



โครงการวิศวกรรม

เรื่อง

คุณลักษณะการอบแห้งของใบผักชี (*Coriandrum sativum* L.)

ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Microwave Drying Characteristics of Coriander Leaves

(*Coriandrum sativum* L.)

นาย	ณัฐวุฒิ	มีใจ	รหัสนักศึกษา	6515125023
นาย	นพพร	ตอบเก่ง	รหัสนักศึกษา	6515125030
นาย	ไพรวลัย		รหัสนักศึกษา	6515125043

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปีการศึกษา 2566



โครงการวิศวกรรม

เรื่อง

คุณลักษณะการอบแห้งของใบผักชี (*Coriandrum sativum* L.)

ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Microwave Drying Characteristics of Coriander Leaves

(*Coriandrum sativum* L.)

นาย	ณัฐวุฒิ	มีใจ	รหัสนักศึกษา	6515125023
นาย	นพพร	ตอบเก่ง	รหัสนักศึกษา	6515125030
นาย	ไพรวลัย		รหัสนักศึกษา	6515125043

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปีการศึกษา 2566



คุณลักษณะการอบแห้งของใบผักชี (*Coriandrum sativum* L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ
Microwave Drying Characteristics of Coriander Leaves (*Coriandrum sativum* L.)

นาย	ณัฐวุฒิ	มีใจ	รหัสนักศึกษา	6515125023
นาย	นพพร	ตอบเก่ง	รหัสนักศึกษา	6515125030
นาย	ไพรวลัย		รหัสนักศึกษา	6515125043

โครงการนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัสวราชันย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ทศนีย์ ชัยยา)

..... คณบดีวิทยาลัยพลังงานทดแทน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วัน 10 เดือนมกราคม พ.ศ. 2567

@ ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรม เรื่องการศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร ซึ่งเป็นหลักสูตรตามความต้องการ การดำเนินโครงการสำเร็จไปด้วยดี

การดำเนินโครงการนี้ที่สำเร็จและลุล่วงไปด้วยดีก็เพราะได้รับการช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัสวราชันย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษา และแนะนำวิธีวิเคราะห์ข้อมูล และจัดทำเล่มรายงานโครงการบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

คณะผู้จัดทำขอเสนอโครงการฯ ขอขอบคุณอาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา และรองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล คณะอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร ที่กรุณามาเป็นกรรมการข้อสอบโครงการในครั้งนี้

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนสนับสนุนเพื่อทำโครงการพลังงานทดแทน เทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตรสมัยใหม่ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้งบประมาณสนับสนุน "โครงการยกระดับวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการใหม่ด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตรสมัยใหม่ (ภายใต้กิจกรรม : พัฒนากำลังคนด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมอัจฉริยะ)" สำหรับนักศึกษาปริญญาตรีประจำปีงบประมาณ 2565 สุดท้ายนี้ผู้จัดทำโครงการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการเล่มนี้จะ เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หาก ผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำโครงการขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ณัฐฤติ มีใจ
นพพร ตอบเก้ง
ไพรวลัย

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ คุณลักษณะการอบแห้งของใบผักชี (*Coriandrum sativum* L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ผู้ทำโครงการ	1	นายณัฐวุฒิ	มีใจ	รหัสนักศึกษา	6515125023
	2	นายณพพร	ตอบเก่ง	รหัสนักศึกษา	6515125030
	3	นายไพโรจน์		รหัสนักศึกษา	6515125043

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัคราพันธ์

- กรรมการ
1. รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล
 2. อาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบผักชีด้วยเครื่องอบแห้งระบบคลื่นไมโครเวฟ ค่าความชื้นเริ่มต้นของผักชีสดเท่ากับ 82.6 ± 2.03 อบแห้งที่ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 9.73 ± 0.42 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก (%w.b.) ผลการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าเท่ากับ 0.2160 ± 0.0021 , 0.3196 ± 0.0300 และ 0.4762 ± 0.0051 กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง ที่ระดับพลังงาน เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูง และสัมประสิทธิ์บอกความผิดพลาดของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) และ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ต่ำกว่าแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

คำสำคัญ : ใบผักชี, การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ, สมการเอมพิริคัล

Abstract

Project Title Microwave Drying Characteristics of Coriander Leaves (*Coriandrum sativum* L.)

Author

1. Mr. Natthawut Meejai	Student ID 6515125023
2. Mr. Nopporn Tobkeng	Student ID 6515125030
3. Mr. Praiwan	Student ID 6515125043

Adviser Associate Professor Dr.Rittichai Assawarachan

Committee

1. Associate Professor Samerkhwan Tantikul
2. Miss Tasanee Chaiya

This research studied the effects of microwave power on drying performance of coriander leaves (*Coriandrum sativum* L.) and analyzed the mathematical drying model. The moisture content of fresh coriander leaves was 82.6 ± 2.03 %w.b. and the final drying moisture content was 9.73 ± 0.42 %w.b. The result showed that the drying rate was equal to 0.2160 ± 0.0021 , 0.3196 ± 0.0300 and 0.4762 ± 0.0051 kg_{water} / hour at 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 and 605.81 ± 4.92 W, respectively. Page mathematical model has shown an excellent fit because this model gave the highest coefficient of determination (R^2), the least chi-square (χ^2) and the lowest root mean square error (RMSE).

Key words: coriander leaves, microwave drying, empirical drying equation,

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ข้อมูลพื้นฐานของใบผักชี.....	6
2.2 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	6
2.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	11
2.4 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	14
2.5 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง.....	17
บทที่ 3 วิธีการวิจัย สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.2 การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟ.....	22
3.3 การวิเคราะห์ค่ากำลังจากคลื่นไมโครเวฟ.....	24
3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	30
4.1 คุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของใบผักชี.....	30
4.2 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ.....	33
4.3 ผลของระดับกำลังงานไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของ ใบผักชี.....	38
4.4 การศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้น ของใบผักชี.....	39
4.5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของใบผักชีอบแห้ง.....	42
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุป.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	48
การวิเคราะห์สมการแบบเอมพิริคัลการอบแห้งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	48
ประวัติผู้ทำโครงการ นาย ณัฐภูมิ มีใจ.....	65
ประวัติผู้ทำโครงการ นาย นพพร ตอเบ็ง.....	66
ประวัติผู้ทำโครงการ นาย ไพรวลย์ -.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้ง ด้วยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ ของใบผักชี.....41

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 ผักชีสด.....	1
1.2 ผลิตภัณฑ์ผักชีอบแห้ง.....	2
2.1 กลไกการเหนียวนำเชิงประจุไอออนภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.2 กลไกการเหนียวนำเชิงไอออนและกลไกกลไกการหมุนของทั้งสองขั้ว.....	9
2.3 การกระจายความร้อนวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมเทียบกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	12
2.4 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง.....	14
2.5 ไดอะแกรมประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง.....	17
2.6 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง.....	19
3.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม.....	21
3.2 การสร้างค่ากำลังงานไมโครเวฟด้วยสารมาตรฐาน.....	22
3.3 การวิเคราะห์กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (ก่อนและหลัง) การให้ความร้อนที่ระดับกำลังงานต่าง ๆ.....	23
3.4 แผนภาพเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	24
3.5 การเตรียมตัวอย่างใบผักชี.....	25
3.6 ภาพถ่ายขั้นตอนการวิเคราะห์หาความชื้นด้วยตามมาตรฐาน AOAC (2010).....	25
3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการเอมพิริคัล.....	27
4.1 ใบผักชีที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
4.2 ชิ้นส่วนของเครื่องอบแห้งเครื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ.....	33
4.3 แบบพร้อมก่อสร้างเครื่องอบแห้งเครื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ.....	34
4.4 ขั้นตอนการเจาะรูระบายอากาศ.....	35
4.5 ขั้นตอนทำแกนรับน้ำหนัก และฐานวางตาชั่ง.....	36
4.6 เครื่องอบแห้งคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ.....	37
4.7 การหาค่า Drying curve ด้วยเครื่องอบแห้งคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ.....	37
4.8 จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์.....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.9 ค่าสีพารามิเตอร์สมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* อบแห้งโดยใช้กำลังไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานเท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์.....	43
4.10 ภาพถ่ายใบผักชีอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงาน เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์.....	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ผักชีเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในแถบเมดิเตอร์เรเนียน อินเดีย และเอเชียตะวันตก ถือได้ว่าเป็นเครื่องเทศที่มีการใช้กันมาอย่างยาวนาน มีหลักฐานการปลูกในประเทศอียิปต์นานกว่า 3,500 ปี ซึ่งคำว่า “Coriander” มาจากภาษากรีก “Koris” แปลว่า bug เนื่องจากกลิ่นของลูกผักชีมีกลิ่นเฉพาะคล้าย Bed bug ต่อมาก็มีการนำไปปลูกยังประเทศในทวีปยุโรปและเอเชีย สำหรับผักชีที่นำไปปลูกในจีนนั้น เล่ากันว่าได้มีการนำเมล็ดพันธุ์จากประเทศทางตะวันตกของจีนเข้าไปในราชวงศ์ฮั่น เมื่อประมาณ 1,600 ปีมาแล้ว สำหรับประเทศที่ปลูกและส่งออกผักชีมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ประเทศอินเดีย และมอโรคโค ผักชีเป็นพืชที่มีความต้องการอย่างมาก แต่ผักชีมีความอ่อนไหวด้านราคาปรับตัวสูงขึ้นลง ปัจจุบันสถานการณ์ราคาผักสดตามแผงผักในตลาดต่างๆ จนถึงขณะนี้ยังคงแพงต่อเนื่อง โดยเฉพาะผักชีที่วางขายบนแผงผักตลาดสดเทศบาล 2 เมืองอุทัยธานี มีราคาขายส่งพุ่งขึ้นไปถึงกิโลกรัมละ 380-400 บาท จากปกติกิโลกรัมละ 40 บาท (ราคาหน้าฟาร์ม) ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักชีอบแห้งเพื่อใช้ทดแทนผักชีสด และการใช้ผักชีอบแห้งแบบเกรด และผักชีอบแห้งแบบมาทดแทนโดยการนำผักชีไปอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มสารปรุงแต่งรส (Food ingredients) ผลิตภัณฑ์ผักชีอบแห้งมีข้อได้เปรียบด้านนวัตกรรมเกษตรในเรื่องของ อายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน ลดต้นทุนค่าขนส่ง ทำให้สะดวกต่อการกระจายสินค้า ปัจจุบันผักชีอบแห้งมีราคาจำหน่าย 1,800-2,000 บาทต่อกิโลกรัมแห้ง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่จำเป็นอย่างมากของแปรรูปผลิตภัณฑ์ผักชีอบแห้ง ได้แก่ ต้นทุนพลังงานในการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เกิดข้อจำกัดด้านการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อน และการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอในห้องอบแห้งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ผักชีอบแห้งมีสีไม่สม่ำเสมอ



ภาพ 1.1 ผักชีสด



ภาพ 1.2 ผลิตภัณฑ์ผักชีอบแห้ง (ก) ใบผักชีผอง (ข) ใบผักชีเกล็ด

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน โดยทั่วไปกลไกการอบแห้งจะเกิดจากการที่น้ำถูกกระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเป็นกระบวนการให้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมกับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นสูง เพื่อลดปริมาณน้ำหรือความชื้นด้วยวิธีระเหยน้ำออกไป อัตราการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (อรรถพล และฤทธิชัย, 2551) ในขณะที่การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีกลไกการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายในตัววัสดุ เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุไดอิเล็กตริก (lossy material) การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipolar rotation) การเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้สนามไฟฟ้า โดยผลจากการเหนี่ยวนำจะทำให้ประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่นและเสียดสีกันระหว่างโมเลกุล จนเกิดเป็นพลังงานความร้อนจากภายในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยอาหารและวัสดุทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกจึงสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorption) และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ฤทธิชัย, 2554) ข้อได้เปรียบด้านวิศวกรรมของการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ดีกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (convective thermal method) ในด้านความสามารถในการเกิดความร้อนของโมเลกุลภายในวัสดุ (ไม่มีข้อเสียเปรียบด้านการถ่ายเทความร้อน) และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงด้านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสูง ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยลดข้อจำกัดในการอบแห้งผักชีได้ทั้งด้านวิศวกรรม และรักษาคุณภาพผักชีได้

การวิจัยและพัฒนาเพื่อช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการอบแห้งจึงเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่สามารถรักษากลิ่นรสและคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ใกล้เคียงผลผลิตสด และการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุชีวภาพนั้นจะถูกแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุเมื่อเทียบกับเวลาใน

การอบแห้งภายในการอบแห้งที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง อย่างไรก็ตามการอบแห้งก็เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งนั้นเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-dependent process) ทั้งยังได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิและความเร็วของตัวกลางการอบแห้ง หรือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับตัววัสดุเองโดยความซับซ้อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลเนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์และการเปลี่ยนแปลงต่างๆ หลายประการระหว่างการอบแห้ง ทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี ชีวเคมี และจุลชีววิทยา ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาสภาวะของการอบแห้งที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องพิจารณาหลักการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัม ควบคู่ไปกับหลักการด้านคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางชีวเคมีของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับวัสดุหนึ่ง อาจต้องทำการทดลองหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อตัวแปรที่สนใจ แต่อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีอาจไม่สามารถทำการทดลองได้หลายๆ ครั้ง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านความยุ่งยากในการทดลอง รวมถึงค่าใช้จ่ายหรือเวลาที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นนักวิจัยส่วนใหญ่จึงสนใจการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) เพื่อใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุชีวภาพในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียดทั้งข้อมูลซึ่งอาจจะวัดได้ยากหรือวัดไม่ได้เลยในห้องปฏิบัติการ สามารถประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปแบบจำลองที่จะนำไปสู่การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้ง (Optimum condition) ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว โครงการวิศวกรรมนี้จึงสนใจในการศึกษาการอบแห้งผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการวิเคราะห์หารูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการต้นแบบ

1.2.2 ศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบผักชีในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ ตามลำดับ

1.2.3 การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้งใบผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 4 ระดับกำลังงานไฟฟ้า ใช้วิธีการปรับโค้งความสัมพันธ์ (Curve fitting) ด้วยสมการเอมพิริคัล (Empirical drying equation) ด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic ตามลำดับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการต้นแบบ

1.3.2 วัดค่าพลังงานความร้อนของสารมาตรฐาน (น้ำกลั่น) เพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังงานไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ระดับต่างๆ จำนวน 4 ระดับพลังงาน

1.3.3 หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของใบผักชีในระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในช่วงเท่ากับ 164.34 ± 3.81 ถึง 605.81 ± 4.92 วัตต์ ใช้วิธีการปรับโค้งความสัมพันธ์ (Curve fitting) ด้วยสมการเอมพิริคัล (empirical drying equation) ด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic ตามลำดับ

1.3.4 ทวนสอบความแม่นยำของสมการเอมพิริคัลด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการวิจัยนี้จะทำให้ทราบถึงข้อมูลพื้นฐาน และค่าพารามิเตอร์การอบแห้งใบผักชี ได้แก่ ค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสุดท้าย ปริมาณอิสระ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 ได้ข้อมูลเชิงวิศวกรรมของการเปลี่ยนแปลงความชื้น อัตราการอบแห้ง พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง และประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟในช่วงกำลังงานไฟฟ้าในช่วง 164.34 ± 3.81 ถึง 605.81 ± 4.92 วัตต์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1.4.2 ได้ข้อมูลผลกระทบของกำลังงานไฟฟ้าของใบผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักชีเพื่อเป็นประโยชน์สามารถรักษาคุณภาพสี

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพื้นฐานของใบผักชี

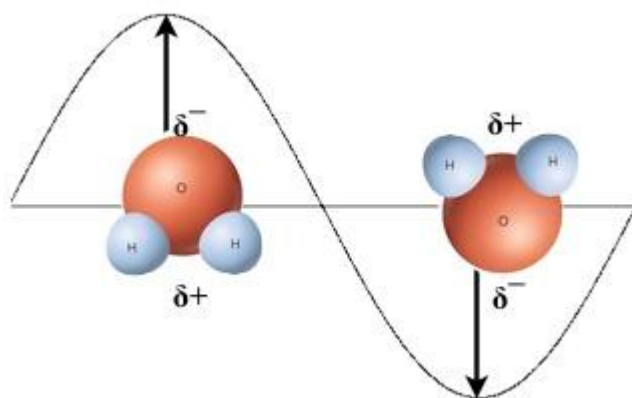
ผักชีในประเทศไทยที่คนไทยรู้จัก จะมีหลายชนิดได้แก่ ผักชี (*Coriandrum sativum* L.; Coriander, Cilantro), ผักชีฝรั่ง (*Eryngium foetidum* L.; Culantro), ผักชีลาว (*Anethum graveolens* L.; Dill weed) โดยการศึกษาวิจัยในโครงการวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร เอกชนนวัตกรรมเกษตรนี้เลือกใช้ผักชีไทย (*Coriandrum sativum* L.) เป็นตัวอย่างในการศึกษา ผักชีเป็นผักที่มีวิตามินเอและซีสูง คุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต 3.67 กรัม, น้ำตาล 0.87 กรัม, เส้นใย 2.8 กรัม, ไขมัน 0.52 กรัม, โปรตีน 2.13 กรัม, วิตามินเอ 337 ไมโครกรัม, อนุพันธ์ของวิตามินเอ (เบต้าแคโรทีน 3,930 ไมโครกรัม, ลูทีนและ ซีแซนทีน 865 ไมโครกรัม), วิตามินบี1 0.067 มิลลิกรัม, วิตามินบี2 0.162 กรัมตามลำดับ ลักษณะทั่วไปของผักชีเป็นไม้ ไม้ล้มลุก ที่มีลำต้นตั้งตรง ภายในจะกลวง และมีกิ่งก้านที่เล็ก ไม่มีขน มีรากแก้วสั้น แตรากฝอยจะมีมาก ซึ่งลำต้นนี้จะสูงประมาณ 8-15 นิ้ว ลำต้นสีเขียวแต่ถ้าแก่จัดจะออกเสียเขียวอมน้ำตาล ใบ ลักษณะการออกของใบจะเรียงคล้ายขนนก แต่อยู่ในรูปทรงพัด ซึ่งใบที่โคนต้นนั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าที่ปลายต้น เพราะส่วนมากที่ปลายต้นใบจะเป็นเส้นฝอย มีสีเขียวสด ดอก ออกเป็นช่อ ตรงส่วนยอดของต้น ดอกนั้นมีขนาดเล็ก มีอยู่ 5 กลีบสีขาวหรือชมพูอ่อนๆ ผล จะติดผลในฤดูหนาว ลักษณะของผลเป็นรูปทรงกลมโตประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ตรงปลายผลจะแยกออกเป็น 2 แฉก ดาวผิวจะมีเส้นคลื่นอยู่ 10 เส้น

ผักชีที่เรานำมาใช้ประโยชน์ก็คือ เมล็ดและต้น ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะมียีนเฉพาะตัว เมล็ดผักชีใช้รักษาอาการปวดท้องและช่วยย่อยอาหาร ส่วนใบที่เรานำมาทำเป็นผักแนมรับประทานกับอาหารอื่น หรือแต่งหน้าอาหารนั้นก็มียีนสรรพคุณช่วยย่อยเช่นกัน และยังมีเบต้าแคโรทีนอีกด้วย แม้จะไม่มากเท่าผักอื่นก็ตาม นอกจากนี้ผักชียังมีฤทธิ์เผ็ดร้อนช่วยขับลม บำรุงธาตุ แก้กลิ้นไส้ได้ใช้ในการช่วยย่อย บำรุงกระเพาะ เจริญอาหาร ขับลมขับพิษ แก่หวัด ขับเหงื่อ ช่วยย่อยอาหาร ลดน้ำตาลในเลือด แก่โรคหัด ปอกทาแก้มคัน แก่ไฟลามทุ่ง แก่ตับอักเสบ ลดการปวดบวมข้อ ต้มดื่มแก้อาหารเป็นพิษ แก่สะอึก กระตุ้นการทำงานของเลือดพลาสมา และกล้ามเนื้อ มีสารต้านมะเร็ง ต้านแบคทีเรีย เชื้อรา และไขของแมลง

2.2 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ผดุงศักดิ์ (2551) อธิบาย การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟอาศัยสมบัติของการดูดซึมพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุหรือโหลตซึ่งวัสดุที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่าวัสดุชนิดนั้นว่า วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric materials) ซึ่งหมายถึงวัสดุที่โครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคที่มีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้า (Dipoles) เช่น โมเลกุลน้ำ เป็นต้น ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการสลับเฟสไปมาหลายล้านครั้งใน 1 วินาที ส่งผลให้เกิดการสั่นของโมเลกุลน้ำ

และเกิดการหมุนและเสียดสีกันในระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดความร้อนที่ผลิตขึ้นภายใน (Internal heat generation) การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave heating technology) เป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในผลผลิตเกษตรที่มีสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้ คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงคลื่นเรดาร์ทำให้ไปรบกวนระบบการสื่อสาร ดังนั้นองค์การ Federal Communication Commission โดยรัฐบาลประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟสำหรับกระบวนการให้ความร้อนไว้ที่ 2 ระดับ คือ 915 ± 13 และ $2,450 \pm 50$ เมกะเฮิร์ตซ์ แต่สำหรับกลุ่มประเทศแถบยุโรป อาจจะใช้ที่ระดับความถี่ 896 เมกะเฮิร์ตซ์ (อรรถพล และ ฤทธิชัย, 2550) กลไกการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนภายในตัววัสดุ เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (Lossy material) โดยกลไกการเกิดความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ จะประกอบไปด้วยกลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic conduction) และกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar rotation)



ภาพ 2.1 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : <http://physics.stackexchange.com>

ภาพ 2.1 แสดงกลไกการเหนี่ยวนำเชิงประจุไอออนภายใต้สนามไฟฟ้า โดยผลจากการเหนี่ยวนำจะทำให้ประจุไอออนขั้วบวกกับขั้วลบเกิดการสั่นและการหมุน และเกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นพลังงานความร้อน การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในผลผลิตเกษตร สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันโดยคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในวัสดุทางการเกษตรเกิดการหมุน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุก่อให้เกิดความร้อนในผลผลิตเกษตรอย่างรวดเร็ว (ฤทธิชัย, 2554)

2.2.1 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction)

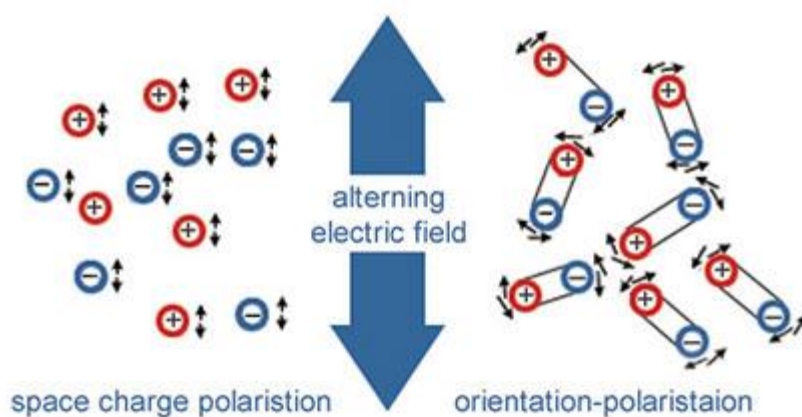
กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนเริ่มขึ้นเมื่อประจุไอออนซึ่งเกิดการแตกตัวในสารละลายถูกเร่งด้วยแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำ เช่น สารละลายเกลือแกงในน้ำ ซึ่งในสารละลายจะประกอบไปด้วยไอออนของโซเดียม (Na^+) คลอไรด์ (Cl^-) หรือไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+ , H^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับประจุที่มีอยู่แต่ละไอออน ซึ่งจากการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้ไอออนชนกับโมเลกุลของน้ำที่ยังไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้นและเป็นที่มาให้อิออนเกิดความเร่งและส่งผลเป็นลูกโซ่ต่อการชนของโมเลกุลอื่น ๆ คล้ายกับการชนของลูกบิลเลียด และเมื่อค่าประจุเปลี่ยนแปลงไอออนจึงมีความเร่งเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม โดยเหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดด้วยอัตราความถี่สูงนับล้านครั้งต่อวินาที ทำให้มีการชนและการเสียดสีระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นพลังงานจากแรงกล และการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมจนเกิดเป็นพลังงานความร้อนจากภายในเนื้อเยื่อของโครงสร้างเซลล์อาหาร เกิดการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นในระดับโมเลกุลอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงมีขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน 2 ขั้นตอน คือ พลังงานของสนามไฟฟ้าถูกแปลงไปเป็นพลังงานจลน์ โดยการเหนี่ยวนำแบบบังคับทิศทาง (Ordered kinetic energy) ซึ่งจะถูกละเลี่ยนกลับมาเป็นพลังงานจลน์ โดยการเหนี่ยวนำแบบไร้ทิศทาง (Disordered kinetic energy) ณ จุดซึ่งมีการเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยกลไกนี้ ก็จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิหรือความถี่ โดยที่พลังงานต่อหน่วยปริมาตร (P_v) ภายใต้สนามไฟฟ้า (E) การเปลี่ยนแปลงพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่

2.2.2 กลไกการหมุนของทั้งสองขั้ว (Dipolar Rotation)

โมเลกุลน้ำซึ่งมีสมบัติเป็นสองขั้ว (dipole) โดยธรรมชาติ ซึ่งหมายถึงโมเลกุลมีสมบัติของการกระจายประจุที่ไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลาง ส่วนโมเลกุลของสารชนิดอื่นก็จะเกิดความไม่สมมาตรได้ หากเกิดการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้า (E) ทำให้เกิดหน่วยแรงคั้นภายในโมเลกุล โดยขั้วทั้งสองจะได้รับอิทธิพลจากกลไกดังกล่าว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงขั้วอย่างรวดเร็วตามสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ยกตัวอย่างเช่น คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ สามารถทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุถึง 4,900 ล้านครั้งต่อหนึ่งรอบคลื่น แม้ว่าในตอนเริ่มต้นประจุในโมเลกุลจะมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรืออย่างสุ่มก็จะได้ผลลัพธ์ให้มีการจัดเรียงประจุตามทิศทาง หรือขั้วของสนามไฟฟ้าที่มากระทำ อย่างไรก็ตาม เมื่อสนามที่มากระทำมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้างดหายไป เปลี่ยนกลับมาเป็นการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นเดิมซึ่งคือ การคลายสนาม (Relaxes) และเช่นกัน เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นการสร้างหรือการจัดเรียง (Alignment) และการคลายสนามที่ความถี่หนึ่งจะเกิดขึ้นนับล้านครั้งในหนึ่งวินาที ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าไปเป็นศักย์เก็บไว้ในวัสดุแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์หรือพลังงานความร้อน นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิในขณะที่มีการสร้างหรือการจัดเรียง และการคลายสนามไฟฟ้านั้น จะถูกนิยามเป็นความถี่ของการ

.....

คลายสนาม (Relaxation frequency) โดยโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำและมอนอเมอร์จะมีค่าความถี่ของการคลายสนามมากกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุให้การเปลี่ยนพลังงานไปเป็นความร้อนได้ช้าลง ในทางตรงกันข้ามกับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เช่น พอลิเมอร์จะมีค่าความถี่ของการคลายสนามน้อยกว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีผลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้ในบางสภาวะ นั่นคือ มีการแปลงพลังงานไปเป็นความร้อนได้สูง และนำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal runaway) ในวัสดุได้ง่ายมีข้อสนับสนุนถึงความจริงอย่างหนึ่งที่ว่าของเหลว เช่น น้ำและมอนอเมอร์จะเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้ง หรือการบ่มวัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นของเหลวและมอนอเมอร์ นอกจากนี้ไมโครเวฟยังสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหารหรือเวชภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้เช่นกัน



ภาพ 2.2 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกกลไกการหมุนของทั้งสองข้อ

ที่มา : PÜSCHNER Microwave Power System

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความชื้นอิสระในอาหารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 78 เหตุนี้ เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุยอมทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุ ไดอิเล็กตริกหลายชนิดมาผสมกัน เกิดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนและยากต่อการอธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีกฎหลัก (Rules of thumb) สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.3.1 ความชื้นสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น

2.2.3.2 ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสีย (Dielectric loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์แต่ก็เป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับวัสดุหลาย ๆ ประเภท ซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์ จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อนด้วยเหตุที่การอบแห้งเกี่ยวข้องกับการไล่น้ำหรือสารละลายออกจากวัสดุ เมื่อเกิดการลดความชื้นทำให้ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์มีค่าลดลง โดยในหลาย ๆ กรณีที่น้ำถูกไล่ออกทำให้การทำความร้อนของตัววัสดุเองมีขีดจำกัดและกลายเป็นวัสดุที่สามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านของตัววัสดุไปได้ที่ระดับความชื้นต่ำ เช่น น้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างวัสดุ (Bound water) และน้ำอิสระ (Free water) ซึ่งอยู่ในรูพรุน (pore) ถ้าค่าความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content; M_c) จะพิจารณาน้ำดังกล่าวเป็นน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้าง (มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 10-40 เปอร์เซ็นต์) และจุดที่ค่าความชื้นสูงกว่าค่าความชื้นวิกฤต ก็จะพิจารณาน้ำให้เป็นอิสระ (ข้อสังเกต คือ ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์ของน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างจะมีค่าต่ำ เพราะน้ำประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่โดยอิสระ เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ

2.2.3.3 ความหนาแน่น โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุ จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลง ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย

2.2.3.4 อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในลักษณะที่ซับซ้อน โดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะแสดงว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์จะมีค่าต่ำและในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง จะไม่สามารถชี้ชัดได้ถึงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ด้วยเหตุที่ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิมีความสำคัญต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกและกระบวนการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอันตรกิริยาของคลื่นและวัสดุไดอิเล็ก-ตริกอย่างถ่องแท้ ยกตัวอย่างเช่น ไม้ที่มีค่าความชื้นระดับต่ำระดับหนึ่ง พบว่าค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจึงมีผลให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไม่เกิดการไหม้ได้ หากถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

2.2.3.5 ความถี่ (Frequency, Hz) ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุที่กระบวนการความร้อนในงานอุตสาหกรรมถูกจำกัดด้วยความถี่ที่คงที่อยู่แล้ว ตามมาตรฐาน ISM ทำให้วิศวกรถูกจำกัดการใช้งานในเรื่องของความถี่นี้

2.2.3.6 การนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าการนำไฟฟ้า คือ ความสามารถของวัสดุในการนำกระแสไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนสามารถที่จะเป็นผลกระทบหลักในการทำความร้อนและการอบแห้ง เนื่องจากผลของน้ำที่ถูกเคลื่อนย้ายออกสู่ภายนอกทำให้ความเข้มข้นของไอออนภายในที่สูงขึ้น

2.2.3.7 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ค่าการนำความร้อนมีบทบาทที่ลดลงในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก เมื่อเทียบกับกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีแบบ

เก่า อันเนื่องมาจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลทำให้ความเร็วในการทำความร้อนมีค่าสูงกว่าจนค่าการนำความร้อนมีผลกระทบระบบไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม มีบางกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีบทบาทหลัก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความลึกของวัสดุที่ต้องการทำความร้อนขึ้น ดังนั้นการนำความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่คลื่นทะลุเข้าไปไม่ถึง

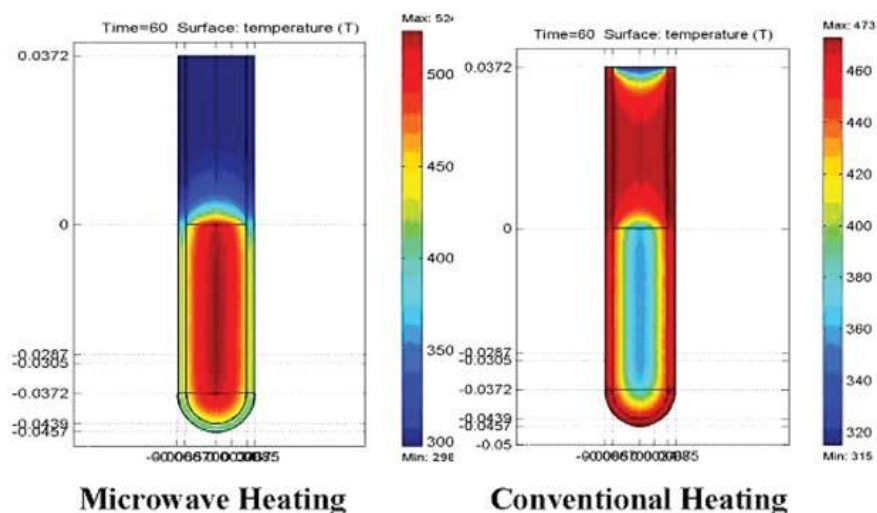
2.2.3.8 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) โดยปกตินักวิจัยและวิศวกรหรือผู้ออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ และไดอิเล็กทริกจะตัดตัวแปรนี้ทิ้งไปและมุ่งพิจารณาที่ค่าสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม โดยความเป็นจริง ค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นตัวแปรสำคัญเป็นสาเหตุให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการพิจารณาทั้งค่าไดอิเล็กทริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2.2.3.9 ค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power penetration depth) โดยมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ดังนั้นความลึกในการทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งหากคลื่นไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุไปได้ การทำความร้อนจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่นี้ผิวของวัสดุเท่านั้น

2.3 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กทริก หรือเรียกว่า การทำความร้อนไดอิเล็กทริก มีข้อได้เปรียบที่เด่นชัดเรื่องของการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในโมเลกุล จึงไม่มีผลกระทบในด้านลบของการถ่ายเทความร้อน และเป็นกระบวนการเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (Bulk heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุ ในขณะที่การให้ความร้อนระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายใน ซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่า ซึ่งเป็นข้อจำกัดในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนและการกระจายความร้อน การเพิ่มความร้อน หรืออัตราการเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรือนาทีในบางกระบวนการผลิต ในขณะที่วิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมใช้เวลาเป็นนาาที ชั่วโมงหรือเป็นวัน เพื่อให้กระบวนการดำเนินอย่างเสร็จสมบูรณ์ ยกตัวอย่างระบบการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมที่มีความเร็วสูงที่สุดซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่ คือ การให้ความร้อนพลาสติกบางชนิดที่สามารถทำได้ในอัตรา 30,000 องศาเซลเซียสต่อวินาทีในทางตรงกันข้าม หากต้องการทำความร้อนที่ระดับต่ำมาก สามารถทำได้ในอัตราเท่ากับ 1 องศาเซลเซียส ต่อ 100 วินาทีโดยตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อน ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ สมบัติไดอิเล็กทริก ลักษณะรูปร่าง ประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิงของคลื่นภายในควิตี (Coupling efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุและกำลังไมโครเวฟและไดอิเล็กทริกที่ป้อนเข้าไป รวมถึง

ตัวแปรอื่นที่มีสมบัติเทียบเท่ากัน พบว่า ความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Green technology) ซึ่งเป็นการทำความร้อนในการแปรรูปอาหารที่ไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วย และข้อจำกัดด้านวิศวกรรมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบดั้งเดิม (อรรถพลและฤทธิชัย (2551))



ภาพ 2.3 การกระจายความร้อนวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมเทียบกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
ที่มา : <http://www.rsc.org/chemistryworld>

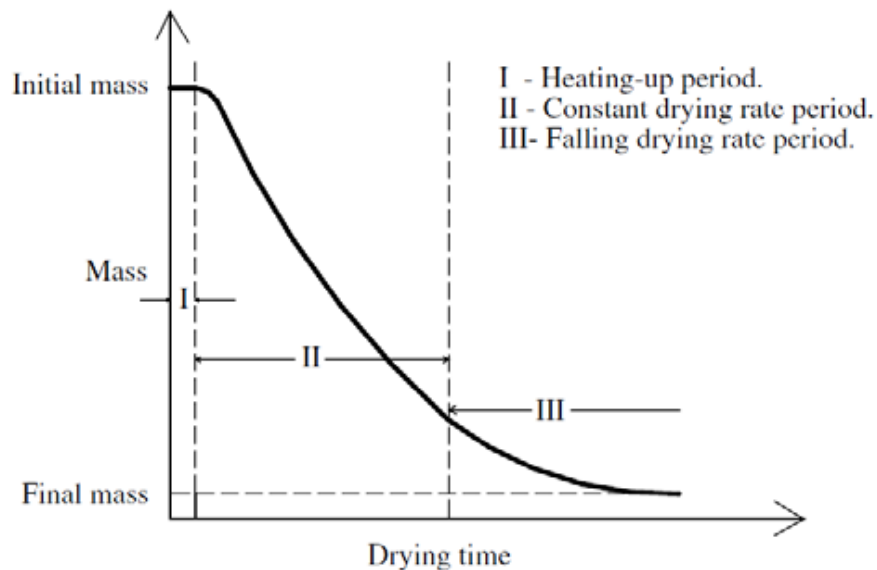
การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกมีประสิทธิภาพสูง (High efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามาก เมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์) โดยในการทำความร้อนด้วยวิธีนี้พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศผนังของเตา สายพานลำเลียงหรือส่วนอื่น ๆ ของกระบวนการแปรรูปอันจะนำไปสู่การประหยัดพลังงาน จากข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก จึงถูกนำมาช่วยปรับปรุงกระบวนการแปรรูป เช่น ปฏิกริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ ซึ่งได้แก่ ปฏิกริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (Melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพไป (Protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลา-ติไนเซชัน (Starch gelatinization)

อย่างไรก็ตาม การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก มีข้อจำกัดในเรื่องของความสามารถของการทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy penetration) หรือค่าความลึกในการทะลุทะลวง (penetration depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power penetration depth) ซึ่งมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heating) ค่าความลึกในการทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพของระบบต่ำ เนื่องจากมีค่า Penetration depth ในช่วง 12.2-32.8 เซนติเมตรเท่านั้น (เทียบเท่าความยาวคลื่นไมโครเวฟที่ 915 และ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์) ดังนั้นองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (FDA) และกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา (USDA) จึงไม่ยอมรับการ pasteurization และการแปรรูปแบบ Ultra-high temperature process (UHT) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกในการอบแห้งนั้น เกิดข้อได้เปรียบเชิงวิศวกรรมและการผลิตอาหารที่เกิดคุณภาพสูงอย่างมาก (Advantages of microwave and dielectric drying) สำหรับกลไกของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม โดยวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมจะเห็นว่า มวลความชื้นสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกในช่วงเวลาที่เริ่มต้น และน้ำที่คงเหลืออยู่จะค่อยๆ แพร่กระจายไปยังผิวถึงแม้ว่าศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการทำความร้อน จะอยู่ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลให้มีการถ่ายเทพลังงานไปยังภายในเนื้อวัสดุ ในขณะที่ศักยภาพของการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น จะอยู่ที่ความแตกต่างของความเข้มข้นของมวลภายในที่อยู่ในสภาวะเปียกและภายนอกที่อยู่ในสภาวะแห้งกว่า เช่นนี้แล้วกระบวนการไล่ความชื้นก็จะช้า อันเนื่องจากข้อจำกัดของอัตราการแพร่จึงต้องการอุณหภูมิภายนอกที่สูงเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ในขณะที่การเกิดความร้อนจากภายในของระบบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก พบว่า การถ่ายเทมวลความชื้นในช่วงต้นจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะการเกิดไอน้ำอย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นซึ่งถูกทำให้เป็นไอ ก่อนที่จะออกจากวัสดุ ซึ่งหากวัสดุมีความชื้นเริ่มต้นสูง จะมีผลให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อันมีผลต่อเนื่องให้ของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุ ภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของความดันรวม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (Pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงดันไอกระทำทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าโดยตรง โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการให้ความร้อนเข้าไปอีก ซึ่งกรณีนี้อาจเป็นเหตุให้เกิดการแข็งตัวของผิวหรือผิวมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป

2.4 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Idris และคณะ (2001) ได้อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงมวลของผลผลิตเกษตรในระหว่างกระบวนการอบแห้งเป็น 3 คาบเวลา (ภาพที่ 2.4) ได้แก่ คาบเวลาที่ 1 เกิดปรากฏการณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนให้ผลผลิตเกษตรจนถึงอุณหภูมิของการระเหย หรือเรียกว่าการให้ความร้อนช่วงต้น (Heating up period) จากนั้นน้ำอิสระบริเวณผิวหน้าของผลผลิต จะเกิดการระเหยโดยถ่ายเทมวลไปยังตัวกลางทางความร้อน เมื่อน้ำหรือความชื้นที่ผิวลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในเซลล์จะเคลื่อนที่มาแทนที่ผิวหน้า เพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไป โดยที่อัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นใน เรียกคาบเวลานี้ว่า คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) ซึ่งจะดำเนินต่อเนื่องไปจนกระทั่งค่าความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content) ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ มีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นในเกิดเป็นชั้นของความแห้ง (Drying front) กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) กลไกการถ่ายเทมวลของการอบแห้งด้วยลมร้อน จะเริ่มจากการถ่ายเทพลังงานจากลมร้อน เพื่อทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าเข้าสู่อุณหภูมิระเหย ส่วนความชื้นที่อยู่ภายในจะค่อย ๆ แพร่กระจายมายังผิว โดยอัตราการแพร่กระจายความชื้นจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อน และความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่อความชื้นลดลงจนเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติและชั้นความแห้งเกิดขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานจะลดต่ำลงอย่างมาก



ภาพ 2.4 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง

ที่มา : Idris และคณะ (2001)

การอบแห้งที่มีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายในผลผลิต ส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นลดต่ำลงต้องใช้เวลายาวนานในการระเหยความชื้นจากชั้นในโครงสร้างเซลล์จำเป็นต้องเพิ่มพลังงาน

มากขึ้น ซึ่งกลไกดังกล่าวเป็นข้อจำกัดของการอบแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเกิดการเหนี่ยวนำความร้อนของน้ำอิสระที่ชั้นผิว และภายในโครงสร้างเซลล์เกิดเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดเป็นไอน้ำก่อนที่ความชื้นจะออกจากวัสดุ โดยเฉพาะหากผลผลิตเกษตรมีความชื้นเริ่มต้นสูงทำให้เกิดความแตกต่างของความดันเฉพาะส่วนของไอสูงมากซึ่งมีผลต่อเนื่องทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ออกจากวัสดุไปอย่างรวดเร็ว กรณีนี้เรียกว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (Pumping effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่แรงดันไอน้ำทำให้ของเหลวเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าเซลล์โดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ (ผดุงศักดิ์, 2551) การอบแห้งผลผลิตเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟถูกเผยแพร่มาตั้งแต่ พ.ศ.2503 เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำให้เกิดความร้อนภายใน จึงช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เป็นอย่างดี และถูกนำมาใช้ออบแห้งผลผลิตเกษตรชนิดต่าง ๆ เช่น องุ่น แครอท สตรอว์เบอร์รี แอปเปิล ช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งได้มากถึงร้อยละ 25-90 เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อน (Wang และคณะ, 2011) นอกจากนี้ผลผลิตเกษตรที่อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ยังมีคุณภาพในด้านคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (Sensory quality) สี อัตราการคืนตัว (Rehydration ratio) และ อัตราการหดตัว (Shrinkage) ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิม

Arslam และ Özcan (2010) ได้เปรียบเทียบสมบัติของแผ่นหัวหอมอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (210 วัตต์) ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 19.2 นาที น้อยกว่าการอบแห้งวิธีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ถึง 53.13, 46.88 และ 34.38 เท่า ตามลำดับ และมีปริมาณของสารประกอบฟีนอล (Phenolic content) เท่ากับ 1,664 และ 1,624 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ของตัวอย่างในตัวอย่างแผ่นหัวหอม เมื่ออบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 210 และ 700 วัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยลมร้อน (50 และ 70 องศาเซลเซียส) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 472, 512 และ 780, 624 มิลลิกรัม/100 กรัม ของตัวอย่างตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Maskan (2001) ซึ่งพบว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (270 วัตต์) มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (60 องศาเซลเซียส) ถึง 65 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน คุณภาพสีของตัวอย่างแผ่นกึ๊วสไลด์ จึงมีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเขียวดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อน จากรายงานวิจัยที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถลดเวลาในการอบแห้ง จึงช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง อย่างไรก็ตาม การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียว จะมีข้อจำกัดในเรื่องความยุ่งยากในการทำงานของระบบและต้นทุนพลังงานตลอดจนความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ฤทธิชัย (2558) ศึกษาผลกระทบของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความหนาแน่นของกำลังงานไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของรังไหม ในระหว่างการอบแห้งและการทำลายหนอนไหม จากผลการศึกษา พบว่า ความชื้นเริ่มต้นของรังไหมสดเท่ากับ 1.77 ± 0.02 กรัมของความชื้นที่ระเหยต่อน้ำหนักแห้ง (g/g dry solid) ใช้เวลาในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจากความชื้นเริ่มต้น เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.06 ± 0.01

กรัมของความชื้นที่ระเหยต่อน้ำหนักแห้งใช้เวลา 620, 480, 370, 245 วินาที ที่ระดับกำลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 272.49±5.83, 408.73±9.08, 550.31±4.92 และ 828.14±14.77 วัตต์ ตามลำดับ การอบแห้งรังไหมด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความชื้นเท่ากับ 0.79-0.91 กรัมของความชื้นที่ระเหยต่อน้ำหนักแห้ง มีประสิทธิภาพในการทำลายหนอนไหมได้ 100 เปอร์เซ็นต์จากผลการศึกษาพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำลายหนอนไหมประสบความสำเร็จอย่างมาก เนื่องจากการเหนี่ยวนำความร้อนจากภายในตัวหนอนไหมที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก โดยไม่ทำลายรังไหมที่มีความเป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้า

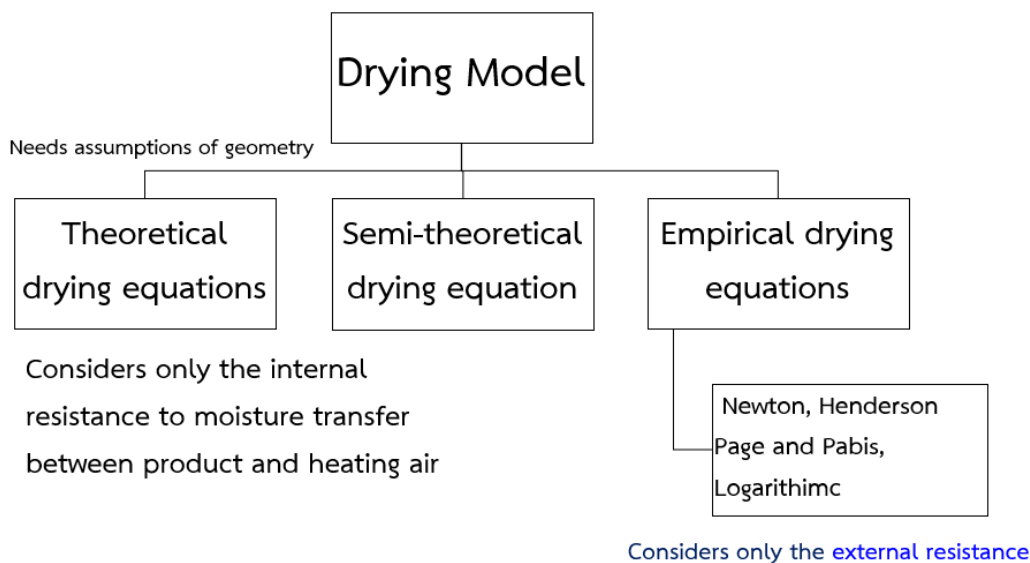
การอบแห้งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของอาหารซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก หากต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งอาหาร หรือวัสดุชีวภาพจะต้องทำการทดลองหลายครั้ง เพื่อหาข้อมูลผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง รวมทั้งเกิดความยุ่งยากในการทดลอง ดังนั้นการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการอบแห้งและแบบจำลองการอบแห้ง จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้ง ปัจจุบันแบบจำลองการอบแห้งได้นำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้ง และศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่าง ๆ เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมแทนการทดลองจริง (สีกกมน, 2555) คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นนวัตกรรมการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถสร้างความร้อนภายในอาหารหรือวัสดุชีวภาพได้ดี เนื่องจากไม่มีผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ และสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 7-10 เท่า จึงช่วยรักษาคุณภาพและลดอัตราการสูญเสียสารอาหารได้เป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าการอบแห้งสาหร่ายเตา (*Spirogyra* sp.) ผักขม (Spinach) กระเจี๊ยบเขียว (Okra) ข้าวเปลือก (Paddy rice) ใบสะระแหน่ (Mint leaves) และกีวี่แผ่น (Kiwifruits) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถช่วยเร่งอัตราการอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และช่วยลดการสูญเสียสารอาหาร ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จึงเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการพัฒนาการอบแห้ง เนื่องจากช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง และรักษาคุณภาพของอาหารหรือวัสดุชีวภาพเป็นอย่างดี

ปองพล และฤทธิชัย (2555) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดห้องปฏิบัติการ โดยติดตั้งเครื่องชั่งที่ฐานวางตู้ไมโครเวฟและพัดลมดูดอากาศ เพื่อใช้สำหรับการศึกษาผลของระดับกำลังงานรวม (164, 465, 605 และ 752 วัตต์) และปริมาณน้ำหนักรีดเริ่มต้นของ (20, 30, 40 และ 50 กรัม) เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้ง และปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของใบกะเพราในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ บันทึกข้อมูลของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุก 30 วินาทีโดยในระหว่างบันทึกน้ำหนักของใบกะเพรাদำเนินการหยุดการทำงาน เพื่อหยุดระบบเหนี่ยวนำคลื่นไมโครเวฟ และระบบการดูดอากาศเป็นเวลา 5 วินาที เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องชั่ง และเมื่อบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเสร็จ ดำเนินการเปิดระบบเหนี่ยวนำคลื่นไมโครเวฟ และระบบดูดอากาศเพื่อให้เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดห้องปฏิบัติการทำงานต่อไป และนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของใบกะเพราที่ระดับกำลังงานรวมและปริมาณน้ำหนักรีดเริ่มต้น นำไป

วิเคราะห์หาแบบจำลองการอบแห้งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น การใช้ฟังก์ชัน liner regression เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) เพื่อให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลองสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear model) และแบบจำลองพหุนาม (polynomial model) ต่อไป

2.5 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

ปัจจุบันได้แบ่งประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สมการเชิงทฤษฎี (Theoretical drying equation), และสมการกึ่งทฤษฎีการอบแห้ง (Semi- theoretical drying equation) และสมการเอมพิริคัล (Empirical drying equation) โดยสมการเชิงทฤษฎีเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบอนุกรมอนันต์สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวอันเนื่องจากการแพร่ของมวลบนผิวรูปทรงภายในวัสดุ (Surface diffusion) และเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างภายในของเซลล์มายังผิววัสดุ แต่เนื่องจากการหาผลเฉลยของสมการเชิงทฤษฎีนั้นมีความซับซ้อนมากเกินไป ดังนั้นจึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการกึ่งทฤษฎีการอบแห้ง ซึ่งเป็นพจน์แรกของอนุกรมอนันต์ของแบบสมการเชิงทฤษฎี และสมการเอมพิริคัลที่เกิดจากการทดลองในแต่ละสภาวะการอบแห้ง (ภาพ 2.5)



ภาพ 2.5 ไดอะแกรมประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

ที่มา : ฤทธิชัย อัครวราชันย์ (2564). พื้นฐานเทคโนโลยีการอบแห้งในงานวิศวกรรมอาหาร.

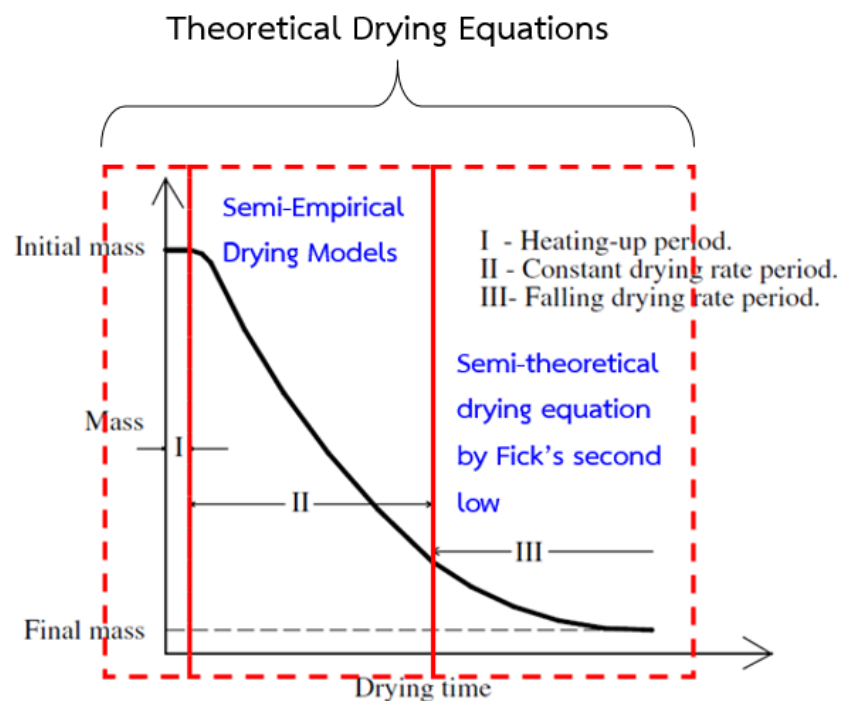
เชียงใหม่. สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 281 หน้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการเชิงทฤษฎีจำนวนมากซึ่งสามารถใช้อธิบายการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) ภายในวัสดุระหว่างการอบแห้งในดังนั้น ผู้อ่านจำเป็นต้องเข้าใจกลไกการถ่ายเทมวลสารความชื้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูน และการถ่ายเทความชื้นที่ผิววัสดุกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดขึ้นในคาบเวลาเดียวกัน ดังนั้นแบบจำลองการแพร่ของของเหลวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นภายในวัสดุ การเคลื่อนที่ถ่ายเทมวลสารความชื้นภายในวัสดุระหว่างการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน และอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็ก การเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นบริเวณที่ต่างๆ ในวัสดุ การเคลื่อนที่ของของเหลวอันเนื่องมาจากการแพร่ของของเหลวบนผิวพูนภายในวัสดุ การเคลื่อนที่ของไอน้ำในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันไอน้ำ และการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือไอน้ำอันเนื่องมาจากผลต่างของความดันอุทกสถิตภายในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีที่อัตราการระเหยของความชื้นกลายเป็นไอน้ำภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไอน้ำภายในวัสดุออกมาถึงผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติยังไม่สามารถระบุได้ว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุนั้นเป็นไปได้โดยกลไกใดกลไกหนึ่งอย่างชัดเจน

Idris และคณะ, (2001) อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงมวลของผลผลิตทางการเกษตรในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยแบ่งออกเป็น 3 คาบเวลา (ภาพ 2.6) ได้แก่ คาบเวลาที่ 1 เกิดปรากฏการณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนให้ผลผลิตทางการเกษตรจนถึงอุณหภูมิของตัวกลางในการเลือกเปลี่ยนความร้อน เรียกว่าการให้ความร้อนช่วงต้น (Heating up period) จากนั้นน้ำอิสระบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนเกิดการระเหย และถ่ายเทมวลไปตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อน้ำหรือความชื้นที่ผิวลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในเซลล์จะเคลื่อนที่มาแทนที่ผิวหน้าเพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไป โดยที่อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้นใน เรียกคาบเวลานี้ว่า คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) จนกระทั่งค่าความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content) ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในโครงสร้างเซลล์ชั้น เกิดเป็นชั้นของความแห้งเกิดขึ้น (Drying front) กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ขณะที่กลไกการถ่ายเทมวลของการอบแห้งด้วยลมร้อน จะเริ่มจากการถ่ายเทพลังงานจากลมร้อนให้ค่าความชื้นที่ผิวหน้าจะถึงอุณหภูมิระเหยและน้ำที่คงเหลืออยู่จะค่อยๆ แพร่กระจายไปสู่ผิว ซึ่งอัตราการแพร่กระจายของน้ำจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งเป็นผลให้มีการถ่ายเทพลังงานไปยังภายในเนื้อวัสดุโดยมีความชื้นเป็นตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน แต่เมื่อความชื้นเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ และชั้นของความแห้งเกิดขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานลดน้อยต่ำลงมาก ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการเชิงทฤษฎี (Theoretical drying equation) มีข้อได้เปรียบทางวิศวกรรมสามารถใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทมวลสารความชื้นได้ทั้ง 3 ช่วงคาบเวลา โดยขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของวัสดุพูน (วัสดุทางการเกษตร) โดยแบ่งรูปทรงเรขาคณิตเช่น แผ่นเรียบ (Slab) ทรงกลม (Sphere) และทรงกระบอกยาวอนันต์ (Infinitely long cylinder) แต่มีข้อเสียเปรียบเนื่องจากอยู่ในรูปอนุกรมอนันต์ส่งผลให้การวิเคราะห์ผลเฉลยมี

.....

ขั้นตอนที่ซับซ้อน สมการกึ่งทฤษฎีการอบแห้ง (Semi- theoretical drying equation) เป็นการพจน์แรกของสมการเชิงทฤษฎีและสามารถอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงมวลความชื้น และการถ่ายเทความมวลความชื้นที่วัสดุพรมเข้าสู่คาบเวลาให้อัตราการอบแห้งลดลงได้ดี และสมการเอมพิริคัล (Empirical drying equation) เป็นสมการที่เกิดจากการทดลอง โดยความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการสมการเชิงทฤษฎีการอบแห้ง สมการกึ่งทฤษฎีการอบแห้ง และสมการเอมพิริคัลในระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือความชื้นของวัสดุพรมในระหว่างการอบแห้งมีรายละเอียดตามที่แสดง ภาพ 2.6 อธิบายหลักการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการเอมพิริคัลเป็นอันดับแรกเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพ 2.6 เส้นโค้งความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างการอบแห้ง

ที่มา : ฤทธิชัย (2564)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย สถานที่ดำเนินงานวิจัย

โครงการวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร นี้ได้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผักชีในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ 4 ระดับกำลังงาน แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์หาระบบกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สารมาตรฐานเป็นตัวทดสอบ และหาค่าความชื้นเริ่มต้นของใบผักชีด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC (2010) ขั้นตอนที่สองของการทดลองทดสอบอบแห้งใบผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟจากความชื้นเริ่มต้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก นำข้อมูลวิเคราะห์หาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและเวลา การศึกษาวิเคราะห์ในขั้นตอนที่สาม ได้แก่ การแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาจะประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Wang and Singh และ Logarithmic โดยการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้งผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลง

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย (Material and Method)

3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 ใบผักชี จำนวน 20 กิโลกรัม

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง (analytical balance, Sartorius model CP 224S)

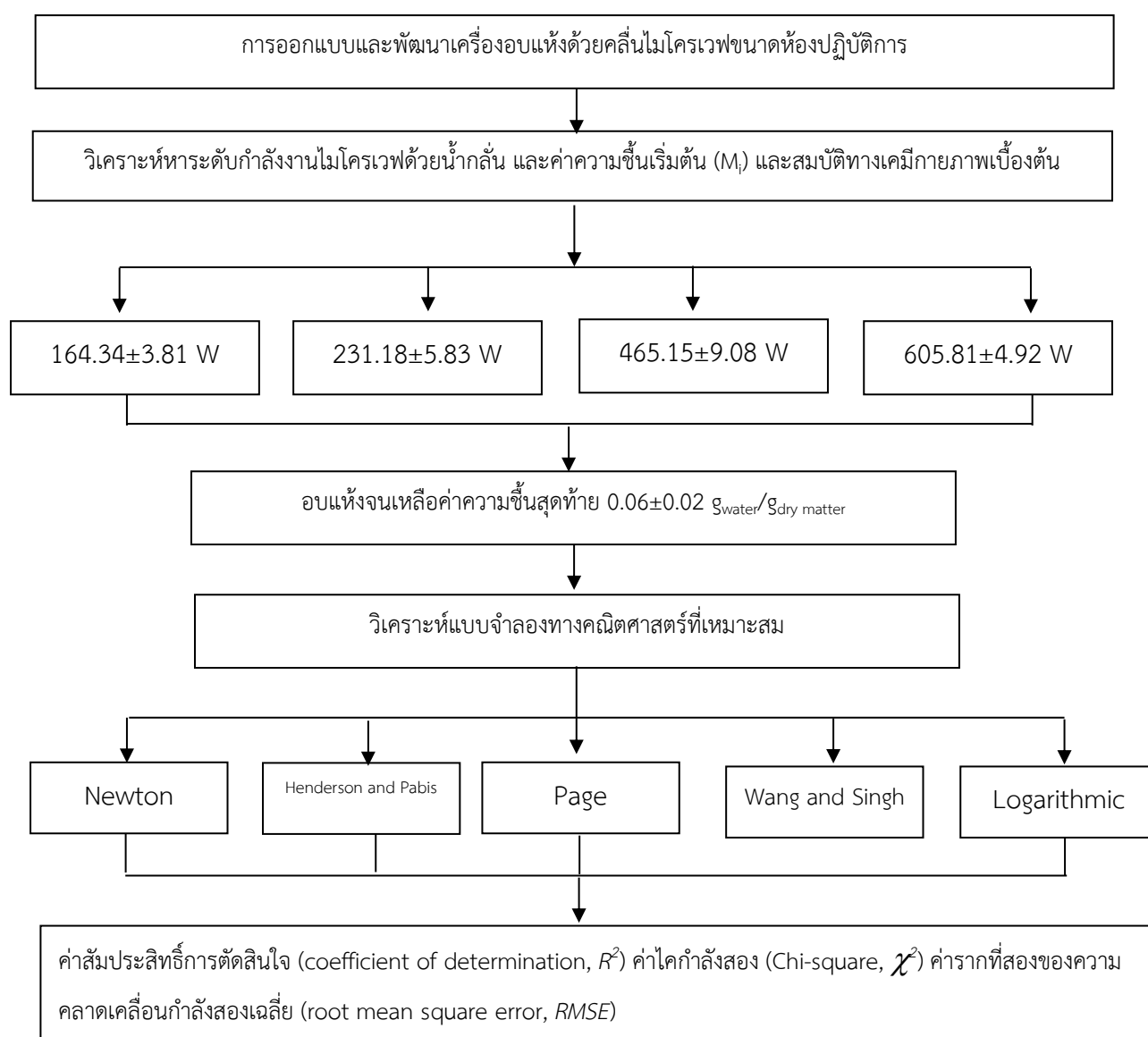
3.2.2 ตู้อบแห้งลมร้อน (Hot air oven, Memmert model UF 110)

3.2.3 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (water activity meter)

3.2.4 เครื่องวัดสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

3.2.5 เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

โครงการวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร เรื่องคุณลักษณะการอบแห้งของใบผักชี (*Coriandrum sativum* L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีแผนการดำเนินโครงการวิจัยตามแผนผัง ภาพ 3.1 โดยแบ่งเป็นการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดห้องปฏิบัติการ จากนั้นทดสอบอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ จำนวน 4 ระดับกำลังงาน ได้แก่ เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ โดยวิธีการวัดกำลังงานไฟฟ้าด้วยสารมาตรฐาน (น้ำกลั่น) ตามที่แสดงในหัวข้อ 3.3 จากนั้นทดสอบอบแห้งใบผักชี และวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบผักชี ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพ 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิศวกรรม

3.2 การวิเคราะห์ค่าพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้พัฒนาโดยหลักสูตรวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ใช้เตาไมโครเวฟขนาด 800 W (Panasonic model: NN-S235WF) วางบนฐานเหล็กโดยที่ฐานอลูมิเนียมที่ติดตั้งเครื่องซึ่งระบบดิจิทัล (Sartorius model: CP3202S) เพื่อบันทึกปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ทำการตรวจวัดระดับการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟ (P) โดยใช้ น้ำกลั่นจำนวน 1,000 กรัม ในปิกรอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร (Pyrex No.1000) แล้วให้ความร้อนโดยเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟต่างๆ แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพาที่มีความแม่นยำในระหว่างการวัดอุณหภูมิเท่ากับ ± 0.1 องศาเซลเซียส (LD Didactic GmbH model: 524-0673) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่า P โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการที่ (3.1) (Wei Cui *et al.*, 2004; Ozkan *et al.*, 2007; Maskan, 2001)

$$P = \frac{mC_p\Delta T}{t} = \frac{4,187\Delta T}{t} \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ การดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (W) และ m คือ น้ำหนักของน้ำ (1,000 กรัม), C_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ มีค่าเท่ากับ 4.187 kJ/g K, ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำกลั่นก่อนและหลังการได้รับความร้อนด้วยคลื่น (°C หรือ K) และ t คือ เวลาที่น้ำกลั่นได้รับความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (60 วินาที) โดยเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวสามารถปรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ 4 ระดับ คือ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อทราบระดับการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ทำการศึกษาการอบแห้งผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟ



ภาพ 3.2 การวัดค่ากำลังงานไมโครเวฟด้วยสารมาตรฐาน



(ก)

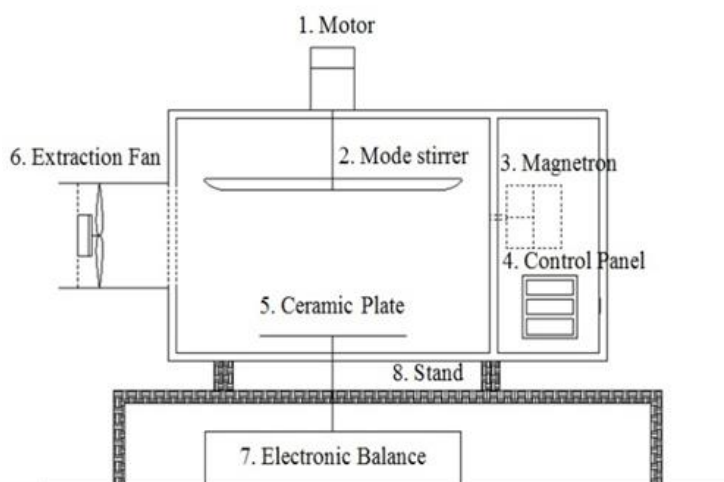


(ข)

ภาพ 3.3 การวิเคราะห์กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (ก่อนและหลัง) การให้ความร้อนที่ระดับกำลังงานต่างๆ

(ก) การเตรียมน้ำกลั่นเพื่อวัดกำลังขนาดของคลื่นไมโครเวฟ

(ข) การวัดอุณหภูมิและการกระจายความร้อน



ภาพ 3.4 แผนภาพเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.3 การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้น

ตัวอย่างใบผักชีที่นำมาศึกษาซื้อจากตลาดแม่กาดเก็บมาจากบ้านนาคูหา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอ แก่งน้อย จังหวัดเชียงใหม่ โดยเก็บตัวอย่างผักชีจำนวน 10 กิโลกรัม นำมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปบรรจุ ในถุงซิปล็อคนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สาหร่ายเตาเกิดการ ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Özbek and Dadali, 2007; Ozkan และคณะ, 2007 และ Assawarachan และคณะ, 2013 ก่อนนำไปศึกษาในขั้นตอนการวิเคราะห์ ค่าความชื้นเริ่มต้น การวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นของสาหร่ายเตา โดยนำใบผักชีจำนวน 2.5 กรัม ใส่ในถ้วย อะลูมิเนียมขนาด 3 ออนซ์ ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert model: 500/108I) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 2010) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วย เครื่องชั่งดิจิตอล (Sartorius model: CP 3202S) นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักสาหร่ายเตาก่อน และหลังการ อบแห้งมาคำนวณหาค่าความชื้นของนำใบผักชี



(ก)



(ข)

ภาพ 3.5 การเตรียมตัวอย่างใบผักชี

(ก) – (ข) แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างใบผักชี



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

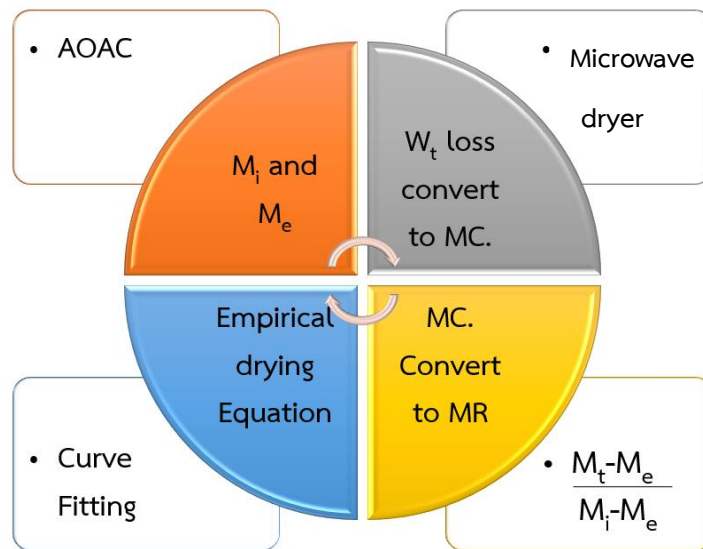
ภาพ 3.6 ภาพถ่ายขั้นตอนการวิเคราะห์หาความชื้นด้วยตามมาตรฐาน AOAC (2010)

(ก)-(ฉ) แสดงขั้นตอนการนำตัวอย่างการอบแห้งเพื่อหาความชื้นด้วย AOAC (2010)

3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของอาหารซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เป็นจำนวนมาก หากต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจะต้องทำการทดลองหลายครั้งเพื่อหาข้อมูลผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้ในการทดลอง รวมทั้งเกิดความยุ่งยากในการทดลอง ดังนั้นการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการอบแห้ง และแบบจำลองการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้ง ปัจจุบันแบบจำลองการอบแห้งได้นำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการตลอดจนการทดลองและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมแทนการทดลองจริง (สักรกมน, 2555) การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งอาหารในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของอาหารเมื่อเทียบเวลาในการอบแห้ง ข้อมูลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นกับเวลาที่เกิดขึ้น ข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งมีความสำคัญ เพราะเป็นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของวัสดุกับเวลา ดังนั้นนิสิตและผู้อ่านตำราเทคโนโลยีการอบแห้งนี้จำเป็นต้องเข้าใจขั้นตอนการหาเส้นโค้งความชื้นในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความชื้นน้ำหนักเปียก และรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความชื้นน้ำหนักแห้ง ขั้นตอนการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งอาหาร ในรูปแบบสมการเอมพิริคัล (Empirical drying equation) สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน เรียงลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์หาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีการค่าความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) และค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, M_e) ด้วยตามมาตรฐานการวิเคราะห์ค่าความชื้นของ Association of Analytical Communities (AOAC, ที่มา: <http://www.aoac.org>) หรือ American Association of Cereal Chemists (AACC, AOAC, ที่มา: <http://www.aaccnet.org>) และการวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ด้วยวิธีสถิตย (static desiccator isotherm method), วิธีจลน์ (dynamic sorption method) และวิธีการวัดจุดกลั่นตัวของน้ำ (dynamic dewpoint isotherm (DDI) method)



ภาพ 3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการเอมพิริคัล

เมื่อ M_i , M_e , M_t คือความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสมดุล และความชื้นที่เวลาใดๆ ในขณะที่ W_t loss คือน้ำหนักที่สูญเสียจากการระเหยในระหว่างการอบแห้ง และ MR คืออัตราส่วนความชื้น (ตัวแปรไร้มิติ)

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากที่อยู่ค่าความชื้นเริ่มต้น (M_i) และค่าความชื้นสมดุล (M_e) จากขั้นตอนที่ 1 แล้วเริ่มศึกษาค่าเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงความชื้น (Drying curve) ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน ที่มีเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปทางทิศทางเดียว (One-dimensional moisture movement) โดยนำวัสดุพูนเข้าเครื่องอบแห้งโดยติดตั้งเครื่องชั่งน้ำหนักบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

ขั้นตอนที่ 3 นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงคำนวณเป็นความชื้น และสร้างรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เวลาคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เป็นค่าความชื้นของวัสดุพูนเพื่อสร้างเส้นโค้งความเปลี่ยนแปลงความชื้น จากนั้นความนำค่าความชื้นที่เวลาใดๆ คำนวณในรูปอัตราส่วนความชื้น (MR)

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้ข้อมูลความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (MR) ที่เวลาใดๆ นำมาหาข้อมูลด้วยการปรับเส้นโค้งเพื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอมพิริคัลรูปแบบต่างๆ โดยตำราวิชาการเล่มนี้ ได้ยกตัวอย่างการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอมพิริคัล ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

น้ำฝน และฤทธิชัย (2558) ได้ศึกษาแบบจำลองการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของสาหร่ายเตา โดยหาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC (2010) โดยนำตัวอย่างจำนวน 2.5 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 ออนซ์ ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น 500/108I) ที่อุณหภูมิ

105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล รุ่น DW88 นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความชื้นดังแสดงในสมการที่

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{M_t}{M_i} \quad (3.2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_t , M_i , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุลตามลำดับ ซึ่งในการศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ค่าความชื้นสมดุลจะสามารถพิจารณาให้มีความเท่ากับศูนย์

แบบจำลองเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของอาหารและวัสดุชีวภาพชนิดต่างๆ ทั้งนี้ไม่มีกฎเกณฑ์หรือหลักการใดที่อาจนำมาใช้สรุปได้ว่าแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพชนิดหนึ่งๆ ภายใต้กระบวนการและสภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ อย่างไรก็ตาม มีรายงานจำนวนมากที่ระบุว่าแบบจำลองของ Page รวมทั้ง Page แบบปรับปรุง และของ Midilli และคณะ สามารถใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของอาหารและวัสดุชีวภาพหลากหลายชนิดได้เป็นอย่างดี เช่น รายงานของ Aghbashlo และคณะ , Arslan และ Özcan , Guiné และคณะ , Doymaz และ Göl, Doymaz และ Kocayigit และ Doymaz อย่างไรก็ตาม ควรทดสอบแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น โดยการคำนวณและวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์และค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองใดเหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองกระบวนการอบแห้งที่ต้องการเสมอ แบบจำลองเอมพิริคัลที่นิยมใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของวัสดุพรมมีรายละเอียด

การวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองการอบแห้งผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีปรับเส้นโค้ง และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (R^2) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นดัชนีบ่งบอกความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในสมการที่ (3.3)-(3.4)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n_p} \quad (3.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (3.4)$$

เมื่อค่า $MR_{exp, i}$ และ $MR_{pre, i}$ เป็นค่าอัตราส่วนความขึ้นจากการทดลอง และค่าอัตราส่วนความขึ้นจากการทำนายของแบบจำลองการอบแห้ง เทคนิคการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเทคนิคดังกล่าว เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยต่าง ๆ สอดคล้องกับผลการวิจัยของพิชิต และคณะ (2556) Assawarachan และ Noomhorm (2011) และ Assawarachan และ Kalayanamitr (2015)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งใบผักชี ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรที่นิยมบริโภคในประเทศไทย ที่สามารถนำไปต่อยอดในอบแห้งเพื่อนำไปสกัดในอุตสาหกรรมอาหารเสริมและยาได้ ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง เพื่อหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสม ตลอดจนสถานะการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเบื้องต้นของใบผักชี เช่น ค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสมดุลที่สถานะการอบแห้งแบบต่างๆ ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2010) จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของคุณลักษณะการอบแห้งใบผักชีหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น หรืออัตราการถ่ายเทมวลสารออกจากกระบวนการในระหว่างการอบแห้ง โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในส่วนที่สองนี้จะถูกนำไปศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการเอมพิริคัล และสมการกึ่งทฤษฎีของวัตถุทางการเกษตรที่มีรูปร่างเป็นแผ่นบาง เพื่อหาสมการในการจำลองสถานะการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของผักชีอบแห้ง

4.1 คุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของใบผักชี

4.1.1 ความชื้นเริ่มต้น และค่าความชื้นสมดุลที่สถานะการอบแห้งต่าง ๆ

การวิเคราะห์คุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของใบผักชี จะทำการศึกษาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีมาตรฐาน (AOAC, 2005) โดยการนำใบผักชีสดจากตลาดมาตัดใบเพื่อแยกใบและคัดขนาด นำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง บรรจุในถุงซิปล็อกแล้วนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ใบผักชีสดเกิดการปรับสภาพความชื้นให้เข้าสู่สถานะสมดุล เป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างของผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพก่อนนำไปศึกษาค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสมดุลที่สถานะการอบแห้งแบบต่างๆ จากนั้นนำไปผักชีสด ไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีปรับสภาพสมดุลความชื้นของวัสดุทางการเกษตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dadali และคณะ (2007), Demirhan และ Özbek (2009) และ Therdthai และ Zhou (2009) และการหาความชื้นสมดุลจะใช้วิธีเชิงพลวัต (Dynamic methods) ซึ่งเป็นวิธีการปล่อยให้ใบผักชีสัมผัสกับอากาศแวดล้อม (55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วลมคงที่) วิธีนี้ใบผักชีจะเข้าสู่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมจึงเหมาะกับวัสดุที่มีความชื้นสูงอย่างใบผักชี การหาค่าความชื้นเริ่มต้น จากดำเนินการตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2005) และมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองตามภาพที่ 3.1 – 3.2 (บทที่ 3) โดยใช้ตัวอย่างใบผักชีจำนวน 2 กรัม และใช้ถ้วยอะลูมิเนียมขนาด 3 ออนซ์ ทำการทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นจำนวน 30 ตัวอย่าง จากผลการทดลองพบว่าความชื้นเริ่มต้นของใบผักชีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 83.96 ± 2.41 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) และความชื้น

.....

สมดุลของใบผักชีอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ระดับความเร็วลมคงที่ 0.32 เมตรต่อวินาที มีค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 5.54 ± 0.09 , 5.39 ± 0.02 และ 5.18 ± 0.04 เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) ที่อุณหภูมิ 55, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภาพที่ 4.1- 4.4 แสดงวิธีการหาค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสมดุลตามมาตรฐาน AOAC (2005) ในขณะทำการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) ที่ความดันบรรยากาศ และคลื่นไมโครเวฟ ระบบสุญญากาศ (Microwave vacuum drying) ที่ระดับความดันสุญญากาศ 20 กิโลปาสคาล ที่ระดับพลังงาน 335, 400 และ 545 วัตต์ ค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่ใบผักชีสูง ส่งผลให้ใบผักชีเกิดระเหยน้ำในโครงสร้างเนื้อเยื่อชั้นในและน้ำอิสระที่ผิวหน้าอย่างรุนแรง ค่าความชื้นสมดุลของใบผักชีในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ น้ำฝน และฤทธิชัย (2558), Dadali และคณะ (2007), Demirhan และ Özbek (2009), Therdthai และ Zhou (2009), Alibas (2007) และ Evin (2012) ซึ่งศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพ ชนิดต่างๆ



(ก)



(ข)

ภาพ 4.1 ใบผักชีที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) –(ข) ตัวอย่างใบผักชีสด

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ ของใบผักชีสามารถอธิบายจากค่าอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา โดยอบแห้งใบผักชีจากความชื้นเริ่มต้น 83.96 ± 2.41 เปอร์เซ็นต์ความชื้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก จนเหลือความชื้น 6 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน, อบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ และอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ซึ่งอัตราส่วนความชื้นของใบผักชีระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ หาได้ตามสมการ 4.1 ดังที่แสดงในสมการต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (4.1)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น (ไร้หน่วย)
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก
	M_{in}	คือ ความชื้นเริ่มต้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก
	M_t	คือ ความชื้น ณ เวลาใด ๆ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก

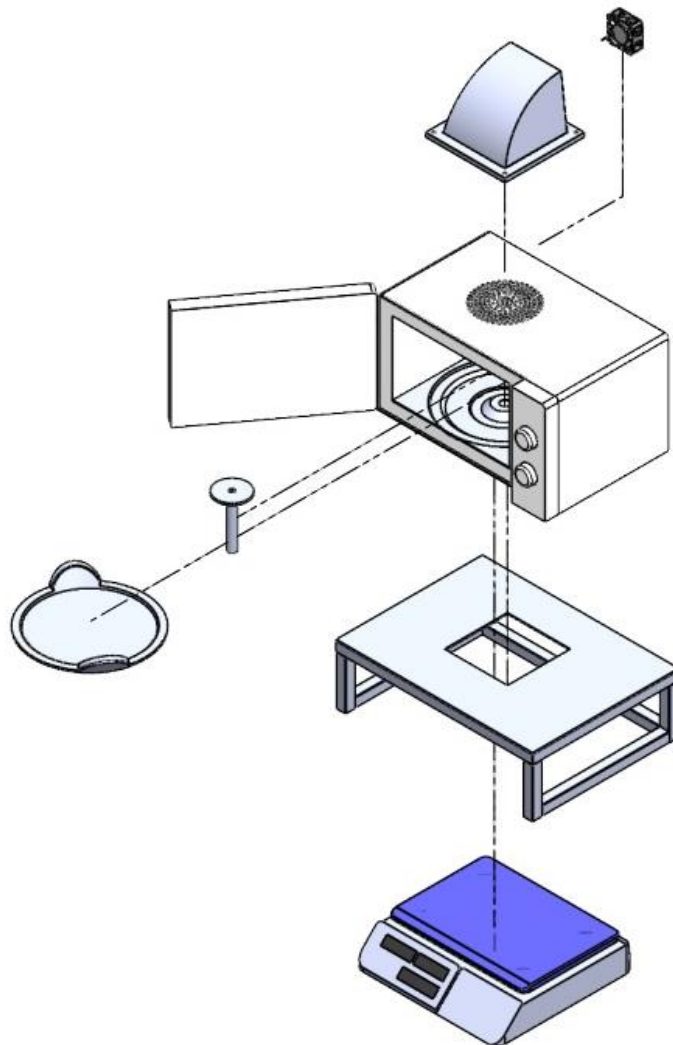
ความชื้นสมดุลของใบผักชีในขณะที่มีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) ที่ความดันบรรยากาศ และคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ (Microwave vacuum drying) ที่ระดับความดันสุญญากาศ 20 กิโลปาสกาล ที่ระดับพลังงาน 335, 400 และ 545 วัตต์ ค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (น้ำฝน และฤทธิ์ชัย (2558), Dadali *et al.* (2007), Demirhan และ Özbek (2009), Therdthai และ Zhou (2009), Alibas (2007) และ Evin (2012) สมการแสดงค่าอัตราส่วนความชื้นของใบผักชีระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) ที่ความดันบรรยากาศ และคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ (Microwave vacuum drying) จึงเป็นไปดังที่แสดงในสมการ (4.2) ต่อไปนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (4.2)$$

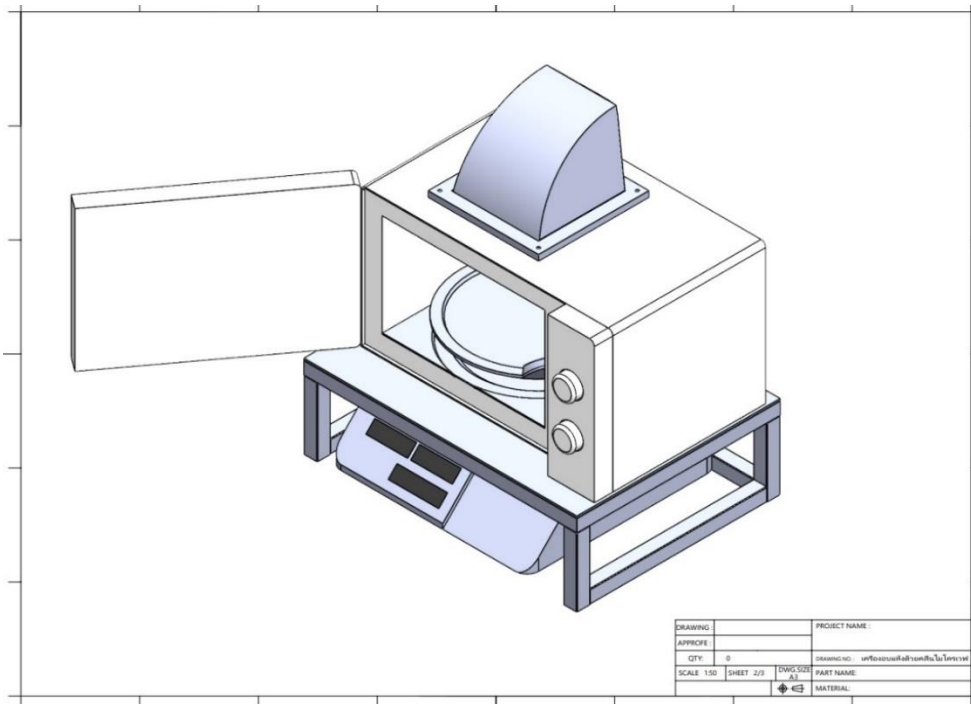
ภาพที่ 4.5 และ 4.6 แสดงเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาด และเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนาโดยสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยพัฒนาไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ (Panasonic Model NN-S235WF) วางบนฐานเหล็ก โดยที่ฐานเหล็กจะติดเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (Sartorius Model CP3202S) บันทึกปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง โดยสามารถปรับระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ 4 ระดับ ได้แก่ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์

4.2 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

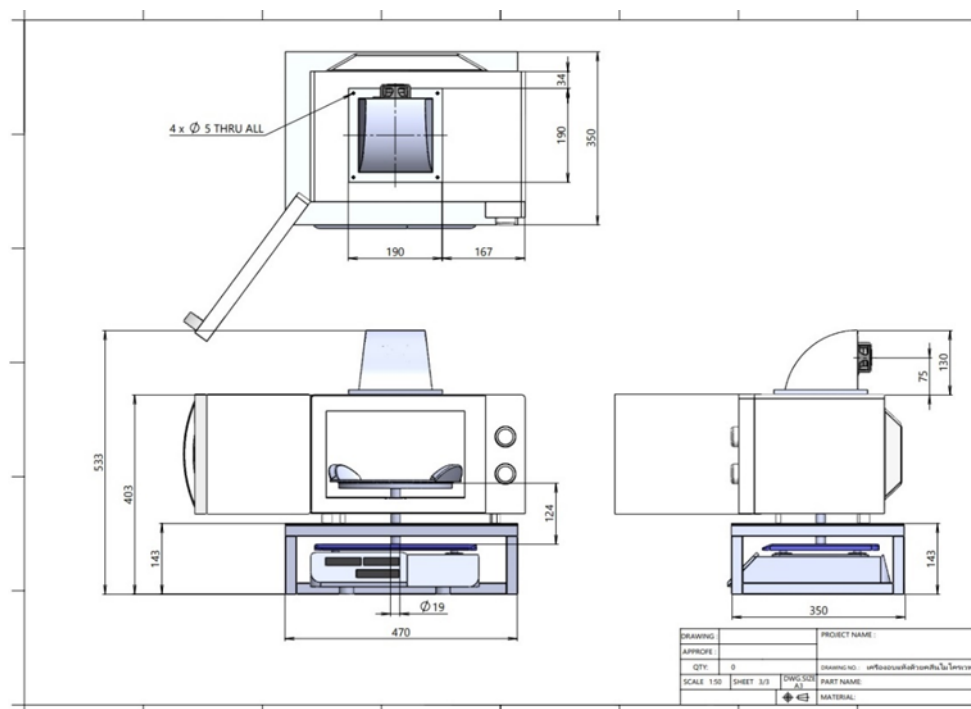
การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการดำเนินการโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ออกแบบสำหรับชิ้นงาน 3 มิติ โดยดัดแปลงเตาอบไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ มาติดตั้งฐานรองรับน้ำหนัก และแกนที่ติดตั้งกับถาดรับตัวอย่างกับถาดน้ำหนักซึ่งติดตั้งบนถาดรับน้ำหนักของเครื่องชั่งน้ำหนัก ด้านบนของเตาไมโครเวฟเจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตรจำนวน 45 รูที่ cover ด้านบน และผนังด้านบนของเตาไมโครเวฟ โดยขึ้นส่วนด้านบนติดตั้ง ฮูท มุม 90 องศา และพัดดูดอากาศขึ้นขนาด 20 วัตต์ ภาพ 4.2 แสดงชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพ 4.2 ชิ้นส่วนของเครื่องอบแห้งเครื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ



(ก)



(ข)

ภาพ 4.3 แบบพร้อมก่อสร้างเครื่องอบแห้งเครื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

(ก) ภาพสามมิติของเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(ข) ขนาดและมิติของเครื่องไมโครเวฟ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพ 4.4 ขั้นตอนการเจาะรูระบายอากาศ
(ก)-(ฉ) แสดงขั้นตอนการวัดและการเจาะรูระบายอากาศ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพ 4.5 ขั้นตอนทำแกนรับน้ำหนัก และฐานวางตาชั่ง

(ก)-(ฉ) แสดงขั้นตอนการติดตั้งฐานรับน้ำหนัก



(ก)



(ข)

ภาพ 4.6 เครื่องอบแห้งคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

(ก)เครื่องอบแห้งไมโครเวฟขนาดห้องปฏิบัติการ (ข) การนำตัวอย่างใบผักชีสดใส่ในเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ



(ก)



(ข)



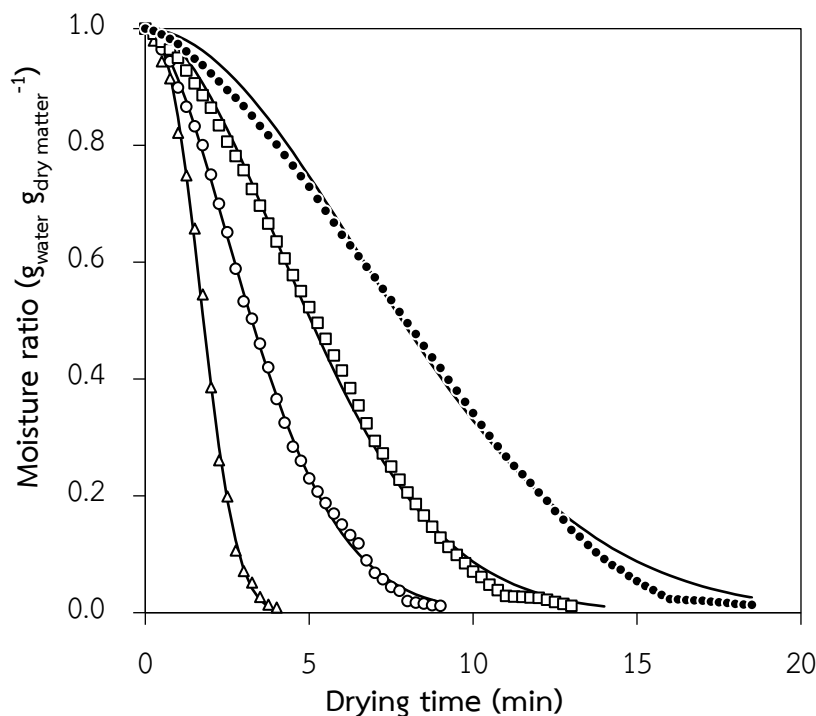
(ค)

ภาพ 4.7 การหาค่า Drying curve ด้วยเครื่องอบแห้งคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

(ก) การเตรียมตัวอย่างใบผักชี (ข) ตั้งระดับพลังงานไมโครเวฟ (ค) เปิดเครื่องการทำงานและบันทึกข้อมูล

4.3 ผลของระดับกำลังงานไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นใบผักชี

จากผลการทดลอง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบผักชีที่เวลาใดๆ ในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศที่ระดับพลังงาน 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบผักชีจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าเท่ากับ 7.5, 5.5 และ 4 นาที ตามลำดับ พบว่าที่ระดับพลังงาน 545 วัตต์ ซึ่งเป็นระดับที่มีพลังงานมากที่สุด จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ใช้เวลาในการอบแห้งใบผักชี 4 นาที แต่ที่ระดับพลังงาน 335 วัตต์ จะใช้เวลาในการอบแห้งใบผักชี 7.5 นาที



ภาพ 4.8 จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งใบผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์

4.4 การศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่างๆ ในการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของน้ำจากใบผักชีสามารถอธิบายในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งทั้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) และสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical equation) ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สามารถใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น สำหรับวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบที่มีความยาวมากๆ (Infinite slab) และมีความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างอาหารหรือวัสดุชีวภาพที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ จะพิจารณาช่วงอัตราการอบแห้ง พบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ และคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ ที่ระดับพลังงานงาน 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ จากความชื้นเริ่มต้น 83.96 ± 2.41 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก จนเหลือความชื้น 6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก

4.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล เช่น แบบจำลองของ Lewis, Henderson and Pabis, Page, Modified Page, Midilli *et al.*, Wang and Singh และ Logarithmic ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งของใบผักชีในระหว่างการอบแห้งด้วยวิธีแบบต่าง ๆ ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่า Chi-Square (χ^2) และค่า RMSE (Root Mean Square Error) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในการอบแห้ง แบบจำลองที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการทำนายจะให้ค่า R^2 สูง แสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งควรจะมีค่าต่ำ ตาราง 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบผักชีในระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อนได้ดีที่สุดโดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.99780-0.99915 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองการอบแห้งของ Lewis Henderson and Pabis, Modified Page, Midilli *et al.*, Wang and Singh และ Logarithmic นอกจากนี้ค่า χ^2 และ RMSE มีค่าระหว่าง 0.00006 - 0.00041 และ 0.00791- 0.02005 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองการอบแห้งแบบต่างๆ

ดังนั้นในการอบแห้งใบผักชีด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศและการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ แบบจำลองของ Page เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบผักชีในระหว่างการอบแห้ง เนื่องจากมีความแม่นยำสูง และค่าความผิดพลาดในการทำนายต่ำ

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ ของใบผักชี

แบบของ การอบแห้ง	กำลังงาน ไมโครเวฟ (วัตต์)	ค่าคงที่แบบจำลองการอบแห้ง			พารามิเตอร์วิเคราะห์ทางสถิติ		
					R ²	χ^2 ×10 ⁻⁴	RMSE
Newton	164.34±3.81	k= 0.1090			0.9676	0.1935	0.1111
	231.18±5.83	k= 0.1683			0.9692	0.1756	0.1019
	465.15±9.08	k= 0.2568			0.9760	0.1801	0.0920
	605.81±4.92	k= 0.4908			0.9485	0.2008	0.1466
Handerson	164.34±3.81	k= 0.1305	a= 1.1971		0.9749	0.1428	0.0879
and	231.18±5.83	k= 0.1986	a= 1.1913		0.9762	0.1312	0.0800
Pabis	465.15±9.08	k= 0.3001	a= 1.1756		0.9819	0.1357	0.0702
	605.81±4.92	k= 0.5864	a= 1.2043		0.9559	0.1378	0.1240
Page	164.34±3.81	k= 0.0134	n= 1.9319		0.9989	0.1219	0.0209
	231.18±5.83	k= 0.0347	n= 1.8429		0.9992	0.1200	0.0148
	465.15±9.08	k= 0.0903	n= 1.7277		0.9997	0.1310	0.0095
	605.81±4.92	k= 0.1637	n= 2.5158		0.9993	0.1138	0.0163
Logarithmic	164.34±3.81	k= 0.0389	a= 2.2651	c= -1.1779	0.9957	0.1380	0.0366
	231.18±5.83	k= 0.0981	a= 1.5738	c= -0.4697	0.9932	0.1274	0.0428
	465.15±9.08	k= 0.01588	a= 1.5077	c= -0.4086	0.9949	0.1376	0.0371
	605.81±4.92	k= 0.01427	a= 2.7763	c= -1.6638	0.9846	0.1367	0.0732
Wang	164.34±3.81	a= -0.0681	b= 0.0005		0.9942	0.1575	0.0465
and	231.18±5.83	a= -0.1158	b= 0.0028		0.9919	0.1502	0.0520
Singh	465.15±9.08	a= -0.1797	b= 0.0071		0.9948	0.1609	0.0453
	605.81±4.92	a= -0.2884	b= 0.0026		0.9819	0.1663	0.0849

หมายเหตุ เมื่อ k คือ อัตราการอบแห้ง, n คือ ค่าดัชนีการอบแห้ง, a และ b คือ ค่าคงที่การอบแห้ง

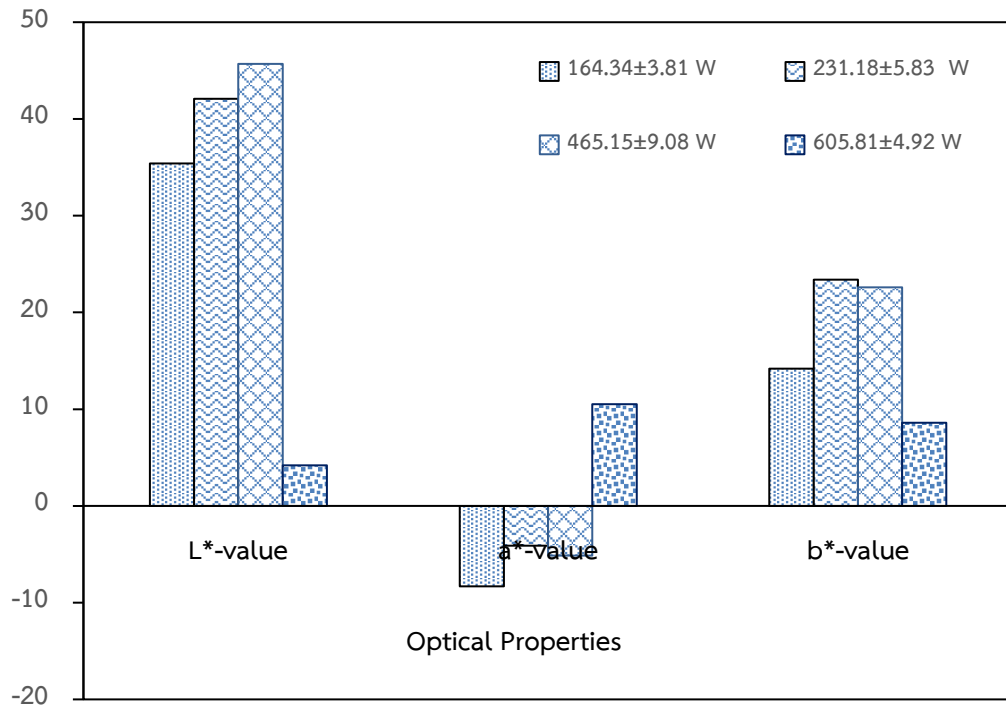
4.5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของใบผักชีบแห้ง

แม้จะมีทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมากซึ่งสามารถใช้อธิบายการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) ภายในวัสดุระหว่างการอบแห้งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองการแพร่ของของเหลวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นภายในวัสดุ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเท่านั้น ทั้งนี้ขอให้ผู้อ่านระลึกไว้เสมอว่า การเคลื่อนที่ (ถ่ายเท) ของความชื้นภายในวัสดุระหว่างการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและอาจเกิดขึ้นเนื่องจากกลไกหลายกลไก เช่น อาจเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็ก การเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นบริเวณที่ต่างๆ ในวัสดุ การเคลื่อนที่ของของเหลวอันเนื่องมาจากการแพร่ของของเหลวบนผิวรูปทรงภายในวัสดุ การเคลื่อนที่ของไอในรูปของการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันไอ และการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือไออันเนื่องมาจากผลต่างของความดันอุทกสถิตภายในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีที่อัตราการระเหยของความชื้นกลายเป็นไอภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของไภายในวัสดุออกมายังผิววัสดุ ในทางปฏิบัติคงไม่สามารถระบุได้ว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุนั้นเป็นไปได้โดยกลไกใดกลไกหนึ่งอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่า ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง ความชื้นอาจเคลื่อนที่โดยกลไกหนึ่ง เช่นโดยการเคลื่อนที่ของของเหลวในหลอดเล็กหรือโดยการแพร่ของของเหลว แต่เปลี่ยนไปเคลื่อนที่โดยอีกกลไกหนึ่ง เช่น โดยการแพร่ของไอ ในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้ง

แบบจำลองการแพร่ของของเหลวมีสมมติฐานว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุเป็นไปได้โดยการแพร่ของของเหลวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณต่างๆ ในวัสดุ หรือเกรเดียนต์ความชื้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานอีกว่าวัสดุมีโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งชิ้น และสมบัติต่างๆ รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลเท่ากันในทุกทิศทาง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วัสดุนั้นเป็นวัสดุไอโซทรอปิก ตลอดจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (เช่น การหดตัว การพองตัว การเกิดขึ้นเชิงเบนผิว) ทางเคมีและชีวเคมีอื่นใดในระหว่างกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบดีว่าสมมติฐานเหล่านี้เป็นสมมติฐานที่ไม่สมเหตุสมผลนัก ด้วยเหตุนี้จึงเรียกสัมประสิทธิ์การแพร่ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลเนื่องจากค่าของสัมประสิทธิ์ดังกล่าวได้มาจากการปรับเส้นโค้งให้ผลเฉลยสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งหมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลที่คำนวณได้นั้นได้รวมเอาผลของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอบแห้งที่มีต่อการถ่ายเทความชื้นเอาไว้แล้ว ดังนั้นในความเป็นจริงแล้ว การจำลองโดยใช้แบบจำลองการแพร่ของของเหลวก็ยังคงเป็นเทคนิคการจำลองที่อาศัยหลักการปรับเส้นโค้งอยู่นั่นเอง

หากสมมติให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสาร (ความชื้น) ภายนอกชิ้นวัสดุมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานการถ่ายเทมวลสารภายในชิ้นวัสดุในลักษณะเดียว อาจหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ซึ่งก็คือผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ที่คำนวณโดยไม่ต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับวัสดุที่มีรูปทรงต่างๆ ได้ ทั้งนี้มีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ การเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปได้ในทิศทางเดียว และความชื้นเริ่มต้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นวัสดุมีค่า

เท่ากันทั้งหมดเงื่อนไขที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลมีค่าคงที่และเท่ากันที่ทุกตำแหน่งในชิ้นวัสดุ และไม่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการอบแห้ง



ภาพ 4.9 ค่าสีพารามิเตอร์สมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* อบแห้งโดยใช้กำลังไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงานเท่ากับ 164.34±3.81, 231.18±5.83, 465.15±9.08 และ 605.81±4.92 วัตต์



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ 4.10 ภาพถ่ายใบผักชีบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงาน เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์

(ก) 164.34 ± 3.81 วัตต์ (ข) 231.18 ± 5.83 วัตต์ (ค) 465.15 ± 9.08 วัตต์ (ง) 605.81 ± 4.92 วัตต์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การศึกษาผลกระทบของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของใบผักชี โดยทำการอบแห้งใบผักชีจากความชื้น 82.6 ± 2.03 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียกจนเหลือความชื้น 9.73 ± 0.42 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ผลของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ เท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 , 465.15 ± 9.08 และ 605.81 ± 4.92 วัตต์ ในการอบแห้งใบผักชีน้ำหนักคงที่ 30 กรัม ใช้เวลาเท่ากับ 18.50, 14.00, 9.00, และ 4.00 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เวลาในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ เมื่อเพิ่มระดับพลังงานไมโครเวฟสูงขึ้นจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของใบผักชีได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ในขณะที่ให้ค่าโคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

ผลกระทบของระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟต่อจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของใบผักชีในระหว่างการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของใบผักชีจนเหลือค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 9.73 ± 0.42 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก จากการทดลองพบว่าค่า L^* และค่า b^* เพิ่มขึ้นเมื่อระดับไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ในช่วงระดับกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 และ 465.15 ± 9.08 วัตต์ แต่เมื่อให้ระดับพลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 605.81 ± 4.92 วัตต์ สีของใบผักชีจะมีค่า L^* และค่า b^* ลดลงอย่างรุนแรง เนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป ในขณะที่ค่า a^* เป็นสีเขียว (ติดลบ) มากขึ้นเมื่อเมื่อระดับไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ในช่วง 164.34 ± 3.81 , 231.18 ± 5.83 และ 465.15 ± 9.08 วัตต์ แต่เมื่อให้ระดับพลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 605.81 ± 4.92 วัตต์ ค่า a^* จะเริ่มเป็นสีแดง (ค่า a^* บวก) ดังนั้นการอบแห้งผักชีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมที่ระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 465.15 ± 9.08 วัตต์ เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งที่เร็วที่สุด แต่สามารถรักษาคุณภาพสีได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟในระดับกำลังงานไฟฟ้าอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ของการอบแห้งใบผักชี และการวิเคราะห์ผลของระดับกำลังงานไมโครเวฟต่อการสลายตัวของสารสำคัญในใบผักชีต่อไป และควรมีการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบอื่น เพื่อให้โครงการวิศวกรรมสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. (2551). **พื้นฐานการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- น้ำฝน ไชยลังกา นักรบ นาคประสม และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2556). **การหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแครอทแผ่นโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง**. วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ. (1) : 92-102.
- น้ำฝน ไชยลังกา และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2558). **จลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของสาหร่ายเตา**. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 26(1) : 87-97.
- ปองพล สุริยะกันธร และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2555). **แบบจำลองการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟ**. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 18(1) : 59-68.
- พิชิต สอนทวย วิโรจน์ ไข่มุขเลิศฤทธิ์ และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2556). **ผลกระทบของระดับคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงสีของการอบแห้งขมิ้นชัน**. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจร. ครั้งที่ 2 หน้า .31-36 ณ โรงแรมวินเซอร์ สวีทส์ สุขุมวิท กรุงเทพฯ. ในวันที่ 30 สิงหาคม 2556.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2558). **ลักษณะการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟของรังไหมและการทำลายหนอนไหม**. ในการประชุมในระดับชาติ ครั้งที่ 1 ประจำปี 2558 หน้า .1-8
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554ก). **เทคโนโลยีการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 17(1): 41-51.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554ข). **การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยคลื่นไมโครเวฟ**. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต. 1(2) : 31-42.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). **การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ**. กรุงเทพมหานคร: บริษัทสำนักพิมพ์ท็อปจำกัด. 250 หน้า..
- อรรถพล นุ่มหอม และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2550). **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนรูปแบบใหม่**. *Food Focus Thailand Magazine* 2 (16) : 28-33.
- Arslan, D and M.M. Özcan. (2010). **Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices**. *LWT* 43 : 1121-1127.

- Assawarachan, R and A. Noomhorm. (2011). **Mathematical Models for Vacuum Microwave Concentration Behavior of Pineapple Juice.** *Journal of Food Process Engineering* 34(5) : 1485-1505.
- Assawarachan, R., J. Sripinyowanich., K. Theppadungporn and A. Noomhorm. (2011). **Drying paddy by microwave vibro- fluidized drying using single mode applicator.** *International Journal of Food, Agriculture & Environment* 9(2) : 50-54.
- Assawarachan, R., M. Nookong, N. Chailungka and D. Amornlerdpison. (2013). **Effect of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of *spirogyra* sp.** *International Journal of Food, Agriculture & Environment* 11(1) : 1-4.
- Assawarachan, R and K. Kalayanamitr. (2015). **Mathematical Models of Sweet Basil (*Ocimum basilicum* Linn.) during Microwave Drying.** *Acta Horticulturae* 1088 : 511-614.
- Goksu, E. I., G. Sumnuand. And A. Esin. (2005). **Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads.** *Journal of Food Engineering* 66 : 463-468.
- Maskan, M. (2001). **Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying.** *Journal of Food Engineering* 48 : 169-175.
- Wang, Y., Y. Li, S. Wang, L. Zhang, M. Gao and J. Tang. (2011). **Review of dielectric drying of foods and agricultural products.** *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 4(1) : 1-19.

ภาคผนวก

การวิเคราะห์สมการแบบเอมพีริคัลการอบแห้งด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบกะเพราด้วยคลื่นไมโครเวฟตามที่แสดงในข้อมูลใน ได้ยกตัวอย่างการวิเคราะห์การหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัลNewtonซึ่งมีรูปแบบสมการ $MR = \exp(-k t)$ โดยจัดรูปแบบสมการ ดังมีรายละเอียดดังนี้

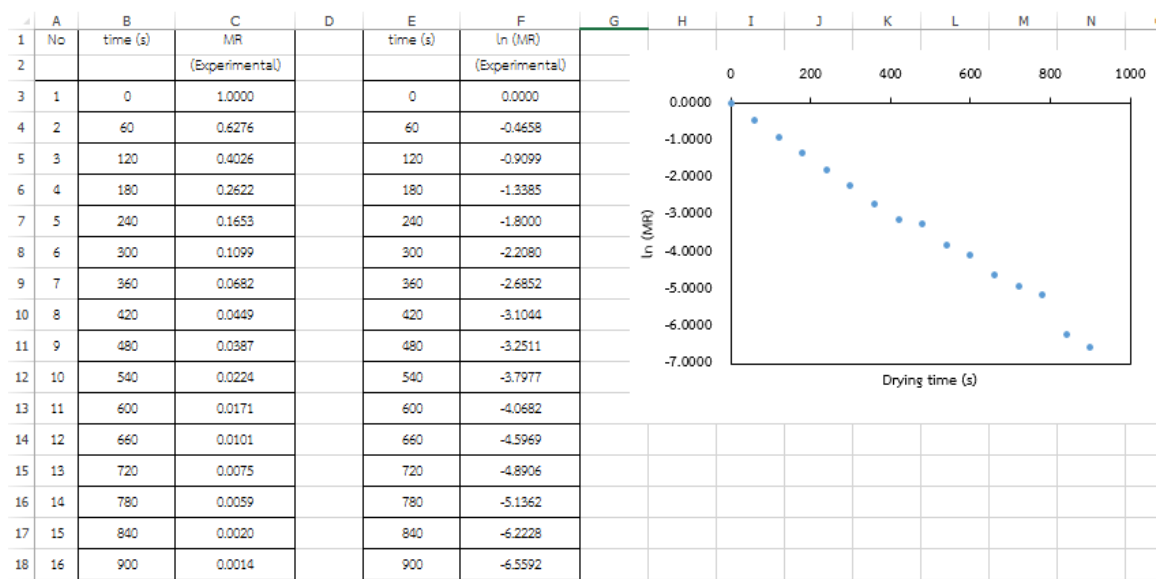
$$MR = \exp(-k t)$$

$$\ln(MR) = (-k t)$$

พบว่าสมการ (4.1) นั้นมีรูปแบบสมการเป็นสมการเส้นตรง $y = mX + C$ โดยมีตัวแปรต้น (แกน x) เป็นเวลา (time) และตัวแปรตาม (แกน y) เท่ากับ moisture ratio (MR) โดยมีจุดตัดเท่ากับ 0 โดยมีอัตราการอบแห้ง (ค่าคงที่ของสมการ Newton) โดยพื้นฐานในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Newton ด้วยการใช้โปรแกรม Excel เบื้องต้น เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจหลักการค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Newton มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จัดรูปแบบสมการ การจัดรูปแบบสมการของข้อมูลใน column B และ column C เป็นค่าของ time (s) และ MR โดยจัดใช้ค่าฟังก์ชัน logarithm function ของ column C และแสดงค่าใน LN (C3) และ copy ข้อมูลทั้งหมดใน column F

ขั้นตอนที่ 2 นำข้อมูลที่ได้จากการจัดรูปแบบสมการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า time ใน column E และ $\ln(MR)$ ใน column E ตามที่แสดงในภาพ



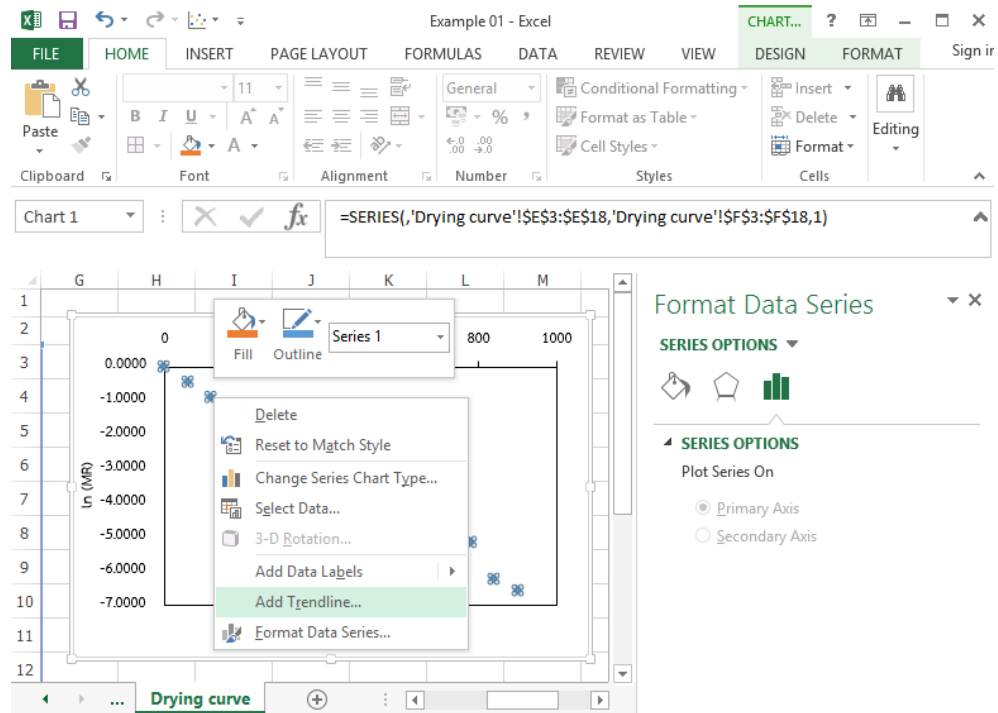
ภาพ ก.1 การสร้างแผนภูมิเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln (MR) และเวลาด้วยโปรแกรม Excell

ขั้นตอนที่ 3 สร้างรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงระหว่างค่า time ใน column E และ ln (MR) ใน column F ด้วยการคลิกขวาที่ข้อมูล จากนั้นเลือกคำสั่ง Formulas > Add Trendline และเลือกฟังก์ชันการสร้างกราฟในรูปแบบสมการ Linear และกำหนดรูปแบบสมการด้วยคำสั่ง Set intercept; Display equation on chart Display; R_squared value on chart หลังจากกำหนดตำแหน่งที่ครบถ้วนแล้ว โปรแกรม Excel สามารถแสดงรูปแบบสมการเส้นตรง

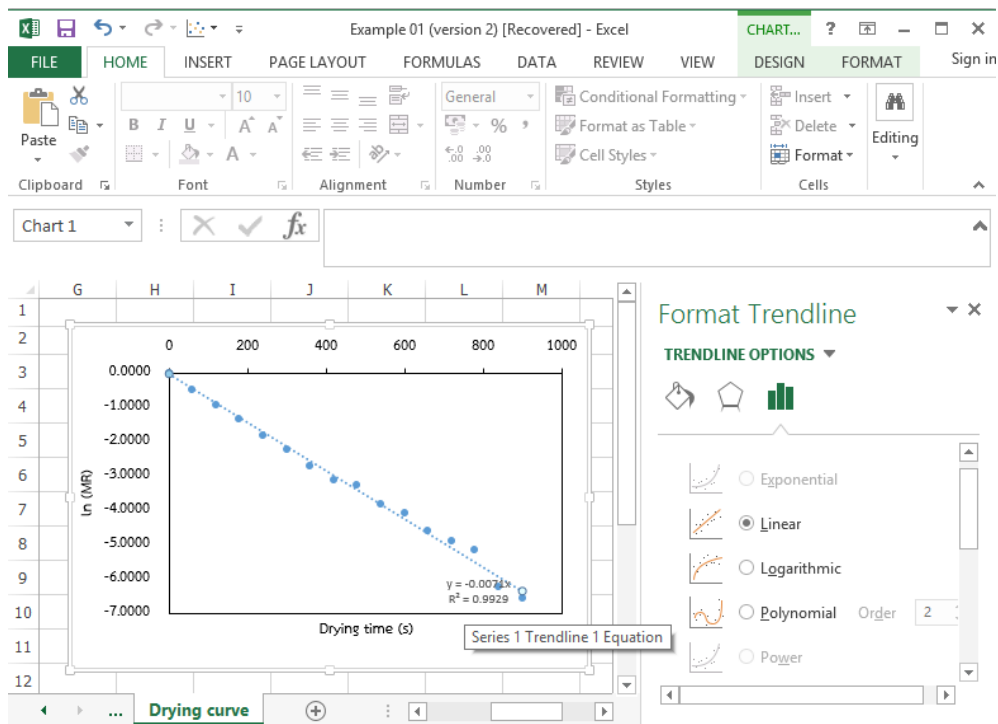
$$y = -0.0071 x \quad (R^2 = 0.9929)$$

$$MR = -k t$$

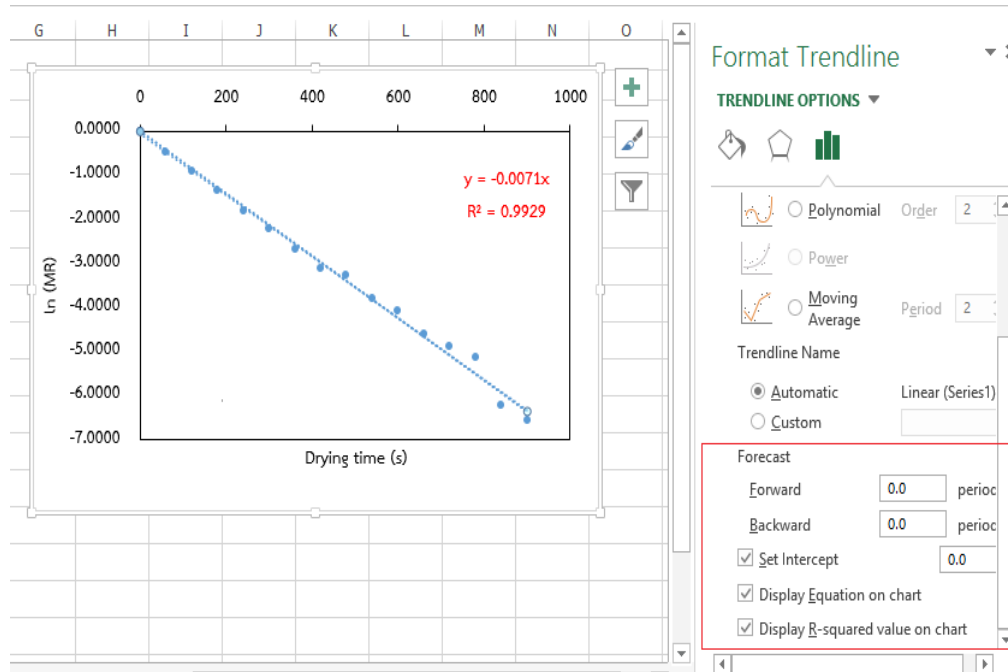
ดังนั้นค่าคงที่การอบแห้งของสมการ Newton มีค่าเท่ากับ 0.0071 sec^{-1}



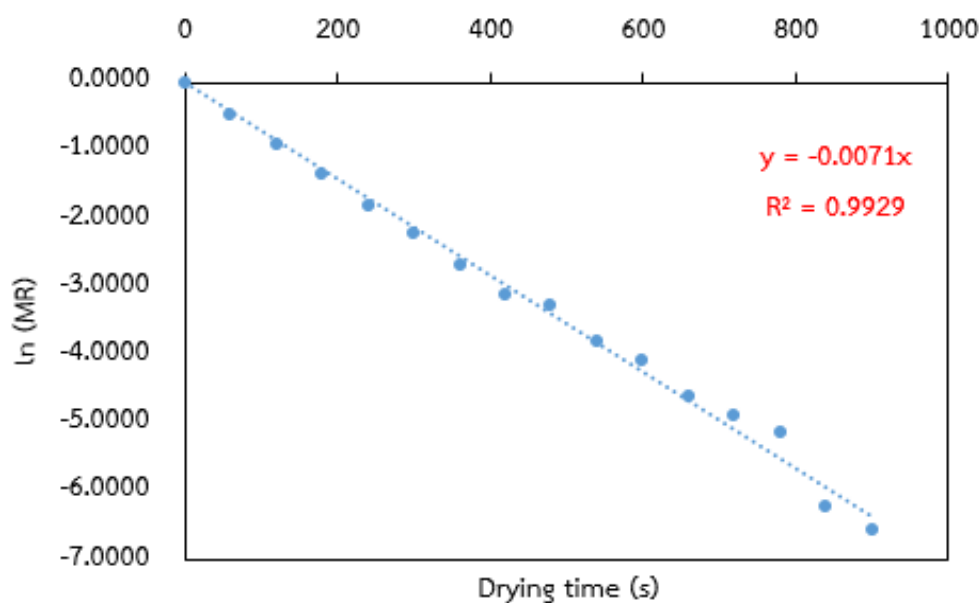
ภาพ ก.2 การสร้างรูปแบบสมการด้วยคำสั่ง Format Add Trendline ด้วยโปรแกรม Excel



ภาพ ก.3 การสร้างสมการด้วยคำสั่งการสร้างกราฟในรูปแบบ Linear ด้วยโปรแกรม Excel



ภาพ ก.4 กำหนดรูปแบบสมการด้วยคำสั่ง Set intercept; Display equation on chart Display; R_squared value on chart ด้วยโปรแกรม Excel



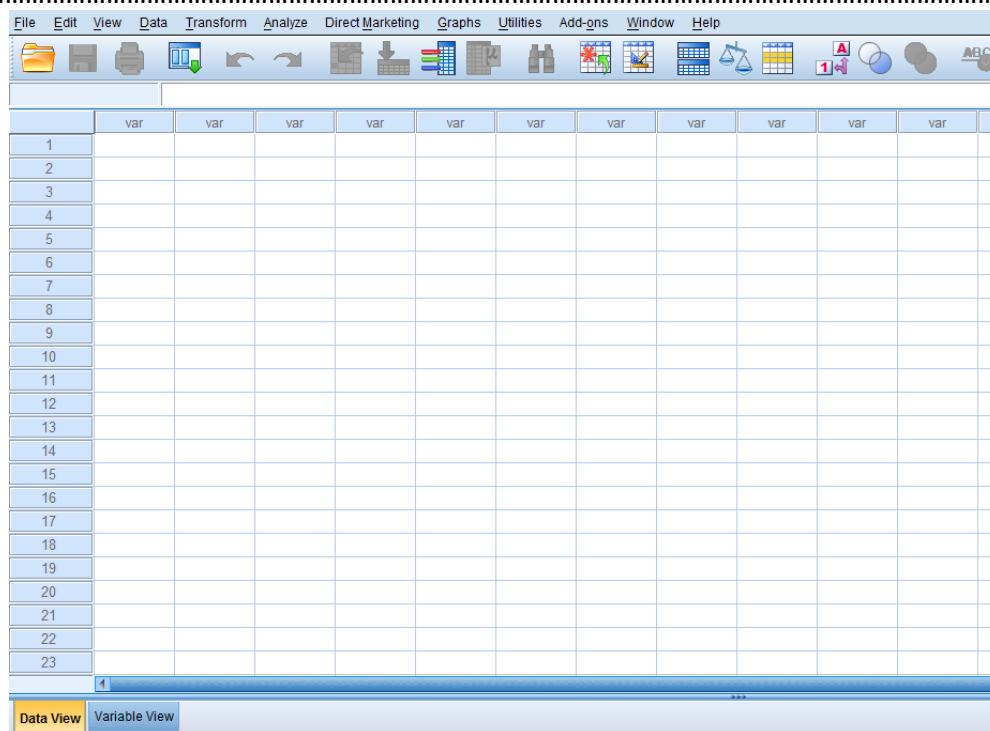
ภาพ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln (MR) และเวลา

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในการจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) ของวัสดุพูน ด้วยวิธีการจัดรูปแบบสมการและนำไปสร้างแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) ด้วย

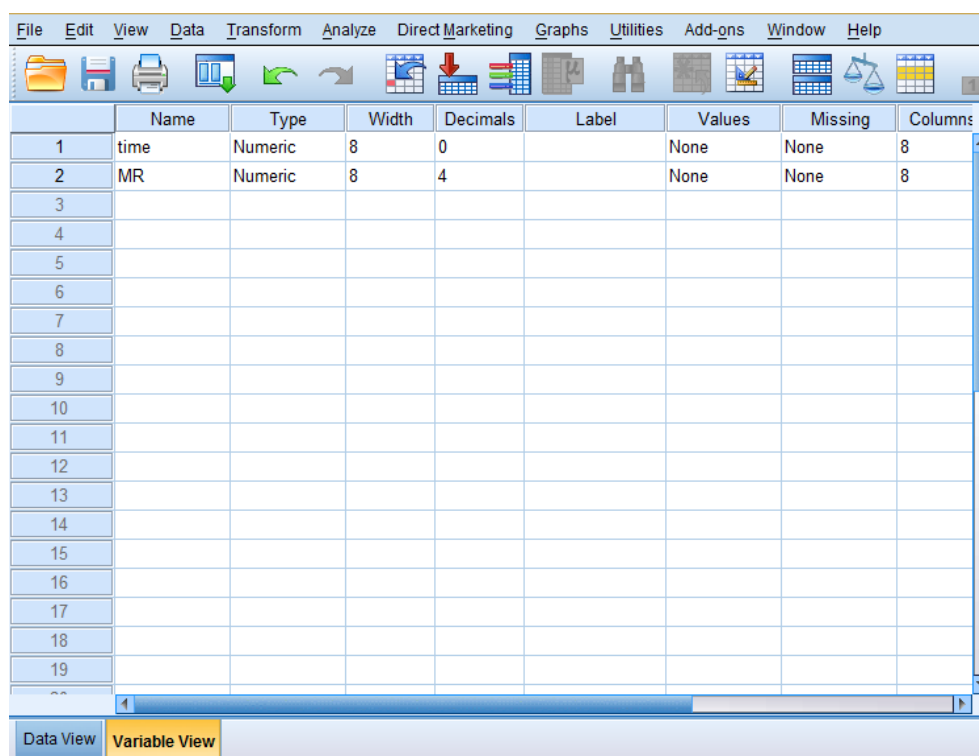
.....
การใช้โปรแกรม Excell อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาสมการเอมพิริคัลด้วยการใช้โปรแกรม Excel นั้นมีความซับซ้อนในการจัดรูปแบบสมการ และการเทียบค่ากับสมการ ปัจจุบันการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในการจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัลด้วยเทคนิคการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) โปรแกรม Statistics Package for the Social Sciences (SPSS) และโปรแกรม Minitab

ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในการจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัลด้วยเทคนิคการปรับเส้นโค้งด้วยการใช้โปรแกรม Statistics Package for the Social Sciences (SPSS) นั้นมีขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ ตามภาพ โดยใช้ฟังก์ชัน Regression และตามด้วยคำสั่ง Nonlinear จากนั้นกำหนดประเภทของตัวแปรต้น ตัวแปรอิสระ และกำหนดสมการเอมพิริคัลที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ของการอบแห้งของรูปแบบสมการเอมพิริคัลนั้น จากนั้นกำหนด

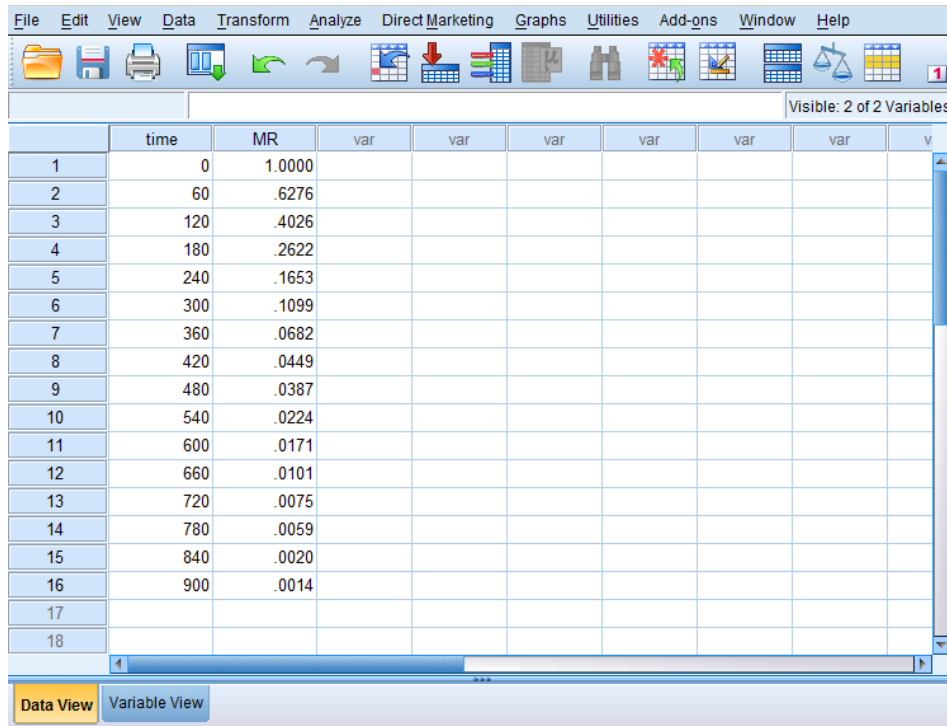
ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในการจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัลด้วยเทคนิคการปรับเส้นโค้งด้วยการใช้โปรแกรม Minitab นั้นมีขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ ตามภาพ



ภาพ ก.6 หน้าจอของโปรแกรม SPSS

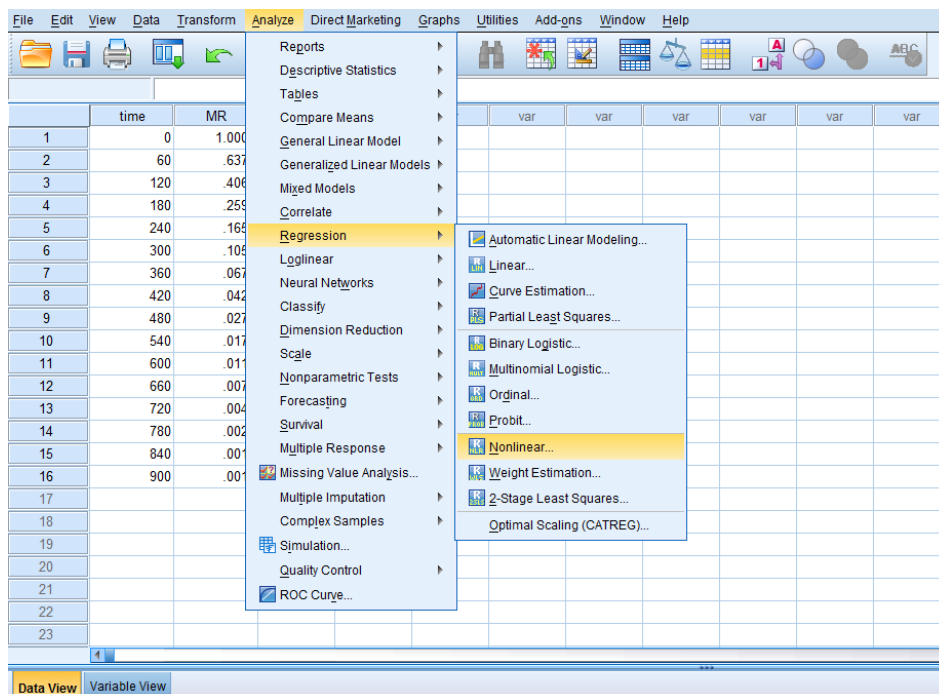


ภาพ ก.7 ขั้นตอนการกำหนดประเภทของตัวแปรต้น และตัวแปรตามในช่อง Variable view

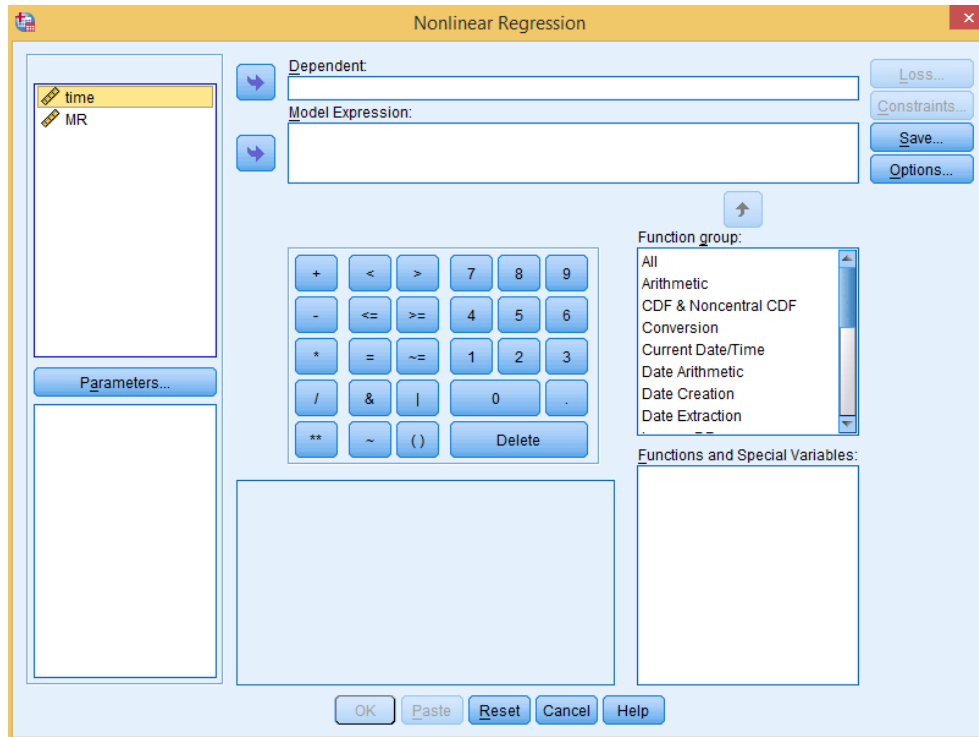


	time	MR	var	var	var	var	var	var	var
1	0	1.0000							
2	60	.6276							
3	120	.4026							
4	180	.2622							
5	240	.1653							
6	300	.1099							
7	360	.0682							
8	420	.0449							
9	480	.0387							
10	540	.0224							
11	600	.0171							
12	660	.0101							
13	720	.0075							
14	780	.0059							
15	840	.0020							
16	900	.0014							
17									
18									

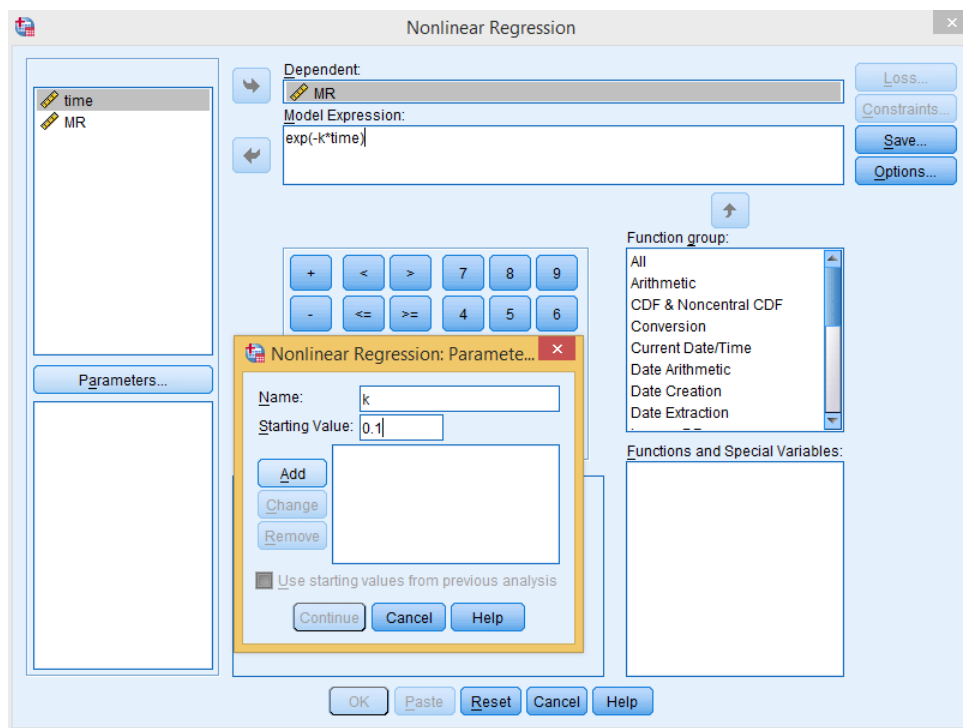
ภาพ ก.8 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลในช่อง Data view



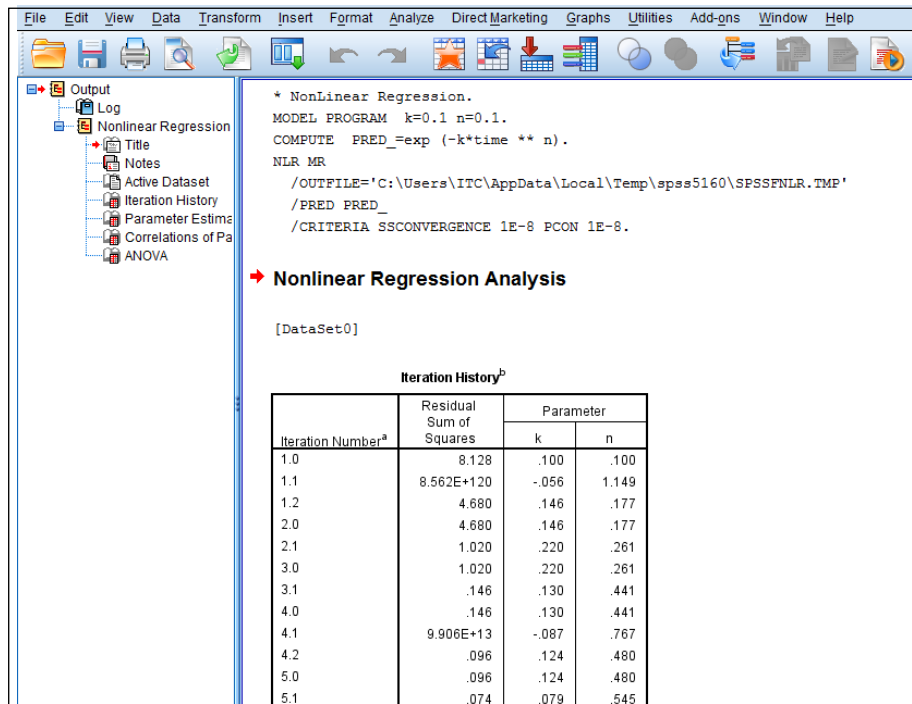
ภาพ ก.9 ขั้นตอนการเลือกฟังก์ชัน Regression และตามด้วยคำสั่ง Nonlinear ในโปรแกรม SPSS



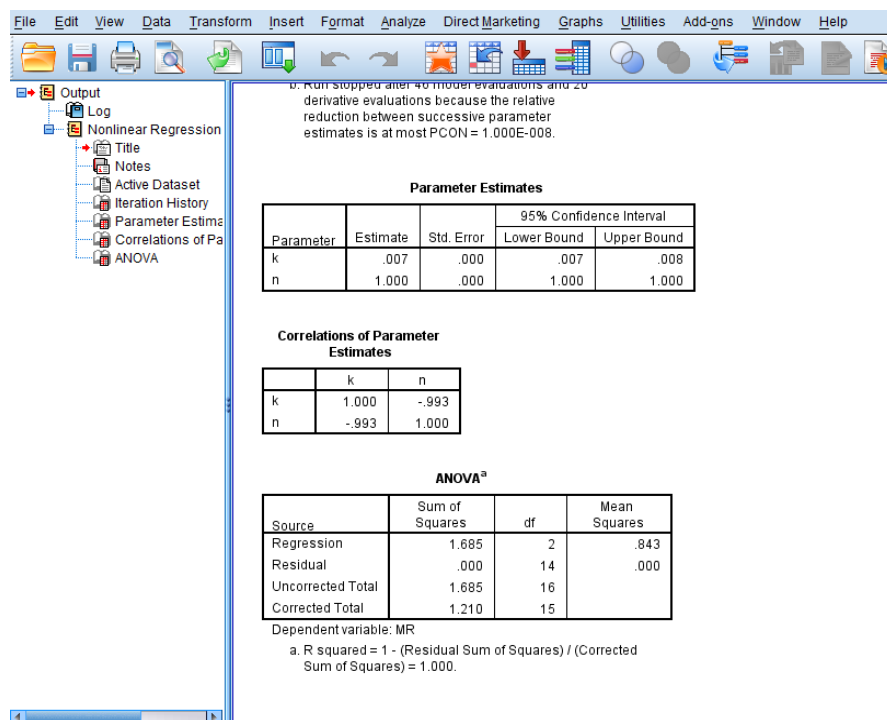
ภาพ ก.10 ขั้นตอนการกำหนดตัวแปรต้น และตัวแปรตาม ในโปรแกรม SPSS



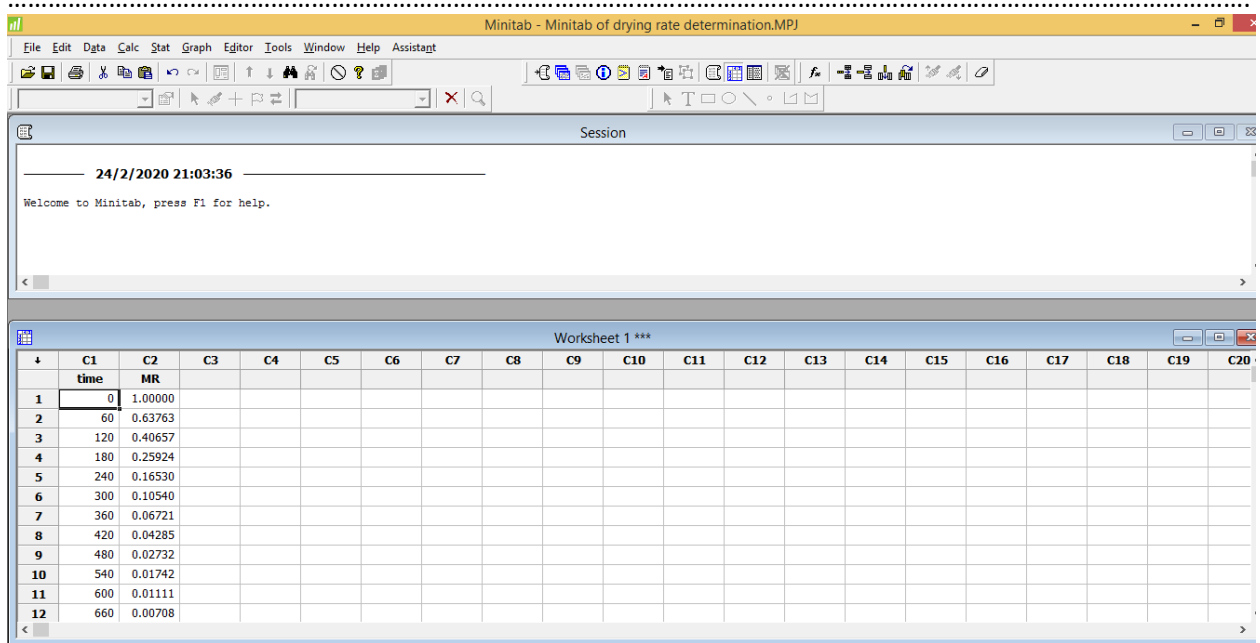
ภาพ ก.11 ขั้นตอนการกำหนดรูปแบบสมการเอมพิริคัลที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม SPSS



ภาพ ก.12 การประมวลผลค่าพารามเตอร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัลที่ในโปรแกรม SPSS (1)



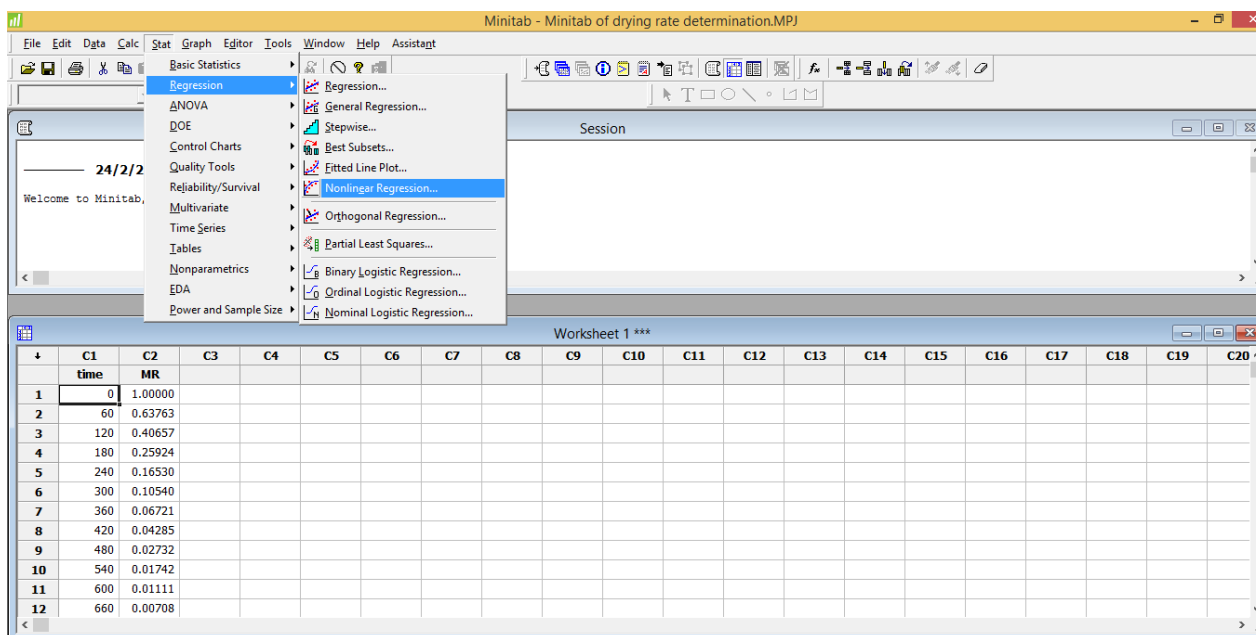
ภาพ ก.13 การประมวลผลค่าพารามเตอร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัลที่ในโปรแกรม SPSS (2)



The screenshot shows the Minitab interface with a worksheet titled 'Worksheet 1 ***'. The worksheet contains two columns: 'time' (C1) and 'MR' (C2). The data is as follows:

	C1 time	C2 MR
1	0	1.00000
2	60	0.63763
3	120	0.40657
4	180	0.25924
5	240	0.16530
6	300	0.10540
7	360	0.06721
8	420	0.04285
9	480	0.02732
10	540	0.01742
11	600	0.01111
12	660	0.00708

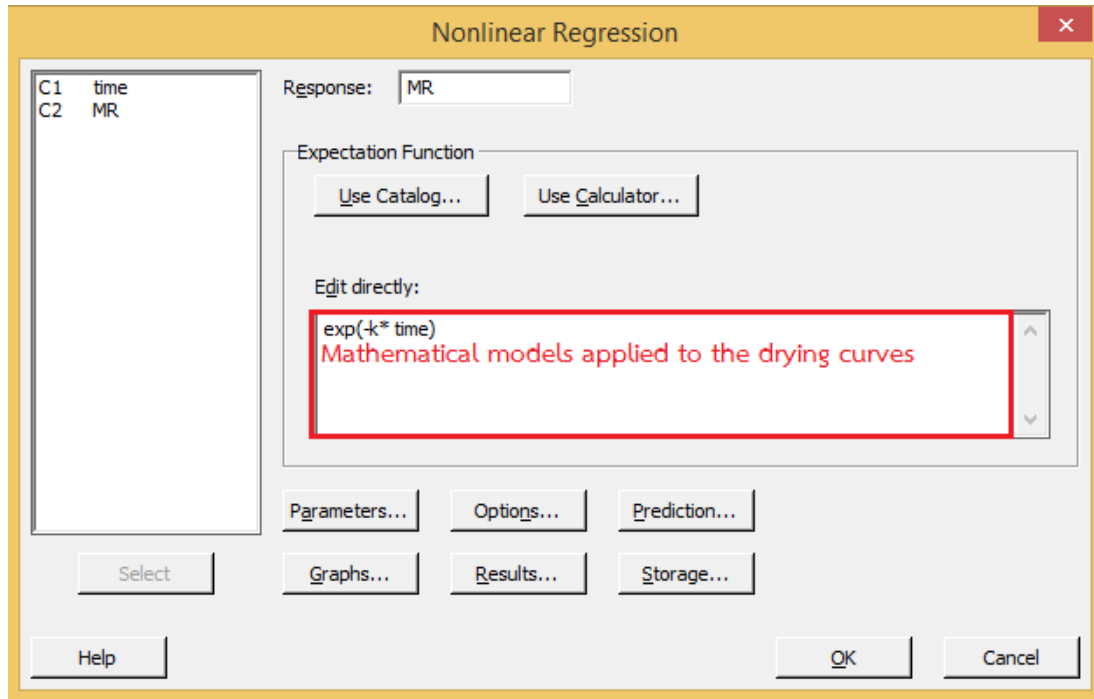
ภาพ ก.14 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลของเวลา และอัตราส่วนความชื้น (MR) ด้วยโปรแกรม Minitab



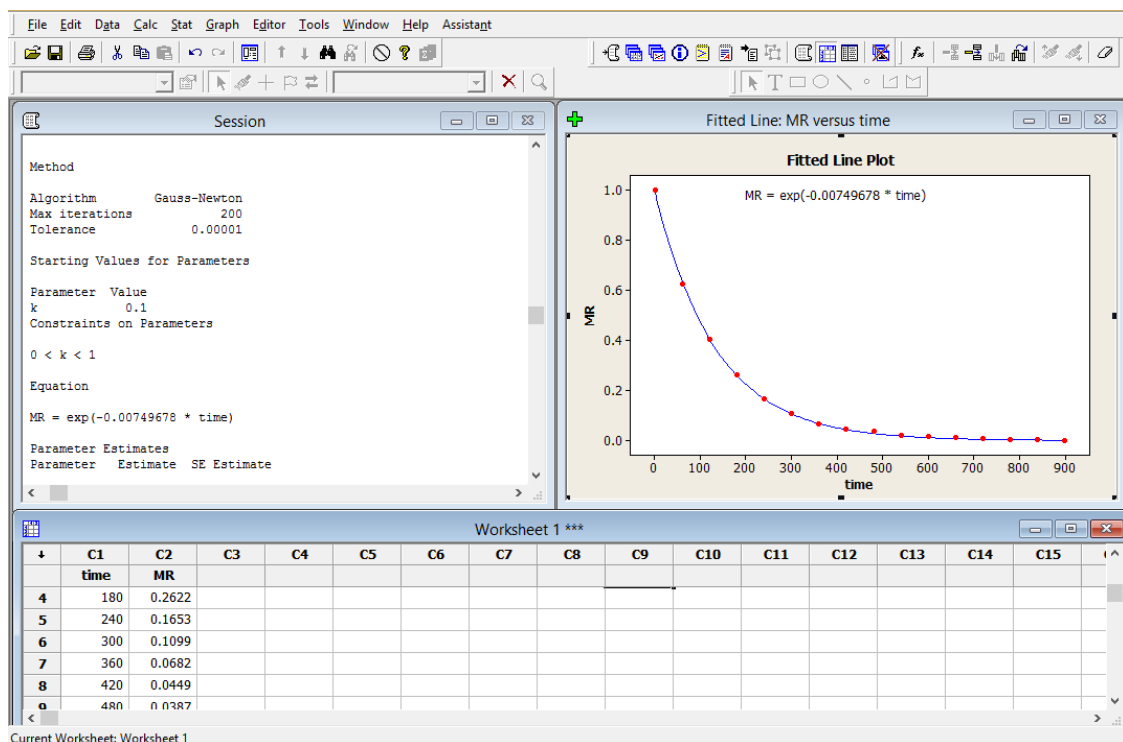
The screenshot shows the Minitab interface with the 'Stat' menu open and the 'Regression' option selected. The worksheet data is the same as in the previous image.

	C1 time	C2 MR
1	0	1.00000
2	60	0.63763
3	120	0.40657
4	180	0.25924
5	240	0.16530
6	300	0.10540
7	360	0.06721
8	420	0.04285
9	480	0.02732
10	540	0.01742
11	600	0.01111
12	660	0.00708

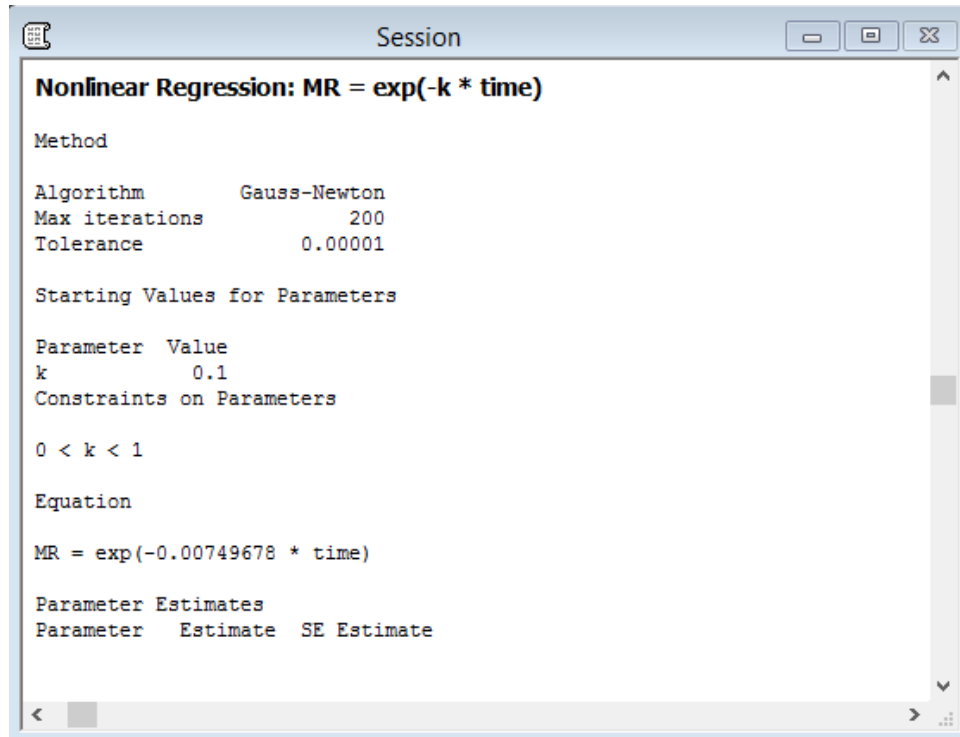
ภาพ ก.15 ขั้นตอนการใช้ฟังก์ชัน Regression และฟังก์ชัน Nonlinear regression ด้วยโปรแกรม Minitab



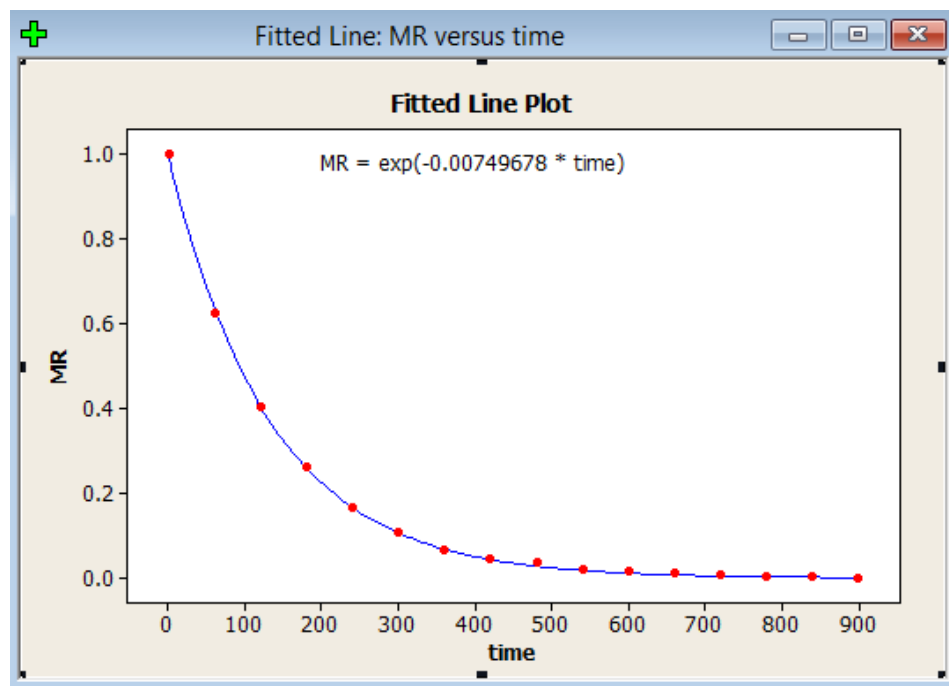
ภาพ ก.16 ขั้นตอนการกำหนดประเภทของตัวแปร และการรูปแบบสมการเอมพิริคัล (Expectation functions) ด้วยโปรแกรม Minitab



ภาพ ก.17 ขั้นตอนการประมวลผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัลการอบแห้งด้วยโปรแกรม Minitab



ภาพ ก.18 ขั้นตอนการประมวลผลทางสถิติเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัลการอบแห้ง



ภาพ ก.19 การแสดงค่าการปรับเส้นโค้งของสมการเอมพิริคัลการอบแห้งด้วยโปรแกรม Minitab

.....
การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) ของ Page ของวัสดุทางวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยสามารถจำแนกได้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) ด้วยการใช้โปรแกรม Excell โดยใช้ข้อมูลของตัวอย่าง 4.3

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์สมการเอมพิริคัลของ Page ซึ่งมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งมีตัวแปร 2 ตัวแปร จำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการด้วยการใส่ฟังก์ชันลอการิทึมซึ่งเป็นฟังก์ชันอินเวอร์สของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

$$MR = \exp(-k t^n)$$

จัดรูปแบบสมการโดยการใส่ฟังก์ชันลอการิทึม ครั้งที่

1

$$\begin{aligned} \ln(MR) &= \ln(-k t^n) \\ &= (\ln(-k) + n \ln t) \end{aligned}$$

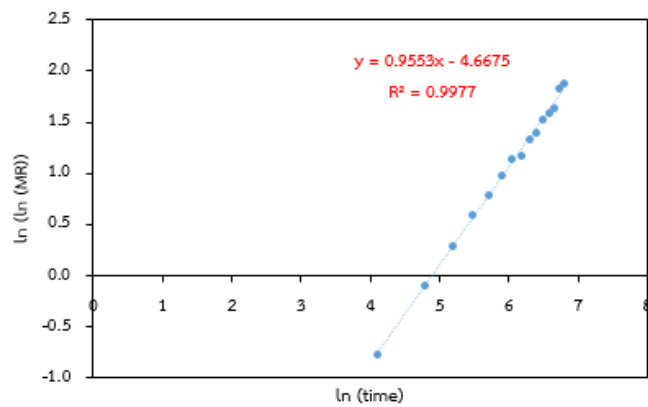
จัดรูปแบบสมการโดยการใส่ฟังก์ชันลอการิทึม ครั้งที่

2

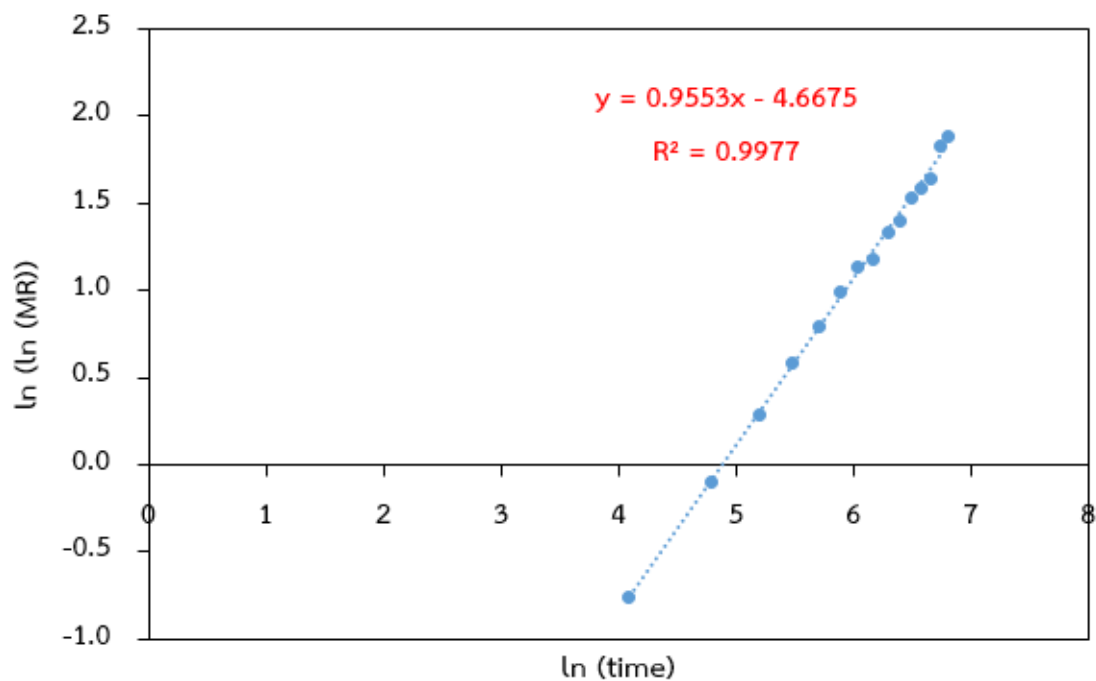
$$\ln(\ln(MR)) = \ln(-k) + n \ln t$$

จากการจัดรูปแบบสมการเอมพิริคัลด้วยการจัดรูปแบบสมการโดยการใส่ฟังก์ชันลอการิทึม 2 ครั้ง พบว่าสมการที่ได้จากการจัดรูปแบบสมการ เป็นรูปแบบสมการเชิงเส้น (เส้นตรง) ทำการหาความชัน และจุดตัด

time (s)	ln (MR) (Experimental)	ln (time)	ln (MR) (Experimental)
0	0.0000	#NUM!	#NUM!
60	-0.4658	4.09	-0.7640
120	-0.9099	4.79	-0.0944
180	-1.3385	5.19	0.2915
240	-1.8000	5.48	0.5878
300	-2.2080	5.70	0.7921
360	-2.6852	5.89	0.9878
420	-3.1044	6.04	1.1328
480	-3.2511	6.17	1.1790
540	-3.7977	6.29	1.3344
600	-4.0682	6.40	1.4032
660	-4.5969	6.49	1.5254
720	-4.8906	6.58	1.5873
780	-5.1362	6.66	1.6363
840	-6.2228	6.73	1.8282
900	-6.5592	6.80	1.8809



ภาพ ก.20 การสร้างกราฟในรูปแบบสมการ Linear ตามข้อมูลตัวอย่าง 4.4 ด้วยโปรแกรม Excell



ภาพ ก.21 การสร้างสมการด้วยคำสั่งการสร้างกราฟในรูปแบบ Linear ด้วยโปรแกรม Excel

จากภาพ ก.21 พบว่าความชัน (Slope) มีค่าเท่ากับ ค่า n และจุดตัด มีค่าเท่ากับ $\ln(-k)$

$$\text{Slope} = 0.9553$$

$$n = 0.9553$$

คำนวณหาค่า k โดยการจัดรูปแบบสมการ

$$\text{Intercept} = -4.6675$$

$$\ln(-k) = -4.6675$$

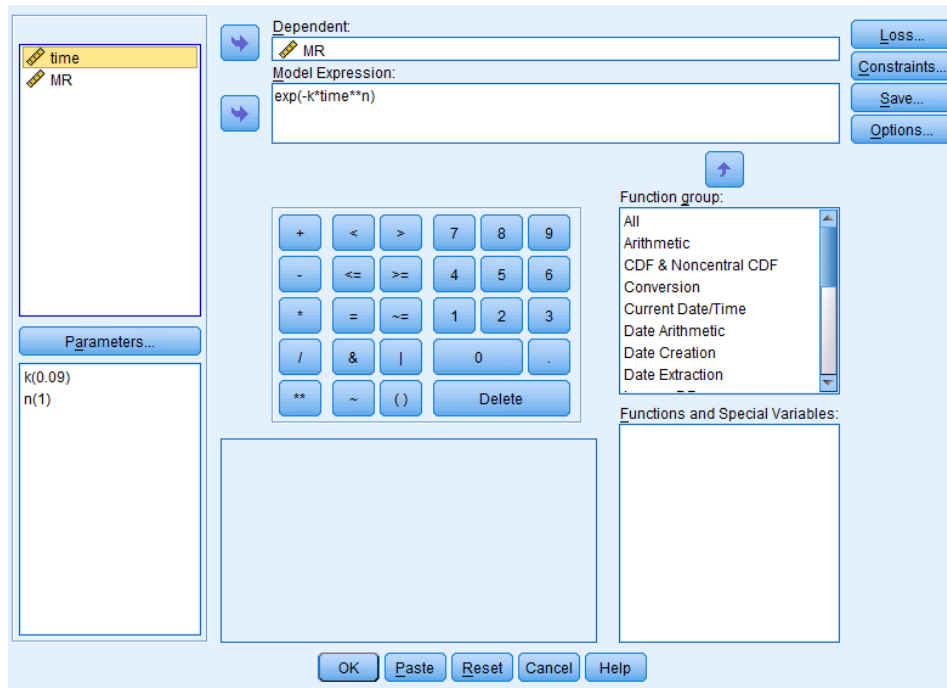
$$\ln(-k) = -4.6675$$

$$k = \exp(-4.6675)$$

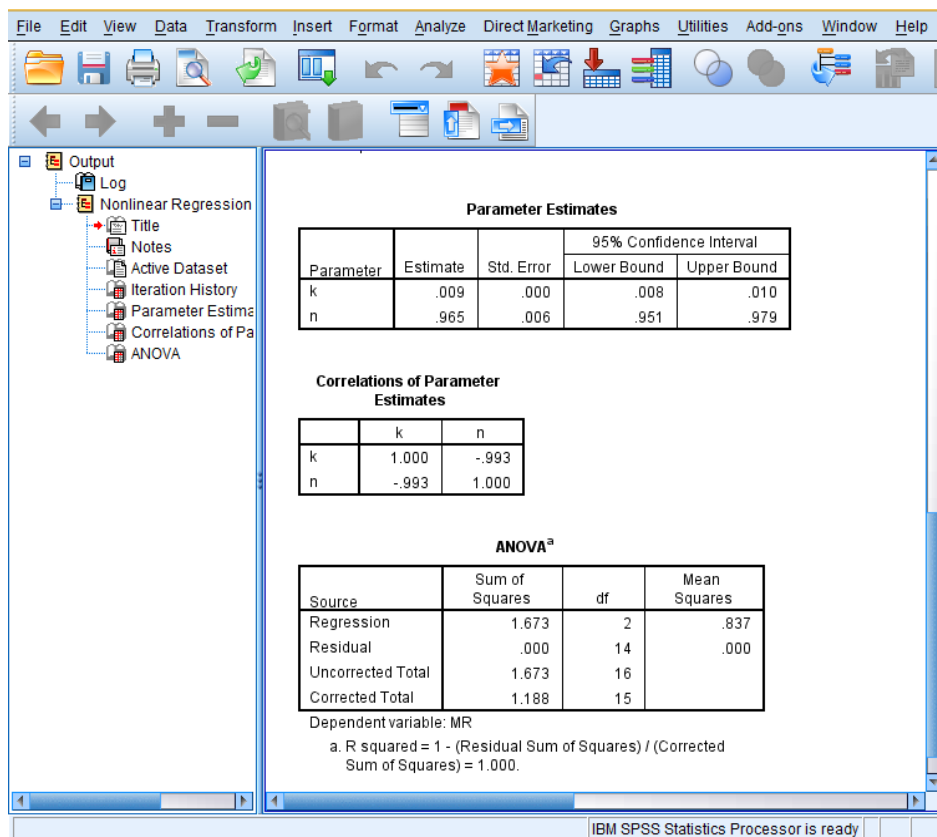
$$= 0.0093$$

ดังนั้นค่าคงที่ของตัวแปรค่าพารามิเตอร์ของสมการเอมพิริคัลการอบแห้งของ Page มีค่า k และ n มีค่าเท่ากับ 0.0093 และ 0.9553 ตามลำดับ ดังนั้นสมการเอมพิริคัลการอบแห้งของ Page มีค่าดังนี้

$$MR = \exp(-0.0093 t^{0.9553})$$



ภาพ ก.22 การกำหนดตัวแปรต้น และตัวแปรตาม ในโปรแกรม SPSS



ภาพ ก.23 การประมวลผลค่าพารามเตอร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัลที่โปรแกรม SPSS

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นาย ณัฐวุฒิ มีใจ
รหัสนักศึกษา 6515125023
วัน เดือน ปี เกิด 22 มกราคม 2545



ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง	2564
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวังเหนือวิทยา	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวังทรายคำวิทยา	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนวังทรายคำวิทยา	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 99 หมู่ 7
ตำบล วังทรายคำ อำเภอ วังเหนือ
จังหวัด ลำปาง
รหัสไปรษณีย์ 52140
เบอร์โทรศัพท์ : 0932733158
Email Address : dewpasak@gmail.com
Facebook : Meejai Nattawut

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นาย นพพร ตอบแก่ง

รหัสนักศึกษา 6515125030

วัน เดือน ปี เกิด 26 มีนาคม 2545

ประวัติการศึกษา



ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคลำปาง	2564
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวัดพระแก้วดอนเต้าสุชาดาราม	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวัดพระแก้วดอนเต้าสุชาดาราม	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านแม่พริก	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 143 หมู่ 6

ตำบล วังใต้ อำเภอ วังเหนือ

จังหวัด ลำปาง

รหัสไปรษณีย์ 52140

เบอร์โทรศัพท์ : 0612855547

Email Address : tobkengnopporn@gmail.com

Facebook : Tobkeng Nopporn

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นาย ไพรวลัย -
 รหัสนักศึกษา 6515125043
 วัน เดือน ปี เกิด 30 ธันวาคม 2541



ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคโนโลยีพายัพและบริหารธุรกิจ	2564
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเทคโนโลยีพายัพและบริหารธุรกิจ	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนสันทรายวิทยาคม	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านถ้ำลอด	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 14 หมู่ 6
 ตำบล ป่าลาน อำเภอ ดอยสะเก็ด
 จังหวัด เชียงใหม่
 รหัสไปรษณีย์ 50220
 เบอร์โทรศัพท์ : 0936086494
 Email Address : MJU6515125043@mju.ac.th
 Facebook : Praiwan Praiwan