

การลดความชื้นของใบรางจืดโดยการตรวจสอบน้ำหนักแบบเวลาจริง
ในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ธนภัทร นวลทูล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มิถุนายน 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



การลดความชื้นของใบรางจืดโดยการตรวจสอบน้ำหนักแบบเวลาจริง
ในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

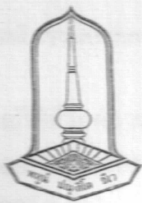
ธนภัทร นวลทูล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มิถุนายน 2561

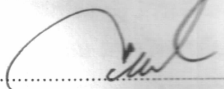
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



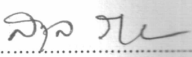


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายธนภัทร นวลทูล
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์)

ประธานกรรมการ
(ผู้ทรงคุณวุฒิ)


(ผศ.ดร.ละมุล วิเศษ)

กรรมการ
(อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก)


(ผศ.ดร.เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล)

กรรมการ
(อาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ)


(ผศ.ดร.นุชิตา สุวแพทย์)

กรรมการ
(อาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม


(รศ.ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์


(ผศ.ดร.กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 30 เดือน 8.4. พ.ศ. 2561



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาดูแลให้คำปรึกษา ตรวจสอบ แก้ไข
ข้อบกพร่องตลอดจนในคำแนะนำช่วยเหลืออย่างยิ่ง จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ ซึ่งเป็น
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติสิน กาญจนวนิชกุล และ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชิดา สุวแพทย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกสร วงศ์เกษม ในการให้คำปรึกษาการทำงานวิจัยและ
วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณต์ นาคบรรพต และนายสุริยา ดาवेถิ ในการให้
ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นต้นสังกัดให้ความช่วยเหลืออย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ มารดา ญาติพี่น้องทุกท่านที่สนับสนุนทุนวิจัยและให้กำลังใจในการทำ
วิทยานิพนธ์เล่มนี้มาโดยตลอด

ธนภัทร นวลทูล



ชื่อเรื่อง	การลดความชื้นของใบรางจืดโดยการตรวจสอบน้ำหนักแบบเวลาจริงในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน		
ผู้วิจัย	นายธนภัทร นวลทูล		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ		
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟและความเร็วงานหมุนต่อ จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบรางจืด คุณภาพ และพลังงานที่ใช้ รวมถึงพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบ งานหมุนแบบอัตโนมัติโดยใช้ความชื้นเป็นเงื่อนไข โดยศึกษาปัจจัยกำลังไมโครเวฟที่ 600 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วงานหมุน ที่ 0 5 และ 10 รอบต่อนาที ร่วมกับลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที ในการทดลองใช้ใบรางจืดความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 90 ฐานเปียก อบแห้งจนกระทั่งความชื้นเหลือร้อยละ 15 ฐานเปียก หลังการอบแห้งวิเคราะห์คุณภาพใบรางจืด ได้แก่ ค่าสีโดยรวม ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (ฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และพลังงานที่ใช้ ผลการทดลองพบว่าการลดลงของความชื้นมีลักษณะเป็นแบบอัตราเร็ว คงที่ เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 5 และ 10 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการลด ความชื้นเร็วที่สุด คือ 150 วินาที สำหรับค่าสีโดยรวม สารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้กำลังวัตต์และความเร็วรอบ ที่เงื่อนไข 1600 วัตต์ ความเร็ว งานหมุน 10 รอบต่อนาที มีปริมาณสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์มากที่สุด 355 และ 858 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุดร้อยละ 63 โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด 16 กิโลวัตต์ ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งใบรางจืดที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบงานหมุนแบบอัตโนมัติ 3 เงื่อนไข ได้แก่ เริ่มจาก 0 เปลี่ยนเป็น 5 0 เปลี่ยนเป็น 10 และ 5 เปลี่ยนเป็น 10 รอบต่อนาที โดย เปลี่ยนความเร็วรอบที่ความชื้นตัวอย่างเหลือร้อยละ 30 ฐานเปียก ที่กำลังไมโครเวฟ ได้แก่ 600 1200 และ 1600 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที ผล การทดลองพบว่างานหมุนที่ควบคุมความเร็วรอบแบบอัตโนมัติจาก 5 เปลี่ยนเป็น 10 รอบต่อนาที ร่วมกับกำลังไมโครเวฟที่ 1600 วัตต์ ใช้เวลาในการลดความชื้นสั้นที่สุด 125 วินาที เมื่อใช้กำลัง ไมโครเวฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสีโดยรวม ปริมาณฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้าน อนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนความเร็วรอบ ที่ไมโครเวฟ 1600 วัตต์ และเปลี่ยนความเร็ว รอบจาก 5 เป็น 10 รอบต่อ มีปริมาณฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์มีค่าสูงที่สุด 467 และ 712 มิลลิกรัมต่อ ลิตร และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดร้อยละ 66 และใช้พลังงานน้อยที่สุด 13 กิโลวัตต์ ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาคุณภาพของใบรางจืดและการใช้พลังงาน เงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้ง คือ งานหมุนที่ควบคุมความเร็วรอบแบบอัตโนมัติจาก 5 เป็น 10 รอบต่อนาที ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ซึ่งเร็วกว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ความเร็วงานหมุนคงที่ 10 รอบต่อนาที ร้อยละ 17



คำสำคัญ: ใบรางจืด, จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ



TITLE Moisture reduction of laurel clock vine leaves with mass monitoring real time in combined microwave and hot air drying

AUTHOR Mr. Thanaphat Nuantoon

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Mechanical Engineering

ADVISOR Asst. Prof. Lamul Wiset, Ph.D.

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2018

ABSTRACT

The aims of this research are to study the effects of microwave power and rotating disk speed on drying kinetics of laurel clock vine leaves, qualities, energy consumption and to develop an automatic rotating disk speed using moisture content as conditions. Microwave powers of 600, 1200 and 1600 and rotating disk speeds of 0, 5 and 10 rpm were factors in this study. Hot air at temperature of 70 °C and air velocity of 0.9 m/s were fixed through the experiment. Laurel clock vine leaves with initial moisture content of 90% wet basis were dried down to 15% wet basis. After drying, color values L^* a^* b^* , bioactive compounds (phenolic and flavonoid), antioxidant activity, energy consumption were determined. Result found that moisture reduction was shown in constant rate drying. At 1600 W with rotating disk at 5 and 10 rpm has the shortest drying time for 150 sec. Total color difference, phenolic and flavonoid contents were increased when microwave power increased. Microwave power at 1600 W with rotating disk at 10 rpm had the highest phenolic and flavonoid contents of 355 and 858 mg/l and antioxidant activity of 63 % with a minimum energy consumption of 16 kWh.

When compare the laurel clock vine leaves drying with automatic control of rotating disk speed of three conditions; 0 -> 5, 0 -> 10 and 5 -> 10 rpm. The rotating speed was changed at the moisture content of 30% wet basis. Microwave powers of 600, 1200 and 1600 W with hot air temperature of 70 °C and air velocity of 0.9 m/s were used. Results found that automatic rotating disk speed at microwave power of 1600 W with the rotating disk change from 5 and 10 rpm had the fastest drying time for 125 sec. Increase in microwave power resulted in increase in total color difference, phenolic and flavonoid contents including antioxidant activity in every condition of change in rotating speed. At microwave power 1600 W with rotating disk change from 5 to 10 rpm had the highest phenolic and flavonoid contents of 467 and 712 mg/l and antioxidant activity of 66 % with a minimum energy consumption of 13 kWh.

When considering in energy consumption and quality of laurel clock vine leaves, the optimal condition is automatically control of rotating disk speed at 5 -> 10



rpm at microwave power of 1600 W. This condition is faster than drying by microwave at power of 1600 W with constant rotating disk speed of 10 rpm 17 %.

Key Words: laurel clock vine leaves, microwave drying kinetics, antioxidant



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ	ข
ABSTRACT	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 คลื่นไมโครเวฟ	3
2.2 ใบรางจืด.....	6
2.3 การอบแห้ง	11
2.3.1 การอบแห้ง.....	11
2.3.2 ความชื้น.....	12
2.3.3 อัตราการอบแห้ง	13
2.4 ค่าสี	14
2.5 พลังงาน	16
2.6 อุปกรณ์และระบบควบคุม.....	17
2.6.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์	17
2.6.2 อุปกรณ์วัดน้ำหนัก	23
2.6.3 วงจรขยายสัญญาณ.....	26
2.6.4 บอร์ด Arduino.....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 การศึกษาผลของความเร็รรอบและกำลังไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้	33
3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	34
3.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์	35
3.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	37
3.1.4 การวิเคราะห์พลังงาน	37
3.2 การออกแบบงานหมุนและระบบควบคุมโดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไข	39
3.2.1 การออกแบบระบบควบคุม.....	39
3.2.2 การเขียนโปรแกรมควบคุม	39
3.2.3 ระบบตรวจวัดค่าน้ำหนัก.....	40
3.2.4 ระบบมอเตอร์ชุดขับเคลื่อนงานหมุน	41



3.2.5 ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนัก.....	41
3.2.6 การออกแบบจานหมุน	42
3.3 การศึกษาผลของความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าน้ำหนัก	
แบบเวลาจริง.....	43
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	43
3.3.2 เงื่อนไขในการทดลอง	43
3.3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.4 การศึกษาผลของการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไข	
ในการปรับความเร็วจานหมุนแบบเวลาจริง.....	43
3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ	43
3.4.2 เงื่อนไขในการทดลอง	43
3.4.3 วิธีการทดลอง.....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย.....	45
4.1 ผลของการศึกษาความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์	
และพลังงานที่ใช้	45
4.1.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์	47
4.1.2 การวิเคราะห์พลังงาน	50
4.2 ผลการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดค่าน้ำหนักและระบบควบคุม	51
4.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น	51
4.2.2 ผลการทดลองใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น	52
4.3 ผลของการศึกษาความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าน้ำหนัก	
แบบเวลาจริง.....	52
4.4 ผลการทดลองอบผลิตภัณฑ์โดยใช้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดเป็นเงื่อนไข	
ในการปรับความเร็วจานหมุนแบบอัตโนมัติ	55
4.4.1 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์	57
4.4.2 การวิเคราะห์พลังงาน	59
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	60
5.1 ผลการศึกษาการอบแห้งใบรางจืดต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพ และพลังงานที่ใช้..	60
5.2 ผลการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความชื้นเพื่อใช้เป็นเงื่อนไข	
ในการปรับความเร็วจานหมุนแบบอัตโนมัติ	60
5.3 ผลการอบแห้งโดยใช้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไข	
ในการปรับความเร็วจานหมุนแบบอัตโนมัติ	60
5.4 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก ข้อมูลความชื้นของใบรางจืดระหว่างอบแห้ง	68
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางสถิติคุณภาพของใบรางจืดที่เงื่อนไขต่างกัน	76



ประวัติย่อผู้วิจัย	101
--------------------------	-----



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 เอกสารงานวิจัยการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	31
ตาราง 2 ผลของกำลังไมโครเวฟและความเร็วงานหมุนต่อค่าสี และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ.....	48
ตาราง 3 ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์.....	50
ตาราง 4 ผลของกำลังไมโครเวฟและความเร็วงานหมุนต่อค่าสี และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ.....	58
ตาราง 5 ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์.....	59
ตาราง 6 ผลการลดลงของร้อยละความชื้นทุก 30 วินาที ที่กำลังไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบงานหมุน 0.5 และ 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที.....	69
ตาราง 7 ผลการลดลงของร้อยละความชื้นใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริง ที่กำลังไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบงานหมุน 0.5 และ 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที	70
ตาราง 8 ผลการลดลงของร้อยละความชื้นใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริง ที่กำลังไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบงานหมุนอัตโนมัติจาก 0 -> 5, 0 ->10 และ 5 -> 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที	73



สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ไมโครเวฟ (Microwave)	4
ภาพประกอบ 2 แบบจำลองเครื่องอบแห้งลมร้อนของงานวิจัยอบแห้งมะม่วงหิมพานต์	5
ภาพประกอบ 3 แบบจำลองเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ของงานวิจัยอบแห้งลำไยปลูกเปลือก	6
ภาพประกอบ 4 ต้นรางจืด	7
ภาพประกอบ 5 ใบรางจืด	7
ภาพประกอบ 6 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล	8
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟลาโวนอยด์	9
ภาพประกอบ 8 โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ A และ B	11
ภาพประกอบ 9 ช่วงเวลาลดความชื้น	13
ภาพประกอบ 10 เครื่องวัดสี Spectrophotometer	14
ภาพประกอบ 11 ระบบสี CIELAB	15
ภาพประกอบ 12 ส่วนประกอบต่างๆ ของ Clamp Meter	16
ภาพประกอบ 13 วิธีการใช้ clamp Meter วัดกระแสไหล	17
ภาพประกอบ 14 โครงสร้างอย่างง่ายของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด	19
ภาพประกอบ 15 ลักษณะขดลวดแบบไปโพลาร์	19
ภาพประกอบ 16 ลักษณะขดลวดแบบยูนิโพลาร์	20
ภาพประกอบ 17 การกระตุ้นขดลวดแบบพูลเต็ป 1 เฟส	21
ภาพประกอบ 18 การกระตุ้นขดลวดแบบพูลเต็ป 2 เฟส	21
ภาพประกอบ 19 การกระตุ้นขดลวดแบบครึ่งสเต็ปหรือฮาล์ฟสเต็ป	22
ภาพประกอบ 20 รูปแบบจำลองของการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์	22
ภาพประกอบ 21 ลักษณะของ Load Cell	24
ภาพประกอบ 22 ลักษณะของ Load Cell แบบกด	24
ภาพประกอบ 23 ลักษณะของ Load Cell แบบดึง	25
ภาพประกอบ 24 โมดูล Grove - Differential Amplifier	26
ภาพประกอบ 25 การต่อใช้งาน load cell กับ microcontroller	26
ภาพประกอบ 26 Board arduino	27
ภาพประกอบ 27 การเขียนโปรแกรมบน Arduino	27
ภาพประกอบ 28 เลือกบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload	28
ภาพประกอบ 29 เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด	28
ภาพประกอบ 30 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile	29
ภาพประกอบ 31 ลักษณะโครงสร้างบอร์ด	29
ภาพประกอบ 32 ลักษณะตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	33
ภาพประกอบ 33 การวัดกระแส (i)	38
ภาพประกอบ 34 การวัดแรงดัน (v)	38



ภาพประกอบ 35 การออกแบบระบบควบคุม	39
ภาพประกอบ 36 ลักษณะแผนผังการทำงานของโปรแกรมซึ่งนำหน้าอัตโนมัติ	40
ภาพประกอบ 37 การต่อวงจรขยายสัญญาณก่อนเข้าอุปกรณ์ควบคุม	40
ภาพประกอบ 38 การต่อวงจรมอเตอร์ผ่านชุดขับเคลื่อนก่อนเข้าชุดควบคุม	41
ภาพประกอบ 39 ลักษณะการวางอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนัkd้านบนผนังตู้	42
ภาพประกอบ 40 การวางอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนัkdโดยรวม	42
ภาพประกอบ 41 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด ที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์	45
ภาพประกอบ 42 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด ที่กำลังไมโครเวฟ 1200 วัตต์	46
ภาพประกอบ 43 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์	46
ภาพประกอบ 44 ลักษณะอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นโดยรวม	51
ภาพประกอบ 45 จอแสดงผลและกล่องควบคุม	52
ภาพประกอบ 46 การเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าน้ำหนัก	52
ภาพประกอบ 47 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์	53
ภาพประกอบ 48 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงที่กำลังไมโครเวฟ 1200 วัตต์	53
ภาพประกอบ 49 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์	54
ภาพประกอบ 50 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัด ความชื้นแบบเวลาจริงร่วมกับการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติ ที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์	55
ภาพประกอบ 51 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัด ความชื้นแบบเวลาจริงร่วมกับการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติ ที่กำลังไมโครเวฟ 1200 วัตต์	56
ภาพประกอบ 52 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัด ความชื้นแบบเวลาจริงร่วมกับการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติ ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งในหลายรูปแบบให้เหมาะสมกับผลผลิตแต่ละชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกัน การใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นอีกเทคนิคการอบแห้งที่นิยมนำมาใช้เพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ เทคนิคนี้มีข้อดีหลายประการ กล่าวคือ การทำงานของคลื่นไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นความถี่ $2,450 \pm 50$ MHz ไปเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในอาหารเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้า ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีโมเลกุลของน้ำภายในอาหารส่งผลให้เกิดความร้อนจากภายในและระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลผลิตและอาหารส่วนใหญ่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในจึงสามารถทำให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับผลิตภัณฑ์ได้เกือบทุกชนิด (Surbkar, 2013) การศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งที่ผ่านมาได้มีการนำไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์หลายชนิด อาทิเช่น ลำไย (Varith et al., 2007) ปลา (Duan et al., 2011) มะม่วงหิมพานต์ (Tirawanichakul et al., 2011) ลิ้นจี่ (Yihui et al., 2011) ขนุน (Tirawanichakul et al., 2012) ข้าวสุก (Jiao et al., 2014) เปลือกส้ม (Clara et al., 2016) พบว่าการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ทำให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งชนิดอื่น

โดยปกติการอบแห้งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับที่ปลอดภัยในการเก็บรักษา เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งระยะเวลาในการอบแห้งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ชั้นความหนาและลักษณะของผลิตภัณฑ์ สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีปัจจัยที่สำคัญ คือ กำลังวัตต์ ความเร็วรอบจานหมุน และอุณหภูมิลมร้อน เมื่อปัจจัยต่างๆเปลี่ยนไปส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ปัญหาของการอบแห้งทั่วไปจะไม่ทราบค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เพื่อจะทราบค่าความชื้นในขณะนั้นจำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์ออกมาชั่งน้ำหนักและตรวจสอบค่าความชื้น ทำให้เสียเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยทั่วไปความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ในผลิตภัณฑ์ยังคงเป็นน้ำอิสระ และในช่วงหลังการลดลงของความชื้นจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถลดความชื้นในช่วงหลังให้เร็วขึ้น การเปลี่ยนเงื่อนไขการอบแห้งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อกระตุ้นการระเหยของน้ำ ผู้วิจัยจึงสนใจการออกแบบระบบที่สามารถปรับความเร็วรอบของจานหมุนแบบอัตโนมัติเมื่อค่าความชื้นของตัวอย่างเข้าสู่จุดวิกฤต และทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความชื้นผลิตภัณฑ์แบบเวลาจริง (real time)

งานวิจัยนี้ได้เลือกใบรางจืดมาเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอบแห้งเพื่อนำไปผลิตเป็นชารางจืด เนื่องจากใบรางจืดมีสรรพคุณทางยาที่ใช้ในการกำจัดสารพิษในร่างกาย ซึ่งมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณสารฟีนอลิก (total phenolic content) ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ (total flavonoid content) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants activity) (Chan et al., 2011) มีรายงานการอบแห้งรางจืด 3 วิธี คือ การอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งแบบ



ไมโครเวฟ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Chan et al., 2012) พบว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวใช้เวลาน้อยที่สุดและมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง แม้ว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟจะใช้เวลาสั้น แต่ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยไม่สามารถถ่ายเทสู่ภายนอกได้จึงจำเป็นต้องเปิดฝาทิ้งบ่อยครั้ง การเลือกใช้เทคนิคการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อระบายความชื้นจึงเป็นทางเลือกในการอบแห้ง นอกจากนี้ในการตรวจวัดค่าความชื้นต้องหยุดการอบแห้งเป็นระยะเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกมาชั่งน้ำหนักและหาค่าความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ผ่านมา

จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงทำการอบแห้งใบรางจืด ด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้การติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นแบบเวลาจริง เข้ามาช่วยในการตรวจสอบความชื้นของผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะสามารถควบคุมระยะเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบจานหมุน จลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งใบรางจืด

1.2.2 เพื่อพัฒนาระบบปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติโดยใช้ความชื้นเป็นเงื่อนไข

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งโดยใช้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ในงานวิจัยนี้ใช้ใบรางจืดขนาดความกว้างและยาวเฉลี่ย 3 และ 8 เซนติเมตร

1.3.2 กำหนดให้ความเร็วลม 0.9 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิลมร้อน 70 ± 2 องศาเซลเซียส

1.3.3 กำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งได้แก่ 600 1200 และ 1600 วัตต์

1.3.4 ความเร็วรอบของจานหมุนได้แก่ 0 5 และ 10 รอบต่อนาที

1.3.5 ความเร็วรอบของจานหมุนอัตโนมัติเมื่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์คงเหลือร้อยละ 30 ได้แก่ 0 -> 5, 0 -> 10 และ 5 -> 10 รอบต่อนาที

1.3.6 อบแห้งจนกระทั่งความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก

1.3.7 วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สี ปริมาณสารฟีนอลิก ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

1.3.8 ความสามารถของอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักไม่เกิน 5,000 กรัม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบรางจืดที่กำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบจานหมุน

1.4.2 สามารถใช้ระบบปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นภายในใบรางจืดแบบเวลาจริง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

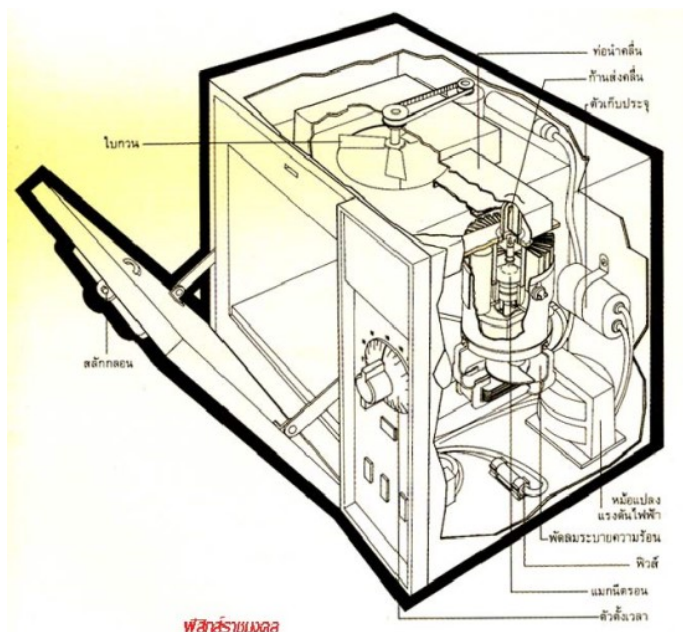
เทคนิคการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนิยมใช้เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีความถี่สูงเมื่อเจอกับความชื้นที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์จะเกิดปฏิกิริยาการสั่นสะเทือนกับความชื้นทำให้เกิดความร้อนภายในจึงเกิดการระเหยออกมาภายนอกผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว การพาความชื้นที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์ในตู้อบไมโครเวฟจำเป็นต้องมีระบบลมร้อนเพื่อพาความชื้นที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ไปสู่ภายนอกห้องอบ หากไม่มีระบบลมร้อนในการระบายอากาศ ความชื้นที่ระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์จะไม่สามารถออกไปจากห้องอบไมโครเวฟได้ จึงเป็นที่มาในการติดตั้งอุปกรณ์สร้างคลื่นไมโครเวฟเข้ากับเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน เนื่องจากการใช้ลมร้อนในการอบแห้งเพียงอย่างเดียวจะใช้เวลานานในการอบแห้ง ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์สัมผัสลมร้อนแล้วค่อยๆร้อนเข้าไปสู่ด้านในของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงในการอบแห้งอาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรอยไหม้ เทคนิคการอบแห้งร่วมระหว่างลมร้อนกับไมโครเวฟนั้นไม่ใช่เรื่องใหม่ แต่เครื่องอบแห้งที่สามารถชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแห้งยังมีน้อย ส่วนใหญ่จะนำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกระบวนการอบแห้งนั้นออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความชื้น ณ ช่วงเวลาหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งร่วมระหว่างลมร้อนและไมโครเวฟที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนัก (load cell) ที่สามารถวัดค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งแบบเวลาจริง จึงจำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลื่นไมโครเวฟ

การทำงานของคลื่นไมโครเวฟจะปล่อยคลื่นความถี่ $2,450 \pm 50$ MHz ไปเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในอาหารเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้า ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีโมเลกุลของน้ำภายในอาหารทำให้เกิดความร้อนจากภายในและระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและครัวเรือน เนื่องจากผลผลิตและอาหารส่วนใหญ่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในจึงสามารถทำให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับอาหารและผลิตภัณฑ์ได้เกือบทุกชนิด (Surbkar, 2013) ส่วนประกอบภายในเตาอบไมโครเวฟ จะมีตัวตั้งเวลาติดตั้งไว้ด้วยเพื่อควบคุมการทำงานของตู้อบ ซึ่งจะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อประตูตู้อบปิดสนิทและถูกลงสลักกลอนไว้อย่างปลอดภัยแล้วเท่านั้น กระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ป้อนเข้าสู่ตัวห้องอบจะถูกแปลงให้มีแรงดันสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 30 เท่า ด้วยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า แล้วจึงผ่านไปยังตัวเก็บประจุซึ่งจะทำงานร่วมกับอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เพื่อทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและป้อนเข้าสู่ “แมกนีตรอน” ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟขึ้นมา คลื่นจะออกจากแมกนีตรอนผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า) เพื่อป้อนเข้าสู่ห้องอบต่อไป ปากทางเข้าสู่ห้องอบจะมีอุปกรณ์กลไกคล้าย ๆ พัดลมเรียกว่า “ไบกวน” ทำหน้าที่กวนให้คลื่นสะท้อนไปมาลงสู่ห้องอบ และอาหารภายในตู้อบก็จะดูดกลืนคลื่นเข้าไปทำให้ตัวมันเองสุกได้ พัดลมระบายความร้อนและสวิตช์ควบคุม



อุณหภูมิจะป้องกันแมกนีตรอนให้มีอุณหภูมิสูงเกินขนาด และฟิวส์จะป้องกันสภาวะการรับภาระเกินกำลัง ดังภาพประกอบ 1 (ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2554)



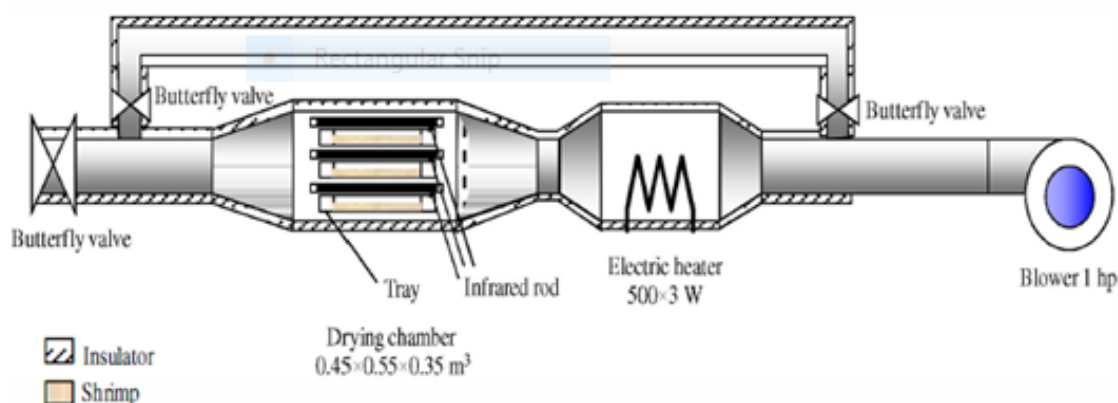
ที่มา: ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (2554)

ภาพประกอบ 1 ไมโครเวฟ (Microwave)

การนำไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งลมร้อนแบบธรรมดาสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากการอบแห้งแบบลมร้อนธรรมดาเป็นลักษณะการพาความร้อนที่เกิดจากขดลวดสร้างความร้อนไปโดยการใช้พัดลมเป่าผ่านขดลวด ทำให้อากาศที่ผ่านขดลวดความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้น เมื่ออากาศที่ร้อนผ่านชั้นผิวหนึ่งของผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดความร้อนจากภายนอกจึงเกิดการระเหยออกมาของน้ำในผลิตภัณฑ์ แต่การเป่าลมร้อนใส่ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่พอเหมาะเพราะหากอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ทรอยไหม้ก่อนที่ความชื้นภายในจะระเหยออกมาจนหมด การอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลานานและสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก จึงได้มีการคิดค้นเพื่อลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งให้ลดลง โดยการนำไมโครเวฟมาช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งมีหลักการคือ เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมาอบแห้งในตู้อบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะทำให้ในผลิตภัณฑ์เกิดความร้อนจากภายในจนน้ำระเหยออกมาจากผลิตภัณฑ์และเมื่อเจอกับลมร้อนที่เป่าผ่านผลิตภัณฑ์ ไอน้ำที่ระเหยจะถูกลมร้อนเป่าออกสู่อากาศภายนอกห้องอบ ตัวอย่างลักษณะแบบจำลองของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งร่วมระหว่างลมร้อนกับไมโครเวฟจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา มีดังต่อไปนี้

2.1.1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนออกแบบห้องอบให้มีขนาด 52x52x50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 2 ห้องอบแห้งทำจากสแตนเลสและผนังภายในห้องอบแห้งได้โดยแผ่น

ฉนวนไมโครไฟเบอร์ 5 เซนติเมตร ขดลวดสร้างความร้อน (heater) 1,000 วัตต์ โดยมีพัดลมขนาด 1 แรงม้า ที่ใช้สำหรับการพาอากาศร้อนออกไปยังภายนอกห้องอบ นอกจากนี้อากาศร้อนหลังจากการอบแห้งจะถูกวนกลับเข้ามาในห้องอบแห้งโดยใช้ท่อรีไซเคิลอุณหภูมิอบแห้ง อุณหภูมิของลมร้อนทางเข้าและทางออกและอุณหภูมิในแต่ละภาคถูกวัดโดยใช้ thermocouple-K ± 0.5 องศาเซลเซียส การไหลของอากาศที่ไหลเข้าวัดจากเครื่องวัดความเร็วลม (digicon รุ่น DA-45)

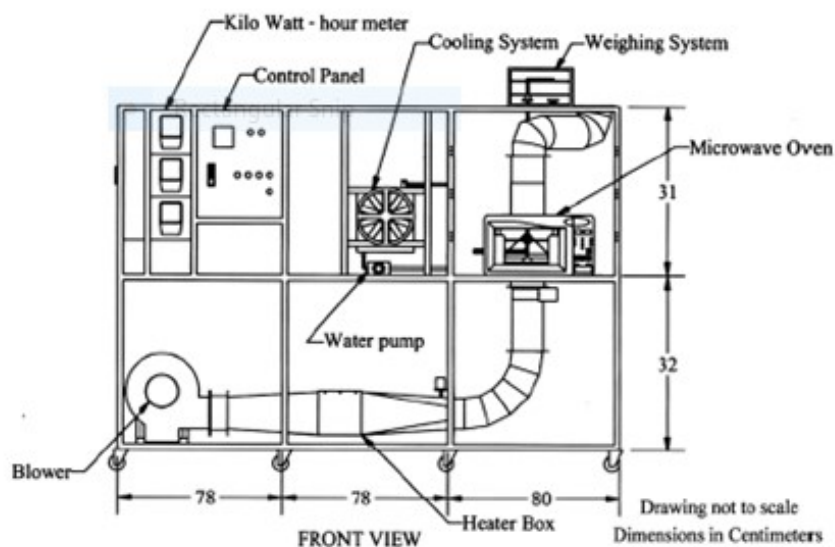


ที่มา: Tirawanichakul et al. (2011)

ภาพประกอบ 2 แบบจำลองเครื่องอบแห้งลมร้อนของงานวิจัยอบแห้งมะม่วงหิมพานต์

2.1.2 เครื่องอบแห้งร่วมระหว่างไมโครเวฟกับลมร้อน (Varith et al., 2007) ออกแบบให้เตาอบไมโครเวฟวางอยู่ในตู้ปิด ประกอบด้วยของ 2450 MHz-1000 W เตาอบไมโครเวฟควบคุมกำลังวัตต์ 100, 180, 300, 450, 600, 800 และ 1200 ด้านล่างของเตาอบไมโครเวฟที่ถูกเชื่อมต่อกับท่ออากาศร้อนทำจากสแตนเลสที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตร เพื่อให้อากาศร้อนถึง 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ฮีตเตอร์คริบขนาด 2,100 วัตต์ โบลเวอร์ความเร็วลม 0.2-5.0 เมตรต่อวินาที ด้านบนของตู้อบไมโครเวฟเชื่อมต่อกับท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตร จานหมุนภายในห้องอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร มอเตอร์มีความเร็ว 10 รอบต่อนาที ภายในช่องไมโครเวฟ สายไฟทั้งหมดถูกควบคุมผ่านเบรกเกอร์หลัก 30 กิโลวัตต์ ดังภาพประกอบ 3





ที่มา: Varith et al. (2007)

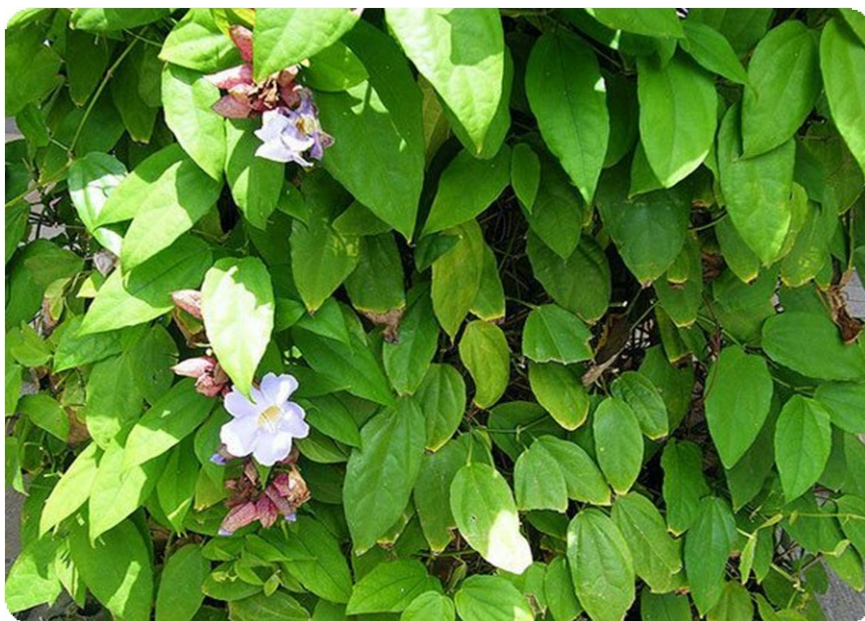
ภาพประกอบ 3 แบบจำลองเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนของงานวิจัยอบแห้งลำไย
ปลอกเปลือก

2.2 ใบรางจืด

รางจืด (laurel clock vine) รางจืดชื่อวิทยาศาสตร์ *Thunbergia laurifolia* Lindl จัดอยู่ในวงศ์เหงือกปลาหมอ (acanthaceae) สมุนไพรรางจืด มีชื่อท้องถิ่นอื่นๆ รางเย็นกาย (ยะลา) ดูเหว่า (ปัตตานี) ทิดพุด (นครศรีธรรมราช) ย่ำแย้แอตแอ (เพชรบูรณ์) น้ำนอง (สระบุรี) จอลอดิเออซังกะปั้งกะละพอน่อเตอ(กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน) กำลั้งช้างเผือก ยาเขียว เครือเขาเขียวขอบชะนาง (ภาคกลาง) ว่านรางจืด เป็นต้น

ลักษณะของรางจืด ต้นรางจืด เป็นไม้เลื้อยหรือไม้เถา ที่มีเนื้อแข็ง ลำต้นหรือเถาแน่นจะกลม เป็นปล้อง มีสีเขียวสดหรือสีเขียวเข้ม ลำต้นไม่มีขนและไม่มีมือจับเหมือนกับตำลึงและมะระ แต่อาศัยลำต้นในการพันรัดขึ้นไป รางจืดเป็นพืชในเขตร้อนและเขตอบอุ่นของทวีปเอเชีย จึงสามารถขึ้นได้ทั่วไปตามป่าดิบชื้นของประเทศไทยทั่วทุกภาค เจริญเติบโตได้เร็วมาก และขยายพันธุ์ด้วยวิธีการใช้เถาในกาปักชำ ดังแสดงในภาพประกอบ 4 (เว็บเพื่อพืชเกษตรไทย, 2552)





ที่มา: puechkaset (2558)

ภาพประกอบ 4 ต้นรางจืด

ใบรางจืด เป็นใบเดี่ยวออกตรงข้ามกัน ลักษณะของใบคล้ายรูปหัวใจหรือรูปใบขอบขนานหรือเป็นรูปไข่ โคนใบมนเว้า ปลายใบเรียวแหลม ใบกว้างประมาณ 3-7 เซนติเมตร และยาวประมาณ 8-14 เซนติเมตร มีเส้นอยู่ 3 เส้นออกจากโคนใบดังแสดงในภาพประกอบ 5



ที่มา: puechkaset (2558)

ภาพประกอบ 5 ใบรางจืด



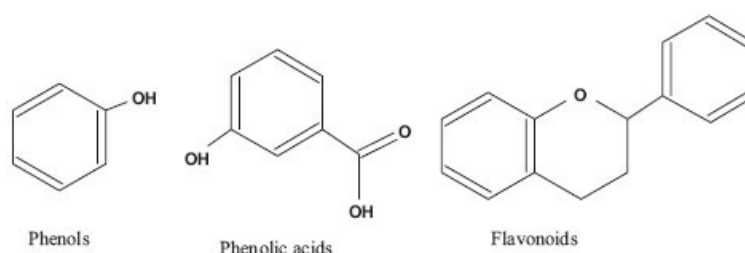
สมุนไพรรางจืด เป็นสมุนไพรที่กระทรวงสาธารณสุขรณรงค์ให้เกษตรกรหรือบุคคลทั่วไปเลือกใช้เพื่อใช้แก้พิษต่างๆ เช่น พิษจากยาฆ่าแมลง ยาเบื่อ สารตะกั่ว และ ยังช่วยลดหินปูนในข้อกระดูกของผู้สูงวัย ช่วยล้างสารเคมีสารพิษและสารตกค้างในร่างกาย ลดอาการแพ้ ลดอาการปวดเมื่อยตามตัวได้อีกด้วย บรรเทาอาการผื่นแพ้ขึ้นตามผิวหนังและป้องกันการเกิดมะเร็งอันเนื่องมาจากสารพิษสะสมในร่างกายได้เป็นอย่างดี

รางจืดเป็นพืชสมุนไพรไทยที่ถูกนำมาใช้แก้พิษสารพิษหลายชนิดในรูปชาขี้ผึ้งและแคปซูล โดยการศึกษาศึกษาหาคุณสมบัติของใบรางจืดนั้นพบว่าสารสกัดใบรางจืดสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (*aerobacter aerogens*) จากงานวิจัย (Chan et al, 2011) ใช้สารสกัดจากใบรางจืดลดพิษต่อดับของแอลกอฮอล์ได้มีความเป็นพิษเล็กน้อยและการดื่มในระยะเวลาอันอาจมีผลต่อดับไตและระบบเลือดได้ ในปัจจุบันก็ยังไม่มีการวิจัยหรือเอกสารใดที่บ่งชี้ได้ว่าหากเราใช้ไปนานๆติดต่อกันหรือใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดผลอย่างไรบ้าง ซึ่งจุดนี้นักวิชาการทางด้านนี้จึงไม่แนะนำให้รับประทานอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันสารออกฤทธิ์สำคัญที่พบใบรางจืดเมื่อทำการสกัดด้วยการต้มแล้วนำเข้ากระบวนการอบแห้งในรูปแบบต่างๆคือกลุ่ม flavonoid phenolic, apigenin cosmosin, delphinidin-3, 5-di-O-D-glucoside, chlorogenic acid, caffeic acid (Mahasarakul et al., 2012)

2.2.1 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ

2.2.1.1 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) หรือ สารประกอบฟีนอล เป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติ ในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร ถั่วเมล็ดแห้ง เมล็ดธัญพืช ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการเจริญเติบโต มีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพคือ มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) สามารถละลายได้ในน้ำ สารประกอบฟีนอลมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน ที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซีน มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่ออยู่ สารประกอบฟีนอลพื้นฐาน คือ สารฟีนอล (phenol) ในโมเลกุลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ในภาพประกอบ 6



Structures of common phenolic compounds.

ภาพประกอบ 6 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล

สารประกอบฟีนอลที่พบในธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด และมีลักษณะสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (phenolic acids)

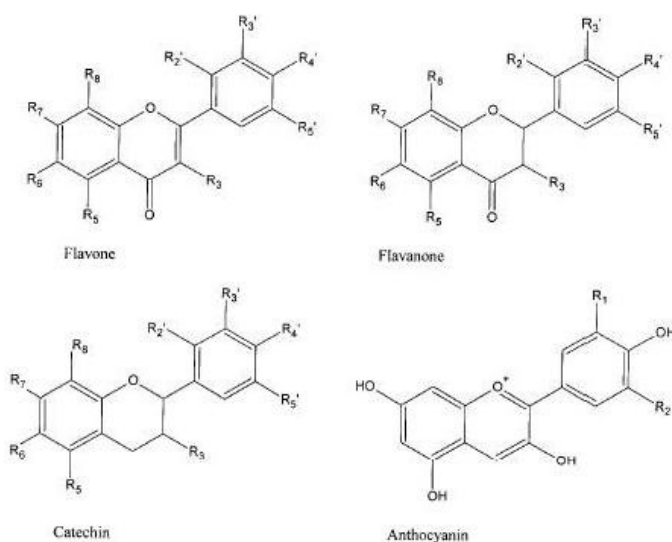


ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ เช่น ลิกนิน (lignin) กลุ่มใหญ่ที่สุดที่พบคือ สารประกอบพวก ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) สารประกอบฟีนอลที่พบในพืชมักจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของ สารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) น้ำตาลชนิดที่พบมากที่สุดโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล คือ น้ำตาลกลูโคส (glucose) และพบว่าอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเองหรือ สารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดอินทรีย์ (organic acid) รวมอยู่ในโมเลกุลของโปรตีน แอลคาลอยด์ (alkaloid) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoid) เป็นต้น พบอยู่ในส่วนของช่องว่างภายในเซลล์ (cell vacuole) ในส่วนต่างๆของพืช เป็นสารที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในกระบวนการเจริญเติบโต และการขยายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด

- 1) ถั่วเมล็ดแห้ง ได้แก่ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง
- 2) เมล็ดธัญพืช เช่น ข้าว และ งา
- 3) ผลไม้ ได้แก่ ฝรั่ง ส้ม กระเทียม
- 4) เครื่องเทศ เช่น พริกไทย พริก ขิง กระเทียม หอมแดง หอมหัวใหญ่
- 5) พืชเครื่องดื่ม ได้แก่ ชา โกโก้
- 6) พืชหัว ได้แก่ มันเทศ

2.2.1.2 สารประกอบฟลาโวนอยด์

ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เป็นสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ประเภทพอลิฟีนอล (polyphenol) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนแอโรมาติก (aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) รวมอยู่ในโมเลกุลตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป สามารถละลายในน้ำ ได้ ส่วนใหญ่มักพบอยู่รวมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) สารประกอบ flavonoids ได้แก่ flavonol, flavanone, flavone, isoflavone, flavonol catechin และ anthocyanins



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟลาโวนอยด์



2.2.1.3 สารฟลาโวนอยด์ที่พบในพืช

- 1) naringin เป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่ให้รสขมในเปลือกของผลไม้พืชตระกูลส้ม
- 2) catechin พบมากในชาเขียว

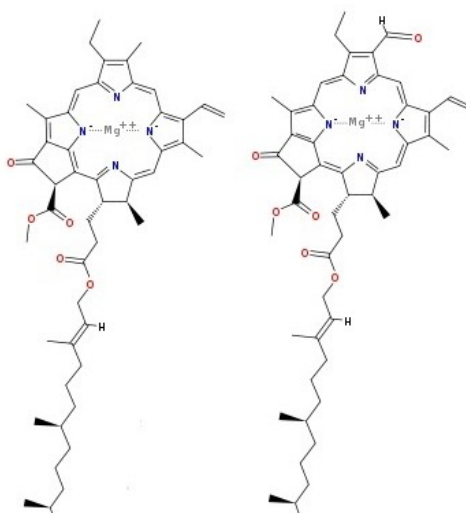
สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ จัดเป็น nutraceutical มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) โดยทำหน้าที่ในการหน่วงเหนี่ยวหรือเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) จึงช่วยลดปฏิกิริยาถูกออกซิเดชันของอนุมูลอิสระได้แหล่งของอาหารที่พบฟลาโวนอยด์มาก ได้แก่ พืช ผักและผลไม้ เช่น ยอ ถั่วเหลือง กระชายดำ สารสกัดจากเมล็ดองุ่น รวมทั้งเครื่องดื่มต่างๆ เช่น ชา และไวน์ เป็นต้น

2.2.1.4 สารประกอบคลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในทุกส่วนที่เป็นสีเขียวของพืช มักพบมากในใบ และในส่วนอื่นๆ เช่น ลำต้น กิ่ง ดอก ผล และรากที่มีสีเขียว โดยเฉพาะในพืชตระกูลผักที่มีสีเขียวเกือบทุกส่วน นอกจากนั้นยังพบได้ในสาหร่ายทุกชนิดและแบคทีเรียบางชนิด คลอโรฟิลล์เป็นสารสำคัญในพืชที่ทำหน้าที่รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์เพื่อไปใช้ในการสร้างพลังงานในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างสารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล คลอโรฟิลล์เป็นสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีฟ้า และสีแดง และดูดกลืนแสงสีเหลือง และสีเขียวได้น้อย ดังนั้น เราจึงมองเห็นใบพืชมีสีเขียวได้ เนื่องจากคลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงสีฟ้า และสีแดงไว้ ส่วนแสงสีเขียวจะสะท้อนออกมาทำให้เรามองเห็น

คลอโรฟิลล์ที่พบในธรรมชาติพบได้ในพืชหลายชนิด ทำให้คลอโรฟิลล์ที่พบมีความแตกต่างกัน แต่จะมีโครงสร้างที่เหมือนกัน คือ ประกอบด้วยวงแหวนไพโรล (pyrrole ring) จำนวน 4 วง ส่วนที่ทำให้แตกต่างกัน คือ คลอโรฟิลล์ที่ต่างกันจะมีโซ่ข้าง (side Chain) ที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll a) และคลอโรฟิลล์ บี (chlorophyll b) จะแตกต่างกันที่ตำแหน่งวงแหวนไพโรล ตำแหน่งที่ 3 (carbon C-3) นับจากตำแหน่งอะตอมไนโตรเจนกลางสุดเวียนขึ้นด้านบน โดยโซ่ต่อด้านข้างคลอโรฟิลล์ เอ เป็นหมู่เมทิล ($-CH_3$) ส่วนโซ่ต่อด้านข้างของคลอโรฟิลล์ บี เป็นหมู่อัลดีไฮด์ ($-CHO$) ทำให้โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ เอ มีขั้ว จึงละลายในสารละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ และเมทิลแอลกอฮอล์ ได้ดีกว่าคลอโรฟิลล์ บี มีหมู่อัลดีไฮด์ที่ไม่มีขั้ว จึงละลายได้ดีในสารที่ไม่มีขั้ว เช่น อีเทอร์ และ คีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ ยังทำให้สีที่มองเห็นแตกต่างกัน คือ คลอโรฟิลล์ เอ จะมีสีเขียวเข้ม ส่วนคลอโรฟิลล์ บี จะมีสีเขียวอ่อน มีอัตราส่วนคลอโรฟิลล์ เอ : คลอโรฟิลล์ บี ที่ 3:1





ที่มา: ภาควิชา วิทยาศาสตร์ (ม.ป.ป.)

ภาพประกอบ 8 โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ A และ B

สูตรโครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่ประกอบด้วยวงแหวนไพโรล (pyrrole ring) โดยมีไนโตรเจน และแมกนีเซียมเชื่อมพันธะเป็นองค์ประกอบอยู่ตรงกลาง และส่วนที่ 2 คือ ส่วนหางที่มีไฮโดรคาร์บอนสายยาว เรียกว่า ฟิทอล (Phytol) จากสูตรโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ที่เหมือนกัน พบว่าองค์ประกอบของโมเลกุลจะมีไนโตรเจนจำนวน 4 อะตอม จึงถือได้ว่าธาตุไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการสร้างสารสีเขียวของคลอโรฟิลล์สำหรับการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างยิ่ง

2.3 การอบแห้ง

2.3.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัสดุนั้นเพื่อดึงน้ำออก วัสดุจะแห้งได้มากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบ ในการอบ เมื่อทำให้ของเหลวในวัตถุดิบระเหยเป็นไอ จะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีสัดส่วนของของเหลวต่ำลง ซึ่งนอกจากจะมีกรณีที่วัตถุดิบมีสภาพเป็นของแข็งที่เปื่อยขึ้นแล้วยังมีกรณีที่อบของเหลวข้น (slurry) หรือของเหลวใสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงอีกด้วย

เครื่องอบโดยมากมักจะเป็นส่วนสุดท้ายของกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่อบแล้วจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จทันที ดังนั้น การอบไม่สม่ำเสมอ เช่น ไม่แห้งหรือแห้งเกินไป และรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เช่น วัตถุดิบเป็นก้อน รวมทั้งปริมาณผลได้ (yield) จึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจ นอกจากนี้ ความร้อนแฝงของการระเหยของของเหลวจะมีค่าสูง การอบจึงสิ้นเปลืองพลังงานมาก การจัดการพลังงานความร้อนจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ



2.3.2 ความชื้น

ความชื้น (moisture content) เป็นค่าบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เนื่องจากความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) โดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ (microbial spoilage) ซึ่งกระทบต่ออายุการวางจำหน่าย (shelf life) อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย (perishable food) เกิดจากสภาวะที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา ปริมาณความชื้น นิยมบอกเป็นร้อยละมี 2 รูปแบบคือ

2.3.2.1 ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไป

$$\%MC_{wb} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

$\%MC_{wb}$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก

M_1 = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง

M_2 = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

2.3.2.2 ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารจะคงที่ อาจบอกเป็นร้อยละ หรือ จำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง ($g\ H_2O / g\ solid$)

$$\%MC_{db} = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (2)$$

$\%MC_{db}$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก

M_1 = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง

M_2 = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

2.3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเปียกและฐานแห้ง

$$\%MC_{db} = \frac{\%MC_{wb}}{100 - \%MC_{wb}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%MC_{wb} = \frac{\%MC_{db}}{100 + \%MC_{db}} \times 100 \quad (4)$$

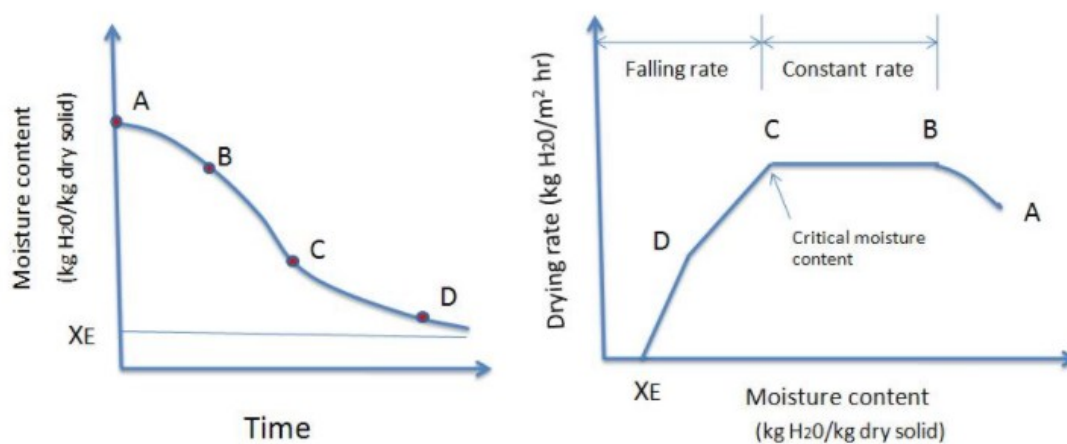


2.3.3 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งของอาหาร (Drying rate) ขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหารเริ่มต้น ก่อนการทำแห้ง และสภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง (drying) อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) เป็นต้น กราฟระหว่างอัตราการทำแห้ง (drying rate) ในภาพประกอบ 9 และความชื้นในสารนั้น (moisture content) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

2.3.3.1 ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (constant rate)

2.3.3.2 ช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุ เคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้ง ความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานั้น เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)



ที่มา: Hii et al. (2009)

ภาพประกอบ 9 ช่วงเวลาลดความชื้น

2.3.3.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก



โดยกำหนดให้

แกน L^* เป็นค่าความสว่าง (lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100

แกน a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

แกน a^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

แกน b^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน



ที่มา: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ม.ป.ป.)

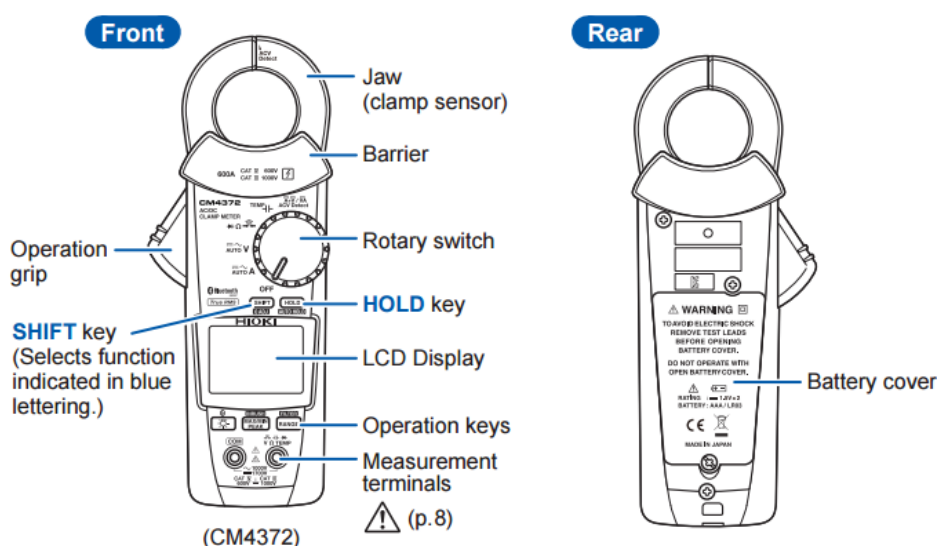
ภาพประกอบ 11 ระบบสี CIELAB

ในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 11 จะพบว่าจุดๆ หนึ่งใน space นั้น เป็น L^* a^* b^* และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น $(L^* a^* b^*)_2$ ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน space เท่าไร ก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสี เราอาจจะกล่าวได้ว่าการมองเห็นสีของมนุษย์และการวัดสีจากเครื่องวัดจะต้องอาศัยปัจจัย 3 อย่างคือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุมีสีและและการอ่านค่าสีแต่กับการมองเห็นสีของมนุษย์นั้นจะพบว่า แต่ละคน อาจจะอ่านค่าสีแตกต่างกันไป สำหรับเครื่องวัดสีนั้นจะให้ค่าที่ได้จากการวัดสีในทางอุตสาหกรรมเป็นไปตามมาตรฐานสากล รวมทั้งยังสามารถที่จะวัดค่าความแตกต่างของสีที่มีเฉดสีต่างออกไปเพียงเล็กน้อยได้เป็นผลให้ในทางอุตสาหกรรม สามารถกำหนดให้ค่าความแตกต่างของสีได้



2.5 พลังงาน

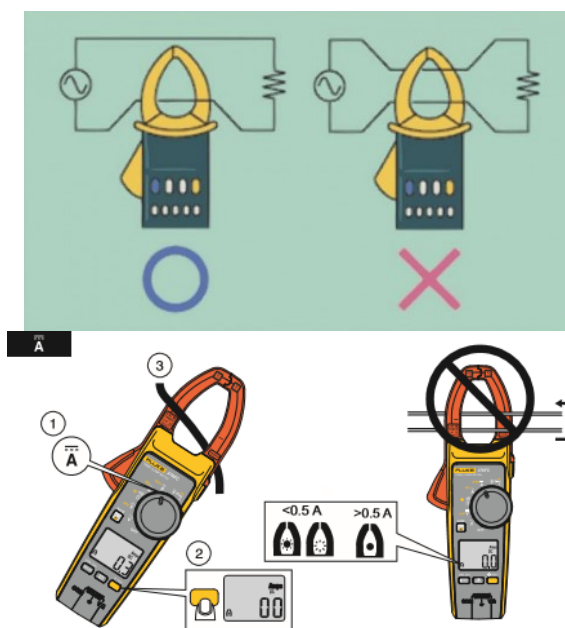
ในการวิเคราะห์พลังงานจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้อุปกรณ์ ผู้วิจัยได้เลือกใช้งาน Clamp Meter ภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 ส่วนประกอบต่างๆ ของ Clamp Meter

วิธีการใช้แคลมป์มิเตอร์วัดกระแสโหลด สำหรับ 1 เฟส 2 สาย จะต้องแคลมป์เพียงแค่ 1 เส้น เท่านั้นเพราะกระแสจะวิ่งไปและกลับมาจากทั้ง 2 เส้น ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กที่ตรงข้ามกัน ถ้าแคลมป์ ทั้ง 2 เส้น พร้อมกัน กระแสจะหักลบกันพอดีทำให้ค่าที่แสดงออกมาเป็น 0 หากเราจะนำไปวัดไฟ 3 เฟส ให้วัดค่ากระแสในเส้น R, S และ T โดยวัดครั้งละเส้น สิ่งที่ไม่ควรลืมในการวัดคือการหมุน rotary Switch ไปให้ตรงตำแหน่ง ถ้าจะวัดกระแสสลับให้หมุนไปที่ตำแหน่ง ACA แล้วให้สายไฟอยู่บริเวณตรงกลางของ clamp พอดี ภาพประกอบ 13





ภาพประกอบ 13 วิธีการใช้ clamp Meter วัดกระแสไหล

การใช้แคลมป์มิเตอร์วัดกระแสไฟรั่ว (leakage current) สำหรับไฟ 1 เฟส 2 สาย จะต้องแคลมป์ทั้ง 2 เส้นพร้อมกัน เพราะกระแสจะวิ่งไปกลับทำให้เกิดคลื่นไฟฟ้าหักล้างกัน ถ้ามีไฟรั่วแคลมป์มิเตอร์จะแสดงค่าบนหน้าจอ หากนำไฟ 3 เฟส จะแคลมป์ทั้ง 3 เส้นพร้อมกันหรือจะวัดบริเวณสายดิน

2.6 อุปกรณ์และระบบควบคุม

2.6.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์

อุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่นักอิเล็กทรอนิกส์รู้จักกันเป็นอย่างดีต้องมีชื่อของมอเตอร์อยู่ใน สารบบอย่างแน่นอน มอเตอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในแวดวงคนทำหุ่นยนต์และกลไกเคลื่อนไหวยก้คือ มอเตอร์ไฟตรงที่มีชุดเฟืองทดหรือบางที่เรียกชุดเฟืองขับมอเตอร์, มอเตอร์เกียร์บ็อกซ์, เซอร์โวมอเตอร์ และ สเต็ปเปอร์มอเตอร์

คุณสมบัติเด่นของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

- 1) มุมในการหมุน (rotation angle) มีค่าตามสัดส่วนของจำนวนของพัลส์อินพุตที่ใช้ขับมอเตอร์
- 2) ความเร็วในการหมุน (rotation speed) มีค่าตามสัดส่วนและสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณพัลส์อินพุตที่ใช้ขับมอเตอร์
- 3) ใช้ในการควบคุมตำแหน่งแบบระบบเปิดที่มีความแม่นยำสูง โดยไม่ต้องใช้สัญญาณป้อนกลับของการกำหนดตำแหน่ง
- 4) ไม่มีความผิดพลาดสะสมของการกำหนดตำแหน่ง



5) เหมาะกับงานที่ต้องการกลไกเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ แรงบิดสูง โดยไม่ต้องใช้ระบบเฟืองทดรอบเพิ่มเติม

6) สามารถกำเนิดและรักษาแรงบิดได้ในทันทีที่มอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน

7) สามารถรักษาสภาวะการหมุนของแกนได้โดยไม่ทำให้มอเตอร์เสียหาย

8) ไม่มีแปรงถ่าน ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

9) มีลูกปืนความเที่ยงตรงสูง เพื่อช่วยการหมุนของแกนมีความแม่นยำ

ข้อด้อยของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

1) การเกิดเรโซแนนซ์ทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ได้

2) การทำให้มอเตอร์สามารถหมุนแกนด้วยความเร็วสูงทำได้ยาก

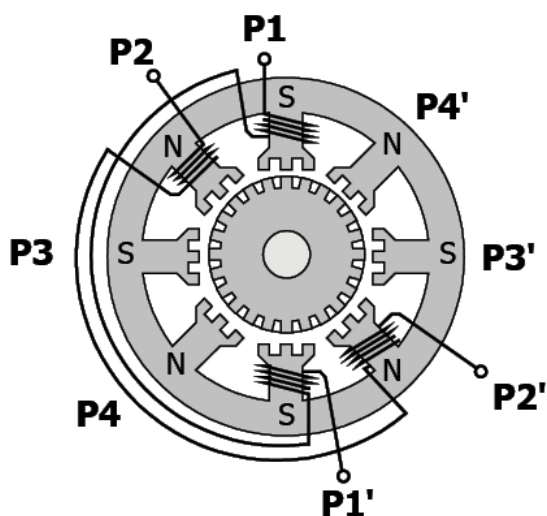
3) หากเกิดแรงบิดสูงสูงเกินกว่าที่รับได้หรือเกิดโอเวอร์ทอร์กมอเตอร์จะสูญเสียการรับรู้ตำแหน่งของแกนหมุน จะต้องกลับไปเริ่มต้นที่จุดเริ่มต้นใหม่

4) ให้แรงบิดที่น้อยกว่ามอเตอร์ไฟตรงและมอเตอร์ไฟสลับที่ขนาดของตัวมอเตอร์เท่ากัน

สเต็ปเปอร์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่มีลักษณะการทำงานแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไป เพราะจะต้องป้อนสัญญาณเป็นพัลส์ให้แก่ขดลวดของมอเตอร์เป็นจังหวะอย่างเหมาะสม และการหมุนของมอเตอร์ชนิดนี้จะหมุนเป็นจังหวะตามพัลส์ที่ป้อนเข้ามา หากมีการป้อนสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง มอเตอร์ก็จะสามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่องเหมือนกับมอเตอร์ไฟตรงปกติ ดังนั้นด้วยจังหวะในการป้อนสัญญาณพัลส์จึงทำให้ผู้ควบคุมสามารถเลือกตำแหน่งที่ต้องการให้มอเตอร์หยุดหมุนได้ จังหวะการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์เรียกว่า สเต็ป (step) นั่นจึงเป็นที่มาของชื่อของมอเตอร์ชนิดนี้ ความละเอียดของมอเตอร์กำหนดเป็นองศาที่หมุนไปในหนึ่งสเต็ป หากมอเตอร์มีจำนวนองศาต่อสเต็ปมาก หมายความว่า มอเตอร์ตัวนี้มีความละเอียดของการหมุนต่ำ ยกตัวอย่าง การหมุนครบ 1 รอบเท่ากับ 360 องศา หากมอเตอร์มีสเต็ปการหมุนเท่ากับ 7.5 องศาต่อสเต็ป มอเตอร์ตัวนี้มีความละเอียดของการหมุนเท่ากับ 48 ตำแหน่ง แต่ถ้าหากมีสเต็ปการหมุนกับ 1.8 องศาต่อสเต็ป ความละเอียดของการหมุนเท่ากับ 200 จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ตัวหลังมีความละเอียดสูงกว่าตัวแรกมาก ทำให้นำมาใช้ในงานที่ต้องการกำหนดตำแหน่งได้ดีกว่า แม่นยำกว่า ผนวกเข้ากับวงจรขับเคลื่อนครึ่งสเต็ป ความละเอียดของการหมุนจะเพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า ทำให้มีความละเอียดของการหมุนกลายเป็น 400 ตำแหน่ง ขนาดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่มีการผลิตและจำหน่ายในท้องตลาด มีตั้งแต่ขนาดแรงดันต่ำ 3V ไปจนถึง 24V และ 48V ส่วนขนาดของกระแสมีตั้งแต่ไม่กี่สิบลิลลิแอมป์อันเป็นสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวเล็กไปจนถึงเป็นสิบลีแอมป์ ซึ่งมีขนาดของมอเตอร์ใหญ่โตขึ้นตามลำดับ ราคาอยู่ในหลักเป็นร้อยบาทขึ้นไปสำหรับของใหม่

ในอดีตมีการแบ่งชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตามลักษณะโครงสร้างซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ แบบแม่เหล็กถาวรหรือ PM (permanent Magnet), แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็กได้หรือ VR (variable Reluctance) และแบบผสมหรือไฮบริด (hybrid) ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างแบบ PM และ VR ในปัจจุบันนี้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮบริด เนื่องจากสามารถทำให้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ของแกนได้สูงถึง 0.9 องศาต่อสเต็ป (ซึ่งเป็นข้อดีของแบบ vr) และให้แรงบิดหรือทอร์กที่สูงโดยใช้พลังงานต่ำ (เป็นข้อดีของแบบ pm) ในภาพประกอบ 14 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด





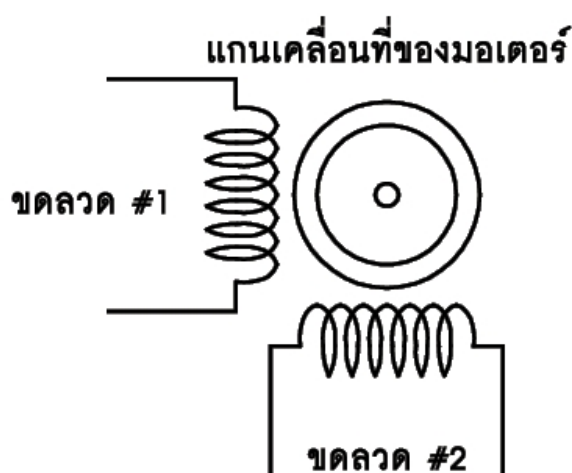
ที่มา: อินเว็นเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 14 โครงสร้างอย่างง่ายของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด

ดังนั้นการกำหนดชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ในยุคต่อมาจนถึงปัจจุบันจึงพิจารณาที่ลักษณะของการพันขดลวด, การต่อสายออกมาใช้งาน และวงจรขับ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ ชนิดไบโพลาร์ (bipolar) และชนิดยูนิโพลาร์ (uni-polar)

2.6.1.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไบโพลาร์

มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในภาพประกอบ 15 แบ่งออกเป็น 2 ขดที่ไม่มีแท่งกลาง ทำให้บางครั้งจึงเรียกสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ว่า เป็นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ 2 เฟส การขับให้มอเตอร์แบบนี้หมุนจะต้องป้อนแรงดันต่างขั้วกันให้แก่ขดลวดแต่ละขด ทำให้วงจรขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน



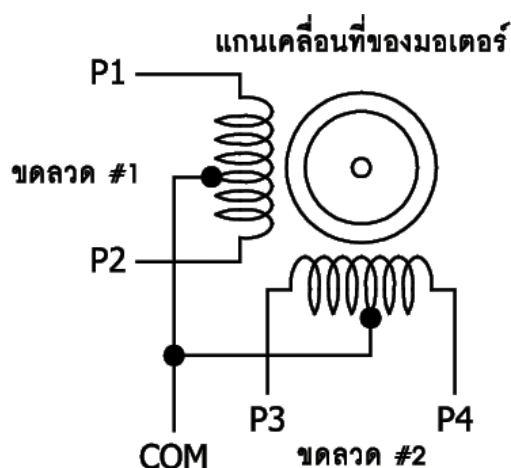
ที่มา: อินเว็นเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 15 ลักษณะขดลวดแบบไบโพลาร์



2.6.1.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 12 มีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ 5 และ 6 สาย บางครั้งเรียกสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ว่า สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ 4 เฟส การขับจะต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้วหรือเฟสของมอเตอร์ให้เรียงลำดับอย่างถูกต้อง มอเตอร์จึงจะสามารถหมุนได้อย่างราบรื่น สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดแบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งตัวจะมี 4 เฟสคือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวดแต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว สำหรับในบทความนี้จะเน้นหนักไปที่สเต็ปเปอร์แบบยูนิโพลาร์นี้ เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายกว่า และใช้วงจรขับที่มีความซับซ้อนน้อยกว่ามาก



ที่มา: อินเว็นเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 16 ลักษณะขดลวดแบบยูนิโพลาร์

1) การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปแต่ละสเต็ปทำได้โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังขดลวดแต่ละขดบนสเตเตอร์ ซึ่งต้องป้อนเป็นแบบซีควเ็นเชียลในรูปแบบที่ถูกต้องด้วย สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ แบบเวฟ (wave) หรือแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส (full step 1-phase), แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส และแบบครึ่งสเต็ป (half step)

(1) แบบฟูลสเต็ป 1 เฟส

การกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบเวฟหรือฟูลสเต็ป 1 เฟสเป็นการกระตุ้นที่มีรูปแบบง่ายที่สุด โดยทำการกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งไล่เรียงถัดกันไป เช่น เริ่มต้นที่ขดที่ 1, 2, 3, 4 แล้ววนกลับมาขดที่ 1 วนไปเรื่อยๆ หรือเริ่มที่ขดที่ 1 แล้วย้อนไปยังขดที่ 4, 3, 2 แล้วกลับมาขดที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งทำให้ทิศทางการหมุนสวนกัน ในการกระตุ้นรูปแบบนี้จึงมีขดลวดเพียงขดเดียวในเวลาหนึ่งที่ถูกกระตุ้นเท่านั้น วงจรกระตุ้นแบบนี้มีราคาถูกและง่าย ขั้นตอนการทำงานต่างๆ

ภาพประกอบ 17



สแต็ปที่	ขดลวดที่ 1	ขดลวดที่ 2	ขดลวดที่ 3	ขดลวดที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	-	ทำงาน	-	-
3	-	-	ทำงาน	-
4	-	-	-	ทำงาน

ที่มา: อินเวนเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 17 การกระตุ้นขดลวดแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส

(2) การกระตุ้นแบบฟูลสเต็ป 2 เฟส

เป็นการกระตุ้นซึ่งคล้ายกับแบบฟูลสเต็ปหนึ่งเฟส แต่การกระตุ้นแบบนี้จ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ขดลวด 2 ขดที่อยู่ใกล้กันในเวลาเดียวกัน และเรียงถัดกันไปเช่นเดียวกับแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส ดังตัวอย่าง ขดลวดชุดแรกที่ถูกกระตุ้นจะเป็นขดที่ 1 และ 2 ตามด้วยการกระตุ้นขดที่ 2 และ 3 ต่อไปเป็นขดที่ 3 และ 4 ถัดไปเป็นขดที่ 4 และ 1 แล้วกลับมาที่ขดที่ 1 และ 2 วนไปตามลำดับเช่นนี้ หรือเริ่มที่ขด 1 และ 4 ตามด้วยขดที่ 4 และ 3 ถัดไปเป็นขดที่ 3 และ 2 ต่อไปเป็นขดที่ 2 และ 1 แล้ววนกลับมาที่ขดที่ 1 และ 4 ทิศทางการหมุนจะสวนทางกัน การกระตุ้นสแต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้สามารถเพิ่มแรงบิดได้มากกว่าแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส โรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจาก 2 ขดลวดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน และเคลื่อนที่ต่อไปด้วยแรงดึงจากอีก 2 ขดลวดถัดไป สำหรับข้อเสียคือการกระตุ้นแบบนี้ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น ขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ แสดงดังภาพประกอบ 18

สแต็ปที่	ขดลวดที่ 1	ขดลวดที่ 2	ขดลวดที่ 3	ขดลวดที่ 4
1	ทำงาน	ทำงาน	-	-
2	-	ทำงาน	ทำงาน	-
3	-	-	ทำงาน	ทำงาน
4	ทำงาน	-	-	ทำงาน

ที่มา: อินเวนเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 18 การกระตุ้นขดลวดแบบฟูลสเต็ป 2 เฟส

(3) การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ปหรือฮาล์ฟสเต็ป

เป็นรูปแบบที่ผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ป 1 และ 2 เฟส เพื่อเพิ่มจำนวน ของสเต็ปต่อรอบอีกเท่าตัวหนึ่ง ในระบบนี้จะกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเป็นลำดับดังนี้ เริ่มจากขดลวดที่ 1, 1 และ 2, 2, 2 และ 3, 3, 3 และ 4, 4, 4 และ 1 แล้ววนกลับมายังขดลวดที่ 1 แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นอีก เพราะช่วงสเต็ปมีระยะสั้นลง แต่ละสเต็ปเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน ความถูกต้องของตำแหน่งมีเพิ่มมากขึ้น แต่ต้องพึงระวังไว้อีก



ประการหนึ่งว่าเมื่อกระตุ้นให้ทำงานในรูปแบบนี้จะต้องทำการหมุนถึง 2 สเต็ป จึงจะได้เท่ากับระยะเท่ากับ 1 สเต็ปเต็มของการควบคุมใน 2 แบบแรก สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องใช้ขนาดเท่ากับแบบ 2 เฟสเป็นอย่างน้อย จึงจะเพียงพอ ขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ แสดงในภาพประกอบ 19

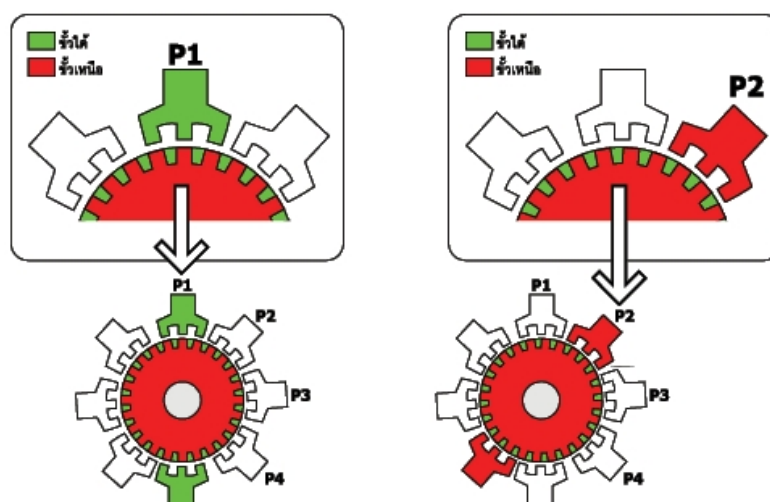
สเต็ปที่	ขดลวดที่ 1	ขดลวดที่ 2	ขดลวดที่ 3	ขดลวดที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	ทำงาน	ทำงาน	-	-
3	-	ทำงาน	-	-
4	-	ทำงาน	ทำงาน	-
5	-	-	ทำงาน	-
6	-	-	ทำงาน	ทำงาน
7	-	-	-	ทำงาน
8	ทำงาน	-	-	ทำงาน

ที่มา: อินเวนเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 19 การกระตุ้นขดลวดแบบครึ่งสเต็ปหรือฮาล์ฟสเต็ป

2.6.1.3 การทำงานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด

สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริดมีแม่เหล็กถาวรที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีซี่หัวเหนือและใต้สลับกันตามแนวของทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นส่วนของโรเตอร์ ขดลวดทั้ง 4 เฟสที่พันรอบแกนเหล็กทำหน้าที่เป็นสเตเตอร์ที่มีซี่แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณกระตุ้นที่ส่งเข้าไปในตัวมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักกับโรเตอร์ทำให้แกนของมอเตอร์เกิดการหมุนและล็อกตำแหน่งได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ



ที่มา: อินเวนเตอร์ (2559)

ภาพประกอบ 20 รูปแบบจำลองของการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพล่า



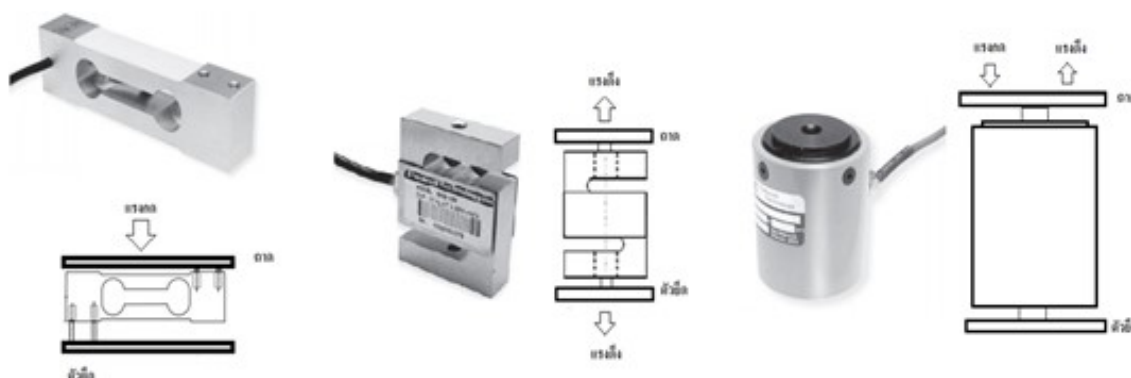
ภาพประกอบ 20 แสดงภาพจำลองของการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่มีความละเอียด 15 องศาต่อสเต็ป นั่นคือ มีจำนวนสเต็ปของการหมุนครบรอบเท่ากับ 24 สเต็ปได้ โดยใช้การขับแบบพูลสเต็ป 1 เฟส เมื่อป้อนสัญญาณพัลส์กระตุ้นเข้าที่เฟส P1 ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กใต้ขึ้น จึงเกิดแรงผลักขั้วแม่เหล็กใต้ของเฟสให้พบกับขั้วแม่เหล็กเหนือของโรเตอร์ ในจังหวะนั้นเองแกนหมุนของมอเตอร์จะเกิดการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งไป 1 สเต็ป เมื่อขั้วแม่เหล็กใต้ของสเตเตอร์พบกับขั้วแม่เหล็กเหนือของโรเตอร์จะเกิดแรงแม่เหล็กดูดกัน ทำให้แกนหมุนหยุดนิ่ง ถ้าสังเกตต่อไปที่ขั้วของสเตเตอร์ของขดลวดในเฟสที่เหลือจะพบว่ามันเหลื่อมกัน ทำให้แรงแม่เหล็กเกิดการหักล้างกัน

จากนั้นป้อนสัญญาณเข้าที่เฟส P2 ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือขึ้นที่สเตเตอร์นั้น ทำให้เกิดแรงผลักอีก 1 จังหวะ ส่งผลให้แกนหมุนของมอเตอร์เคลื่อนที่ต่อเนื่องไปอีก 1 สเต็ป เมื่อขั้วแม่เหล็กเหนือของสเตเตอร์พบกับขั้วแม่เหล็กใต้ของโรเตอร์จะเกิดแรงแม่เหล็กดูดกัน ทำให้แกนหมุนหยุดนิ่ง และจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดหากมีการป้อนสัญญาณกระตุ้นไล่ตามลำดับมายัง P3 และ P4 แล้ววนกลับไป P1 อีก แกนหมุนของมอเตอร์ก็จะเกิดการเคลื่อนที่เปลี่ยนมุมไปอย่างต่อเนื่องจนครบ 1 เมื่อเคลื่อนที่ครบ 24 สเต็ปหากสเต็ปเปอร์มอเตอร์มีความละเอียดของการหมุนมากขึ้น เช่น 7.5 องศาต่อสเต็ป จำนวนสเต็ปที่ต้องการใน 1 รอบจะเพิ่มเป็น 48 สเต็ป และสูงถึง 200 สเต็ปหากมอเตอร์มีความละเอียด 1.8 องศาต่อสเต็ป

2.6.2 อุปกรณ์วัดน้ำหนัก

อุปกรณ์วัดน้ำหนัก (Load Cell) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า การแปลงค่านี้ไม่ใช่การแปลงค่าโดยตรงหากแต่เกิดขึ้นสองขั้นตอน จากการแปลงค่าทางกลศาสตร์ แรงจะถูกตรวจจับได้จากการเปลี่ยนรูปร่างของส텐เกจ และส텐เกจแปลงค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (ความเครียด) นี้ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โหลดเซลมักจะประกอบไปด้วยส텐เกจสี่ตัวซึ่งจัดเรียงวงจรในรูปแบบของวงจรวิสตัน บริดจ์ แต่โหลดเซลที่ประกอบด้วยส텐เกจเพียงหนึ่งหรือสองตัวก็มีใช้เช่นกัน สัญญาณไฟที่จ่ายออกไปนี้มักจะมีขนาดเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์และต้องการการขยายสัญญาณด้วยการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานได้ ขั้นตอนวิธีเพื่อคำนวณหาค่าแรง โหลดเซลเกือบ 80% นั้นเป็นชนิดส텐เกจ โดยโหลดเซลแบบส텐เกจก็แบ่งเป็นอีก 2 ประเภทใหญ่ คือ โหลดเซลแบบใช้แรงกด ออกแบบมาเพื่อใช้แรงกดลงบนตัวโหลดเซลล์ และ โหลดเซลแบบใช้แรงดึง ออกแบบมาเพื่อใช้แรงดึงตัวโหลดเซลล์ออกจากกัน (Bandara, 2554) ดังภาพประกอบ 21

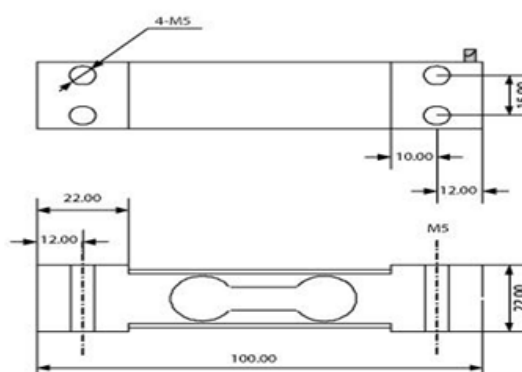




ที่มา: อุตสาหกรรม-ระยอง (2554)

ภาพประกอบ 21 ลักษณะของ Load Cell

2.6.2.1 โหลดเซลแบบใช้แรงกด



ที่มา: อุตสาหกรรม-ระยอง (2554)

ภาพประกอบ 22 ลักษณะของ Load Cell แบบกด

โหลดเซลแบบใช้แรงกดมีชื่อเรียกตามรูปร่างและการใช้งานหลายประเภท ได้แก่

1) Single End Shear Beam นิยมใช้ในการชั่งน้ำหนักในถัง น้ำหนักตั้งแต่ 250 กิโลกรัม ถึง 10 ตัน เช่น การชั่งน้ำหนักหิน-ทรายในถัง ก่อนปล่อยลงไปผสมกับซีเมนต์และน้ำในแพลนคอนกรีต เป็นต้น โหลดเซลประเภทนี้ใช้งานโดยยึดปลายด้านหนึ่งเข้ากับฐาน และนำถังวางลงบนปลายอีกด้านหนึ่ง

2) Double End Shear Beam โหลดเซลประเภทนี้เหมือนกับนำ Single End Shear Beam จำนวน 2 ตัวมารวมกัน ซึ่งทำให้มีจำนวนสแตนท์มากขึ้น ทำให้ได้ความละเอียดมากขึ้น การติดตั้งเป็นการยึดปลายทั้งสองข้างด้วยสกรูติดกับฐานแล้วนำถังมาวางตรงกลาง โดยมีลูกบอลและเบ้ายึดตัวถังและโหลดเซล เพื่อให้ถังสามารถขยับได้แต่ไม่หลุดหล่นไป

3) Single Point ออกแบบมาให้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็กน้ำหนักตั้งแต่ 2 กิโลกรัม ถึง 800 กิโลกรัม ใช้งานโดยยึดโหลดเซลล์เข้าที่จุดศูนย์กลาง Bending Beam โหลดเซลล์ประเภทนี้มีโครงสร้างคล้ายสปริง ทำงานโดยการแปลงแรงบิดที่กดที่ปลายด้านหนึ่ง ซึ่งจะให้สัญญาณได้ดีที่ขนาดแรงกดไม่มาก ตั้งแต่ 25 กิโลกรัม ถึง 500 กิโลกรัม

4) Pancake ชื่อเรียกมาจากรูปทรงกลมของโหลดเซลล์ประเภทนี้ Pancake เป็นโหลดเซลล์ที่ใช้ได้ทั้งกับแรงกดและแรงดึง ขนาดตั้งแต่ 500 กิโลกรัม ถึง 500 ตัน เป็นโหลดเซลล์ที่มีความแม่นยำสูง โดยค่า Linearity และ Hysteresis อยู่ในระดับ 0.05% เนื่องจากมีจำนวนสแตนเกจมากกว่าโหลดเซลล์ชนิดอื่น

5) Canister โหลดเซลล์รูปทรงกระบอก เหมือนกระป๋อง ใช้รับแรงกด มีความแม่นยำสูง โดยค่า Linearity และ Hysteresis อยู่ในระดับ 0.05% จึงนิยมใช้ทำเครื่องชั่งทั่วไปที่ต้องการความแม่นยำสูงๆ ไปจนถึงเครื่องชั่งรถบรรทุก มีขนาดตั้งแต่ 200 กิโลกรัม ถึง 20 ตัน

2.6.2.2 โหลดเซลล์แบบใช้แรงดึง



ที่มา: อุตสาหกรรม-ระยอง (2554)

ภาพประกอบ 23 ลักษณะของ Load Cell แบบดึง

โหลดเซลล์แบบใช้แรงดึง S Beam โหลดเซลล์ประเภทนี้ใช้งานโดยแขวนถึงที่ต้องการชั่งที่ด้านล่าง มีขนาดตั้งแต่ 2 กิโลกรัม ถึง 5 ตันถึงแม้ว่าโหลดเซลล์ชนิดสแตนเกจจะเป็นชนิดที่มักจะถูกใช้งานก็ตาม แต่ก็มีโหลดเซลล์ชนิดอื่นเช่นกัน ในการประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรม ไฮดรอลิก (ไฮดรอสแตติก) นับได้ว่าได้รับความนิยมเป็นอันดับที่สอง และถูกใช้ประโยชน์เพื่อแก้ปัญหาที่มาจากโหลดเซลล์ชนิดสแตนเกจ ตัวอย่างเช่น ไฮดรอลิกโหลดเซลล์ สามารถทนทานต่อความต่างศักย์ฉับพลันได้ (ฟ้าผ่า) จึงนับว่ามีประสิทธิภาพใช้งานในสภาวะนอกตัวอาคารได้ดีกว่า



2.6.3 วงจรขยายสัญญาณ

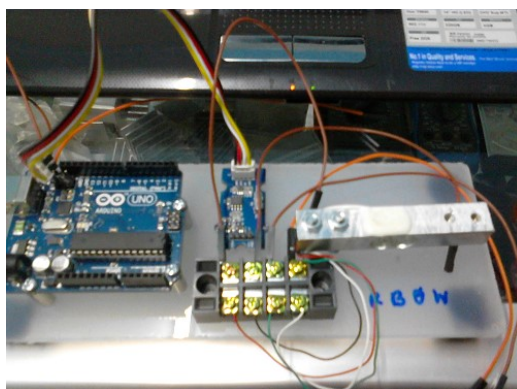
โมดูล grove - differential amplifier (seeedstudio) โมดูลขยายสัญญาณ analog จากสัญญาณเล็ก ๆ ที่แทบจะจับความแตกต่างไม่ได้ ให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้ง่ายและถูกต้อง โดยสามารถเลือกกำลังขยายได้เพียงเลื่อนสวิตช์เลือกค่าที่ต้องการ สามารถเลือกได้ 2 ค่า คือ ขยายสัญญาณ 35 เท่า หรือเลือกขยายสัญญาณ 1085 เท่า ซึ่งมีเขียนไว้ในตัวโมดูลแล้ว ดังภาพประกอบ 24



ที่มา: ไอเก็ท (ม.ป.ป.)

ภาพประกอบ 24 โมดูล Grove - Differential Amplifier

การทำงานของตัว load cell โดยใช้ตัว grove - differential amplifier ดังภาพประกอบ 25



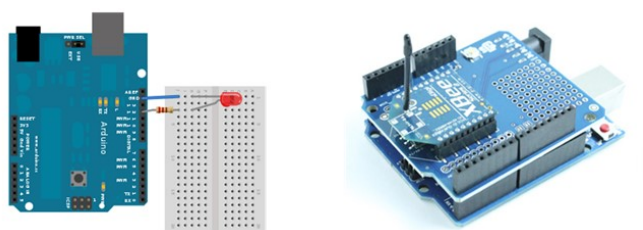
ไอเก็ท (ม.ป.ป.)

ภาพประกอบ 25 การต่อใช้งาน load cell กับ microcontroller

2.6.4 บอร์ด Arduino

arduino (ภาพประกอบ 26) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล avr ที่มีการพัฒนาแบบ open source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน hardware และ software ตัว บอร์ด arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่อ

อุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา i/o ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น arduino xbee shield, arduino music shield, arduino relay shield, arduino wireless shield, arduino gprs shield เป็นต้น



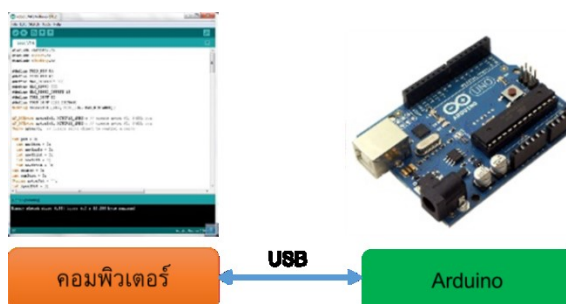
ที่มา: ไทยง่ายอีเล็ค (2555)

ภาพประกอบ 26 Board Arduino

จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง
- Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

2.6.4.1 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino

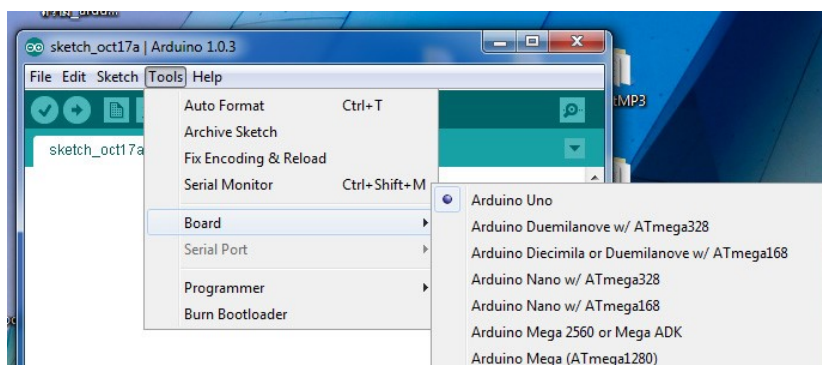


ที่มา: ไทยง่ายอีเล็ค (2555)

ภาพประกอบ 27 การเขียนโปรแกรมบน Arduino

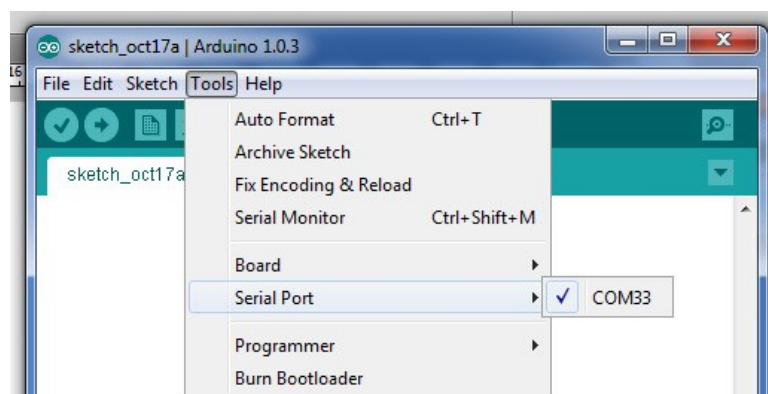
เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรม arduino ide ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก Arduino.cc/en/main/software หลังจากที่ได้เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกรุ่นบอร์ด arduino ที่ใช้และหมายเลข com port





ที่มา: ไทยง่ายอีเล็ค (2555)

ภาพประกอบ 28 เลือกบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload

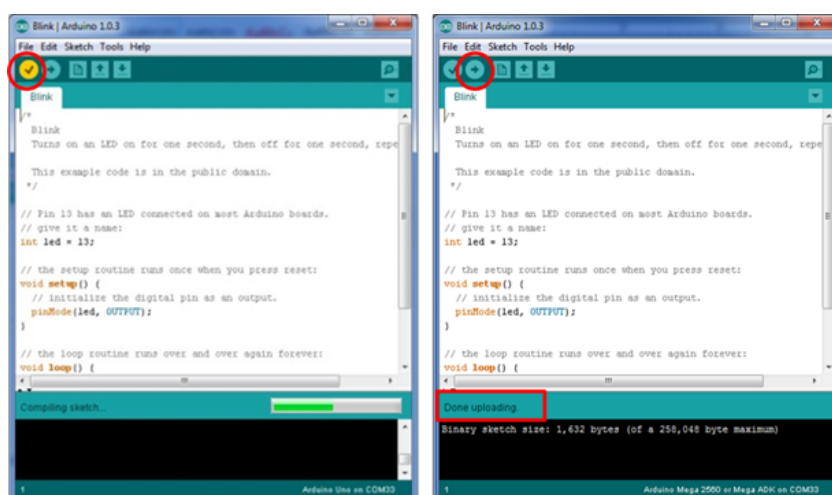


ที่มา: ไทยง่ายอีเล็ค (2555)

ภาพประกอบ 29 เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด

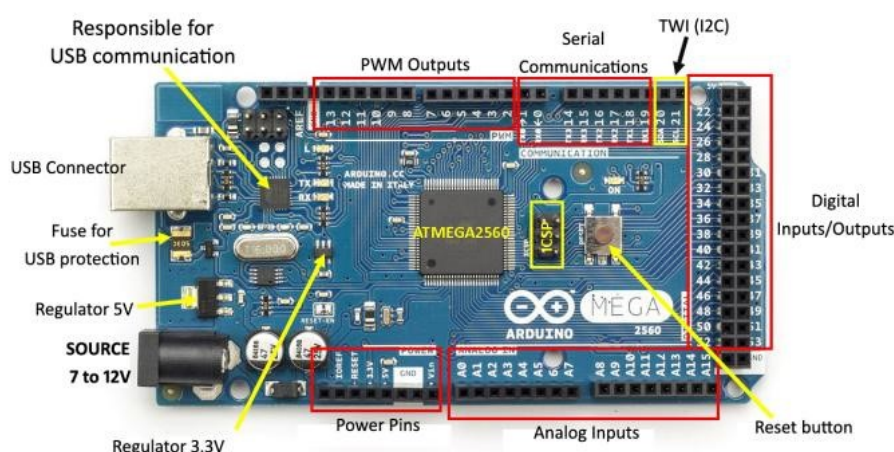
กดปุ่ม verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที





ที่มา: ไทยง่ายอีเล็ค (2555)

ภาพประกอบ 30 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile



ที่มา: ไทยง่ายอีเล็ค (2555)

ภาพประกอบ 31 ลักษณะโครงสร้างบอร์ด

2.6.4.2 Layout & Pin out Arduino Board (Model: arduino mega2560)

- 1) USB Port : ใช้สำหรับต่อกับ computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
- 2) Reset Button : เป็นปุ่ม reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
- 3) ICSP Port ของ atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม visual comport บน atmega16U2



- 4) I/O Port: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin 0,1 เป็นขา Tx, Rx Serial, Pin 3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
- 5) ICSP Port : Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
- 6) MCU : Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
- 7) I/O Port : นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
- 8) Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอกประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}
- 9) Power Jack : รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
- 10) MCU ของ Atmega 16 U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งสามารถยืดอายุการเก็บรักษาวัตถุดิบได้นานขึ้น ส่งผลให้การบริโภคในปัจจุบันมีความหลากหลายและสะดวกสบายต่อการใช้ชีวิตประจำวัน รูปแบบการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพและสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี คือ การอบแห้งแบบแช่แข็ง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงเหมาะสำหรับวัตถุดิบมีมูลค่าสูงหลังจากแปรรูปที่ไม่สามารถลดความชื้นโดยใช้ความร้อนแบบปกติ เนื่องจากความร้อนอาจทำลายสรรพคุณในวัตถุดิบให้เสื่อมสลายส่งผลต่อมูลค่าทางการตลาดที่ลดลง ถึงอย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยความร้อนยังเป็นที่นิยมนำมาใช้เพื่อลดความชื้นของวัตถุดิบ ประหยัดพลังงานและลดราคาต้นทุนลงได้ โดยข้อเสียคือใช้เวลาอบแห้งนานจึงมีแนวคิดลดเวลาอบแห้งที่วัตถุดิบจะสัมผัสกับความร้อนและลดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยนำคลื่นไมโครเวฟเข้ามาช่วยในกระบวนการอบแห้งจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าได้มีการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งอย่างแพร่หลาย แสดงดังตาราง 1



ตาราง 1 เอกสารงานวิจัยการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ผลิตภัณฑ์	เงื่อนไข	ผลการทดลอง	อ้างอิง
ลำไย	อุณหภูมิ - 40, 50, 60 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ - 180, 300, 450 วัตต์	การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง	Varith et al. (2007)
เยื่อกระดาษ	อุณหภูมิ - 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ไมโครเวฟที่ - 10, 15, 20 และ 25 วัตต์ต่อกรัม	การอบแห้งร่วมระหว่างไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทำให้คุณภาพของเยื่อกระดาษที่ขุขู่แห้งได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือการอบแห้งด้วยไมโครเวฟรวมถึงสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	Yihui et al. (2011)
ปลานิล	อุณหภูมิ - 40, 50 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ - 200, 400, 600 วัตต์ ความเร็วลม - 1.5 เมตรต่อวินาที	พลังงานไมโครเวฟทำให้ความชื้นในลดลงได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการใช้ลมร้อนอบแห้งในช่วงเวลาเดียวกัน รวมถึงการใช้อุณหภูมิลมร้อนต่ำและพลังงานไมโครเวฟเป็นประโยชน์ต่อการรักษาคุณภาพของ	Duan et al. (2011)
มะม่วงหิมนะพานต์	อุณหภูมิ - 70, 80 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ - 308, 546 วัตต์ ความเร็วลม - 0.79 เมตรต่อวินาที	การใช้กำลังไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งเมื่อเทียบกับการใช้ลมร้อนในการอบแห้งเพียงอย่างเดียว	Tirawanichakul et al. (2011)
อบแห้งข้าวหุงสุก	อุณหภูมิ - 70, 80, 90 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ - 210, 300, 560 วัตต์	ช่วยลดเวลาในการอบแห้งเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว โดยกำลังไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ และอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้ง	Jiao et al. (2014)
อบแห้งเปลือกส้ม	อุณหภูมิ - 55 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟ - 2, 4, 6 วัตต์ต่อกรัม	การใช้ไมโครเวฟเข้ามาช่วยในการอบแห้งทำให้ระยะเวลาในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว	Clara et al. (2016)



ผลการทดลองนำคลื่นไมโครเวฟเข้ามาใช้ในการอบแห้งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ระยะเวลาในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สรุปได้ว่าโดยทั่วไปแล้วเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีการออกแบบในลักษณะเดียวกัน โดยมีอุปกรณ์หลักได้แก่ ขดลวดให้ความร้อน พัดลม อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และชุดสร้างคลื่นไมโครเวฟ รวมถึงสามารถอบแห้งวัตถุดิบที่มีความชื้นได้หลากหลายประเภท

ในส่วนของการรักษาคุณค่าทางอาหารและสรรพคุณพบว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีค่าคงเหลือที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่ใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว จากการศึกษางานวิจัยของ Chan et al. (2011) ได้ศึกษาการอบแห้งใบรางจืด 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งลมร้อน 5.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ 16 ชั่วโมง และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 4 นาที โดยการอบแห้งแบบลมร้อนและแสงแดดมีปริมาณของฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 73, 76 และ 80, 89 ตามลำดับ การอบแห้งแบบไมโครเวฟปริมาณของฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 38 - 41 และ 50 - 51 ตามลำดับ Chan et al. (2012) ศึกษาการอบแห้งใบรางจืดโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบแสงอาทิตย์ 16 ชั่วโมง การอบแห้งแบบลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส 5.5 ชั่วโมง และการอบแห้งแบบไมโครเวฟ 4 นาที เพื่อเปรียบเทียบปริมาณคงเหลือของฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟมีปริมาณคงเหลือสูงกว่าการอบแห้งทั้งหมด เนื่องจากการอบแห้งของลมร้อนและแบบแสงอาทิตย์มีการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวระยะเวลาการลดค่าความชื้นของตัวอย่างจึงใช้เวลานานส่งผลต่อปริมาณสารคงเหลือในตัวอย่อย่างมีค่าลดต่ำลง

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เนื่องจากทำให้น้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็วมีผลดีทั้งในด้านการประหยัดเวลารักษาคุณค่าของวัตถุดิบ และลดการใช้พลังงาน แต่การจะทราบถึงความชื้นที่คงเหลือในผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งจำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์ออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบค่าน้ำหนักที่หายไปจากการระเหยของน้ำในระหว่างการอบแห้งและคำนวณเปลี่ยนเป็นค่าความชื้น ต้องทำการหยุดการอบแห้งเป็นช่วง ส่งผลให้การอบแห้งไม่ต่อเนื่องและเสียเวลาในการนำผลิตภัณฑ์เข้าออกจากตู้อบ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างระบบที่สามารถวัดค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งโดยไม่จำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์ออกมาวัดค่าความชื้นภายนอกกระบวนการ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ การศึกษาผลของความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้ รายละเอียดการออกแบบงานหมุนและระบบควบคุมโดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไข การศึกษาผลของความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักแบบเวลาจริง และการศึกษาผลของการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วงานหมุนแบบเวลาจริง

3.1 การศึกษาผลของความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้

ในการทดลองใช้ตู้อบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟซึ่งติดตั้งอยู่ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม แสดงในภาพประกอบ 28 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

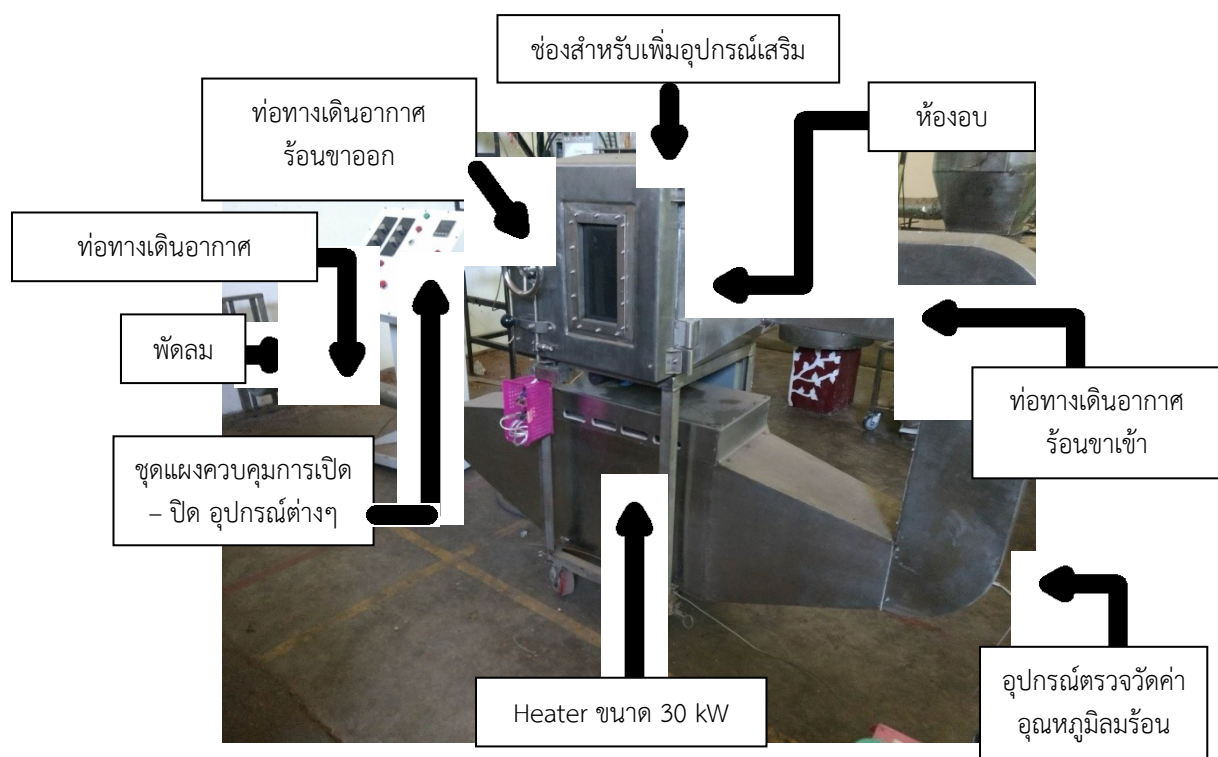
ห้องอบมีขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

กำลังไมโครเวฟสามารถปรับค่าได้จาก 0 ถึง 1600 วัตต์

ความเร็วลมภายในห้องอบสามารถปรับค่าได้จาก 0 ถึง 2 เมตรต่อวินาที

ขดลวดให้ความร้อนสามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงสุด 150 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบของงานหมุนสามารถปรับค่าได้สูงสุด 20 รอบต่อนาที



ภาพประกอบ 32 ลักษณะตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ



3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

สมุนไพรรางจืดที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดดอกสีม่วงซึ่งปลูกโดยไม่ใช้สารเคมีใน ตำบล ขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน 2560 โดยเลือกใช้ใบอ่อนรางจืดขนาดเบอร์ 2 และ 3 (Chan et al., 2012) ที่มีความกว้างและยาวเฉลี่ย 3 และ 8 เซนติเมตร จากนั้นทำการสับตัวอย่างใบรางจืดนำตัวอย่างใบรางจืดใส่ลงในกระป๋องอลูมิเนียม จำนวน 3 กระป๋อง ชั่งน้ำหนักแต่ละกระป๋องด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง ทำการจดบันทึกค่าน้ำหนักของกระป๋อง จากนั้นนำ เข้าตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงนำกระป๋องอลูมิเนียมทั้ง 3 ชั่งน้ำหนัก นำค่าน้ำหนักก่อนและหลังอบแห้งมาคำนวณเพื่อหาค่าความชื้นของใบรางจืด

3.1.1.2 เงื่อนไขในการทดลอง

- 1) ความเร็วรอบของจานหมุน 3 ระดับ ได้แก่ 0, 5 และ 10 รอบต่อนาที
- 2) กำลังไมโครเวฟ 3 ระดับ ได้แก่ 600, 1200 และ 1600 วัตต์
- 3) ความเร็วลม 0.9 เมตรต่อวินาที
- 4) อุณหภูมิลมร้อน 70 ± 2 องศาเซลเซียส

3.1.1.3 วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักใบรางจืดโดยกำหนดให้ใน 1 การทดลอง ใช้ใบรางจืด 20 กรัม
- 2) ตั้งอุณหภูมิในห้องอบ 70 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.9 เมตรต่อวินาที
- 3) วางใบรางจืดในลักษณะกระจายให้ทั่วบนจานหมุนภายในตู้อบ
- 4) ตั้งค่ากำลังไมโครเวฟที่ 600 วัตต์ ที่ความเร็วรอบของจานหมุน 0 เมตรต่อนาที จากนั้นเริ่มกระบวนการอบแห้ง
- 5) ทำการอบแห้งเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำใบรางจืดออกจากห้องอบชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละค่าความชื้นมาตรฐานเปียก พร้อมบันทึกผลการทดลอง
- 6) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1 และ 5 โดยเพิ่มเวลาอบแห้งขึ้นครั้งละ 30 วินาที จนเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก พร้อมบันทึกผลการทดลอง
- 7) ทดลองซ้ำในข้อ 1 และ 6 โดยคงค่ากำลังไมโครเวฟที่ค่า 600 วัตต์ และปรับความเร็วของจานหมุนเป็น 5 รอบต่อนาที
- 8) ทดลองซ้ำในข้อ 1 และ 6 โดยคงค่ากำลังไมโครเวฟที่ค่า 600 วัตต์ และปรับความเร็วของจานหมุนเป็น 10 รอบต่อนาที
- 9) เปลี่ยนกำลังไมโครเวฟจาก 600 วัตต์ เป็น 1200 และ 1600 วัตต์ จากนั้นทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 ถึง 9 ตามลำดับ
- 10) Plot Graph ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา
- 11) นำใบรางจืดที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ค่าสี ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ สารฟีนอลิก และสารฟลาโวนอยด์
- 12) คำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการอบผลิตภัณฑ์ที่อบจนเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก



3.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.1.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำใบรางจืดที่ผ่านการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไข มาทำให้ละเอียดโดยใช้เครื่องปั่นน้ำผลไม้ห่อ lmar-flex ที่ 1 – 2 นาที หลังจากนั้นนำผงตัวอย่างแยกในแต่ละเงื่อนไขในถุงซิปล็อกแบบมีแถบใช้เขียนบอกรายละเอียด เพื่อเตรียมใช้ในการวิเคราะห์สารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และค่าสี

3.1.2.2 การวัดสีของผลิตภัณฑ์

การวัดสีที่เกิดจากผลการทดลองสามารถตรวจวัดได้จากการนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งและบดละเอียดด้วยเครื่องปั่น จากนั้นทำการวัดสีด้วยระบบ Hunter L* a* b* ด้วยเครื่องวัดสีมาตรฐาน Spectrophotometer Hunter lab color flex เป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยโดยที่

L* คือ ค่าความสว่างซึ่งมีค่าจาก 0 คือสีดำไปจนถึง 100 คือสีขาว

a* คือ ค่าบ่งบอกความเป็นสีแดงและสีเขียว โดยค่า (+) บ่งบอกว่าเป็นสีแดง ค่าลบ (-) บ่งบอกว่าเป็นสีเขียว

b* คือ ค่าบ่งบอกความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่า (+) บ่งบอกว่าเป็นสีเหลือง ค่าลบ (-) บ่งบอกว่าเป็นสีน้ำเงิน

ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม โดยนำค่าสีเริ่มต้นเปรียบเทียบกับค่าสีที่เปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (5)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (5)$$

ขั้นตอนในการวัดสี

- 1) เปิดเครื่อง Hunter L a b colour flex
- 2) ทำการสอบเทียบ (calibrate) เครื่องวัดสีโดยนำแผ่นสีขาวมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวมาวางบนช่องทดสอบเครื่อง
- 3) ทำการเปรียบเทียบ (calibrate) เครื่องวัดสีโดยนำแผ่นสีดำมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวมาวางบนช่องทดสอบเครื่อง
- 4) ทำการเลือกการแสดงผลข้อมูลเป็นแบบ L* a* b*
- 5) นำผงรางจืดที่ต้องการวัดสีวางบนแผ่นกระจกที่ใช้ทำการทดสอบ
- 6) กดปุ่มเริ่มการทำงานของเครื่องเพื่อประมวลผลและบันทึกผลข้อมูล
- 7) ทำการวัดค่าซ้ำจำนวน 3 ครั้งเพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยและบันทึกผลข้อมูล
- 8) เปรียบเทียบลักษณะสีตามเงื่อนไขการทดลองตามที่กำหนด

3.1.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิก

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ใช้วิธี Folin-Ciocalteu method (Yoo et al., 2008)



ขั้นตอนในการการวิเคราะห์

1) ชั่งผงตัวอย่าง 0.015 กรัม ใส่ในหลอดไมโครเซนตริฟิวขนาด 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 1.5 มิลลิลิตร

2) ต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นใช้ ปิเปตต์ดูดน้ำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร พักไว้ในหลอดเซนตริฟิว

3) นำน้ำตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดไมโครเซนตริฟิวขนาด 1.5 มิลลิลิตร

4) เติม Folin - Ciocalteu's reagent 10 % ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน

5) เติม 7.5 % (w/v) Na_2CO_3 ปริมาตร 100 ไมโครลิตร

6) เติมน้ำกลั่น 300 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและเก็บไว้ในที่มืดนาน 2 ชั่วโมง

7) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 731 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง SPECTRONIC 20 GENESYS

8) วิเคราะห์ค่า TPC โดยเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานซึ่งเตรียมจากกรดแกลลิก (gallic acid) คำนวณค่าในหน่วยมิลลิกรัมเทียบเท่ากรดแกลลิก (milligrams of gallic acid equivalents, GAE) ต่อลิตรของตัวอย่าง (mg GAE/l)

3.1.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์

การวิเคราะห์ปริมาณ ฟลาโวนอยด์ ทั้งหมด (TFC) ดัดแปลงจากวิธีของ Yoo et al. (2008) ในขวดสีชา

ขั้นตอนในการการวิเคราะห์

1) เติมตัวอย่าง 250 ไมโครลิตร และเติม 5 % (w/v) NaNO_2 ปริมาตร 75 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 5 นาที

2) ก่อนเติม 10 % (w/v) AlCl_3 ปริมาตร 150 ไมโครลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 6 นาที

3) เติม 1.0 M NaOH ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร

4) เติมน้ำกลั่น 275 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยานาน 5 นาที

5) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง SPECTRONIC 20 GENESYS

6) วิเคราะห์ค่า TFC โดยเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานซึ่งเตรียมจากเคอร์ซีติน (quercetin) คำนวณค่าในหน่วยมิลลิกรัมเทียบเท่าเคอร์ซีติน (milligrams of quercetin equivalents, QE) ต่อลิตรของตัวอย่าง (mg QE/l)

3.1.2.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

การทดสอบปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ดัดแปลงจากวิธีของ Yoo et al. (2008) และ Cotelle et al. (1996)

ขั้นตอนในการการวิเคราะห์

1) เติมสารละลายอนุมูลอิสระเสถียร 0.08 นาโนเมตร DPPH (1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl) ปริมาตร 900 ไมโครลิตร ในหลอด ไมโครเซนตริฟิวขนาด 1.5 มิลลิลิตร



2) เติมตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่า (vortex) นาน 10 วินาที ก่อนเก็บไว้ในที่มีदनาน 30 นาที

3) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง SPECTRONIC 20 GENESYS

4) คำนวณการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (FRSA) ดังสมการที่ (6)

$$\% \text{ FRSA} = \frac{(A_c - A_s)}{A_c} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ A_s คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตัวอย่าง

A_c คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวควบคุม (ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างในการทำปฏิกิริยา)

3.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่า $L^*a^*b^*$ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี Duncan new' s multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS

3.1.4 การวิเคราะห์พลังงาน

พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณจาก พลังงานที่ใช้ของ microwave, load cell, heater และ blower รวมกันในหน่วยวัตต์ต่อชั่วโมง สามารถเขียนเป็นสมการ (7) – (11) โดยกำหนดให้ค่า $\cos\theta = 1$

$$\text{Power}_{\text{total}} = \text{Power}_{\text{microwave}} + \text{Power}_{\text{heater}} + \text{Power}_{\text{blower}} + \text{Power}_{\text{motor}} \quad (7)$$

โดยที่

$\text{Power}_{\text{microwave}}$ ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครเวฟกับกระแสที่ใช้งาน มีหน่วยเป็นวัตต์

$$\text{Power}_{\text{microwave}} = V \times I \times \cos\theta \quad (8)$$

$\text{Power}_{\text{heater}}$ ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดฮีตเตอร์คูณกระแสที่ใช้งาน มีหน่วยเป็นวัตต์

$$\text{Power}_{\text{heater}} = V \times I \times \cos\theta \quad (9)$$

$\text{Power}_{\text{blower}}$ ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับพัดลมคูณกระแสที่ใช้งาน มีหน่วยเป็นวัตต์

$$\text{Power}_{\text{blower}} = V \times I \times \cos\theta \quad (10)$$

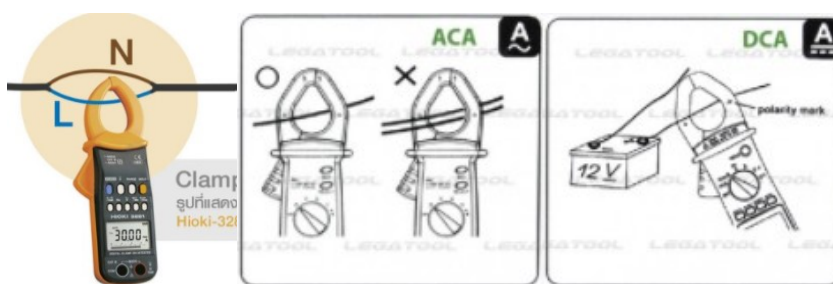
$\text{Power}_{\text{motor}}$ ได้จากการคำนวณรอบของจานหมุนและโหลดบนจานหมุน

$$\text{Power}_{\text{motor}} = V \times I \times \cos\theta \quad (11)$$



3.1.4.1 ขั้นตอนในการวัดกระแส (i)

- 1) เปิดเครื่องแคลมป์มิเตอร์
- 2) เลือกประเภทกระแสที่ต้องการวัด โดยแบ่งเป็นกระแสสลับ (ACA) และกระแสตรง (DCA)
- 3) นำปากคิปปิดคล้องสายไฟที่ต่อไปยังอุปกรณ์ กรณีไฟกระแสสลับจำเป็นต้อง 1.1 คล้องเส้น L (line) ในส่วนไฟกระแสตรงคล้องที่สายไฟขั้วบวก (ภาพประกอบ 33)
- 4) อ่านค่ากระแสจากหน้าจอแคลมป์มิเตอร์และบันทึกผล

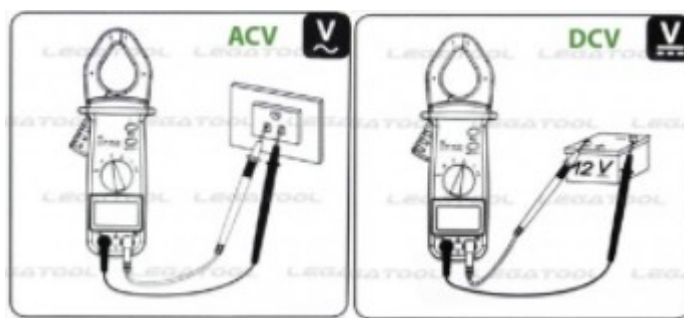


ที่มา: แล็กกาทูล

ภาพประกอบ 33 การวัดกระแส (i)

3.1.4.2 ขั้นตอนในการวัดแรงดัน (v)

- 1) เปิดเครื่อง แคลมป์มิเตอร์และทำการเสียบสายวัดแรงดัน โดยที่สีแดงเป็นขั้วบวก สีดำเป็นขั้วลบ ดังภาพประกอบ 34
- 2) เลือกประเภทแรงที่ต้องการวัด โดยแบ่งเป็นแรงดัน (ACV) และแรงดัน (DCV)
- 3) นำปลายสายทั้ง 2 สีที่เสียบเข้ากับแคลมป์มิเตอร์ไปแตะสายไฟขั้วบวกและขั้วลบที่ต่อไปยังอุปกรณ์ อ่านค่าแรงดันจากหน้าจอแคลมป์มิเตอร์และบันทึกผล



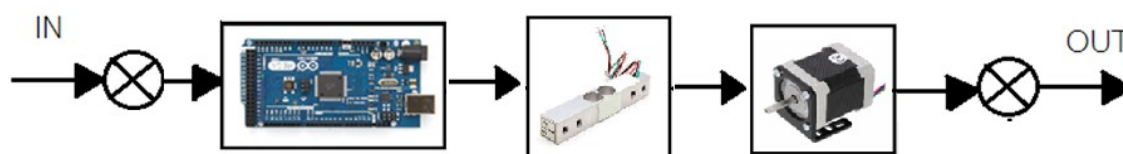
ภาพประกอบ 34 การวัดแรงดัน (v)



3.2 การออกแบบงานหมุนและระบบควบคุมโดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไข

3.2.1 การออกแบบระบบควบคุม

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขนั้น จำเป็นจะต้องวัดค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ตลอดเวลาที่อยู่ภายในห้องอบ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นโดยตรงไว้ภายในเตาอบไมโครเวฟเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นส่วนมากมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการนำวัสดุที่มีลักษณะเป็นพลาสติกเข้าไปภายในตู้อบที่มีคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดการดูดซับคลื่นจนเกิดความร้อน ทำให้พลาสติกที่อยู่ภายในอุปกรณ์เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น หรืออุปกรณ์บางชนิดมีลักษณะเป็นโลหะซึ่งจะเกิดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถรับคลื่นไมโครเวฟได้อย่างเต็มที่ (Matthes, 1992) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ออกแบบระบบการควบคุมความเร็วมอเตอร์ของงานหมุนให้มีระบบป้อนกลับจากอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนัก เมื่ออัตราความชื้นลดลงระบบจะทำการส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ควบคุมและส่งสัญญาณไปปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ติดอยู่กับงานหมุนในห้องอบตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ดังภาพประกอบ 35

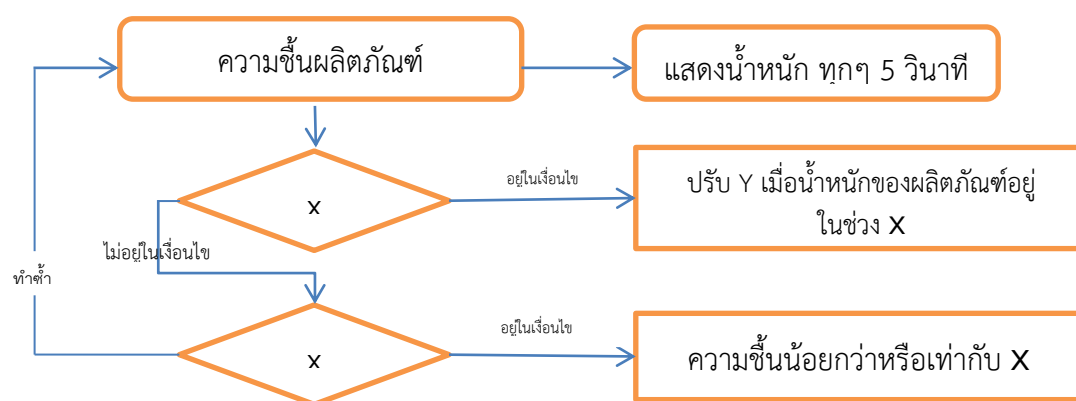


ภาพประกอบ 35 การออกแบบระบบควบคุม

3.2.2 การเขียนโปรแกรมควบคุม

ในปรับความเร็วของงานหมุนภายในตู้อบจะทำการปรับเมื่อความแตกต่างของร้อยละความชื้นที่เปลี่ยนไปจากร้อยละความชื้นตั้งต้น ความสัมพันธ์ของความเร็วงานหมุนกับร้อยละความชื้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของร้อยละความชื้นเทียบกับเวลา โดยสามารถเขียนแผนผังการทำงานของระบบควบคุมความเร็วของงานหมุน แสดงดังภาพประกอบ 36 เมื่อ X เป็นค่าความแตกต่างของร้อยละความชื้นและ Y เป็นค่าของความเร็วงานหมุน

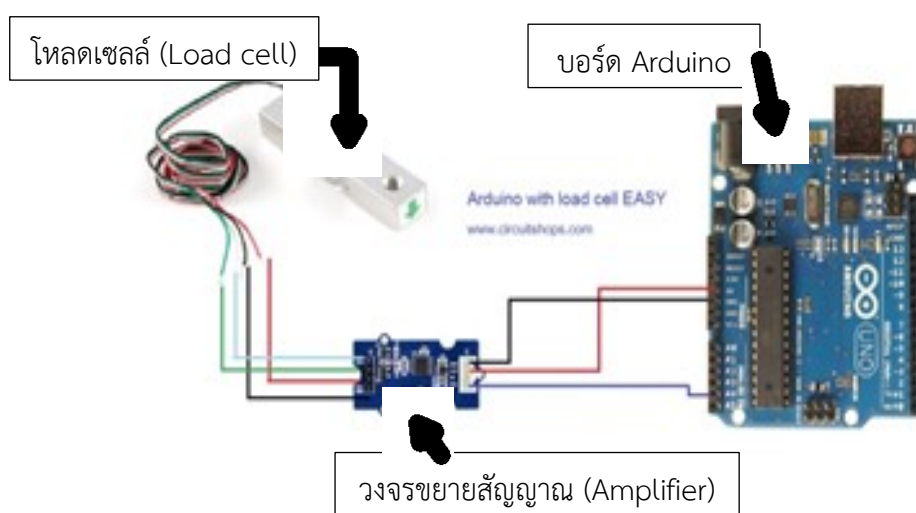




ภาพประกอบ 36 ลักษณะแผนผังการทำงานของโปรแกรมชั่งน้ำหนักอัตโนมัติ

3.2.3 ระบบตรวจวัดค่าน้ำหนัก

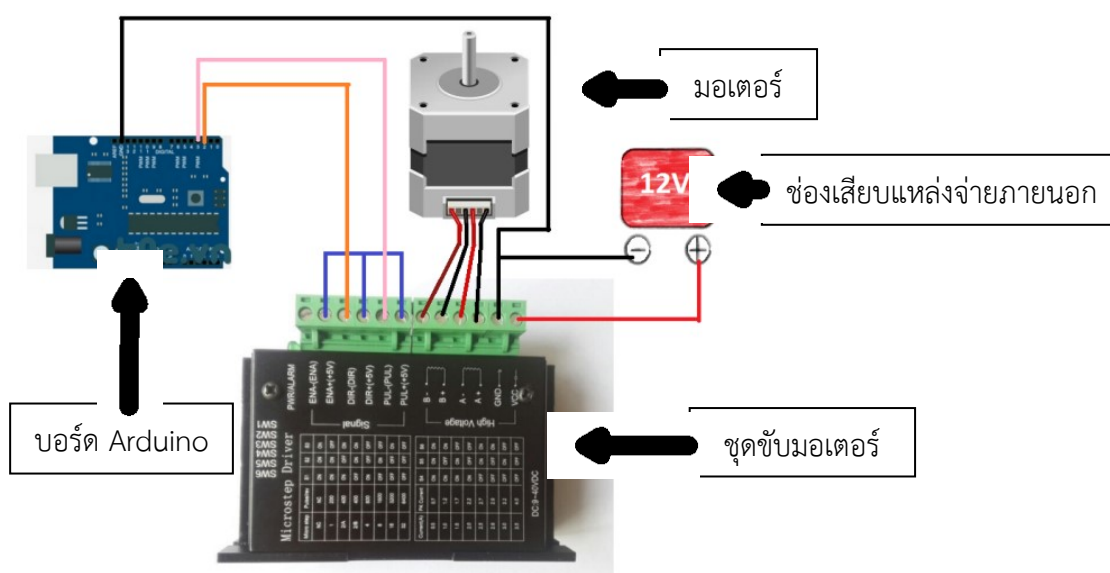
ในการตรวจวัดน้ำหนักเลือกใช้อุปกรณ์ชนิด โหลดเซลล์มาใช้ในการตรวจวัดน้ำหนักเพื่อหาความชื้นแบบเวลาจริง เนื่องจากโหลดเซลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดค่าน้ำหนักที่ส่งค่าสัญญาณเป็นลักษณะแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนัก เพื่อสะดวกต่อการแสดงค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยโดยผ่านบอร์ด Arduino ที่มีการเขียนโปรแกรมในการแปลงแรงดันไฟฟ้าไปเป็นค่าน้ำหนัก การต่อวงจรใช้งานโหลดเซลล์ในภาพประกอบ 37 จำเป็นต้องต่อผ่านชุดขยายแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งมาจากโหลดเซลล์นั้นมีขนาดเล็ก ทำให้การอ่านค่าของชุดควบคุมอาจไม่แม่นยำ จึงจำเป็นต้องขยายสัญญาณผ่านวงจรขยายสัญญาณให้เท่ากับภาครับของชุดควบคุมคือ 3.3 ถึง 5 โวลต์ และทำการปรับเทียบค่าน้ำหนักผ่านบอร์ด Arduino โดยการใช้ลูกตุ้มน้ำหนักขนาดต่างๆ ทั้งนี้ โหลดเซลล์ยังมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง ราคาไม่สูงจนเกินไปและหาซื้อได้ง่าย สะดวกต่อการซ่อมบำรุงเมื่อเสียหาย เหมาะกับระบบควบคุมที่มีการรับค่าเป็นสัญญาณดิจิทัลทั่วไป (Thaieasyelec, 2012)



ภาพประกอบ 37 การต่อวงจรขยายสัญญาณก่อนเข้าอุปกรณ์ควบคุม

3.2.4 ระบบมอเตอร์ชุดขับเคลื่อนจานหมุน

การต่อวงจรของมอเตอร์ภาพประกอบ 38 ใช้ในการปรับรอบการหมุนมีลักษณะการต่อคล้ายกับโพลตเซลล์จำเป็นต้องผ่านตัวกลาง เนื่องจากแรงดันที่ออกจากชุดควบคุม Arduino นั้นไม่เพียงพอที่จะสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์จึงต้องผ่านชุดขับมอเตอร์ ชุดควบคุมการหมุนจำเป็นต้องใช้กระแสไฟสูงกว่ามอเตอร์ธรรมดาทั่วไป การเลือกใช้ชุดขับเพื่อส่งกำลังไปยังมอเตอร์จึงต้องเลือกใช้ชุดขับที่มีการจ่ายกระแสสูง ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ชุดขับที่จ่ายกระแสได้สูงถึง 4.5A ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 – 45 VDC พร้อมวงจรป้องกันการลัดวงจรโดยใช้ optical coupling ความเร็วสูง มีระบบระบายความร้อนในตัวใช้ได้ทั้งแบบ 2-phase / 4-phase / 4-wire / 6-wire stepper motor. เลือกปรับการหมุนได้หลายแบบ full step / half step / 1/2 step, 1/4 step, step 1/8, 1/16 step



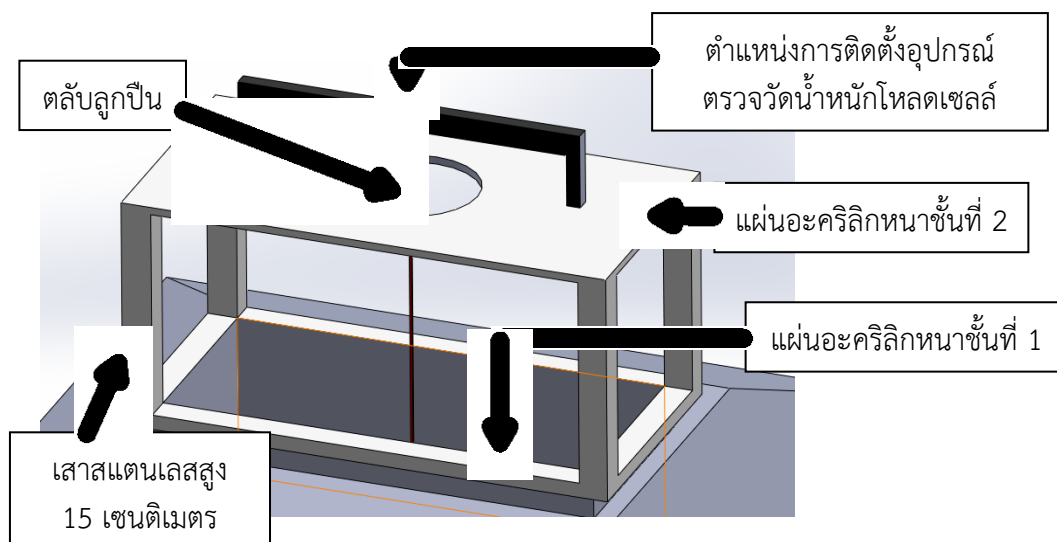
ที่มา: โรบอทยาม (ม.ป.ป.).

ภาพประกอบ 38 การต่อวงจรมอเตอร์ผ่านชุดขับเคลื่อนก่อนเข้าสู่ชุดควบคุม

3.2.5 ตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนัก

อุปกรณ์วัดน้ำหนัก (load cell) มีความละเอียดอ่อนต่อสภาพอากาศรอบข้างที่มีอุณหภูมิสูง การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักชนิดนี้จึงไม่สามารถติดตั้งภายในตู้อบที่มีอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากความร้อนภายในตู้อบอาจส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมทำให้น้ำหนักคลาดเคลื่อนไปจากค่าน้ำหนักที่แท้จริง (compomax, 2012) ในงานวิจัยจึงได้ทำการออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนักที่ด้านบนภายนอกของตู้อบ ดังภาพประกอบ 39

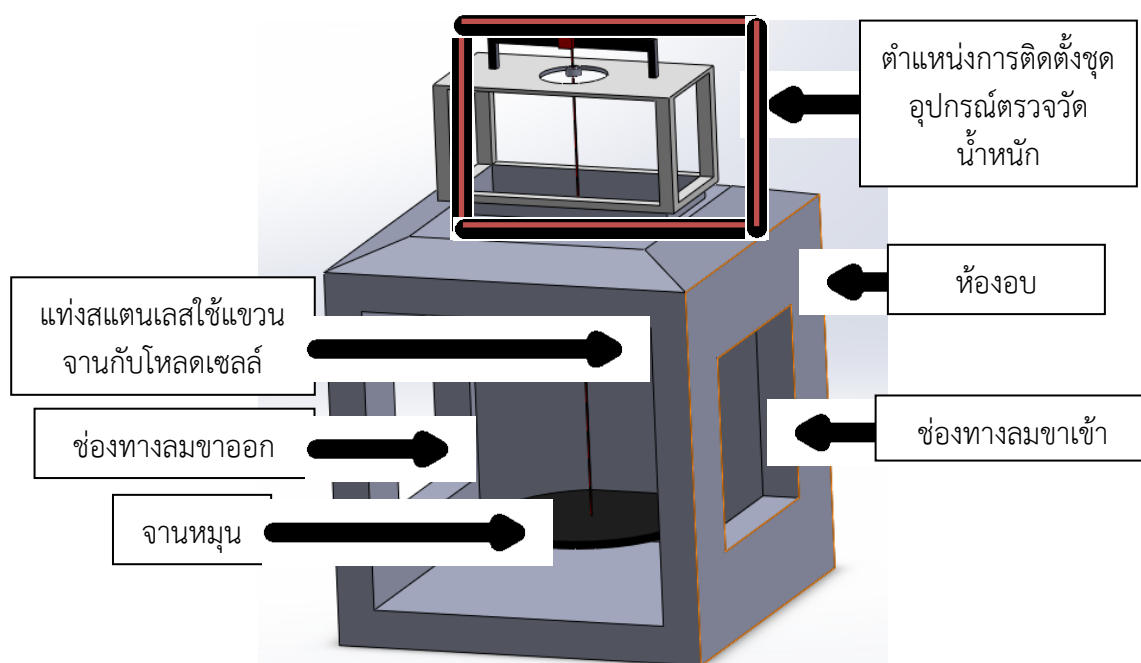




ภาพประกอบ 39 ลักษณะการวางอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักรีดด้านบนผนังตู้

3.2.6 การออกแบบจานหมุน

ลักษณะของจานหมุนภายในตู้ออกแบบให้แบ่งออกเป็น 3 ชั้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการใช้วางผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง ต่างจากเดิมที่จานหมุนมีเพียงชั้นเดียวทำให้การวางผลิตภัณฑ์จำกัดด้วยพื้นที่ในการอบแห้ง โดยโครงสร้างของจานหมุนทั้ง 3 ชั้นเชื่อมติดกันด้วยแกนกลางที่ถูกแขวนยึดกับมอเตอร์ที่ถูกติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก ภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 การวางอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักรีดโดยรวม

3.3 การศึกษาผลของความเร็รรอบและกำลังไมโครเวฟโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักแบบเวลาจริง

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.1.1

3.3.2 เงื่อนไขในการทดลอง

3.3.2.1 ความเร็รรอบของจานหมุน 3 ระดับ ได้แก่ 0, 5 และ 10 รอบต่อนาที

3.3.2.2 กำลังไมโครเวฟ 3 ระดับ ได้แก่ 600, 1200 และ 1600 วัตต์

3.3.2.3 ความเร็วลม 0.9 เมตรต่อวินาที

3.3.2.4 อุณหภูมิลมร้อน 70 ± 2 องศาเซลเซียส

3.3.2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดแสดงค่าความชื้น

3.3.3 วิธีการทดลอง

3.3.3.1 ชั่งน้ำหนักใบรางจืดโดยกำหนดให้ใน 1 การทดลอง ใช้ใบรางจืด 20 กรัม

3.3.3.2 ตั้งอุณหภูมิตูบที่ 70 ± 2 องศาเซลเซียส และความเร็วลมที่ 0.9 เมตรต่อวินาที

3.3.3.3 วางใบรางจืดบนจานหมุนทั้ง 3 ชั้น ในลักษณะกระจายให้ทั่ว

3.3.3.4 ตั้งค่ากำลังไมโครเวฟที่ 600 วัตต์ และความเร็รรอบของจานหมุนที่ 0 เมตรต่อวินาที จากนั้นเริ่มกระบวนการอบแห้ง

3.3.3.5 ทำการตั้งค่าอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงค่าความชื้นทุก 5 วินาที อบแห้งใบรางจืดจนเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก

3.3.3.6 ทดลองซ้ำในข้อ 1 และ 5 โดยคงค่ากำลังไมโครเวฟที่ค่า 600 วัตต์ และปรับความเร็วของจานหมุนเป็น 5 รอบต่อนาที

3.3.3.7 ทดลองซ้ำในข้อ 1 และ 5 โดยคงค่ากำลังไมโครเวฟที่ 600 วัตต์ ความเร็วของจานหมุนเป็น 10 รอบต่อนาที

3.3.3.8 เปลี่ยนกำลังไมโครเวฟจาก 600 วัตต์ เป็น 1200 และ 1600 วัตต์ จากนั้นทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 ถึง 8 ตามลำดับ

3.3.3.9 Plot Graph ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา เพื่อวิเคราะห์หาจุดวิกฤตของผลิตภัณฑ์และนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วรอบจานหมุน

3.3.3.10 คำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการอบผลิตภัณฑ์จนความชื้นเหลือต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก

3.4 การศึกษาผลของการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วจานหมุนแบบเวลาจริง

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1.1

3.4.2 เงื่อนไขในการทดลอง

3.4.2.1 การปรับความเร็วรอบของจานหมุน 3 เงื่อนไข ได้แก่ 0 ไปเป็น 5, 0 ไปเป็น 10 และ 5 ไปเป็น 10 รอบต่อนาที โดยเปลี่ยนความเร็วรอบเมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์เข้าสู่จุดวิกฤต



3.4.2.2 กำลังไมโครเวฟ 3 ระดับ ได้แก่ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วลม 0.9 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิลมร้อน 70 ± 2 องศาเซลเซียส

3.4.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแสดงค่าค่าความชื้น

3.4.3 วิธีการทดลอง

3.4.3.1 ชั่งน้ำหนักใบรางจืดโดยกำหนดให้ใน 1 การทดลอง ใช้ใบรางจืด 20 กรัม

3.4.3.2 ตั้งอุณหภูมิตู้อบไว้ที่ 70 ± 2 องศาเซลเซียส และความเร็วลมที่ 0.9 เมตรต่อวินาที

3.4.3.3 วางใบรางจืดบนจานหมุนทั้ง 3 ชั้น ในลักษณะกระจายให้ทั่ว

3.4.3.4 ตั้งค่ากำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์

3.4.3.5 ปรับตั้งค่าความเร็วรอบของจานหมุนจาก 0 ไปเป็น 5 โดยการเปลี่ยนความเร็วรอบดูจากค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เริ่มเข้าสู่จุดวิกฤต

3.4.3.6 ทำการตั้งค่าอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงค่าความชื้นทุก 5 วินาที อบแห้งใบรางจืดจนเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก

3.4.3.7 ปรับตั้งค่าความเร็วรอบของจานหมุนจาก 0 ไปเป็น 10 จากนั้นทำการทดลองซ้ำในข้อ 1 ถึง 6 ตามลำดับ

3.4.3.8 ปรับตั้งค่าความเร็วรอบของจานหมุนจาก 5 ไปเป็น 10 จากนั้นทำการทดลองซ้ำในข้อ 1 ถึง 6 ตามลำดับ

3.4.3.9 เปลี่ยนกำลังไมโครเวฟจาก 600 วัตต์ เป็น 1200 และ 1600 วัตต์ จากนั้นทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 ถึง 9 ตามลำดับ

3.4.3.10 Plot Graph ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลา

3.4.3.11 นำใบรางจืดที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1.1

3.4.3.12 คำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการอบผลิตภัณฑ์ที่อบจนเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก

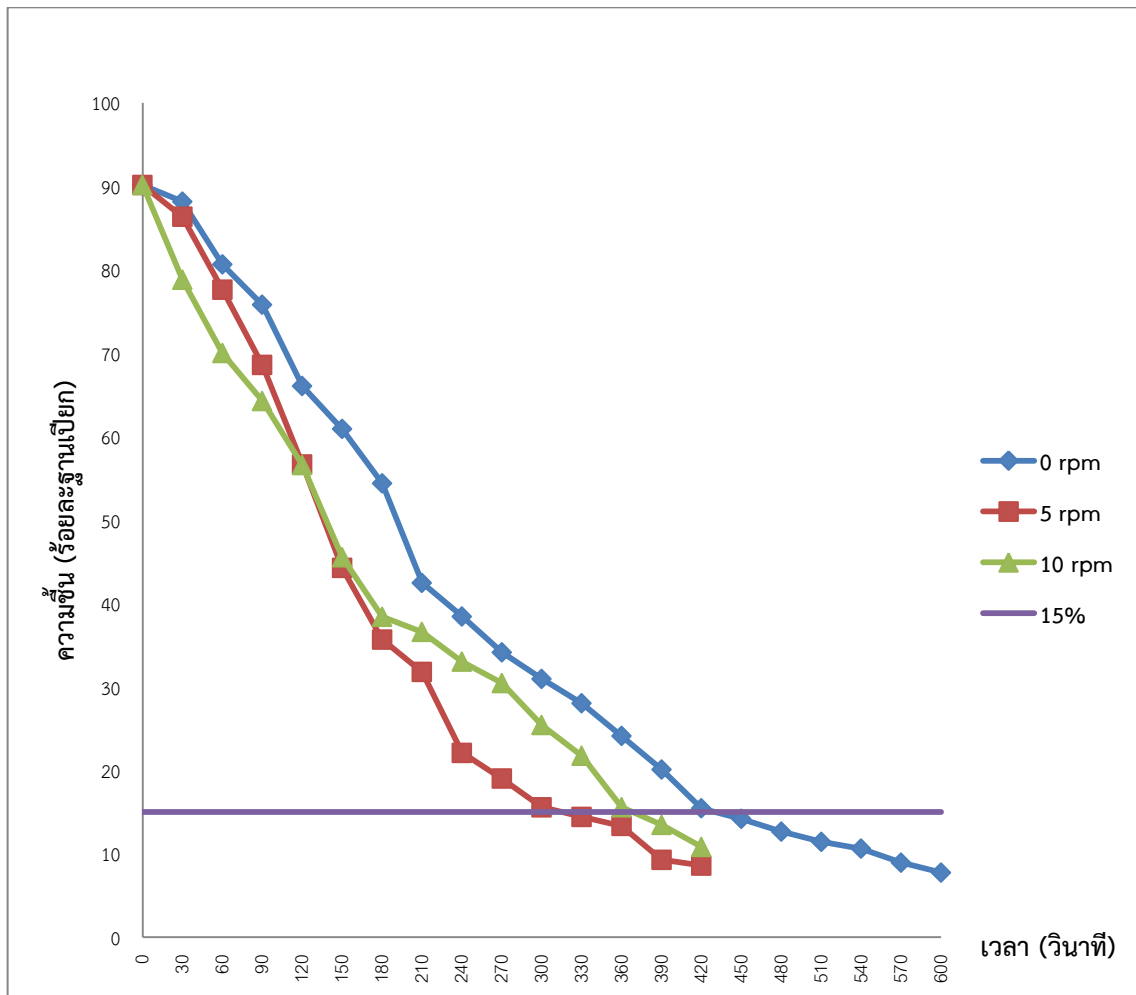


บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

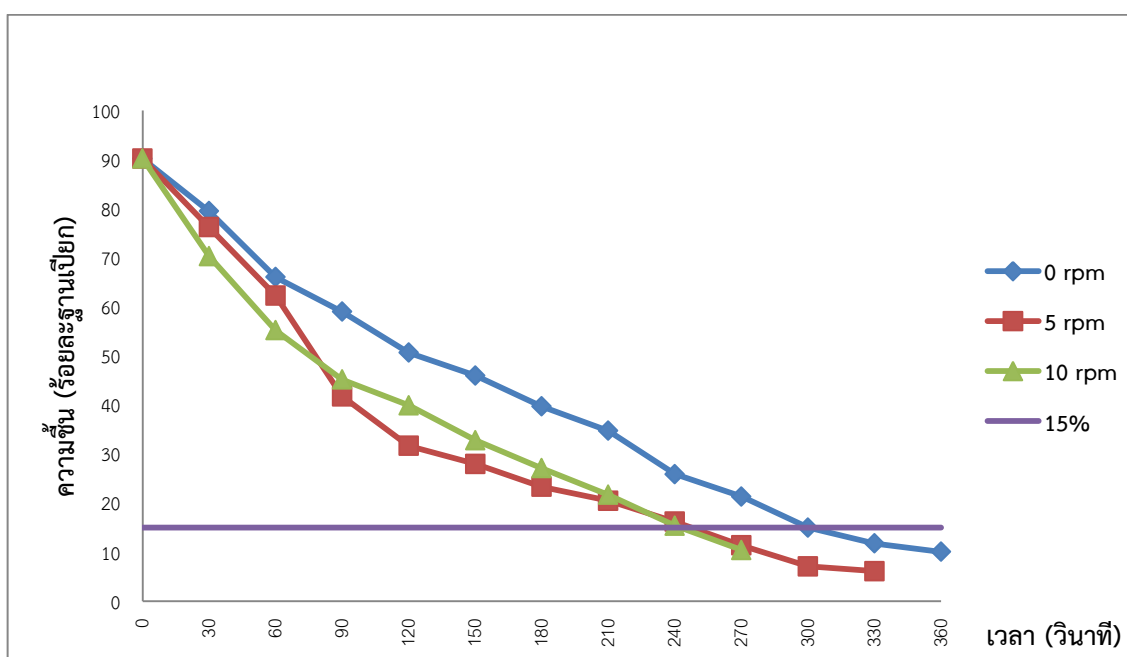
4.1 ผลของการศึกษาความเร็วรอบและกำลังไม่โครเวฟต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และพลังงานที่ใช้

จากการนำใบรางจืดที่มีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 90 ฐานเปียก อบแห้งจนความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก ที่กำลังไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบจานหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิลมร้อนคงที่ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อนคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที ความชื้นของใบรางจืดมีค่าลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 41- 43

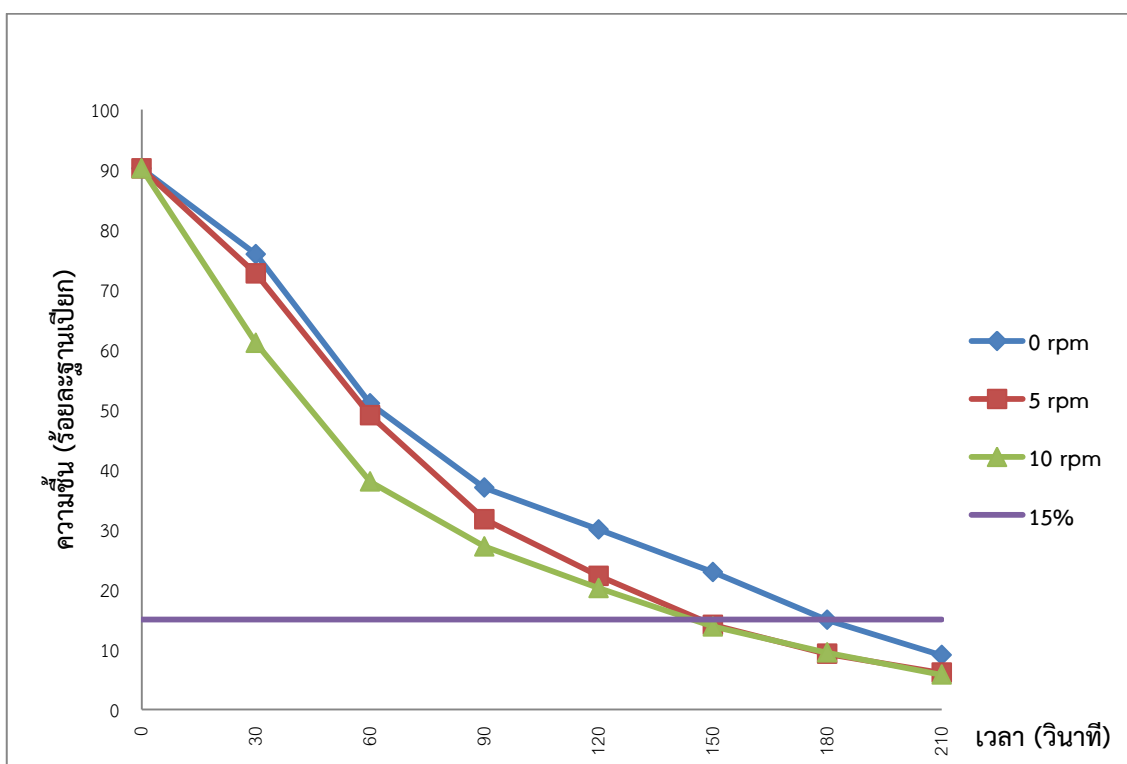


ภาพประกอบ 41 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด ที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์





ภาพประกอบ 42 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด ที่กำลังไมโครเวฟ 1200 วัตต์



ภาพประกอบ 43 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์



จากภาพประกอบ 41 - 43 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในใบรางจืดไปจนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง พบว่าการลดลงของความชื้นมีลักษณะเป็นแบบอัตราเร็วคงที่ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ให้เกิดการเสียดสีจนเปลี่ยนเป็นความร้อน ทำให้ความชื้นจากภายในเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและระเหยอย่างรวดเร็ว การเพิ่มกำลังไมโครเวฟสูงขึ้นส่งผลให้น้ำภายในใบรางจืดมีการระเหยความชื้นที่ผิวจนออกมาได้เร็วขึ้นและลักษณะตัวอย่างที่บางทำให้ความชื้นอยู่ภายในแพร่ซึมผ่านมาที่ผิวหนังได้เร็วเช่นกัน ส่งผลให้การลดลงของความชื้นเป็นไปในทางทิศเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ของ Varith et al. (2007) ศึกษาอบแห้งลำไย Yihui et al. (2011) ศึกษาอบแห้งเยื่อกระดาษ Duan et al. (2011) ศึกษาอบแห้งปลานิล Tirawanichakul et al. (2011) ศึกษาอบแห้งมะม่วงหิมพาน Kasseem et al. (2011) ศึกษาอบแห้งองุ่น Jiao et al. (2014) ศึกษาอบแห้งเมล็ดข้าวและ Clara et al. (2016) ศึกษาอบแห้งเปลือกส้ม โดยงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นได้ทำการเปรียบเทียบการใช้กำลังวัตต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้ลดความชื้นภายในตัวอย่างสั้นลง ในส่วนการพิจารณาความเร็วรอบจานหมุนที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ใช้กำลังวัตต์ต่ำ พบว่าจานที่มีการหมุนส่งผลให้การลดความชื้นเป็นไปได้เร็วกว่าจานที่หยุดอยู่กับที่ เนื่องจากในระหว่างการเคลื่อนที่ของจานหมุนทำให้ตัวอย่างสามารถรับคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนไปมาได้ดีขึ้น แต่เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟสูงขึ้นร่วมกับการเพิ่มความเร็วรอบจานหมุนส่งผลให้การลดความชื้นที่มีค่าไม่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองเพิ่มกำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบจานหมุนในการอบแห้ง ส่งผลให้การใช้กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 5 และ 10 รอบต่อนาที เป็นเงื่อนไขที่ใช้เวลาลดความชื้นเร็วที่สุด โดยใช้เวลา 150 วินาที ในขณะที่การใช้กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ที่จานหมุนหยุดนิ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้เวลานานที่สุด 450 วินาที เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขกำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบจานหมุน ที่ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุดและมากที่สุด ในการลดความชื้นให้เหลือต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก พบว่าการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 5 และ 10 รอบต่อนาที มีการลดลงของความชื้นเร็วกว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ที่จานหมุนหยุดนิ่ง ประมาณ 3 เท่า

4.1.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์

หลังการอบแห้งนำใบรางจืดที่มีค่าความชื้นร้อยละ 15 ฐานเปียก มาวิเคราะห์ ค่าสี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ผลที่ได้แสดงในตาราง 2



ตาราง 2 ผลของกำลังไมโครเวฟและความเร็วงานหมุนต่อค่าสีและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (rpm)	ค่าสี			ΔE	สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ		ความสามารถใน การต้านอนุมูล อิสระ (%)
		L*	a*	b*		ฟีนอลิก (mg/l)	ฟลาโวนอยด์ (mg/l)	
600	0	30.79 $\pm$ 0.26 ^g	- 0.96 $\pm$ 0.28 ^a	17.19 $\pm$ 0.18 ^g	2.56	157.0 $\pm$ 10.91 ^e	250.0 $\pm$ 11.31 ^f	23.8 $\pm$ 4.94 ^e
	5	32.19 $\pm$ 0.28 ^f	- 1.88 $\pm$ 0.41 ^b	18.36 $\pm$ 1.15 ^f	1.21	191.5 $\pm$ 11.28 ^e	292.0 $\pm$ 5.66 ^f	27.9 $\pm$ 2.13 ^e
	10	33.41 $\pm$ 0.27 ^e	- 2.37 $\pm$ 0.31 ^c	19.92 $\pm$ 2.35 ^{de}	1.52	222.8 $\pm$ 16.59 ^d	493.0 $\pm$ 4.24 ^c	32.0 $\pm$ 0.50 ^d
1200	0	34.70 $\pm$ 0.03 ^d	- 3.92 $\pm$ 0.82 ^d	19.34 $\pm$ 0.04 ^e	3.43	166.1 $\pm$ 34.25 ^e	319.0 $\pm$ 24.04 ^e	34.6 $\pm$ 1.57 ^c
	5	35.37 $\pm$ 0.05 ^c	- 4.55 $\pm$ 0.02 ^e	19.59 $\pm$ 0.21 ^{de}	4.36	245.2 $\pm$ 34.47 ^d	435.0 $\pm$ 43.84 ^d	35.8 $\pm$ 3.04 ^c
	10	36.46 $\pm$ 0.05 ^b	- 4.84 $\pm$ 0.04 ^{ef}	20.40 $\pm$ 0.20 ^{cd}	5.12	275.3 $\pm$ 24.75 ^c	637.5 $\pm$ 21.92 ^b	42.2 $\pm$ 0.15 ^b
1600	0	35.51 $\pm$ 0.48 ^c	- 4.85 $\pm$ 0.12 ^{fg}	20.86 $\pm$ 0.01 ^{bc}	5.01	320.7 $\pm$ 77.10 ^b	502.5 $\pm$ 40.38 ^c	43.6 $\pm$ 4.01 ^b
	5	36.42 $\pm$ 0.03 ^a	- 4.92 $\pm$ 0.02 ^{ef}	21.39 $\pm$ 0.47 ^{ab}	5.83	351.4 $\pm$ 33.23 ^a	854.0 $\pm$ 25.06 ^a	61.1 $\pm$ 3.03 ^a
	10	36.95 $\pm$ 0.04 ^a	- 5.22 $\pm$ 0.06 ^g	21.95 $\pm$ 0.03 ^a	6.29	354.7 $\pm$ 42.82 ^a	857.5 $\pm$ 0.71 ^a	63.4 $\pm$ 0.40 ^a

หมายเหตุ

ตัวเลข (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ตามด้วยตัวอักษรเดียวกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันทางด้านสถิติ โดย Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าสีเริ่มต้น ความสว่าง (L*) 32.60, สีเขียว (-a*) - 1.24, สีเหลือง (b*) 18.97

จากตาราง 2 แสดงให้เห็นค่าสีใบรางจืดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าสีเริ่มต้น เมื่อพิจารณากำลั้งไมโครเวฟที่มีผลต่อ ค่า L^* ความสว่าง a^* ความเป็นสีเขียว และ b^* ความเป็นสีเหลือง พบว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่ตัวอย่างได้รับความร้อนสั้นลง ส่งผลต่อค่าความแตกต่างของสีโดยรวมมีค่าสูงกว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟต่ำ เนื่องจากภายในพืชสีเขียวมีคลอโรฟิลล์ 2 ชนิด คือ ชนิด A (มีค่าเป็นสีเขียวเข้ม) และชนิด B (มีค่าเป็นสีเขียวอ่อน) ที่มีอัตราส่วน 3 ต่อ 1 เมื่อได้รับความร้อนทำให้คลอโรฟิลล์ชนิด A บางส่วนมีค่าลดลงเปลี่ยนสภาพเป็นฟิโอฟิตินส่งผลให้มีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น เมื่อคลอโรฟิลล์ชนิด A เริ่มหมดไปส่งผลให้สีเขียวอ่อนจากคลอโรฟิลล์ B เด่นชัดมากขึ้น และมีความสว่างเพิ่มขึ้นจากแสงที่สามารถผ่านได้ดีกว่าคลอโรฟิลล์ชนิด A แต่เมื่อสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานานคลอโรฟิลล์ทั้ง 2 ชนิด จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลทำให้ค่าความเป็นสีเขียวและค่าความสว่างลดลง ผลการทดลองเป็นไปในทางทิศเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Yihui et al. (2011) ออบแห้งเห็ดกระดาศ และ Chan et al. (2011) ออบแห้งใบรางจืดที่เพิ่มกำลั้งไมโครเวฟขึ้น ตัวอย่างมีค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น ที่การอบแห้งแบบใช้ลมร้อนเป็นเวลานาน ส่งผลให้ตัวอย่างมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ในส่วนความเร็วของจานหมุนเมื่อเปรียบเทียบการใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นในการอบแห้ง พบว่าตัวอย่างสามารถรับความร้อนและการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟอย่างทั่วถึงมากกว่าจานที่หยุดนิ่ง ส่งผลให้ความแตกต่างของสีโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาปริมาณคงเหลือของสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระภายในใบรางจืดมีปริมาณคงเหลือมากกว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟต่ำ เนื่องจากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ จะเกิดการเสื่อมสลายหากสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานาน เมื่อใช้กำลั้งไมโครเวฟเพิ่มขึ้นทำให้การลดลงของความชื้นใช้เวลาสั้นกว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟต่ำ ตัวอย่างจึงมีการสัมผัสกับลมร้อนเป็นเวลาล้นลง จากผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Chan et al. (2012) ที่ใช้กำลั้งไมโครเวฟเพิ่มสูงขึ้นมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพคงเหลือมากกว่ากำลั้งวัตต์ต่ำ เมื่อพิจารณาการเพิ่มความเร็วรอบจานหมุนทำให้ตัวอย่างสามารถเคลื่อนที่รับคลื่นไมโครเวฟได้ดี มีการการลดลงของความชื้นเร็วขึ้น การสัมผัสความร้อนของตัวอย่างมีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้สารออกฤทธิ์มีปริมาณคงเหลือมากกว่าจานหมุนหยุดนิ่ง

จากผลการทดลองเพิ่มกำลั้งไมโครเวฟและความเร็วรอบจานหมุน พบว่าการใช้เงื่อนไขกำลั้งไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ความเร็วจานหมุน 10 รอบต่อนาที ส่งผลให้สารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ คงเหลือมากที่สุด คือ 354 858 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด ร้อยละ 63 ในขณะที่การใช้กำลั้งไมโครเวฟ 600 วัตต์ ที่จานหมุนหยุดนิ่งมีปริมาณสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ น้อยที่สุด คือ 157 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุดเช่นกัน โดยมีค่าร้อยละ 24 เมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขที่ให้ค่ามากที่สุดและน้อยสุด พบว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 10 รอบต่อนาที มีปริมาณคงเหลือของสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าการใช้กำลั้งไมโครเวฟ 600 วัตต์ ที่จานหมุนหยุดนิ่ง อยู่ที่ร้อยละ 226 343 และ 266 ตามลำดับ



4.1.2 การวิเคราะห์พลังงาน

ในการวิเคราะห์พลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบแห้งใบรางจืดจนความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) – (11) เมื่อเปรียบเทียบพลังงานทั้งหมดที่ใช้อบแห้งใบรางจืด โดยมีการใช้พลังงานของอุปกรณ์ ได้แก่ ไมโครเวฟ, โบลเวอร์, ฮีตเตอร์ และอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้แสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์

กำลัง ไมโครเวฟ (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (rpm)	เวลาที่ ใช้ (s)	พลังงานที่ใช้ (kWh)				
			ไมโครเวฟ	โบลเวอร์	ฮีตเตอร์	อุปกรณ์ชั่ง น้ำหนัก	รวม
600	0	450	8.0×10^{-2}	8.0×10^{-2}	31.0×10^{-2}	NA	47.0×10^{-2}
	5	360	6.0×10^{-2}	6.0×10^{-2}	23.0×10^{-2}	0.2×10^{-2}	35.0×10^{-2}
	10	390	6.0×10^{-2}	7.0×10^{-2}	25.0×10^{-2}	0.5×10^{-2}	38.0×10^{-2}
1200	0	300	6.0×10^{-2}	7.0×10^{-2}	26.0×10^{-2}	NA	39.0×10^{-2}
	5	270	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}	19.0×10^{-2}	0.2×10^{-2}	28.0×10^{-2}
	10	270	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}	19.0×10^{-2}	0.4×10^{-2}	28.0×10^{-2}
1600	0	210	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}	15.0×10^{-2}	NA	22.0×10^{-2}
	5	150	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	10.0×10^{-2}	0.1×10^{-2}	16.0×10^{-2}
	10	150	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	10.0×10^{-2}	0.2×10^{-2}	16.0×10^{-2}

*หมายเหตุ

- NA คือ ปริมาณการใช้พลังงานเพียงเล็กน้อย

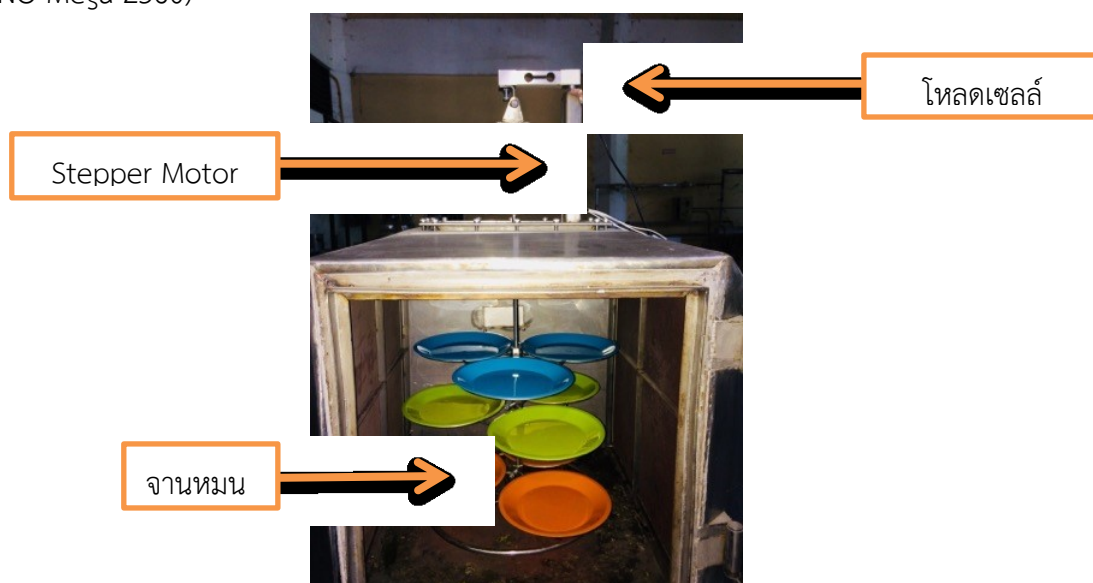
จากตาราง 3 แสดงการใช้พลังงานของอุปกรณ์ทั้งหมดเมื่ออบแห้งใบรางจืดจนกระทั่งความชื้นต่ำกว่าค่าที่กำหนด พบว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟต่ำส่งผลให้การลดความชื้นของใบรางจืดใช้พลังงานมากกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูง เนื่องมาจากการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟต่ำใช้เวลานานจึงส่งผลให้อุปกรณ์มีการใช้พลังงานมากขึ้น ในส่วนของการเพิ่มความเร็วรอบของจานหมุนส่งผลให้อุปกรณ์มีการใช้พลังงานน้อยกว่าที่จานหมุนหยุดนิ่ง เนื่องจากตัวอย่างมีการเคลื่อนที่รับความร้อนและคลื่นไมโครเวฟได้ดีทำให้การลดลงของความชื้นใช้เวลาสั้นลง ส่งผลให้อุปกรณ์ใช้พลังงานน้อยลงตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการใช้กำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบจานหมุนที่ใช้พลังงานมากที่สุดและน้อยที่สุด พบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 5 และ 10 รอบต่อนาที ใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ที่จานหมุนหยุดนิ่ง ประมาณ 3 เท่า



4.2 ผลการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักและระบบควบคุม

4.2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

จากการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในบทที่ 3 ได้ดำเนินการสร้างและติดตั้งอยู่สูงขึ้นไปจากผนังด้านบนของตู้อบ 15 เซนติเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนและกำลังวัตต์ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ โดยเลือกใช้โหลดเซลล์ขนาด 10 กิโลกรัม ผ่านการเชื่อมต่อกับวงจรขยายสัญญาณ (HX711 Weight Sensor Amplifier) ที่ได้รับจากโหลดเซลล์และส่งค่าไปยังแผงควบคุม (ARDUINO Mega 2560)



ภาพประกอบ 44 ลักษณะอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นโดยรวม

4.2.1.1 การปรับความเร็วรอบและจานหมุน

ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ปรับความเร็วรอบและจานหมุน โดยเลือกใช้ Stepper Motor DC ขนาด 12 โวลต์ มาใช้ในการปรับความเร็วรอบ ผ่านชุดขับ TB6600 4A ขนาด 12 โวลต์ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับค่าได้จากแผงควบคุม (ARDUINO Mega 2560) ในส่วนของจานหมุนถูกแขวนติดอยู่กับมอเตอร์มีลักษณะเป็นชั้นทั้งหมด 3 ชั้น ลอยจากพื้น ซึ่งในแต่ละชั้นสามารถวางจานใส่ผลิตภัณฑ์ จำนวน 3 ใบ โดยลักษณะของจานต้องมีคุณสมบัติทนทานต่อคลื่นไมโครเวฟและมีน้ำหนักเบา ในภาพประกอบ 44

4.2.1.2 จอแสดงผล

ในด้านการแสดงผลแบบเวลาจริง เลือกใช้จอขนาด 20 x 4 มาใช้ในการแสดงผล (20X4 Character LCD Module Display I2C) น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโหลดเซลล์ ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ดังภาพประกอบ 45 จากการนำสมการที่ใช้หาค่าความชื้นมาเขียนลงในโปรแกรมควบคุม เมื่อมีค่าสัญญาณจากโหลดเซลล์ส่งเข้าระบบจะทำการคำนวณค่าน้ำหนักและค่าความชื้นออกมาพร้อมกันทุก 5 วินาที (การปรับเวลาในการแสดงผลสามารถตั้งค่าในโปรแกรมควบคุม) ในส่วนของความเร็วรอบและความเร็วลมยังเป็นการแสดงผลแบบปรับตั้งค่าตามที่กำหนด

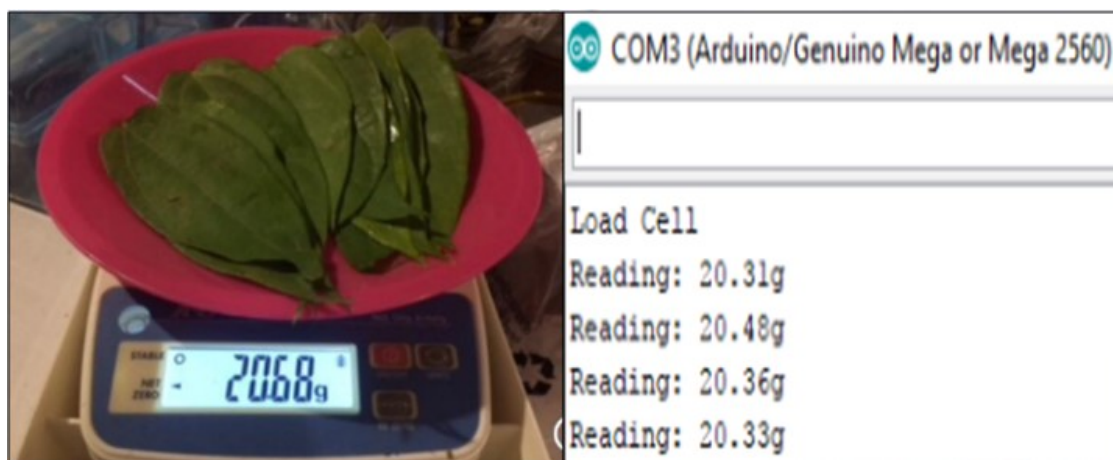




ภาพประกอบ 45 จอแสดงผลและกล่องควบคุม

4.2.2 ผลการทดลองใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น

ในส่วนการเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าน้ำหนักที่ได้จากอุปกรณ์กับตราชั่งมาตรฐานที่ผ่านการสอบเทียบค่าน้ำหนักแบบมาตรฐาน พบว่าค่าน้ำหนักตัวอย่างที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นมีความแม่นยำมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับน้ำหนักที่ได้จากตราชั่งมาตรฐาน ในภาพประกอบ 46

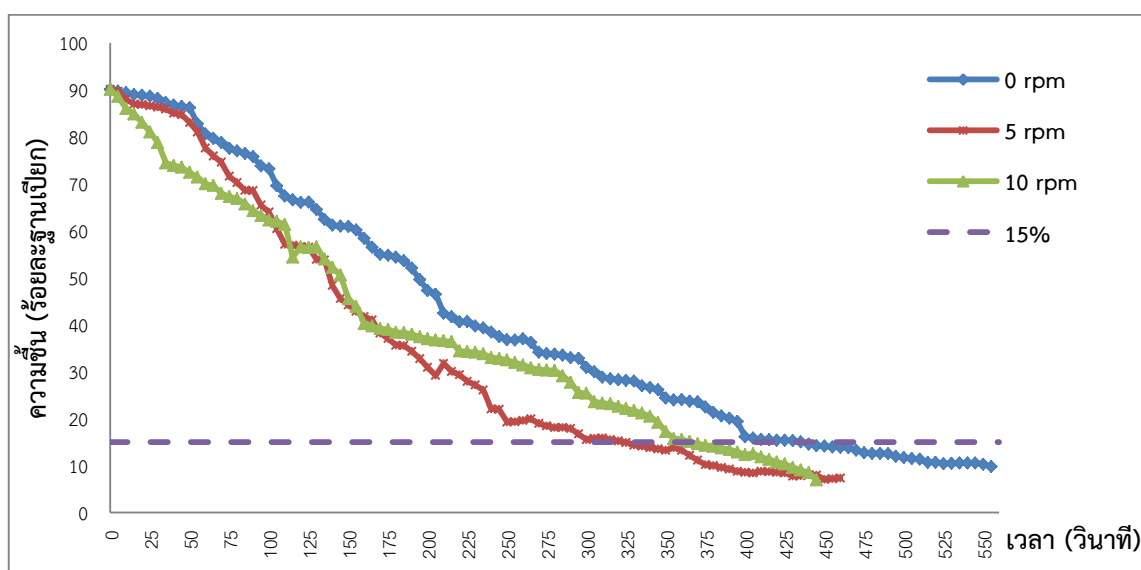


ภาพประกอบ 46 การเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าน้ำหนัก

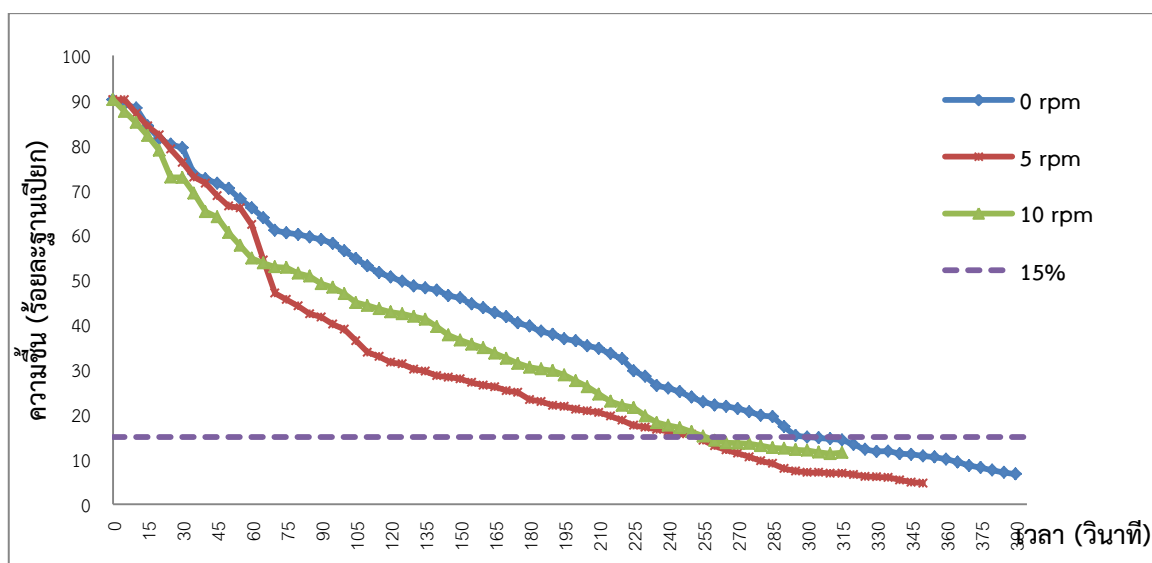
4.3 ผลของการศึกษาความเร็วรอบและกำลังไมโครเวฟโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนักแบบเวลาจริง

จากการศึกษาการลดลงของความชื้นในใบรางจืดเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1 รวมถึงการนำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงเข้ามาช่วยในการแสดงความชื้น โดยจะบันทึกค่าน้ำหนักทุก 5 วินาที ค่าที่ได้ดัง แสดงในภาพประกอบ 47 – 49



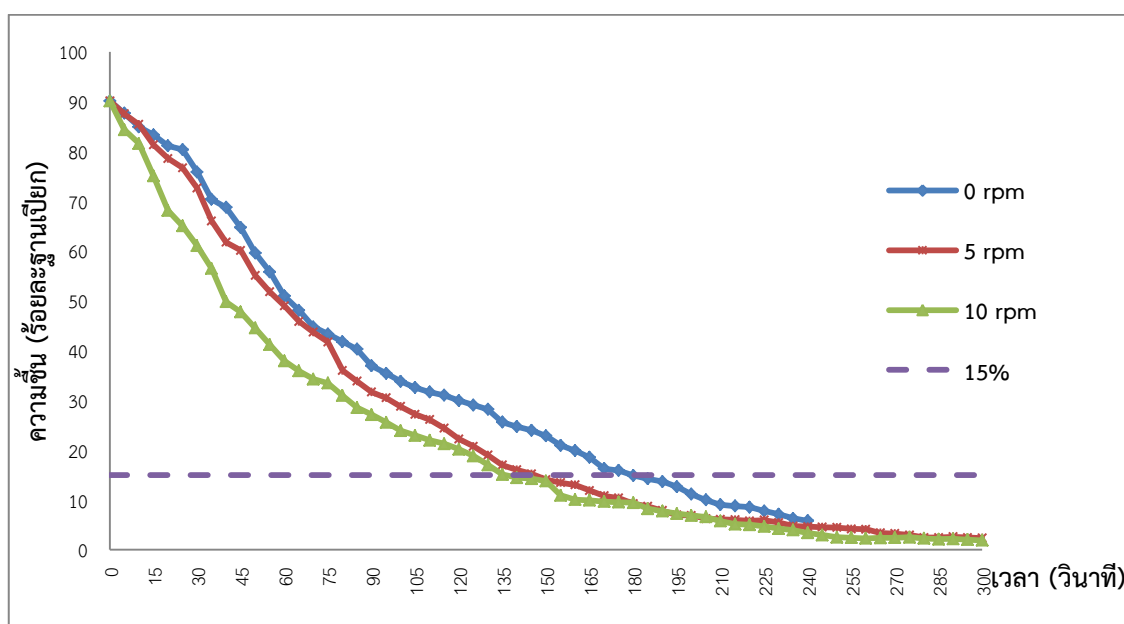


ภาพประกอบ 47 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริง ที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์



ภาพประกอบ 48 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริง ที่กำลังไมโครเวฟ 1200 วัตต์





ภาพประกอบ 49 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริง ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์

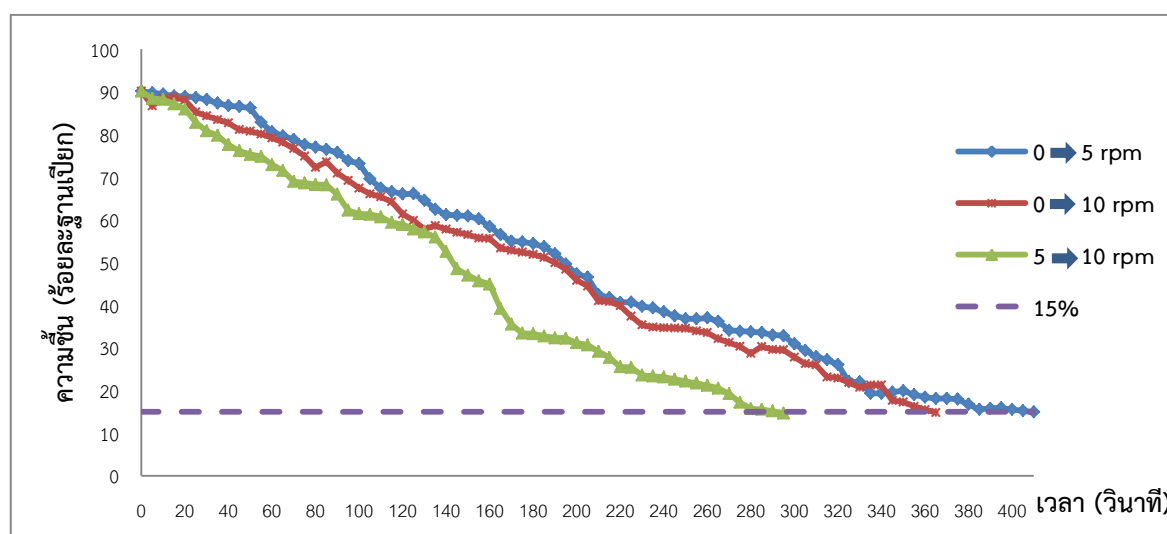
จากภาพประกอบ 47 - 49 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบรางจืดในระหว่างอบแห้งพบว่า การลดลงของความชื้นมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 เมื่อพิจารณาการแสดงความชื้นขณะอบแห้งโดยตั้งค่าแสดงผลทุก 5 วินาที พบว่าการแสดงความชื้นแบบละเอียดทำให้ทราบค่าความชื้นที่ต้องการและสามารถหยุดการอบแห้งได้ในทันที อย่างไรก็ตามการลดลงของความชื้นไม่แสดงจุดวิกฤตของการเปลี่ยนแปลงความชื้นชัดเจน เนื่องมาจากการอบแห้งที่ใช้คลื่นไมโครเวฟมีการลดลงของความชื้นเป็นแบบอัตราคงที่ ต่างจากการอบแห้งแบบลมร้อนที่แสดงจุดวิกฤตอย่างชัดเจน โดยสามารถพบได้จากการแบ่งช่วงลดความชื้น 3 ลักษณะ คือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้นเป็นช่วงเริ่มต้นที่เกิดการถ่ายเทความร้อนกับผลิตภัณฑ์ ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิลมร้อน จนถึงช่วงที่สองอัตราค่าแห้งคงที่ (constant rate) เป็นช่วงที่น้ำภายในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่มาที่ผิวนอกและระเหยน้ำออกอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความชื้นเฉลี่ยจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง เมื่อถึงจุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ส่งผลให้อัตราเร็วในการอบแห้งลดลง เรียกว่า จุดวิกฤตความชื้น (critical moisture content) จนถึงช่วงที่สามอัตราการอบแห้งลดลง เป็นช่วงที่ความชื้นในผลิตภัณฑ์เหลือน้อยจนเคลื่อนไปยังผิวนอกอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวสูงขึ้น อัตราการอบแห้งจะลดลงจนถึงค่าความชื้นสมดุลและไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก เรียกว่า อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นและผลการทดลองไม่แสดงจุดวิกฤตชัดเจน ผู้วิจัยจึงทำการกำหนดจุดเปลี่ยนความเร็วรอบของจานหมุน เมื่อความชื้นของใบรางจืดลดลงเหลือร้อยละ 30 ฐานเปียก



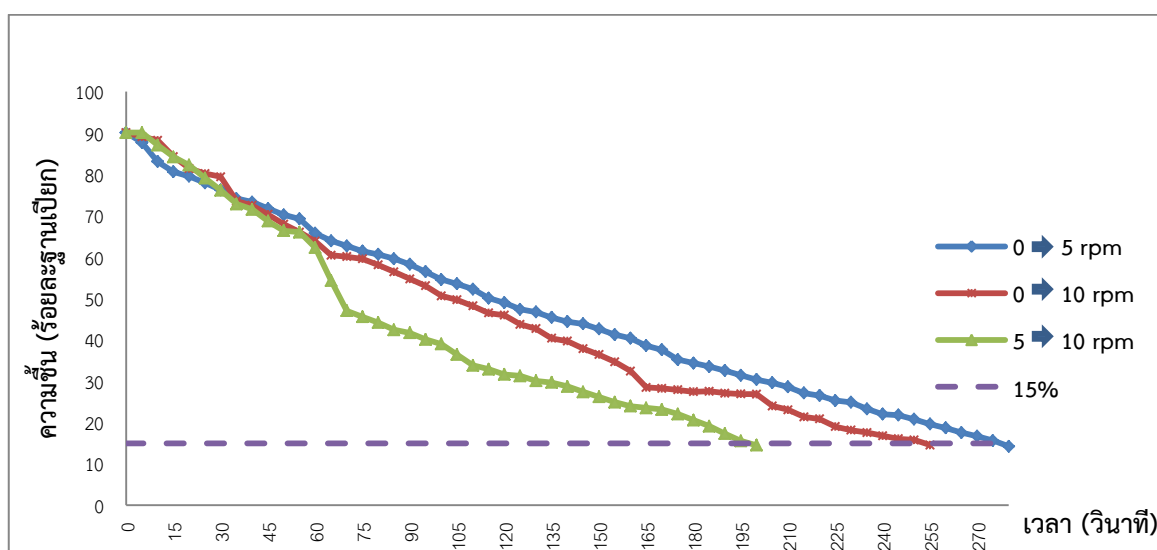
4.4 ผลการทดลองอบผลิตภัณฑ์โดยใช้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดเป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วจานหมุนแบบอัตโนมัติ

จากการศึกษาการลดลงของความชื้นในใบรางจีตร่วมกับอุปกรณ์ตรวจความชื้นแบบเวลาจริง แนวโน้มการลดความชื้นที่ความเร็วรอบจานหมุนอัตโนมัติ 3 เงื่อนไข ได้แก่ จาก 0 เปลี่ยนเป็น 5, จาก 0 เปลี่ยนเป็น 10 และจาก 5 เปลี่ยนเป็น 10 รอบต่อนาที โดยกำหนดการเปลี่ยนความเร็วรอบของจานหมุนที่ความชื้นของใบรางจีตอยู่ที่ประมาณร้อยละ 30 ฐานเปียก มาใช้เป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วรอบไปจนกระทั่งความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ฐานเปียก ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 50 – 52

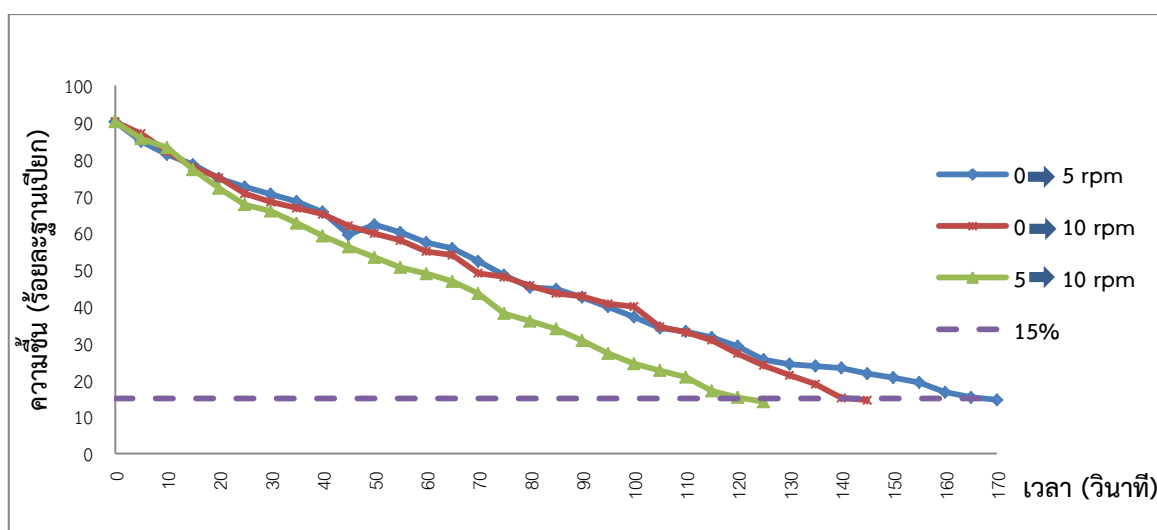


ภาพประกอบ 50 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจีต เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงร่วมกับการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติที่กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์





ภาพประกอบ 51 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงร่วมกับการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติที่กำลังไมโครเวฟ 1200 วัตต์



ภาพประกอบ 52 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบรางจืด เมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงร่วมกับการปรับความเร็วรอบจานหมุนแบบอัตโนมัติที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์

จากภาพประกอบ 50 – 52 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบรางจืดเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟ พบว่าลักษณะการลดลงเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเงื่อนไขกำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบที่ใช้เวลาในการลดความชื้นน้อยที่สุดและมากที่สุด พบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 5 -> 10 รอบต่อนาที ใช้เวลาลดความชื้นเร็วที่สุดที่ 125



วินาที เร็วกว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 0 -> 5 รอบต่อนาที ที่ใช้เวลาในการลดความชื้นมากที่สุด 410 วินาที อยู่ที่ร้อยละ 70

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่ใช้เวลาสั้นที่สุดระหว่างการใช้ความเร็วจานหมุน แบบที่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบขณะอบแห้งและแบบไม่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบ (ในหัวข้อ 4.1) ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ เช่นเดียวกัน พบว่าการใช้ความเร็วรอบจานหมุนแบบที่มีการเปลี่ยนความเร็ว 5 -> 10 รอบต่อนาที มีการลดลงของความชื้นเร็วกว่าการใช้ความเร็วจานหมุนแบบไม่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบที่ 10 รอบต่อนาที อยู่ที่ร้อยละ 17

4.4.1 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์

ในการวิเคราะห์คุณภาพของใบรางจืดเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.1 เมื่อผ่านการอบแห้งที่จานหมุนมีการปรับความเร็วโดยอัตโนมัติ

จากตาราง 4 แสดงให้เห็นค่าสีของใบรางจืดมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้น โดยมีแนวโน้มค่าสีโดยรวมสูงขึ้น ผลการทดลองเพิ่มกำลังวัตต์ที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 ในส่วนของการเพิ่มความเร็วจานหมุนอัตโนมัติที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ พบว่าที่ความเร็วจานหมุน 5 -> 10 รอบต่อนาที มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด โดยมีปริมาณคงเหลือของสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ 467 712 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระร้อยละ 66 ในขณะที่การใช้กำลังไมโครเวฟที่ 600 วัตต์ ที่ความเร็วจานหมุน 0 -> 5 รอบต่อนาที มีปริมาณคงเหลือของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระร้อยละ 19 เมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขที่ส่งผลให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด พบว่าเงื่อนไขกำลังไมโครเวฟที่ 1600 วัตต์ ที่ใช้ความเร็วจานหมุน 5 -> 10 รอบต่อนาที มีสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ มากกว่าร้อยละ 135 154 ตามลำดับ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าร้อยละ 145

เมื่อเปรียบเทียบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ระหว่างการอบแห้งแบบไม่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบจานหมุนขณะอบแห้ง (จากหัวข้อ 4.1) และแบบมีการเปลี่ยนความเร็วรอบขณะอบแห้ง พบว่าการอบแห้งที่ใช้ความเร็วจานหมุนที่มีการเปลี่ยนความเร็ว 5 -> 10 รอบต่อนาที มีปริมาณสารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ มากกว่าการอบแห้งที่ใช้ความเร็วรอบคงที่ 10 รอบต่อนาที อยู่ที่ร้อยละ 32 20 และ 3 ตามลำดับ



ตาราง 4 ผลของกำลังไมโครเวฟและความเร็วงานหมุนต่อค่าสีและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	ความเร็วรอบ (rpm)	ค่าสี				สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ		ความสามารถในการ ต้านอนุมูลอิสระ (%)
		L*	a*	b*	ΔE	ฟีนอลิก (mg/l)	ฟลาโวนอยด์ (mg/l)	
600	0 → 5	30.73 ± 0.31 ^f	- 1.64 ± 0.20 ^a	17.22 ± 0.26 ^f	2.60	199.2 ± 12.18 ^e	279.5 ± 0.71 ^e	18.9 ± 2.58 ^g
	0 → 10	30.56 ± 0.14 ^g	- 1.79 ± 0.02 ^a	17.30 ± 0.03 ^f	2.70	192.5 ± 11.40 ^e	251.5 ± 0.71 ^e	24.0 ± 4.49 ^g
	5 → 10	32.36 ± 0.10 ^e	- 2.17 ± 0.07 ^b	21.47 ± 0.13 ^b	2.67	319.1 ± 14.32 ^b	289.0 ± 2.82 ^e	34.6 ± 3.42 ^e
1200	0 → 5	34.74 ± 0.09 ^d	- 4.23 ± 0.44 ^c	19.40 ± 0.03 ^e	3.71	186.7 ± 3.15 ^e	357.0 ± 36.77 ^d	27.8 ± 1.85 ^f
	0 → 10	34.70 ± 0.23 ^d	- 4.92 ± 0.03 ^e	19.34 ± 0.04 ^e	4.25	244.1 ± 27.98 ^d	373.0 ± 35.36 ^d	30.9 ± 1.53 ^f
	5 → 10	35.38 ± 0.62 ^c	- 4.54 ± 0.09 ^d	19.59 ± 0.21 ^d	4.36	251.9 ± 15.08 ^c	436.5 ± 27.57 ^c	50.2 ± 3.08 ^{ab}
1600	0 → 5	35.25 ± 0.36 ^c	- 4.95 ± 0.02 ^e	21.72 ± 0.04 ^a	5.32	212.2 ± 7.86 ^e	559.5 ± 19.10 ^b	42.1 ± 2.84 ^{cd}
	0 → 10	36.12 ± 0.02 ^b	- 5.08 ± 0.09 ^{ef}	21.09 ± 0.49 ^c	5.62	272.6 ± 6.16 ^c	507.5 ± 41.71 ^b	43.7 ± 4.29 ^c
	5 → 10	36.46 ± 0.04 ^a	- 5.19 ± 0.03 ^f	21.88 ± 0.03 ^a	6.26	467.2 ± 0.06 ^a	711.7 ± 21.36 ^a	65.5 ± 8.81 ^a

หมายเหตุ

ตัวเลข (ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ตามด้วยตัวอักษรเดียวกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันทางด้านสถิติ โดย Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าสีเริ่มต้น ความสว่าง (L*) 32.60, สีเขียว (-a*) - 1.24, สีเหลือง (b*) 18.97

4.4.2 การวิเคราะห์พลังงาน

วิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งใบรางจืดจนสิ้นสุดกระบวนการ โดยพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์สามารถจำแนกเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.1 ค่าที่ได้แสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์

กำลังไมโครเวฟ (วัตต์)	จานหมุน (rpm)	เวลาที่ใช้ (s)	พลังงานที่ใช้ (kWh)				
			ไมโครเวฟ	โบลเวอร์	ฮีตเตอร์	อุปกรณ์ซึ่ง น้ำหนัก	รวม
600	0 → 5	410	7.0×10^{-2}	7.5×10^{-2}	28.3×10^{-2}	0.1×10^{-2}	43.0×10^{-2}
	0 → 10	365	6.2×10^{-2}	6.7×10^{-2}	25.2×10^{-2}	0.1×10^{-2}	38.3×10^{-2}
	5 → 10	295	5.0×10^{-2}	5.4×10^{-2}	20.4×10^{-2}	0.2×10^{-2}	31.0×10^{-2}
	0 → 5	280	4.8×10^{-2}	5.1×10^{-2}	19.3×10^{-2}	0.1×10^{-2}	29.4×10^{-2}
1200	0 → 10	255	4.4×10^{-2}	4.7×10^{-2}	17.6×10^{-2}	0.1×10^{-2}	26.7×10^{-2}
	5 → 10	200	3.4×10^{-2}	3.7×10^{-2}	13.8×10^{-2}	0.1×10^{-2}	21.0×10^{-2}
	0 → 5	170	2.9×10^{-2}	3.1×10^{-2}	11.7×10^{-2}	0.1×10^{-2}	17.8×10^{-2}
1600	0 → 10	145	2.5×10^{-2}	2.7×10^{-2}	10.0×10^{-2}	0.1×10^{-2}	15.2×10^{-2}
	5 → 10	125	2.1×10^{-2}	2.3×10^{-2}	8.6×10^{-2}	0.1×10^{-2}	13.1×10^{-2}

จากตาราง 5 แสดงให้เห็นการใช้พลังงานของทุกอุปกรณ์ต่อชั่วโมง เมื่อการอบแห้งใบรางจืดไปจนจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ พบว่าที่ กำลังวัตต์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อเวลาในการอบแห้งเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 เมื่อพิจารณาความเร็วจานหมุนที่ 5 → 10 รอบต่อนาที ที่อบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด 0.13 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ในขณะที่ความเร็วจานหมุน 0 → 5 รอบต่อนาที ใช้พลังงานมากที่สุด 0.43 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง เมื่อเทียบการใช้พลังงานระหว่างการอบแห้งที่ใช้ความเร็ว 0 → 5 และ 5 → 10 รอบต่อนาที พบว่าการใช้ความเร็ว 5 → 10 สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ร้อยละ 36

เมื่อนำผลการใช้พลังงานน้อยที่สุดในหัวข้อ 4.1 ที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ไม่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบมาเทียบกับการอบแห้งแบบมีการเปลี่ยนความเร็วรอบขณะอบแห้งที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด พบว่าการใช้ความเร็วจานหมุนแบบมีการเปลี่ยนความเร็วรอบขณะอบแห้ง 5 → 10 รอบต่อนาที สามารถลดการใช้พลังงานลงได้มากกว่าการใช้ความเร็วจานหมุนแบบคงที่ 10 รอบต่อนาที อยู่ที่ร้อยละ 23



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟที่ 600 1200 และ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วรอบจานหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที ร่วมกับอุณหภูมิความร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งใบรางจืดจนกระทั่งความชื้นเหลือร้อยละ 15 ฐานเปียก ในการทดลองนำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นและระบบควบคุมความเร็วของจานหมุนอัตโนมัติมาใช้ในการอบแห้ง โดยใช้เงื่อนไขการเปลี่ยนความเร็วของจานหมุนอัตโนมัติ 3 รูปแบบ ได้แก่ จาก 0 เปลี่ยนเป็น 5 0 เปลี่ยนเป็น 10 และ 5 เปลี่ยนเป็น 10 รอบต่อนาที เมื่อความชื้นใบรางจืดลดเหลือร้อยละ 30 ฐานเปียก สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการศึกษาการอบแห้งใบรางจืดต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพ และพลังงานที่ใช้

การลดลงของความชื้นเป็นแบบอัตราคงที่ การใช้กำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นสามารถลดความชื้นได้เร็วขึ้น ที่ความเร็วรอบจานหมุน 5 และ 10 รอบต่อนาที ส่งผลให้การลดความชื้นไม่แตกต่างกันที่ กำลังไมโครเวฟ 1200 และ 1600 วัตต์ โดยที่ กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 5 และ 10 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการลดความชื้นเร็วที่สุด คือ 150 วินาที เมื่อกำลังไมโครเวฟและความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ ค่าสีโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น สารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์มีค่าสูงขึ้น ที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ความเร็วจานหมุน 10 รอบต่อนาที มีปริมาณสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์มากที่สุด 355 และ 858 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระร้อยละ 63 โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด 16 กิโลวัตต์ชั่วโมง

5.2 ผลการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความชื้นเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขปรับความเร็วของจานหมุนแบบอัตโนมัติ

อุปกรณ์สามารถแสดงค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ขณะที่อบแห้งและความเร็วรอบของจานหมุนสามารถหมุนได้ตามความเร็วที่กำหนด ในส่วนจอแสดงผลสามารถแสดงได้ 4 ค่า ได้แก่ ความชื้น น้ำหนัก ความเร็วของจาน และความเร็วลม โดยสามารถกำหนดการแสดงผลบนหน้าจอได้ต่ำสุด 1 วินาที

5.3 ผลการอบแห้งโดยใช้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เป็นเงื่อนไขในการปรับความเร็วจานหมุนแบบอัตโนมัติ

การเปลี่ยนความเร็วรอบจานหมุนจาก 5 เป็น 10 รอบต่อนาที ส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นที่สุดในทุกระดับกำลังไมโครเวฟ โดยการใช้กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ใช้เวลาในการลดความชื้นสั้นที่สุด 125 วินาที เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟส่งผลให้ค่าสีโดยรวม ปริมาณฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้น ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 วัตต์ ความเร็วจานหมุน



เปลี่ยนจาก 5 เป็น 10 รอบต่อนาที มีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์มีค่ามากที่สุด 467 และ 712 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีมากที่สุดร้อยละ 66 โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด 13 กิโลวัตต์ชั่วโมง

จากการทดลองเมื่อพิจารณาด้านพลังงานและคุณภาพของใบรางจืด เงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้ง คือ จานหมุนที่ควบคุมความเร็วรอบแบบอัตโนมัติจาก 5 เปลี่ยนเป็น 10 รอบต่อนาที ที่กำลังไมโครเวฟที่ 1600 วัตต์

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 5.4.1 ควรเพิ่มปุ่มตั้งค่าให้เครื่องตรวจชั่งน้ำหนักเป็น 0 ก่อนนำผลิตภัณฑ์เข้าอบแห้ง
- 5.4.2 ทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ เช่น เนื้อสัตว์ ผลไม้ เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง



เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน. (2557). *บทที่ 4*. [ออนไลน์].
ได้จาก: <http://ienergyguru.com/2015/09/drying> [สืบค้นเมื่อ กันยายน 2559].
- คำนึ่ง วาทยธา. (2548). *Microwave and hot-air drying of cassava chips*. โครงการพัฒนา
บัณฑิตศึกษาและวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. ม.ป.ท.: ม.ป.พ.
- ธนภัทร นวลทูล, เกสร วงศ์เกษม, ละมุล วิเศษ และณัฐพล ภูมิสะอาด. (2559). ความเร็วของจานหมุน
และอุณหภูมิในการอบแห้งต่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน. *วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ฉบับพิเศษ ประจำปี 2559, 162-167.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. (2553). *ความชื้น*. [ออนไลน์]. ได้จาก:
<http://www.foodnetworksolution.com/moisture-content-ความชื้น> [สืบค้นเมื่อ
ตุลาคม 2559].
- ภาคภูมิ พระประเสริฐ. (ม.ป.ป.). *สรุวิทยาของพืช*. [ออนไลน์]. ได้จาก:
<http://www.siamchemi.com/คลอโรฟิลล์> [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. (2554). *ทฤษฎีบทเกี่ยวกับไมโครเวฟ*. [ออนไลน์].
ได้จาก: [http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/5/microwave
/index.htm](http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/5/microwave/index.htm) [สืบค้นเมื่อ กันยายน 2559].
- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (ม.ป.ป.). *Portals*. [ออนไลน์]. ได้จาก:
cms2.swu.ac.th/Portals/155/ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- โรบอทสยาม. (ม.ป.ป.). *Motor-driver-connect-arduino*. [ออนไลน์]. ได้จาก:
[https://robotsiam.blogspot.com/2016/08/l298n-motor-driver-connect-arduino-
r3.html](https://robotsiam.blogspot.com/2016/08/l298n-motor-driver-connect-arduino-r3.html) [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- เล็กกาทูล. การวัดกระแส [ออนไลน์]. ได้จาก: <https://legatool.com/wp/99/>
[สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- อินเว็นเตอร์. (2559). *สตีปเปอร์มอเตอร์*. [ออนไลน์]. ได้จาก: [https://www.inventor.in.th/home/
สตีปเปอร์มอเตอร์](https://www.inventor.in.th/home/สตีปเปอร์มอเตอร์) [สืบค้นเมื่อ กันยายน 2559].
- อุตสาหกรรม-ระยอง. (2554). *เครื่องมือวัดและควบคุมโหลดเซลล์*. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://ins-
rayong.blogspot.com/2014/06/load-cell.html](http://ins-rayong.blogspot.com/2014/06/load-cell.html) [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- ไอเก็ท. (ม.ป.ป.). *Grove---Differential-Amplifier*. [ออนไลน์]. ได้จาก:
[http://circuitshops.igetweb.com/articles/42157703/Grove---Differential-
Amplifier](http://circuitshops.igetweb.com/articles/42157703/Grove---Differential-Amplifier) [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- Bandara, L. (2554). *เครื่องมือวัดและควบคุม INSTRUMENT AND CONTROL*. [ออนไลน์]. ได้จาก:
<http://ins-rayong.blogspot.com/2014/06/load-cell.html> [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].



- Chan, E.W.C., LYE, P.Y., Tan, L.N., ENG, S.Y., Tan, Y.P. and Wong, Z.C. (2012). Effects of drying method and particle size on the antioxidant properties of leaves and teas of *Morus alba*, *Lagerstroemia speciosa* and *Thunbergia laurifolia*. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 18(3), 465–472.
- Chan, E.W.C., Ying, S., Tan, Y.P. and Wong, Z.C. (2011). Phytochemistry and pharmacological properties of *thunbergia laurifolia*. *Pharmacognosy Journal*, 3(24), 1 - 6.
- Clara, T., Marta, C. and Pedro, J. (2016) Study of the effect of microwave power coupled with hot air drying on orange peel by dielectric spectroscopy. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 622-628.
- Compomax. (2012). ปัญหาจากการใช้โหลดเซลล์. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.compomax.co.th/application/ปัญหาจากการใช้โหลดเซลล์> [สืบค้นเมื่อ กันยายน 2559].
- Dijkkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. (1997). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering*, 81, 459–468.
- Duan, Z., Jiangb, L., Wanga, J., Yub, X. and Wangb, T. (2011). Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 472–476.
- Hamathulin, A., Simla, S., Boontang, S. and Inchuen, S. (2012). Relationship between color value and anthocyanin content in purple waxy corn germplasm. *KHON KAEN AGR. J.*, 40(4), 59-64.
- Hii, C.L., Law, C.L. and Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90, 191-198.
- Huang, J., Zhang, M., Adhikari, B. and Yang, Z. (2016). Effect of microwave air spouted drying arranged in two and three stages on the drying uniformity and quality of dehydrated carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 177, 80-89.
- Huang, Y.D., Cheng, Y. and Liang, K. (2009). Effects of microwave and hot air drying on characteristics and quality of orange skin. *Food Science*, 30(21), 16-20.
- Jiao, A., Xu, X. and Jin, Z. (2014). Modelling of dehydration rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying. *Food and bioproducts processing*, 9(2), 259–265.
- Kassem, A.S., Shokr, A.Z., El-Mahdy, A.R., Aboukarima, A.M. and Hamed E.Y. (2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society. Agricultural Sciences*, 10, 33–40.



- Mahasarakul, K., Sakkayawong, N. and Na Nakorn, P. (2013). Shelf-life of Herbal Beverage from *Thunbergialaurifolia* Lindl. *Thai Journal of Science and Technology*, 2(2): 140-152.
- Matthes, R. (1992). Radiation emission from microwave ovens. *Journal of Radiological Protection*, 12(3), 167-173.
- Mohammed, K., Gamal, E., Da-Wen, S. and Paul, A. (2012). Prediction of some quality attributes of lamb meat using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis. *Analytica Chimica Acta*, 714, 57– 67.
- Pace, M., Bonis, D., Marra, M.V. and Ruocco, G. (2011). Characterization of a combination oven prototype effects of microwave exposure and enhanced convection to local temperature rise in moist substrate. *Int Commun Heat Mass Transf*, 38, 557–564.
- puechkaset. (2558). *ร่างจัดสรรพคุณลดและกำจัดสารพิษ*. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.puechkaset.com/ร่างจัด> [สืบค้นเมื่อ ตุลาคม 2559].
- Ricardo, L., Monteiro. Bruno, A.M., Jo~ao, B.C. and Laurindo. (2016). A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. *Journal of Food Engineering*, 178, 1-11.
- Song, C., Wang, Y., Wang, S., Cui, Z., Xu, Y. and Zhu, H. (2016) Non-uniformity investigation in a combined thermal and microwave drying of silica gel. *Applied Thermal Engineering*, 98, 872–879.
- Stdb. (n.d.). *equipment_detail*. [Online]. available from: http://stdb.most.go.th/equipment_detail.aspx?id=747 [accesses 2017].
- Surbkar, R. (2013). Dehydration technology. *The Journal of KMUTNB*. 23(2), 15-22.
- Thaieasyelec. (2012). *วิธีการใช้งาน LOAD CELL*. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/how-to-use-load-cell-and-hx711-amplifier-module.html> [สืบค้นเมื่อ กันยายน 2559].
- Thaieasyelec. (2013). *บทความ ARDUINO*. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/ARDUINO.HTML>. [สืบค้นเมื่อ กันยายน 2559].
- Tirawanichakul, S., Lamaepae, S. and Tirawanichakul, Y., (2012). Combined infrared microwave and hot air drying for jackfruit kinetics. *Quality and Sensory Analysis. Burapha Sci. J.* 17(1), 117-129.



- Tirawanichakul, S., Saenaratana, N., Boonyakiat, P. and Tirawanichakul, Y. (2011). Microwave and hot air drying of cashew nut: drying kinetics and quality aspects. 2011 IEEE Colloquium on Humanities. *Science and Engineering Research (CHUSER 2011)*, 11, 825-830.
- Varith, J. Dijkanarukkul, P. Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering*, 81, 459-468.
- Walde, S.G., Balaswamy, K., Velu, V. and Roa, D.G. (2002). Microwave drying and ginding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). *J. of Food Eng.*, 55, 271-276.
- Wang, Q. Zeng, Y, G. Jing, R, B., Juan L. and Hong, P, L., (2012). Comparative study of the characteristics of oil shale with hot air drying and microwave drying. *Energy Procedia*, 17, 884 – 891.
- Yihui, C. Hui, L. Hetong, L. Shaoqing, W. Fang, Y. and Yifen, L. (2011). Studies on combined hot-air and microwave vacuum drying of Lithi Pulp. *Energy Procedia*, 1(11). 793-796.
- YiW, C. and Wang, J. (2008). Comparative study between hot air drying and microwave drying the strawberry powder. *Journal of Anhui University of Technology and Science*, 23(4),16-19
- Yoo, K.M., Lee, C.H., Lee, H., Moon, B. and Lee, C.Y. (2008). Relative antioxidant and cytoprotective activities of common herbs. *Food Chem*, 106, 929-936.
- Yuan, P. and Da-Wen S. (2015). Vis-NIR hyperspectral imaging in visualizing moisture distribution of mango slices during microwave-vacuum drying. *Journal Chemistry*, 88, 271-278.
- Zhu L, Y., Peng H.J., Zhang M.S., Fan X.X., Zhang, L.Y., Huang, M.H. and Guo, S. (2006). Studies on microwave drying of sphalerite. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 31(2), 29-33.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ข้อมูลความขึ้นของใบراجิตระหว่างอบแห้ง



ตาราง 6 ผลการลดลงของร้อยละความชื้นทุก 30 วินาที ที่กำลังไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบจานหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
0	90.12	90.12	90.12	90.12	90.12	90.12	90.12	90.12	90.12
30	88.16	86.33	78.80	79.43	76.17	70.29	79.97	78.12	74.38
60	80.62	77.60	69.98	66.02	62.26	55.18	71.34	65.59	65.03
90	75.78	68.57	64.25	58.95	41.70	45.14	60.30	53.74	55.79
120	66.04	56.65	56.56	50.61	31.62	39.87	54.02	43.56	47.99
150	60.90	44.23	45.53	45.94	27.95	32.79	44.75	37.12	40.69
180	54.39	35.66	38.38	39.67	23.30	27.08	39.31	31.57	30.80
210	42.45	31.77	36.57	34.70	20.46	21.67	33.47	23.75	25.25
240	38.43	22.09	32.99	25.86	16.17	15.37	26.27	19.32	18.86
270	34.12	19.00	30.44	21.29	11.36	10.40	22.19	9.44	7.36
300	30.94	15.56	25.40	14.97	7.07		15.28	6.44	
330	28.01	14.41	21.72	11.76	6.09		9.30		
360	24.09	13.31	15.55	10.05			5.32		
390	20.08	9.27	13.44						
420	15.43	8.57	10.80						
450	14.15								
480	12.64								
510	11.41								
540	10.58								
570	8.92								
600	7.74								



ตาราง 7 ผลการลดลงของร้อยละความชื้นใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงที่กำลัง
ไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบจานหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อวินาที
อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อวินาที

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
5	89.78	89.67	88.60	89.12	90.12	87.19	87.65	87.51	84.35
10	89.43	87.98	86.00	88.26	87.07	84.46	84.93	85.40	81.59
15	88.99	86.98	84.88	84.30	84.23	81.23	83.33	81.32	75.10
20	88.85	86.88	83.11	81.44	82.26	77.62	81.10	78.56	68.12
25	88.65	86.63	81.06	80.18	79.11	70.93	80.37	76.69	65.02
30	88.16	86.33	78.80	79.43	76.17	70.88	75.86	72.61	61.05
35	87.33	85.93	74.44	73.55	72.86	66.98	70.37	66.02	56.50
40	86.74	85.03	73.90	72.50	71.52	62.43	68.77	61.74	49.81
45	86.50	84.73	73.51	71.50	68.72	61.12	64.70	60.12	47.73
50	86.20	83.09	72.43	70.34	66.40	57.26	59.60	55.10	44.53
55	82.83	81.04	71.45	67.98	66.04	54.08	55.82	51.80	41.19
60	80.62	77.60	69.98	66.02	62.26	50.91	50.96	49.00	37.94
65	79.65	75.96	69.64	63.81	54.36	49.74	48.10	45.85	35.90
70	78.81	74.61	67.97	61.00	47.02	48.76	44.75	43.69	34.26
75	77.59	71.62	67.24	60.45	45.57	48.62	43.35	41.72	33.48
80	77.00	70.27	66.85	60.10	44.18	47.20	41.79	36.01	30.96
85	76.46	68.62	65.72	59.55	42.42	46.47	40.29	33.85	28.54
90	75.78	68.57	64.25	58.95	41.70	44.61	36.94	31.68	27.14
95	73.82	65.48	63.27	58.09	40.09	43.73	35.44	30.50	25.59
100	73.18	63.99	62.29	56.44	38.96	42.12	33.84	28.78	23.94
105	69.56	60.44	62.00	54.73	36.42	39.97	32.58	27.21	22.97
110	67.41	57.10	61.36	53.07	33.84	39.24	31.65	26.13	22.00
115	66.58	56.90	54.40	51.57	32.91	38.41	31.02	24.40	21.27
120	66.04	56.65	56.56	50.61	31.62	37.63	29.96	22.24	20.21
125	66.09	56.50	56.46	49.66	31.26	37.19	29.08	20.76	18.85
130	64.57	53.91	56.56	48.60	30.07	36.51	28.21	18.99	17.06
135	62.46	53.76	54.01	48.20	29.60	35.82	25.64	17.03	15.12
140	61.19	48.37	52.20	47.70	28.62	33.97	24.71	16.04	14.49
145	61.00	45.58	50.58	46.50	28.31	31.92	23.99	15.26	14.30



ตาราง 7 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
150	60.90	44.23	45.53	45.94	27.95	30.70	22.87	14.07	13.81
155	60.16	42.84	43.92	44.64	27.12	29.67	20.98	13.48	10.95
160	58.40	41.69	40.19	43.73	26.50	28.74	19.91	13.04	10.08
165	56.49	41.04	39.75	42.68	26.14	27.42	18.55	11.91	9.94
170	54.98	38.25	39.16	41.73	25.31	26.20	16.32	10.83	9.69
175	54.83	37.05	39.02	40.37	24.90	24.93	15.93	10.39	9.55
180	54.39	35.66	38.38	39.67	23.30	23.96	14.91	9.25	9.45
185	53.65	35.56	38.28	38.51	22.88	23.52	14.23	8.71	8.24
190	52.04	34.36	37.99	37.86	22.01	23.13	13.70	7.88	7.76
195	49.59	32.81	37.40	36.86	21.80	22.05	12.68	6.99	7.27
200	47.29	30.92	37.01	36.41	21.18	20.59	11.18	6.89	6.88
205	46.51	29.22	36.76	35.30	20.77	19.12	10.01	6.25	6.59
210	42.45	31.77	36.57	34.70	20.46	17.32	9.04	6.11	5.77
215	41.71	30.07	36.37	33.54	19.63	15.56	8.80	6.01	5.14
220	40.63	29.37	34.41	32.44	18.70	14.53	8.56	5.81	5.04
225	40.68	27.98	34.27	29.73	17.56	14.00	7.78	5.96	4.70
230	39.70	27.18	34.12	28.47	17.15	11.95	7.15	5.47	4.27
235	39.31	26.08	33.78	26.42	16.68	10.29	6.33	4.78	3.98
240	38.43	22.09	32.99	25.86	16.17	9.60	5.84	4.63	3.40
245	37.50	21.99	32.80	25.06	15.65	9.02	5.26	4.53	2.96
250	36.82	19.30	32.50	23.85	15.60	8.04	5.21	4.48	2.52
255	36.77	19.35	31.96	22.80	14.25	6.97			
260	37.01	19.60	31.42	22.10	13.01	5.94			
265	36.23	19.95	30.84	21.80	12.08	5.31			
270	34.12	19.00	30.44	21.29	11.36	5.21			
275	33.88	18.45	30.35	20.59	10.53	5.11			
280	33.73	18.10	30.25	19.79	9.65	4.57			
285	33.54	18.15	29.12	19.54	9.09	4.08			
290	33.00	17.95	27.75	17.28	7.95	3.89			
295	32.85	16.75	25.54	15.27	7.38	3.60			



ตาราง 7 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
300	30.94	15.56	25.40	14.97	7.07	3.45			
305	29.96	15.81	23.58	14.77	7.07				
310	28.84	15.91	23.34	14.57	6.92				
315	28.49	15.56	23.14	14.32	6.92				
320	28.30	15.26	22.65	13.31	6.61				
325	28.15	14.96	22.16	12.21	6.19				
330	28.01	14.41	21.72	11.76	6.09				
335	26.98	14.16	21.18	11.81	5.99				
340	26.63	13.86	20.55	11.25	5.42				
345	26.15	13.56	19.22	11.10	4.90				
350	24.38	13.26	17.21	10.75	4.69				
355	23.99	13.86	15.74	10.50	4.38				
360	24.09	13.31	15.55		4.23				
365	23.75	12.21	15.16		3.71				
370	23.55	11.17	14.67		3.35				
375	22.52	10.22	14.32						
380	21.35	10.02	14.13						
385	20.61	9.62	13.74						
390	20.08	9.27	13.44						
395	19.39	8.82	12.90						
400	16.16	8.57	12.36						
405	15.87	8.47	12.56						
410	15.57	8.77	11.83						
415	15.52	8.72	11.34						
420	15.43	8.57	10.80						
425	15.43	8.47	10.36						
430	15.33	7.78	9.62						
435	15.08	7.83	9.03						
440	14.59	8.03	8.54						



ตาราง 8 ผลการลดลงของร้อยละความชื้นใบรางจืดเมื่อใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบเวลาจริงที่กำลัง
ไมโครเวฟ 600, 1200 และ 1600 วัตต์ ความเร็วรอบจานหมุนอัตโนมัติจาก 0 -> 5, 0 ->10
และ 5 -> 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมคงที่ 0.9 เมตรต่อ
วินาที

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10
5	89.78	86.69	88.41	87.71	89.12	90.12	90.12	90.12	90.12
10	89.43	88.38	88.17	83.10	88.26	87.07	84.81	86.92	85.51
15	88.99	88.69	87.13	80.64	84.30	84.23	81.27	82.12	83.12
20	88.85	88.03	85.94	79.56	81.44	82.26	78.52	77.78	77.12
25	88.65	85.22	82.81	77.94	80.18	79.11	74.73	74.93	72.08
30	88.16	84.33	80.81	76.27	79.43	76.17	72.42	70.58	67.61
35	87.33	83.48	79.77	74.16	73.55	72.86	70.45	68.33	65.84
40	86.74	82.68	77.58	73.32	72.50	71.52	68.49	66.68	62.59
45	86.50	81.12	76.16	71.75	70.34	68.72	65.59	65.03	59.13
50	86.20	80.72	75.31	70.23	67.98	66.40	59.49	61.88	56.13
55	82.83	80.10	74.83	69.25	66.02	66.04	62.15	59.79	53.29
60	80.62	79.21	72.88	65.76	63.81	62.26	60.08	57.89	50.57
65	79.65	78.18	71.55	63.94	60.45	54.36	57.33	54.89	48.85
70	78.81	76.67	68.94	62.71	60.10	47.02	55.71	53.89	46.75
75	77.59	74.93	68.61	61.44	59.55	45.57	52.26	48.99	43.46
80	77.00	72.26	68.23	60.65	58.09	44.18	48.48	47.99	38.02
85	76.46	73.55	68.18	59.62	56.44	42.42	45.18	45.59	35.97
90	75.78	70.96	65.95	58.24	54.73	41.70	44.69	43.49	33.87
95	73.82	69.23	62.20	56.48	53.07	40.09	42.48	42.74	30.70
100	73.18	67.40	61.39	54.56	50.61	38.96	39.87	40.69	27.21
105	69.56	66.06	61.25	53.53	49.66	36.42	37.12	39.95	24.40
110	67.41	65.35	60.68	52.25	48.20	33.84	34.12	34.40	22.56
115	66.58	64.24	59.35	50.09	46.50	32.91	33.14	32.95	20.76
120	66.04	61.34	58.88	48.96	45.94	31.62	31.57	30.80	17.03
125	66.09	59.83	57.83	47.39	43.73	31.26	29.16	27.14	15.26
130	64.57	57.82	57.12	46.70	42.68	30.07	25.52	23.94	14.07
135	62.46	58.62	55.93	45.42	40.37	29.67	24.29	21.27	



ตาราง 8 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10
140	61.19	57.78	52.51	44.39	39.67	28.74	23.75	18.85	
145	61.00	57.07	48.48	43.85	37.86	27.42	23.26	15.12	
150	60.90	56.49	47.01	42.62	36.41	26.20	21.73	14.49	
155	60.16	55.73	45.68	41.25	34.70	24.93	20.65		
160	58.40	55.60	44.92	40.37	32.44	23.96	19.32		
165	56.49	53.37	39.22	38.60	28.50	23.52	16.67		
170	54.98	52.83	35.51	37.57	28.27	23.13	15.29		
175	54.83	52.39	33.42	35.21	27.91	22.05			
180	54.39	51.90	33.28	34.37	27.46	20.59			
185	53.65	51.19	32.71	33.54	27.55	19.12			
190	52.04	49.94	32.33	32.56	27.10	17.32			
195	49.59	48.42	32.24	31.43	26.92	15.56			
200	47.29	45.80	31.15	30.40	26.88	14.53			
205	46.51	44.46	30.67	29.60	24.00				
210	42.45	40.98	29.12	28.62	23.06				
215	41.71	40.81	27.75	27.12	21.35				
220	40.63	39.87	25.54	26.50	20.86				
225	40.68	37.42	25.40	25.31	19.01				
230	39.70	35.37	23.58	24.90	18.16				
235	39.31	34.84	23.34	23.30	17.57				
240	38.43	34.70	23.14	22.01	16.81				
245	37.50	34.61	22.65	21.80	16.05				
250	36.82	34.57	22.16	20.77	15.78				
255	36.77	33.95	21.72	19.63	14.56				
260	37.01	33.54	21.18	18.70					
265	36.23	32.12	20.55	17.56					
270	34.12	31.23	19.22	16.68					
275	33.88	30.34	17.21	15.65					
280	33.73	28.69	15.74	14.25					
285	33.54	30.29	15.55						



ตาราง 8 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	600 วัตต์			1200 วัตต์			1600 วัตต์		
	ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ			ความเร็วรอบ		
	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10	0 -> 5	0 ->10	5 -> 10
290	33.00	29.59	15.16						
295	32.85	29.49	14.67						
300	30.94	27.81							
305	29.37	26.28							
310	27.98	25.99							
315	27.18	23.17							
320	26.08	22.93							
325	22.09	21.84							
330	21.99	20.76							
335	19.30	21.30							
340	19.35	21.25							
345	19.60	17.65							
350	19.95	17.30							
355	19.00	16.27							
360	18.45	15.53							
365	18.10	14.84							
370	18.15								
375	17.95								
380	16.75								
385	15.56								
390	15.81								
395	15.91								
400	15.56								
405	15.26								
410	14.96								



ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ผลทางสถิติคุณภาพของใบراجิ๊ดที่เงื่อนไขต่างกัน



ผลการวิเคราะห์ค่าสี L*a*b* ใบรางจืด

Descriptives

		Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
L	1.00	30.7922	.26143	.08714	30.5913	30.9932	30.51	31.12
	2.00	32.1944	.27785	.09262	31.9809	32.4080	31.85	32.49
	3.00	33.4100	.27436	.09145	33.1991	33.6209	33.09	33.73
	4.00	34.7056	.03358	.01119	34.6797	34.7314	34.68	34.78
	5.00	35.3744	.04851	.01617	35.3372	35.4117	35.34	35.46
	6.00	35.9556	.05247	.01749	35.9152	35.9959	35.88	36.01
	7.00	35.5067	.47731	.15910	35.1398	35.8736	34.98	36.10
	8.00	36.4156	.03127	.01042	36.3915	36.4396	36.39	36.46
	9.00	36.4567	.04123	.01374	36.4250	36.4884	36.43	36.53
	Total	34.5346	1.89986	.21110	34.1145	34.9547	30.51	36.53

			Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
a	1.00	9	-.9611	.27746	.09249	-1.1744	-.7478	-1.35	-.75
	2.00	9	-1.8844	.41286	.13762	-2.2018	-1.5671	-2.25	-1.33
	3.00	9	-2.3722	.31148	.10383	-2.6116	-2.1328	-2.77	-2.04
	4.00	9	-3.9178	.81890	.27297	-4.5472	-3.2883	-4.97	-2.93
	5.00	9	-4.5467	.01732	.00577	-4.5600	-4.5334	-4.57	-4.51
	6.00	9	-4.8389	.04428	.01476	-4.8729	-4.8048	-4.91	-4.78
	7.00	9	-4.9478	.11766	.03922	-5.0382	-4.8573	-5.07	-4.71
	8.00	9	-5.2156	.05615	.01872	-5.2587	-5.1724	-5.29	-5.14
	9.00	9	-4.8167	.01658	.00553	-4.8294	-4.8039	-4.84	-4.80
	Total	81	-3.7223	1.52374	.16930	-4.0593	-3.3854	-5.29	-.75

			Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
b	1.00	9	17.1856	.17903	.05968	17.0479	17.3232	16.92	17.35
	2.00	9	19.9156	2.35460	.78487	18.1057	21.7255	16.77	21.64
	3.00	9	18.3600	1.14786	.38262	17.4777	19.2423	17.57	19.93
	4.00	9	19.3400	.04330	.01443	19.3067	19.3733	19.27	19.39
	5.00	9	19.5944	.21084	.07028	19.4324	19.7565	19.30	19.82
	6.00	9	20.4000	.19786	.06595	20.2479	20.5521	20.23	20.68
	7.00	9	21.3933	.46669	.15556	21.0346	21.7521	20.72	21.75
	8.00	9	21.9456	.02877	.00959	21.9234	21.9677	21.90	21.98
	9.00	9	20.8644	.01130	.00377	20.8558	20.8731	20.85	20.88
	Total	81	19.8888	1.64791	.18310	19.5244	20.2531	16.77	21.98

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
L	Between Groups	285.096	8	35.637	700.967	.000
	Within Groups	3.660	72	.051		
	Total	288.757	80			
a	Between Groups	177.466	8	22.183	192.975	.000
	Within Groups	8.277	72	.115		
	Total	185.742	80			
b	Between Groups	159.663	8	19.958	24.954	.000
	Within Groups	57.584	72	.800		
	Total	217.247	80			

L

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
1.00	9	30.7922						
2.00	9		32.1944					
3.00	9			33.4100				
4.00	9				34.7056			
5.00	9					35.3744		
7.00	9					35.5067		
6.00	9						35.9556	
8.00	9							36.4156
9.00	9							36.4567
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	.218	1.000	.700

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.



a

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
8.00	9	-5.2156						
7.00	9	-4.9478	-4.9478					
6.00	9		-4.8389	-4.8389				
9.00	9		-4.8167	-4.8167				
5.00	9			-4.5467				
4.00	9				-3.9178			
3.00	9					-2.3722		
2.00	9						-1.8844	
1.00	9							-.9611
Sig.		.098	.445	.088	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b

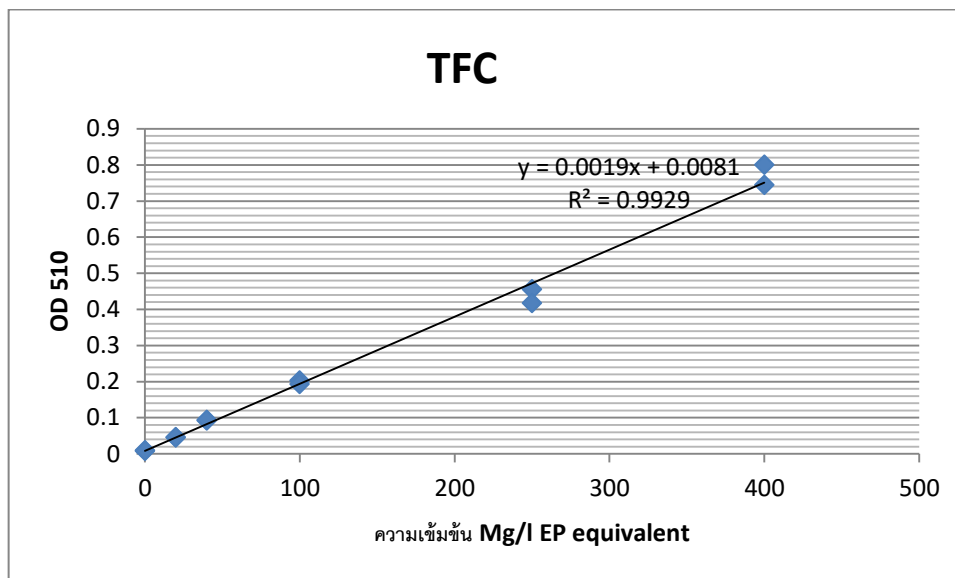
Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
1.00	9	17.1856						
3.00	9		18.3600					
4.00	9			19.3400				
5.00	9			19.5944	19.5944			
2.00	9			19.9156	19.9156			
6.00	9				20.4000	20.4000		
9.00	9					20.8644	20.8644	
7.00	9						21.3933	21.3933
8.00	9							21.9456
Sig.		1.000	1.000	.203	.074	.274	.214	.194



Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

กราฟสารตั้งต้นและผลการวิเคราะห์ค่า flavonoid



Descriptives

Flavonoid

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	292.0000	5.65685	4.00000	241.1752	342.8248	288.00	296.00
2.00	2	250.0000	11.31371	8.00000	148.3504	351.6496	242.00	258.00
3.00	2	493.0000	4.24264	3.00000	454.8814	531.1186	490.00	496.00
4.00	2	319.0000	24.04163	17.00000	102.9945	535.0055	302.00	336.00
5.00	2	435.0000	43.84062	31.00000	41.1077	828.8923	404.00	466.00
6.00	2	637.5000	21.92031	15.50000	440.5538	834.4462	622.00	653.00
7.00	2	502.5550	40.38287	28.55500	139.7293	865.3807	474.00	531.11
8.00	2	857.5000	.70711	.50000	851.1469	863.8531	857.00	858.00
9.00	3	854.0000	25.05993	14.46836	791.7477	916.2523	828.00	878.00
Total	19	533.4268	228.49752	52.42093	423.2946	643.5591	242.00	878.00



ANOVA

flavoniod

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	933754.334	8	116719.292	193.059	.000
Within Groups	6045.776	10	604.578		
Total	939800.110	18			

flavoniod

Duncan^{a,b}

treatment1	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
2.00	2	250.0000					
1.00	2	292.0000	292.0000				
4.00	2		319.0000				
5.00	2			435.0000			
3.00	2				493.0000		
7.00	2				502.5550		
6.00	2					637.5000	
9.00	3						854.0000
8.00	2						857.5000
Sig.		.112	.289	1.000	.700	1.000	.888

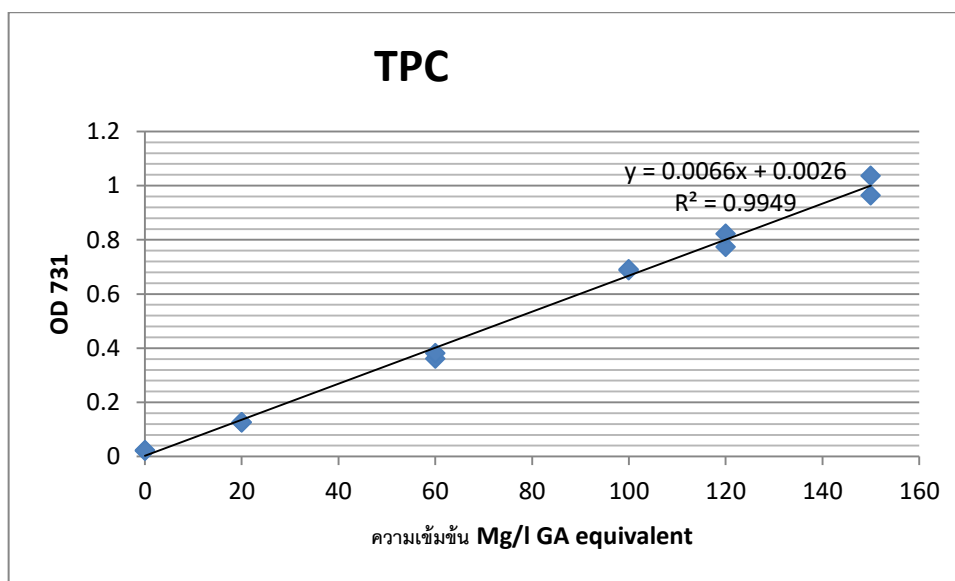
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.077.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



กราฟสารตั้งต้นและผลการวิเคราะห์ phenolic



Descriptives

phenolic

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	157.0333	10.90615	6.29667	129.9410	184.1257	144.44	163.33
2.00	3	191.4800	11.27844	6.51161	163.4628	219.4972	183.89	204.44
3.00	3	222.7800	16.59291	9.57992	181.5609	263.9991	210.56	241.67
4.00	3	166.1100	34.24741	19.77275	81.0347	251.1853	126.67	188.33
5.00	3	245.1867	34.46895	19.90066	159.5611	330.8123	210.00	278.89
6.00	2	275.2800	24.74874	17.50000	52.9214	497.6386	257.78	292.78
7.00	3	351.3733	33.23228	19.18667	268.8198	433.9269	313.00	370.56
8.00	2	354.7200	42.82239	30.28000	-30.0239	739.4639	324.44	385.00
9.00	3	320.7400	42.01955	24.26000	216.3576	425.1224	272.22	345.00
Total	25	248.9644	77.07797	15.41559	217.1482	280.7806	126.67	385.00

ANOVA

phenolic

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	128633.063	8	16079.133	18.440	.000
Within Groups	13951.242	16	871.953		
Total	142584.306	24			

phenolic

Duncan^{a,b}

treatment1	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
1.00	3	157.0333				
4.00	3	166.1100				
2.00	3	191.4800	191.4800			
3.00	3		222.7800	222.7800		
5.00	3		245.1867	245.1867		
6.00	2			275.2800	275.2800	
9.00	3				320.7400	320.7400
7.00	3					351.3733
8.00	2					354.7200
Sig.		.217	.061	.067	.093	.223

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.700.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

Descriptives

Antioxidant

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	23.7800	4.93561	3.49000	-20.5647	68.1247	20.29	27.27
2.00	2	27.8800	2.13546	1.51000	8.6936	47.0664	26.37	29.39
3.00	3	31.9967	.49903	.28812	30.7570	33.2363	31.61	32.56
4.00	2	35.7800	1.56978	1.11000	21.6761	49.8839	34.67	36.89
5.00	3	34.6033	3.04099	1.75572	27.0491	42.1576	32.34	38.06
6.00	2	43.5550	.14849	.10500	42.2208	44.8892	43.45	43.66
7.00	2	42.1550	4.00930	2.83500	6.1329	78.1771	39.32	44.99
8.00	2	63.3650	3.03349	2.14500	36.1102	90.6198	61.22	65.51
9.00	2	61.0600	.39598	.28000	57.5023	64.6177	60.78	61.34
Total	20	39.7475	13.02453	2.91237	33.6518	45.8432	20.29	65.51

ANOVA

Antioxidant

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3147.297	8	393.412	57.066	.000
Within Groups	75.833	11	6.894		
Total	3223.130	19			

Antioxidant

Duncan^{a,,b}

treatment1	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
1.00	2	23.7800				
2.00	2	27.8800	27.8800			
3.00	3		31.9967	31.9967		
5.00	3			34.6033		
4.00	2			35.7800		
7.00	2				42.1550	
6.00	2				43.5550	
9.00	2					61.0600
8.00	2					63.3650
Sig.		.133	.132	.181	.591	.381

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.160.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



ผลการวิเคราะห์ค่าสี L*a*b* ใบรางจืด ที่เงื่อนไขปรับความเร็วรอบอัตโนมัติ

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
L 1.00	9	30.7267	.31008	.10336	30.4883	30.9650	30.41	31.12
2.00	9	30.5556	.14028	.04676	30.4477	30.6634	30.41	30.73
3.00	9	32.3611	.10386	.03462	32.2813	32.4409	32.25	32.49
4.00	9	34.7400	.09341	.03114	34.6682	34.8118	34.67	34.88
5.00	9	34.7022	.02279	.00760	34.6847	34.7197	34.67	34.73
6.00	9	35.3778	.06200	.02067	35.3301	35.4254	35.33	35.46
7.00	9	35.2467	.36024	.12008	34.9698	35.5236	34.98	35.73
8.00	9	36.1211	.01965	.00655	36.1060	36.1362	36.09	36.14
9.00	9	36.4600	.03640	.01213	36.4320	36.4880	36.42	36.51
Total	81	34.0323	2.13560	.23729	33.5601	34.5046	30.41	36.51

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
a 1.00	9	-1.6411	.20423	.06808	-1.7981	-1.4841	-1.81	-1.37
2.00	9	-1.7922	.02224	.00741	-1.8093	-1.7751	-1.81	-1.75
3.00	9	-2.1678	.06515	.02172	-2.2179	-2.1177	-2.25	-2.09
4.00	9	-4.2344	.44227	.14742	-4.5744	-3.8945	-4.84	-3.91
5.00	9	-4.9156	.02698	.00899	-4.9363	-4.8948	-4.95	-4.87
6.00	9	-4.5422	.09244	.03081	-4.6133	-4.4712	-4.67	-4.43
7.00	9	-4.9456	.01944	.00648	-4.9605	-4.9306	-4.97	-4.91
8.00	9	-5.0767	.08746	.02915	-5.1439	-5.0094	-5.17	-4.95
9.00	9	-5.1900	.02550	.00850	-5.2096	-5.1704	-5.23	-5.16
Total	81	-3.8340	1.44013	.16001	-4.1524	-3.5155	-5.23	-1.37

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
b 1.00	9	17.2156	.25783	.08594	17.0174	17.4137	16.86	17.43
2.00	9	17.3000	.02828	.00943	17.2783	17.3217	17.27	17.35
3.00	9	21.4667	.12510	.04170	21.3705	21.5628	21.33	21.64
4.00	9	19.3978	.02728	.00909	19.3768	19.4188	19.35	19.43
5.00	9	19.3411	.04314	.01438	19.3080	19.3743	19.27	19.39
6.00	9	19.5944	.21084	.07028	19.4324	19.7565	19.30	19.82
7.00	9	21.7222	.04466	.01489	21.6879	21.7566	21.68	21.78
8.00	9	21.0933	.48724	.16241	20.7188	21.4679	20.71	21.75
9.00	9	21.8789	.03408	.01136	21.8527	21.9051	21.82	21.93
Total	81	19.8900	1.71249	.19028	19.5113	20.2687	16.86	21.93

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
L	Between Groups	362.694	8	45.337	1504.600	.000
	Within Groups	2.170	72	.030		
	Total	364.863	80			
a	Between Groups	163.837	8	20.480	708.903	.000
	Within Groups	2.080	72	.029		
	Total	165.917	80			
b	Between Groups	231.644	8	28.956	703.295	.000
	Within Groups	2.964	72	.041		
	Total	234.609	80			

L

Duncana

trt	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
2.00	9	30.5556						
1.00	9		30.7267					
3.00	9			32.3611				
5.00	9				34.7022			
4.00	9				34.7400			
7.00	9					35.2467		
6.00	9					35.3778		
8.00	9						36.1211	
9.00	9							36.4600
Sig.		1.000	1.000	1.000	.646	.113	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.



a

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
9.00	9	-5.1900					
8.00	9	-5.0767	-5.0767				
7.00	9		-4.9456				
5.00	9		-4.9156				
6.00	9			-4.5422			
4.00	9				-4.2344		
3.00	9					-2.1678	
2.00	9						-1.7922
1.00	9						-1.6411
Sig.		.162	.060	1.000	1.000	1.000	.063

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b

Duncan^a

trt	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
1.00	9	17.1856						
3.00	9		18.3600					
4.00	9			19.3400				
5.00	9			19.5944	19.5944			
2.00	9			19.9156	19.9156			
6.00	9				20.4000	20.4000		
9.00	9					20.8644	20.8644	
7.00	9						21.3933	21.3933
8.00	9							21.9456
Sig.		1.000	1.000	.203	.074	.274	.214	.194

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.



ผลการวิเคราะห์ค่า flavonoid ที่เงื่อนไขปรับความเร็วรอบอัตโนมัติ

Descriptives

flavoniod

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	279.5000	.70711	.50000	273.1469	285.8531	279.00	280.00
2.00	2	251.5000	.70711	.50000	245.1469	257.8531	251.00	252.00
3.00	2	289.0000	2.82843	2.00000	263.5876	314.4124	287.00	291.00
4.00	2	357.0000	36.76955	26.00000	26.6387	687.3613	331.00	383.00
5.00	2	373.0000	35.35534	25.00000	55.3449	690.6551	348.00	398.00
6.00	2	436.5000	27.57716	19.50000	188.7290	684.2710	417.00	456.00
7.00	2	559.5000	19.09188	13.50000	387.9662	731.0338	546.00	573.00
8.00	2	507.5000	41.71930	29.50000	132.6670	882.3330	478.00	537.00
9.00	3	711.6667	21.36196	12.33333	658.6006	764.7327	687.00	724.00
Total	19	433.7895	159.11302	36.50303	357.0995	510.4795	251.00	724.00

ANOVA

flavoniod

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	449315.991	8	56164.499	87.906	.000
Within Groups	6389.167	10	638.917		
Total	455705.158	18			

flavoniod

Duncan^{a,b}

treatment1	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
2.00	2	251.5000				
1.00	2	279.5000				
3.00	2	289.0000				
4.00	2		357.0000			
5.00	2		373.0000			
6.00	2			436.5000		
8.00	2				507.5000	
7.00	2				559.5000	
9.00	3					711.6667
Sig.		.179	.533	1.000	.062	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.077.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



ผลการวิเคราะห์สาร phenolic ที่เงื่อนไขปรับความเร็วรอบอัตโนมัติ

Descriptives

phenolic

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	199.1700	12.17638	8.61000	89.7696	308.5704	190.56	207.78
2.00	2	192.5000	11.39856	8.06000	90.0880	294.9120	184.44	200.56
3.00	3	319.0733	14.31710	8.26598	283.5077	354.6390	306.11	334.44
4.00	2	186.6650	3.14663	2.22500	158.3937	214.9363	184.44	188.89
5.00	3	244.0733	27.97909	16.15373	174.5694	313.5772	224.44	276.11
6.00	3	251.8533	15.08039	8.70667	214.3916	289.3151	234.44	260.56
7.00	2	212.2250	7.85596	5.55500	141.6420	282.8080	206.67	217.78
8.00	3	272.5533	6.16033	3.55667	257.2502	287.8564	265.44	276.11
9.00	3	467.2233	26.93916	15.55333	400.3027	534.1439	451.67	498.33
Total	23	271.5413	88.88305	18.53340	233.1054	309.9772	184.44	498.33

ANOVA

phenolic

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	169496.729	8	21187.091	68.860	.000
Within Groups	4307.598	14	307.686		
Total	173804.327	22			

phenolic

Duncan^{a,b}

treatment1	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
4.00	2	186.6650				
2.00	2	192.5000				
1.00	2	199.1700				
7.00	2	212.2250	212.2250			
5.00	3		244.0733	244.0733		
6.00	3			251.8533		
8.00	3			272.5533		
3.00	3				319.0733	
9.00	3					467.2233
Sig.		.158	.064	.109	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.455.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่เงื่อนไขปรับความเร็วรอบอัตโนมัติ

Descriptives

antioxidant

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	18.8900	2.58801	1.83000	-4.3624	42.1424	17.06	20.72
2.00	3	24.0300	4.48545	2.58968	12.8875	35.1725	20.19	28.96
3.00	3	34.6033	3.41998	1.97452	26.1076	43.0990	31.50	38.27
4.00	3	27.8367	1.85001	1.06810	23.2410	32.4323	25.79	29.39
5.00	3	30.8667	1.53279	.88495	27.0590	34.6743	29.39	32.45
6.00	3	50.1467	3.07754	1.77682	42.5016	57.7917	48.33	53.70
7.00	3	42.1267	2.84229	1.64100	35.0660	49.1873	39.98	45.35
8.00	3	43.6567	4.29349	2.47885	32.9911	54.3223	40.06	48.41
9.00	3	65.4500	8.81170	5.08744	34.5605	78.3395	46.41	62.90
Total	26	37.1896	12.19177	2.39100	32.2653	42.1140	17.06	62.90

ANOVA

antioxidant

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3406.851	8	425.856	23.419	.000
Within Groups	309.133	17	18.184		
Total	3715.984	25			

antioxidant

Duncan^{a,b}

treatment1	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
1.00	2	18.8900						
2.00	3	24.0300	24.0300					
4.00	3		27.8367	27.8367				
5.00	3		30.8667	30.8667				
3.00	3			34.6033	34.6033			
7.00	3				42.1267	42.1267		
8.00	3					43.6567	43.6567	
6.00	3						50.1467	50.1467
9.00	3							56.4500
Sig.		.169	.087	.090	.051	.674	.087	.096

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.842.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	ว่าที่ ร.ต. ธนภัทร นวลทูล
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2534
จังหวัด และประเทศที่เกิด	จังหวัดเลย ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2549	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัยพิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก
พ.ศ. 2552	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัยเลย อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย
พ.ศ. 2556	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2561	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่ง สถานที่ทำงาน	วิศวกรประจำสาขาเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	บ้านเลขที่ 149/1 หมู่ 9 ตำบลหนองผือ อำเภอท่าลี่ จังหวัดเลย 42140

