตามได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ แบบธรรมดาและสามารถนำเอาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้ไปต่อยอดสู่งานวิจัยใหม่ ๆ ได้อย่างหลากหลาย ด้วยข้อได้เปรียบดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการพัฒนาตัวแบบสมการเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องกับระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมกับตัวแปรที่จะใช้อธิบายถึงสมรรถนะของระบบอบแห้งและศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อไป

ตารางที่ 2.3 การประยุกต์ใช้ AI ในกระบวนการอบแห้ง

ผู้แต่ง	ผลิตภัณฑ์	วัตถุประสงค์	ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	แบบจำลอง ANN	ผลการศึกษา
Momenzadeh et al. in 2012	ถั่วเขียว	หาระยะเวลาอบแห้งที่เหมาะสม	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, ความชื้นถั่วเขียว	ระยะเวลาอบแห้ง	A BP-ANN with the logsig (Log sigmoid) transfer function	ให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่า 98%
Mahjoorian et al. in 2017	กวี	ทำนายอัตราส่วนความชื้น (MR)	เวลา และ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	อัตราส่วนความชื้น (MR)	Two-hidden layer, BP-ANN with logsig activation function	ประเมิน MR แม่นยำกว่า 98%
Husna and Purqon in 2016	ทุเรียน	ประเมินปริมาณความชื้น	มวล, อุณหภูมิ, ความหนา, เวลาอบแห้ง	ประเมินปริมาณความชื้น	A BP-ANN with 10 neurons in 1 hidden layer	ทำนายความชื้นทุเรียนอย่างแม่นยำ ($R^2 = 0.9847$)
Barroca et al. in 2017	แครอท	ประเมินผลของการบำบัดล่วงหน้าต่อคุณภาพของแครอทอบแห้ง	อุณหภูมิอบแห้ง, ความเข้มข้นของกรด Ascorbic และเวลา, ความเข้มข้นของ Sodium metabisulphite และเวลา, อุณหภูมิและเวลาของน้ำ	ความชื้น, เถ้า, โปรตีน, เส้นใย, น้ำตาลทั้งหมด, น้ำตาลที่ลดลง, น้ำตาลคงเหลือ, ความแตกต่างของสีทั้งหมด	ไม่มีข้อมูลที่ชัดเจน	การบำบัดก่อนทำแห้งมีผลกระทบต่อองค์ประกอบทางโภชนาการของแครอท แต่ไม่ส่งผลต่อค่าสี การบำบัดล่วงหน้าด้วยสารเคมีมีผลกระทบน้อยที่สุดต่อตัวแปรที่ศึกษา

ตารางที่ 2.3 การประยุกต์ใช้ AI ในกระบวนการอบแห้ง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ผลิตภัณฑ์	วัตถุประสงค์	ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	แบบจำลอง ANN	ผลการศึกษา
Murthy and Manohar in 2014	ขมิ้นขาว	ศึกษาจลศาสตร์การอบแห้ง	อุณหภูมิอากาศ, ความเร็วอากาศ, เวลาอบแห้ง	ปริมาณความชื้น	One-hidden-layer BP-trained MLP ANN model	แบบจำลอง ANN สามารถอธิบายจลศาสตร์การอบแห้งได้อย่างเหมาะสม ($R^2 = 0.998$)
Nadian et al. in 2015	แอปเปิ้ล	จำลองอัตราส่วนความชื้นและค่าสีที่ได้รับจาก CVS แบบเรียลไทม์	อุณหภูมิอากาศ, ความเร็วลม, ความหนาตัวอย่าง, เวลาอบแห้ง	ความสว่าง, ความแดง, ความเหลือง, ความแตกต่างของสีโดยรวม และอัตราส่วนความชื้น	Two-hidden-layer BP-trained MLP ANN	ทำนายคุณสมบัติสีและอัตราส่วนความชื้นได้อย่างแม่นยำ
Bahmani et al. in 2016	มะเขือยาวสีม่วง	เพื่ออธิบายการสูญเสียน้ำและของแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยใช้ ANN และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	อัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลายออสโมติก, อุณหภูมิ, เวลา, ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและของแข็งที่เพิ่มขึ้น	One-hidden-layer BP-trained MLP ANN model	ANN สามารถปรับปรุงการทำนายผลตัวแปรตามได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบธรรมดา

หมายเหตุ จาก “Recent developments of artificial intelligence in drying of fresh food: A review,” โดย Sun, Zhang, and Mujumdar, 2019, *Critical reviews in food science and nutrition*, 59, 2258-2275.

2.6 การวิเคราะห์ความไว

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) เป็นเครื่องมือสำคัญในการตรวจสอบพฤติกรรมของผลลัพธ์ต่อตัวแปรอิสระต่าง ๆ Jamil et al. (2021) ชี้แนะว่า การวิเคราะห์ความไวสามารถระบุอิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่ส่งผลต่อตัวแปรตามที่สนใจได้อย่างมีนัยสำคัญและเน้นย้ำถึงการปรับปรุงการออกแบบสำหรับการวิจัยในอนาคตได้ บทความในส่วนนี้เป็นการอธิบายหลักการวิเคราะห์ความไวแบบมาตรฐาน (Normalized sensitivity analysis methodology) ซึ่งถูกเสนอโดย Jamil et al. (2021) ในบทของหนังสือ Heat Exchangers เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจถึงหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์ความไวซึ่งเป็นวิธีภายใต้เบื้องหลังของโปรแกรมสำเร็จรูปที่งานวิจัยนี้ใช้ในการศึกษา

การวิเคราะห์ความไวโดยใช้แคลคูลัส (Partial derivative based) เป็นหนึ่งในวิธีที่เชื่อถือได้และใช้กันอย่างแพร่หลาย ในแนวทางนี้ ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (X) จะรวมค่าระบุ (Nominal value, x) และความไม่แน่นอน (U_x) ของตัวแปรนั้น ๆ ตามสมการที่ 2.15 ความไม่แน่นอนในสมรรถนะของตัวแปรตาม ($Y(X)$) เนื่องจากความไม่แน่นอนของตัวแปรอิสระ (X) แสดงดังสมการที่ 2.16 กรณีวิเคราะห์หลายตัวแปร ค่าความไม่แน่นอนรวมของฟังก์ชันหลายตัวแปรสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.17

$$X = x \pm U_x \quad (2.15)$$

$$U_y = \frac{dY}{dX} U_x \quad (2.16)$$

$$U_y = \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X_j} U_{x_j} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

ตัวแปรของอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative parameter) ในสมการที่ 2.17 หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient, SC) ของตัวแปรตามที่เลือก เมื่อแปลงเป็นรูปแบบมาตรฐานแล้ว เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความไวปกติ (Normalized sensitivity coefficient, NSC) โดยควบคุมความไม่แน่นอนในตัวแปรตามและตัวแปรต้นด้วยค่าระบุที่สอดคล้องกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความไวปกติให้การเปรียบเทียบตัวแปรต้นทั้งหมดที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ พิจารณาจากผลกระทบที่สำคัญต่อตัวแปรตามที่ต้องการ เขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.18 เมื่อกำหนดให้ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Normalized uncertainty, NU) เป็นไปตามสมการที่ 2.19 ดังนั้นความไวแบบมาตรฐานของตัวแปรตาม (Normalized sensitivity, U_y/y) คำนวณโดยโดยใช้สมการ 2.20

$$NSC = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \frac{x_{x_j}}{y} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$NU = \left(\frac{U_{x_j}}{x_{x_j}} \right)^2 \quad (2.19)$$

$$\frac{U_Y}{y} = \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \frac{x_{x_j}}{y} \right)^2 \left(\frac{U_{x_j}}{x_{x_j}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

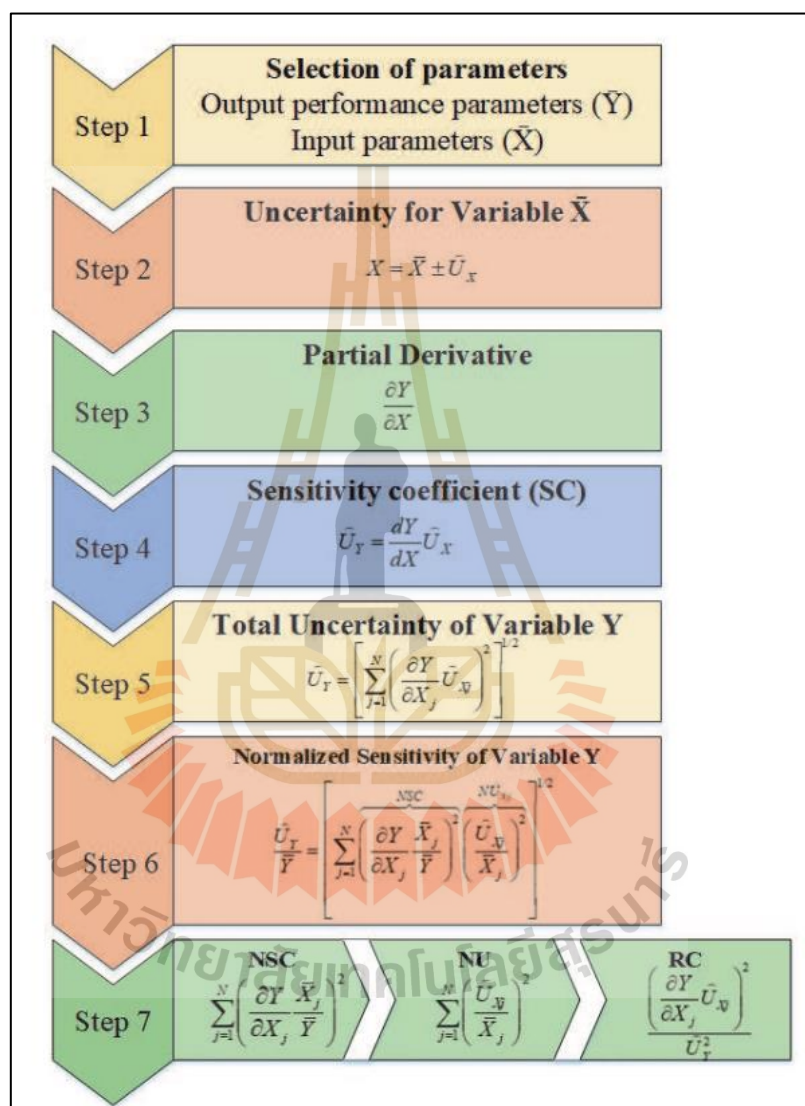
ส่วนร่วมสัมพัทธ์ (Relative contribution, RC) เป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ความไวแบบมาตรฐานและใช้ในการระบุตัวแปรที่มีส่วนสนับสนุนความไม่แน่นอนที่โดดเด่น โดยการรวมค่าสัมประสิทธิ์ความไวเข้ากับความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจริงตามสมการที่ 2.21

$$RC = \frac{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_j} U_{x_j} \right)^2}{U_Y^2} \quad (2.21)$$

โดยที่	X	คือ	ตัวแปรต้น หรือ ตัวแปรอิสระ
	x	คือ	ค่าระบุของตัวแปรต้น
	U_x	คือ	ความไม่แน่นอนของตัวแปรอิสระ
	Y	คือ	ตัวแปรตาม
	y	คือ	ค่าระบุของตัวแปรตาม
	U_Y	คือ	ความไม่แน่นอนของตัวแปรตาม
	n, j	คือ	จำนวนนับตั้ง 1, 2, ..., n

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความไวแบบมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 2.10 เริ่มจากการเลือกตัวแปรอิสระและตัวแปรตามสำหรับพิจารณา (ขั้นตอนที่ 1) หลังจากนั้นจึงเลือกความไม่แน่นอนหรือการก่อกวนระบบ โดยทั่วไป คือ 1% ของค่าระบุ (ขั้นตอนที่ 2) ในขั้นตอนที่ 3 เป็นการใช้อุ่นุพันธ์ย่อยสำหรับเทียบตัวแปรตามแต่ละตัวกับตัวแปรอิสระต่าง ๆ ขั้นตอนที่ 4 ทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์

ความไวโดยใช้สมการที่ 2.16 จากนั้นจึงคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวมและความไวมาตรฐานของตัวแปรตามโดยใช้สมการ 2.17 และ 2.20 ในขั้นตอนที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายจึงคำนวณหาความสำคัญและความโดดเด่นของตัวแปรอิสระในแง่ของ NSC และ RC โดยใช้สมการที่ 2.18 และ 2.21 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แผนภาพการวิเคราะห์ความไว

หมายเหตุ จาก “Exergoeconomic and normalized sensitivity analysis of plate heat exchangers: A theoretical framework with application,” โดย Jamil et al., 2021, Heat Exchangers.

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรด้วยการวิเคราะห์ความไวปรากฏในรายงานของ Khoshroo, Emrouznejad, Ghaffarizadeh, Kasraei, and Omid (2018) ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อผลผลิตถั่ว โดยพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นเพื่อทำนายผลผลิตถั่วซึ่งคำนึงถึงการใช้พลังงานรูปแบบต่าง ๆ หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ความไวผ่านแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เชื่อถือได้ (ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว) ผลการศึกษาพบว่า เครื่องจักรเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อผลผลิต ข้อมูลนี้มีประโยชน์ต่อการบริหารจัดการกระบวนการผลิตต่อไป นอกจากนี้ Adeyi et al. (2022) ได้ศึกษาการเตรียมตัวอย่างและอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อจลนศาสตร์การอบแห้งของผลมิราเคิล (Miracle berry fruit, MBF) งานวิจัยนี้ใช้ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive neuro fuzzy inference system, ANFIS) สำหรับสร้างแบบจำลองและประเมินความไวของปัจจัยในการอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ผลการศึกษาพบว่า ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้อย่างแม่นยำ และผลจากการวิเคราะห์ความไวบ่งชี้ว่า เวลาในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญสูงสุดต่อการลดลงของอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้ปัญญาประดิษฐ์รูปแบบต่าง ๆ มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นต่อตัวแปรตาม ซึ่งแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือสูงเหล่านั้นได้รับการวิเคราะห์ความไวเพื่อจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรอิสระที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามผลที่ได้มานี้ สามารถนำไปใช้วางแผนการจัดการในกระบวนการผลิตได้อย่างตรงประเด็น วิธีการดังกล่าวจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาในระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมนี้ได้

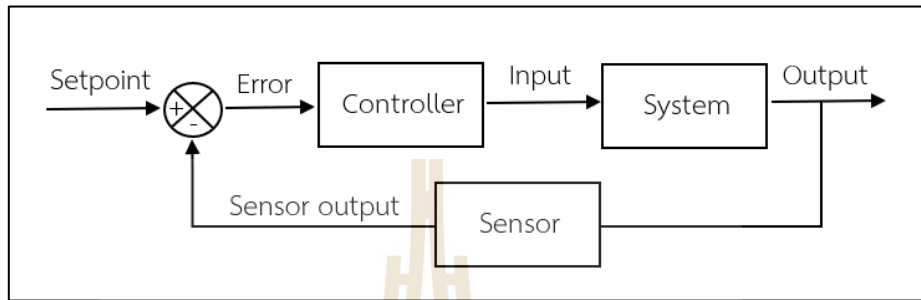
2.7 ระบบควบคุมในกระบวนการอบแห้ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการลดความชื้นและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปมักจะมีการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่ทำการศึกษามักจะแปรเปลี่ยนตามเวลาหรือไม่ได้มีค่าไม่คงที่เสมอไป เช่น ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่เข้าสู่ระบบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบของการอบแห้ง ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาหารจากการที่ไม่สามารถควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้คงเดิมได้ ดังนั้นระบบควบคุมจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อสภาวะที่มีความผันผวนในกระบวนการอบแห้งและกระบวนการผลิตมากขึ้นในปัจจุบัน

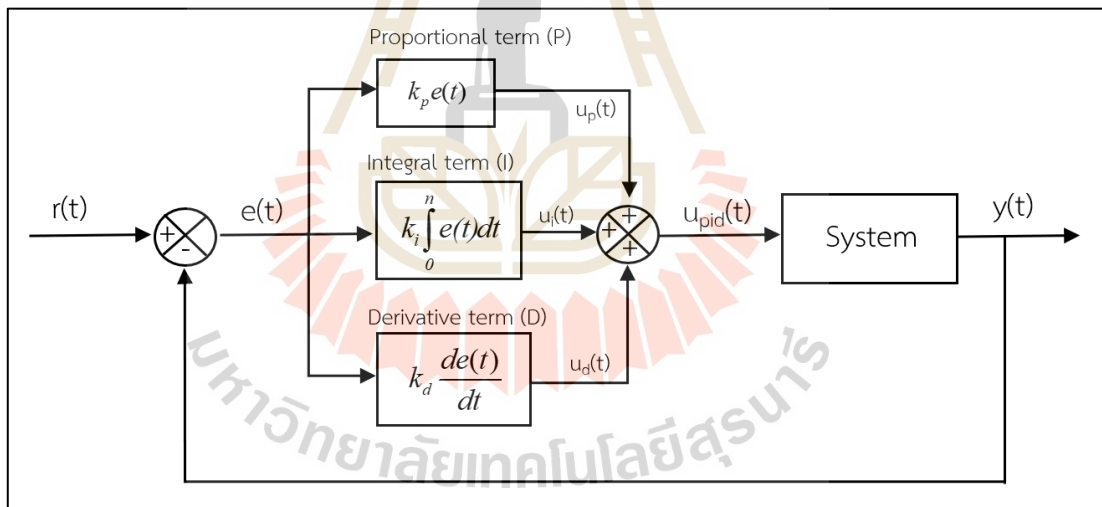
สุรชัย เหมศิริ และ ประชา บุญยวนิชกุล (2560) ได้ทบทวนปัญหาในกระบวนการอบแห้งประกอบไปด้วย 1. การควบคุมความชื้นสุดท้ายให้เป็นไปตามที่ต้องการ 2. การลดความต้องการพลังงานของเครื่องอบแห้ง และ 3. การชดเชยระบบในกรณีที่ความชื้นของวัสดุไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังได้ตรวจเอกสารในช่วงปี พ.ศ. 2548 ถึง 2555 พบว่า มีการควบคุมกระบวนการของเครื่องอบแห้งอยู่ 4 รูปแบบ ได้แก่ การควบคุมแบบป้อนกลับ การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.7.1 ถึง 2.7.2) การควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ และการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (ซึ่งกล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 2.5.1 ถึง 2.5.2)

2.7.1. ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ระบบควบคุมวงปิด (Closed-loop control) เป็นการควบคุมระบบพลวัตให้ผลตอบสนองเป็นไปตามค่าที่กำหนด (Setpoint) อธิบายด้วยแผนภาพบล็อก (Block diagram) อย่างง่ายดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกสำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 2.11 เป็นลักษณะการทำงานของระบบควบคุมป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) โดยมีหลักการทำงานพื้นฐาน คือ ตัวควบคุม (Controller) จะคำนวณค่าสัญญาณควบคุม (Control signal หรือ System input หรือ Input, $u(t)$) เพื่อชดเชยแก่ระบบในรูปแบบสัญญาณป้อนเข้าสู่ระบบ เมื่อระบบรับสัญญาณป้อนเข้าใด ๆ (Input, $u(t)$) จะเกิดการตอบสนองขึ้นในแต่ละรอบของการทำงาน (Output, $y(t)$) ผลตอบสนองนี้จะเป็นตัวแปรที่ผู้ปฏิบัติงานให้ความสนใจที่จะควบคุมให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ (Setpoint, $r(t)$) การควบคุมแบบป้อน

จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณตอบสนองเหล่านั้น (Sensor) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (Setpoint, $r(t)$) ซึ่งการควบคุมแบบลบจะนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์ (Sensor output) ไปหักลบกับค่าอ้างอิง เพื่อคำนวณค่าผิดพลาด (Error, $e(t)$) จากกระบวนการ (System หรือ Plant หรือ Process) และค่าผิดพลาดนี้จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุมเพื่อคำนวณสัญญาณชดเชยต่อไป แม้ว่าตัวควบคุมและเทคนิคการควบคุมรูปแบบใหม่ถูกพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ ในปัจจุบัน แต่ตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมและถูกกล่าวถึงในวงกว้าง คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบพีซีแอลจิก (พรจิต ประทุมสุวรรณ, 2561; ธนิต มาลากร, 2561) ซึ่งในส่วนนี้ผู้เขียนจะขอกล่าวถึงตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional – Integral – Derivative controller, PID controller) เป็นหลัก เนื่องจากเป็นวิธีการควบคุมที่ได้รับการใช้งานในอุตสาหกรรมกว่า 90% ของโลก (ธนิต มาลากร, 2561) และตัวควบคุมแบบพีซีแอลจิกผู้เขียนได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.5.2

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ หรือ ระบบควบคุมพีไอดี เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งได้รับการประยุกต์ใช้ในบริบทต่าง ๆ ของการควบคุม วัตถุประสงค์ของตัวควบคุมชนิดนี้ คือ การลดค่าผิดพลาดหรือลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการให้เหลือน้อยที่สุดจากการปรับค่าสัญญาณป้อนเข้ากระบวนการ (ค่าชดเชยความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ) ตัวควบคุมพีไอดี ประกอบด้วย 3 พจน์ ได้แก่ พจน์สัดส่วน (Proportional term), พจน์ปริพันธ์ (Integral term) และ พจน์อนุพันธ์ (Derivative term) ดังรูปที่ 2.12 หรืออาจเขียนเป็นความสัมพันธ์ในโดเมนเวลา (Time-domain) ได้ดังสมการที่ 2.22 ในบางโอกาสอาจพบเห็นการใช้งานตัวควบคุมลักษณะนี้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ เช่น การควบคุมแบบ P, PI หรือ PD ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับระบบพลวัตที่แตกต่างกัน

$$u_{pid} = \left[k_p e(t) \right]_p + \left[k_i \int_0^n e(t) dt \right]_i + \left[k_d \frac{de(t)}{dt} \right]_d \quad (2.22)$$

โดยที่ u_{pid}	คือ สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมพีไอดี
$e(t)$	คือ สัญญาณผิดพลาดจากกระบวนการ $y(t)$ เทียบกับสัญญาณอ้างอิง $r(t)$
k_p, k_i, k_d	คือ ค่าคงที่หรืออัตราขยายพี ไอ และ ดี ตามลำดับ
n	คือ จำนวนรอบการทำงาน ($n = t$)

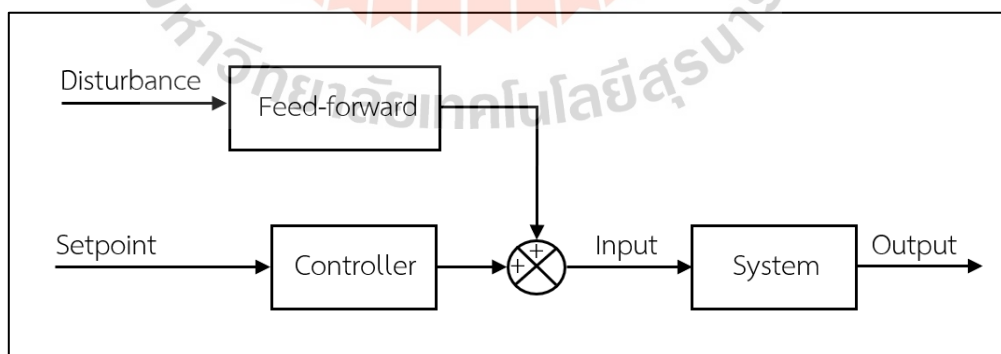
เทอมสัดส่วน (Proportional term) ทำหน้าที่ชดเชยค่าความผิดพลาดจากการตอบสนองของระบบ การที่ค่าอัตราขยาย K_p คูณเข้ากับค่าผิดพลาด $e(t)$ ณ เวลาใด ๆ ส่งผลให้สัญญาณควบคุม u_p มีค่าสูงเมื่อความผิดพลาดของระบบสูง ในทางกลับกัน สัญญาณควบคุม (u_p) จะมีค่าต่ำเมื่อค่าผิดพลาดจากกระบวนการเทียบกับค่าอ้างอิงมีค่าน้อย กล่าวคือ ค่าดังกล่าวเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และมีเครื่องหมายเป็นไปได้อันที่ทิศทางลบและบวก เทอมสัดส่วนเป็นตัวช่วยส่งเสริมการตอบสนองในสถานะชั่วคราวเป็นอย่างดี

เทอมปริพันธ์ (Integral term) ทำหน้าที่ชดเชยค่าผิดพลาดของระบบ โดยที่ค่า k_i จะถูกคูณเข้ากับผลรวมค่าผิดพลาดที่เวลาใด ๆ ส่งผลให้ระบบมีการชดเชยความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง $e(t)$ กับเวลา (t) ในโดเมนเวลา เทอมปริพันธ์สำคัญอย่างมากต่อระบบวงเปิดประเภทศูนย์ (Type 0 of open-loop transfer function) ซึ่งมักจะมีความคลาดเคลื่อนออฟเซต (Offset error) เกิดขึ้นจากการตอบสนองต่อฟังก์ชันหนึ่งหน่วยเวลา (Unit-step input) เนื่องจากตัวแปรนี้ช่วยส่งเสริมการชดเชยความคลาดเคลื่อนที่ระยะเวลาอนันต์เป็นศูนย์ในทางทฤษฎี (ใกล้เคียงศูนย์อย่างมากในทางปฏิบัติ)

เทอมอนุพันธ์ (Derivative term) เป็นผลคูณค่าคงที่ k_d กับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดจากกระบวนการในแต่ละช่วงเวลา (ความชันของค่าผิดพลาด) เปรียบเสมือนพจน์ที่คาดการณ์เหตุการณ์หรือพิจารณาทิศทางที่ผลตอบสนองพุ่งไปในแต่ละช่วงเวลา เทอมอนุพันธ์จะช่วยชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบ ช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ขนาดของค่า k_d มีผลอย่างมากต่อเทอมอนุพันธ์ หากระบบมีสัญญาณรบกวนที่กระทบต่อสัญญาณผิดพลาดจากระบบสูงเกินไปอาจส่งผลให้ระบบเกิดความไม่เสถียรได้

2.7.2. ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward control) เป็นการเพิ่มความสามารถของการควบคุมปกติในสถานะที่มีการรบกวน (Disturbance) การทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะรับสัญญาณอ้างอิง (Setpoint) ส่งเข้าสู่ตัวควบคุม ขณะที่สัญญาณรบกวน (Disturbance) ถูกส่งเข้ากล่องป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward) หรือแบบจำลองที่จะทำการชดเชยค่า และป้อนเข้าสู่จุดเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator) ผลรวมที่ได้เป็นสัญญาณควบคุมซึ่งถือว่าเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบและได้ผลตอบสนองในท้ายที่สุด



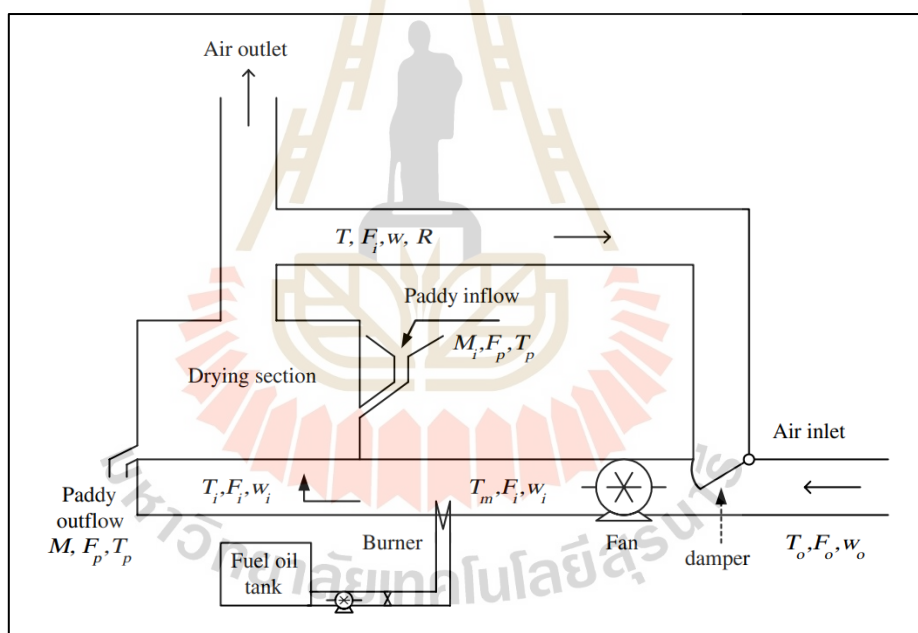
รูปที่ 2.13 แผนภาพการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

จุดประสงค์ของวิธีการนี้ คือ การควบคุมค่าสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยกำจัดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนระบบต่าง ๆ ที่จะเข้ามาส่งผลกระทบต่อระบบทางพลวัต ดังนั้น

จึงเป็นที่ชัดเจนว่าระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในการทำนายการตอบสนองของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงอินพุตและสัญญาณรบกวน ซึ่งมีหลักการดังรูปที่ 2.13

2.7.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมในระบบอบแห้ง

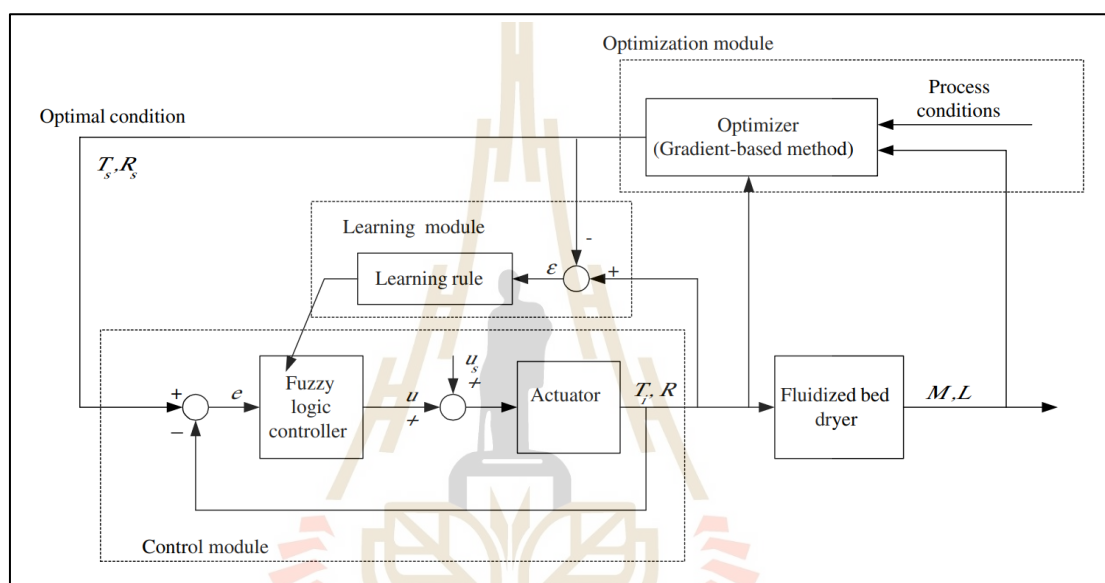
S. Atthajariyakul, and T. Leephakpreeda (2006) พัฒนาระบบควบคุมชนิดตรรกะคลุมเครือแบบปรับตัวได้ (Adaptive fuzzy logic control) สำหรับกำหนดสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเครื่องฟลูอิดซ์เบดชนิดไหลขวาง (รูปที่ 2.14) งานวิจัยนี้สนใจควบคุมสภาวะดำเนินการ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T_i) และสัดส่วนหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำ (R) ซึ่งถูกปรับให้มีค่าเหมาะสมผ่านตรรกะคลุมเครือที่สามารถปรับกฎการอนุมานได้ ตัวแปรดำเนินการดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความชื้นข้าวที่ออกจากเครื่องอบ (M) และการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพ (L) ซึ่งสนใจเป็นเป้าหมายของการควบคุมเพื่อให้ได้กำลังการผลิตสูงสุด



รูปที่ 2.14 แผนภาพเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเครื่องฟลูอิดซ์เบดชนิดไหลขวาง
หมายเหตุ จาก “Fluidized bed paddy drying in optimal conditions via adaptive fuzzy logic control,” โดย S. Atthajariyakul, and T. Leephakpreeda, 2006, Journal of food engineering, 75, 104-114.

การทำงานของระบบควบคุมนี้จำเป็นต้องกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ เข้าไปยังระบบ เช่น ความชื้นเริ่มต้นข้าว (M_i) อัตราการป้อนข้าวเปลือก (F_p) และอุณหภูมิของข้าว (T_p) เพื่อรักษาความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกไว้ที่ระดับที่ต้องการ (M) และใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (L)

ดังนั้น M และ L จึงเป็นดัชนีที่สำคัญที่ต้องคงไว้ให้ระบบทำงานได้ตามค่าที่ต้องการ รูปที่ 2.15 แสดงภาพรวมการทำงานของระบบควบคุมเครื่องอบแห้งด้วยตรรกะคลุมเครือแบบปรับตัวได้ในส่วนการปรับให้เหมาะสม (Optimization module) มีการสังเกตค่า M และ L จากกระบวนการและป้อนพวกมันไปยังหน่วยคำนวณค่าเหมาะสมที่สุด (Optimizer) ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าของ M และ L ให้เป็นไปตามดัชนีของระบบ เพื่อกำหนดค่า T และ R ที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรควบคุมค่าที่ได้รับจากหน่วยคำนวณค่าเหมาะสมที่สุดจะถูกป้อนไปยังตัวควบคุมชนิดตรรกะคลุมเครือเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงที่ต้องการในทุกขั้นตอนของการคำนวณ (Updating time step)



รูปที่ 2.15 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมตรรกะคลุมเครือแบบปรับตัวได้

หมายเหตุ จาก “Fluidized bed paddy drying in optimal conditions via adaptive fuzzy logic control,” โดย S. Atthajariyakul, and T. Leephakpreeda, 2006, *Journal of food engineering*, 75, 104-114.

ในส่วนควบคุม (Control module) ตัวควบคุมชนิดตรรกะคลุมเครือจะใช้ข้อมูลอ้างอิงที่ต้องการ (T_s, R_s) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศและเปอร์เซ็นต์การเวียนอากาศกลับที่แท้จริงจากกระบวนการ (T, R) ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะใช้ในกฎการอนุมานแบบฟัชชี่ลอจิกเพื่อให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งจริง และเปอร์เซ็นต์ของอากาศเวียนกลับที่เข้าใกล้ค่าอ้างอิงมากที่สุด (สอดคล้องกับตัวแปรดัชนีที่สนใจ) นอกจากนี้ ตัวแปรในตัวควบคุมชนิดตรรกะคลุมเครือถูกปรับโดยกฎการเรียนรู้ความไว (Sensitivity learning rule) เพื่อลดข้อผิดพลาดระหว่างตัวแปรควบคุมกับค่าอ้างอิงจากหน่วยคำนวณค่าเหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความสามารถของระบบควบคุมตรรกะศาสตร์คลุมเครือแบบปรับตัวได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำหนดสภาวะการอบแห้งข้าวเปลือกแบบเรียลไทม์ โดยเฉพาะส่วนการปรับให้เหมาะสม (Optimization module) ที่เข้ามา

มีบทบาทสำคัญในการกำหนดค่าตัวแปรอ้างอิงต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบควบคุมทางพลวัตกับผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการกำหนดสภาวะการอบแห้งคงที่ พบว่าระบบควบคุมในงานวิจัยนี้สามารถจัดการกับสิ่งรบกวนของระบบพลวัต รักษาระดับความชื้นสุดท้ายและอุณหภูมิของข้าวเปลือกได้อย่างแม่นยำ

Jin et al. (2022) ศึกษาการออกแบบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมเพื่อควบคุมเครื่องอบเมล็ดพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากผลการศึกษาในส่วนแรกแบบจำลอง Back Propagation Neural Network (BPNN) ได้รับการคัดเลือกเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายความชื้นข้าวและระยะเวลารอคอยมอเตอร์ระบายเมล็ดพืชจากตัวแปรต้นต่าง ๆ (สภาวะอากาศขาเข้า-ขาออกจากเครื่องในแต่ละส่วน, อากาศแวดล้อม, ความชื้นและอุณหภูมิข้าวเริ่มต้น) โดยพิจารณาความเหมาะสมจากตัวแปรตรวจสอบความแม่นยำทางสถิติ (R^2 , MAE, MSE) หลังจากกำหนดโมเดล BPNN ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ระบบควบคุมอัจฉริยะที่ใช้ BPNN จึงถูกพัฒนาขึ้น โดย BPNN predictor สามารถคาดการณ์ความชื้นข้าวได้จากการปรับอัตราการปล่อยเมล็ดข้าวของเครื่องอบแห้งทำให้การควบคุมกระบวนการเป็นไปได้อย่างถูกต้องแบบจำลองการควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมได้รับการจำลองโดยใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลของการทดลอง ผลการวิจัยพบว่าระบบควบคุมอัจฉริยะที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ BPNN มีข้อได้เปรียบในด้านความเสถียรที่แข็งแกร่งและการจัดการเสียงรบกวนที่ดี และอาจมีศักยภาพที่ดีสำหรับการศึกษาการใช้งานในอนาคต

สุรัชย์ เหมหิรัญ (2563) ได้พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล ผู้วิจัยรายงานว่า “การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์คงที่ ตามเงื่อนไขการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการปรับตั้งพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมกับความเร็วยรอบการหมุนของโรตารีวาล์วและความเร็วของอากาศร้อนจะส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานที่สูงขึ้น อีกทั้งยังไม่คุ้มค่าต่อต้นทุนการใช้พลังงานในการดำเนินการอบแห้งอีกด้วย” ดังนั้นจึงเสนอวิธีการควบคุมเครื่องอบแห้ง ประกอบด้วย การประเมินความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจริงขณะดำเนินการอบแห้ง และการกำหนดลำดับการควบคุมจากข้อมูลทดสอบ ในส่วนแรก: ระบบประเมินความชื้นเรียลไทม์ได้รับการพัฒนาขึ้นจากตัวรับรู้คุณสมบัติของอากาศ โดยวิธีสมดุลมวล ระบบสามารถประเมินความชื้นข้าวได้อย่างแม่นยำในช่วง 21%w.b. ถึง 15%w.b. เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินกับเครื่องตรวจวัดความชื้นทางการค้า พบว่า มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความชื้นสุดท้าย ประมาณ 4.3% ในส่วนที่สอง: ได้ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (ความเร็วรอบโรตารีวาล์วและความเร็วอากาศขาออกเครื่องอบแห้ง) ต่อการใช้พลังงานของเครื่อง โดยตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงได้สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วและความเร็วของอากาศขาออกอย่างสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาออกจากเครื่องอบแห้ง ทั้งนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันเป้าหมายในการใช้พลังงานน้อยที่สุด จากการศึกษาพบว่าระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนโรตารีวาล์วและความเร็วอากาศอบแห้งขาออกได้ตามเป้าหมาย อีกทั้งยังสามารถประมาณระดับความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานตัดสินใจหยุดการเดินเครื่องได้ นอกจากนี้ การดำเนินของระบบควบคุมยังสามารถ

ลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ถึง 33.2% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการปรับตั้งพารามิเตอร์คงที่

จากรายงานวิจัยในหัวข้อ 2.5 และ 2.7 ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของปัญหาประติศาสตร์และระบบควบคุมที่ส่งผลต่อการดำเนินงานของเครื่องอบแห้งในยุคปัจจุบัน ทั้งในแง่ของการประหยัดพลังงาน การควบคุมคุณภาพ และอื่น ๆ ให้เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด โดยส่งผลอย่างมากต่อระบบที่เป็นพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง อย่างเช่นระบบอบแห้ง ทำให้การพัฒนาขีดความสามารถของการอบแห้งแบบพาหะลมที่เคยมีมาจากการทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อ 2.4 จำเป็นจะต้องศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้นที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามต่าง ๆ ที่สนใจในระบบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมชนิดวงงาน (Batch type) ตามหัวข้อ 2.6 แล้วจึงประยุกต์ใช้ทฤษฎีของระบบควบคุมในการควบคุมสถานะและจัดการแก้ปัญหาเกี่ยวกับอิทธิพลที่มีความโดดเด่นนั้น ๆ หลักการนี้อาจเป็นวิธีการหนึ่งที่มีแนวโน้มที่ดีในการจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งและคงไว้ซึ่งคุณภาพของผลผลิตได้ อย่างไรก็ตาม สิ่งเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการพิสูจน์สมมติฐานตามหลักการวิจัยอย่างถี่ถ้วนและทำการศึกษาต่อไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.7.4. การปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี

เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวควบคุมพีไอดีได้รับความนิยมและถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตของโลกอย่างกว้างขวาง เนื่องจากระบบควบคุมชนิดนี้สามารถปรับแต่งตัวแปรควบคุมได้โดยอาศัยการสังเกตผลตอบสนองของกระบวนการ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานหน้าเครื่องจักรสามารถปรับตั้งค่าตัวแปรควบคุมพีไอดีได้อย่างง่ายดาย โดยอ้างอิงจากประสบการณ์ที่พบเห็นพฤติกรรมตอบสนองของระบบในแบบต่าง ๆ ซึ่งลดความซับซ้อนในเรื่องของการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบ อีกทั้งยังช่วยลดข้อผิดพลาดจากการออกแบบตัวควบคุมในวิธีการอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีควบคุมในเชิงลึกอีกด้วย

สุรชัย เหมหิรัญ (2563) อธิบายแนวทางปรับแต่งตัวควบคุมอย่างง่ายอยู่ 2 แนวทาง ได้แก่ 1. การปรับแต่งตัวควบคุมด้วยมือ (Manual tuning) และ 2. การปรับแต่งด้วยวิธีการของซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols method) ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ผลตอบสนองของกระบวนการเป็นหลัก รายละเอียดสำคัญเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองและการปรับแต่งตัวควบคุมแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.7.4.1 ผลตอบสนองของกระบวนการในโดเมนเวลา

ในส่วนนี้เป็นการอธิบายผลตอบสนองของระบบ โดยยกตัวอย่างผลตอบสนองของระบบอ้างอิงอันดับสอง (รูปที่ 2.16) สำหรับประกอบการอธิบายคุณลักษณะต่าง ๆ ตลอดจนใช้วิเคราะห์ผลบางประการในส่วนถัดไป ทั้งนี้ ผู้ศึกษาสามารถปรับแต่งตัวควบคุมให้ระบบมีผลตอบสนองเป็นไปตามคุณลักษณะต่าง ๆ และกำหนดความต้องการของผลตอบสนองของกระบวนการตามเนื้อหาที่อธิบายในส่วนนี้

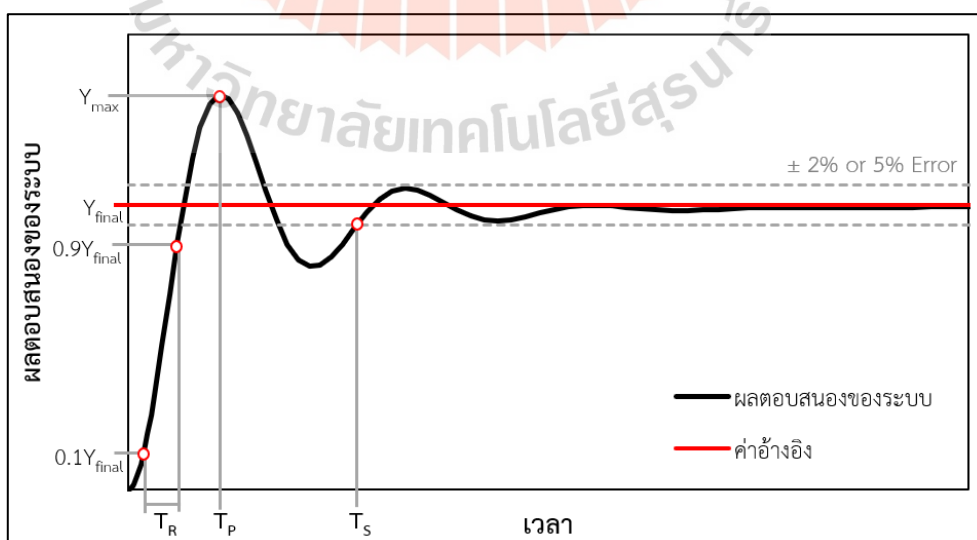
$$\%OS = \left(\frac{Y_{max} - Y_{final}}{Y_{final}} \right) \times 100 \quad (2.23)$$

โดยที่ %OS คือ เปอร์เซนต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot)

Y_{max} คือ ผลตอบสนองส่วนเกินสูงสุด

Y_{final} คือ ผลตอบสนองอ้างอิง หรือ ผลตอบสนองในสภาวะคงตัว

ชนิด มาลากร (2561) จำแนกผลตอบสนองในโดเมนเวลาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) และผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady state response) สำหรับผลตอบสนองชั่วคราว เป็นการพิจารณาอ้อมไของผลตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งได้รับผลกระทบจากสิ่งรบกวนข้างก่อนเข้าสู่สมดุล ตัวแปรชี้วัดความอ้อมไเหล่านี้ ได้แก่ ช่วงเวลาขึ้น (Rise time, T_R) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่การตอบสนองมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 ของค่าเป้าหมาย (Y_{final}) บางครั้งอาจพิจารณาจากความชันกราฟการตอบสนอง (Slope) ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการได้เช่นกัน และช่วงเวลาสูงสุด (Peak time, T_P) เป็นเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าสูงสุดในแ่งมุมของความคลาดเคลื่อนในช่วงนี้มักจะพิจารณาด้วยค่าเปอร์เซนต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot, %OS) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าพุ่งเกินสูงสุดเปรียบเทียบกับค่าที่สภาวะคงตัวหรือค่าเป้าหมาย (Y_{final}) คำนวณได้จากสมการที่ 2.23 ค่าเวลาสู่สมดุล (Settling time, T_S) เป็นเส้นแบ่งเขตระหว่างผลตอบสนองชั่วคราวและผลตอบสนองในสภาวะคงตัวดังรูปที่ 2.16 โดยที่ค่าเวลาสู่สมดุลเป็นระยะเวลาที่ระบบเริ่มตอบสนองจนกระทั่งผลตอบสนองของระบบลู่อู่เข้าสู่ค่าขอบสุดท้ายที่ 2% หรือ 5% ของค่าผิดพลาดซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบควบคุมนั้น ๆ หลังจากนั้นระบบจะเข้าสู่ช่วงสถานะคงตัวดังรูปที่ 2.16 การตอบสนองในสภาวะคงตัวเป็นส่วนสำคัญที่งานวิจัยนี้ใช้พิจารณาความสามารถของระบบควบคุม เมื่อผ่านช่วงเวลาสู่สมดุล ผลตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับค่าอ้างอิง (ค่าเป้าหมาย) เรียกว่า ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady state error, E_{ss}) เป็นนิยามเดียวกับค่า $e(t)$ ที่เคยกล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 2.7.1



รูปที่ 2.16 การตอบสนองของระบบต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยในโดเมนเวลา

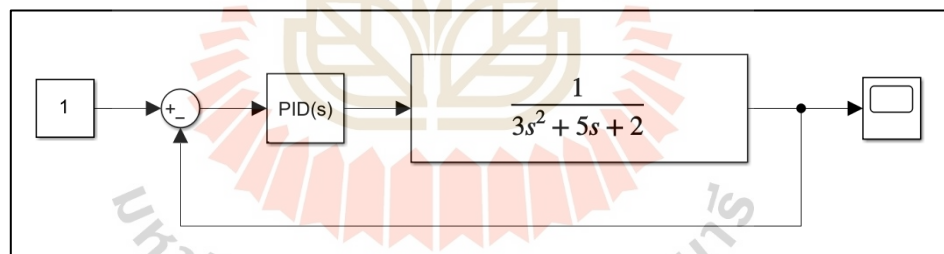
2.7.4.2 การปรับแต่งตัวควบคุมด้วยมือ

แนวทางนี้ไม่มีระเบียบวิธีการที่ตายตัว ส่วนใหญ่นิยมโดยปรับตั้งค่าอัตราขยาย k_p , k_i และ k_d โดยอ้างอิงผลตอบสนองดังตารางที่ 2.4 ซึ่งชี้แนะผลของการเพิ่มค่าตัวแปรพีไอดีอย่างอิสระ

ตารางที่ 2.4 ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรพีไอดีอย่างอิสระ

ตัวแปร	ช่วงเวลาขึ้น	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน	เวลาสู่สมดุล	ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว	สเถียรภาพ
k_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด	ลด
k_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงจนหมด	ลด
k_d	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด (กรณี k_d ต่ำ)

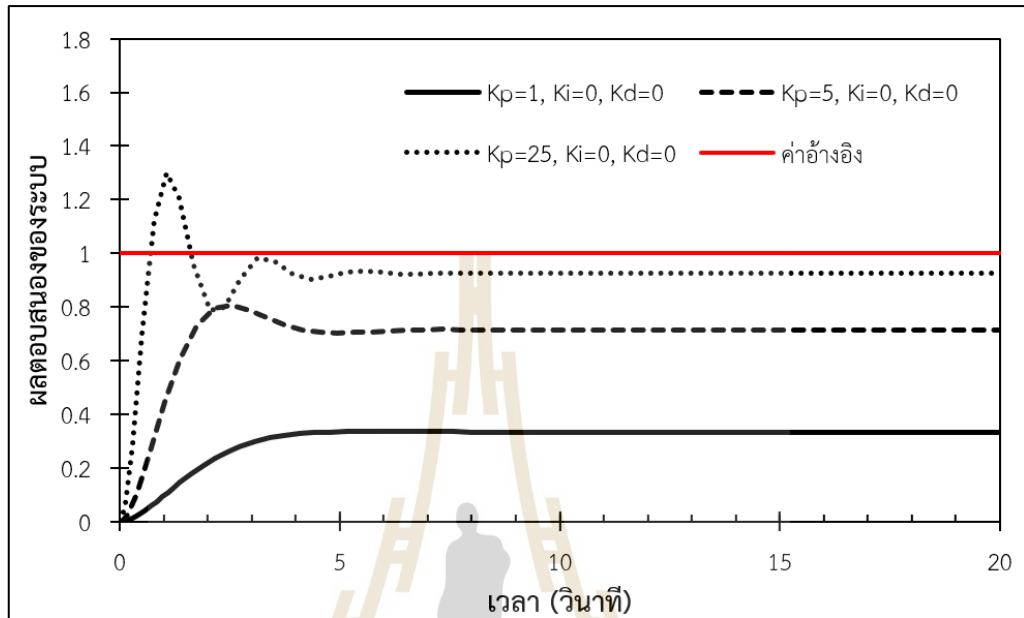
หมายเหตุ จาก “PID control system analysis, design, and technology,” โดย Kiam, Gregory, and Yun, 2005, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13, 559–576.



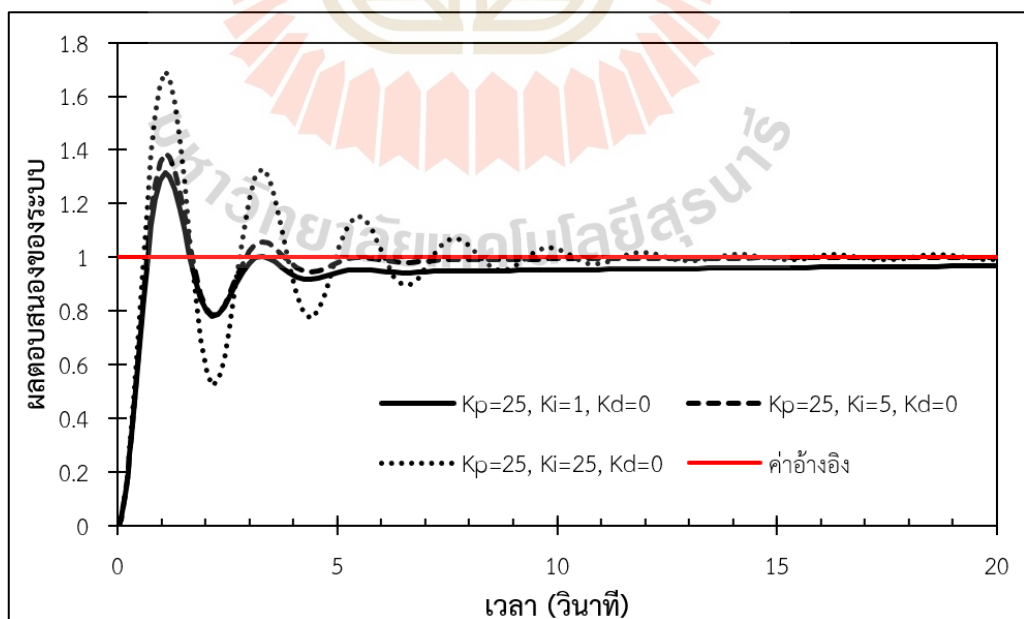
รูปที่ 2.17 การพิจารณาผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองด้วยการปรับแต่งตัวควบคุม PID

สุรัชชัย เหมศิริ (2563) ให้ข้อแนะนำในการปรับตั้งเบื้องต้น โดยกำหนดค่า k_i และ k_d เท่ากับ 0 และเพิ่มค่า k_p หากพิจารณาผลตอบสนองของฟังก์ชันถ่ายโอนดังรูปที่ 2.17 การเพิ่มขึ้นของค่า k_p ส่งผลให้พฤติกรรมของระบบจะมีการตอบสนองตามรูปที่ 2.18 เมื่อเพิ่ม k_p จนทำให้ระบบเกิดการแกว่งแบบสมชอบแล้วจึงปรับลดค่า k_p ลงครึ่งหนึ่งของค่าเดิม (ค่าที่ทำให้ระบบเกิดการแกว่ง) โดยทั่วไปแล้วระบบมักจะมีคามคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนออฟเซต (Offset error) ดังในรูปที่ 2.18 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น จึงแนะนำให้เพิ่มค่า k_i จนกระทั่งออฟเซตลดลงในเวลาที่ต้องการ หากพิจารณาตามรูปที่ 2.19 ข้อสังเกตที่พบ คือ การเพิ่มขึ้นของ k_i มากจนเกินไปอาจส่งผลให้ผลมีการสั่นเกิดขึ้น (ระบบไม่เสถียร) อย่างไรก็ตาม

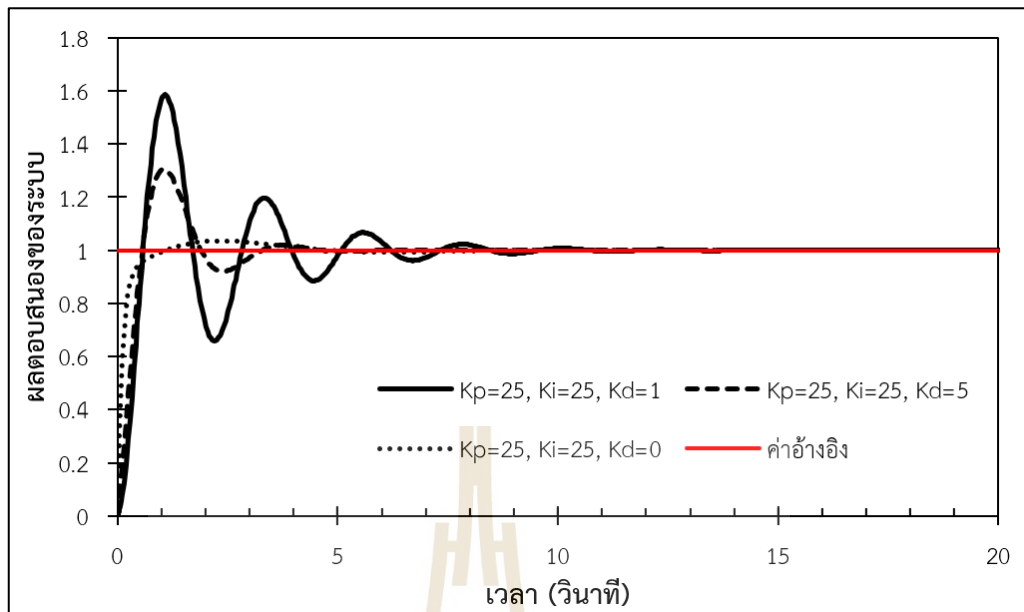
เราสามารถลดผลกระทบของการสั่นนี้ โดยการปรับเพิ่มค่า k_d จนกระทั่งผลตอบสนองของระบบอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามรูปที่ 2.20 พฤติกรรมที่กล่าวมานี้สอดคล้องกับตารางที่ 2.4 ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.18 การตอบสนองของระบบจากการเพิ่มค่าอัตราขยายพี (k_p)



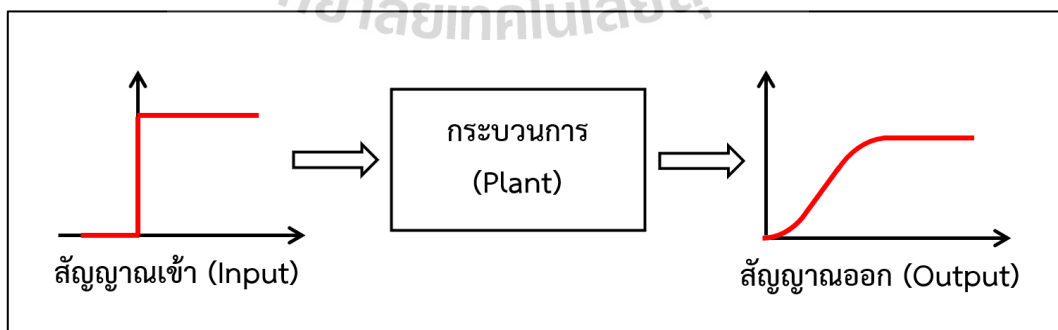
รูปที่ 2.19 การตอบสนองของระบบจากการเพิ่มค่าอัตราขยายไอ (k_i)



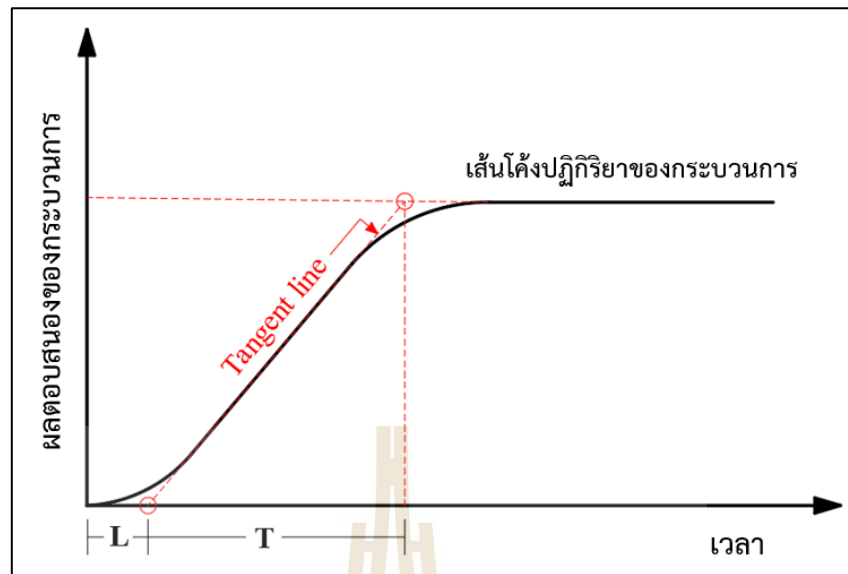
รูปที่ 2.20 การตอบสนองของระบบจากการเพิ่มค่าอัตราขยายดี (k_d)

2.7.4.2 การปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์

ซีเกลอร์ และ นิโคลส์ (Ziegler and Nichols) ได้พัฒนาวิธีการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีขึ้น โดยอาศัยการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม การปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols method) มี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols method: First method) และวิธีการที่สองของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols method: Second method) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.21 การตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณเข้าแบบขั้นบันได



รูปที่ 2.22 การวัดค่าตัวแปรจากเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการ

วิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์ บางครั้งเรียกว่า วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process reaction method) การปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมด้วยวิธีการนี้ ใช้การป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดไปยังระบบที่สนใจแล้วสังเกตผลตอบสนองของกระบวนการ โดยทดลองกับระบบวงเปิด ดังรูปที่ 2.21 จากนั้นจึงวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ค่าเวลาหน่วง (Delay time, L) และ ค่าเวลาคงที่ (Time constant, T) จากผลตอบสนองของระบบ (ปฏิกิริยาของกระบวนการ) ดังรูปที่ 2.22 โดยที่ ค่าอัตราขยาย k_p , k_i และ k_d คำนวณได้จากตารางที่ 2.5

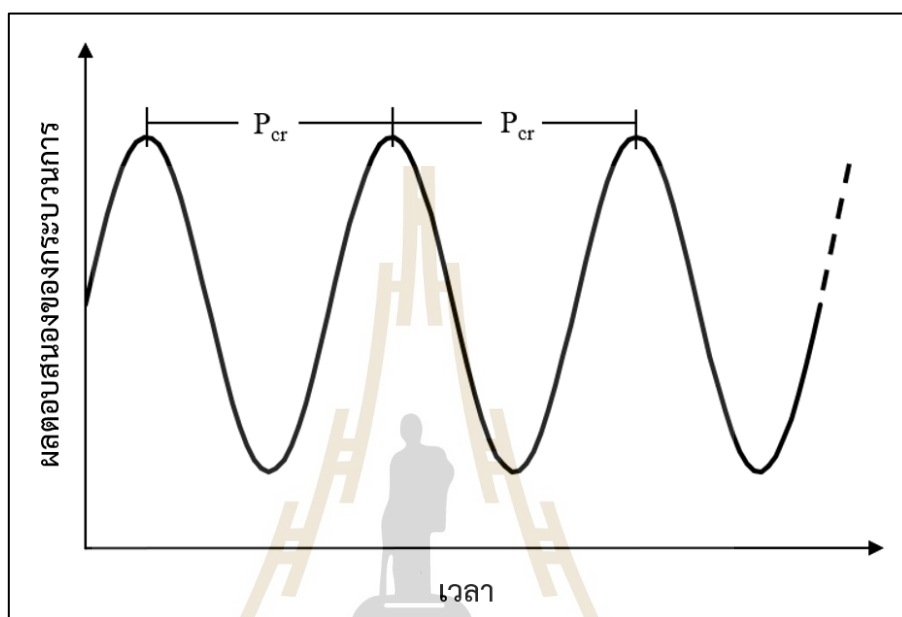
ตารางที่ 2.5 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมโดยวิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์

ตัวควบคุม	k_p	k_i	k_d
P	T/L		
PI	$0.9T/L$	$0.3k_p/L$	
PID	$1.2T/L$	$k_p/2L$	$k_pL/2$

หมายเหตุ จาก "Optimum settings for automatic controllers" โดย Ziegler, and Nichols, 1942, *Transactions of the ASME*, 64, 759-768.

วิธีการที่สองของซีเกลอร์-นิโคลส์ บางครั้งเรียกว่า วิธีการวัฏจักรสุดท้าย (Ultimate cycle method) วิธีการนี้เริ่มต้นจากการทำให้ระบบและตัวควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดสัดส่วน (Proportional Control) เพียงอย่างเดียว ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำการปรับค่าอัตราขยายปริพันธ์ (k_i) และอัตราขยายอนุพันธ์ (k_d) ให้เหลือน้อยที่สุด (มีค่าเท่ากับศูนย์) จากนั้นจึงเพิ่มค่าอัตราขยายสัดส่วน (k_p) จาก 0 จนกระทั่งค่าอัตราขยายสัดส่วนเข้าใกล้ค่าอัตราขยาย

วิกฤติ (k_{cr}) เมื่อค่าอัตราขยายสัดส่วนมีค่าเท่ากับอัตราขยายวิกฤติ ($k_p = k_{cr}$) ผลตอบสนองของระบบ จะเกิดการกวัดแกว่งแบบสมมูลขอบอย่างต่อเนือง (The sustained oscillation with critical period) ดังรูปที่ 2.23 คาบเวลาวิกฤติ (Critical period, P_{cr}) และ ค่าอัตราขยายวิกฤติ (Critical gain, k_{cr}) ที่ประเมินได้จากผลการทดลองถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.23 การแกว่งแบบสมมูลขอบอย่างต่อเนือง

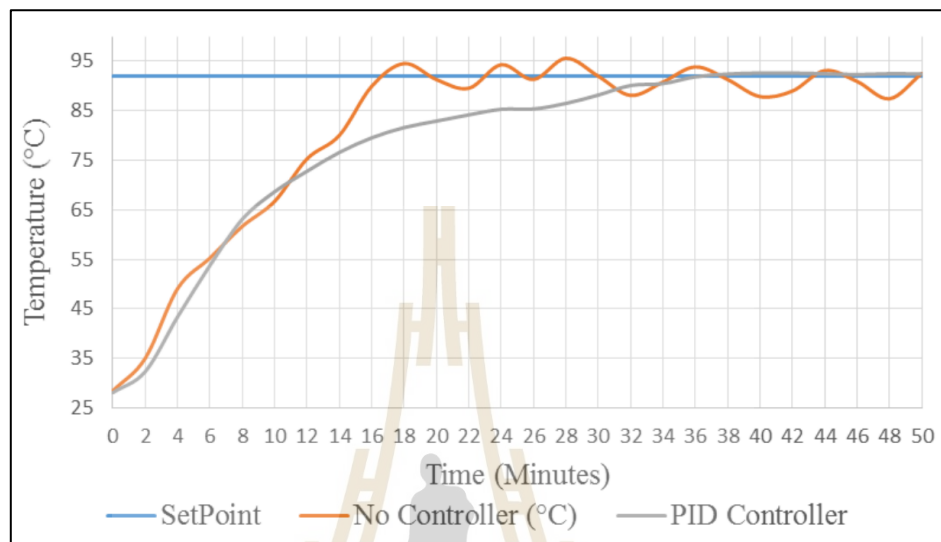
ตารางที่ 2.6 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมโดยวิธีการที่สองของซีเกลอร์-นิโคลส์

ตัวควบคุม	k_p	k_i	k_d
PI	$0.45 k_{cr}$	$0.54 P_{cr}$	-
PID - classic	$0.6 k_{cr}$	$1.2 k_{cr}/P_{cr}$	$0.075 k_{cr}/P_{cr}$
PID - no overshoot	$0.2 k_{cr}$	$0.4 k_{cr}/P_{cr}$	$0.066 k_{cr}/P_{cr}$

หมายเหตุ จาก “Optimum settings for automatic controllers” โดย Ziegler, and Nichols, 1942, Transactions of the ASME, 64, 759–768.

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า Aisuwarya, and Hidayati, 2019 ประยุกต์ใช้วิธีแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์ในการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ขดลวดทำความร้อนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำของเครื่องจ่ายน้ำร้อน ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 2.24 เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างระบบที่มีการควบคุมแบบพีไอดีกับระบบที่ไม่มีการควบคุม พบว่า ระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีสามารถรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิน้ำร้อนไว้ที่ค่าเป้าหมาย คือ 92°C ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิได้ในช่วง 92.31°C

ถึง 92.62°C (คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 0.67%) ขณะที่ระบบที่ไม่มีตัวควบคุมไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิน้ำร้อนได้ โดยที่ อุณหภูมิมีความผันผวนประมาณ 3°C ถึง 5°C จากอุณหภูมิอ้างอิง



รูปที่ 2.24 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของอุณหภูมิน้ำร้อนระหว่างระบบที่มีและไม่มีตัวควบคุม
 หมายเหตุ จาก “Implementation of ziegler-nichols PID tuning method on stabilizing temperature of hot-water dispenser,” โดย Aisuwarya, and Hidayati, 2019

Anto, Asumadu, and Okyere, 2016 ใช้วิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์ ในการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีสำหรับปรับปรุงสมรรถนะระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุด (Maximum power point tracking, MPPT) ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับกริด ผลกระทบของตัวควบคุมพีไอดีต่อตัวแปรสมรรถนะของระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุดแสดงดังตารางที่ 2.7 การศึกษานี้เน้นย้ำว่าตัวควบคุมพีไอดีซึ่งปรับแต่งโดยวิธีของซีเกลอร์-นิโคลส์ สามารถกำจัดการทำงานเกินขนาดลงได้มากกว่า 30% (พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินในตารางที่ 2.7) กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ระบบควบคุมนี้ช่วยลดการสูญเสียของระบบในตอนเริ่มต้นลง 30% นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาสู่สมดุลของระบบลง 236 ms เมื่อเปรียบเทียบกับระบบวงเปิด(ระบบแบบเดิม)

วิธีการที่กล่าวมานี้เป็นวิธีสำคัญสำหรับการพัฒนาระบบควบคุมในขั้นเริ่มต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมายืนยันว่าการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์สามารถใช้งานได้ดีกับระบบที่ไม่จำเป็นต้องรักษาเสถียรภาพอย่างเฉียบพลันมากนัก ดังเช่นระบบเชิงความร้อน อีกทั้ง วิธีการนี้มีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบควบคุมที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.7.3 จึงมีความเหมาะสมต่อการศึกษาในขั้นต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตาม หากพิสูจน์แล้วว่าการควบคุมคุณลักษณะบางประการในกระบวนการอบแห้งสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการได้อย่างแท้จริง

การวิเคราะห์ระบบบอบแหย่อย่างรอบคอบประกอบกับพัฒนาวิธีควบคุมขั้นสูงจะเป็นสิ่งจำเป็นต่อการศึกษของผู้วิจัยต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 2.7 ผลกระทบของตัวควบคุมพีไอดีต่อตัวแปรสมรรถนะของระบบตามรอยจุดกำลังสูงสุด

ตัวควบคุม	ตัวแปรสมรรถนะ		
	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%)	เวลาสู่สมดุล (s)	ช่วงเวลาขึ้น (s)
ระบบวงเปิด	35.056	0.616	0.123
P	13.224	0.450	0.016
PI	10.171	0.510	0.112
PID	0.510	0.380	0.018

หมายเหตุ จาก “PID control for improving P&O-MPPT performance of a grid-connected solar PV system with Ziegler-Nichols tuning method,” โดย Anto, Asumadu, and Okyere, 2016.



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการเพาะปลูกในเขตพื้นที่ ตำบลหนองแขวง อำเภอเทพารักษ์ จังหวัดนครราชสีมา เก็บเกี่ยวในช่วงปี 2565 - 2566 เป็นประชากรสำหรับการทดลอง ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองกลุ่มตัวอย่างข้าวปริมาณ 20 kg ได้รับการสุ่มอย่างง่าย เพื่อจัดเตรียมความชื้นและใช้ในการทดลองดังจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อต่าง ๆ ของบทนี้

3.2 สถานที่ทำวิจัย

การดำเนินงานภายใต้ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประกอบด้วย 3 จุดสำคัญ ได้แก่ อาคารเครื่องมือ 3 (สำหรับทำความสะอาดข้าว ในหัวข้อ 3.3.3) อาคารเครื่องมือ 4 (ใช้สำหรับการทดลองในหัวข้อ 3.10) และ อาคารจักรกลการเกษตร (ใช้สำหรับการทดลองในหัวข้อ 3.11 ถึง 3.14)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 เครื่องสาคิตการถ่ายเทความร้อนและมวล

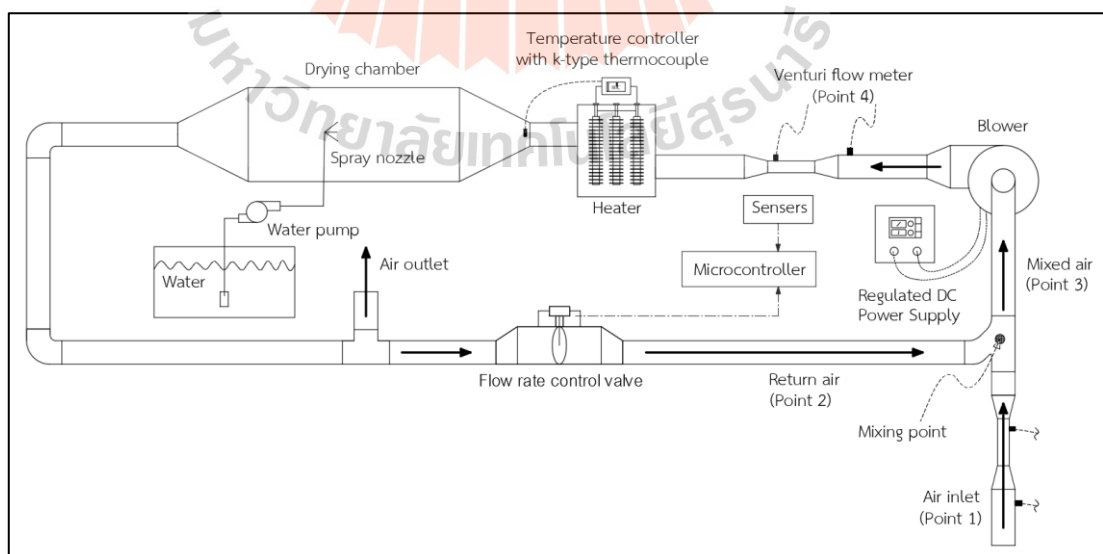
งานวิจัยนี้ใช้เครื่องสาคิตการถ่ายเทความร้อนและมวล (แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2) สำหรับศึกษาคุณลักษณะการทำงานของวาล์วรูปแบบต่าง ๆ ในการหมุนเวียนอากาศรอบห้องกลับมาใช้ซ้ำ และพัฒนาระบบควบคุมการผสมอากาศรอบห้องเวียนกลับนี้กับอากาศใหม่ที่เข้าสู่เครื่องอบแห้ง ระบบควบคุมการผสมอากาศที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาผ่านเครื่องสาคิตการถ่ายเทความร้อนและมวล แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามประเภทของวาล์วควบคุมการไหล (Flow rate control valve) ได้แก่ ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ (Solenoid valve) และ ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) ในส่วนของการทำงานของทั้งสองระบบนี้จะขอล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 3.10

เครื่องสาคิตการถ่ายเทความร้อนและมวลอาศัยการทำงานของพัดลม (Blower) กระแสตรงขนาด 24 V 5.5 A 3700 RPM ในการขับเคลื่อนอากาศ โดยอากาศแวดล้อม (Air inlet) ไหลเข้ามายังระบบ ณ จุดที่ 1 (Point 1) และไหลผ่านอุปกรณ์วัดการไหลแบบเวนตูรี (Venturi flow meter) ความเร็วของอากาศ ณ จุดที่ 4 (Point 4) ถูกควบคุมให้คงที่ 6 m/s ตลอดการทดลองด้วย Regulated DC Power Supply ยี่ห้อ ATTEN รุ่น APR3010H คิดเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร 0.01478 m³/s อากาศเหล่านี้ถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยเครื่องทำความร้อน (Heater) ซึ่งทำงานร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (Temperature Controller) รุ่น REX-C100 ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ 80 °C ตลอดการทดลอง อากาศร้อนเหล่านี้ถูกส่งเข้าสู่ห้องอบแห้ง

(Drying chamber) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลในลำดับถัดไป สำหรับภายในของห้องอบแห้ง ประกอบไปด้วยหัวพ่นฝอย (Spray nozzle) 1 หัว ทำหน้าที่ฉีดพ่นละอองน้ำโดยใช้เครื่องสูบน้ำ แรงดันสูง (Water pump) ยี่ห้อ SEAFLO รุ่น SFDP1-013-100-22 ขนาด 12 V 5 A ความดัน 100 PSI สร้างแรงดันแก่ระบบพ่นฝอย เมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับละอองน้ำจะเกิดการถ่ายเทความร้อน และมวลขึ้นภายในระบบส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศลดลงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงขึ้น ตามกระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น อากาศที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวถูกนำกลับมาใช้ซ้ำ (Return air) โดยไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหล (Flow rate control valve) ปริมาณอากาศ ที่ต้องการนำกลับไปใช้ซ้ำได้รับการคำนวณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และมีอากาศ บางส่วนถูกปล่อยทิ้งออกจากระบบ (Air outlet) กระบวนการผสมอากาศแบบแอดเดียแบติก (Adiabatic mixing process) เกิดขึ้นที่จุดผสม (Mixing point) อากาศที่ได้รับการผสมแล้ว (Mixed air) แสดงดังจุดที่ 3 (Point 3) ระบบนี้จะดำเนินรอบการทำงานต่อไปเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดการทดลอง



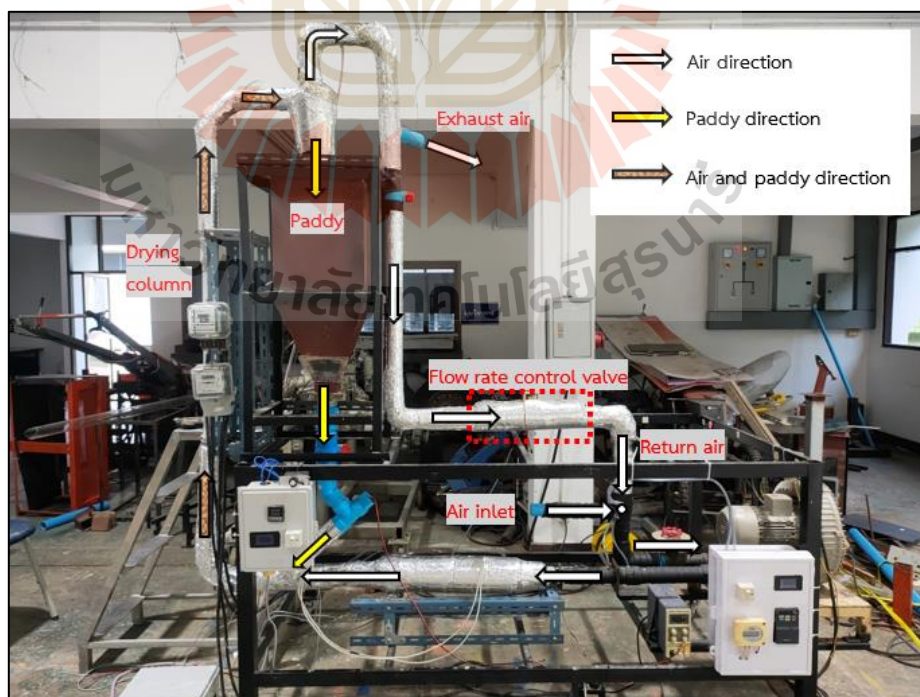
รูปที่ 3.1 เครื่องสาธิตการถ่ายเทความร้อนและมวล



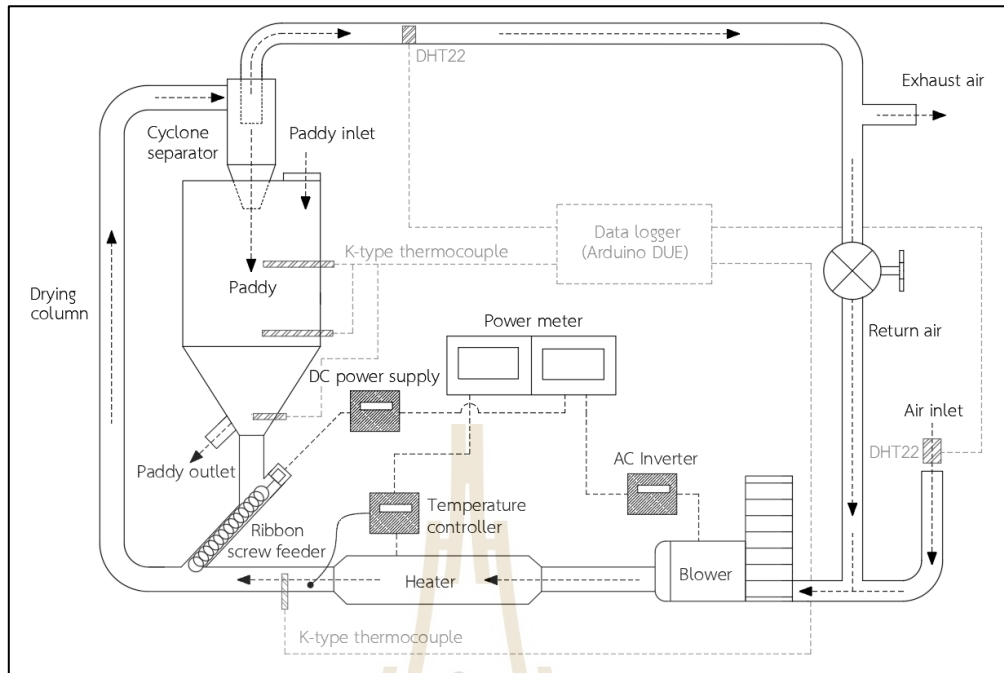
รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องสาธิตการถ่ายเทความร้อนและมวล

3.3.2 เครื่องอบแห้งพาสลัดแบบ

งานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องอบแห้งพาสลัดแบบสำหรับศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือก ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบต่าง ๆ ประกอบด้วย พัดลม (Blower: Ventex, Model: 2RB 710 H16, 2.2 kW) สำหรับสร้างการไหลอากาศผ่านเครื่องทำความร้อนขนาด 4 kW ทำงานร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (Band: RKC, Model: REX-C100) เพื่อผลิตอากาศร้อนตามค่าที่ต้องการ อินเวอร์เตอร์ (AC inverter Hitachi 2.2 kW 220 V 1 phase, Model: C1-022SFC) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบการทำงานของพัดลมซึ่งใช้กำหนดอัตราการไหลของอากาศอบแห้งในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้กำหนดความเร็วอากาศอบแห้งเทียบเท่าความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก (Terminal velocity) จากงานวิจัยของ ญัฐพงษ์ วงศ์บัพพา กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ (2565) มีค่าคงที่ 8.5 m/s เมื่อข้าวเปลือกจากถังเก็บไหลลงตามแรงโน้มถ่วงเข้าสู่อุปกรณ์จ่ายข้าวชนิดสปริง (Ribbon screw feeder) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 50 RPM โดยการจ่ายไฟ 12 V แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเกียร์ ข้าวเปลือกจะถูกขับเคลื่อนเข้าสู่หอบแห้ง (Drying column) ด้วยอัตราการป้อน $3.3 \text{ kg}_{\text{dry-solid}}/\text{min}$ อากาศร้อนซึ่งมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือกพาให้เมล็ดข้าวเหล่านั้นลอยผ่านหอบแห้งเข้าสู่ไซโคลนเพื่อแยกเมล็ดข้าวและอากาศออกจากกันดังลูกศรที่ปรากฏในรูปที่ 3.3 อุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้รับการตรวจวัดโดยมิเตอร์ไฟฟ้า (Power meter, Brand: NATIONINE, Model: DD28, 15/45 A, 1 phase 2 wire) ในกรณีที่ทำการศึกษาผลของการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำสามารถปรับสัดส่วนการเวียนอากาศโดยวาล์วควบคุมการไหลที่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งพาสลัดแบบ



รูปที่ 3.4 แผนภาพเครื่องอบแห้งพาสลมันแบบ

3.3.3 อุปกรณ์สำหรับจัดเตรียมตัวอย่างข้าว

เพื่อควบคุมตัวแปรขนาดของเมล็ดข้าวตลอดจนสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่อาจปะปนเข้ามาทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในการทดลอง งานวิจัยนี้จึงใช้เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ด้วยตะแกรงและแรงลม ยี่ห้อ SEEDBORO รุ่น LA-LS ดังรูปที่ 3.5 สำหรับคัดแยกขนาดและทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกก่อนนำมาจัดเตรียมความชื้นในหัวข้อ 3.5.2



รูปที่ 3.5 เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ด้วยตะแกรงและแรงลม

อุปกรณ์สำหรับขั้นตอนเตรียมความชื้นข้าวเปลือก แสดงดังรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย (ก) กระจกฉีดน้ำขนาด 650 ml ใช้สำหรับฉีดพ่นน้ำในขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง (ข) เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA3202S-CW พิกัด 3200 g ความละเอียด 0.01 g สำหรับ ชั่งมวลของข้าวและน้ำ (ค) ถังเก็บข้าว ยี่ห้อ INDEX รุ่น ริคโก 6045 ขนาด 36.5 x 24 x 26.5 cm (ง) ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UF30 ใช้อบไล่ความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับ วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในเมล็ดพืช (จ) ตู้เย็น 2 ประตู ยี่ห้อ SANDEN รุ่น YEM-1105i ขนาด 28 Q ใช้เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกขึ้นก่อนนำมาทดลอง



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์สำหรับจัดเตรียมตัวอย่างข้าว



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความชื้นและคุณภาพข้าว

3.3.4 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความชื้นและคุณภาพข้าว

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือที่ผ่านมาตรฐานซึ่งตรงวัดและมีความน่าเชื่อถือทางการค้า สำหรับตรวจสอบความชื้นข้าว ประกอบด้วย (ก) ถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับใส่ตัวอย่างเข้าตู้อบลมร้อน (ข) เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น ATY224R พิกัด 220 g ความละเอียด 0.0001 g และตู้อบลมร้อน (รูปที่ 3.6 (ง)) นอกจากนี้ยังได้ใช้เครื่องมือจากบริษัท ที.เอส.เอ็ม ซายน์ จำกัด ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว ได้แก่ (ค) เครื่องกะเทาะข้าวกล้องชนิดลูกยางคู่ รุ่น NW – 150 (ง) เครื่องคัดแยกข้าวหักแบบทรงกระบอก เครื่องมือทั้งหมดนี้แสดงดังรูปที่ 3.7

3.3.5 เซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัย

เครื่องมือวัดบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นจากการเขียนโปรแกรมบนแพลตฟอร์มอะดุยโน (Arduino) ควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัย

รูป	ชื่ออุปกรณ์	วัตถุประสงค์
	อะดุยโน ดียูอี (Arduino DUE)	ไมโครคอนโทรลเลอร์
	โมดูลวัดความดันอากาศ (Air Pressure Sensor Module - HX710B)	วัดความดันอากาศในอุปกรณ์ ตรวจสอบอัตราการไหลแบบเวนทูรี
	โซลินอยด์วาล์ว (solenoid valve) รุ่น 2W-500-50 12VDC (2")	ควบคุมการไหลผ่านของอากาศ
	โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay) FOFER SSR-25 DD 25A DC-DC 5V-60VDC output	ตัด-ต่อวงจรควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว
	เซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) รุ่น MG90S เฟืองโลหะ	ขับเคลื่อนใบพัดของวาล์วปีกผีเสื้อ เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศเวียนกลับ

ตารางที่ 3.1 เซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัย (ต่อ)

รูป	ชื่ออุปกรณ์	วัตถุประสงค์
	DHT22 Humidity and Temperature Sensor Module (AM2302)	วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ยี่ห้อ RKC รุ่น REX-C100	ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งและอุณหภูมิข้าวเปลือก
	โซลิตสเตรีย (Solid state relay) FOFER SSR 3-32V DC TO 24-380V AC Single-phase output	ตัด-ต่อวงจรควบคุมการทำงานของขดลวดทำความร้อน
	K-Type Thermocouple with MAX6675 module	วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง
	K-Type Thermocouple Temperature Sensor - Wire 3 m, Stainless Steel Probe Length 100 mm	วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

3.3.6 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

การแข่งขันทางการตลาดในปัจจุบันส่งเสริมให้มีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมเกิดขึ้นมาอย่างแพร่หลาย ซึ่งแต่ละค่ายต่างมีจุดแข็งที่แตกต่างกันตามลักษณะของงานที่จะนำไปใช้ งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมจำนวน 4 โปรแกรมในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

1. โปรแกรม Microsoft 365 ใช้รวบรวมและสรุปผลข้อมูล ตลอดจนจัดการงานทางด้านเอกสาร
2. โปรแกรม MATLAB ใช้ระบุเอกลักษณ์ของระบบ จำลองสถานการณ์ ออกแบบ และเขียนคำสั่งควบคุมเพื่อนำไปใช้งานกับระบบที่กำลังศึกษา
3. โปรแกรม IBM SPSS Statistics ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติต่าง ๆ อาทิเช่น การตรวจสอบสมมติฐาน การวิเคราะห์ปัจจัย การวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น และ
4. โปรแกรม Arduino IDE ใช้เขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino DUE) ในการควบคุมระบบและจัดเก็บข้อมูลการวัดผ่าน PLX-DAQ เข้าสู่ Microsoft Excel โดยที่ผู้อ่านสามารถศึกษาวิธีการเขียนคำสั่งได้จากวิทยานิพนธ์ของ อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว (2564)

3.4 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรทางสถิติ 2 ตัว ในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ โดยทั่วไปเรียกว่า ค่าอาร์สแควร์ (R-Squared, R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างค่าสังเกต (ค่าอ้างอิง) กับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 (อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, 2564) ค่าที่ได้จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 หากค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มาก ๆ สิ่งนี้แสดงถึงความสอดคล้องของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากตามไปด้วย

การวัดผลความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำคัญอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือและการเลือกใช้แบบจำลอง ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) จึงมักจะถูกใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองควบคู่กับค่า R^2 เนื่องจากผู้วิเคราะห์สามารถแปลผลได้ง่ายและหน่วยที่ได้มีค่าเดียวกับตัวแปรที่พิจารณา เช่น หากพิจารณาผลการสอบเทียบความแม่นยำของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิตั้งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.5.2 พบว่า ค่า RMSE มีค่าเท่ากับ 0.367 ซึ่งแปลความหมายได้ว่า โดยเฉลี่ยแล้วผลการสอบเทียบสามารถทำนายผลอุณหภูมิคลาดเคลื่อนที่ค่าบวกหรือค่าลบ 0.367 °C ค่า RMSE ประเมินได้ดังสมการที่ 3.6 (อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, 2564)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,pred})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{avg})^2} \quad (3.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,pred} - y_i)^2}{n}} \quad (3.2)$$

โดยที่	y_i	คือ ค่าสังเกตหรือค่าอ้างอิง
	$y_{i,pred}$	คือ ค่าตัวแปรตามจากแบบจำลอง
	y_{avg}	คือ ค่าเฉลี่ยของ y_i
	n	คือ จำนวนข้อมูล

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเซ็นเซอร์ทำงานอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงสอบเทียบเซ็นเซอร์และอุปกรณ์การวัดแต่ละชนิดก่อนนำมาใช้ทำการทดลอง โดยอาศัยชุดข้อมูลการทดลองจากเซ็นเซอร์ชนิดนั้น ๆ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงที่เชื่อถือได้แล้วจึงสร้างความสัมพันธ์เพื่อใช้ประเมินผลข้อมูลต่อไป เครื่องมือวัดที่ได้รับการสอบเทียบในส่วนนี้ ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (DHT22) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (K-Type Thermocouple) และชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวทูลี (Venturi flow meter) ซึ่งมีโมดูลวัดความดันอากาศ (Air Pressure Sensor Module - HX710B) เป็นส่วนประกอบในการวัด

3.5.1 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ทินกร เฟิงประโคน (2564) เสนอการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (DHT22) โดยใช้สารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่าง ๆ ในการกำหนดสภาวะควบคุมภายในกล่องปิดผนึกในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 °C ถึง 65 °C ผลการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ DHT22 ให้ผลการวัดอุณหภูมิที่มีความแม่นยำที่ R² เท่ากับ 0.999 และ RMSE เท่ากับ 0.539 นอกจากนี้ยังให้ข้อสังเกตถึงความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้นจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศเมื่อเซ็นเซอร์ต้องเผชิญกับอุณหภูมิทำงานสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในย่านอุณหภูมิตั้งแต่ 55 °C ถึง 65 °C งานวิจัยดังกล่าวจึงพัฒนาสมการสอบเทียบขึ้นมาสำหรับเซ็นเซอร์ DHT22 โดยเฉพาะ ซึ่งมีความถูกต้องของการวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ที่ R² เท่ากับ 0.993 และ RMSE เท่ากับ 1.616 สมการที่ 3.3 ใช้สำหรับปรับแก้ค่าอุณหภูมิ และสมการที่ 3.4 ใช้สำหรับปรับแก้ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ สมการเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงความไม่แน่นอนของการวัดในงานวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน

$$T_{prediction} = \frac{T_{measurement} - 1.5816}{0.9418} \quad (3.3)$$

$$RH_{prediction} = \frac{RH_{measurement} - 1.9635e^{(0.02368T_{measurement} - 0.03745)}}{0.001062T_{measurement} + 0.9492} \quad (3.4)$$

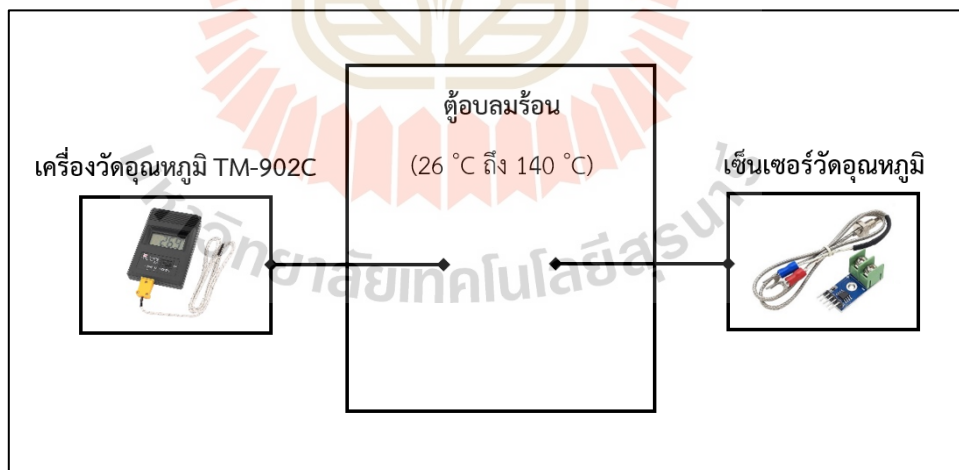
โดยที่	T _{prediction}	คือ	อุณหภูมิจากสมการสอบเทียบ
	T _{measurement}	คือ	อุณหภูมิจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ DHT22
	RH _{prediction}	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศจากสมการสอบเทียบ
	RH _{measurement}	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ DHT22

3.5.2 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิทุกชิ้นที่ใช้ในการทดลองได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยเครื่องวัดอุณหภูมิ TM-902C เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง (รูปที่ 3.8) ใช้ตู้อบลมร้อนในการกำหนดอุณหภูมิสอบเทียบตั้งแต่ 26 °C ถึง 140 °C แผนภาพของระบบสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและผลการสอบเทียบ แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



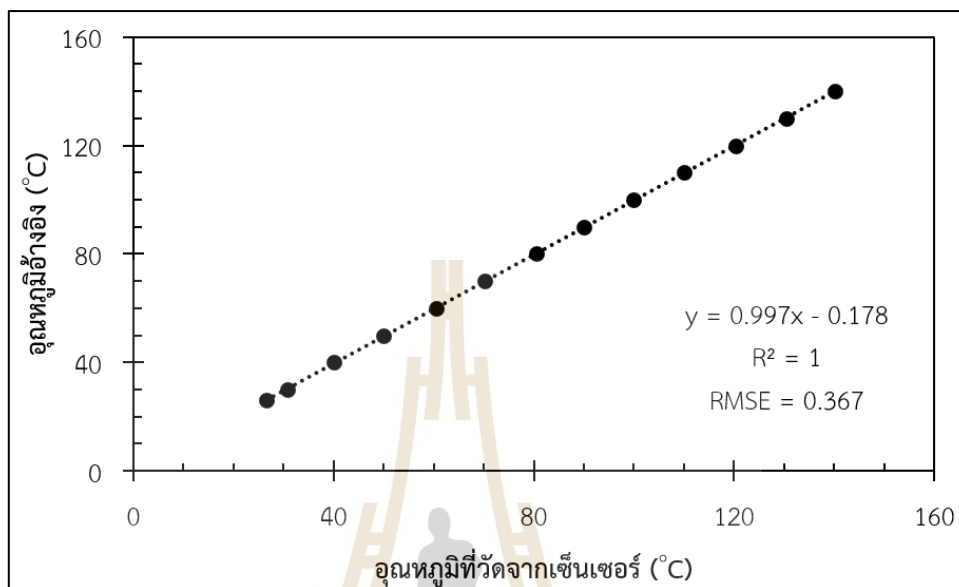
รูปที่ 3.8 เครื่องวัดอุณหภูมิ TM-902C



รูปที่ 3.9 แผนภาพของระบบสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (K-type thermocouple) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 5 ตัว ทั้งหมดนี้ได้รับการสอบเทียบความแม่นยำในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 26 °C ถึง 140 °C ผลการตรวจสอบความแม่นยำแสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นตัวอย่างของผลการสอบเทียบของเซ็นเซอร์

วัดอุณหภูมิตัวที่ 1 และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิตัวอื่น ๆ มีแนวโน้มผลการตรวจสอบแบบเดียวกัน ค่า R^2 ที่ประเมินได้จากเซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัว มีค่าเท่ากับ 1 และ RMSE มีค่าอยู่ระหว่าง 0.367 ถึง 0.438

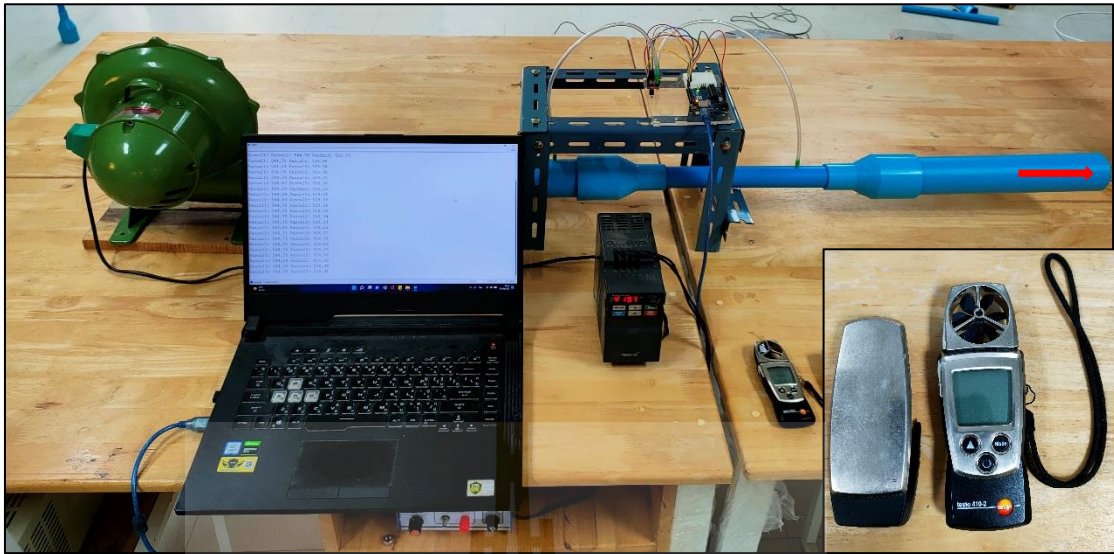


รูปที่ 3.10 สมการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

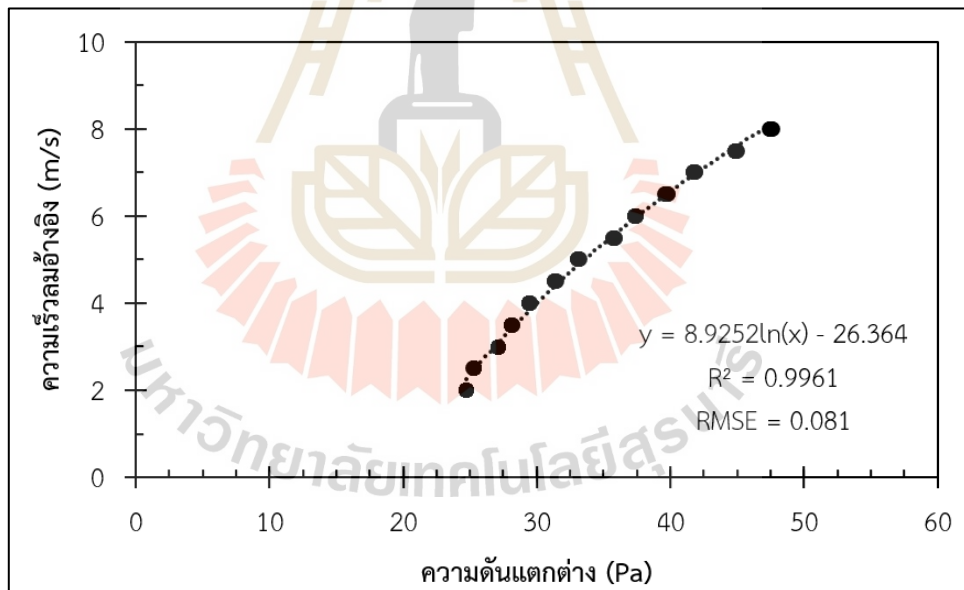
3.5.3 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวนจูรี

ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวนจูรี (Venturi flow meter) ที่ใช้ในหัวข้อ 3.10.3 มีทั้งสิ้น 2 ชุด แต่ละชุดได้นำมาสอบเทียบก่อนนำไปทดสอบจริงดังรูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดความเร็วลมอ้างอิง คือ เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Testo 410-2 NTC, Rotary Vane Anemometer, 20 m/s Max) ซึ่งใช้วัดความเร็วลม ณ ปลายทางออกของระบบ (ทางออกของลูกศรสีแดงด้านขวามือของรูปที่ 3.11) เครื่องเป่าลม (Blower) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนอากาศ ปรับความเร็วลมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ตั้งแต่ 2 m/s ถึง 8 m/s ไหลผ่านท่อพีวีซีขนาดหน้าตัด 2 นิ้ว

เมื่อดำเนินการสอบเทียบอุปกรณ์ โมดูลวัดความดันอากาศ (HX710B) จะรับค่าความดัน 2 จุด (ตามจุดต่อสายจากชุดวัดอัตราการไหล) จากนั้นจึงนำมาคิดความดันแตกต่างแล้วใช้ข้อมูลนี้สำหรับสร้างสมการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมต่อไป อนึ่ง การทดลองในส่วนนี้ทำการปรับเทียบค่าความเร็วอากาศเป็นหลัก ซึ่งจะนำความเร็วอากาศไปคิดค่าอัตราการไหลอีกครั้งในการทดลองแบบเรียลไทม์ เนื่องจากการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของไหลซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างการสร้างสมการสอบเทียบสำหรับชุดวัดอัตราการไหลอากาศชุดที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยที่การสอบเทียบชุดที่ 2 มีแนวโน้มเดียวกันจากการทวนสอบความถูกต้องของการทำนายความเร็วลม พบว่า ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวนจูรีที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความเร็วลมที่ค่า R^2 สูงกว่า 0.99 และ RMSE ต่ำกว่า 0.081 (พิจารณาผลการทำนายจากชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวนจูรีทั้งสองชุด)



รูปที่ 3.11 การสอบเทียบชุดวัดอัตราการไหลของอากาศแบบเวทูรี



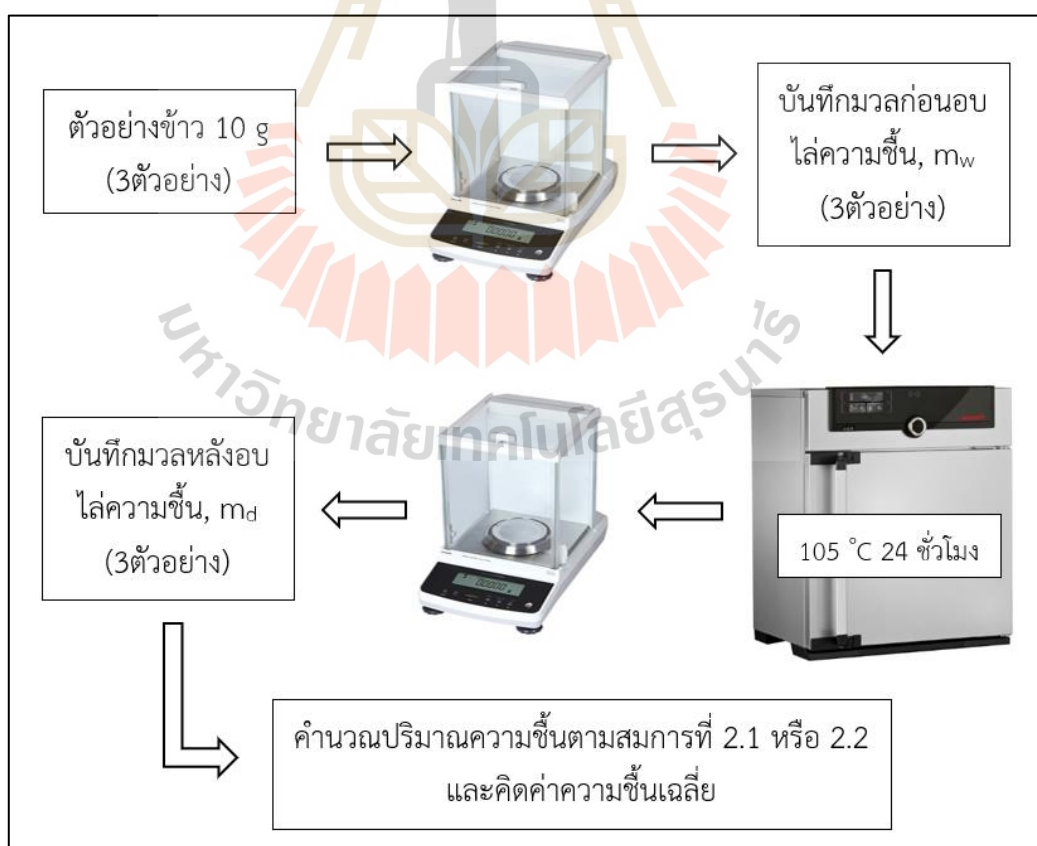
รูปที่ 3.12 สมการสอบเทียบความเร็วลม

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.1 ถึง 3.5.3 จะเห็นว่าเซ็นเซอร์และเครื่องมือวัดที่พิจารณา มีค่า R^2 สูงกว่า 0.99 ขึ้นไป อีกทั้งยังมีค่า RMSE เข้าใกล้ 0 มาก ภายใต้สถานการณ์การทำงาน ซึ่งทำการสอบเทียบมาแล้ว อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้งานในการทดลองของส่วนต่าง ๆ ต่อไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.6 การตรวจความชื้นและจัดเตรียมตัวอย่างข้าว

3.6.1 การตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือก

ตัวอย่างข้าวเปลือกได้รับการตรวจสอบความชื้นตามวิธีมาตรฐานของ AOAC 945.15-1990 (AOAC, 1990; Ling, Teng, and Lin, 2018) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูง เนื่องจากวิธีการตรวจสอบความชื้นทางตรง (Direct method) กระบวนการตรวจสอบความชื้นแสดงดังรูปที่ 3.13 เริ่มจากการสุ่มตัวอย่างข้าวอย่างง่ายเพื่อใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างที่สนใจศึกษา ในสถานการณ์นั้น ๆ จำนวน 3 ตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างข้าวไปชั่งและบันทึกค่ามวลชื้นของข้าว (m_w) ก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อนเพื่อระเหยความชื้น โดยที่กำหนดเงื่อนไขการอบระเหยความชื้นที่อุณหภูมิอากาศ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลากว่า 24 ชั่วโมง ข้าวที่ผ่านขั้นตอนนี้ไปแล้วสามารถอนุมานได้ว่าเป็นข้าวที่ปราศจากน้ำหรือความชื้นอยู่ภายใน เรียกว่า มวลแห้ง (m_d) ผลต่างระหว่างมวลชื้นและมวลแห้งของข้าวเปลือกแสดงถึงน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ภายในเมล็ด โดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้นเหล่านี้มักจะคิดออกมาเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับมวลชื้นหรือมวลแห้งตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งานต่อไป และเนื่องจากตัวอย่างข้าวมีจำนวน 3 ตัวอย่าง (บางกรณีเป็นการทดลองที่มีการทำซ้ำ) จำนวนตัวอย่างเหล่านี้จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของความชื้นข้าวในขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.13 การตรวจสอบความชื้นข้าวเปลือก

3.6.2 การเตรียมความชื้นข้าวเปลือก

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.3 ข้าวเปลือกซึ่งผ่านการคัดขนาดและทำความสะอาดแล้วถูกนำมาเตรียมความชื้นโดยการเติมน้ำกลับมายังตัวอย่างข้าวเพื่อให้ข้าวมีความชื้นเป็นไปตามที่ต้องการ งานวิจัยนี้กำหนดให้ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองมีค่าประมาณร้อยละ 24 มาตรฐานเปียก หรือประมาณร้อยละ 32 มาตรฐานแห้ง กระบวนการเตรียมความชื้นข้าวเริ่มต้นจากการตรวจสอบความชื้นข้าวเริ่มต้น (ประเมินได้จากสมการที่ 3.5) จากนั้นจึงนำความชื้นข้าวเริ่มต้นไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมกลับไปยังตัวอย่างตามสมการที่ 3.6 อนึ่ง มวลแห้งที่ปรากฏในสมการคือมวลแห้งทั้งหมดของตัวอย่างที่นำมาเตรียมความชื้นในแต่ละครั้ง และความชื้นเป้าหมายเป็นความชื้นที่ผู้วิจัยต้องการให้ได้ค่าประมาณร้อยละ 32 มาตรฐานแห้ง

$$MC_{initial} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (3.5)$$

$$m_{water} = m_d (M_{target} - M_{initial}) \quad (3.6)$$

โดยที่	$MC_{initial}$	คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น (ทศนิยม)
	MC_{target}	คือ ความชื้นข้าวที่ต้องการ (ทศนิยม)
	m_w	คือ มวลข้าวเปลือกชื้น (g)
	m_d	คือ มวลแห้ง (g)
	m_{water}	คือ มวลน้ำสำหรับเติมกลับไปยังตัวอย่าง (g)



รูปที่ 3.14 การเตรียมตัวอย่างควบคุม

3.6.3 การเตรียมตัวอย่างควบคุม

ตัวอย่างควบคุมในงานวิจัยนี้หมายความว่าตัวอย่างอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบคุณภาพข้าวกับตัวอย่างข้าวหลังกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลม ตัวอย่างเหล่านี้ผ่านกระบวนการเตรียมความชื้นในหัวข้อ 3.5.2 ก่อนที่จะนำไปลดความชื้นด้วยวิธีแสงแดดและลมธรรมชาติดังรูปที่ 3.14 โดยควบคุมความหนาของชั้นให้มีค่าประมาณ 2 ถึง 3 mm

3.7 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

3.7.1 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เป็นการประเมินหาปริมาณน้ำซึ่งระเหยออกจากวัสดุต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ 3.7 (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, 2557)

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (3.7)$$

โดยที่	DR	คือ อัตราการอบแห้ง (kg _{water} /h)
	m _i	คือ มวลข้าวเปลือกก่อนอบแห้ง (kg)
	m _f	คือ มวลข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (kg)
	t	คือ เวลาที่ใช้อบแห้ง (h)

3.7.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นการประเมินการใช้พลังงานของระบบต่อหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกไป โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ใช้พลังงานหลักสูงสุดในกระบวนการอบแห้ง เรียกว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปฐมภูมิ พบได้ในแหล่งผลิตความร้อน และส่วนที่สอง เรียกว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทุติยภูมิ ซึ่งประเมินจากการใช้พลังงานในอุปกรณ์ส่วนควบต่าง ๆ ในเครื่องอบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ 3.8 (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, 2557)

$$SEC = \frac{3.6E}{m_i - m_f} \quad (3.8)$$

โดยที่	SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg _{water})
	E	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (kWh)

3.8 การตรวจสอบคุณภาพข้าว

ตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างข้าวหลังการอบแห้งถูกนำมากะเทาะเปลือกโดยเครื่องกะเทาะข้าวกล้องดังรูปที่ 3.7 (ค) และคัดแยกข้าวหักออกจากข้าวเต็มเมล็ดด้วยเครื่องคัดแยกข้าวหักแบบทรงกระบอกดังรูปที่ 3.7 (ง) เพื่อนำตัวอย่างที่ได้มาชั่งมวลข้าวและประเมินผลคุณภาพข้าว ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.8.1 ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง

ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (Brown rice yield, BRY) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพข้าว ซึ่งพิจารณาในส่วนของข้าวกล้องที่มีความสมบูรณ์เกิน 80% ขึ้นไปเทียบกับข้าวกล้องทั้งหมดที่พิจารณาดังสมการที่ 3.9 (Behera, and Sutar, 2018)

$$BRY = \left(\frac{m_{head}}{m_{total}} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

โดยที่	BRY	คือ ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (%)
	m_{head}	คือ มวลของข้าวกล้องต้นที่มีความสมบูรณ์เกิน 80% ขึ้นไป (g)
	m_{total}	คือ มวลข้าวทั้งหมดที่นำมาสี (g)

3.8.2 ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์

ถึงแม้ว่าร้อยละผลผลิตข้าวกล้องเป็นตัวแปรที่ดีในการตรวจสอบคุณภาพข้าวเชิงปริมาณ แต่อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบผลจากกลุ่มตัวอย่างต่างกันอาจทำให้การวิเคราะห์ผลเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นในกรณีที่มีการเปรียบเทียบร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 1 กลุ่ม จึงควรพิจารณาเปรียบเทียบร้อยละผลผลิตกับตัวอย่างควบคุมของกลุ่มนั้น ๆ ออกมาเป็นร้อยละการสูญเสียผลผลิตข้าวกล้อง (Percent loss of brown rice yield, %Loss) ตามสมการที่ 3.10 จากนั้นจึงนำมาคิดเป็นร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์ (Relative brown rice yield, RBRY) จากสมการที่ 3.11 ตามลำดับ (Behera, and Sutar, 2018)

$$\%Loss = \left(\frac{BRY_{control} - BRY}{BRY_{control}} \right) \times 100 \quad (3.10)$$

$$RBRY = 100 - \%Loss \quad (3.11)$$

โดยที่	RBRV	คือ ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์ (%)
	%Loss	คือ ร้อยละการสูญเสียผลผลิตข้าวกล้อง (%)
	BRY _{control}	คือ ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องของตัวอย่างควบคุม (%)

3.9 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย

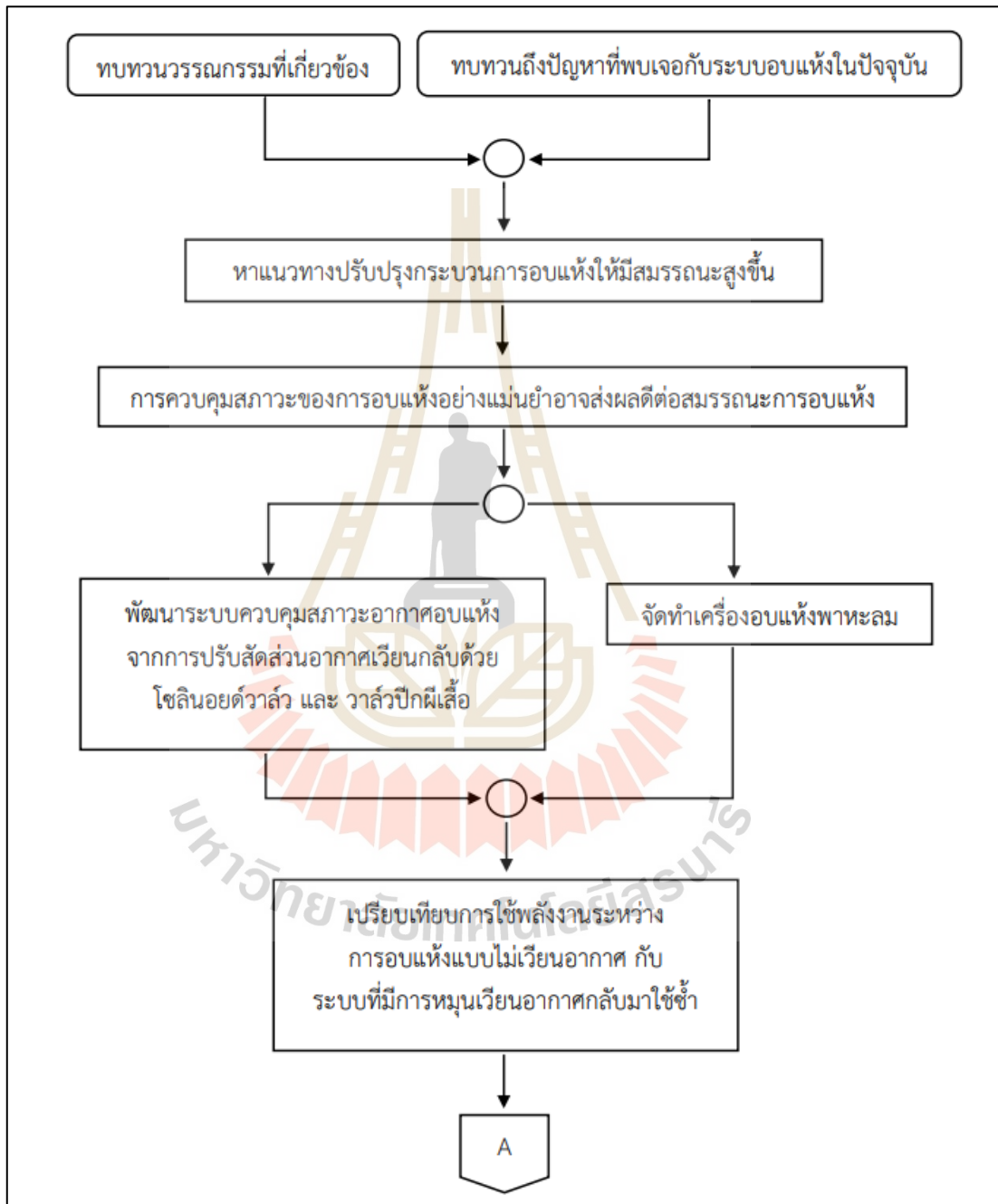
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มต้นจากการรับทราบปัญหาในปัจจุบันที่มักจะพบเจอในระบบอบแห้งข้าวเปลือกประกอบกับการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อค้นหาพื้นที่ทำงานวิจัย จากการศึกษาพบว่ากว่าร้อยละ 90 ของต้นทุนในการอบแห้งถูกใช้ในการผลิตอากาศร้อนเป็นหลัก อีกทั้งยังพบว่าการที่ข้าวเปลือกได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานส่งผลให้ข้าวหลังกระบวนการอบแห้งเกิดการแตกหักสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะควบคุมสภาวะการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพาหะลมที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อปรับปรุงสมรรถนะบางประการของระบบอบแห้งแบบเดิมให้ดีขึ้น ลำดับขั้นตอนการทดลองและการพิสูจน์สมมติฐานต่าง ๆ แสดงตามแผนภาพดังรูปที่ 3.15

การดำเนินงานช่วงแรกเป็นการพัฒนาระบบหมุนเวียนอากาศทิ้งกลับมาใช้ซ้ำ โดยพัฒนาตัวควบคุมการผสมอากาศระหว่างอากาศอบแห้งที่ใช้แล้วกับอากาศใหม่ที่เข้าสู่เครื่องอบแห้งจากการใช้วาล์ว 2 รูปแบบ ได้แก่ วาล์วชนิดโซลินอยด์และวาล์วปีกผีเสื้อ ซึ่งระบบทั้ง 2 ชนิด ได้รับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานเพื่อเลือกระบบที่เหมาะสมมาใช้กับเครื่องอบแห้งพาหะลมในขณะเดียวกัน เครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบก็ได้รับการพัฒนาขึ้นในระยะเวลาคู่ขนานกัน

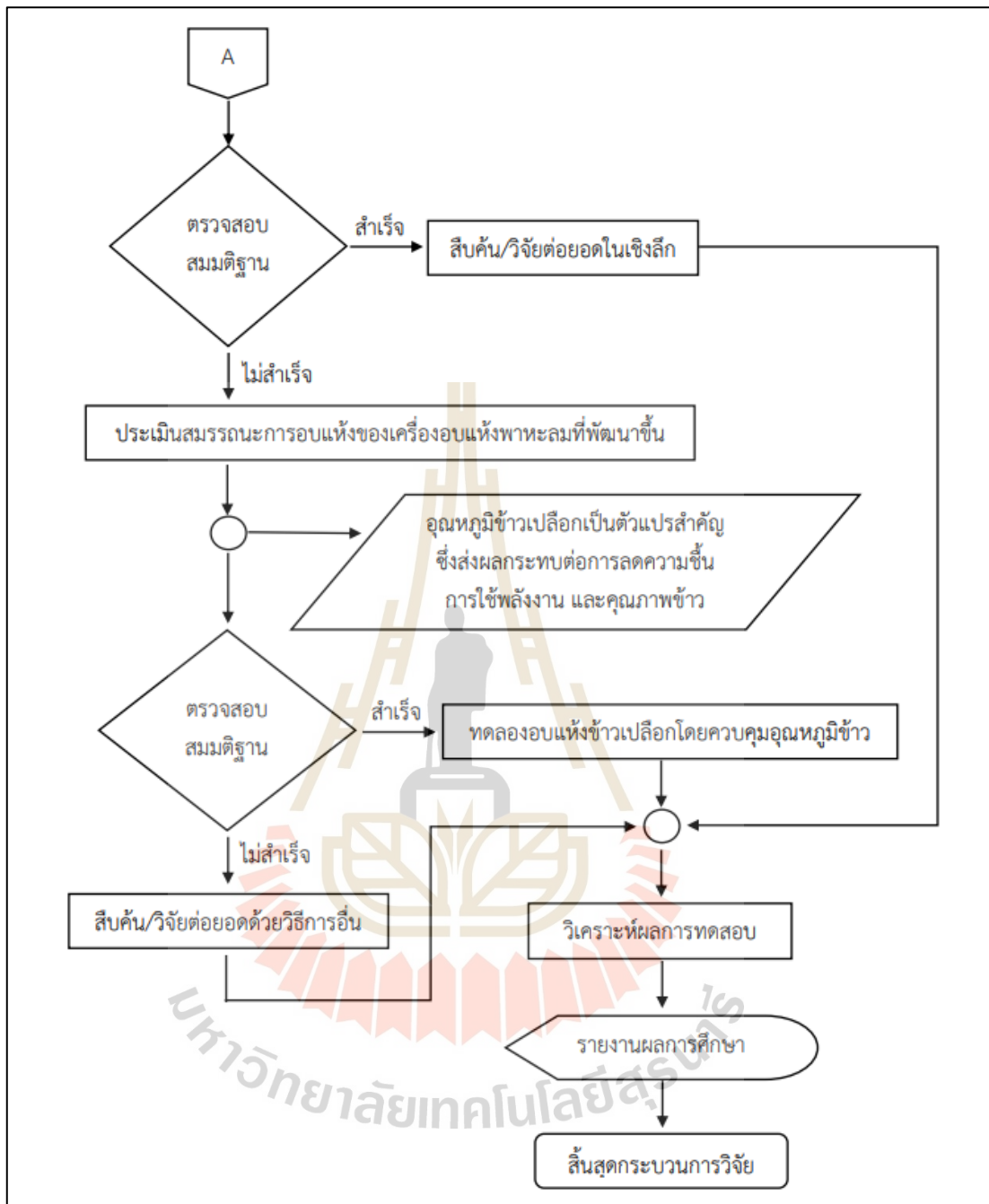
สมมติฐานแรกที่ทำการศึกษาตรวจสอบ คือ การเวียนอากาศทิ้งกลับมาใช้ซ้ำสามารถช่วยลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลาทำแห้งข้าวเปลือกได้หรือไม่ การทดลองในส่วนนี้จะขอกกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อ 3.11 ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำสามารถลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งแบบพาหะลมได้เพียง 3.38% ซึ่งนับว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ อมร ดอนเมือง, นิรุต อ่อนสูง และ สุรียา โชคเพิ่มพูน (2563) อีกทั้งยังทำให้บางกรณีของการอบแห้งมีระยะเวลาที่เนิ่นนานขึ้นจนทำให้กระบวนการมีการใช้พลังงานที่ไม่แตกต่างจากระบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่องานวิจัยในส่วนแรกไม่ประสบความสำเร็จ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมในบางประเด็น (กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 3.12) เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพาหะลมที่พัฒนาขึ้น ตลอดจนหาแนวทางต่อยอดงานวิจัย โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งเพื่อยกระดับความสามารถในการอบแห้งให้สูงขึ้นต่อไป

จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ต่อตัวแปรตาม พบว่า อุณหภูมิข้าวเปลือกเป็นอิทธิพลโดดเด่นซึ่งผลกระทบต่อลดความชื้นข้าว การใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง และร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง สูงถึง 42% (กล่าวถึงผลการทดลองนี้อย่างละเอียดในหัวข้อ 4.4) ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบสมมติฐานนี้โดยการพิจารณาค่าคงที่เวลาของการเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกจากการส่งผ่านอากาศร้อนอุณหภูมิคงที่ค่าต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยพยายามอบแห้งให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกอยู่ในช่วง 42 °C ถึง 44 °C แล้วเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ระยะเวลาทำแห้ง และคุณภาพข้าวกับวิธีอบแห้งรูปแบบเดิมที่เคยทำผ่านมาแล้ว เมื่อตรวจสอบสมมติฐานนี้แล้วพบว่า สมมติฐานนี้เป็นจริง กล่าวคือ วิธีการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในค่าหนึ่ง

สามารถส่งผลดีต่อตัวแปรตามที่สนใจศึกษาอย่างมีนัยสำคัญ การวิจัยในครั้งนี้จึงประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งพาทะลมแล้วจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเขียนรายงานผลการศึกษิตตามแผนภาพดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย



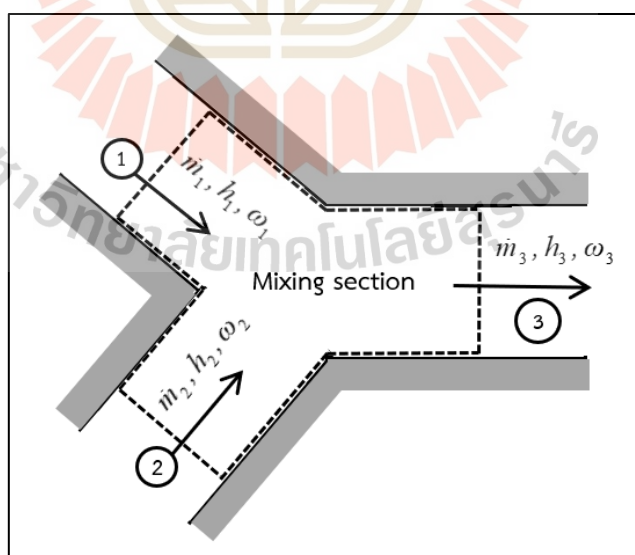
รูปที่ 3.15 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย (ต่อ)

3.10 การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้งจากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับด้วยวาล์วควบคุมการไหล

การทดลองในส่วนนี้ใช้เครื่องสาธิตการถ่ายเทความร้อนและมวล ในหัวข้อ 3.3.1 สำหรับสร้างสภาวะอบแห้งทดแทนการอบแห้งข้าวเปลือกจากเครื่องอบแห้งพาหะลมขนาดใหญ่ ทั้งนี้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาเตรียมการที่อาจเกิดขึ้นจากการทดสอบกับระบบอบแห้งจริง ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้งจากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับที่พัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามประเภทของวาล์วควบคุมการไหล ได้แก่ ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ (Solenoid valve) และระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) ซึ่งจะอธิบายวิธีการพัฒนาแต่ละระบบอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

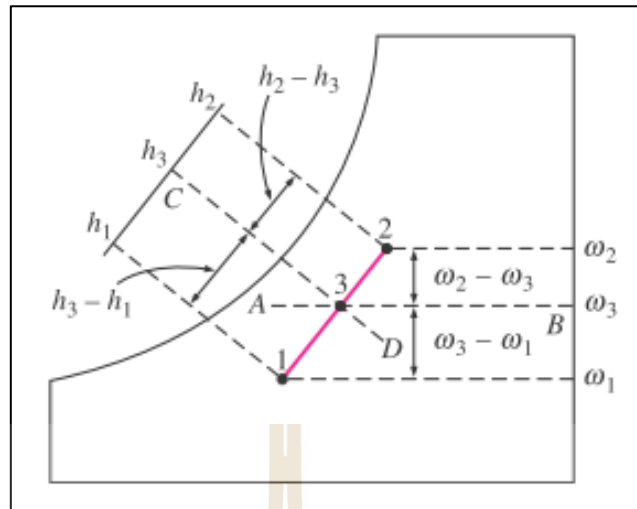
3.10.1 กระบวนการผสมอากาศ

กระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic process) เป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ โดยทั่วไปการผสมอากาศขึ้นในกระบวนการปรับอากาศมักจะอธิบายด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.16 ซึ่งแสดงถึงการรวมกระแสอากาศทั้งสองเข้าด้วยกัน อีกทั้งกระบวนการดังกล่าวมักจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมน้อยมากจากการล้อมรอบระบบด้วยวัสดุกันความร้อนเพื่อป้องกันการไหลของความร้อน ด้วยเหตุนี้การผสมอากาศจึงตั้งอยู่บนสมมติฐานของกระบวนการอะเดียแบติก เรียกว่า “กระบวนการผสมอากาศแบบอะเดียแบติก (Adiabatic mixing of two air streams)” (Cengel and Boles, 2011)



รูปที่ 3.16 การผสมอากาศขึ้น

หมายเหตุ จาก *Thermodynamics: An Engineering Approach Seventh Edition*, โดย Cengel and Boles, 2011, New York: McGraw-Hill.



รูปที่ 3.17 แผนภาพกระบวนการผสมอากาศชื้น

หมายเหตุ จาก *Thermodynamics: An Engineering Approach Seventh Edition*, โดย Cengel and Boles, 2011, New York: McGraw-Hill.

โดยปกติแล้วกระบวนการผสมอากาศมักจะละเลยผลของงานและการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์เนื่องจากสิ่งเหล่านี้มีอิทธิพลต่อกระบวนการเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสมมูลมวลของอากาศแห้ง สมมูลมวลของความชื้นในอากาศ และสมมูลพลังงานสำหรับกระบวนการผสมอากาศแบบอะเดียแบติกจากรูปที่ 3.17 จึงแสดงได้ดังสมการที่ 3.12 ถึงสมการที่ 3.14 ตามลำดับ

$$\dot{m}_{o1} + \dot{m}_{o2} = \dot{m}_{o3} \quad (3.12)$$

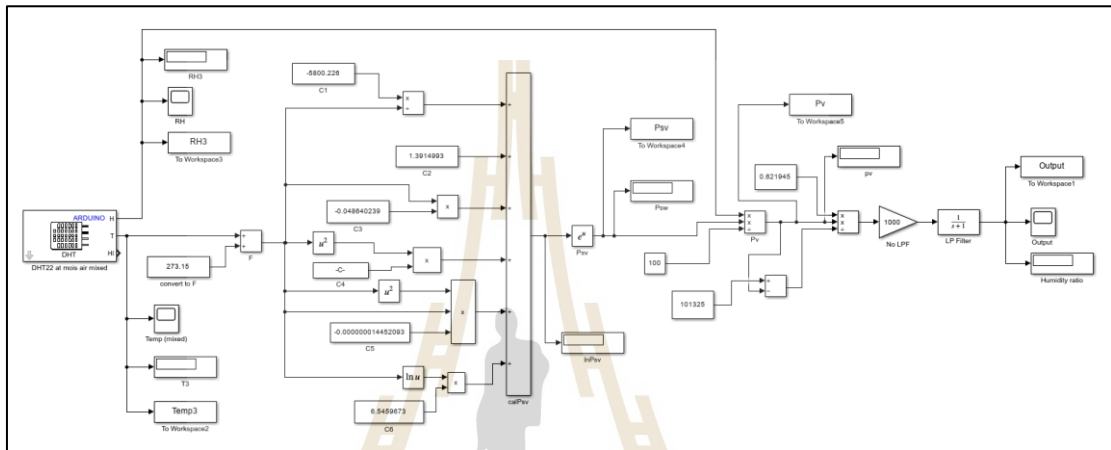
$$\dot{m}_{o1} \omega_1 + \dot{m}_{o2} \omega_2 = \dot{m}_{o3} \omega_3 \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2 = \dot{m}_{a3} h_3 \quad (3.14)$$

- โดยที่
- i คือ หมายเลขกำกับสถานะ (state)
 - \dot{m}_{ai} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (kg/s)
 - ω_i คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$)
 - h_i คือ เอลทาลปีของอากาศ ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{da}}$)

3.10.2 การประเมินค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (DHT22)

อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (Humidity ratio, ω) เป็นตัวแปรตอบสนอง (Output) ที่งานวิจัยนี้สนใจควบคุม การตรวจวัดคุณสมบัติอากาศด้วยเซ็นเซอร์ DHT22 จะได้ค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{db}) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (RH) ตามแต่ละจุดวัดออกมา ดังนั้น จึงต้องนำค่าตัวแปรดังกล่าวมาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศในแต่ละสถานะ



รูปที่ 3.18 แผนภาพบล็อกสำหรับการคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศ

งานวิจัยนี้ใช้สมการความสัมพันธ์อ้างอิงจากสมาคมวิศวกรทำความร้อน ความเย็นและการปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, ASHRAE) ในการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นอากาศจากข้อมูล ที่อ่านค่าโดยเซ็นเซอร์ DHT22 ขั้นตอนการคำนวณเริ่มจากเซ็นเซอร์ DHT22 อ่านค่าอุณหภูมิอากาศ ในหน่วยขององศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) และแปลงค่าอุณหภูมิเป็นหน่วยเคลวิน (K) ก่อนนำไปคำนวณ ค่าความดันไออิ่มตัว (Saturation vapor pressure, P_{sv}) ตามสมการที่ 3.15 (ASHRAE, 2009) ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศถูกนำมาคำนวณค่าความดันไอของอากาศ (Vapor pressure, P_v) ตามสมการที่ 3.16 (ASHRAE, 2009) สุดท้ายจึงนำค่าความดันไอที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ ก่อนหน้ามาหาค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศตามสมการที่ 3.17 (ASHRAE, 2009) และเนื่องจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.10 มีการใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการเขียนและพัฒนาระบบควบคุม การคำนวณด้วยวิธีการที่ได้กล่าวมานี้จึงถูกเขียนอยู่ในรูปของแผนภาพบล็อก (Block diagram) แสดงดังรูปที่ 3.18

$$P_{sv} = e^{\left(\frac{C_1}{T_{db}} + C_2 + C_3 T_{db} + C_4 T_{db}^2 + C_5 T_{db}^3 + C_6 \ln T_{db} \right)} \quad (3.15)$$

$$P_v = \frac{RH \times P_{sv}}{100} \quad (3.16)$$

$$\omega = 0.621945 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (3.17)$$

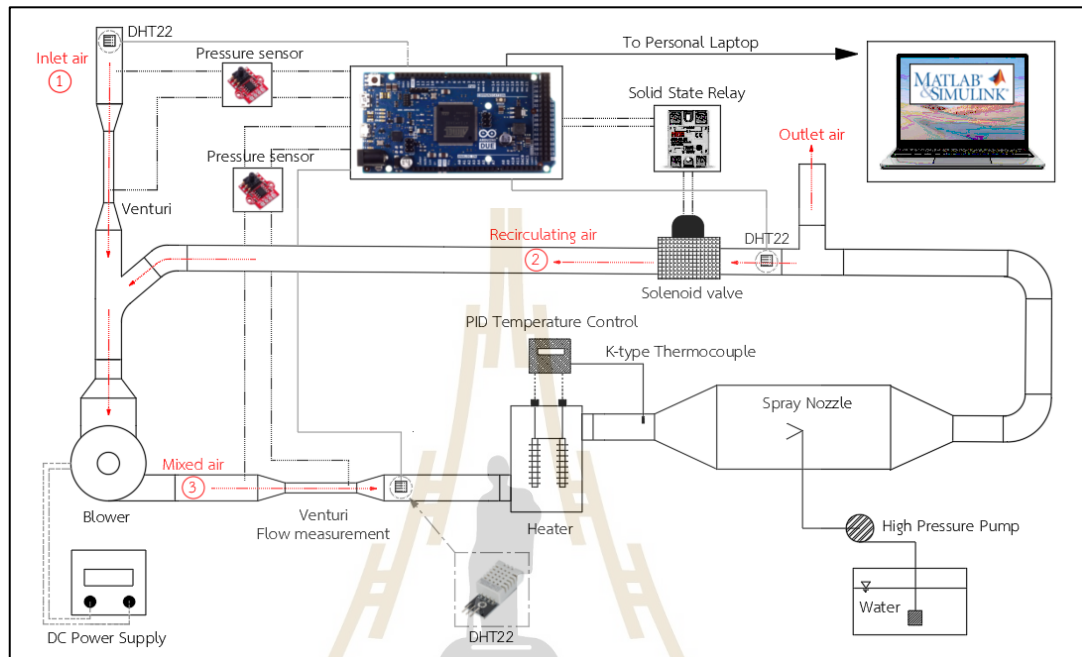
โดยที่	P_{sv}	คือ ความดันไออิ่มตัวของอากาศ (Pa)
	P_v	คือ ความดันไอของอากาศ (Pa)
	T_{db}	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (K)
	C_1	คือ -5800.2206
	C_2	คือ 1.3914993
	C_3	คือ -0.048640239
	C_4	คือ 0.00004.1764768
	C_5	คือ -0.000000014452093
	C_6	คือ 6.5459673
	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)
	ω	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$)
	P_{atm}	คือ ความดันบรรยากาศ (กำหนดให้มีค่าเป็น 101325 Pa)

3.10.3 การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์

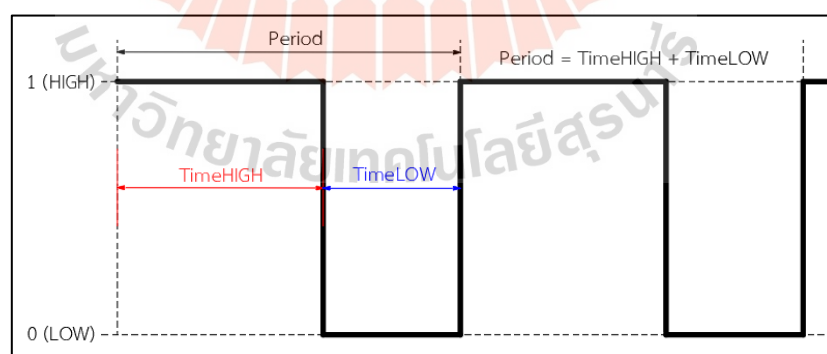
ระบบนี้ใช้วาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ (Solenoid valve) หรือรู้จักกันในนามว่า “โซลินอยด์วาล์ว” สำหรับปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งที่ใช้แล้วให้กลับมาผสมกับอากาศใหม่อีกครั้งในแต่ละรอบการทำงาน แม้ว่าโซลินอยด์วาล์วจะมีพฤติกรรมการทำงานแบบเปิด/ปิด (ON/OFF) แต่งานวิจัยนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากเทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse width modulation, PWM) มาประยุกต์ใช้กับวาล์วลักษณะนี้ โดยมุ่งหวังว่าจะควบคุมการทำงานของวาล์วให้มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับความกว้างของสัญญาณพัลส์เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศขึ้นได้ ในขั้นตอนของการตั้งค่าการทดลอง ผู้วิจัยได้ติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ เข้ากับเครื่องสาธิตการถ่ายเทความร้อนและมวลดังรูปที่ 3.19 ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศในหัวข้อนี้ได้รับการพัฒนาขึ้น 2 รูปแบบ ได้แก่ ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี (อธิบายในหัวข้อ 3.10.3.2) และระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับตามวิธีการของ Ziegler – Nichols (อธิบายในหัวข้อ 3.10.3.3)

การปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse width modulation, PWM) เป็นเทคนิคสำหรับอ่านและเขียนข้อมูลแบบอนาล็อก (Analog signal) ด้วยสัญญาณแบบดิจิทัล

(Digital signal) กล่าวคือ PWM เป็นวิธีการสร้างสัญญาณดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมหรือสัญญาณพัลส์ (Pulse signal) ที่มีคาบเวลาที่ต่อเนื่อง สัญญาณดังกล่าวมีสถานะ 2 รูปแบบ คือสถานะเป็น 1 หรือ HIGH และสถานะเป็น 0 หรือ LOW (Dunn, 2005) แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นด้วยโซลินอยด์วาล์ว



รูปที่ 3.20 ลักษณะของสัญญาณแบบ PWM

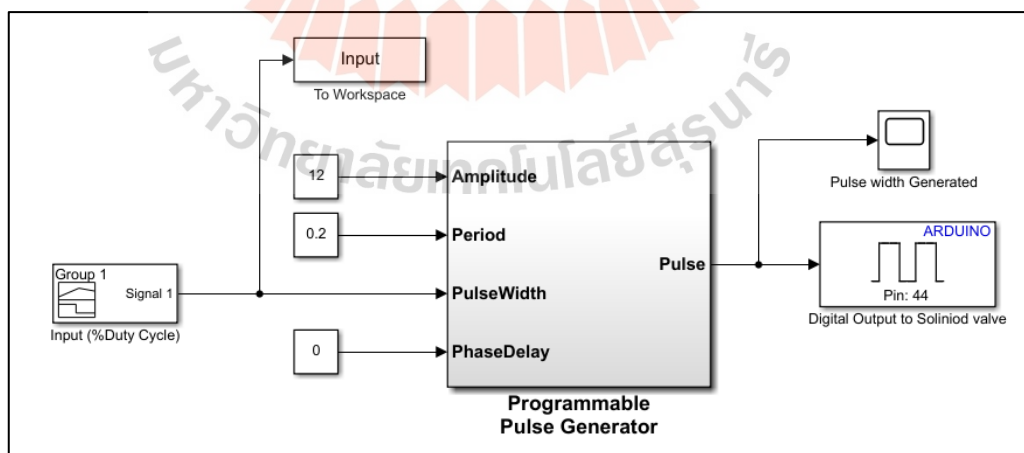
ความแตกต่างของแต่ละสถานะใน 1 คาบเวลา (Period) เมื่อนำมาคิดเปรียบเทียบเป็นร้อยละระหว่าง 2 สถานะนี้ สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของสถานะ HIGH ในแต่ละคาบเวลา นิยามดังกล่าวเรียกว่า วัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.18 (Dunn, 2005)

$$Duty\ cycle = \left(\frac{TimeHIGH}{Period} \right) \times 100 \quad (3.18)$$

โดยที่	Duty cycle	คือ	สัดส่วนของสถานะ HIGH ในแต่ละคาบเวลา (%)
	TimeHIGH	คือ	ความกว้างของสถานะ HIGH (sec)
	TimeLOW	คือ	ความกว้างของสถานะ LOW (sec)
	Period	คือ	คาบเวลา (sec)

3.10.3.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ

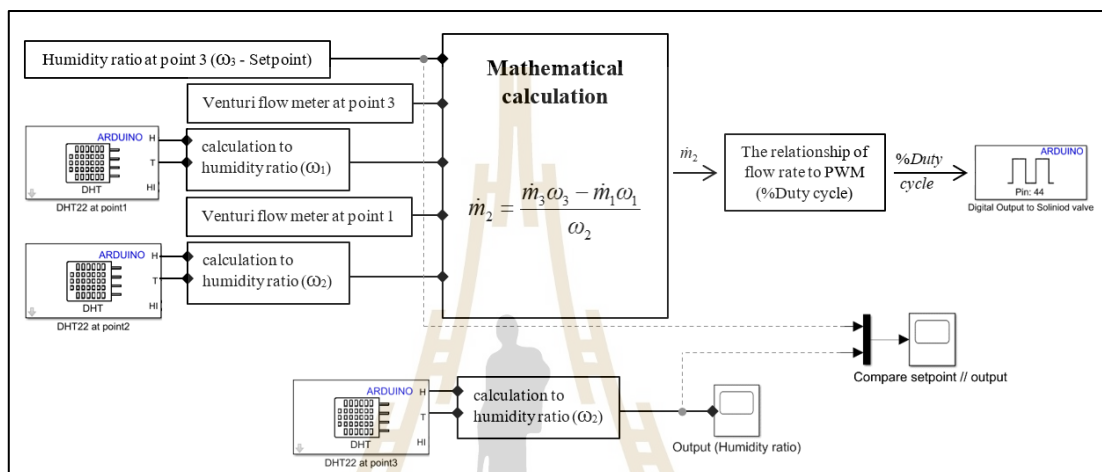
การทดลองในส่วนนี้สนใจศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ โดยกำหนดวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) หรือความกว้างของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเข้า (Input signal) ให้มีค่าเป็น 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ของคาบเวลา (Period) 0.2 วินาที ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลตอบสนองของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเวียนกลับ ณ จุดวัดที่ 2 ของรูป 3.19 ระบบนี้ดำเนินการผ่านเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Programmable pulse generator) บนโปรแกรม MATLAB Simulink ดังรูปที่ 3.21 กำหนดขอบบนของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Amplitude) ที่ค่า 12 V และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศอบแห้งเวียนกลับสามารถประเมินได้โดยประยุกต์ใช้สมมูลมวลของความชื้นในอากาศตามสมการที่ 3.13 ทารด้วยความหนาแน่นของอากาศขณะทำการทดลอง



รูปที่ 3.21 แผนภาพบล็อกสำหรับสั่งการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว

3.10.3.2 การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี

ระบบควบคุมชนิดนี้อาศัยการเก็บข้อมูลจากเครื่องมือวัดตามรูปที่ 3.19 เพื่อใช้ประเมินหาค่าอัตราการไหลของอากาศเวียนกลับที่ต้องการ (ณ จุดที่ 2) ด้วยสมการมวลและสมดุลความชื้นจากสมการที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ แผนภาพการคำนวณค่าอัตราการไหลอากาศอบแห้งเวียนกลับและโปรแกรมควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์วแสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนภาพระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี

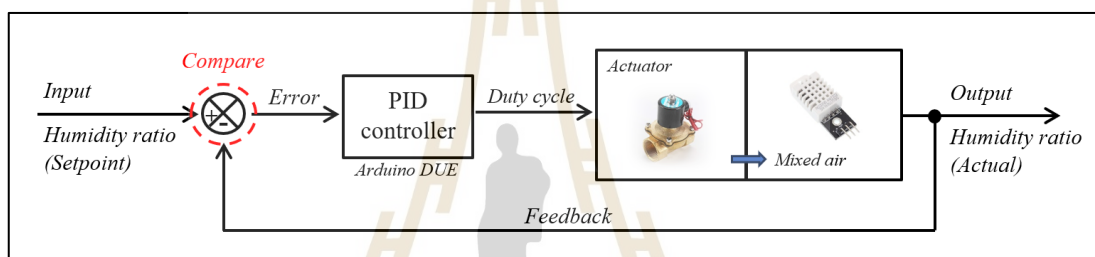
โปรแกรมควบคุมเริ่มต้นจากกำหนดค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศหลังผสมที่ต้องการ (ω_3 - Setpoint) และอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์วัด ณ จุดวัดต่างๆ ได้แก่ DHT22 ณ จุดวัดที่ 1 และ 2 อ่านค่าคุณสมบัติอากาศและประเมินค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศ ตามหัวข้อ 3.10.2 ขณะเดียวกัน ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศซึ่งวัดโดย Venturi flow meter ร่วมกับ DHT22 ที่จุดวัดต่างๆ ถูกใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้ามายังโปรแกรมคำนวณตามหลักการสมดุลความชื้นในอากาศ (สมการที่ 3.12) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลอากาศ ณ จุดที่ 2 อนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับต่อความกว้างของสัญญาณพัลส์ (The relationship of flow rate to PWM) ที่ปรากฏในรูปที่ 3.22 เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ศึกษาในหัวข้อ 3.10.3.1 ใช้เพื่อกำหนดค่า PWM สำหรับเป็นสัญญาณป้อนเข้าสำหรับสั่งการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว นอกจากนี้ เส้นประสีเทาในรูปยังเป็นการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของระบบควบคุมวงเปิดกับค่าเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีการสั่งงานและบักทีคค่าทุก ๆ 0.05 วินาที เพื่อใช้วิเคราะห์ผลต่อไป

3.10.3.3 การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับตามวิธีการของ Ziegler – Nichols

ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นรูปแบบนี้ดำเนินการด้วยระบบควบคุมพีไอดีแบบวงปิด (Closed-loop control) ซึ่งเขียนคำสั่งการทำงานบนโปรแกรม MATLAB Simulink

เข้าสู่ Arduino DUE โดยกำหนดให้ระบบประมวลผล สั่งงาน และบันทึกข้อมูลทุก 0.05 วินาที การนำเข้าสู่สัญญาณจากเซ็นเซอร์มีเพียง 1 จุดเท่านั้น นั่นคือ ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ DHT22 ณ จุดวัดที่ 3 ของรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นอากาศชื้นหลังกระบวนการผสมอากาศ

หลักการดำเนินงานพื้นฐานของระบบนี้ คือ DHT22 ณ จุดวัดที่ 3 ทำหน้าที่อ่านค่าคุณสมบัติอากาศและประเมินค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศ ตามหัวข้อ 3.10.2 โดยที่ค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศที่ประเมินได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนความชื้นอ้างอิงดังรูปที่ 3.23 โดยทั่วไปแล้วระบบที่ดำเนินงานอยู่นั้นมักจะมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปเข้าสู่ตัวควบคุมพีไอดีเพื่อคำนวณค่าชดเชยความคลาดเคลื่อนและสั่งการทำงานของโซลินอยด์วาล์วอย่างสัมพันธ์กับค่าชดเชยส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ระยะอนันต์ตามทฤษฎีควบคุมแบบคลาสสิก



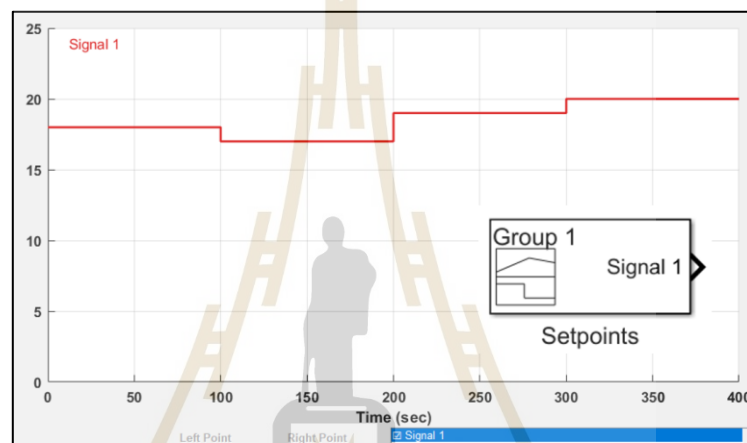
รูปที่ 3.23 แผนภาพระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับ

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการที่สองของ Ziegler – Nichols สำหรับปรับแต่งค่าคงที่ต่าง ๆ ในระบบควบคุมพีไอดี โดยเริ่มต้นจากการทำระบบให้เป็นระบบควบคุมป้อนกลับและตัวควบคุมเริ่มต้นเป็นชนิดสัดส่วนเพียงอย่างเดียว (Proportional Control) ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำการปรับค่าอัตราขยายปริพันธ์และอัตราขยายอนุพันธ์ให้เหลือน้อยที่สุด (มีค่าเป็นศูนย์) จากนั้นจึงเพิ่มค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) จาก 0 จนกระทั่งค่าอัตราขยายสัดส่วนเข้าใกล้ค่าอัตราขยายวิกฤติ (K_{cr}) เมื่อค่า $K_p = K_{cr}$ ค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศที่ประเมินได้ (ผลตอบสนองของระบบ) จะเกิดการกวัดแกว่งแบบสมมูลขอบอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 2.23 คาบเวลาที่วัดได้จากการทดสอบ (P_{cr}) และ ค่าอัตราขยายวิกฤติ (K_{cr}) ถูกใช้ในการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.6 โดยที่ตัวควบคุม PI, PID - classic และ PID - no overshoot ซึ่งไร้การปรับแต่งเพิ่มเติมได้รับการทดลองและศึกษาผลตอบสนองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.10.3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์

การทดลองในหัวข้อ 3.10.3.2 และ 3.10.3.3 ได้รับการทดสอบระบบโดยกำหนดสัญญาณอ้างอิง (Setpoint) แบบขั้นบันไดดังรูปที่ 3.24 ค่าอัตราส่วนความชื้นอ้างอิงที่กำหนดประกอบด้วย 18, 17, 19 และ 20 g_w/kg_{da} ซึ่งแต่ช่วงของค่าอ้างอิงถูกกำหนดเป็น 100 วินาที เพื่อติดตามผลตอบสนองของระบบและมีระยะเวลาเพียงพอที่ผลตอบสนองของระบบจะเข้าสู่ค่าอ้างอิง

สมรรถนะของระบบควบคุมในแต่ละวิธีได้รับการประเมินโดยตัวแปรต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7.4.1 และ 3.6 ประกอบด้วย 1. ความชันกราฟ (Slop) ซึ่งวิเคราะห์ในช่วงเริ่มต้นของการตอบสนอง โดยประมาณบนช่วงของความเป็นเชิงเส้น 2. เวลาสู่สมดุล (Setting time, T_s) เป็นระยะเวลาที่ระบบเริ่มตอบสนองจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวของค่าสุดท้ายที่ 2% ของค่าผิดพลาด 3. เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot, %OS) และ 4. ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ใช้ในการวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างค่าตอบสนองของกระบวนการ (ω_{output}) กับค่าตอบสนองที่สภาวะคงตัว (ω_{ss}) ซึ่งใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองหลังจากที่ผ่านเวลาสู่สมดุล



รูปที่ 3.24 อัตราส่วนความชันอ้างอิงแบบขั้นบันได

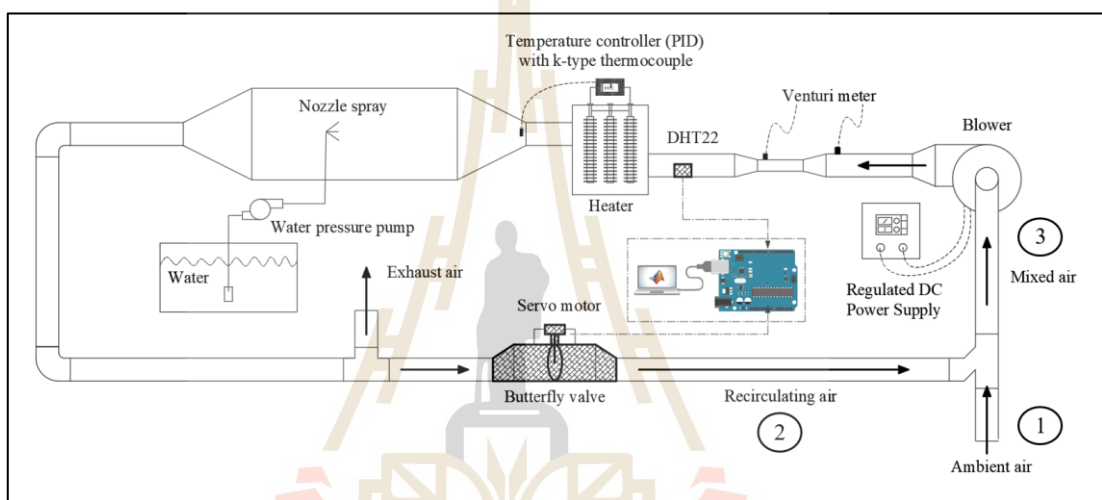


รูปที่ 3.25 วาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์

3.10.4 การพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ

ระบบนี้ใช้วาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) สำหรับปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งที่ใช้แล้วให้กลับมาผสมกับอากาศใหม่อีกครั้งในแต่ละรอบการทำงาน โดยมีเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น MG90S ทำหน้าที่การขับเคลื่อนลิ้นปีกผีเสื้อของวาล์วดังรูปที่ 3.25

ระบบที่พัฒนาในหัวข้อนี้มีการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คล้ายคลึงกับระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับจากโซลินอยด์วาล์วในหัวข้อ 3.10.3.3 แตกต่างกันที่ระบบนี้ใช้วาล์วดังรูปที่ 3.25 ไปแทนที่โซลินอยด์วาล์ว จุดติดตั้งวาล์วและเซ็นเซอร์แสดงดังรูปที่ 3.26



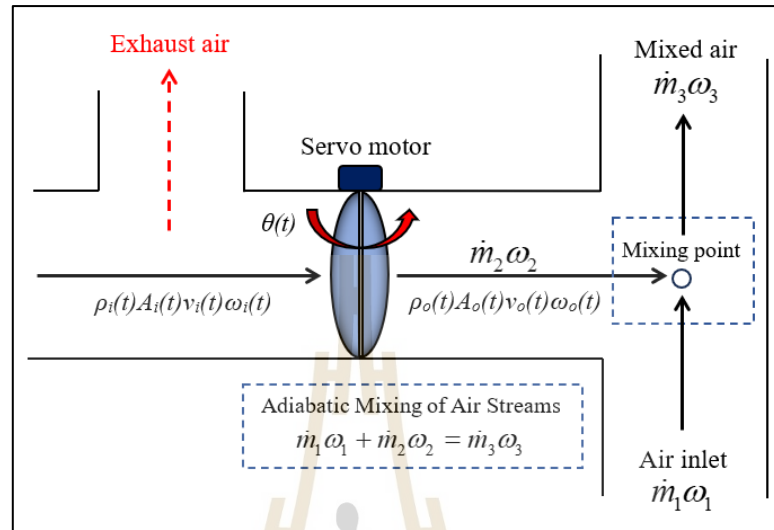
รูปที่ 3.26 การติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับพัฒนาระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นด้วยวาล์วปีกผีเสื้อ

3.10.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ

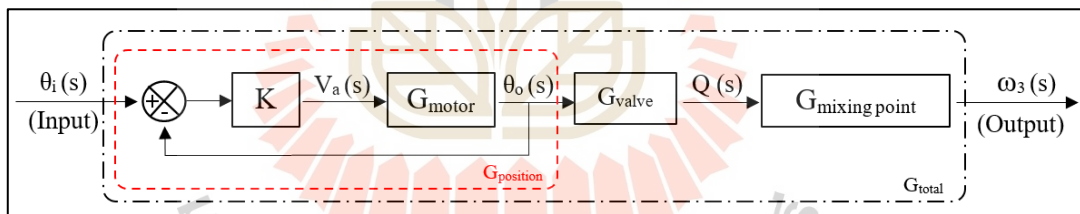
การทำงานของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วชนิดปีกผีเสื้อแสดงดังรูปที่ 3.27 อัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับถูกปรับสัดส่วนด้วยวาล์วปีกผีเสื้อซึ่งทำงานร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงและเข้าสู่ห้องผสมอากาศตามกระบวนการผสมอากาศแบบอะเดียแบติก (Adiabatic mixing of two air streams)

การทดลองนี้กำหนดให้สัญญาณขาเข้าเป็นเปอร์เซ็นต์ในการเปิดปิดวาล์วซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100% สัมพันธ์กับการหมุนเปิดวาล์วที่ 0 ถึง 90 องศา ส่วนสัญญาณขาออกกำหนดเป็นค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศหลังกระบวนการผสม การทำงานของระบบดังกล่าวแสดงด้วยแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 3.28 งานวิจัยนี้แบ่งการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ 1. แบบจำลองของระบบควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (G_{position}) 2. แบบจำลองถ่ายโอนอัตราการไหลของอากาศอบแห้งที่เปลี่ยนไปจากการหมุนปรับวาล์ว (G_{valve}) และ 3. แบบจำลองของห้องผสมอากาศระหว่างอากาศอบแห้งซึ่งถูกปรับสัดส่วนกับอากาศ

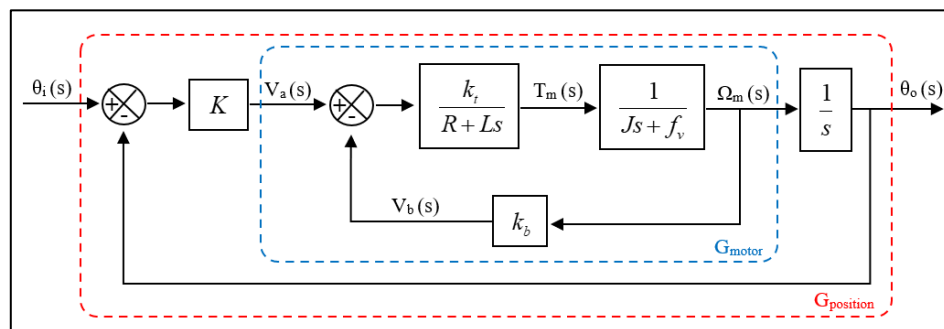
แวลวล้อมที่เข้าสู่เครื่องอบแห้ง โดยแต่ละส่วนถูกนำมารวมเป็นรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนรวมของระบบ (G_{total}) เพื่อใช้ระบุเอกลักษณ์ของระบบและออกแบบตัวควบคุมซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป



รูปที่ 3.27 การทำงานของวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ



รูปที่ 3.28 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ



รูปที่ 3.29 แผนภาพของระบบควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง

พิจารณาระบบควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ตามรูปที่ 3.29 การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงทำได้โดยการปรับค่าแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจรรอาร์เมเจอร์ (Armature controlled) เมื่อประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's Law) และกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) จะได้ความสัมพันธ์ของระบบเป็นไปตามสมการที่ 3.19 และสมการที่ 3.20 เมื่อนำสมการทั้งสองมาแปลงลาปลาซและกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์ จะได้ผลดังสมการที่ 3.21 และสมการที่ 3.22

$$T_m(t) = k_t I_a(t) = J \frac{d\Omega_m(t)}{dt} + f_v \Omega_m(t) \quad (3.19)$$

$$V_a(t) = R_a I_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + V_b(t) = R_a I_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + k_b \Omega_m(t) \quad (3.20)$$

$$K_t I_a(s) = Js \Omega_m(s) + f_v \Omega_m(s) \quad (3.21)$$

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + k_b \Omega_m(s) \quad (3.22)$$

จัดพจน์สมการที่ 3.20 และแทนค่า $I_a(s)$ ลงในสมการที่ 3.22 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ดังสมการที่ 3.22 โดยทั่วไปค่าคงที่เวลาทางไฟฟ้ามักจะถูกละเลยในการพิจารณา เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าคงที่ทางกล ดังนั้นจึงสามารถลดรูปสมการที่ 3.23 ได้เป็นสมการที่ 3.24 ฟังก์ชันถ่ายโอนจากการจ่ายแรงดันแก่มอเตอร์เพื่อหมุนเป็นมุมมองศาใด ๆ หาได้จากสมการที่ 3.25 และสมการที่ 3.26

$$G_{motor}(s) = \frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t}{(L_a s + R_a)(Js + f_v) + k_t k_b} \quad (3.23)$$

$$G_{motor}(s) = \frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t}{R_a (Js + f_v) + k_t k_b} \quad (3.24)$$

$$G_{position}(s) = \frac{\theta_o(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{s} \left[\frac{k_t}{R_a(Js + f_v) + k_t k_b} \right] \quad (3.25)$$

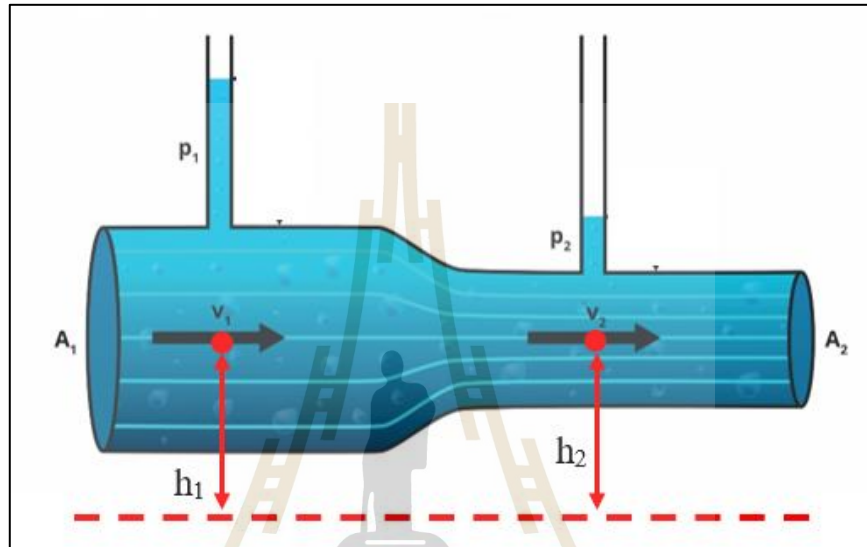
$$G_{position}(s) = \frac{\theta_o(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t / (R_a f_v + k_t k_b)}{s(\tau s + 1)} = \frac{K_T}{\tau s^2 + s} \quad (3.26)$$

เมื่อนำระบบสมการเหล่านี้มาวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับระบบควบคุมตำแหน่งการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ตามรูปที่ 3.29 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนจากการยุบบล็อกเป็นไปตามสมการที่ 3.27

$$G_{position}(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{KK_T}{\tau s^2 + s + KK_T} \quad (3.27)$$

โดยที่	T_m	คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N-m)
	Ω_m	คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)
	I_a	คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
	V_a	คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่จอร์อาร์เมเจอร์ (V)
	L_a	คือ ความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ (H)
	R_a	คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)
	k_t, K_t	คือ ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (N-m/A)
	J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (kg-m^2)
	f_v	คือ ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานหนืด (N-m-s/rad)
	k_b, K_b	คือ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (V-s/rad)
	K	คือ อัตราขยายของระบบควบคุมตำแหน่งมอเตอร์
	θ_i	คือ ตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิง (rad)
	θ_o	คือ ตำแหน่งเชิงมุมที่สังเกตได้ (rad)
	K_T	คือ ค่าคงที่สำหรับรวมพจน์ตัวแปร โดยที่ $K_T = k_t / (R_a f_v + k_t k_b)$
	τ	คือ ค่าคงที่เวลา โดยที่ $\tau = R_a J / (R_a f_v + k_t k_b)$
	s	คือ ฟังก์ชันเชิงซ้อน
	G_{motor}	คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์
	$G_{position}$	คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์

พิจารณาสมการที่ 3.26 เมื่อป้อนสัญญาณไฟฟ้า (V_a) แก่มอเตอร์ ส่งผลให้มอเตอร์เกิดการหมุนซึ่งขับเคลื่อนวาล์วปีกผีเสื้อให้หมุนเป็นมุมองศาต่าง ๆ (θ_o) การทำงานเช่นนี้ทำให้พื้นที่หน้าตัดขวางการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลง อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้งเวียนกลับเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ระบบดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากการไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างกันดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การไหลผ่านท่อของของไหล

การเคลื่อนที่ของของไหลตามเส้นทางการไหลจากพื้นที่หน้าตัด A_1 ไปยังพื้นที่หน้าตัด A_2 อธิบายด้วยสมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) ดังสมการที่ 3.28 เมื่อพิจารณาการไหลที่ระดับความสูงเดียวกัน ($h_1 = h_2$) และของไหลเป็นของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) สมการที่ 3.28 จึงถูกลดรูปเป็นสมการที่ 3.29 และ 3.30 ตามลำดับ ทั้งนี้สมการที่ 3.30 ถูกจัดรูปแบบให้ด้านขวาของสมการเป็นความเร็วทางออกของการไหลเนื่องจากผู้วิจัยสนใจพิจารณาการไหลของของไหล ณ ช่องทางออกท่อจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดขวางการไหลเป็นหลัก

$$\rho_1 g_1 h_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 + P_1 = \rho_2 g_2 h_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + P_2 \quad (3.28)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (3.29)$$

$$v_2(t) = \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho} + v_1^2} \quad (3.30)$$

เพื่อพิจารณาการไหลเชิงมวลของของไหลจึงได้ประยุกต์ใช้สมการของความต่อเนื่อง (continuity equation) กับปัญหานี้เมื่อของไหลไหลผ่านวาล์วควบคุม ตามสมการที่ 3.31 จากนั้นจึงทำการแปลงสมการที่ 3.31 ซึ่งอยู่ในโดเมนเวลาด้วยวิธีแปลงลาปลาซ (Laplace transform) ได้เป็นสมการที่ 3.32 เพื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนบน s -domain โดยที่ ค่าคงที่ K_1 เป็นสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อเชิงเส้น (A) กับพื้นที่หน้าตัดต่อจากระยะเชิงมุมของมอเตอร์ (θ) ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของอัตราการไหลของอากาศอบแห้งที่เปลี่ยนไปจากการหมุนปรับวาล์ว (G_{valve}) แสดงได้ดังสมการที่ 3.33

$$q(t) = \rho(t)A(t)v_2(t) \quad (3.31)$$

$$Q(s) = \rho(s)A(s)V_2(s) \quad ; \quad A(s) = K_1\theta(s) \quad (3.32)$$

$$G_{valve}(s) = \frac{Q(s)}{\theta(s)} = \rho(s)V_2(s)K_1 \quad (3.33)$$

โดยที่	q, Q	คือ	การไหลเชิงมวลของของไหล (kg/s)
	ρ	คือ	ความหนาแน่น (kg/m ³)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดขวางการไหล (m ²)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)
	h	คือ	ความสูง (m)
	v, V	คือ	ความเร็วของของไหล (m/s)
	P	คือ	ความดัน (Pa)
	ΔP	คือ	ความดันแตกต่าง (Pa)
	G_{valve}	คือ	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวาล์วควบคุมการไหล

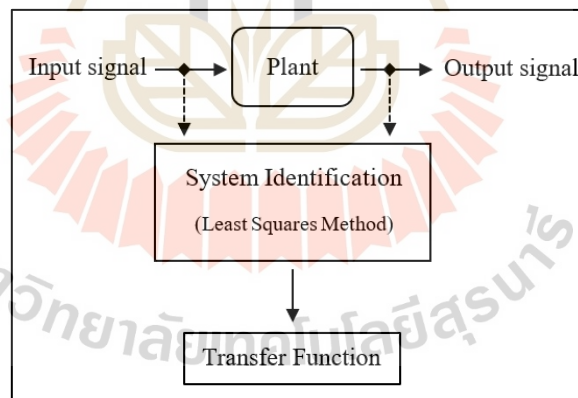
พิจารณาการผสมอากาศเป็นค่าอิสระตามเวลา ($x(t)$) กระบวนการผสมอากาศจึงมีความสัมพันธ์ตาม $K_2 x(t)$ โดยที่ K_2 เป็นสัมประสิทธิ์ของกระบวนการผสมอากาศ ดังนั้นลาปลาซของฟังก์ชันนี้จึงแสดงดังสมการที่ 3.34

$$G_{\text{mixing point}}(s) = \frac{\omega_3(s)}{Q(s)} = K_2 X(s) \quad (3.34)$$

โดยที่ x, X คือ ค่าอิสระตามเวลา
 k_2, K_2 คือ สัมประสิทธิ์ของกระบวนการผสมอากาศ
 ω_3 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังกระบวนการผสม ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$)
 G_{mixing} คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของการผสมอากาศ

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนครบทั้ง 3 ส่วนแล้ว ได้แก่ $G_{\text{position}}(s)$ $G_{\text{valve}}(s)$ และ $G_{\text{mixing point}}$ ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมของระบบ (G_{total}) เกิดจากการยุบบล็อกจากส่วนควบทั้ง 3 ส่วนที่ได้รับรายงานมาก่อนหน้านี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง (Second-order transfer function) ดังสมการที่ 3.35

$$G_{\text{total}}(s) = \frac{\omega_3(s)}{\theta_i(s)} = \frac{KK_T K_1 K_2 \rho(s) V_2(s) X(s)}{\tau s^2 + s + KK_T} \quad (3.35)$$



รูปที่ 3.31 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

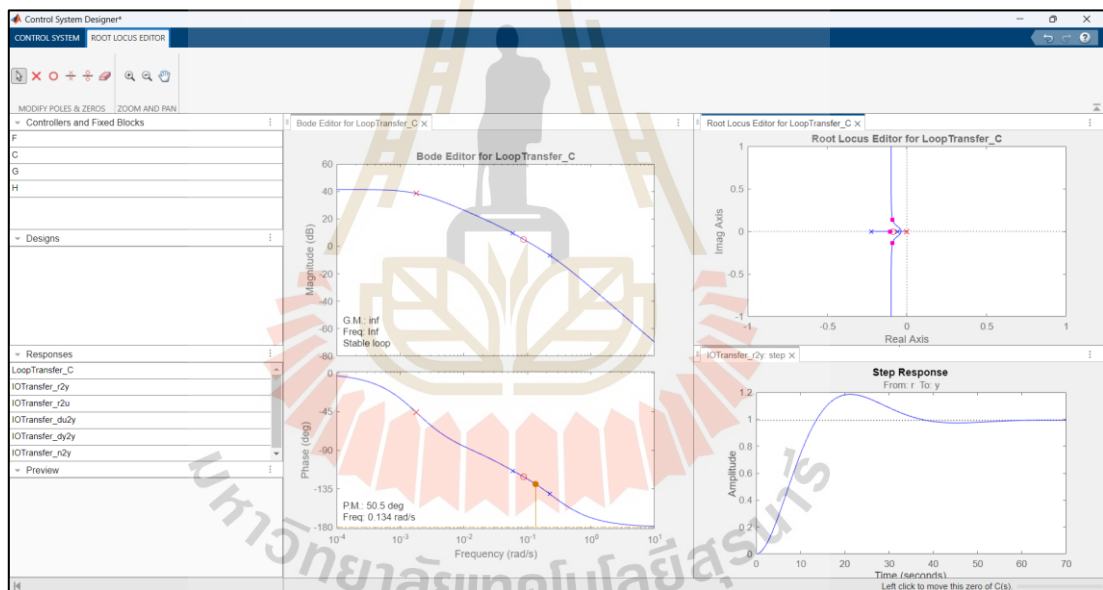
3.10.4.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ

การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไดนามิกโดยใช้ข้อมูลสัญญาณป้อนเข้าและสัญญาณตอบสนองของระบบจากการทดลอง (Ljung, 2010) งานวิจัยนี้เลือกใช้การเก็บข้อมูลแบบวงปิดในโดเมนเวลาสำหรับใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least

squares method) เปรียบเทียบกับรูปแบบทั่วไปของระบบอันดับที่สอง (Second order system) ตามสมการที่ 3.35 สำหรับขั้นตอนในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ สามารถเขียนเป็นแผนภาพอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 3.31

3.10.4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการระบุเอกลักษณ์ของระบบถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม โดยเริ่มจากการตั้งข้อกำหนดการออกแบบ (Design specifications) งานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady-State Errors, E_{ss}) เท่ากับศูนย์ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot, %OS) น้อยกว่า 25% และเวลาสู่สมดุล (Setting time, T_s) ที่ 2% ของความคลาดเคลื่อน ไม่เกิน 60 วินาที ข้อกำหนดเหล่านี้ถูกใช้ในการคำนวณหาจุดออกแบบ (Design point) ตามสมการที่ 3.36 ถึง 3.38 จากนั้นจึงวิเคราะห์ทางเดินรากเพื่อกำหนดค่าอัตราขยายพีและไอ ภายใต้เงื่อนไขของมุม (Angle condition) และเงื่อนไขของขนาด (Magnitude condition) ให้ระบบมีพฤติกรรมเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบ (Ogata, 2010)



รูปที่ 3.32 การปรับเส้นทางเดินรากของระบบ

งานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชัน `sisotool` ของโปรแกรม MATLAB ในการปรับเส้นทางเดินรากของระบบดังรูปที่ 3.32 เมื่อต้องการออกแบบตัวควบคุมพีไอ การปรับเส้นทางเดินรากของระบบจึงจำเป็นต้องเพิ่มโพลและซีโรให้สอดคล้องกับรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอ ตามสมการที่ 3.39 ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการปรับที่หน้าต่าง `Root locus editor` ที่มุมบนขวาของรูปที่ 3.32 และตรวจสอบผลตอบสนองของระบบด้านล่างขวาของรูปเดียวกัน ส่วนด้านซ้ายของรูปเป็นผลเชิงความถี่ซึ่งสามารถใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอได้เช่นเดียวกัน วิธีการใช้งานฟังก์ชัน `sisotool` ผู้เขียนได้แนบไว้ในภาคผนวก ข ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

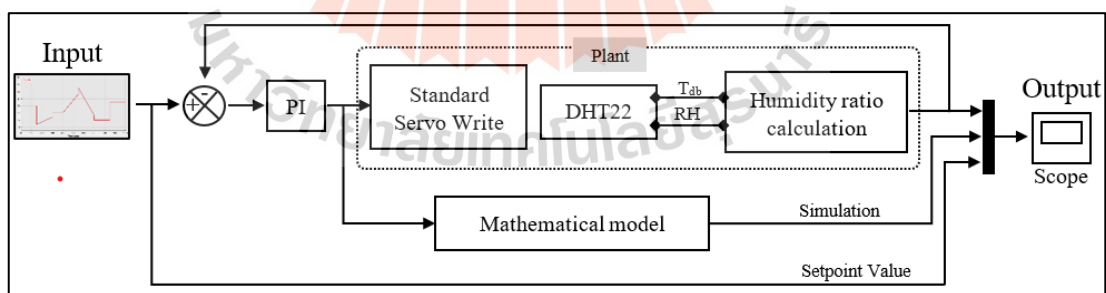
$$\zeta = \frac{\ln^2(\%OS)}{\ln^2(\%OS) + \pi^2} \quad (3.36)$$

$$\omega_n = \frac{4}{T_s \zeta} \quad (3.37)$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (3.38)$$

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p(s + Z_c)}{s} \quad (3.39)$$

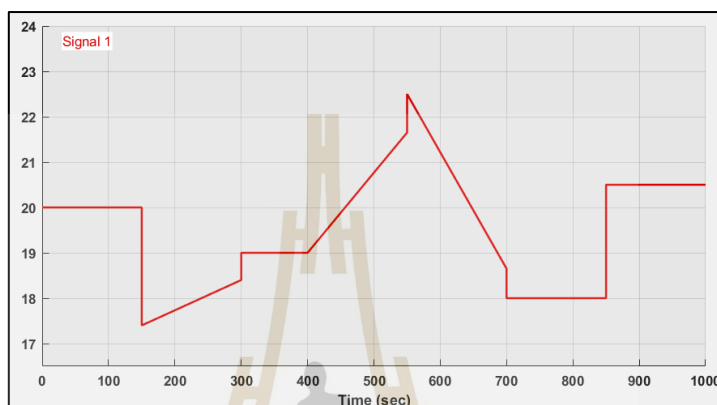
- โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio)
 ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)
 $s_{1,2}$ คือ โพลเด่นที่ใช้เป็นจุดออกแบบ (Design point)
 $G_{PI}(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอ
 k_n คือ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ($n = p, i$)
 Z_c คือ ซีโร่ (zero) โดยที่ $Z_c = k_i/k_p$



รูปที่ 3.33 แผนภาพระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ

เมื่อได้ค่าคงที่ของตัวควบคุม ได้แก่ k_p และ k_i จากการจำลองระบบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว (Simulation) ตัวควบคุมพีไอจึงถูกนำไปติดตั้งกับระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อแบบป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.33 โดยทดสอบด้วยค่าอัตราส่วนความชื้นอ้างอิง 2 รูปแบบ ได้แก่ 1. ค่าอ้างอิงแบบขั้นบันได (Step)

ตามรูปที่ 3.24 เพื่อใช้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศ จากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ในหัวข้อ 3.10.3 และ 2. ค่าอ้างอิงแบบผสม ซึ่งมีทั้งรูปแบบ ขึ้นบันไดและแบบลาดเอียง (Step and ramp) เพื่อสังเกตการทำงานของระบบเมื่อต้องเผชิญ กับสภาวะที่หลากหลาย โดยที่ การทดลองในส่วนนี้ได้ออกแบบตัวแปรอ้างอิง (ω -setpoint) ไว้ในช่วง 17 ถึง 23 g_w/kg_{da} แสดงดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 ค่าอ้างอิงในการทดสอบระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ

3.11 การศึกษาผลของการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำต่อการใช้พลังงาน ในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

การทดลองในส่วนนี้ใช้เครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบสำหรับศึกษาการใช้พลังงาน ของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากหัวข้อ 3.10 ที่ได้รับการคัดเลือก (ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ) ถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งดังรูปที่ 3.3 เพื่อใช้ปรับการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับซึ่งในส่วนนี้ เป็นการทดลองขั้นเบื้องต้นเพื่อดูแนวโน้มของการใช้พลังงานในแต่ละระบบ โดยตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดและค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่งานวิจัยนี้ควบคุมให้คงที่ตลอดการอบแห้ง

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่เวียนอากาศกลับและแบบเวียนอากาศกลับ

ตัวแปร	ระบบแบบไม่เวียนอากาศ	ระบบแบบเวียนอากาศ
ความชื้นข้าวเริ่มต้น	24%w.b.	24%w.b.
ความชื้นข้าวสุดท้าย	14%w.b.	14%w.b.
มวลข้าวเปลือกขึ้นเริ่มต้น	20 kg	20 kg
ความเร็วอากาศอบแห้ง	8.5 m/s	8.5 m/s
อัตราการป้อนข้าวเปลือก	3.3 $kg_{dry-solid}/min$	3.3 $kg_{dry-solid}/min$
การบันทึกข้อมูล	ทุก 15 นาที	ทุก 15 นาที

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยไม่มีลมวนเวียนอากาศกลับ (ปิดวาล์วควบคุมการไหล) และการอบแห้งข้าวเปลือกโดยลมวนเวียนอากาศกลับมาผสมใหม่ (เปิดวาล์วควบคุมการไหล) ทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ 60°C และ 80°C ตามลำดับ ระหว่างกระบวนการอบแห้งผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตัวอย่างข้าว ณ ทางออกของไซโคลน เก็บไว้ในซองปิดผนึกเพื่อตรวจความชื้น และบันทึกค่าที่อ่านจากเซ็นเซอร์ซึ่งติดตั้งบนเครื่องอบแห้ง ทุก 15 นาที เพื่อใช้วิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

3.12 การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่

วิธีอบแห้งข้าวโดยควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ตลอดการทดสอบ (Air temperature controlled drying method, ATC method) เป็นวิธีการที่พบเห็นได้ทั่วไปในงานด้านการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร เนื่องจากการทดลองในหัวข้อ 3.11 บ่งชี้ผลของการลดการใช้พลังงานของระบบที่มีการลมวนเวียนอากาศเวียนกลับได้เพียง 3.38% และยังทำให้อัตราการอบแห้งช้าลงในบางกรณี ส่งผลให้การใช้พลังงานโดยรวมของระบบแทบจะไม่มี ความแตกต่างกันเท่าที่ควร (กล่าวถึงผลการทดลองนี้ในหัวข้อ 4.2) ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงต่อยอดผลการทดลองจากหัวข้อ 3.11 โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศคงที่ 100°C เพิ่มเติมในส่วนหนึ่งของระบบแบบไม่เวียนอากาศกลับ กล่าวคือ ทดลองอบแห้งข้าวที่อุณหภูมิอากาศ 60°C 80°C และ 100°C ตามลำดับ เงื่อนไขตัวแปรควบคุมเป็นไปตามตารางที่ 3.2 โดยทำการทดลอง 3 ชั่วโมงในแต่ละเงื่อนไขทดสอบ ข้อมูลที่ได้มานี้ถูกนำไปประเมินสมรรถนะและคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง ตลอดจนนำไปวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตาม เพื่อหาแนวทางเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งต่อไป

3.13 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามในงานวิจัย

ข้อมูลการทดลองในหัวข้อ 3.12 ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างความสัมพันธ์และผลกระทบของตัวแปรต้นแต่ละตัวที่มีผลต่อตัวแปรตามด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics เพื่อหาแนวทางจัดการกับตัวแปรที่ส่งผลกระทบสูงสุดต่อระบบที่พิจารณาและพัฒนาวิธีควบคุมกระบวนการอบแห้งรูปแบบใหม่ต่อไปในอนาคต สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยจำแนกออกเป็น 3 ส่วนดังหัวข้อต่อไปนี้

3.13.1 การวิเคราะห์ปัจจัยของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก

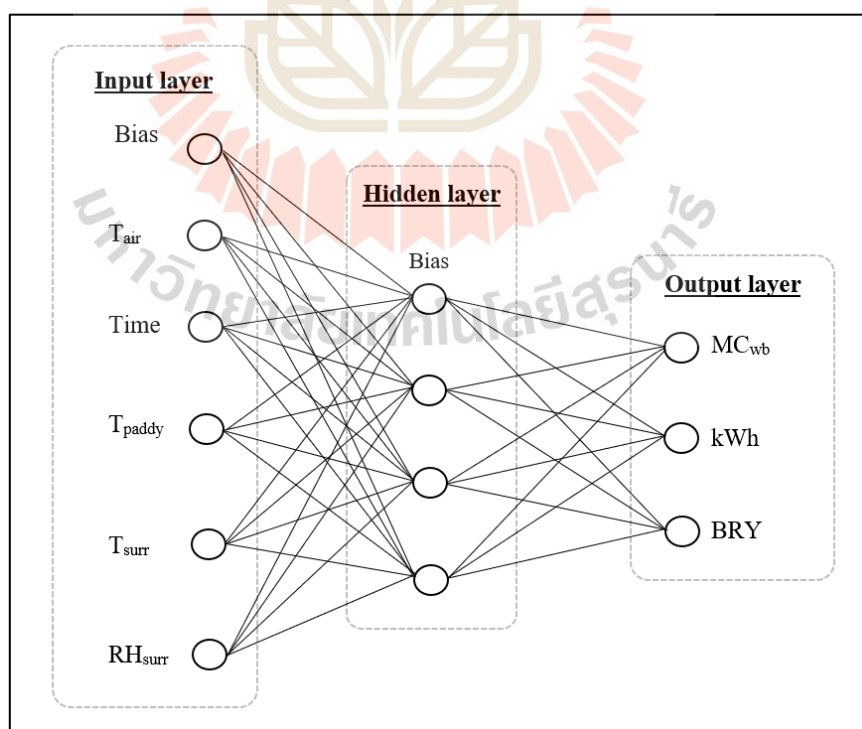
การวิเคราะห์ในส่วนแรกนี้เป็นการนำเอาข้อมูลการทดลองจำนวน 159 ชุดข้อมูล มาวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) เพื่อศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจ (อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, 2564) สกัดปัจจัยด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) หมุนแกนปัจจัยด้วยวิธี Varimax ตัวแปรที่นำมาพิจารณาในส่วนนี้ ประกอบด้วย อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (T_{surr}) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (RH_{surr}) อุณหภูมิข้าวเปลือก (T_{paddy}) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T_{air}) เวลาที่ใช้อบแห้ง (Time) ความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการ (MC_{wb}) การใช้พลังงานในรูปของหน่วยไฟฟ้า (kWh) และร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (BRY)

3.13.2 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ในการศึกษานี้ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้รับการพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม IBM SPSS Statistics ในรูปแบบของ Multi-Layer perceptron จากตัวแปรทั้ง 8 ตัว ที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม แสดงดังตารางที่ 3.3 ข้อมูลการทดลองเหล่านี้ถูกจัดแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอน (Training data) จำนวน 70% ของข้อมูลทั้งหมด และชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Testing data) จำนวน 30% ของข้อมูลทั้งหมด โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ศึกษาเป็นแบบ 1 Hidden layer และ Activation function เป็นแบบ Hyperbolic tangent ดังรูปที่ 3.35 โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ได้รับการประเมินความถูกต้องด้วยค่า R^2 และ RMSE ตามหัวข้อ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

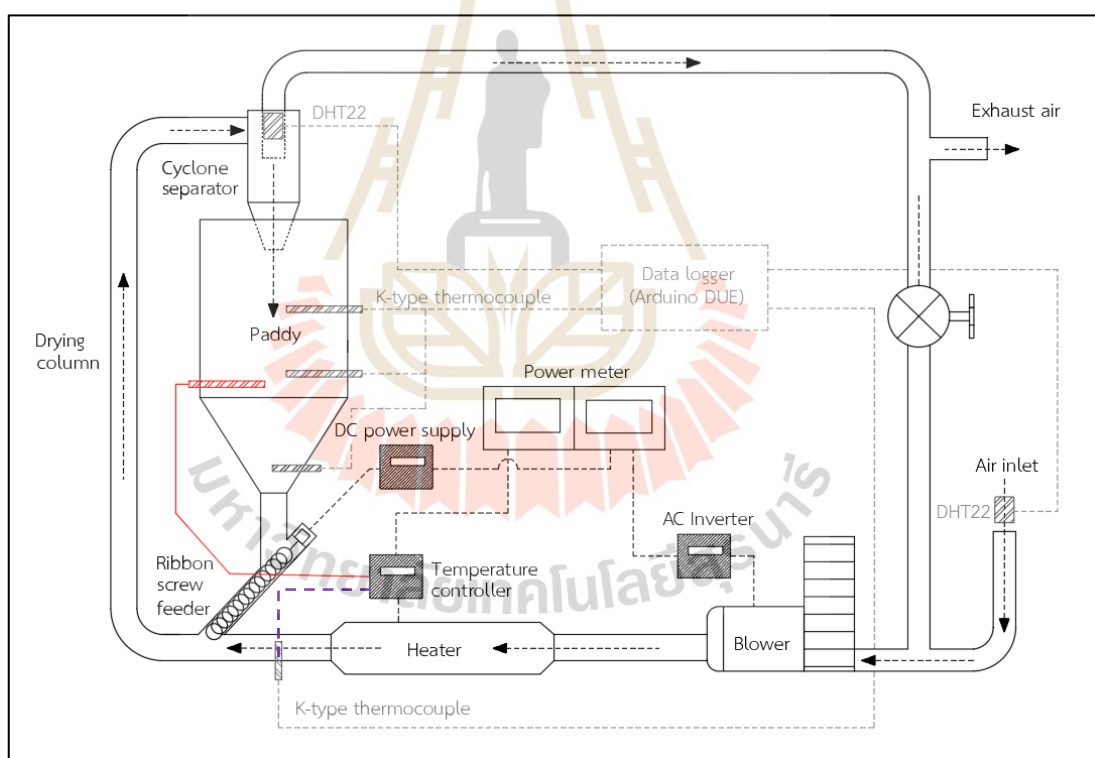
ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม
อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (T_{surr})	ความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการ (MC_{wb})
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (RH_{surr})	การใช้พลังงานในรูปของหน่วยไฟฟ้า (kWh)
อุณหภูมิข้าวเปลือก (T_{paddy})	ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (BRY)
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T_{air})	
เวลาที่ใช้ออบแห้ง (Time)	



รูปที่ 3.35 โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3.13.3 การวิเคราะห์ความไวของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก

IBM (2024) ระบุว่าการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตามในโปรแกรม SPSS ดำเนินการบนพื้นฐานของการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากหัวข้อก่อนหน้ามาวิเคราะห์ความไวจากการแปรผันของตัวแปรต้นแต่ละตัว ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแปรปรวนของตัวแปรอิสระปรากฏในตัวแปรตามที่สนใจศึกษา โดยทั่วไปเป็นการประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ความไวปกติ (Normalized sensitivity coefficient, NSC) บางครั้งอาจอยู่ในรูปของการมีส่วนร่วมสัมพัทธ์ (Relative contribution, RC) ซึ่งเป็นการกระจายความสำคัญของตัวแปรออกตามสัดส่วน (Jamil et al., 2021) ซึ่งงานวิจัยนี้นำเสนอความสำคัญของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตามในรูปแบบของการมีส่วนร่วมสัมพัทธ์ด้วยเช่นกัน เรียกว่า ความสำคัญ (Importance) เพื่อให้สอดคล้องกับผลลัพธ์จากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ศึกษา วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในงานวิจัย ผู้เขียนได้แนบไว้ในภาคผนวก ข ของวิทยานิพนธ์นี้



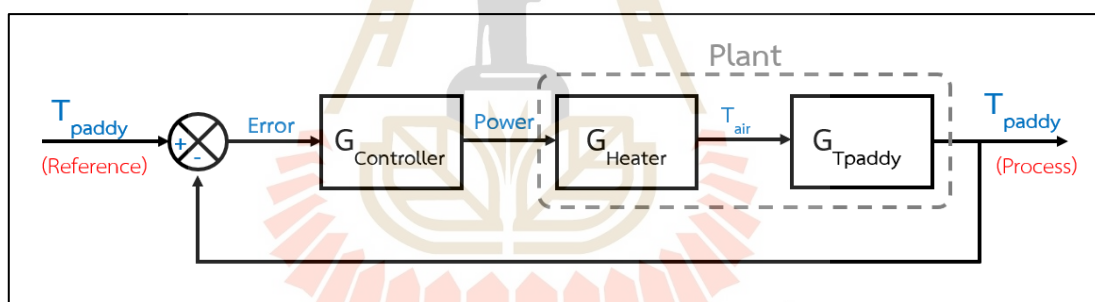
รูปที่ 3.36 แผนภาพเครื่องอบแห้งและการติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิ RKC รุ่น REX-C100

3.14 การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือก

วิธีอบแห้งข้าวโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือก (Paddy temperature controlled drying method, PTC method) เป็นวิธีการอบแห้งรูปแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นต่อจากการอบแห้งโดยควบคุม

อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ในหัวข้อ 3.12 (แบบเดิม) ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ระบบควบคุมในส่วนนี้ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ RKC รุ่น REX-C100 ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่เครื่องทำความร้อน (Heater) โดยเชื่อมต่อเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิข้าวเปลือกเข้ากับถังเก็บข้าวตามรูปที่ 3.36 (เส้นสีแดง) เพื่ออ่านค่าและชดเชยอุณหภูมิข้าวเปลือกภายในถังเก็บ ซึ่งแตกต่างจากระบบแบบเดิมที่รับค่าสัญญาณอุณหภูมิของอากาศร้อน ณ ทางออกของเครื่องทำความร้อนตามรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.36 (เส้นประสีม่วง)

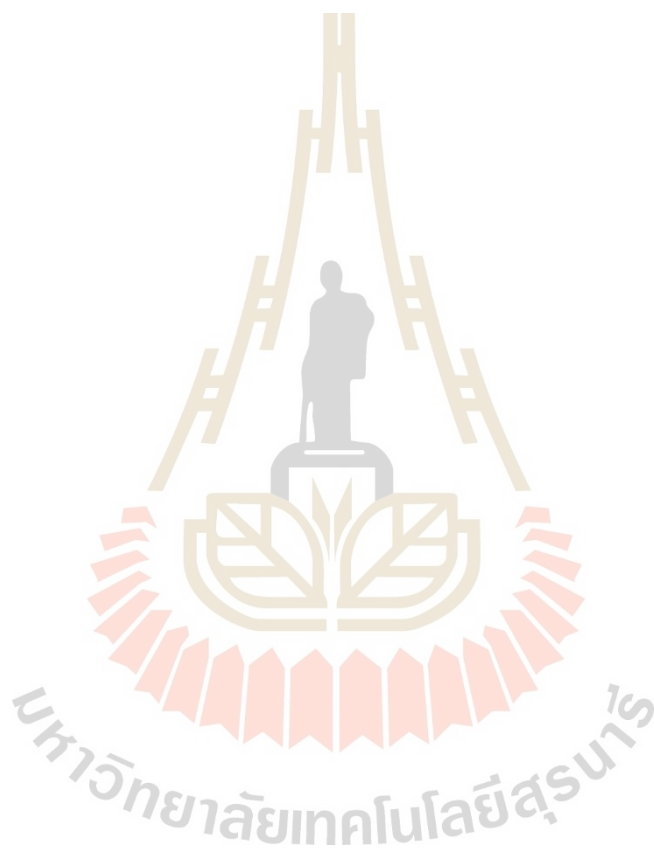
งานวิจัยนี้ใช้วิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์ในการปรับแต่งตัวควบคุม PID โดยเลือกการตอบสนองของอุณหภูมิข้าวเปลือกในเงื่อนไขขอบเขตที่อุณหภูมิอากาศ 60°C จากวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ (หัวข้อ 3.12) มาประมาณค่าตัวแปรเวลาหน่วง (L) และ ค่าคงที่เวลา (T) ตามเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการดังรูปที่ 2.22 ค่าคงที่ k_p , k_i และ k_d พิจารณาได้จากตารางที่ 2.5 ในการทดลองได้ทำการควบคุมค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.2 โดยตั้งค่าอุณหภูมิข้าวเปลือกเป้าหมายที่ 42°C , 45°C และ 48°C ตามลำดับ ในส่วนของระบบบันทึกข้อมูล ผู้วิจัยได้เขียนคำสั่งในการใช้เซ็นเซอร์ต่าง ๆ ดังในภาพที่ 3.36 อ่านและบันทึกค่าผ่าน Arduino DUE ร่วมกับ PLX-DAQ เข้าสู่ Microsoft Excel ทุก 2 วินาที สำหรับการเขียนโปรแกรมและการใช้งานพื้นฐานเหล่านี้ ผู้อ่านสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากภาคผนวกของ อภิสัทธ์ ภัคดีแก้ว (2564)



รูปที่ 3.37 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือก

หลักการการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกอธิบายได้ด้วยแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 3.37 แผนภาพดังกล่าวประกอบด้วย บล็อกของตัวควบคุม ($G_{\text{Controller}}$) บล็อกของระบบอุ่นอากาศ (G_{Heater}) และ บล็อกของอุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บ (G_{Tpaddy}) สำหรับการทดลองในส่วนนี้เป็นการกำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมายของข้าวเปลือกที่ 42°C , 45°C และ 48°C ตามลำดับ ดังนั้นค่าเหล่านี้จึงเป็นค่าอ้างอิง ($T_{\text{paddy}} - \text{reference}$) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ขณะที่ระบบทำงาน เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจะรับค่าสัญญาณอุณหภูมิข้าวเปลือกจากกระบวนการ ($T_{\text{paddy}} - \text{process}$) มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง เพื่อคำนวณหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับระบบ (Error) ซึ่งมีค่าเป็นไปได้ทั้งบวกและลบ หลักจากนั้นระบบจะป้อนสัญญาณความคลาดเคลื่อนไปยังตัวควบคุมพีไอดี เพื่อคำนวณและสั่งจ่ายสัญญาณชดเชยแก่อุปกรณ์อุ่นอากาศ (Heater) ในที่นี้คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้า (Power) ที่ตัวควบคุมสั่งจ่ายให้แก่อุปกรณ์อุ่นอากาศนั่นเอง กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์

จะมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณความร้อนที่ระบบอุ่นอากาศสามารถทำให้แก่อากาศอบแห้งได้ กล่าวคือ หากมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์อุ่นอากาศเป็นจำนวนมาก อากาศอบแห้ง (T_{air}) จะมีแนวโน้มของอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากตัวควบคุมสั่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์อุ่นอากาศน้อย อุณหภูมิของอากาศอบแห้งก็จะมีค่าน้อยตามกันไปด้วย ซึ่งแนวโน้มการทำงานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เกิดขึ้นในการทดลอง เมื่อข้าวเปลือกได้รับความร้อนจากอากาศอบแห้ง ข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิง เนื่องจากระบบควบคุมพีไอดีทำการชดเชยค่าผิดพลาดของกระบวนการตามทฤษฎีควบคุมแบบคลาสสิก



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอผลและการอภิปรายผลการวิจัยในแต่ละส่วนที่ดำเนินการผ่านมาจากบทที่ 3 ประกอบด้วย ผลการพัฒนาระบบควบคุมค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศ ผลของการเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำต่อการประหยัดพลังงานในกระบวนการอบแห้ง ผลการวิเคราะห์หาอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการอบแห้ง และผลของการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการพัฒนา ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้งจากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับด้วยวาล์วควบคุมการไหล

ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้งได้รับการพัฒนาขึ้นจากวาล์วควบคุมชนิดโซลินอยด์และวาล์วควบคุมชนิดปีกผีเสื้อ คุณสมบัติการทำงานจากระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นแต่ละรูปแบบ แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์

ผลการทดลองในส่วนนี้ศึกษาความสามารถในการทำงานของวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ พร้อมทั้งเสนอแนวทางควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้ง 2 แนวทาง ได้แก่ ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี และระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ บทวิเคราะห์การทำงานของระบบ แสดงดังหัวข้อ 4.1.1.1 ถึง 4.1.1.4

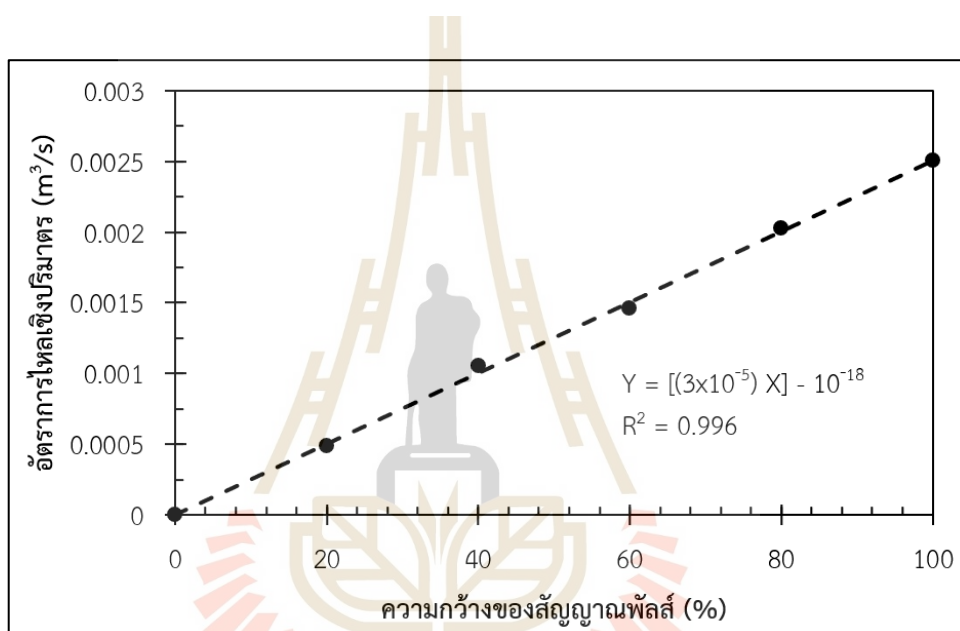
4.1.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่มีผลต่ออัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ

จากการทดลองในหัวข้อ 3.10.3.1 เมื่อกำหนดวัฏจักรการทำงาน (Duty cycle) หรือความกว้างของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณป้อนเข้าสู่ระบบเวียนอากาศ (โซลินอยด์วาล์ว) ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศอบแห้งเวียนกลับที่ตอบสนองออกมาจากสัญญาณป้อนเข้าค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณป้อนเข้าและสัญญาณออก มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังสมการที่ 4.1 ความสัมพันธ์นี้บ่งชี้ถึงปริมาณการเวียนกลับของอากาศ ณ จุดวัดที่ 2 ของเครื่องสาคิตการถ่ายเทความร้อนและมวล ซึ่งแปรผันเป็นเชิงเส้นกับวัฏจักรการทำงานของวาล์ว กล่าวคือ หากระบบได้รับสัญญาณป้อนเข้าสูง ผลลัพธ์ของการตอบสนอง (อัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ) ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ในทางกลับกัน หากระบบได้รับสัญญาณป้อนเข้าต่ำ ผลลัพธ์ของการตอบสนอง (อัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ) จะมีค่า

ต่ำลงด้วยเช่นกัน เป็นไปตามสมการที่ 4.1 ซึ่งความสัมพันธ์นี้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณในส่วนของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี (หัวข้อ 3.10.3.2)

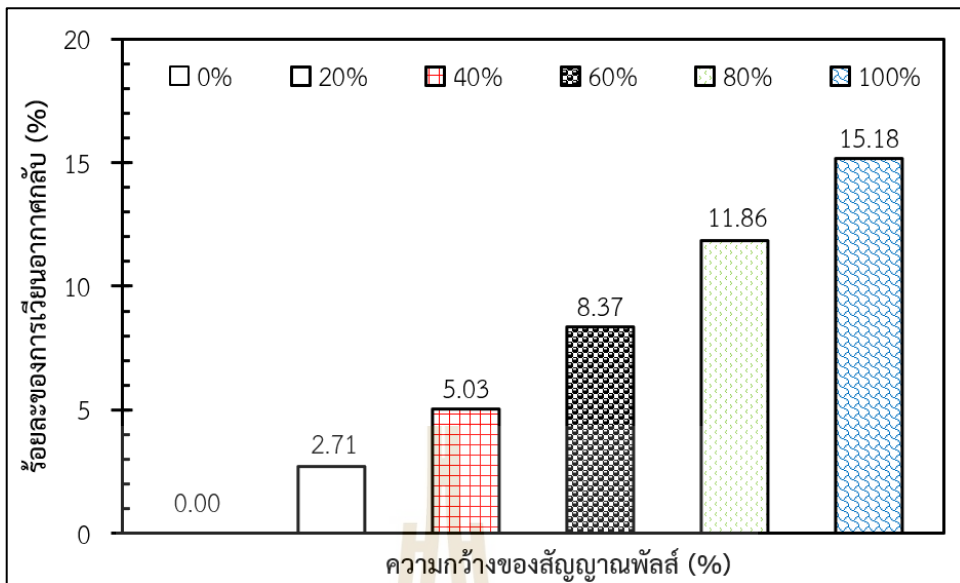
$$Y = [(3 \times 10^{-5}) X] - 10^{-18} \quad (4.1)$$

โดยที่ Y คือ วัฏจักรการทำงาน หรือความกว้างของสัญญาณพัลส์ (%)
X คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศอบแห้งเวียนกลับ (m^3/s)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของสัญญาณพัลส์ผลต่ออัตราการไหลของอากาศเวียนกลับ

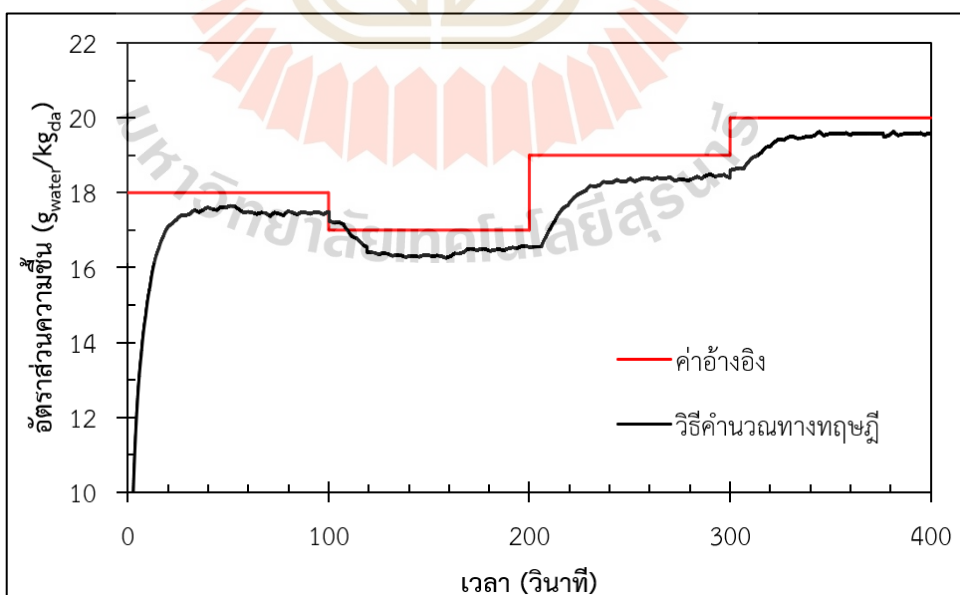
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณของอากาศอบแห้งเวียนกลับต่อปริมาณการไหลเชิงปริมาตรภายในระบบสาธิตการอบแห้ง พบว่า การจ่ายสัญญาณป้อนเข้าที่แตกต่างกันส่งผลให้สัดส่วนการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่เป็นไปตามรูปที่ 4.2 การจ่ายสัญญาณป้อนเข้าตั้งแต่ 0% ถึง 100% ให้สัดส่วนอากาศเวียนกลับอยู่ที่ 0%, 2.71%, 5.03%, 8.37%, 11.86% และ 15.18% ตามลำดับ ในแง่ของการทำงาน ระบบหมุนเวียนอากาศที่พัฒนาขึ้นจากโซลินอยด์วาล์วมีการตอบสนองรวดเร็ว ระบบนี้จึงเหมาะกับระบบที่ต้องการความว่องไวเป็นพิเศษ แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น โซลินอยด์วาล์วจะเกิดความร้อนสะสมบริเวณขดลวดไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในระยะยาวได้ นอกจากนี้ การที่ผู้ควบคุมป้อนสัญญาณสั่งเปิด/ปิดวาล์วจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ ทำให้สนามแม่เหล็กดึงดูดลูกสูบให้เคลื่อนที่เอาชนะแรงของสปริง กระบวนการนี้ส่งเสียงดังเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจไม่เหมาะสมหากนำระบบนี้ไปใช้ในบริเวณที่ต้องการความสงบเงียบ สิ่งเหล่านี้เป็นทั้งข้อได้เปรียบและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากการทดลองในส่วนนี้



รูปที่ 4.2 ร้อยละของการเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ต่อความกว้างของสัญญาณพัลส์

4.1.1.2 ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี

ผลตอบสนองของระบบควบคุมค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี

พิจารณาผลลัพธ์โดยภาพรวม พบว่า วิธีการนี้เกิดความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว ในลักษณะของความคลาดเคลื่อนออฟเซต (Offset error) อันเนื่องมาจากความสูญเสียของระบบ อาทิเช่น ความคลาดเคลื่อนของความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ใช้ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์ วาล์วดังสมการที่ 4.1 และหากพิจารณาในแง่มุมของกลไกการเปิด/ปิดวาล์วด้วยความถี่ของสัญญาณป้อนเข้า พบว่า อิทธิพลนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อากาศเกิดความล่าช้าเนื่องจากอากาศเกิดการเสียรูปแบบการไหลในขณะที่มีการเปิดหรือปิดวาล์ว ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในระหว่างการไหลของอากาศผ่านวาล์วควบคุมเมื่อเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1.1 ที่มีการทดสอบการไหลอากาศด้วยการเปิดวาล์วคงที่ ณ การจ่ายสัญญาณป้อนเข้าใด ๆ

เมื่อตัดข้อมูลมาเฉพาะวินาทีที่ 40 ถึงวินาทีที่ 100 เพื่อคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว (Percent error) มีค่าอยู่ที่ 3.691% ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะมีค่าผิดพลาดจากการประมาณในสถานะคงตัวเกิดขึ้น แต่ค่าผิดพลาดดังกล่าวอาจถูกปรับแก้ด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผู้สนใจสามารถนำเอาหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในระบบที่เกี่ยวข้องต่อไปได้ สำหรับตัวแปรบ่งชี้สมรรถนะของระบบควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี

ตัวแปรสมรรถนะ	อัตราส่วนความชื้นอ้างอิง (g_{water}/kg_{da})			
	18	17	19	20
Slope	0.458	-0.043	0.081	0.049
T_s (s)	21.180	11.860	14.420	16.080
ω_{ss} (g_{water}/kg_{da})	17.490	16.500	18.330	19.490
RMSE	0.533	0.589	0.778	0.489

จากตารางที่ 4.1 สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี มีค่าความชัน (Slope) ของกราฟสูงมากในช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ เนื่องจากระบบต้องการการการหมุนเวียนอากาศสูง เพื่อไปชดเชยส่วนต่างของความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณในแต่ละรอบของการทำงาน จึงทำให้กราฟมีความชันเป็น 0.458 คิดเป็น 5 ถึง 10 เท่า เมื่อเทียบกับการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงในระยะหลัง ๆ ระบบนี้เข้าสู่สมดุล (T_s) ที่เวลา 21.180 วินาที และเมื่อทำงานแปรเปลี่ยนตามค่าอ้างอิงอื่น ระบบยังคงความสามารถในการตอบสนองสู่สมดุลได้ต่ำกว่า 16.08 วินาทีทั้งสิ้น ในส่วนของค่าอัตราส่วนความชื้นในสถานะคงตัวที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงโดยคำนวณเป็น RMSE เท่ากับ 0.533, 0.589, 0.778 และ 0.489 g_{water}/kg_{da} สำหรับการควบคุมอัตราส่วนความชื้นเป็น 18, 17, 19 และ 20 g_{water}/kg_{da} ตามลำดับ

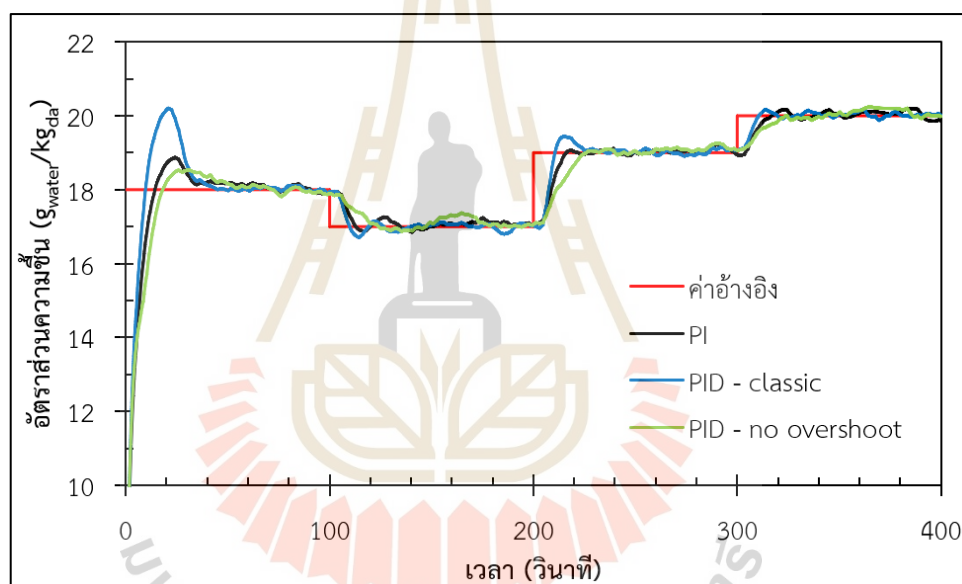
4.1.1.3 ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์

จากการทดลองปรับแต่งค่าอัตราขยายพีไอดีตามวิธีการที่สองของซีเกลอร์-นิโคลส์ พบว่า ค่าอัตราขยายวิกฤติ (k_{cr}) ที่ทำให้ระบบเกิดการกวัดแกว่งแบบสมชอบ มีค่าเท่ากับ

50 หน่วย วัดคาบการแกว่งวิกฤติ (P_{cr}) ได้เป็น 15.61 วินาที ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ จากการนำค่าคงที่ k_{cr} และ P_{cr} ไปคำนวณตามตารางที่ 2.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นของอากาศตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ แสดงดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

ชนิดของตัวควบคุม	k_p	k_i	k_d
PI	22.500	8.429	-
PID – classic	30.000	3.842	0.240
PID – no overshoot	10.000	1.281	0.211



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

พิจารณาผลตอบสนองของระบบควบคุมดังรูปที่ 4.4 พบว่า ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยตัวควบคุมแบบ PID – classic มีการตอบสนองที่มีความว่องไวสูงสุด (ความชันสูงสุด) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมชนิดอื่นในทุก ๆ ค่าอัตราส่วนความชื้นอ้างอิง รองลงมาเป็นตัวควบคุมแบบ PI และช้าที่สุดเป็นตัวควบคุมแบบ PID – no overshoot เนื่องจากค่าอัตราขยายสัดส่วน (k_p) ของตัวควบคุม PID – classic, PI และ PID – no overshoot มีค่าเท่ากับ 30 22.5 และ 10 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามสมการที่ 2.22 จะเห็นได้ว่า พจน์ของสัดส่วน (Term P) เป็นผลคูณระหว่างค่าอัตราขยายสัดส่วนกับค่าผิดพลาดของระบบในแต่ละรอบการทำงาน ($e(t)$) ซึ่งเป็นอิทธิพลหลักที่ส่งผลให้ระบบเกิดความว่องไวสูงมากในช่วงเริ่มต้นและลดลงตามเวลา ซึ่งแปรผันตามค่าผิดพลาดที่ลดลงตามไปด้วย (พิจารณารูปที่ 2.18 ประกอบ) ขณะที่ผลจากพจน์

ปริพันธ์ (Term I) ซึ่งเป็นผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา เมื่อรวมกับพจน์ของสัดส่วน (Term P) จะช่วยเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่จากการใช้พจน์ของสัดส่วนได้ และเนื่องจากพจน์ของปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงปรากฏการตอบสนองของระบบเป็นเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินตามรูปที่ 4.4 หากพิจารณาตัวแปรอัตราขยายของตัวควบคุม PID – classic เทียบกับ PID – no overshoot จะเห็นว่า พจน์ของอนุพันธ์ (Term D) เข้ามามีส่วนช่วยชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบ และช่วยลดขนาดของการพุ่งเกินที่เกิดขึ้นเมื่อระบบต้องดำเนินการบนตัวควบคุม PI จากการทดสอบระบบควบคุม พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุดพบได้จากระบบซึ่งควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ PID - classic รองลงมาคือ ตัวควบคุมแบบ PI และสุดท้ายเป็นตัวควบคุมแบบ PID – no overshoot เมื่อพิจารณาผลตอบสนองในสถานะคงตัว พบว่า ตัวควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ สามารถให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงเป็นอย่างมาก (ค่าความผิดพลาดอยู่ในขอบเขต 2%) สำหรับสมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์

ชนิดของตัวควบคุม	ตัวแปรสมรรถนะ	อัตราส่วนความชื้นอ้างอิง ($g_{\text{water}}/kg_{\text{da}}$)			
		18	17	19	20
PI	Slope	0.780	-0.124	0.174	0.092
	T_s (s)	32.70	9.44	12.39	9.45
	%OS (%)	4.22	0.71	0	0.15
	RMSE	0.137	0.113	0.087	0.112
PID - classic	Slope	0.912	-0.162	0.347	0.144
	T_s (s)	31.19	7.64	18.79	7.20
	%OS (%)	11.69	1.72	2.11	0.76
	RMSE	0.093	0.105	0.088	0.245
PID – no overshoot	$Slope_{\text{int}}$	0.619	-0.040	0.102	0.045
	T_s (sec)	38.82	16.39	19.30	10.99
	%OS (%)	2.91	0.59	0.38	0
	RMSE	0.143	0.159	0.113	0.278

จากตารางที่ 4.3 ตัวควบคุมแบบ PID – Classic ให้ผลตอบสนองไปยังเวลาสู่สมดุล (T_s) ได้รวดเร็วที่สุด ยกเว้นในกรณีที่ค่าอัตราส่วนความชื้นอ้างอิงมีค่าเป็น 19 $g_{\text{water}}/kg_{\text{da}}$ ซึ่งตัวควบคุม PI ให้ผลตอบสนองสู่สมดุลที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมแบบ PID – Classic เนื่องจากความชันกราฟในระยะเริ่มต้น (Slope) ที่มีค่าสูงของตัวควบคุม PID – Classic ทำให้ระบบเกิดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%OS) ที่ 2.11% จึงมีค่าเวลาสู่สมดุลล่าช้าตามไปด้วย แต่ไม่พบการพุ่งเกิน

สำหรับผลตอบสนองของตัวควบคุม PI ในขณะนั้น นอกจากนี้ อิทธิพลของพจน์อนุพันธ์ในตัวควบคุมแบบ PID - Classic กลับช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของผลตอบสนองในช่วงสถานะคงตัวของผลลัพธ์ การควบคุมอัตราส่วนความชื้นตั้งแต่ 17 ถึง 19 $\text{g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$ สังเกตได้จากค่า RMSE มีค่าน้อยมากในช่วงเวลานั้น และ RMSE มีค่าสูงขึ้นเมื่อระบบพยายามควบคุมอัตราส่วนความชื้นที่ 20 $\text{g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$ เมื่อพิจารณาในส่วนของตัวควบคุมแบบ PID – no overshoot พบว่า ตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลลัพธ์ในช่วงสถานะคงตัวไม่แตกต่างจากตัวควบคุมอื่น แต่กลับมีค่าเวลาสู่สมมูลมากกว่าตัวควบคุมแบบอื่นในทุกกรณี และมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมอื่นในการทดลองนี้

ข้อได้เปรียบประการแรกจากวิธีการควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ คือ ผลตอบสนองของระบบในช่วงสถานะคงตัวมีค่าลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายอ้างอิง ทำให้ค่า RMSE ของผลลัพธ์อยู่ในช่วง 0.087 ถึง 0.245 $\text{g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$ ซึ่งต่ำกว่าระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎีอย่างมีนัยสำคัญ ข้อได้เปรียบประการที่สอง คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับเหล่านี้มีการใช้งานเซ็นเซอร์ตรวจวัดข้อมูลน้อยกว่าวิธีคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งมีการใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศและใช้เซ็นเซอร์ DHT22 มากกว่าสองตัวขึ้นไป อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการอบแห้งวัสดุเกษตรในความเป็นจริง การอบแห้งจำเป็นต้องใช้เวลาในการดำเนินการยาวนานหลายชั่วโมงสำหรับการลดความชื้นในวัสดุเกษตรลงสู่ความชื้นที่เหมาะสมในการจัดเก็บ (14%w.b. สำหรับข้าวเปลือก) การพิจารณาผลตอบสนองในช่วงเริ่มต้นจึงมีความจำเป็นน้อยกว่าช่วงของผลตอบสนองในสถานะคงตัว หากวิเคราะห์และประเมินผลตอบสนองจากวิธีการต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอมาก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่า การประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมแบบป้อนกลับกับระบบอบแห้งมีจุดเด่นในด้านการจัดการกับค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัวของสภาวะอากาศอบแห้งที่ระบบต้องการได้ และมีความแม่นยำสูง ดังนั้นจึงเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ระบบนี้ในการหมუნเวียนอากาศกับกระบวนการอบแห้งต่อไปในอนาคต

ผลการทดสอบนี้ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์ที่ใช้งานในระบบหมუნเวียนอากาศ ซึ่งยอมให้อากาศเวียนกลับได้สูงสุดที่ 15.18% ของการไหลอากาศภายในระบบสาริตการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการทดสอบนี้ แม้ว่าในการทดลองจะมีการลดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางออกอากาศจากระบบแล้วก็ตาม แต่ด้วยลักษณะทางกายภาพของโซลินอยด์วาล์วที่มีพื้นที่หน้าตัดปิดกั้นการไหลสูง (ดูได้จากข้อมูลทางเทคนิคของวาล์วในภาคผนวก) ส่งผลให้ของไหลในระบบผ่านไปได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของบอลวาล์วที่ปรับด้วยมือในงานวิจัยของ บุญชริกา ศิลา, อภิสสิทธ์ ภัคตีแก้ว, กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ (2565) การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะหน้าตัดขวางการไหลน้อยจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการขยายผลและเปรียบเทียบถึงข้อดี/ข้อเสียของระบบ ดังนั้น ผลการทดลองในหัวข้อถัดไปจึงเป็นผลของการพัฒนาต่อย่อยระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศแบบป้อนกลับจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานทั้งในแง่ของการเพิ่มปริมาณอากาศเวียนกลับและการใช้งานระบบควบคุมป้อนกลับที่มีเสถียรภาพต่อไป

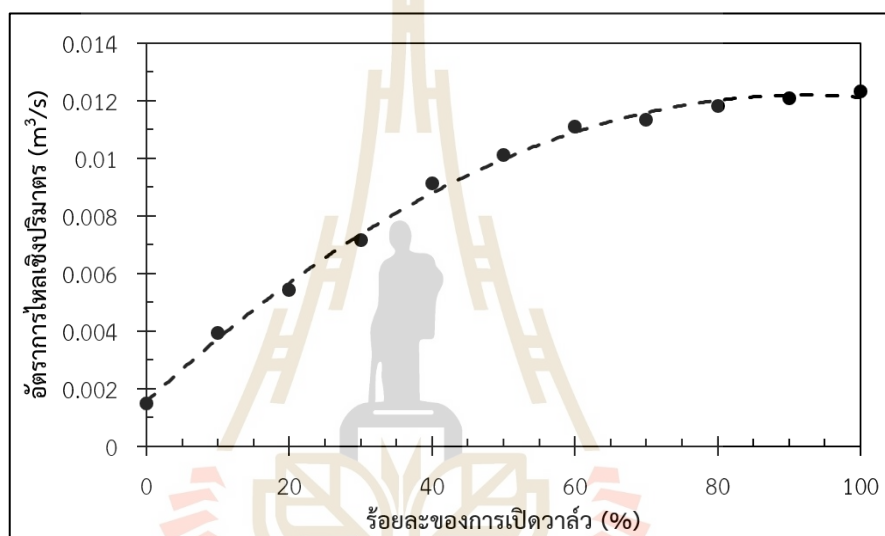
4.1.2 ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ

ผลการทดลองในส่วนนี้ นำเสนอความสามารถในการทำงานของวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบจากวิธีระบุเอกลักษณ์ ผลการออกแบบตัวควบคุม

ฟิโอ สมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบ ตลอดจนเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมอัตราส่วนความชื้นระหว่างระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในส่วนนี้กับระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นจากโซลินอยด์วาล์ว

4.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการเปิดวาล์วต่ออัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ

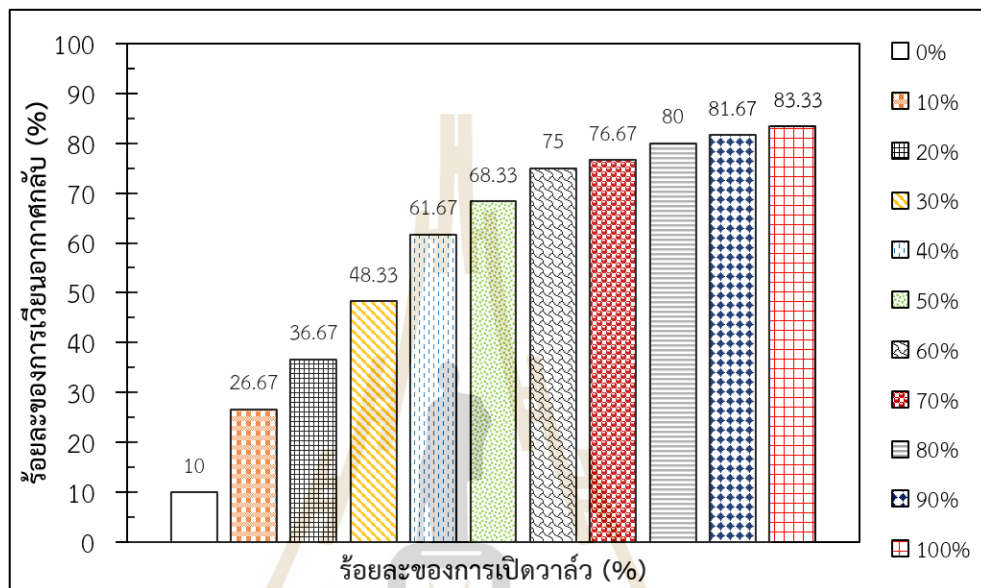
ผลตอบสนองในรูปแบบของอัตราการไหลของอากาศอบแห้งเวียนกลับ เนื่องจากสัญญาณป้อนเข้าใด ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 การไหลเชิงปริมาตรของอากาศเวียนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนคงที่สูงมากในช่วงที่ระบบได้รับสัญญาณป้อนเข้าตั้งแต่ 0% ถึง 60% (วาล์วเปิด 0 ถึง 54 องศา)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการเปิดวาล์วต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศอบแห้งเวียนกลับ

ข้อสังเกตที่พบจากการทดลองนี้ คือ กรณีที่มีการจ่ายสัญญาณป้อนเข้าเป็น 0 (วาล์วปิด) พบว่า มีอากาศบางส่วนเกิดการรั่วไหลเข้ามายังห้องผสมอากาศในอัตรา $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$ พฤติกรรมนี้ส่งผลให้กราฟดังในรูปที่ 4.5 ไม่ได้เริ่มต้นจากค่าศูนย์ ในขณะที่วาล์วปิด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 พบว่า การจ่ายสัญญาณป้อนเข้าตั้งแต่ค่า 0% ถึง 50% ส่งผลให้ระบบมีอัตราการไหลสูงขึ้น ในลักษณะของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ในช่วงของความชื้นเชิงเส้นสูงนี้เกิดการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้งานใหม่ได้สูงถึง 75% แสดงดังในรูปที่ 4.6 อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศอบแห้งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อจ่ายสัญญาณป้อนเข้าเกินกว่า 50% เป็นต้นไป จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศอบแห้งเวียนกลับจากการจ่ายสัญญาณป้อนเข้าตั้งแต่ 60% ถึง 100% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียง 10% ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงของความชื้นเชิงเส้นดังที่ได้รายงานมา อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาภาพรวมของระบบ จะเห็นว่าระบบดังกล่าวมีศักยภาพในการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้งานใหม่ได้สูงที่สุดถึง 83.33%

ที่การจ่ายสัญญาณป้อนเข้าเป็น 100% (วาล์วเปิด 90 องศา) เมื่อเปรียบคุณลักษณะของการเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ระหว่างวาล์วปีกผีเสื้อกับโซลินอยด์วาล์วในหัวข้อ 4.1.1.1 พบว่า วาล์วชนิดปีกผีเสื้อสามารถเพิ่มปริมาณการเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ได้สูงขึ้นจากโซลินอยด์วาล์วถึง 68.15% ผลการทดลองนี้เป็นแนวโน้มที่ดีต่อการสนับสนุนวาล์วปีกผีเสื้อสำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบอบแห้งหรือระบบอื่นที่ต้องการปริมาณการหมุนเวียนอากาศสูงต่อไป



รูปที่ 4.6 ร้อยละของการเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ต่อร้อยละของการเปิดวาล์วปีกผีเสื้อ

4.1.2.2 ผลการระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ

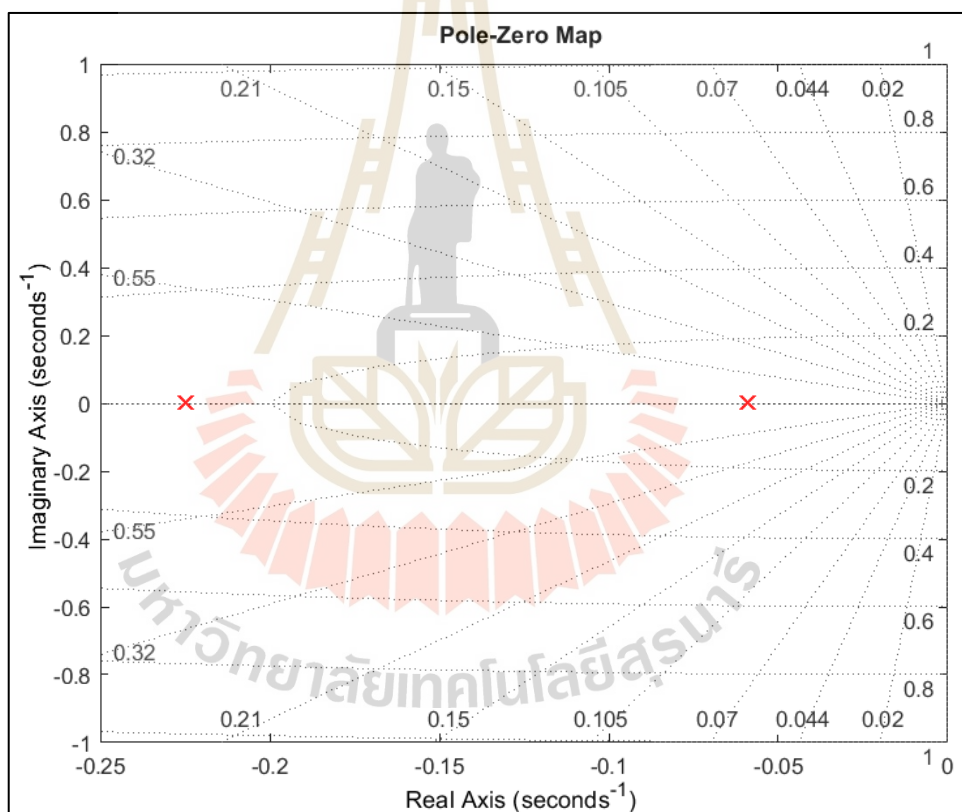
ผลจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบตามหัวข้อ 3.10.4.2 พบว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุดสามารถประมาณค่าตัวแปรที่ปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง (สมการที่ 3.35) ได้ดังสมการที่ 4.2

$$G(s) = \frac{0.002263}{s^2 + 0.2842s + 0.01332} \quad (4.2)$$

ผลการประมาณค่าให้ความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองเป็น 85.51% และมีค่า RMSE เป็น 0.288 แม้ว่าระบบที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลจะมีสี่รอบวนสูง ทำให้แบบจำลองที่ได้มีค่า R^2 อยู่ 0.86 แต่อย่างไรก็ตาม ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 4.2 นี้เป็นผลที่ดีที่สุดจากการทดลองเก็บผลข้อมูลกว่า 10 ครั้ง และผลความแม่นยำของแบบจำลองดังกล่าว

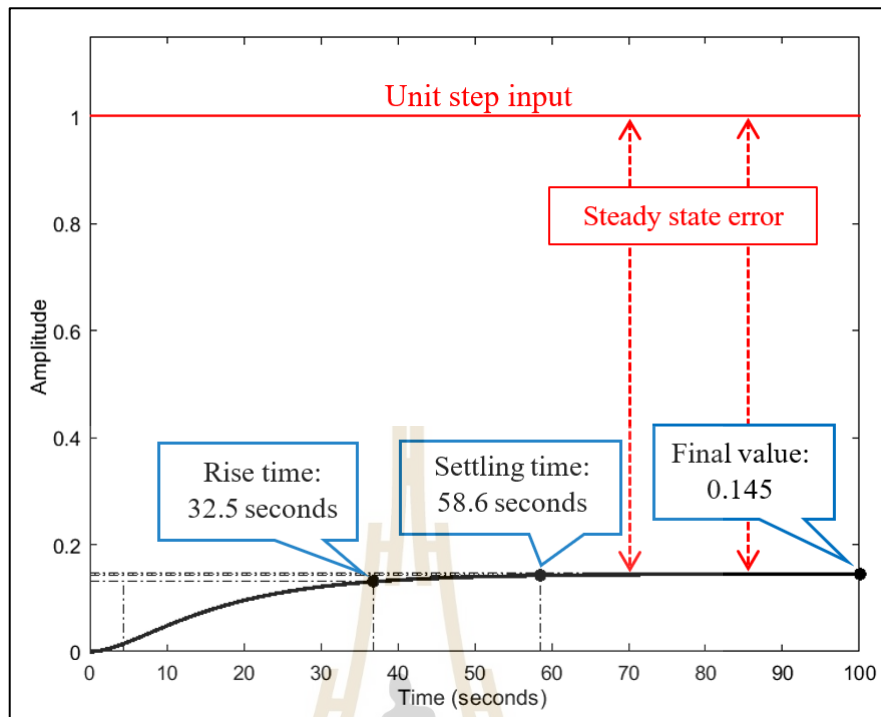
ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ T. Pongam, J. Srisertpol, and V. Khompis (2013) ซึ่งได้มีการระบุเอกลักษณ์ของระบบทางอนุกรมของเตาอบเหล็กเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอในแนวทางเดียวกัน ดังนั้น ความแม่นยำของแบบจำลองนี้จึงเพียงพอต่อการนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอและจำลองแนวโน้มผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อก่อนนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมกับระบบจริงในส่วนนี้ได้

พิจารณาคูณลักษณะของระบบจากสมการที่ 4.2 พบว่า ระบบมีโพล (poles) ซึ่งวางอยู่บนแกนจำนวนจริง 2 ตัว คือ -0.0592 และ -0.225 ดังรูปที่ 4.7 เมื่อทดสอบฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยการจ่ายสัญญาณป้อนเข้าแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย พบว่า ผลตอบสนองชั่วคราวในส่วนของเวลาขึ้น (Rise time) มีค่าเป็น 32.5 วินาที เวลาสู่สมดุลที่ 2% ของความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว (Settling time) มีค่าเป็น 58.6 วินาที และเข้าสู่สถานะคงตัวที่ค่า 0.145 ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แผนภาพโพล-ซีโรของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อ

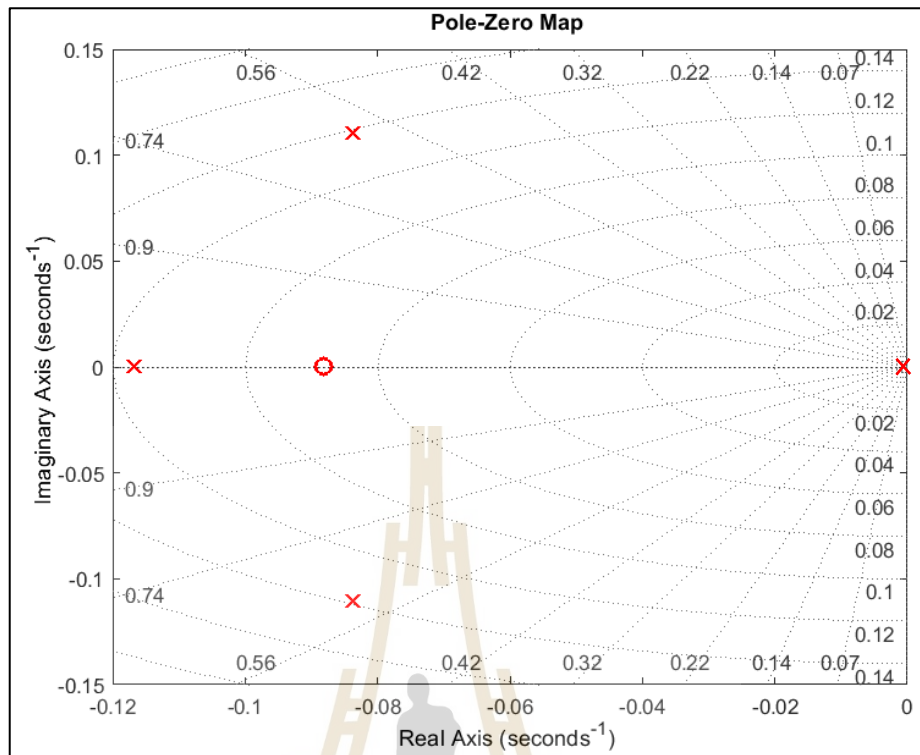
พิจารณาจากรูปที่ 4.8 พบว่า ระบบมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในรูปแบบออฟเซต (Offset error) อันเนื่องมาจากระบบวงเปิดประเภทศูนย์ (Type 0 of open-loop transfer function) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ จึงมีความจำเป็นจะต้องปรับปรุงความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัวให้ลดน้อยที่สุดด้วยตัวควบคุมแบบพีไอตามหัวข้อ 3.10.4.3



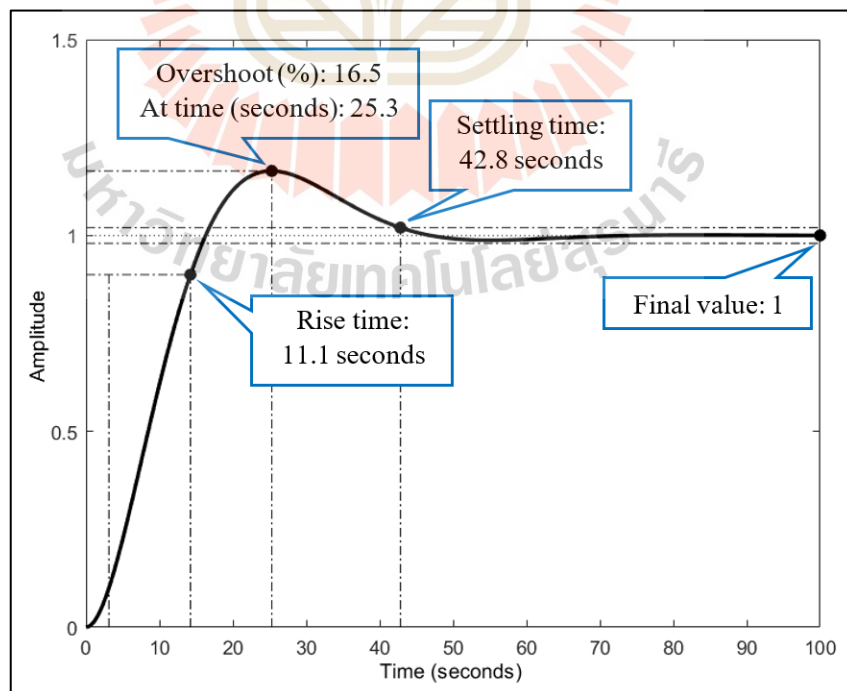
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความถี่ขึ้นอากาศจากควาล์วควบคุมชนิดปีกผีเสื้อต่อฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

4.1.2.3 ผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอ

จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอในหัวข้อที่ 3.10.4.3 ทำให้ได้ค่าอัตราขยายพี (k_p) เท่ากับ 11.22 และ ค่าอัตราขยายไอ (k_i) เท่ากับ 0.9884 ส่งผลให้ระบบมีพฤติกรรมเป็นไปตามเงื่อนไขออกแบบจากสมการที่ 3.38 รายละเอียดโพลและซีโร (Poles and zero) ของระบบ ซึ่งถูกชดเชยโดยตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 การเพิ่มซีโรบนระนาบจำนวนจริงที่ -0.088 แก่ระบบ ส่งผลให้โพลเด่นวางตัวออกจากแกนจินตภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับระบบเดิมในรูปที่ 4.7 โพลเด่นของระบบนี้เป็นโพลสังยุค (Complex conjugate poles) ซึ่งวางตัวบนระนาบ $-0.0837 \pm j 0.11$ ส่งผลให้ระบบตอบสนองเร็วขึ้นและเกิดการสั่นของผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน เท่ากับ 16.5% (ต่ำกว่า 25%) และเวลาสู่สมดุล เท่ากับ 42.8 (ต่ำกว่า 60 วินาที) ดังรูปที่ 4.10 ผลลัพธ์ที่ได้ล้วนเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบที่ต้องการ ดังนั้นค่าอัตราขยายพีไอดังกล่าวจึงถูกนำไปทดสอบและเก็บผลการทดลองกับระบบควบคุมอัตราส่วนความถี่ขึ้นอากาศในลำดับถัดไป ในขั้นตอนการทดสอบผู้วิจัยได้กำหนดค่าเป้าหมายของการควบคุมบางช่วงให้มีการติดตามทั้งขาขึ้นและขาลง ในลักษณะของสัญญาณแบบทางลาด (Ramp signal) ปะปนไปกับสัญญาณแบบขั้นบันได (Step signal) แบบสุ่ม เพื่อศึกษาความสามารถในการติดตามผลการควบคุม เมื่อระบบมีความต้องการค่าอัตราส่วนความถี่ขึ้นแบบไม่คงที่และเป็นการแสดงถึงศักยภาพของการควบคุมที่จะนำไปใช้งานต่อในอนาคต



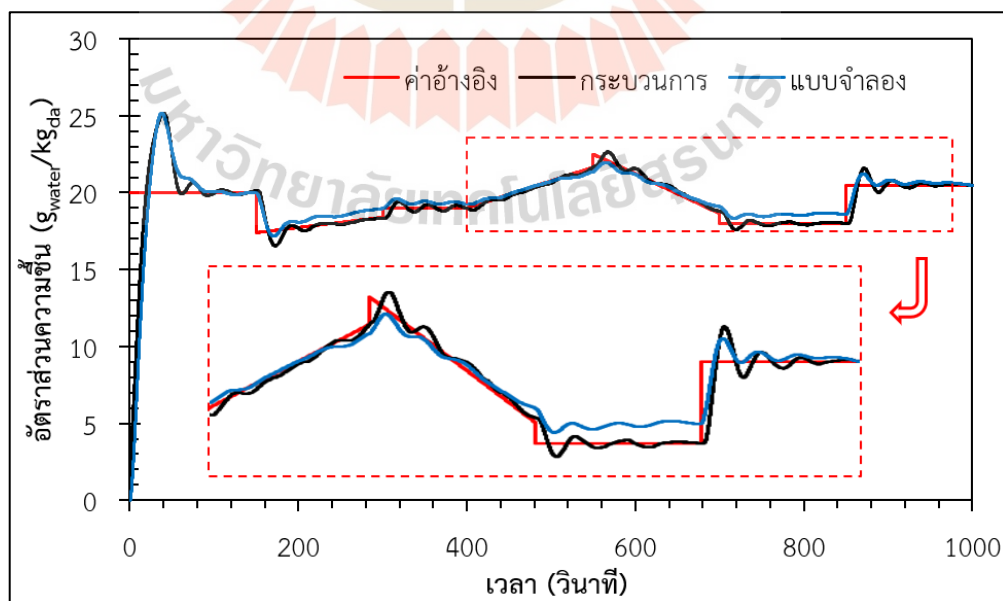
รูปที่ 4.9 แผนภาพโพล-ซีโรของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศซึ่งชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.10 การจำลองผลตอบสนองของระบบต่อฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยด้วยตัวควบคุมพีไอ

4.1.2.4 สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ

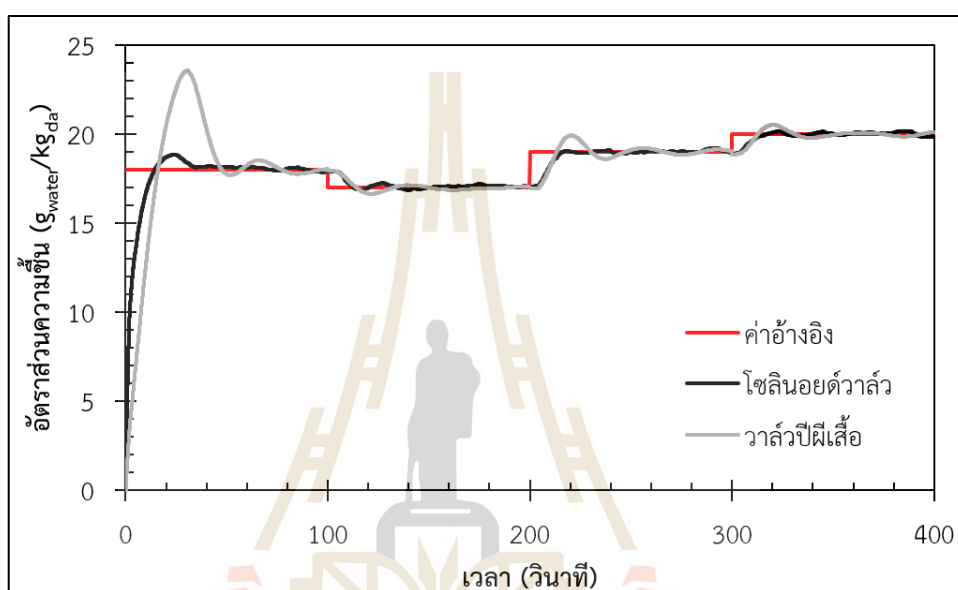
รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของระบบจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยที่ กระบวนการ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศภายหลังการผสมแล้วจากการทดลองจริง และแบบจำลอง คือ ผลตอบสนองจากแบบจำลองตามสมการที่ 4.1 ซึ่งได้รับสัญญาณชดเชยจากตัวควบคุมพีไอ พิจารณาผลตอบสนองของระบบจากการชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอตามรูปที่ 4.11 พบว่า ความถูกต้องในการอธิบายข้อมูลจากแบบจำลองด้วยการระบุเอกลักษณ์ที่มีค่าสูงถึง 85.51% ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริง แม้ว่าในบางช่วงจะเกิดความคลาดเคลื่อนจากการทำนายผลที่แบบจำลองไม่สามารถอธิบายได้ครบถ้วน ทำให้เกิดผลต่างระหว่างค่าจากกระบวนการและแบบจำลองขึ้นดังภาพขยาย อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลของระบบในภาพรวม จะเห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบมาสามารถทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีค่าเป็น 25% และเวลาสู่สมดุลมีค่าเป็น 52 วินาที ซึ่งผลตอบสนองของกระบวนการมีพฤติกรรมลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงในเวลาถัดมา เมื่อค่าอ้างอิงเกิดการเปลี่ยนแปลงในระยะหลัง ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินลดน้อยลงจากช่วงแรกที่ระบบเริ่มทำงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ จากการประเมินตัวแปรสมรรถนะของระบบควบคุม พบว่า เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินในระยะหลัง มีค่าต่ำกว่า 3.512% ทุกกรณี (เมื่อมีการปรับแก้ค่าอ้างอิง) นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบมีการใช้เวลาสู่สมดุลต่ำกว่า 20 วินาที ในทุกกรณีด้วยเช่นกัน จากที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอมีศักยภาพอย่างมากในการปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว โดยระบบควบคุมนี้สามารถติดตามสัญญาณเป้าหมายและชดเชยความคลาดเคลื่อนทำให้ค่าผิดพลาดของระบบมีเข้าใกล้ค่า 0 ในท้ายที่สุด



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศด้วยตัวควบคุมพีไอ

4.1.3 ผลเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์และชนิดปีกผีเสื้อ

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์และชนิดปีกผีเสื้อ ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากวาล์วปีกผีเสื้อเพิ่มเติมโดยใช้ค่าอ้างอิงเดียวกับการทดสอบระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากโซลินอยด์วาล์ว ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากโซลินอยด์วาล์วและวาล์วปีกผีเสื้อ

ตารางที่ 4.4 สมรรถนะของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วควบคุมการไหลแต่ละชนิด

ระบบควบคุม อัตราส่วนความชื้น	ค่าอ้างอิง (g _{water} /kg _{da})	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%)	เวลาสู่สมดุล (s)
โซลินอยด์วาล์ว	18	4.22	32.70
วาล์วปีกผีเสื้อ	18	23.65	45.68
โซลินอยด์วาล์ว	17	0.71	9.44
วาล์วปีกผีเสื้อ	17	2.07	10.80
โซลินอยด์วาล์ว	19	0	12.39
วาล์วปีกผีเสื้อ	19	4.76	27.25
โซลินอยด์วาล์ว	20	0.15	9.45
วาล์วปีกผีเสื้อ	20	2.60	24.30

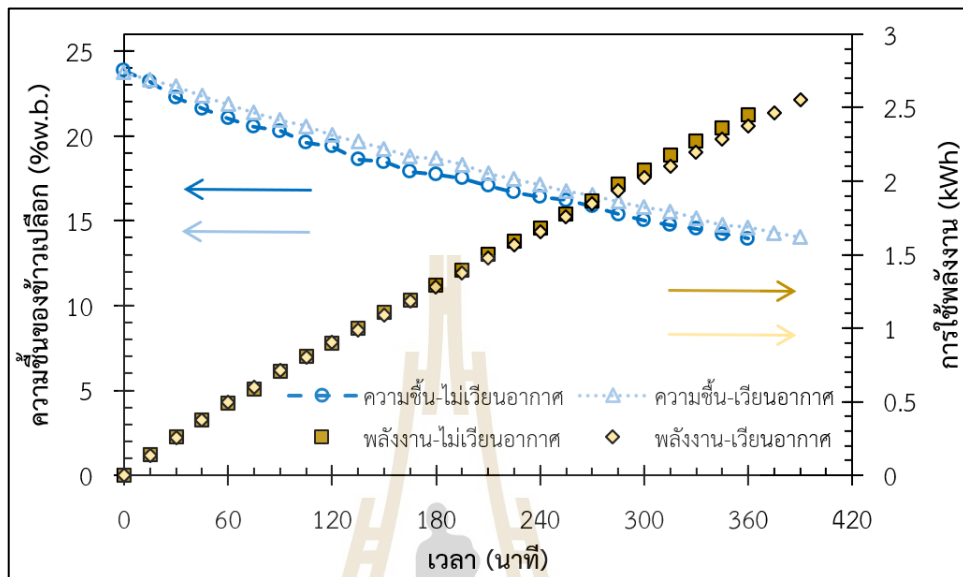
พิจารณาผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นตามรูปที่ 4.12 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน ระบบควบคุมค่าอัตราส่วนความชื้นจากโซลินอยด์วาล์ว (ตัวควบคุม PI) มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อค่าอ้างอิงที่ $18 \text{ g}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{da}}$ ซึ่งเข้าสู่เวลาสมมูลเร็วกว่าระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากวาล์วปีกผีเสื้อถึง 40% อย่างไรก็ตาม อิทธิพลนี้มีความโดดเด่นเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการทดลองเท่านั้น เมื่อพิจารณาในอัตราส่วนความชื้นอ้างอิงถัดไป พบว่า ระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากวาล์วปีกผีเสื้อสามารถตอบสนองต่อค่าอัตราส่วนความชื้นได้เร็วขึ้นจากเดิมเป็นอย่างมาก แต่ยังคงล่าช้ากว่าระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากโซลินอยด์วาล์วอยู่ประมาณ 7% ผลเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นโดยโซลินอยด์วาล์วและวาล์วปีกผีเสื้อแสดงดังตารางที่ 4.4 โดยในส่วนนี้เป็นการนำเสนอข้อมูลเฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและค่าเวลาสู่สมมูลเท่านั้น เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวให้ข้อมูลในแง่ของความไวและเสถียรภาพของระบบต่อค่าอ้างอิงซึ่งง่ายต่อการพิจารณาต่อยอดในกระบวนการอบแห้ง

แม้ว่าระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากวาล์วปีกผีเสื้อจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและเวลาสู่สมมูลมากกว่าระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากโซลินอยด์วาล์วในทุกค่าอ้างอิง (พิจารณาตามตารางที่ 4.4) แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงระบบอบแห้งซึ่งมีการดำเนินงานที่ยาวนานหลายชั่วโมง ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากวาล์วปีกผีเสื้อในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยค่าอ้างอิงระยะหลัง ๆ กลับให้ผลตอบสนองที่ดีทั้งในด้านของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและเวลาสู่สมมูลมีค่าไม่เกิน 5% และ 30 วินาที ตามลำดับ อีกทั้งการปรับเปลี่ยนที่อ้างอิงนี้เป็นการปรับเปลี่ยค่าขึ้นหรือลงอย่างกะทันหัน ซึ่งอาจพบเจอได้น้อยในความเป็นจริงเมื่อเทียบกับรูปแบบความต้องการอื่นในระบบอบแห้ง เช่น การลดลงหรือเพิ่มขึ้นในรูปแบบของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Function) เป็นต้น ดังนั้นหากพิจารณาการทำงานจากระบบควบคุมจากวาล์วปีกผีเสื้อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันดังกล่าว รูปที่ 4.11 จึงอาจเทียบเคียงกรณีนี้ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ระบบควบคุมจากวาล์วปีกผีเสื้อยังสามารถเวียนอากาศอบแห้งที่ใช้แล้วกลับมาใช้ซ้ำได้กว่า 83% ของการไหลในระบบอบแห้งที่ทดสอบ จึงมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานมากกว่าระบบควบคุมจากโซลินอยด์วาล์ว สิ่งเหล่านี้เป็นเหตุผลสนับสนุนที่ดีต่อการพิจารณาให้นำระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศจากวาล์วปีกผีเสื้อมาประยุกต์ใช้กับระบบอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรต่อไปได้ในอนาคต

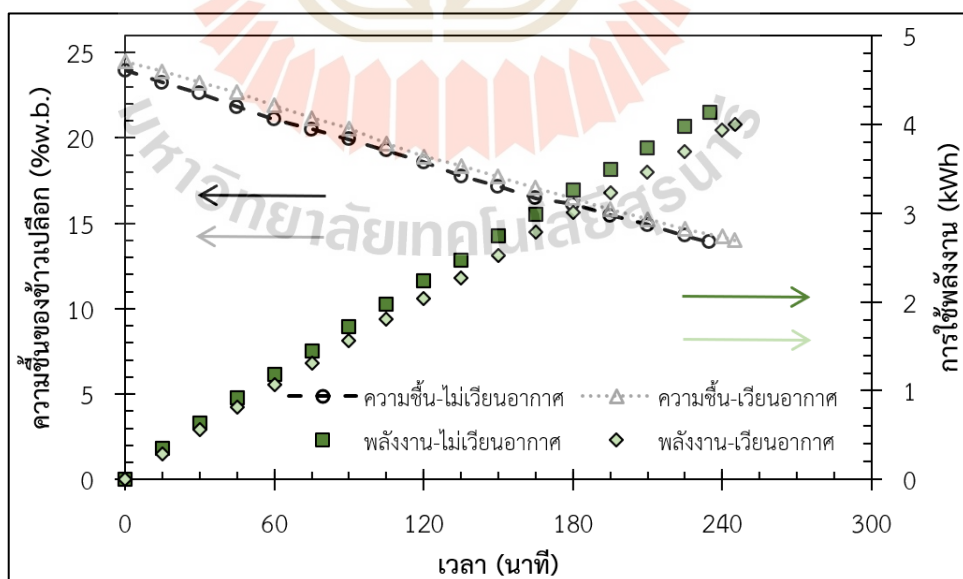
4.2 ผลของการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำต่อการใช้พลังงาน ในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

จากการทดลองในหัวข้อ 3.11 เมื่อนำวาล์วปีกผีเสื้อจากการทดสอบก่อนหน้ามาติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งพาหะลมต้นแบบและทดสอบระบบ ผลในส่วนนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีการเวียนอากาศ (ปิดวาล์วควบคุมการไหล) และระบบที่มีการเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำ (เปิดวาล์วควบคุมการไหลสูงสุด) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาระบบควบคุมความชื้นอากาศอบแห้งเวียนกลับมาใช้กับระบบอบแห้งข้าวเปลือก ขณะทดลองได้วัดอัตราการไหลสูงสุดของอากาศเวียนกลับที่ระบบสามารถทำได้ มีค่าเป็น 56.52% ของอัตราการไหลในระบบอบแห้ง คิดเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรอยู่ที่ $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ ผลของการลดความชื้นข้าว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

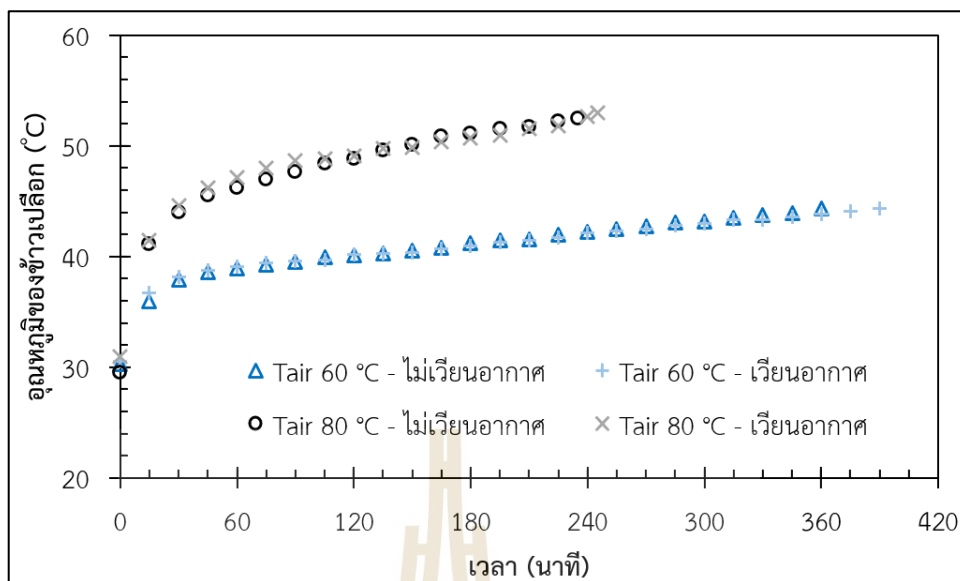
ข้าวเปลือก และการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งระหว่างระบบที่มีการหมุนเวียนอากาศและไม่มี การหมุนเวียนอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 60 °C และ 80 °C แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวและการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 °C



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวและการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 °C



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งแบบไม่เวียนอากาศ และเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำ

จากรูปที่ 4.13 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกที่เวลาต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้ง ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 °C ดังเส้นสีฟ้า พบว่า ปริมาณความชื้นข้าวเปลือกลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้ปรากฏให้เห็นทั้งระบบอบแห้งปกติ (ไม่มีการเวียนอากาศ) และระบบที่มีการหมุนเวียนอากาศกลับ เมื่อพิจารณาในแง่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น (ความชันกราฟ) จะเห็นได้ว่า ระบบอบแห้งปกติ (เส้นสีฟ้าเข้ม) สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าระบบอบแห้งที่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำ (เส้นสีฟ้าอ่อน) โดยที่ระบบอบแห้งปกติสามารถลดความชื้นข้าวจนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 14%w.b. ที่เวลา 360 นาที ขณะที่ระบบอบแห้งแบบหมุนเวียนอากาศกลับจำเป็นต้องใช้เวลานานถึง 390 นาทีขึ้นไป (ใช้เวลาอบแห้งนานขึ้น 8.33%) เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของระบบทั้งสองประเภทตามจุดสีเหลือง พบว่า การเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานในระบบอบแห้งมีทิศทางที่สอดคล้องกันทั้งสองระบบ และอัตราการเปลี่ยนแปลงไม่ได้แตกต่างกันมากนัก (พิจารณาจากความชันของกราฟ) ดังจุดสีเหลืองเข้มและจุดสีเหลืองอ่อนในรูปที่ 4.13 อันเนื่องมาจากอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 30 °C ถึง 32 °C และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้าระบบอุ่นอากาศ (Heater) กับอุณหภูมิเป้าหมาย (60 °C) มีค่าน้อย จึงทำให้ความชันของกราฟระหว่างระบบอบแห้งปกติ (จุดสีเหลืองเข้ม) และระบบอบแห้งแบบหมุนเวียนอากาศกลับ (จุดสีเหลืองอ่อน) ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด หากพิจารณาการอบแห้งข้าวเปลือกที่เวลาตั้งแต่ 120 นาทีเป็นต้นไปกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ จะเห็นว่า ช่วงเวลานั้นข้าวเปลือกมีอัตราการอบแห้งลดลงจากช่วงเริ่มต้นที่มีอัตราอบแห้งคงที่ อากาศร้อนที่เข้ามารับความชื้นจากเมล็ดข้าวในหอบแห้งจะรับความชื้นได้น้อยลงตามเวลา (พิจารณารูปที่ 2.2 ประกอบการอธิบาย) ส่งผลให้กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นแก่อากาศ

เป็นไปในทิศทางลดลง เมื่อพิจารณากระบวนการอบแห้งในฝั่งของอากาศ ดังนั้นอากาศอบแห้งที่หมุนเวียนกลับเข้ามาผสมกับอากาศใหม่ก่อนเข้าสู่เครื่องเป่าลม (Blower) จึงมีอุณหภูมิสูงตามระยะเวลาอบแห้ง ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นกราฟเด่นชัดขึ้นในช่วงท้ายของกระบวนการ ถึงแม้ว่าการเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำจะมีประโยชน์ต่อการลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งจากการที่มีความร้อนเหลือเหลืออยู่ในอากาศ แต่อากาศเหล่านั้นมีความชื้นบางส่วนเวียนกลับเข้ามายังระบบอบแห้งซ้ำวนเปลือกด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ความสามารถในการรับความชื้นของอากาศลดน้อยลงตามไปด้วย อิทธิพลนี้ปรากฏอย่างชัดเจนในความแตกต่างระหว่างเส้นสีฟ้าเข้มและเส้นสีฟ้าอ่อนของรูปที่ 4.13 เป็นเหตุให้ระบบอบแห้งแบบเวียนอากาศต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น จนกระทั่งส่งผลต่อการใช้พลังงานของระบบสูงขึ้น 3.92% ในท้ายที่สุด ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เกียรติศักดิ์ ใจโต และคณะ (2561) ที่ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมหมุนเวียน จากการปรับสัดส่วนอากาศ (อากาศอบแห้งเวียนกลับต่ออากาศแวดล้อมขาเข้า) 3 ค่า ได้แก่ 0:3 1:3 และ 2:3 ตามลำดับ โดย เกียรติศักดิ์ ใจโต และคณะ ระบุว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่นำอากาศกลับมาใช้ใหม่มีค่าการใช้พลังงานสูงขึ้น เนื่องจากอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความชื้นสูงทำให้ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกในคอลัมน์ลดลงตามสัดส่วนอากาศที่เพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้จำนวนรอบการอบแห้งมีมากขึ้นและส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่ลดลงด้วยเช่นกัน

จากรูปที่ 4.14 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งที่ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศ 80 °C มีลักษณะเป็นการลดลงแบบคงที่ ระบบอบแห้งปกติใช้ระยะเวลาอบแห้ง 240 นาที ขณะที่ระบบอบแห้งแบบเวียนอากาศใช้เวลา 245 นาที ซึ่งใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเป็นอิทธิพลหลักในการขับเคลื่อนกลไกการถ่ายเทมวลของความชื้นข้าวเปลือกมากกว่าความชื้นที่ติดตามมาจากอากาศซึ่งเวียนกลับมาเข้าสู่ระบบอบแห้ง ทำให้จุดสิ้นสุดกระบวนการมีความแตกต่างกันเพียง 5 นาที และเกิดความแตกต่างระหว่างการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกระหว่างระบบอบแห้งปกติ (เส้นสีดำ) และระบบอบแห้งแบบเวียนอากาศ (เส้นสีเทา) เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำสามารถลดภาระการทำความร้อนของระบบอุ่นอากาศลงได้ วิจารณ์ได้จากความชื้นของการใช้พลังงานในระบบอบแห้งปกติ (จุดสีเขียวเข้ม) และระบบอบแห้งแบบเวียนอากาศ (จุดสีเขียวอ่อน)

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างด้านการใช้พลังงานของระบบเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำระหว่างเงื่อนไขการอบแห้งที่ 60 °C และ 80 °C พบว่า การนำระบบหมุนเวียนอากาศไปใช้กับระบบอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อการลดภาระการทำความร้อนในระบบอุ่นอากาศให้ลดลงได้ แต่ทว่า ระบบอบแห้งแบบเวียนอากาศ ณ เงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C สามารถลดการใช้พลังงานของระบบได้เพียง 3.38% ซึ่งลดการใช้พลังงานได้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ อมรดอนเมือง, นิรุต อ่อนสูง และ สุริยา โชคเพิ่มพูน (2563) Darvishi, Azadbakht, and Noralahi (2018) และ Afzali, Darvishi, and Behrooz-Khazaei (2019) ที่สามารถลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งในรูปแบบอื่นหรือกับวัสดุอื่นลงได้มากกว่า 10% เป็นต้นไป นอกจากนี้ หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งตามรูปที่ 4.15 พบว่า อิทธิพลของความชื้นที่ติดมากับอากาศอบแห้งซึ่งถูกเวียนกลับมาผสมใหม่ (กรณีเวียนอากาศ) ไม่ได้ส่งผลต่อ

ความแตกต่างของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการแต่อย่างใด แต่อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่เพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ผลจากการทดลองในส่วนนี้ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของระบบหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ซ้ำต่อการใช้พลังงานในระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม ระบบหมุนเวียนอากาศช่วยลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งแบบพาหะลมได้ 3.38% ในเงื่อนไขอบแห้งที่ 80 °C แต่ในเงื่อนไขอบแห้งที่ 60 °C กลับทำให้ระบบมีระยะเวลาดำเนินการยาวนานขึ้น เป็นเหตุให้ระบบใช้พลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย (สูงขึ้น 3.92%) ตัวเลขดังกล่าวเป็นความเสี่ยงทางด้านพลังงานที่ต้องพิจารณาต่อการประยุกต์ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศอบแห้งกับระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมนี้ โดยเฉพาะกับเครื่องอบแห้งที่มีการทำงานแบบวงจรมีอุณหภูมิต่ำกว่า 80 °C แต่ระบบนี้จะเป็นผลดีต่อการอบแห้งวัสดุอื่นหรือระบบรูปแบบอื่นที่ไม่ต้องพึ่งพาอุณหภูมิอากาศสูงเกินกว่า 80 °C ขึ้นไป เนื่องจากแนวโน้มผลการทดลองในส่วนนี้บ่งชี้ว่า ระบบหมุนเวียนอากาศจะสามารถลดการใช้พลังงานของระบบอบแห้งอากาศได้ดีขึ้น เมื่อใช้ระบบนี้กับการอบแห้งที่ดำเนินงานภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ ดังนั้น การทำงานในลำดับถัดไปจึงดำเนินการอบแห้งเพิ่มเติมบางเงื่อนไข ตามที่ระบุในหัวข้อ 3.12 เพื่อนำข้อมูลที่มีอยู่มาใช้วิเคราะห์ผลและหาแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมต่อไป

4.3 ผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่

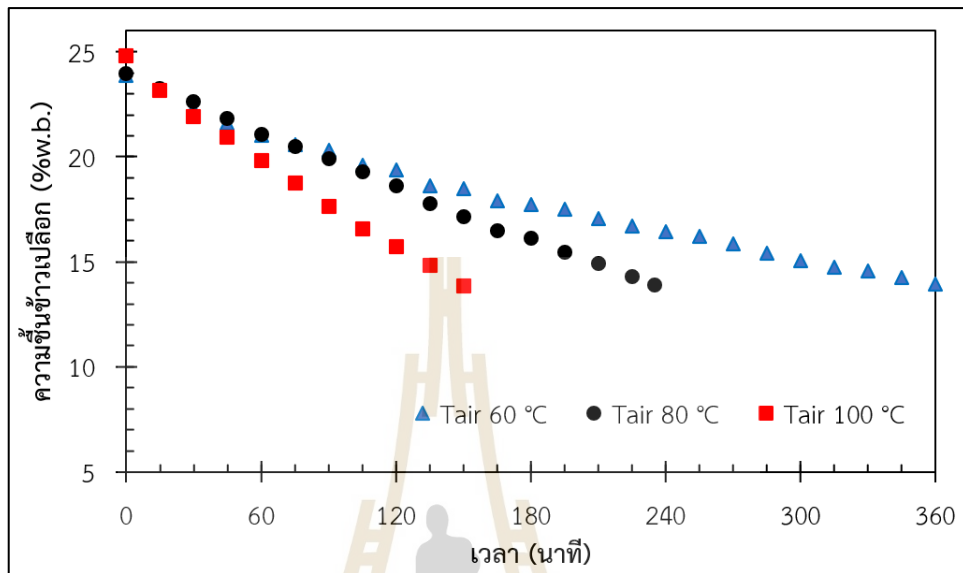
หัวข้อนี้นำเสนอผลของการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 3 อุณหภูมิ ได้แก่ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศ (T_{air}) เท่ากับ 60 °C 80 °C และ 100 °C ตามลำดับ นำเสนอผลเป็นค่าเฉลี่ยของตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งได้มาจากการทดลองซ้ำ 3 การทดลองในแต่ละเงื่อนไข

4.3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิคงที่

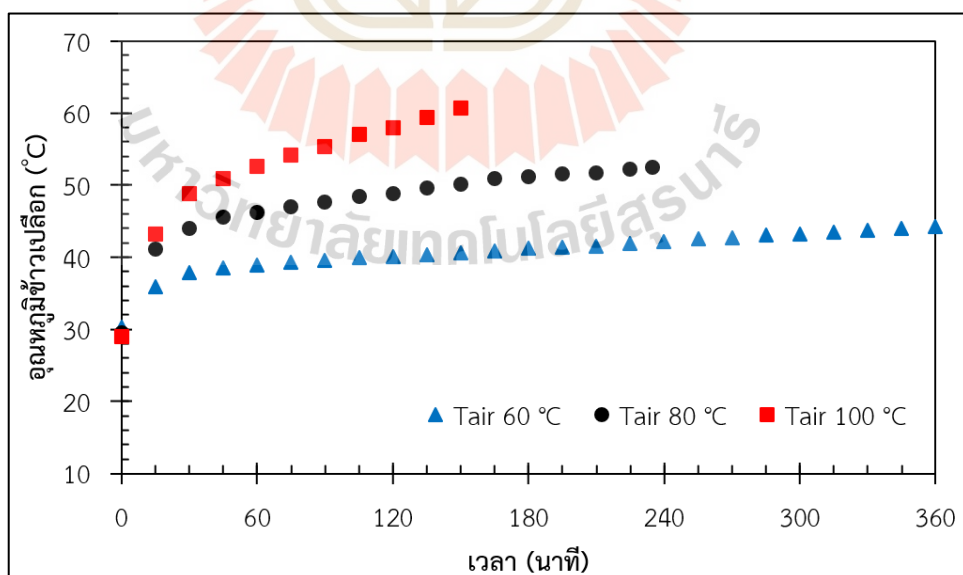
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งดังรูปที่ 4.16 พบว่า ความชื้นข้าวเปลือกลดลงตามระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้น หากพิจารณาแนวโน้มการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ใด ๆ จะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลให้กระบวนการยุติไวขึ้น โดยที่การอบแห้ง ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศคงที่ 100 °C สามารถลดเวลาอบแห้งลงได้ถึง 58.33% และ 33.33% เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 60 °C และ 80 °C ตามลำดับ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่เคยทบทวนมาแล้วในหัวข้อ 2.4.1 เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิข้าวเปลือกตามรูปที่ 4.17 หากพิจารณาตามสมการที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง ในลักษณะของความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งจึงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลมากขึ้น และทำให้กระบวนการอบแห้งยุติเร็วขึ้นตามที่กล่าวมา

การใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งพาหะลมกรณีอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.18 การใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

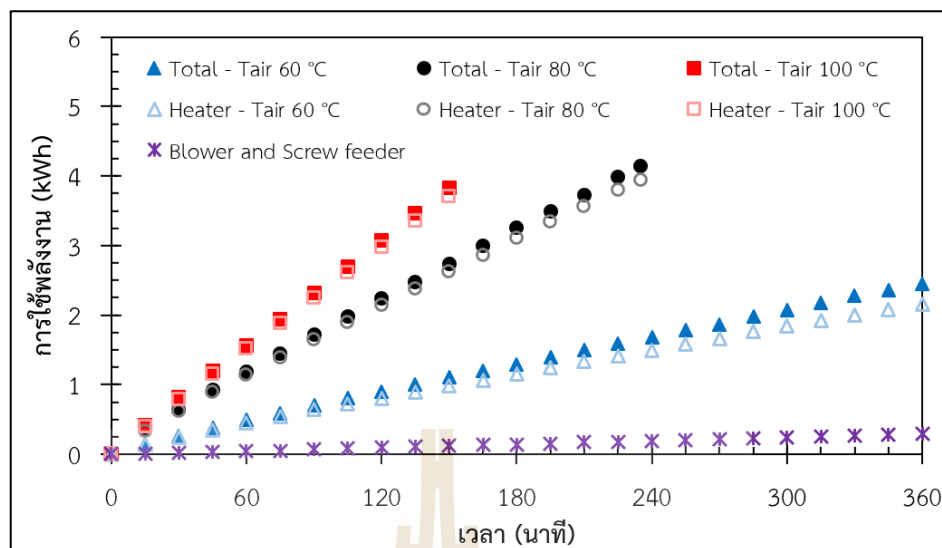
แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนปฐมภูมิ คือ แหล่งผลิตความร้อน (จุดข้อมูลแบบโปร่ง) และ 2. ส่วนทุติยภูมิ คือ อุปกรณ์ส่วนควบอื่น ได้แก่ เครื่องเป่าลม และสกรูลำเลียงข้าว (จุดข้อมูลสีม่วง)



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิข้าวเปลือกระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่



รูปที่ 4.18 การใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่

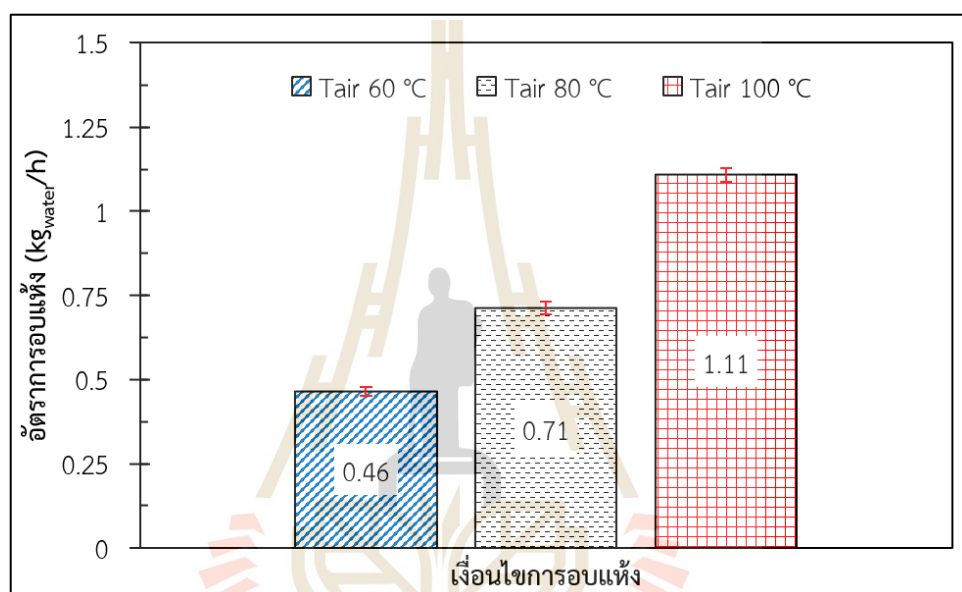
ผลรวมการใช้พลังงานระหว่างส่วนปฐมภูมิและส่วนทุติยภูมิ (Total) แสดงดังจุดทึบของข้อมูลการอบแห้ง ณ เงื่อนไขต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.18 ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่แหล่งผลิตความร้อนมากกว่า 90% ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วันชัย สุตะพันธ์, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2555) ที่ได้รายงานการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลคลุกเคล้า ณ โรงสีข้าวพรเจริญ ว่ามีการใช้พลังงานของระบบในการผลิตอากาศร้อนถึง 93.89%

จากรูปที่ 4.18 การบริโภคพลังงานของเครื่องอุ่นอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาใช้งาน นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของภาระทำความร้อน (อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น) ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงาน (ความชันกราฟ) เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ถึงกระนั้น การอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับจัดเก็บอย่างปลอดภัย มักจะมีจุดยุติกระบวนการที่ความชื้น 14%w.b. ซึ่งมีตัวแปรด้านเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้การใช้พลังงานของระบบอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศ 60 °C มีค่าต่ำที่สุด (2.45 kWh) เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการอบแห้งอื่นในการทดลองนี้ รองลงมาคือ เงื่อนไขอบแห้งที่ 100 °C มีการใช้พลังงานอยู่ที่ 3.84 kWh และสุดท้ายเป็นเงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C มีการใช้พลังงานสูงที่สุด(4.14 kWh) เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการทดลองอื่นในส่วนนี้ เพื่อให้ผลการทดลองมีความชัดเจนมากขึ้น ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลที่ได้ในส่วนนี้ไปประเมินหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพาหะลมในหัวข้อถัดไป

4.3.2 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่

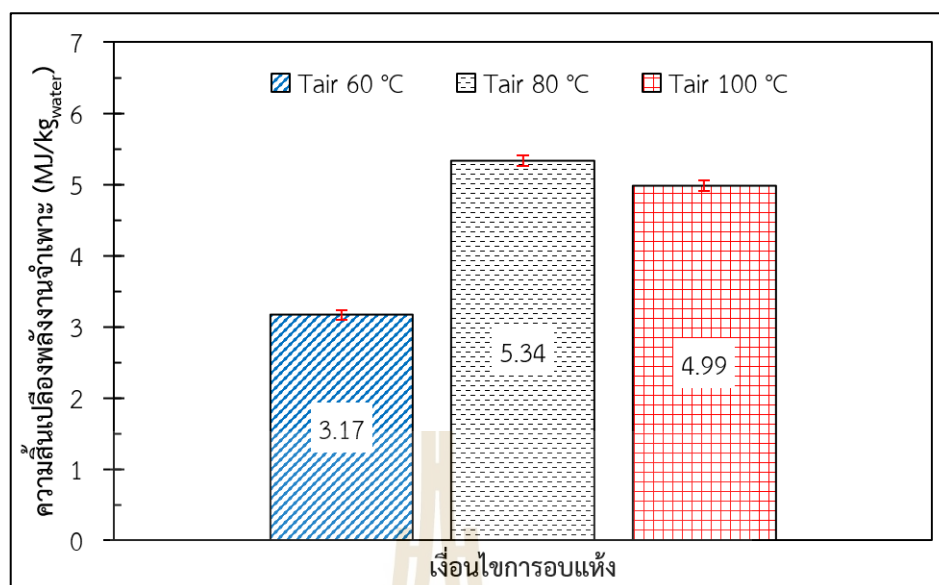
ตามรายงานในหัวข้อ 4.3.1 เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินไปข้างหน้า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิข้าว และการที่อุณหภูมิข้าวเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณา

สมการควบคุมของแบบจำลองการอบแห้งตามสมการที่ 2.9 ถึง 2.11 จะเห็นว่า ยิ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าสูงขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ หรืออัตราการอบแห้งแห้งก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน (Li, Wang, Li, Jiang, and Lu, 2016; N. Srisang, S. Soponronnarit, R. Thuwapanichayanan, and S. Prachayawarakorn, 2016) ด้วยเหตุนี้ อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อข้าวเปลือกเปลือกต้องเผชิญกับเงื่อนไขการอบแห้งที่มีอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นดังรูปที่ 4.19 โดยที่การอบแห้ง ณ เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศ 60 80 และ 100 °C มีอัตราการอบแห้งเป็น 0.46 0.71 และ 1.11 kg_{water}/h ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่

พิจารณาความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะรวมของการอบแห้งจากรูปที่ 4.20 พบว่า เงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 60 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมต่ำสุดที่ 3.17 MJ/kg_{water} ขณะที่ เงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 80 °C และ 100 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมเป็น 5.34 และ 4.99 MJ/kg_{water} ตามลำดับ หากพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการใช้พลังงานของเงื่อนไขอบแห้งที่ 80 °C และ 100 °C จะเห็นว่า การอบแห้งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีการใช้พลังงานต่างกันเพียง 0.35 MJ/kg_{water} ในขณะที่เดียวกัน หากเปรียบเทียบการใช้พลังงานของเงื่อนไขอบแห้งที่ 60 °C กับเงื่อนไขอบแห้งที่ 80 °C และ 100 °C พบว่า มีความแตกต่างกันตั้งแต่ 1.82 ถึง 2.17 MJ/kg_{water} เงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 60 °C สามารถลดการใช้พลังงานของระบบลงได้ประมาณ 1.5 เท่า จากเงื่อนไขอุณหภูมิอากาศ 80 °C และ 100 °C อย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขดังกล่าวจำเป็นต้องพิจารณาน้ำหนักของน้ำที่แลกเปลี่ยนกับอัตราการอบแห้งและดัชนีคุณภาพข้าวด้วยในทางปฏิบัติ



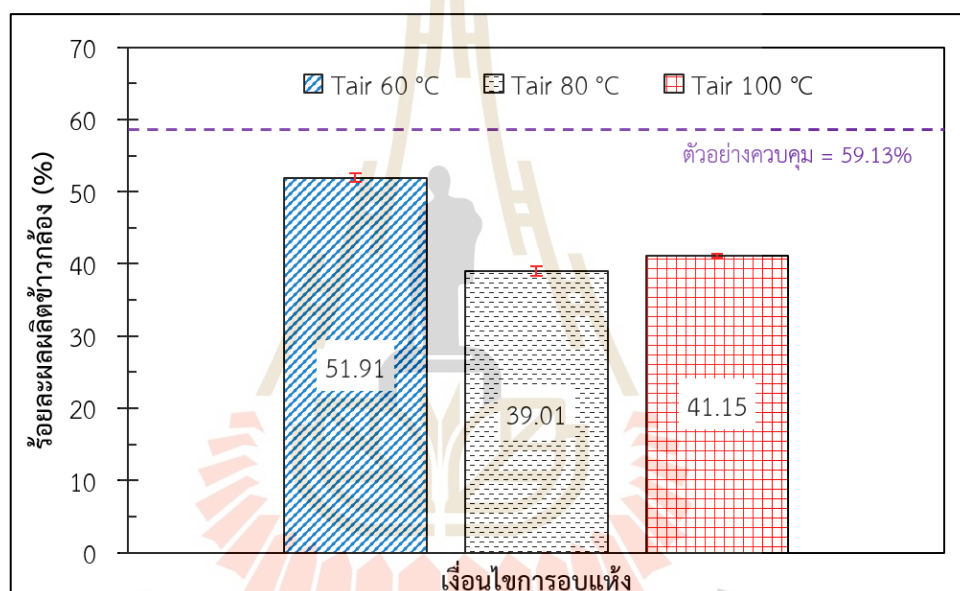
รูปที่ 4.20 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของระบบอบแห้งข้าวเปลือก ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่

4.3.3 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่

ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 60 80 และ 100 °C แสดงดังรูปที่ 4.21 การอบแห้งที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศ 60 °C มีร้อยละผลผลิตข้าวกล้องเป็น 51.91% ขณะที่เงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 80 °C และ 100 °C มีร้อยละผลผลิตข้าวกล้องเท่ากับ 39.01% และ 41.15% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแตกต่างของร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากแต่ละเงื่อนไขทดลอง พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C มีค่าร้อยละผลผลิตข้าวกล้องแตกต่างกันเพียง 5% ขณะที่เงื่อนไขอบแห้งข้าวเปลือกที่ 60 °C มีค่าร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสูงขึ้นจากเงื่อนไขอุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ประมาณ 20% ถึง 25% ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นบนเมล็ดข้าวกล้องของ N. Srisang, S. Soponronnarit, R. Thuwapanichayanan, and S. Prachayawarakorn (2016) งานวิจัยดังกล่าวเน้นย้ำถึงความเสียหายของผลผลิตข้าวกล้อง ซึ่งเกิดขึ้นจากอิทธิพลของเกรเดียนต์ความชื้น (Moisture gradient) บนเมล็ดข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศอบแห้งควบคู่กับเวลาการอบแห้งซึ่งเป็นอิทธิพลร่วมในการพิจารณา

จากแนวโน้มผลการทดลองในส่วนนี้ทำให้ทราบว่า อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง อุณหภูมิของข้าวเปลือก และเวลาในการอบแห้ง มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างซับซ้อน แต่ละตัวแปรล้วนส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.16 ถึง 4.21 แม้ว่าข้าวเปลือกจะได้รับการอบแห้งที่ 60 °C เป็นระยะเวลาสั้นกว่าเงื่อนไขอื่น แต่กลับให้ผลผลิตข้าวสูงสุด ขณะที่การอบแห้ง ณ เงื่อนไขอบแห้งอุณหภูมิ 100 °C มีผลผลิตสูงกว่าเงื่อนไขอบแห้งอุณหภูมิ 80 °C ทั้ง ๆ ที่มีระยะเวลาทำแห้งสั้นกว่า ทำให้เกิดความคลุมเครือในบางประเด็นของแต่ละตัวแปร

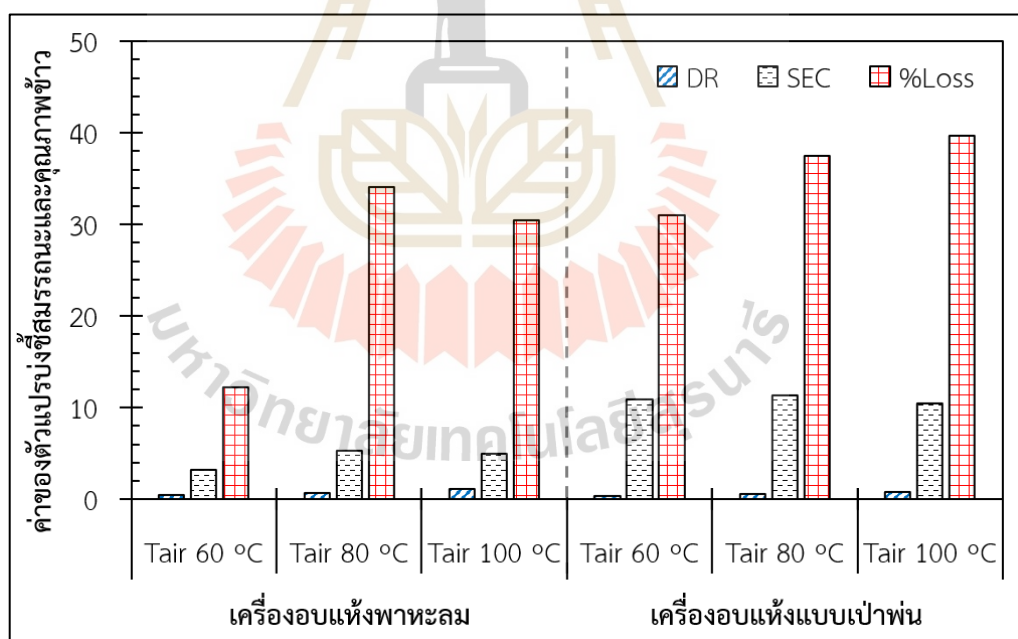
เมื่อต้องพิจารณาตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามทีละตัว ในอีกแง่มุมหนึ่ง หากจะพิจารณาผลของอุณหภูมิข้าวที่เพิ่มขึ้นจากการอบแห้งในเงื่อนไขต่าง ๆ จะเห็นว่า อุณหภูมิข้าวในเงื่อนไขอบแห้ง 60°C ซึ่งมีค่าต่ำ ให้ผลของร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสูง แต่ในทางตรงกันข้าม อุณหภูมิข้าวของเงื่อนไขอบแห้งที่ 80°C มีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขอบแห้งที่ 100°C แต่เงื่อนไขอบแห้งที่ 100°C กลับมีค่าร้อยละผลผลิตข้าวสูงกว่าเงื่อนไข 80°C จากที่ยกตัวอย่างมาข้างต้น จะเห็นว่ามีข้อมูลบางส่วนที่ค่อนข้างกำกวมในการสรุปผล ดังนั้น เพื่อให้เกิดความกระจ่างของตัวแปรต้นที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามในวิทยานิพนธ์นี้มากขึ้น จึงจำเป็นต้องนำข้อมูลการทดลองในส่วนนี้ไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคเชิงสถิติหลายตัวแปร (Factor analysis) และวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) ต่อไปนี้หัวข้อ 3.13 โดยมีดัชนีบางอย่างมาอธิบายเป็นตัวเลขให้เห็นอย่างชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 4.21 ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศคงที่

จากข้อมูลดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ทำให้ผู้วิจัยพบความเหมาะสมของจุดดำเนินการของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมนี้ภายใต้การอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศคงที่ 60°C เนื่องจากในทางปฏิบัติ ผู้ประกอบการมักจะให้ความสำคัญแก่ต้นทุนด้านพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก แม้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 60°C ให้ผลของอัตราการอบแห้งต่ำกว่าเงื่อนไขอื่นก็ตาม แต่ในทางตรงกันข้าม เงื่อนไขนี้กลับมีการใช้พลังงานจำเพาะต่ำสุดและมีร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 80°C และ 100°C ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 60°C ($T_{\text{air}} 60^{\circ}\text{C}$) เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดภายใต้สภาวะอากาศอบแห้งคงที่จากการทดลองนี้ และใช้ผลดังกล่าวเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบอบแห้งจากวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ (ATC method) ต่อไป

เครื่องอบแห้งพาสลิมในงานวิจัยนี้ (เงื่อนไข Tair 60 °C) ใช้พลังงานต่ำกว่า เครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (Mondal, Shiplu, Sen, Roy, and Sarker, 2019) อยู่ 23.43% แต่งานวิจัยนี้ต้องใช้ระยะเวลาในการทำแห้งยาวนานกว่า 36% ในการลดความชื้นข้าวจาก 24%w.b. ลงมาต่ำกว่า 14%w.b. ขณะที่ร้อยละผลผลิตข้าวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เครื่องอบแห้งพาสลิมนี้ ยังมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบกระแสน้ำทำงานร่วมกับพาสลิม (C. Nimmol, K. Sathapornprasath, and S. Devahastin, 2012) เมื่อพิจารณาการอบแห้ง ข้าวเปลือกที่ 70 °C โดยลดความชื้นข้าวจาก 21.87%w.b. ลงมาจนถึง 17.62%w.b. พบว่า ร้อยละ ผลผลิตข้าวของงานวิจัยดังกล่าวต่ำกว่างานวิจัยนี้อยู่ 20.72% หากเปรียบเทียบสมรรถนะของ เครื่องอบแห้งพาสลิมในงานวิจัยนี้กับเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ (ศิวกกร ศรีธัญญากร, 2562) ซึ่งมีกำลังการผลิตใกล้เคียงกัน ณ เงื่อนไขการอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 19 m/s มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 15 kg และอุณหภูมิอากาศอบแห้งในช่วง 60 °C ถึง 100 °C ตามรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า เครื่องอบแห้งแบบพาสลิมมีข้อได้เปรียบทั้งอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า การใช้พลังงาน ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของระบบแบบเป่าพ่น อีกทั้งยังพบว่าข้าวมีการแตกหักน้อยกว่าในทุกค่าอุณหภูมิ ของการอบแห้ง สิ่งเหล่านี้ทำให้เครื่องอบแห้งพาสลิมยังคงเป็นตัวเลือกที่ดีแก่การพัฒนาต่อยอดสู่เครื่องจักรอบแห้งระดับกลางที่มีการทำงานแบบหวดเป็นอย่างมาก



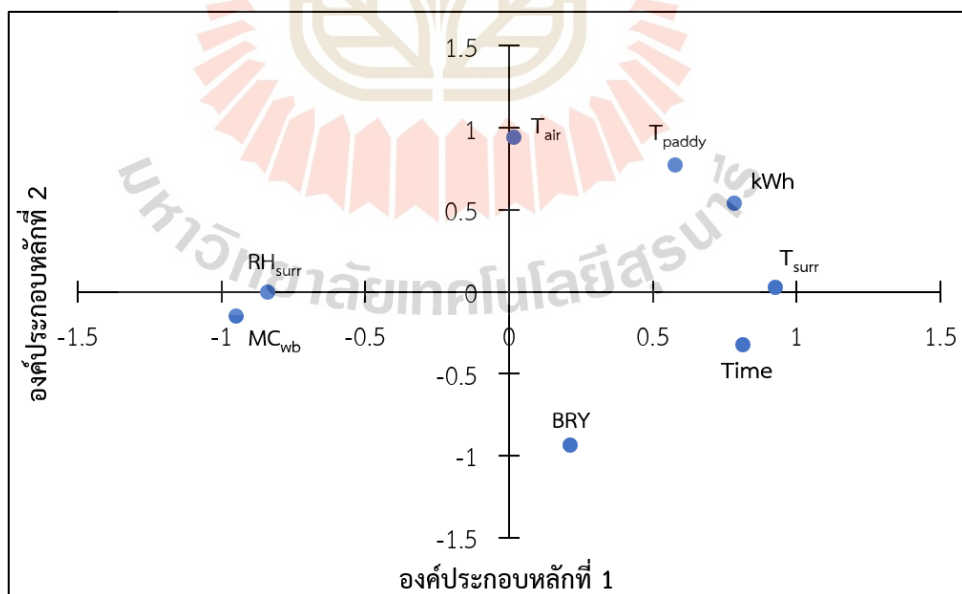
รูปที่ 4.22 สมรรถนะเชิงเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งพาสลิมกับเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น

4.4 ผลกระทบของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามในกระบวนการอบแห้งพาทะลม

ข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือกจากหัวข้อ 4.3 ได้รับการวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งแบบพาทะลม ประกอบด้วย อุณหภูมิ (T_{surr}) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH_{surr}) ของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บ (T_{paddy}) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (T_{air}) เวลาที่ใช้อบแห้ง (Time) ความชื้นข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง (MC_{wb}) การใช้พลังงานในรูปของหน่วยไฟฟ้า (kWh) และ ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (BRY) ภายหลังจากการศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร ผู้วิจัยยังได้นำข้อมูลเหล่านี้มาพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการวิเคราะห์ความไว เพื่อประเมินหาผลกระทบของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (ความสำคัญของตัวแปรอิสระ) ต่อตัวแปรตามที่สนใจศึกษาดังหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก

การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นหนึ่งในวิธีวิเคราะห์สถิติแบบหลายตัวแปร (Multivariate Analysis) สำหรับศึกษาโครงสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลจำนวนมาก โดยวิธีนี้มุ่งเน้นการลดมิติของข้อมูลและยังสามารถแก้ไขปัญหาภาวะร่วมเส้นตรงพหุ (Multicollinearity) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (สายชล สิ้นสมบูรณ์ทอง, 2559) ด้วยจุดเด่นนี้เอง ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลการอบแห้งจากผลในหัวข้อ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยระบุว่า การอธิบายตัวแปรด้วยความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนปัจจัยขององค์ประกอบหลักที่ 1 และองค์ประกอบหลักที่ 2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของชุดข้อมูลเดิมได้สูงถึง 86.175% ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนปัจจัยขององค์ประกอบหลักที่ 1 และ 2

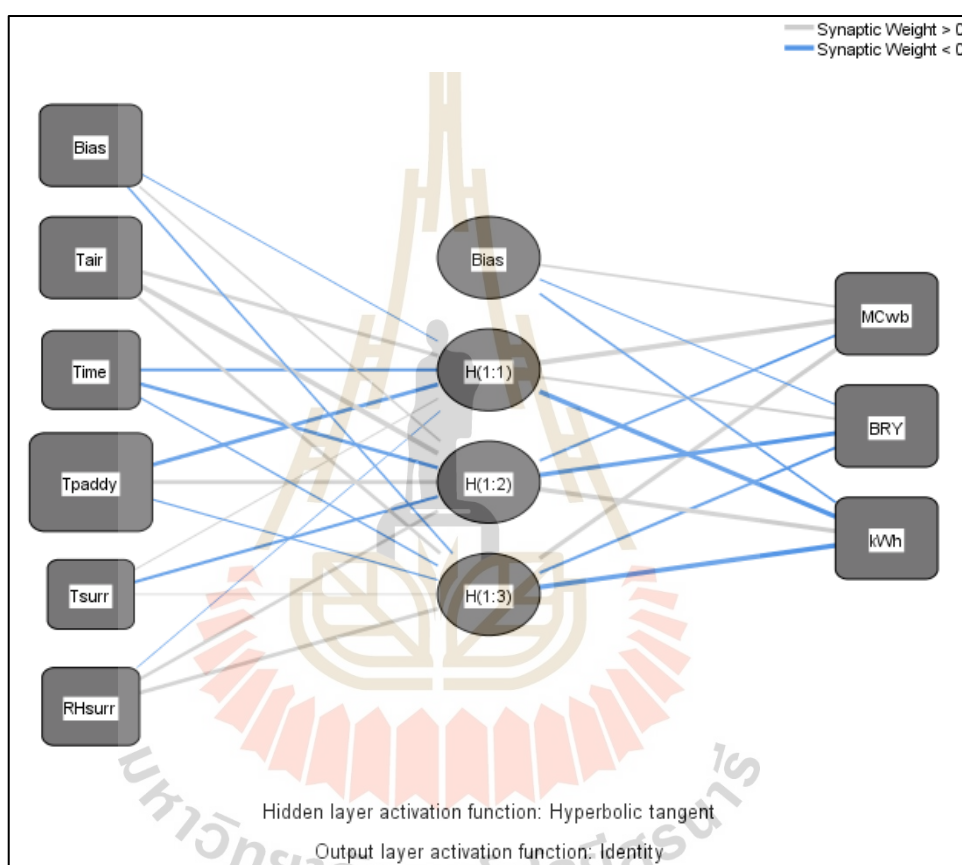
รูปที่ 4.23 อธิบายโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนปัจจัยของตัวแปรต่าง ๆ บนองค์ประกอบหลักที่ 1 และองค์ประกอบหลักที่ 2 แนวโน้มข้อมูลพิจารณาได้จากแกนบวก และแกนลบบนแกนองค์ประกอบ โดยที่อิทธิที่มีแนวโน้มส่งเสริมกัน (แนวโน้มมีทิศทางเดียวกัน) ขณะที่อิทธิพลที่มีแนวโน้มขัดแย้งกัน (แนวโน้มมีทิศสวนทางกัน) ระยะห่างของตัวแปรระหว่างแกนองค์ประกอบแสดงถึงคะแนนของความสำคัญหรืออิทธิพลระหว่างตัวแปรที่มีต่อกัน นอกจากนี้ การวางตัวบนแกนองค์ประกอบในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกันแสดงถึงอิทธิพลที่ไม่มีผลต่อกัน หรือแทบจะไม่มีผลต่อกัน

พิจารณาแนวโน้มของตัวแปรบนแกนองค์ประกอบหลักที่ 1 พบว่า เมื่อ T_{surr} เพิ่มขึ้น ค่า RH_{surr} จะลดลง กระบวนการนี้เป็นจริงตามหลักการปรับอากาศหากพิจารณากรณีที่อัตราส่วนความชื้นอากาศคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงน้อย การเพิ่มขึ้นของ Time ส่งผลให้ระบบต้องใช้ kWh สูงขึ้น ขณะเดียวกัน T_{paddy} ก็เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาด้วยเช่นกัน ในอีกทางหนึ่ง การที่ RH_{surr} น้อย ส่งผลให้ MC_{wb} ลดลงต่ำลงด้วยเช่นกัน อิทธิพลนี้เป็นการเสริมกันในทิศทางลบ ข้อมูลบนแกนองค์ประกอบหลักที่ 1 บ่งชี้ความโดดเด่น 2 ประการ คือ การเพิ่มขึ้นของ Time มีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดลงของ MC_{wb} และการเพิ่มขึ้นของ kWh มีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดลงของ MC_{wb} ด้วยเช่นกัน

พิจารณาตัวแปรบนแกนองค์ประกอบหลักที่ 2 พบว่า การเพิ่มขึ้นของ T_{air} ส่งผลต่อ BRY เป็นอย่างมาก อิทธิพลนี้มีความโดดเด่นสูงสุดบนแกนองค์ประกอบหลักที่ 2 รองลงมาคือ T_{paddy} ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปัจจัยใกล้เคียงกับ T_{air} เป็นอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของค่า T_{air} และ T_{paddy} ทำให้ Time ลดลง นอกจากนี้ หากพิจารณาทิศทางของแนวโน้มเพิ่มเติม จะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของ T_{air} ส่งผลต่อการเพิ่ม T_{paddy} และ kWh ในทิศทางเดียวกัน อิทธิพลเหล่านี้ล้วนเป็นตัวแปรคู่ตรงข้ามกับ BRY และ Time ข้อมูลดังกล่าวบ่งชี้ว่า T_{air} และ T_{paddy} เป็นสาเหตุอันดับต้น ๆ ที่กระทบต่อร้อยละผลผลิตข้าวหลังกระบวนการอบแห้งและอิทธิพลนี้เองที่ส่งเสริมให้ kWh ในระบบอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น แต่ Time ลดลง ขณะที่ T_{surr} และ RH_{surr} แทบจะไม่ส่งผลต่อค่า T_{air} แต่อย่างใด เมื่อพิจารณาภาพรวมจากทั้ง 2 แกนองค์ประกอบ พบว่า ตัวแปร T_{paddy} เป็นตัวแปรที่ปรากฏความโดดเด่นทั้งแกนองค์ประกอบที่ 1 และ 2 ซึ่งกระทบต่อการลดลงของ MC_{wb} การเพิ่มขึ้นของ kWh และการลดลงของ BRY ซึ่งเป็นตัวแปรที่งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญ ทว่าตัวแปร T_{paddy} เป็นผลโดยอ้อมจากการเพิ่มขึ้นของ T_{air} และ Time ตัวแปรนี้จึงเป็นที่น่าจับตามองต่อการนำมาพิจารณาถึงความสำคัญของตัวแปรอิสระและอาจใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงผลกระทบต่อระบบอบแห้งพาหะลมได้ อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยนี้ทำให้เห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เท่านั้น ซึ่งยังไม่เป็นการชี้ชัดว่าอิทธิพลของตัวแปร T_{paddy} จะมีความสำคัญต่อตัวแปรตามที่น่าสนใจศึกษาอย่างแท้จริง จากการทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อ 2.6 พบว่า การวิเคราะห์ความไวของข้อมูลผ่านแบบจำลองหรือความสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายพฤติกรรมของตัวแปรต้นต่อตัวแปร เป็นวิธีการที่จะสามารถเข้ามาช่วยยืนยันข้อสมมติฐานนี้ได้อย่างแน่ชัดมากขึ้น ดังนั้น ในส่วนถัดไปจึงเป็นการนำข้อมูลการทดลองที่มีอยู่ไปฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองดังหัวข้อ 3.13.2 และนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้วิเคราะห์ความไวในหัวข้อ 3.13.3 ตามลำดับ

4.4.2 ความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากโปรแกรม IBM SPSS Statistics แสดงดังรูปที่ 4.24 ประกอบด้วยชั้นนำเข้าข้อมูล ชั้นแอบแฝง 1 ชั้น และชั้นส่งออกข้อมูล ฟังก์ชันกระตุ้นของชั้นแอบแฝงเป็นแบบไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic tangent) และชั้นส่งออกเป็นแบบปกติ (Identity) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ค่าถ่วงน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.24 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการศึกษาสมรรถนะระบบอบแห้งพาทะลม

ผลการทำนายค่าตัวแปรตามจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.25 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลตัวแปรตามทั้ง 3 ตัวอย่างแม่นยำ พิจารณาจากการวางตัวของข้อมูลบนเส้นแนวอ้างอิง (เส้นประสีเทา) ของรูปที่ 4.25 เมื่อพิจารณาผลการประเมินด้วยตัวแปรทางสถิติในตารางที่ 4.6 พบว่าในชุดข้อมูลฝึกสอนแบบจำลอง (Training data) ค่า R^2 ของ MC_{wb} , kWh และ BRY เป็น 0.997, 0.999 และ 0.999 ตามลำดับ RMSE มีค่าเป็น 0.169, 0.034 และ 0.161 ตามลำดับ ขณะที่ชุดข้อมูลตรวจสอบความถูกต้อง (Testing data) มีค่า R^2 ของ MC_{wb} , kWh และ HRY เป็น 0.997

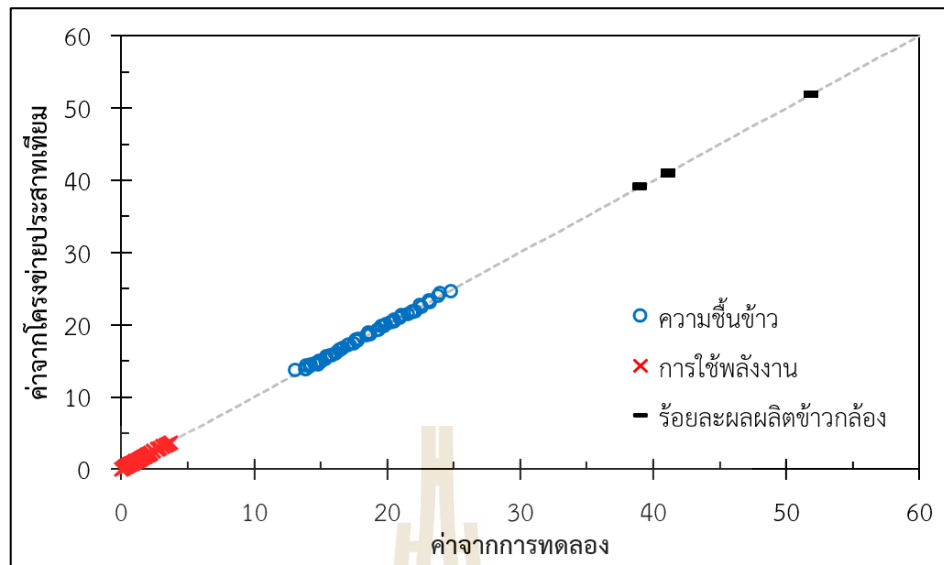
0.999 และ 0.999 ตามลำดับ และ RMSE มีค่าเป็น 0.192, 0.036 และ 0.166 ตามลำดับ ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองจากทั้ง 2 ชุดข้อมูล มีค่า R^2 ตั้งแต่ 0.997 เป็นต้นไป และค่า RMSE มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เป็นอย่างมาก แสดงว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้สามารถทำนายพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพาหะลมได้อย่างแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของใบปวยเล้ง (Sarimeseli, and Yuceer, 2015) พบว่า ค่า R^2 และ RMSE มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะ R^2 ที่มีค่าเกินกว่า 0.999 และ RMSE ที่เข้าใกล้ 0 ตัวเลขเหล่านี้เป็นการยืนยันว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการศึกษานี้มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายค่าตัวแปรตามทั้ง 3 และสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ความไวต่อไปได้

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างแบบจำลอง	ชั้นแอบแฝง			ชั้นส่งออกข้อมูล			
	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	BRY	kWh	MC _{wb}	
ชั้นรับข้อมูล	(Bias)	-0.034	0.211	-0.173	-	-	-
	Tair	0.453	1.186	0.426	-	-	-
	Time	-0.327	-0.439	-0.148	-	-	-
	T _{paddy}	-0.763	0.821	-0.091	-	-	-
	T _{surr}	0.041	-0.290	0.028	-	-	-
	RH _{surr}	-0.010	0.385	0.478	-	-	-
ชั้นแอบแฝง	(Bias)	-	-	-	0.245	-0.079	-0.241
	H(1:1)	-	-	-	1.364	0.280	-1.103
	H(1:2)	-	-	-	-0.253	-0.902	0.945
	H(1:3)	-	-	-	0.887	-0.285	-1.143

ตารางที่ 4.6 ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

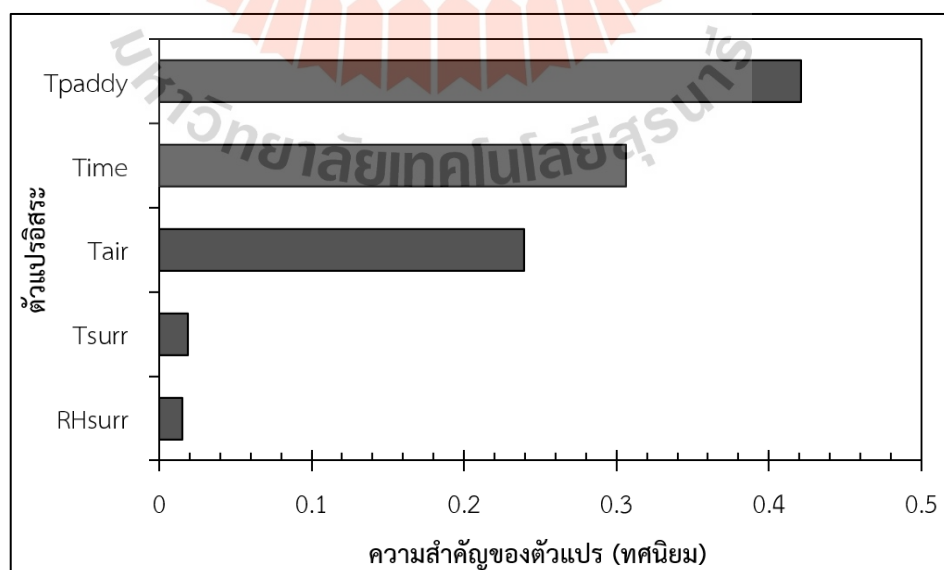
ชุดข้อมูล	ตัวแปรทางสถิติ	ตัวแปรตาม		
		MC _{wb}	kWh	BRY
Training data	R^2	0.997	0.999	0.999
	RMSE	0.169	0.034	0.161
Testing data	R^2	0.997	0.999	0.999
	RMSE	0.192	0.036	0.166



รูปที่ 4.25 ความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความไวของข้อมูลการอบแห้งข้าวเปลือก

ในส่วนนี้เป็นการนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เชื่อถือได้จากหัวข้อ 4.4.2 ($R^2 \geq 0.997$, $RMSE \leq 0.192$) ถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ความไวด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความไวบ่งชี้ถึงความสำคัญ (ผลกระทบ) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่มีต่อการลดความชื้นข้าว การใช้พลังงาน และร้อยละผลผลิตข้าวกล้องในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.26 ความสำคัญของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

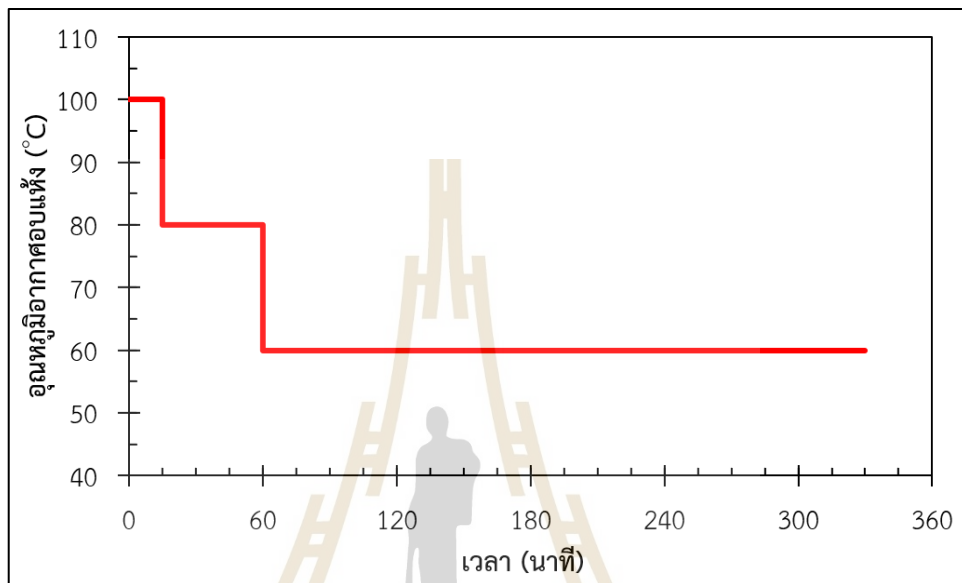
ความสำคัญของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์ความไว ประกอบด้วย T_{paddy} , T_{ime} , T_{air} , T_{surr} และ RH_{surr} ซึ่งมีค่าความสำคัญของตัวแปรเป็น 42.08%, 30.60%, 23.92%, 1.87% และ 1.52% ตามลำดับ แสดงค่าเหล่านี้ในรูปแบบทศนิยมดังรูปที่ 4.26 จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการอบแห้งเป็นตัวแปรอิสระที่มีความโดดเด่นสูงสุด โดยมีความสำคัญเกือบครึ่งหนึ่งของอิทธิพลทั้งหมดที่มีต่อตัวแปรตาม เมื่อเทียบกับตัวแปรอิสระอื่นที่พิจารณา ขณะที่เวลาและอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญรองลงมา นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์ความไวยังแสดงให้เห็นว่าสภาวะอากาศแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้งน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิข้าว เวลา และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จากการศึกษาที่ปัจจัยในหัวข้อก่อนหน้านี้ พบว่าทิศทางการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของอุณหภูมิข้าวเปลือก มีความสัมพันธ์กับทิศทางของเวลา และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง หากพิจารณาผลตามงานวิจัยของ N. Srisang, S. Soponronnarit, R. Thuwapanichayanan, and S. Prachayawarakorn (2016) จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิข้าวเปลือกเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดค่าการถ่ายเทมวล (พิจารณาสมการที่ 2.12 ประกอบการอธิบาย) นอกจากนี้การที่ข้าวมีอุณหภูมิสูงยังส่งผลให้เกิดความเค้นบนเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย ทั้งในแง่ของความเค้นเชิงความร้อนและความเค้นจากการไล่ระดับของความชื้นบนเมล็ด ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ความไวในส่วนนี้จึงตอบข้อสมมติฐานของตัวแปรแอบแฝง (ตัวแปร T_{paddy}) ในหัวข้อที่ 4.4.1 ซึ่งมีความโดดเด่นต่อการลดความชื้น การใช้พลังงาน และร้อยละผลผลิตข้าว ทั้งในแกนองค์ประกอบหลักที่ 1 และหลักที่ 2 ได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นเพียงการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลขจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเทียบเคียงปรากฏการณ์ของระบบอบแห้งจริงในสภาวะที่ตัวแปรต้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ เพียงเท่านั้น (Simulation) เพื่อยืนยันข้อสมมติฐานนี้อย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบข้อเท็จจริงดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.4.4

4.4.4 ผลการตรวจสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการอบแห้งโดยคำนึงถึงอุณหภูมิข้าวเปลือก

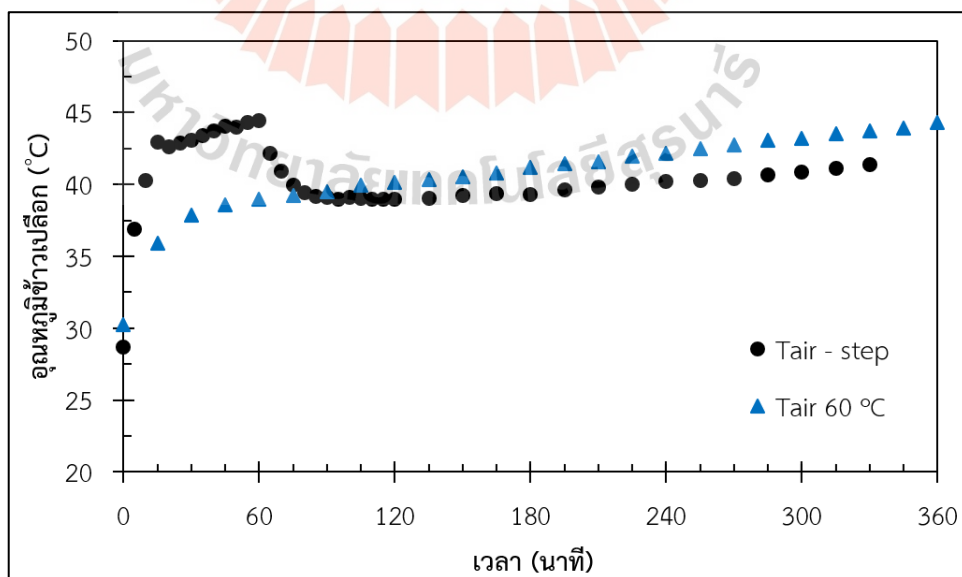
การทดลองในส่วนนี้ได้รับแรงบันดาลใจมาจากงานวิจัยของ Xu et al. (2022) ที่ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบอุณหภูมิสองชั้น (Two-stage temperature drying) งานวิจัยดังกล่าวมีการกำหนดระดับของอุณหภูมิอากาศร้อน 2 ระดับ เพื่อศึกษาสมรรถนะการอบแห้ง และผลกระทบต่อคุณภาพข้าวของรูปแบบการอบแห้งระหว่างเทคนิคอบแห้งแบบอุณหภูมิสองชั้น กับเทคนิคอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ การศึกษานี้ระบุว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิสองชั้นเป็นเทคนิคที่สามารถเข้าช่วยปรับปรุงสมรรถนะของการทำแห้งแบบเดิมอีกทั้งยังส่งเสริมคุณภาพข้าวหลังกระบวนการอบแห้งในทุกมิติ

การทดลองนี้จึงออกแบบภาวะการณ์ (Profile) ของอากาศอบแห้งคล้ายคลึงกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิสองชั้นตามรูปที่ 4.27 โดยมุ่งหวังให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 40°C ถึง 44°C (ต้องการให้อุณหภูมิข้าวมีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไข T_{air} 60°C เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลอง) ทั้งนี้ ภาวะการณ์ของอากาศอบแห้งดังกล่าวเป็นเพียงการกำหนดอย่างอิสระสำหรับตรวจสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการอบแห้งโดยให้ความสำคัญกับอุณหภูมิของข้าวเปลือกในขั้นเบื้องต้นเท่านั้น และผลของการทดลองในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอค่าเฉลี่ยของตัวแปรจากการทดลองเป็นจำนวน 2 ซ้ำ เรียกผลการทดลองในส่วนนี้ว่า ผลการทดลองอบแห้ง

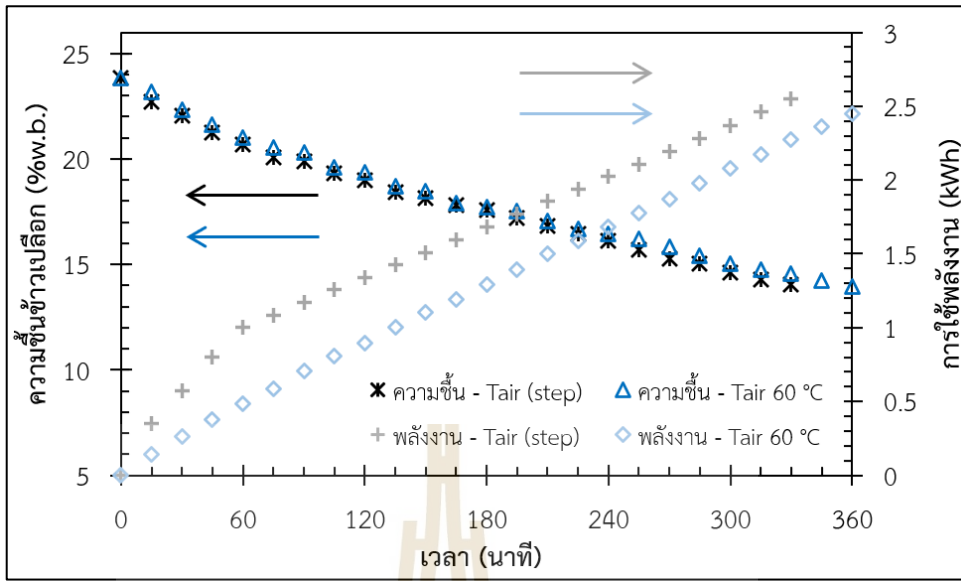
ข้าวด้วยอุณหภูมิอากาศแบบขั้นบันได (T_{air} - step) ผลของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่เปลี่ยนแปลงจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศแบบขั้นบันได แสดงดังรูปที่ 4.28 (จุดสีดำ) ในส่วนของการลดลงของความชื้นข้าวและการใช้พลังงานของวิธีอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศแบบขั้นบันได แสดงดังรูปที่ 4.29 โดยมีการแสดงผลที่ได้เปรียบเทียบกับเงื่อนไข T_{air} 60 °C



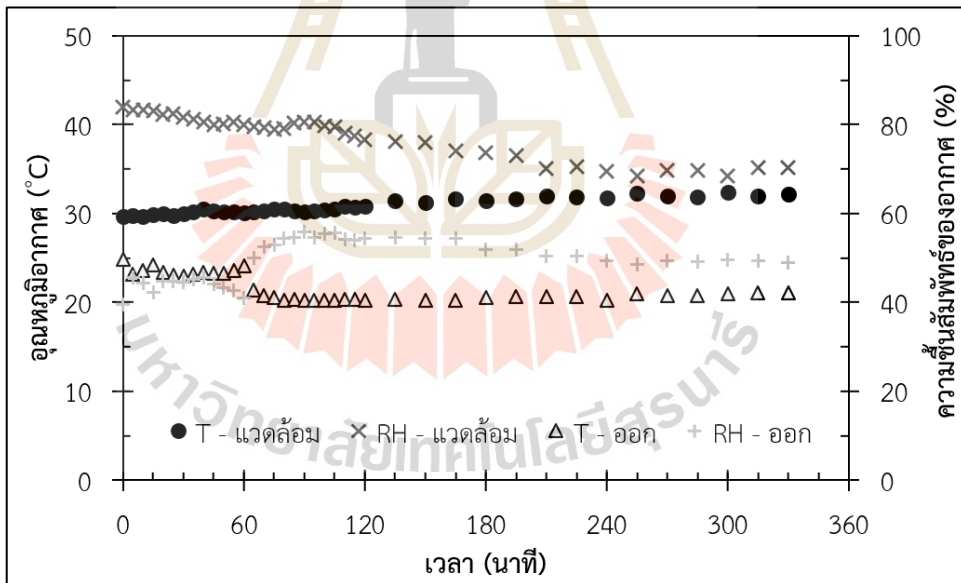
รูปที่ 4.27 ภาวะการณ์ของอากาศอบแห้งแบบขั้นบันได



รูปที่ 4.28 พฤติกรรมของการเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ



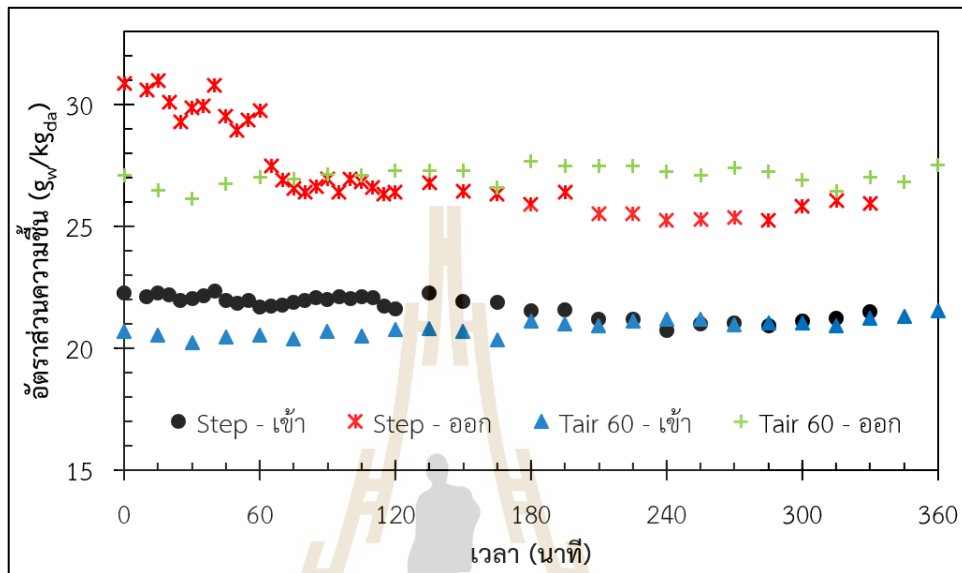
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงความชื้นข้าวและการใช้พลังงานในระบบอบแห้งแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไขอบแห้งแบบขั้นบันได

สภาวะอากาศขาเข้า (แวดล้อม) และออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{air} - step$ ได้รับการบันทึกและแสดงตามรูปที่ 4.30 เมื่อนำข้อมูล มาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศทางเข้าเครื่องอบแห้งและทางออกของไซโคลนจะได้ผลการประเมินค่าอัตราส่วนความชื้นดังรูปที่ 4.31 โดยที่ ข้อมูลจุดสีดำเป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้ง และข้อมูล

จุดสีแดงเป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศออกเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{air} - step$ นอกจากนี้ยังได้ประเมินค่าอัตราส่วนความชื้นทั้งขาเข้า (จุดสีน้ำเงิน) และขาออก (จุดสีเขียว) เครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ สำหรับเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่อากาศอบแห้งได้รับร่วมด้วย

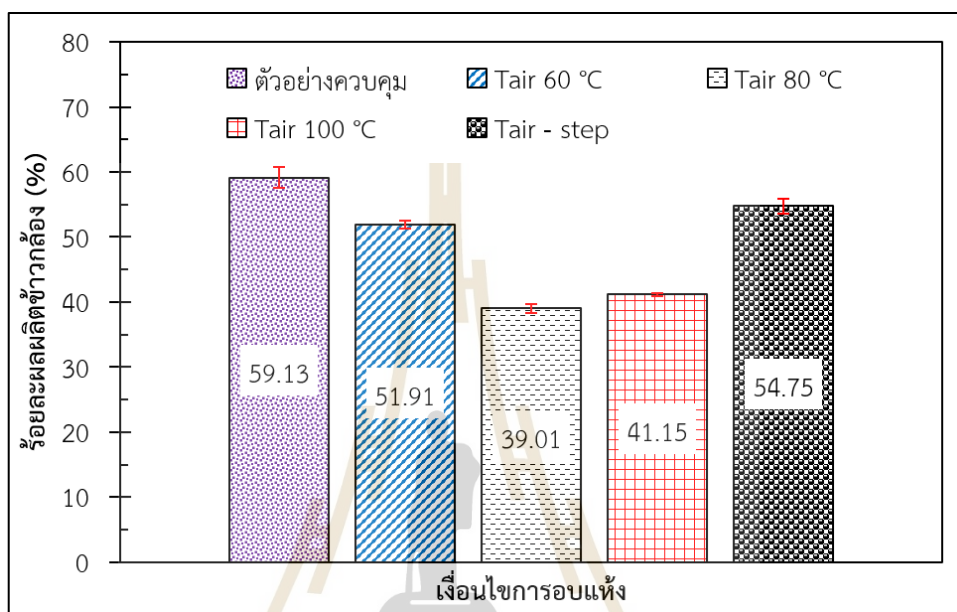


รูปที่ 4.31 อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากรอบแห้งด้วยรูปแบบการอบแห้งต่างกัน

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิข้าวดังรูปที่ 4.28 พบว่า ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรกของการอบแห้ง เนื่องจากข้าวสัมผัสกับอากาศร้อน $100^{\circ}C$ และข้าวยังคงมีแนวโน้มของอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อต้องเผชิญกับอากาศร้อน $80^{\circ}C$ ต่อเนื่องจนถึงนาทีที่ 60 ของกระบวนการ ทำให้ช่วงเวลานี้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงมาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ตามรูปที่ 4.28 และ 4.31 ขณะเดียวกัน การใช้พลังงานของระบบในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นไปด้วยเมื่อเทียบกับเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ตามรูปที่ 4.29 เมื่อผ่านพ้น 1 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีพฤติกรรมลดลงเนื่องจากการพาความร้อนโดยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ $60^{\circ}C$ จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิข้าวในกระบวนการอบแห้งตามรูปที่ 4.28 พบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกของวิธี $T_{air} - step$ ในระยะหลังนี้มีค่าต่ำกว่าเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ที่ระยะเวลาเดียวกันตั้งแต่นาทีที่ 90 เป็นต้นไป จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ ส่งผลให้อากาศร้อนรับความชื้นจากข้าวได้น้อยกว่าเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ตามรูปที่ 4.31 อย่างก็ตามหากพิจารณาจุดสิ้นสุดกระบวนการจากรูปที่ 4.29 จะเห็นว่า วิธี $T_{air} - step$ สามารถลดเวลาของกระบวนการอบแห้งได้ 30 นาที และมีการใช้พลังงานของกระบวนการอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน

พิจารณาคคุณภาพข้าวหลักการอบแห้งจากเงื่อนไขต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.32 พบว่าการอบแห้งแบบ $T_{air} - step$ สามารถเพิ่มร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากวิธีควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ในทุกเงื่อนไข และการแตกหักของข้าว (%Loss) จากการอบแห้งแบบ $T_{air} - step$ มีเพียง 7.40%

ขณะที่เงื่อนไข Tair 60 °C ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 4.3 มีการแตกหักของข้าวต่ำสุดที่ 12.21% เมื่อพิจารณาในภาพรวมจะเห็นว่ากรอบแห้งแบบ Tair – step โดยคำนึงถึงอุณหภูมิข้าวเปลือก ส่งผลดีต่อระบบอบแห้งทั้งในด้านของการปรับปรุงสมรรถนะและการส่งเสริมดัชนีคุณภาพข้าวให้เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.32 ร้อยละผลผลิตข้าวกลองจากเงื่อนไขอบแห้งแบบต่าง ๆ

ผลจากการวิเคราะห์ความไวและการทดลองเพื่อตรวจสอบสมมติฐานในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการอบแห้ง หากต้องการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยพาหะลมร้อนให้ได้ผลลัพธ์ทั้งในเชิงพลังงาน อัตราการอบแห้ง และคุณภาพข้าวที่ดี นักวิจัยควรให้ความสำคัญกับอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการเป็นอันดับแรก เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีค่าผลกระทบต่อกระบวนการสูงถึง 42% เมื่อเทียบกับตัวแปรอิสระอื่นในการศึกษานี้ ดังนั้น ในขั้นตอนการดำเนินงานถัดไป ผู้วิจัยจึงเสนอวิธีอบแห้งข้าวเปลือกโดยมุ่งเน้นไปที่การควบคุมอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเป็นสำคัญตามหัวข้อ 3.14

4.5 ผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือก

ผลการทดลองในหัวข้อนี้ นำเสนอค่าคงที่พีไอดีที่ใช้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอสมรรถนะของการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกจากการนำตัวควบคุมพีไอดีมาชดเชยอุณหภูมิอากาศอบแห้งซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิในกระบวนการจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง และสุดท้ายเป็นคุณภาพของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไข

4.5.1 ค่าอัตราขยายพีไอดีจากการประเมินตามวิธีการแรกของซีเกลอร์-นิโคลส์

จากการประมาณค่าเวลาหมุนวน (L) และค่าเวลาคงที่ (T) ตามเส้นโค้งปฏิกิริยาตอบสนองของกระบวนการที่เงื่อนไข Tair 60 °C พบว่า ค่าคงที่ L มีค่าเท่ากับ 0.7 นาที และ T มีค่าเท่ากับ 22 นาที เมื่อนำค่าเหล่านี้คำนวณตามตารางที่ 2.5 จะได้ว่า ค่าคงที่พี (P) ไอ (I) และ ดี (D) มีค่าเป็น 37.71, 26.94 และ 13.99 ตามลำดับ ค่าคงที่เหล่านี้ถูกนำไปตั้งค่าในตัวควบคุมพีไอดีของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ RKC รุ่น REX-C100 ต่อไป การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งข้าวในเงื่อนไขอุณหภูมิข้าวเปลือกคงที่ 42 °C, 45 °C และ 48 °C เรียกเงื่อนไขเหล่านี้ว่า T_{paddy} 42 °C T_{paddy} 45 °C และ T_{paddy} 48 °C ตามลำดับ

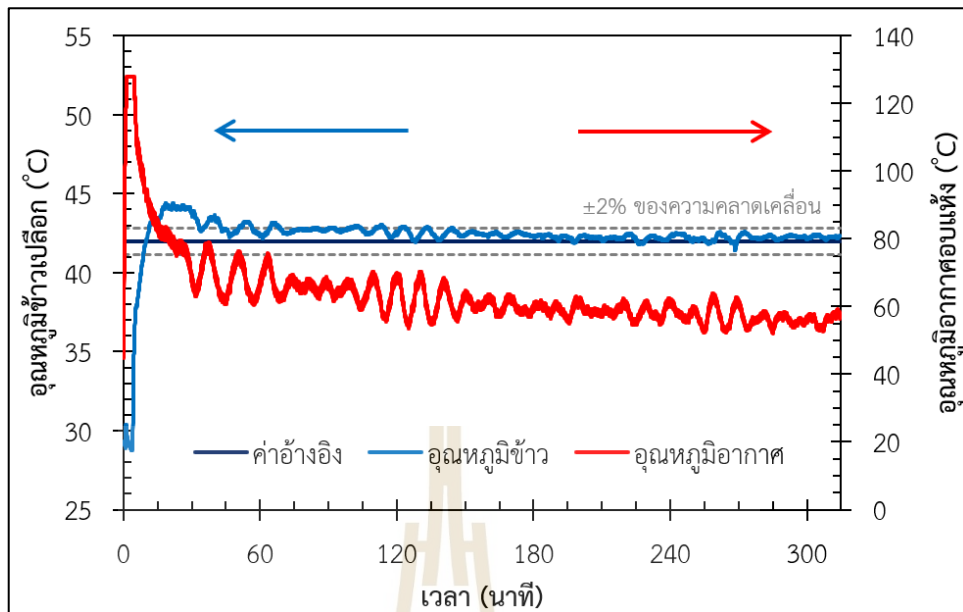
4.5.2 สมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ผลส่วนนี้เสนอการตอบสนองของอุณหภูมิข้าวเปลือกจากการป้อนอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิอย่างสัมพันธ์กับเป้าหมายของอุณหภูมิข้าว ฌ เงื่อนไขอุณหภูมิข้าวเปลือกคงที่ 42 °C 45 °C และ 48 °C พร้อมกับรายงานผลของสภาวะอากาศจากเครื่องอบแห้งที่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการ การนำเสนอผลในส่วนนี้เป็นการเสนอตัวอย่างผลการทดลอง 1 ครั้งจากการทำซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยที่ผลการทดลองแต่ละครั้งมีแนวโน้มของข้อมูลสอดคล้องกัน ทั้งนี้ เพื่อลดจำนวนข้อมูลซ้ำซ้อนซึ่งมากจนเกินไป

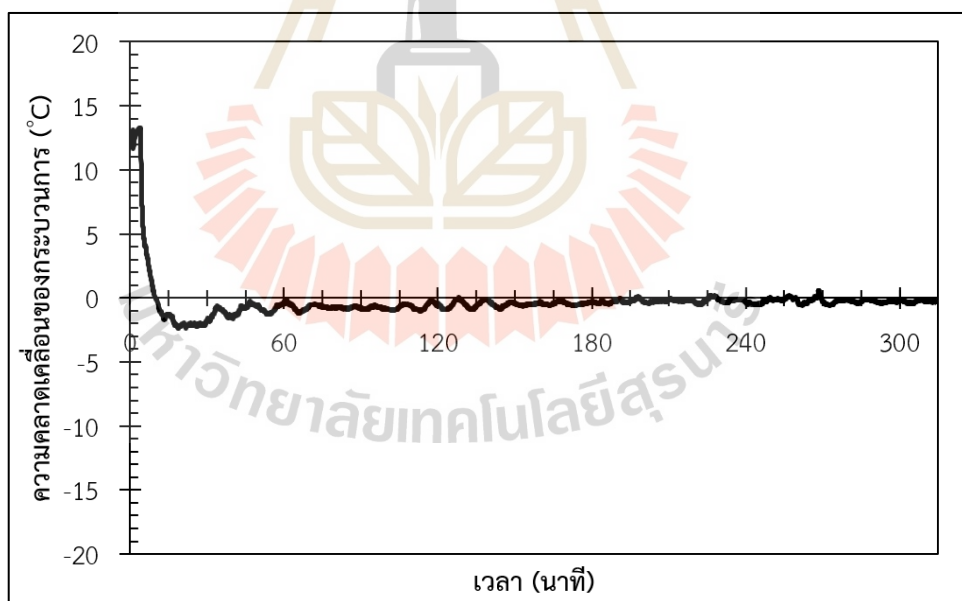
4.5.2.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 42 °C

รูปที่ 4.33 แสดงผลการตอบสนองของกระบวนการ (อุณหภูมิข้าวเปลือก) และอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สัมพันธ์กับสัญญาณชดเชยที่เวลาต่าง ๆ ฌ เงื่อนไข T_{paddy} 42 °C เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของอุณหภูมิข้าวเปลือก (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่า ตัวควบคุมพีไอดีสามารถชดเชยสัญญาณความคลาดเคลื่อนของระบบได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในช่วงที่ระบบเริ่มต้นการทำงาน ค่าผิดพลาดจากกระบวนการมีค่าสูงสุดถึง 13 °C (รูปที่ 4.34) โดยค่าผิดพลาดเหล่านี้ได้รับการชดเชยด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 125 °C ในการอุ่นข้าวให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 นาทีแรก หลังจากนั้นตัวควบคุมพีไอดีจะลดสัญญาณชดเชยลง (ลดอุณหภูมิอากาศอบแห้ง) ตามค่าผิดพลาดที่ลดลง ดังจะเห็นว่า ช่วง 4 ถึง 15 นาที อุณหภูมิอากาศอบแห้งถูกลดลงอย่างรวดเร็ว และมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิ 85 °C ลงมาถึง 70 °C เป็นเวลา 30 นาทีถัดมา หลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศจะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น (ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการลดลง) จนกระทั่งอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีค่าสุดท้ายของกระบวนการอยู่ที่ประมาณ 55 °C ถึง 60 °C

ในแง่ของผลตอบสนองในโดเมนเวลา พบว่า การตอบสนองของกระบวนการมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินอยู่ที่ 5.24% เกิดขึ้นในนาที่ที่ 25 และลู่เข้าเวลาสู่สมดุล (T_s) ใน 45 นาที หลังจากนั้น ผลตอบสนองของกระบวนการจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี มีค่าอยู่ในขอบเขต 2% ของค่าเป้าหมายอ้างอิง (42 °C) ตลอดการทดลอง



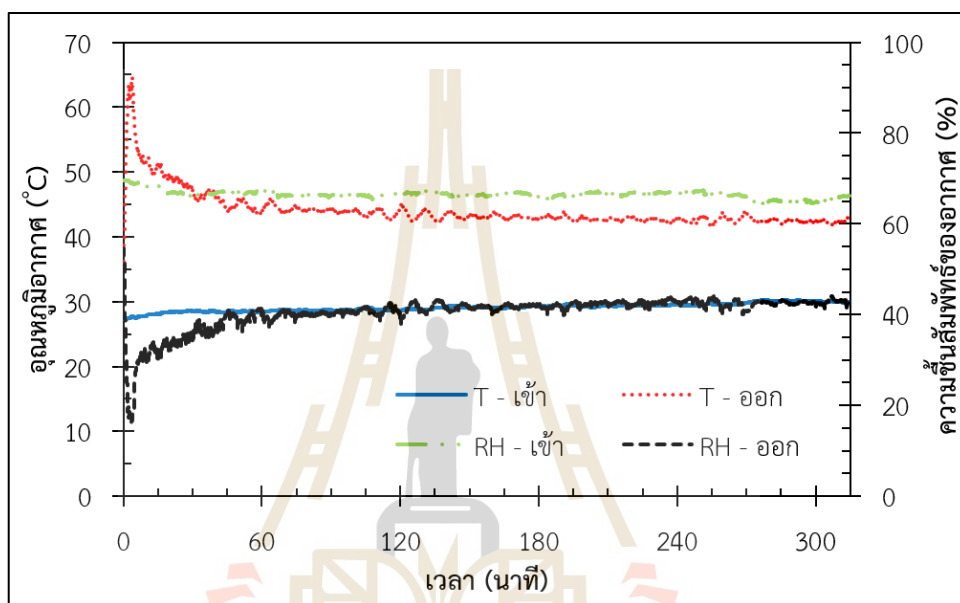
รูปที่ 4.33 อุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.34 ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เวลาต่าง ๆ จากเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิข้าวเปลือกตามรูปที่ 4.34 พบว่า ความผิดพลาดของกระบวนการได้รับการชดเชยจากตัวควบคุมพีไอได้อย่างมีประสิทธิภาพสังเกตได้จากการลดลงของค่าผิดพลาดตามระยะเวลาของกระบวนการ

แม้ว่าระบบจะดำเนินการโดยมีสภาวะรบกวนอยู่โดยรอบเป็นจำนวนมากก็ตาม แต่ตัวควบคุมที่ใช้ทดลองนี้ยังคงความสามารถในการจัดการกับปัญหาได้โดยที่อุณหภูมิข้าวเปลือกยังคงอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน 2% ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ แนวโน้มนี้ให้ผลแบบเดียวกันกับงานวิจัยของ Aisuwarya, and Hidayati (2019) และ Anto, Asumadu, and Okyere (2016) ซึ่งได้ใช้หลักการของ Ziegler–Nichols ปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีเพื่อควบคุมระบบที่เป็นปัญหาหนึ่งตัวแปรต้นและหนึ่งตัวแปรตามให้มีผลตอบสนองที่แม่นยำในระยะยาวในรูปแบบเดียวกัน

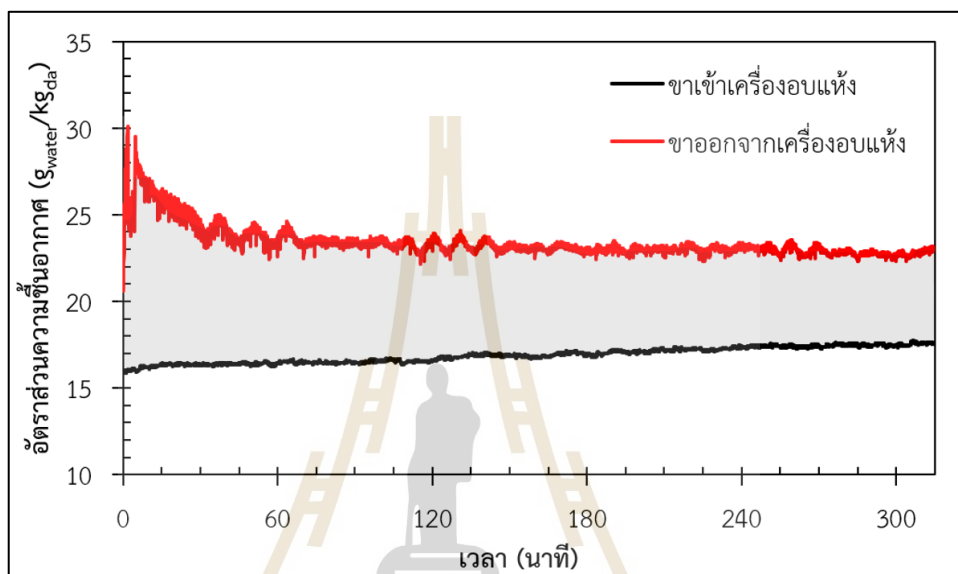


รูปที่ 4.35 สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.35 แสดงสภาวะอากาศทั้งเข้าและออกจากระบบอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ สภาวะอากาศขาเข้าแสดงเป็นอุณหภูมิ (T-เข้า) และ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (RH-เข้า) ของสิ่งแวดล้อมรอบเครื่องอบแห้ง ข้อมูลนี้ถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศฝั่งขาเข้าเครื่องอบแห้งตามเส้นสีดำของรูปที่ 4.36 ขณะที่ สภาวะอากาศขาออก แสดงเป็นอุณหภูมิ (T-ออก) และ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (RH-ออก) ณ ทางออกไซโคลนของเครื่องอบแห้งจากรูปที่ 4.35 ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศฝั่งขาออกจากเครื่องอบแห้งตามเส้นสีแดงของรูปที่ 4.36 ด้วยเช่นกัน

รูปที่ 4.36 แสดงอัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}\text{C}$ ความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศระหว่างขาเข้าและขาออกนี้อธิบายถึงปริมาณน้ำที่อากาศได้รับจากเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งผู้เขียนอธิบายด้วยพื้นที่แรงเงาสีเทา เมื่อพิจารณาขนาดที่แรงเงานี้ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณน้ำที่อากาศได้รับการทดลอง ณ เงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}\text{C}$ มีค่าลดลงตามเวลา ภาวะการณ์นี้สอดคล้องไปกับภาวะการณ์ของอุณหภูมิ

อากาศซึ่งชดเชยโดยระบบควบคุมพีไอดีตามรูปที่ 4.33 เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศอบแห้งมีลักษณะลดลงตามเวลาจากการที่ค่าผิดพลาดของอุณหภูมิข้าวลดลง ซึ่งการที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งลดลง มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำของอากาศอบแห้งที่ลดลงตามไปด้วย (ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่ม)เมื่อพิจารณาตามแผนภาพไซโครเมตริกที่อัตราส่วนความชื้นขาเข้าเท่ากันหรือเปลี่ยนแปลงน้อย

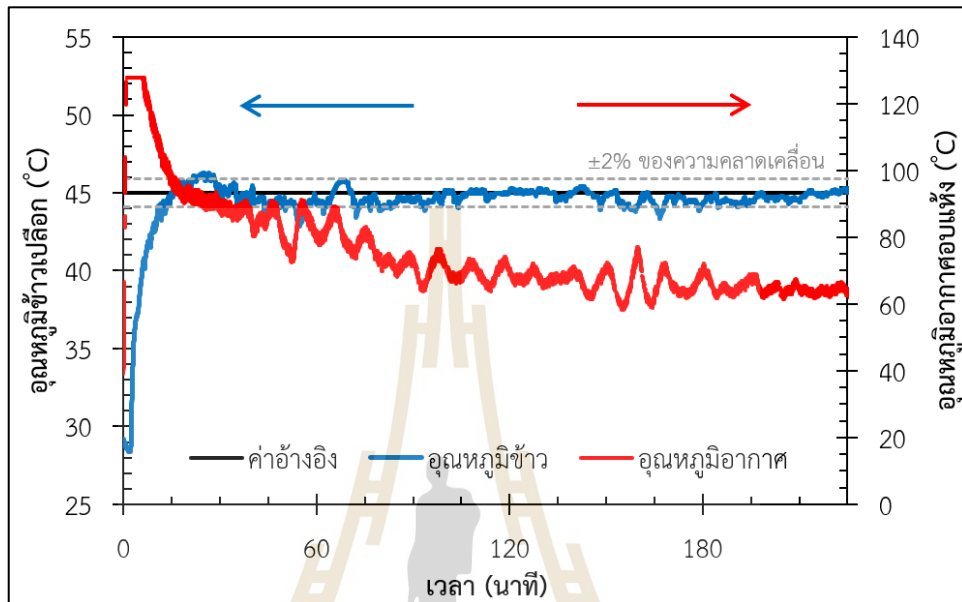


รูปที่ 4.36 อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42^{\circ}\text{C}$

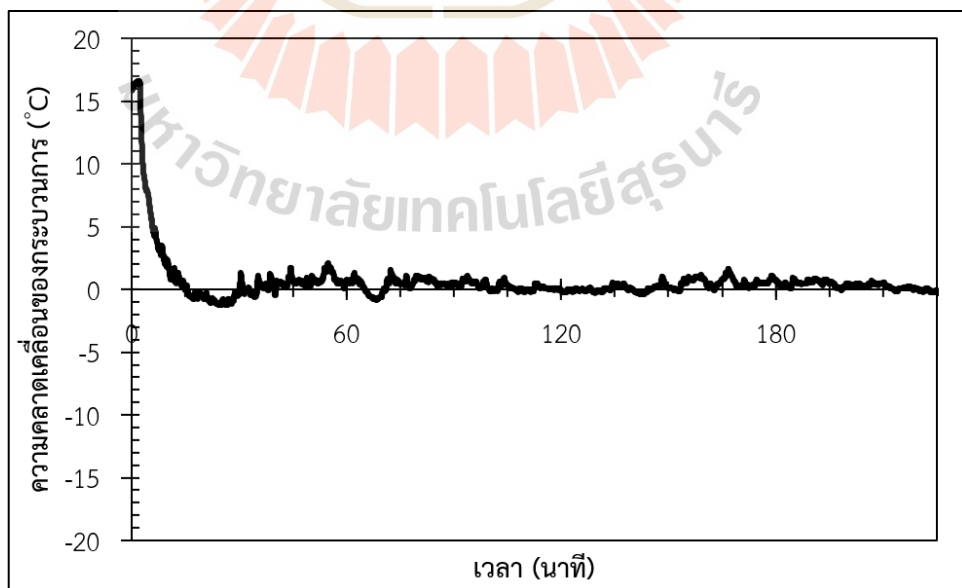
4.5.2.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 45°C

รูปที่ 4.37 แสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สัมพันธ์กับสัญญาณชดเชย ณ เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$ จากผลการทดลองพบว่า พฤติกรรมการชดเชยสัญญาณค่าคลาดเคลื่อนของระบบควบคุมพีไอดีที่ใช้งาน มีลักษณะสอดคล้องกับเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42^{\circ}\text{C}$ ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งมีค่าประมาณ 125°C ในช่วงของการอบแห้งตั้งแต่ 0 ถึง 7 นาทีแรก เนื่องจากระบบควบคุมต้องการชดเชยความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่มากของกระบวนการในระยะแรก (รูปที่ 4.38) หลังจากนั้นระบบจะปรับลดอุณหภูมิอากาศอบแห้งลงอย่างรวดเร็วเพื่อยับยั้งการเกิดเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกินของผลตอบสนองที่อาจเกิดขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่หน้าที่ที่ 18 อุณหภูมิอากาศอบแห้งจะมีอัตราการลดลงอย่างเชื่องช้าตั้งแต่ 95°C ลงมาจนถึง 70°C ณ หน้าที่ที่ 105 ของการอบแห้ง หลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศจะค้างอยู่ที่ระดับประมาณ 65°C จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าผิดพลาดที่ลดลงตามเวลาดังรูปที่ 4.38 เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของระบบ พบว่า อุณหภูมิข้าวเปลือกจากเงื่อนไขนี้มีเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกินเท่ากับ 2.78% และมีเวลาสู่สมดุลที่ 28 นาที ข้อสังเกตที่พบเห็นได้จากรูปที่ 4.37 นี้คือ ระบบมีสิ่งรบกวนเป็นจำนวนมาก ทำให้ข้อมูลที่ผ่านเข้ามาได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่อย่างไรก็ตาม

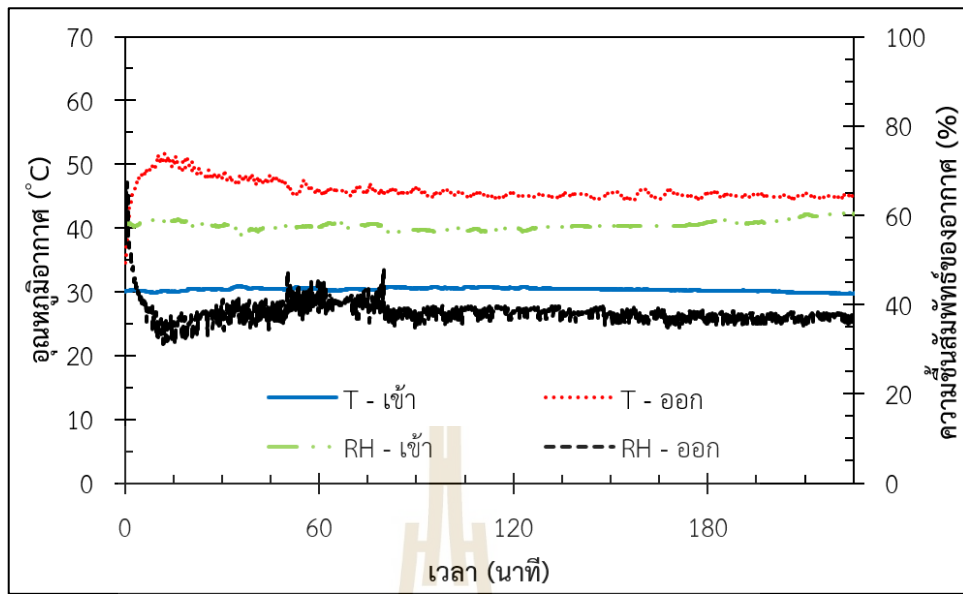
ระบบควบคุมพีไอดีที่ใช้ในการทดลองนี้ยังคงควบคุมตัวแปรดังกล่าวให้ดำเนินไปได้จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ โดยที่ความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัวยังคงอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน 2% ที่ยอมรับได้



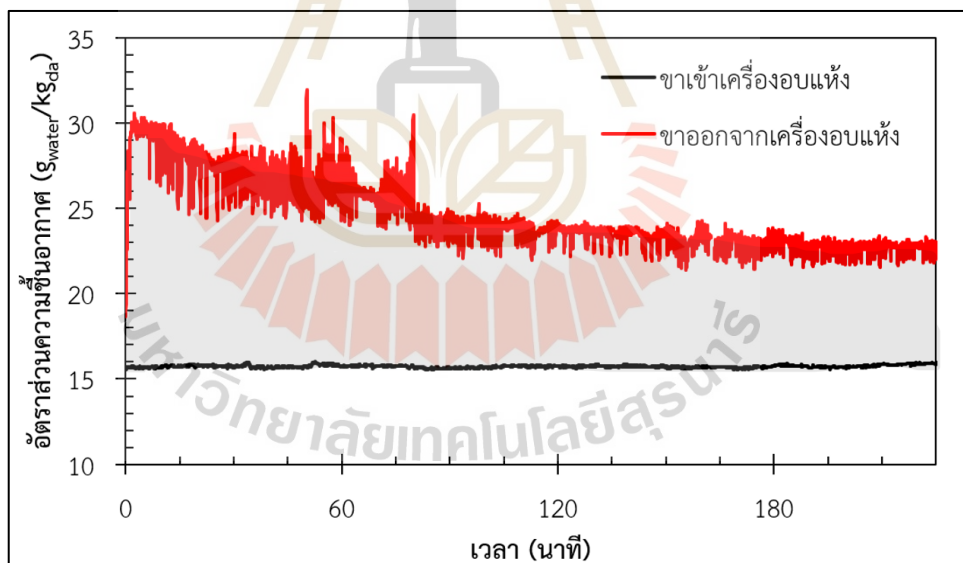
รูปที่ 4.37 อุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.38 ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เวลาต่าง ๆ จากเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.39 สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}\text{C}$



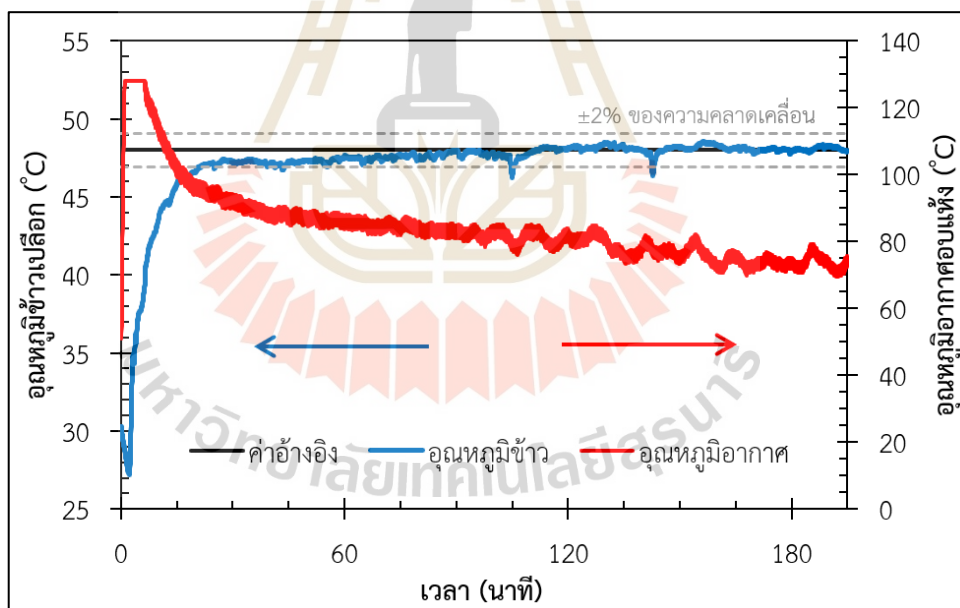
รูปที่ 4.40 อัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}\text{C}$

พิจารณาในแง่ของพฤติกรรมการระเหยน้ำจากวัสดุ (ความชื้นที่อากาศอบแห้งได้รับจากข้าวเปลือก) พบว่า รูปร่างของพื้นที่แรงงามีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปร่างของอุณหภูมิอากาศอบแห้งเช่นเดียวกับเงื่อนไขการทดลองก่อนหน้า โดยที่พื้นที่แรงงาของรูปที่ 4.40 มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่แรงงาของรูปที่ 4.36 สิ่งนี้แสดงถึงความสามารถในการทำแห้งข้าวเปลือกจากเงื่อนไข T_{paddy}

45 °C ซึ่งสูงกว่าเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42$ °C อย่างเห็นได้ชัด ผลการทดลองนี้จะช่วยยืนยันพฤติกรรม การลดความชื้นข้าวเปลือกในหัวข้อ 4.5.3 ได้เป็นอย่างดี

4.5.2.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 48 °C

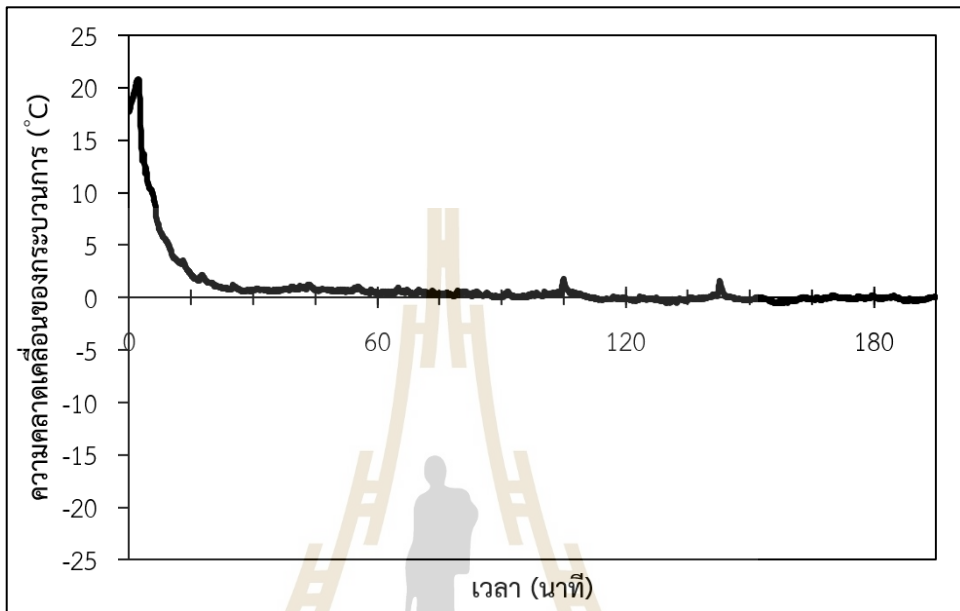
จากรูปที่ 4.41 ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ค่าอ้างอิง 48 °C มีพฤติกรรมสอดคล้องกับการทดลองในสองเงื่อนไขก่อนหน้านี้ โดยเฉพาะการชดเชย ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 125 °C เป็นเวลา 7 นาที ในช่วงเริ่มต้น การทดลอง สำหรับชดเชยความคลาดเคลื่อนกว่า 20 °C ในช่วงเริ่มต้นดังรูปที่ 4.42 หลังจากนั้น ตัวควบคุมจะลดอุณหภูมิอากาศอบแห้งลงอย่างรวดเร็วจาก 125 °C ลงมาสู่ 100 °C ในนาทีที่ 15 ของการทดลอง พฤติกรรมนี้สัมพันธ์กับการลดลงของความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการ ตามรูปที่ 4.42 เมื่อผ่านพ้นนาทีที่ 15 ของกระบวนการ พบว่า อุณหภูมิของอากาศอบแห้งมีพฤติกรรม ลดลงอย่างเชื่องช้าตามเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิ 100 °C ลงไปจนถึง 75 °C ที่เวลา 195 นาที ซึ่งเป็นเวลายุติกระบวนการ ในส่วนของการตอบสนองของอุณหภูมิข้าวเปลือกในเงื่อนไข นี้ไม่พบเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริง และมีเวลาสู่สมดุลที่ 22 นาที โดยภาพรวม ของระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกให้อยู่ในค่า ±2% ของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้



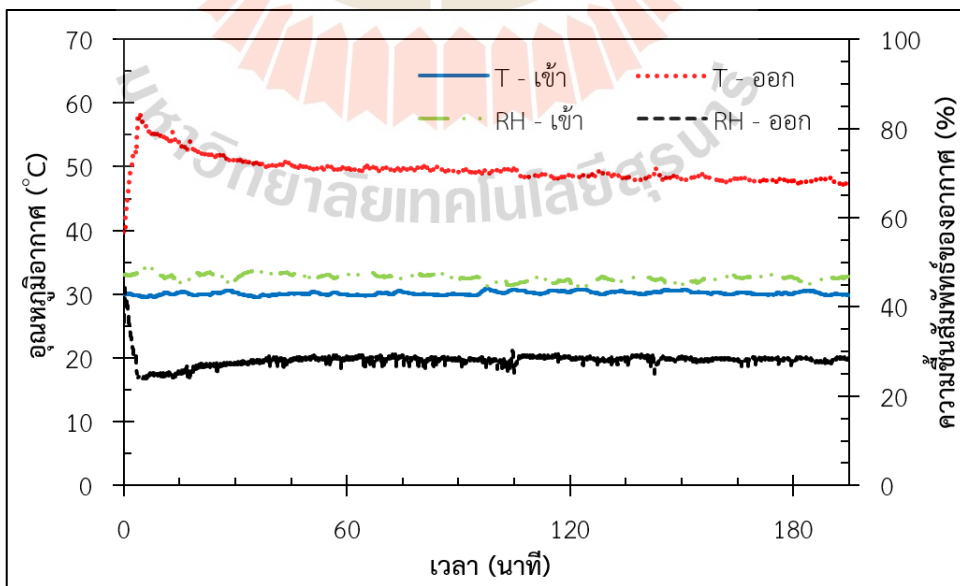
รูปที่ 4.41 อุณหภูมิข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 48$ °C

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของกระบวนการจากการทดลองทั้ง 3 เงื่อนไข ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ พบว่า ตัวควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวระหว่างกระบวนการ อบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำระบบเข้าสู่สมดุลได้ในเวลาตั้งแต่ 22 ถึง 45 นาที และ เวลาสู่สมดุลดังกล่าว เป็นเพียง 10% ถึง 14% ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเท่านั้น

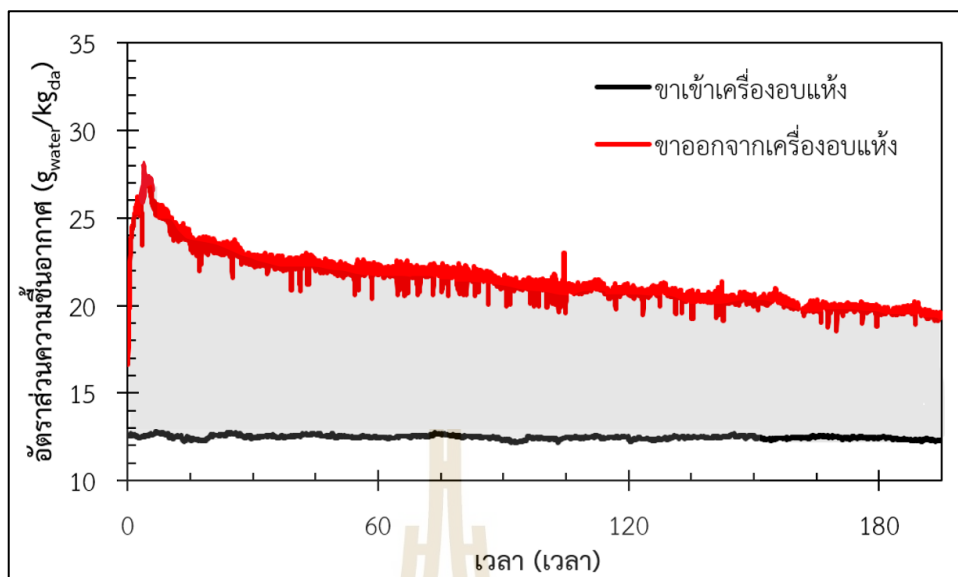
ดังนั้นผู้อ่านจะเห็นได้ว่า สัดส่วนตั้งแต่ 86% ถึง 90% คือช่วงที่ข้าวเปลือกดำเนินการภายใต้ วัตถุประสงค์ของการทดลองอย่างแท้จริง ซึ่งตั้งอยู่บนความคลาดเคลื่อน 2% ที่ยอมรับได้ สิ่งเหล่านี้ เป็นเครื่องการันตีความสามารถของระบบควบคุมพีไอดีที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 4.42 ความคลาดเคลื่อนของกระบวนการที่เวลาต่าง ๆ จากเงื่อนไข $T_{paddy} 48^{\circ}C$



รูปที่ 4.43 สภาวะอากาศขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{paddy} 48^{\circ}C$



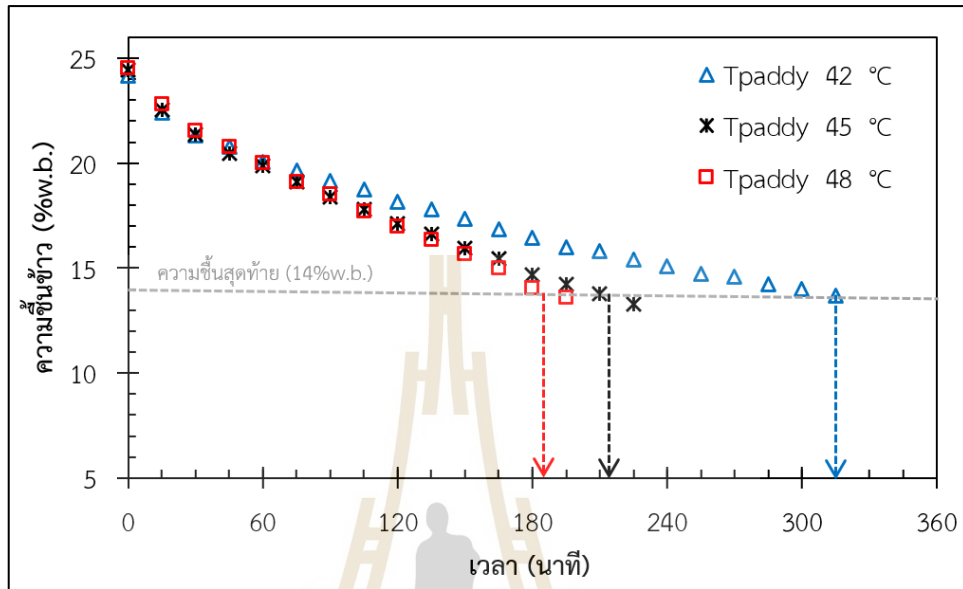
รูปที่ 4.44 อัตราส่วนความชื้นอากาศเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งโดยเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 48^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.44 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งที่เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 48^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณข้อมูลสภาวะอากาศของรูปที่ 4.43 เช่นเดียวกับเงื่อนไขทดลองก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณความชื้นที่อากาศอบแห้งได้รับ พบว่า เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 48^{\circ}\text{C}$ มีแนวโน้มสอดคล้องกับภาวะการณของอุณหภูมิอากาศอบแห้งตามรูปที่ 4.41 ซึ่งอากาศร้อนรับมวลน้ำได้มากในช่วงแรกและมวลน้ำที่อากาศได้รับมีค่าลดลงตามเวลา ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองในเงื่อนไขก่อนหน้านี้

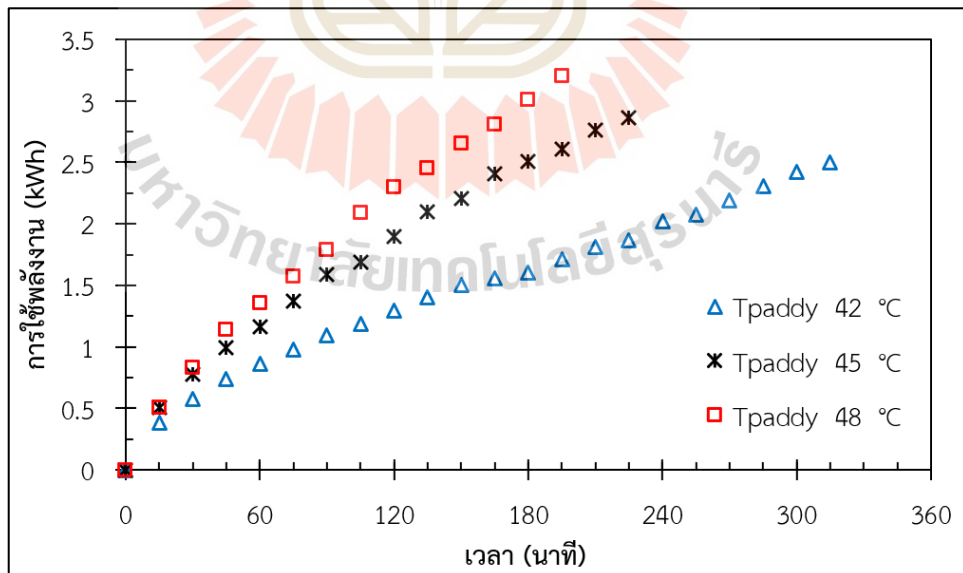
4.5.3 จลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าว

พิจารณาพฤติกรรมการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งตามรูปที่ 4.45 พบว่า ความชื้นข้าวลดลงตามระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้นในลักษณะของความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ (2565) ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับวิทยานิพนธ์นี้ โดยที่แบบจำลองของ Midilli et al. ($MR = a \cdot \exp(-kt) + bt$) สามารถทำนายพฤติกรรมดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวตามเงื่อนไขของอุณหภูมิข้าวเปลือกต่าง ๆ พบว่า การลดลงของความชื้นข้าวเป็นไปได้อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับการอบแห้งด้วยเงื่อนไขของอุณหภูมิข้าวเปลือกสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ข้าวเปลือกได้รับการอบแห้งจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามความต้องการของอุณหภูมิเป้าหมายอ้างอิงของข้าวที่เพิ่มขึ้นตามเงื่อนไขการทดลอง (พิจารณาผลตอบสนองของระบบควบคุมในหัวข้อ 4.5.2 ประกอบ) แต่ในทางตรงกันข้าม การที่ระบบควบคุมทำงานบนเงื่อนไขอุณหภูมิข้าวเปลือกสูงขึ้น ส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเครื่องอุ่นอากาศ

ต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิข้าวเปลือกมีค่าน้อยที่สุดในระหว่างการทดลอง โดยผลของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแต่ละเงื่อนไขการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.45 ความชื้นข้าวเปลือกที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าว



รูปที่ 4.46 การใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าว

จากรูปที่ 4.45 เส้นประสีเทาแสดงถึงความชื้นสุดท้ายของกระบวนการอบแห้ง จุดตัดระหว่างเส้นสีเทากับเส้นแนวโน้มความชื้นข้าวในแต่ละเงื่อนไขบ่งชี้ถึงจุดสิ้นสุดของกระบวนการ เมื่อพิจารณาลงมาในแนวแกน x พบว่า เงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ $T_{paddy} 45^{\circ}C$ และ $T_{paddy} 48^{\circ}C$ ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 315 215 และ 185 นาที ตามลำดับ เงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}C$ สามารถลดเวลาในการอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ ลงได้ 100 นาที (31.75%) และเงื่อนไข $T_{paddy} 48^{\circ}C$ สามารถลดเวลาในการอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ ลงได้ 130 นาที (41.27%) ขณะที่เงื่อนไข $T_{paddy} 48^{\circ}C$ สามารถลดเวลาในการอบแห้งจากเงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}C$ ลงได้ 30 นาที (13.95%)

รูปที่ 4.46 รายงานการใช้พลังงานจากการทดลองในเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ $T_{paddy} 45^{\circ}C$ และ $T_{paddy} 48^{\circ}C$ เป็น 2.5 2.8 และ 3.1 kWh ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ กับ $T_{paddy} 45^{\circ}C$ พบว่า เงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}C$ มีการใช้พลังงานสูงกว่าเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ อยู่ 0.3 kWh (12%) ขณะที่เงื่อนไข $T_{paddy} 48^{\circ}C$ จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงจาก $T_{paddy} 42^{\circ}C$ ขึ้นไปอีกถึง 0.6 kWh (24%)

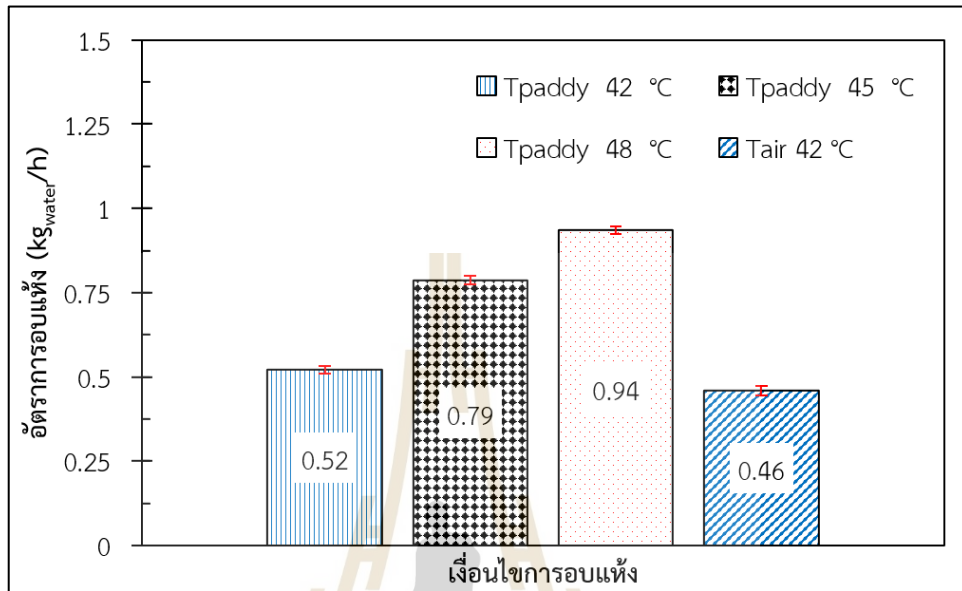
จากข้อมูลทางด้านเวลาและการใช้พลังงานของระบบอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิ ข้าวดังที่กล่าวมา พบว่า เงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}C$ เป็นข้อสังเกตที่น่าสนใจต่อการพิจารณาความเหมาะสมด้านการอบแห้ง เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถลดเวลาการทำแห้งลงได้จากเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ ถึง 31.75% ซึ่งมีข้อแลกเปลี่ยนด้านพลังงานสูงขึ้นเพียง 12% เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 4.3 พบว่า เงื่อนไข $T_{paddy} 45^{\circ}C$ สามารถลดเวลาทำแห้งลงมาได้ถึง 145 นาที (40.28%) และมีข้อแลกเปลี่ยนด้านพลังงานสูงขึ้นเพียง 0.35 kWh (14.28%) อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขที่สังเกตพบดังกล่าว จำเป็นจะต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในมิติอื่น ๆ ดังหัวข้อ 4.5.4 และ 4.5.5 ร่วมด้วย

4.5.4 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าว

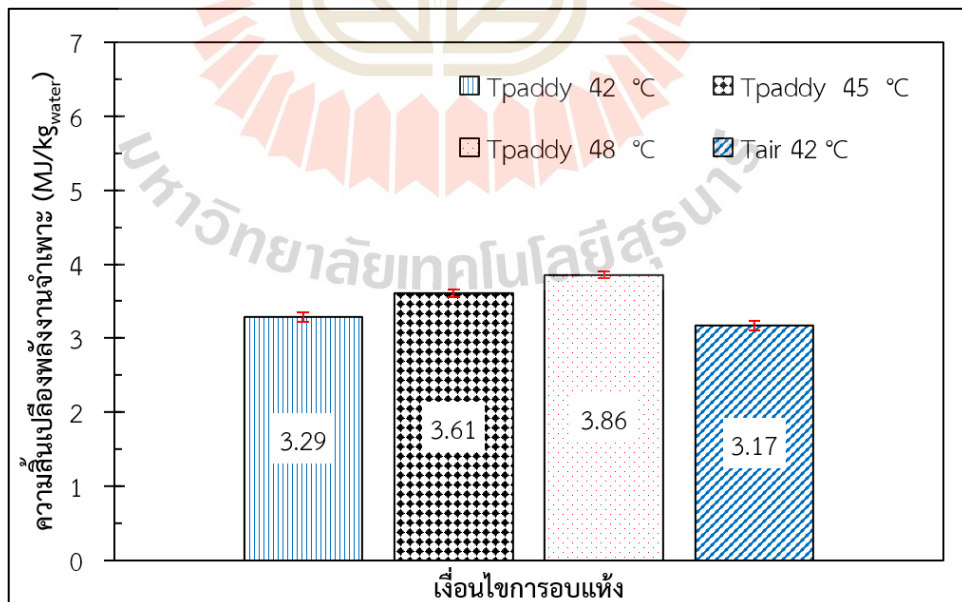
ข้อมูลจากหัวข้อ 4.5.3 ได้รับการประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบอบแห้งในแต่ละเงื่อนไข ประกอบด้วย อัตราการอบแห้ง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ โดยนำเสนอเป็นสมรรถนะการทำงานเฉลี่ยของระบบอบแห้ง สำหรับใช้เปรียบเทียบกับเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากวิธีอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิคงที่ (ATC method) แสดงดังรูปที่ 4.47 และรูปที่ 4.48 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.47 การอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น เป็นไปตามข้อมูลความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศระหว่างขาเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งในหัวข้อ 4.5.2 ซึ่งทำให้กระบวนการอบแห้งยุติเร็วขึ้นด้วยเช่นกัน (รูปที่ 4.45) โดยที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจากเงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ $T_{paddy} 45^{\circ}C$ และ $T_{paddy} 48^{\circ}C$ มีค่าเป็น 0.52, 0.79 และ 0.94 kg_{water}/h ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างผลการทดลองในส่วนนี้กับเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ พบว่า วิธีอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือก (PTC method) มีค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าเงื่อนไข $T_{air} 60^{\circ}C$ ในทุกค่าที่ทำการศึกษา โดยที่เงื่อนไข $T_{paddy} 42^{\circ}C$ $T_{paddy} 45^{\circ}C$ และ $T_{paddy} 48^{\circ}C$ สามารถปรับปรุงอัตราการอบแห้งให้เพิ่มขึ้นได้ 13.04% 71.74% และ 104.34% ตามลำดับ แต่ทว่าวิธีอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิ

ข้าวเปลือกจำเป็นต้องมีข้อแลกเปลี่ยนด้านพลังงานที่สูงขึ้นจากเงื่อนไข $T_{\text{air}} 60^{\circ}\text{C}$ ในทุกเงื่อนไขที่ทำการศึกษาด้วยเช่นกันแสดงดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.47 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเชิงเปรียบเทียบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



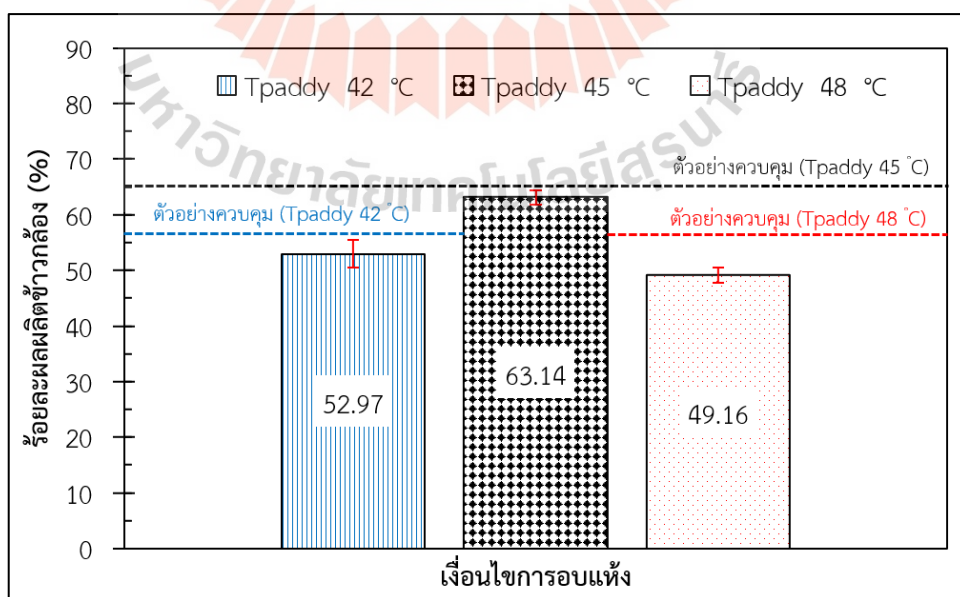
รูปที่ 4.48 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยเชิงเปรียบเทียบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

พิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจากแต่ละเงื่อนไขการทดลองดังรูปที่ 4.48 พบว่า เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$ และ $T_{\text{paddy}} 48^{\circ}\text{C}$ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อยู่ที่ 3.29 3.61 และ 3.86 MJ/kg_{water} ซึ่งสูงกว่าเงื่อนไข $T_{\text{air}} 60^{\circ}\text{C}$ อยู่ 3.78% 13.88% และ 21.77% ตามลำดับ

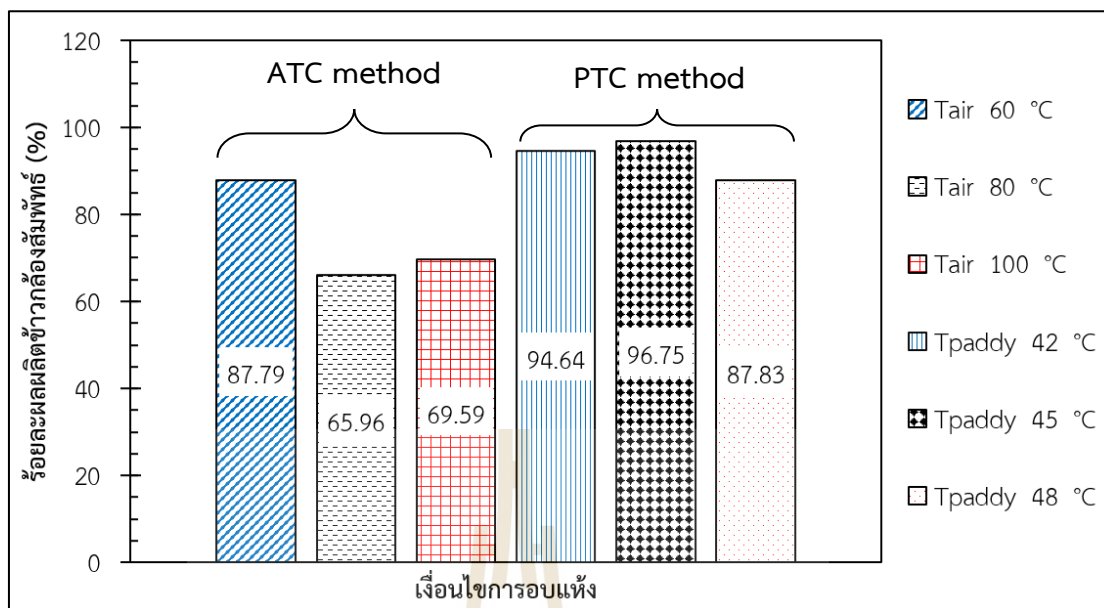
จากข้อมูลเชิงสมรรถนะการทำแห้งที่กล่าวมาในส่วนนี้ ทำให้พบจุดเด่นสำคัญของ PTC method โดยเฉพาะกับเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$ และ $T_{\text{paddy}} 48^{\circ}\text{C}$ ที่เข้ามามีบทบาทในการปรับปรุงอัตราการอบแห้งสูงถึง 71.74% และ 104.34% ตามลำดับ จากเงื่อนไข $T_{\text{air}} 60^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นจุดดำเนินการที่เหมาะสมจาก ATC method โดยมีข้อแลกเปลี่ยนด้านพลังงานเพียง 13.88% และ 21.77% ตามลำดับ ทั้งนี้ ตัวเลขด้านพลังงานอาจมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นเข้าไปในระบบ กรณีที่ระบบได้รับการพิจารณาขยายกำลังการผลิต (ศิวกร ศรีธัญญากร, 2562)

4.5.5 คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าว

ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างและระเบียบวิธีการเตรียมความชื้นในแต่ละครั้งส่งผลให้ตัวอย่างในการทดลอง (ตัวอย่างสำหรับทดลองและตัวอย่างควบคุม) มีการแตกหักที่ไม่เท่ากันในแต่ละครั้งของการเตรียมวัสดุ งานวิจัยนี้จึงตรวจสอบร้อยละผลผลิตข้าวโดยพิจารณาตามแต่ละกลุ่มตัวอย่างดังรูปที่ 4.49 โดยที่เส้นประสีน้ำเงิน สีดำ และสีแดง คือ ค่าร้อยละผลผลิตข้าวกล้องเฉลี่ยของชุดตัวอย่างควบคุม ใช้สำหรับเปรียบเทียบร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์ในการพิจารณาผลได้จากการทดลองที่มีมากกว่า 1 กลุ่มตัวอย่าง และแผนภูมิแท่ง ซึ่งประกอบด้วยแท่งสีน้ำเงิน สีดำ และสีแดง คือ ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องที่ประเมินได้จากเงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 42^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$ และ $T_{\text{paddy}} 48^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำไปประเมินร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์เปรียบเทียบกับ ATC method ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.49 ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องจากกระบวนการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าว



รูปที่ 4.50 ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์เฉลี่ยเชิงเปรียบเทียบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.50 ผลการทดลองประกอบด้วย ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์ จากวิธีอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิคงที่ (ATC method) และวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือก (PTC method) ชุดข้อมูลดังกล่าวบ่งชี้ว่า วิธีอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกสามารถปรับปรุง ร้อยละผลผลิตข้าวกล้องให้สูงขึ้นจากวิธีอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิคงที่ในทุกเงื่อนไข เมื่อเปรียบเทียบ PTC method กับเงื่อนไข $T_{air} 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า เงื่อนไข $T_{paddy} 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{paddy} 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $T_{paddy} 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์สูงกว่า เงื่อนไข $T_{air} 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ อยู่ 8.85% 8.96% และ 0.04% ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า PTC method มีการจ่ายอากาศอบแห้งแบบแปรผัน ตามความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการ โดยมีพฤติกรรมการอบแห้งด้วยอากาศ ร้อนอุณหภูมิ $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วง 5 ถึง 10 นาทีแรกของกระบวนการ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และมวลสูงในช่วงเวลานี้ แม้ว่าในช่วงเวลาดังกล่าวอาจมีเกรเดียนต์ความชื้นเกิดขึ้นสูงก็ตาม แต่หากพิจารณาแนวโน้มผลการจำลองตามงานวิจัยของ N. Srisang, S. Soponronnarit, R. Thuwapanichayanan, and S. Prachayawarakorn (2016) จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ในกระบวนการระยะหลังจะลดหลั่นลงมาเรื่อย ๆ จนกระทั่งอุณหภูมิอากาศอบแห้งเข้าสู่ระยะสมดุล ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตั้งแต่ระยะกลางของกระบวนการอบแห้งเป็นต้นไป ทำให้เกิดสมดุล การแพร่ความชื้นและการระเหยตัวของความชื้นจากเมล็ดข้าวเปลือกออกสู่อากาศในทิศทางที่ดีขึ้น อีกทั้งระบบอบแห้งของงานวิจัยนี้เป็นแบบวนรอบการทำงาน ซึ่งในแต่ละรอบ ข้าวจะมีระยะพักตัว ประมาณ 5-6 นาที ทำให้เกิดช่องของเวลาให้ความชื้นจากแกนกลางของเมล็ดแพร่มายังผิวของเมล็ด ได้ดีขึ้น ลักษณะดังกล่าวอาจช่วยสนับสนุนให้การกระจายความชื้นของเมล็ดข้าวมีความสม่ำเสมอ มากกว่า ATC method ซึ่งผลจากข้อสมมติฐานนี้ได้สะท้อนออกมาในรูปแบบของร้อยละผลผลิต ข้าวกล้องสัมพัทธ์เฉลี่ยจากวิธีนี้ที่สูงกว่า ATC method ตามรูปที่ 4.50 ในทุกเงื่อนไขทดลอง

อย่างไรก็ตาม ผลที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอมาเป็นผล ณ ปลายทางของกระบวนการอบแห้ง การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ความเค้น – ความเครียด (Stress – strain analysis) ที่เกิดขึ้นกับเมล็ดข้าวในกระบวนการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) จะช่วยให้ผู้ศึกษาพบเห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเมล็ด ทั้งในแง่ของการกระจายตัวของความชื้น ณ เวลาอบแห้งใด ๆ ตลอดจนแรงที่กระทำต่อเมล็ดข้าวซึ่งนำมาสู่ผลของการแตกหักข้าวในท้ายที่สุดได้

พิจารณาผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาในส่วนนี้ พบว่า เงื่อนไข $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$ มีจุดเด่นสูงสุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ จากวิธีอบแห้งโดยการควบคุมอุณหภูมิข้าว เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวมีอัตราการอบแห้งและร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสูงกว่าเงื่อนไข $T_{\text{air}} 60^{\circ}\text{C}$ อยู่ 71.74% และ 8.96% ตามลำดับ แม้ว่าจะมีข้อเสียเปรียบด้านพลังงานอยู่ 13.88% ก็ตาม แต่นัยสำคัญด้านอัตราอบแห้งที่โดดเด่นเป็นอย่างมาก ประกอบกับปริมาณข้าวหักที่พบเจอน้อยจากการทดลองทำให้ $T_{\text{paddy}} 45^{\circ}\text{C}$ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการพัฒนากระบวนการควบคุมอัตราส่วนความชื้นจากการหมุนเวียนอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ การทดลองเพื่อค้นหาอิทธิพลที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก และการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมสำหรับเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบอบแห้งแบบพาหะลมดั้งเดิม ซึ่งในหัวข้อนี้ได้แสดงบทสรุปของวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ผลการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

จากการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอากาศร้อนคงที่ 60 80 และ 100 °C พบว่า อัตราการอบแห้งมีค่าเป็น 0.46 0.71 และ 1.11 kg_{water}/h ตามลำดับ ขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมมีค่าเป็น 3.17 5.34 และ 3.99 MJ/kg_{water} ตามลำดับ ในแง่มุมมองดัชนีบ่งชี้คุณภาพข้าว พบว่า การอบแห้งข้าวภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศอากาศร้อนคงที่ 60 80 และ 100 °C มีร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์เป็น 87.79% 65.96% และ 69.59% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง พบว่า เงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศร้อน 60 °C มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดและร้อยละผลผลิตที่ได้มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ดังนั้นจึงพิจารณาเงื่อนไขอากาศอบแห้ง 60 °C เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการทดลองสำหรับใช้เปรียบเทียบการใช้พลังงานและคุณภาพข้าวกับวิธีอบแห้งแบบใหม่ที่นำเสนอภายในวิทยานิพนธ์

5.1.2 ผลการควบคุมสภาวะการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งพาหะลม

การควบคุมสภาวะอากาศอบแห้งจากการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ซ้ำช่วยลดการใช้พลังงานในระบบอบแห้งแบบพาหะลมได้ 3.38% ในเงื่อนไขอบแห้งที่ 80 °C แต่ในเงื่อนไขอบแห้งที่ 60 °C กลับทำให้ระบบมีระยะเวลาดำเนินการยาวนานขึ้น เป็นสาเหตุให้ระบบใช้พลังงานสูงขึ้น 3.92% ตัวเลขดังกล่าวเป็นความเสี่ยงทางด้านพลังงานซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อการประยุกต์ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศอบแห้งกับระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม โดยเฉพาะกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบวงงานที่มีอุณหภูมิทำงานต่ำกว่า 80 °C เป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยและการวิเคราะห์ความไวบ่งชี้ว่า การอบแห้งโดยคำนึงถึงอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อส่งเสริมสมรรถนะและคุณภาพข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญ การควบคุมสภาวะการอบแห้งส่วนถัดไปจึงมุ่งเน้นการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้งเป็นสำคัญ ผลจากการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดีซึ่งปรับแต่งค่าคงที่ตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ทำให้ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกเป็นไปตามเป้าประสงค์

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่การทำงานในสถานะคงตัวมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2% ของอุณหภูมิข้าวเป้าหมายในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ ในส่วนของสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งภายใต้เงื่อนไขควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกคงที่ 42 45 และ 48 °C พบว่า อัตราการอบแห้งมีค่าเป็น 0.52 0.79 และ 0.94 kg_{water}/h ตามลำดับ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมมีค่าเป็น 3.29 3.61 และ 3.86 MJ/kg_{water} ตามลำดับ และร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสัมพัทธ์มีค่าเป็น 94.64% 96.75% และ 87.83% ตามลำดับ

5.1.3 ผลการประเมินเปรียบเทียบการใช้พลังงานและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีควบคุมอุณหภูมิข้าวสามารถปรับปรุงอัตราการอบแห้งและร้อยละผลผลิตข้าวกล้องให้สูงกว่าเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศ 60 °C ได้เป็นอย่างมาก แต่ระบบดังกล่าวต้องแลกมาด้วยการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นจากระบบเดิมเล็กน้อย เมื่อพิจารณาการดำเนินงานที่ผ่านมาทั้งหมด พบว่า เงื่อนไขการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 45 °C มีอัตราการอบแห้งและร้อยละผลผลิตข้าวกล้องสูงกว่าเงื่อนไขอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศ 60 °C อยู่ 71.74% และ 8.96% ตามลำดับ แม้ว่าจะมีข้อเสียเปรียบด้านพลังงานอยู่ 13.88% ก็ตาม แต่นัยสำคัญด้านอัตราอบแห้งที่โดดเด่นเป็นอย่างมาก ประกอบกับปริมาณข้าวหักที่พบเจอน้อยจากการทดลอง ทำให้การอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ 45 °C เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

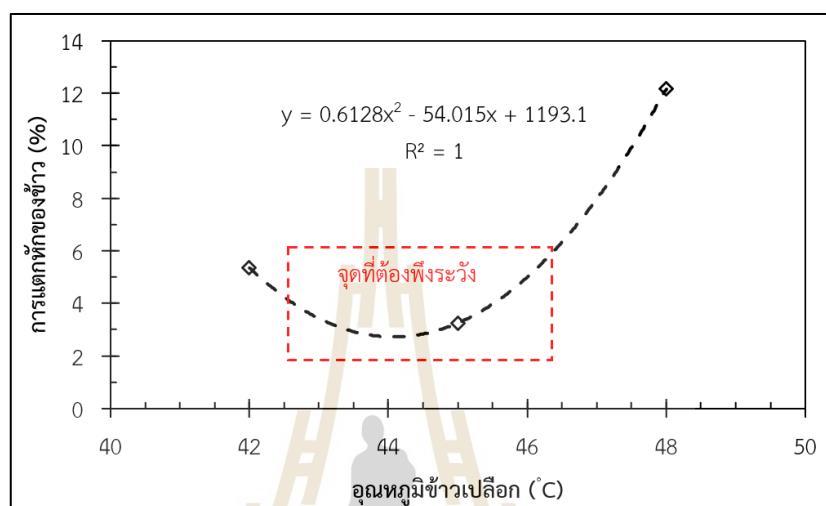
1. แม้ว่าระบบควบคุมอัตราส่วนความชื้นอากาศอบแห้งจากการปรับสัดส่วนอากาศอบแห้งเวียนกลับด้วยวาล์วควบคุมการไหลชนิดโซลินอยด์และชนิดปีผีเสื้อที่พัฒนาขึ้นจากศึกษานี้จะขาดความเหมาะสมต่อระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม แต่ผลการทดลองในงานวิจัยบ่งชี้ว่าระบบหมุนเวียนอากาศสามารถลดการใช้พลังงานของระบบอุ่นอากาศได้ดีขึ้น เมื่อใช้ระบบนี้กับการอบแห้งที่ดำเนินงานภายใต้อุณหภูมิสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการอบแห้งวัสดุอื่นหรือระบบรูปแบบอื่นที่ไม่ต้องพึ่งระวังต่ออุณหภูมิอากาศสูงเกินกว่า 80 °C ขึ้นไปในระยะยาว

2. ผลของร้อยละผลผลิตข้าวกล้องที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอมาเป็นผล ณ ปลายทางของกระบวนการอบแห้งซึ่งมากจากสาเหตุของแรงเค้นที่กระทำต่อเมล็ดข้าวในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ความเค้น - ความเครียด ที่เกิดขึ้นกับเมล็ดข้าวในกระบวนการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะช่วยให้ผู้ศึกษาพบเห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเมล็ด ทั้งในแง่ของการกระจายตัวของความชื้น ณ เวลาอบแห้งใด ๆ ตลอดจนแรงที่กระทำต่อเมล็ดข้าวซึ่งนำมาสู่ผลของการแตกหักข้าวในท้ายที่สุดได้

3. ข้อมูลจากการทดลองนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิข้าวเปลือกที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ระบบมีเวลาอบแห้ง (Time) มีการใช้พลังงาน (Energy) และมีร้อยละการแตกหักข้าว (%Loss) ต่ำที่สุดได้ โดยใช้เทคนิคหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) ได้ต่อไปในอนาคต จากการหาค่าความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันบางประการเพิ่มเติม เช่น $Time = f(MC_{wb}, T_{paddy})$, $Energy = f(Time, T_{paddy})$ และ $\%Loss = f(T_{paddy})$ โดยกำหนดเงื่อนไข

บังคับให้ความชื้นข้าว (MC_{wb}) มีค่าเท่ากับความชื้นสุดท้ายของกระบวนการ และ T_{paddy} มีค่าอยู่ในช่วง 42°C ถึง 48°C เป็นต้น

4. การหาค่าเหมาะสมที่สุดดังข้อที่ 3 ควรคำนึงถึงข้อพึงระวังเกี่ยวกับจุดข้อมูลการทดลองที่น้อยเกินไปตามรูปที่ 5.1 ด้วย



รูปที่ 5.1 จุดที่ควรพึงระวังในการหาค่าเหมาะสมที่สุดเกี่ยวกับฟังก์ชันการแตกหักของข้าว

5. การประยุกต์เทคนิคอื่นในการอุ่นข้าวเปลือกแทนอากาศร้อนหรือใช้ฟังก์ชันการทำงานเสริมกันกับอากาศร้อนอาจทำให้กระบวนการมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานลดลงจากผลของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้

6. การพัฒนาแบบจำลองในการศึกษาพฤติกรรมกรอบแห้งโดยพิจารณากรณีที่อุณหภูมิข้าวเปลือกเปลี่ยนแปลงค่าสัมพันธ์กับดัชนีชี้วัดอื่นมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ตัว อาจส่งผลให้เกิดแนวโน้มที่ดีต่อสมรรถนะการทำแห้งได้ ประเด็นนี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจในการต่อยอดจากงานวิจัย รวมถึงการพัฒนาระบบควบคุมสมัยใหม่เข้ามาใช้กับระบบอบแห้งอุตสาหกรรมที่กล่าวมาอาจทำให้ค้นพบประเด็นใหม่ต่อไปได้ในอนาคต

รายการอ้างอิง

- กรมการค้าต่างประเทศ. (2566). สถิติการส่งออกข้าวหอมมะลิไทย (รายประเทศ/เปรียบเทียบรายปี) เดือนพฤศจิกายน 2566. สืบค้นจาก <https://www.dft.go.th/th-th/DFT-Service/Service-Data-Information/Statistic-Import-Export/Detail-dft-service-datastatistic/ArticleId/27442/-2566>
- กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ. (2567). สรุปสินค้าไทยที่มีศักยภาพในการส่งออกด้วย FTA ในช่วง 7 เดือน ปี 2566 (มค.-กค.). สืบค้นจาก <https://www.dtn.go.th/th/content/category/detail/id/1567/iid/12418>
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4000 - 2560 ข้าวหอมมะลิไทย. กรุงเทพฯ: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- เกียรติศักดิ์ ใจโต, นาฏชนก ปรางปรุ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, จิตรารัตน์ จอกกิว, กระจวี ตรีอำนาจ และ ชีรวัดน์ ชื่นอังศตคต. (2561). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม หมุนเวียน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19, 19(1), 185-188.
- จิตรารัตน์ จอกกิว. (2559). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/7059>
- ชัยวัฒน์ รัตนชัยสกุล. (2564). การจำลองการอบแห้งสำหรับเมล็ดพืชและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา กระจวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). อิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, 8(2), 131-143. สืบค้นจาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/246477>
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีจิตรสมบุญ. (2565). การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบ เป่าพ่นในท่อพ่นปลา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 17(1), 53-63. สืบค้นจาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/sej/article/view/243529>
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา. (2557). เส้นแนวปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/5584>
- ทินกร เพ็ง ประโคน. (2564). การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/9246>

- ธนิต มาลากร. (2561). *ระบบพลวัตและการควบคุม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญทริกา ศิลา, อภิสักดิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). ผลของการหมุนเวียนอากาศทิ้งที่มีต่อการใช้พลังงานในระบบทำความร้อนอากาศ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14*, 14(1), 253-256.
- ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานันท์ ต้นภูมิ, ฉัตรชัย นิยมผล และกิตติ สถาพรประสาธน์. (2559). อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 11(1), 1-9. สืบค้นจาก <https://ejournals.swu.ac.th/index.php/SwuENGj/article/view/7671>
- พรจิต ประทุมสุวรรณ. (2561). *การควบคุมแบบฟuzzyลอจิก*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- มนตรี หวังจิ, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ วทีญญู รอดประพัฒน์. (2542). ระบบอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสีข้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์สาขาวิทยาศาสตร์*, 33(1), 126-133. สืบค้นจาก https://kukrdb.lib.ku.ac.th/journal/KJNS/search_detail/result/273287
- วันชัย สุตะพันธ์, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา. (2555). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบข้าวเปลือกแบบไหลคลุกเคลา: กรณีศึกษาโรงสีข้าวพรเจริญ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 32(4), 418-421. สืบค้นจาก <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/19296>
- ศิวกร ศรีธัญญากร. *การทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคเป่าพ่นหล่นอิสระ* (วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต). สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8731>
- ศุภ โขค แสงสว่าง. (2559). การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับงานทางด้านเกษตร. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 26(2), 319-331. สืบค้นจาก <https://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/kjournal/article/view/620>
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2565). *การอบแห้งผลิตผลการเกษตร: ประสบการณ์ 40 ปี ในการวิจัยและพัฒนา ร่วมกับภาคอุตสาหกรรมเกษตร*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. สืบค้นจาก <https://sites.google.com/mail.kmutt.ac.th/drtl>
- สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. (2567). *สถิติการส่งออกข้าว*. สืบค้นจาก: <http://www.thairiceexporters.or.th/>
- สายชล สีนสมบูรณ์ทอง. (2559). *การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวโดยใช้ SPSS และ MINITAB = Multivariate Analysis by Using SPSS and MINITAB*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จามจุรีโปรดักส์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2565). *ตารางแสดงรายละเอียดข้าวนาปี*. สืบค้นจาก: <https://www.oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดข้าวนาปี/TH-TH>
- สุชาติ ธนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, สักกมน เทพหัสติน ณ อยุธยา และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2555). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 1(2), 1-10. สืบค้นจาก <https://kuojs.lib.ku.ac.th/index.php/jstku/article/view/3292>

- สุรัชย์ เหมหิรัญ และ ประชา บุญยวานิชกุล. (2560). การทบทวนวิธีการควบคุมการลดความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 24(1), 60-68. สืบค้นจาก <http://cmuir.cmu.ac.th/jspui/handle/6653943832/66491>
- สุรัชย์ เหมหิรัญ. (2563). *การพัฒนาาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโพล* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ศึกษาศาสตร์). สืบค้นจาก <http://ir-ithesis.swu.ac.th/dspace/handle/123456789/634>
- อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2565). แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 8(2), 99-109. สืบค้นจาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/246388>
- อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว. (2564). *การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ศึกษาศาสตร์). สืบค้นจาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8950>
- อมร ตอนเมือง, นิรุต อ่อนสลุง และ สุรียา โชคเพิ่มพูน. (2563). การลดพลังงานในการอบลดความชื้นข้าวเปลือกในไซโลขนาด 300 ตัน โดยการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 39(2), 174-181. สืบค้นจาก <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/196911>
- Adeyi, O., Adeyi, A.J., Oke, E.O., Ajayi, O.K., Oyelami, S., Otolorin, J.A., Areghan, S.E. and Isola, B.F. (2022). Adaptive neuro fuzzy inference system modeling of *Synsepalum dulcificum* L. drying characteristics and sensitivity analysis of the drying factors. *Scientific Reports*, 12(1), 13261. doi: 10.1038/s41598-022-17705-y
- Afzali, F., Darvishi, H., and Behrooz-Khazaei, N. (2019). Optimizing exergetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system. *Applied Thermal Engineering*, 154, 358-367. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.096
- Aisuwarya, R., and Hidayati, Y. (2019). Implementation of ziegler-nichols PID tuning method on stabilizing temperature of hot-water dispenser. In *2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*. pp. 1-5. doi: 10.1109/QIR.2019.8898259
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2009). *2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. New York: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- Anto, E. K., Asumadu, J. A., and Okyere, P. Y. (2016). PID control for improving P&O-MPPT performance of a grid-connected solar PV system with Ziegler-Nichols

- tuning method. In *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1847-1852. doi: 10.1109/ICIEA.2016.7603888
- Association of Official Agricultural Chemists. (1990). *Moisture in cereal adjuncts: Air oven method (103 to 104°C)*. Official Methods of Analysis. 15th ed. Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists.
- Atthajariyakul, S., and Leephakpreeda, T. (2006). Fluidized bed paddy drying in optimal conditions via adaptive fuzzy logic control. *Journal of food engineering*, 75(1), 104-114. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.055
- Behera, G., and Sutar, P. P. (2018). Effect of convective, infrared and microwave heating on drying rates, mass transfer characteristics, milling quality and microstructure of steam gelatinized Paddy. *Journal of food process engineering*, 41(8), e12900. doi: 10.1111/jfpe.12900
- Cengel, Y.A., and Boles, M.A. (2011). *Thermodynamics: An Engineering Approach Seventh Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Chayjan, R. A., Ghasemi, A., and Sadeghi, M. (2019). Stress fissuring and process duration during rough rice convective drying affected by continuous and stepwise changes in air temperature. *Drying Technology*, 37(2), 198-207. doi:10.1080/07373937.2018.1445637
- Darvishi, H., Azadbakht, M., and Noralahi, B. (2018). Experimental performance of mushroom fluidized-bed drying: Effect of osmotic pretreatment and air recirculation. *Renewable Energy*, 120, 201-208. doi: 10.1016/j.renene.2017.12.068
- Dunn, W. (2005). *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control*. London: Artech House.
- IBM. (2024). *Neural Networks*. Retrieved from <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/29.0.0?topic=edition-neural-networks>
- Jamil, M. A., Goraya, T. S., Yaqoob, H., Ng, K. C., Shahzad, M. W., and Zubair, S. M. (2021). Exergoeconomic and normalized sensitivity analysis of plate heat exchangers: A theoretical framework with application. *Heat Exchangers*. doi: 10.5772/intechopen.99736
- Jin, Y., Wong, K. W., Yang, D., Zhang, Z., Wu, W., and Yin, J. (2022). A neural network model used in continuous grain dryer control system. *Drying technology*, 40(9), 1901-1922. doi: 10.1080/07373937.2021.1891930
- Kasetorganic. (2566). ข้าวอะไรที่คนไทยไม่เคยได้กิน. สืบค้นจาก: <https://www.kasetorganic.com/thairices/best-jasmine-rice-gi/>
- Khoshroo, A., Emrouznejad, A., Ghaffarizadeh, A., Kasraei, M., and Omid, M. (2018). Sensitivity analysis of energy inputs in crop production using artificial neural

- networks. *Journal of cleaner production*, 197, 992-998. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.249
- Kiam, H. A., Chong, G., and Yun, L. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 13 (4): 559–576. doi: 10.1109/TCST.2005.847331
- Ling, J., Teng, Z., & Lin, H. (2018). Improved method for prediction of milled rice moisture content based on Weibull distribution. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 159-165. Retrieved from <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3429>
- Ljung, L. (2010). Perspectives on system identification. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 1-12. doi: 10.1016/j.arcontrol.2009.12.001
- Mondal, M. H. T., Shiplu, K. S. P., Sen, K. P., Roy, J., and Sarker, M. S. H. (2019). Performance evaluation of small scale energy efficient mixed flow dryer for drying of high moisture paddy. *Drying Technology*, 37(12), 1541-1550. doi: 10.1080/07373937.2018.1518914
- Nimmol, C. (2019). Performance, energy, and product quality aspects of a modified pneumatic dryer for rapid drying of high-moisture paddy. *Transactions of the ASABE*, 62(6), 1531-1539. doi: 10.13031/trans.13347
- Nimmol, C., Sathapornprasath, K., and Devahastin, S. (2012). Drying of high-moisture paddy using a combined impinging stream and pneumatic drying system. *Drying Technology*, 30(16), 1854-1862. doi: 10.1080/07373937.2012.713070
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Pongam, T., Srisertpol, J., and Khompis, V. (2013). PI Controller Design for Temperature Control of Reheating Furnace Walking Hearth Type in Setting up Process. *Advanced Materials Research*, 748, 801-806. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.748.801
- Sarimeseli, A., & Yuceer, M. (2015). Investigation of infrared drying behaviour of spinach leaves using ANN methodology and dried product quality. *Chemical and Process Engineering*, 36(4), 425-436. doi: 10.1515/cpe-2015-0030
- 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.
- Srisang, N., Soponronnarit, S., Thuwapanichayanan, R., and Prachayawarakorn, S. (2016). Modeling heat and mass transfer-induced stresses in germinated brown rice kernels during fluidized bed drying. *Drying Technology*, 34(6), 619-634. doi: 10.1080/07373937.2015.1066385

- Sun, Q., Zhang, M., and Mujumdar, A. S. (2019). Recent developments of artificial intelligence in drying of fresh food: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(14), 2258-2275. doi: 10.1080/10408398.2018.1446900
- Tohidi, M., Sadeghi, M., and Toriki-Harchegani, M. (2017). Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 519-528. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.196
- Vinod, M., Raghuraman, M., and Chakravarthi, V. M. (2020). Experimental investigation of paddy grain drying mechanism. *Paper presented at the Innovative Product Design and Intelligent Manufacturing Systems: Select Proceedings of ICIPDIMS 2019*. doi: 10.1007/978-981-15-2696-1_13
- Xu, X., Zhao, T., Ma, J., Song, Q., Wei, Q., and Sun, W. (2022). Application of two-stage variable temperature drying in hot air-drying of paddy rice. *Foods*, 11(6), 888. doi: 10.3390/foods11060888
- Ziegler, J.G, and Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64, 759–768. Retrieved from [http://staff.guilan.ac.ir/staff/users/chaibakhsh/fckeditor_repo/file/documents/Optimum%20Settings%20for%20Automatic%20Controllers%20\(Ziegler%20and%20Nichols,%201942\).pdf](http://staff.guilan.ac.ir/staff/users/chaibakhsh/fckeditor_repo/file/documents/Optimum%20Settings%20for%20Automatic%20Controllers%20(Ziegler%20and%20Nichols,%201942).pdf)




ภาควิชา

รายละเอียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูลจากเซ็นเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาดของประเทศไทย ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.5 ในส่วนนี้ผู้เขียนได้แนบข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยดังต่อไปนี้

Arduino Due



Arduino Due Front *Arduino Due Back*

Overview

The Arduino Due is a microcontroller board based on the Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU ([datasheet](#)). It is the first Arduino board based on a 32-bit ARM core microcontroller. It has 54 digital input/output pins (of which 12 can be used as PWM outputs), 12 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 84 MHz clock, an USB OTG capable connection, 2 DAC (digital to analog), 2 TWI, a power jack, an SPI header, a JTAG header, a reset button and an erase button.

Warning: Unlike other Arduino boards, the Arduino Due board runs at 3.3V. The maximum voltage that the I/O pins can tolerate is 3.3V. Providing higher voltages, like 5V to an I/O pin could damage the board.

The board contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a micro-USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Due is compatible with all Arduino shields that work at 3.3V and are compliant with the 1.0 Arduino pinout. The Due follows the 1.0 pinout:

- ✦ TWI: SDA and SCL pins that are near to the AREF pin.
- ✦ The IOREF pin which allows an attached shield with the proper configuration to adapt to the voltage provided by the board. This enables shield compatibility with a 3.3V board like the Due and AVR-based boards which operate at 5V.
- ✦ An unconnected pin, reserved for future use.

The Due has a [dedicated forum](#) for discussing the board.

ARM Core benefits

The Due has a 32-bit ARM core that can outperform typical 8-bit microcontroller boards. The most significant differences are:

- ✦ A 32-bit core, that allows operations on 4 bytes wide data within a single CPU clock. (for more information look [int type](#) page).
- ✦ CPU Clock at 84Mhz.
- ✦ 96 KBytes of SRAM.
- ✦ 512 KBytes of Flash memory for code.
- ✦ a DMA controller, that can relieve the CPU from doing memory intensive tasks.

Schematic, Reference Design & Pin Mapping

EAGLE files: [arduino-Due-reference-design.zip](#)
 Schematic: [arduino-Due-schematic.pdf](#)
 Pin Mapping: [SAM3X Pin Mapping page](#)

Summary

Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 12 provide PWM output)
Analog Input Pins	12
Analog Outputs Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130 mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (two banks: 64KB and 32KB)
Clock Speed	84 MHz

Power

The Arduino Due can be powered via the USB connector 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.
- ✦ **3.3V.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 800 mA. This regulator also provides the power supply to the SAM3X microcontroller.
- ✦ **GND.** Ground pins.
- ✦ **IOREF.** This pin on the Arduino board provides the voltage reference with which the microcontroller operates. A properly configured shield can read the IOREF pin voltage and select the appropriate power source or enable voltage translators on the outputs for working with the 5V or 3.3V.

Memory

The SAM3X has 512 KB (2 blocks of 256 KB) of flash memory for storing code. The bootloader is preburned in factory from Atmel and is stored in a dedicated ROM memory. The available SRAM is 96 KB in two contiguous bank of 64 KB and 32 KB. All the available memory (Flash, RAM and ROM) can be accessed directly as a flat addressing space.

It is possible to erase the Flash memory of the SAM3X with the onboard erase button. This will remove the currently loaded sketch from the MCU. To erase, press and hold the Erase button for a few seconds while the board is powered.

Input and Output

- ✦ **Digital I/O: pins from 0 to 53**
Each of the 54 digital pins on the Due can be used as an input or output, using `pinMode()`, `digitalWrite()`, and `digitalRead()` functions. They operate at 3.3 volts. Each pin can provide (source) a current of 3 mA or 15 mA, depending on the pin, or receive (sink) a current of 6 mA or 9 mA, depending on the pin. They also have an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 100 KOhm. In addition, some pins have specialized functions:

- ✦ **Serial: 0 (RX) and 1 (TX)**
- ✦ **Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX)**
- ✦ **Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX)**
- ✦ **Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX)**
Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data (with 3.3 V level). Pins 0 and 1 are connected to the corresponding pins of the ATmega16U2 USB-to-TTL Serial chip.
- ✦ **PWM: Pins 2 to 13**
Provide 8-bit PWM output with the `analogWrite()` function. the resolution of the PWM can be changed with the `analogWriteResolution()` function.
- ✦ **SPI: SPI header (ICSP header on other Arduino boards)**
These pins support SPI communication using the [SPI library](#). The SPI pins are broken out on the central 6-pin header, which is physically compatible with the Uno, Leonardo and Mega2560. The SPI header can be used only to communicate with other SPI devices, not for programming the SAM3X with the In-Circuit-Serial-Programming technique. The SPI of the Due has also advanced features that can be used with the [Extended SPI methods for Due](#).
- ✦ **CAN: CANRX and CANTX**
These pins support the CAN communication protocol but are not yet supported by Arduino APIs.
- ✦ **"L" LED: 13**
There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH, the LED is on, when the pin is LOW, it's off. It is also possible to dim the LED because the digital pin 13 is also a PWM output.
- ✦ **TWI 1: 20 (SDA) and 21 (SCL)**
- ✦ **TWI 2: SDA1 and SCL1.**
Support TWI communication using the [Wire library](#).
- ✦ **Analog Inputs: pins from A0 to A11**
The Due has 12 analog inputs, each of which can provide 12 bits of resolution (i.e. 4096 different values). By default, the resolution of the readings is set at 10 bits, for compatibility with other Arduino boards. It is possible to change the resolution of the ADC with `analogReadResolution()`. The Due's analog inputs pins measure from ground to a maximum value of 3.3V. Applying more than 3.3V on the Due's pins will damage the SAM3X chip. The `analogReference()` function is ignored on the Due.

The AREF pin is connected to the SAM3X analog reference pin through a resistor bridge. To use the AREF pin, resistor BR1 must be desoldered from the PCB.

- ✦ **DAC1 and DAC2**
These pins provides true analog outputs with 12-bits resolution (4096 levels) with the `analogWrite()` function. These pins can be used to create an audio output using the [Audio library](#).

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.

Communication

The Arduino Due has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino or other microcontrollers, and different devices like phones, tablets, cameras and so on. The SAM3X provides one hardware UART and three hardware USARTs for TTL (3.3V) serial communication.

The Programming port is connected to an ATmega16U2, which provides a virtual COM port to software on a connected computer (To recognize the device, Windows machines will need a .inf file, but OSX and Linux machines will recognize the board as a COM port automatically.). The 16U2 is also connected to the SAM3X hardware UART. Serial on pins RX0 and TX0 provides Serial-to-USB communication for programming the board through the ATmega16U2 microcontroller. The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the ATmega16U2 chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

The Native USB port is connected to the SAM3X. It allows for serial (CDC) communication over USB. This provides a serial connection to the Serial Monitor or other applications on your computer. It also enables

the Due to emulate a USB mouse or keyboard to an attached computer. To use these features, see the [Mouse and Keyboard library reference pages](#).

The Native USB port can also act as a USB host for connected peripherals such as mice, keyboards, and smartphones. To use these features, see the [USBHost reference pages](#).

The SAM3X also supports TWI and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the TWI bus; see the [documentation](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

Programming

The Arduino Due can be programmed with the Arduino software ([download](#)). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

Uploading sketches to the SAM3X is different than the AVR microcontrollers found in other Arduino boards because the flash memory needs to be erased before being re-programmed. Upload to the chip is managed by ROM on the SAM3X, which is run only when the chip's flash memory is empty.



Either of the USB ports can be used for programming the board, though it is recommended to use the Programming port due to the way the erasing of the chip is handled :

Programming port: To use this port, select "Arduino Due (Programming Port)" as your board in the Arduino IDE. Connect the Due's programming port (the one closest to the DC power jack) to your computer. The programming port uses the 16U2 as a USB-to-serial chip connected to the first UART of the SAM3X (RX0 and TX0). The 16U2 has two pins connected to the Reset and Erase pins of the SAM3X. Opening and closing the Programming port connected at 1200bps triggers a "hard erase" procedure of the SAM3X chip, activating the Erase and Reset pins on the SAM3X before communicating with the UART. This is the recommended port for programming the Due. It is more reliable than the "soft erase" that occurs on the Native port, and it should work even if the main MCU has crashed.

Native port: To use this port, select "Arduino Due (Native USB Port)" as your board in the Arduino IDE. The Native USB port is connected directly to the SAM3X. Connect the Due's Native USB port (the one closest to the reset button) to your computer. Opening and closing the Native port at 1200bps triggers a 'soft erase' procedure; the flash memory is erased and the board is restarted with the bootloader. If the MCU crashed for some reason it is likely that the soft erase procedure won't work as this procedure happens entirely in software on the SAM3X. Opening and closing the native port at a different baudrate will not reset the SAM3X.

Unlike other Arduino boards which use avrdude for uploading, the Due relies on bossac.

The ATmega16U2 firmware source code is available [in the Arduino repository](#). You can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

USB Overcurrent Protection

The Arduino Due 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 and Shield Compatibility

The maximum length and width of the Arduino Due PCB are 4 and 2.1 inches respectively, with the USB connectors and power jack extending beyond the former dimension. Three 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.

The Arduino Due is designed to be compatible with most shields designed for the Uno, Diecimila or Duemilanove. Digital pins 0 to 13 (and the adjacent AREF and GND pins), analog inputs 0 to 5, the power header, and "ICSP" (SPI) header are all in equivalent locations. Further the main UART (serial port) is located on the same pins (0 and 1). *Please note that I²C is not located on the same pins on the Due (20 and 21) as the Duemilanove / Diecimila (analog inputs 4 and 5).*



24-Bit ADC with Built-in Temperature Sensor (HX710A)**24-Bit ADC with (DVDD-AVDD) Voltage Difference Detection (HX710B)****DESCRIPTION**

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX710(A/B) is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) with built-in temperature sensor (HX710A) or DVDD, AVDD voltage difference detection (HX710B). It's designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input low-noise amplifier (PGA) has a fixed gain of 128, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$, when a 5V reference voltage is connected to the VREF pin. On chip oscillator provides the system clock without any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization. There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX710 are through the pins.

FEATURES

- On-chip temperature measurement (HX710A)
- DVDD and AVDD supply voltage difference measurement (HX710B)
- On-chip low noise amplifier with a gain of 128
- On-chip oscillator requiring no external component
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 40SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption:
 - normal operation $< 1.2\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 8 pin SOP-8 package

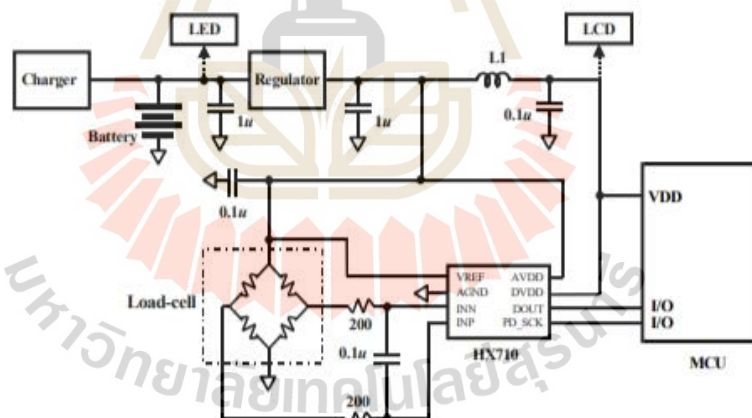
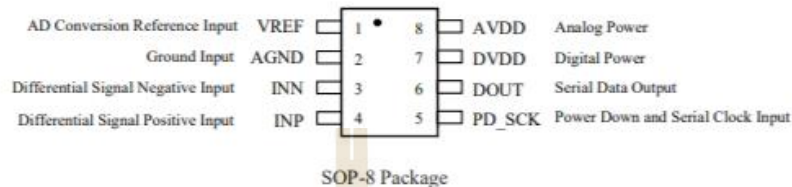


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram using HX710(a/b)

Information contained in this document is for design reference only and not a guarantee. Avia Semiconductor reserves the right to modify it without notice.

Tel: (592) 252-9530 (China)
Email: sales@aviaic.com

AVIA SEMICONDUCTOR
www.aviaic.com

Pin Description

Pin #	Name	Function	Description
1	VREF	Analog Input	Reference input voltage: 1.8 ~ 5.5V (\leq AVDD)
2	AGND	Ground	Analog Ground
3	INN	Analog Input	Differential signal negative input
4	INP	Analog Input	Differential signal positive input
5	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
6	DOUT	Digital Output	Serial data output
7	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V ($DVDD \geq AVDD$)
8	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V

Table 1 Pin Description

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input voltage range	V(inp)-V(inn)	±0.0039*VREF			mV
Effective-Number-of-Bits (ENBs) ⁽¹⁾	Gain=128, Rate=10SPS	19.5			Bits
	Gain=128, Rate=40SPS	18.4			
Noise-Free Bits (NFBs) ⁽²⁾	Gain=128, Rate=10SPS	17.1			Bits
	Gain=128, Rate=40SPS	16.0			
Integral Nonlinearity (INL)	Differential input, end-point fit	±0.001			%of FSR
Common mode input range		AGND+0.9		AVDD-1.3	V
VREF input voltage range		1.8		AVDD	
Output data rate			10/40		Hz
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFF	HEX
Output settling time ⁽³⁾			400/100		ms
Input offset			0.01		mV
Input referred noise			50		nV(rms)
Temperature drift	Input offset		±15		nV/°C
	Gain		±7		ppm/°C
Input common mode rejection			100		dB
Power supply rejection			100		dB
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD	2.6		5.5	V
Analog supply current	Normal		1100		μA
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		μA
	Power down		0.2		

(1) (2) ENBs = $\ln(FSR/RMS\ Noise)/\ln(2)$, NFBs = $\ln(FSR/Peak-to-Peak\ Noise)/\ln(2)$. FSR is full-scale input or output. RMS Noise corresponds to input or output RMS noise. Peak-to-Peak Noise corresponds to input or output peak-to-peak noise.

(3) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics

Analog Input

The differential input is designed to interface directly with a bridge sensor's differential output. It has a fixed gain of 128. The large gains are needed to accommodate the small output signal from the sensor. When a 5V reference is used at the VREF pin, the full-scale differential input voltage range is $\pm 20\text{mV}$.

Power Supply Options

Digital power supply (DVDD) can be connected directly to AVDD supply. But it should be the same or similar voltage as the MCU power supply to ensure proper communication with the MCU.

If battery output is directly connected to DVDD pin and a regulator output is used for AVDD supply, battery output voltage can be detected by detecting the voltage difference between DVDD and AVDD pins (HX710B).

A/D conversion reference voltage (VREF) should be connected to load-cell's supply voltage. It can be connected directly to AVDD or through a resistor to reduce the power consumption by the load-cell.

Clock Source, Output Data Rate and Format

HX710 uses the on-chip oscillator as clock source. The nominal output data rate is 10 or 40SPS.

The output 24 bits of data is in 2's complement format. When input differential signal goes out of the 24-bit range, the output data will be saturated at 800000h (MIN) or 7FFFFFFh (MAX), until the input signal comes back to the input range.

Temperature Measurement

HX710A has an on-chip temperature sensor that can be used to measure system temperature for temperature related system level compensation. It has an effective 15-bit accuracy. Typical measurement resolution is about 20.4 LSB readings/ $^{\circ}\text{C}$ (15 bits).

The on chip digital temperature sensor has significant chip-to-chip variations in offset and gain. When using it for absolute temperature readings, these need to be calibrated out. However, if it's used for temperature related system performance improvement, it's not necessary to calibrate out gain and offset.

Serial Interface

Pin PD_SCK and DOUT are used for data retrieval, input selection, output data rate selection and power down controls.

When output data is not ready for retrieval, digital output pin DOUT is high. Serial clock input PD_SCK should be low. When DOUT goes to low, it indicates data is ready for retrieval. By applying 25~27 positive clock pulses at the PD_SCK pin, data is shifted out from the DOUT output pin. Each PD_SCK pulse shifts out one bit, starting with the MSB bit first, until all 24 bits are shifted out. The 25th pulse at PD_SCK input will pull DOUT pin back to high (Fig.2).

Input selection and output data rate selection is controlled by the number of the input PD_SCK pulses (Table 3). PD_SCK clock pulses should not be less than 25 or more than 27 within one conversion period, to avoid causing serial communication error.

PD_SCK Pulses	Input	Data Rate
25	Differential input	10 Hz
26	Temperature (HX710A)	40 Hz
26	DVDD-AVDD (HX710B)	40Hz
27	Differential input	40 Hz

Table 3 Input and Data Rate Selection

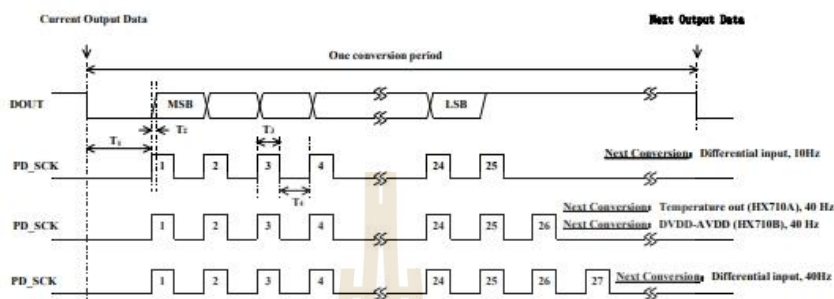


Fig.2 Data output, input and data rate selection timing and control

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T ₁	DOUT falling edge to PD_SCK rising edge	0.1			μs
T ₂	PD_SCK rising edge to DOUT data ready			0.1	μs
T ₃	PD_SCK high time	0.2	1	50	μs
T ₄	PD_SCK low time	0.2	1		μs

Reset and Power-Down

When chip is powered up, on-chip power on reset circuitry will reset the chip.

Pin PD_SCK input is used to power down the HX710. When PD_SCK Input is low, chip is in normal working mode.

When PD_SCK pin changes from low to high and stays at high for longer than 60μs, HX710 enters power down mode (Fig.3). When PD_SCK returns to low, chip will return back to the setup conditions before power down and enter normal operation mode.

If PD_SCK pulse number is changed during the current conversion period, power down should be executed after current conversion period is completed. This is to ensure the change is saved before power down. When chip returns back to normal operation from power down, it will return to the set up conditions of the last change.

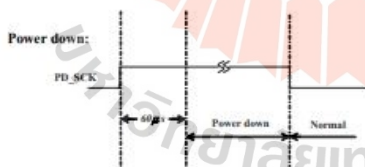
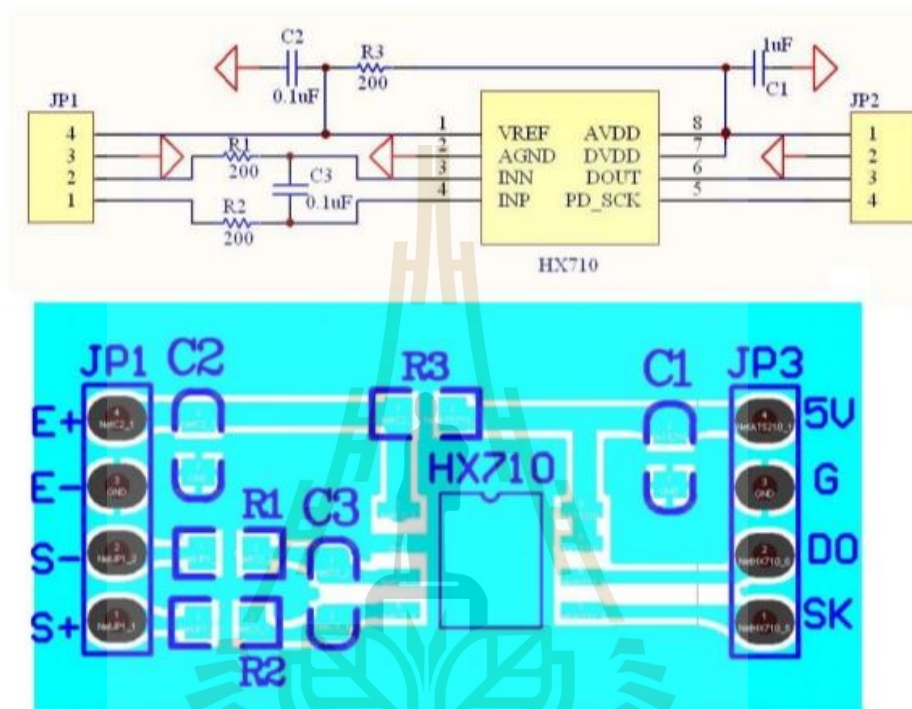


Fig.3 Power down control

Application Example

Fig.1 is a typical weigh scale application using HX710(AB).

Reference PCB Board Design (Single layer)



Reference Driver (Assembly)

```

/*-----
Call from ASM:      LCALL  ReaAD
Call from C:  extern unsigned long ReadAD(void);

                unsigned long data;
                data=ReadAD();
                .
                .
-----*/

PUBLIC      ReadAD
HX710ROM   segment code
rseg       HX710ROM

sbit      ADD0 = P1.5;
    
```



```

sbit      ADSK = P0_0;
/*-----*/
OUT:   R4, R5, R6, R7  R7=>LSB
/*-----*/

ReadAD:
  CLR   ADSK           //AD Enable (PD_SCK set low)
  SETB  ADD0           //Enable 51CPU I/O
  JB    ADD0,$         //AD conversion completed?
  MOV   R4,#24

ShiftOut:
  SETB  ADSK           //PD_SCK set high (positive pulse)
  NOP
  CLR   ADSK           //PD_SCK set low
  MOV   C,ADD0         //read on bit
  XCH  A,R7            //move data
  RLC  A
  XCH  A,R7
  XCH  A,R6
  RLC  A
  XCH  A,R6
  XCH  A,R5
  RLC  A
  XCH  A,R5
  DJNZ  R4,ShiftOut   //moved 24BIT?
  SETB  ADSK
  NOP
  CLR   ADSK
  RET
  END

```

Reference Driver (C)

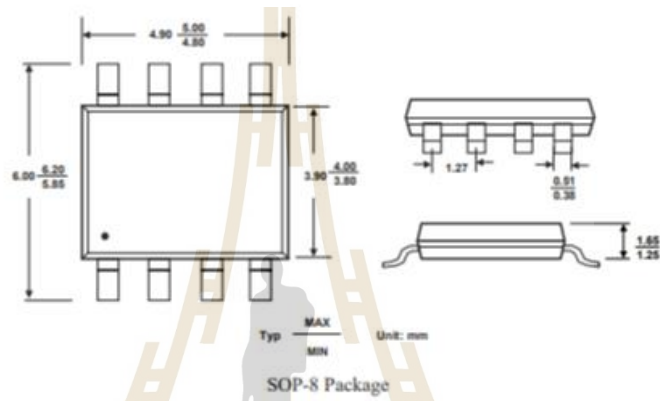
```

/*-----*/
sbit  ADD0 = P1^5;
sbit  ADSK = P0^0;
unsigned long ReadCount(void) {
  unsigned long Count;
  unsigned char i;
  ADD0=1;
  ADSK=0;
  Count=0;
  while(ADD0);
  for (i=0;i<24;i++){
    ADSK=1;
    Count=Count<<1;
    ADSK=0;
    if(ADD0) Count++;
  }
}

```

```
ADSK=1;  
Count=Count~0x800000;  
ADSK=0;  
return(Count);  
}
```

Package Dimensions



Solenoid Valve

2W Brass Series 2-Way Direct Acting Solenoid Valve Normally Closed

●The Professional Solenoid Valves Manufactory

2W | **160** | **15** | **AC220V** | **V**

2 Way Direct Acting
Orifice
Pipe Size
Available Voltage
Blank: NBR
V: For High Temp.

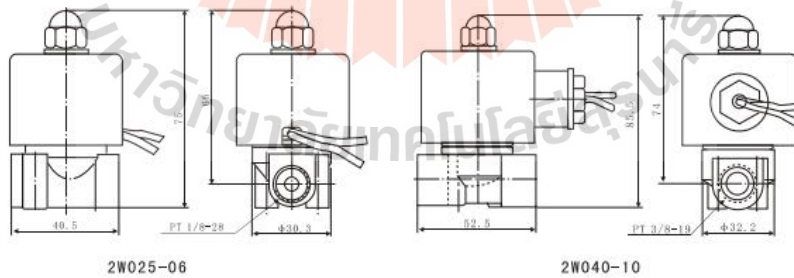
AC: 110V
AC: 220V
DC: 24V
Contact the Factory for Others



Specifications

Model code	2W025-06	2W025-08	2W040-10	2W160-10	2W160-15	2W200-20	2W250-25	2W350-35	2W400-40	2W500-50
Symbol										
Fluid Media	Air, Water, Oil, Gas									
Operating Mode	Direct Acting									
Type	Normally Closed									
Orifice	2.5	4	16	20	25	35	40	50		
Cv Factor	0.23	0.6	4.8	7.6	12	24	29	48		
Pipe Size	1/8"	1/4"	3/8"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
Viscosity	Under 20CTS									
Operating Pressure	Water: 0-7 Air: 0-7 Oil: 0-5									
Fluids Temp.	-5~80°C									
Available Voltage	±10%									
Body Material	Brass									
Seals Material	NBR or VITON									

Construction Dimensions Chart

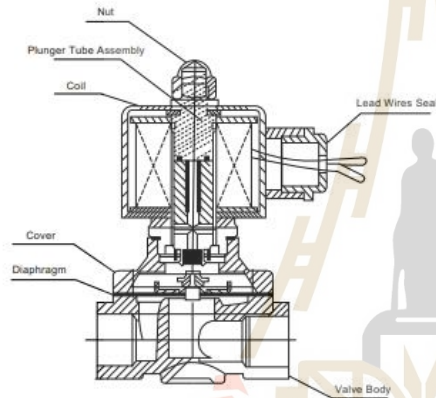
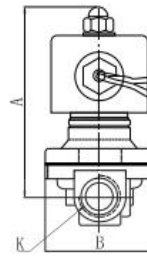
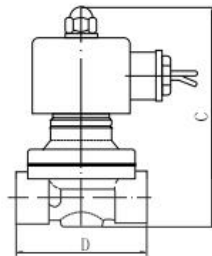




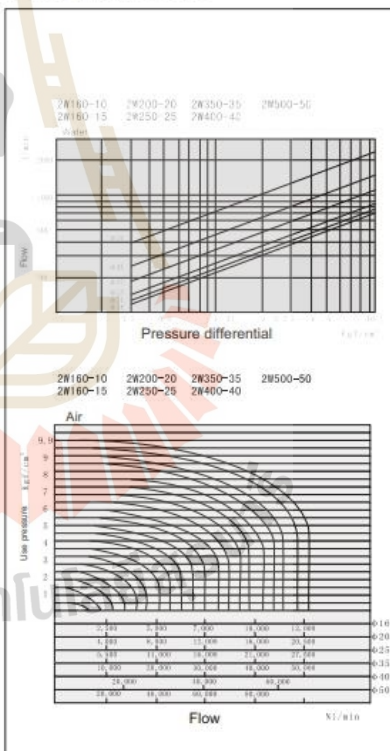
2W Brass Series 2-Way Direct Acting Solenoid Valve Normally Closed

●The Professional Solenoid Valves Manufactory

Construction Dimensions Chart



Fluid Flow Chart



Technical Parameter

Model code	A	B	C	D	K
2W160-10	101.5	57	117	69	PT 3/8"
2W160-15	101.5	57	117	69	PT 1/2"
2W260-20	107	57	123.5	73	PT 3/4"
2W260-25	111.5	73.5	134.5	99	PT 1"
2W360-35	142	95	172	112	PT1 1/4"
2W460-40	142	95	172	123	PT1 1/2"
2W560-50	172	123	209	168	PT2"

Solenoid Valve

2W Stainless Steel Series 2-Way Direct Acting Solenoid Valve Normally Closed

●The Professional Solenoid Valves Manufactory

Technical Parameter

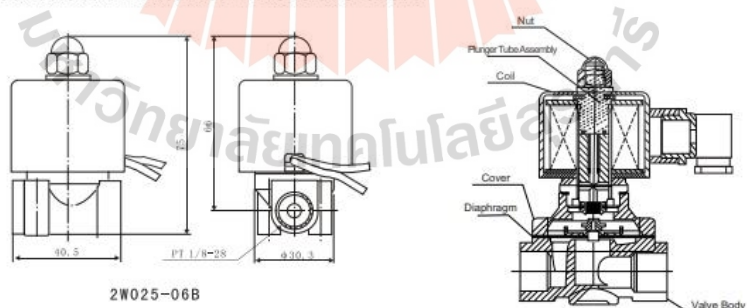
Model code	L	H	Pipe Size
2W025-06B	40.5	75	PT1/8"
2W025-08B	40.5	75	PT1/4"
2W040-10B	52.5	85.5	PT3/8"
2W160-10B	69	117	PT3/8"
2W160-15B	69	117	PT1/2"
2W200-20B	73	123.5	PT3/4"
2W250-25B	99	134.5	PT1"
2W350-35B	112	172	PT1 1/4"
2W400-40B	123	172	PT1 1/2"
2W500-50B	168	209	PT2"
2W250-25FB	135	160	Flange Connector 4 Holes
2W350-35FB	152	212	Flange Connector 4 Holes
2W400-40FB	152	215	Flange Connector 4 Holes
2W500-50FB	200	252	Flange Connector 4 Holes



Specifications

Model code	2W025-06B	2W025-08B	2W040-10B	2W160-10B	2W160-15B	2W200-20B	2W250-25B	2W350-35B	2W400-40B	2W500-50B
Symbol										
Fluid Media	Air, Water, Oil, Gas									
Operating Mode	Direct Acting									
Type	Normally Closed									
Orifice	2.5	4	16	20	25	35	40	50		
Cv Factor	0.23	0.6	4.8	7.6	12	24	29	48		
Pipe Size	1/8"	1/4"	3/8"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
Viscosity	Under 20CTS									
Operating Pressure	Water:0~7 Air:0~7 Oil:0~5									
Fluids Temp.	-5~80°C									
Available Voltage	± 10% AC220V 110V DC24V Contact the factory for Others									
Body Material	S.S.304 (S.S.316 Special Made)									
Seals Material	NBR or VITON									

Construction External Dimensions Chart





2W Brass Series 2-Way Direct Acting Solenoid Valve Normally Open

●The Professional Solenoid Valves Manufactory

Characteristics

Normally open, open when de-energized,
 Closed when energized
 Body material: forged brass
 They are capable of operating at zero differential pressure
 Available voltage:
 Voltage tolerance:



Inapplicable Fluids

Fluids that will turn to liquid after being heated and become solid after being cooled
 Strong corrosive fluids
 Fluids that have kinematic viscosity over 50CST

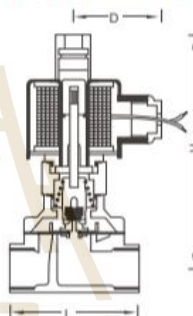
Attention

Make sure the pipe is clean before installing
 Pls fix a Y frame filter in front of the solenoid valve, for longer life-span

Technical Parameter

Model Code	L	H	Pipe Size
2W025-06H	40.5	110	1/8"
2W025-08H	40.5	110	1/4"
2W040-10H	52.5	115	3/8"
2W160-10H	69	135	3/8"
2W160-15H	69	135	1/2"
2W200-20H	73	142	3/4"
2W250-25H	99	150	1"
2W350-35H	112	186	PT1 1/4"
2W400-40H	123	197	PT1 1/2"
2W500-50H	168	225	PT2"

Construction Dimensions Chart



Specifications

Model Code	2W025-06H	2W025-08H	2W040-10H	2W160-10H	2W160-15H	2W200-20H	2W250-25H	2W350-35H	2W400-40H	2W500-50H
Fluid Media	Air, Water, Oil, Gas									
Operating Mode	Direct Acting									
Type	Normally Open									
Orifice	2,5	4	16	20	25	35	40	50		
Cv Rating	0.23	0.6	4.8	7.6	12	24	29	48		
Pipe Size	1/8"	1/4"	3/8"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
Viscosity	20 CTS @ 40°C									
Operating Pressure	Water:0~7 Air:0~7 Oil:0~5									
Fluids Temp.	-5~80°C									
Available Voltage	± 10%									
Body Material	Forged Brass									
Seals Material	NBR or VITON									

Solenoid Valve

2W Stainless Steel Series 2-Way Direct Acting Solenoid Valve Normally Open

●The Professional Solenoid Valves Manufactory

Characteristics

Normally open, open when de-energized,
closed when energized
Body material: forged brass
They are capable of operating at zero differential pressure
Available voltage:
Voltage tolerance:

Inapplicable Fluids

Fluids that will turn to liquid after being heated and
become solid after being cooled
Strong corrosive fluids
Fluids that have kinematic viscosity over 50CST

Attention

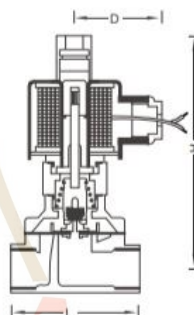
Make sure the pipe is clean before installing
Pis fix a Y frame filter in front of the solenoid valve,
for longer life-span



Technical Parameter

Model Code	L mm	H mm	Pipe Size
ZW025-06BH	40.5	110	1/8"
ZW025-08BH	40.5	110	1/4"
ZW040-10BH	52.5	115	3/8"
ZW160-10BH	69	135	3/8"
ZW160-15BH	69	135	1/2"
ZW200-20BH	73	142	3/4"
ZW250-25BH	99	150	1"
ZW350-35BH	112	186	PT1 1/4"
ZW400-40BH	123	197	PT1 1/2"
ZW500-50BH	168	225	PT2"
ZW250-25FBH	135	160	Flange Connection 4 Holes
ZW350-35FBH	152	230	Flange Connection 4 Holes
ZW400-40FBH	152	240	Flange Connection 4 Holes
ZW500-50FBH	200	270	Flange Connection 4 Holes

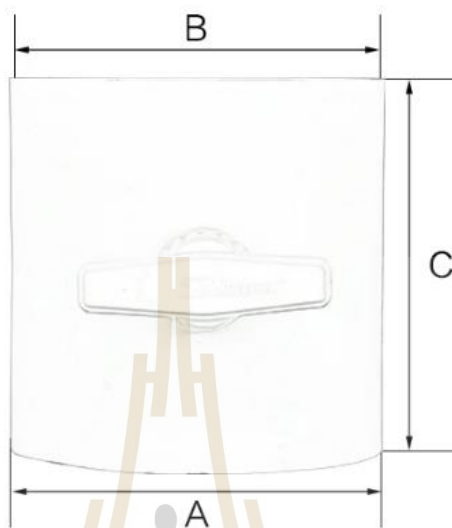
Construction Dimensions Chart



Specifications

Model Code	ZW025-06BH	ZW025-08BH	ZW040-10BH	ZW160-10BH	ZW160-15BH	ZW200-20BH	ZW250-25BH	ZW350-35BH	ZW400-40BH	ZW500-50BH
Fluid Media	Air, Water, Oil, Gas									
Operating Mode	Direct Acting									
Type	Normally Open									
Orifice	2.5	4	16	20	25	35	40	50		
Cv Rating	0.23	0.6	4.8	7.6	12	24	29	48		
Pipe Size	1/8"	1/4"	3/8"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
Viscosity	Under 20CTS									
Operating Pressure	Water:0-7 Air:0-7Oil:0-5									
Fluids Temp.	-5-80°C									
Available Voltage	± 10%									
Body Material	S.S.304									
Seals Material	NBR or VITON									

HVAC Air ท่อวาล์ว/คู่มือ Air DUCT Damper/มอดเตอร์วาล์ว พลาสติก



规格	A (mm)	B (mm)	C (mm)	重量 (g)
75	82	75	146	181
100	98	90	146	235
150	148	140	146	345
200	198	190	146	470

ข้อมูลจำเพาะ

สื่อ	air	อุณหภูมิของ สื่อ	อุณหภูมิปกติ
มาตรฐานหรือ ไม่เป็น มาตรฐาน	มาตรฐาน	สถานะ	คู่มือ
ความดัน	ความดันต่ำ	วัสดุ	พลาสติก
โครงสร้าง	การควบคุมดูแล	การออกใบรับรอง	NONE
ที่มา	CN (แหล่งกำเนิดสินค้า)		



FOTEK SSR SERIES SOLID STATE RELAY

- ★ High Reliability by S.M.T. & TQC.
(Surface Mounting Technology)
- ★ High Isolation over than 50MΩ / 500VDC
- ★ High Dielectric over than 2.5KV
- ★ Low Enable Current less than 7.5mA / 12VDC
C MOS IC or TTL Compatible.
- ★ Low EMI / EFI & Surge by Zero Cross Trigger Method.
- ★ High Surge Current Duration Over 10 Times of Rated Current / One Cycle
- ★ High Surge Voltage Duration by Snubber Circuit.
- ★ 表面貼焊技術及全面品管，提供最可靠的 SSR
- ★ 高絕緣阻抗超過 50MΩ / 500VDC
- ★ 高耐壓超過 2.5KV
- ★ 低觸發電流小於 7.5mA / 12VDC，可與 CMOS IC及 TTL 匹配
- ★ 零點觸發方式避免電磁 / 高頻干擾
- ★ 高耐過電流，超過10倍額定電流/一週期
- ★ 具緩衝迴路可吸收瞬間突破



Guiding of Model

Terminal Type

Ex. **SSR-40 D A-H**

① ② ③ ④ ⑤

- ① **Product 產品別**
SSR: SINGLE PHASE SOLID STATE RELAY
單相固態繼電器
STR: THREE PHASE SOLID STATE RELAY
三相固態繼電器

② **Output Current 輸出電流**

10 : 10A 25 : 25A
40 : 40A 50 : 50A
75 : 75A

③ **Input Voltage 輸入方式**

D: DC 3W ~ 32V < ON/OFF >
A: AC 80 ~ 250V < ON/OFF >
L: 4 ~ 20mA (linear)
V: VARIABLE RESISTER

④ **Output Voltage 輸出電壓**

A: AC VOLTAGE
D: DC VOLTAGE

⑤ **Output Voltage Range 輸出電壓範圍**

H : High Voltage Type < 90 ~ 480VAC >
Non: Standard Type < 24 ~ 380VAC >

PCB Type

Ex. **SSR-P 03 D A**

① ② ③ ④ ⑤

- ① **Product 產品別**
SSR : SINGLE PHASE SOLID STATE

② **Mounting Method 固定方式**

PCB: PCB TYPE

③ **Output Current 輸出電流**

03 = 3A
05 = 5A

④ **Input Method 輸入方式**

D : DC VOLTAGE

⑤ **Output Voltage 輸出電壓**

D : DC 5 ~ 60V
A : AC 24 ~ 280V

SSR SERIES



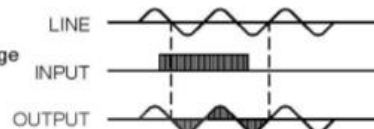
Control Method

Zero Cross Trigger Method

Output TURN ON or TURN OFF only on Zero Cross Point of sine wave , may avoid surge or EMI / RFI occurring.

Specially suited to control resistive , capacitive and Non - saturated inductive loads.

輸出只在正弦波的零點才會動作或復歸，可避免產生突波或 EM / RFI，特別適於控制阻抗性，電容性和不飽和感抗性等負載。

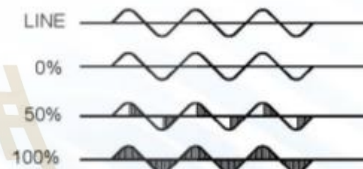


Variable Resistance Control Method

< Trimmer Control Method >

Power Output is Controlled by the Trigger Angle of Triac with Variable Resister 250K Ω /110VAC, 500K Ω /220VAC

輸出功率以可變電阻 250K Ω /110VAC, 500K Ω /220VAC 控制 Triac 觸發角決定輸出功率。



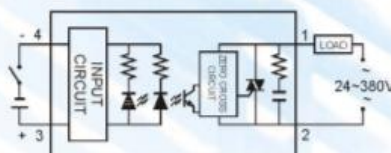
Application Hints

Input	NPN	Output	NO	Input	PNP	Output	NO	Input	L.S.	Output	NO
Input	NPN	Output	NC	Input	PNP	Output	NC	Latch Circuit (AC to AC)			

FOTEK SSR SERIES DC TO AC SOLID STATE RELAY

■ Specification

Type	Terminal Type					PCB Type
Model	SSR-10DA	SSR-25DA	SSR-40DA	SSR-25DA-H	SSR-40DA-H	SSR-P03DA
Rated Load Current	10A	25A	40A	25A	40A	3A
Input Data						
Operating Voltage	3~32VDC					
Min. ON / OFF Voltage	ON > 2.4V , OFF < 1.0V					
Trigger Current	7.5mA / 12V					
Control Method	Zero Cross Trigger					
Output Data						
Operating Voltage	24~380VAC		90~480VAC		24~380VAC	
Min. Black Voltage	600 VAC < Repetive >					
Voltage Drop	1.6 V / 25 C					
Max. Durated Current	135A	275A	410A	275A	410A	135A
Leakage Current	3.0mA	3.0mA	3.0mA	5.0mA	5.0mA	3.0mA
Response Time	ON < 10ms , OFF < 10ms					
General Data						
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC / 1min.					
Isolation Strength	Over 50MΩ / 500VDC					
Operating Temperature	-20 C ~+80 C					
Housing Material	Intensive ABS					
Weight	Appr. 105g					Appr. 15g
Connection Diagram						



FOTEK SSR SERIES HIGH CURRENT DC TO AC SOLID STATE RELAY

■ Specification

Type	Terminal Type			
Model	SSR-50DA	SSR-75DA	SSR-50DA-H	SSR-75DA-H
Rated Load Current	50A	75A	50A	75A
Input Data				
Operating Voltage	3~32VDC			
Min. ON / OFF Voltage	ON>2.4V , OFF<1.0V			
Trigger Current	7.5mA / 12V			
Control Method	Zero Cross Trigger			
Operating Data				
Operating Voltage	24~380VAC	90~480VAC		
Min. Blocking Voltage	600 VAC<Repetitive>			
Voltage Drop	1.6V / 25°C			
Max. Duratde Current	550A	820A	550A	820A
Leakage Current Max.	6.0mA	6.0mA	6.0mA	6.0mA
Response Time	ON<10ms , OFF<10ms			
General Data				
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC/1min.			
Isolation Strength	Over 50M Ω / 500VDC			
Operating Temperature	-20°C ~+80°C			
Housing Material	Intensive ABS			
Weight	Appr. 125g			
Connection Diagram/Dimension				

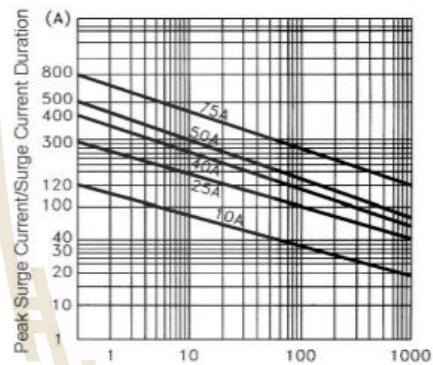
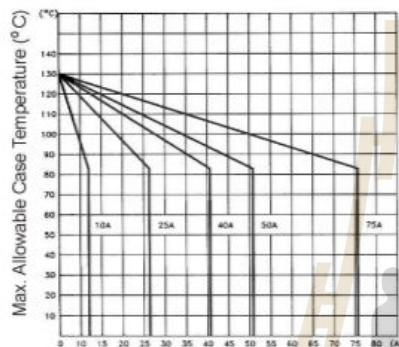
SSR SERIES



Curve of Characteristic

Max. Allowable Case Temperature
最高容許表面溫度

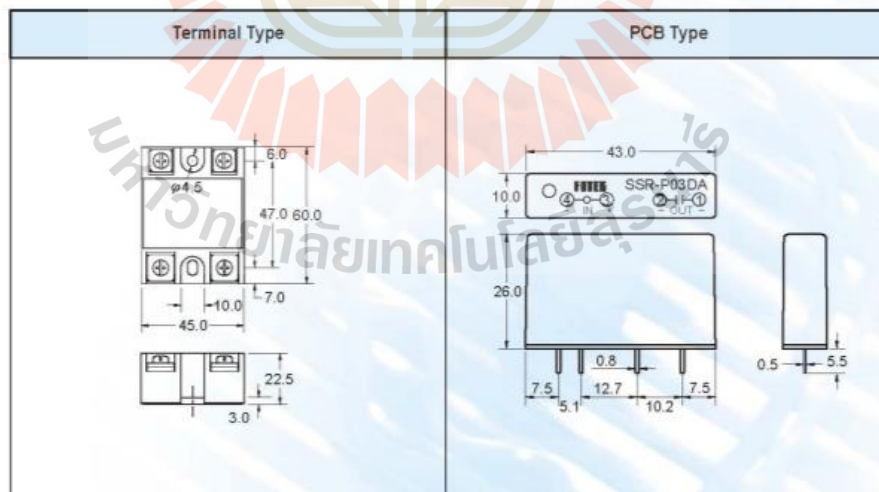
Peak Surge Current/Surge Current Duration
衝擊電流/承受次數



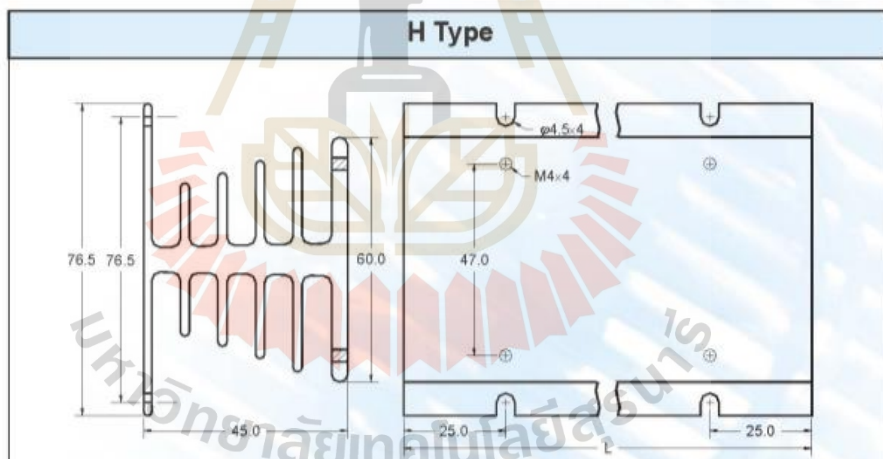
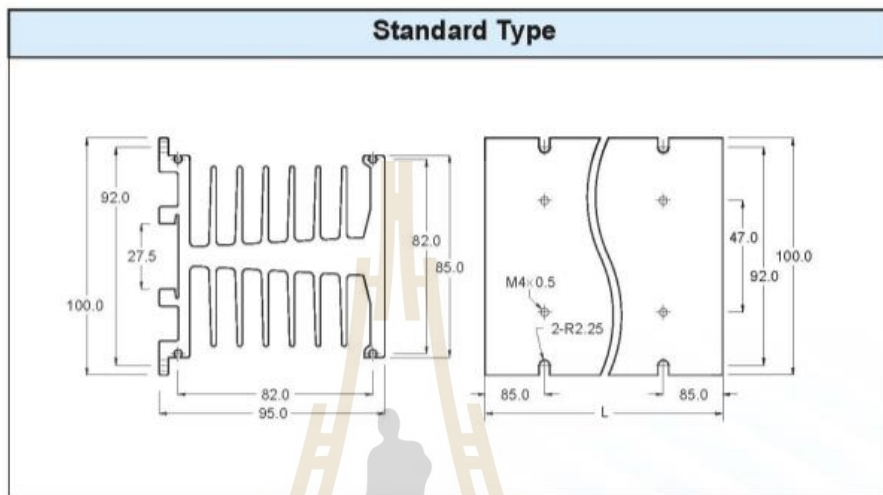
ON State Current (A) 動作電流

Surge Current Duration (Full cycles)

Dimension



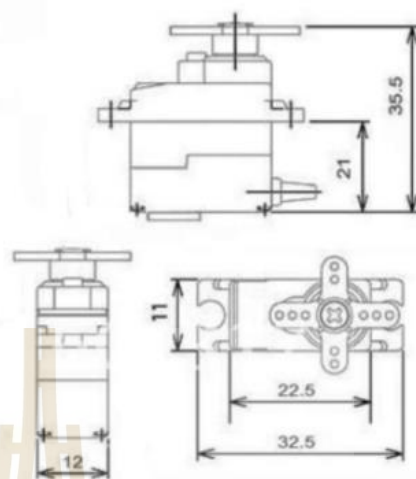
■ Dimension < Heat Sink >



MODEL	LENGTH(L)mm	CURRENT DURATION	PCS OF SSR
HS-50H	50.0	10A MAX.	SIGLE
HS-100H	100.0	25A MAX.	TWICE
HS-150H	150.0	40A MAX.	THREE
HS-200H	200.0		FOUR

MG90S

Metal Gear Servo



MG90S servo, Metal gear with one bearing

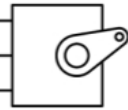
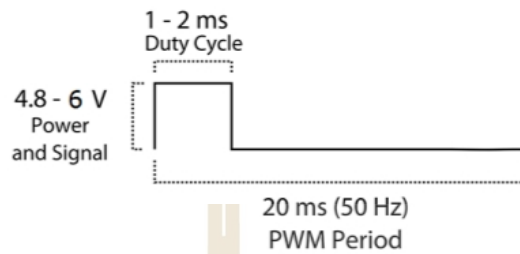
Tiny and lightweight with high output power, this tiny servo is perfect for RC Airplane, Helicopter, Quadcopter or Robot. This servo has *metal gears* for added strength and durability.

Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but *smaller*. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

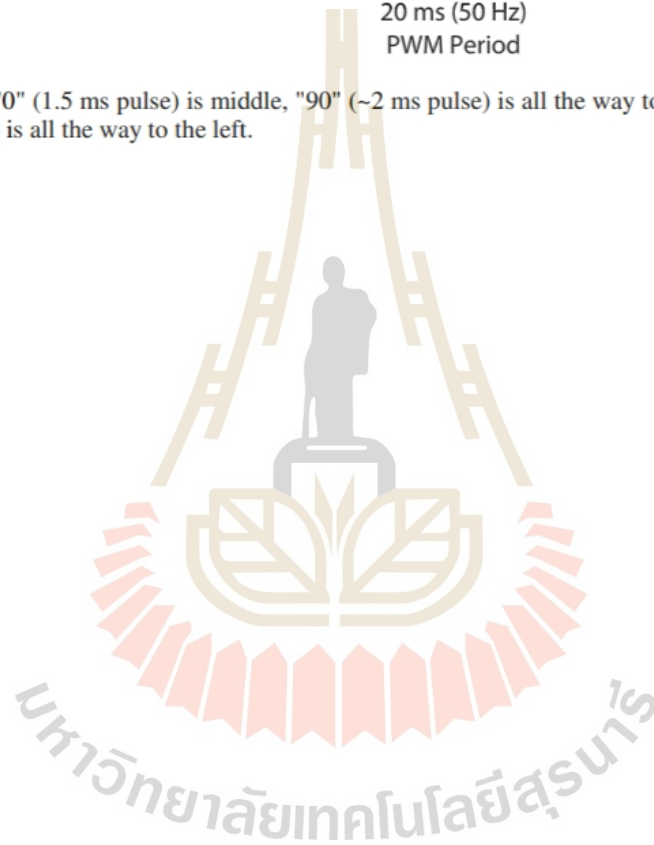
Specifications

- Weight: 13.4 g
- Dimension: 22.5 x 12 x 35.5 mm approx.
- Stall torque: 1.8 kgf-cm (4.8V), 2.2 kgf-cm (6 V)
- Operating speed: 0.1 s/60 degree (4.8 V), 0.08 s/60 degree (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V - 6.0 V
- Dead band width: 5 μ s

PWM=Orange (⌋⌋)
 Vcc = Red (+)
 Ground=Brown (-)

Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2 ms pulse) is all the way to the right, "-90" (~1 ms pulse) is all the way to the left.

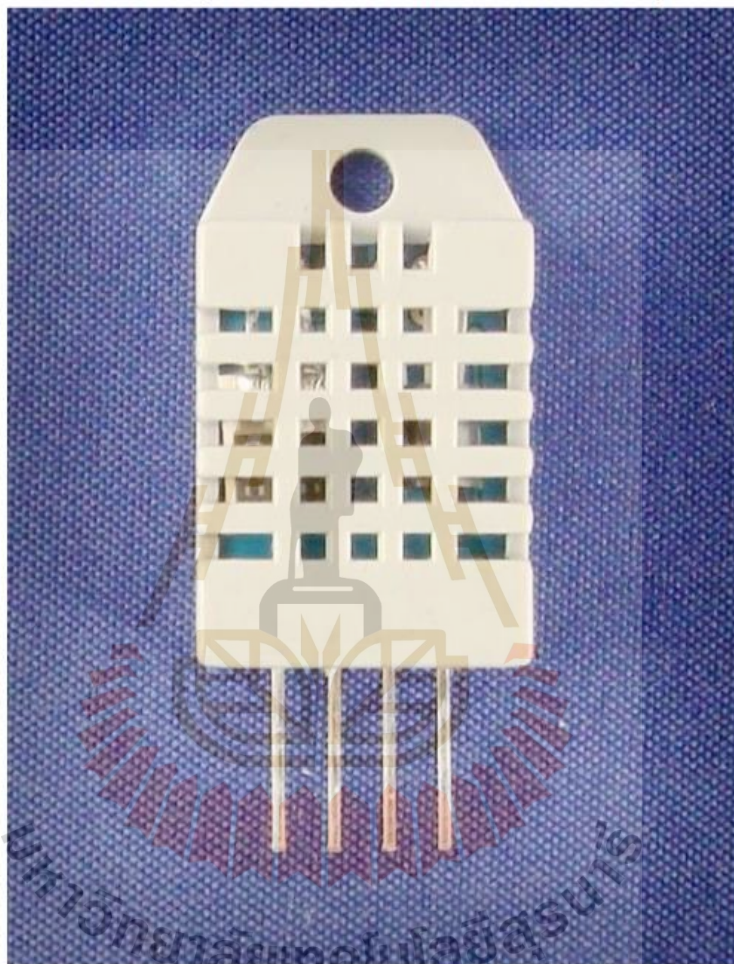


Aosong Electronics Co.,Ltd

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:

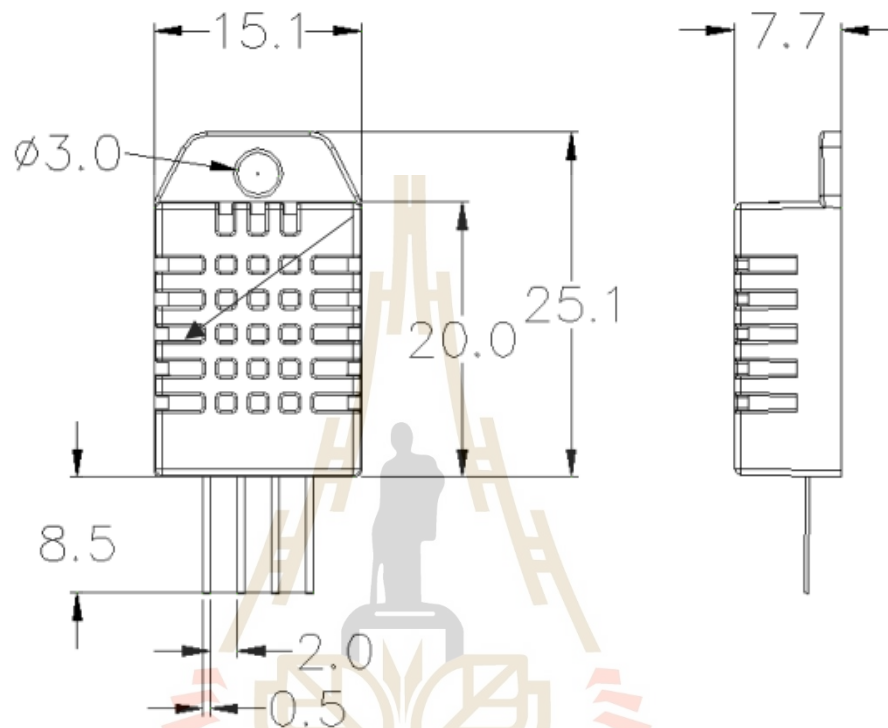
Model	DHT22	
Power supply	3.3-6V DC	
Output signal	digital signal via single-bus	
Sensing element	Polymer capacitor	
Operating range	humidity 0-100%RH;	temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH);	temperature <+-0.5Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH;	temperature 0.1Celsius
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)

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



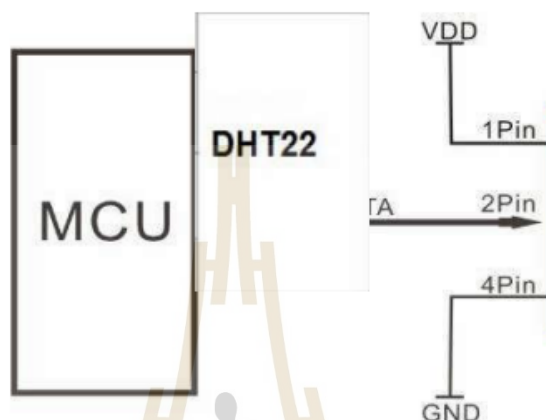
Pin sequence number: 1 2 3 4 (from left to right direction).

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)

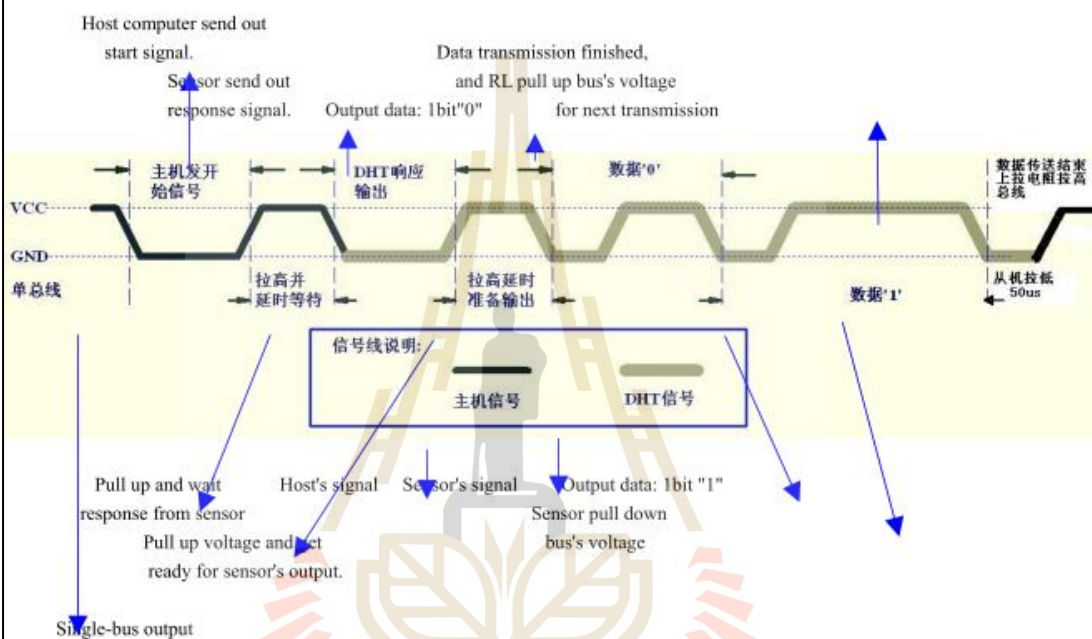
Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

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:



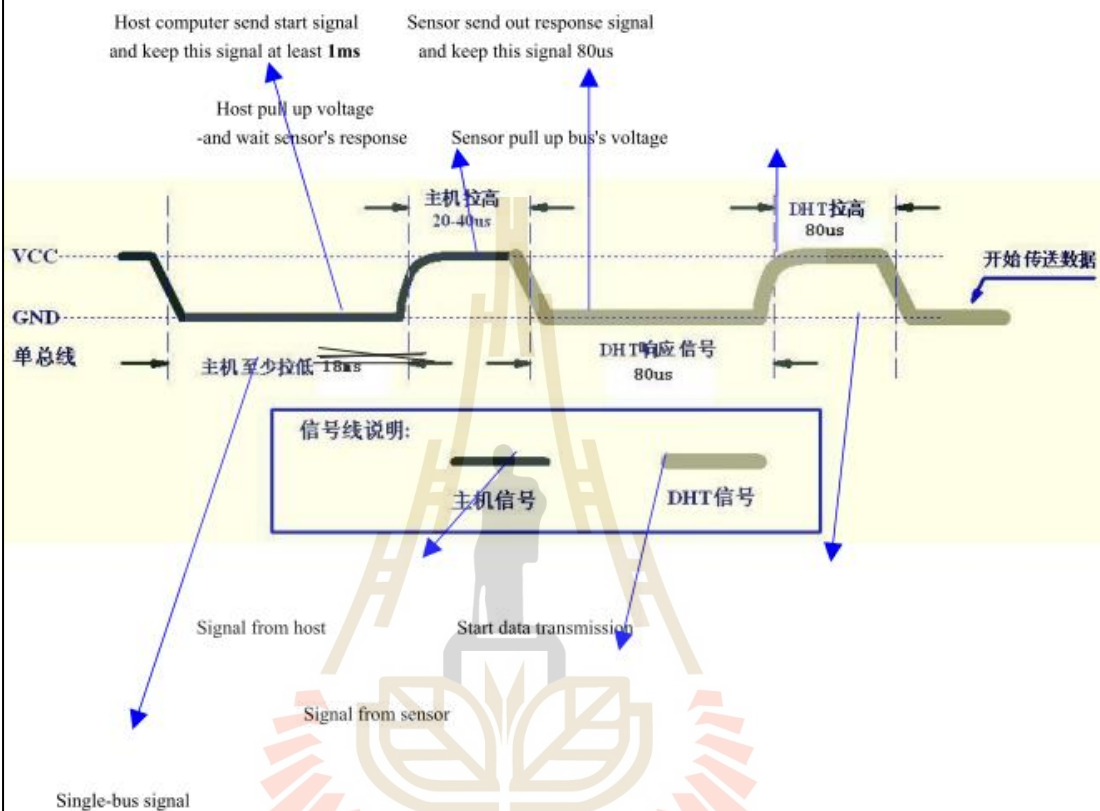
2) Step 1: MCU send out start signal to DHT22

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



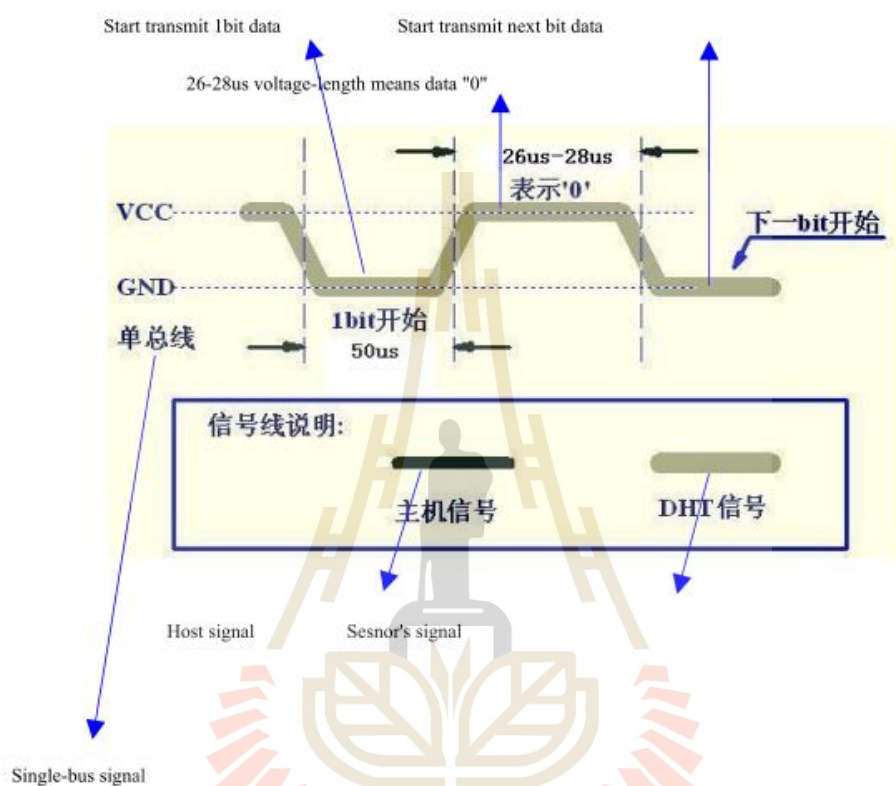
Step 2: DHT22 send response signal to MCU

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:

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



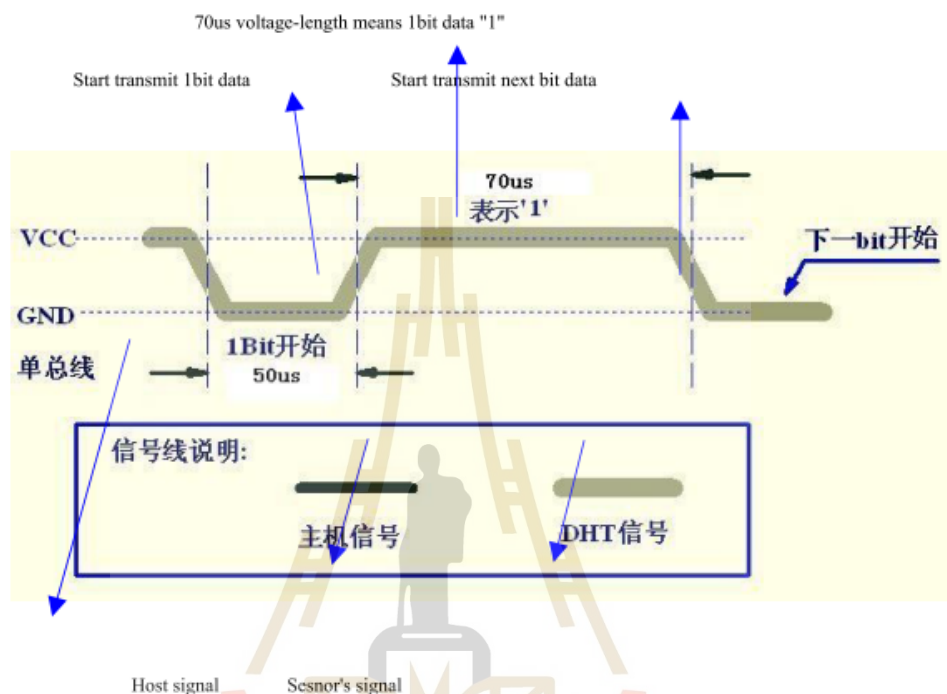
Step 3: DHT22 send data to MCU

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:

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors



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.

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

Digital Controller

REX-C100/C400/C410/C700/C900 INSTRUCTION MANUAL

IMNZC22-E1

Thank you for purchasing this RKC product. In order to achieve maximum performance and ensure proper operation of your new instrument, carefully read all the instructions in this manual. Please place the manual in a convenient location for easy reference.



WARNING

- To prevent injury to persons, damage to instrument and equipment, a suitable external protection device shall be required.
- All wiring must be completed before power is turned on to prevent electric shock, fire or damage to instrument and equipment.
- This instrument must be used in accordance with the specifications to prevent fire or damage to instrument and equipment.
- This instrument is not intended for use in locations subject to flammable or explosive gases.
- Do not touch high-voltage connections such as power supply terminals, etc. to avoid electric shock.
- RKC is not responsible if this instrument is repaired, modified or disassembled by other than factory-approved personnel. Malfunction can occur and warranty is void under these conditions.

CAUTION

- This product is intended for use with industrial machines, test and measuring equipment. (It is not designed for use with medical equipment and nuclear energy.)
- This is a Class A instrument. In a domestic environment, this instrument may cause radio interference, in which case the user may be required to take additional measures.
- This instrument is protected from electric shock by reinforced insulation. Provide reinforced insulation between the wire for the input signal and the wires for instrument power supply, source of power and loads.
- Be sure to provide an appropriate surge control circuit respectively for the following:
 - If input/output or signal lines within the building are longer than 30 meters.
 - If input/output or signal lines leave the building, regardless the length.
- This instrument is intended for installation in an enclosed instrumentation panel. All high-voltage connections such as power supply terminals must be enclosed in the instrumentation panel to avoid electric shock by operating personnel.
- All precautions described in this manual should be taken to avoid damage to the instrument or equipment.
- All wiring must be in accordance with local codes and regulations.
- All wiring must be completed before power is turned on to prevent electric shock, instrument failure, or incorrect action. The power must be turned off before repairing work for input break and output failure including replacement of sensor, contactor or SSR, and all wiring must be completed before power is turned on again.
- To prevent instrument damage as a result of failure, protect the power line and the input/output lines from high currents with a suitable overcurrent protection device with adequate breaking capacity such as fuse, circuit breaker, etc.
- Prevent metal fragments or lead wire scraps from falling inside instrument case to avoid electric shock, fire or malfunction.
- Tighten each terminal screw to the specified torque found in the manual to avoid electric shock, fire or malfunction.
- For proper operation of this instrument, provide adequate ventilation for heat dissipation.
- Do not connect wires to unused terminals as this will interfere with proper operation of the instrument.
- Turn off the power supply before cleaning the instrument.
- Do not use a volatile solvent such as paint thinner to clean the instrument. Deformation or discoloration will occur. Use a soft, dry cloth to remove stains from the instrument.
- To avoid damage to instrument display, do not rub with an abrasive material or push front panel with a hard object.
- When high alarm with hold action is used for Alarm function, alarm does not turn on while hold action is in operation. Take measures to prevent overheating which may occur if the control device fails.

NOTICE

- This manual assumes that the reader has a fundamental knowledge of the principles of electricity, process control, computer technology and communications.
- The figures, diagrams and numeric values used in this manual are only for purpose of illustration.
- RKC is not responsible for any damage or injury that is caused as a result of using this instrument, instrument failure or indirect damage.
- RKC is not responsible for any damage and/or injury resulting from the use of instruments made by imitating this instrument.
- Periodic maintenance is required for safe and proper operation of this instrument. Some components have a limited service life, or characteristics that change over time.
- Every effort has been made to ensure accuracy of all information contained herein. RKC makes no warranty expressed or implied, with respect to the accuracy of the information. The information in this manual is subject to change without prior notice.
- No portion of this document may be reprinted, modified, copied, transmitted, digitized, stored, processed or retrieved through any mechanical, electronic, optical or other means without prior written approval from RKC.

All Rights Reserved, Copyright © 2012, RKC INSTRUMENT INC.

RKC® RKC INSTRUMENT INC.

1. PRODUCT CHECK

C100 □□□□-□□ *□□ □□□□-□□ *□□
(1)(2) (3) (4) (6)(7) (1)(2) (3) (4)(5) (6)(7)

C400
C410
C700
C900

(1) Control action

F: PID action with autotuning (Reverse action)
D: PID action with autotuning (Direct action)
W: Heat/Cool PID action with autotuning (Water cooling)¹
A: Heat/Cool PID action with autotuning (Air cooling)¹

(2) Input type, (3) Range code

Refer to "9. INPUT RANGE TABLE."

(4) First control output [OUT1] (Heat-side)

M: Relay contact G: Trigger for triac driving²
V: Voltage pulse 8: Current (4 to 20 mA DC)

(5) Second control output [OUT2] (Cool-side)³

No symbol: When control action is F or D. M: Relay contact
V: Voltage pulse 8: Current (4 to 20 mA DC)

(6) Alarm 1 [ALM1], (7) Alarm 2 [ALM2]

N: No alarm H: Process high alarm
A: Deviation high alarm J: Process low alarm
B: Deviation low alarm K: Process high alarm with hold action
C: Deviation high/low alarm L: Process low alarm with hold action
D: Band alarm P: Heater break alarm (HBA)[CTL-6]⁴
E: Deviation high alarm S: Heater break alarm (HBA)[CTL-12]⁴
F: Deviation low alarm R: Control loop break alarm (LBA)⁵
with hold action
G: Deviation high/low alarm with hold action

¹ C100 cannot be specified in Heat/Cool PID action.

² For the C100, when control output is trigger output for triac driving, only the ALM1 is available.

³ For the C100, there is no second control output.

⁴ Heater break alarm (HBA) cannot be specified in case of ALM1. Also, it isn't possible to specify when control output is current output.

⁵ As control loop break alarm (LBA), only either the ALM1 or ALM2 is selected.



Check that power supply voltage is also the same as that specified when ordering.

<Accessories>

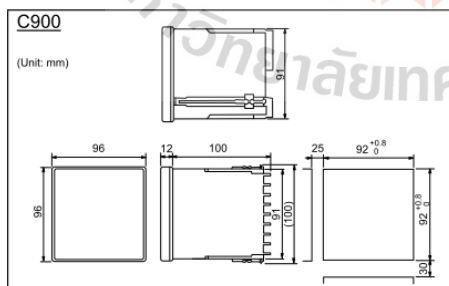
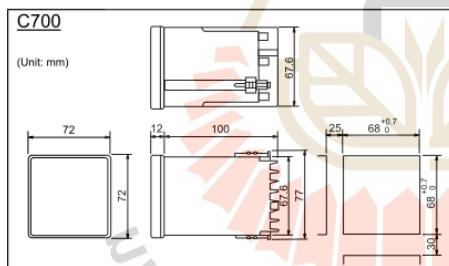
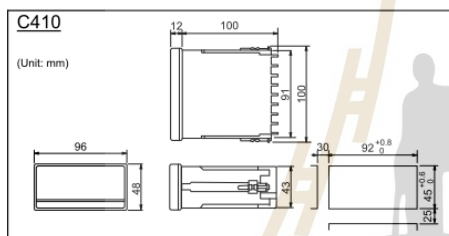
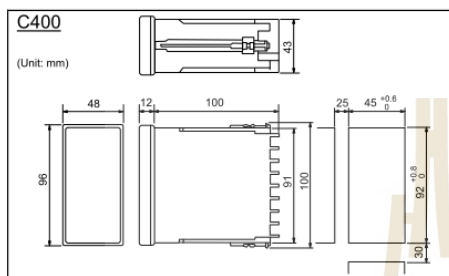
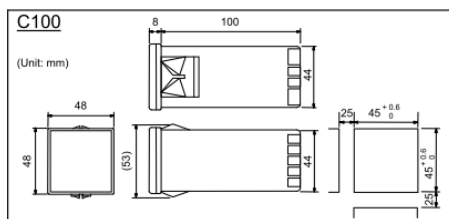
- Mounting brackets (C100/400/410/700/900): 2
- Instruction manual (IMNZC22-E1): 1

2. MOUNTING

2.1 Mounting Cautions

- This instrument is intended to be used under the following environmental conditions. (IEC61010-1)
[OVERVOLTAGE CATEGORY II, POLLUTION DEGREE 2]
- Use this instrument within the following environment conditions:
 - Allowable ambient temperature: 0 to 50 °C
 - Allowable ambient humidity: 45 to 85 % RH
 - Installation environment conditions: Indoor use, Altitude up to 2000 m
- Avoid the following conditions when selecting the mounting location:
 - Rapid changes in ambient temperature which may cause condensation.
 - Corrosive or inflammable gases.
 - Direct vibration or shock to the mainframe.
 - Water, oil, chemicals, vapor or steam splashes.
 - Excessive dust, salt or iron particles.
 - Excessive induction noise, static electricity, magnetic fields or noise.
 - Direct air flow from an air conditioner.
 - Exposure to direct sunlight.
 - Excessive heat accumulation.
- Mount this instrument in the panel considering the following conditions:
 - Provide adequate ventilation space so that heat does not build up.
 - Do not mount this instrument directly above equipment that generates large amount of heat (heaters, transformers, semi-conductor functional devices, large-wattage resistors.)
 - If the ambient temperature rises above 50 °C, cool this instrument with a forced air fan, cooler, etc. Cooled air should not blow directly on this instrument.
 - In order to improve safety and the immunity to withstand noise, mount this instrument as far away as possible from high voltage equipment, power lines, and rotating machinery.
 - High voltage equipment: Do not mount within the same panel.
 - Power lines: Separate at least 200 mm.
 - Rotating machinery: Separate as far as possible.
 - For correct functioning mount this instrument in a horizontal position.
- In case this instrument is connected to a supply by means of a permanent connection, a switch or circuit-breaker shall be included in the installation. This shall be in close proximity to the equipment and within easy reach of the operator. It shall be marked as the disconnecting device for the equipment.

2.2 Dimensions



Panel thickness: 1 to 5 mm or 5 to 9 mm (C100)
1 to 8 mm (C400/410/700/900)

2

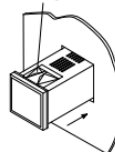
2.3 Mounting procedures

■ C100

● When the controllers are mounted on panel with 1 to 5 mm in thickness

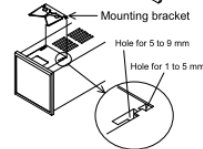
Since the mounting brackets are already installed on the controller, insert the controller into the panel front without removal of the brackets.

Mounting bracket



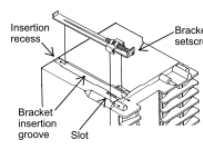
● When the controllers are mounted on panel with 5 to 9 mm in thickness

Remove the mounting brackets from the controller with a slotted screwdriver. Engage each mounting bracket with holes marked with 5-9 on the housing and then insert the controller into the panel from the panel front.



■ C400/410/700/900

1. Prepare the panel cutout as specified in 2.2 Dimensions.
2. Insert the instrument through the panel cutout.
3. Insert an upper mounting bracket along the bracket insertion groove from the back, and then engage a projection at the bracket end with a recess at the groove front and also insert metal fitting legs into slots.
4. Tighten a bracket setscrew from the rear of the bracket with Phillips screwdriver. Do not overtighten the bracket setscrew.
5. The other mounting bracket should be installed the same way described in 3. and 4.



C900 is used in the above figures for explanation, but the same mounting procedures also apply to C400/410/700.

3. WIRING

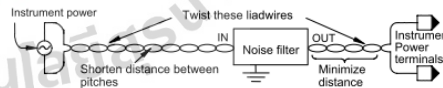


WARNING

To prevent electric shock or instrument failure, do not turn on the power until all wiring is completed. Make sure that the wiring is correct before applying power to the instrument.

3.1 Wiring Cautions

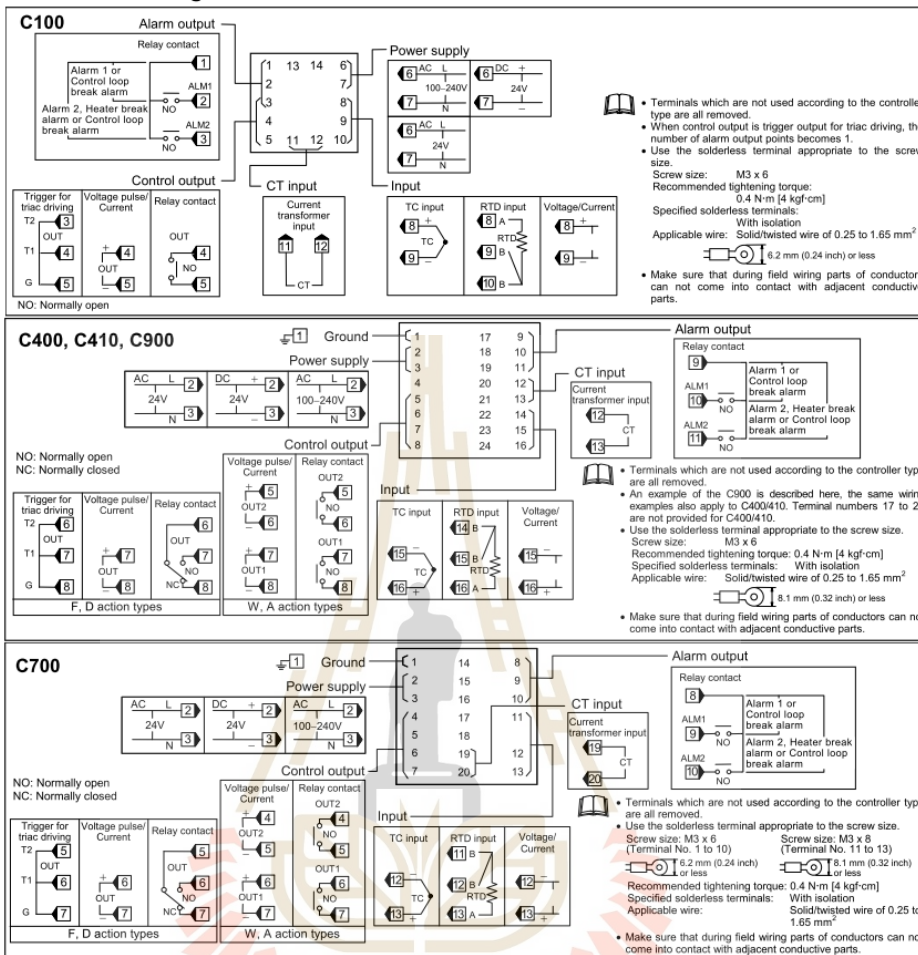
- For thermocouple input, use the appropriate compensation wire.
- For RTD input, use low resistance lead wire with no difference in resistance between the three lead wires.
- To avoid noise induction, keep input signal wire away from instrument power line, load lines and power lines of other electric equipment.
- Signal connected to Voltage input and Current input shall be low voltage defined as "SELV" circuit per IEC 60950-1.
- If there is electrical noise in the vicinity of the instrument that could affect operation, use a noise filter.
 - Shorten the distance between the twisted power supply wire pitches to achieve the most effective noise reduction.
 - Always install the noise filter on a grounded panel. Minimize the wiring distance between the noise filter output and the instrument power supply terminals to achieve the most effective noise reduction.
 - Do not connect fuses or switches to the noise filter output wiring as this will reduce the effectiveness of the noise filter.



- Allow approximately 5 to 6 seconds for contact output when the instrument is turned on. Use a delay relay when the output line is used for an external interlock circuit.
- Power supply wiring must be twisted and have a low voltage drop.
- This instrument with 24 V power supply is not provided with an overcurrent protection device. For safety install an overcurrent protection device (such as fuse) with adequate breaking capacity close to the instrument.
 - Fuse type: Time-lag fuse (Approved fuse according IEC60127-2 and/or UL248-14)
 - Fuse rating: Rated current: 0.5 A
- For an instrument with 24 V power supply input, supply power from "SELV" circuit defined as IEC 60950-1.
- A suitable power supply should be considered in end-use equipment. The power supply must be in compliance with a limited-energy circuits (maximum available current of 8 A).

IMNZC22-E1

3.2 Terminal Configuration



Specifications

Input:

Input type: K, J, R, S, B, E, T, N, PLII, W5Re/W26Re, U, L

RTD: Input impedance: Approx. 1 MΩ

Voltage: 0 to 5 V DC, 1 to 5 V DC

Current: 0 to 20 mA DC, 4 to 20 mA DC

Input impedance: Approx. 250 Ω

Sampling cycle: 0.5 seconds

Input range: Refer to Input range table

Control method: PID control

Control output: ON/OFF, P, PI, or PD actions is available

Relay contact output: 250 V AC, 3A (Resistive load)

Electrical life: 300,000 times or more (Rated load)

Voltage pulse output: 0/12 V DC

Current output: 4 to 20 mA DC

Trigger output for triac driving: Zero cross method for medium capacity triac driving (100 A or less)

Load voltage used: 100 V AC line, 200 V AC line

Load used: Resistive load

Alarm output: Relay contact output: 250 V AC, 1A (Resistive load)

Electrical life: 50,000 times or more (Rated load)

Heater break alarm function: Measured current: 0 to 30 A (CTL-6-P-N) or 0 to 100 A (CTL-12-S56-10L-N)

Input rating: Maximum current rating: 120 mA

Input impedance: Approx. 2.5 Ω

Performance: Display accuracy (at the ambient temperature 23 °C ± 2 °C): Thermocouple (TC): ± (0.5 % of display value + 1 digit) or ± 3 °C [6 °F] whichever is greater

R and S input: 0 to 399 °C [0 to 799 °F]: ± 6 °C [12 °F]

B input: 0 to 399 °C [0 to 799 °F]: Accuracy is not guaranteed.

RTD: ± (0.5 % of display value + 1 digit) or ± 0.8 °C [1.6 °F] whichever is greater

Voltage/Current: ± (0.5 % of input span + 1 digit)

Memory backup: Backed up by Nonvolatile Memory

Number of write times: Approx. 100,000 times

Data storage period: Approx. 10 years

Power: Power supply voltage: 85 to 264 V AC (Power supply voltage range), 50/60 Hz

Rating: 100 to 240 V AC

21.6 to 26.4 V AC (Power supply voltage range), 50/60 Hz

Rating: 24 V AC

21.6 to 26.4 V DC (Power supply voltage range)

Rating: 24 V DC

Power consumption: 6 VA max. (at 100 V AC)

9 VA max. (at 240 V AC)

6 VA max. (at 24 V AC)

145 mA max. (at 24 V DC)

Weight: C100: Approx. 170 g

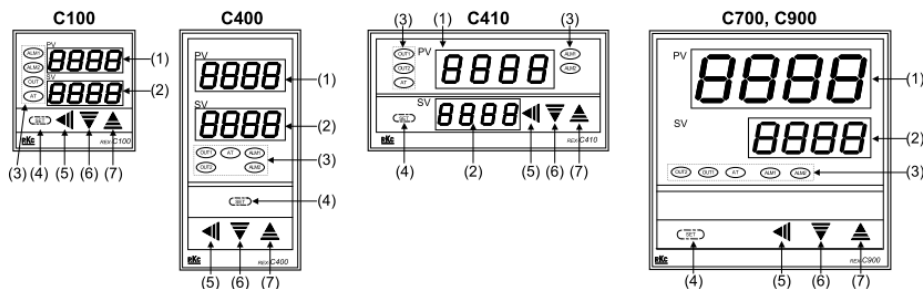
C700: Approx. 250 g

C400/410: Approx. 260 g

C900: Approx. 340 g

IMNZC22-E1

4. PARTS DESCRIPTION

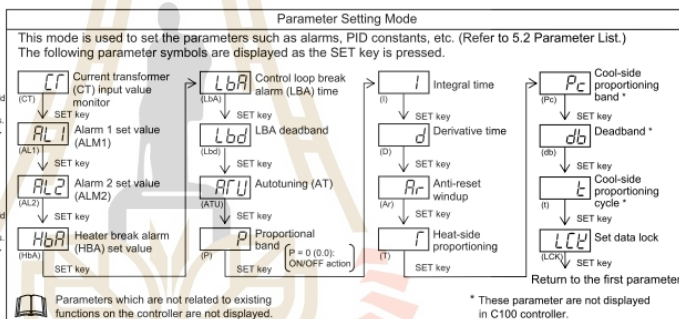
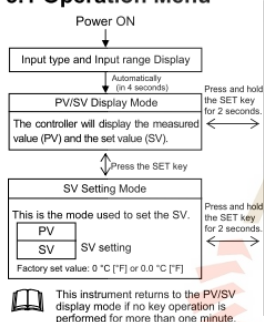


- (1) Measured value (PV) display [Green]
Displays PV or various parameter symbols.
- (2) Set value (SV) display [Orange]
Displays SV or various parameter set values (or CT input value).
- (3) Indication lamps
Alarm output lamps (ALM1, ALM2) [Red]
ALM1: Lights when alarm 1 output is turned on.
ALM2: Lights when alarm 2 output is turned on.
- Autotuning (AT) lamp [Green]
Flashes when autotuning is activated.
(After autotuning is completed: AT lamp will go out)
- Control output lamps (OUT1 [Yellow], OUT2 [Green])
OUT1: Lights when control output is turned on.*
OUT2: Lights when cool-side control output is turned on.
- (4) (SET) (Set key)
Used for parameter calling up and set value registration.
- (5) (Shift key)
Shift digits when settings are changed.
- (6) (DOWN key)
Decrease numerals.
- (7) (UP key)
Increase numerals.

To avoid damage to the instrument, never use a sharp object to press keys.

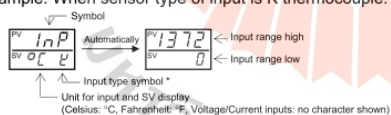
5. SETTING

5.1 Operation Menu



Input type and input range display

This instrument immediately confirms the input type symbol and input range following power ON.
Example: When sensor type of input is K thermocouple.



* Input Type Symbol Table

Symbol	K	J	R	S	B	E	T	N	PL	II	W	U	L	U	L	J	P	P	r	Y	I
Input type	Thermocouple (TC)										RTD		Voltage input		Current input						

5.2 Parameter List

The following parameter symbols are displayed as the SET key is pressed.

Parameter symbols which are not related to existing functions on the controller are not displayed.

Symbol	Name	Setting range	Description	Factory set value
CF	Current transformer (CT) input value monitor	0.0 to 100.0 A [Display only]	Display input value from the current transformer. [Displayed only when the instrument has the heater break alarm (HBA)]	
AL1	Alarm 1 set value (ALM1)	TC/RTD inputs: Deviation alarm, Process alarm: -199.9 to +999.9 °C [°F] or -199.9 to +999.9 °C [°F] Voltage/Current inputs: Deviation alarm: -199.9 to +200.0 % Process alarm: -199.9 to +300.0 %	Set the alarm 1 set value and alarm 2 set value. For the alarm action type, refer to page 7.	TC/RTD inputs: 50 (50.0) Voltage/Current inputs: 5.0
AL2	Alarm 2 set value (ALM2)			

Symbol	Name	Setting range	Description	Factory set value
HbA	Heater break alarm (HBA) set value ¹	0.0 to 100.0 A	Alarm value is set by referring to input value from the current transformer (CT). Used only for single-phase.	0.0
LbA	Control loop break alarm (LBA) time ²	0.1 to 200.0 minutes	Set control loop break alarm (LBA) set value.	8.0
Lbd	LBA deadband ³	TC/RTD inputs: 0 to 9999 °C [°F] Voltage/Current inputs: 0 to 100 % of input span	Set the area of not outputting LBA. No LBA deadband functions with 0 set. Differential gap : TC/RTD inputs: 0.8 °C [°F] Voltage/Current inputs: 0.8 % of input span	0
ATV	Autotuning (AT)	0: AT end or cancel 1: AT start or execution	Turns the autotuning ON/OFF.	0
P	Proportional band	TC/RTD inputs: 1 (0.1) to span 0.1 °C [°F] resolution: Within 999.9 °C [°F] Voltage/Current inputs: 0.1 to 100.0 % of input span 0 (0.0): ON/OFF action	Set when PI, PD or PID control is performed. Heat/Cool PID action: Proportional band setting on the heat-side. ON/OFF action differential gap: TC/RTD inputs: 2 (0.2) °C [°F] Voltage/Current inputs: 0.2 % of input span	TC/RTD inputs: 30 (30.0) Voltage/Current inputs: 3.0
I	Integral time	1 to 3600 seconds (0 second: PD action)	Set the time of integral action to eliminate the offset occurring in proportional control.	240
D	Derivative time	1 to 3600 seconds (0 second: PI action)	Set the time of derivative action to improve control stability by preparing for output changes.	60
ARW	Anti-reset windup (ARW)	1 to 100 % of heat-side proportional band (0 %: Integral action OFF)	Overshooting and undershooting are restricted by the integral effect.	100
Γ	Heat-side proportioning cycle	1 to 100 seconds (Not displayed if the control output is current output.)	Set control output cycle. Heat/Cool PID action: Heat-side proportioning cycle	Relay contact output: 20 Voltage pulse output/ Trigger output for triac driving: 2
PC	Cool-side proportional band	1 to 1000 % of heat-side proportional band	Set cool-side proportional band when Heat/Cool PID action.	100
db	Deadband	TC/RTD inputs: -10 to +10 °C [°F] or -10.0 to +10.0 °C [°F] Voltage/Current inputs: -10.0 to +10.0 % of input span	Set control action deadband between heat-side and cool-side proportional bands. Minus (-) setting results in overlap.	0 or 0.0
t	Cool-side proportioning cycle	1 to 100 seconds (Not displayed if the control output is current output.)	Set control cool-side output cycle for Heat/Cool PID action.	Relay contact output: 20 Voltage pulse output: 2
LCK	Set data lock (LCK)	0100: No set data locked (All parameters changeable) 0101: Set data locked (All parameters locked) 0110: Only the set value (SV) is changeable with the set data locked	Performs set data change enable/disable.	0100

¹ Heater Break Alarm (HBA) function

The HBA function monitors the current flowing through the load by a dedicated current transformer (CT), compares the measured value with the HBA set value, and detects a fault in the heating circuit.

Low or No current flow (Heater break, malfunction of the control device, etc.):

When the control output is ON and the current transformer input value is equal to or less than the heater break determination point for the preset number of consecutive sampling cycle, an alarm is activated.

Over current or short-circuit:

When the control output is OFF and the current transformer input value is equal to or greater than the heater break determination point for the preset number of consecutive sampling cycle, an alarm is activated.

Precaution for HBA setting:

- Displayed only for when HBA is selected as Alarm 2.
- HBA is not available on a current output.
- Set the set value to approximately 85 % of the maximum reading of the CT input.
- Set the set value to a slightly smaller value to prevent a false alarm if the power supply may become unstable.
- When more than one heater is connected in parallel, it may be necessary to increase the HBA set value to detect a single heater failure.
- When the current transformer is not connected or the HBA set value is set to "0.0," the HBA is turned on.

² Control Loop Break Alarm (LBA) function

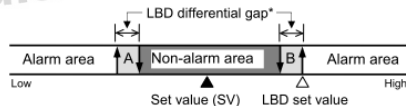
The LBA function is used to detect a load (heater) break or a failure in the external actuator (power controller, magnet relay, etc.), or a failure in the control loop caused by an input (sensor) break. The LBA function is activated when control output reaches 0 % or 100 %. LBA monitors variation of the measured value (PV) for the length of LBA time. When the LBA time has elapsed and the PV is still within the alarm determination range, the LBA will be ON.

Precaution for LBA setting:

- Displayed only for when LBA is selected as Alarm 1 or Alarm 2.
- No LBA function can be used at Heat/Cool PID control action.
- The LBA function can not be activated when AT function is turned on.
- The LBA function is activated when control output reaches 0 % or 100 %. The time required for the LBA output to turn on includes both the time from the initial occurrence of loop failure and the LBA setting time. Recommended setting for LBA is for the set value of the LBA to be twice the value of the integral time (I).
- If LBA setting time does not match the controlled object requirements, the LBA setting time should be lengthened.
If setting time is not correct, the LBA will malfunction by turning on or off at inappropriate times or not turning on at all.

³ LBA Deadband function

The LBA may malfunction due to external disturbances. To prevent malfunctioning due to external disturbance, LBA deadband (LBD) sets a neutral zone in which LBA is not activated. When the measured value (PV) is within the LBD area, LBA will not be activated. If the LBD setting is not correct, the LBA will not work correctly.



A: During temperature rise: Alarm area
During temperature fall: Non-alarm area
B: During temperature rise: Non-alarm area
During temperature fall: Alarm area

* TC and RTD inputs: 0.8 °C [°F] (fixed)
Voltage/Current inputs: 0.8 % of input span (fixed)

5.3 Changing Parameter Settings

Procedures to change parameter settings are shown below.

To store a new value for the parameter, always press the SET key. The display changes to the next parameter and the new value will be stored.

- A new value will not be stored without pressing SET key after the new value is displayed on the display.
- After a new value has been displayed by using the UP and DOWN keys, the SET key must be pressed within 1 minute, or the new value is not stored and the display will return to the PV/SV monitor screen.

● **Change the set value (SV)**

Change the set value (SV) from 0 °C to 200 °C

1. **Select the SV setting mode**

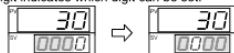
Press the SET key at PV/SV monitor screen until SV setting screen is displayed.



2. **Shift the high-lighted digit**

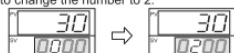
Press the shift key to high-light the hundreds digit.

The high-lighted digit indicates which digit can be set.



3. **Change the set value**

Press the UP key to change the number to 2.



4. **Store the set value**

Press the SET key to store the new set value. The display returns to the PV/SV monitor screen.



● **Change parameters other than the set value (SV)**

The changing procedures are the same as those of example 2 to 4 in the above "● Change the set value (SV)". Pressing the SET key after the setting ends shifts to the next parameter. When no parameter setting is required, return the instrument to the PV/SV display mode.

6. OPERATION

CAUTIONS

- All mounting and wiring must be completed before the power is turned on. If the input signal wiring is disconnected or short-circuited (RTD input only), the instrument determines that burnout has occurred.
 - Displays:
 - Upscale: Thermocouple input, RTD input (when input break)
 - Downscale: Thermocouple input (specify when ordering), RTD input (when short-circuited), Voltage input (1 to 5 V DC), Current input (4 to 20 mA DC)
 - For the voltage (0 to 5 V DC) or current (0 to 20 mA DC) input, the display becomes indefinite (display of about zero value).
 - Outputs:
 - Control output: OFF (Heat/Cool control: the control output on both heat-side and cool-side is turned off)
 - Alarm output: Both of the Alarm 1 and Alarm 2 outputs of this instrument are turned on when burnout occurs regardless of any of the following actions taken. (High alarm, low alarm, etc.) In addition, when used for any purposes other than these alarms (event, etc.), specify the Z-124 specification (not to be forcibly turned on).
- A power failure of 20 ms or less will not affect the control action. When a power failure of more than 20 ms occurs, the instrument assumes that the power has been turned off. When power returns, the controller will retain the conditions that existed prior to shut down.
- The alarm hold action is activated when not only the power is turned on, but also the SV is changed.

6.1 Operating Precautions

- (1) All mounting and wiring must be completed before the power is turned on.
- (2) The settings for the SV and all parameters should be appropriate for the controlled object.
- (3) A power supply switch is not furnished with this instrument. It is ready to operate as soon as the power is turned on.

6.2 Set Data Lock (LCK) Function

The set data lock restricts parameter setting changes by key operation. This function prevents the operator from making errors during operation.

Set value	Parameters which can be changed
0100	All parameters [Factory set value]
0101	No parameters [All Locked]
0110	SV

Parameters protected by Set Data Lock function are still displayed for monitoring.

6.3 Autotuning (AT) Function

Autotuning (AT) automatically measures, calculates and sets the optimum PID and LBA constants. The following conditions are necessary to carry out autotuning and the conditions which will cause the autotuning to stop.

📖 **Caution for using the Autotuning (AT)**

When a temperature change (UP and/or Down) is 1 °C or less per minute during Autotuning, Autotuning may be cancelled before calculating PID values. In that case, adjust the PID values manually. It is possible to happen when the set value is around the ambient temperature or is close to the maximum temperature achieved by the load.

■ **Requirements for AT start**

Start the autotuning when all following conditions are satisfied:

- Prior to starting the AT function, end all the parameter settings other than PID and LBA.
- Confirm the LCK function has not been engaged.

📖 When the autotuning is finished, the controller will automatically returns to PID control.

■ **Requirements for AT cancellation**

The autotuning is canceled if any of the following conditions exist.

- When the set value (SV) is changed.
- When the PV bias value is changed.
- When the PV becomes abnormal due to burnout.
- When the power is turned off.
- When power failure longer than 20 ms occurs.

📖 If the AT is canceled, the controller immediately changes to PID control. The PID values will be the same as before AT was activated.

📖 When AT is completed, the controller immediately changes to PID control. If the control system does not allow the AT cycling process, set each PID constant manually to meet the needs of the application.

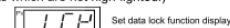
7. INITIAL SETTING

⚠ **WARNING**

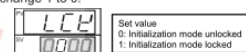
Parameters in the Initialization mode should be set according to the application before setting any parameter related to operation. Once the Parameters in the Initialization mode are set correctly, no further changes need to be made to parameters for the same application under normal conditions. If they are changed unnecessarily, it may result in malfunction or failure of the instrument. RKC will not bear any responsibility for malfunction or failure as a result of improper changes in the Initialization mode.

7.1 Go to Initialization Mode

1. Turn on the power to this controller. The instrument goes to the PV/SV display after confirming input type symbol and input range.
2. Press and hold the SET key for 5 seconds to go to the Parameter setting mode from the PV/SV display.
3. Press the SET key until "LCK" (Set Data Lock display) will be displayed.
4. The high-lighted digit indicates which digit can be set. Press shift key to high-light the hundreds digit. (The [] section in each image of the controller shows the digits which are not high-lighted.)



5. Press the DOWN key to change 1 to 0.



6. Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter, and the Initialization mode is unlocked.



7. Press the shift key for 5 seconds while pressing the SET key to go to the Initialization mode. When the controller goes to the Initialization mode, "SL1" will be displayed.



📖 If the control is set to the initial set mode, all outputs are turned OFF.

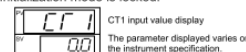
7.2 Exit Initialization Mode

📖 When any parameter setting is changed in the Initialization mode, check all parameter set values in SV setting mode and Parameter setting mode.

1. Press the shift key for 5 seconds while pressing the SET key from any display in the Initialization mode. The controller goes back to the operation mode and the PV/SV display will be displayed.
2. Press and hold the SET key for 5 seconds in the PV/SV display.
3. Press the SET key until "LCK" (Set Data Lock display) will be displayed.
4. The high-lighted digit indicates which digit can be set. Press shift key to high-light the hundreds digit.



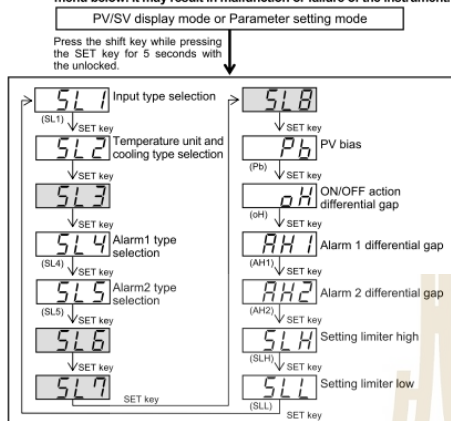
5. Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter, and the Initialization mode is locked.



7.3 Initial Setting Menu

Display flowcharts in Initialization mode are shown in the following.

Do not change to the [] section parameters and any parameter in the initialization mode which is not described in the initial setting menu below. It may result in malfunction or failure of the instrument.



7.4 Input Type Selection (SL1)

When any parameter setting is changed in the Initialization mode, check all parameter set values in SV setting mode and Parameter setting mode.

Factory set value varies depending on the input type.

Set value	Input type	Hardware
0000	K	Thermocouple (TC)
0001	J	
0010	L	
0011	E	
0100	N	
0111	R	
1000	S	
1001	B	
1010	W5Re/W26Re	
1011	PL II	
0101	T	
0110	U	
1100	Pt100 (JIS/IEC)	RTD
1101	JP100 (JIS)	
1110	0 to 5 V DC	Voltage
1111	1 to 5 V DC	
1110	0 to 20 mA DC	Current
1111	4 to 20 mA DC	

Conduct setting so as to meet the instrument specification (input type). Setting change between different symbols may cause malfunction, but the setting can be changed when hardware types have the same symbol. However, when the setting is changed, always reset "SLH" and "SLL" (Refer to page 8).

Change Settings

Example: Change the input type from "K" to "J"

- Press the SET key. The display will go to SL1.



- Press the UP key to change the number to 1.



- Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

7.5 Temperature Unit and Cooling Type Selection (SL2)

Inappropriate settings may result in malfunction. Control type between Heat Only and Heat/Cool cannot be changed by this parameter.

Factory set value varies depending on the instrument specification.

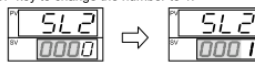
Set value	Description	
	Temperature unit	Cooling type selection
0000	°C	Air cooling (A type) or Heat only type (F, D type)
0001	°F	Air cooling (A type) or Heat only type (F, D type)
0010	°C	Water cooling (W type)
0011	°F	Water cooling (W type)

IMNZC22-E1

Change Settings

Example: Change the temperature unit of the Heat only type from "°C (0000)" to "°F (0001)"

- Press the SET key until SL2 is displayed.
- Press the UP key to change the number to 1.



- Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

7.6 Alarm 1 [ALM1] Type Selection (SL4) Alarm 2 [ALM2] Type Selection (SL5)

If the alarm function is not provided with the instrument when shipped from the factory, no alarm output is available by changing SL4 and/or SL5.

SL4 is set to 0000 in the following cases.

- When the instrument does not have ALM1 output
- When Control Loop Break Alarm (LBA) is provided and assigned to ALM1

SL5 is set to 0000 in the following cases.

- When the instrument does not have ALM2 output
- When Control Loop Break Alarm (LBA) is provided and assigned to ALM2
- When the SV alarm is provided and assigned to ALM2
- When the Heater Break Alarm (HBA) is provided

Factory set value varies depending on the instrument specification.

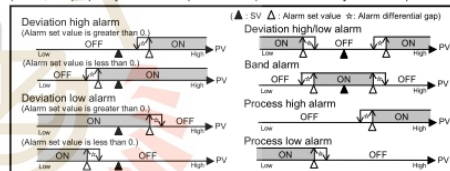
Set value	Details of setting
0000	No alarm
0001	Deviation high alarm
0101	Deviation low alarm
0010	Deviation high/low alarm
0110	Band alarm
0011	Process high alarm
0111	Process low alarm
1001	Deviation high alarm with hold action *
1101	Deviation low alarm with hold action *
1010	Deviation high/low alarm with hold action *
1011	Process high alarm with hold action *
1111	Process low alarm with hold action *

* Hold action:

When Hold action is ON, the alarm action is suppressed at start-up or the control set value change until the measured value enters the non-alarm range.

Alarm action type

Both of the Alarm 1 and Alarm 2 outputs of this instrument are turned on when burnout occurs regardless of any of the following actions taken (High alarm, low alarm, etc.). In addition, when used for any purposes other than these alarms (event, etc.), specify the Z-124 specification (not to be forcibly turned on).



Change Settings

Example: Change the ALM1 type from "Deviation high alarm (0001)" to "Deviation low alarm (0101)"

- Press the SET key three times at SL1 until SL4 is displayed.
- Press the shift key to high-light the hundreds digit.
- Press the UP key to change the number to 1.



- Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

7.7 PV bias (Pb)

The value set in the PV bias is added to the input value (actual measured value) to correct the input value. The PV bias is used to correct the individual variations in the sensors or when there is difference between the measured values (PV) of other instruments.

Setting range: TC/RTD inputs: -1999 to +9999 °C [°F] or -199.9 to +999.9 °C [°F]

Voltage/Current inputs: -199.9 to +200.0 %

Factory set value: TC/RTD inputs: 0 °C [°F] or 0.0 °C [°F]

Voltage/Current inputs: 0.0 %

Continued on the next page.

Continued from the previous page.

Change Settings

Example: When the temperature is measured by two instruments

When the measured values (PV) are as shown in the following:

Main unit = 198 °C
Recorder = 200 °C

If a PV bias correction value of +2 °C is added to the measured value the main unit, the displayed value become:

Displayed value = Measured value (PV) + PV bias
= 198 °C + 2 °C = 200 °C

The setting procedures is described in the following.

1. Press the SET key at "Pb" is displayed.



2. Press the UP key to change the number to 2.



3. Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

7.8 ON/OFF Action Differential Gap (oH)

Setting range: TC/RTD inputs: 0 to 100 °C [°F] or 0.0 to 100.0 °C [°F]

Voltage/Current inputs: -199.9 to +200.0 %

Factory set value: TC/RTD inputs: 2 °C [°F] or 2.0 °C [°F]

Voltage/Current inputs: 0.2 % of input span

Change Settings

Example: Change the On/Off Action differential gap from "2 °C" to "4 °C"

1. Press the SET key at "oH" is displayed.
2. Press the UP key to change the number to 4.
3. Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

**7.9 Alarm 1 Differential Gap (AH1)
Alarm 2 Differential Gap (AH2)**

Setting range: TC/RTD inputs: 0 to 100 °C [°F] or 0.0 to 100.0 °C [°F]

Voltage/Current inputs: 0.0 to 10.0 %

Factory set value: TC/RTD inputs: 2 °C [°F] or 2.0 °C [°F]

Voltage/Current inputs: 0.2 % of input span

Change Settings

Example: Change the Alarm 1 differential gap from "2 °C" to "4 °C"

1. Press the SET key at "AH1" is displayed.
2. Press the UP key to change the number to 4.
3. Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

**7.10 Setting Limiter High (SLH)
Setting Limiter Low (SLL)**

For voltage or current input, set scaling within the input range.

Refer to 9. INPUT RANGE TABLE.

Factory set value varies depending on the instrument specification.

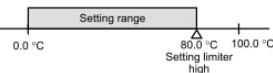
Input type	Setting range *
TC	K 0 to 1372 °C 0 to 2502 °F
	J 0 to 1200 °C 0 to 2192 °F
	R 0 to 1769 °C 0 to 3216 °F
	S 0 to 1769 °C 0 to 3216 °F
	B 0 to 1820 °C 0 to 3308 °F
	E 0 to 1000 °C 0 to 1832 °F
	N 0 to 1300 °C 0 to 2372 °F
	T -199.9 to +400.0 °C -199.9 to +752.0 °F
	W5Re/W26Re 0 to 2320 °C 0 to 4208 °F
	PLII 0 to 1390 °C 0 to 2534 °F
RTD	U -199.9 to +600.0 °C -199.9 to +999.9 °F
	L 0 to 800 °C 0 to 1600 °F
	Pt100 -199.9 to +649.0 °C -199.9 to 999.9 °F
	JPt100 -199.9 to +649.0 °C

* Limit setting becomes SLH ≥ SLL.

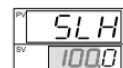
When changing the high-limit (SLH) and the low-limit (SLL) limiter settings, always set the set-value (SV) within the limiter range.

Change Settings

Example: The input range (input scale range) is from 0.0 to 100.0 °C, the setting limiter high is 80.0 °C.

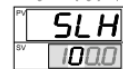


1. Press the SET key at "SLH" is displayed.

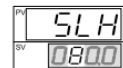


Setting limiter (high) display

2. Press the shift key to high-light the tens digit.



3. Press the DOWN key to change the number to 8.



4. Press the SET key to store the new set value. The display goes to the next parameter.

8. ERROR DISPLAYS

Error display

Err	RAM failure (Incorrect set data write, etc.)	Turn off the power at once. If an error occurs after the power is turned on again, please contact RKC sales office or the agent.
------------	--	--

Over-scale and Underscale

Measured value (PV) [Flashing]	PV is outside of input range.	WARNING To prevent electric shock, always turn off the power before replacing the sensor. Check Input type, Input range and connecting state of sensor. Confirm that the sensor or wire is not broken.
0000 [Flashing]	Over-scale: PV is above the high input display range limit.	
UUUU [Flashing]	Underscale: PV is below the low input display range limit.	

9. INPUT RANGE TABLE

TC/RTD inputs

Input type	Range	Code	Range	Code	Range	Code
K	0 to 200 °C	K 01	0 to 400 °C	K 02	0 to 600 °C	K 03
	0 to 800 °C	K 04	0 to 1000 °C	K 05	0 to 1200 °C	K 06
	0 to 1372 °C	K 07	0 to 100 °C	K 13	0 to 300 °C	K 14
	0 to 450 °C	K 17	0 to 500 °C	K 20	0 to 800 °F	K A1
	0 to 1600 °F	K A2	0 to 2502 °F	K A3	20 to 70 °F	K A9
	0 to 200 °C	J 01	0 to 400 °C	J 02	0 to 600 °C	J 03
	0 to 800 °C	J 04	0 to 1000 °C	J 05	0 to 1200 °C	J 06
	0 to 450 °C	J 10	0 to 800 °F	J A1	0 to 1600 °F	J A2
	0 to 2192 °F	J A3	0 to 400 °F	J A6	0 to 300 °F	J A7
	0 to 1600 °C	R 01	0 to 1769 °C	R 02	0 to 1350 °C	R 04
	0 to 3200 °F	R A1	0 to 3216 °F	R A2	—	—
	0 to 1600 °C	S 01	0 to 1769 °C	S 02	0 to 3200 °F	S A1
0 to 3216 °F	S A2	—	—	—	—	
TC	400 to 1800 °C	B 01	0 to 1820 °C	B 02	800 to 3200 °F	B A1
	0 to 3308 °F	B A2	—	—	—	—
	0 to 800 °C	E 01	0 to 1000 °C	E 02	0 to 1600 °F	E A1
	0 to 1832 °F	E A2	—	—	—	—
N	0 to 1200 °C	N 01	0 to 1300 °C	N 02	0 to 2300 °F	N A1
	0 to 2372 °F	N A2	—	—	—	—
T	-199.9 to +400.0 °C	T 01	-199.9 to +100.0 °C	T 02	-100.0 to +200.0 °C	T 03
	0 to 350.0 °C	T 04	-199.9 to +752.0 °F	T A1	-100.0 to +200.0 °F	T A2
	-100.0 to +400.0 °F	T A3	0 to 450.0 °F	T A4	0 to 752.0 °F	T A5
WSRe/W26Re	0 to 2300 °C	W 01	0 to 2320 °C	W 02	0 to 4000 °F	W A1
	0 to 1390 °C	A 01	0 to 1390 °C	A 02	0 to 1200 °C	A 03
PLII	0 to 2400 °F	A A1	0 to 2534 °F	A A2	—	—
	—	—	—	—	—	—
U	-199.9 to +600.0 °C	U 01	-199.9 to +100.0 °C	U 02	0 to 400.0 °C	U 03
	-199.9 to +999.9 °F	U A1	-100.0 to +200.0 °F	U A2	0 to 999.9 °F	U A3
L	0 to 400 °C	L 01	0 to 800 °C	L 02	0 to 800 °F	L A1
	0 to 1600 °F	L A2	—	—	—	—
Pt100	-199.9 to +649.0 °C	D 01	-199.9 to +200.0 °C	D 02	-100.0 to +50.0 °C	D 03
	-100.0 to +100.0 °C	D 04	-100.0 to +200.0 °C	D 05	0 to 50.0 °C	D 06
	0 to 100.0 °C	D 07	0 to 200.0 °C	D 08	0 to 300.0 °C	D 09
	0 to 500.0 °C	D 10	-199.9 to +999.9 °F	D A1	-199.9 to +400.0 °F	D A2
	-199.9 to +200.0 °F	D A3	-100.0 to +100.0 °F	D A4	-100.0 to +300.0 °F	D A5
	0 to 100.0 °F	D A6	0 to 200.0 °F	D A7	0 to 400.0 °F	D A8
	0 to 50.0 °F	D A9	—	—	—	—
	-199.9 to +649.0 °C	P 01	-199.9 to +200.0 °C	P 02	-100.0 to +50.0 °C	P 03
	-100.0 to +100.0 °C	P 04	-100.0 to +200.0 °C	P 05	0 to 50.0 °C	P 06
	0 to 100.0 °C	P 07	0 to 200.0 °C	P 08	0 to 300.0 °C	P 09
0 to 500.0 °C	P 10	—	—	—	—	

¹ 0 to 399 °C [0 to 799 °F]; -6 °C [12 °F]

² 0 to 399 °C [0 to 799 °F]; Accuracy is not guaranteed.

Voltage/Current inputs

Type	Range	Code	Type	Range	Code
0 to 5 V DC	0.0 to 100.0 (Fixed)	4 01	0 to 20 mA DC	0.0 to 100.0 (Fixed)	7 01
1 to 5 V DC	0.0 to 100.0 (Fixed)	6 01	4 to 20 mA DC	0.0 to 100.0 (Fixed)	8 01

The first edition: DEC. 2012 [JM001]

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

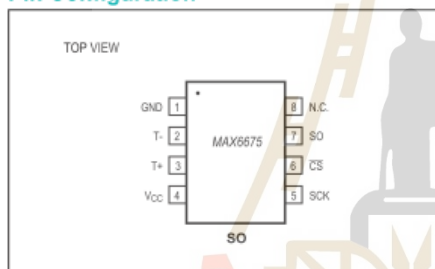
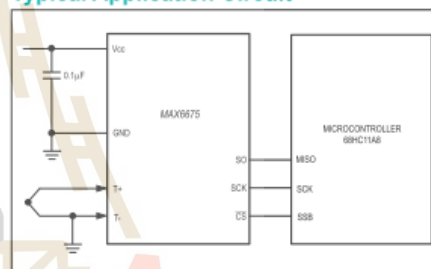
- Industrial
- Appliances
- HVAC

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**

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)

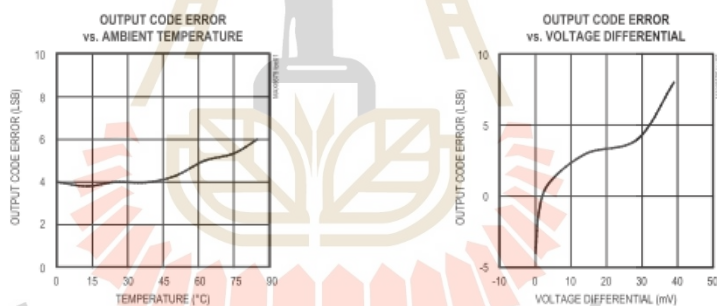
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Error		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-5	+5	LSB
			$V_{CC} = +5V$	-6	+6	
		$T_{THERMOCOUPLE} = 0^\circ C$ to $+700^\circ C$, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-8	+8	
			$V_{CC} = +5V$	-9	+9	
		$T_{THERMOCOUPLE} = +700^\circ C$ to +1000°C, $T_A = +25^\circ C$ (Note 2)	$V_{CC} = +3.3V$	-17	+17	
			$V_{CC} = +5V$	-19	+19	
Thermocouple Conversion Constant				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:

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

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.

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)

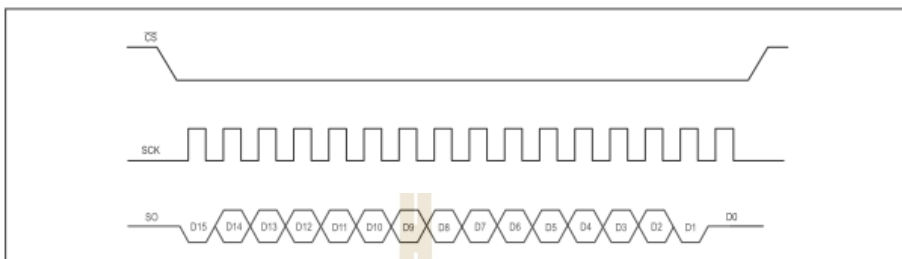


Figure 1a. Serial Interface Protocol

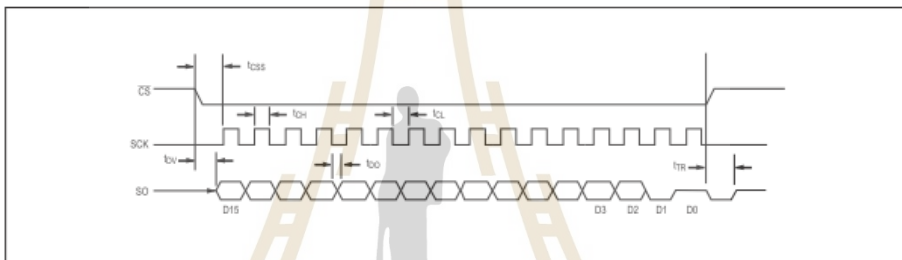


Figure 1b. Serial Interface Timing

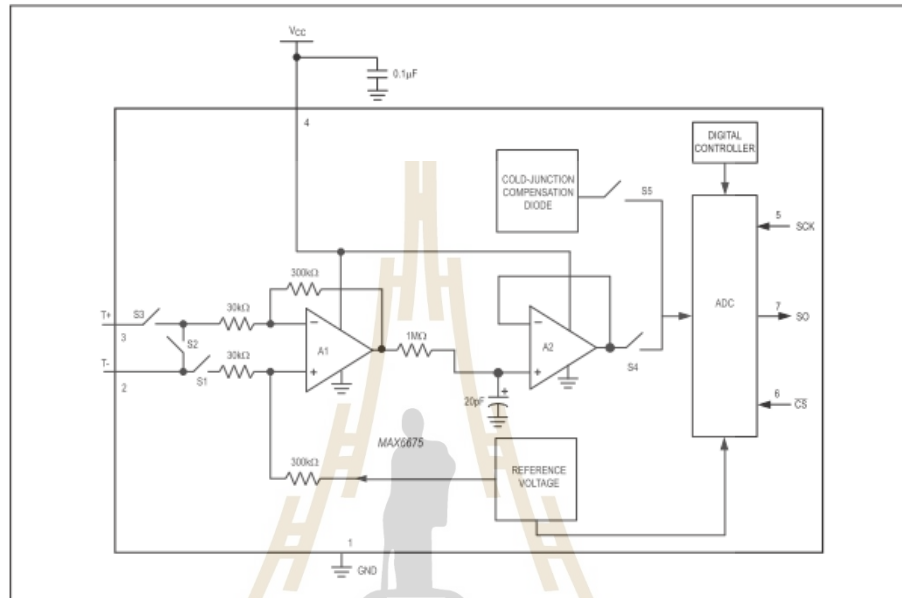
BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING												THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE		
		15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4				3	
	0	MSB													LSB	2	1	0
																	0	Three-state

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

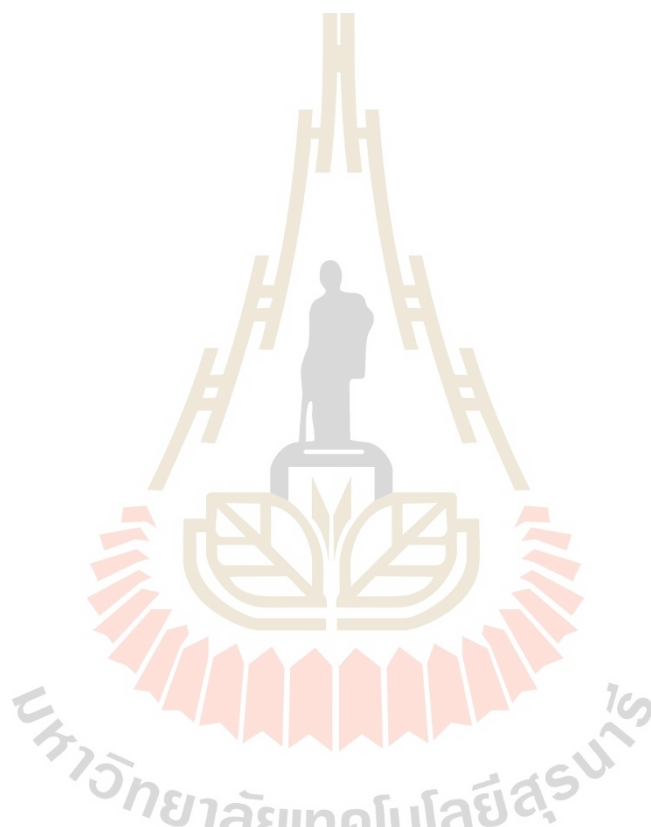
For the latest package outline information and land patterns (footprints), go to www.maximintegrated.com/packages. Note that a "+", "#", or "-" in the package code indicates RoHS status only. Package drawings may show a different suffix character, but the drawing pertains to the package regardless of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



TEMPERATURE SENSOR Type K thermocouple (Some are UL certified.)

温度センサー

Temperature sensors for our digital temperature controller "MonoOne" series. It is ready to use if your temperature controller supports thermocouple K and Pt100Ω.



Type K thermocouple

RoHS Compliance

Sheet type K thermocouple

Selection Standard

This is formed of a thermocouple on an insulating sheet, and is suitable for measuring surface temperature. It is a sheet-like thermocouple that is stuck on the surface of the object to measure surface temperature quickly and accurately.



Normal limit: 200°C Tolerance: Class 2 (±2.5°C or ±0.75%)

Product code	L(m)
TH-8297-1	1.0
TH-8297-3	3.0
TH-8297-10	10.0

Normal Limit of temperature sensing section

Outer diameter of sheath φ(mm)	Normal Limit T(SUS316)
1.0, 1.6, 2.3	650
2.3, 3.2	750

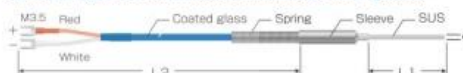
Sheath type K thermocouple

Selection Standard

This is a stainless steel sheath tube filled with inorganic insulator at high pressure through a thermocouple element, and is excellent in sensitivity, vibration resistance, and economical efficiency.

However, the durability of measurement in a high-temperature activated gas atmosphere may be extremely poor. Please consult us in advance.

Sheath type K thermocouple (Coated with glass)



Maximum cladding material temperature: 250°C (Sleeve 80°C) Tolerance: Class 2

Product code	φ (m)	L1 (m)	L2 (m)
TH-8159	3.2	100	1.5
TH-8159-1	3.2	100	3.0
TH-8159-2	3.2	100	5.0
TH-8185	3.2	300	3.0
TH-8182	3.2	500	3.0
TH-8192	3.2	50	3.0
TH-8163	1.6	100	3.0
TH-8163-1	1.6	100	1.5
TH-8196	1.0	100	3.0

Sheath type K thermocouple (Coated with silicone)



Maximum cladding material temperature: 180°C (Sleeve 80°C) Tolerance: Class 2

Product code	φ (m)	L1 (m)	L2 (m)
TH-8173	2.3	100	2.0
TH-8174	3.2	100	2.0

Sheath type K thermocouple (Coated with Fluororesin)



Maximum cladding material temperature: 280°C (Epoxy resin 150°C) Tolerance: Class 1 Waterproof type

Product code	φ (m)	L1 (m)	L2 (m)
TH-8100-2	3.2	100	2.0



株式会社スリーハイ
THREE HIGH CO., LTD.

Web: www.threehigh.com
Mail: info_overseas@threehigh.co.jp

Headquarters/Factory 4-42-16 Higashiyamata, Tsuzuki Ward, Yokohama City, Kanagawa 224-0023 JAPAN
TEL: +81-45-590-5561 FAX: +81-45-590-5571





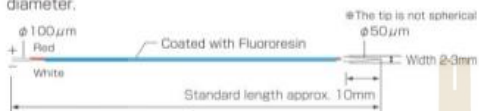
TEMPERATURE SENSOR Type K thermocouple (Some are UL certified.)

温度センサー

Ultrafine type K thermocouple

Selection Standard

It is suitable for measurement of ultrafine part and gas temperature.
 This ultrafine thermocouple with ultra-high-speed response is one of the industry's best in the field.
 The tip of the thermocouple is a thermocouple with 50μm diameter.



Normal limit: 260°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%)

Product code	L(m)
TH-8910-1	1.0

Stick type K thermocouple

Selection Standard

It is recommend if the detection section is planar or flat.
 This is a sensor with stable sensing of its heat resistance of 260°C and high durability.



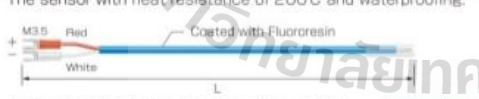
Normal limit: 260°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%)

Product code	L(m)
TH-8282	2.0

Mold type K thermocouple

Selection Standard

The tip is molded with resin and is recommended for measurements in liquids.
 The sensor with heat resistance of 200°C and waterproofing.



Normal limit: 200°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%) Waterproof type

Product code	L(m)
TH-8484-3	3.0

Duplex (tip welding) type K thermocouple

Selection Standard

The duplex type K thermocouple is the one whose thermocouple element wire is coated with Fluororesin or glass. It is used without protective tube.

Duplex type K thermocouple (Coated with glass)



Normal limit: 250°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8162-1~TH-8162-20	2,000
TH-8282-2	2.0
TH-8282-3	3.0
TH-8282-5	5.0
TH-8282-10	10.0
TH-8282-20	20.0

Normal limit: 250°C Tolerance: Class1(±1.5°C or ±0.4%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8296-1	1.0
TH-8296-2	2.0
TH-8296-3	3.0
TH-8296-5	5.0
TH-8296-10	10.0
TH-8296-20	20.0

Duplex type K thermocouple (Coated with Fluororesin)



Normal limit: 260°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8181-1	1.0
TH-8181-2	2.0
TH-8181-3	3.0
TH-8181-5	5.0
TH-8181-10	10.0
TH-8181-20	20.0



株式会社スリーハイ
THREE HIGH CO.,LTD.

Web: www.threehigh.com
 Mail: info_overseas@threehigh.co.jp

Headquarters/Factory 4-42-16 Higashiyamata, Tsuzuki Ward, Yokohama City, Kanagawa 224-0023 JAPAN
 TEL: +81-45-590-5561 FAX: +81-45-590-5571





TEMPERATURE SENSOR Type K thermocouple (Some are UL certified.)

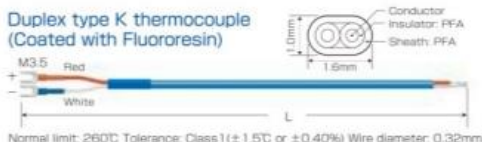
温度センサー

Type K thermocouple

RoHS Compliance

Duplex (tip welding) type K thermocouple

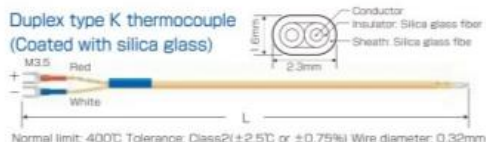
Duplex type K thermocouple (Coated with Fluororesin)



Normal limit: 260°C Tolerance: Class1(±1.5°C or ±0.40%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8391-1	1.0
TH-8391-2	2.0
TH-8391-3	3.0
TH-8391-5	5.0
TH-8391-10	10.0
TH-8391-20	20.0

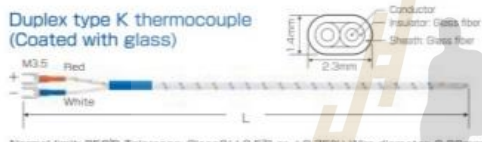
Duplex type K thermocouple (Coated with silica glass)



Normal limit: 400°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8292-1	1.0
TH-8292-2	2.0
TH-8292-3	3.0
TH-8292-5	5.0
TH-8292-10	10.0
TH-8292-20	20.0

Duplex type K thermocouple (Coated with glass)



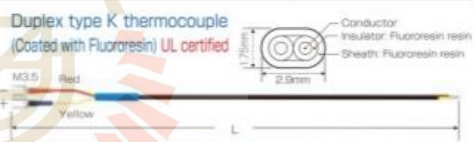
Normal limit: 350°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8294-1	1.0
TH-8294-2	2.0
TH-8294-3	3.0
TH-8294-5	5.0
TH-8294-10	10.0
TH-8294-20	20.0

Normal limit: 400°C Tolerance: Class1(±1.5°C or ±0.40%) Wire diameter: 0.32mm

Product code	L(m)
TH-8396-1	1.0
TH-8396-2	2.0
TH-8396-3	3.0
TH-8396-5	5.0
TH-8396-10	10.0
TH-8396-20	20.0

Duplex type K thermocouple (Coated with Fluororesin) UL certified



Normal limit: 200°C Tolerance: Class2(±2.5°C or ±0.75%) Wire diameter: 0.65mm

Product code	L(m)
TH-8290-1	1.0
TH-8290-2	2.0
TH-8290-3	3.0
TH-8290-5	5.0
TH-8290-10	10.0
TH-8290-20	20.0

Product code	L(m)
TH-8398-1	1.0
TH-8398-2	2.0
TH-8398-3	3.0
TH-8398-5	5.0
TH-8398-10	10.0
TH-8398-20	20.0

Changeable to circular terminal as optional (Extra charge)
Product: Duplex type K thermocouple Please consult us.



株式会社スリーハイ
THREE HIGH CO.,LTD.

Web: www.threehigh.com

Mail: info_overseas@threehigh.co.jp

Headquarters/Factory 4-42-16 Higashiyamata, Tsuzuki Ward, Yokohama City, Kanagawa 224-0023 JAPAN
TEL: +81-45-590-5561 FAX: +81-45-590-5571





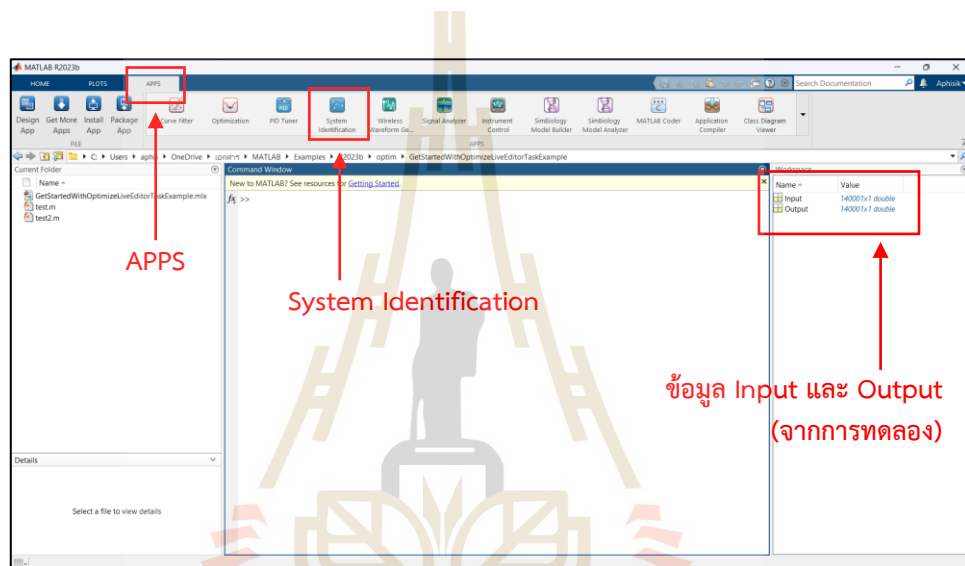
ภาคผนวก ข

พื้นฐานการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

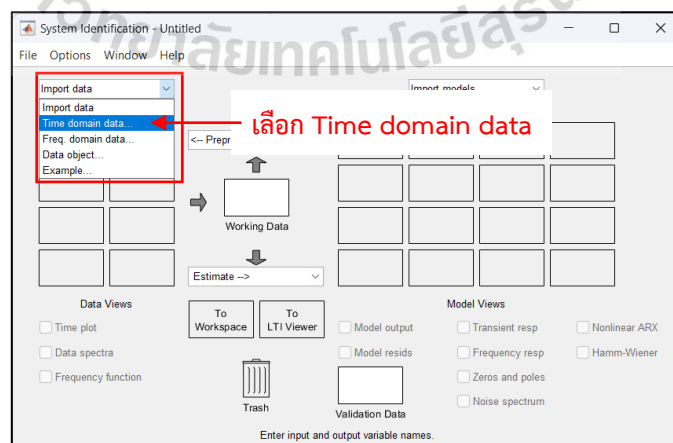
ข.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB

วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบในส่วนนี้เป็นการอธิบายขยายความเกี่ยววิธีการเพิ่มเติมสืบเนื่องมาจากหัวข้อ 3.10.4.2 ในบทที่ 3 โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการบนโปรแกรม MATLAB รายละเอียดขั้นตอนการใช้งานคำสั่งต่าง ๆ ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จากรูปภาพดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือก Open เพื่อนำข้อมูลสัญญาณป้อนเข้าและสัญญาณออกของระบบเข้ามายังหน้า Workspace ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ ข.1 จากนั้นเลือก APPS และเลือก System Identification หลังจากนั้นจะมีหน้าต่างงานดังขึ้นมาดังรูปที่ ข.2 เลือก Time domain data

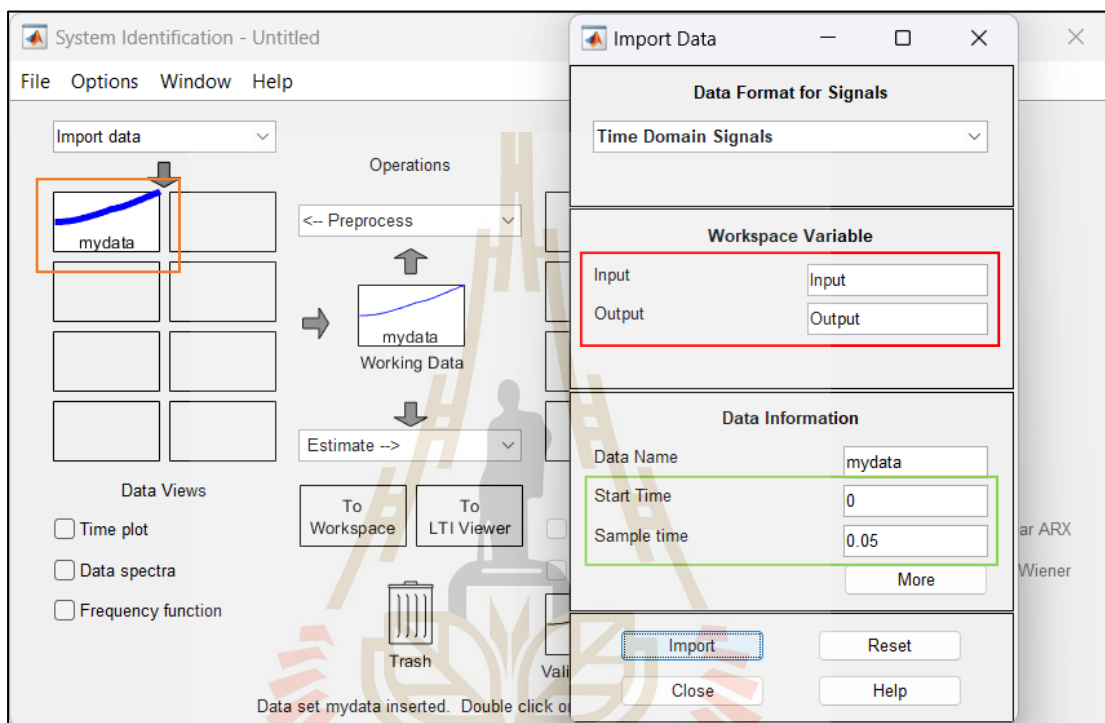


รูปที่ ข.1 การนำเข้าข้อมูลมายังโปรแกรม MATLAB

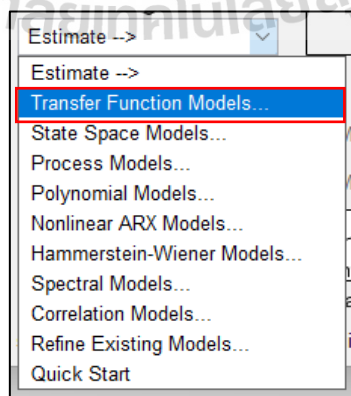


รูปที่ ข.2 การนำเข้าข้อมูลโดเมนเวลามายังหน้า System Identification

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อปรากฏหน้าต่าง Import Data ให้กรอกชื่อตัวแปรลงไปในส่วนของ Workspace Variable (กรอบสีแดง) จากนั้นจึงกรอกเวลาเริ่มต้นและความถี่ของข้อมูลที่จะนำข้อมูลมาพิจารณาในส่วน Data Information (กรอบสีเขียว) หลังจากนั้น กด Import ข้อมูลจะถูกนำเข้ามายังหน้า System Identification ตามกรอบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ ข.3 เสร็จแล้วให้เลือก Estimate แล้วเลือก Transfer Function Models ดังรูปที่ ข.4

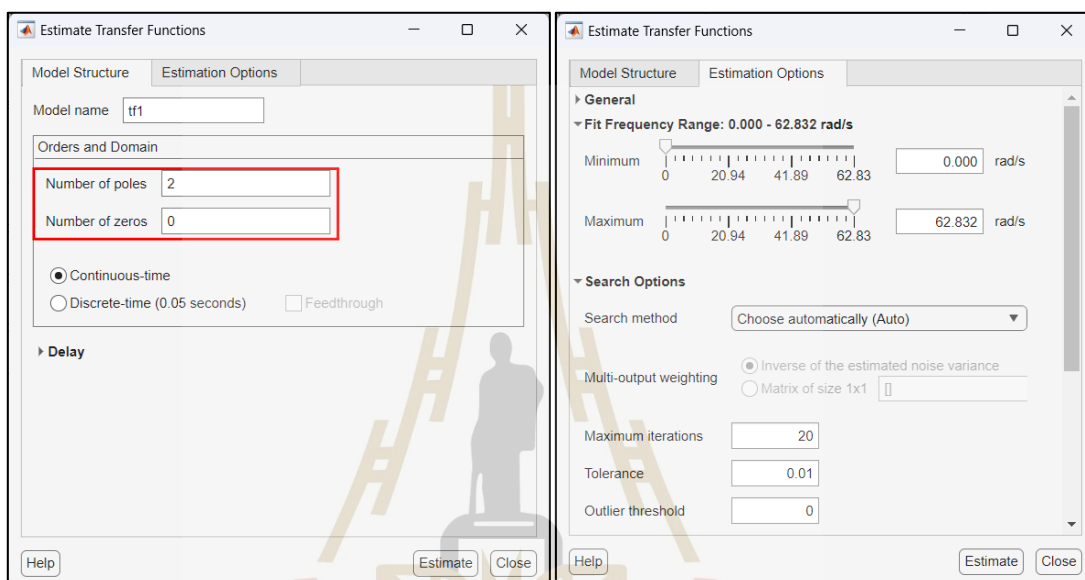


รูปที่ ข.3 การเตรียมข้อมูลก่อนกระบวนการระบุเอกลักษณ์

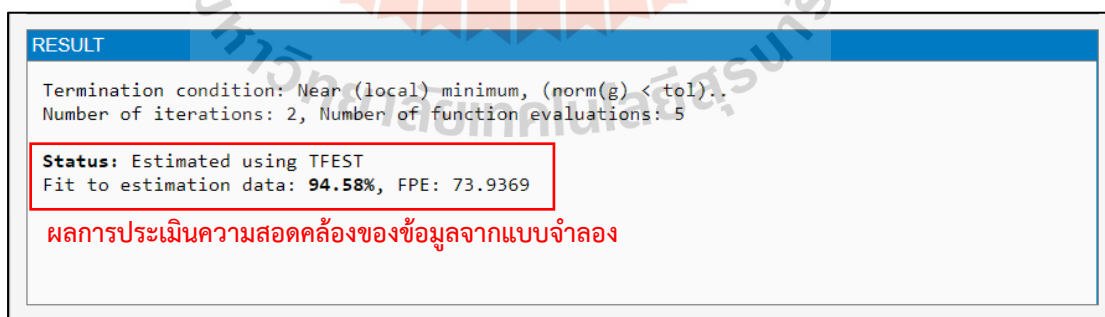


รูปที่ ข.4 การกำหนดรูปแบบฟังก์ชันในการประมาณค่า

ขั้นตอนที่ 3 ระบุจำนวนโพล (Pole) และซีโร (Zero) ของระบบที่สนใจศึกษา ในตัวอย่างนี้เป็นระบบอันดับ 2 ซึ่งมีโพลจำนวน 2 ตัว และซีโร 0 ตัว จึงระบุได้ดังรูปที่ ข.5 (ด้านขวามือ) จากนั้นเลือก Estimate ระบบจะประมาณค่าตัวแปรในฟังก์ชันถ่ายโอนโดยระเบียบวิธีการและการตั้งค่าอื่น ๆ จะเป็นค่าเริ่มต้นมาตรฐานของโปรแกรม MATLAB ทั้งนี้ ผู้อ่านสามารถปรับแต่งเพิ่มเติมได้จากส่วน Estimation Options ดังรูปที่ ข.5 (ด้านซ้ายมือ) ผลลัพธ์ของการระบุเอกลักษณ์แสดงดังรูปที่ ข.6 และ ข.7 โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนดูได้จากการดับเบิลคลิกที่หน้าผลลัพธ์ตามรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.5 การระบุจำนวนโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอน



รูปที่ ข.6 ผลลัพธ์จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (ความแม่นยำของแบบจำลอง)

System Identification - Untitled

File Options Window Help

Import data

Operations

Preprocess

mydata

Working Data

Estimate -->

Data Views

Time plot

Data spectra

Frequency function

To Workspace

To LTI Viewer

Trash

Model Views

Model output

Model resids

Validation Data

Transient resp

Frequency resp

Zeros and poles

Noise spectrum

Nonlinear ARX

Hamm-Wiener

Data/model Info: tf1

Model name: tf1

Color: [0,0,1]

From input "u1" to output "y1":
16.15

 $s^2 + 1.249 s + 0.1065$
Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 2 Number of zeros: 0

Diary and Notes

```
% Details about Estimation Data
% Import mydata

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.Display = 'on';
Options.EnforceStability = true;

tf1 = tfest(mydata, 2, 0, Options)
```

Show in LTI Viewer

Present Export Delete Close Help

ดับเบิลคลิก

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

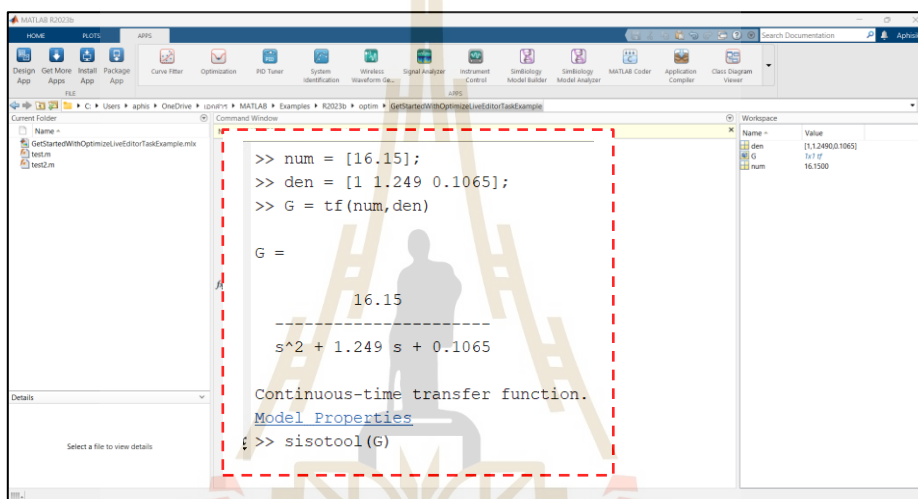
รูปที่ ข.7 การระบุจำนวนโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอน

ข.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีคำนวณทางคอมพิวเตอร์ทำให้การออกแบบตัวควบคุมในปัจจุบันสามารถทำได้หลากหลายวิธีผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป ในส่วนนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม 2 วิธีการ โดยดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วย วิธีปรับเส้นทางเดินรากของระบบ และวิธีการปรับตัวควบคุมด้วย PID Tuner ใน MATLAB Simulink

ข.2.1 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีปรับเส้นทางเดินรากของระบบ

วิธีนี้จำเป็นต้องกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนบนโปรแกรม MATLAB ก่อน หลังจากนั้นจึงเรียกใช้คำสั่ง `sisotool` เพื่อปรับเส้นทางเดินของรากดังรูปที่ ข.8 และ ข.9 ตามลำดับ



```

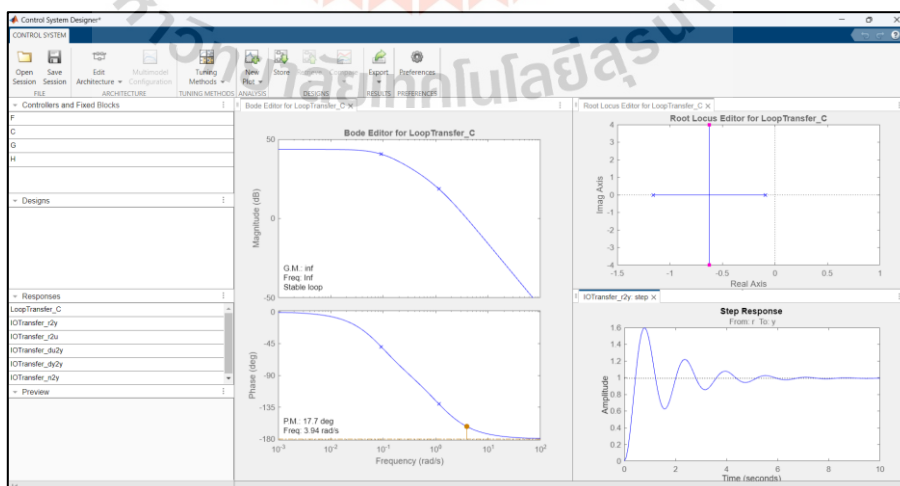
>> num = [16.15];
>> den = [1 1.249 0.1065];
>> G = tf(num,den)

G =

    16.15
-----
s^2 + 1.249 s + 0.1065

Continuous-time transfer function.
Model Properties
>> sisotool(G)
  
```

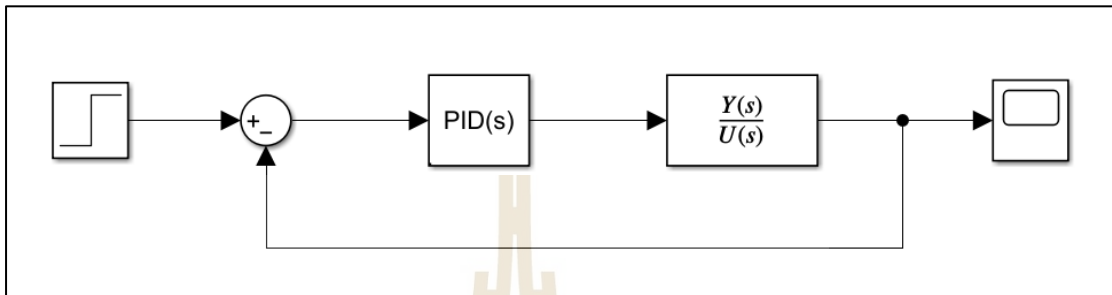
รูปที่ ข.8 การกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนและเรียกใช้คำสั่ง `sisotool` บนโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ข.9 หน้าต่างสำหรับปรับเส้นทางเดินรากของระบบ

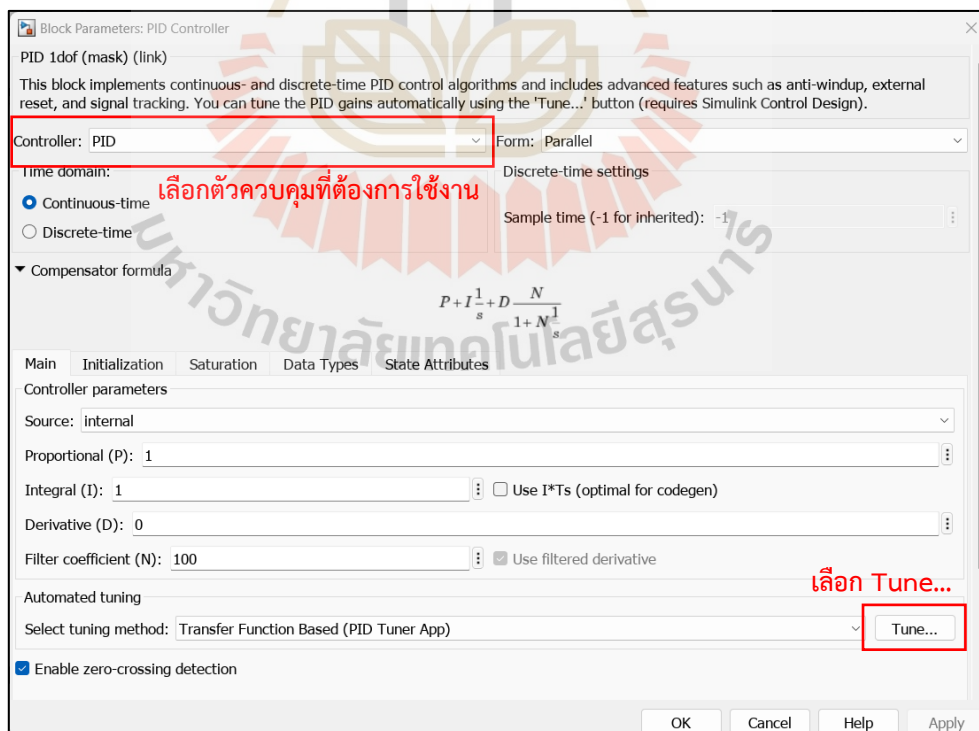
ข.2.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วย PID Tuner ใน MATLAB Simulink

วิธีการนี้ดำเนินงานบน MATLAB Simulink โดยนำฟังก์ชันถ่ายโอนจากขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้จำลองเพื่อดูผลตอบสนองของระบบตามรูปที่ ข.10 จากนั้นกด Run เพื่อดูผลตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้น (ไม่จำเป็นต้องระบุค่า PID)



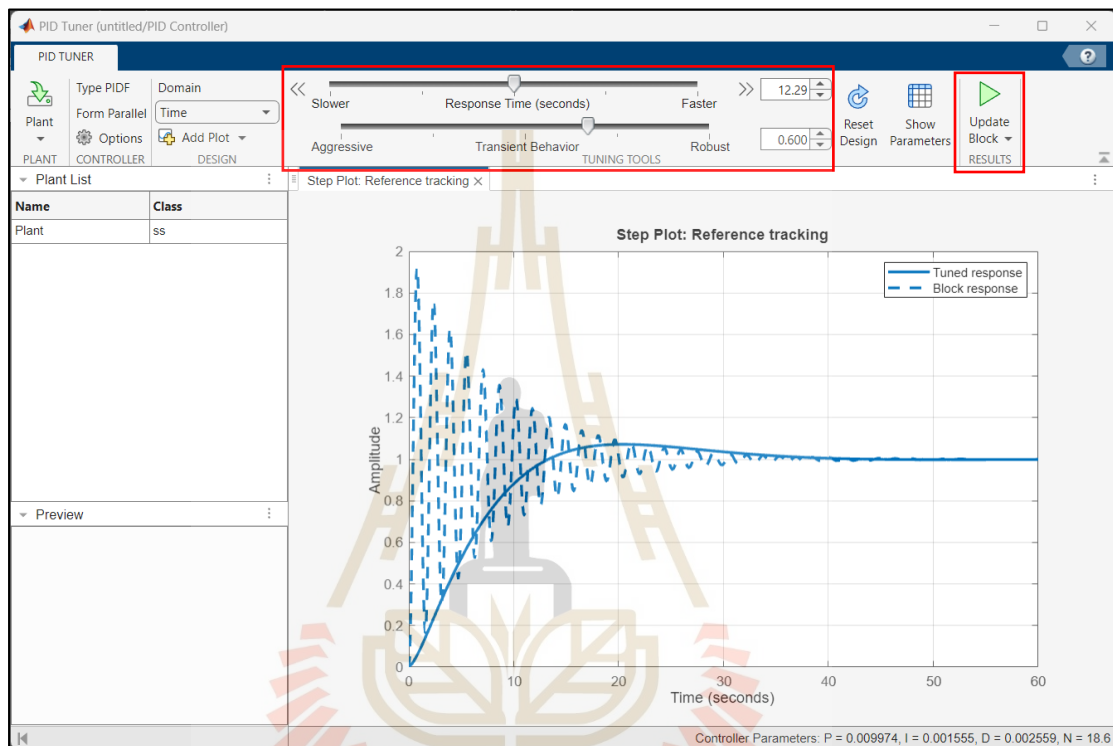
รูปที่ ข.10 การจำลองผลตอบสนองของระบบควบคุม PID

เมื่อระบบได้รับสัญญาณเข้าและดำเนินการจนครบตามเวลาที่ระบุไว้แล้ว ให้ดับเบิลคลิกที่กล่อง PID(s) ที่แสดงในรูปที่ ข.10 เพื่อเข้าสู่หน้าต่างปรับแต่งตัวควบคุมดังรูปที่ ข.11



รูปที่ ข.11 หน้าต่าง Block Parameters สำหรับปรับแต่งค่า PID

ลำดับถัดมาให้ผู้อ่านเลือกตัวควบคุมที่ต้องการใช้งาน จากนั้นเลือก Tune โปรแกรม จะพาเข้าสู่หน้าปรับแต่งตัวควบคุมตามรูปที่ ข.12 โดยให้ผู้ปรับแต่งกำหนดค่าตามพฤติกรรมที่ต้องการตามกรอบสีแดง จากนั้นกด Update Block โดยสังเกตผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากหน้าจอ ของโปรแกรมจนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่ต้องการ แล้วจึงปิดหน้าต่างโปรแกรม ทั้งนี้ค่า PID หลังจา การกด Update Block จะถูกบันทึกไปยังหน้า Block Parameters (รูปที่ ข.10) โดยอัตโนมัติ

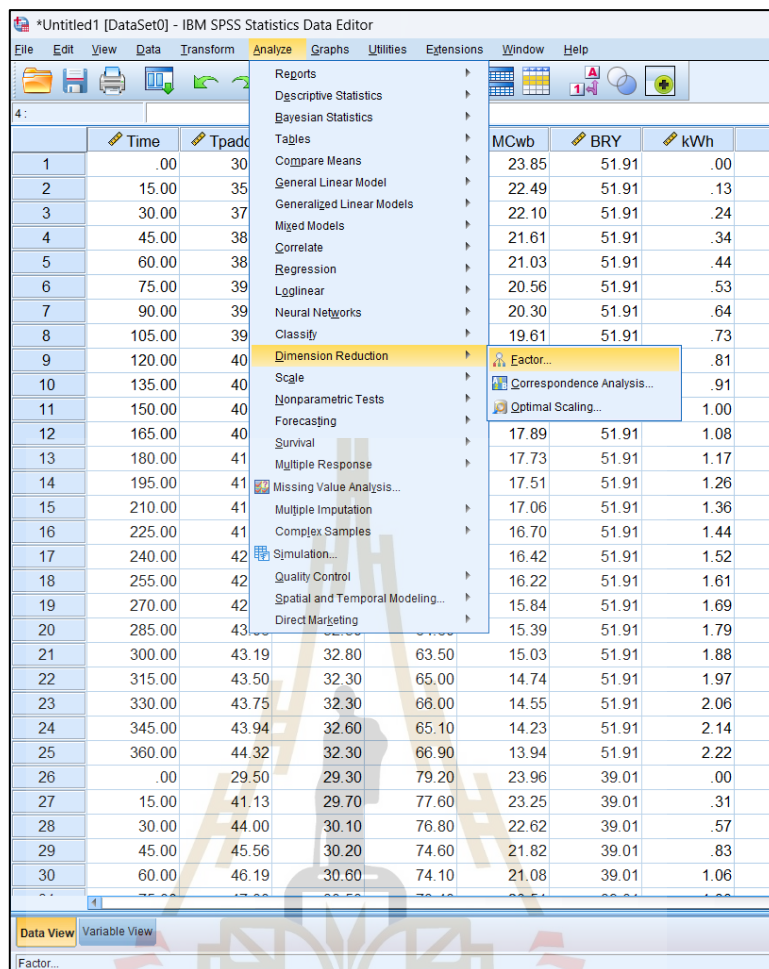


รูปที่ ข.12 หน้าต่าง PID Tuner สำหรับปรับแต่งผลตอบสนอง

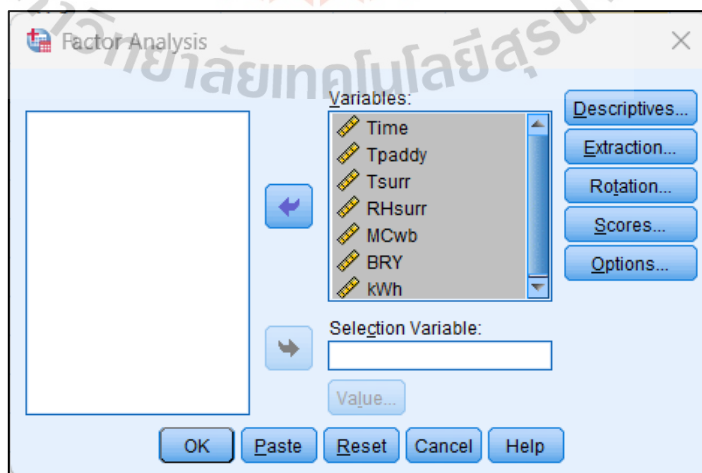
ข.3 การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics

การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร โดยมีจุดเด่นในด้านการลดจำนวนของข้อมูลจากการรวมกลุ่มตัวแปรที่อาจมีความสัมพันธ์กันไว้ด้วยกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอาจเป็นได้ทั้งในเชิงบวกหรือลบก็ได้ สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics สามารถทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำข้อมูลที่จะวิเคราะห์เข้ามายังหน้าจอโปรแกรม SPSS ตามรูปที่ ข.13 แล้วจึงไปที่แถบเมนู เลือก Analyze จากนั้นไปที่ Dimension Reduction เลือก Factor โปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง Factor Analysis ขึ้น ให้ผู้ศึกษาเลือกตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์เข้าไปยังส่วน Variables ตามรูปที่ ข.14

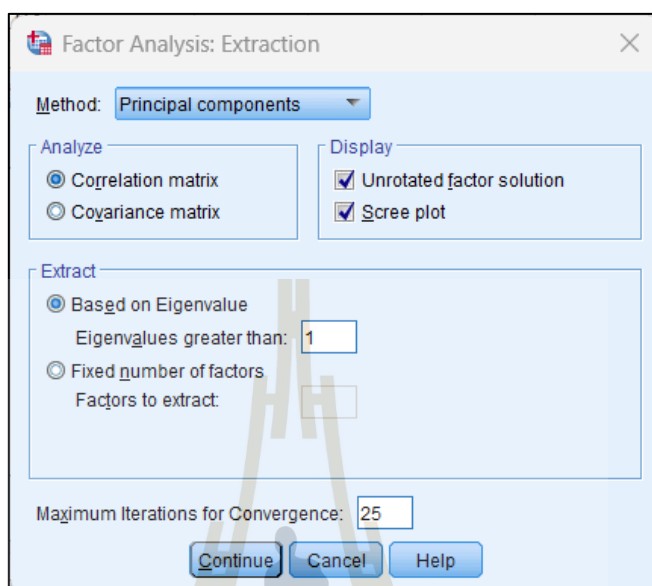


รูปที่ ข.13 การเตรียมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ปัจจัย



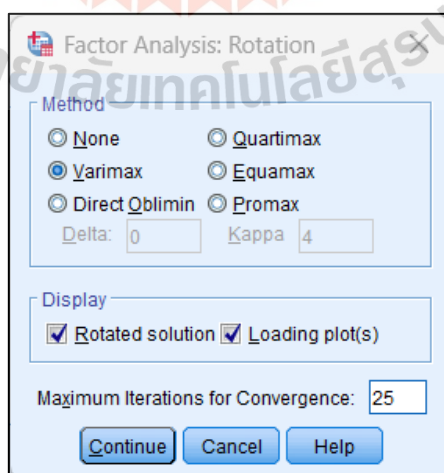
รูปที่ ข.14 การเลือกตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ปัจจัย

ขั้นตอนที่ 2 เลือก Extraction เพื่อกำหนดวิธีสกัดปัจจัย โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ตามรูปที่ ข.15 แล้วกด Continue



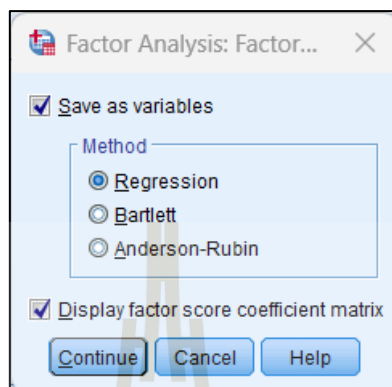
รูปที่ ข.15 การเลือกวิธีสกัดปัจจัย

ขั้นตอนที่ 3 ที่หน้า Factor Analysis ให้กดเลือก Rotation เพื่อกำหนดการหมุนแกนองค์ประกอบ โดยที่งานวิจัยนี้เลือกใช้การหมุนแกนแบบ Varimax ตามรูปที่ ข.16 รายละเอียดเพิ่มเติมผู้อ่านสามารถศึกษาได้จากวิทยานิพนธ์ของ อภิสสิณี ภัคดีแก้ว (2564)



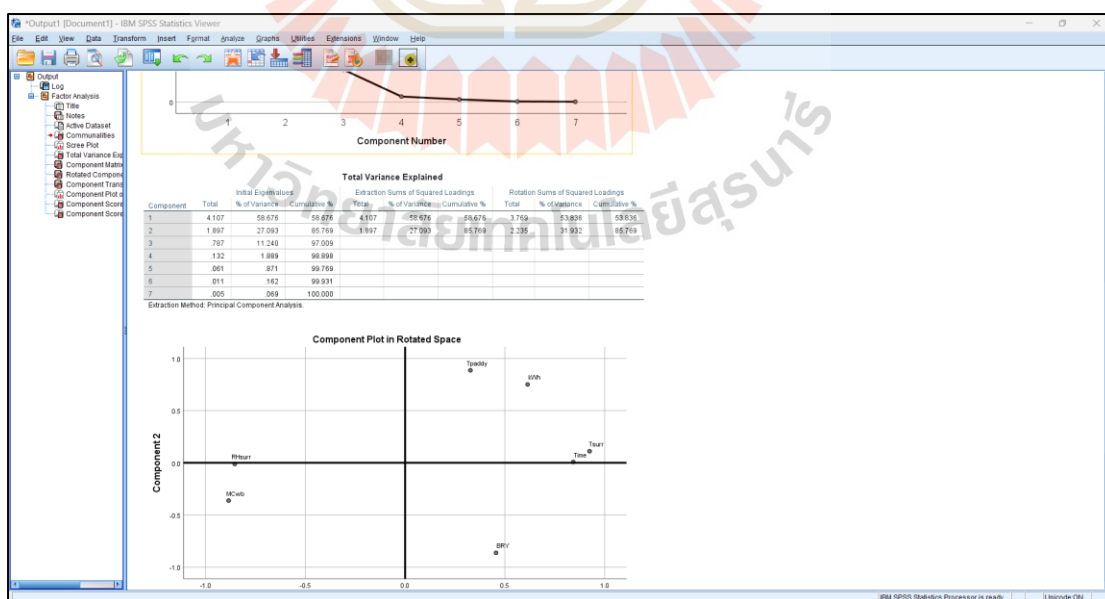
รูปที่ ข.16 การเลือกวิธีหมุนแกนองค์ประกอบ

หากต้องการบันทึกค่าตัวแปรและแสดงค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักองค์ประกอบ (Factor score coefficient matrix) ให้ผู้ศึกษาเข้าไปเลือกในหน้า Score ตามรูปที่ ข.17 โดยที่ สัมประสิทธิ์น้ำหนักองค์ประกอบจะมีความสัมพันธ์กับค่า Standardize ของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดของงานวิจัยนี้



รูปที่ ข.17 การบันทึกค่าตัวแปรและแสดงค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักองค์ประกอบ

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อตั้งค่าต่าง ๆ ในโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้กลับมาที่หน้า Factor Analysis แล้วกด OK หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าและแสดงผลลัพธ์เป็นตัวเลขและตัวแปรทางสถิติที่ผู้ใช้งานต้องนำไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปดังรูปที่ ข.18

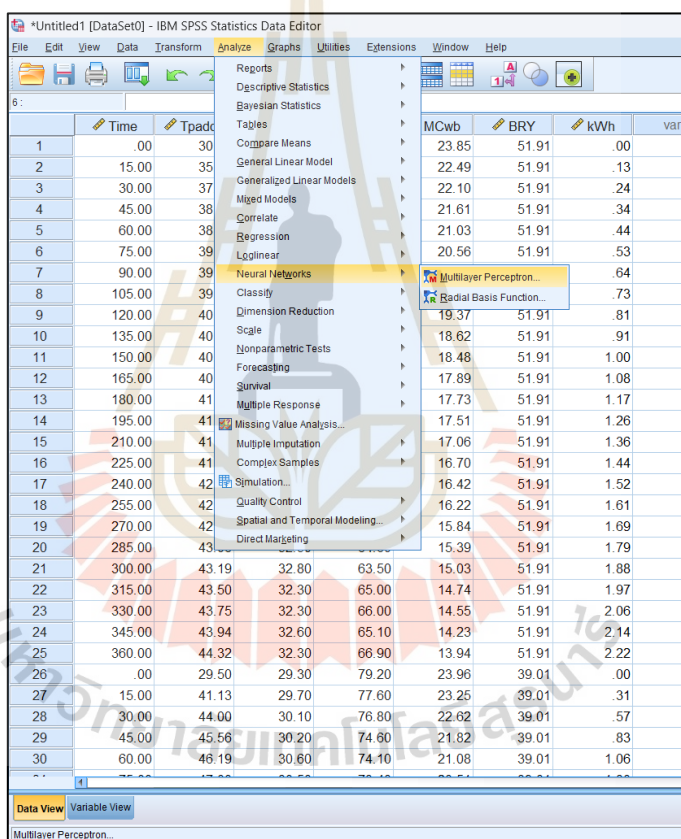


รูปที่ ข.18 หน้าต่างผลลัพธ์ของโปรแกรม IBM SPSS Statistics

ข.3 การวิเคราะห์ความไวด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics

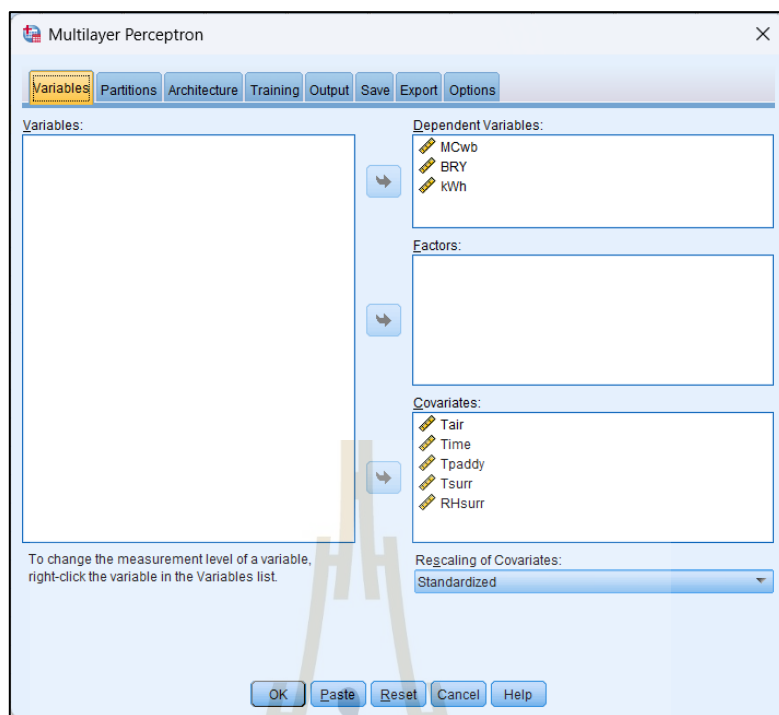
งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความไวโดยอาศัยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นมาบนโปรแกรม IBM SPSS Statistics ซึ่งในฟังก์ชัน Neural Networks ของ IBM สามารถดำเนินการหาความสำคัญของตัวแปรได้ในคำสั่งเดียว สำหรับการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและการหาความสำคัญของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตามสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ในส่วนนี้ใช้ข้อมูลชุดเดิมจากรูปที่ ข.13 โดยเลือก Analyze แล้วไปที่ฟังก์ชัน Neural Networks ดังรูปที่ ข.19 จากนั้นจึงเลือก Multilayer Perceptron เพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากข้อมูลการทดลอง



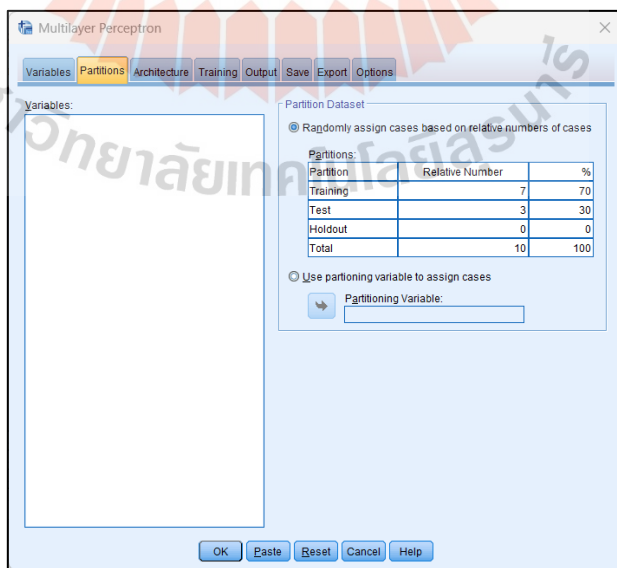
รูปที่ ข.19 การเข้าสู่ฟังก์ชัน Neural Networks

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตัวแปรเข้าไปยังการวิเคราะห์ โดยจำแนกตามประเภท 2 ส่วน ได้แก่ ตัวแปรตาม (Dependent variables) และ ตัวแปรร่วม (Covariates) ตามรูปที่ ข. 20 จากนั้นให้กำหนดวิธีการทำให้ฐานข้อมูลเป็นค่ามาตรฐาน ซึ่งในที่นี้เลือกเป็น Standardized



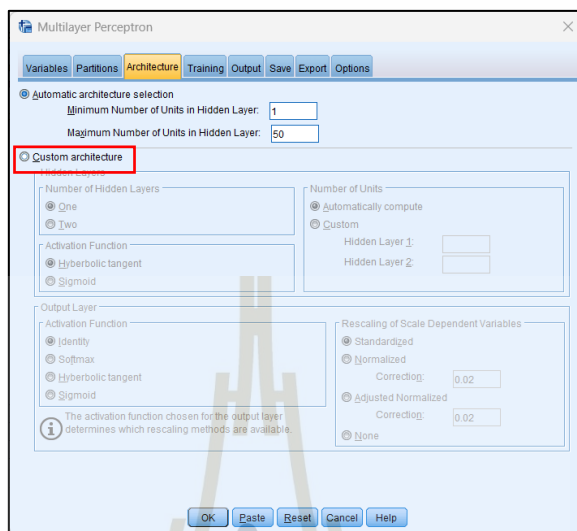
รูปที่ ข.20 การจัดประเภทของตัวแปรสำหรับวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 3 เลือกจำนวนข้อมูลที่ต้องการแบ่งสำหรับการฝึกสอนและการตรวจสอบความแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วมักจะเลือกให้มีสัดส่วนประมาณ 70%:30% ของจำนวนข้อมูลทั้งหมด



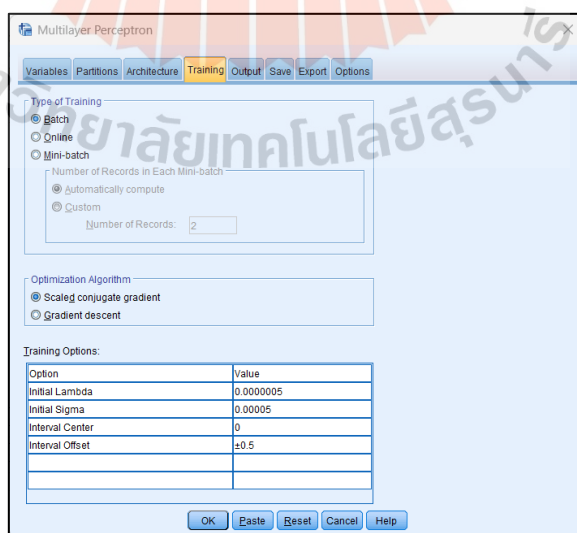
รูปที่ ข.21 การกำหนดสัดส่วนข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทวนสอบโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 4 หากผู้อ่านต้องการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้างแบบจำลองด้วยตนเอง ผู้อ่านสามารถกำหนดได้โดยเลือก Custom Architecture ตามกรอบสีแดงในรูปที่ ข.22



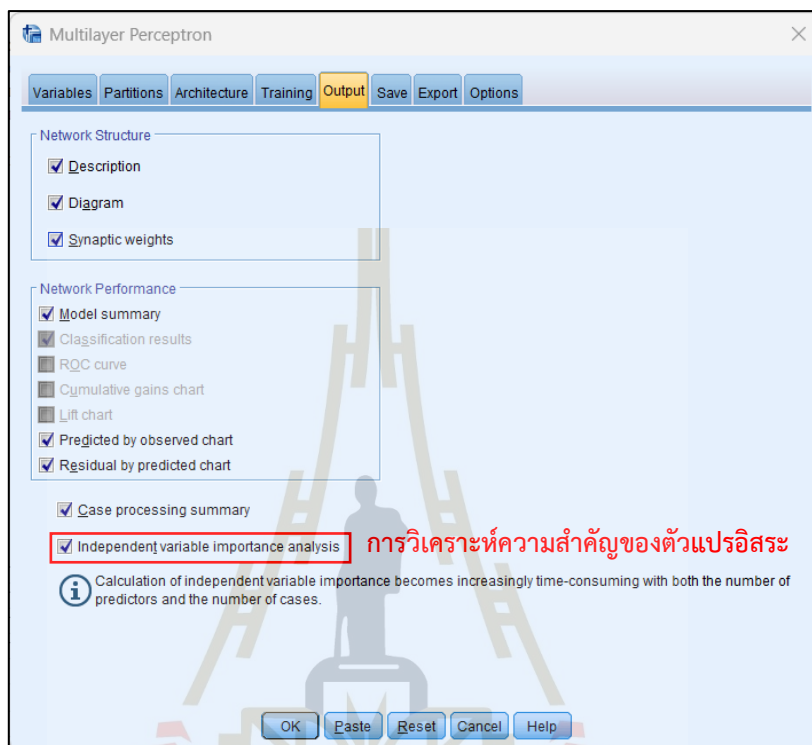
รูปที่ ข.22 การกำหนดสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 5 เลือกวิธีการฝึกสอนแบบจำลองรวมถึงระเบียบวิธีในการหาค่าเหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้เลือกใช้การฝึกสอนแบบ Batch และวิธีหาค่าเหมาะสมด้วย Scaled conjugate gradient method ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของโปรแกรม



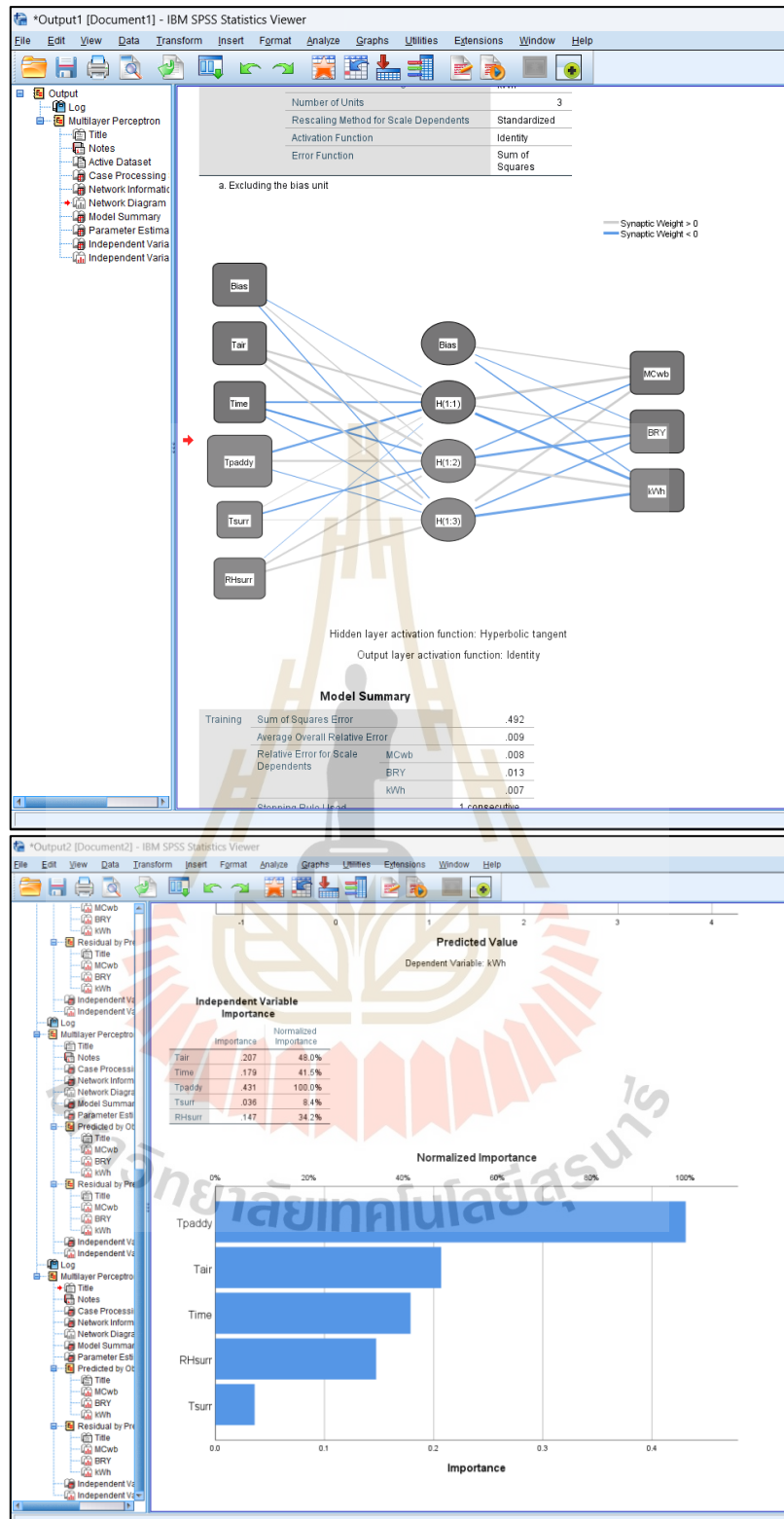
รูปที่ ข.23 การกำหนดวิธีฝึกสอนและวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 เลือกค่าที่ต้องการแสดงในหน้าต่างผลลัพธ์ตามรูปที่ ข.24 โดยที่ Independent variable importance analysis คือ การวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรอิสระที่งานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบและใช้งาน (กรอบสีแดง)



รูปที่ ข.24 การเลือกค่าที่ต้องการแสดงในหน้าต่างผลลัพธ์

ขั้นตอนที่ 7 กำหนดจุดสิ้นสุดการคำนวณ โดยระบุความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้จากการคำนวณ ซึ่งงานวิจัยเลือกใช้ค่ามาตรฐานของโปรแกรม คือ การเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่า 0.0001 จากนั้นกด OK เพื่อเริ่มการคำนวณ เมื่อการคำนวณสิ้นสุดลง หน้าต่างผลลัพธ์จะแสดงขึ้น ดังรูปที่ ข.25



รูปที่ ข.25 หน้าต่างผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม



ภาคผนวก ค

ผลงานทางวิชาการในระหว่างการศึกษา

ในระหว่างการศึกษาาระดับปริญญาเอก ผู้วิจัยได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการและส่งบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ลงในวารสารทั้งในประเทศและต่างประเทศ จำนวน 9 ผลงาน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้มีโอกาสร่วมทำโครงการวิจัยในหัวข้อ เรื่อง การพัฒนาระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบแม่นยำในกระบวนการอบแห้งแบบตามเวลาจริงเพื่อควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์และการประหยัดพลังงานในเครื่องอบแห้ง และยื่นขอลิขสิทธิ์ (ทรัพย์สินทางปัญญา) ตามเอกสารแนบ จำนวน 3 ฉบับ รวมผลงานทั้งสิ้น 12 ผลงาน สามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มของผลงานดังต่อไปนี้

1. งานประชุมวิชาการระดับชาติ

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2565). แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 7, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 29 มีนาคม 2565.

บุญชฎิกา ศิลา, อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2565). ผลของการหมุนเวียนอากาศทั้งที่มีต่อการใช้พลังงานในระบบทำความร้อนอากาศ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14, โรงแรมฮิลตัน อาร์เคเดีย รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต, 25-27 พฤษภาคม 2565.

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2566). การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความชื้นในระบบหมุนเวียนอากาศอบแห้ง. การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 22, โรงแรม เดอะ ม้านตริณี จังหวัดเชียงราย, 9-10 มีนาคม 2566.

2. งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treeamnuak, and Tawarat Treeamnuak. (2023). Design of feedback controller for humidity control of air circulation in drying system. Proceeding in the 8th International Conference on Advance Technology Innovation (ICATI 2023), Okinawa Japan, 1-5 April 2023.

Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treeamnuak, and Tawarat Treeamnuak. (2024). Sensitivity Analysis of Factors in Thai Jasmine Paddy Rice Drying Process. Proceeding in the 5th International Congress on Natural Sciences and Engineering (ICNSE 2024), Kyoto Japan, 27-29 March 2024.

Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treeamnuak, and Tawarat Treeamnuak. (2024). Application of PID controller for controlling paddy temperature in hot air pneumatic drying process. Proceeding in the 10th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2024), Singapore, 27-29 April 2024.

3. วารสารวิชาการระดับชาติ

อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระวี ตรีอำรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2565). แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, 8(2), 99-109.

4. วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, Tawarat Treamnuk, and Natthapong Wongbubpa. (2023). Application of pulse width modulation technique in air humidity control system. Agriculture and Natural Resources, 57(2), 321-330.

Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, and Tawarat Treamnuk (2023). Humidity control for air circulation in the drying process. Advances in Technology Innovation, 8(4), 278-289.

5. ทรัพย์สินทางปัญญา

- (1) ลิขสิทธิ์ เรื่อง ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ และค่าความต้านทานของข้าว (อยู่ระหว่างการเผยแพร่)
- (2) ลิขสิทธิ์ เรื่อง ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ และค่าความเก็บประจุของข้าว (อยู่ระหว่างการเผยแพร่)
- (3) ลิขสิทธิ์ เรื่อง ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ และค่าความต้านทาน และค่าความเก็บประจุของข้าว (อยู่ระหว่างการเผยแพร่)



ทะเบียนข้อมูลเลขที่ ว1 011054

คำขอแจ้งข้อมูลเลขที่ 438031

หนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์

ออกให้เพื่อแสดงว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้แจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์ไว้ต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา

เมื่อวันที่ 14 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567

ประเภทงาน วรรณกรรม ลักษณะงาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ชื่อผลงาน ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ
และค่าความต้านทานของข้าว

ออกให้ ณ วันที่ 7 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

ลงชื่อ.....

(นางธนัญญา ไซตติติก)

นักวิชาการพาณิชย์ชำนาญการพิเศษ

ปฏิบัติราชการแทนผู้อำนวยการกองลิขสิทธิ์

หมายเหตุ เอกสารนี้มีได้รับรองความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์

ในกรณีมีข้อพิพาทศาลจะเป็นผู้วินิจฉัยชี้ขาดความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์



ทะเบียนข้อมูลเลขที่ ว1 011056

คำขอแจ้งข้อมูลเลขที่ 438033

หนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์

ออกให้เพื่อแสดงว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้แจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์ไว้ต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา

เมื่อวันที่ 14 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567

ประเภทงาน วรรณกรรม ลักษณะงาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ชื่อผลงาน ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ

และค่าความเก็บประจุของข้าว

ออกให้ ณ วันที่ 7 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

ลงชื่อ.....

(นางธนิกฐา ไซตติติก)

นักวิชาการพาณิชย์ชำนาญการพิเศษ

ปฏิบัติราชการแทนผู้อำนวยการกองลิขสิทธิ์

หมายเหตุ เอกสารนี้มิได้รับรองความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์

ในกรณีมีข้อพิพาทศาลจะเป็นผู้วินิจฉัยชี้ขาดความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์



ทะเบียนข้อมูลเลขที่ ว1 011055

คำขอแจ้งข้อมูลเลขที่ 438032

หนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์

ออกให้เพื่อแสดงว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้แจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์ไว้ต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา

เมื่อวันที่ 14 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567

ประเภทงาน วรรณกรรม ลักษณะงาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ชื่อผลงาน ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ

และค่าความต้านทาน และค่าความเก็บประจุของข้าว

ออกให้ ณ วันที่ 7 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

ลงชื่อ.....

(นางธนภรดา โชติติลล)

นักวิชาการพาณิชย์ชำนาญการพิเศษ

ปฏิบัติราชการแทนผู้อำนวยการกองลิขสิทธิ์

หมายเหตุ เอกสารนี้มิได้รับรองความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์

โน้ตกรรมมีข้อพิพาทศาลจะเป็นผู้วินิจฉัยชี้ขาดความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์

ประวัติผู้เขียน

นายอภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2539 ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่ บ้านหนองแวง ตำบลหนองแวง อำเภอเทพารักษ์ จังหวัดนครราชสีมา เริ่มเข้าศึกษาระดับอนุบาลชั้นปีที่ 1 จนถึงมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 3 ณ โรงเรียนพงษ์ศิริวิทยา และเข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 4 - 6 ณ โรงเรียนมัธยมด่านขุนทด อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นจึงเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2558 เมื่อสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีในปี พ.ศ. 2562 จึงได้เข้าทำงานในบริษัทเอกชนอยู่ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ (สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล) และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอกในสาขาเดียวกัน ภายหลังจากการศึกษาระดับปริญญาโท ในปี พ.ศ. 2564 โดยได้รับทุนกิตติบัณฑิตตลอดมา ทั้งนี้ ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาเอก ผู้เขียนได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการรวมทั้งสิ้น 5 วิชา ได้แก่ เขียนแบบวิศวกรรม 1 เขียนแบบวิศวกรรม 2 การเขียนแบบทางกล ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2 และปฏิบัติการความร้อนและของไหลสำหรับวิศวกรรมยานยนต์ ในระหว่างการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ผู้เขียนได้มีโอกาสร่วมทำวิจัยกับคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิหลากหลายท่าน จนมีผลงานวิชาการสะสมเป็นจำนวน 16 ผลงาน ดังต่อไปนี้

1. Aphisik Pakdeekeaw, Somkiat Maithomklang, Niti Klinkaew, Supunnee Junpirom and Ekarong Sukjit. (2021). The utilization of biodiesel from palm oil and palm kernel oil by using reactor with different stirred method in a diesel engine. Proceeding in the 30th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference. The Virtual Conference via ZOOM, 6-7 May 2021.
2. อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2564). การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13. ออนไลน์, 12-14 พฤษภาคม 2564.
3. อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนรรค, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช. (2564). ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกที่มีความชื้นแตกต่างกัน. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 16 (1), 69-82.
4. อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2565). การพัฒนาวิธีการประเมินความชื้นข้าวเปลือกแบบตามเวลาจริงด้วยอุปกรณ์รับรู้คุณสมบัติอากาศ. การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน

และกระบวนการ ครั้งที่ 21, โรงแรม วินทรี ซิตี้ รีสอร์ท จังหวัดเชียงใหม่, 10-11 มีนาคม 2565.

5. อภิสิกข์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตริอำนาจ และ เทวรัตน์ ตริอำนาจ. (2565). แบบจำลองออบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 7, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 29 มีนาคม 2565.
6. บุญชริกา ศิลา, อภิสิกข์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตริอำนาจ และ เทวรัตน์ ตริอำนาจ. (2565). ผลของการหมุนเวียนอากาศทิ้งที่มีต่อการใช้พลังงานในระบบทำความร้อนอากาศ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14, โรงแรมฮิลตัน อาร์เคเดีย รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต, 25-27 พฤษภาคม 2565.
7. อภิสิกข์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตริอำนาจ และ เทวรัตน์ ตริอำนาจ. (2565). แบบจำลองออบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, 8(2), 99-109.
8. อภิสิกข์ ภัคดีแก้ว, กระจวี ตริอำนาจ และ เทวรัตน์ ตริอำนาจ. (2566). การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความชื้นในระบบหมุนเวียนอากาศอบแห้ง. การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 22, โรงแรม เดอะ มินทรีย์ จังหวัดเชียงราย, 9-10 มีนาคม 2566.
9. Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, and Tawarat Treamnuk. (2023). Design of feedback controller for humidity control of air circulation in drying system. Proceeding in the 8th International Conference on Advance Technology Innovation (ICATI 2023), Okinawa Japan, 1-5 April 2023.
10. Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, Tawarat Treamnuk, and Natthapong Wongbubpa. (2023). Application of pulse width modulation technique in air humidity control system. Agriculture and Natural Resources, 57(2), 321-330.
11. Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, and Tawarat Treamnuk (2023). Humidity control for air circulation in the drying process. Advances in Technology Innovation, 8(4), 278-289.
12. Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, and Tawarat Treamnuk. (2024). Sensitivity Analysis of Factors in Thai Jasmine Paddy Rice Drying Process. Proceeding in the 5th International Congress on Natural Sciences and Engineering (ICNSE 2024), Kyoto Japan, 27-29 March 2024.
13. Aphisik Pakdeekaew, Krawee Treamnuk, and Tawarat Treamnuk. (2024). Application of PID controller for controlling paddy temperature in hot air pneumatic drying process. Proceeding in the 10th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2024), Singapore, 27-29 April 2024.

14. ลิขสิทธิ์ เรื่อง ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ และค่าความต้านทานของข้าว (อยู่ระหว่างการเผยแพร่)
15. ลิขสิทธิ์ เรื่อง ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ และค่าความเก็บประจุของข้าว (อยู่ระหว่างการเผยแพร่)
16. ลิขสิทธิ์ เรื่อง ระบบตรวจวัดความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริงด้วยการวัดอุณหภูมิ และค่าความต้านทาน และค่าความเก็บประจุของข้าว (อยู่ระหว่างการเผยแพร่)

นอกจากการทำวิจัยในระหว่างการศึกษา ผู้เขียนยังได้เข้าร่วมอบรมในหลักสูตรต่าง ๆ อาทิเช่น หลักสูตรอบรมการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Solid work ในระดับ Associate และหลักสูตร แบตเตอรี่ และการประยุกต์ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยได้รับหนังสือรับรองจากหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

