

การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

DEVELOPMENT OF MICROWAVE ASSISTED HOT AIR PADDY
DRYING SYSTEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.กীরติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ



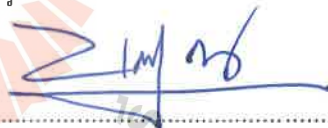
(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ

ประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน : การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ
(DEVELOPMENT OF MICROWAVE ASSISTED HOT AIR PADDY DRYING SYSTEM)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค, 208 หน้า

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด/ไมโครเวฟ/การจำลองสถานการณ์/ข้าวขาวดอกมะลิ 105

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบอบแห้งแบบพวยพุ่ง (Spouted Bed) รูปทรงของห้องอบแห้งเป็น สามเหลี่ยมมุมตัดขนาดความสูง 500 มิลลิเมตร ความกว้างด้านละ 320 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กพับ ขึ้นรูป ท่ออะคลิลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งอยู่กึ่งกลางห้องอบแห้งถูกใช้สำหรับ บรรจุข้าวเปลือกเพื่อทำการอบแห้ง ติดตั้งระบบกำเนิดไมโครเวฟด้วยหัวแม่กนิตรอนขนาด 800 วัตต์ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต เพื่อเสริมการทำงานของระบบ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ด้วยเงื่อนไขการทดสอบ 4 เงื่อนไขได้แก่ การอบแห้งด้วย อากาศร้อน การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับ อากาศสภาพแวดล้อม และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากอัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพ ของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าความขาวของข้าวสาร ผลการทดสอบ พบว่า การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งมีอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน จำเพาะสูงสุด ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมมีค่าอัตรา การอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งนั้น พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งและการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียง อย่างเดียวมีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่น้อยมากเมื่อเทียบกับข้าวชุดควบคุมคุณภาพ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ข้าว ตันที่ได้จากการอบแห้งโดยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันในชุดควบคุม

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กระวี ตรีอำนรรค

THAMARAT YABSUNGNOEN : DEVELOPMENT OF MICROWAVE ASSISTED HOT AIR
PADDY DRYING SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KRAWEE TREEMNUK,
Ph.D., 208 PP.

Keyword : Fluidized Bed Dryer/Microwave/Simulation/Jasmine Rice 105

This research aims to develop a system for drying paddy by hot air combined with microwave. The developed system in this experiment is a spouted bed paddy drying system. The shape of the drying chamber is a triangular with chamfered, height 500 mm and width 320 mm per side. It is made of folded steel sheet. The 90 mm diameter of acrylic tube was used as a paddy drying tube and it was installed on centroid of chamber. A microwave generator system with a magnetron head of 800 watts, frequency 2.45 GHz was installed for assisted the operation of the system. Jasmine rice 105 at moisture content of 22 %wb were test with 4 conditions as follows: hot air drying, hot air drying with first power level of microwave, ambient air drying with first power level of microwave, and ambient air drying with second-level microwave. The drying performance was assessed by drying rate, specific energy consumption, head rice yield percentage, and whiteness of rice. The result showed that drying by hot air and first power level of microwave had the highest drying rate and gives high specific energy consumption. The lowest drying rate and specific energy consumption occurred in drying by ambient air with first power level of microwave condition. In terms of quality, drying by hot air drying with first power level of microwave condition and hot air drying condition had a very small head rice yield percentage when compared to control condition while the head rice yield percentage obtained from ambient air and first power level of microwave was close to the percent of head rice yield from control condition.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature Thamarat Yabsungnoen.
Advisor's Signature Krawee Treemnuke

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและด้านอื่น ๆ จากบุคคลและกลุ่มคนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นทั้งผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ หากมิได้คำแนะนำดี ๆ ในการแก้ไขปัญหาจากท่าน งานวิจัยนี้คงสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ผู้วิจัยซาบซึ้งในความปรารถนาดี และจะปฏิบัติตามคำสอนของท่านตลอดไป

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กীরติ สุลักษณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม และครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมารดา บิดา ผู้เป็นที่รักยิ่งที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด แม้จะด้วยความลำบากสักเพียงใด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตได้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านเพื่อพัฒนาองค์ความรู้สืบต่อไป

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ภูมิหลังของข้าวเปลือก.....	3
2.3 โครงสร้างของข้าวเปลือก.....	4
2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	5
2.4.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	5
2.4.2 ช่วงอัตราการบแห้งลด.....	6
2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืช.....	8
2.5.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านการไหล	8
2.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต.....	9
2.5.3 องศาความเป็นทรงกลม.....	10
2.5.4 ค่าความชื้นในเมล็ด.....	10
2.5.5 ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นของเมล็ด และค่าความพรุน.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	เครื่องอบแห้ง.....	12
2.6.1	เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ.....	13
2.6.2	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ.....	13
2.6.3	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน.....	14
2.7	การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	15
2.8	การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบทั่วไป.....	17
2.8.1	ทฤษฎีพื้นฐานของไมโครเวฟ.....	17
2.8.2	การดูดซับพลังงานไมโครเวฟโดยสารไดอิเล็กทริก.....	19
2.8.3	คุณสมบัติของสารไดอิเล็กทริก.....	20
2.8.4	ความลึกของการทะลุทะลวง.....	22
2.9	ระบบอบแห้งที่เสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	22
2.9.1	การอบแห้งแบบพาความร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	23
2.9.2	การอบแห้งแบบสุญญากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	24
2.9.3	การอบแห้งแบบแช่แข็งเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	25
2.9.4	การอบแห้งเป่าพ่นเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	26
2.10	การสูญเสียความชื้นในระบบการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วย.....	28
2.11	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	29
2.11.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อค่าพลังงานไมโครเวฟคงที่.....	29
2.11.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิ.....	30
2.11.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อมีการปรับค่าพลังงานด้วยสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมอุณหภูมิ.....	30
2.12	การสิ้นเปลืองพลังงาน.....	31
2.13	ประสิทธิภาพในการอบแห้ง.....	33
2.14	คุณภาพของการสีเมล็ดข้าว.....	33
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีการดำเนินวิจัย.....	39
3.1	การศึกษาสมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105.....	39
3.1.1	ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบ.....	39
3.1.2	ข้าวเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาดก่อนการปรับความชื้น.....	40
3.1.3	กระบวนการปรับความชื้นข้าวเปลือก.....	41
3.1.4	กระบวนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือกและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก.....	42
	การทดลองความกว้าง ความยาว ความลึกของเมล็ด ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและองศาความเป็นทรงกลม.....	43
	การทดลองความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนของเมล็ด.....	43
	การทดลองความเร็วลมในสุดท้ายและสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ.....	45
	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.2	กระบวนการศึกษาพฤติกรรมการกระจายของคลื่นไมโครเวฟในตู้ไมโครเวฟแบบคริวรีนและการออกแบบห้องอบแห้งโดยมีการทำงานเสริมด้วยไมโครเวฟ.....	47
3.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.2.2	กระบวนการทดลองการกระจายอุณหภูมิของน้ำภายในตู้ไมโครเวฟ.....	49
3.3	กระบวนการออกแบบและจำลองเพื่อหาห้องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบจริง.....	51
3.3.1	การจำลองโมเดลตู้ไมโครเวฟคริวรีนเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการจำลองโหมดสนามไฟฟ้า.....	51
3.3.2	ขั้นตอนการจำลองโหมดสนามไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด.....	51
3.3.3	ขั้นตอนการจำลองโหมดสนามไฟฟ้าในสถานะมีโหลด.....	54
3.3.4	การจำลองสนามไฟฟ้าของห้องอบแห้งในรูปทรงต่าง ๆ.....	58
3.4	การออกแบบรายละเอียดของห้องอบแห้งแบบรูปทรงสามเหลี่ยมมุม.....	60
3.5	การทดลองพฤติกรรมกรอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	64
3.5.1	การผึ่งแห้งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก.....	65
3.5.3 การทดสอบหาค่าคุณภาพผลิตภัณฑ์.....	67
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	69
4.1 สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105	69
4.1.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อมิติของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105.....	69
4.1.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุนและความ หนาแน่นเชิงเมล็ด.....	73
4.2 สมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105.....	75
4.2.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อค่าความเร็วสุดท้าย.....	75
4.2.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล.....	76
4.3 พฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารระดับครัวเรือน.....	78
4.4 การออกแบบและการจำลองสำหรับห้องลดความชื้นของข้าวเปลือก.....	86
4.5 พฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกโดยอากาศร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	93
4.5.1 ความชื้นของข้าวเปลือกและอัตราส่วนของความชื้น.....	93
4.5.2 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกกับอุณหภูมิของข้าวเปลือก.....	95
4.5.3 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับปริมาณน้ำที่ระเหยได้.....	97
4.5.4 คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง.....	100
5 บทสรุป.....	105
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	115
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	176
ภาคผนวก ค บทความที่ตีพิมพ์.....	183
ประวัติผู้เขียน.....	211

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองตู้ไมโครเวฟสภาวะไร้โหลด.....	52
3.2 จำนวนกริดของรูปแบบห้องผิวเรียบและผิวเว้านูน.....	53
3.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองตู้ไมโครเวฟสภาวะมีโหลด.....	57
3.4 จำนวนกริดของรูปแบบห้องผิวเรียบและผิวเว้านูนของการจำลองขณะมีโหลด.....	57
3.5 จำนวนกริดของห้องแต่ละรูปทรง.....	57
3.6 รายละเอียดของการทดสอบแต่ละเงื่อนไข.....	64
4.1 ค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม.....	71
4.2 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม เชิงเมล็ด และค่าความพรุน.....	74
4.3 ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล.....	77
ก1 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก.....	116
ก2 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก.....	119
ก3 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก.....	122
ก4 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก.....	125
ก5 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก.....	128
ก6 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ด และค่าความพรุนของเมล็ดในแต่ละความชื้น.....	130
ก7 ค่าความเร็วลมสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก8 ค่าความเร็วลมสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียส.....	135
ก9 ค่าความเร็วลมสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 70 องศาเซลเซียส.....	137
ก10 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 80 องศาเซลเซียส.....	140
ก11 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 90 องศาเซลเซียส.....	142
ก12 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส.....	144
ก13 ค่าอุณหภูมิน้ำของแต่ละแถวที่ระดับความสูง 38.50 ครั้งที่ 1.....	147
ก14 ค่าอุณหภูมิน้ำของแต่ละแถวที่ระดับความสูง 38.50 ครั้งที่ 2.....	148
ก15 ค่าอุณหภูมิน้ำของแต่ละแถวที่ระดับความสูง 38.50 ครั้งที่ 3.....	149
ก16 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียสข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1.....	150
ก17 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียสข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก เปียก ครั้งที่ 2.....	152
ก18 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียสข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3.....	154
ก19 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียสร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1.....	156
ก20 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2.....	158
ก21 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3.....	160
ก22 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก ครั้งที่ 1.....	162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก23 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2.....	164
ก24 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3.....	166
ก25 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1.....	168
ก26 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2.....	170
ก27 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3.....	172
ก28 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส.....	174
ก29 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับ หนึ่ง.....	174
ก30 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง	174
ก31 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสอง	175
ก32 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อม(ชุดควบคุม).....	175

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ข้าวเปลือกทั้งสามชนิด.....	4
2.2 (a) ส่วนประกอบของเมล็ดข้าวเปลือก (Paddy) และ (b) โครงสร้างภายในข้าวขาว.....	5
2.3 กราฟวัฏจักรการอบแห้ง.....	6
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง.....	7
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง.....	8
2.6 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ.....	13
2.7 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ.....	14
2.8 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน.....	14
2.9 การแบ่งเทคนิคประยุกต์ใช้ไมโครเวฟแบบต่าง ๆ.....	16
2.10 กลไกการเคลื่อนไหวยของความร้อนภายในผลิตภัณฑ์อาหารหรือพืชผลพรรณเกษตรในระหว่าง การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	18
2.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	21
2.12 ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของอาหารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	21
2.13 ระบบการอบแห้งแบบพาความร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	23
2.14 ระบบอบแห้งแบบสุญญากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	24
2.15 ระบบอบแห้งแบบแช่แข็งเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	25
2.16 ระบบการอบแห้งแบบเป่าพ่นเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	26
2.17 การเปรียบเทียบการอบแห้งแบบดั้งเดิมและการอบแห้งแบบดั้งเดิมโดยมีไมโครเวฟ.....	28
2.18 ชนิดของเส้นอุณหภูมิของการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วยแบบต่าง ๆ ของอาหาร.....	29
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและความชื้นที่เปลี่ยนไปในวัสดุ.....	32
3.1 (ก) เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์โดยตะแวงและแรงลมรุ่น SEEDB-RO/LA-LS (ข) จุดสุดท้าย ที่ข้าวเปลือกลงมา.....	40
3.2 (ก) ตัวอย่างการสูมตัดข้าวเปลือก (ข) ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก.....	41
3.3 ตู้อบร้อนยี่ห้อMEMMERT รุ่น UF160 ความจุ 160 ลิตร.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 (ก) การกำหนดความชื้นในข้าวเปลือก (ข) ตู้เย็นที่ใช้รักษาคุณภาพข้าว.....	42
3.5 การวัดขนาด ก) ความยาว ข) ความกว้าง และ ค) ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก.....	43
3.6 การหาความหนาแน่นเชิงกลุ่ม.....	44
3.7 การทดสอบค่าความพรุน.....	44
3.8 ระบบการทดสอบอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก.....	45
3.9 ตาชั่งดิจิตอล 2,200 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม.....	46
3.10 PID Electronic temperature controller รุ่น REX-C100.....	47
3.11 (ก) ลักษณะไมโครเวฟที่นำมาใช้ทดสอบ (ข) ขนาดของห้องอบแห้ง.....	48
3.12 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Creality Ender-3 3D Printer.....	48
3.13 รายละเอียดการวางอุปกรณ์และขนาดของอุปกรณ์.....	49
3.14 ภาพรวมของฐานวางอุปกรณ์และอุปกรณ์บรรจุน้ำ.....	49
3.15 การบรรจุอุปกรณ์ภายในตู้ไมโครเวฟ.....	50
3.16 อุปกรณ์การทดลองในตู้ไมโครเวฟขณะทำงาน.....	50
3.17 การวัดอุณหภูมิน้ำหลังจากการครบระยะเวลา 30 วินาที.....	50
3.18 โมเดลที่ใช้ในการจำลองตู้อบไมโครเวฟที่มีผิวเรียบและผิวเว้านูน.....	54
3.19 โมเดลที่ใช้ในการจำลองตู้อบไมโครเวฟที่มีผิวเรียบและผิวเว้านูนในขณะมีไหลด์.....	56
3.20 ลักษณะรูปทรงและขนาดของห้องต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองโหมดสนามไฟฟ้า.....	59
3.21 ภาพรวมระบบอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	61
3.22 ภายในห้องอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	62
3.23 รายละเอียดของตู้ควบคุมของระบบอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ.....	63
3.24 ข้าวเปลือกที่ทำการผึ่งในร่ม.....	64
3.25 (ก) การวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (ข) การวัดความเร็วของอากาศ.....	65
3.26 (ก) การวัดอุณหภูมิข้าว (ข) การบรรจุอุปกรณ์บรรจุข้าวลงในห้องอบแห้ง.....	66
3.27 (ก) เครื่องสี่ขาระบบลูกยาง (ข) ข้าวกล้องที่ได้จัดการกระเทาะ.....	67
3.28 ข้าวขาวที่ได้จากการขัดขาว.....	67
3.29 (ก) ข้าวเต็มเมล็ด (ข) ข้าวเมล็ดหัก.....	68
3.30 เครื่องวัดความขาวของข้าว (ก) สอบเทียบเครื่องวัด (ข) ค่าความขาวที่วัดได้.....	68

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก.....	70
4.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก.....	70
4.3 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต.....	72
4.4 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าระดับความกลม.....	72
4.5 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ด.....	73
4.6 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความพรุนของเมล็ด.....	74
4.7 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก.....	75
4.8 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล.....	76
4.9 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าในห้องผิวเรียบ (ข) โหมดสนามไฟฟ้าในห้องผิวเว้านูน.....	79
4.10 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้ผิวเรียบที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรในสถานะไม่มีโหลด (ข) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้ผิวเว้านูนที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร ในสถานะไม่มีโหลด	80
4.11 ผลการจำลอง (ก) การกระจายระดับอุณหภูมิของตู้ผิวเรียบที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร (ข) การกระจายระดับอุณหภูมิของตู้ผิวเว้านูนที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร.....	81
4.12 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้ผิวเรียบที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรในสถานะโหลด (ข) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้ผิวเรียบที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรในสถานะโหลด.....	82
4.13 ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้จากทดลองที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร.....	83
4.14 ความถี่ของไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการทำความร้อนบนมันฝรั่งจากการจำลองเทียบ กับการทดลอง.....	84
4.15 ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของไมโครเวฟส่งผลต่อรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิในแผ่นเจล.....	85
4.16ก พื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับ 0.25 เมตรและการวัดสนามไฟฟ้าเชิงเส้น(เส้นสีแดง) ของรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	86
4.16ข รายละเอียดพื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงพื้นที่ระดับความสูง 0.25 เมตร ของรูปทรง สี่เหลี่ยม.....	87
4.16ค รายละเอียดความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ระดับ 0.25 เมตร ตามเส้นสีแดงในรูปที่ 4.25ก ของรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17ก พื้นที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ระดับ 0.25 เมตรและการวัดสนามไฟฟ้าเชิงเส้น(เส้นสีแดง) ของรูปทรงหกเหลี่ยม.....	88
4.17ข รายละเอียดพื้นที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าแบบเชิงพื้นที่ระดับความสูง 0.25 เมตร ของรูปทรง หกเหลี่ยม.....	89
4.17ค รายละเอียดความเข้มข้นสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ระดับ 0.25 เมตร ตามเส้นสีแดงในรูปที่ 4.26ก ของรูปทรงหกเหลี่ยม.....	90
4.18ก พื้นที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ระดับ 0.25 เมตรและการวัดสนามไฟฟ้าเชิงเส้น(เส้นสีแดง) ของรูปทรงสามเหลี่ยมลบมุม.....	91
4.18ข รายละเอียดพื้นที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าแบบเชิงพื้นที่ระดับความสูง 0.25 เมตร ของรูปทรง สามเหลี่ยมลบมุม.....	91
4.18ค รายละเอียดความเข้มข้นสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ระดับ 0.25 เมตร ตามเส้นสีแดงในรูปที่ 4.18ก.....	92
4.19 ความสัมพันธ์ความชื้นข้าวเปลือกกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง.....	93
4.20 อัตราส่วนความชื้นบนเงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ เทียบกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง.....	94
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก.....	96
4.22 ความสัมพันธ์อุณหภูมิผิวเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก.....	96
4.23ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณการระเหยน้ำเปรียบเทียบกับ กับความชื้นของข้าวเปลือก.....	97
4.23ข ความสัมพันธ์ของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณน้ำระเหยเปรียบเทียบกับ ความชื้นของข้าวเปลือก.....	98
4.24 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย.....	99
4.25 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวตันของแต่ละวิธีการอบแห้ง.....	101
4.26 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสารของแต่ละวิธีการอบแห้ง.....	101
4.27 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง.....	102
4.28 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80 องศาเซลเซียส.....	102
4.29 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ลักษณะข่าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม	103
4.31 ลักษณะข่าวสารที่ได้จากการฝังแห้งในที่ร้อน (ชุดควบคุมคุณภาพ).....	103



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้าวเปลือกเป็นสินค้าเกษตรที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยมาอย่างยาวนานเป็นรัฐพืชที่ใช้บริโภคภายในประเทศอีกทั้งยังเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยที่มีปริมาณการส่งออกมากที่สุดในบรรดาผลผลิตเกษตรที่ส่งออกทั้งหมด และข้าวยังใช้เป็นหลักทรัพย์ทางการเงินได้อีกด้วย ข้าวสามารถเพาะปลูกในประเทศได้ตลอดทั้งปี ภายหลังจากเก็บเกี่ยว ความชื้นในข้าวเปลือกยังคงมีค่าสูง เกษตรกรจะต้องลดความชื้นลง ซึ่งวิธีที่เป็นที่นิยมคือการตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำที่สุด แต่การตากแห้งข้าวเปลือกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีข้อจำกัดในการควบคุมความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้ ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดเชื้อราและข้าวเน่าเสีย อีกทั้งยังมีปัญหาจากความไม่แน่นอนของสภาวะอากาศ และปัญหาจากการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการตากแห้งซึ่งต้องใช้แรงงานคนในการเกลี่ยพลิกกลับชั้นข้าวเปลือกและเก็บรวบรวมข้าวเปลือกจำนวนมากบ่อยครั้งที่เกษตรกรจะนำข้าวไปตากแห้งริมถนนซึ่งทำให้เป็นอุปสรรคในการสัญจรและอาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุได้ การใช้เครื่องอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว เครื่องอบแห้งแบบหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมคือเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Dryer) ซึ่งอาศัยการใช้อากาศร้อนอุณหภูมิสูงเป่าผ่านชั้นบรรจุข้าวเปลือกเพื่อทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากข้าวเปลือก แต่วิธีนี้จำเป็นจะต้องใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงและเครื่องอัดอากาศขนาดใหญ่เป็นส่วนประกอบ เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด จะอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งกำเนิดสู่ข้าวเปลือกโดยตรงเพื่อให้เกิดการระเหยน้ำทำให้ลดการใช้พลังงานในการผลิตอากาศร้อนเพื่อใช้อบแห้งได้ แต่พบว่ามีข้อจำกัดในการออกแบบเครื่องให้ใช้ประสิทธิภาพของรังสีได้คุ้มค่าและต้องใช้ระยะเวลานานในการอบแห้ง

การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเทคนิคที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าอินฟราเรด มีความถี่สูงกว่าและมีอัตราการถ่ายเทพลังงานสูงกว่าอินฟราเรดสามารถทำให้เกิดความร้อนในวัสดุอบแห้งได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้ตัวกลาง ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง มีระยะเวลาอบแห้งสั้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้อากาศร้อนและเครื่องอัดอากาศในระบบ

จากเหตุผลที่ได้กล่าวในข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยคาดว่าจะได้ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานลดลง มีประสิทธิภาพการทำงานสูง โดยที่ยังสามารถรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกหลังอบแห้งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาระบบอบแห้งแบบใหม่ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 2) เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้น
- 3) เพื่อประเมินคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการศึกษาการทำงานและจำลองการแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกวงกลมและทรงกระบอกหน้าตัดแปดเหลี่ยมโดยใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ 2,450 เมกกะเฮิร์ต
- 2) เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเป็นต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ
- 3) ใช้ข้าวเปลือกที่มีการปรับค่าความชื้นในการทดสอบอบแห้ง
- 4) ใช้ข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 เป็นวัสดุทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบ
- 5) มีการแปรค่าระดับพลังงานของไมโครเวฟด้วยการควบคุมการทำงานแบบช่วง (Pulse Mode)
- 6) มีการควบคุมตัวแปรความเร็วและอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในเครื่องต้นแบบ
- 7) เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบที่ใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวกับการใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในการอบแห้ง
- 8) เปรียบเทียบคุณภาพของข้าวเปลือกหลังอบแห้งกับข้าวเปลือกชุดควบคุมที่ใช้การผึ่งให้แห้งในร่ม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงผลการจำลองการแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้ง
- 2) ทราบถึงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบ
- 3) ทราบถึงคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในส่วนของปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ กล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยต่าง ๆ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้อันได้แก่ ภูมิหลังของข้าวเปลือก โครงสร้างของข้าวเปลือก ทฤษฎีการอบแห้ง ประเภทของเครื่องอบแห้ง คุณลักษณะของไมโครเวฟ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2 ภูมิหลังของข้าวเปลือก

ชัยฤทธิ์ ดำรงเกียรติ (2555) ได้กล่าวว่า ข้าวเป็นพืชในตระกูลหญ้า (Graminaceae) จัดเป็นพืชอาหารหลักของประชากรมากกว่าครึ่งโลก ชนิดของข้าวที่ปลูกสามารถจำแนกตามถิ่นกำเนิดและความนิยมบริโภคได้ 2 ชนิด (Species) คือ ข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud.) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดและบริโภคในบางประเทศของทวีปแอฟริกา และข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* L.) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดและปลูกเป็นพืชอาหารโดยทั่วไปในทวีปเอเชียตลอดจนแถบตะวันออกกลาง ยุโรป อเมริกา และออสเตรเลีย ข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* L.) ยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดย่อย (Sub-species) ได้อีก 3 กลุ่ม (ดังรูปที่ 2.1) คือ กลุ่มแรก ซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เรียกว่า กลุ่มข้าวอินดิกา (Indica) กลุ่มที่ 2 ซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออก บริเวณประเทศจีน ญี่ปุ่น และเกาหลีเรียกว่า กลุ่มข้าวจาปอนิกา (Japonica) ส่วนกลุ่มที่ 3 ซึ่งมีถิ่นกำเนิดแถบหมู่เกาะชวามีการปลูกและบริโภคเฉพาะท้องถิ่น เรียกว่า กลุ่มข้าวจาวานิกา (Javanica) ดังนั้น ข้าวที่ปลูกเพื่อการบริโภคอย่างกว้างขวางและเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป จึงมีเพียง 2 กลุ่ม คือ ข้าวอินดิกาและข้าวจาปอนิกา โดยข้าวที่ขัดสีแล้วมีจำหน่ายทั่วโลก ประมาณร้อยละ 87 เป็นข้าวในกลุ่มอินดิกา ส่วนกลุ่มข้าวจาปอนิกามี การปลูกและจำหน่ายเพียงร้อยละ 11

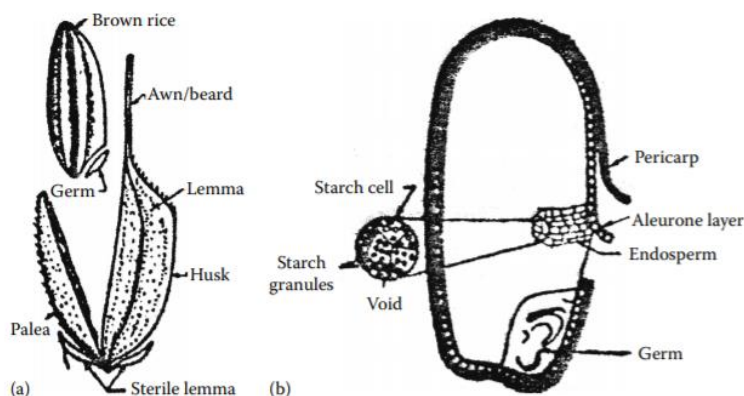


รูปที่ 2.1 ข้าวเปลือกทั้งสามชนิด (International Rice Research Institute, 2007)

2.3 โครงสร้างของข้าวเปลือก

Amalendu Chakraverty และ R. Paul Singh (2014) ได้อธิบายถึงโครงสร้างเมล็ดข้าวเปลือก ว่าข้าวเปลือกประกอบไปด้วยเปลือกเมล็ดข้าว (Pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ดชั้น (Seed coat) แอลูโลน (Aleurone) จมูกข้าว (Germ) และแอนโดรสเปิร์ม (Endosperm) ซึ่งข้าวเปลือกบางชนิดอาจประกอบด้วยแกลบ (Husk) ซึ่งแกลบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดอัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ

ตามหลักการแล้วข้าวเปลือกจะมีส่วนประกอบหลัก 2 องค์ประกอบคือ แอนโดรสเปิร์ม และจมูกข้าว เนื้อเยื่อทั้งหมดของจมูกข้าวประกอบด้วยเซลล์ที่มีความไวต่อความร้อนอย่างมาก ส่วนแอนโดรสเปิร์มจะประกอบไปด้วยผนังเซลล์ที่บาง (Thin-walled cell) บรรจุไปด้วย Protoplasm และเม็ดแป้ง (Starch granules) ทำหน้าที่ในการเก็บอาหารสำรองไว้สำหรับในระยะเป็นตัวอ่อน (Embryo) ตามรูปที่ 2.2 ในการสีข้าวเปลือกจะได้ส่วนที่เป็น ข้าวขาว (White rice) (ตามรูปที่ 2.2 คือ Brown rice) ออกมาซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



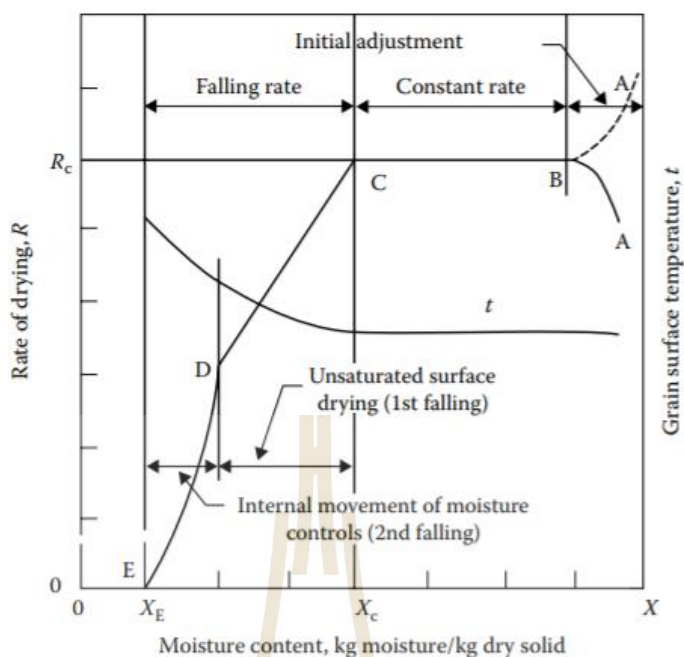
รูปที่ 2.2 (a) ส่วนประกอบของเมล็ดข้าวเปลือก (Paddy) และ (b) โครงสร้างภายในข้าวขาว
ที่มา: Amalendu Chakraverty and R. Paul Singh (2014)

2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งหรือการทำให้แห้งคือการลดความชื้นหรือการนำน้ำออกจากวัสดุด้วยกลไกการระเหยน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งวิธีที่เลือกใช้เช่น การนำอากาศร้อนมาผ่านวัสดุเพื่อให้เกิดความต่างของอุณหภูมิและผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและวัสดุเองเพื่อให้เกิดการระเหยขึ้น (Amalendu Chakraverty และ R. Paul Singh (2014)) หลักการอบแห้งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.4.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) อัตราการระเหยของน้ำอยู่ในสภาวะคงที่ตลอดช่วงนี้ (รูปที่ 2.3) ซึ่งอัตราการระเหยหรืออัตราการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับ 1. ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและผิวเปียกของวัสดุในความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 2. ความแตกต่างของความชื้นอากาศและผิวเปียกของวัสดุที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศคงที่ 3. ความเร็วการเคลื่อนที่ของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นของอากาศคงที่



รูปที่ 2.3 กราฟวัฏจักรการอบแห้ง

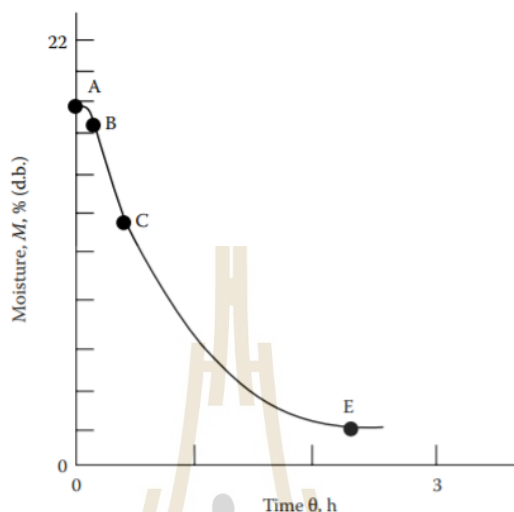
ที่มา: Amalendu Chakraverty and R. Paul Singh (2014)

ในระยะเวลา Constant Rate การอบแห้งจะเป็นการระเหยที่ผิวและความชื้นจะระเหยออกไปในอากาศซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันไอ ณ จุดที่สิ้นสุดระยะ Constant Rate เราเรียกจุดนี้ว่า จุดความชื้นวิกฤตของวัสดุ, x_c โดยเฉลี่ยแล้วจุดความชื้นวิกฤตจะขึ้นอยู่กับวัสดุโดยจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของความชื้นของวัสดุที่ผิว ความหนาของวัสดุ และอัตราการอบแห้ง จุดความชื้นวิกฤตนั้นยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุด้วย เช่น รูปร่าง ขนาด และขอบเขตของการอบแห้ง

2.4.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลด (Falling Rate Period)

ช่วงอัตราการอบแห้งลด (Falling Rate Period) จะเกิดขึ้นหลังจากช่วง Constant Rate ซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรการอบแห้งวัสดุทั้งหมด ผิวที่เปียกหรือมีความชื้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสิ้นสุด Falling Rate Period ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.3 ว่าอัตราการการอบแห้งนั้นลดลงเรื่อยๆ สาเหตุของการสิ้นสุด Falling Rate Period นี้เนื่องจากความชื้นไม่สามารถเคลื่อนตัวจากจุดศูนย์กลางหรือภายในเนื้อวัสดุมาสู่ที่ผิวของวัสดุได้ ระยะ Falling Rate คือช่วงที่อุณหภูมิของผิวและจุดศูนย์กลางวัสดุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศเป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วง Constant Rate Period ระยะของ Falling Rate จะแบ่งเป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ

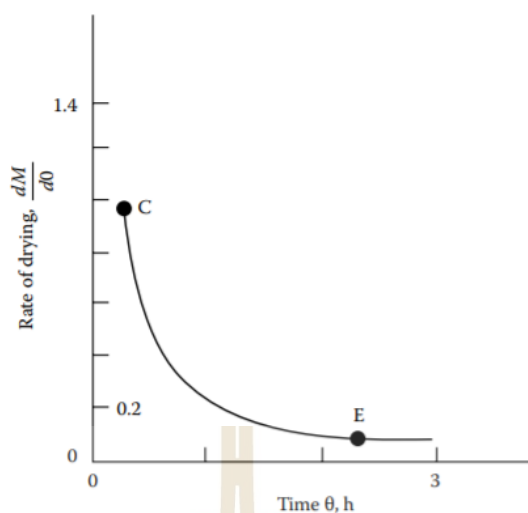
คือ การอบแห้งแบบไม่อิ่มตัวของน้ำที่ผิว (Unsaturated surface drying) และ การอบแห้งที่อาศัยการควบคุมอัตราการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ที่มา: Amalendu Chakraverty and R. Paul Singh (2014)

จากรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 เป็นความสัมพันธ์ที่อธิบายถึงพฤติกรรมความชื้นภายในวัสดุที่ทำการอบแห้งจะเห็นได้ว่าจะช่วง A-B เป็นช่วงที่ความชื้นค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากช่วงต้นของการอบแห้ง ความร้อนจากการอากาศร้อนยังไม่สามารถกระจายความร้อนได้ทั่ววัสดุ ดังนั้นการระเหยยังเกิดเฉพาะที่ผิวของวัสดุ ส่วนช่วง B-C เป็นช่วงที่ความร้อนสามารถเริ่มกระจายได้ทั่ววัสดุ ที่ผิวของวัสดุความชื้นเริ่มระเหยออกได้มากขึ้นปริมาณน้ำที่ผิวของวัสดุเริ่มลดน้อยลงซึ่งส่งผลให้เนื้อวัสดุที่เป็นชั้นถัดมาจากผิวของวัสดุได้รับความร้อนมากขึ้น ดังนั้นช่วงนี้จึงเห็นได้ว่าอัตราการลดความชื้นนั้นรวดเร็วกว่าช่วง A-B และช่วงสุดท้ายคือช่วง C-E ซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นส่วนใหญ่ของวัสดุเริ่มลดลงอย่างมากซึ่งช่วงนี้ความชื้นหรือปริมาณน้ำที่ผิวเริ่มระเหยออกหมดและปริมาณน้ำที่อยู่ภายในวัสดุที่เป็นชั้นถัดจากผิวของวัสดุเริ่มระเหยมากขึ้นและปริมาณลดลง ในช่วงท้ายของ C-E อัตราการลดลงของความชื้นนั้นเริ่มช้าลงเนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุเริ่มน้อยลงและออกสู่ผิวของวัสดุยากเนื่องจากการหดตัวของวัสดุทำให้รูพรุนของวัสดุแคบลง ซึ่งสุดท้ายของช่วง C-E ความชื้นของวัสดุจะเริ่มคงที่ซึ่งหากอบแห้งต่อไปอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุได้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
ที่มา: Amalendu Chakraverty and R. Paul Singh (2014)

2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืช

คุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดพืชมีความสำคัญในการออกแบบระบบอบแห้ง ค่าคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ (Drag coefficient) ค่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter) องศาความเป็นทรงกลม (Degree of sphericity) ค่าความชื้นในเมล็ด (Moisture content) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ความหนาแน่นของเมล็ด (Kernel density) และค่าความพรุน (Porosity)

2.5.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านการไหล (Drag coefficient, C_d)

คือค่าสัมประสิทธิ์ต้านการเคลื่อนที่ของวัสดุซึ่งค่านี้มีปัจจัยอื่นๆ เป็นตัวกำหนด เช่น ความหนาของวัสดุ รูปร่าง และความขรุขระของผิววัสดุ รวมถึงการจัดเรียงวัสดุอบแห้งที่อยู่ภายใน กอซึ่งการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ สามารถทำได้โดยการทดลองให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านเมล็ดพืชด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งที่ทำให้เมล็ดพืชเริ่มลอยตัวในชั่วขณะหนึ่ง (Terminal velocity) ณ จุดนี้แรงโน้มถ่วงที่โลกกระทำต่อเมล็ดพืชจะเท่ากับแรงลอยตัวของวัสดุ หรือ Drag force (Mohsenin Nurin, 1980) และมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.1)

$$M \times g = \rho_A V_t^2 C_d A_f \quad (2.1)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ว่า

$$C_d = \frac{2Mg}{\rho_A A_f V_t^2} V_t \quad (2.2)$$

โดย	M	คือ มวลของเมล็ดมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)
	ρ_A	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)
	C_d	คือ drag coefficient
	A_f	คือ ค่า Frontal area มีหน่วยเป็น m ²
	V_t	คือ ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)

ค่า Frontal area คำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$A_f = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ L_1 และ L_2 คือ ความกว้างและความหนาของเมล็ดพืชในหน่วยเมตร (m)

2.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter)

ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter) สามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.4) (Mohsenin Nurin, 1980)

$$D = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

โดย	L	คือ ความยาวของเมล็ด (m)
	W	คือ ความกว้างของเมล็ด (m)
	T	คือ ความหนาของเมล็ด (m)

2.5.3 องศาความเป็นทรงกลม (Degree of sphericity, ϕ)

หรือค่าความกลม เป็นปริมาณที่ไม่มี มิติ (Dimensionless) คำนวณหาได้จาก

สมการ (2.5)

$$\phi = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L \times 100} \quad (2.5)$$

2.5.4 ค่าความชื้นในเมล็ด (Moisture content)

ความชื้นในวัสดุเป็นค่าที่ใช้บอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุทั้งหมด การบอกความชื้นในวัสดุมี 2 แบบ คือ ความชื้นฐานเปียก (Wet basis) และความชื้นฐานแห้ง (Dry basis) (เกียรติศักดิ์ ใจโต, 2558) ซึ่งมีรายละเอียดดังสมการ (2.6) และ (2.7) ดังนี้

1. ความชื้นฐานเปียก (Wet basis)

$$M_w = \frac{(W - d)}{W} \quad (2.6)$$

2. ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis)

$$M_d = \frac{(W - d)}{d} \quad (2.7)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของวัสดุ (kg)

d คือ น้ำหนักแห้งวัสดุ (kg)

ซึ่งการทดสอบหาค่าความชื้นทั้ง 2 ค่าทำได้ตามมาตรฐาน ASABE (ASAE, 1997) โดยจะต้องนำวัสดุมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อชั่งหามวลแห้ง

การปรับความชื้นในเมล็ดพืชหรือวัสดุ

การปรับความชื้นในวัสดุที่ใช้อบแห้งสามารถทำได้ด้วยการเติมน้ำกลับเข้าไปในวัสดุที่เราทราบค่าความชื้นและน้ำหนักแห้งของวัสดุ จนกระทั่งรู้มวลแห้งของวัสดุที่อบแห้ง หากเรารู้มวลเริ่มต้นก่อนการอบแห้งและทราบมวลแห้งหลังจากได้ทำการอบไล่ความชื้นออกไปหมดแล้วเรา

สามารถคำนวณหาความชื้นเริ่มต้นของวัสดุตามฐานเปียกและสามารถคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปวัสดุเมื่อกำหนดความชื้นใหม่ (ASABE, 1997)

$$W_2 = W_1 \times \left[\frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \right] W_2 \quad (2.8)$$

โดย	W_2	คือ ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ (kg)
	M_1	คือ ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ (%wb,เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก)
	M_2	คือ ความชื้นเริ่มต้น (%wb,เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก)
	W_1	คือ มวลของกองวัสดุก่อนอบแห้ง(kg)

2.5.5 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ความหนาแน่นของเมล็ด (Kernel density) และค่าความพรุน (Porosity)

ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

คือการตวงวัสดุหรือเมล็ดพืชใส่ในภาชนะที่รู้ปริมาตรความจุแน่นอนจนเต็มความจุของภาชนะ แล้วจึงชั่งน้ำหนักของเมล็ดพืชนั้น ความหนาแน่นรวมคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$\rho_b = \frac{W_g}{V_g} \quad (2.9)$$

โดย	ρ_b	คือ ความหนาแน่นรวมของเมล็ด (kg/m ³)
	W_g	คือ น้ำหนักของเมล็ดเป็นกอนมีหน่วยเป็น (kg)
	V_g	คือ ปริมาตรของกองเมล็ดมีหน่วยเป็น (m ³)

ความหนาแน่นของเมล็ด (Kernel Density)

ความหนาแน่นของวัสดุชั้นเดียวหรือเมล็ดพืชเพียงเมล็ดเดียว ซึ่งจะวัดหาปริมาตรโดยการแทนที่น้ำหรือของเหลวและชั่งน้ำหนักของเมล็ดหนึ่งเมล็ดนั้นโดยตรง การหาความหนาแน่นของเมล็ดนี้จะต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง

ค่าความพรุน (porosity)

คือที่เมล็ดหรือวัสดุมีโครงสร้างภายในที่อนุญาตให้อากาศเข้ามาแทรกได้ซึ่งหากสามารถหาค่า porosity ได้ก็จะสามารถหาค่า Kernel Density ได้เช่นกันโดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการ (2.10) (Mohsenin Nurin,1980)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_k}\right) \times 100\% \quad (2.10)$$

โดย ε คือ ความพรุน (%)

ρ_b คือ ความหนาแน่นรวมของเมล็ด (kg/m^3)

ρ_k คือ ความหนาแน่นของเมล็ด (kg/m^3)

2.6 เครื่องอบแห้ง

กระบวนการลดความชื้นเป็นกระบวนการรูปแบบหนึ่งที่ใช้รักษาอาหารและลดกิจกรรมทางความชื้นเพื่อยืดอายุเก็บรักษาของผลไม้ พืชผัก และผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ (Rui Wang และคณะ, 2011b; Arum S. Mujumdar, 2010; Min Zhang et al., 2006) ซึ่งกระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่เป็นฐานในการลดความชื้นแต่ยังมีข้อจำกัดคือสิ้นเปลืองพลังงาน วิธีการลดความชื้นที่มีพื้นฐานมาจากการระเหยน้ำออกจากผิวผ่านความร้อนได้แก่ การใช้ลมร้อนในการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุ หรือการใช้การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying) ที่ทำให้ภายในห้องอบแห้งมีสถานะเป็นสุญญากาศเพื่อทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อช่วยรักษาคุณภาพและความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ อีกวิธีการหนึ่งคือการอาศัยการระเหิดของน้ำออกจากวัสดุผ่านการแช่แข็งและลดความดัน (Freeze drying) ที่ใช้ต้นทุนด้านพลังงานที่สูงแต่รักษาคุณค่าทางโภชนาการได้ดีที่สุด ทั้ง 3 วิธีมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำในช่วงอัตราการอบแห้งลดของกระบวนการอบแห้ง (Falling rate period of drying) (Carter D. Clary et al., 2005; Min Zhang et al., 2003; Min Zhang et al., 2005) นอกจากนี้การขยายเวลาการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นที่เหมาะสมในช่วงอัตราการอบแห้งลดจะส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งหากการอบแห้งนั้นใช้วิธีการพาความร้อนจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ในด้านรูปร่างและอาจสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ (Nidhal Mousa and Mohammed Farid, 2002) อีกวิธีการหนึ่งคือการประยุกต์ใช้คลื่นหรือรังสีในย่านต่างๆ มาทำความร้อนแก่วัสดุ เช่น รังสีไมโครเวฟ และรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งมีหลายชนิดและมีหลักการทำงานแตกต่างกัน ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเครื่องอบแห้งแบบอาศัยอากาศเป็นตัวพาความร้อนเป็นหลัก (พิริสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุสตาฟา ยะกา และประชา บุณยวานิชกุล, 2557) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ

จากรูปที่ 2.6 ตัวเครื่องประกอบด้วยห้องกำเนิดความร้อนส่วนใหญ่ใช้กับเมล็ดพันธุ์ ซึ่งมีช่องว่างทางด้านบนเพื่อใช้วางกระสอบของข้าวเปลือกซึ่งต้องการอบ ซึ่งโดยปกติมีจำนวนหลายช่องสามารถวางข้าวเปลือกได้ครั้งละหลายกระสอบตามจำนวนของช่องว่าง ลมร้อนจะถูกเป่าผ่านช่องว่างของข้าวเปลือกที่บรรจุในกระสอบ เครื่องอบแบบนี้จะใช้อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 43 องศาเซลเซียส และในระหว่างการอบแห้งจะต้องพลิกกลับกระสอบเป็นระยะๆ เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารทั่วถึงทั้งด้านบนและด้านล่างของกระสอบ

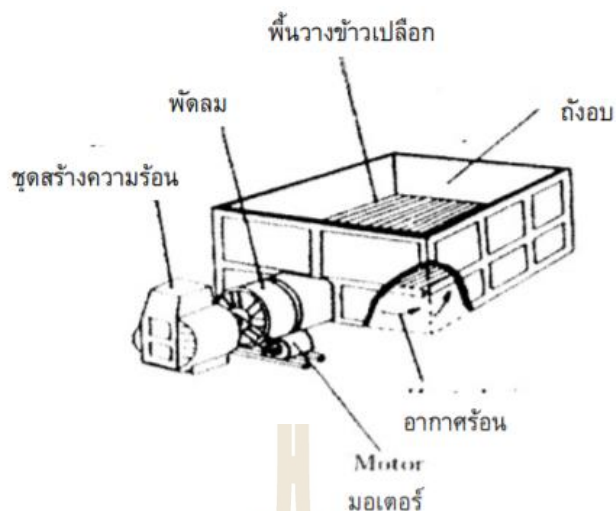


รูปที่ 2.6 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ

ที่มา: พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ (2557)

2.6.2 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ

เครื่องลดความชื้นแบบกระบะ (รูปที่ 2.7) ประกอบด้วยกระบะที่บรรจุข้าวเปลือกอยู่บนตะแกรง โดยด้านล่างของตะแกรงเป็นห้องอากาศร้อนที่ต่อเข้ากับพัดลมและเครื่องกำเนิดอากาศร้อน อากาศร้อนจะพัดผ่านชั้นของข้าวเปลือกที่อยู่บนแผ่นตะแกรงจากด้านล่างสู่ด้านบน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับอากาศร้อน โดยความชื้นของข้าวเปลือกทางด้านล่างจะลดลงเร็วกว่าทางด้านบน เครื่องลดความชื้นแบบนี้ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส และที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่จะใช้กับเมล็ดพันธุ์ เนื่องจากเมล็ดข้าวอยู่กับที่ จึงไม่ส่งผลต่อการแตกตัวของเมล็ดมากนัก

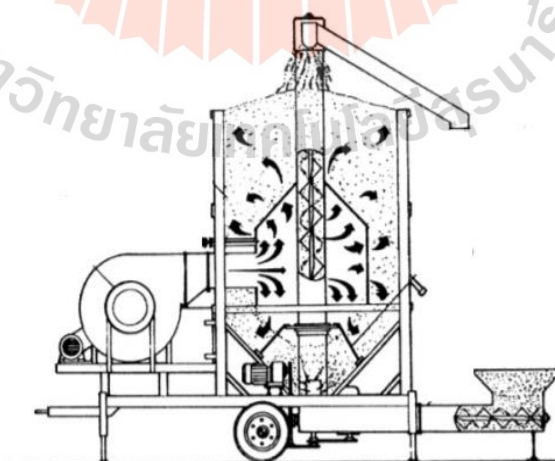


รูปที่ 2.7 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ

ที่มา: พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ (2557)

2.6.3 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน

เครื่องลดความชื้นแบบถังหมุนเวียนนี้ประกอบด้วยถังบรรจุข้าวเปลือกซึ่งทำด้วยตะแกรงเป็นรูปทรงกระบอกแนวตั้งส่วนกลางของถังจะมีท่อลมทำด้วยตะแกรงรูปทรงกระบอกซ้อนอยู่ใน ลมร้อนถูกเป่าให้ไหลผ่านเมล็ดตามแนวรัศมีจากรูตะแกรงออกสู่ภายนอก ข้าวเปลือกที่อยู่ด้านล่างจะถูกลำเลียงขึ้นไปด้านบนใหม่หลายเที่ยวจนกว่าจะแห้ง เครื่องออกแบบนี้ได้มีการสร้างจำหน่ายในอดีตแต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากปัญหาเรื่องฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายรบกวนผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่อยู่ใกล้เคียง รวมทั้งปัญหาเรื่องการสึกหรอของระบบลำเลียงในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน

ที่มา: พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ (2557)

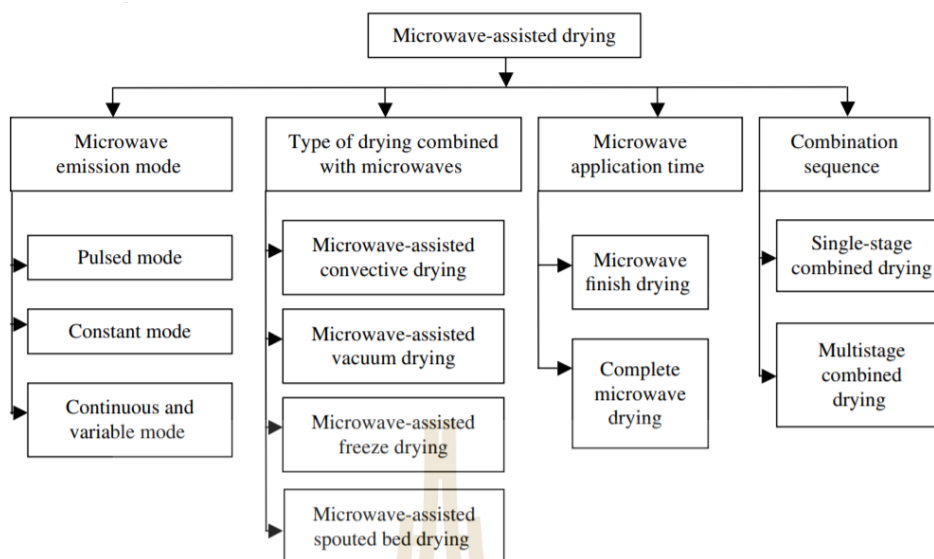
2.7 การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในปัจจุบันการพัฒนาระบบให้ความร้อนเพื่อการอบแห้งยังคงดำเนินมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาวิธีการพาคความร้อนที่ดีขึ้นและลดระยะเวลาการอบแห้งให้สั้นลง การลดขนาดเครื่องอบแห้ง การทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างทั่วถึงและมีพฤติกรรมการอบแห้งที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous drying) ตลอดจนการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟจึงอาจเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถพัฒนากระบวนการอบแห้งให้ดีขึ้นได้ (B.Abbasi Souraki et al.,2009)

คลื่นไมโครเวฟได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อที่จะทำให้การอบแห้งอาหารหรือผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ส่วนใหญ่แล้วคลื่นไมโครเวฟจะถูกประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการอบแห้งแบบอื่น เช่น การอบแห้งแบบพาคความร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่แข็ง ทั้ง 3 วิธีนี้เป็นวิธีการอบแห้งแบบทั่วไป (Conventional Drying Method) ซึ่งหากนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมด้วยจะทำให้เกิดเป็นวิธีการอบแห้งแบบผสม (Combined Drying Method) ซึ่งได้แก่

- การอบแห้งแบบสุญญากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted vacuum drying, MWVD)
- การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted freeze drying, MWFD)
- การอบแห้งแบบเป่าพ่นเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted spouted bed drying, MWSD)
- การอบแห้งแบบพาคความร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted convective drying, MWCD)

ในรูปที่ 2.9 แสดงการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในรูปแบบต่างๆ (Yingqiang Wang et al.,2011b and Mehmet Fatih Arıkan et al.,2012)



รูปที่ 2.9 การแบ่งเทคนิคประยุกต์ใช้ไมโครเวฟแบบต่าง ๆ

ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

การเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบทั่วไป (Microwave-Assisted drying) จะต้องอยู่บนหลักการทำความร้อนแบบเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ซึ่งจะแตกต่างกับการพาความร้อน (Convective) การนำความร้อน (Conduction) หรือการแผ่รังสีความร้อน (Radiation transfer) ซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งแบบทั่วไป (Conventional drying method) กล่าวคือ ผิวของวัสดุจะรับความร้อนจากแหล่งความร้อนด้วยวิธีการข้างต้นจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่พื้นที่ตรงกลางของวัสดุในรูปแบบการนำความร้อน ซึ่งต่างจากการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่จะทำให้เกิดความร้อนจากภายในของวัสดุ การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบทั่วไปจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งลงได้ถึง 25-90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการอบแห้งวัสดุด้วยเครื่องอบแห้งแบบทั่วไปเพียงอย่างเดียว และยังสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งให้สูงขึ้นได้ถึง 4 - 8 เท่า (Hao Feng et al., 2012) นอกจากนี้การบริโภคพลังงานของวิธีการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบทั่วไปจะมีค่าลดลงเหลือเพียง 31 ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น เมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบทั่วไปเพียงอย่างเดียว (Xu Duan et al., 2010b; J. Varith et al., 2007; T.D. Durance และ J.H. Wang, 2002; G.P. Sharma และ Suresh Prasad, 2006a) การศึกษาของ Zheng-Wei Cui et al., (2003) และ Tein M. Lin et al., (1999) และ (1998) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบทั่วไปภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะมีคุณภาพที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีแบบทั่วไปเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยวิธีการนี้จะต้องระวังการเกิดความร้อนที่สูงเกินไปจากคลื่นไมโครเวฟ (Thermal runaway) จนทำให้

ผลิตภัณฑ์เกิดการไหม้ได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้หากใช้ไมโครเวฟในการอบแห้งเพื่อนำความชื้นออกอย่างช้าๆ ในบริเวณที่เป็น Hygroscopic region หรืออาจก็ทำให้เกิดจุดความร้อนขึ้นบนผลิตภัณฑ์ (Hot spot) ซึ่งอาจทำความเสียหายแก่โครงสร้างของตัวผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการควบคุมกระบวนการการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับการทำอบแห้งแบบทั่วไป (Microwave-Assisted drying) จะต้องทำให้เงื่อนไข (Boundary condition) นั้นเหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์ซึ่งจะช่วยให้การใช้พลังงานน้อยที่สุดและหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้

2.8 การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบทั่วไป (Microwave-Assisted Drying of Foods)

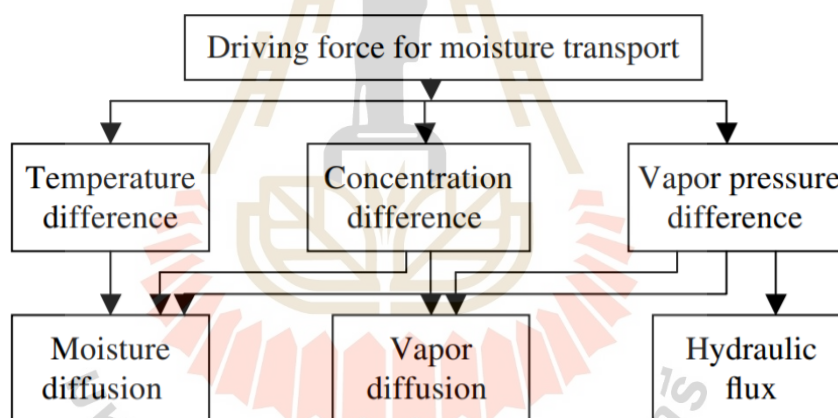
2.8.1 ทฤษฎีพื้นฐานของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นวิทยุแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในความถี่ระหว่าง 300 เมกกะเฮิร์ต และ 300 กิกะเฮิร์ต ถึงแม้ว่าคลื่นไมโครเวฟจะมีช่วงความถี่ที่กว้างมากแต่ในการประยุกต์ใช้งานจะมีการเลือกใช้อย่างเฉพาะเจาะจงเพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดกับคลื่นวิทยุช่วงอื่นเช่น วิทยุสื่อสารและคลื่นเรดาร์ (U.S. Shivhare et al.,2010) ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีการนำมาใช้มี 2 ค่า คือ 1) ความถี่ 2,450 เมกกะเฮิร์ต สำหรับครัวเรือน (เตาไมโครเวฟที่ใช้อุ่นอาหาร) และ 2) ความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต สำหรับอุตสาหกรรม (Serpil Sahin and Servet Gülüm Samnu,2006)

เนื่องจากไมโครเวฟเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร ซึ่งมีกลไกการทำความร้อนผ่านการกระตุ้นสารที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก(Dielectric) เช่น น้ำ ไขมัน และโปรตีน การทำความร้อนด้วยกระบวนการกระตุ้นสารไดอิเล็กทริกจะแตกต่างจากกระบวนการนำความร้อน การพาความร้อน ซึ่งจะต้องมีแหล่งความร้อนภายนอกอย่างชัดเจนทำความร้อนแบบไฟฟ้า หรือความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และต้องอาศัยตัวกลาง (Medium) ในการส่งผ่านพลังงานไปถึงตัววัสดุ จึงจะสามารถกระจายความร้อนเข้าสู่ภายในตัววัสดุได้ กระบวนการนี้ใช้เวลานานและขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ แตกต่างจากการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ทั้งปริมาตรของวัสดุจะร้อนขึ้นอย่างทั่วถึงมากกว่า เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีความสามารถในทะลุทะลวงของคลื่น (Penetration Depth) ต่อวัสดุ ทำให้เกิดการทำความร้อนจากภายในของวัสดุและส่งผ่านออกสู่ภายนอก

อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจได้อย่างถูกต้อง ไมโครเวฟไม่ใช่รูปแบบพลังงานความร้อน แต่พลังงานของไมโครเวฟคือพลังงานจากแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบของคลื่นไมโครเวฟ ที่จะทำปฏิกิริยากับสารไดอิเล็กทริกที่อยู่ภายในวัสดุแล้วจึงเกิดความร้อนขึ้น การสั่นของสารไดอิเล็กทริกในอาหารหรือผลิตภัณฑ์จะมี 2 กลไกหลักๆ คือ การคลายพลังงานของสารสองขั้ว (Dipolar relaxation)และการนำของสารไอออนิก (Serpil Sahin and Servet Gülüm Samnu, 2006) สำหรับการนำของสารไอออนิก ไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเคลื่อนตัว

ของไอออนในทิศทางตรงกันข้ามของสภาพขั้วของมัน (Polarity) ซึ่งการเคลื่อนไหวของไอออนจะทำให้เกิดการชนกับโมเลกุลอื่นๆ ในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดพลังงานจลน์อย่างไม่มีระเบียบขึ้นและกลายเป็นการทำความร้อนของสาร ไดอิเล็กทริกขึ้น เมื่อโมเลกุลที่มีขั้วได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2,450 เมกกะเฮิร์ต จะเกิดการหมุนหรือสั่นขึ้นด้วยอัตรา 2.45×10^9 รอบต่อวินาที และแรงเสียดทานที่เกิดจากการหมุนอย่างซ้ำๆ ของโมเลกุลก็จะทำให้เกิดความร้อนตามมาซึ่งมันจะเริ่มจากผิวและถ่ายเทเข้าสู่ภายในวัสดุคล้ายกับกรณีทำความร้อนแบบทั่วไป (Conventional drying method) น้ำที่เป็นส่วนประกอบภายในอาหารที่เป็นด้วยสารสองขั้วจะเกิดความร้อนขึ้นและส่งผลให้เกิดความดันไอที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลของน้ำจากภายในวัสดุออกสู่ผิวของวัสดุที่ถูกทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ถึงตอนนี้ น้ำจะถูกขับออกจากภายในวัสดุสู่ผิวของวัสดุอย่างซ้ำๆ ด้วยกลไกผสมอันได้แก่ การแพร่ของความชื้น การแพร่ของไอน้ำ และการเกิดไฮดรอลิกฟลักซ์ กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์อาหารหรือพืชผลเกษตรในระหว่างการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถสรุปได้ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการเคลื่อนไหวของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์อาหารหรือพืชผลเกษตรในระหว่างการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ดัดแปลงจาก Zheng-Wei Cui (2004)

ความชื้นจะถูกนำออกมาสู่ผิววัสดุด้วยกลไกตามรูปที่ 2.10 ซึ่งความชื้นที่ผิวของวัสดุสามารถถูกนำออกไปได้ด้วยวิธีการพาความร้อน (Hot air convection drying) ด้วยลมร้อนหรือสามารถใช้การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) ในการนำความชื้นออกหรือการทำให้แข็งแล้วระเหิดออกโดยการลดความดันแบบการอบแห้งแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) เมื่อความชื้นบนผิวถูกไล่ออกไปด้วยวิธีการอบแห้งแบบทั่วไปซึ่งจะก่อให้เกิดแรงขับเคลื่อนดันความชื้นออกมาที่ผิวอีกรอบหนึ่ง ดังนั้นกระบวนการจะเกิดแบบซ้ำๆ จนกระทั่งกระบวนการอบแห้งเสร็จสิ้น (Zheng-Wei

Cui, 2004) ในระหว่างกระบวนการที่กล่าวมาพลังงานไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในการระเหย

2.8.2 การดูดซับพลังงานไมโครเวฟโดยสารไดอิเล็กทริก (Energy absorption by product during dielectric heating)

โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของกำลังงานเฉลี่ย P (Average power density, การดูดซับเชิงปริมาตรของพลังงานไมโครเวฟ, Wm^{-3}) ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ซึ่งหาได้จากสมการ (2.11) (Mohammad Al-Harahshela และคณะ, 2009)

$$P = 2\pi f \varepsilon \varepsilon'' E^2 \quad (2.11)$$

โดยที่	f	คือ ความถี่ของไมโครเวฟ(Hz)
	ε	คือ ความสามารถที่สสารสามารถเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า (F/m) มีค่าคงที่เท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m
	ε''	คือ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Factor)
	E	คือ ค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ (V/m)

วัสดุที่เป็นสารไดอิเล็กทริกอย่างผลิตภัณฑ์อาหารจะแปลงพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารไดอิเล็กทริกที่เกิดความร้อนสามารถคำนวณตามสมการ (2.12) (Marc Regier and Helmar Schubert, 2005)

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = 55.63 \times 10^{-12} f \quad (2.12)$$

โดย	C_p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)
	$\frac{dT}{dt}$	คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ($^\circ\text{C} / \text{s}$)

ซึ่งอัตราความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้นๆ

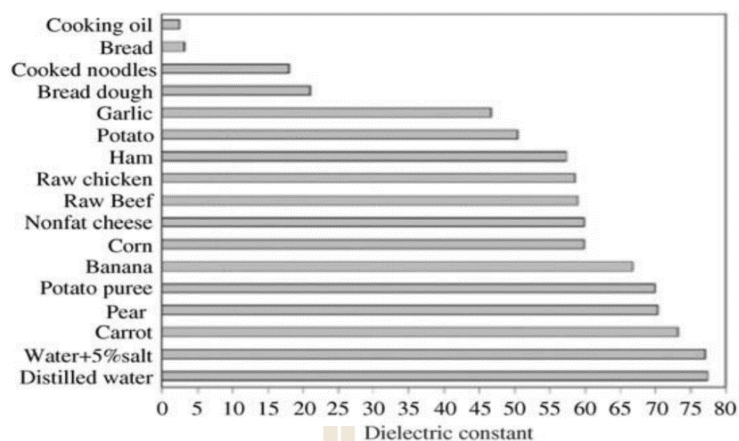
2.8.3 คุณสมบัติของสารไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties)

คุณสมบัติของสารไดอิเล็กทริกเป็นตัวแปรหลักที่กำหนดพฤติกรรมกรรมการปฏิสัมพันธ์ของสารในสนามแม่เหล็กและทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากสารไดอิเล็กทริก (M.E.Sosa Morales และคณะ, 2010) โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของสารไดอิเล็กทริกจะสามารถเขียนเป็นจำนวนเชิงซ้อนในรูปความสัมพันธ์จำนวนเชิงซ้อนทางด้านสนามไฟฟ้า (Relative complex permittivity) ดังสมการ (2.13)

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.13)$$

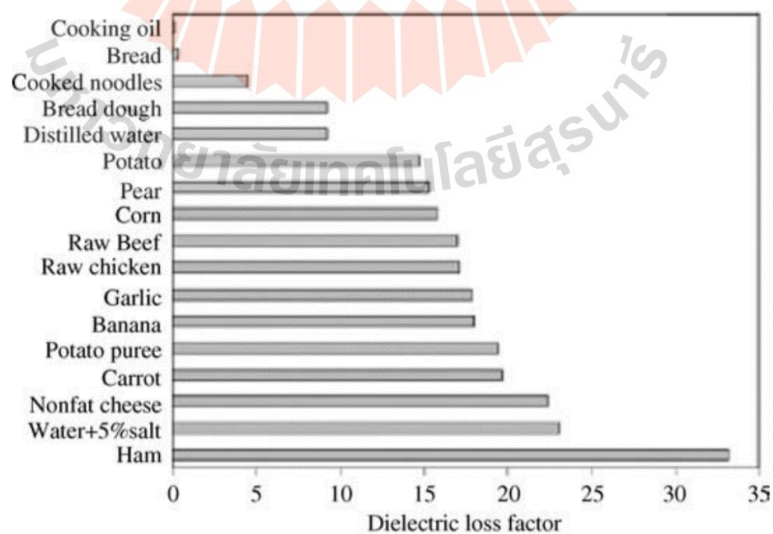
โดย ϵ' คือ จำนวนจริงที่เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
 ϵ'' คือ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก(dielectric loss factor)
 j คือ $\sqrt{-1}$

ในที่นี้จำนวนจริงที่เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ' เป็นตัวแปรที่แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ϵ'' คือการวัดความสามารถในการกระจายพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของความร้อน ยิ่งมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากเท่าใด วัสดุจะสามารถเก็บหรือซึมซับพลังงานไมโครเวฟได้ง่ายขึ้นเท่านั้น คุณสมบัติสารไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับความชื้นในวัสดุ ส่วนประกอบของวัสดุ และอุณหภูมิตลอดจนความถี่ของสนามไมโครเวฟ ค่าคงที่ของสารไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้นแต่จะลดลงตามความถี่ของสนามไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าสารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะไม่สามารถทำนายได้ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอาจทำให้ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ สารไดอิเล็กทริกของน้ำจะมีค่าสูงในวัสดุจำพวกอาหาร



รูปที่ 2.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอาหารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ดัดแปลงจาก Serpil Sahin and Servet Gülüm Samnu (2014)

สารไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกในอาหารชนิดต่างๆ สามารถดูได้จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับซึ่งจากรูปเราจะเห็นได้ว่าน้ำมันสำหรับทำอาหารนั้นมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่ำเนื่องจากว่าส่วนประกอบเป็นสารไม่มีขั้ว (Nonpolar-characteristic) แต่สำหรับอาหารที่มีความชื้นเป็นส่วนประกอบหรือน้ำเป็นส่วนประกอบเช่นผลไม้ จะมีส่วนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สูงเนื่องจากมีส่วนประกอบสารมีขั้ว และอาหารที่มีเกลือเป็นส่วนประกอบจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงที่สุดเช่น แฮม (Serpil Sahin และ Servet Gülüm Samnu, 2006)



รูปที่ 2.12 ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของอาหารต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ดัดแปลงจาก Serpil Sahin and Servet Gülüm Samnu (2014)

2.8.4 ความลึกของการทะลุทะลวง (Penetration depth)

ความลึกของการทะลุทะลวงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญเนื่องจากใช้วัดว่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้ความร้อนแก่วัสดุได้อย่างทั่วถึงอย่างไร (Marc Regier และ Helmar Schubert, 2005) ความลึกของการทะลุทะลวงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบในฟังก์ชันตัวแปร ϵ' และ ϵ'' และสามารถคำนวณตามสมการ (2.13) และ (2.14) ดังนี้ (Arun S.Mujumdar, 2006)

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi \sqrt{\epsilon' \left[\sqrt{1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2} - 1 \right]}} \quad (2.14)$$

หรือ

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi \epsilon''} \quad (2.15)$$

ในที่นี้ λ_0 คือ ค่าพื้นที่อิสระของความยาวคลื่นไมโครเวฟ (free space microwave wavelength) ซึ่งได้ได้จากสมการที่ (2.16) โดยที่ c_0 คือความเร็วแสงมีค่าประมาณ 3×10^8 m/s

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (2.16)$$

ผลิตภัณฑ์อาหารทั่วไปจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (ϵ'') น้อยกว่า 25 ซึ่งจะให้ระยะการทะลุทะลวงอยู่ระหว่าง 0.6-1 เซนติเมตร การทะลุทะลวงของไมโครเวฟที่มีต่ออาหารนั้นที่ความถี่ 915 และ 2,450 MHz และอาหารที่มีความชื้นสูงที่อุณหภูมิห้องสามารถสร้างการทะลุทะลวงได้ระหว่าง 0.3 ถึง 7 เซนติเมตรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารไดอิเล็กทริกของอาหารและขึ้นอยู่กับความถี่ของสนามไมโครเวฟ (M.E.Sosa-Mades et al., 2010) ระยะการเจาะหรือระยะการทะลุทะลวงของไมโครเวฟจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัสดุลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Swittra Bai-Ngew et al., 2010)

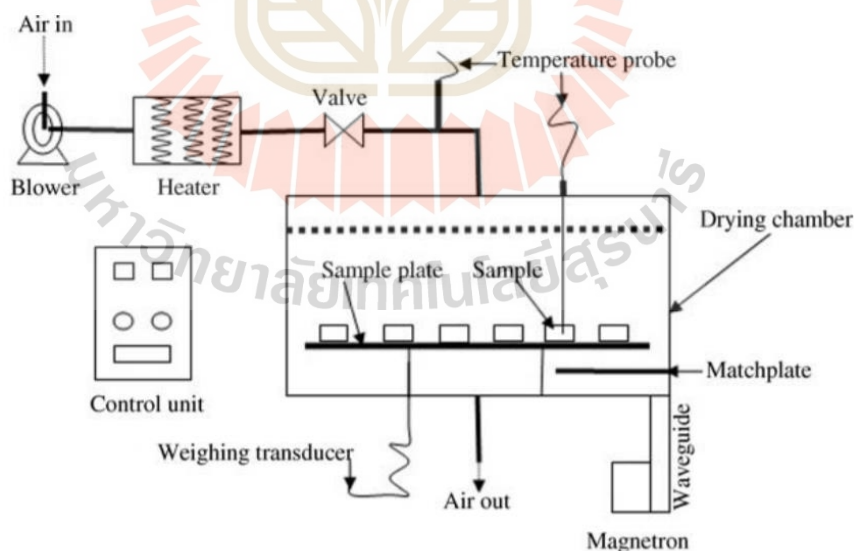
2.9 ระบบอบแห้งที่เสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟจะมีอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญ คือ หัวแม่กนิตรอน (Magnetron) ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานไมโครเวฟ ตัวนำทางคลื่น (Wave guide) ห้องอบแห้ง (Drying chamber) แผ่นวัสดุ (Material plate) ระบบการลดความชื้น (Dehumidification system)

ระบบขับเคลื่อนทางกล (Mechanical drive system) ระบบป้องกัน (Safety protection system) เซนเซอร์วัดค่าต่างๆ (Sensors) และระบบควบคุม (Control system) โดยพื้นฐานแล้ว ระบบการอบแห้งโดยไมโครเวฟจะช่วยผสมผสานการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นๆ โดยหลักๆ จะมี 4 แบบ ดังนี้

2.9.1 การอบแห้งแบบพาความร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Convective Drying Equipment)

จากรูปที่ 2.13 ระบบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไมโครเวฟ (Microwave generator) และระบบเป่าลม (Forced air system) เครื่องกำเนิดไมโครเวฟสามารถสร้างกำลังได้มากที่สุดที่ 1,000 วัตต์ ที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต ห้องอบแห้งจะวางอยู่ตัวในแนวนอนโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 เซนติเมตรและความสูง 10 เซนติเมตร ภายในติดตั้งถาดรองรับที่ทำมาจากเทฟลอน (Teflon) น้ำหนักที่ลดลง อุณหภูมิของวัสดุและกำลังงานของไมโครเวฟ จะถูกบันทึกทุกวินาทีด้วยเครื่องมือบันทึกของระบบ อากาศขาเข้าและอากาศขาออกจะอยู่ตำแหน่งตรงกลางพอดีของห้องอบแห้ง (Chamber) ในแนวตั้งเพื่อให้ลมร้อนกระจายได้ทั่วห้องอบแห้ง กำลังงานไมโครเวฟ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วอากาศและความชื้นของอากาศจะถูกปรับอย่างเหมาะสม อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัด Fiber-optic temperature sensors (ReFLex™, Neoptix, Canada) ซึ่งจะติดตั้งตำแหน่งต่างๆโดยขนาดของภาชนะวางนั้นจะปรับให้เหมาะสมตามการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 2.13 ระบบการอบแห้งแบบพาความร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

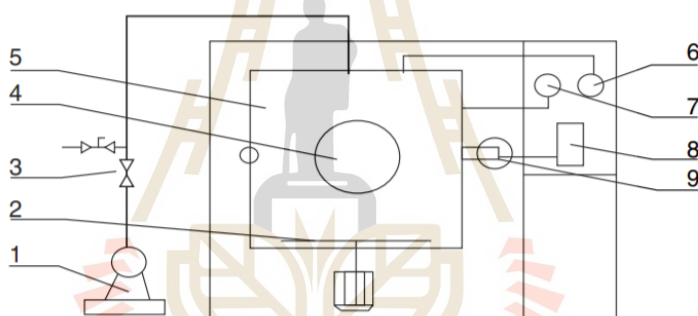
ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

โดยหลักการแล้วจะมี 3 วิธีในการเปิดใช้ระบบเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ คือ

1. ปล่อยคลื่นไมโครเวฟตั้งแต่เริ่มกระบวนการลดความชื้น
2. เมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลด จึงปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกไป
3. เริ่มปล่อยคลื่นไมโครเวฟเมื่ออัตราการอบแห้งเริ่มมีค่าน้อยลงหรือผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำ

ซึ่งไมโครเวฟจะช่วยให้การอบแห้งทำได้ดีขึ้น ช่วยกระตุ้นหรือเร่งให้น้ำออกมาสู่ผิวของวัสดุได้อย่างรวดเร็วได้ในอัตราสูง ในขณะที่การพาความร้อนจะช่วยนำความชื้นออกจากห้องอบแห้งและยังช่วยให้การอบแห้งทำได้อย่างเท่ากันแบบทั่วถึงผลิตภัณฑ์ (Homogeneous) ดังนั้นระบบอบแห้งพาความร้อนแบบมีไมโครเวฟช่วยไม่เพียงแต่ทำให้อัตราการอบแห้งนั้นเพิ่มขึ้น แต่รวมถึงการทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นด้วย

2.9.2 การอบแห้งแบบสุญญากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted vacuum drying)



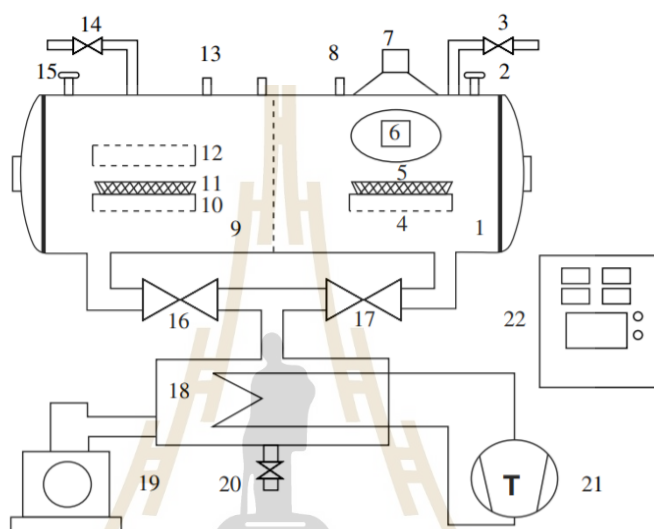
รูปที่ 2.14 ระบบอบแห้งแบบสุญญากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ ประกอบด้วย 1) ป้มสุญญากาศ 2) ถาดหมุน 3) วาล์ว 4) หน้าต่างกระจกสำหรับสังเกตการณ์ 5) ห้องอบแห้ง 6) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด 7) อุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศ 8) อุปกรณ์ปล่อยพลังงานของหัวแม่กนิตรอน และ 9) หัวแม่กนิตรอน

ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

ในรูปที่ 2.14 ระบบของเครื่องอบแห้งสุญญากาศโดยมีไมโครเวฟช่วย ซึ่งปริมาตรสำหรับการใส่ผลิตภัณฑ์จะมีขนาด 360 มิลลิเมตร x 340 มิลลิเมตร x 240 มิลลิเมตร หัวแม่กนิตรอนถูกออกแบบให้มีกำลังได้ถึง 750 วัตต์ ซึ่งถาดสำหรับวางผลิตภัณฑ์จะเชื่อมต่อกับเพลลาเชื่อมกับมอเตอร์ซึ่งจะหมุนในระหว่างการอบแห้งในระหว่างการอบแห้งดำเนินการไป การออกแบบโครงสร้างและขนาดหน้าต่างจะถูกออกแบบอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเนื่องจากความดันต่ำ ประตูกจะถูกเคลือบด้วย Convex-concave ซึ่ง

ส่งผลให้ไมโครเวฟรั่วร่น้อยกว่า 5 มิลลิวัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เครื่องอบแห้งสุญญากาศโดยมีไมโครเวฟช่วยจะทำงานโดยห้องอบแห้งมีความดันที่รักษาไว้อยู่ที่ 25 มิลลิบาร์ และหมุนด้วยความเร็ว 5 รอบต่อนาที (Zheng-Wei Cui et al, 2003)

2.9.3 การอบแห้งแบบแช่แข็งเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted freeze-drying)



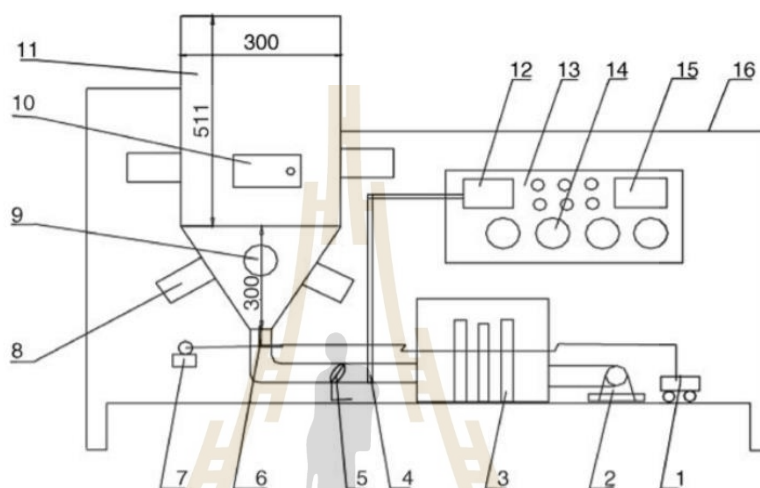
รูปที่ 2.15 ระบบอบแห้งแบบแช่แข็งเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ ประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้ง 2) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบไฟเบอร์ 3) วาล์วควบคุมสุญญากาศ 4) แผ่นรองรับตัวอย่างการทดลอง 5) ตัวอย่างที่นำมาอบแห้ง 6) และ 7) หัวปล่อยไมโครเวฟ 8) อุปกรณ์วัดความดัน 9) ห้องอบแห้งสำหรับ แช่เยือกแข็ง 10) และ 12) แผ่นความร้อน 11) ตัวอย่างที่นำมาอบแห้งในส่วนแช่เยือกแข็ง 13) เซนเซอร์วัดความดัน 14) วาล์วควบคุมสุญญากาศในส่วนแช่เยือกแข็ง 15) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 16) วาล์วควบคุมสุญญากาศขาเข้าในส่วนแช่เยือกแข็ง 17) วาล์วควบคุมสุญญากาศขาเข้า 18) ส่วนทำความเย็น 19) ปัมสุญญากาศ 20) วาล์วสำหรับปล่อยน้ำที่ควบแน่น 21) คอมเพลสเซอร์สำหรับทำความเย็น 22) ระบบควบคุม

ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

จากรูปที่ 2.15 ระหว่างการอบแห้งดำเนินไปนั้นความดันของห้องอบแห้งจะถูกรักษาไว้ที่ 100 ปาสคาล โดยใช้ปั๊มสุญญากาศอุณหภูมิจะถูกลดลงให้เหลือ -40 ถึง -45 องศาเซลเซียส จากนั้นแผ่นความร้อนจะให้ความร้อนตัวอย่างที่แช่อบแห้งซึ่งผลของการลดความดันและเพิ่มอุณหภูมิ

จะทำให้เกิดการระเหิดของน้ำออกจากวัสดุ ส่วนไมโครเวฟมีหน้าที่ในการเร่งและกระตุ้นให้สารไดอิเล็กทริกเกิดการสั่นจนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและช่วยให้เกิดการระเหิดเช่นกัน (Xu Duan et al., 2010b and Yingqiang Wang et al., 2011b)

2.9.4 การอบแห้งแบบเป่าพ่นเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted spouted bed drying equipment)



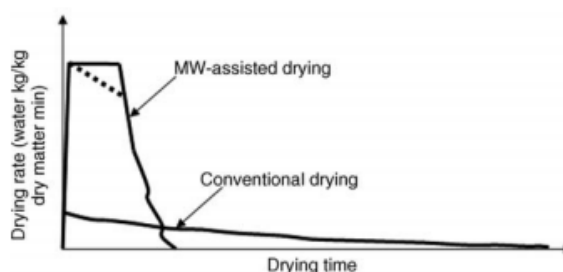
รูปที่ 2.16 ระบบการอบแห้งแบบเป่าพ่นเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ ประกอบด้วย 1) คอมเพลสเซอร์อัดอากาศ 2) เครื่องเป่าอากาศ 3) เครื่องกำเนิดความร้อนแบบไฟฟ้า 4) อุปกรณ์วัดความดัน 5) วาล์วปรับอัตราการไหล 6) Nozzle 7) ปุ่มสูบล้างของเหลวแบบรีดท่อ 8) หัวแม่กนิตรอน 9) หน้าต่างสังเกตการณ์ 10) หน้าต่างเปิดปิดที่สามารถสังเกตการณ์ 11) Spouted bed 12) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม 13) กล้องควบคุม 14) ปุ่มควบคุมกำลังไฟฟ้า 15) อุปกรณ์แบบ Optical-fiber 16) ฐานรองรับอุปกรณ์ทั้งหมด
ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

จากรูปที่ 2.16 ระบบควบคุมกำลังงานไมโครเวฟจะจ่ายพลังงานไมโครเวฟโดยหัวแม่กนิตรอน ซึ่งแต่ละหัวสามารถจ่ายกำลังได้สูงสุด 1 กิโลวัตต์ และสามารถปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 0 ถึง 4 กิโลวัตต์ อุณหภูมิของอากาศที่เกิดจากระบบอบแห้งนี้สามารถควบคุมให้อยู่ระหว่าง 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส ซึ่งจะควบคุมผ่านการส่งสัญญาณป้อนกลับ (Feed-back loop) ในตัวควบคุมความเร็วอากาศสามารถปรับให้เหมาะสมได้ด้วยพัดลม ซึ่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิจะใช้ Fiber-optic temperature ในการวัดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ด้านล่างของโคนทำจากพลาสติกซึ่งจะมีหน้าที่รองรับวัสดุที่ทำการอบแห้งโดยมีวัตถุประสงค์ทำให้ได้รับลมร้อนมากที่สุด (B.Abbasi Souraki et al., 2009)

2.10 การสูญเสียความชื้นในระบบการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วย

ขณะที่ความชื้นถูกขับออกในระหว่างการอบแห้งดำเนินไปนั้น โดยทั่วไปการสูญเสียความชื้นสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราการอบแห้ง ซึ่งอยู่ในรูปแบบของหน่วยกิโลกรัมของน้ำที่ถูกขับออกต่อกิโลกรัมของมวลแห้งและเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วยตลอดการอบแห้งนั้นจะแสดงได้สามช่วงคือ ช่วงที่ 1. อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นแบบชั่วคราว ช่วงที่ 2. อัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ และช่วงที่ 3. อัตราการอบแห้งที่ลดลง ในช่วงที่หนึ่งของการอบแห้งอัตราการอบแห้งนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากวัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นผลทำให้สารไดอิลิคทริกในวัสดุเกิดการสั่นและเกิดความร้อนขึ้น จากนั้นอัตราการอบแห้งจะเข้าสู่ช่วงที่สองคือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ความชื้นส่วนใหญ่ในวัสดุถูกขับออก หลังจากผ่านช่วงนี้ไปจะเข้าสู่ช่วงที่สามคืออัตราการอบแห้งลดซึ่งจะเป็นแบบนี้ไปชั่วคราวจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงสุดท้ายคืออัตราการอบแห้งที่ต่ำสุดและดำเนินไปจนกระทั่งไปสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง (Aneta Wojdyo et al., 2009; Adam Figiel., 2010; Mehmet Fatih Arikan et al., 2012) ในช่วงที่อัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวที่น้ำถูกดึงออกมาจากภายในซึ่งส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างสม่ำเสมอ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับช่วงอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ ประเภทวัสดุที่นำมาอบแห้ง รวมถึงสภาวะที่เกี่ยวข้อง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้นอาจเกิดจากปริมาณน้ำในวัสดุเริ่มเหลือน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากพฤติกรรมสองอย่างของความชื้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ คือ 1. วัสดุเริ่มดูดซับพลังงานไมโครเวฟลดลงเนื่องจากสารไดอิลิคทริกเริ่มมีน้อยลงในอาหาร 2. น้ำที่อยู่ภายในวัสดุเริ่มออกมายากขึ้นเพราะชั้นผิวของวัสดุเริ่มแห้งเป็นผลทำให้ผลต่างของความดันมีค่าน้อยลงจากพฤติกรรมทั้งสองทำให้อัตราการอบแห้งเริ่มลดลง (Nádia Pereira et al., 2007) หากเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบทั่วไป การเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟสามารถช่วยนำความชื้นออกในอัตราที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบการอบแห้งแบบดั้งเดิมและการอบแห้งแบบดั้งเดิมโดยมีไมโครเวฟช่วย

ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งได้แก่ ประเภทของระบบอบแห้งที่มีการใช้ไมโครเวฟช่วยเสริมการทำงาน ลักษณะการปล่อยไมโครเวฟอันได้แก่ การปล่อยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง (Continuous mode) และการปล่อยไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (Pulse mode) กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ การปรับสภาพวัสดุก่อนการอบแห้ง และองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้อบแห้งตลอดจนประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น หากเพิ่มกำลังไฟฟ้าแก่ไมโครเวฟจะส่งผลให้ใช้เวลาการอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เดียวกันหากเพิ่มการอบแห้งหรือเพิ่มวัสดุอบแห้งก็จะใช้เวลาการอบแห้งนานเช่นกัน (Qingguo Hu et al., 2006; Okan Esturk, 2012; Aneta Wojdyo et al., 2009; Adam Figiel, 2010; Mehmet Fatih Arikian et al., 2012) การเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งด้วยระบบออสโมติกจะช่วยลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นและเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนย้ายความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุ ผลของการทำออสโมติกจะลดการหดตัวของวัสดุในเวลากการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วยส่งผลให้การเคลื่อนตัวของความชื้นในวัสดุได้สะดวกขึ้น (Rui Wang et al., 2010a; Mohammad Al-Harashsheha et al., 2009)

อิทธิพลของความหนาวัสดุที่มีผลต่อระยะเวลาการอบแห้งของวัสดุ วัสดุที่มีความหนาน้อยจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานกว่าการอบแห้งที่วัสดุมีความหนามากกว่า (ซึ่งเรื่องนี้จะตรงข้ามกับการอบแห้งแบบวิธีทั่วไป กล่าวคือชิ้นงานที่มีความหนามากกว่าจะใช้เวลาการอบแห้งที่นานกว่า วัสดุที่มีความหนาน้อยกว่า) ยกตัวอย่างจากการศึกษาการอบแห้งกล้วยที่มีลักษณะเป็นชิ้นงานที่บางจะใช้เวลาการอบแห้งที่ยาวนานมากกว่ากล้วยที่มีความหนามากกว่า (Medeni Maskan ,2000; Jun Wang et al., 2004; Adam Figiel, 2009) ซึ่งปรากฏการณ์นี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่วัสดุมีความหนาน้อยส่งผลให้มีสารไดอิเล็กทริกน้อยและหากระยะการทะลุทะลวงของไมโครเวฟ (Penetration depth) มีมากเกินไปดังนั้นทำให้ดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ไม่มาก (Adam Figiel, 2009)

2.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

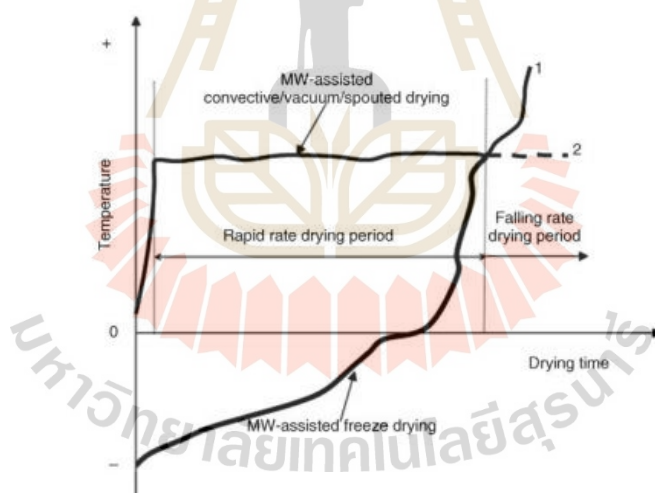
อุณหภูมิถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดของการอบแห้งแบบต่างๆ ที่มีการเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากสามารถสะท้อนถึงประสิทธิภาพการอบแห้งโดยทั่วไปค่อนข้างดี (Xu Duan et al, 2010)

ในรูปที่ 2.18 จะสังเกตเห็นเส้นแนวโน้มอุณหภูมิของการอบแห้งแบบแช่แข็งที่เสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟว่ามีความแตกต่างกับเส้นอุณหภูมิของวิธีการอบแห้งแบบอื่น ๆ อีก 3 วิธี เนื่องจากกลไก การอบแห้งที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นอยู่กับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ ลักษณะการปล่อยคลื่นไมโครเวฟ ประเภทเครื่องอบแห้งที่ใช้ และรวมถึงว่าการอบแห้งนั้นมีเครื่องควบคุมหรือไม่

2.11.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อค่าพลังงานไมโครเวฟคงที่

อุณหภูมิที่แตกต่างกันสามารถวัดได้โดยกำลังไมโครเวฟคงที่ในกระบวนการอบแห้ง (Carter D.Clary et al., 2005; H.Feng et al., 1999; L. M. Ahmné et al., 2007; Xu Duan et al, 2010) ได้แก่

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งแบบเส้นตรง
2. ช่วงอุณหภูมิคงที่ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาอัตราการอบแห้งคงที่ดังได้กล่าวในข้างต้นความชื้นจะถูกนำออกสู่พื้นที่ผิวด้านนอกของวัสดุและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอโดยมีการดึงความร้อนในรูปความร้อนแฝงจึงให้อุณหภูมิลดลง (Cooling effect of Vaporization) โดยระบบยังคงได้สมดุลกับความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟ
3. ช่วงที่ความร้อนมีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งในเวลานี้อัตราการอบแห้งจะลดลงและอุณหภูมิของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.18 ชนิดของเส้นอุณหภูมิของการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วยแบบต่าง ๆ ของอาหาร โดย 1 และ 2 แสดงถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วงท้ายของการอบแห้ง เส้นที่บคือเส้นอุณหภูมิที่พลังงานไมโครเวฟคงที่สำหรับ MWFD, MWVD และ MWCD ส่วนเส้นปะคือเส้นอุณหภูมิการควบคุมพลังงานไมโครเวฟผ่านการส่งข้อมูลป้อนกลับ หรือการควบคุมการปล่อยพลังงานแบบ เปิด-ปิด หรือ MWSD โดยพลังงานไมโครเวฟมีค่าคงที่
ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

ในช่วงที่อุณหภูมิการอบแห้งค่อนข้างคงที่ อุณหภูมิของการอบแห้งแบบแช่แข็งโดยมีไมโครเวฟช่วยจะมีค่าต่ำสุดในขณะที่อุณหภูมิของการอบแห้งแบบสุญญากาศโดยมีไมโครเวฟช่วยโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 26 ถึง 52 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ งาน การอบแห้งแบบพาความร้อนโดยมีไมโครเวฟช่วยสามารถทำอุณหภูมิสูงกว่า 2 วิธีข้างต้นได้ขึ้นอยู่กับกำลังไมโครเวฟที่ใช้และเงื่อนไขอื่น ๆ เช่นอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง (Nádia Pereira et al., 2007) และเช่นเดียวกันกับช่วงอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่ (Rapid rate drying period) อุณหภูมิของช่วงนี้จะค่อนข้างคงที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่ใช้ ขนาดของภาระงานในการอบแห้ง ลักษณะของวัสดุที่ใช้ออบแห้ง ตลอดจนเงื่อนไขการอบแห้งอื่นๆ เมื่อการอบแห้งดำเนินไปนั้นปริมาณน้ำที่อยู่ภายในวัสดุจะลดลงเรื่อยๆ แต่ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิของวัสดุก็เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟถูกส่งมาที่วัสดุอย่างต่อเนื่อง (พลังงานที่ถ่ายเทสู่วัสดุต่อปริมาณน้ำในวัสดุ) และเมื่อน้ำระเหยออกไปจึงส่งผลให้เกิดการลดลงของความร้อนจำเพาะของวัสดุอบแห้ง การที่อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ นั้นจนส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Thermal runaway หรือ Thermal overrun (Adam Figiel, 2010; G.E. Botha et al, 2012) ระดับพลังงานไมโครเวฟมีผลอย่างยิ่งต่อการเกิด Thermal runaway กล่าวคือ หากใช้พลังงานไมโครเวฟที่สูงมากจะส่งผลอย่างมากต่อ ในทางกลับกันหากใช้พลังงานไมโครเวฟที่ต่ำ อากาศที่ใช้ออบแห้งอุณหภูมิไม่สูง และความเร็วลมที่สูงจะช่วยลดเรื่องอิทธิพลของ Thermal runaway ได้

2.11.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไมโครเวฟโดยไม่

ควบคุมอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงพลังงานไมโครเวฟแบบ เปิด-ปิด สลับกัน (Pulsed mode) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบอบอบแห้งจะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่าการเปิดพลังงานไมโครเวฟแบบต่อเนื่องช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิด Thermal runaway หรือความร้อนที่สูงเกินไปในวัสดุอบแห้งได้

2.11.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อมีการปรับค่าพลังงานด้วยสัญญาณป้อนกลับเพื่อ

ควบคุมอุณหภูมิ

เป็นวิธีการควบคุมอุณหภูมิได้ดีที่สุด หลักการทำงานคือจะเริ่มการอบแห้งด้วยระดับพลังงานสูงสุดก่อนและป้อนกลับสัญญาณสู่ระบบควบคุมแบบ Fuzzy logic หากระดับพลังงานสูงเกินไปความผันผวนของอุณหภูมิจะมากเกินไปแต่หากกำลังไฟฟ้าต่ำเกินไปอุณหภูมิจะไม่ถึงที่กำหนดไว้ ซึ่งการส่งข้อมูลแบบสุ่มจะถูกทำซ้ำๆ จนได้อุณหภูมิที่เหมาะสมทั้งนี้การป้อนพลังงานเข้านั้นจะทำการตั้งค่าที่ทำได้ล่วงหน้า (Zhen Li et al., 2010)

2.12 การสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy Consumption)

ในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วย (J. Varith et al., 2007; Emma Holtz et al., 2010) ความสิ้นเปลืองพลังงานในระบบจะประกอบด้วย

1. พลังงานที่ใช้ไปกับการผลิตคลื่นไมโครเวฟ
2. พลังงานที่ใช้ไปกับระบบลดความชื้น ตัวอย่างเช่น พลังงานที่จ่ายให้กับอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศหรือพลังงานที่ใช้รักษาความเป็นสุญญากาศในระบบ หรือ พลังงานที่จ่ายให้กับระบบทำความเย็นสำหรับระบบอบแห้งแบบแช่แข็ง
3. พลังงานที่จ่ายให้กับระบบขับเคลื่อน (Mechanical drive system) ตัวอย่างเช่น พัดลม

ปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าในระบบสามารถใช้เครื่องมือวัดมิเตอร์วัดได้โดยตรงแต่ขนาดพลังงานที่ถูกใช้ไปสำหรับระบบอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วยสามารถหาได้ 2 วิธี (J. Varith et al., 2007; Y. Soysal et al., 2006) วิธีแรกคือ Specific energy consumption (SEC) หรืออัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คำนวณได้ตามสมการ (2.17)

$$SEC \left(\frac{kJ}{kg_{H_2O}} \right) = \frac{3600E}{M_s (X_i - X_f)} \quad (2.17)$$

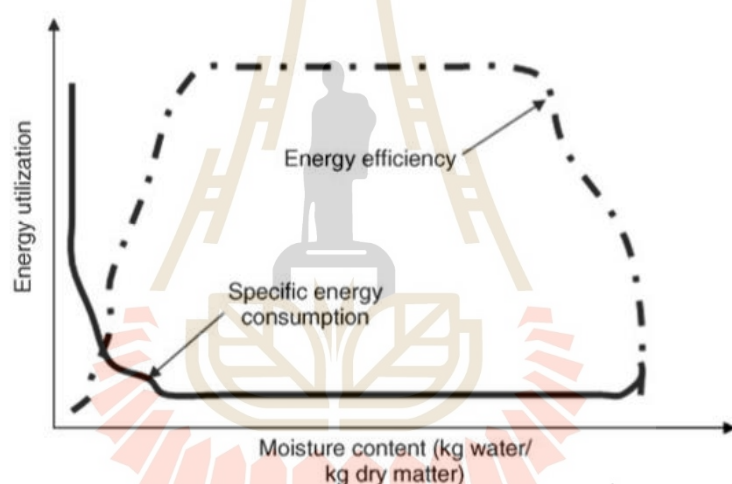
โดย E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ (kWh)
 X_i คือ ปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุ (ฐานแห้ง) ก่อนอบแห้ง
 X_f คือ ปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุ(ฐานแห้ง) หลังอบแห้ง
 M_s คือ ขนาดมวลแห้งของวัสดุ (kg)

หรือใช้การประเมินประสิทธิภาพในเชิงพลังงาน (Energy efficiency) ได้ตามสมการ (2.18)

$$\eta(\%) = M_s (X_i - X_f) \frac{\Delta h_v}{3600E} \times 100\% \quad (2.18)$$

โดย Δh_v คือค่าเอนทาลปีของการระเหยของน้ำ (2,257 kJ/kg ที่ 100 องศาเซลเซียส ณ ความดันบรรยากาศ) ความสัมพันธ์ระหว่าง Specific energy consumption กับ Energy efficiency ในระบบอบแห้งโดยมีไมโครเวฟ แสดงดังรูปที่ 2.19 เมื่อเริ่มต้นกระบวนการการอบแห้งนั้นค่า Specific energy consumption จะมีค่าสูงในขณะที่ค่า Efficiency นั้นมีค่าต่ำ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟยังทำได้แค่การเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุแต่น้ำในวัสดุยังมีการระเหยได้น้อย ต่อจากนั้นค่า Specific energy

consumption จะมีค่าลดลงต่างจากค่า Energy efficiency ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลงเรื่อย ๆ ระยะห่างระหว่าง Specific energy consumption (SEC) กับ Energy efficiency จะมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ของ Specific energy consumption กับ Energy efficiency ในวัสดุต่างกันจะมีลักษณะคล้ายกันโดยเฉพาะช่วงค่าความชื้นปานกลางถึงสูง เมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไปจนถึงจุด Hygroscopic region (จุดที่ความชื้นของวัสดุต่ำกว่าจุดความชื้นวิกฤต) ซึ่งบริเวณนี้การระเหยของน้ำทำได้ยากอย่างมาก พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยของน้ำจะเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการอบแห้งทำให้ค่า SEC สูงขึ้นและทำให้ค่า Energy efficiency มีค่าลดลงในช่วงท้ายในการอบแห้ง วัสดุอบแห้ง ณ ตอนนี้มีมีความชื้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤตและจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (ϵ'') ลดลงอย่างมากจึงทำให้วัสดุรับพลังงานไมโครเวฟได้น้อยลงตามไปด้วย และทำให้ค่า Energy efficiency มีค่าต่ำในช่วงท้ายของการอบแห้ง (Emma Holtz et al., 2010 and Weerachai Kaensup et al., 2002)



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานและความชื้นที่เปลี่ยนไปในวัสดุ
ที่มา: Evangelos Tsotsas and Arun S.Mujumdar (2014)

ปัจจัยที่มีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานสำหรับระบบอบแห้งที่เสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ ในอาหาร เช่น เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ความหนาแน่นหรือความเข้มข้นของไมโครเวฟ การควบคุมการปล่อยไมโครเวฟ การประยุกต์วิธีอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟ ตลอดจนถึงเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ของการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิของอากาศ ความเร็วของอากาศ และความดันภายในระบบ เป็นต้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ของระบบอบแห้งโดยมีไมโครเวฟช่วยสามารถลดลงอย่างมีนัยสำคัญหากเพิ่มความหนาแน่นหรือความเข้มข้นของไมโครเวฟ (G.P. Sharma and Suresh Prasad., 2006a) การควบคุมพลังงานไมโครเวฟแบบ เปิด-ปิด นั้น

สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการอบแห้งได้ดีกว่าการปล่อยให้ไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง (Carter D. Clary et al, 2007; Predrag Sunjka et al, 2004; Mehmet Fatih Ariakan et al, 2012)

2.13 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

ประสิทธิภาพในการอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากอัตราการอบแห้ง ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยต่อเวลา (จิตรารัตน์ จอกแก้ว, 2559) ดังสมการ (2.19) และ (2.20)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2.19)$$

หรือ

$$DR = \frac{M_i - M_f}{t} \quad (2.20)$$

โดย	W_i	คือ น้ำหนักของวัสดุก่อนอบแห้งมี (kg)
	W_f	คือ น้ำหนักของวัสดุหลังอบแห้งมีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)
	M_i	คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (%db)
	M_f	คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (%db)
	t	คือ เวลาที่ใช้ไปกับการอบแห้งมีหน่วยเป็นชั่วโมง (hr)

ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการอบแห้งและการประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงานนั้นไม่ได้เป็นเครื่องบ่งบอกคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความชื้นต้องไม่เกินค่าฐานที่กำหนด รวมถึงความสมบูรณ์ของเมล็ด สี กลิ่นและรสชาติ

2.14 คุณภาพของการสีเมล็ดข้าว(Paddy milling quality)

คุณภาพของการสีข้าวจะพิจารณาจากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain) และข้าวตัน (Head grain) หากข้าวมีคุณภาพของการสีข้าวที่ดีจะมีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันที่เยอะมีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) ที่น้อย ซึ่งสามารถนำปริมาณข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวขาว ข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตัน ไปคำนวณหาปริมาณข้าวตัน ข้าวเต็มเมล็ด ปริมาณแกลบ และปริมาณรำข้าวได้ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555) ดังสมการ (2.21) (2.22) และ (2.23)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน} = \frac{\text{น้ำหนักต้นข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \% \quad (2.21)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์รำข้าว} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวขาว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \% \quad (2.22)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \% \quad (2.23)$$



2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Gharekhani, M. Kashaninejad¹, A. Daraei Garmakhany² และ A. Ranjbari (2012) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาว (ขนาดเชิงเส้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเรขาคณิต ความเป็นทรงกลม น้ำหนักจำนวนหนึ่งพันเมล็ด ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเมล็ด และรูพรุน) และคุณสมบัติอากาศพลศาสตร์ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านการไหล (Terminal Velocity and Drag Coefficient) ทดสอบบนความชื้นในช่วง 5 ถึง 37% ฐานเปียก สำหรับข้าวเปลือกและข้าวขาวของข้าวสายพันธุ์ Fajr และ Tarom ผลพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเชิงเรขาคณิต น้ำหนักจำนวนหนึ่งพันเมล็ดและความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณความชื้นในเมล็ดเพิ่มขึ้นกับข้าวทั้งสองพันธุ์ ความหนาแน่นของเมล็ดและความพรุนลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อเพิ่มความชื้น ค่าความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือกและข้าวขาวเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 37% ฐานเปียก Drag Coefficient ของข้าวขาวลดลงเป็นเส้นตรงในขณะที่ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น

T. Santos, L. C. Costa, M. Valente, J. Monteiro และ J. Sousa (2015) ได้ทำการศึกษาเครื่องไมโครเวฟโดยทำการทดลองนำพลังงานไมโครเวฟผ่านวัสดุโดยตรงและได้ข้อสรุปว่าคุณภาพของการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของการกระจายสนามแม่เหล็ก สิ่งที่เป็นปัญหาสำหรับการใช้ไมโครเวฟคือความไม่สม่ำเสมอของความร้อนในตัววัสดุซึ่งจะทำให้เกิด Thermal runaway เมื่อวัสดุดูดซับพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามความสามารถในการดูดซับพลังงาน

เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศเชิญอักษร (2550) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยตู้อบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous) แบบให้ความร้อนช่วงต้น (Preheating drying) และเป็นช่วง (Pulse drying) ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การนำไมโครเวฟมาอบแห้งร่วมกับลมร้อนช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งการลดระยะเวลาการอบแห้งได้ช่วยเพิ่มค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน การทดสอบยังพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบการทำงานเป็นช่วง (Pulse) มีความเหมาะสมในการอบแห้งมากที่สุด ให้ค่า SMER มากที่สุด ใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุด

ธนารุช บุญน้อม และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งพริกโดยใช้อุปกรณ์เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ซึ่งผลของการทดสอบพบว่าอุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที กำลังคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 0.61 วัตต์ต่อกรัมพริกแห้ง ค่าความชื้นของพริกลดลงจาก 71.80 ถึง 8.61 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก ภายในระยะเวลา 150 นาที โดยมีค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) เท่ากับ 23.78, 22.10 และ 12.87 ตามลำดับ และมีต้นทุนการอบแห้งเท่ากับ 17 บาทต่อกิโลกรัมพริกแห้ง

M.Serowik และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษารอบแห้งเจลดคาราจีแนนผ่านเครื่องอบแห้งแบบพวยพุ่ง(Spouted Bed Drying , SBD) โดยมีไมโครเวฟเสริม วัตถุประสงค์การนำไมโครเวฟมาช่วยอบแห้งเพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำการออกแบบไว้ล่วงหน้าซึ่งคุณภาพที่ว่าคือ ความหนาแน่นแบบรวม (Bulk Density) พฤติกรรมความชื้น (Water Activity) สีของผลิตภัณฑ์ (Color Parameters) พฤติกรรมการไหลเมื่อได้รับแรง (Rheology) ความสามารถในการละลาย (Solubility properties) ซึ่งผลของมันจะเปรียบเทียบกับระหว่างผลของการอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) และการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยมีไมโครเวฟเสริม (Microwave-Assisted Hot Air Drying) ซึ่งผลของการใช้ไมโครเวฟช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งและเสริมประสิทธิภาพการแพร่ (Effective Diffusion Coefficient) ในเรื่องครุภาพไมโครเวฟมีส่วนช่วยในการลดขนาดของความหนาแน่นเชิงกลุ่มแต่ไม่ส่งผลในเรื่องของสีผลิตภัณฑ์,ความสามารถในการละลายน้ำและพฤติกรรมการไหลเมื่อได้รับแรง

Leyla Nesrin Kahyaoglu และคณะ(2012) ได้ทำการศึกษาผลของการนำข้าวสาลี (Parboiled Wheat) มาทำการอบแห้งผ่านเครื่องอบแห้งแบบพวยพุ่ง (SBD) และเครื่องอบแห้งแบบพวยพุ่งโดยมีไมโครเวฟช่วย (MSBD) ซึ่งการทดลองจะทำบนอุณหภูมิของอากาศร้อนต่าง ๆ ได้แก่ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟ 2 ค่าคือ 3.5 วัตต์ต่อกรัมและ 7.5 วัตต์ต่อกรัม ซึ่งผลของการใช้กำลังไมโครเวฟทั้ง 3.5 วัตต์ต่อกรัมและ 7.5 วัตต์ต่อกรัมจะลดระยะเวลาการอบแห้งเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวคือ 60 เปอร์เซ็นต์ และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลของการใช้ไมโครเวฟมาช่วยอบแห้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่ได้ดีกล่าวคือ 11.3×10^{-10} ถึง 5.06×10^{-10} เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบพวยพุ่งอย่างเดียว 3.32×10^{-10} ถึง 1.44×10^{-10}

Linlin Li และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษารอบแห้งแยมจีน (Chinese Yam) ผ่านเครื่องอบแห้งแช่แข็งแบบพวยพุ่งโดยมีไมโครเวฟเสริมซึ่งมีความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต ,MFD-915 ซึ่งทำการทดลองบนเวลาอบแห้งเป็นเวลาต่าง ๆ กันคือ 10 นาที, 20 นาที และ 30 นาที ผลของการทดสอบพบว่า MFD-915 ใช้เวลาอบแห้ง 10 นาที สามารถลดระยะเวลาได้ถึง 41.38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่ใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (FD) ซึ่งการใช้เครื่อง MFD-915 สามารถประหยัดพลังงานได้ 34.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็งอย่างเดียว

Leyla Nesrin Kahyaoglu และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษารอบแห้งเครื่องอบแห้งแบบพวยพุ่งและเครื่องอบแห้งแบบพวยพุ่งโดยมีไมโครเวฟช่วยช่วยมาทำการอบแห้งข้าวสาลีและขนมเบอร์เกอร์เพื่อดูผลของความแตกต่าง ได้แก่ ความหนาแน่นแบบกลุ่ม (bulk density) ความหนาแน่นเมล็ด (kernel density) ความพรุน (porosity) ความกลม (sphericity) สี (color parameter) โครงสร้างจุลภาค (microstructure) และการกระจายของรูพรุน (pore distribution)ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะถูกศึกษาหลังการอบแห้งไปแล้วซึ่งการทดสอบจะทำบนอุณหภูมิของอากาศตั้งแต่ 50,70 และ 90 องศาเซลเซียส ส่วนกำลังไมโครเวฟจะใช้อยู่ 2 ค่า คือ 288 วัตต์ และ 624 วัตต์ ซึ่งผลของการทดลองพบว่า

สีของผลิตภัณฑ์ของทั้งสองไม่มีความต่างอย่างนัยสำคัญ การใช้ไมโครเวฟร่วมกับการแห้งแบบพวยพุ่งส่งผลทำให้เบอร์เกอร์เกิดรูพรุนมากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องอบแบบพวยพุ่งอย่างเดียว ส่วนค่าความกลมกับความหนาแน่นแบบกลุ่มจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นควบคู่ไปกับการใช้ไมโครเวฟที่สูง

C.A.Sologubik และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของความชื้นที่มีอิทธิพลต่อข้าวบาร์เลย์ซึ่งความชื้นในข้าวบาร์เลย์ที่ศึกษามีตั้งแต่ 13.15 ถึง 45.82 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานแห้ง ซึ่งผลของการเพิ่มความชื้นในข้าวบาร์เลย์ทำให้ความยาวของเมล็ดข้าวบาร์เลย์เพิ่มขึ้น 8.10 มิลลิเมตร ถึง 8.62 มิลลิเมตร ความกว้างของเมล็ดข้าวบาร์เลย์เพิ่มขึ้นจาก 3.42 ถึง 3.74 มิลลิเมตร ความหนาของเมล็ดของข้าวบาร์เลย์เพิ่มขึ้นจาก 2.61 มิลลิเมตร ถึง 2.84 มิลลิเมตร ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของเมล็ดเพิ่มขึ้นจาก 4.16 ถึง 4.50 มิลลิเมตร น้ำหนักเมล็ดข้าว 1000 เมล็ด (Thousands Kernel Weight) เพิ่มขึ้นจาก 39.46 ถึง 51.13 กรัม พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 54.60 ถึง 63.79 ตารางมิลลิเมตร ค่าความพรุนเพิ่มขึ้นจาก 42.69 เปอร์เซ็นต์ ถึง 44.44 เปอร์เซ็นต์ มุมกอนของเมล็ดเพิ่มขึ้นจาก 18.18 องศา เป็น 27.31 องศา และค่าความเสียดทานสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะผิวที่เมล็ดกระทำต่อพื้นกล่าวคือ ค่าความเสียดทานสถิตของเมล็ดมีผลต่อไม้อัด, เหล็กกล้าปัวไนท์ และอลูมิเนียม คือเพิ่มขึ้น 60.17 , 38.14 และ 59.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

R.Akar และ C.Ayadin (2005) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อผลกระเจียบ โดยทำการทดลองความชื้นตั้งแต่ 11.3 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานแห้ง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อความชื้นในผลกระเจียบเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแบบกลุ่ม (Bulk Density) ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกันคือ จาก 174 ถึง 193 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นของผลกระเจียบ (Kernel Density) เพิ่มขึ้นจาก 617 ถึง 684 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้ำหนักผลกระเจียบ 1000 ผล (Thousands Kernel Weight) เพิ่มขึ้นจาก 570 ถึง 945 กรัม พื้นที่หน้าตัดของผลกระเจียบเพิ่มขึ้นจาก 2.06 ถึง 2.69 ตารางเซนติเมตร ความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) เพิ่มขึ้นจาก 7.30 ถึง 9.29 เมตรต่อวินาที

Edward A. Baryeh (2002) ได้ทำการศึกษากายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของลูกเต๋อย (Millet) ผ่านการเพิ่มความชื้นตั้งแต่ 5 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 22.5 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานแห้ง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าความยาวของเมล็ด, ความกว้างของเมล็ด, ความหนาของเมล็ด และ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีขนาดเพิ่มขึ้นตามลำดับคือ 3.522 ถึง 4.163 มิลลิเมตร, 2.735 ถึง 3.211 มิลลิเมตร, 2.180 ถึง 2.788 มิลลิเมตร และ 2.759 มิลลิเมตร ถึง 3.340 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนของพื้นที่ผิวของเมล็ด ปริมาตรและความกลมของเมล็ดเพิ่มขึ้นคือ 23.91 ถึง 35.05 ตารางมิลลิเมตร, 8.2 ถึง 14.65 ลูกลูกบาศก์มิลลิเมตร และ 0.783 ถึง 0.803 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่น

ของเมล็ดเพิ่มขึ้นจาก 1,550 ถึง 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) เพิ่มขึ้นจาก 2.75 เมตรต่อวินาที ถึง 4.63 เมตรต่อวินาที

Jingyi Zhu และคณะ (2020) ได้ศึกษาผลของการทดสอบการตอบสนองทางความร้อนของ ไมโครเวฟบนหินน้ำมัน (Shale Oil) เพื่อศึกษาเรื่องการกระจายอุณหภูมิ, การเคลื่อนไหวภายใน, ความดันที่เกิดขึ้น และความเค้นของหินน้ำมันที่เกิดขึ้นจากความร้อนภายใต้การแผ่รังสีของไมโครเวฟ การศึกษาทำการจำลองแบบ (Simulation) ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แบบสามมิติซึ่งปัจจัยที่มาศึกษาคือ ความถี่ของไมโครเวฟและกำลังของไมโครเวฟ ผลของการศึกษาพบว่า การกระจายอุณหภูมิในหินน้ำมันเกิดขึ้นอย่างไม่เท่ากันเนื่องจากการกระจายไม่เท่ากันของสนามไฟฟ้า ในเรื่องของความถี่ของไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อหินน้ำมันมากที่สุดคือ 2450 เมกะเฮิร์ต จะให้ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่อื่น ๆ ที่ทำการทดลอง ในเรื่องของกำลังไมโครเวฟนั้นผลการทดสอบพบว่ากำลังไมโครเวฟที่มากจะทำให้อัตราการทำความร้อนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปรากฏการณ์เคลื่อนไหวภายในหินน้ำมันจะมีการแพร่ของเหลวภายในออกสู่ภายนอกจากนั้นจะเป็นการพาความร้อน ซึ่งผลของการแพร่นั้นยังทำให้เกิดการเร่งความดันภายในหินน้ำมันและสร้างความเค้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นด้วย

Michele Micco และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษากการทดลองและการจำลองแบบ (Experiment and Simulation) โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการอบแห้งแบบทั่วไปและการอบแห้งด้วยไมโครเวฟซึ่งทั้งสองวิธีได้ทำการอบแห้งมะเขือเทศผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการอบแห้งมะเขือเทศของไมโครเวฟทำได้ระยะเวลาที่สั้นกว่า แต่ใช้พลังงานเยอะกว่า

E.Saniso และคณะ(2019) ได้ทำการศึกษากการนำคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งทั่วไปมาทำการนึ่งข้าวแทนการใช้ไอน้ำซึ่งผลที่ได้คืออัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และช่วยให้ข้าวที่แห้งกลายเป็นเจลาตินต์ที่อยู่ใกล้แกนกลางเมล็ดซึ่งหากใช้วิธีไอน้ำนั้นจะทำได้ยากกว่าวิธีไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งทั่วไป ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์คือสีของข้าวคือสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง

จะเห็นได้ว่าการหาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหอมมะลิมีส่วนช่วยให้เราได้ออกแบบเครื่องอบแห้งได้ถูกต้องมากขึ้นซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ในการออกแบบขนาดของท่อและความเร็วลมที่ใช้ในเครื่องอบแห้งส่วนคุณสมบัติของไมโครเวฟนั้นคือ การลดระยะเวลาในการอบแห้ง อีกทั้งหากนำมาผสมผสานกับการอบแห้งทั่วไปก็สามารถลดพลังงานในการอบแห้งที่ความชื้นเดียวกันได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้อธิบายถึงวิธีการศึกษาหัวข้อตามประเด็นต่าง ๆ และลงรายละเอียดของอุปกรณ์ วัสดุ ทดสอบ รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน อันได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติ กายภาพของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ในประเด็น ความกว้าง ความยาว ความลึกของเมล็ด ค่า เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต องศาความเป็นทรงกลม ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นของ เมล็ด ความพรุน ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศ ส่วนของการออกแบบ ระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนจะกล่าวถึงวิธีการ จำลองแบบห้องอบแห้งด้วยโปรแกรม COMSOL ผ่านการใช้สมการควบคุมของ Maxwell และใน การศึกษาสุดท้ายคือ การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบไป ด้วยแก่ การศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยประเมินจาก อัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เพอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวหลังจาก การอบแห้ง

3.1 การศึกษาสมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

การทดสอบหาค่าสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นแตกต่างกัน ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบถูกเตรียมให้มีค่าความชื้นแตกต่างกัน ในช่วง 10 – 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก และแปรค่าอุณหภูมิของอากาศในช่วง 50 ถึง 100 องศา เซลเซียส สำหรับการทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์

3.1.1 ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบหาค่าสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ในงานวิจัยส่วนนี้ใช้ ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่เก็บเกี่ยวจากแปลงของเกษตรกรจากจังหวัดนครราชสีมา ฤดูกาล เพาะปลูก 2562 ซึ่งเป็นข้าวที่มาจากยูงฉาง

3.1.2 ข้าวเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาดก่อนการปรับความชื้น

ข้าวเปลือกที่ผ่านตากลานเพื่อลดความชื้นและเก็บในยุ้งฉางนั้นมีวัสดุเจือปนอย่าง ใบหญ้า เมล็ดหญ้า พวงเมล็ดลีบ และอื่น ๆ จำเป็นต้องทำความสะอาดข้าวเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออก เพื่อลดอิทธิพลด้านอื่น ๆ นอกจากข้าวเปลือกโดยทำได้ด้วยวิธีการดังนี้

- 1) นำข้าวเปลือกมาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์แบบ ตะแกรงและแรงลมยี่ห้อ SEEDB-RO/LA-LS (รูปที่ 3.1ก)
- 2) ข้าวเปลือกจะไหลลงมาตามการสั่นของเครื่องซึ่งการไหลข้าวจะผ่านจุดกรองต่าง ๆ
- 3) เมื่อข้าวเปลือกไหลผ่านจุดต่าง ๆ ตามข้อที่ 2 ข้าวเปลือกจะไหลลงมาจุดสุดท้าย ดังรูปที่ 3.1ข



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์โดยตะแกรงและแรงลมรุ่น SEEDB-RO/LA-LS

(ข) จุดสุดท้ายที่ข้าวเปลือกลงมา

3.1.3 กระบวนการปรับความชื้นข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่นำมาตอนเริ่มต้นนั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 11.72 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ดังนั้นจะต้องมีการปรับความชื้นก่อนทำการเริ่มทดสอบ ตามขอบเขตของการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก ตั้งแต่ 10-26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก โดยมีวิธีการดังนี้

- 1) ทำการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการทำความสะอาด มาทำการสูมตักข้าวดังรูปที่ 3.2 ก นำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า ดังรูปที่ 3.2 ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) ตัวอย่างการสูมตักข้าวเปลือก (ข) ตัวอย่างการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก

- 2) ทำการอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อหามวลแห้งของข้าวเปลือกโดยอบผ่านตู้อบร้อนยี่ห้อMEMMERT รุ่น UF160 ความจุ 160 ลิตร ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 วัน



รูปที่ 3.3 ตู้อบร้อนยี่ห้อMEMMERT รุ่น UF160 ความจุ 160 ลิตร

- 3) หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 2 ทำการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกเพื่อหามวลแห้งของข้าวเปลือก เมื่อทราบมวลแห้งของข้าวเปลือกแล้วจะสามารถคำนวณหา

ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกตามสมการที่ 2.6 จึงทราบความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

- 4) ทำการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการกำหนดความชื้นข้าวเปลือกตามสมการที่ 2.8 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณตามข้อ 3 และ 4 สามารถดูได้จากภาคผนวก ข
- 5) หลังจากทราบปริมาณน้ำที่ต้องใส่เพื่อกำหนดความชื้นข้าวเปลือก ทำการจูนน้ำลงไปให้ข้าวตามปริมาณที่คำนวณจากข้อที่ 4 ดังรูปที่ 3.4ก จากนั้นทำการบรรจุข้าวเปลือกที่ผ่านการกำหนดความชื้นลงในถุงจากนั้นนำไปเข้าตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 5 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 7 วัน ตามรูปที่ 3.4ข



(ก)

(ข)

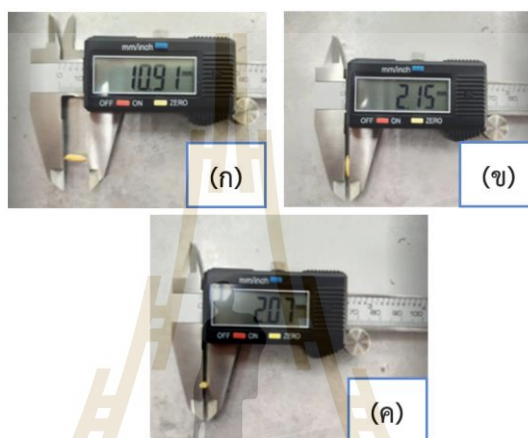
รูปที่ 3.4 (ก) การกำหนดความชื้นในข้าวเปลือก (ข) ตู้เย็นที่ใช้รักษาคุณภาพข้าว

3.1.4 กระบวนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือกและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก

หลังจากครบเวลาการกำหนดความชื้นข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 7 วัน จึงนำออกมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพมีได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความลึกของเมล็ด ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ระดับความเป็นทรงกลม ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นของเมล็ดและความพรุน ในขณะที่คุณสมบัติอากาศพลศาสตร์มีได้แก่ ความเร็วลมในอุโมงค์ และสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

**การทดลองความกว้าง ความยาว ความลึกของเมล็ด ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย
เชิงเรขาคณิต และองศาความเป็นทรงกลม**

- 1) ทำการวัดขนาดของเมล็ดข้าวเปลือกโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดขนาดความกว้าง (รูปที่ 3.5ก) ความยาว (รูปที่ 3.5ข) และความลึกของเมล็ด (รูปที่ 3.5ค) เป็นจำนวน 50 เมล็ดต่อความชื้น ซึ่งมีทั้งหมด 5 ระดับความชื้นคือ 10 14 18 22 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก รวมเป็น 250 เมล็ด



รูปที่ 3.5 การวัดขนาด ก) ความยาว ข) ความกว้าง และ ค) ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

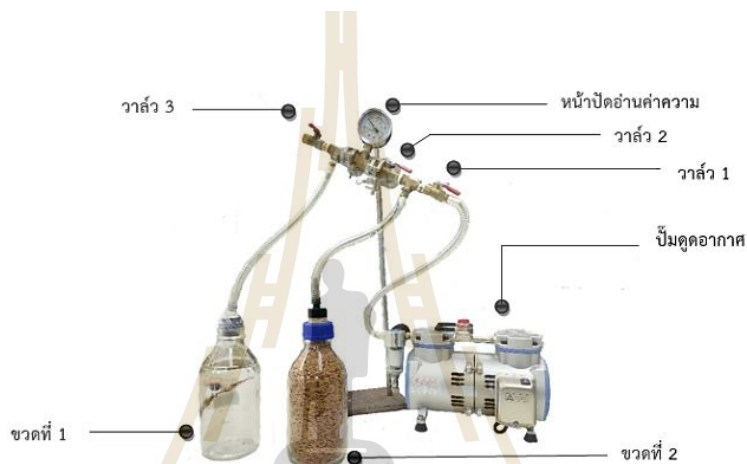
- 2) นำค่าความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดมาคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและระดับความเป็นทรงกลมซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับวิธีการคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข
- 3) วิเคราะห์ผลทางสถิติและศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ

**การทดลองความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่า
ความพรุนของเมล็ด**

- 1) หากภาชนะบรรจุสำหรับใส่ข้าวและคำนวณปริมาตรภาชนะที่บรรจุข้าว ทำการบรรจุข้าวให้เต็มภาชนะจากนั้นชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.6) และคำนวณหาความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (ไม่คือน้ำหนักของภาชนะ) ตามสมการที่ 2.9 ทดสอบ 10 ซ้ำ ในแต่ละความชื้นและบันทึกค่า



รูปที่ 3.6 การหาความหนาแน่นเชิงกลุ่ม



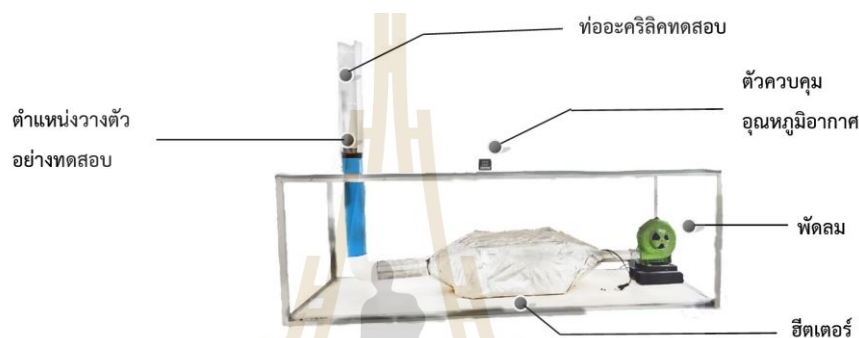
รูปที่ 3.7 การทดสอบค่าความพรุน

- 2) ค่าความพรุน หาค่าได้จากวิธีการแทนที่อากาศด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ รูปที่ 3.7 โดยบรรจุเมล็ดข้าวเปลือกลงในโหลแก้วจนเต็ม จากนั้นนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์ โดยขวดที่ 1 เป็นขวดเปล่าที่มีอากาศบรรจุอยู่ปกติ เริ่มการทดสอบโดยเปิดปั๊ม สูบอากาศในระบบออกจนขวดที่ 1 และ 2 มีความดันเป็นสุญญากาศ จากนั้น ปิดวาล์ว 1 และวาล์ว 2 แล้วจึงเปิดวาล์ว 3 เพื่อให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ ขวดที่ 1 ทำการปิดวาล์ว 3 อ่านค่าความดัน P_1 แล้วจึงเปิดวาล์ว 2 เพื่ออ่านค่า ความดัน P_2 ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละความชื้นแล้วคำนวณค่าความ พรุนด้วยสมการที่ 3.1

$$\mathcal{E} = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100\% \quad (3.1)$$

- 3) เมื่อทราบค่าความพรุนและความหนาแน่นเชิงมวลจะสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดตามสมการที่ 2.10 ตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้ตามภาคผนวก ข
- 4) วิเคราะห์ผลทางสถิติและศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ

การทดลองความเร็วลมสุดท้ายและสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ



รูปที่ 3.8 ระบบการทดสอบอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก

ก่อนจะเริ่มทดสอบความเร็วลมในอุโมงค์จะต้องทำการอุ่นเครื่องโดยการเปิดโบลเวอร์และตั้งค่าอานุมหุมิผ่านตัวควบคุมอานุมหุมิ (รูปที่ 3.8) โดยอานุมหุมิค่าแรกที่ทดสอบคือ 50 องศาเซลเซียส

- 1) เมื่อค่าอานุมหุมิอากาศเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ตั้งไว้ ทำการปิดโบลเวอร์และตัวควบคุมอานุมหุมิจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเมล็ดโดยหีบเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์จากถุงข้าวเปลือกความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากนั้นนำไปวางไว้ตำแหน่งวางตัวอย่างทดสอบและทำการเปิดโบลเวอร์และตัวควบคุมอานุมหุมิ โดยค่อยเพิ่ม ๆ ความเร็วอากาศผ่านการเปิดหน้าต่างโบลเวอร์สังเกตว่าเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัว วัดค่าความเร็วลมด้วยแอนิโมมิเตอร์และบันทึกค่าเป็นความเร็วลมในอุโมงค์ทำ 10 ซ้ำต่อ 1 ความชื้นซึ่งมีทั้งหมด 5 ระดับความชื้นได้แก่ 10 14 18 22 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก
- 2) หลังทำครบทุกความชื้นแล้วทำการปรับสภาวะอากาศโดยทำการเพิ่มอานุมหุมิอากาศเป็น 60 องศาเซลเซียส และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 อีกครั้งจนครบทุกความชื้นจากนั้นจึงปรับสภาวะอากาศเป็น 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ

- 3) เมื่อทราบค่ามวลของเมล็ดข้าวเปลือกและความเร็วสุดท้ายจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลได้โดยใช้สมการที่ 2.2 มาใช้คำนวณโดยตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้ในภาคผนวก ข
- 4) วิเคราะห์ผลทางสถิติและศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 2,200 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักข้าวและการตวงน้ำเพื่อกำหนดความชื้น



รูปที่ 3.9 ตาชั่งดิจิตอล 2,200 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม

- 1) แอนาโมมิเตอร์ ความละเอียด 0.1 เมตรต่อวินาที สำหรับการวัดอัตราการไหลของอากาศที่ออกมาจากท่อ
- 2) Thermocouple Type K สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศเพื่อหาอุณหภูมิทางออกและใช้ส่งค่าให้กับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ PID Electronic temperature controller
- 3) ตัวควบคุมอุณหภูมิ PID Electronic temperature controller รุ่น REX-C100 ดังรูป 3.10



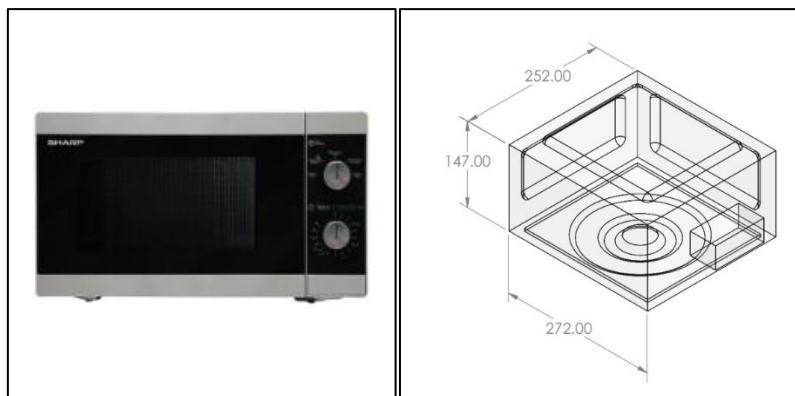
รูปที่ 3.10 PID Electronic temperature controller รุ่น REX-C100

3.2 กระบวนการศึกษาพฤติกรรมการกระจายของคลื่นไมโครเวฟในตู้ไมโครเวฟแบบคริวรีนและการออกแบบห้องอบแห้งโดยมีการทำงานเสริมด้วยไมโครเวฟ

ก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้ไมโครเวฟแบบคริวรีนจะต้องกล่าวถึงความเข้าใจก่อนว่าไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทำลายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำให้การใช้เครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ควัดโดยตรงในขณะที่ไมโครเวฟทำงานอยู่นั้นไม่สามารถทำได้แต่เราสามารถศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟได้ผ่านการทำอัตติกิริยาระหว่างไมโครเวฟกับสารไดอิเล็กทริกเช่น น้ำ กล่าวคือเมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านน้ำจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและสามารถใช้ Thermocouple Type K ในการวัดอุณหภูมิจากนั้นจำลองภาพ Contour

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

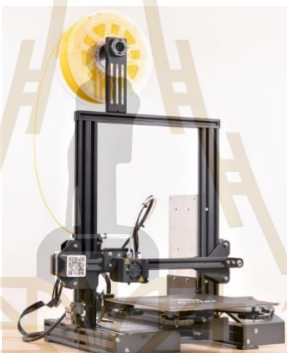
- 1) ตู้ไมโครเวฟที่ใช้ในการทดสอบเป็นยี่ห้อ SHARP ความจุห้องอบ 20 ลิตร ขนาด 800 วัตต์ รุ่น R-200W ความถี่ 2,450 เมกกะเฮิร์ต รูปที่ 3.11ก ซึ่งขนาดความกว้าง ความสูง และความลึก (หน่วย มิลลิเมตร) แสดงได้ดังรูปที่ 3.11ข
- 2) ฐานสำหรับการวางอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์บรรจุน้ำผลิตโดยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Creality Ender-3 3D Printer (รูปที่ 3.12) โดยวัสดุที่ใช้การพิมพ์เป็น PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified) โดยขนาดและรายละเอียดของฐานสำหรับอุปกรณ์ดูได้ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 และขนาดของอุปกรณ์ใส่น้ำดูได้จากรูปที่ 3.13 1 แก้วของอุปกรณ์ใส่น้ำจะมี 9 หลุม
- 3) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำโดยใช้อุปกรณ์ Thermocouple Type K
- 4) นาฬิกาจับเวลาสำหรับการจับเวลาการทำงานของไมโครเวฟ



(ก)

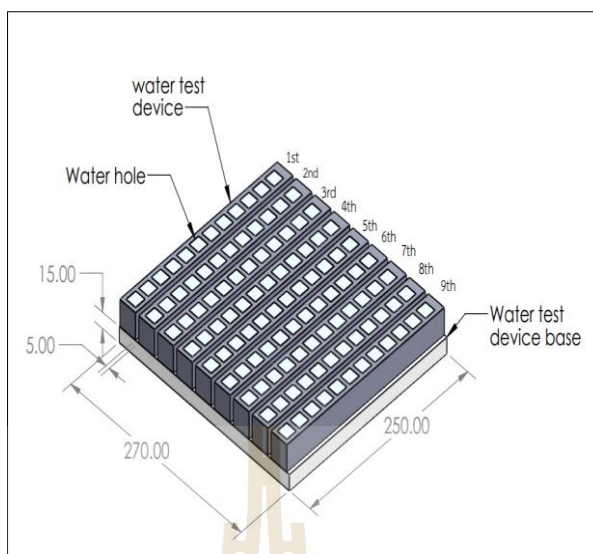
(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) ลักษณะไมโครเวฟที่นำมาใช้ทดสอบ (ข) ขนาดของห้องอบแห้ง



รูปที่ 3.12 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Creality Ender-3 3D Printer

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



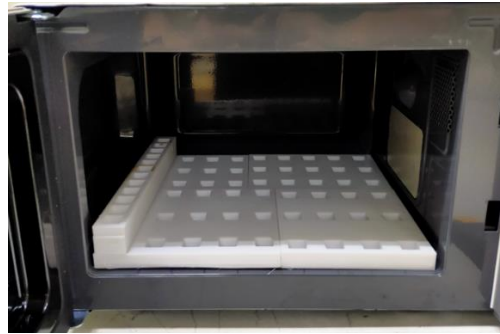
รูปที่ 3.13 รายละเอียดการวางอุปกรณ์และขนาดของอุปกรณ์



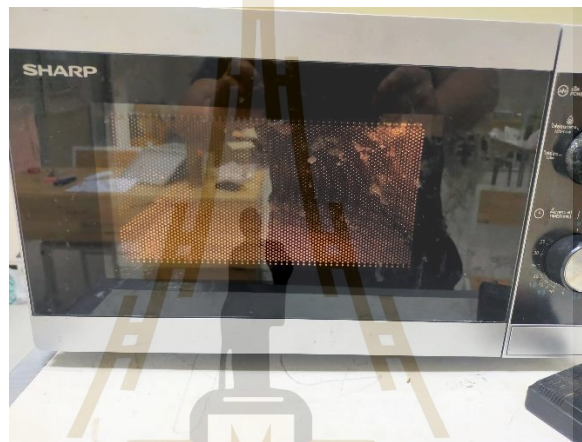
รูปที่ 3.14 ภาพรวมของฐานวางอุปกรณ์และอุปกรณ์บรรจุน้ำ

3.2.2 กระบวนการทดลองการกระจายอุณหภูมิของน้ำภายในตู้ไมโครเวฟ

- 1) ทำการบรรจุฐานวางอุปกรณ์และอุปกรณ์บรรจุน้ำ (บรรจุน้ำแล้ว) ดังรูปที่ 3.15 ลงในแถวที่ 1 ที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรวัดจากฐานห้องไมโครเวฟ จากนั้นเปิดไมโครเวฟโดยใช้ระดับพลังงานไฟต่ำ (รูปที่ 3.16) จับเวลา 30 วินาที (ระดับพลังงานไฟต่ำคือใน 1 รอบเท่ากับ 30 วินาที ใน 30 วินาที ไมโครเวฟทำงาน 6 วินาที) จากนั้นเมื่อครบเวลากำหนดปิดไมโครเวฟและทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้อุปกรณ์ Thermocouple Type K (รูปที่ 3.17) และบันทึกค่าการทดลอง



รูปที่ 3.15 การบรรจุอุปกรณ์ภายในตู้ไมโครเวฟ



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์การทดลองในตู้ไมโครเวฟขณะทำงาน



รูปที่ 3.17 การวัดอุณหภูมิน้ำหลังจากการครบระยะเวลา 30 วินาที

- 2) บรรจุน้ำใหม่และเปลี่ยนแฉวเป็นแฉวที่สองจากนั้นทดสอบตามขั้นตอนที่ 1 ทำจนครบ 9 แฉว เมื่อครบ 9 แฉว ให้ทำการทดสอบซ้ำ 3 รอบ
- 3) เมื่อทำการทดสอบทุกขอบเขตที่ตั้งไว้จึงนำค่ามาทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและสร้างกราฟ Contour ผ่านโปรแกรม Mini Tab

3.3 กระบวนการออกแบบและจำลองเพื่อหาห้องอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบจริง

ในกระบวนการออกแบบห้องอบแห้งจะใช้การจำลองโมเดลขึ้นโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ รวมถึงค่าคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นปัจจัยที่จำเป็นอย่างยิ่งในการคำนวณผ่านสมการควบคุม (Governing Equations) โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics เวอร์ชัน 5.5 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้การประมาณค่าผ่านวิธี Finite Element Method (FEM)

3.3.1 การจำลองโหมตสนามไฟฟ้าของตู้ไมโครเวฟครัวเรือน

ในการจำลองการเกิดโหมตสนามไฟฟ้าและการจำลองอุณหภูมิของน้ำจะทำการจำลองสองโมเดลที่มีรูปร่างต่างกันโดยโมเดลแรกผนังของห้องจะราบเรียบ และโมเดลที่สองลักษณะของห้องเป็นแบบผิวเว้านูน ทั้งนี้โมเดลแบบผิวราบเรียบนั้นคือการจำลองมาจากตู้ไมโครเวฟจริงแต่เปลี่ยนผิวเว้านูนเป็นผิวเรียบซึ่งแต่ละโมเดลจะต้องจำลองโหมตสนามไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดก่อนแล้วจึงจำลองโหมตสนามไฟฟ้าขณะมีโหลดรวมถึงจำลองอุณหภูมิด้วยโดยมีขั้นตอนดังนี้

3.3.2 ขั้นตอนการจำลองโหมตสนามไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด

- 1) การวัดขนาดของห้องในตู้ไมโครเวฟ Sharp R200W ขนาดกว้าง 272 มิลลิเมตร ยาว 252 มิลลิเมตร สูง 147 มิลลิเมตร เพื่อการสร้างโมเดลโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS 2022 ซึ่งมีห้องแบบผิวเรียบและผิวเว้านูนซึ่งขนาดนั้นสามารถดูได้ตามรูปที่ 3.18ก และ 3.18ข ตามลำดับ เมื่อออกแบบเสร็จให้บันทึกไฟล์เป็นนามสกุล Step.File เพื่อใช้ในการโยนเข้าไปในโปรแกรม Comsol Multiphysics
- 2) ในโปรแกรม Comsol Multiphysics จะมีหลายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ให้ศึกษาโดยเนื้อหาของการศึกษานี้คือการศึกษาระยะกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใน Comsol Multiphysics จะมีชื่อว่า Electromagnetic Waves, Frequency Domain ในหัวข้อดังกล่าวนี้จะมีหลายปรากฏการณ์ที่ถูกควบคุมด้วยสมการควบคุมต่าง ๆ ให้เลือกเป็น Frequency Domain ที่เป็นปรากฏการณ์ที่อธิบายว่าหากคลื่นไมโครเวฟมีความถี่ค่าหนึ่ง มีกระจายและ

สะท้อนอย่างไรซึ่งถูกควบคุมด้วยสมการที่ 3.1 และสมการเงื่อนไขและขอบเขตด้วยสมการที่ 3.2

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) = 0 \quad (3.1)$$

$$n \times \vec{E} = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ	σ	คือ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)
	k_0	คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Propagation Constant)
	ω	คือ ค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s)
	ϵ_r	คือ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์
	μ_r	คือ ค่าการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์
	\vec{E}	คือ ค่าความเข้มของของสนามไฟฟ้า (V/m)
	n	คือ เวกเตอร์มีทิศทางชี้เข้าหาผนัง
	ϵ_0	คือ แรงต้านสนามไฟฟ้าบนพื้นที่อิสระมีค่า 8.854×10^{-12} Farad/m

- 3) วัสดุที่เป็นส่วนประกอบในการจำลองได้แก่ อากาศซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ด้านในของตู้อบแห้งและอลูมิเนียมซึ่งเป็นผนังของห้องอบแห้ง ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการจำลองสามารถดูได้ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองตู้ไมโครเวฟสภาวะไร้โหลด

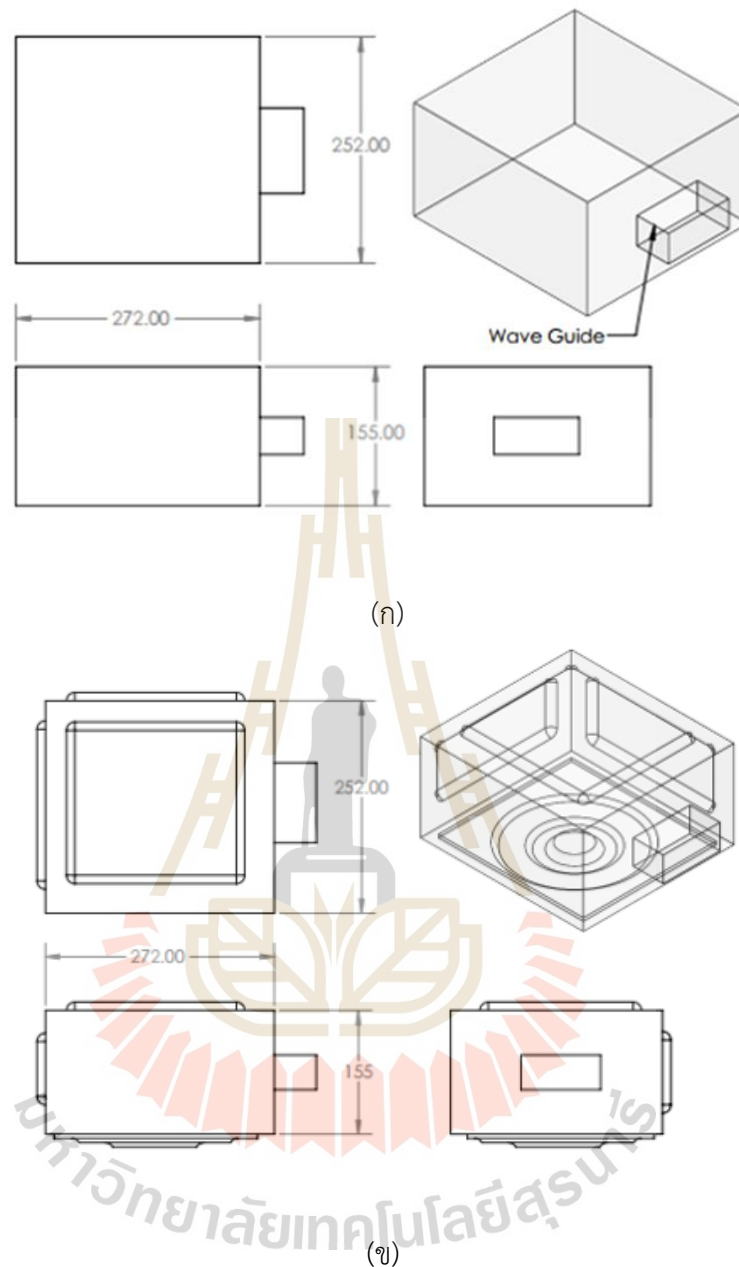
Materials	Relative permeability	Relative permittivity	Electrical conductivity (S/m)
Air	1	1	0
Aluminum	1	1	6.00×10^7

- 4) ท่อนำคลื่นที่ใช้การจำลองเป็นท่อหน้าตัด 4 เหลี่ยมจำลองมาจากตู้ไมโครเวฟแบบคริวเรือนจริงทำงานแบบโหมด TE_{10} กำหนดความถี่ไมโครเวฟเท่ากับ 2.45 GHz เท่ากับความถี่ไมโครเวฟแบบคริวเรือนกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์

- 5) การแบ่งกริดเพื่อการคำนวณ (Meshing) นั้นจะทำการควบคุมจากโปรแกรมซึ่งเป็น Physics-Controlled Mesh เป็นการแบ่งกริดให้เหมาะสมกับการศึกษาฟิสิกส์ที่เลือกมาซึ่งโปรแกรมจะสร้างให้อัตโนมัติโดยจำนวนกริดแต่ละรูปแบบห้องแสดงดังตารางที่ 3.2
- 6) ทำการ Compute เพื่อให้โปรแกรมคำนวณผลการจำลองออกมาซึ่งจะดูภาพรวมของการกระจายของโหมดสนามไฟฟ้าของทั้งสองห้อง

ตารางที่ 3.2 จำนวนกริดของรูปแบบห้องผิวเรียบและผิวเว้ามนูน

	Number of vertex elements	Number of edge elements	Number of boundary elements	Number of elements
Simple Shape	16	148	1,440	12,248
Complex Shape	72	1677	11,978	76,416



รูปที่ 3.18 โมเดลที่ใช้ในการจำลองตู้อบไมโครเวฟที่มีผิวเรียบ (ก) และผิวเว้านูน (ข)

3.3.3 ขั้นตอนการจำลองโหมดสนามไฟฟ้าในสภาวะมีโหนด

- 1) ทำการสร้างโมเดลฐานวางอุปกรณ์บรรจุน้ำและอุปกรณ์บรรจุน้ำในโปรแกรม SOLIDWORKS 2021 และนำมาประกอบกันในโหมด ASSEMBLY ของโปรแกรมซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.19ก โมเดลห้องผิวเรียบและ 3.19ข โมเดลห้องผิวเว้านูน

- 2) ขั้นตอนการจำลองนั้นเหมือนกับการจำลองโหมดสนามไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลดแต่สิ่งที่เพิ่มเติมคือการทำความร้อนจากไมโครเวฟซึ่งจะใช้ Electromagnetic Heating ในหัวข้อ Microwave Heating ควบคู่กับหัวข้อ Electromagnetic Waves, Frequency Domain โดยสมการของ Microwave Heating ที่ใช้จำลองคือสมการที่ 3.3

$$\overline{Q}_{MW} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (3.3)$$

สมการที่ 3.3 คือสมการที่ควบคุมพลังงานของวัสดุที่เกิดความร้อนจากไมโครเวฟดังนั้นวัสดุจะร้อนมากเท่าไรนั้นขึ้นกับปริมาณสนามไฟฟ้าที่สามารถรับได้ดังสมการที่ 3.4

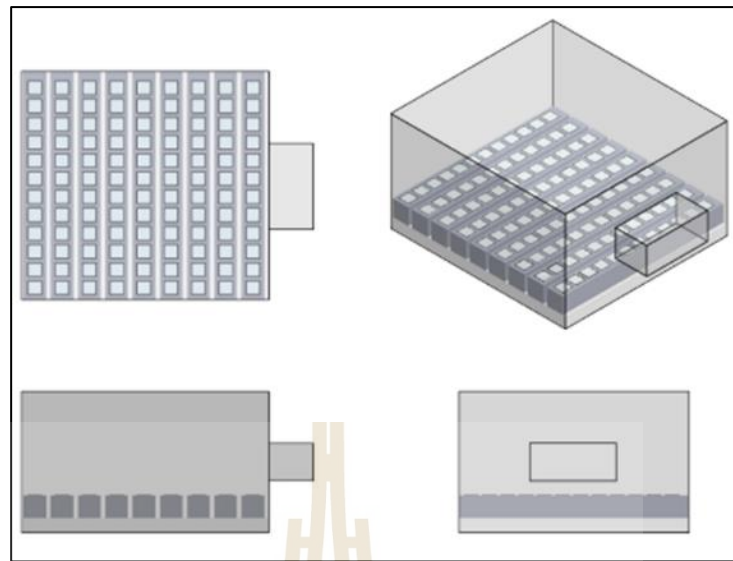
$$\nabla \times E = -j\omega \epsilon_0 \epsilon^* E \quad (3.4)$$

สมการที่ 3.4 คือสมการที่ใช้ทำนายปริมาณสนามไฟฟ้าภายในวัสดุทั้งสมการ 3.3 และ 3.4 เป็นสมการที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของน้ำในการจำลองซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำนั้นถูกควบคุมด้วยสมการที่ 3.5

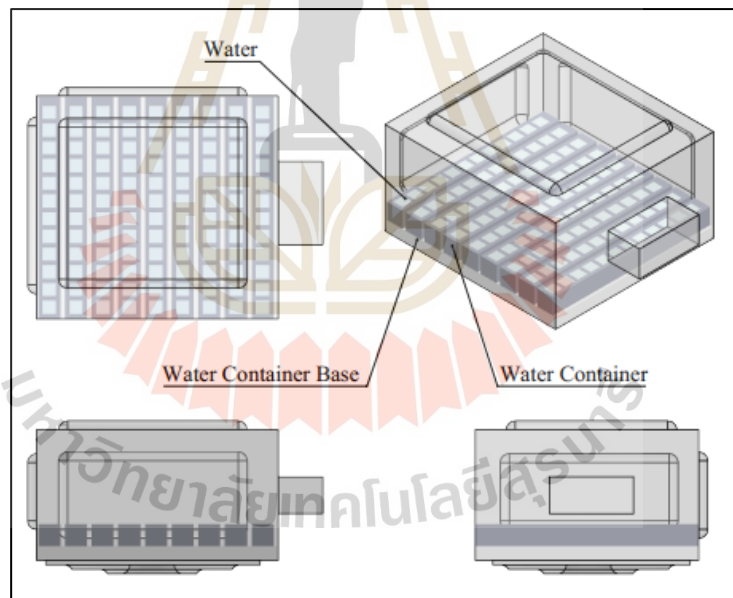
$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\overline{Q}_{MW}}{\rho C_p} \quad (3.5)$$

จากรูปที่ 3.19 มีวัสดุเพิ่มเข้ามาซึ่งต้องกำหนดคุณสมบัติเพิ่มเติมดังตารางที่ 3.3

- 3) การแบ่งกริดก็ยังใช้วิธีเดียวกันกับการแบ่งกริดในการจำลองในสถานะไร้โหลด มีเพียงฐานสำหรับวางอุปกรณ์และอุปกรณ์บรรจุน้ำที่ต้องใส่เพิ่มขึ้นในระบบขณะแบ่งกริดซึ่งจำนวนกริดแสดงได้ดังตารางที่ 3.4
- 4) ทำการ Compute เพื่อให้โปรแกรมคำนวณผลการจำลองออกมาเพื่อแสดงผลการกระจายอุณหภูมิและการกระจายสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.19 โมเดลของตู้อบไมโครเวฟขณะมีหลอดห้องผิวเรียบ (ก) และผิวเว้า (ข)

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองตู้ไมโครเวฟสถานะมีโหนด

Materials	Relative permeability	Relative permittivity	Electrical conductivity (S/m)
Air	1	1	0
Aluminum	1	1	6.0×10^7
Plastic	1	3.3	0
Water	1	75-12j	5.5×10^{-6}

ตารางที่ 3.4 จำนวนกริดของรูปแบบห้องผิวเรียบและผิวเว้ามนของการจำลองขณะมีโหนด

	Simple Shape	Complex Shape
Number of vertex elements	960	1,016
Number of edge elements	10,844	12,563
Number of boundary elements	190,358	133,468
Number of elements	978,185	731,396

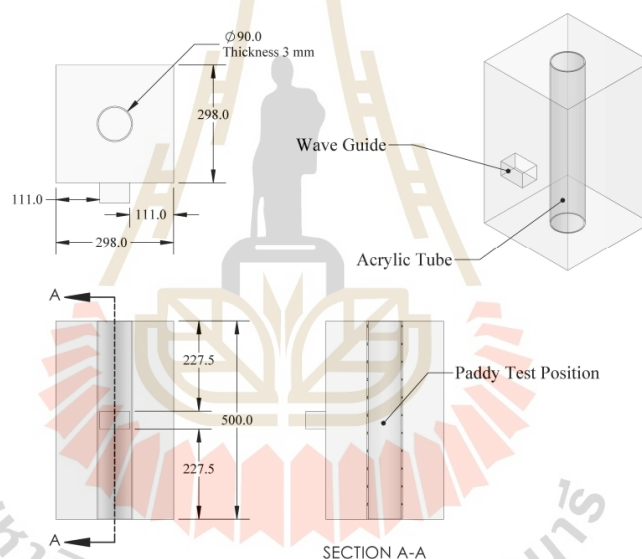
ตารางที่ 3.5 จำนวนกริดของห้องแต่ละรูปทรง

	Square shape	Hexagon Shape	Chamfered triangle Shape
Number of vertex elements	32	28	28
Number of edge elements	2,298	832	766
Number of boundary elements	45,370	25,826	22,160
Number of elements	256,577	268,551	168,545

3.3.4 การจำลองสนามไฟฟ้าของห้องอบแห้ง

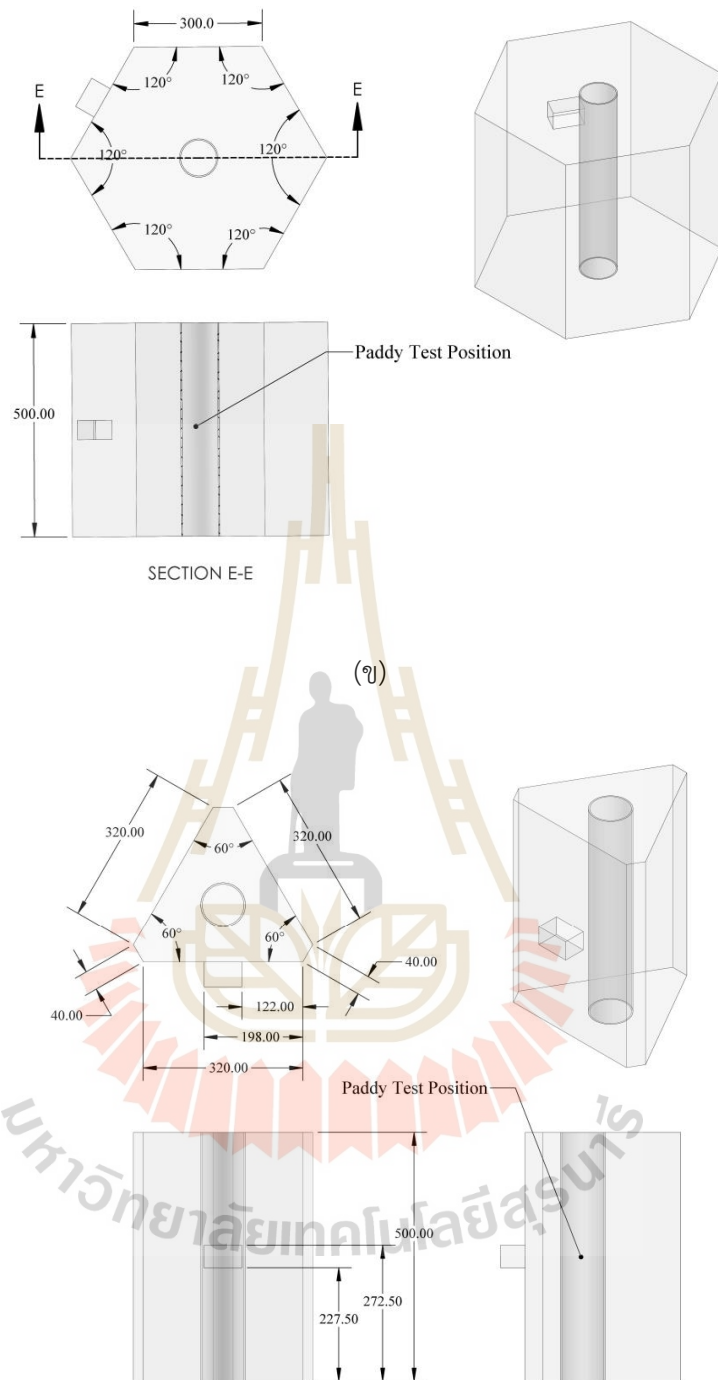
การจำลองสนามไฟฟ้าในห้องอบแห้งนั้นจะใช้ห้องรูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงหกเหลี่ยม และรูปสามเหลี่ยมมุมมน ซึ่งลักษณะและขนาดของรูปทรงต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.20 ก ห้องสี่เหลี่ยม 3.20 ข ห้องแบบหกเหลี่ยมและ 3.20 ค ห้องแบบสามเหลี่ยมมุมมน โดยประเภทวัสดุและคุณสมบัติ นั้นยังใช้ค่าจากตารางที่ 3.3 ทำการจำลองแบบด้วยวิธีการเดียวกับขั้นตอนการจำลองโหมด สนามไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด จากทำการศึกษาผลของโหมดสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูงของการใช้ อบแห้งข้าวเปลือกในท่อ จำนวนกริดของห้องแต่ละรูปทรงแสดงได้ดังตารางที่ 3.5

หลังจากทำการจำลองสนามโหมดสนามไฟฟ้าของห้องอบแห้งแต่ละแบบเสร็จแล้ว ทำการวิเคราะห์ผลและประเมินเพื่อเลือกรูปทรงของห้องอบแห้งที่เหมาะสมและจะนำมาสร้างเป็น ต้นแบบเครื่องอบแห้งและทดสอบการทำงานต่อไป



(ก)

รูปที่ 3.20 ลักษณะรูปทรงและขนาดของห้องต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองโหมดสนามไฟฟ้า ก.ห้องรูปทรง แบบสี่เหลี่ยม ข.ห้องรูปทรงหกเหลี่ยม และค.ห้องรูปทรงสามเหลี่ยมมุมมน



(ค)

รูปที่ 3.20 ลักษณะรูปทรงและขนาดของห้องต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองโหมตสนามไฟฟ้า ก.ห้องรูปทรง แบบสี่เหลี่ยม ข.ห้องรูปทรงหกเหลี่ยม และค.ห้องรูปทรงสามเหลี่ยมมุม (ต่อ)

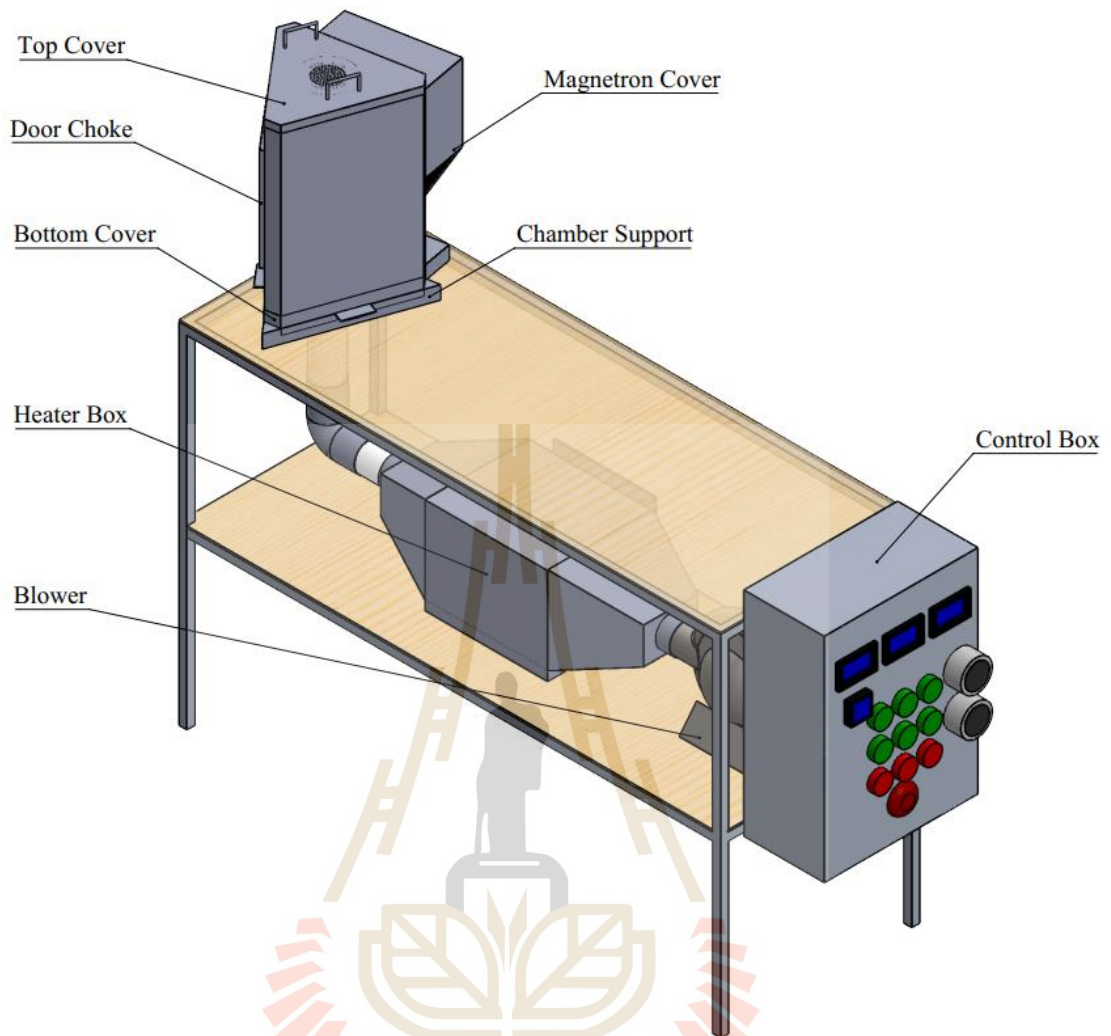
3.4 การออกแบบรายละเอียดของห้องอบแห้งแบบรูปทรงสามเหลี่ยมมุม

จากรูปที่ 3.21 แสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งซึ่งห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ทำหน้าที่อบแห้งข้าวเปลือก กล่องทำความร้อน (Heater Box) ทำหน้าที่จ่ายความร้อนให้กับอากาศ เครื่องเป่าอากาศ (Blower) ทำหน้าที่จ่ายอากาศให้กับระบบ กล่องควบคุมระบบ (Control Box) ทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแต่ละอุปกรณ์ ห้องอบแห้งมีส่วนประกอบที่เป็นหน้าต่างกันคลื่น (Door Choke) ทำหน้าที่กันคลื่นไมโครเวฟไม่ให้ออกมาได้และยังสามารถสังเกตการณ์ภายในห้องอบแห้งได้ กล่องครอบแม่กนิตรอน (Magnetron Cover) ทำหน้าที่ในการกันคลื่นสนามแม่เหล็กออกมาได้

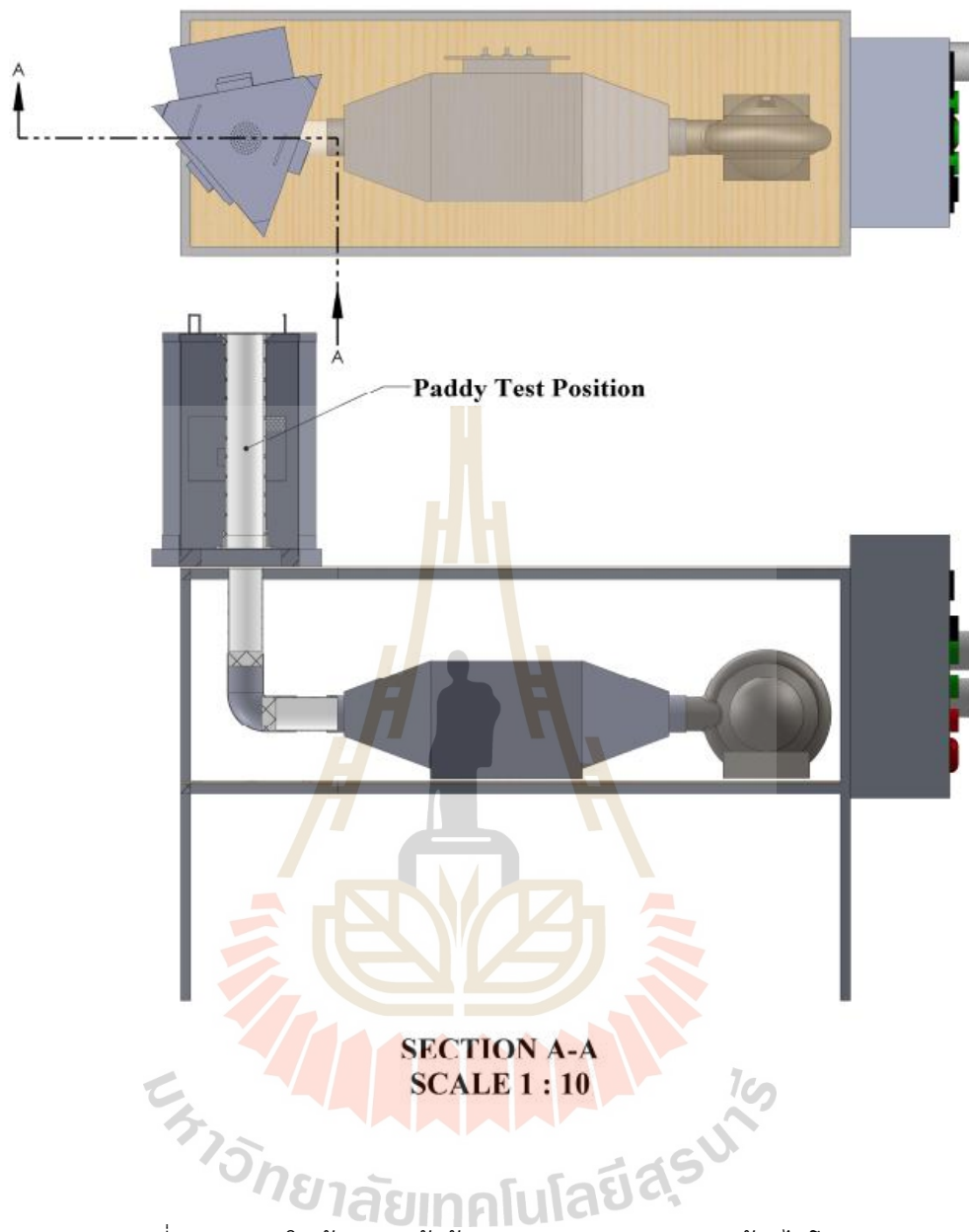
จากรูปที่ 3.22 ภาพตัดที่แสดงชิ้นส่วนภายในห้องอบแห้งเห็นได้ว่าจะมีท่อทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 90 มิลลิเมตร รวมถึงตำแหน่งการทดสอบข้าวเปลือก (Paddy test position) ด้านหลังท่อจะมีส่วนประกอบสำคัญคือท่อนำคลื่น (Wave Guided) ทำหน้าที่นำคลื่นไมโครเวฟจากแม่กนิตรอน

จากรูปที่ 3.23 คือรายละเอียดของปุ่มควบคุมต่างๆ อุปกรณ์ทุกตัวถูกควบคุมด้วยปุ่มเริ่ม (Start Button) ปุ่มหยุด (Stop Button) ไฟแสดงสถานะ (Power Indicator) ในการควบคุมการจ่ายพลังงานไมโครเวฟมีปุ่มปรับระดับพลังงาน (Microwave Level Adjustment) และปุ่มปรับเวลาๆ (Timer Adjustment) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของอากาศใช้ยี่ห้อ REX-C100 PID Controller

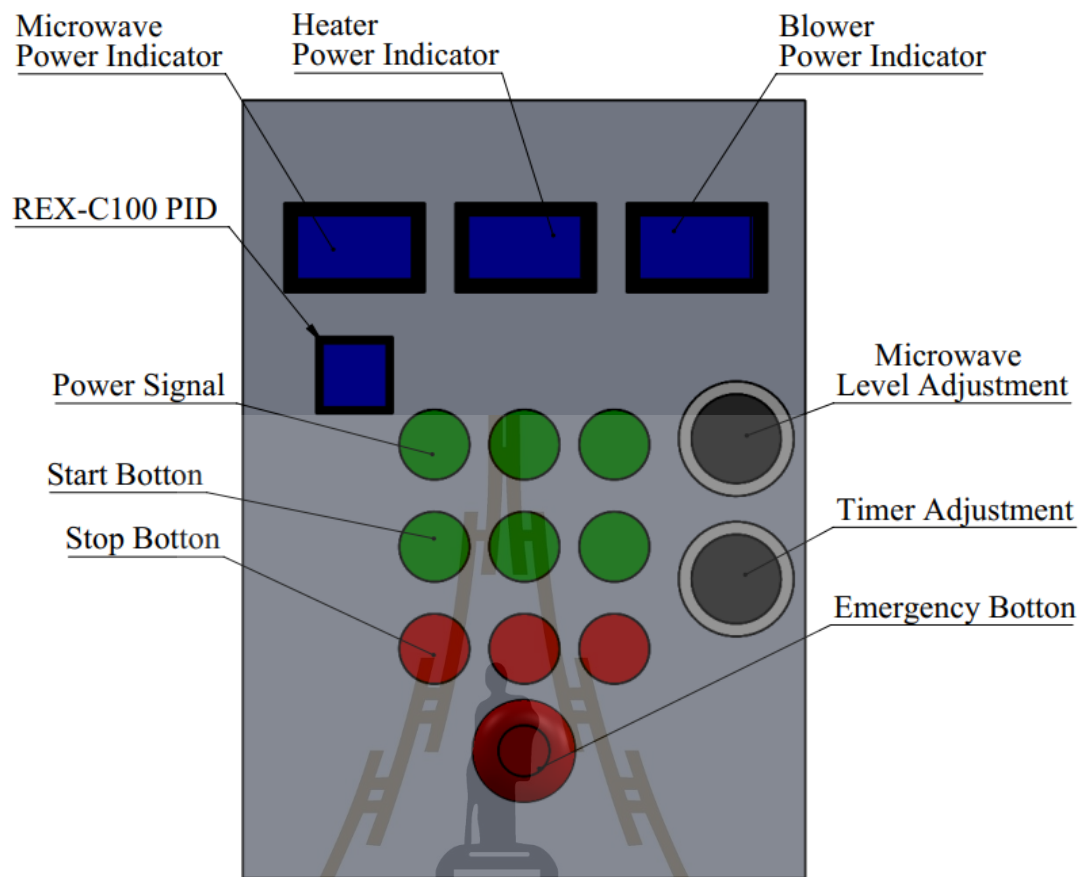




รูปที่ 3.21 ภาพรวมระบบอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 3.22 ภายในห้องอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 3.23 รายละเอียดของตู้ควบคุมของระบบอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

3.5 การทดลองพฤติกรรมการอบแห้งด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

ข้าวที่ใช้ทดสอบเป็นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ.2564 จากจังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งเป็นข้าวจากยู้งฉาง การหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกและการกำหนดความชื้นในข้าวเปลือกสามารถทำได้แบบเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.3 กระบวนการปรับความชื้นข้าวเปลือกซึ่งการทดลองนี้จะใช้ข้าวเปลือกที่ถูกกำหนดความชื้นให้เท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก การทดสอบจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.6 ในแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งโดยแต่ละเงื่อนไขมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

3.5.1 การผึ่งแห้งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ

ข้าวเปลือกที่ผึ่งแห้งถูกนำมาใช้เป็นชุดควบคุมสำหรับเปรียบเทียบคุณภาพของตารางที่ 3.6 รายละเอียดของการทดสอบแต่ละเงื่อนไข

	Hot air, 80 °C	Ambient Air	Microwave level 1	Microwave level 2
Condition 1 st	✓			
Condition 2 nd	✓		✓	
Condition 3 rd		✓	✓	
Condition 4 th		✓		✓

หมายเหตุ Microwave level 1 คือการทำงาน 1 รอบใช้เวลา 30 วินาที โดยแม่กนิตรอนทำงาน 6 วินาที และหยุด 24 วินาที, Microwave level 2 คือการทำงาน 1 รอบใช้เวลา 30 วินาที แม่กนิตรอนทำงาน 12 วินาที และหยุด 18 วินาที

ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) นำข้าวเปลือกมาผึ่งในร่มดังรูปที่ 3.24

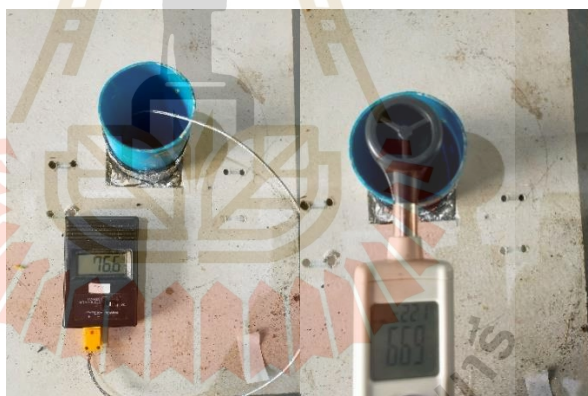


รูปที่ 3.24 ข้าวเปลือกที่ทำการผึ่งในร่ม

- 2) ทำการเช็คความชื้นทุกวันจนกว่าข้าวจะแห้งจนมีความชื้นเท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก
- 3) นำข้าวเปลือกจากข้อ 2. มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและดัชนีความขาว

3.5.2 การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก

- 1) ก่อนทำการทดสอบจะต้องเตรียมวัสดุให้พร้อมโดยการนำถุงบรรจุข้าวเปลือกที่ปิดสนิทมาทิ้งไว้ในอากาศสภาพแวดล้อมประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศสภาพแวดล้อม
- 2) ทำการเปิดโบลเวอร์และปรับหน้าต่างทางเข้าอากาศให้เปิดสุด ทำการตั้งค่าอุณหภูมิของอากาศผ่านอุปกรณ์ REX-C100 PID (รูปที่ 3.22) โดยตั้งค่าให้ได้ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจากนั้นทำการเก็บค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศด้วย Thermocouple Type K (ดังรูปที่ 3.25ก) จากนั้นทำการวัดความเร็วของอากาศด้วยแอนาโมมิเตอร์ (ดังรูปที่ 3.25 ข) วัดทั้งหมด 5 ซ้ำ



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.25 (ก) การวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (ข) การวัดความเร็วของอากาศ

- 3) ทำการวัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกด้วย Thermocouple Type K ดังรูปที่ 3.27 ก วัดค่าทั้งหมด 5 ซ้ำ ซึ่งข้าวให้ได้ประมาณ 100 กรัม จากนั้นบรรจุข้าวลง อุปกรณ์บรรจุข้าวดังรูปที่ 3.26 (ข) ซึ่งเป็นตำแหน่ง Paddy Test Position รูปที่ 3.22 ภายในห้องอบแห้ง (ในระหว่างการบรรจุให้กดปุ่ม Emergency ก่อนเพื่อหยุดการทำงานของเครื่อง)



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.26 (ก) การวัดอุณหภูมิข้าว (ข) การบรรจุอุปกรณ์บรรจุข้าวลงในห้องอบแห้ง

- 4) เปิดเครื่องและจับเวลา 5 นาที จากนั้นหยุดจับเวลาปิดเครื่องนำข้าวออกมาซึ่งใหม่บันทึกค่าน้ำหนัก วัดอุณหภูมิของข้าวเปลือกและบันทึก จดค่าพลังงานที่ใช้แต่ละอุปกรณ์ นำข้าวเปลือกกลับไปบรรจุห้องอบแห้งใหม่เปิดเครื่องจับเวลา 5 นาที ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าน้ำหนักข้าวเปลือกที่ซึ่งได้จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (เปลี่ยนแปลงในทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ของกรัม)
- 5) ทำการคำนวณหาค่าความชื้นในแต่ละช่วงเวลาตามสมการที่ 2.7 จะได้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก คำนวณอัตราการอบแห้ง 2.19 และคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะตามสมการที่ 2.17 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก
- 6) จากขั้นตอนที่ 5 จะทราบเวลาที่ข้าวเปลือกเหลือความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ให้ทำการชั่งข้าวให้ได้ประมาณ 100 กรัม ทำการอบแห้งด้วยเริ่มขั้นตอนที่ 3 ถึง 4 ให้จับเวลาจนกว่าจะถึงเวลาที่ข้าวเปลือกเหลือความชื้นที่ 14 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก จากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำไปหาค่าคุณภาพผลิตภัณฑ์ต่อไป

ในการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกบนเงื่อนไขที่ 2 นั้นมีขั้นตอนที่เหมือนการทดสอบบนเงื่อนไขที่ 1 แต่มีขั้นตอนที่แตกต่างกันคือขั้นตอนที่ 2 จะเพิ่มการทำงานของไมโครเวฟเข้าไป โดยหมุนปุ่ม Timer Adjustment ตามเข็มนาฬิกาจนสุด (รูปที่ 3.23) จากนั้นปรับระดับพลังงานไมโครเวฟเป็นระดับที่ 1 ผ่านปุ่ม Microwave Level Adjustment ในขณะที่เงื่อนไขที่ 3 และ 4 คือการปิด Heater แล้วใช้อากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ซึ่งในเงื่อนไขที่ 4 ให้ปรับพลังงานเป็นไมโครเวฟระดับที่ 2

3.5.3 การทดสอบหาค่าคุณภาพผลิตภัณฑ์

ข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งแต่ละเงื่อนไขและข้าวเปลือกชุดควบคุม จะถูกนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าความขาวของผลิตภัณฑ์ซึ่งทำได้ดังนี้

- 1) ทำการกระเทาะข้าวเปลือกด้วยการใช้เครื่องกระเทาะข้าวเปลือกแบบระบบลูกยางดังรูปที่ 3.27ก จะได้ออกมาเป็นข้าวกล้องดังรูปที่ 3.27ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.27 (ก) เครื่องสีข้าวระบบลูกยาง (ข) ข้าวกล้องที่ได้จากการกระเทาะ

- 2) นำข้าวกล้องที่ได้จากการกระเทาะมาสีด้วยเครื่องขัดขาวจะได้ข้าวขาวดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ข้าวขาวที่ได้จากการขัดขาว

- 3) นำข้าวที่ได้จากการขัดขาวมาแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวเต็มเมล็ดและเมล็ดหักดังรูปที่ 3.29 ทำการชั่งน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดออกมาจะได้ ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวตันได้ตามสมการที่ 2.21 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

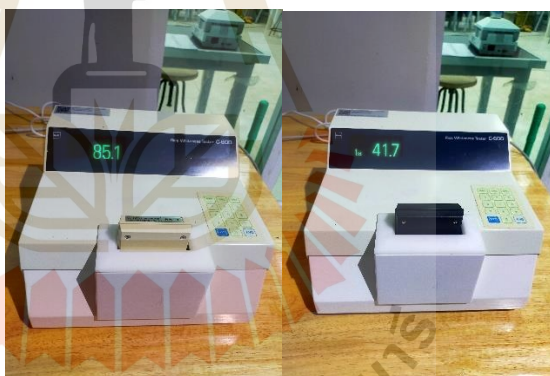


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.29 (ก) ข้าวเต็มเมล็ด (ข) ข้าวเมล็ดหัก

- 4) นำข้าวที่ได้จากการขัดขาวมาหาค่าความขาวจากเครื่องวัดความขาวซึ่งก่อนวัดจะต้องสอบเทียบค่าความขาวก่อนตามรูปที่ 3.30ก ซึ่งจะต้องได้ค่าความขาว 85.1 และทำการหาค่าความขาวของข้าวสารรูปที่ 3.30ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.30 เครื่องวัดความขาวของข้าว (ก) สอบเทียบเครื่องวัด (ข) ค่าความขาวที่วัดได้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

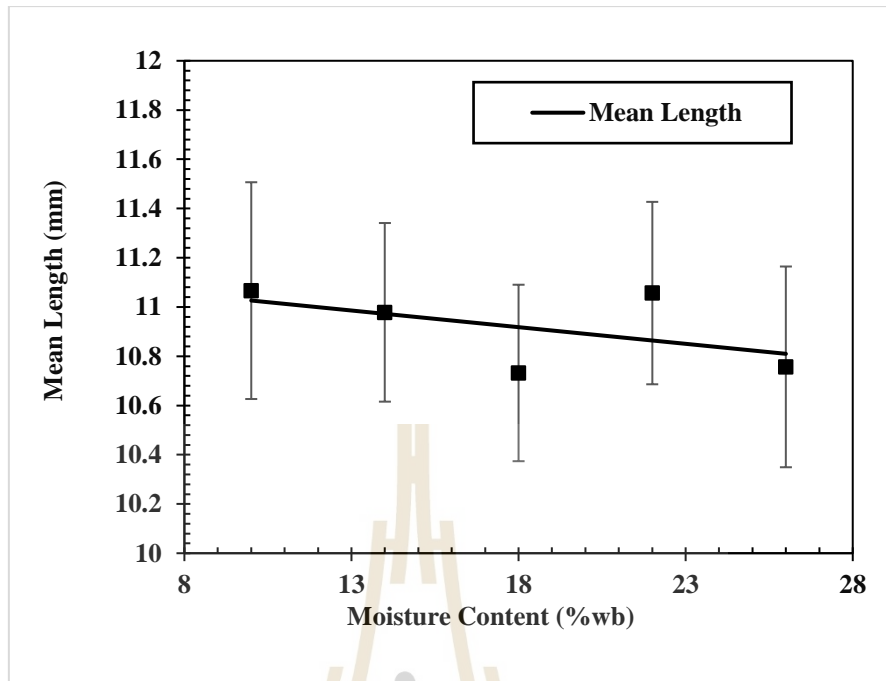
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์โดยมีเครื่องมืออาทิ การสร้างกราฟเพื่อศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ต่าง ๆ การใช้ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของนักวิจัยท่านอื่นมาอภิปรายผล และอธิบายความแตกต่างหรือคล้ายคลึงกันของข้อมูล โดยหัวข้อของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลนี้ประกอบไปด้วย สมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 พฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารระดับครัวเรือน การออกแบบห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ และพฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ด้วยอากาศร้อน อากาศสภาพแวดล้อมและการเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟในการอบแห้ง

4.1 สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

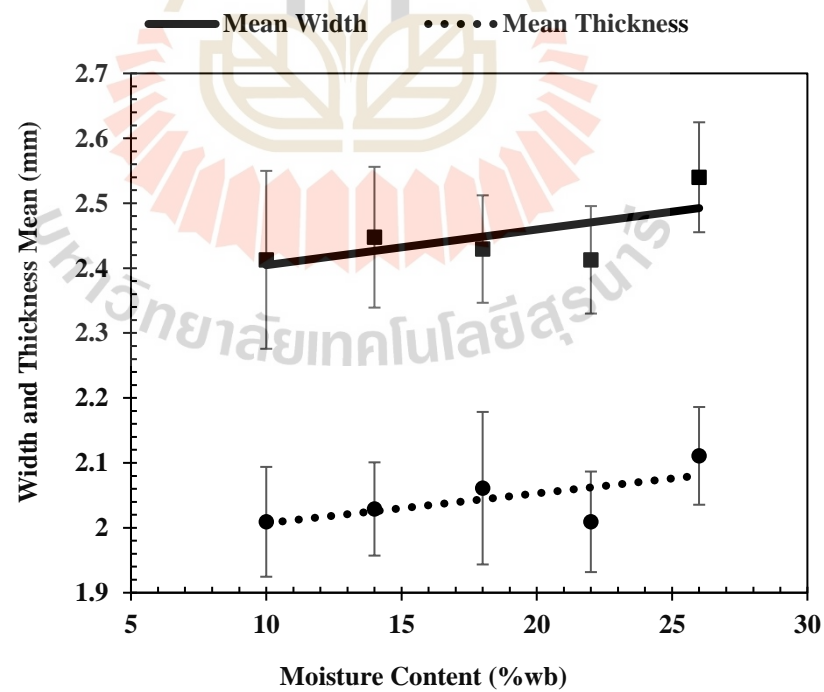
4.1.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อมิติของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ในช่วง 10 - 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก กับค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความยาวของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่ตรงข้ามกับความหนาและความกว้างเฉลี่ยของข้าวเปลือกที่มีค่าเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อิทธิพลของความชื้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้างและความหนา (ตารางที่ 4.1) โดยค่าเฉลี่ยความยาวที่ความชื้น 10 - 18 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่จะแตกต่างกับค่าเฉลี่ยความยาวที่ความชื้น 22 - 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นั่นคือความชื้นข้าวเปลือกที่มากกว่า 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีผลทำให้ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือกสั้นลง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าค่าความกว้างเฉลี่ยที่ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีความแตกต่างกันและแตกต่างกับค่าความกว้างเฉลี่ยที่ความชื้น 10 14 และ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ซึ่งทั้ง 3 ค่าหลังนี้มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อประเมินผลร่วมกับแนวโน้มจากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความชื้นมากกว่า 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ขึ้นไป ส่วนความหนาของข้าวเปลือกพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมีค่าเฉลี่ยจากทุกความชื้นเท่ากับ 2.06 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

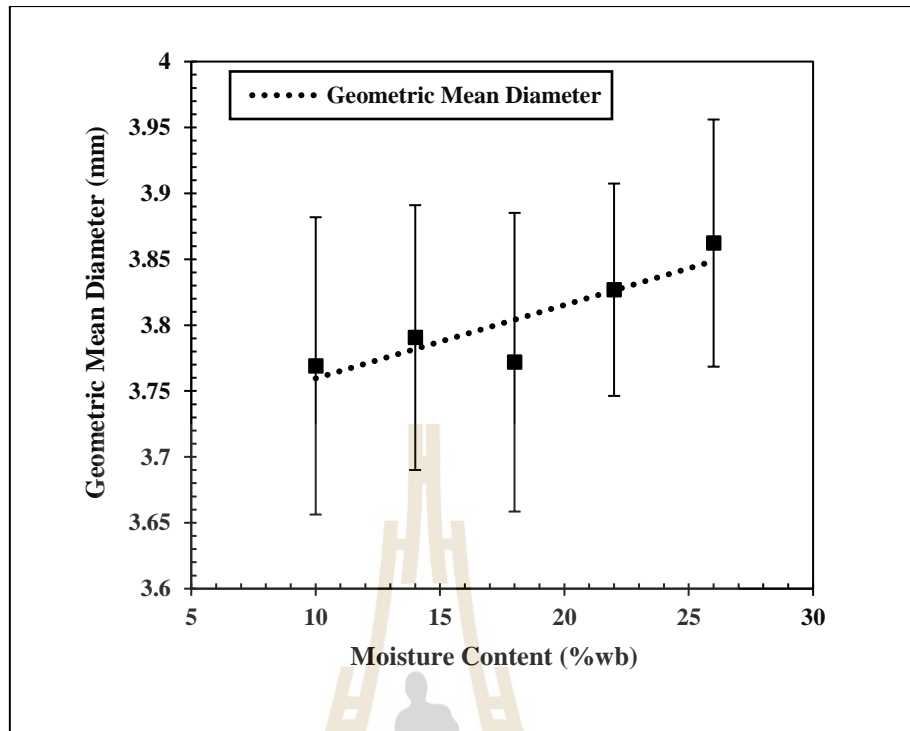
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม

Moisture Content %WB	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Geometric Mean Diameter (mm)	Degree of Sphericity (%)
10	11.07 ± 0.44 ^b	2.41 ± 0.14 ^a	2.00 ± 0.08 ^a	3.77 ± 0.11 ^a	34.09 ± 1.189 ^a
14	10.98 ± 0.36 ^b	2.44 ± 0.11 ^{ab}	2.02 ± 0.07 ^{ab}	3.79 ± 0.10 ^{ab}	34.55 ± 0.88 ^b
18	10.73 ± 0.36 ^a	2.42 ± 0.08 ^a	2.06 ± 0.12 ^{bc}	3.77 ± 0.11 ^a	35.16 ± 1.01 ^c
22	10.8 ± 0.37 ^a	2.48 ± 0.08 ^b	2.09 ± 0.08 ^{cd}	3.82 ± 0.08 ^{bc}	35.44 ± 1.00 ^c
26	10.75 ± 0.41 ^a	2.54 ± 0.08 ^c	2.11 ± 0.08 ^d	3.86 ± 0.09 ^c	35.93 ± 1.01 ^d
Average	10.86 ± 0.41	2.46 ± 0.11	2.06 ± 0.09	3.80 ± 0.03	35.03 ± 0.72

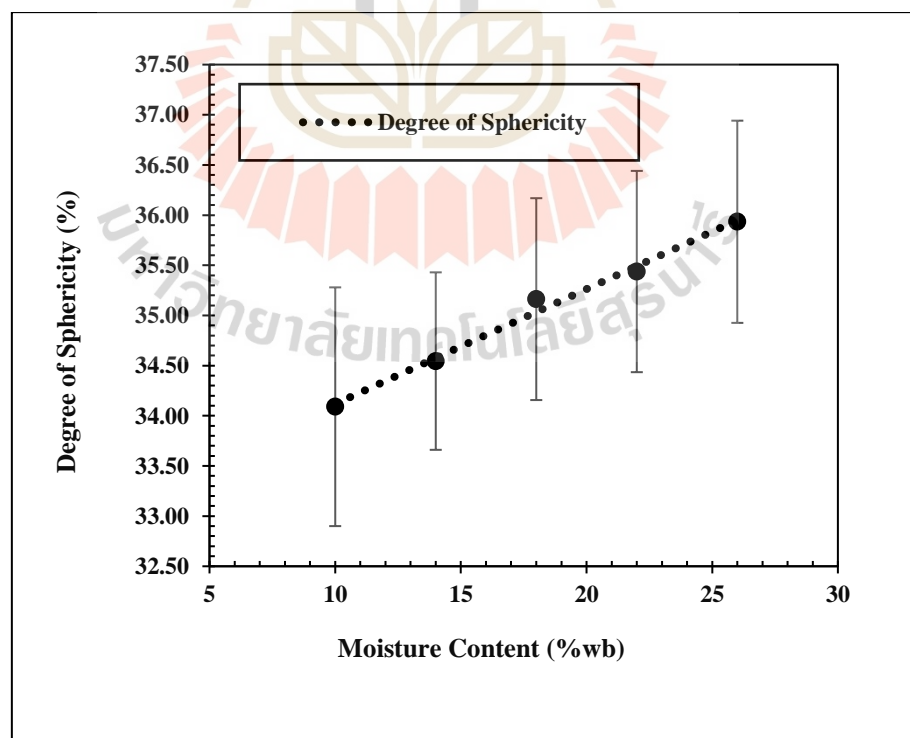
หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การเพิ่มขึ้นของความชื้นในข้าวเปลือกทำให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนาประกอบกับความยาวที่ลดลงเนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ทางสถิติกลับพบว่าอิทธิพลของความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นต่ำมาก (เปลี่ยนแปลงในทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ของค่าที่วัดได้) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 0.55 ± 0.0172 มิลลิเมตร

การเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกทำให้ค่าระดับความกลมเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นมีความแตกต่างกัน โดยความชื้น 10 14 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าเฉลี่ยระดับความกลมแตกต่างกัน และที่ความชื้น 22 กับ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าเฉลี่ยระดับความกลมเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน (ตามตัวอักษรในตารางที่ 1) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นมีอิทธิพลต่อค่าระดับความกลมเฉลี่ยชัดเจนที่สุด

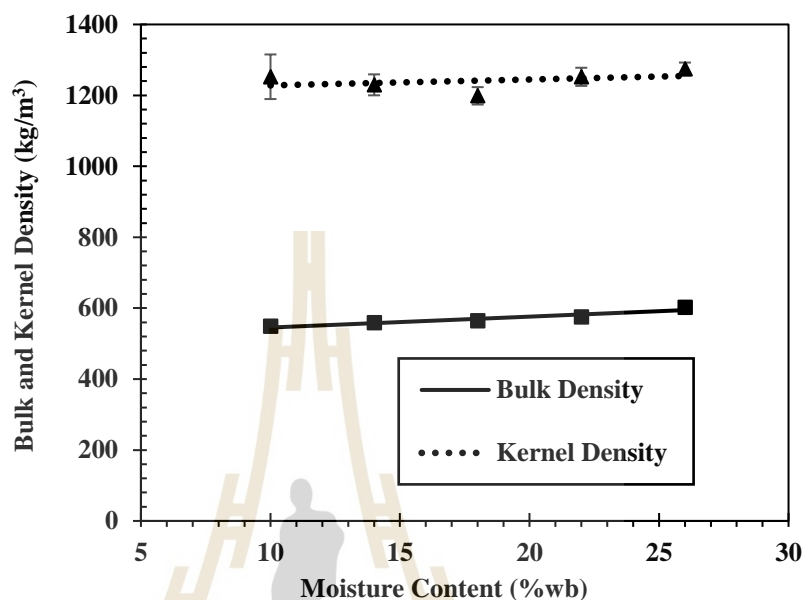


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าระดับความกลม

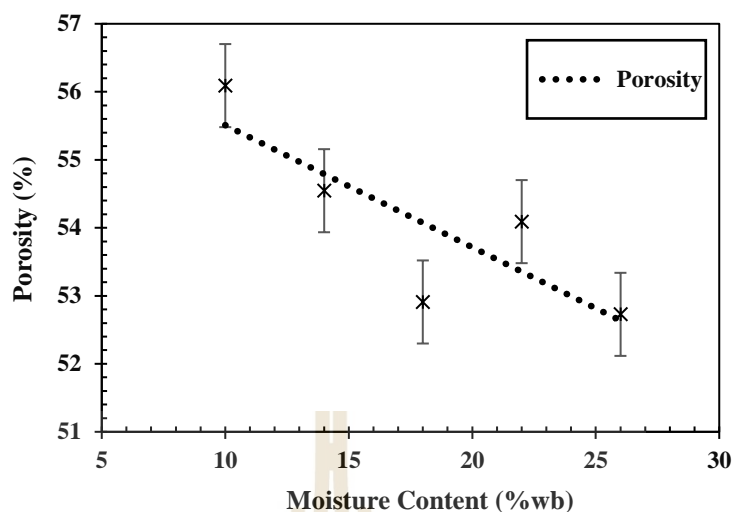
4.1.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ด

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อความชื้นในข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะแม้ว่าปริมาตรของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนาของเมล็ดเนื่องจากความชื้น แต่การเพิ่มขึ้นของมวลข้าวเปลือกเนื่องจากการเพิ่มความชื้นมีอิทธิพลสูงกว่า จึงทำให้ความหนาแน่นเชิงกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.9

สำหรับค่าความพรุน (รูปที่ 4.6) พบว่าเมื่อความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความพรุนของเมล็ดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาและความกว้างร่วมกับการลดลงของความยาวเมล็ดทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงกลมมากขึ้นและส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเมล็ดมีค่าลดลง เมื่อนำค่าความพรุนและค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มไปคำนวณตามสมการที่ 2.10 จะได้ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดดังรูปที่ 4.5 ซึ่งค่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องความชื้นจะถูกกักเก็บในรูขนาดเล็กภายในข้าวเปลือกและทำให้มวลของเมล็ดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงมวลและการลดลงของค่าความพรุนของเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความพรุนของเมล็ด

การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอิทธิพลของความชื้นที่มีค่ามากกว่า 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญและความชื้นนี้ยังส่งผลต่อการลดลงของค่าความพรุนอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเมื่อเมล็ดมีความชื้นสูงขึ้นย่อมทำให้ปริมาตรของเมล็ดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม ในหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมา ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ $1,241.47 \pm 28.67$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

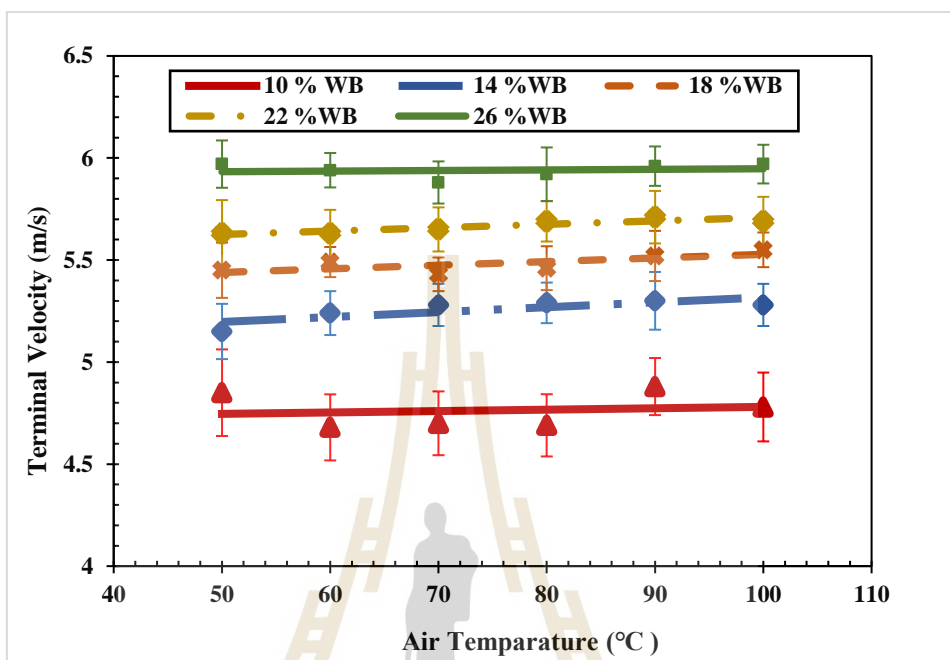
ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม เชิงเมล็ด และค่าความพรุน

Moisture Content %WB	Bulk Density (kg/m^3)	Kernel Density (kg/m^3)	Porosity (%)
10	548.97 ± 9.41^a	$1,252.44 \pm 62.87^{bc}$	56.09 ± 1.77^c
14	558.91 ± 14.14^{ab}	$1,229.65 \pm 29.55^{ab}$	54.54 ± 0.61^b
18	564.46 ± 11.97^b	$1,198.66 \pm 24.53^a$	52.90 ± 0.38^a
22	574.87 ± 11.30^c	$1,252.31 \pm 25.61^{bc}$	54.09 ± 0.64^b
26	602.40 ± 8.58^d	$1,274.30 \pm 18.16^c$	52.72 ± 0.00^a
Average	569.92 ± 20.43	$1,241.47 \pm 28.67$	54.07 ± 1.36

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย \pm คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.2 สมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

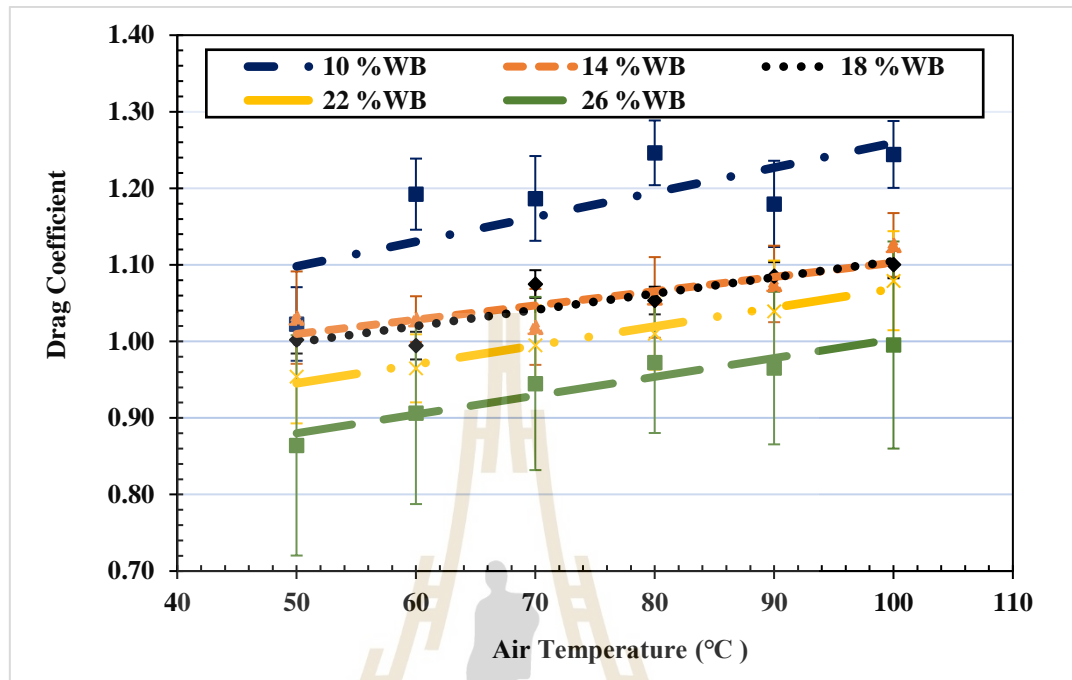
4.2.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าความเร็วสุดท้าย



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก

จากรูปที่ 4.7 เมื่อความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้าวเปลือกมีมวลเพิ่มขึ้นจากความชื้นทำให้ต้องใช้ความเร็วลมมากขึ้นในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัว ผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อค่าความเร็วลมสุดท้ายพบว่ามีเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศมีผลทำให้ความหนาแน่นอากาศลดลงเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 4.3) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งให้เห็นว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อค่าความเร็วสุดท้าย โดยที่ความชื้นข้าวเปลือก 10 14 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าเฉลี่ยความเร็วสุดท้ายแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศจาก 50 – 100 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเร็วลอยตัวในแต่ละความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ข้าวเปลือกที่ความชื้นข้าวเปลือก 18 กับ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก พบว่ามีค่าเฉลี่ยความเร็วสุดท้ายไม่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน

4.2.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความชื้นและอุณหภูมิอากาศ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นข้าวเปลือกและค่าอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นโดยค่าสัมประสิทธิ์นี้อยู่ในช่วง 0.80 – 1.95 และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นในข้าวเปลือกและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการทดสอบไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของมวลเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าค่อนข้างสูงในขณะที่การเพิ่มขึ้นของมิติเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าต่ำมาก และเมื่อคำนวณเป็นพื้นที่หน้าตัดของเมล็ดตามสมการที่ 2.3 จะได้ค่า A_f ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากจนเกือบคงที่ หากพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.2 อากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (ρ_a) มีค่าลดลง ในขณะที่มวลข้าวเปลือก (M) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วสุดท้าย (V_f) เพิ่มขึ้นไปด้วยผลคูณของตัวแปรในเทอมส่วนจึงพอดีกับเทอมเศษ และเป็นผลให้อัตราส่วนของมัน (คือค่า C_d) มีค่าคงที่ สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลในงานด้านอากาศพลศาสตร์อื่นๆ ที่ค่านี้จะแปรผันตามรูปทรงและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุเป็น

ส่วนใหญ่ และจากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเท่ากับ 1.05 ± 0.1254

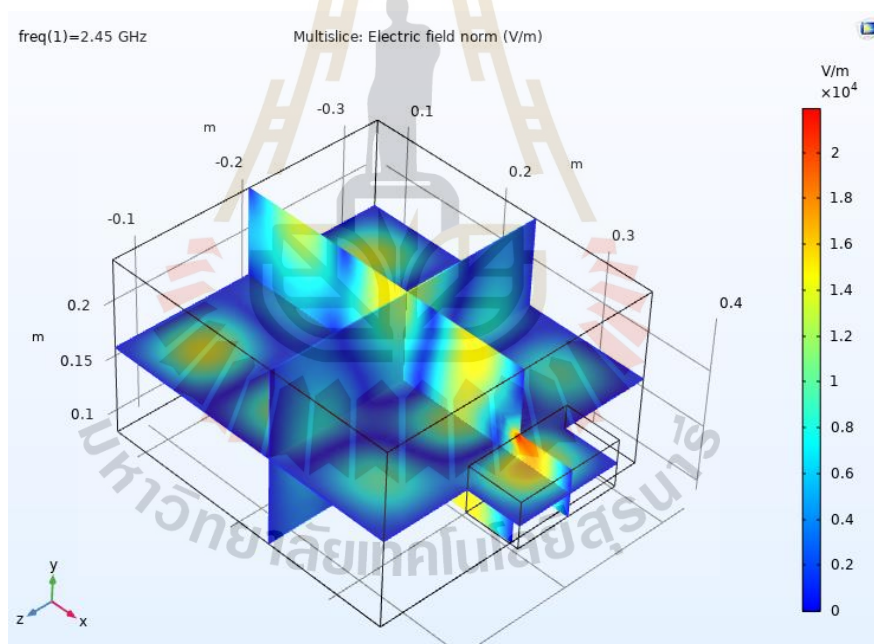
ตารางที่ 4.3 ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

Air Temperature (°C)	Moisture Content (%WB)	Terminal Velocity (m/s)	Drag Coefficient
50	10	4.85 ± 0.21^b	1.02 ± 0.143^{cdef}
	14	4.68 ± 0.16^c	1.18 ± 0.119^{cdef}
	18	4.70 ± 0.16^e	1.19 ± 0.114^{efg}
	22	4.69 ± 0.15^{fgh}	1.25 ± 0.091^{bc}
	26	4.88 ± 0.14^i	1.18 ± 0.099^a
60	10	4.78 ± 0.17^a	1.24 ± 0.136^{hi}
	14	5.15 ± 0.14^{cd}	1.03 ± 0.061^{cdef}
	18	5.24 ± 0.11^e	1.03 ± 0.044^{bcde}
	22	5.28 ± 0.10^{fgh}	1.02 ± 0.051^{bcd}
	26	5.29 ± 0.10^i	1.06 ± 0.047^{ab}
70	10	5.30 ± 0.14^a	1.08 ± 0.066^{hi}
	14	5.28 ± 0.10^d	1.13 ± 0.066^{cdef}
	18	5.45 ± 0.14^e	1.09 ± 0.307^{efg}
	22	5.49 ± 0.07^{fgh}	0.99 ± 0.030^{bcde}
	26	5.43 ± 0.08^i	1.08 ± 0.049^{abc}
80	10	5.46 ± 0.11^a	1.05 ± 0.052^i
	14	5.52 ± 0.12^d	1.09 ± 0.049^{defg}
	18	5.55 ± 0.08^e	1.10 ± 0.043^{defg}
	22	5.63 ± 0.16^h	0.95 ± 0.054^{cdf}
	26	5.63 ± 0.12^i	0.97 ± 0.067^{bcd}
90	10	5.65 ± 0.11^b	1.00 ± 0.036^{hi}
	14	5.69 ± 0.10^d	1.01 ± 0.052^{efg}
	18	5.71 ± 0.13^{ef}	1.04 ± 0.056^{efg}
	22	5.69 ± 0.12^h	1.08 ± 0.077^{cdefg}
	26	5.97 ± 0.12^i	0.86 ± 0.050^{bcd}
100	10	5.94 ± 0.08^{ab}	0.91 ± 0.048^i
	14	5.88 ± 0.10^d	0.95 ± 0.055^{gh}
	18	5.92 ± 0.13^{ef}	0.97 ± 0.043^{fgh}
	22	5.96 ± 0.10^h	0.96 ± 0.057^{efg}
	26	5.97 ± 0.09^i	1.00 ± 0.043^{bcde}

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย \pm คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

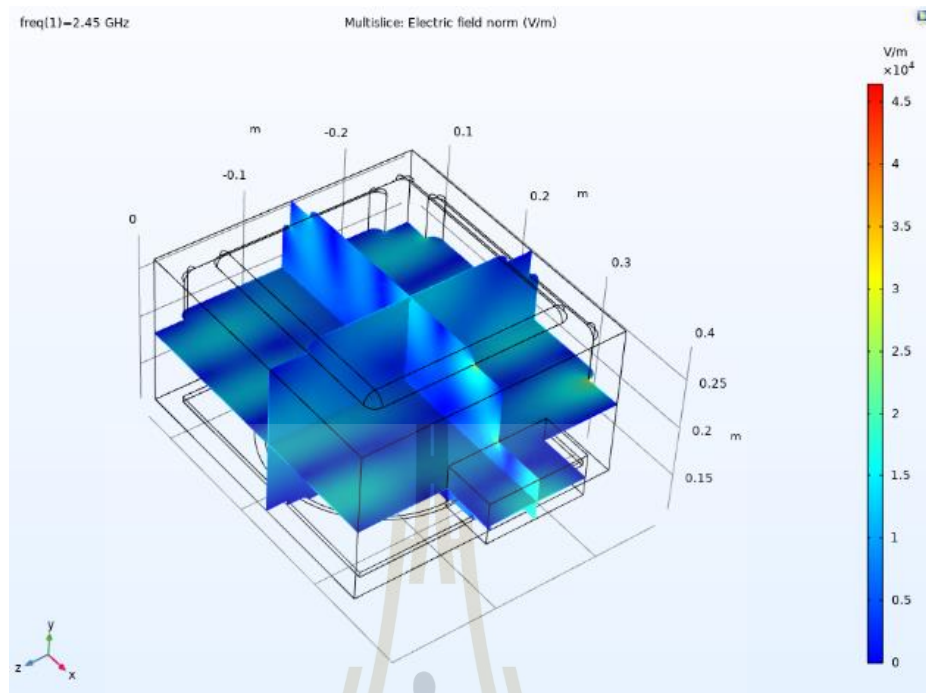
4.3 พฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารระดับครัวเรือน

การจำลองโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเรียบและผิวเว้านูนในสถานะไม่มีโหลด ดังรูปที่ 4.9ก และ 4.9ข ตามลำดับ ผลแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันกล่าวคือโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าของตู้ไมโครเวฟแบบผิวเรียบมีความเป็นระเบียบมากกว่าโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าของตู้ไมโครเวฟแบบผิวเว้านูนซึ่งโหมดคลื่นมีการกระจายมากกว่าแต่ยังมีความเป็นระเบียบโดยเฉพาะในรูปที่ 4.10ก และ 4.10ข ซึ่งคือภาพตัดของโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเรียบและแบบผิวเว้านูนที่ระดับความสูง 38.88 มิลลิเมตรแสดงความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในลักษณะรูปร่างของโหมดสนามไฟฟ้าของตู้ไมโครเวฟแบบผนังผิวเรียบและผิวเว้านูน อย่างไรก็ตามความเข้มของโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเว้านูนมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 35,000 โวลต์ต่อเมตร ซึ่งมีความมากกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุดของตู้ไมโครเวฟแบบผิวเรียบที่มีค่าเท่ากับ 12,000 โวลต์ต่อเมตร



(ก)

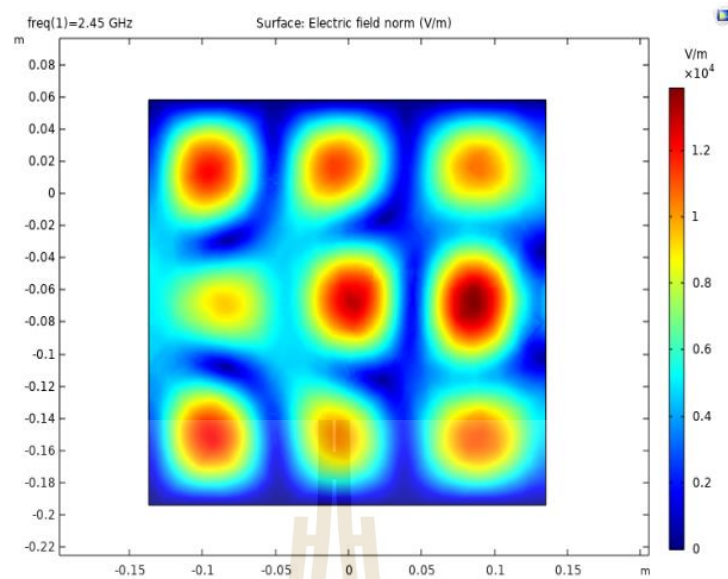
รูปที่ 4.9 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าในห้องผิวเรียบ (ข) โหมดสนามไฟฟ้าในห้องผิวเว้านูน



(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าในห้องผิวเรียบ (ข) โหมดสนามไฟฟ้าในห้องผิวเว้านูน (ต่อ)

ในทำนองเดียวกันผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ทดสอบของตู้ไมโครเวฟแบบผิวเว้านูนและผิวเรียบยังแสดงให้เห็นความแตกต่างของการกระจายระดับอุณหภูมิของน้ำดังรูปที่ 4.11ก และ 4.11ข ซึ่งรูปแบบการกระจายระดับอุณหภูมิของน้ำในแต่ละตู้ไมโครเวฟนั้นสอดคล้องตามตำแหน่งการเกิดโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าโดยระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของโหมดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.12ก และ 4.12ข โดยค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของน้ำในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเว้านูนมีค่าประมาณ 60 และ 30 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของน้ำในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเรียบมีค่าเท่ากับ 80 และ 30 องศาเซลเซียส



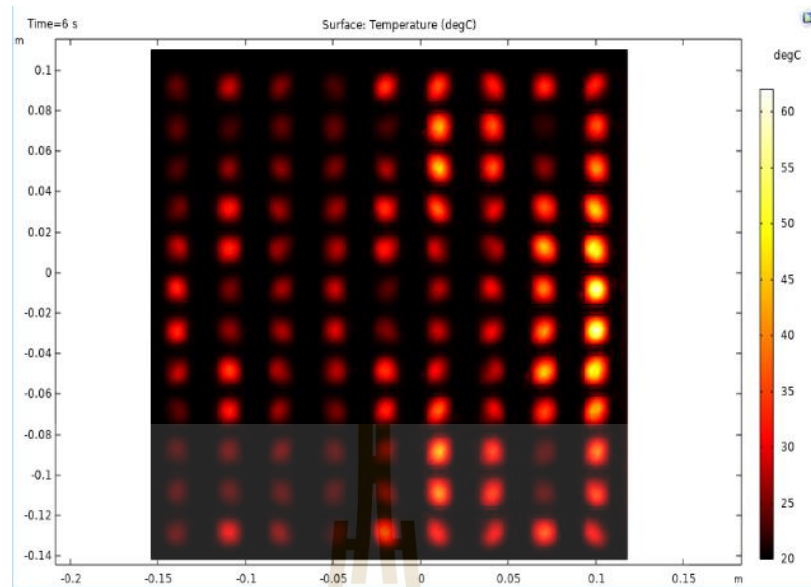
(ก)



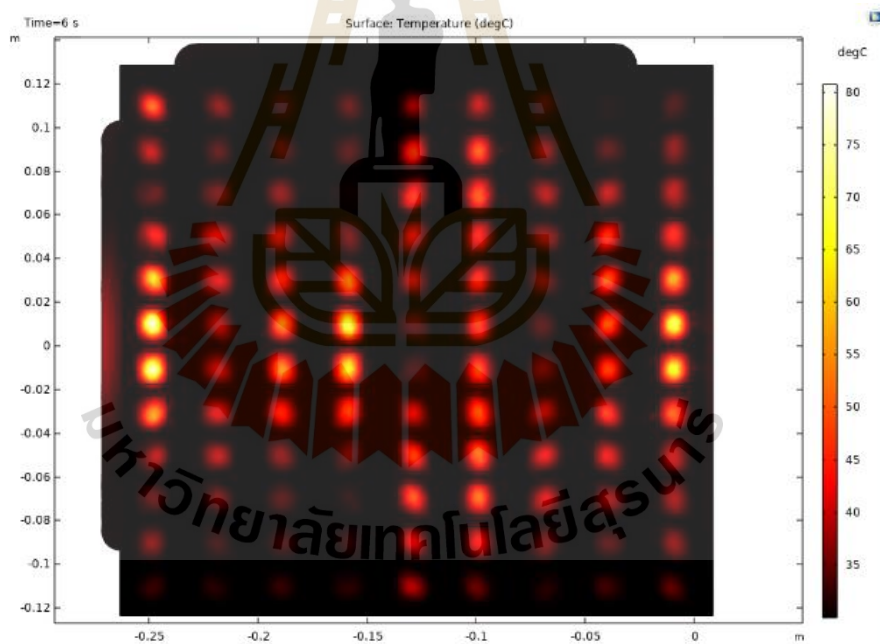
(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้มือเรียบที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรในสถานะไม่มีโหลด

(ข) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้มือเว้าในที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร ในสถานะไม่มีโหลด

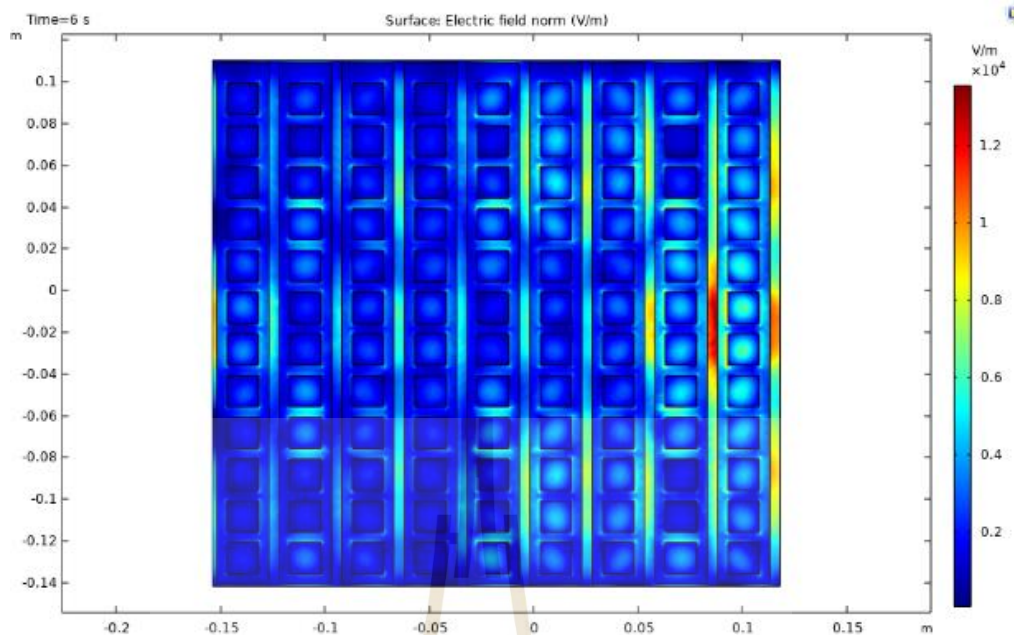


(ก)

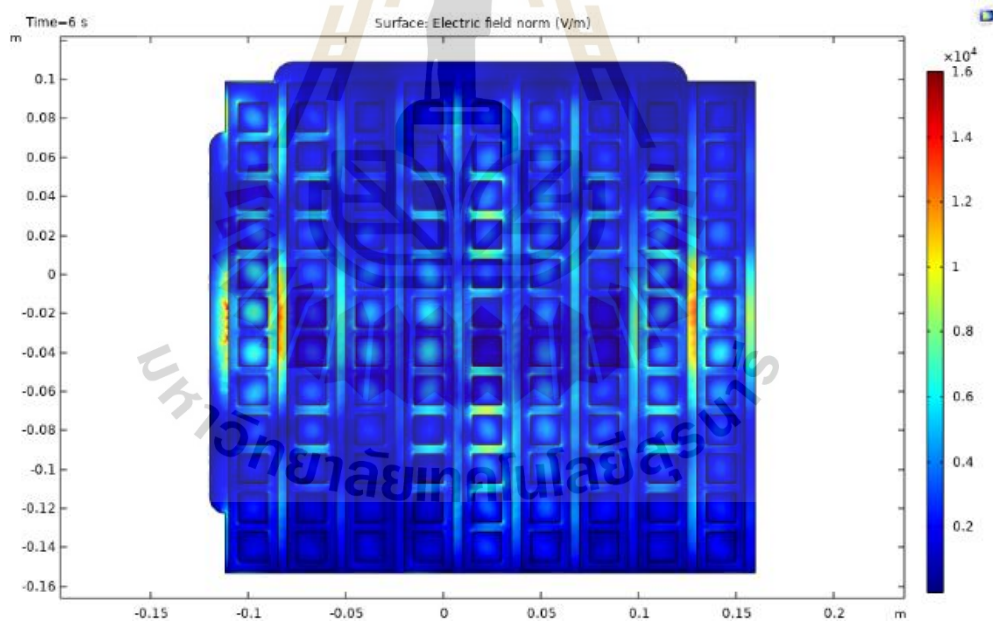


(ข)

รูปที่ 4.11 ผลการจำลอง (ก) การกระจายระดับอุณหภูมิของตู้ผิวเรียบที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร (ข) การกระจายระดับอุณหภูมิของตู้ผิวเว้านูนที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร



(ก)

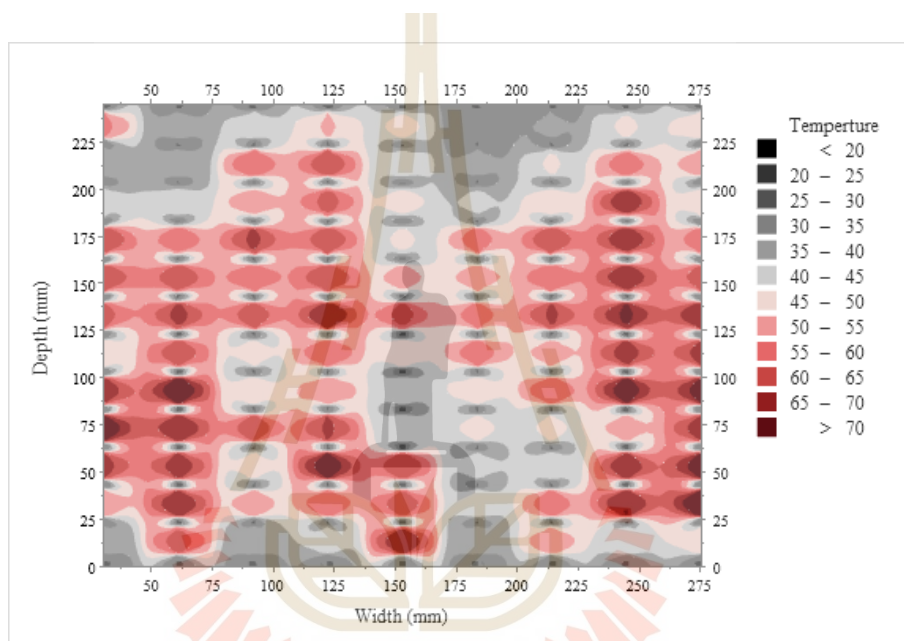


(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) โหมดสนามไฟฟ้าของตู้ฉนวนเรียงที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรในสภาวะโหลด (ข)
โหมดสนามไฟฟ้าของตู้ฉนวนเรียงที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตรในสภาวะโหลด

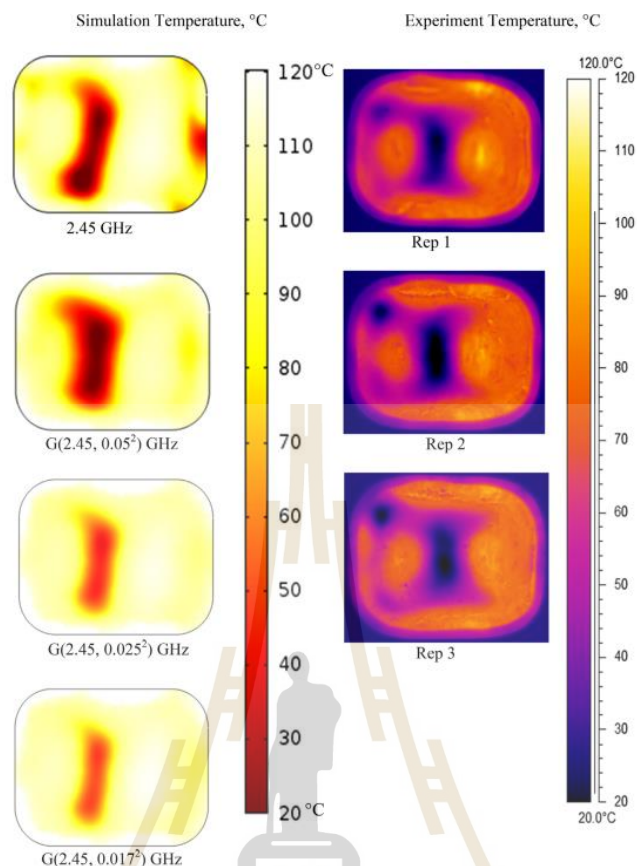
เพื่อความถูกต้องของผลการจำลองการกระจายระดับอุณหภูมิ ค่าที่บันทึกได้จากการทดลอง ได้ถูกนำมาสร้างกราฟพื้นที่แบบ Contour ขึ้นซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผล

การจำลองอุณหภูมิน้ำของตู้ทั้งสองแบบพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองการกระจายระดับอุณหภูมิของน้ำในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเว้านูนโดยอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองนั้นมีช่วงระดับอุณหภูมิที่ 55 ถึง 80 องศาเซลเซียส ตำแหน่งที่เกิดอยู่บริเวณทางออกของท่อน้ำคลื่น ตรงกลางบริเวณบนสุดล่างสุด และทางซ้ายบริเวณตรงกลางของห้อง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีความคล้ายกันในการไล่ระดับความเข้มของอุณหภูมิแต่ก็มีความแตกต่างกันของค่าตัวเลขอุณหภูมิของน้ำโดยค่าอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุดของการทดลองจะอยู่ที่ประมาณ 70 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่าอุณหภูมิมากที่สุดและต่ำสุดของผลการจำลองมีค่าเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส



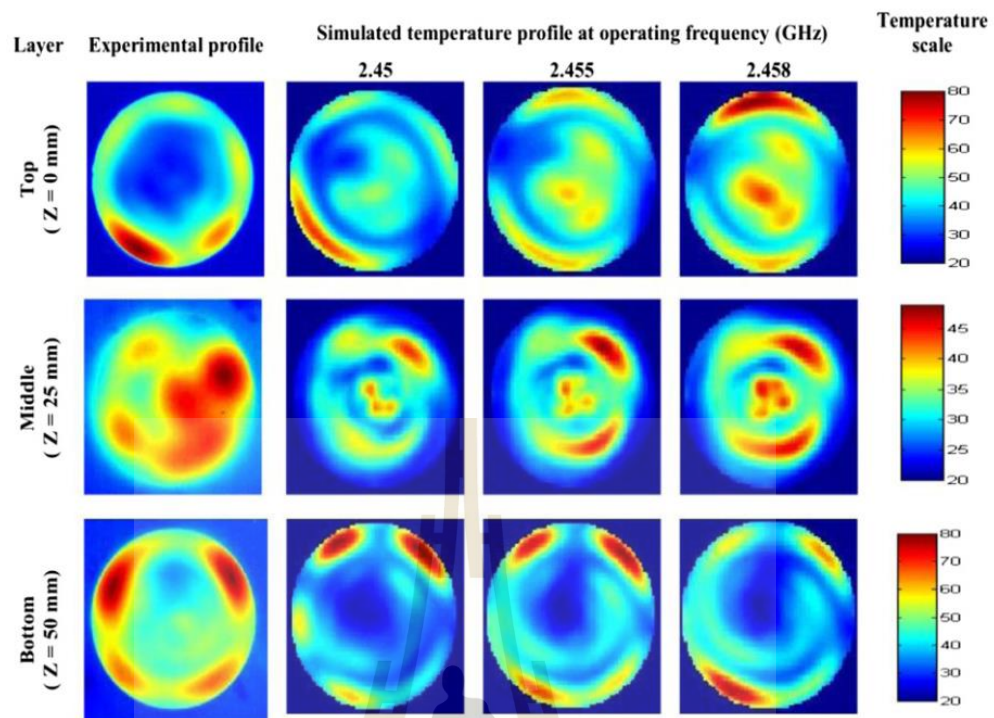
รูปที่ 4.13 ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองที่ระดับความสูง 38.50 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองและการจำลองจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งเดียวกันค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองและจากการทดลองมีความแตกต่างกัน ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้คล้ายกับงานวิจัยของ K.Pitchai et al .,(2018) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าการกระจายความถี่ของไมโครเวฟของเกาซ์เซียนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิของตัวกลางในมันฝรั่งบดที่อยู่บนถาด โดยทำการจำลองผ่านโปรแกรม COMSOL และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ของไมโครเวฟมีผลต่อรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของมันฝรั่งบดที่ได้จากการจำลอง อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของมันฝรั่งบดที่ได้จากการทดลองยังมีความแตกต่างในเรื่องของระดับอุณหภูมิและตำแหน่งจุดร้อนและจุดเย็นสุด ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.14 ความถี่ของไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการทำความร้อนบนมันฝรั่งจากการจำลอง
 เทียบกับการทดลอง
 ที่มา: K.Pitchai et al.,(2018)

และสอดคล้องกับงานวิจัยการทำความร้อนในแผ่นเจลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟโดยศึกษารูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของแผ่นเจลในการทดลองเปรียบเทียบกับจำลองรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของแผ่นเจลด้วยคอมพิวเตอร์ (K.Pitchai et al.,2018) ซึ่งพบว่าค่า RSME มีค่า 0.53 ถึง 4.52 องศาเซลเซียส และรูปแบบการกระจายอุณหภูมิของการทดลองยังมีความแตกต่างกับรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิในการจำลองดังรูปที่ 4.24



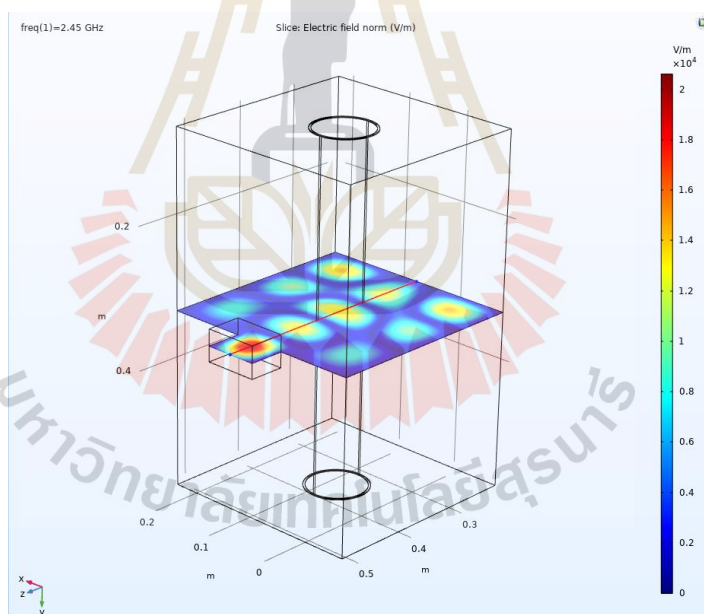
รูปที่ 4.15 ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของไมโครเวฟส่งผลต่อรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิในแผ่นเจล

จากการเปรียบเทียบผลของการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดจุดร้อนสุด เย็นสุดและรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของตัวกลาง คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ดังที่ K.Pitchai และคณะได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ และสำหรับงานวิจัยนี้พบว่ารูปร่างของห้องก็ส่งผลต่อรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของตัวกลาง การเกิดจุดร้อนสุดจุดเย็นสุดด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเกิด โหมดคลื่นไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต่างกันซึ่งทำให้เกิดรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันอีกด้วย ผลการจำลองยังชี้ให้เห็นอีกว่าระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ นั้นสอดคล้องไปตามระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองนั้นยังมีความแตกต่างจากผลของการจำลองอยู่บ้างทั้งระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นถึงแม้ว่าการจำลองรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของน้ำในตู้ไมโครเวฟแบบผิวเว้าจะช่วยให้รูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของน้ำคล้ายผลที่ได้จากการทดลองก็ตาม ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการกำหนดคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวกลางที่เป็นค่าคงที่ซึ่งในความเป็นจริงแล้วควรจะเป็นค่าที่แปรผันตามอุณหภูมิหรือความชื้นซึ่งจะทราบค่าได้จากการทดลองเท่านั้น ดังนั้นรูปร่างของห้องที่ใช้จำลองส่งผลต่อการเกิดโหมดและขนาดของสนามไฟฟ้าและส่งผลถึงรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิ ผลของการศึกษาครั้งนี้ถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบห้องอบแห้งซึ่งจะกล่าวต่อไป

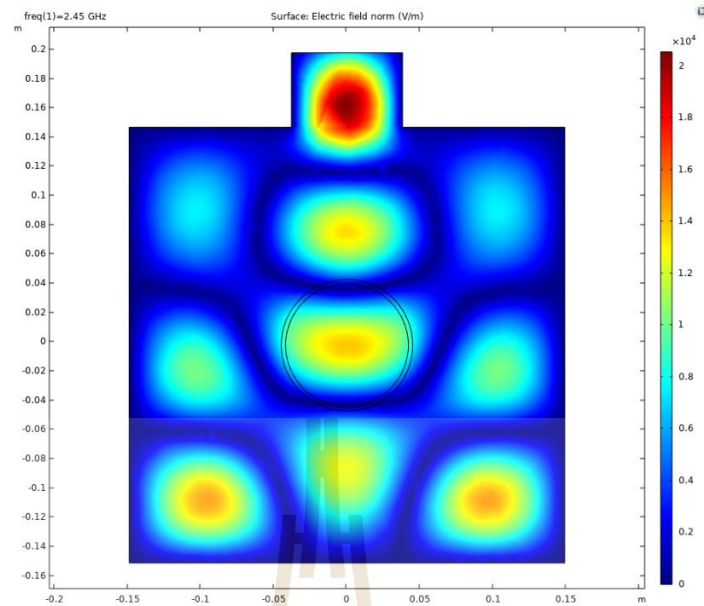
4.4 การออกแบบและการจำลองสำหรับห้องลดความชื้นของข้าวเปลือก

บทวิเคราะห์ที่ก่อนหน้านี้ทำให้ทราบว่ารูปร่างของห้องส่งผลต่อการเกิดโหมดคลื่นสนามไฟฟ้า ในเรื่องตำแหน่งการเกิดและขนาดของสนามไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลของความเข้มของโหมดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรูปทรงต่าง ๆ

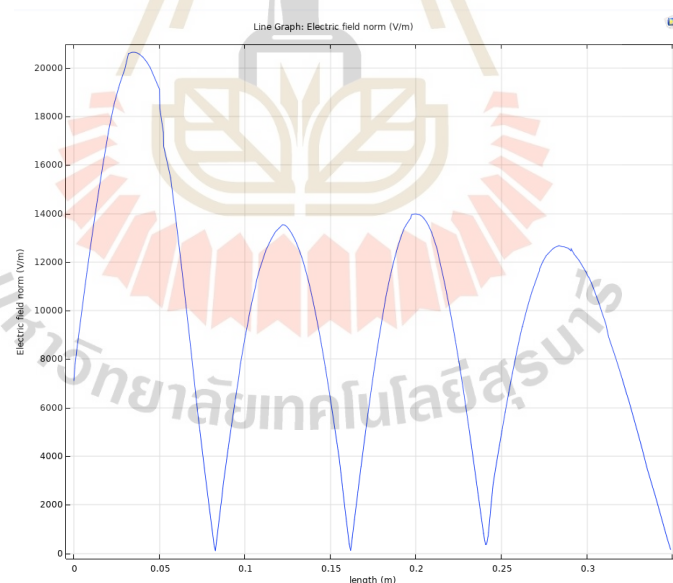
รูปทรงแรกที่จะทำการวิเคราะห์คือรูปทรงสี่เหลี่ยม ตามรูปที่ 4.16k ซึ่งเป็นภาพรวมพื้นที่ โหมดสนามไฟฟ้าที่ระดับความสูง 0.25 เมตร เส้นสีแดงที่ลากผ่านคือความเข้มของสนามไฟฟ้าตามระยะห่างจากท่อนำคลื่นและถูกนำมาสร้างเป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าเทียบกับระยะทางที่วัดจากท่อนำคลื่นไปถึงผนังห้องด้านตรงกันข้าม ซึ่งตำแหน่งของโหมดคลื่นและระดับความเข้มของโหมดคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 4.16ค ซึ่งมีโหมดคลื่นทั้งหมดจำนวน 9 โหมด โดยโหมดที่มีความเข้มสูงสุดจะมีสองโหมดอยู่ที่บริเวณตำแหน่งแกนนอนเท่ากับ -0.1 เมตร แกนตั้งเท่ากับ -0.12 เมตร มีความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 14,000 โวลต์ต่อเมตร และบริเวณตำแหน่งแกนนอนเท่ากับ 0.1 เมตร แกนตั้งเท่ากับ -0.12 เมตร มีความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 14,000 โวลต์ต่อเมตรเช่นกัน



รูปที่ 4.16ก พื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับ 0.25 เมตรและการวัดสนามไฟฟ้าเชิงเส้น(เส้นสีแดง) ของรูปทรงสี่เหลี่ยม



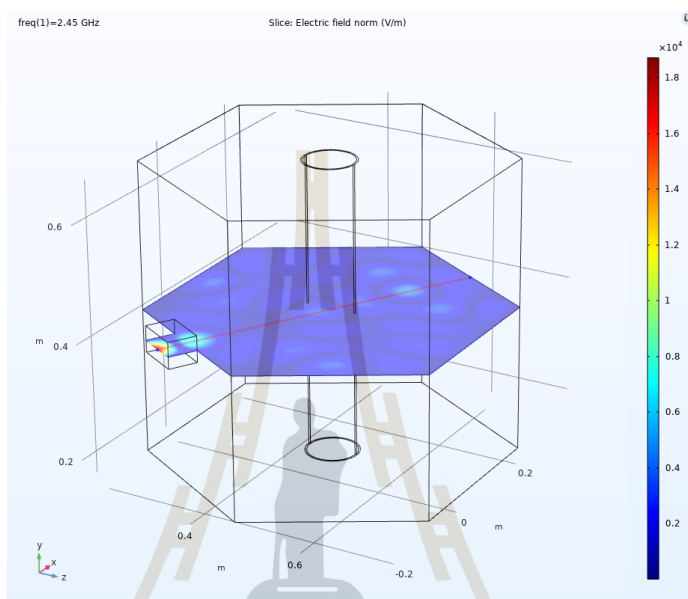
รูปที่ 4.16ข รายละเอียดพื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงพื้นที่ระดับความสูง 0.25 เมตร ของรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.16ค รายละเอียดความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ระดับ 0.25 เมตร ตามเส้นสีแดงในรูปที่ 4.1ก ของรูปทรงสี่เหลี่ยม

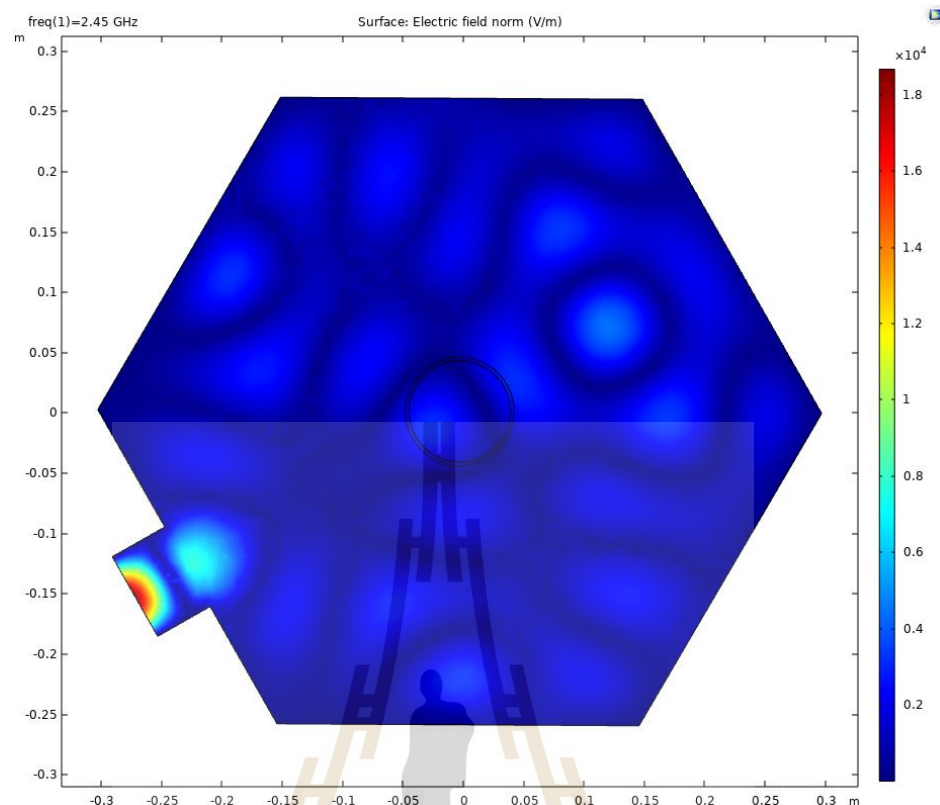
โหมดคลื่นสนามไฟฟ้าของรูปทรงหกเหลี่ยมที่ระดับความสูง 0.25 เมตรแสดงดังรูปที่ 4.17ก ซึ่งตำแหน่งของโหมดคลื่นและระดับความเข้มของโหมดคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 4.17ข ซึ่งโดยโหมดคลื่นที่ความเข้มสูงสุดจะมีหนึ่งโหมดอยู่ที่บริเวณตำแหน่งแนวนอนเท่ากับ 0.125 เมตร แนวตั้งเท่ากับ

0.05 เมตร มีความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 4,000 โวลต์ต่อเมตร จากรูปที่ 4.17ค ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการลากเส้นสีแดงเทียบกับระยะที่ลากผ่านซึ่งพบว่าที่ระยะ 0.25 ถึง 0.3 เมตร หรือตำแหน่งที่จะใช้ทดสอบข้าวเปลือกมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 3,000 โวลต์ต่อเมตร



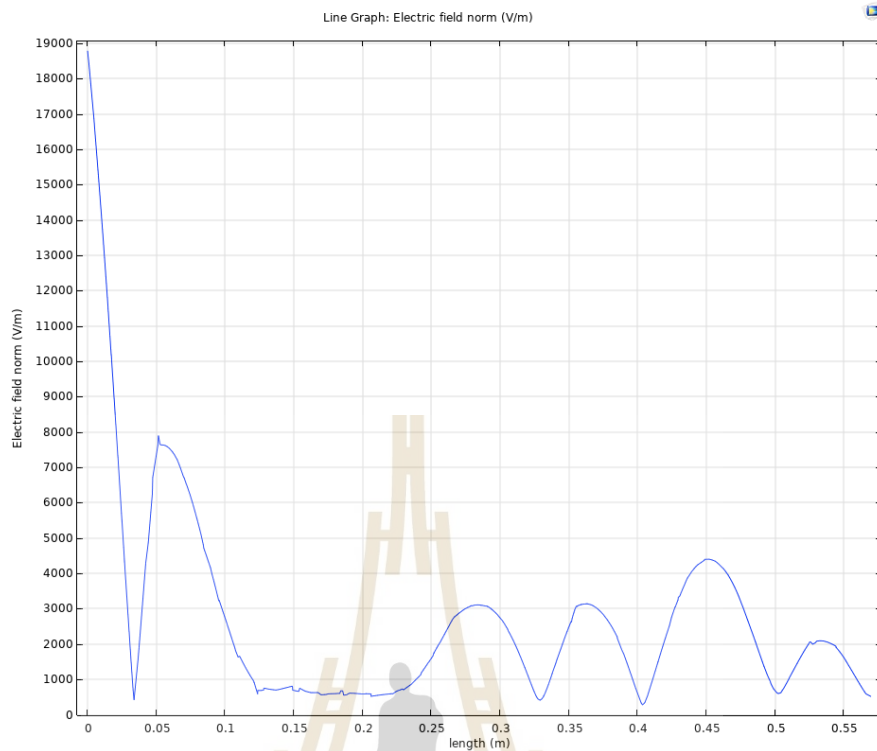
รูปที่ 4.17ก พื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับ 0.25 เมตรและการวัดสนามไฟฟ้าเชิงเส้น(เส้นสีแดง) ของรูปทรงหกเหลี่ยม

โหมดคลื่นสนามไฟฟ้าของรูปทรงสามเหลี่ยมลบมุมที่ระดับความสูง 0.25 เมตรแสดงดังรูปที่ 4.18ก ซึ่งตำแหน่งของโหมดคลื่นและระดับความเข้มของโหมดคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 4.18ข ซึ่งโดยโหมดคลื่นที่ความเข้มสุดจะมีหนึ่งโหมดอยู่ที่บริเวณตำแหน่งแนวนอนเท่ากับ 0.15 เมตร แนวตั้งเท่ากับ 0 เมตร มีความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 24,000 โวลต์ต่อเมตร จากรูปที่ 4.18ค ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการลากเส้นสีแดงเทียบกับระยะที่ลากผ่านซึ่งพบว่าที่ระยะ 0.15 ถึง 0.2 เมตร หรือตำแหน่งที่จะใช้ทดสอบข้าวเปลือกมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 14,000 โวลต์ต่อเมตร



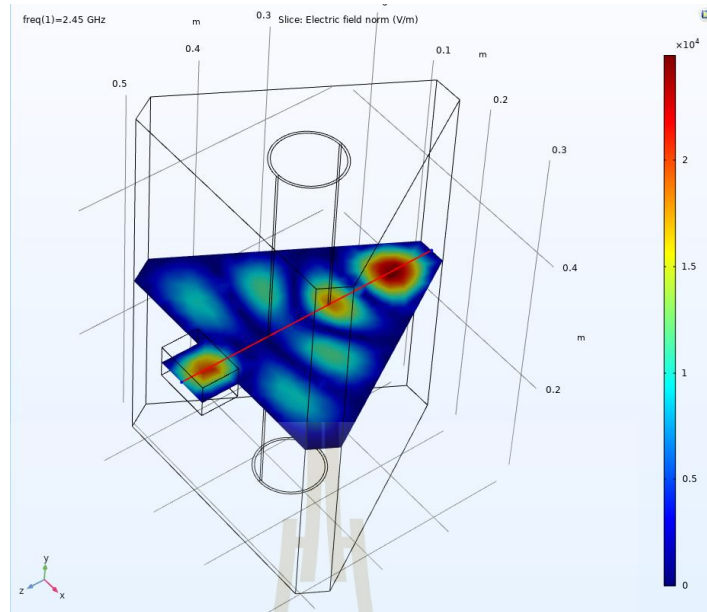
รูปที่ 4.17x รายละเอียดพื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงพื้นที่ระดับความสูง 0.25 เมตร ของรูปทรงหกเหลี่ยม

จากการอภิปรายผลข้างต้นกับผลการจำลองโหมดสนามไฟฟ้าในหัวข้อการศึกษาพฤติกรรม การเกิดโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าและรูปแบบการไล่ระดับอุณหภูมิของภายในตู้ไมโครเวฟแบบ คริวเรื่อนั้นจะเห็นได้ว่ารูปทรงและขนาดของห้องมีผลต่อขนาดและตำแหน่งของโหมดสนามไฟฟ้าที่ เกิดขึ้น โดยรูปทรงจะส่งผลต่อตำแหน่งการเกิดโหมดสนามไฟฟ้ารวมถึงจำนวนของเหลี่ยมมุมจะเป็น ตัวกำหนดจำนวนโหมดที่เกิดขึ้นกล่าวคือหากปริมาตรของห้องมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดโหมดสนามไฟฟ้า จำนวนมาก แต่แต่ละโหมดจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ตัวอย่างเช่นรูปทรงห้องแบบหก เหลี่ยมซึ่งมีจำนวนโหมดค่อนข้างมากแต่ความเข้มของสนามไฟฟ้านั้นมีค่าลดลง ในทางกลับกันหาก ปริมาตรห้องขนาดเล็กกว่าจะเกิดโหมดปริมาณที่น้อยแต่จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่า

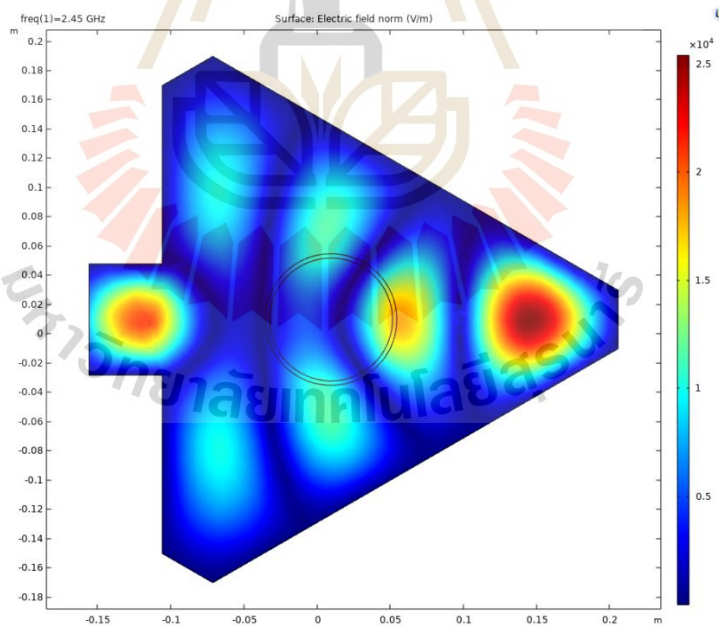


รูปที่ 4.17ค รายละเอียดความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ระดับ 0.25 เมตร ตามเส้นสีแดงในรูปที่ 4.17ก ของรูปทรงหกเหลี่ยม

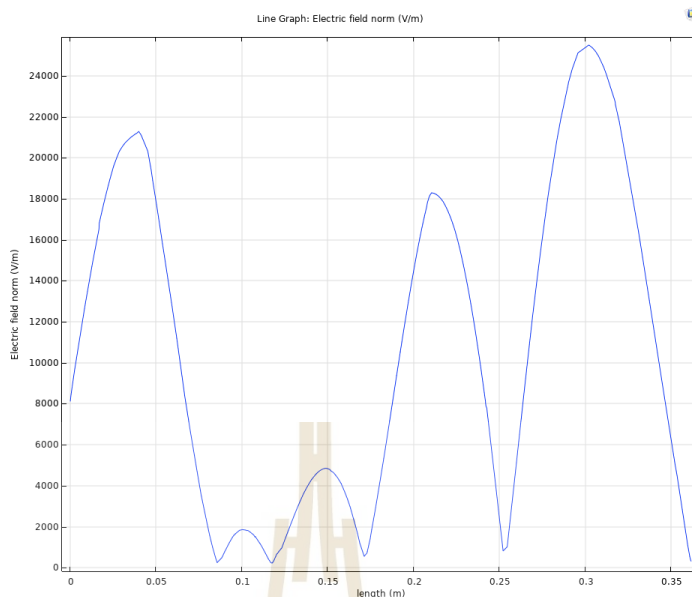
อย่างไรก็ตามกรณีห้องรูปทรงกระบอกซึ่งมีความใหญ่ปริมาตรใกล้เคียงกับห้องหกเหลี่ยมแต่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณตรงกลางของห้องนั้นเกิดการสะท้อนและซ้อนทับกันเป็นคลื่นสั้นพ้องซึ่งแสดงว่ารูปทรงนั้นมีผลต่อการหักล้างและซ้อนทับกันของคลื่นดังนั้น ขนาดของปริมาตรเป็นตัวแปรหนึ่งในการกำหนดขนาดและตำแหน่งของโหมดและรูปทรงของห้องเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถกำหนดการซ้อนทับของคลื่นได้



รูปที่ 4.18ก พื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระดับ 0.25 เมตรและการวัดสนามไฟฟ้าเชิงเส้น(เส้นสีแดง) ของรูปทรงสามเหลี่ยมลบมุม



รูปที่ 4.18ข รายละเอียดพื้นที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงพื้นที่ระดับความสูง 0.25 เมตร ของรูปทรงสามเหลี่ยมลบมุม



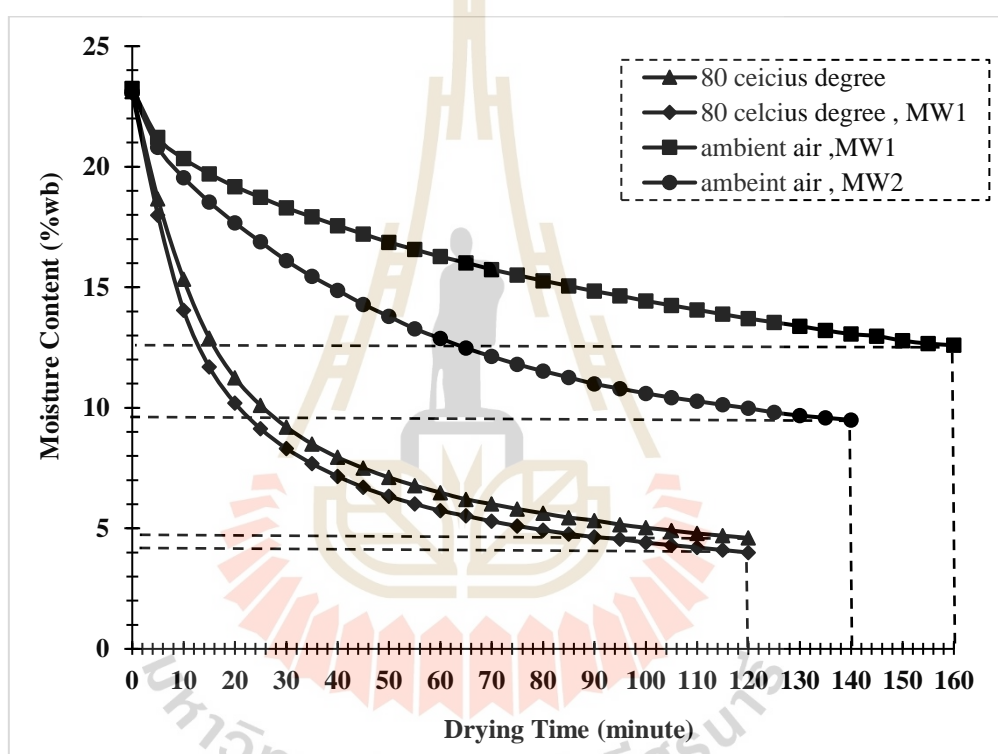
รูปที่ 4.18ค รายละเอียดความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเชิงเส้นที่ระดับ 0.25 เมตร ตามเส้นสีแดงในรูปที่

การเลือกรูปทรงห้องอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นต้องการความเข้มของโหมตสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการซ้อนทับมากที่สุดซึ่งรูปทรงสามเหลี่ยมมีปริมาตรห้องที่น้อยกว่ารูปทรงอื่นๆและมีเหลี่ยมมุมน้อยที่สุด คลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นการที่สามารถทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่นน้อยที่สุดนั่นหมายความว่าคลื่นที่สะท้อนมาจากผนังจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการสั่นของสารไดอิเล็กทริกเข้าไปซ้ำมาจนกว่าคลื่นสนามไฟฟ้าจะถูกจับจากตัวกลางจนหมด ในความเป็นจริงคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบแห้งนั้นมีการเคลื่อนที่จาก ท่อนำคลื่นตลอดเวลาและทุกครั้งก็จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีสารไดอิเล็กทริกและเกิดความร้อนขึ้นตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ประกอบกับรูปทรงสามเหลี่ยมแบบลบมุมยังไม่เคยถูกนำไปใช้ในการออกแบบห้องอบแห้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำห้องรูปทรงสามเหลี่ยมมาประยุกต์ใช้ออกแบบเป็นห้องอบแห้ง ซึ่งจะได้นำเสนอผลการทดสอบอบแห้งด้วยห้องอบแห้งรูปทรงสามเหลี่ยมในหัวข้อถัดไป

4.5 พฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกโดยอากาศร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

เนื้อหาในส่วนพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกโดยอากาศร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ จะประกอบไปด้วย พฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 ในเงื่อนไขและขอบเขตต่าง ๆ การวิเคราะห์ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก อัตราส่วนของความชื้น อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก อุณหภูมิผิวของข้าวเปลือก การคำนวณเปลืองพลังงานจำเพาะ ปริมาณข้าวต้น ดัชนีความขาว และ อิทธิพลของวิธีการอบแห้งที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

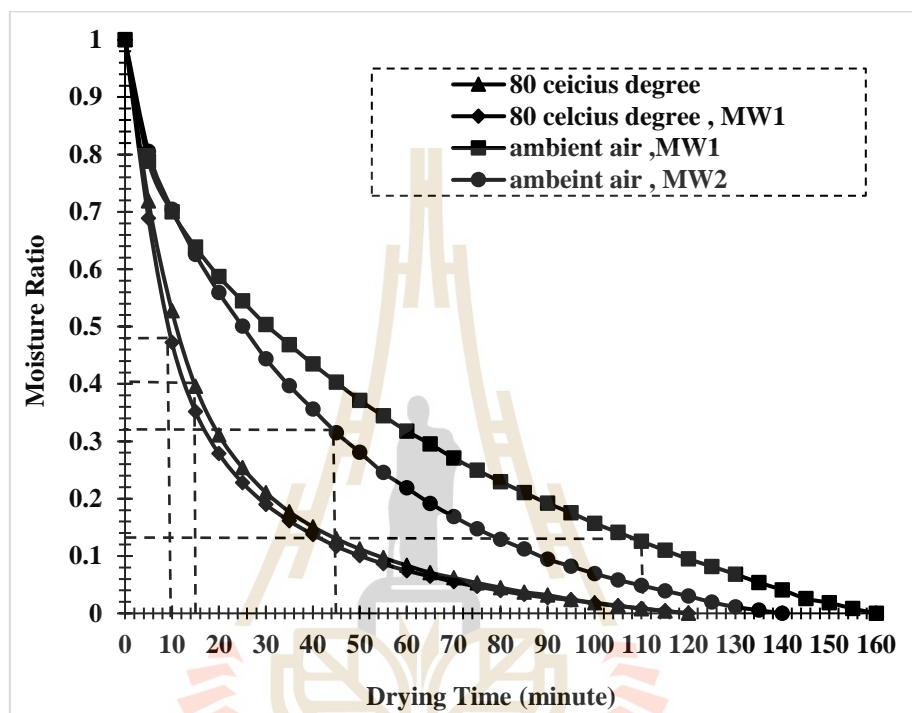
4.5.1 ความชื้นของข้าวเปลือกและอัตราส่วนของความชื้น



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ความชื้นข้าวเปลือกกับเวลาที่ใช้อบแห้ง

ความชื้นของข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับความสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขขอบเขตในการอบแห้งข้าวเปลือก ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงความชื้นของข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขของการอบแห้ง การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน 80 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาประมาณ 120 นาทีจนความชื้นของข้าวเปลือกเข้าสู่ความชื้นสมดุลประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก ในทำนองเดียวกันการใช้อากาศร้อน 80 องศาเซลเซียสควบคู่ไปกับการใช้ไมโครเวฟขนาด 160 วัตต์ จะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกเข้าสู่ความชื้นสมดุลที่ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลา 120 นาทีเช่นเดียวกับกับการใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว นอกเหนือไปจากนั้นการใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งขนาด 160 วัตต์ ร่วมกับอากาศ

สภาพแวดล้อมจะทำให้ความชื้นเข้าสู่สมดุลประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่เวลา 160 นาที ในทำนองเดียวกันการใช้ไมโครเวฟระดับสองขนาด 320 วัตต์ ร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกเข้าสู่สภาวะความชื้นสมดุลประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียก ที่เวลา 140 นาที



รูปที่ 4.20 อัตราส่วนความชื้นบนเงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ เทียบกับเวลาที่ใช้อบแห้ง

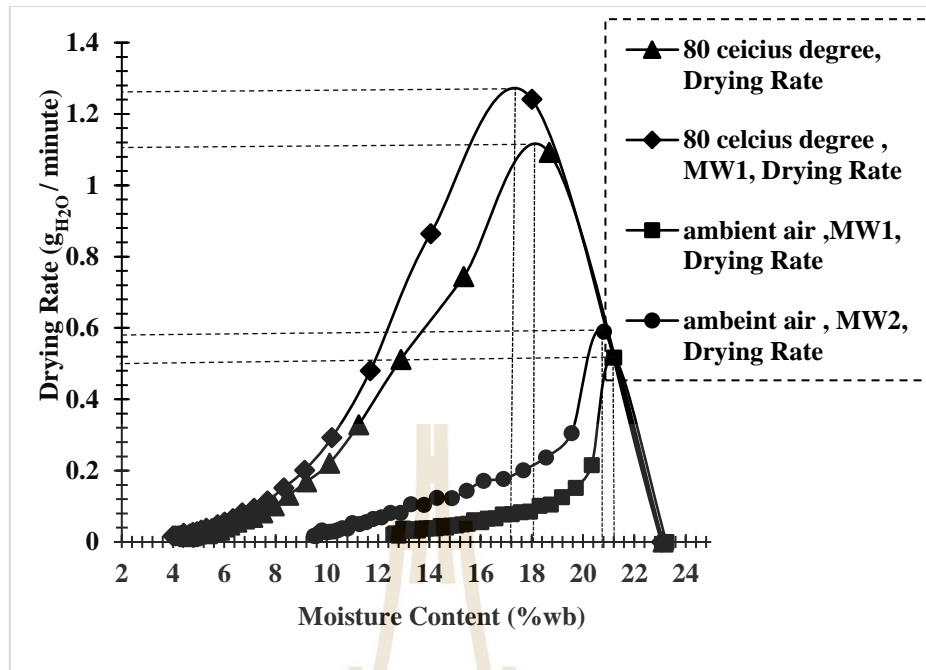
สิ่งที่น่าสังเกตจากรูปที่ 4.19 ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกของการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกที่ใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งนั้นค่าความชื้นสมดุลแตกต่างกันน้อยมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าใช้อากาศร้อนในการอบแห้งวัสดุอาจไม่จำเป็นต้องใช้ไมโครเวฟเพิ่มเนื่องจากประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามการใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมเทียบกับการใช้ไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมนั้นค่าความชื้นสมดุลแตกต่างกันค่อนข้างมาก

ต่อเนื่องจากการวิเคราะห์ความชื้นสมดุล จากรูปที่ 4.20 คืออัตราส่วนความชื้นบนเงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาที่ความชื้นประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก การใช้อากาศร้อน 80 องศาเซลเซียส ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกเข้าสู่ 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่เวลาประมาณ 15 นาที ที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.48 ในทำนองเดียวกันใช้อากาศร้อน 80 องศา

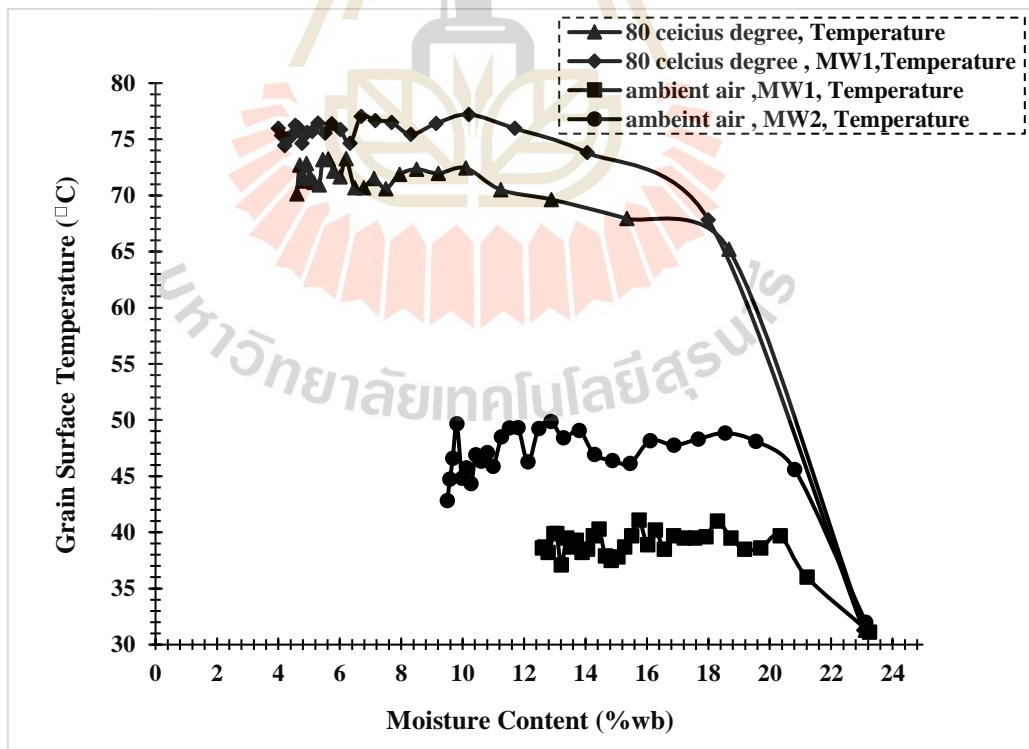
เซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งทำให้ความชื้นข้าวเปลือกเข้าสู่ 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่เวลาประมาณ 10 นาที ที่อัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.4 ส่วนการใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมจะใช้เวลาประมาณ 110 นาที จึงได้ความชื้นของข้าวเปลือกเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่อัตราส่วนความชื้น 0.125 สุดท้ายการใช้ไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมจะใช้เวลาประมาณ 45 นาที จึงได้ความชื้นของข้าวเปลือกเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่อัตราส่วนความชื้น 0.32

4.5.2 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกกับอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือก

เพื่อขยายความจากการอภิปรายข้างต้นพิจารณารูปที่ 4.21 อัตราการอบแห้งของวัสดุค่อนข้างจะเป็นไปตามทฤษฎีในเรื่องของพฤติกรรมการอบแห้งคือมีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและอัตราการอบแห้งลดลงโดยอัตราการอบแห้งสูงสุดของแต่ละวิธีการของการอบแห้งนำมาเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งมีค่าเท่ากับ 1.25 กรัม น้ำต่อนาที การอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าเท่ากับ 1.11 กรัม น้ำต่อนาที การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 0.575 กรัม น้ำต่อนาที และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 0.525 กรัม น้ำต่อนาที สังเกตว่าช่วงแรกของการอบแห้งนั้นอัตราการอบแห้งนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยให้การอบแห้งดำเนินต่อไปความชื้นจะดำเนินมาถึงจุดความชื้นวิกฤตในที่นี้คือจุดยอดของเส้นกราฟหากการอบแห้งยังดำเนินต่อไปจะเข้าสู่ระยะอัตราการอบแห้งลดลงซึ่งจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าใกล้อัตราการอบแห้งเป็น 0 กรัม น้ำต่อนาที อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับพลังงานที่ข้าวเปลือกได้รับ กล่าวคืออัตราการอบแห้งของอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งซึ่งทำให้น้ำออกจากข้าวเปลือกอย่างรวดเร็วในทางตรงกันข้ามข้าวเปลือกที่ได้รับพลังงานจากไมโครเวฟอย่างเดียวจะมีอัตราการอบแห้งที่น้อยกว่าเนื่องจากได้รับพลังงานน้อยกว่า ข้อสังเกตก่อนที่การอบแห้งจะดำเนินมาถึงจุดความชื้นวิกฤตนั้นตามทฤษฎีจะต้องมีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่แต่เนื่องจากการทดลองนั้นแบ่งช่วงเวลาที่ละ 5 นาที ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถอธิบายการลดลงความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาการอบแห้ง (รูปที่ 4.19) กล่าวคือในช่วงแรกของการอบแห้งอัตราการอบแห้งยังมีค่าสูง ความชื้นของข้าวเปลือกจะมีอัตราลดลงอย่างรวดเร็วผ่านจุดความชื้นวิกฤต จากนั้นอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลงและความชื้นในข้าวเปลือกจะยังคงลดลงเรื่อย ๆ แต่ลดลงในอัตราที่ช้ากว่าในช่วงแรก



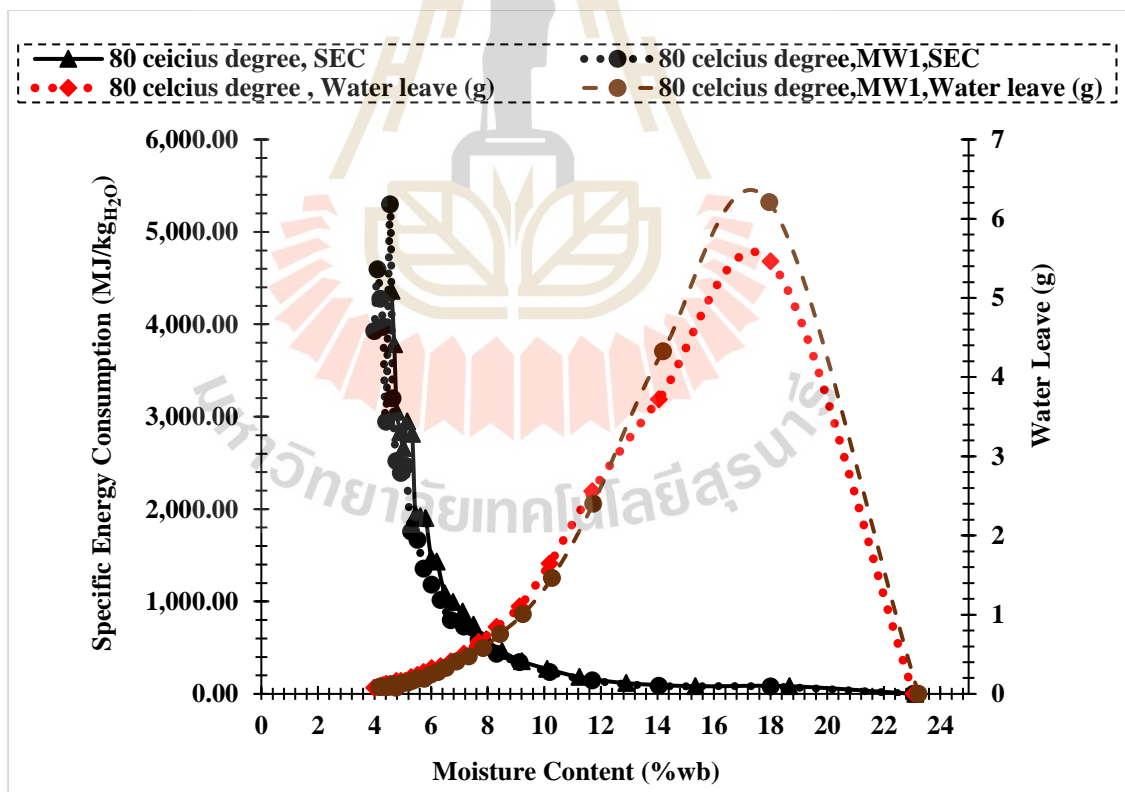
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์อุณหภูมิผิวเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก

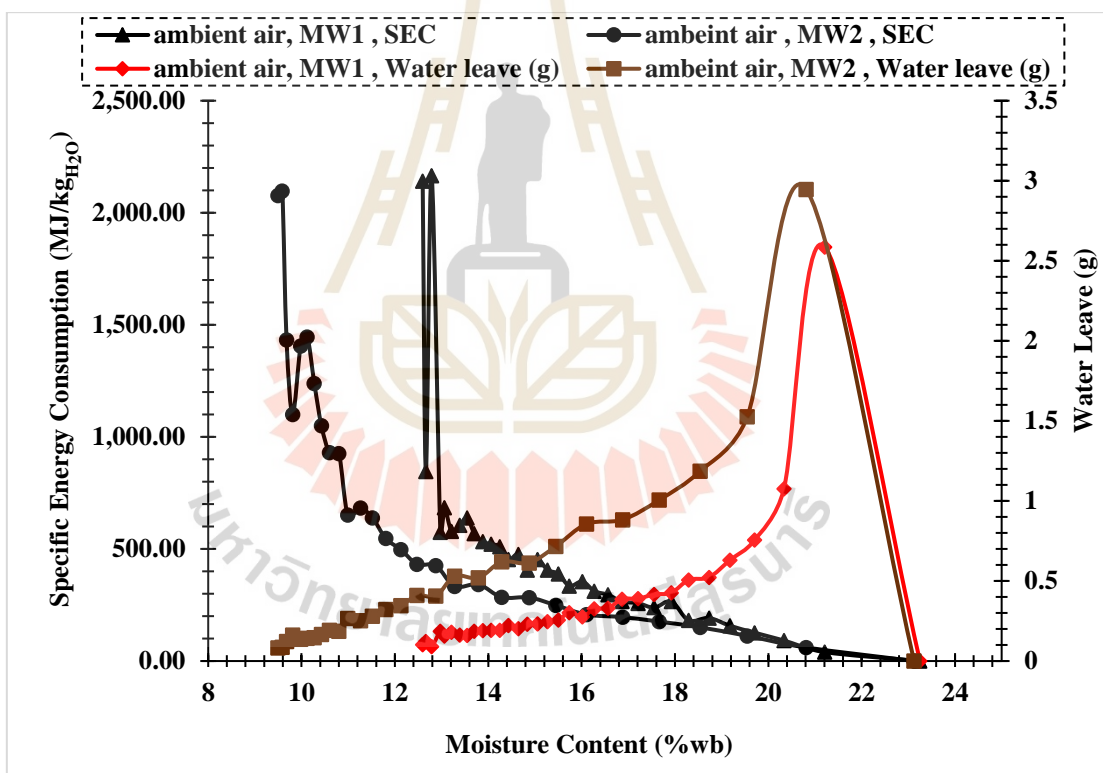
การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกตามเวลาการอบแห้งและพฤติกรรมของ อัตราการอบแห้งสามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 4.22 อุณหภูมิของข้าวเปลือกจะขึ้นอยู่กับลักษณะการอบแห้งเป็นหลัก การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งจะได้อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 75-80 องศาเซลเซียส รองลงมาคือการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวจะได้อุณหภูมิของข้าวเปลือกเท่ากับ 70-75 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมจะได้อุณหภูมิของข้าวเปลือกเท่ากับ 40-50 องศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมจะได้อุณหภูมิของข้าวเปลือกเท่ากับ 35-40 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสอดคล้องไปตามกับ อัตราการอบแห้งกล่าวคือเมื่อข้าวเปลือกได้รับพลังงานจากเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่าง ๆ อุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นตามค่าพลังงานนั้น ๆ อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นก็จะสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเปลือกดังรูปที่ 4.21

4.5.3 ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับปริมาณน้ำที่ระเหยได้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณการระเหยน้ำเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก

จากรูปที่ 4.23ก และ 4.23ข จากการพิจารณาพบว่าช่วงแรกของการอบแห้งค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะมีค่าต่ำจนเมื่อปล่อยให้การอบแห้งดำเนินต่อไปค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นมีการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นเพิ่มแบบทวีคูณ ค่าการสูญเสียน้ำในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นจะมีค่าสูงจนเมื่อผ่านความชื้นวิกฤตค่าการสูญเสียน้ำจะเริ่มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สิ่งที่เกิดขึ้นได้คือค่าการสูญเสียน้ำนั้นแปรผกผันกับค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกล่าวคือหากการอบแห้งสามารถลดความชื้นได้มากค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะมีค่าต่ำหรือมีความคุ้มค่าต่อพลังงานที่ใช้ในทางตรงกันข้ามหากลดความชื้นได้น้อยการค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะมีค่าสูงมากหรือเอาน้ำออกมาได้ยากมากนั่นเอง ปรากฏการณ์การแปรผกผันนี้อาจมีสาเหตุมาจากความยากของการนำน้ำภายในวัสดุออกจากภายในข้าวเปลือกขึ้นสู่ผิวข้าวเปลือกในช่วงท้ายของการอบแห้ง

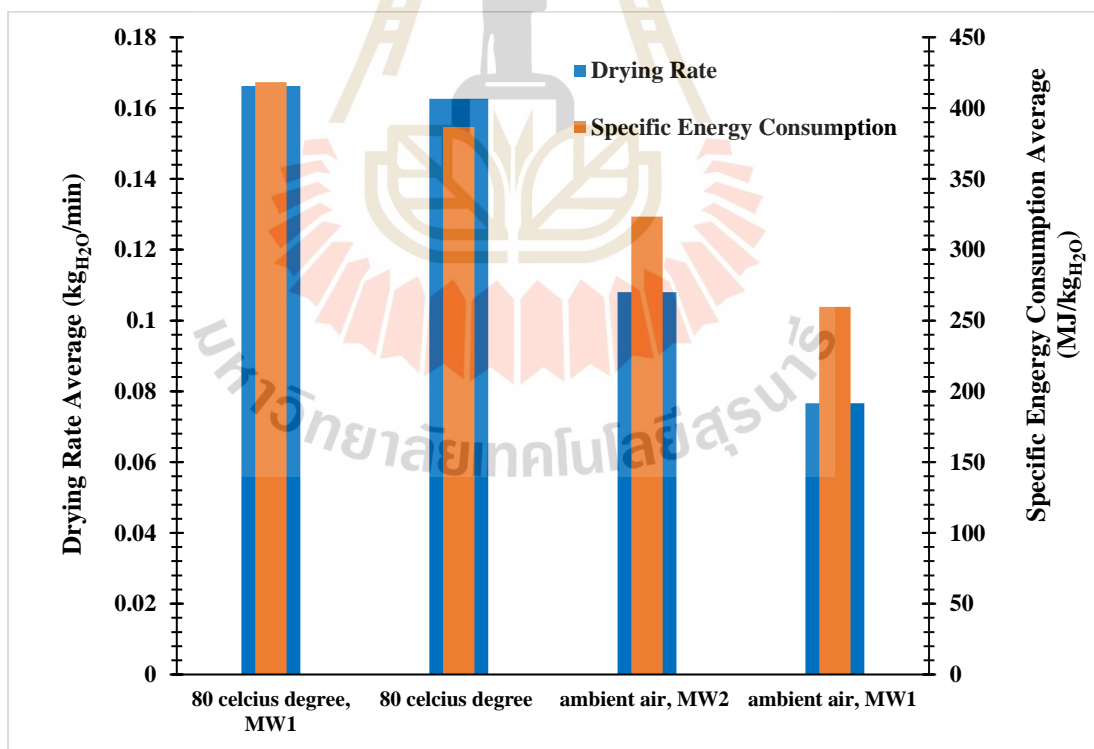


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณน้ำระเหยเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก

โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งหากเป็นการใช้อากาศร้อนปกติเมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับผิวข้าวเปลือกจะเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังผิว ความชื้นที่อยู่บริเวณผิวจะมีการระเหยออกมา

เนื่องจากบริเวณผิวนั้นไม่มีสิ่งกีดขวางทางออกของไอน้ำ หลังจากนั้นการถ่ายเทความร้อนจากผิวจะเข้าสู่เนื้อวัสดุแบบการนำความร้อน จุดนี้ทำให้การขับน้ำออกจากวัสดุทำได้ยากกว่าเนื่องจากวัสดุมีส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างที่เป็นตัวรับความร้อนเหมือนกับความร้อนที่เข้ากัน โครงสร้างที่ว่านี้คือตัวกีดขวางการไหลของไอน้ำ ที่ผิวของวัสดุจะแห้งกว่าภายในวัสดุทำให้รูพรุนของวัสดุหดตัวลงและทำให้น้ำที่อยู่ภายในวัสดุออกมาได้ยาก หากการจ่ายพลังงานเพื่อใช้อบแห้งมีอัตราที่คงที่แต่น้ำที่อยู่ภายในวัสดุนั้นเคลื่อนที่ออกมาได้ยากหรือออกมาได้น้อยจึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วงท้ายของการอบแห้งของรูปที่ 4.23ก และ รูปที่ 4.23ข มีค่าสูงซึ่งไม่ได้เกิดจากการเพิ่มพลังงานเข้ามาเพิ่มขึ้นเพื่อขับน้ำออกมาแต่เกิดจากการน้ำที่ออกมาน้อยลงในขณะที่พลังงานยังเท่าเดิมซึ่งพิสูจน์ได้จากสมการที่ 2.17

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟนั้นยังคล้ายกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในแง่พฤติกรรมของน้ำที่ออกจากวัสดุแต่มีความแตกต่างในเรื่องของลักษณะการทำความร้อนกล่าวคือการทำความร้อนของไมโครเวฟต้องอาศัยปฏิกิริยาการสั่นของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของข้าวเปลือกจนเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งผิวและเนื้อวัสดุ



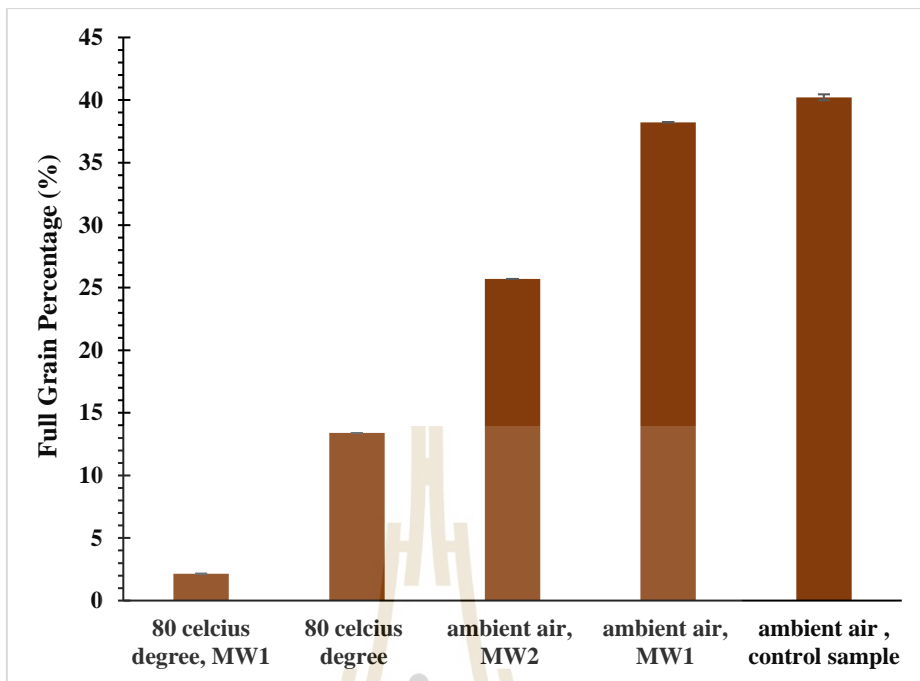
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าอัตราการอบแห้งแบบเฉื่อยและค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเรียงจากมากไปน้อย การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งเฉื่อยสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.18 ถึง 0.16 กิโลกรัมน้ำต่อนาทีก และมีค่าบริโภคพลังงานแบบจำเพาะมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 410 ถึง 420 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ ในขณะที่การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.06 กิโลกรัมน้ำต่อนาทีก และมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด 260 ถึง 270 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ เมื่อนำการลดลงของความชื้นในรูปที่ 4.19 และ 4.20 มาวิเคราะห์รวมกับรูป 4.24 จะสังเกตเห็นได้ว่าแม้การอบแห้งแบบการใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะมีการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็วแต่กลับใช้พลังงานเพื่อขับน้ำออกมากในขณะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งและระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมนั้นแม้จะมีอัตราการขับน้ำที่ต่ำแต่ก็มีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ต่ำเช่นกัน

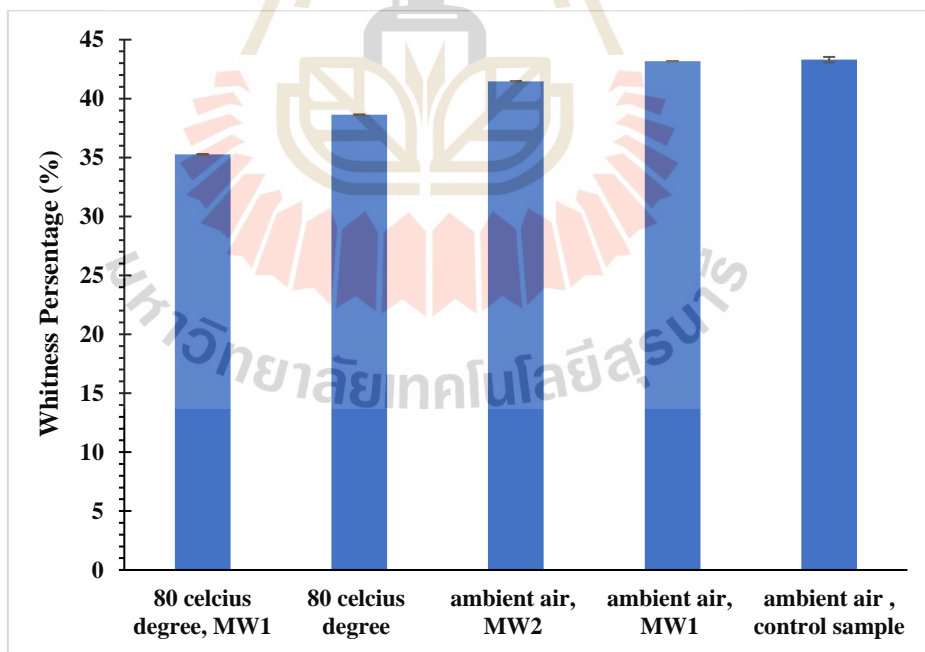
อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่ผ่านมายังมีขอบเขตเฉพาะเรื่องของพลังงานและการถ่ายเทมวลเท่านั้น ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

4.5.4 คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

หากพิจารณาจากรูปที่ 4.25 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งจะมีค่ามากที่สุดคือ 38 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับแล้วใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของชุดควบคุมที่มีค่าเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่น้อยที่สุดคือเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแนวโน้มของรูปที่ 4.25 จะเรียงลำดับจากน้อยไปหามากที่น่าสังเกตคือเมื่อเทียบแนวโน้มรูปที่ 4.25 กับ รูปที่ 4.26 พบว่าแนวโน้มสวนทางกันกล่าวคือหากสังเกตวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งนั้นมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากที่สุดแต่ก็มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งในการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดแต่มีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่มากที่สุด ใกล้เคียงกับชุดควบคุมหรือกล่าวได้ว่ายังมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากขึ้นก็มีผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นน้อยลงเช่นกัน แนวโน้มดังกล่าวของรูปที่ 4.26 ยังคล้ายกับแนวโน้มของค่าความขาวของข้าวสารในรูปที่ 4.24 ซึ่งค่าความขาวของข้าวสารที่ได้จากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมด้วยไมโครเวฟมีค่าน้อยที่สุดในตรงกันข้ามการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งรวมด้วยอากาศสภาพแวดล้อมจะมีค่าความขาวมากที่สุดใกล้เคียงกับค่าความขาวของชุดควบคุม เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นยังสามารถสะท้อนถึงการหักของเมล็ดข้าวสารที่เกิดจากการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ยังดำเนินต่อไปเพื่อหาสาเหตุของการหักในเมล็ดข้าวสาร



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของแต่ละวิธีการอบแห้ง



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสารของแต่ละวิธีการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 คือลักษณะของข้าวกล้องที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟซึ่งจะเห็นรอยที่แบ่งเป็นส่วนที่มีขนาดใกล้เคียงกันซึ่งคล้ายกับข้าวสารที่

ได้จากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนดังรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นรอยแบ่งเป็นส่วนเช่นกันซึ่งข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยสองวิธีนี้เมื่อนำไปขัดขาวจะได้ข้าวที่แตกหักเป็นจำนวนมากซึ่งส่วนที่หักมีขนาดใกล้เคียงกับส่วนที่ถูกแบ่งด้วยรอยดังกล่าว ในทางตรงกันข้ามข้าวกล้องที่ได้จากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งและระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ไม่มีรอยแบ่งแบบรูปที่ 4.27 และ 4.28 มีหน้าซ้ายังมีลักษณะเหมือนเหมือนข้าวกล้องที่ได้จากชุดควบคุมโดยเฉพาะข้าวกล้องที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม ลักษณะข้าวกล้องที่เห็นตามรูปนั้นเป็นเหตุผลอย่างดีที่ใช้ในการอธิบายเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.27 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง



รูปที่ 4.28 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.29 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม



รูปที่ 4.30 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม



รูปที่ 4.31 ลักษณะข้าวสารที่ได้จากการผึ่งแห้งในที่ร่ม (ชุดควบคุมคุณภาพ)

การหักของเมล็ดที่มากนั้นที่เกิเกิดขึ้นจากการกะเทาะข้าวเปลือกรวมถึงการขัดข้าว เมล็ดอาจมีสาเหตุมาจากวิธีการที่ใช้ในการอบแห้งเพราะสิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยร่วมกันคือการใช้อากาศ ร้อน 80 องศาเซลเซียสซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 4.22 จะพบว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ใช้การ อบแห้งด้วยอากาศร้อนรวมถึงอากาศร้อนร่วมไมโครเวฟระดับหนึ่งมีค่าสูงกว่าด้วยการอบแห้งด้วย ไมโครเวฟร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม การอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80 องศาเซลเซียส อาจเป็น สาเหตุของรอยที่เกิดบนข้าวกล้องดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากอากาศ ร้อนถ่ายเทให้กับข้าวเปลือกจะเกิดการระเหยที่ผิวก่อนแล้วจึงขยับเข้าไปภายในข้าวเปลือก การระเหย ที่ผิวอาจทำให้รูพรุนของข้าวเปลือกมีขนาดเล็กลงแล้วน้ำออกได้ยากแต่ความดันด้านในที่เกิดจากกา ระเหยของน้ำยังสูงจากการได้รับความร้อนจากอากาศเป็นผลทำให้เกิดรอยแตกบนผิวเมล็ดข้าวซึ่งเกิด จากแรงดันไอสูงภายในเมล็ดข้าวเปลือก



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีคุณสมบัติได้แก่ มิติของเมล็ดข้าวเปลือก ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ด ค่าความพรุน ค่าความเร็วสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล พบว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกในช่วง 10 - 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ทำให้ความยาวเมล็ดข้าวเปลือกลดลงและทำให้ความหนาและความกว้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าระดับความกลมเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของข้าวเปลือก การเพิ่มขึ้นของความชื้นที่สูงกว่า 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก จะทำให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและค่าความพรุนมีความแตกต่างกัน แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงเมล็ดของข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศไม่มีผลต่อค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกและการเพิ่มขึ้นของความชื้นมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

ในส่วนของการศึกษาพฤติกรรมและการเกิดโหมตคลื่นสนามไฟฟ้าและรูปแบบการกระจายระดับอุณหภูมิของภายในตู้ไมโครเวฟแบบครัวเรือนซึ่งศึกษาแบบจำลองโหมตสนามไฟฟ้าและการกระจายระดับอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ของตู้แบบผิวเรียบและผิวเว้านูนเทียบกับผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของรูปร่างห้องส่งผลต่อการกระจายของโหมตสนามไฟฟ้าและการกระจายระดับของอุณหภูมิน้ำซึ่งพบว่าผลการจำลองของอุณหภูมิของน้ำในห้องแบบผิวเว้านูนใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ต่อเนื่องถึงการจำลองรูปทรงของห้องที่มีผลต่อการกระจายโหมตสนามไฟฟ้าซึ่งพบว่าขนาดของห้องส่งผลให้เกิดจำนวนโหมตสนามไฟฟ้ามากกว่าขนาดห้องที่เล็กแต่ความเข้มของโหมตสนามไฟฟ้าในห้องที่ใหญ่กว่าจะค่าน้อยกว่าความเข้มของโหมตสนามไฟฟ้าในห้อง

การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟซึ่งการอบแห้งมี 4 เงื่อนไขได้แก่ การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับสอง การใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม และการใช้ไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมพบว่า การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งมีอัตราการอบแห้งมากที่สุดแต่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากเช่นกัน ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งมีค่าอัตราการอบแห้งน้อยที่สุดแต่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดในแง่ของคุณภาพของวัสดุตัวอย่างหลังการอบแห้งนั้นพบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งและการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวมีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่น้อยมากเมื่อเทียบกับข้าวที่มาจากชุดควบคุมคุณภาพในขณะที่เปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ได้จากการอบแห้งโดยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์ข้าวตันในชุดควบคุม

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์นั้นมีค่าแปรปรวนของข้อมูลที่ค่อนข้างมากซึ่งเกิดจากการไม่ได้ควบคุมขนาดของข้าวเปลือกทำให้เกิดผลการทดลองที่ค่อนข้างกว้าง ส่วนของการจำลองการเกิดโหมตสนามไฟฟ้าและการไล่ระดับอุณหภูมิของน้ำนั้นยังใช้ค่าคุณสมบัติ Relative permittivity ของน้ำที่เป็นค่าคงที่อยู่ซึ่งความเป็นจริงแล้วค่านี้ควรเป็นฟังก์ชันที่แปรค่าตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงจะทำให้ผลการจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น การจำลองรูปทรงของห้องที่มีผลต่อการกระจายของโหมตสนามไฟฟ้าที่เกิดภายในห้องควรจะมีการจำลองการทำความร้อนในเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเพื่อเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล สุดท้ายการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยอากาศเสริมด้วยไมโครเวฟบนเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่าง ๆ ควรทดสอบเงื่อนไขอื่นๆเพิ่มเติม เช่นอุณหภูมิอากาศอบแห้งและระดับพลังงานไมโครเวฟอื่นๆเพื่อจะทราบถึงค่าที่เหมาะสมต่อการอบแห้งได้มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- เกียรติศักดิ์ ใจโต. (2558). การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับอบแห้งมะพร้าวขูด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 10.
- จิตรรัตน์ จอกแก้ว. (2559). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 10.
- ชัยฤทธิ์ ดำรงเกียรติ. (2555). ข้าวไร่กับการสร้างความมั่นคงทางอาหารบนพื้นที่สูง [ออนไลน์]. ได้จาก http://www.ricethailand.go.th/rkb3/Eb_024.pdf.
- พีรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูไชนาค, มุस्ताฟา ยะกา และ ประชา บุญยวานิชกุล. (2557). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในอุตสาหกรรม. *SWU Engineering Journal* (2014) 9(1), 68-74.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555). มาตรฐานสินค้าเกษตร เรื่องข้าว. 28.
- Ahrne, L., Pereira, N. R., Staack, N., Floberg, P., 2007. Microwave convective drying of plant foods at constant and variable microwave power. *Drying Technol.* 25: 1149– 1153., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (286) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Al-Harashsheha, M., Al-Muhtaseb, A. H., Mageec, T. R. A., 2009. Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chem. Eng. Process.* 48: 524– 531., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (283) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Amalendu Chakraverty. , R. Paul Singh. (2014). *Postharvest technology and food process engineering.* Florida: CRC Press.

- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), (1997). ASAE S352.2. Moisture Measurement – unground grain and seeds, Standard Vol.555. ASABE, St.Joseph, MI,USA
- Arikan, M. F., Ayhan, Z., Soysal, Y., Esturk, O., 2012. Drying characteristics and quality parameters of microwave-dried grated carrots. Food Bioprocess Technol. 5: 3217–3229., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification** (280) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- Botha, G. E., Oliveira, J. C., Ahrne, L., 2012. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. J. Food Eng. 108: 304–311., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification**. (298-299) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- Clary, C. D., Wang, S. J., Petrucci, V.E., (2005). Fixed and incremental levels of microwave power application on drying grapes under vacuum. J. Food Sci. 70(5): 344-349. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification**. (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Cui, Z. W., 2004. Mathematical modeling of microwave-vacuum drying and its application in food processing. Diss., Jiangnan University, Wuxi, VRC., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification**. (282,303) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Cui, Z. W., Xu, S. Y., Sun, D. W., 2003. Dehydration of garlic slices by combined microwave vacuum and air drying. Drying Technol. 21: 1173–1184., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification**. (280,288) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Cui, Z. W., Xu, S. Y., Sun, D. W., 2004. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices. J. Food Eng. 65: 157–164., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar

- (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (282,303) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Duan, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Wang, S. J., 2010b. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *J. Food Eng.* 96: 491–497., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.**(280) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Duan, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Wang, R., 2010a. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods. *Drying Technol.* 28:1– 10., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279,303) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Durance, T. E., Wang, J. H., 2002. Energy consumption, density, and rehydration rate of vacuum microwave- and hot-air convection-dehydrated tomatoes. *J. Food Sci.* 67: 2212–2216., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (280,302,303) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Esturk, O., 2012. Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food Bioprocess Technol.* 5(5): 1664–1673., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (294) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Feng, H., Tang, J., Cavaliere, R. P., 1999. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: Effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature. *Drying Technol.* 17(10): 1981–1998., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (296,298) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Feng, H., Yin, Y., Tang, J., 2012. Microwave drying of food and agricultural materials Basics and heat and mass transfer modeling. *Food Eng. Rev.* 4: 89–106., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (280) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

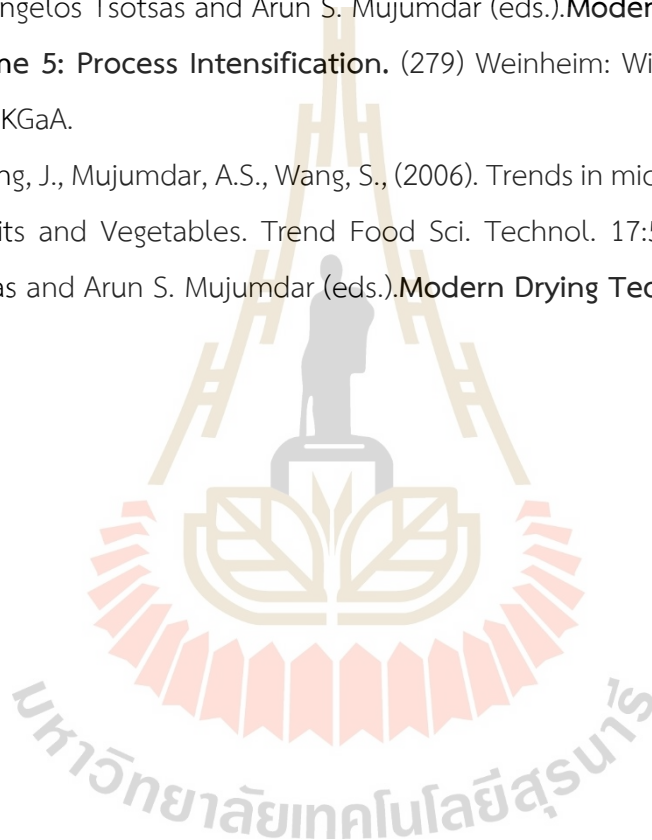
- Figiel, A., 2009. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *J. Food Eng.* 94: 98 –104., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (298,294) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Figiel, A., 2010. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *J. Food Eng.* 98, 461–470., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (293,294,298). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Holtz,E., Ahrne, L., Rittenauer, M., Rasmuson, A., 2010. Influence of dielectric and sorption properties on drying behavior and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials. *J. Food Eng.* 97(2): 144– 153., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (281).Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Hu, Q. G., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Xiao, G. N., Sun, J. C., 2006. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination. *J. Food Eng.* 77: 977–982., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (294). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Kaensup, W., Chutima, S., Wongwises, S., 2002. Experimental study on drying of chilli in a combined microwave-vacuum rotary drum dryer. *Drying Technol.* 20(10): 2067–2079., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (301) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Lin, T. M., Durance, T. D., Scaman, C. H., 1999. Physical and sensory properties of vacuum microwave dehydrated shrimp. *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 8: 41– 53., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (280) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Li, Z., Raghavan, G. S. V., Orsat, V., 2010. Temperature and power control in microwave drying. *Food Eng.* 97: 478–483., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (299) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Maskan, M., 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *J. Food Eng.* 44: 71–78., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (294) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Mosenin, N.N. (1980). *Physical properties of plants and animal materials.* New York: Gordon and Breach Science Publisher.
- Mousa, N., Farid, M., (2002). Microwave vacuum drying of banana slice. *Drying Technol.* 20:2055–2066. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Mujumdar, A.S., Law, C.L., (2010). Drying technology: Trends and application in postharvest Processing. *Food Bioprocess Technol.* 3: 843-852. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Mujumdar, A. S., 2006. *Handbook of industrial drying* (3rd ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida, USA., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (285) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Pereira, N., Marsaioli, A., Ahrne, L., 2007. Effect of microwave power, air velocity and temperature on final drying of osmotically dehydrated bananas. *J. Food Eng.* 81: 79 –87., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (286) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Regier, M., Schubert, H., 2005. *The microwave processing of foods.* Woodhead Publishing, Cambridge, UK., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (295) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Sahin, S., Sumnu, S. G., 2006. Physical properties of foods. Springer, Berlin Germany., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (282) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Shivhare, U. S., Orsat, V., Raghavan, G. S. V., Ribeiro, C. P., Passos, M. L., 2010. Innovation in Food Engineering: New Techniques and Products. CRC Press, Boca Raton, USA., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (281) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sharma, G. P., Prasad, S., 2006a. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy* 31: 1921–1926., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (301) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., LopezMalo, A., García, H. S., 2010. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st century and their potential applications. *LWT – Food Sci. Technol.* 43(8): 1169–1179 In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (283) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Souraki, B.A., Andres, A., Mowla, D., (2009). Mathematical modeling of microwave-assisted inert medium fluidized bed drying of cylindrical carrot sample. *Chem. Eng. Process.* 48:296-305 . In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Soysal, Y., Öztekin, S., Eren, Ö ., 2006. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Eng.* 93(4): 403–413., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (300) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Sunjka, P. S., Rennie, T. J., Beaudry, C., Raghavan, G. S. V., 2004. Microwave– convective and microwave–vacuum drying of cranberries: A comparative study. *Drying Technol.* 22(5): 1217–1231., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar

- (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (301) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A., Achariyaviriya, S., 2007. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *J. Food Eng.* 81(2): 459–468., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (299) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wang, J., Xiong, Y.-S., Yu, Y., 2004. Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *Eur. Food Res. Technol.* 219: 500–506., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (294) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wang, R., Zhang, M., Mujumdar, A. S., (2010b). Effect of food ingredient on microwave freeze drying of instant vegetable soup. *LWT-Food Sci. Technol.* 43: 1144-1150. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.). **Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wang, R., Zhang, M., Mujumdar, A. S., 2010a. Effect of osmotic dehydration on microwave freeze-drying characteristics and quality of potato chips. *Drying Technol.* 28(6): 798–806., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (294) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wang, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., (2011b). Trends in processing technologies for dried aquatic product. *Drying Technol.* 29: 382-394. . In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (280) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Wojdyo, A., Figiel, A., Oszmianski, J., 2009. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. *J. Agric. Food Chem.* 57: 1337–1343., In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (293) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Zhang, M., Li, C. L., Ding, X. L., (2005). Effects of heating conditions on thermal denaturation of white mushroom suitable for dehydration. *Drying Technol.*23(5):1119-1125. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Zhang, M., Li, C. L., Ding, X. L., (2003). Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low vacuum dehydration. *Drying Technol.* 21(3):569-579. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5: Process Intensification.** (279) Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang, S., (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and Vegetables. *Trend Food Sci. Technol.* 17:524-534. In Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar (eds.).**Modern Drying Technology Volume 5:**





ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
1	9.85	2.39	2.02	3.62	36.78
2	11.14	2.42	1.97	3.76	33.74
3	10.76	2.49	2.02	3.78	35.15
4	10.25	2.36	1.98	3.63	35.43
5	10.96	2.51	1.99	3.80	34.64
6	11.2	2.5	2	3.83	34.16
7	11.12	2.4	2.07	3.81	34.25
8	10.78	2.37	2.03	3.73	34.59
9	11.41	2.43	1.96	3.79	33.20
10	11.85	2.55	1.98	3.91	33.01
11	11.45	2.08	2.02	3.64	31.76
12	11.69	2.41	2.12	3.91	33.44
13	11.29	2.11	1.98	3.61	32.00
14	11.78	2.58	2.09	3.99	33.87
15	11.03	2.41	2.03	3.78	34.26
16	11.48	2.48	2.05	3.88	33.79
17	11.4	2.52	2.11	3.93	34.46
18	11.14	2.37	2.06	3.79	34.01
19	11.29	2.3	2.2	3.85	34.11
20	11.62	2.51	2.09	3.94	33.87
21	11.64	2.29	2.03	3.78	32.49
22	11.64	2.47	2.03	3.88	33.32

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลาง เฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความกลม (%)
23	11.12	2.62	2.05	3.91	35.15
24	10.29	2.37	2.03	3.67	35.68
25	10.04	2.39	2.05	3.66	36.49
26	10.86	2.28	1.93	3.63	33.42
27	10.71	2.37	2.04	3.73	34.80
28	11.05	2.66	1.97	3.87	35.01
29	11.14	2.44	2.04	3.81	34.23
30	11.11	2.26	2.02	3.70	33.32
31	11.2	2.61	1.88	3.80	33.95
32	11.13	2.52	2.04	3.85	34.62
33	10.97	2.43	1.95	3.73	34.02
34	10.61	2.34	2.05	3.71	34.93
35	11.54	2.27	1.99	3.74	32.37
36	11.02	2.5	1.91	3.75	34.00
37	11.03	2.31	1.98	3.70	33.50
38	10.87	2.34	2.05	3.74	34.37
39	11.31	2.58	1.91	3.82	33.77
40	11.04	2.43	2.09	3.83	34.67
41	10.94	2.04	1.61	3.30	30.16
42	10.58	2.46	2.03	3.75	35.47
43	10.9	2.49	2.06	3.82	35.08
44	10.99	2.28	2.06	3.72	33.88

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 10 เปอร์เซนต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ดที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลาง เฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความกลม (%)
45	11.06	2.32	1.96	3.69	33.37
46	10.36	2.76	1.86	3.76	36.30
47	10.77	2.33	1.99	3.68	34.19
48	10.75	2.38	2.07	3.76	34.93
49	11.8	2.44	2.04	3.89	32.94
50	11.37	2.47	1.97	3.81	33.51
เฉลี่ย	11.07	2.41	2.01	3.79	34.55

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
1	10.71	2.33	1.9	3.62	33.79
2	10.32	2.35	2.01	3.65	35.40
3	11.3	2.31	2.02	3.75	33.18
4	10.76	2.37	1.97	3.69	34.29
5	11.3	2.65	2.21	4.04	35.80
6	11.46	2.42	2.12	3.89	33.93
7	11.43	2.52	2.09	3.92	34.29
8	11.31	2.72	2.13	4.03	35.65
9	11.03	2.44	2.16	3.87	35.12
10	11.28	2.32	2.02	3.75	33.27
11	11.82	2.42	2.09	3.91	33.08
12	10.7	2.54	1.92	3.74	34.92
13	10.9	2.48	2.05	3.81	34.98
14	11.59	2.51	2.03	3.89	33.60
15	10.33	2.49	2.02	3.73	36.12
16	10.67	2.48	1.96	3.73	34.95
17	10.68	2.55	2.08	3.84	35.96
18	11.5	2.29	2.12	3.82	33.23
19	11.14	2.33	1.96	3.71	33.26
20	11.34	2.59	2.01	3.89	34.34
21	10.81	2.42	1.97	3.72	34.43
22	11.6	2.29	2.02	3.77	32.52
23	11.17	2.87	2.06	4.04	36.19

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง เรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
24	11.56	2.37	2.1	3.86	33.40
25	11.23	2.38	2.05	3.80	33.82
26	10.58	2.45	2.03	3.75	35.42
27	10.74	2.38	2.09	3.77	35.07
28	10.7	2.44	2	3.74	34.93
29	10.78	2.54	2.05	3.83	35.52
30	10.82	2.42	1.95	3.71	34.29
31	11.22	2.47	2.06	3.85	34.32
32	10.51	2.35	1.99	3.66	34.85
33	10.8	2.57	2.13	3.90	36.07
34	10.9	2.5	2.02	3.80	34.90
35	10.98	2.35	2.04	3.75	34.13
36	10.43	2.41	1.97	3.67	35.21
37	10.98	2.35	1.94	3.69	33.57
38	11.05	2.41	2.08	3.81	34.50
39	10.99	2.39	2.01	3.75	34.13
40	11.09	2.52	1.94	3.78	34.13
41	10.94	2.48	2	3.79	34.61
42	10.53	2.35	1.97	3.65	34.69
43	10.95	2.46	2.06	3.81	34.83
44	10.65	2.42	1.97	3.70	34.77
45	11.35	2.4	2.1	3.85	33.95

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
46	10.6	2.46	2.09	3.79	35.77
47	11.06	2.5	2.03	3.83	34.62
48	11.19	2.43	2	3.79	33.86
49	10.68	2.45	2.05	3.77	35.31
50	10.46	2.44	1.81	3.59	34.30
เฉลี่ย	10.9784	2.4476	2.029	3.79	34.55

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 18
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
1	10.57	2.31	2.05	3.69	34.87
2	11.08	2.55	2.17	3.94	35.59
3	10.76	2.42	1.95	3.70	34.41
4	10.21	2.45	2.5	3.97	38.88
5	10.86	2.45	2.1	3.82	35.20
6	10.55	2.31	2.04	3.68	34.85
7	10.29	2.35	2.05	3.67	35.70
8	10.38	2.35	1.79	3.52	33.92
9	10.71	2.46	2.21	3.88	36.19
10	10.93	2.51	2.11	3.87	35.39
11	11.59	2.35	2.18	3.90	33.66
12	10.79	2.42	2.08	3.79	35.10
13	10.61	2.47	2.07	3.79	35.68
14	10.25	2.37	2.01	3.66	35.66
15	10.96	2.45	2.02	3.79	34.54
16	11.25	2.24	2.21	3.82	33.95
17	10.52	2.53	2.11	3.83	36.40
18	10.84	2.34	1.69	3.50	32.29
19	11.03	2.55	1.97	3.81	34.56
20	10.66	2.27	2.04	3.67	34.41
21	10.43	2.48	2.1	3.79	36.31
22	11.18	2.4	2.07	3.82	34.13
23	10.85	2.45	2.03	3.78	34.83

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความกลม (%)
24	10.55	2.59	2.12	3.87	36.68
25	10.52	2.43	2.08	3.76	35.74
26	10.47	2.46	2.08	3.77	36.01
27	10.72	2.45	1.99	3.74	34.88
28	10.72	2.46	2.04	3.78	35.21
29	9.8	2.33	1.76	3.43	34.95
30	10.6	2.44	2.06	3.76	35.50
31	10.88	2.41	2.01	3.75	34.46
32	10.6	2.33	1.96	3.64	34.38
33	10.98	2.61	2.18	3.97	36.14
34	10.62	2.55	2	3.78	35.63
35	11.03	2.48	2.2	3.92	35.53
36	10.22	2.45	2.06	3.72	36.42
37	11.14	2.46	2.1	3.86	34.66
38	11.08	2.48	2.1	3.86	34.88
39	10.75	2.5	2.11	3.84	35.74
40	11.36	2.47	2.09	3.89	34.20
41	10.62	2.4	2.04	3.73	35.15
42	10.56	2.44	2.03	3.74	35.41
43	10.79	2.3	2.03	3.69	34.23
44	10.06	2.3	2.05	3.62	35.98
45	10.82	2.49	2.11	3.85	35.54

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
46	11	2.44	2.04	3.80	34.52
47	10.22	2.33	2.01	3.63	35.53
48	11.47	2.43	2.09	3.88	33.80
49	10.64	2.48	2.1	3.81	35.83
50	11.09	2.48	2.06	3.84	34.63
เฉลี่ย	10.7322	2.4294	2.061	3.77	35.16

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
1	11.01	2.56	2.15	3.93	35.68
2	10.74	2.55	2.1	3.86	35.94
3	11.48	2.49	2.14	3.94	34.32
4	11.22	2.66	2.18	4.02	35.85
5	11.85	2.44	2.1	3.93	33.17
6	11.05	2.46	2.18	3.90	35.28
7	10.45	2.44	2	3.71	35.49
8	11.14	2.4	2.23	3.91	35.07
9	10.75	2.42	2.1	3.79	35.30
10	10.7	2.45	2.14	3.83	35.78
11	11.16	2.45	2.14	3.88	34.79
12	10.99	2.56	2.07	3.88	35.27
13	10.93	2.54	2.1	3.88	35.48
14	10.32	2.48	2.04	3.74	36.22
15	10.51	2.37	2.16	3.78	35.92
16	10.35	2.52	2.09	3.79	36.63
17	10.83	2.46	2.09	3.82	35.26
18	11.27	2.3	1.92	3.68	32.64
19	11.28	2.62	2.14	3.98	35.32
20	11.23	2.39	2.03	3.79	33.76
21	10.59	2.54	2.12	3.85	36.35
22	10.75	2.44	2.07	3.79	35.22
23	10.44	2.63	2.02	3.81	36.53

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความกลม (%)
24	10.38	2.5	2.08	3.78	36.41
25	11.02	2.34	2.02	3.73	33.89
26	10.71	2.55	1.77	3.64	34.01
27	10.06	2.57	2.09	3.78	37.58
28	10.68	2.42	2.05	3.76	35.17
29	11.05	2.58	2.23	3.99	36.12
30	10.4	2.43	2.04	3.72	35.79
31	11.13	2.48	2.13	3.89	34.94
32	11.27	2.45	2.1	3.87	34.34
33	10.68	2.44	2.05	3.77	35.26
34	11.21	2.44	2.05	3.83	34.14
35	10.74	2.58	2.2	3.94	36.64
36	10.4	2.52	2.07	3.79	36.40
37	10.82	2.33	2.22	3.83	35.35
38	10.27	2.38	2.14	3.74	36.42
39	10.93	2.44	2.09	3.82	34.95
40	10.37	2.57	2.07	3.81	36.71
41	10.65	2.47	2.11	3.81	35.82
42	10.96	2.46	2.1	3.84	35.04
43	10.71	2.64	2.03	3.86	36.02
44	11.06	2.41	2.13	3.84	34.75
45	10.4	2.5	2.05	3.76	36.19

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
46	11.1	2.49	2.19	3.93	35.37
47	10.25	2.6	2.13	3.84	37.49
48	11.07	2.41	2.04	3.79	34.23
49	10.49	2.4	2.08	3.74	35.66
50	10.5	2.46	2.08	3.77	35.94
เฉลี่ย	11.0566	2.4128	2.0092	3.83	35.44



ตารางผนวกที่ ก5 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความ กลม (%)
1	10.94	2.53	2.17	3.92	35.80
2	10.83	2.44	2.08	3.80	35.11
3	10.31	2.73	2.08	3.88	37.66
4	10.61	2.59	2.13	3.88	36.59
5	10.12	2.52	2.03	3.73	36.83
6	11.63	2.59	2.19	4.04	34.74
7	10.74	2.61	2.09	3.88	36.16
8	11	2.52	2.1	3.88	35.23
9	11.014	2.56	2.14	3.92	35.61
10	10.74	2.56	2.18	3.91	36.44
11	10.36	2.62	2.19	3.90	37.67
12	11.01	2.61	2.17	3.97	36.02
13	10.82	2.55	2.17	3.91	36.16
14	10.16	2.4	2.17	3.75	36.95
15	10.87	2.57	2.15	3.92	36.03
16	10.78	2.33	2.11	3.76	34.84
17	10.57	2.58	2.06	3.83	36.23
18	11.12	2.5	2.13	3.90	35.05
19	10.15	2.48	2.14	3.78	37.21
20	10	2.6	2.11	3.80	38.00
21	10.86	2.52	2.12	3.87	35.65
22	11.3	2.46	2.21	3.95	34.92
23	10.63	2.58	2.13	3.88	36.50

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง
เรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26
เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ด ที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย เชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความกลม (%)
24	10.55	2.44	2.14	3.80	36.07
25	10.8	2.54	2.18	3.91	36.21
26	10.47	2.54	2.04	3.79	36.16
27	10.35	2.6	1.85	3.68	35.54
28	10.68	2.52	2.08	3.83	35.82
29	10.01	2.65	2.23	3.90	38.92
30	10.75	2.58	2.06	3.85	35.83
31	10.56	2.44	1.97	3.70	35.06
32	10	2.44	2.04	3.68	36.79
33	11.51	2.45	2.18	3.95	34.29
34	11.6	2.54	2.16	3.99	34.42
35	11.35	2.6	2.18	4.01	35.30
36	11.17	2.45	2.2	3.92	35.09
37	11.29	2.57	2.09	3.93	34.80
38	10.77	2.43	2	3.74	34.73
39	10.8	2.64	2.17	3.96	36.62
40	10.65	2.32	1.94	3.63	34.11
41	11	2.58	2.13	3.92	35.68
42	10.48	2.59	2.12	3.86	36.84
43	10.3	2.56	2.15	3.84	37.30
44	11.32	2.74	2.18	4.07	35.99
45	10.6	2.54	2.07	3.82	36.04

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการวัดขนาดของความยาว ความกว้าง ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับความกลมของเมล็ดของข้าวเปลือกที่มีความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ต่อ)

เมล็ดที่	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (mm)	ค่าระดับความกลม (%)
46	11.1	2.49	2.19	3.93	35.37
47	10.25	2.6	2.13	3.84	37.49
48	11.07	2.41	2.04	3.79	34.23
49	10.49	2.4	2.08	3.74	35.66
50	10.5	2.46	2.08	3.77	35.94
เฉลี่ย	11.0566	2.4128	2.0092	3.83	35.44

ตารางที่ ก6 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ด และค่าความพรุนของเมล็ดในแต่ละความชื้น

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (kg/m ³)	ความหนาแน่นเชิงเมล็ด (kg/m ³)	ค่าความพรุน (%)
10	1	532.79	1105.79	51.82
10	2	558.57	1335.72	58.18
10	3	550.35	1316.05	58.18
10	4	543.59	1245.73	56.36
10	5	544.94	1248.83	56.36
10	6	567.05	1299.48	56.36
10	7	547.15	1253.89	56.36
10	8	544.58	1247.99	56.36
10	9	545.68	1225.00	55.45
10	10	555.01	1245.95	55.45

ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนของเมล็ดใน
แต่ละความชื้น (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (kg/m ³)	ความหนาแน่นเชิงเมล็ด (kg/m ³)	ค่าความพรุน (%)
14	1	542.73	1218.38	55.45
14	2	579.94	1301.90	55.45
14	3	553.17	1216.98	54.55
14	4	550.10	1210.22	54.55
14	5	542.98	1194.55	54.55
14	6	556.49	1224.27	54.55
14	7	554.77	1220.49	54.55
14	8	554.28	1219.41	54.55
14	9	575.15	1240.52	53.64
14	10	579.45	1249.79	53.64
18	1	566.92	1222.78	53.64
18	2	549.24	1184.64	53.64
18	3	555.26	1174.58	52.73
18	4	565.45	1196.14	52.73
18	5	543.10	1148.87	52.73
18	6	567.54	1200.56	52.73
18	7	565.45	1196.14	52.73
18	8	577.36	1221.34	52.73
18	9	574.41	1215.11	52.73
18	10	579.82	1226.53	52.73
22	1	561.89	1236.16	54.55
22	2	576.13	1267.49	54.55
22	3	570.98	1256.15	54.55

ตารางที่ ก6 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนของเมล็ดในแต่
ละความชื้น (ต่อ)

ความชื้น(%wb)	ครั้งที่	ความหนาแน่นเชิง กลุ่ม (kg/m ³)	ความหนาแน่นเชิงเมล็ด (kg/m ³)	ค่าความ พรุน (%)
22	4	556.85	1225.08	54.55
22	5	578.34	1272.35	54.55
22	6	576.13	1267.49	54.55
22	7	584.11	1259.85	53.64
22	8	583.99	1259.59	53.64
22	9	594.31	1281.84	53.64
22	10	565.94	1197.18	52.73
26	1	597.13	1263.16	52.73
26	2	587.18	1242.12	52.73
26	3	600.08	1269.39	52.73
26	4	592.71	1253.81	52.73
26	5	603.27	1276.15	52.73
26	6	606.34	1282.64	52.73
26	7	611.99	1294.59	52.73
26	8	610.88	1292.25	52.73
26	9	613.46	1297.71	52.73
26	10	600.94	1271.21	52.73

ตารางที่ ก7 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 50 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	1	4.7	0.96
10.00	2	4.7	1.03
10.00	3	4.9	0.98
10.00	4	5.3	0.87
10.00	5	4.7	1.10
10.00	6	5.0	0.85
10.00	7	4.7	1.31
10.00	8	4.6	1.16
10.00	9	5	0.90
10.00	10	4.9	1.06
14.00	1	5.1	1.01
14.00	2	4.9	1.05
14.00	3	5.1	1.09
14.00	4	5.3	0.99
14.00	5	5.3	0.97
14.00	6	5.2	1.13
14.00	7	5.2	1.00
14.00	8	5.1	1.02
14.00	9	5.3	0.94
14.00	10	5.0	1.10
18.00	1	5.7	0.92
18.00	2	5.5	1.00
18.00	3	5.4	1.09

ตารางที่ ก7 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
18.00	5	5.3	0.99
18.00	6	5.4	1.02
18.00	7	5.6	0.96
18.00	8	5.5	0.93
18.00	9	5.3	1.09
18.00	10	5.5	0.98
22.00	1	5.5	0.95
22.00	2	5.6	0.95
22.00	3	5.4	1.03
22.00	4	5.5	0.94
22.00	5	5.6	0.93
22.00	6	5.7	0.91
22.00	7	5.8	0.93
22.00	8	5.9	0.88
22.00	9	5.5	1.06
22.00	10	5.8	0.96
26.00	1	5.9	0.84
26.00	2	6.1	0.82
26.00	3	6.0	0.80
26.00	4	6.1	0.88
26.00	5	5.8	0.91
26.00	6	5.9	0.85
26.00	7	6.0	0.81

ตารางที่ ก7 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 50 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
26.00	8	6.1	0.88
26.00	9	6.0	0.89
26.00	10	5.8	0.96

ตารางที่ ก8 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 60 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	1	4.7	1.04
10.00	2	4.8	1.06
10.00	3	4.7	1.11
10.00	4	4.8	1.24
10.00	5	4.4	1.35
10.00	6	4.7	1.18
10.00	7	4.5	1.37
10.00	8	4.9	1.20
10.00	9	4.5	1.18
10.00	10	4.8	1.04
14.00	1	5.3	0.96
14.00	2	5.2	1.04
14.00	3	5.4	0.99
14.00	4	5.1	1.04
14.00	5	5.2	1.00
14.00	6	5.4	1.05

ตารางที่ ก8 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
14.00	7	5.1	1.11
14.00	8	5.3	1.03
14.00	9	5.2	1.00
14.00	10	5.2	1.08
18.00	1	5.6	0.99
18.00	2	5.4	1.01
18.00	3	5.5	0.97
18.00	4	5.4	1.06
18.00	5	5.5	0.97
18.00	6	5.5	0.97
18.00	7	5.4	1.02
18.00	8	5.5	0.98
18.00	9	5.5	0.97
18.00	10	5.6	1.00
22.00	1	5.5	1.07
22.00	2	5.7	0.92
22.00	3	5.8	0.89
22.00	4	5.7	0.90
22.00	5	5.5	1.01
22.00	6	5.8	0.88
22.00	7	5.6	1.05
22.00	8	5.6	1.00
22.00	9	5.6	0.97

ตารางที่ ก8 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
22.00	10	5.5	0.96
26.00	1	5.9	0.87
26.00	2	6.1	0.90
26.00	3	6.0	0.89
26.00	4	5.9	0.89
26.00	5	5.9	0.89
26.00	6	5.8	1.03
26.00	7	5.9	0.90
26.00	8	6.0	0.92
26.00	9	6.0	0.85
26.00	10	5.9	0.92

ตารางที่ ก9 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	1	4.9	1.02
10.00	2	4.4	1.41
10.00	3	4.7	1.13
10.00	4	4.9	1.04
10.00	5	4.7	1.26
10.00	6	4.8	1.15
10.00	7	4.5	1.23

ตารางที่ ก9 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	8	4.7	1.16
10.00	9	4.7	1.25
10.00	10	4.7	1.22
14.00	1	5.3	1.04
14.00	2	5.2	1.04
14.00	3	5.4	0.96
14.00	4	5.1	1.08
14.00	5	5.2	1.07
14.00	6	5.2	1.04
14.00	7	5.3	1.07
14.00	8	5.3	0.98
14.00	9	5.4	0.95
14.00	10	5.4	0.96
18.00	1	5.5	1.04
18.00	2	5.4	1.16
18.00	3	5.3	1.08
18.00	4	5.4	1.12
18.00	5	5.3	1.13
18.00	6	5.5	1.04
18.00	7	5.5	1.09
18.00	8	5.5	1.03
18.00	9	5.4	1.05
18.00	10	5.5	1.01

ตารางที่ ก9 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานกาไหล
22.00	1	5.5	1.07
22.00	2	5.6	1.00
22.00	3	5.6	1.01
22.00	4	5.7	1.01
22.00	5	5.6	0.96
22.00	6	5.7	0.96
22.00	7	5.9	0.96
22.00	8	5.7	1.01
22.00	9	5.6	1.01
22.00	10	5.6	0.96
26.00	1	6.0	0.88
26.00	2	6.0	0.87
26.00	3	5.9	0.91
26.00	4	6.0	0.88
26.00	5	5.8	1.01
26.00	6	5.9	0.98
26.00	7	5.8	0.99
26.00	8	5.8	0.97
26.00	9	5.7	1.01
26.00	10	5.9	0.95

ตารางที่ ก10 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	1	4.8	1.30
10.00	2	4.6	1.36
10.00	3	4.7	1.07
10.00	4	4.7	1.27
10.00	5	4.4	1.34
10.00	6	4.7	1.14
10.00	7	4.6	1.25
10.00	8	4.7	1.28
10.00	9	5.0	1.18
10.00	10	4.7	1.28
14.00	1	5.2	1.06
14.00	2	5.4	1.02
14.00	3	5.4	1.07
14.00	4	5.2	1.04
14.00	5	5.1	1.18
14.00	6	5.3	1.04
14.00	7	5.3	1.01
14.00	8	5.3	1.07
14.00	9	5.3	1.05
14.00	10	5.4	1.04
18.00	1	5.4	1.12
18.00	2	5.3	1.10
18.00	3	5.5	1.06

ตารางที่ ก10 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
18.00	5	5.6	0.98
18.00	6	5.6	0.99
18.00	7	5.4	1.12
18.00	8	5.5	1.02
18.00	9	5.5	1.03
18.00	10	5.3	1.09
22.00	1	5.7	0.99
22.00	2	5.8	0.99
22.00	3	5.7	1.03
22.00	4	5.8	0.98
22.00	5	5.8	0.92
22.00	6	5.7	1.05
22.00	7	5.5	1.12
22.00	8	5.6	1.01
22.00	9	5.7	1.00
22.00	10	5.6	1.00
26.00	1	6.0	0.96
26.00	2	5.9	1.04
26.00	3	5.7	1.02
26.00	4	6.1	0.92
26.00	5	5.9	0.95
26.00	6	5.8	1.01
26.00	7	5.9	0.97

ตารางที่ ก10 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
26.00	8	6.0	0.91
26.00	9	5.8	0.99
26.00	10	6.1	0.95

ตารางที่ ก11 ค่าความเร็วลมสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	1	4.7	1.22
10.00	2	4.9	1.14
10.00	3	4.9	1.23
10.00	4	4.7	1.22
10.00	5	4.9	1.14
10.00	6	5.1	1.05
10.00	7	5.0	1.16
10.00	8	4.9	1.18
10.00	9	4.7	1.40
10.00	10	5.0	1.06
14.00	1	5.4	1.10
14.00	2	5.0	1.17
14.00	3	5.4	1.04
14.00	4	5.5	0.97
14.00	5	5.3	1.07
14.00	6	5.2	1.08

ตารางที่ ก11 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
14.00	7	5.3	1.04
14.00	8	5.3	1.17
14.00	9	5.2	1.11
14.00	10	5.4	1.00
18.00	1	5.7	1.05
18.00	2	5.6	1.07
18.00	3	5.6	1.02
18.00	4	5.5	1.06
18.00	5	5.4	1.15
18.00	6	5.4	1.09
18.00	7	5.4	1.10
18.00	8	5.4	1.18
18.00	9	5.5	1.10
18.00	10	5.7	1.04
22.00	1	5.7	0.99
22.00	2	5.6	1.13
22.00	3	5.5	1.11
22.00	4	5.7	1.03
22.00	5	5.8	0.96
22.00	6	5.9	1.06
22.00	7	5.7	1.01
22.00	8	5.7	1.08
22.00	9	5.9	0.98

ตารางที่ ก11 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
22.00	10	5.6	1.05
26.00	1	6	0.96
26.00	2	6.1	0.89
26.00	3	6.1	0.90
26.00	4	6.0	1.04
26.00	5	5.9	1.00
26.00	6	5.8	1.00
26.00	7	6.0	0.88
26.00	8	5.9	1.03
26.00	9	5.9	0.97
26.00	10	5.9	0.97

ตารางที่ ก12 ค่าความเร็วลมสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	1	5.1	1.11
10.00	2	4.8	1.18
10.00	3	4.7	1.09
10.00	4	4.8	1.20
10.00	5	4.8	1.27
10.00	6	4.7	1.25
10.00	7	4.6	1.46
10.00	8	4.9	1.33

ตารางที่ ก12 ค่าความเร็วลมสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 10 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
10.00	9	4.5	1.45
10.00	10	4.9	1.10
14.00	1	5.2	1.17
14.00	2	5.3	1.12
14.00	3	5.3	1.12
14.00	4	5.3	1.13
14.00	5	5.4	1.06
14.00	6	5.2	1.12
14.00	7	5.4	1.05
14.00	8	5.2	1.25
14.00	9	5.1	1.20
14.00	10	5.4	1.05
18.00	1	5.4	1.12
18.00	2	5.5	1.12
18.00	3	5.7	1.05
18.00	4	5.6	1.13
18.00	5	5.5	1.10
18.00	6	5.6	1.04
18.00	7	5.5	1.16
18.00	8	5.5	1.09
18.00	9	5.6	1.15
18.00	10	5.6	1.05

ตารางที่ ก12 ค่าความเร็วลมสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 22.00 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ความชื้น (%wb)	ครั้งที่	ค่าความเร็วลมสุดท้าย (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล
			ไหล
22.00	1	5.6	1.07
22.00	2	5.9	0.94
22.00	3	5.8	1.10
22.00	4	5.5	1.25
22.00	5	5.7	1.11
22.00	6	5.8	1.04
22.00	7	5.6	1.09
22.00	8	5.7	1.10
22.00	9	5.6	1.06
22.00	10	5.7	1.04
26.00	1	6.1	0.98
26.00	2	5.8	1.09
26.00	3	6.0	0.97
26.00	4	6.0	1.00
26.00	5	5.9	0.99
26.00	6	5.9	0.97
26.00	7	6.0	0.98
26.00	8	6.1	0.94
26.00	9	5.9	0.99
26.00	10	6.0	1.05

ตารางที่ ก13 ค่าอุณหภูมิของน้ำของแต่ละแถวที่ระดับความสูง 38.50 ครั้งที่ 1

สดมภ์ที่/ แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	53.0	38.2	66.0	43.5	45.0	58.9	38.7	47.6	60.6
2	40.1	54.0	78.5	67.2	47.7	43.3	42.2	52.5	67.7
3	39.0	44.0	67.4	62.0	47.0	40.5	39.6	65.9	71.3
4	41.4	44.5	53.5	54.5	41.4	35.9	32.0	45.3	57.3
5	38.9	44.1	60.1	44.3	33.8	40.6	46.2	61.6	68.2
6	33.0	55.0	36.7	40.5	47.2	60.1	38.8	62.0	34.5
7	41.7	60.7	49.3	43.9	56.3	57.9	37.9	43.9	60.8
8	51.8	47.5	60.3	59.5	85.6	72.6	35.6	36.5	58.4
9	33.2	32.3	41.6	55.5	46.6	42.3	32.4	42.2	91.7
10	33.9	35.3	32.3	37.7	38.7	37.5	35.1	36.6	71.6
11	40.3	42.1	32.5	31.0	49.4	46.2	34.0	37.6	49.5
12	48.3	53.0	48.5	39.0	46.6	38.2	32.5	36.6	43.7

ตารางที่ ก14 ค่าอุณหภูมิของน้ำของแต่ละแถวที่ระดับความสูง 38.50 ครั้งที่ 2

สดมภ์/ แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	52.5	39.3	36.7	42.5	48.6	42.6	68.4	62.0	61.4
2	40.5	38.1	53.8	53.3	52.8	47.1	57.6	58.4	68.9
3	37.5	39.8	74.1	60.9	51.4	57.5	34.6	38.6	71.9
4	42.5	49.8	78.4	62.9	53.6	54.3	48.4	45.6	45.5
5	34.7	38.7	53.5	54.1	42.6	40.2	45.1	62.4	61.2
6	35.0	52.4	38.1	58.9	62.0	65.9	49.3	73.6	38.7
7	59.1	53.8	41.1	66.5	70.8	75.2	54.5	77.6	62.6
8	43.5	66.2	37.6	60.0	64.2	66.2	56.3	66.1	55.8
9	31.4	33.4	45.8	47.1	48.1	70.4	53.3	52.1	59.8
10	38.4	38.9	31.5	48.1	42.9	52.8	48.5	56.9	61.5
11	37.6	43.7	31.5	45.8	52.8	40.1	56.2	53.2	60.0
12	36.6	60.1	66.7	39.0	35.7	30.1	45.5	45.9	52.2

ตารางที่ ก15 ค่าอุณหภูมิของน้ำของแต่ละแถวที่ระดับความสูง 38.50 ครั้งที่ 3

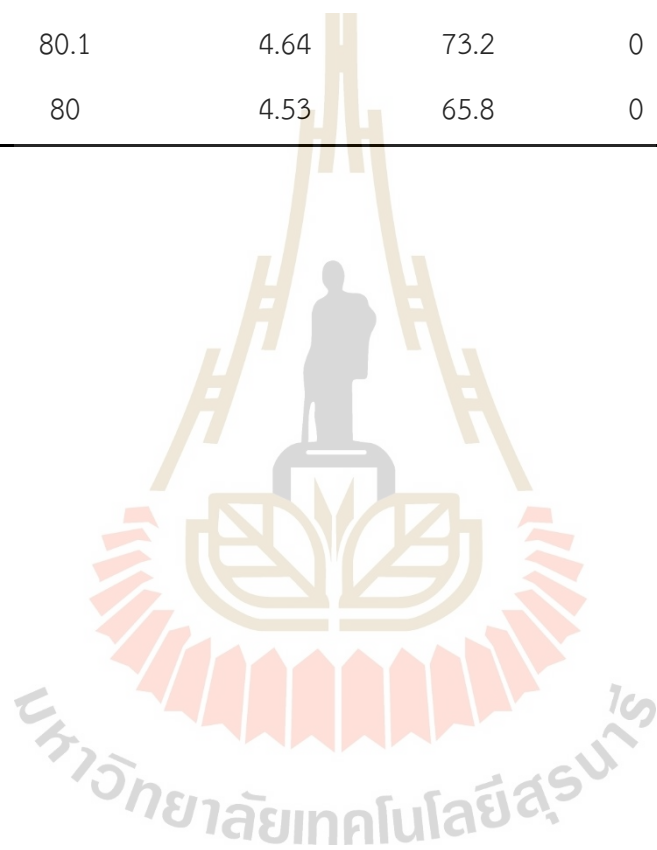
สดมภ์/ แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	45.7	49.4	37.7	60.1	57.7	39.9	59.0	55.9	69.0
2	41.0	50.4	40.8	83.9	45.7	54.2	63.1	65.9	56.9
3	52.7	56.5	53.2	68.9	61.0	49.9	58.2	53.4	62.3
4	49.2	63.7	53.3	61.0	52.1	59.9	58.3	54.8	70.5
5	37.3	57.6	49.0	49.4	40.4	50.2	43.2	98.1	69.8
6	39.0	54.2	47.5	58.9	58.1	42.6	40.3	51.0	47.1
7	45.2	70.2	50.8	75.0	58.4	61.1	52.5	62.9	78.5
8	55.0	45.1	62.8	74.3	62.3	55.3	42.4	52.7	54.3
9	25.8	44.0	56.2	78.5	66.3	59.8	45.2	60.1	54.3
10	37.9	40.2	40.1	64.8	50.0	48.4	41.6	64.4	55.2
11	36.4	32.4	31.8	67.8	67.4	34.7	50.2	52.6	43.0
12	47.7	52.7	65.8	34.7	45.6	52.1	33.6	55.6	59.0

ตารางที่ ก16 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์
ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.62 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง:
79.5°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 35.8°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.02	23.66	31.3	1	0
5	94.37	19.06	64.6	0.72	130
10	90.42	15.53	67.6	0.52	215
15	87.91	13.12	66.1	0.4	299
20	86.24	11.43	67.9	0.31	379
25	85.09	10.24	71.1	0.25	463
30	84.24	9.33	69.5	0.21	544
35	83.58	8.61	71.3	0.18	630
40	83.06	8.04	67.8	0.15	714
45	82.65	7.59	64.2	0.13	800
50	82.27	7.16	70.3	0.11	888
55	81.97	6.82	64.3	0.1	978
60	81.72	6.53	66.1	0.09	1,065
65	81.45	6.22	73.6	0.07	1,156
70	81.3	6.05	68.9	0.06	1,242
75	81.12	5.84	70.1	0.06	1,329
80	80.95	5.65	73.8	0.05	1,419
85	80.8	5.47	73	0.04	1,511
90	80.7	5.35	65.9	0.03	1,600
95	80.52	5.14	67.3	0.03	1,724

ตารางที่ ก17 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์
ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T_{paddy}	MR	Power (Wh)
100	80.39	4.99	67.5	0.02	1,819
105	80.3	4.88	72	0.01	1,906
110	80.19	4.75	67.7	0.01	1,987
115	80.1	4.64	73.2	0	2,076
120	80	4.53	65.8	0	2,164



ตารางที่ ก17 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.58 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 78.3°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 34.8°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.36	22.90	31.10	1.00	0.00
5	95.25	18.75	65.40	0.74	120.00
10	91.56	15.48	66.00	0.54	200.00
15	88.88	12.93	71.50	0.41	282.00
20	87.17	11.22	71.40	0.32	370.00
25	86.01	10.02	73.20	0.26	451.00
30	85.11	9.07	73.60	0.21	534.00
35	84.43	8.34	72.70	0.18	615.00
40	83.93	7.79	74.30	0.15	697.00
45	83.52	7.34	73.60	0.13	783.00
50	83.19	6.97	71.30	0.11	867.00
55	82.88	6.62	73.80	0.10	955.00
60	82.61	6.32	73.60	0.08	1,038.00
65	82.35	6.02	72.50	0.07	1,125.00
70	82.20	5.85	72.30	0.06	1,204.00
75	82.00	5.62	72.70	0.05	1,291.00
80	81.86	5.46	72.80	0.04	1,373.00
85	81.69	5.26	73.10	0.03	1,456.00
90	81.59	5.15	73.40	0.03	1,543.00
95	81.45	4.98	72.40	0.02	1,625.00
100	81.35	4.87	73.90	0.02	1,709.00

ตารางที่ ก17 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์
ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	81.25	4.75	72.90	0.01	1,796.00
110	81.14	4.62	73.20	0.01	1,885.00
115	81.07	4.54	73.00	0.00	1,966.00
120	81.02	4.48	71.90	0.00	2,054.00

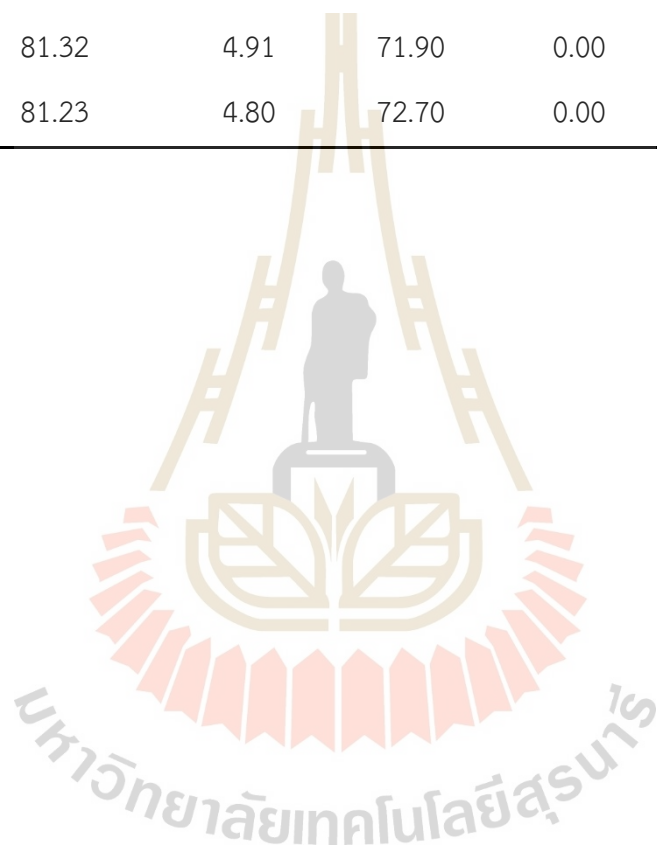


ตารางที่ ก18 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์
ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.51 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง:
78.1°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 35.7°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.14	22.79	31.40	1.00	0.00
5	94.52	18.19	65.60	0.70	120.00
10	91.00	15.02	70.20	0.52	200.00
15	88.51	12.63	71.30	0.38	282.00
20	86.96	11.07	72.20	0.30	370.00
25	85.96	10.04	73.00	0.25	451.00
30	85.18	9.22	72.80	0.21	534.00
35	84.56	8.55	73.00	0.18	615.00
40	84.06	8.01	73.50	0.15	697.00
45	83.66	7.57	74.00	0.13	783.00
50	83.33	7.20	72.90	0.11	867.00
55	83.05	6.89	73.90	0.10	955.00
60	82.79	6.59	72.30	0.08	1,038.00
65	82.58	6.36	73.70	0.07	1,125.00
70	82.37	6.12	73.70	0.06	1,204.00
75	82.22	5.95	73.70	0.05	1,291.00
80	82.06	5.76	73.10	0.04	1,373.00
85	81.92	5.60	73.50	0.04	1,456.00
90	81.82	5.49	73.50	0.03	1,543.00
95	81.69	5.34	73.80	0.02	1,625.00

ตารางที่ ก18 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์
ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
100	81.59	5.22	73.60	0.02	1,709.00
105	81.49	5.10	73.60	0.01	1,796.00
110	81.39	4.99	72.90	0.01	1,885.00
115	81.32	4.91	71.90	0.00	1,966.00
120	81.23	4.80	72.70	0.00	2,054.00



ตารางที่ ก19 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวพระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.55 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 78.5°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 35.4°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.67	22.56	31.30	1.00	0.00
5	94.54	17.54	69.50	0.69	135.00
10	90.26	13.63	74.30	0.47	236.00
15	87.92	11.33	74.50	0.35	326.00
20	86.49	9.87	74.70	0.28	414.00
25	85.50	8.82	74.50	0.23	504.00
30	84.79	8.06	73.80	0.19	583.00
35	84.23	7.45	76.50	0.16	674.00
40	83.78	6.95	75.30	0.14	764.00
45	83.34	6.46	75.40	0.12	854.00
50	83.01	6.09	73.30	0.10	946.00
55	82.71	5.75	75.70	0.09	1,037.00
60	82.45	5.45	76.20	0.07	1,126.00
65	82.24	5.21	75.20	0.06	1,219.00
70	82.05	4.99	74.30	0.05	1,310.00
75	81.90	4.81	74.10	0.04	1,402.00
80	81.75	4.64	75.70	0.04	1,495.00
85	81.60	4.46	75.80	0.03	1,586.00
90	81.51	4.36	74.90	0.02	1,674.00
95	81.47	4.31	74.10	0.02	1,768.00
100	81.34	4.16	73.20	0.02	1,863.00

ตารางที่ ก19 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือก
ที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	81.23	4.03	72.90	0.01	1,953.00
110	81.17	3.96	74.00	0.01	2,046.00
115	81.12	3.90	74.70	0.01	2,136.00
120	81.02	3.78	75.60	0.00	2,228.00



ตารางที่ ก20 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.4 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 79.1°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 33.8°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.12	23.38	31.10	1.00	0.00
5	94.13	18.50	67.50	0.70	141.00
10	89.56	14.34	71.90	0.48	252.00
15	87.21	12.03	78.10	0.36	352.00
20	85.67	10.45	78.40	0.28	448.00
25	84.61	9.33	78.10	0.23	546.00
30	83.80	8.45	76.70	0.19	643.00
35	83.18	7.77	76.90	0.16	739.00
40	82.67	7.20	78.10	0.13	837.00
45	82.26	6.74	77.90	0.11	922.90
50	81.94	6.37	77.20	0.10	1,010.20
55	81.66	6.05	76.50	0.08	1,096.50
60	81.42	5.77	78.00	0.07	1,185.00
65	81.26	5.59	75.70	0.06	1,259.70
70	81.04	5.33	78.40	0.05	1,353.40
75	80.87	5.13	77.80	0.05	1,509.00
80	80.73	4.97	76.50	0.04	1,607.00
85	80.61	4.83	73.80	0.03	1,702.00
90	80.51	4.71	76.10	0.03	1,802.00
95	80.40	4.58	79.00	0.02	1,897.00
100	80.28	4.43	76.60	0.02	1,998.00

ตารางที่ ก20 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือก
ที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	80.21	4.35	75.90	0.01	2,094.00
110	80.11	4.23	75.00	0.01	2,193.00
115	80.04	4.15	75.70	0.00	2,290.00
120	79.95	4.04	76.10	0.00	2,386.00



ตารางที่ ก21 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวพระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.63 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 77.1°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 33.3°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.50	23.23	31.40	1.00	0.00
5	94.00	17.95	66.50	0.68	133.00
10	89.88	14.19	75.20	0.47	229.00
15	87.37	11.73	75.30	0.34	329.00
20	85.95	10.27	78.50	0.27	432.00
25	84.98	9.25	76.60	0.22	530.00
30	84.23	8.44	75.80	0.19	627.00
35	83.68	7.84	76.10	0.16	723.00
40	83.22	7.33	76.60	0.14	821.00
45	82.84	6.90	77.80	0.12	916.00
50	82.51	6.53	73.40	0.10	1,013.00
55	82.26	6.24	75.40	0.09	1,106.00
60	82.03	5.98	74.90	0.08	1,202.00
65	81.83	5.75	75.80	0.07	1,298.00
70	81.66	5.56	76.60	0.06	1,393.00
75	81.48	5.35	75.20	0.05	1,488.00
80	81.34	5.18	74.60	0.04	1,582.00
85	81.20	5.02	74.30	0.04	1,680.00
90	81.06	4.86	77.10	0.03	1,776.00
95	80.98	4.76	75.60	0.02	1,872.00
100	80.87	4.63	76.00	0.02	1,969.00

ตารางที่ ก21 ผลการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวพระดับหนึ่ง
ข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	80.78	4.53	76.40	0.01	2,070.00
110	80.69	4.42	74.30	0.01	2,162.00
115	80.55	4.25	75.70	0.00	2,252.00
120	80.48	4.17	76.20	0.00	2,342.00



ตารางที่ ก22 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.63 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 32.5°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 27.3°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.15	22.91	31.10	1.00	0.00
5	97.54	20.85	41.00	0.78	27.00
10	96.52	20.02	40.30	0.70	54.00
15	95.79	19.41	41.80	0.64	81.00
20	95.13	18.85	40.50	0.58	108.00
25	94.64	18.43	40.70	0.54	135.00
30	94.09	17.95	40.50	0.49	155.00
35	93.67	17.58	39.10	0.46	190.00
40	93.30	17.26	38.90	0.43	217.00
45	92.91	16.91	41.40	0.40	243.00
50	92.55	16.59	39.90	0.37	270.00
55	92.21	16.28	39.10	0.34	297.00
60	91.83	15.93	41.60	0.31	326.00
65	91.54	15.67	39.50	0.28	353.00
70	91.24	15.39	39.10	0.26	380.00
75	90.97	15.14	40.20	0.23	408.00
80	90.76	14.94	40.60	0.22	435.00
85	90.55	14.74	39.40	0.20	462.00
90	90.34	14.55	38.70	0.18	489.00
95	90.11	14.33	39.60	0.16	516.00

ตารางที่ ก22 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวพระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มี
ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
100	89.89	14.12	40.00	0.14	544.00
105	89.71	13.94	38.50	0.13	571.00
110	89.51	13.75	42.20	0.11	600.00
115	89.31	13.56	40.30	0.10	629.00
120	89.14	13.39	39.90	0.08	657.00
125	88.98	13.24	40.50	0.07	686.00
130	88.80	13.06	41.50	0.05	713.00
135	88.66	12.93	40.00	0.04	740.00
140	88.54	12.81	38.80	0.03	769.00
145	88.42	12.69	37.80	0.02	796.00
150	88.31	12.58	38.80	0.01	824.00
155	88.17	12.44	39.60	0.00	852.00
160	88.15	12.42	38.60	0.00	880.00

ตารางที่ ก23 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.29 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 31.5°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 26.0°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.07	23.44	32.4	1.00	0.00
5	96.75	20.82	43.3	0.73	27.00
10	95.72	19.96	40.2	0.64	54.00
15	95.05	19.40	38.7	0.58	79.00
20	94.54	18.97	42.1	0.54	106.00
25	94.07	18.56	38.7	0.50	133.00
30	93.67	18.21	35.3	0.47	160.00
35	93.35	17.93	37.5	0.44	187.00
40	92.95	17.58	38.2	0.41	214.00
45	92.63	17.29	37.8	0.38	242.00
50	92.27	16.97	41.1	0.35	271.00
55	91.98	16.71	39.1	0.33	296.00
60	91.70	16.46	38	0.31	323.00
65	91.48	16.25	37.2	0.29	349.00
70	91.24	16.03	37.3	0.27	375.00
75	91.01	15.82	38.1	0.25	401.00
80	90.77	15.60	37.7	0.23	429.00
85	90.55	15.39	37.6	0.21	456.00
90	90.34	15.20	37.2	0.20	483.00
95	90.16	15.03	37.1	0.18	509.00
100	89.95	14.83	41.6	0.16	537.00

ตารางที่ ก23 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มี
ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	89.76	14.65	41.6	0.15	564.00
110	89.57	14.47	38.2	0.13	592.00
115	89.37	14.28	38.6	0.11	620.00
120	89.20	14.11	38.6	0.10	647.00
125	89.05	13.97	38.2	0.09	675.00
130	88.89	13.81	36.9	0.08	702.00
135	88.69	13.62	38.1	0.06	730.00
140	88.50	13.44	40.3	0.04	758.00
145	88.25	13.19	39.8	0.02	786.00
150	88.23	13.17	39.2	0.02	813.00
155	88.11	13.05	39.2	0.01	842.00
160	87.98	12.92	38.5	0.00	870.00

ตารางที่ ก24 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.32 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 32.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 26.8°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.60	23.3946	31.1	1.00	0.00
5	98.77	21.9702	36	0.86	27.00
10	97.59	21.0267	39.7	0.76	55.00
15	96.72	20.3164	38.6	0.69	82.00
20	96.00	19.7188	38.5	0.64	109.00
25	95.39	19.2054	39.5	0.59	138.00
30	94.82	18.7197	41	0.54	165.00
35	94.28	18.2541	39.6	0.50	194.00
40	93.80	17.8358	39.5	0.46	222.00
45	93.34	17.4309	39.5	0.43	250.00
50	92.90	17.0398	39.7	0.39	279.00
55	92.54	16.7171	38.5	0.36	308.00
60	92.22	16.4281	40.2	0.34	336.00
65	91.90	16.1371	38.9	0.31	363.00
70	91.53	15.7981	41.1	0.28	393.00
75	91.26	15.549	39.7	0.26	422.00
80	90.97	15.2798	38.7	0.24	449.00
85	90.70	15.0276	37.8	0.22	483.00
90	90.43	14.7739	37.5	0.20	505.00
95	90.23	14.5849	37.9	0.18	532.00
100	89.99	14.3572	40.3	0.16	560.00

ตารางที่ ก24 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งข้าวเปลือกที่มี
ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	89.78	14.1568	39.7	0.15	588.00
110	89.59	13.9748	38.5	0.13	615.00
115	89.42	13.8112	38.2	0.12	642.00
120	89.20	13.5987	39.3	0.10	675.00
125	89.03	13.4337	38.7	0.09	703.00
130	88.88	13.2876	39.5	0.08	731.00
135	88.68	13.092	37.1	0.06	761.00
140	88.52	12.9349	39.9	0.05	790.00
145	88.33	12.7477	39.9	0.03	817.00
150	88.19	12.6091	38.2	0.02	845.00
155	88.08	12.5	38.7	0.01	874.00
160	87.92	12.3408	38.6	0.00	901.00

ตารางที่ ก25 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.29 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 34.8°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 27.8°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.52	22.61	32.50	1.00	0.00
5	97.64	20.34	49.90	0.81	50.00
10	96.07	19.04	53.00	0.70	100.00
15	94.77	17.93	51.30	0.61	149.00
20	93.77	17.05	50.00	0.55	198.00
25	92.86	16.24	49.70	0.49	246.00
30	92.03	15.48	49.00	0.43	295.00
35	91.34	14.85	48.00	0.38	344.00
40	90.74	14.28	47.70	0.34	392.00
45	90.12	13.69	49.10	0.30	440.00
50	89.62	13.21	59.00	0.27	489.00
55	89.08	12.69	54.00	0.23	537.00
60	88.71	12.32	53.60	0.21	584.00
65	88.29	11.90	52.20	0.18	631.00
70	87.94	11.55	48.30	0.16	678.00
75	87.67	11.28	46.70	0.14	726.00
80	87.39	11.00	49.90	0.12	777.00
85	87.13	10.73	51.20	0.10	825.00
90	86.89	10.48	49.50	0.09	873.00
95	86.71	10.30	49.70	0.07	920.00
100	86.53	10.11	45.30	0.06	968.00

ตารางที่ ก25 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มี
ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	86.36	9.94	46.40	0.05	1016.00
110	86.25	9.82	45.20	0.04	1064.00
115	86.13	9.69	46.90	0.03	1112.00
120	86.00	9.56	46.20	0.03	1160.00
125	85.88	9.43	49.90	0.02	1206.00
130	85.77	9.32	48.70	0.01	1254.00
135	85.69	9.23	45.80	0.01	1301.00
140	85.61	9.15	40.90	0.00	1349.00

ตารางที่ ก26 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.29 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 34.6°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 27.4°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.20	23.62	31.20	1.00	0.00
5	97.13	21.24	46.40	0.80	52.00
10	95.66	20.03	48.60	0.70	97.00
15	94.47	19.02	50.80	0.62	148.00
20	93.37	18.07	46.90	0.55	198.00
25	92.46	17.26	46.10	0.49	247.00
30	91.56	16.45	49.10	0.43	298.00
35	90.77	15.72	45.20	0.38	348.00
40	90.15	15.14	46.30	0.34	396.00
45	89.46	14.49	46.60	0.29	446.00
50	88.93	13.98	43.00	0.26	495.00
55	88.43	13.49	45.00	0.23	545.00
60	88.04	13.11	46.30	0.20	593.00
65	87.70	12.77	46.50	0.18	642.00
70	87.38	12.45	43.80	0.16	690.00
75	87.07	12.14	50.30	0.14	738.00
80	86.79	11.86	53.00	0.12	787.00
85	86.55	11.61	49.00	0.10	834.00
90	86.26	11.31	44.50	0.08	882.00
95	86.07	11.12	46.80	0.07	930.00
100	85.91	10.95	46.60	0.06	978.00

ตารางที่ ก26 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มี
ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	85.76	10.80	45.60	0.05	1026.00
110	85.62	10.65	41.70	0.04	1074.00
115	85.54	10.57	42.80	0.04	1121.00
120	85.45	10.47	42.50	0.03	1170.00
125	85.28	10.30	48.90	0.02	1219.00
130	85.14	10.15	45.90	0.01	1268.00
135	85.07	10.07	45.20	0.01	1318.00
140	84.99	9.99	42.40	0.00	1364.00

ตารางที่ ก27 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (เงื่อนไข: ความเร็วอากาศ: 7.42 m/s อุณหภูมิของกระเปาะแห้ง: 34.4°C อุณหภูมิกระเปาะเปียก: 27.2°C)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
0	100.35	23.14	32.30	1.00	0.00
5	97.46	20.85	40.50	0.81	47.00
10	95.92	19.58	42.70	0.71	95.00
15	94.85	18.68	44.40	0.64	143.00
20	93.93	17.88	48.00	0.58	191.00
25	93.10	17.15	47.50	0.52	238.00
30	92.26	16.39	46.40	0.47	286.00
35	91.59	15.78	45.20	0.43	335.00
40	90.97	15.21	45.20	0.38	384.00
45	90.42	14.69	45.10	0.35	432.00
50	89.89	14.19	45.20	0.31	482.00
55	89.34	13.66	46.20	0.28	531.00
60	88.88	13.21	49.70	0.25	579.00
65	88.41	12.75	49.00	0.22	628.00
70	88.04	12.39	46.70	0.19	676.00
75	87.65	12.00	51.00	0.17	724.00
80	87.37	11.71	45.00	0.15	773.00
85	87.11	11.45	45.30	0.13	822.00
90	86.84	11.17	43.60	0.11	870.00
95	86.65	10.98	44.80	0.10	919.00
100	86.41	10.73	47.10	0.09	969.00

ตารางที่ ก27 ผลการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟระดับสองข้าวเปลือกที่มี
ความชื้น 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 3 (ต่อ)

Time (min)	Paddy Mass (g)	Moisture (%wb)	T _{paddy} (°C)	MR	Power (Wh)
105	86.23	10.55	48.70	0.07	1018.00
110	86.04	10.35	46.10	0.06	1066.00
115	85.81	10.11	47.50	0.05	1116.00
120	85.62	9.91	45.80	0.03	1165.00
125	85.42	9.70	50.20	0.02	1214.00
130	85.30	9.57	45.20	0.01	1263.00
135	85.19	9.45	43.20	0.01	1312.00
140	85.10	9.36	45.20	0.00	1362.00

ตารางที่ ก28 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส

NO	MC _{final} (%wb)	W _{paddy} (g)	W _{milling} (g)	W _{polishing} (g)	W _{head rice} (g)	W _{broken rice} (g)	HRY (%)	WI
1.00	13.20	88.71	65.47	34.19	11.88	22.84	13.39	39.20
2.00	12.98	89.65	66.17	34.55	12.00	23.08	13.39	38.10
3.00	12.63	87.93	64.90	33.89	11.77	22.64	13.39	38.60
Average	12.94	88.76	65.51	34.21	11.88	22.86	13.39	38.63

ตารางที่ ก29 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟ

ระดับหนึ่ง

NO	MC _{final} (%wb)	W _{paddy} (g)	W _{milling} (g)	W _{polishing} (g)	W _{head rice} (g)	W _{broken rice} (g)	HRY (%)	WI
1.00	13.63	90.42	55.66	26.87	1.95	24.81	2.15	35.10
2.00	14.33	90.48	55.70	26.89	1.95	24.83	2.15	35.60
3.00	14.19	90.23	55.54	26.81	1.94	24.76	2.15	35.10
Average	14.05	90.38	55.63	26.86	1.94	24.80	2.15	35.27

ตารางที่ ก30 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟ

ระดับหนึ่ง

NO	MC _{final} (%wb)	W _{paddy} (g)	W _{milling} (g)	W _{polishing} (g)	W _{head rice} (g)	W _{broken rice} (g)	HRY (%)	WI
1.00	13.75	90.42	63.70	50.41	34.20	16.10	37.82	43.10
2.00	14.46	90.48	64.08	50.71	34.40	16.20	38.02	43.50
3.00	13.97	90.23	64.33	50.91	34.54	16.26	38.28	42.90
Average	14.05	90.38	64.04	50.68	34.38	16.19	38.04	43.17

ตารางที่ ก31 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อมร่วมกับไมโครเวฟ
ระดับสอง

N0	MC _{final} (%wb)	W _{paddy} (g)	W _{milling} (g)	W _{polishing} (g)	W _{head rice} (g)	W _{broken rice} (g)	HRY (%)	WI
1.00	13.63	90.42	63.92	47.64	23.19	23.88	25.64	41.70
2.00	14.33	90.48	64.26	47.90	23.31	24.01	25.76	41.60
3.00	14.19	90.23	64.97	48.42	23.57	24.27	26.12	41.10
Average	14.05	90.38	64.39	47.99	23.36	24.05	25.84	41.47

ตารางที่ ก32 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยอากาศสภาพแวดล้อม(ชุดควบคุม)

N0	MC _{final} (%wb)	W _{paddy} (g)	W _{milling} (g)	W _{polishing} (g)	W _{head rice} (g)	W _{broken rice} (g)	HRY (%)	WI
1.00	12.39	89.31	62.64	51.65	36.49	15.16	40.86	43.70
2.00	13.36	90.28	62.61	51.63	36.48	15.15	40.41	43.10
3.00	12.40	89.72	62.93	51.89	36.67	15.23	40.87	43.10
Average	12.72	89.77	62.73	51.73	36.55	15.18	40.71	43.30



ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณในอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและ อากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก

1.1 การคำนวณปริมาณที่ต้องเติมเข้าไปเพื่อกำหนดความชื้นในข้าวเปลือก

จากบทที่ 3 ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกจะอยู่ที่ 11.72 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก หาก
ต้องกำหนดความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ในข้าวเปลือกปริมาณ 1.5 กิโลกรัม จะต้องเติมน้ำ
เข้าไปทั้งหมดคือ

$$W_2 = W_1 \times \left[\frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \right]$$

$$W_2 = 1.5 \times \left[\frac{26 - 11.72}{100 - 26} \right]$$

$$W_2 = 0.289 \text{ kg}$$

ต้องเติมน้ำเข้าไปทั้งหมด 0.289 กิโลกรัม เพื่อที่จะได้ข้าวที่มีความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

1.2 การคำนวณค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความ กลม

จากตารางที่ ก1 เมล็ดที่ 1 ของความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ตามฐานเปียกมีความกว้าง
ความยาว และความหนา 9.85 2.39 และ 2.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะสามารถคำนวณค่า
เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมได้โดย

$$D = (LWT)^{\frac{1}{3}}$$

$$D = (9.85 \times 2.39 \times 2.02)^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 3.622 \text{ mm}$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L \times 100}$$

$$\phi = \frac{(9.85 \times 2.39 \times 2.02)^{\frac{1}{3}}}{9.85 \times 100}$$

$$\phi = 36.78$$

ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีค่าเท่ากับ 3.622 มิลลิเมตร ค่าระดับความกลมมีค่าเท่ากับ 36.78

1.3 การคำนวณค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ค่าความพรุนและค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ด

จากตารางที่ 6 ความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 ปริมาตรของภาชนะบรรจุมีค่าเท่ากับ 8.1439×10^{-5} ลูกบาศก์เมตร และน้ำหนักของข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 0.04339 กิโลกรัม

$$\rho_b = \frac{W_g}{V_g}$$

$$\rho_b = \frac{0.04339}{8.1439 \times 10^{-5}}$$

$$\rho_b = 532.79 \text{ kg/m}^3$$

ค่าความดันที่วาล์วหนึ่งอ่านได้ 55 kPa ค่าความดันที่วาล์วที่สองอ่านได้ 26.5 kPa จะสามารถคำนวณค่าความพรุนของกองเมล็ดได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{55 - 26.5}{26.5} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 51.82 \%$$

การที่ได้ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนมาได้นั้นจะสามารถหาค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดได้ดังนี้

$$\rho_k = \frac{\rho_b}{\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)}$$

$$\rho_k = \frac{532}{\left(1 - \frac{51.82}{100}\right)}$$

$$\rho_k = 1105.79 \text{ kg / m}^3$$

1.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหล

จากตารางที่ ก7 ความชื้นที่ 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ครั้งที่ 1 มวลของเมล็ดมีค่าเท่ากับ 0.0246 กิโลกรัม มีค่า frontal area มีค่าเท่ากับ 1.848×10^{-5} ตารางเมตร ความหนาแน่นของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.087 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความเร็วสุดท้ายเท่ากับ 4.7 เมตรต่อวินาที

$$C_d = \frac{2Mg}{\rho_A A_f V_t^2}$$

$$C_d = \frac{2 \times 0.0246 \times 9.81}{1.087 \times 1.848 \times 10^{-5} \times 4.7^2}$$

$$C_d = 0.96$$

2. การคำนวณในพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุและการประเมินคุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้ง

2.1 การคำนวณความชื้นวัสดุที่เวลาใด ๆ

จากตารางที่ ก16 วัสดุมีความชื้นเริ่มต้นที่ 23.60 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีมวลทั้งหมด 100.12 กรัม มีมวลแห้งทั้งหมด 76.38 กรัม ที่เวลา 5 นาที มวลทั้งหมดเหลือ 94.37 กรัม ซึ่งจะสามารถคำนวณความชื้น ณ เวลาดังกล่าวได้โดย

$$M_w = \frac{(W - d)}{W} \times 100\%$$

$$M_w = \frac{(94.37 - 76.86)}{94.37} \times 100\%$$

$$M_w = 19.06 \%$$

2.2 การคำนวณอัตราส่วนความชื้น

จากตารางที่ ก16 ความชื้นสมดุลเท่ากับ 4.48 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 23.66 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกที่เวลา 5 นาที ความชื้นมีค่าเท่ากับ 19.06 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ดังนั้นจะสามารถคำนวณอัตราส่วนความชื้นได้ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}}$$

$$MR = \frac{19.06 - 4.48}{23.66 - 4.48}$$

$$MR = 0.74$$

2.3 อัตราการอบแห้ง

จากตารางที่ ก27 เวลาที่ 5 นาที น้ำหนักของข้าวเปลือกเท่ากับ 97.46 กรัม และเวลาที่ 10 นาที น้ำหนักของข้าวเปลือกเท่ากับ 95.92 กรัม จะสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้งที่เวลาดังกล่าวได้โดย

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t}$$

$$DR = \frac{97.46 - 95.92}{5}$$

$$DR = 0.308 \frac{\text{g}_{H_2O}}{\text{min}}$$

2.4 การคำนวณค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากตารางที่ ก27 เวลาที่ 5 นาที น้ำหนักของข้าวเปลือกเท่ากับ 97.46 กรัม ค่าพลังงานที่อ่านได้ทั้งหมดเท่ากับ 47 Wh และเวลาที่ 10 นาที น้ำหนักของข้าวเปลือกเท่ากับ 95.92 กรัม ค่าพลังงานที่อ่านได้ทั้งหมดเท่ากับ 95 Wh จะสามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้งที่เวลาดังกล่าวได้โดย

$$SEC = \frac{P_2 - P_1}{W_2 - W_1}$$

$$SEC = \frac{(95 - 47) \times 3600}{(0.09746 - 0.09592)}$$

$$SEC = 112.2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{H_2O}}$$

2.5 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น

จากตารางที่ ก31 การทดลองครั้งที่ 1 จะได้น้ำหนักข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง 90.42 กรัมเมื่อนำไปกระเทาะแล้วจะได้ข้าวกล้องปริมาณ 63.92 กรัม ซึ่งนำมาขัดขาวได้ 47.64 กรัม นำมาแยกข้าวต้นและข้าวหัก 23.19 กรัม และ 23.88 กรัม ตามลำดับ สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นได้โดย

$$\%HRY = \frac{23.19}{90.42} \times 100\%$$

$$\%HRY = 25.64 \%$$





ภาคผนวก ค.

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวีตริ อำนรรค และ เทวรัตน์ ตริอำนรรค. (2564). **อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 22 , 10 - 14 พฤษภาคม 2564, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวีตริ อำนรรค และ เทวรัตน์ ตริอำนรรค. (2564). **สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105**. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 (2565). (รอออนไลน์)

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวีตริ อำนรรค และ เทวรัตน์ ตริอำนรรค. (2565). **การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารระดับครัวเรือน**. การประชุมวิชาการการถ่ายพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนกระบวนการ ครั้งที่ 14, 10 - 11 มีนาคม 2565, โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท จังหวัดเชียงใหม่



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



- 1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก
 2 Influence of Moisture Content on Physical and Aerodynamic Properties of Paddy
 3 ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน^{1*}, กระวี ศรีอำรรค¹, เทวรัตน์ ศรีอำรรค²
 4 Thamarat Yabsungnoen^{1*}, Krawee Treeamnu¹, Tawarat Treeamnu²

- 5 ¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000
 6 ²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 30000
 7 ³สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000
 8 ² School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 30000
 9 *Corresponding author: Tel: +66-8-4523-7632 E-mail: Thamavalesky@gmail.com

10 บทคัดย่อ

11 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอก
 12 มะลิ 105 ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่ ความกว้าง ความยาว ความหนา เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ระดับความกลม ความ
 13 หนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ด ความพรุน ความเร็วสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล ทำการทดสอบโดยแปรค่า
 14 ความชื้นตั้งแต่ 10% ถึง 26%wb ผลการศึกษาพบว่าอิทธิพลของความชื้นทำให้ความหนาและความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอก
 15 มะลิ 105 เพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความยาวลดลง ผลของความชื้นที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความ
 16 กลมเพิ่มขึ้น อิทธิพลของความชื้นนี้ทำให้ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้นแต่ค่าความพรุนลดลง การศึกษาสมบัติ
 17 ทางอากาศพลศาสตร์พบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นในข้าวเปลือกมีผลให้ค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการ
 18 ไหลลดลง

19 คำสำคัญ: คุณสมบัติอากาศพลศาสตร์, ข้าวเปลือก, ความจุความชื้น, คุณสมบัติทางกายภาพ

20 Abstract

21 The objective of this research was to study the influence of moisture content of paddy on physical and
 22 aerodynamic properties of Hom Mali cultivar (Kor khor 105). Width, thickness, Length, Geometric Mean Diameter
 23 (GMD), Degree of Sphericity (DOS), bulk density, kernel density, porosity, terminal velocity and drag coefficient of
 24 paddy are studied. Moisture content of paddy ranged from 10% to 26%wb are selected as a sample in this research.
 25 The results showed that the increasing of moisture content in paddy grain the width, thickness, GMD and DOS but
 26 decrease length increased. This influence also effects to increase bulk density, kernel density but decrease the
 27 porosity of paddy. For the aerodynamic properties, the moisted paddy influence on the trending up of terminal
 28 velocity but the drag coefficient was lessened.

29 Keywords: aerodynamic properties, moisture content, paddy, physical properties

30

31

1. บทนำ

ข้าวถือว่าเป็นอาหารที่คนไทยนิยมบริโภคมาช้านานและมี ส่วนเกี่ยวข้องกับประเพณีของไทย ซึ่งข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจ สำคัญของประเทศไทยที่ส่งออกไปยังต่างประเทศเป็นปริมาณถึง ปีละ 29 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562)

ในการพัฒนาเครื่องจักรกลหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก เรา จำเป็นจะต้องทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพและทางอากาศ

พลศาสตร์ของเมล็ดข้าวเปลือก ได้แก่ รูปร่าง ขนาด มวล ความ หนาแน่นเชิงกลุ่ม (Bulk Density) ความหนาแน่นเชิงเมล็ด

(Kernel Density) ความพรุนของเมล็ด (Porosity) และค่า สัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล (Drag Coefficient) ซึ่งคุณสมบัติ

เหล่านี้มีผลต่อการออกแบบเครื่องจักรกลทางเกษตรอย่างยิ่ง หาก ไม่พิจารณาคุณสมบัติเหล่านี้เครื่องจักรที่สร้างขึ้นใช้งานอาจทำให้

ได้ผลผลิตหลังการแปรรูปต่ำกว่าที่ควร ปัจจัยประการสำคัญที่ ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์คือ

ความชื้นในผลผลิต (Mohsenin, 1980) รูปร่างและขนาดของ เมล็ดถูกใช้ในการออกแบบเครื่องจักรคัดแยก ความหนาแน่นเชิง

กลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดและความพรุนของเมล็ดมีส่วนสำคัญ ในการออกแบบระบบเติมอากาศ (Aeration System) และระบบ

การเก็บผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว (Post- Harvest Process) ซึ่งความชื้นมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเหล่านี้

มาก (Kashaninejad et al., 2008; White and Jayas, 2001) และ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมผลิตข้าวเปลือก ในด้าน

คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ ได้แก่ ความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) และค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล (Drag

Coefficient) มีส่วนในการออกแบบระบบการไหลของอากาศและ ระบบแยกผลิตภัณฑ์ซึ่งรวมถึงการเลือกขนาดเครื่องเป่าลมด้วย

(Gupta et al., 2007) จากความสำคัญดังกล่าวข้างต้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อคุณสมบัติทาง กายภาพและทางอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ

105 โดยทำการทดสอบหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ค่าความกลม ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเมล็ด ความ

พรุนของเมล็ด ความเร็วสุดท้าย และค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการ ไหลของข้าวเปลือกที่มีค่าความชื้นแตกต่างกัน

2. อุปกรณ์และวิธีการ ในการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัด นครราชสีมา ประเทศไทย เก็บเกี่ยวเมื่อปีพุทธศักราช 2562 โดย

ทำการแยกวัสดุเจือปนรวมถึงเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ออกก่อน จากนั้น

ทำการหาความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยวิธี Oven drying method (ASABE, 1997) ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก สามารถคำนวณได้ตามฐานเปียก (Wet Basis, %W.B.) จาก สมการที่ (1)

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

โดย M_w คือเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก, w คือน้ำหนัก ของเมล็ดข้าวเปลือกตอนเริ่มต้น (g), d คือน้ำหนักแห้งของเมล็ด ข้าวเปลือกหลังอบ (g)

ทำการแปรค่าความชื้นของข้าวเปลือกออกเป็น 5 ระดับ คือ 10 14 18 22 และ 26 %wb โดยทำการเติมน้ำกลับสู่ข้าวเปลือก

(Rewet) ตามปริมาณน้ำซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) (ASABE, 1997) ด้วยวิธีการพันละองน้ำลงบนกองข้าวเปลือก จากนั้น

บรรจุข้าวเปลือกในถุงปิดผนึกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 10 วัน

$$W_2 = W_1 \times \frac{[M_1 - M_2]}{[100 - M_1]} \quad (2)$$

โดยที่ W_2 คือปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (g), W_1 คือน้ำหนัก ของกองเมล็ดที่ต้องการกำหนดความชื้นใหม่ (g), M_1 คือ

เปอร์เซ็นต์ความชื้นสุดท้ายฐานเปียกที่ต้องการ, M_2 คือ

เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก

ก่อนทำการทดสอบจะต้องนำข้าวเปลือกมาทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิ เท่ากับอุณหภูมิห้องก่อน (Kashaninejad et al., 2006) แล้วจึง

ทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของข้าวเปลือกที่แต่ละความชื้น ดังนี้

2.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและระดับค่าความ กลม (Geometric Mean Diameter, Degree of Sphericity)

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (D) และระดับความ กลม (ϕ) คำนวณด้วยสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

(Mohsenin, 1980) โดยทำการสุ่มเมล็ดข้าวจำนวน 50 เมล็ด ใน แต่ละความชื้น วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ด

ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ดิจิตอล (Digital Caliper Vernier Gauge 0-150 mm) ความละเอียด 0.01 mm

$$D = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L \times 100} \quad (4)$$

โดย L คือความยาวของเมล็ด (mm), W คือความกว้างของเมล็ด (mm), T คือความหนาของเมล็ด (mm)

2.2 ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Bulk density, Porosity and Kernel density)

ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (Bulk density, ρ_b , kg m^{-3}) หาได้จากผลหารระหว่างปริมาตรบรรจุข้าวเปลือกในภาชนะที่ทราบปริมาตรต่อน้ำหนัก โดยทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง ค่าความพรุนหาได้จากวิธีการแทนที่อากาศ และคำนวณค่าได้ตามสมการ (5)

$$\text{Porosity} = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100\% \quad (5)$$

โดย P_1 ความดันของอากาศก่อนการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุที่บรรจุเมล็ด (Pa), P_2 คือความดันของอากาศหลังการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ดที่บรรจุ (Pa) (Kocabiyyik, 2004)

เมื่อทราบค่าความพรุนของเมล็ดข้าวเปลือกแล้วจะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นเชิงเมล็ดได้ตามสมการ (6) (Mohsenin, 1980)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_b}\right) \times 100 \quad (6)$$

โดย ε คือค่าความพรุนของเมล็ด, ρ_s คือค่าความหนาแน่นของเมล็ด (kgm^{-3}) และ ρ_b คือค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มของเมล็ด (kgm^{-3})

2.3 ความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล (Terminal Velocity, Drag Coefficient)

ค่าความเร็วสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกทดสอบหาได้โดยการนำเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 50 เมล็ด วางไว้ที่ด้านล่างของท่อชุดทดสอบแรงลอยตัว (Fig. 1) จากนั้นทำการป้อนอากาศด้วยพัดลมผ่านฮีตเตอร์ให้มีอุณหภูมิประมาณ 60°C และเพิ่มความเร็วลมจนกระทั่งเมล็ดเริ่มลอยตัว วัดความเร็วลมด้วย Anemometer ความละเอียด 0.1 ms^{-1} ทำทั้งหมด 10 ซ้ำในแต่ละระดับความชื้นของเมล็ด โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อชุดทดสอบและความยาวท่อมีค่า 73 mm และ 410 mm ตามลำดับ

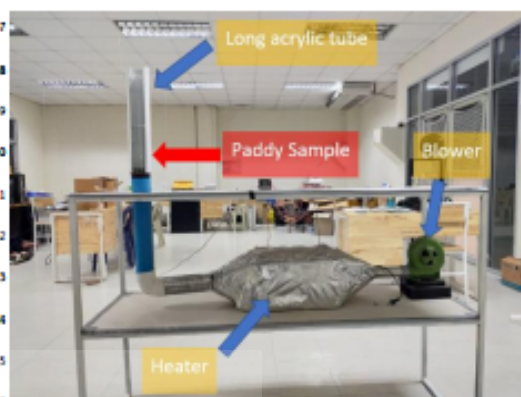


Figure 1 Terminal velocity apparatus

เมื่อทราบค่าความเร็วลมที่สามารถทำให้เมล็ดเริ่มลอยได้ ก็จะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลจากสมการ (7) (Mohsenin, 1980 และ Shellard and MacMillan, 1978)

$$M \times g = \frac{1}{2} A_f C_d V_t^2 \rho_a \quad (7)$$

โดย M คือมวลของเมล็ดข้าวเปลือก (kg), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 ms^{-2}), ρ_a คือความหนาแน่นของอากาศ (kgm^{-3}), C_d คือสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล, A_f คือพื้นที่หน้าตัดของเมล็ด (Frontal Area) (m^2)

ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าแปรตามความหนา รูปร่าง และความขรุขระของผิวของเมล็ดข้าวเปลือก (Gupta et al, 2007) ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลสามารถคำนวณได้จากสมการ (8)

$$C_d = \frac{2Mg}{\rho_a A_f V_t^2} \quad (8)$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (9)$$

ซึ่งค่า A_f คำนวณได้จากสมการที่ 9 โดย L_1 และ L_2 คือความยาวที่มากที่สุดสองลำดับแรกของเมล็ดข้าวเปลือก

3. ผลและวิจารณ์ 40

ขนาดของเมล็ดของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 41

จากรูปที่ 2 3 และ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น 42

ในเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 10 ถึง 26 43

%wb กับขนาดความยาว ความกว้าง และความหนาของเมล็ด 44

ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อ 45

ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 เพิ่มขึ้นจะทำให้ 46

ค่าเฉลี่ยความยาวของเมล็ดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ 47

ค่าเฉลี่ยความกว้างและความหนามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการ 48

ทดลองนี้มีบางส่วนสอดคล้องกับผลการทดลองในถั่วพิชตาซิโอ 49

(Kashaninejad et al.,2006) ถั่วเหลือง (Kashaninejad et 50

al.,2008) เมล็ดข้าวบาร์เลย์ (Sánchez-Mendoza et al.,2008) 51

เมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom 52

(Gharekhani et al.,2013) ผลของการเพิ่มขึ้นของความหนา 53

และความกว้างยังทำให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต 54

และค่าระดับความกลมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งการ 55

ลดลงของค่าความยาวไม่มีอิทธิพลเท่ากับการเพิ่มความหนาและ 56

ความกว้าง 57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

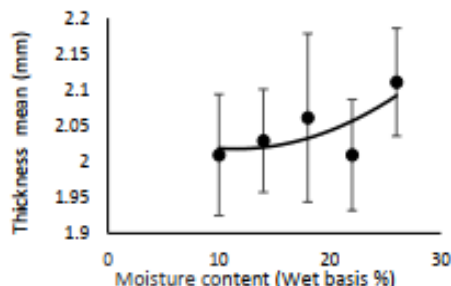


Figure 4 Influence of moisture on thickness of Hom Mali paddy

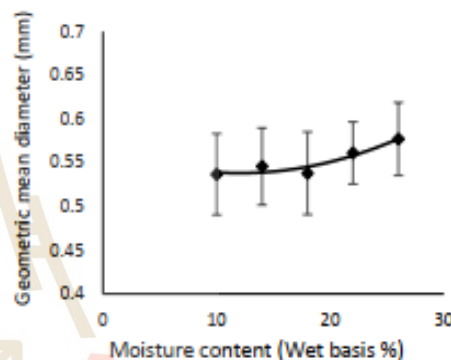


Figure 5 Influence of moisture on geometric mean diameter of Hom Mali paddy

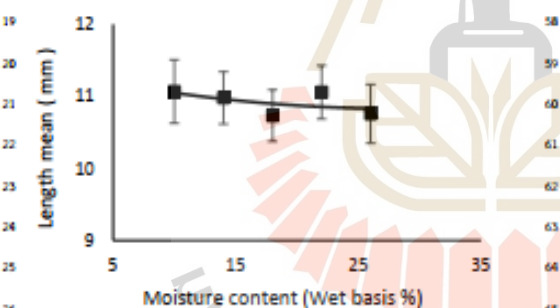


Figure 2 Influence of moisture on length of Hom Mali paddy

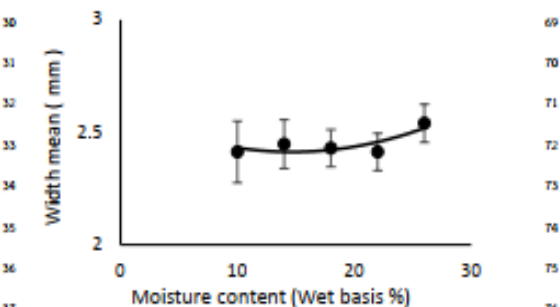


Figure 3 Influence of moisture on width of Hom Mali paddy

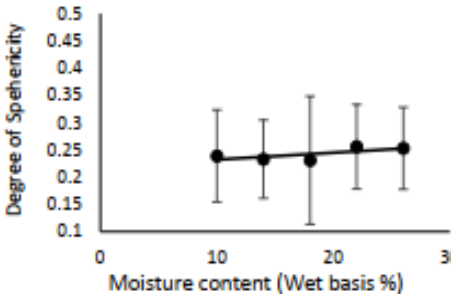
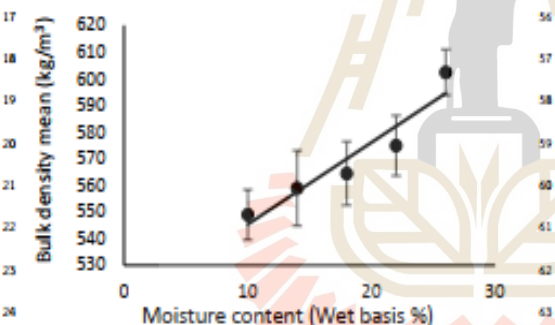


Figure 6 Influence of moisture on degree of sphericity of Hom Mali paddy

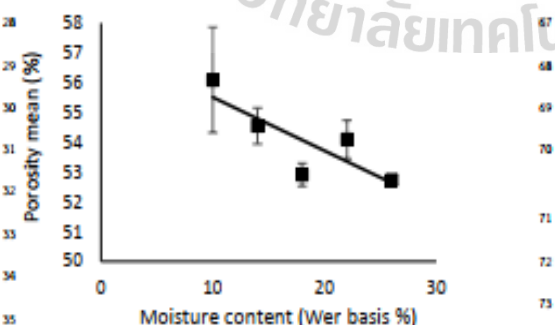
วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ xx ฉบับที่ x (xxxx), x-x

๑ ทดลองในข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom
 ๒ ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิง
 ๓ เมล็ด

๔ จากรูปที่ 7 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าความหนาแน่น
 ๕ เชิงกลุ่ม เมื่อปริมาณน้ำที่อยู่ในเมล็ดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความ
 ๖ หนาแน่นเชิงกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความ
 ๗ พรุนที่พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความพรุนของกองเมล็ด
 ๘ มีค่าลดลง (รูปที่ 8) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลกับการหดตัวของความ
 ๙ ยาวและการขยายขนาดของความหนาและความกว้างแต่เพราะ
 ๑๐ เป็นการขยายขนาดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงทำให้ความ
 ๑๑ หนาแน่นเชิงเมล็ดและเชิงกลุ่มมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่
 ๑๒ เพิ่มขึ้น การขยายตัวดังกล่าวนี้มีผลให้ช่องว่างระหว่างเมล็ดมีค่า
 ๑๓ ลดลงและส่งผลให้ค่าความพรุนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยดังแสดง
 ๑๔ ในรูปที่ 8 และเมื่อนำผลของค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความ
 ๑๕ พรุนไปคำนวณค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดพบว่าค่ามีการเพิ่มขึ้น
 ๑๖ เพียงเล็กน้อยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9

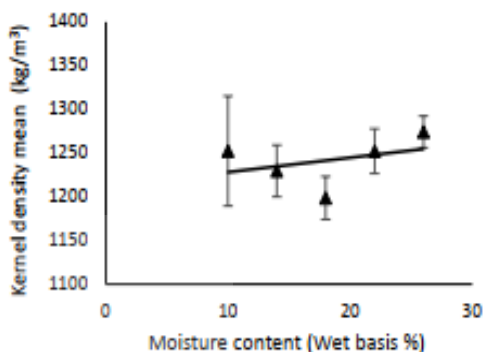


๒๕ Figure 7 Influence of moisture on bulk density of Hom
 ๒๖ Mali paddy



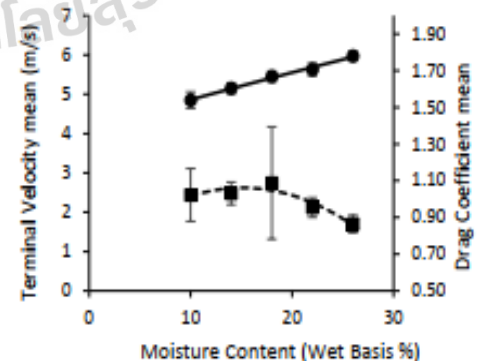
๓๖ Figure 8 Influence of moisture content on porosity of
 ๓๗ Hom Mali paddy

๓๘ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความ
 ๓๙ หนาแน่นเชิงเมล็ด และการลดลงของความพรุนนี้คล้ายกับผลการ



๕๒ Figure 9 Influence of moisture on kernel density of Hom
 ๕๓ Mali paddy

๕๔ ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล
 ๕๕ จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในเมล็ดกับ
 ๕๖ ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหล พบว่า
 ๕๗ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วสุดท้ายของเมล็ด
 ๕๘ ข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้าวมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและต้องการ
 ๕๙ ความเร็วลมที่ใช้ในการทำให้เมล็ดลอยตัวนั้นเพิ่มขึ้น และส่งผล
 ๖๐ ต่อเนื่องถึงค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลที่มีแนวโน้มลดลงตาม
 ๖๑ ค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากหากพิจารณาตามสมการที่ 8 ค่า
 ๖๒ ความเร็วลมมีอิทธิพลแบบทวีคูณในสมการ เมื่อเปรียบเทียบกับ
 ๖๓ ค่ามวลซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทาน
 ๖๔ การไหลลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองในเมล็ดข้าวเทพี
 ๖๕ (Zewdu,2007) และเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ
 ๖๖ Tarom (Gharekhani et al.,2013)



๗๓ Figure 10 Influence of moisture content on terminal
 ๗๔ velocity and Drag Coefficient of Hom Mali

- 1 paddy 39 Habib Kocabiyik, Tukan Aktaş and Birol Kayışğlu,
2 4. สรุป 40 2004. Porosity Rate of Some Kernel Crops. Journal of
3 การศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทาง 41 Agronomy 3(2): 76-80.
4 กายภาพของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ทำให้เราทราบว่า การ 42 Kashaninejad, M., Ahmadi, M., Daraei, A. and Chabra,
5 เพิ่มขึ้นของความชื้นในช่วง 10% ถึง 26%wb มีผลทำให้ขนาด 43 D., 2008. Handling and frictional characteristics of
6 ของความหนาและความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือกหอมขาวดอก 44 soybean as a function of moisture content and variety.
7 มะลิ 105 เพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือกลดลง 45 Powder Technology 188: 1-8.
8 ผลของความชื้นที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิง 46 Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. and
9 เรขาคณิตและค่าระดับความกลมเพิ่มขึ้น อิทธิพลของความชื้นนี้ 47 Tabil, L.G., 2006. Some physical properties of pistachio
10 ทำให้ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้น 48 (Pistacia vera L.) nut and its kernel. Journal of Food
11 และค่าความพรุนลดลง การศึกษาสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ 49 Engineering 72: 30-38.
12 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นในข้าวเปลือกมีผลให้ค่าความเร็ว 50 Mohsenin, N.N., 1980. Physical properties of plants
13 สูดท้ายเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลลดลง 51 and animal materials, Gordon and Breach Science
52 Publisher, New York, NY, USA.
14 กิตติกรรมประกาศ 53 Sánchez-Mendoza, J., Domínguez-López, A.,
15 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนการทำ 54 Navarro-Galindo, S. and López-Sandoval, J.A., 2008.
16 วิจัยในครั้งนี้ 55 Some physical properties of roselle (Hibiscus sabdariffa
56 L.) seeds as a function of moisture content. Journal of
17 เอกสารอ้างอิง 57 Food Engineering 87: 391-397.
18 สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 58 Shellard, J.E. and Macmillan, R.H., 1978.
19 เศรษฐกิจ การเกษตรของประเทศไทย ปี 2562 59 Aerodynamic properties of threshed wheat materials.
20 แหล่งข้อมูล: [http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/j](http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2563/indicator2562.pdf)
21 [ournal/2563/indicator2562.pdf](http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2563/indicator2562.pdf). วันที่เข้าถึงข้อมูล 15 60 Journal of Agricultural Engineering Research 23: 273-
22 มกราคม 2564. 61 281.
23 American Society of Agricultural and Biological 62 Singh, K.K. and Goswami, T.K., 1996. Physical
24 Engineers (ASABE), 1997. ASAE S352.2. Moisture 63 properties of cumin seed. Journal of Agricultural
25 measurement—unground grain and seeds, ASAE 64 Engineering Research 64: 93-98.
26 standards Vol. 555 ASABE, St. Joseph, MI, USA. 65 White, N.D.G. and Jayas, D.S., 2001. Physical
27 Aydin, C. and Ozcan, M., 2002. Some physico- 66 properties of canola and sunflower meal pellets.
28 mechanic properties of terebinth (Pistacia terebinthus L.) 67 Canadian Biosystems Engineering 43: 49-52.
29 fruits. Journal of Food Engineering 53: 97-101. 68 Zewdu, A.D., 2007. Aerodynamic properties of tef
30 Gupta, R.K., Arora, G. and Sharma, R., 2007. 69 grain and straw material. Biosystem Engineering 98: 304-
31 Aerodynamical properties of sunflower seed 70 309
32 (Helianthus annuus L.). Journal of Food Engineering 79:
33 899-904.
34 Gharekhani, M., Kashaninejad, M., Daraei
35 Garmkhany A., and Ranjari A., 2013. Physical and
36 aerodynamic properties of paddy and white rice as a
37 function of moisture content. Quality Assurance and
38 Safety of Crops and Foods: 187-197

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

สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน¹ กระจวี ตรีอำนรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำนรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

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

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

รับบทความ แก้ไขบทความ..... ตอบรับบทความ (ผู้เขียนไม่ต้องกำหนด)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาค่าสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นแตกต่างกัน ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบถูกเตรียมให้มีค่าความชื้นแตกต่างกันในช่วง 10 - 26 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก และแปรค่าอุณหภูมิของอากาศในช่วง 50 ถึง 100 องศาเซลเซียส สำหรับการทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ ผลการทดสอบและวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกในช่วง 10 - 26 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก ทำให้ความยาวเมล็ดข้าวเปลือกลดลงแต่ทำให้ความหนาและความกว้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าระดับความกลมเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของข้าวเปลือก การเพิ่มขึ้นของความชื้นที่สูงกว่า 22%WB จะทำให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและค่าความพรุนมีความแตกต่างกัน แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงเมล็ดของข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศไม่มีผลต่อค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก และการเพิ่มขึ้นของความชื้นมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

คำสำคัญ : ความชื้น; สมบัติอากาศพลศาสตร์; สมบัติกายภาพ; ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

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

Physical and Aerodynamics Properties of Khao Dawk Mali 105 Paddy Rice

Thamarat Yabsungnoen¹ Krawee Treamnuk^{1*} Tawarat Treamnuk²
and Nuttapong Ruttanadech³

¹School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

²School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

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

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

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

Received; Revised; Accepted (Do not assign)

Abstract

This research objective was to determine physical and aerodynamics properties of Khao Dawk Mali 105 paddy (Thai Jasmine paddy rice). The paddy sample in this test was prepared with different moisture contents in the range of 10 - 26%WB and air temperature in aerodynamics properties test was varied in the range of 50°C - 100°C. Test results and statistical mean difference analysis by DMRT method (at $P < 0.05$) found that increasing of paddy moisture in the range of 10% - 26 %WB reduce the average length but increase the thickness and width of grain. The increasing of paddy moisture over 22%WB affected on the difference of average bulk density and porosity but it did not influence on the change of average kernel density. Air temperature had no effect on aerodynamic properties of paddy and the increasing of paddy moisture statistically significant effected on the increase of terminal velocity, but it did not influence on the change of drag coefficient of paddy.

Keywords : moisture content; aerodynamics properties; physical properties; Khao Dawk Mali 105 Paddy rice

* Corresponding Author. Tel.: +668 4523 7632, E-mail Address: thamavalesky@gmail.com

1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa*) เป็นพืชอาหารที่นิยมปลูกมากในทวีปเอเชียและอาจมีการเพาะปลูกบางส่วนในทวีปอื่น ข้าวถือเป็นอาหารหลักของคนเอเชียในหลายประเทศ สำหรับประเทศไทยข้าวเป็นอาหารหลักที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด ในปีพุทธศักราช 2563 เป็นผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับที่ 1 ในภูมิภาคอาเซียนปริมาณ 7.5 ล้าน[1] ดังนั้นแล้วข้าวจึงถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยเฉพาะข้าวหอมมะลิถือเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคต่างชาติมากที่สุด ภายหลังจากการเก็บเกี่ยว ผลผลิตเกษตรจำเป็นต้องผ่านกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว (Post-Harvest Processing) กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยวิธีการและเครื่องจักรกลเกษตรโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพื่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งการออกแบบเครื่องจักรกลเหล่านี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของผลผลิตเกษตร สมบัติดังกล่าวนี้สำหรับข้าวเปลือกประกอบไปด้วย รูปร่าง ขนาด มวล ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (Bulk density) ความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Kernel density) ความพรุน (Porosity) ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล (Drag coefficient) ค่าเหล่านี้ล้วนเป็นข้อมูลที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก เช่น รูปร่างและขนาดของเมล็ดถูกใช้ในการออกแบบเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปน ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนของเมล็ดเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบเติมและระบายอากาศ (Aeration system) ในขณะที่เก็บรักษา [7],[13]ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล ถูกใช้ในการออกแบบระบบการไหลของอากาศและระบบคัดแยกซึ่งรวมถึงการเลือกขนาดเครื่องเป่าลม [4] ซึ่งค่าทั้งหมดดังกล่าวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมผลิตข้าว ปัจจัยประการสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์คือความชื้นในผลผลิต [9]

สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นผลผลิตข้าวที่สำคัญของไทย การศึกษาสมบัติกายภาพดังกล่าวนี้ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

จากความสำคัญดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นแตกต่างกัน โดยทำการทดสอบหาสมบัติกายภาพ ได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ค่าความกลม ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ด ความพรุนของเมล็ด และทดสอบหาสมบัติอากาศพลศาสตร์ได้แก่ ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของข้าวเปลือกในอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

ในการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดนครราชสีมา ฤดูกาลเพาะปลูก 2562 โดยทำการแยกวัสดุเจือปนรวมถึงเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ด้วยเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์

2.1.1 การหาความชื้นเริ่มต้นในข้าว

หาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกด้วยวิธี Oven Drying Method [2] โดยการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก (รูปที่ 1ก) ก่อนและหลังทำการอบแห้ง ด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อน (รูปที่ 2ข) คำนวณค่าความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, %WB) จากสมการที่ 1

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

M_w - เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

W - มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (กรัม)

D - มวลแห้งเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบ (กรัม)



รูปที่ 1 ก) การชั่งน้ำหนักเพื่อหามวลเริ่มต้น
ข) การอบตัวอย่างด้วยเครื่องอบแห้งมาตรฐาน

2.1.2 การกำหนดความชื้นในข้าวเปลือก

กำหนดความชื้นในการทดสอบโดยแปรค่าความชื้นของข้าวเปลือกออกเป็น 5 ระดับ คือ 10 14 18 22 และ 26 %WB ด้วยการเติมน้ำกลับสู่ข้าวเปลือก (Rewet) โดยปริมาณน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 [2] ด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำที่คำนวณได้ลงบนกองข้าวเปลือก จากนั้นคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้ทั่วกัน บรรจุในภาชนะที่บดแสงแล้วเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$W_2 = W_1 \times \frac{[M_1 - M_2]}{[100 - M_1]} \tag{2}$$

โดยที่

W_2 - ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (กรัม)

W_1 - มวลของกองเมล็ดที่ต้องการกำหนดความชื้นใหม่ (กรัม)

M_1 - เปอร์เซ็นต์ความชื้นสุดท้ายฐานเปียกที่ต้องการ

M_2 - เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก

ก่อนทำการทดสอบจะต้องนำข้าวเปลือกมาทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนโดยยังไม่เปิดฉนิก

ถุง [8] แล้วจึงทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวเปลือกที่แต่ละความชื้นดังนี้

2.2 การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติกายภาพของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

2.2.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต และระดับความกลม (Geometric Mean Diameter, Degree of Sphericity)

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (D) และค่าระดับความกลม (ϕ) คำนวณด้วยสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ [9] โดยทำการสุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 50 เมล็ด จากข้าวเปลือกแต่ละความชื้นทั้ง 5 ความชื้นที่เตรียมไว้ นำมาวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ดิจิตอล (Digital Caliper Vernier Gauge 0-150 mm) ความละเอียด 0.01 mm ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวัดขนาด ก) ความยาว ข) ความกว้าง และ ค) ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

$$D = (LWT)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L \times 100} \tag{4}$$

โดยที่

- L - ความยาวของเมล็ด (มิลลิเมตร)
- W - ความกว้างของเมล็ด (มิลลิเมตร)
- T - ความหนาเมล็ด (มิลลิเมตร)
- ϕ - ระดับความกลม (เปอร์เซ็นต์)
- D - เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (มิลลิเมตร)

ทดลองซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละความชื้นแล้วคำนวณค่าความพรุนด้วยสมการ 6 [6]



รูปที่ 3 การหาความหนาแน่นเชิงกลุ่ม

2.2.2 ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Bulk Density, Porosity and Kernel Density)

ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม หาได้จากการชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือกที่บรรจุในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอน (ตามรูปที่ 3) จากนั้นคำนวณตามสมการที่ 5 โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ในแต่ละความชื้นจนครบทั้ง 5 ความชื้น

$$Porosity = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100\% \tag{6}$$

$$\rho_b = \frac{M_p}{V} \tag{5}$$

โดยที่

- ρ_b - ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- M_p - มวลของข้าวเปลือก (กิโลกรัม)
- V - ปริมาตรของภาชนะบรรจุ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

โดยที่

- P_1 - ความดันของอากาศก่อนการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ด (ปาสคาล)
- P_2 - ความดันของอากาศหลังการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ด (ปาสคาล)

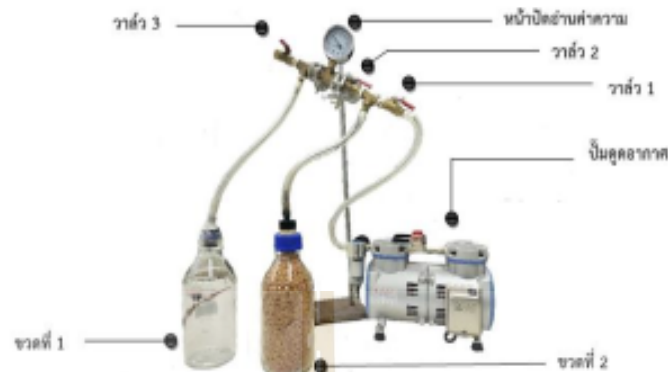
ความหนาแน่นเชิงเมล็ด คำนวณได้ด้วยสมการที่ 7 (Mohsenin, 1980)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_k}\right) \times 100\% \tag{7}$$

ค่าความพรุน หาค่าได้จากวิธีการแทนที่อากาศด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ 4 โดยบรรจุเมล็ดข้าวเปลือกลงในโหลแก้วจนเต็ม จากนั้นนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์โดยขวดที่ 1 เป็นขวดเปล่าที่มีอากาศบรรจุอยู่ปกติ เริ่มการทดสอบโดยเปิดปั๊มสุบอากาศในระบบออกจนขวดที่ 1 และ 2 มีความดันเป็นสุญญากาศ จากนั้นปิดวาล์ว 1 และวาล์ว 2 แล้วจึงเปิดวาล์ว 3 เพื่อให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ขวดที่ 1 ทำการปิดวาล์ว 3 อ่านค่าความดัน P_1 แล้วจึงเปิดวาล์ว 2 เพื่ออ่านค่าความดัน P_2 ทำการ

โดยที่

- ε - เปอร์เซ็นต์ความพรุนของเมล็ด
- ρ_b - ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- ρ_k - ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 4 การทดสอบค่าความพูน

2.2.3 การทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) หาได้จากวิธีการทดสอบการลอยตัวของเมล็ด (Suspension method) ดังรูปที่ 5 โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกตัวอย่าง (Paddy sample) จำนวน 10 เมล็ด มาบรรจุไว้ภายในท่ออะคริลิก ผิดและป้อนอากาศร้อนด้วยพัดลมและฮีตเตอร์ (Blower และ Heater) ควบคุมอุณหภูมิด้วย PID Electronic temperature controller โดยให้อากาศไหลเข้าสู่ท่ออะคริลิกแนวตั้ง (Long acrylic tube ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและความยาว 73 mm และ 410 mm ตามลำดับ) จากด้านล่างและไหลผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้ทดสอบ ปรับเพิ่มความเร็วลมจนสังเกตเห็นเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัวขึ้น วัดความเร็วลมขณะนั้นด้วย Anemometer ความละเอียด 0.1 ms^{-1} ทำการทดสอบกับข้าวทั้ง 5 ระดับความชื้น (10 14 18 22 และ 26%WB) และที่แต่ละความชื้นทำการแปรค่าอุณหภูมิอากาศออกเป็น 4 ระดับ คือ 70 80 90 และ 100°C และทำการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำต่อ 1 สภาวะการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล (Drag Coefficient) สามารถหาได้จากค่าความเร็วลมสุดท้าย

(Terminal Velocity) โดยการคำนวณจากสมการที่ 8 [9],[11]

$$C_d = \frac{2Mg}{\rho_A A_f V_t^2} \quad (8)$$

โดยที่

- M - มวลของเมล็ดข้าวเปลือก (กรัม)
- g - ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
- ρ_A - ความหนาแน่นอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- A_f - พื้นที่หน้าตัดของเมล็ด (Frontal Area) (ตารางเมตร) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 9
- V_t - ค่าความเร็วสุดท้าย (เมตรต่อวินาที)
- C_d - ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

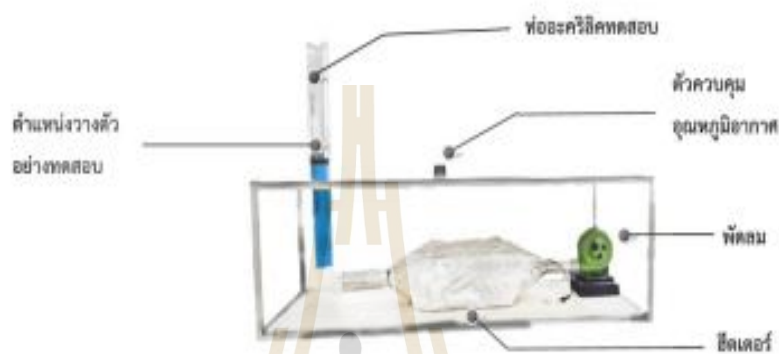
$$A_f = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (9)$$

โดยที่

L_1 และ L_2 คือความยาวที่มากที่สุดสองอันดับแรก ของเมล็ดข้าวเปลือก (มิลลิเมตร)

วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new

Multiple Range Test (DMRT) ที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 5 การทดสอบหาค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

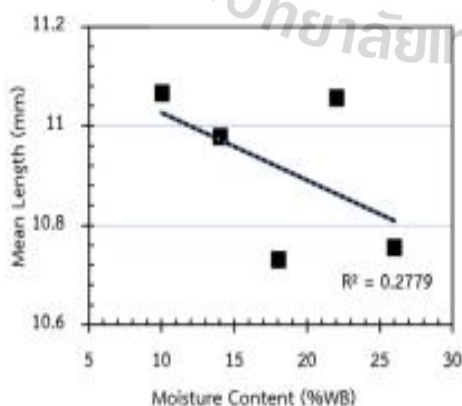
3.การศึกษาและอภิปรายผล

3.1 สมบัติกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกขาว

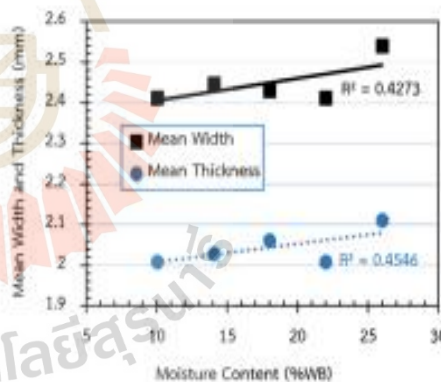
ดอกมะลิ 105

3.1.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อมิติของเมล็ด

ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

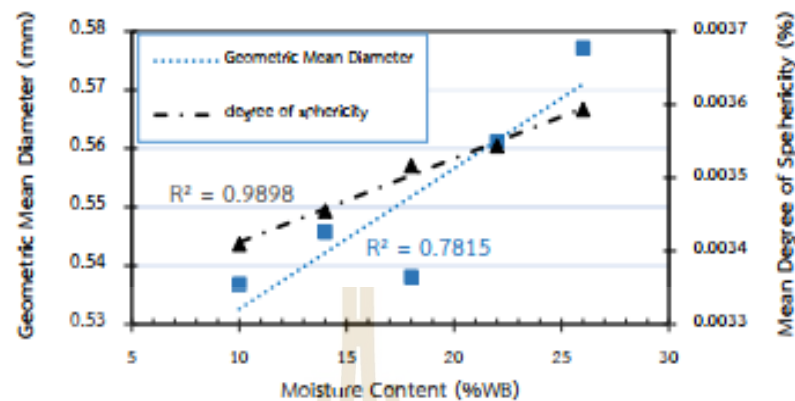


รูปที่ 6 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 7 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ในช่วง 10% - 26 %WB กับค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความ



รูปที่ 8 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม

Moisture Content %WB	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Geometric Mean Diameter (mm)	Degree of Sphericity (%)
10	11.07 ± 0.44 ^b	2.41 ± 0.14 ^a	2.00 ± 0.08 ^a	0.53 ± 0.046 ^a	3.40x10 ⁻³ ± 1.0x10 ^{-4a}
14	10.98 ± 0.36 ^b	2.44 ± 0.11 ^{ab}	2.02 ± 0.07 ^{ab}	0.54 ± 0.044 ^a	3.454x10 ⁻³ ± 8.84x10 ^{-5b}
18	10.73 ± 0.36 ^a	2.42 ± 0.08 ^a	2.06 ± 0.12 ^{bc}	0.53 ± 0.047 ^{ab}	3.516x10 ⁻³ ± 1.01x10 ^{-4c}
22	10.8 ± 0.37 ^a	2.48 ± 0.08 ^b	2.09 ± 0.08 ^{cd}	0.56 ± 0.035 ^{bc}	3.543x10 ⁻³ ± 1.0x10 ^{-4c}
26	10.75 ± 0.41 ^a	2.54 ± 0.08 ^c	2.11 ± 0.08 ^d	0.57 ± 0.041 ^c	3.593x10 ⁻³ ± 1.01x10 ^{-4d}
Total	10.86 ± 0.41	2.46 ± 0.11	2.06 ± 0.09	0.55 ± 0.0172	3.50x10 ⁻³ ± 7.277x10 ⁻⁵

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ยาวของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย แต่ตรงข้ามกับความหนาและความกว้างเฉลี่ยของข้าวเปลือกที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในถั่วพืชดาซีโอด [8] ถั่วเหลือง [7] เมล็ดข้าวบาร์เลย์ [10] เมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อิทธิพลของความชื้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้างและความหนา (ตารางที่ 1) โดยค่าเฉลี่ยความยาวที่ความชื้น 10% - 18%WB มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่จะแตกต่างกับค่าเฉลี่ยความยาวที่ความชื้น 22% -

26%WB อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นั่นคือความชื้นข้าวเปลือกที่มากกว่า 22%WB มีผลทำให้ความยาวของเมล็ดข้าวเปลือกสั้นลง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าค่าความกว้างเฉลี่ยที่ความชื้น 22%WB และ 26%WB มีความแตกต่างกันและแตกต่างกับค่าความกว้างเฉลี่ยที่ความชื้น 10% 14% และ 22%WB ซึ่งทั้ง 3 ค่าหลังนี้มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อประเมินผลร่วมกับแนวโน้มจากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีการเพิ่มขึ้นอย่าง

ชัดเจนเมื่อความชื้นมากกว่า 26%WB ขึ้นไป ส่วนความหนาของข้าวเปลือกพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมีค่าเฉลี่ยจากความชื้นเท่ากับ 2.06 mm

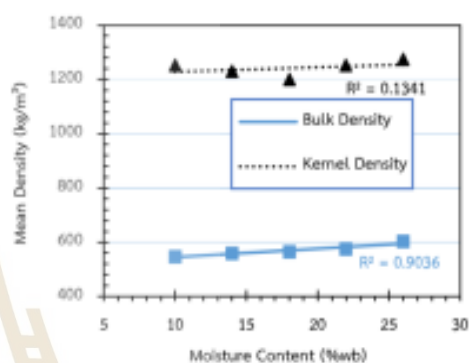
การเพิ่มขึ้นของความชื้นในข้าวเปลือกทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนาประกอบกับความยาวที่ลดลงเนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3 และ 4 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดสอบในถ้วยเหลือง [7] เมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ทางสถิติกลับพบว่าอิทธิพลของความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นต่ำมาก (เปลี่ยนแปลงในทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ของค่าที่วัดได้) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 0.55 ± 0.0172 mm

การเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกทำให้ค่าระดับความกลมเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นมีความแตกต่างกัน โดยความชื้น 10% 14% และ 26%WB มีค่าเฉลี่ยระดับความกลมแตกต่างกัน และที่ความชื้น 22% กับ 26%WB มีค่าเฉลี่ยระดับความกลมเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน (ตามตัวอักษรในตารางที่ 1) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นมีอิทธิพลต่อค่าระดับความกลมเฉลี่ยชัดเจนที่สุด

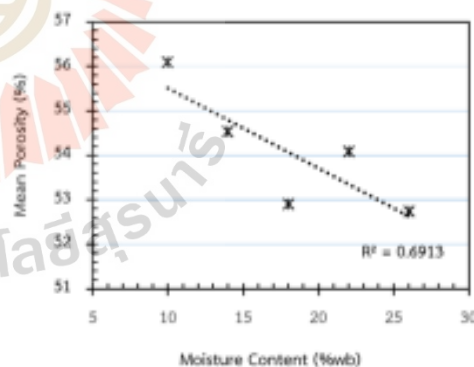
3.1.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อความชื้นในข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม

เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะแม้ว่าปริมาตรของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนาของเมล็ดเนื่องจากความชื้น แต่การเพิ่มขึ้นของมวลข้าวเปลือกเนื่องจากการเพิ่มความชื้นมีอิทธิพลสูงกว่า จึงทำให้ความหนาแน่นเชิงกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 5



รูปที่ 9 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ด



รูปที่ 10 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความพรุนของเมล็ด

สำหรับค่าความพรุน (รูปที่ 10) พบว่าเมื่อความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความพรุนของเมล็ดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาและความกว้างร่วมกับการลดลงของความยาวเมล็ดทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงกลมมากขึ้นและส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเมล็ดมีค่า

ลดลง เมื่อนำค่าความพรุนและค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มไปคำนวณตามสมการที่ 7 จะได้ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดต้งรูปที่ 9 ซึ่งค่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นจะถูกกักเก็บในรูขนาดเล็กภายในข้าวเปลือกและทำให้มวลของเมล็ดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงมวลและการลดลงของค่าความพรุนของเมล็ด

ข้าวเปลือก แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ด และการทดลองของความพรุนนี้คล้ายกับผลการทดลองในข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] และเมล็ดยี่ห่วย (Cumin Seeds) [12]

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม เชิงเมล็ด และค่าความพรุน

Moisture Content %WB	Bulk Density (kg/m ³)	Kernel Density (kg/m ³)	Porosity (%)
10	548.97 ± 9.41 ^a	1252.44 ± 62.87 ^{bc}	56.09 ± 1.77 ^c
14	558.91 ± 14.14 ^{ab}	1229.65 ± 29.55 ^{ab}	54.54 ± 0.61 ^b
18	564.46 ± 11.97 ^b	1198.66 ± 24.53 ^a	52.9 ± 0.38 ^a
22	574.87 ± 11.30 ^f	1252.31 ± 25.61 ^{bc}	54.09 ± 0.64 ^b
26	602.40 ± 8.58 ^d	1274.3 ± 18.16 ^c	52.72 ± 1.5x10 ^{-34a}
	569.92 ± 20.43	1241.47 ± 28.67	54.07 ± 1.36

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

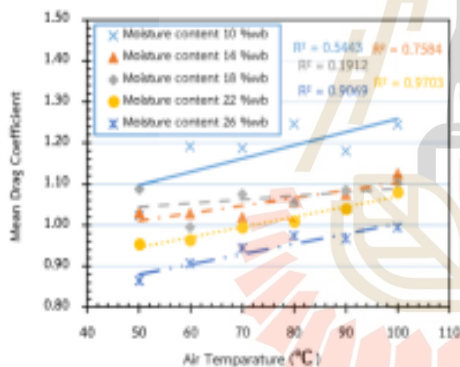
การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอิทธิพลของความชื้นที่มีค่ามากกว่า 22%WB จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญและความชื้นนี้ยังส่งผลต่อการลดลงของค่าความพรุนอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเมื่อเมล็ดมีความชื้นสูงขึ้นยอมทำให้ปริมาตรของเมล็ดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม ในหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมา ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ $1,241.47 \pm 28.67 \text{ kg/m}^3$

3.2 สมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

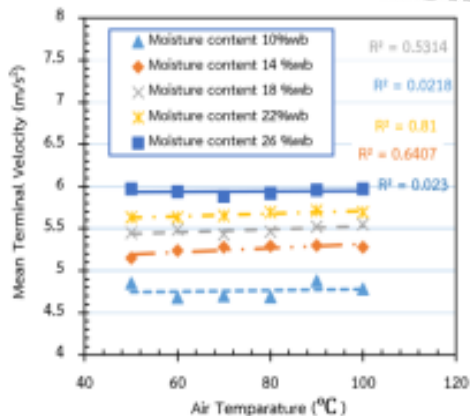
3.2.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าความเร็วสุดท้าย

จากรูปที่ 10 เมื่อความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้นเนื่องจากข้าวเปลือกมีมวลเพิ่มขึ้นจากความชื้นทำให้ต้องใช้ความเร็วลมมากขึ้นในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัว ผลของอุณหภูมิกอากาศที่มีต่อค่าความเร็วลมสุดท้ายพบว่าไม่เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิกอากาศมีผลทำให้ความหนาแน่นอากาศลดลงเพียงเล็กน้อย ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลสอดคล้องกับผลการทดลองในเมล็ดข้าวเทพี [14] และเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5]

การวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 3) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ชี้ให้เห็นว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อค่าความเร็วสุดท้าย โดยที่ความชื้นข้าวเปลือก 10%WB 14%WB และ 26%WB มีค่าเฉลี่ยความเร็วสุดท้ายแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศจาก 50 - 100°C ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเร็วลอยตัวในแต่ละความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ข้าวเปลือกที่ความชื้นข้าวเปลือก 18% กับ 22%WB พบว่ามีค่าเฉลี่ยความเร็วสุดท้ายไม่แตกต่างกันโดยอุณหภูมิของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน



รูปที่ 10 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าความเร็วสุดท้ายของเมล็ด



รูปที่ 11 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของเมล็ด

3.2.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับความชื้นและอุณหภูมิอากาศ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นข้าวเปลือกและค่าอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นโดยค่าสัมประสิทธิ์นี้อยู่ในช่วง 0.80 - 1.95 และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นในข้าวเปลือกและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการทดสอบไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของมวลเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าค่อนข้างสูงในขณะที่การเพิ่มขึ้นของมิติเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าต่ำมาก (ดังผลจากหัวข้อ 3.1.1) และเมื่อคำนวณเป็นพื้นที่หน้าตัดของเมล็ดตามสมการที่ 9 จะได้ค่า A_f ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากจนเกือบคงที่ หากพิจารณาในรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 8 อากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (ρ_a) มีค่าลดลง ในขณะที่มวลข้าวเปลือก (M) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วสุดท้าย (V_t) เพิ่มขึ้นไปด้วย (ดังผลตามหัวข้อ 3.2.1) ผลคูณของตัวแปรในเทอมส่วนจึงพอดีกับเทอมเศษและเป็นผลให้อัตราส่วนของมัน (คือค่า C_d) มีค่าคงที่สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลในงานด้านอากาศพลศาสตร์อื่นๆ ที่ค่านี้จะแปรผันตามรูปทรงและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุเป็นส่วนใหญ่ และจากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเท่ากับ 1.05 ± 0.1254

ตารางที่ 3 ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการ

Air Temperature (°C)	Moisture Content (%WB)	Terminal Velocity (m/s)	Drag Coefficient
50	10	4.85±0.21 ^b	1.02±0.143 ^{cd}
	14	4.68±0.16 ^c	1.18±0.119 ^{cd}
	18	4.70±0.16 ^a	1.19±0.114 ^{ef}
	22	4.69±0.15 ^{gh}	1.25±0.091 ^{bc}
	26	4.88±0.14 ⁱ	1.18±0.099 ^a
60	10	4.78±0.17 ^a	1.24±0.136 ^{hi}
	14	5.15±0.14 ^{cd}	1.03±0.061 ^{cd}
	18	5.24±0.11 ^a	1.03±0.044 ^{bcde}
	22	5.28±0.10 ^{gh}	1.02±0.051 ^{bed}
	26	5.29±0.10 ^j	1.06±0.047 ^{ab}
70	10	5.30±0.14 ^a	1.08±0.066 ^{hi}
	14	5.28±0.10 ^{cd}	1.13±0.066 ^{cd}
	18	5.45±0.14 ^a	1.09±0.307 ^{ef}
	22	5.49±0.07 ^{gh}	0.99±0.030 ^{bcde}
	26	5.43±0.08 ⁱ	1.08±0.049 ^{abc}
80	10	5.46±0.11 ^a	1.05±0.052 ⁱ
	14	5.52±0.12 ^{cd}	1.09±0.049 ^{def}
	18	5.55±0.08 ^a	1.10±0.043 ^{def}
	22	5.63±0.16 ^h	0.95±0.054 ^{cd}
	26	5.63±0.12 ⁱ	0.97±0.067 ^{bed}
90	10	5.65±0.11 ^b	1.00±0.036 ^{hi}
	14	5.69±0.10 ^{cd}	1.01±0.052 ^{ef}
	18	5.71±0.13 ^{cd}	1.04±0.056 ^{ef}
	22	5.69±0.12 ^h	1.08±0.077 ^{cd}
	26	5.97±0.12 ⁱ	0.86±0.050 ^{bed}
100	10	5.94±0.08 ^{ab}	0.91±0.048 ⁱ
	14	5.88±0.10 ^{cd}	0.95±0.055 ^{gh}
	18	5.92±0.13 ^{cd}	0.97±0.043 ^{gh}
	22	5.96±0.10 ^h	0.96±0.057 ^{ef}
	26	5.97±0.09 ⁱ	1.00±0.043 ^{bcde}

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกัน
ในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.สรุป

การทดสอบหาสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นข้าวเปลือกในช่วง 10 % - 26 %WB ทำให้ความยาวเมล็ดข้าวเปลือกลดลง และทำให้ความหนาและความกว้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าระดับความกลมเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของข้าวเปลือก การเพิ่มขึ้นของความชื้นที่สูงกว่า 22%WB จะทำให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและค่าความพรุนมีความแตกต่างกัน แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงเมล็ดของข้าวเปลือก อุณหภูมิอากาศไม่มีผลต่อค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกและการเพิ่มขึ้นของความชื้นมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of International Trade Ministry of Commerce.(2021,May 25). The overall situation of the rice market in ASEAN ,September 2019(online). Available:https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/564288/564288.pdf&title=564288&cate=455&d=0
- [2] Moisture measurement–unground grain and seeds, ASAE standards Vol. 555 ASABE, 1997.
- [3] Aydin, C. and Ozcan, M, “Some physico-mechanic properties of terebinth(*Pistacia terebinthus* L.) fruits,” *Journal of Food Engineering*, vol. 53, pp.97-101. 2002.
- [4] Gupta, R.K., Arora, G. and Sharma, R, “Aerodynamical properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.)” *Journal of Food Engineering*, vol. 79, pp.899-904. . 2007.
- [5] Gharekhani, M., Kashaninejad, M., Daraei Garmkhany A, and Ranjari A, “Physical and aerodynamic properties of paddy and white rice as a function of moisture content”, *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, pp. 187-197. 2013.
- [6] Habib Kocabiyik, Tukan Aktaş and Birol Kayışözü, “Porosity Rate of Some Kernel Crops”, *Journal of Agronomy*, vol. 3(2), pp. 76-80. 2004.
- [7] Kashaninejad, M., Ahmadi, M., Daraei, A. and Chabra, D., “Handling and frictional characteristics of oybean as a function of moisture content and variety”, *Powder Technology*, vol. 188, pp. 1-8. 2008.
- [8] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A.and Tabil, L.G., “Some physical properties of pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel”,

- Journal of Food Engineering, vol. 72, pp. 30-38. 2006.
- [9] Mohsenin, N.N., Physical properties of plants and animal materials, New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1980.
- [10] Sánchez-Mendoza, J., Domínguez-López, A., Navarro-Galindo, S. and López-Sandoval, J.A., "Some physical properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds as a function of moisture content", Journal of Food Engineering, vol. 87, pp. 391-397. 2008.
- [11] Shellard, J.E. and Macmillan, R.H., "Aerodynamic properties of threshed wheat materials", Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 23, pp. 273-281. 1978.
- [12] Singh, K.K. and Goswami, T.K., "Physical properties of cumin seed", Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 64, pp. 93-98. 1996.
- [13] White, N.D.G. and Jayas, D.S., "Physical properties of canola and sunflower meal pellets". Canadian Biosystems Engineering, vol. 43, pp. 49-52. 2001.
- [14] Zewdu, A.D., "Aerodynamic properties of tef grain and straw material", Biosystem Engineering, vol. 98, pp. 304-309. 2007.

การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารระดับครัวเรือน STUDY OF MICROWAVE BEHAVIOUR IN HOUSEHOLD OVEN

ธรรมรัตน์ แยมสูงเนิน¹

กระวี ตรีอำนรรค¹

เทวรัตน์ ตรีอำนรรค²

¹สำนักวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา

30000

²สำนักวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา

30000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารไมโครเวฟ (Microwave Oven) ที่ใช้งานทั่วไปในครัวเรือน ทำการจำลองคลื่นไมโครเวฟด้วยสมการของแมกซ์เวลล์โดยใช้วิธีการประมาณการแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการศึกษามีปัจจัยด้านรูปร่างของผนังภายในตู้ไมโครเวฟที่ส่งผลกระทบต่อกระจายคลื่นและอุณหภูมิด้วยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบให้ความร้อนกับน้ำด้วยคลื่นไมโครเวฟและวัดค่าอุณหภูมิของน้ำภายในตู้อบจริง การศึกษาพบว่าผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลด้านรูปร่างของห้องส่งผลกระทบต่อกระจายของสนามไฟฟ้าและส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของน้ำในห้องคิวแบบเว้าจะมีความถี่รูปแบบการกระจายอุณหภูมิเชิงพื้นที่คล้ายคลึงกับการกระจายอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดสอบมากกว่าการใช้แบบจำลองแบบคิวห้องแบบเรียบ

คำสำคัญ: ตู้อบไมโครเวฟระดับครัวเรือน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

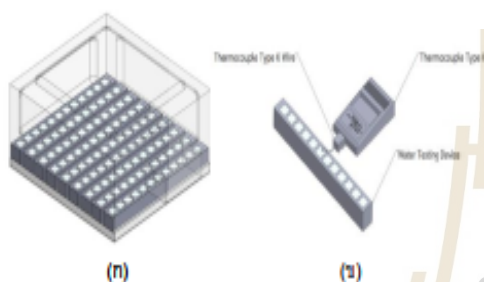
Abstract

This research aims to study the behavior of microwave waves in a household microwave oven. Maxwell's equation was used in Finite element method with computer program to simulate the wave distribution of microwave in the oven. The simulation results of wave and temperature distribution that affected from the difference wall shape type of the oven were compared to the test results of water temperature from the microwave heating experiment. The simulation results showed that the effect of oven wall shape influenced the distribution of the electric field and affected the change of water temperature due to the resultant electric field mode. The comparison of simulation results of the water temperature distribution in the oven between concave oven wall and flat oven wall showed that the spatial water temperature distribution pattern from experiment was more similar to the concave wall model than the flat oven wall model.

Keyword: Household microwave oven, Finite Element Method, Microwave heating

*E-mail: Thamavalesky@gmail.com

วางจานอาหารในตู้ไมโครเวฟ) โดยเริ่มจากขอบหนึ่งด้านที่หนึ่งบนระนาบแนวนอนของตู้อบ (ตำแหน่งที่ 1) ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ เปิดให้ไมโครเวฟทำงานที่ระดับพลังงานต่ำที่สุด (Low Power) ตู้อบจะปล่อยพลังงานไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ต่อเนื่อง 8 วินาที และหยุด 24 วินาที เมื่อถึงวินาทีที่ 30 จึงหยุดการทำงานและจากนั้นใช้เทอร์โมคัปเปิล type K วัดอุณหภูมิของน้ำแต่ละช่อง (รูปที่ 3ข) บันทึกค่าและทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และย้ายตำแหน่งภาชนะบรรจุน้ำมายังตำแหน่งที่ 2 ทำการทดสอบซ้ำขั้นตอนเดิม จนครบทั้ง 9 ตำแหน่ง (รูปที่ 3ก) จะได้พื้นที่วัดอุณหภูมิเต็มทั้งระนาบแนวนอนของตู้อบ



รูปที่ 3 (ก) การใช้ภาชนะบรรจุน้ำทดสอบจนครบทั้ง 9 ตำแหน่ง (แถว)
(ข) การวัดอุณหภูมิในจุดทดสอบ

2.2 การสร้างแบบจำลอง

สร้างโมเดลของตู้อบไมโครเวฟและจำลองการปล่อยคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่นด้วยโปรแกรม COMSOL Multi-Physics เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบผนังตู้อบรูปแบบ คือห้องผนังแบบเรียบและแบบผนังเว้ามนที่มีต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในน้ำ

เมื่อเริ่มทำงาน หัวแมกนิตรอนจะปลดปล่อยคลื่นไมโครเวฟผ่านทางท่อนำคลื่นเข้าสู่ตู้อบไมโครเวฟซึ่งจะเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำและเกิดความร้อนขึ้น การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของไมโครเวฟนั้นสามารถจำลองได้ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ดังสมการที่ 1 และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เป็นไปตามสมการที่ 2 [9]

$$k_0 \nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$n \times \vec{E} = 0 \quad (2)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ

k_0 คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Propagation Constant)

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุม

สมการที่ 4 เป็นการกำหนดให้ค่านิ่งของท่อนำคลื่นและผนังของตู้ไมโครเวฟมีสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect conductore) ซึ่งส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่มากระทบต่อผนังมีค่าเป็น 0 และ \vec{n} คือค่า Unit Vector ที่มีทิศทางตั้งฉากเข้าสู่ผนัง

การปลดปล่อยพลังงานความร้อนของน้ำ (Q_{th}) เนื่องจากการสั่นของโมเลกุลมีชีวิเป็นปฏิกิริยาโพลาริเซชัน (Polarization reaction) สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 3 ซึ่งเทอมแรกของสมการนั้นเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนจากผลทางสนามไฟฟ้าและเทอมที่สองเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนจากผลทางสนามแม่เหล็ก

$$Q_w = \pi f \epsilon_0 \epsilon_r |\vec{E}|^2 + \pi f \mu_0 \mu_r |\vec{H}|^2 \quad (3)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของไมโครเวฟ (Hz)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่แรงต้านสนามไฟฟ้าบนพื้นที่อิสระมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} Farad/m

ϵ_r คือ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุ (Farad/m)

E คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Volt/m)

μ_0 คือ ค่าคงที่การซึมผ่านสนามแม่เหล็กบนพื้นที่อิสระมีค่าเท่ากับ $4 \pi \times 10^{-7}$ (Henry/m)

μ_r คือ ค่าการซึมผ่านสนามแม่เหล็ก (Henry/m)

H คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Ampere/m)

อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในน้ำเนื่องจากการสั่นของโมเลกุลมีชีวิสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{Q_{th}}{\rho C_p V} \quad (4)$$

โดย $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในน้ำ ($^{\circ}C$ /วินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($kJ/kg \cdot ^{\circ}C$)

จากสมการที่ 3 และ 4 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในน้ำจะขึ้นอยู่กับความถี่ของไมโครเวฟซึ่งเป็นปัจจัยหลักรวมถึงค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของวัสดุและค่าการซึมผ่านสนามแม่เหล็กของวัสดุ โดยที่ค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของน้ำเป็นการในการเพิ่มอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำนั้นเป็นแบบเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาหนึ่งและไม่เกิดการสูญเสียความร้อนขึ้น (Heat Loss) [10,11]

ทำการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ซึ่งเป็นการหาผลเฉลยทางตัวเลขโดยประมาณของค่าสนามไฟฟ้าผ่านโปรแกรม COMSOL Multi-Physics โดยสร้างโมเดลแบบห้องผนังเรียบและแบบผนัง

1. บทนำ

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 300 GHz ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคลื่นไมโครเวฟหลายอย่าง เช่น วิทยุสื่อสาร เรดาร์ และโดยเฉพาะคือไมโครเวฟที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในครัวเรือน [1] การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟไม่ได้อาศัยการแผ่รังสีเหมือนคลื่นอินฟราเรดแต่ได้ทำความร้อนโดยตรงผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่กลไกการทำความร้อนจะอาศัยปฏิกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนในวัสดุขึ้นได้ การใช้งานที่เกี่ยวข้องใช้ไมโครเวฟในการทำความร้อนระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้ความถี่ที่ 915 MHz แต่ในการใช้งานระดับครัวเรือนเพื่อทำความร้อนนิยมใช้ความถี่ที่ 2.45 GHz โดยการแพร่ผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ [2] ในการหาการกระจายของสนามไฟฟ้าสามารถหาด้วยวิธีการวิเคราะห์ [3] หรือวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [4] ซึ่งทำให้ได้คำตอบที่เป็นผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) แต่วิธีการดังกล่าวนั้นสามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาอย่างง่ายที่ไม่มีรูปร่างซับซ้อนและรูปทรงมีความสมมาตร หากนำวิธีเหล่านี้ไปแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน มีความโค้งงอ และไม่มี ความสมมาตร อาจใช้เวลานานในการหาผลเฉลยแม่นยำหรืออาจหาไม่ได้เลย [5]

ในการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟนิยมทำในรูปแบบการทดลองจริงเพื่อเก็บค่าและวิเคราะห์ผลร่วมกับการจำลองพฤติกรรมทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมช่วยคำนวณ Donglei Luan และคณะ ได้ใช้โปรแกรม Quickwave version 7.5 64-bit (QWED, Warsaw, Poland) ซึ่งคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผลต่างเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบระดับครัวเรือน พบว่าตำแหน่งของวัสดุและการหมุนของจานรองวัสดุภายในตู้ไมโครเวฟมีผลต่อความแปรปรวนของคลื่นไมโครเวฟรวมถึงรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Heat Pattern) [6] Chamohong และ Datta ได้ทำการศึกษาดังกล่าวของปริมาณและรูปร่างของอาหารด้วยโปรแกรม FIDAP พบว่ามีผลต่อการกระจายอุณหภูมิของอาหาร อัตราความร้อนรวมถึงเวลาที่ใช้ในการละลายอาหาร [7] Apinun Plodkeaw และ Mudtorlep Nisoe ได้ทำการศึกษาระบบการแพร่ของไมโครเวฟในตู้อบคลื่นแบบมัลติโหมด (Multimode Cavity) เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดภายในตู้ไมโครเวฟไปสู่ตู้คลื่นแบบมัลติโหมด จนกระทั่งเกิดเป็นคลื่นนิ่งภายในตู้คลื่นเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วย COMSOL ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 0.2 % [8] จะเห็นได้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟค่อนข้างสูงและได้รับการยอมรับจากนักวิจัยที่สนใจการใช้

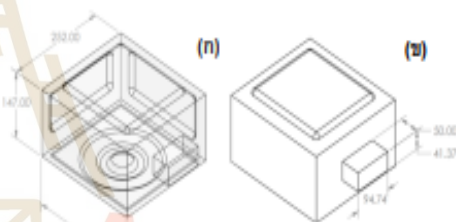
งานคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากมีความสะดวกและปลอดภัยมากกว่าการทำ การทดสอบและตรวจวัดคลื่นโดยตรงมาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟและการทำความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในตู้อบ โดยทำการทดลองให้ความร้อนกับน้ำด้วยตู้ไมโครเวฟระดับครัวเรือน และเปรียบเทียบผลกับการจำลองคลื่นไมโครเวฟบนโปรแกรม COMSOL เมื่อใช้โมเดลที่มีปัจจัยด้านรูปร่างภายในของตู้อบไมโครเวฟแตกต่างกันสองรูปแบบคือ แบบเรียบและแบบเว้ามน ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองคลื่นไมโครเวฟและช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้กับนักวิจัยที่ต้องการออกแบบและทำการจำลองระบบที่เกี่ยวข้องกับคลื่นไมโครเวฟได้ในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การทดสอบการกระจายของอุณหภูมิภายในตู้ไมโครเวฟ

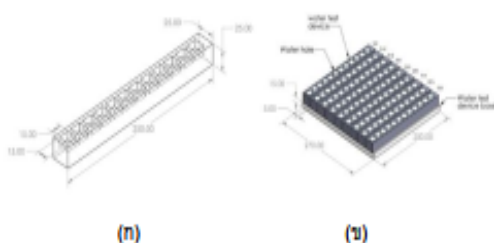
เลือกใช้ตู้ไมโครเวฟยี่ห้อ SHARP ความจุของตู้ 20 ลิตร ขนาด 800 วัตต์ รุ่น R-200W ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งขนาดความกว้าง ความสูง และความลึก (หน่วย mm) แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) ขนาดของตู้ไมโครเวฟที่แสดงรายละเอียดภายในตู้

(ข) ขนาดของตู้ภายนอก

ใช้ถาดแบบ 12 ช่อง (รูปที่ 2ก) แต่ละช่องมีมิติ 15 x 15 x 15 mm สำหรับบรรจุน้ำซึ่งมีสมบัติไดอิเล็กทริกเพื่อทดสอบการกระจายอุณหภูมิของน้ำ ถาดนี้จะถูกติดตั้งกับฐาน (รูปที่ 2ข) ที่สามารถปรับตำแหน่งได้อิสระบนระนาบแนวนอนและแนวตั้งภายในตู้ไมโครเวฟ

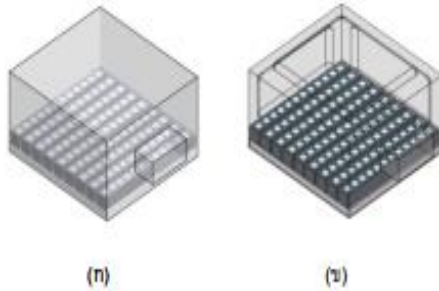


รูปที่ 2 (ก) ถาดแบบช่องสำหรับบรรจุน้ำเพื่อทดสอบการกระจายอุณหภูมิ

(ข) ฐานแบบปรับตำแหน่งได้สำหรับติดตั้งถาด

ทดสอบโดยเติมน้ำในช่องถาดให้เต็มทุกช่องและทำการติดตั้ง ถาดบรรจุน้ำบนฐานที่ระดับความสูง 38 mm (เป็นค่าใกล้เคียงกับระดับการ

เว้นมุม (รูปที่ 4) กำหนดขอบเขตและ Mode การสั่นเหมือนกัน คือ Mode TE₁₀ [8] กำหนดวัตถุในตู้เป็นน้ำที่มีปริมาตรและตำแหน่ง เช่นเดียวกับการทดสอบตู้ไมโครเวฟในหัวข้อ 2.1

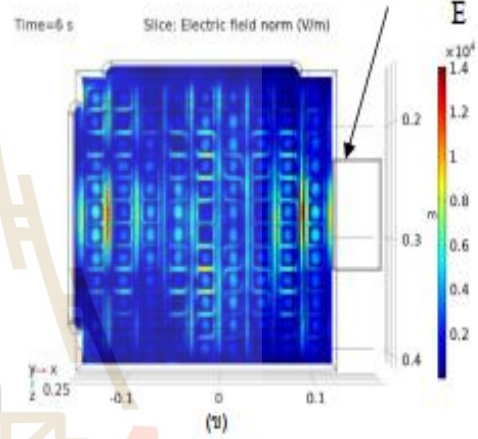
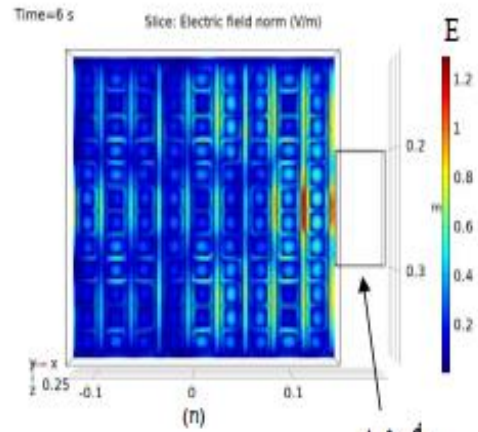


รูปที่ 4 (ก) โมเดลรูปร่างที่ผนังเป็นแบบวางเรียบ และ (ข) โมเดลรูปร่างที่ผนังมีการมีเว้นมุม

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการจำลองคลื่นสนามไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟ

หลังจากคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นแล้วเข้าสู่ห้องอบไมโครเวฟ คลื่นจะแพร่กระจายภายในห้องไปจนถึงขอบเขตห้องซึ่งเป็นผนังโลหะก็จะสะท้อนและแทรกสอดซ้อนทับกัน เกิดเป็นโหมดต่างๆ ภายในห้องคลื่นขึ้น ภาพตัดขวางที่ความสูง 38 mm จากพื้นตู้อบ (รูปที่ 5 ก) แสดงผลการเกิดโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าต่างๆ ภายในห้องผนังวางเรียบ เปรียบเทียบกับโหมดคลื่นสนามไฟฟ้าในห้องผนังเว้นมุมดังแสดงในรูปที่ 5 ข จะสังเกตเห็นว่าแนวโน้มการกระจายพื้นที่ของคลื่นสนามไฟฟ้าระดับ 0.8-0.4 x 10⁴ โวลต์ต่อเมตร ภายในห้องแบบผนังวางเรียบจะเกิดบริเวณตำแหน่งริมผนังห้องและจุดสูงของค่าสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่ 1.2 x 10⁴ โวลต์ต่อเมตร อยู่ตำแหน่งใกล้ทางออกของท่อนำคลื่นทางขวามือ (รูปที่ 5 ก) ในขณะที่ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าของห้องผนังเว้นมุมบริเวณตรงกลางมีความเข้มข้น 1-0.8 x 10⁴ โวลต์ต่อเมตร และความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุดของห้องผนังเว้นมุมจะมีค่าสูงสุดที่ 1.4 x 10⁴ โวลต์ต่อเมตร ที่ตำแหน่งริมซ้ายของห้องและบริเวณทางออกของท่อนำคลื่น (รูปที่ 5 ข) จะสังเกตเห็นว่าการใช้ผนังห้องแบบมุมเว้ามีส่วนช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่ตรงกลางห้องอบได้ดีกว่าห้องแบบผนังวางเรียบซึ่งพื้นที่ส่วนนี้คือตำแหน่งที่วางจานอาหารเพื่ออุ่นให้เกิดความร้อนเอง

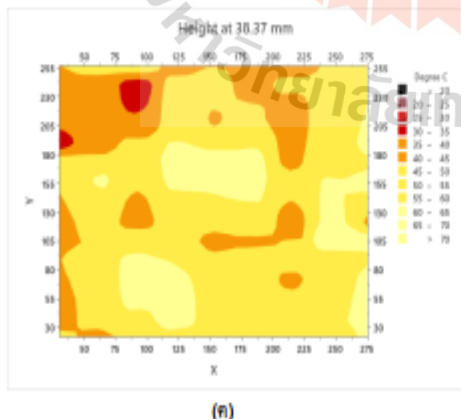
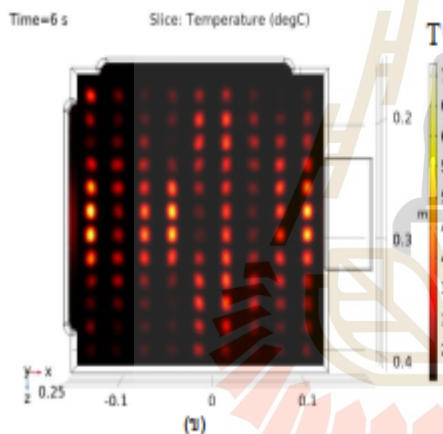
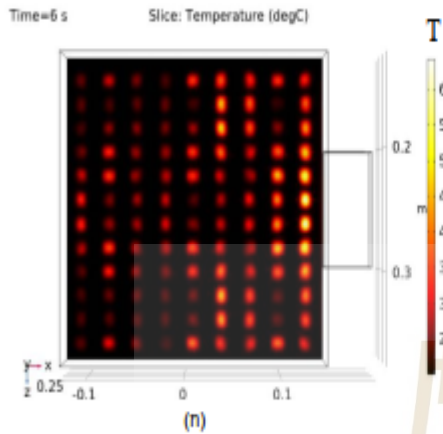


รูปที่ 5 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าภายในห้อง (ก) แบบผนังแบบเรียบและ (ข) แบบผนังเว้นมุม

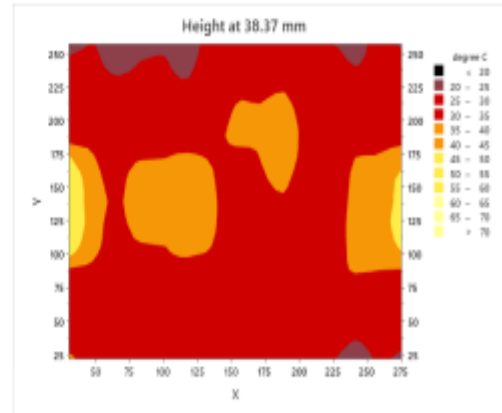
3.2 ผลการจำลองอุณหภูมิของน้ำในตู้ไมโครเวฟ

ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของน้ำในห้องแบบผนังแบบเรียบพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมีค่าเป็น 60 องศาเซลเซียส เกิดที่ตำแหน่งบริเวณทางออกของท่อนำคลื่น (รูปที่ 6 ก) พื้นที่ที่มีระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 60-45 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นบริเวณขอบผนังของห้องเป็นส่วนใหญ่ และตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำสุดเกิดขึ้นบริเวณมุมบนและล่างทางด้านซ้าย ดังรูปที่ 6 ก ในขณะที่ผลการจำลองอุณหภูมิของน้ำในห้องแบบผนังเว้นมุมมีค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส พื้นที่ที่มีระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 70-45 องศาเซลเซียส จะอยู่บริเวณทางออกของท่อนำคลื่น บริเวณตรงกลางของห้อง และริมห้องทางด้านซ้าย ดังรูปที่ 6 ข เมื่อเทียบผลการจำลองการกระจายตัวอุณหภูมิของทั้งสองห้องกับผลการทดสอบการกระจายอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ทดสอบจริงซึ่งมีผนังแบบเว้นมุม (รูปที่ 6 ค) พบว่ามีความใกล้เคียงกับแบบจำลองในห้องผนังแบบเว้นมุมมากกว่า ความแตกต่างที่สำคัญคือผลการกระจายอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดสอบจริงมีระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วง 42-52 องศาเซลเซียส ซึ่งระดับอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าและอยู่ในช่วง 62-72 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำ

นั้นมีความใกล้เคียงกับผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าตามความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6 ผลการจำลองอุณหภูมิของน้ำภายในห้อง (ก) แบบผนังแบบเรียบ และ (ข) ผนังเว้นูน และ (ค) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิในในห้องผนังเว้นูน



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิของน้ำจากแบบจำลองผนังเว้นูน

จากรูปที่ 7 เป็นการแปลงผลการจำลองอุณหภูมิของน้ำในรูปที่ 6 ข เป็นกราฟ Contour จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของการจำลองจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 25-35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดที่ 71 องศาเซลเซียสจะเกิดที่ตำแหน่งซ้ายมือของห้องและทางออกของท่อน้ำคูลิ่ง (ทางขวามือของห้อง) ในขณะที่พื้นที่ 35-45 องศาเซลเซียสจะอยู่ที่พื้นที่กลาง และพื้นที่ 20-25 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่ขอบบนและล่างของห้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการกระจายอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ทดสอบจริงซึ่งมีผนังแบบเว้นูน รูปที่ 6 ค จะพบว่ามีความแตกต่างคือพื้นที่ส่วนใหญ่ของผลการทดสอบการกระจายอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ทดสอบจริงมีอุณหภูมิตั้งแต่ 45-60 องศาเซลเซียส และพื้นที่ 60-70 องศาเซลเซียส บริเวณตรงกลางและด้านล่างทางซ้ายของห้อง ในขณะที่ความเหมือนกันคืออุณหภูมิสูงสุดคือ 60-70 องศาเซลเซียส ที่บริเวณใกล้ทางออกของท่อน้ำคูลิ่งและทางซ้ายของห้อง จะเห็นได้ว่าการกระจายของอุณหภูมิในห้องที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะสอดคล้องกันกับการกระจายอุณหภูมิที่ได้การทดลองแต่มีความแตกต่างกันที่ระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามการทดลองและการจำลองในครั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้และไม่ถูกนำมาเป็นปัจจัยควบคุมในการจำลอง เช่น ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้น การสูญเสียพลังงานเนื่องจากสภาพแวดล้อม และรูปร่างของท่อน้ำคูลิ่งซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนแล้วส่งผลต่อการเกิดโหมตสนามไฟฟ้าและการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในห้องไมโครเวฟและค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของรูปร่างของห้องส่งผลต่อการกระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าและเป็นผลทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนไปตามโหมตของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของน้ำในห้องผนังแบบเว้นูนจะมีความคล้ายเชิงพื้นที่กับการกระจายอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจำลองรูปร่างผิวของห้องนั้นส่งผลต่อการ

กระจายอุณหภูมิต่างกันมากหากมีการออกแบบระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟซึ่งมีปัจจัยของการออกแบบคือเรื่องความถี่คลื่นประเภทวัสดุ และกำลังไฟ รูปร่างของห้องก็ส่งผลกระทบต่อกระจายของโหมตคลื่นเช่นกัน การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิจึงน่าเชื่อถือขึ้นทั้งนี้ทั้งนี้ระหว่างการจำลองและการทดสอบจริงช่วยสร้างความเชื่อมั่นว่าการจำลองด้วยโปรแกรมสามารถให้คำตอบได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงและมีความสามารถเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการจำลองระบบเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในห้องคลื่นแบบอื่นๆ ได้ดีเช่นกัน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Madhuohanda Bhattaoharya, Tanmay Basak. (2015). A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. *Energy*, 97, 308-338.
- [2] Morteza Oghbaei, Omid Mirzaee. (2010). Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 494, 175-189.
- [3] Canale, R., & Chapra, S. (2014). *Numerical methods for engineers*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- [4] Griffiths G, Sohieser, W. E. (2010). *Traveling wave analysis of partial differential equations: Numerical and analytical methods with matlab and maple*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- [5] Dechaumphai P. (2020). *Computer Aided Engineering with MATLAB and ANSYS*. Bangkok: Cupress.
- [6] Donglei Luan, Yifen Wang, Juming Tang, and Deepali Jain. (2017). Frequency Distribution in Domestic Microwave Ovens and Its Influence on Heating Pattern. *Journal of Food Science*, Vol 82.
- [7] Chamohong M, Datta AK. (1996). Thawing of foods in a microwave oven: II. Effect of load geometry and dielectric properties. *J Microwave Powers Electromagnetic Energy*, 34, 22-32.
- [8] Apinun Plodkeaw, Mudtorlep Nieng. (2012). 3D Simulations of Microwave Propagation in Multimode Cavity by Meep. *Burapha Sci.* 17, 139-149.
- [9] COMSOL. (2005). *COMSOL Multiphysics: User's guide*. Burlington, MA: COMSOL.
- [10] Balanis CA. (1989). *Advanced engineering electromagnetics*. New York: John Wiley & Sons.
- [11] Von Hippel AR. (1954). *Dielectrics and waves*. Massachusetts: MIT Press.

ประวัติผู้เขียน

นายธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2539 ที่อำเภอสิงห์ขอม จังหวัดสุรินทร์ เริ่มศึกษาระดับชั้นอนุบาลที่โรงเรียนเหรียญทองวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 2 เรียนที่โรงเรียนสายมิตร ประถมศึกษาชั้นที่ 3-6 เรียนโรงเรียนประชารัฐสามัคคี และระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล) ด้วยทุน 84 พรรษาเฉลิมพระเกียรติ ในปี พ.ศ. 2558 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ) ทุนOROG ในปี พ.ศ. 2562 จากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โดยในขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนในของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลอยู่หลายวิชารายวิชา เช่น วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม วิชาพอลิเมอร์สำหรับวิศวกรรมยานยนต์และวิชาเขียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์

ผลงานวิจัยที่นำเสนอขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวีตรี อำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2564). **อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก.** การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 22 , 10 - 14 พฤษภาคม 2564, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวีตรี อำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2564). **สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105.** วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 (2565). (รอออนไลน์)

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวีตรี อำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2565). **การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นไมโครเวฟในตู้อบอาหารระดับครัวเรือน.** การประชุมวิชาการการถ่ายพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนกระบวนการ ครั้งที่ 14, 10 - 11 มีนาคม 2565, โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท จังหวัดเชียงใหม่