

ผลของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวต่อจุลินทรีย์บางชนิดและการประยุกต์

นางสาวปุนหอม เหลืองอ่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาจุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HOUSEHOLD AND SINGLE MODE MICROWAVES ON SELECTED
MICROORGANISMS AND APPLICATIONS

Miss Poonhom Lueng-on



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Microbiology and Microbial Technology

Department of Microbiology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวต่อจุลินทรีย์บางชนิดและการประยุกต์
โดย	นางสาวปุนหอม เหลืองอ่อน
สาขาวิชา	จุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย ภัทรกุลวณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเมธ เฉลิมวิสุตม์กุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาหนัน เรืองสำราญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย ภัทรกุลวณิชย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเมธ เฉลิมวิสุตม์กุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ธัญนุช เกรียงไกรพิพัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ณัฐพันธุ์ ศุภกา)

ปูนหอม เหลืองอ่อน : ผลของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวต่อจุลินทรีย์บางชนิดและการประยุกต์ (EFFECTS OF HOUSEHOLD AND SINGLE MODE MICROWAVES ON SELECTED MICROORGANISMS AND APPLICATIONS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. กอบชัย ภัทรกุลวณิช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.สุรเมธ เฉลิมวิสุตม์กุล, 121 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของไมโครเวฟครัวเรือนกับไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์และ 850 วัตต์ตามลำดับต่อจุลินทรีย์บางชนิด ไมโครเวฟครัวเรือนสามารถทำลายเซลล์ของแบคทีเรีย *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus luteus* และ *Bacillus subtilis* ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* สปอร์ของ *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus nidulans* และแอสโคสปอร์ของ *Emericella nidulans* ได้ในเวลา 90 วินาที เอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* ถูกทำลายภายในเวลา 300 วินาที ไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวสามารถทำลายเซลล์ของจุลินทรีย์ข้างต้นและสปอร์ของเราได้ทั้งหมดในเวลา 90 วินาที และทำลายเอนโดสปอร์จนเหลือ 2.5 ลอการิทึม ทำลายสปอร์ *R. oryzae* และแอสโคสปอร์ได้ในเวลา 120 วินาที จากการศึกษาสภาพของเซลล์แบคทีเรีย ยีสต์ และสปอร์ราด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเซลล์แบคทีเรีย ยีสต์และสปอร์ราที่ถูกกระทำด้วยไมโครเวฟครัวเรือนเป็นเวลา 60 และ 90 วินาทีเสียหาย พบความเสียหายที่ผนังเซลล์แบคทีเรีย ผนังของสปอร์ราหลุดลอกออก และเอนโดสปอร์ที่ถูกกระทำด้วยไมโครเวฟครัวเรือนเป็นเวลา 180 วินาทีมีความเสียหายที่ผนังของเอนโดสปอร์เช่นเดียวกัน การใช้ไมโครเวฟครัวเรือนเป็นเวลา 60 วินาที จะทำให้ลดความชื้นในข้าวได้ 15.7-32.9% พบราปนเปื้อนในข้าวเปลือก 100% ซึ่งเป็นราในจีนัส *Aspergillus*, *Penicillium* และ *Rhizopus* หลังการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟจะลดจำนวนราลงได้ 26.7-100% ไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวจึงเป็นทางเลือกในการทำลายจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ระยะเวลาสั้น

ภาควิชา	จุลชีววิทยา	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	จุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5672021023 : MAJOR MICROBIOLOGY AND MICROBIAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: MICROWAVE TREATMENT / PADDY GRAINS / SINGLE MODE MICROWAVE

POONHOM LUENG-ON: EFFECTS OF HOUSEHOLD AND SINGLE MODE MICROWAVES ON SELECTED MICROORGANISMS AND APPLICATIONS. ADVISOR: ASST. PROF. KOBCHAI PATTARAGULWANIT, Dr.rer.nat., CO-ADVISOR: ASST. PROF. SURAMATE CHALERMWISUTKUL, Dr.Ing., 121 pp.

The aim of this study is to investigate the efficiency of household and single mode microwave at 2,450 MHz with power level of 800 and 850 W, respectively. The household microwave could destroy *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus luteus*, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae* as well as spores of *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus nidulans* and ascospores of *Emericella nidulans* within 90 seconds. Endospores of *B. subtilis* were completely destroyed within 300 seconds. The single mode microwave applicator killed above mentioned microorganisms and fungal spores within 90 seconds. Endospores of *B. subtilis* were decreased to 2.5 log. Ascospores and spores of *R. oryzae* were killed within 120 seconds. SEM photographs of treated microbial cells, endospores and fungal spores revealed the damage of cell wall of bacteria and yeast as well as endospores. Fungal spores wall were deformed. The application of household microwave for 60 seconds could reduce moisture content in paddy grains to 15.7-32.9%. The paddy grains were 100% contaminated with fungi in the genus of *Aspergillus*, *Penicillium*, and *Rhizopus*. After microwave treatment, the number of contaminated fungi was reduced up to 26.7-100%. Therefore, the household and single mode microwave are an alternative method to effectively kill microorganisms in the short time.

Department: Microbiology Student's Signature

Field of Study: Microbiology and Advisor's Signature

Microbial Technology Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย ภัทรกุลวณิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเมธ เฉลิมวิสุตม์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ช่วยแก้ไขปัญหา และให้ข้อคิดเห็นในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตาของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาหนัน เรืองสำราญ ที่กรุณารับเป็นประธานในการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งช่วยปรับปรุงและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ธัญนุช เกรียงไกรพิพัฒน์ และ ดร. ญัฐพันธ์์ ศุภกา ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และช่วยแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกต่างๆ แก่ผู้วิจัย รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ผ่านมาในชีวิต ที่ได้อบรมสั่งสอนมาจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา เพื่อสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการความถี่วิทยุและไมโครเวฟ บัณฑิตวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดี

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนในภาควิชาจุลชีววิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องปฏิบัติการ 1704/13 อาคารมหาวชิรุณหิศ ที่ได้ช่วยเหลือทุกอย่าง และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณพ่อแม่ และน้องชายที่คอยอยู่เคียงข้าง ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ รวมถึงให้กำลังใจเป็นอย่างดีในทุกๆ ด้านแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปรัชญาวัฒนธรรม	5
2.1 การควบคุมประชากรจุลินทรีย์.....	5
2.2 ไมโครเวฟ.....	9
2.3 วัสดุไดอิเล็กทริกและสมบัติไดอิเล็กทริก	12
2.4 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในเชิงจุลชีววิทยา.....	15
2.4.1 ด้านการแพทย์.....	17
2.4.2 ด้านอุตสาหกรรมอาหาร	17
2.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อม	18
2.4.4 ด้านเกษตรกรรม.....	19
2.5 การเพาะปลูกข้าวในประเทศไทย	21
2.6 การปนเปื้อนราในข้าวเปลือก	22
2.7 การลดความชื้นในข้าวเปลือก.....	23

บทที่ 3 อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย	28
3.1 จุลินทรีย์และการเพาะเลี้ยง.....	33
3.1.1 จุลินทรีย์.....	33
3.1.2 การเพาะเลี้ยง.....	34
3.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	36
3.2.1 ตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเจริญของจุลินทรีย์.....	36
3.2.2 ตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อและสารที่ใช้ทดสอบอื่น ๆ.....	37
3.2.3 การวัดความถี่ของตัวอย่างสารที่ใช้ทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบ เวกเตอร์.....	37
3.2.4 การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	38
3.3 การทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟคร่าวเรือน	39
3.3.1 การทดสอบหาจุดร้อน (hotspot) ในไมโครเวฟคร่าวเรือน (Kharkovsky และ Hasar (2003)).....	39
3.3.2 การวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่น.....	39
3.3.3 การกระทำจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟคร่าวเรือน.....	40
3.4 การทำลายจุลินทรีย์ด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว	40
3.4.1 การวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่น.....	40
3.4.2 การกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว	41
3.5 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การรอดของจุลินทรีย์.....	42
3.6 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของสปอร์และเซลล์ของจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)	42
3.6.1 การเตรียมตัวอย่างจุลินทรีย์เพื่อส่งตรวจ.....	42
3.6.2 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	43

3.7 การยับยั้งราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟครัวเรือน	44
3.7.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก	44
3.7.2 การลดความชื้นในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ	45
3.7.3 การลดความชื้นในข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแห้ง	45
3.7.4 การวัดปริมาณความชื้นเริ่มต้นโดยวิธีของ ASAE (1982).....	45
3.7.5 อัตราการงอกของข้าวเปลือก (International Seed Testing Association (2003))	46
3.7.6 การคัดแยกและหาจำนวนราทั้งหมดที่ปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวเปลือก.....	46
3.7.6.1 การคัดแยกราในข้าวเปลือกด้วยวิธี direct plating	46
3.7.6.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือก	47
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	48
4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	48
4.2 การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นเมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	53
4.3 จุดร้อน (hotspot) ภายในไมโครเวฟครัวเรือน.....	54
4.4 การทำลายจุลินทรีย์โดยไมโครเวฟ	55
4.4.1 แบคทีเรีย	55
4.4.2 เอนโดสปอร์ของ <i>B. subtilis</i>	57
4.4.3 ยีสต์และสปอร์รา.....	59
4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
4.5.1 เซลล์แบคทีเรียและเอนโดสปอร์ของแบคทีเรีย.....	65
4.5.2 ยีสต์และสปอร์รา.....	68
4.6 การยับยั้งจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ	76

4.6.1 การลดความชื้นในข้าวเปลือก	76
4.6.2 การงอกของข้าวเปลือก.....	80
4.6.3 การทำลายราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกตัวอย่าง	82
4.6.4 ชนิดของราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือก	84
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	88
5.1 ค่าคงที่ไดอิลีกทริก	88
5.2 การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นด้วยไมโครเวฟคร้วร้อนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว	91
5.3 จุดร้อนในไมโครเวฟคร้วร้อน.....	92
5.4 ประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟ	93
5.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์หลังจากทดสอบด้วยไมโครเวฟ	97
5.6 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟเพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือก	99
5.7 การงอกของเมล็ดข้าว.....	101
5.8 การยับยั้งราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ	102
5.9 ข้อเสนอแนะ	103
รายการอ้างอิง	105
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ	117
ภาคผนวก ข สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	121

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและรังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน.....	8
รูปที่ 2.2 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไอออนและกลไกกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว.....	12
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความถี่เรโซแนนซ์และความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและความถี่เพื่อคำนวณ ค่าของตัวประกอบเชิงคุณภาพ	14
รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ต่อวงจรกับ cavity resonator ที่มีขนาดความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์.....	38
รูปที่ 3.2 ไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่ความถี่ 2.45 GHz ประกอบด้วยแมกนีตรอน (A), ท่อนำคลื่น (B), cavity (C) และภาชนะบรรจุทรงกระบอก	41
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ของสารตัวอย่าง	51
รูปที่ 4.2 การตอบสนองต่อความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ของ <i>B. subtilis</i> และ <i>S. cerevisiae</i> ที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรเท่ากับ 0.5 และ 1	51
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ทดสอบโดยไมโครเวฟคร่าวเรือน (■) และไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว(●).....	53
รูปที่ 4.4 กระจาดายแฟกซ์แสดงตำแหน่งจุดร้อนภายในไมโครเวฟคร่าวเรือนที่เวลา 30 วินาที (ซ้าย) และ 120 วินาที (ขวา).....	54
รูปที่ 4.5 จำนวนแบคทีเรียและอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟคร่าวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ	56
รูปที่ 4.6 จำนวนแบคทีเรียและอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่ กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ.....	56
รูปที่ 4.7 จำนวนเอนโดสปอร์ <i>B. subtilis</i> และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟคร่าวเรือนที่ กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ.....	58

รูปที่ 4.8 จำนวนเอนโดสปอร์ <i>B. subtilis</i> และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ	58
รูปที่ 4.9 จำนวน <i>S. cerevisiae</i> และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ	61
รูปที่ 4.10 จำนวน <i>S. cerevisiae</i> และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ	61
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำลายสปอร์ราด้วยไมโครเวฟครัวเรือน และอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ	62
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำลายสปอร์ราด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว และอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ	62
รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ <i>L. monocytogenes</i> (A, C) และเซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือน (B, D) ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า (รูปบน) และ 40,000 เท่า (รูปล่าง).....	66
รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเอนโดสปอร์ <i>B. subtilis</i> (A, C) และเซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือน (B, D) ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า (รูปบน) และ 40,000 เท่า (รูปล่าง).....	67
รูปที่ 4.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ <i>S. cerevisiae</i> (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ซ้าย) และ 15,000 เท่า (ขวา).....	70
รูปที่ 4.16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ <i>A. niger</i> (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา).....	71

รูปที่ 4.17 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ <i>P. chrysogenum</i> (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา)	72
รูปที่ 4.18 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ <i>R. oryzae</i> (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา).....	73
รูปที่ 4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ <i>A. nidulans</i> (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา).....	74
รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแอสโคสปอร์ (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 12,000 เท่า (ซ้าย) และ 25,000 เท่า (ขวา).....	75
รูปที่ 4.21 ลักษณะข้าวเปลือกที่แตกพองจากการทดสอบกับไมโครเวฟ เวลา 90 วินาที.....	78
รูปที่ 4.22 การงอกของเมล็ดข้าวเปลือกตัวอย่าง P11 ที่ผ่านกระบวนการตากเป็นเวลา 3 วัน.....	80
รูปที่ 4.23 ราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกตัวอย่าง P6 (ซ้าย) และราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกตัวอย่าง P6 ที่ผ่านกระบวนการตาก (ขวา)	83
รูปที่ 4.24 ราในสกุล <i>Penicillium</i> (บน) และ <i>Rhizopus</i> (ล่าง) ที่คัดแยกได้จากข้าวเปลือกที่กำลังขยาย 400 เท่า.....	85
รูปที่ 4.25 ราในสกุล <i>Aspergillus</i> ที่คัดแยกได้จากข้าวเปลือกที่กำลังขยาย 400 เท่า	86
รูปที่ 4.26 ราในสกุล <i>Aspergillus</i> ที่คัดแยกได้จากข้าวเปลือกที่กำลังขยาย 400 เท่า (ต่อ).....	87
รูปที่ 5.1 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว (A) และรูปแบบการเกิดจุดร้อนในเตาไมโครเวฟครัวเรือน (B).....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ระดับปริมาณความชื้นสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ และปัญหา ที่พบ.....	25
ตารางที่ 3.1 แบบที่เรียที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย	33
ตารางที่ 3.2 ราและยีสต์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย	34
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างข้าวเปลือก ชนิดของพันธุ์ข้าว ระยะเวลาเก็บเกี่ยว และแหล่งที่มา.....	44
ตารางที่ 4.1 ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสาร ตัวอย่าง.....	52
ตารางที่ 4.2 ค่า D-value ของจุลินทรีย์เมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟ	64
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสภาพภูมิอากาศในวันที่ 28-30 มกราคม 2559	77
ตารางที่ 4.4 ความชื้นในข้าวเปลือกก่อนและหลังการลดความชื้นด้วยวิธีต่างๆ	79
ตารางที่ 4.5 การงอกของข้าวเปลือกตัวอย่างหลังผ่านการลดความชื้นด้วยไมโครเวฟและการตาก .	81
ตารางที่ 4.6 การปนเปื้อนราในตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนและหลังการลดความชื้นด้วยการตาก และการใช้ไมโครเวฟ	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไมโครเวฟจัดอยู่ในประเภทรังสีชนิดไม่แตกตัวเป็นไอออน โดยเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นขนาด 0.001 ถึง 1 เมตรที่ความถี่ 0.3 ถึง 300 กิกะเฮิรตซ์ในช่วงระหว่างความถี่วิทยุและความถี่อินฟราเรด (Janković และคณะ, 2014, ฐิติมา เอ็งเจริญ, 2554) ไมโครเวฟสามารถก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุโดยการเปลี่ยนพลังงานในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้กลายเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งแสดงในรูปของของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Assawarachan และคณะ, 2011, ฐิติมา เอ็งเจริญ, 2554)

ไมโครเวฟมีผลต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ในสองแบบ คือ ผลที่เกี่ยวกับความร้อน (thermal effect) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนพลังงานจากไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ต่างจากความร้อนที่เกิดจากวิธีการที่อาศัยตัวกลางในการพาหรือการนำความร้อน และผลที่ไม่เกี่ยวกับความร้อน (nonthermal effect) เป็นผลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอุณหภูมิในวัสดุ แต่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทุติยภูมิและตติยภูมิของโปรตีนโดยกลไกการจัดเรียงตัวของโมเลกุล และทำให้เมมเบรนเสียสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่านนำไปสู่การตายของเซลล์ในที่สุด (Mishra และคณะ, 2013, Janković และคณะ, 2014)

เนื่องจากไมโครเวฟมีผลต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และอาจทำให้เซลล์ตายได้ จึงมีการศึกษาประสิทธิภาพของไมโครเวฟในการทำลายจุลินทรีย์ ไมโครเวฟสามารถยับยั้งการเจริญของ *Streptococcus faecalis*, *Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus* และ *Listeria* spp. รวมทั้งสปอร์ของแบคทีเรียและรา พลังงานจากไมโครเวฟที่ให้ความร้อนมากกว่า 60 องศาเซลเซียส มีผลทำลาย *Escherichia coli* และ *Bacillus subtilis* โดยศึกษาจากปริมาณดีเอ็นเอที่ออกมาออกเซลล์ เนื่องมาจากความเสียหายที่เยื่อหุ้มเซลล์ (Woo และคณะ, 2000) จุลินทรีย์แต่ละประเภทถูกทำลายเมื่อรับไมโครเวฟในระดับที่มากพอ ขึ้นกับปัจจัยเรื่องความถี่ ขนาดกำลังไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ ต่อมามีการนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ในด้านการแพทย์ ด้าน

สิ่งแวดล้อม ด้านอาหาร และด้านเกษตรกรรม (Shamis และคณะ, 2011, Janković และคณะ, 2014)

ทางด้านการศึกษาและทันตกรรมได้มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์เพื่อทำลาย *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans*, และ *Bacillus subtilis* ซึ่งปนเปื้อนในวัสดุเรซินสำหรับใช้ในทันตกรรม (Janković และคณะ, 2014) Banana และคณะ (2013) ใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 385, 450 และ 700 วัตต์ ที่เวลา 1, 5 และ 10 นาทีตามลำดับ ทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคในของเสียทางการแพทย์ที่แห้ง

ในอุตสาหกรรมอาหาร มีการนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การลวก การปรุงสุก การอบ การทำให้แห้ง การละลายน้ำแข็ง รวมทั้งการพาสเจอร์ไรเซชัน Al-Hilphy และ Ali (2013) ศึกษาการใช้ไมโครเวฟเพื่อทำลายจุลินทรีย์ในน้ำนมวัวด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เวลาสั้น (flash pasteurization) ในขณะที่ยังคงประกอบทางเคมีในน้ำนม คือ ไขมัน แลคโตส และโปรตีนไม่สูญเสียไปเมื่อเทียบกับวิธีให้ความร้อนด้วยการต้มเดือด

การใช้ไมโครเวฟยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการก่อนการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร Jeevitha และคณะ (2016) รายงานว่าการใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 663 วัตต์ เป็นเวลา 12.5 นาที สามารถควบคุมประชากรจุลินทรีย์ในพริกไทยดำให้อยู่ในระดับมาตรฐานของ ICMSF และสมาคมเครื่องเทศแห่งยุโรป โดยไม่ทำให้พิเพอรินซึ่งเป็นสารอัลคาลอยด์ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในพริกไทยดำเสียสภาพ และยังช่วยลดความชื้นได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากวิธีการใช้ไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์นี้มีข้อดี คือ ประหยัดเวลาและพลังงาน จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ประยุกต์กับไมโครเวฟโดยใช้หลักการทางวิศวกรรมร่วมด้วยเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ Prapuchanay และคณะ (2012) ประดิษฐ์ระบบให้ความร้อนโดยไมโครเวฟเชิงโหมดเดี่ยว (Single Mode Cylindrical Microwave Cavity) เพื่อพัฒนาให้เป็นระบบให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม โดยทดสอบประสิทธิภาพของระบบกับของเหลว คือ น้ำ นม น้ำมันปาล์ม และไบโอดีเซล พบว่าระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 23 องศาเซลเซียสถึง 85 องศาเซลเซียสซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มเป็น 63 องศาเซลเซียสด้วยเตาไมโครเวฟครัวเรือนในเวลาเท่ากันที่ 120 วินาที

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟยังได้รับการยอมรับมากขึ้นในการอบแห้งผลผลิตการเกษตร กระบวนการอบแห้งมีส่วนสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนานขึ้นเป็นการรองรับ ปัญหาผลผลิตล้นตลาดและเพิ่มมูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรอีกทางหนึ่ง (Assawarachan และ คณะ, 2011) จึงได้มีงานวิจัยที่พัฒนาระบบการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟร่วมกับเทคโนโลยีการ อบแห้งแบบอื่นเพื่อใช้ลดความชื้นในธัญพืชที่มีความชื้นสูงหลังการเก็บเกี่ยว เช่น ถั่ว ข้าว และ ข้าวโพด โดยการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมต้องพิจารณาจากต้นทุนการผลิต ต้นทุน การบำรุงรักษา วิธีการใช้งานไม่ซับซ้อน และส่งผลดีต่อคุณภาพของผลผลิต

ข้าว (สกุล *Oryza*) จัดเป็นเป็นธัญพืชที่ประชากรโลกมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะใน ทวีปเอเชีย รวมถึงประเทศไทยเลือกบริโภคเป็นหลัก (Park และคณะ, 2012, Xing-jun และคณะ, 2016) ปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกหลังกระบวนการเก็บเกี่ยวนั้นมีความสำคัญต่อคุณภาพของ ข้าวเปลือก และส่งผลต่อราคาของข้าวเปลือกในแต่ละรุ่นผลิตอีกด้วย ดังนั้นข้าวเปลือกที่มีความชื้น มากกว่าร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักแห้งจำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้งก่อนจะเก็บต่อไป ในกลุ่ม ประเทศที่มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นพบว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นร้อยละ 14 ต่อน้ำหนักทั้งหมด สามารถเก็บได้นานถึง 3 เดือน (Park และคณะ, 2012, ขวลิขิต หาญดี, 2558) โดยทั่วไปสามารถ ตรวจพบจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผลผลิตทางการเกษตรซึ่งมีจำนวนมากขึ้นหากในโกดังนั้นมีความชื้น มากกว่า 14 เปอร์เซ็นต์ จากสาเหตุดังกล่าวทำให้เมล็ดเสียสภาพ ความสามารถในการงอก รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการจึงไม่สามารถนำไปแปรรูปต่อในระดับอุตสาหกรรมได้ (Magan และ Aldred, 2007, Mujumdar, 2014) แสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณความชื้นในผลผลิตทาง การเกษตรเป็นวิธีการหนึ่งในการควบคุมประชากรจุลินทรีย์

วิธีที่นิยมเพื่อลดปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกให้เป็นไปตามมาตรฐานการเก็บรักษา คือ วิธีการทำให้แห้ง (drying) ซึ่งเป็นวิธีการหลัก ตัวอย่างเช่น การตากแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไป เนื่องจากค่าใช้จ่ายน้อยและทำได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลานาน ใช้พื้นที่และแรงงานมาก อีกทั้งยัง ไม่สามารถควบคุมคุณภาพข้าวได้ (International Rice Research Institute, 2016) ในประเทศ ไทยแบ่งการตากข้าวออกเป็น 2 แบบ คือการตากข้าวในนาและการตากลาน (ขวลิขิต หาญดี, 2558) วิธีการทำให้แห้งโดยใช้เครื่องจักร ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในโรงสีระดับเล็กถึงใหญ่ คือ การใช้เครื่องอบ ลมร้อนซึ่งแบ่งตามรูปแบบการใช้งานได้เป็น 2 แบบ คือ แบบกะ และแบบต่อเนื่อง (International

Rice Research Institute, 2016) ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟเพื่อเป็นระบบลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น Cheenkachorn (2007) พัฒนาการใช้ไมโครเวฟร่วมกับเครื่องอบแห้งภายใต้สุญญากาศ (microwave-vacuum dryer) เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานีก่อนเข้าสู่กระบวนการสี พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้น ยิ่งทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกลดลง และคุณภาพของข้าวสารที่ได้จากการอบนี้มีความยืดหยุ่น และสามารถดูดซับน้ำได้ไม่แตกต่างจากวิธีการอบแห้งแบบปกติ

แม้ว่าไมโครเวฟนั้นเป็นที่รู้จักมาเป็นเวลานานเนื่องจากการนำมาใช้ภายในครัวเรือนอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ประกอบอาหาร และมีการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและการแพทย์ แต่ในด้านเกษตรกรรมยังต้องการผลการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับผลทางชีวภาพที่มีต่อจุลินทรีย์และพัฒนาวิธีการใช้ไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและพัฒนาคุณภาพให้ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นมีมูลค่ามากยิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการทดสอบประสิทธิภาพของไมโครเวฟครัวเรือนที่ใช้ในชีวิตประจำวันและระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว (single-mode microwave applicator) ในการทำลายจุลินทรีย์ รวมทั้งลดความชื้นและควบคุมประชากรจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยว

1.2 วัตถุประสงค์

ทดสอบประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนและระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และการประยุกต์ใช้กับการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ในข้าวเปลือก

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบประสิทธิภาพของไมโครเวฟทั่วไปและระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวในการทำลายจุลินทรีย์ และได้วิธีการในการยับยั้งจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกโดยเตาไมโครเวฟ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1 การควบคุมประชากรจุลินทรีย์

การควบคุมประชากรจุลินทรีย์ คือ วิธีการควบคุมจำนวนและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การควบคุมประชากรจุลินทรีย์นั้นเกิดขึ้นมานานหลายพันปีและในปัจจุบันยังมีการใช้วิธีการเหล่านี้อยู่ โดยหลักฐานทางประวัติศาสตร์ชี้ให้เห็นว่า มนุษย์ยุคโบราณรู้จักการใช้เกลือหรือการตากแห้งในการถนอมอาหารสด หรือชาวโรมันใช้วิธีการเผาศพเพื่อจำกัดการแพร่ระบาดของโรค (Hofkin, 2011)

การควบคุมจุลินทรีย์ หมายรวมถึงการทำลายจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด รวมทั้งสปอร์และไวรัส (sterilization) การทำลายเซลล์ปกติของจุลินทรีย์ (vegetative cell) แต่ไม่ทำลายเอนโดสปอร์ของแบคทีเรีย (disinfection) การลดจำนวนประชากรจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่มีความปลอดภัยตามมาตรฐาน (decontamination) การหยุดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (inactivation) และการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ (antiseptic) (Cowan และ Bunn, 2014) ในบางกรณีการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ ไม่ได้มีความหมายเพียงการจำกัดจำนวนจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่กำหนด แต่ในบางกรณียังหมายถึงการส่งเสริมจุลินทรีย์ให้ได้จำนวนที่ต้องการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณของอุตสาหกรรมอาหารและยาบางประเภท (Hofkin, 2011) การควบคุมประชากรจุลินทรีย์มีความสำคัญอย่างมากในทางการแพทย์ เกษตรกรรม รวมทั้งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในคน สัตว์ และพืช ซึ่งก่อความเสียหายต่อวิถีการดำรงชีวิตและเศรษฐกิจ สถานที่ที่จำเป็นต้องมีการควบคุมจุลินทรีย์อย่างเคร่งครัด ได้แก่ โรงพยาบาล ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการด้านอาหารและยา รวมทั้งที่อยู่อาศัยของประชากรทั่วไป (Hofkin, 2011, Mahon และคณะ, 2015)

มีการศึกษาและวิจัยทางจุลชีววิทยาเกี่ยวกับการควบคุมจุลินทรีย์เป็นเวลานาน การศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการควบคุมจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น จำนวนของจุลินทรีย์ ชนิดของจุลินทรีย์ ระยะการเจริญของจุลินทรีย์ และภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญ เป็นต้น

(Banwart, 1989) การจำกัดปัจจัยของภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ในการเจริญ (optimum condition) เป็นหลักการสำคัญในการกำหนดวิธีการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือปริมาณออกซิเจน เป็นต้น (Hofkin, 2011) เนื่องจากองค์ประกอบของจุลินทรีย์หรือสปอร์ของจุลินทรีย์แต่ละชนิดแตกต่างกัน ส่งผลให้จุลินทรีย์นั้นทนทานต่อวิธีการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ได้แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น เอนโดสปอร์ของแบคทีเรียทนต่อการถูกทำลายได้มากกว่าสปอร์ของรา ส่วนแบคทีเรียกลุ่ม *Staphylococcus* และ *Pseudomonas* ทนต่อการถูกทำลายได้มากกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบส่วนใหญ่ (Cowan และ Bunn, 2014) จึงต้องเลือกใช้วิธีการควบคุมจุลินทรีย์ในจุดประสงค์ต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมกับปัจจัยเหล่านี้

วิธีการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

1) **วิธีการทางเคมี** เป็นการใส่สารเคมีในการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ซึ่งมีหลายชนิดโดยคำนึงถึงประเภทของสิ่งที่จะทำให้ปลอดภัย ซึ่งสารเคมีแต่ละชนิดมีกลไกในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น

- สารประเภทฟีนอล มีสมบัติทำลายโปรตีน และรบกวนเมมเบรนของเซลล์
- สารประกอบของธาตุฮาโลเจน เช่น สารประกอบคลอรีน สารประกอบไอโอดีน ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ และทำลายโปรตีนโครงสร้าง
- แอลกอฮอล์ มีสมบัติละลายไขมัน และดึงน้ำออกจากเซลล์
- สารลดแรงตึงผิวและสารชำระล้าง รบกวนการผ่านเข้าออกสารของเมมเบรน
- สารประเภทอัลดีไฮด์ เช่น ฟORMALIN และกลูตารัลดีไฮด์ สามารถรวมตัวกับโปรตีนและทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของกรดนิวคลีอิก
- ไอออนของโลหะหนัก สามารถรวมตัวกับโปรตีน และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์
- สารออกซิแดนท์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น (Pommerville, 2013, Cowan และ Bunn, 2014)

นอกจากนี้สารในพืชสมุนไพรบางประเภทสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้เช่นกัน เช่น อบเชย กระเทียม และวาซาบิ เป็นต้น (Pommerville, 2013) หรือสารในสถานะแก๊ส เช่น แก๊สเอทิลีนออกไซด์หรือโอโซนยังสามารถใช้เพื่อยับยั้งการเจริญหรือลดจำนวนของจุลินทรีย์บนพื้นผิวของ

วัตถุหรือเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ประสิทธิภาพของการใช้สารเคมีเพื่อควบคุมจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ ปริมาณของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน และระยะเวลาที่จุลินทรีย์สัมผัสกับสารเคมี (Todar, 2008)

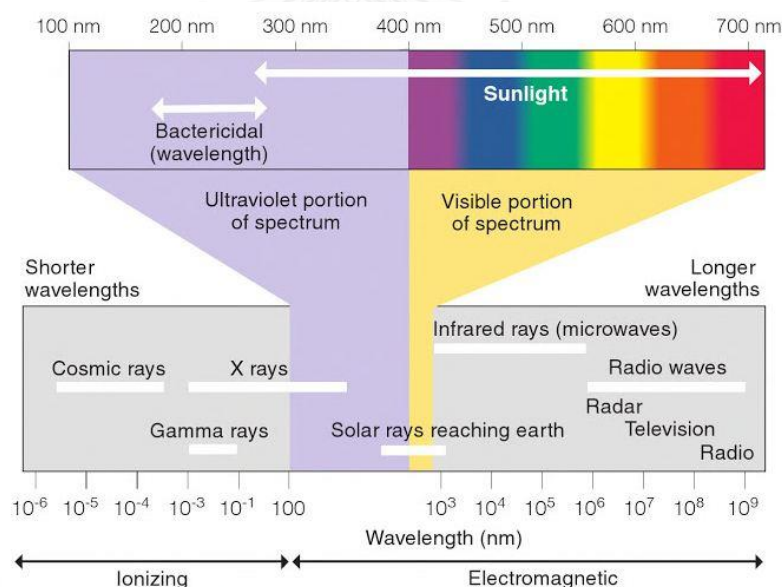
2) วิธีการทางกายภาพ แบ่งเป็นวิธีการที่เกี่ยวข้องกับความร้อน ซึ่งทำลายเซลล์ของจุลินทรีย์โดยตรง โดยการทำให้โปรตีนเสียสภาพ ยกตัวอย่างเช่น การใช้ความร้อนแห้งโดยตู้อบลมร้อน (hot air oven) หรือการเผาโดยตรง (incineration) การใช้ความร้อนชื้น เช่น การต้มเดือด พาสเจอร์ไรเซชัน (pasteurization) ทินดัลไลเซชัน (tyndallization) และการทำให้ปราศจากเชื้อโดยไอน้ำภายใต้ความดัน (autoclaving) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ การใช้ความร้อนชื้นนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่าและใช้เวลาสั้นกว่าการใช้ความร้อนแห้งเนื่องจากความร้อนชื้นในรูปไอน้ำสามารถแพร่กระจายบนวัตถุได้ทั่วถึงมากกว่าและน้ำเป็นตัวกลางที่นำความร้อนได้ดีกว่า (Sastri, 1957) ประสิทธิภาพในการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้และอุณหภูมิเป็นหลัก (Todar, 2008, Pommerville, 2013, Cowan และ Bunn, 2014)

อีกวิธีคือวิธีการที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน ได้แก่

- การแช่เย็น หรือการแช่เยือกแข็ง ส่วนมากการแช่เย็นไม่ได้เป็นการทำลายจุลินทรีย์โดยตรง เป็นเพียงการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เท่านั้น จึงนิยมใช้ในการถนอมอาหาร
- การกรอง สำหรับการทำให้ของเหลวที่ไม่คงตัวในความร้อน (thermolabile) หรืออากาศบริเวณนั้นปราศจากเชื้อ โดยวัสดุกรองมีหลายประเภท เช่น เทฟลอน เซลลูโลสไนเตรต เซลลูโลสอะซิเตท เป็นต้น และมีขนาดรูกรองประมาณ 0.2 ไมโครเมตร
- การใช้แรงดันออสโมติก เป็นการใส่สารละลายไฮโปโทนิก ซึ่งมีความเข้มข้นของสารมากกว่าความเข้มข้นภายในเซลล์แซพของจุลินทรีย์ เพื่อให้องค์ประกอบที่เป็นน้ำภายในเซลล์ออกนอกเซลล์ และทำให้จุลินทรีย์นั้นตาย (Saini, 2010, Mahon และคณะ, 2015)
- การฉายรังสี โดยวิธีการฉายรังสีแบ่งเป็น 2 ประเภท (รูปที่ 2.1) ตามความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสีเพื่อทำให้โมเลกุลแตกตัวเป็นไอออน คือ

รังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionizing radiation) เช่น รังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ (X-ray) มักใช้ในทางการแพทย์ เช่น การทำให้อุปกรณ์การแพทย์ที่ทำจากยางหรือพลาสติกปลอดเชื้อ รวมถึงอุตสาหกรรมอาหารและยาบางประเภทที่ประกอบด้วยวิตามิน หรือน้ำตาล ซึ่งไม่สามารถทำให้ปลอดเชื้อด้วยความร้อนได้ รังสีเหล่านี้มีความยาวคลื่นที่สั้นจึงสามารถทะลุผ่านโมเลกุลในเซลล์ กระตุ้นให้อิเล็กตรอนออกจากชั้นพลังงานหลักโดยการแตกตัวเป็นไอออน และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ดีเอ็นเอของจุลินทรีย์เกิดความเสียหาย รวมทั้งทำลายโปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ (Pommerville, 2013) และลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam) ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงสามารถใช้ยับยั้งจุลินทรีย์โดยทำลายพันธะในดีเอ็นเอ (Todar, 2008)

รังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (non-ionizing radiation) เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือยูวี (ultraviolet; UV) ที่ความยาวคลื่น 265 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรังสีที่นิยมใช้ทั่วไปในห้องผ่าตัดหรือห้องปฏิบัติการ แต่รังสีชนิดนี้ไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุที่เป็นแก้ว ผ้า หรือกระดาษได้ จึงนิยมใช้ทำลายเฉพาะจุลินทรีย์ที่บริเวณพื้นผิว เมื่อดีเอ็นเอในเซลล์ดูดซับพลังงานจากรังสียูวีทำให้เกิดการเชื่อมกันของเบสไทมีน (T-T dimer) ทำให้กระบวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอถูกรบกวนส่งผลให้เซลล์ตาย (Maktabi และคณะ, 2011, Pommerville, 2013)



รูปที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและรังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Mello และคณะ, 2014)

คลื่นวิทยุและไมโครเวฟ (microwave) เป็นคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้ในด้านจุลชีววิทยาเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมจุลินทรีย์ ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยเป็นผลจากความร้อน (thermal effect) และความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟช่วยลดเวลาการทำให้ปลอดเชื้อของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมและทำให้คุณภาพของอาหารบางประเภทดีขึ้น (Puligundla และคณะ, 2013, Ozkoc และคณะ, 2014)

2.2 ไมโครเวฟ

ไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง 30 เมกะเฮิร์ตซ์ถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งทำให้ไมโครเวฟมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 เมตรถึง 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นระหว่างช่วงคลื่นอินฟราเรดและคลื่นวิทยุ (รูปที่ 2.1) (Vollmer, 2004, Mello และคณะ, 2014) ไมโครเวฟเป็นคลื่นที่มีพลังงานต่ำ กล่าวคือ 1 ควอนตัมของไมโครเวฟมีค่าประมาณ 10^5 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งน้อยกว่าขนาดพลังงานที่กระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลหรือทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลได้ จึงจัดเป็นรังสีแบบที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Janković และคณะ, 2014) การกำหนดใช้ความถี่ในแต่ละช่วงของไมโครเวฟขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทำงาน โดยแบ่งเป็น 3 ระดับ (Mishra และคณะ, 2013)

1. ความถี่ระหว่าง 30-300 เมกะเฮิร์ตซ์ (very high frequencies; VHF) ใช้งานด้านวิทยุและโทรทัศน์
2. ความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์-3 กิกะเฮิร์ตซ์ (ultra high frequencies; UHF) ใช้ในเตาไมโครเวฟคริวรีออนและเรดาร์
3. ความถี่ระหว่าง 3-300 กิกะเฮิร์ตซ์ (extra high frequencies; EHF) ใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

เนื่องจากความถี่ของไมโครเวฟใกล้เคียงกับความถี่ของเรดาร์ ซึ่งรบกวนระบบการสื่อสารและโทรคมนาคม ดังนั้นคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission; FCC) กำหนดให้อุตสาหกรรมทั่วไปและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์การแพทย์ (Industrial and Scientific Medical; ISM) สามารถใช้ไมโครเวฟในช่วง

ความถี่ 915 ± 13 เมกะเฮิรตซ์และ $2,450 \pm 50$ เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งทั้งสองช่วงความถี่เป็นช่วงความถี่เดียวกับที่ใช้ในเตาไมโครเวฟครัวเรือนและอุตสาหกรรม ยกเว้นในบางประเทศทางทวีปยุโรปที่ใช้ความถี่ 896 เมกะเฮิรตซ์ (Salazar-González และคณะ, 2012) เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟทางอุตสาหกรรมนั้นมีการออกแบบความถี่ให้เหมาะสมกับกระบวนการใช้ความร้อนในการปรุงสุกอาหาร โดยน้ำในอาหารจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีที่ความถี่ดังกล่าว (Thostenson และ Chou, 1999, Tyagi และ Lo, 2013)

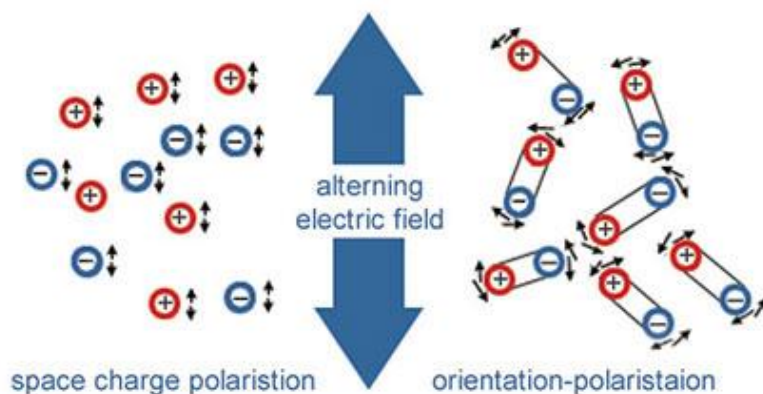
ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟประกอบด้วยหลอดแมกนีตรอน ซึ่งเป็นท่อสุญญากาศที่ประกอบด้วยส่วนแอโนดและแคโทดทำหน้าที่สร้างไมโครเวฟที่ส่งผลให้เกิดการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าด้วยความถี่สูง จากนั้นส่วนที่เป็นสายอากาศ (antenna) จะส่งคลื่นต่อไปที่ท่อนำคลื่น (wave guide) เพื่อนำคลื่นตรงไปที่ช่องว่าง (cavity) ภายในเตาไมโครเวฟ (Ahmed และ Ramaswamy, 2007) เตาไมโครเวฟครัวเรือนมักจะออกแบบให้ช่องว่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมที่มีผนังโลหะทำหน้าที่เป็นกรงฟาราเดย์ (Faraday cage) และประตูบานพับจะมีตาข่ายโลหะ โดยที่ช่องว่างระหว่างตาข่ายมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของไมโครเวฟ เพื่อไม่ให้คลื่นรั่วไหลออกมาและประสิทธิภาพที่ดีในการสะท้อนของคลื่นซึ่งเกิดขึ้นภายในช่องว่าง (Vollmer, 2004) ในขณะที่ระบบไมโครเวฟระดับอุตสาหกรรมมีการออกแบบช่องว่าง หรือแอปพลิเคชัน (applicator) ที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งแอปพลิเคชันเป็นตัวบ่งบอกว่ารูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัตถุนั้นเป็นแบบโหมดเดียว (single mode) หรือแบบหลายโหมด (multimode)

สำหรับแอปพลิเคชันชนิดโหมดเดียว (single mode applicator) นั้นถูกออกแบบให้เป็นลักษณะเรโซแนนซ์เดียว ส่วนใหญ่เป็นทรงกระบอก เช่น แอปพลิเคชันชนิดโหมด TM_{10} และโหมด TM_{010} ซึ่งสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงโดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของแอปพลิเคชัน การป้อนวัสดุทดสอบหรือโหลด (load) จึงต้องอยู่ที่บริเวณดังกล่าว และต้องระมัดระวังในการเลือกใช้ขนาดและชนิดของวัสดุทดสอบ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่บริเวณทำความร้อนทำให้วัสดุทดสอบมีอุณหภูมิสูงเฉพาะบริเวณตรงกลาง จึงเหมาะกับวัสดุที่มีสมบัติในการดูดกลืนคลื่นน้อย และวัสดุทดสอบต้องมีขนาดเล็กมากพอ เพื่อคงสภาพคลื่นเรโซแนนซ์ภายใน แอปพลิเคชันลักษณะนี้ควบคุมการกระจายตัวของคลื่นได้ง่ายกว่าแอปพลิเคชันหลายโหมด และใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนแอปพลิเคชันหลายโหมดนั้นมีสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ เนื่องมาจากคลื่นกระจาย

ตัวมากขึ้นและขยายขอบเขตครอบคลุมวัสดุทดสอบ โดยคลื่นถูกส่งมาจากหลายระนาบสะท้อนกับผนังของแอฟฟลิคเตอร์มาตกกระทบกับวัสดุทำให้การกระจายสนามไฟฟ้ามีความซับซ้อนมากขึ้น การรวมกันระหว่างคลื่นที่ตกกระทบกับคลื่นที่สะท้อนทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นแอฟฟลิคเตอร์ลักษณะนี้เหมาะกับการทำความร้อนในวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีสมบัติการดูดกลืนคลื่นสูง จึงประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมสังเคราะห์ วัสดุเซรามิก (Rattanadecho และ Suwannapum, 2008)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟและความถี่ไดอิเล็กทริกไม่ใช้พลังงานความร้อนโดยตรง แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากอันตรกิริยาระหว่างคลื่นและวัสดุที่ดูดซับคลื่นไว้เนื่องมาจากกลไก 2 แบบ (Assawarachan และคณะ, 2011, Anwar และคณะ, 2015) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ได้แก่

1. การหมุนของโมเลกุลที่มีขั้วเพื่อจัดเรียงขั้วไปในทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า (dipolar rotation) หรือกลไกชนิดการหมุนของทั้งสองขั้ว เช่น โมเลกุลของน้ำ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่สมมาตรเมื่อเทียบจากศูนย์กลาง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขั้วอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากความถี่ของสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ โมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบจึงจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และสามารถกลับมาไม่เป็นระเบียบแบบเดิมจากการคลายสนามไฟฟ้า (สนามไฟฟ้ามีค่าลดลงเท่ากับศูนย์) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้านี้ทำให้เกิดเป็นพลังงานศักย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ในเวลาต่อมา
2. การเคลื่อนที่ของไอออนไปมาอย่างรวดเร็วจากการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าความถี่สูง (ionic polarization) หรือกลไกชนิดการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (ionic conduction) โดยไอออนในวัสดุถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่มากกระทำไปชนกับโมเลกุลข้างเคียงต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ เกิดเป็นพลังงานจลน์และเป็นการถ่ายเทพลังงานในระดับโมเลกุล



รูปที่ 2.2 กลไกการเหนี่ยวนำเชิงไดอิเล็กตริกและกลไกการเหนี่ยวนำของทั้งสองขั้ว (Assawarachan และคณะ, 2011)

กล่าวโดยสรุป การเสียดสีและชนกันกับโมเลกุลข้างเคียงจากทั้ง 2 กลไกทำให้เกิดการสะสมพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (dielectric heating) ส่งผลให้อุณหภูมิของวัตถุเพิ่มขึ้น (Anwar และคณะ, 2015, พันธุ์พิทยา จังโส, 2556) เมื่อวัตถุได้รับคลื่นไมโครเวฟโดยการจัดเรียงของโมเลกุลที่มีขั้วก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นที่พื้นผิวและภายในวัตถุนั้น จะมีพลังงานบางส่วนที่ไม่ถูกดูดซับไว้จึงเกิดความร้อนจากภายในสู่ภายนอกวัตถุ อีกทั้งการที่ส่วนภายในของวัตถุร้อนกว่าภายนอกนั้นเกิดจากความร้อนบริเวณผิวสูญเสียไปให้กับสภาพที่แวดล้อม กระบวนการเกิดความร้อนโดยไมโครเวฟจึงแปรผกผันกับการเกิดความร้อนจากการพาความร้อนด้วยการต้มหรือลวกซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่กระจายจากด้านนอกสู่ส่วนด้านในซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า (Tyagi และ Lo, 2013) สมบัติการดูดซับพลังงานของแต่ละวัตถุขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นสมบัติทางไฟฟ้าแสดงว่ามีขั้ว (polarity) ของวัตถุนั้น (Anwar และคณะ, 2015) ดังนั้นปริมาณความชื้นและไอออน อย่างเช่นเกลือในอาหาร จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดความร้อน (Ohlsson และ Bengtsson, 2001)

2.3 วัสดุไดอิเล็กตริกและสมบัติไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริก จัดเป็นวัสดุที่ฉนวนที่มีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า แม้ว่าสิ่งมีชีวิตและผลผลิตทางการเกษตรนั้นว่ามีสมบัติการนำไฟฟ้าได้บ้าง แต่ยังคงถูกจัดว่าเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก โดยในธรรมชาติสามารถบ่งบอกสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเหล่านี้ได้จากสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านวัสดุนั้น จึงทำให้วัสดุไดอิเล็กตริกมีประสิทธิภาพ

ในการเกิดความร้อนอย่างรวดเร็วจากคลื่นช่วงวิทยุและช่วงไมโครเวฟ (Nelson, 2010) ดังนั้นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ถือว่าเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (พันธ์พิทยา จังโส, 2556) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเกี่ยวข้องกับสภาพยอมเชิงซ้อน (complex permittivity; ϵ^*) ซึ่งค่านี้ใช้บอกถึงปริมาณพลังงานที่สะสมและสูญเสียภายในสารในสนามไฟฟ้าตามสมการ (1)

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad ; \text{ เมื่อ } j = \sqrt{-1} \quad (1)$$

โดยปริมาณ ϵ' คือส่วนจริง (real part) หมายถึงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานภายใต้สนามไฟฟ้าของสาร และ ϵ'' คือส่วนจินตภาพ (imaginary part) ซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity; σ) เรียกว่า ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก มีความเกี่ยวข้องกับการความสามารถในการดูดซับพลังงานไว้เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุมของคลื่นที่ใช้ในการวัด (ω) ดังสมการ (2)

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (2)$$

นอกจากนี้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกยังสัมพันธ์แบบผกผันกับตัวประกอบเชิงคุณภาพ (quality factor; Q) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการกักเก็บพลังงานของสาร โดยสารที่มีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพสูง จะมีการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากสารดูดซับพลังงานไว้ได้มาก ทำให้สัญญาณที่ส่งไปมีค่าลดทอนลง (กิตติยา พงศาภาสิริหัต และ กุลจิรา บรมเจตน์, 2558) สามารถคำนวณค่าของตัวประกอบเชิงคุณภาพได้จากกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแอมพลิจูด (รูปที่ 2.3) โดยเรียกความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ซึ่งสัมพันธ์กับตัวประกอบเชิงคุณภาพดังสมการ (3)

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

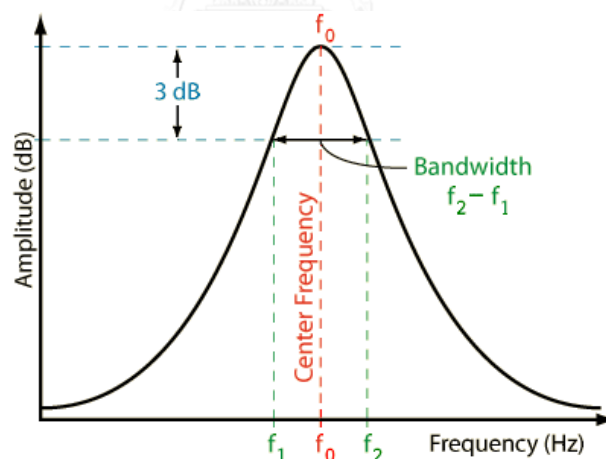
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก แสดงออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนต์ ($\tan\delta$) ดังสมการ (4)

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (4)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงออกมาในรูปของความเข้มสนามไฟฟ้าในวัสดุที่แตกต่างกัน คือ สารที่มีขั้วนั้นสามารถเก็บสะสมพลังงานได้ จึงทำให้เกิดความเข้มของสนามไฟฟ้ามากและมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำ ในทางตรงข้ามสารที่ไม่มีขั้วนั้นเก็บสะสมพลังงานได้น้อย ทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าน้อยและมีความถี่เรโซแนนซ์สูง (ฐิติมา เสงี่ยมเจริญ, 2554, กิตติยา พงศาภาสิริทัต และ กุลจิรา บรมเจตน์, 2558)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นที่ใช้บ่งบอกสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ สามารถคำนวณได้จากการวัดผลตอบสนองต่อคลื่นในช่วงวิทยุถึงช่วงไมโครเวฟ โดยอุปกรณ์ที่นิยมใช้คือเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (vector network analyzer) ซึ่งจะวัดสัญญาณที่ได้จากการสะท้อนและการส่งผ่าน cavity resonator และแสดงสัญญาณออกมาในรูปของ S-parameter ซึ่งสัมพันธ์กับ log magnitude (dB) (รูปที่ 2.3) ตามสมการ (5) (Nelson, 2010, Das และคณะ, 2013)

$$\text{dB} = 10 \log |S_{21}| \quad ; \text{ เมื่อ } S \text{ เป็นค่าเชิงเส้น} \quad (5)$$



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความถี่เรโซแนนซ์และความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและความถี่เพื่อคำนวณค่าของตัวประกอบเชิงคุณภาพ (กิตติยา พงศาภาสิริทัต และ กุลจิรา บรมเจตน์, 2558)

ปัจจุบันมีการประยุกต์หลักการของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมาใช้กับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร และอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพื่อบอกปริมาณความชื้นในวัตถุ การวัดสภาพยอมของดินเพื่อการสำรวจทางธรณีวิทยา การตรวจหาเซลล์มะเร็งในร่างกาย และการตรวจหาระดับน้ำตาลในเลือด เป็นต้น (ฐิติมา เสงี่ยมเจริญ, 2554)

งานวิจัยด้านจุลชีววิทยามีการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซลล์แบคทีเรียกลุ่มแกรมลบ (*S. typhimurium* และ *E. coli*) เปรียบเทียบกับแบคทีเรียกลุ่มแกรมบวก (*L. sakei* และ *L. innocua*) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแบคทีเรียสองกลุ่มนี้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญขึ้นกับภาวะของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ โดยที่แบคทีเรียแกรมบวกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าแบคทีเรียแกรมลบเมื่อทดสอบในภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 30–40% โดยวิธี Electrostatic force microscopy และสามารถใช้สมบัติทางไฟฟ้านี้วิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีภายในเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ได้ (Ferrer และคณะ, 2014) นอกจากนี้การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกยังถูกนำมาใช้ในการตรวจติดตามกระบวนการหมักเบียร์และวิสกีด้วยยีสต์ โดยใช้ระบุความเข้มข้นของเซลล์ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเซลล์ รูปร่างของเซลล์ และการมีชีวิตของเซลล์ ข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ในการควบคุมคุณภาพระหว่างการหมักได้ (Asami, 2002)

2.4 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในเชิงจุลชีววิทยา

มนุษย์และสิ่งมีชีวิตประเภทต่าง ๆ ได้รับไมโครเวฟในการดำรงชีวิตประจำวันเป็นปกติอยู่แล้วจากการใช้ไมโครเวฟเพื่อการสื่อสาร กระบวนการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี หรือการสร้างความร้อน (ช่วงความถี่ 896 หรือ 915 เมกะเฮิร์ตซ์) และจากอุปกรณ์ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (ช่วงความถี่ 824 ถึง 850, 900, 1,800 หรือ 1,900 เมกะเฮิร์ตซ์) เรดาร์ทางจราจร (ช่วงความถี่ 10.5 และ 24 กิกะเฮิร์ตซ์) อุปกรณ์ด้านอุณหภูมิห้องปรับอากาศ (ช่วงความถี่ 915 หรือ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์) และคลื่นวิทยุ UHF (ช่วงความถี่ 470 ถึง 890 เมกะเฮิร์ตซ์) เป็นต้น (Janković และคณะ, 2014)

ไมโครเวฟทำให้เกิดผลทางชีวภาพได้โดยขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่น ความถี่ รูปแบบของคลื่น และระยะเวลาที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟ ผลที่เกี่ยวข้องกับความร้อน (thermal effect) คือพลังงานความร้อนในระบบสิ่งมีชีวิตที่เกิดจากการที่โมเลกุลที่มีขั้วในรูปของน้ำ ดีเอ็นเอ และโปรตีนเกิดการเคลื่อนที่เพื่อจัดเรียงขั้วซึ่งเป็นรูปแบบเฉพาะที่ไม่พบในการให้ความร้อนแบบปกติ จึง

สะสมเป็นพลังงานที่เปลี่ยนเป็นความร้อนในภายหลัง (Mishra และคณะ, 2013) ส่วนผลที่ไม่เกี่ยวข้องกับกำกับการเพิ่มอุณหภูมิ (nonthermal effect) เช่น เนื่องจากโมเลกุลเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเพื่อจัดเรียงตัวไปในทางเดียวกัน (2,450 ล้านครั้งต่อวินาที) ภายในสนามไฟฟ้า และไอออนถูกกระตุ้นไปชนกับโมเลกุลข้างเคียง ทำให้โปรตีนในเซลล์ของจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับทุติยภูมิและตติยภูมิ และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ รวมทั้งอาจเป็นการทำลายพันธะไฮโดรเจน (Banik และคณะ, 2003, Tyagi และ Lo, 2013)

งานวิจัยของ Kim และคณะ (2008) ศึกษาผลของไมโครเวฟที่มีต่อกลไกภายในเซลล์ *B. subtilis* โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ 500 และ 2,000 วัตต์ กับการต้มเดือด พบว่าไมโครเวฟที่มีขนาดกำลังไฟฟ้า 2,000 วัตต์สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้มากกว่าขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในไมโครเวฟครัวเรือน (500 วัตต์) และการต้มเดือด ผลการตรวจสอบลักษณะของเซลล์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นการรั่วไหลของไซโทพลาสซึม และพบกรดนิวคลีอิกจากเซลล์ที่ได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างดีเอ็นเอถูกทำลาย นอกจากนี้พบอิเล็กตรอนจากการตกตะกอนของโปรตีนรวมตัวกันเป็นโครงสร้างรูปพีรามิดบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ ในขณะที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์จากการต้มเดือด นอกจากนี้ Campanha และคณะ (2013) ศึกษาผลของไมโครเวฟที่มีต่อเยื่อหุ้มเซลล์ของ *Candida albicans* โดยใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 650 วัตต์ เป็นเวลา 1-5 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ปราศจากเซลล์มาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ความเข้มข้นของดีเอ็นเอ ปริมาณของ Ca^{++} และ K^+ ซึ่งรั่วไหลออกจากเซลล์ พบว่าหลังจากทดสอบกับไมโครเวฟเป็นเวลา 2 นาที ตรวจพบสารที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์เหล่านี้ แสดงว่าไมโครเวฟรบกวนการผ่านเข้าออกของสาร และทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เปิดออก จากงานวิจัยของ Cockrell และคณะ (2015) ที่ศึกษาผลของไมโครเวฟเปรียบเทียบกับกำกับการให้ความร้อนแบบปกติต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของ *Thermus scotoductus* SA-01 ซึ่งเป็นแบคทีเรียทนร้อน มีการสันนิษฐานว่าคลื่นของไมโครเวฟทำให้โปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์เสียสภาพ โดยการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมโซ่ข้างของกรดอะมิโน เกิดเป็นโครงสร้างโปรตีนทุติยภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโปรตีนชักนำให้จำนวนของโมเลกุลที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้กลไกที่ช่วยให้แบคทีเรียปรับตัวให้ทนต่อความร้อน คือ กระบวนการเพิ่มอัตราส่วนของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ให้มากขึ้น

2.4.1 ด้านการแพทย์

ไมโครเวฟถูกใช้เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในทางการแพทย์และทันตกรรม Dovigo และคณะ (2009) รายงานว่าไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 650 วัตต์สามารถทำลาย *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* ภายในเวลา 3 นาทีและลดจำนวน *Bacillus subtilis* ได้ภายในเวลา 5 นาที วิธีการนี้ใช้ทำความสะอาดพื้นปลอมแทนการแช่ในสารละลายกลูตารัลดีไฮด์หรือคลอรีนไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นพิษและทำให้วัสดุพื้นปลอมเกิดการสึกกร่อน การทำความสะอาดพื้นปลอมด้วยไมโครเวฟสามารถลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ *Candida albicans* ที่ช่องปากในผู้ป่วยสูงอายุ เนื่องจากสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อได้ดีและมีความสะดวก รวดเร็ว (Brondani และคณะ, 2012) มีรายงานการใช้ไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเจริญของ *Trichophyton rubrum*, *T. rubrum* var. *nigricans*, *T. interdigitale* และ *Microsporum canis* ซึ่งเป็นรากกลุ่ม dermatophyte ที่ก่อให้เกิดโรคกลากบนผิวหนังในพื้นที่รองเท้าที่ทำจากวัสดุพอลิเอทิลีนและวัสดุไม้คอร์ก โดยใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 560 วัตต์เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งวิธีการนี้นับเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว ไม่ทำให้วัสดุพื้นรองเท้าเสียหาย ไม่ก่ออันตรายต่อผิวหนัง และไม่ชักนำให้สายพันธุ์จุลินทรีย์ทนต่อการถูกทำลาย (Budihardja และ Mayser, 2014)

2.4.2 ด้านอุตสาหกรรมอาหาร

ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มมีการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในกระบวนการปรุงสุก ละลายน้ำแข็ง อบแห้ง และลวก งานวิจัยจำนวนมากรายงานการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์อาหาร เช่น ในอุตสาหกรรมหมักไวน์ได้นำไมโครเวฟมาใช้ทำลายยีสต์ *Brettanomyces* รวมทั้งแบคทีเรียที่สร้างกรดแลคติกและแบคทีเรียที่สร้างกรดแอสिटิกในถังไม้โอ๊คที่ใช้บ่มไวน์ โดยใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 3,000 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที (González-Arenzana และคณะ, 2013) การทำให้ปราศจากเชื้อด้วยไมโครเวฟสามารถลดจำนวนเอนโดสปอร์ของ *Alicyclobacillus acidoterrestris* ในครีมแอสพารากัสได้ถึง 2 เท่าโดยใช้ไมโครเวฟกำลังไฟฟ้าขนาด 900 วัตต์เป็นเวลา 5 นาที, กำลังไฟฟ้า 810 วัตต์ 6 นาที และกำลังไฟฟ้า 720 วัตต์ใช้เวลา 7 นาที (Giuliani และคณะ, 2010) ไมโครเวฟสามารถยับยั้งการเจริญของ *L. monocytogenes* ในน้ำก็วีสำเร็จรูปพร้อมดื่ม โดยใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 900 วัตต์ ($D_{60\text{ }^{\circ}\text{C}} = 17.35$ วินาที) และ 1,000 วัตต์

($D_{60\text{ °C}} = 17.04$ วินาที) ซึ่งใช้เวลาสั้นกว่าการให้ความร้อนตามวิธีดั้งเดิม ($D_{60\text{ °C}} = 37.45$ วินาที) โดยไม่ทำให้คุณค่าทางโภชนาการและรสสัมผัสของน้ำกีวีเสียไป (Benlloch-Tinoco และคณะ, 2014) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าไมโครเวฟที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium และ *Listeria monocytogenes* ในซัลซา (salsa) ซึ่งเป็นอาหารที่มีมะเขือเทศเป็นส่วนประกอบ โดยใช้เวลา 30 วินาทีที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4.8 กิโลวัตต์ (Sung และ Kang, 2014) นอกจากนี้การใช้ไมโครเวฟเพื่อทำลายจุลินทรีย์ในนํ้านมวัวด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เวลาดสั้น (flash pasteurization) ทำให้องค์ประกอบทางเคมีในนํ้านม คือ ไขมัน แลคโตส และโปรตีนไม่สูญเสียไปเมื่อเทียบกับวิธีให้ความร้อนแบบปกติซึ่งใช้เวลามากกว่า 3-5 เท่า (Al-Hilphy และ Ali, 2013) แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟเป็นวิธีการที่ดีสำหรับการคงคุณค่าทางสารอาหารในผลิตภัณฑ์นมเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในเวลาอันสั้น การเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟให้เป็นความร้อนในอาหาร ขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กทริกและการเกิดอันตรกิริยาของโมเลกุลขององค์ประกอบในอาหารนั้น เช่น นํ้า ไขมัน หรือเกลือกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นไมโครเวฟจึงสร้างความร้อนในอาหารที่มีนํ้าเป็นองค์ประกอบได้รวดเร็วกว่าอาหารที่มีไขมันหรือนํ้าตาล เนื่องจากสารเหล่านี้มีความเป็นขั้วน้อยกว่านํ้า (Salazar-González และคณะ, 2012) ต่อมามีการพัฒนาอุปกรณ์ไมโครเวฟโดยใช้หลักการทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์อาหารและเครื่องต้มในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น Gentry และ Roberts (2005) ศึกษาการใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยเฉพาะเพื่อการผลิตอย่างต่อเนื่อง (continuous flow microwave) ในอุตสาหกรรมการผลิตนํ้าแอปเปิ้ล โดยผู้วิจัยออกแบบให้ภายในเตาไมโครเวฟมีท่อชุดแบบเกลียวเพื่อให้ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟกระจายอย่างสม่ำเสมอและกำหนดตัวแปรเป็นอุณหภูมิของนํ้าแอปเปิ้ลก่อนเข้าระบบ ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบ และกำลังไฟฟ้า ผลการวิจัยพบว่าการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 2,000 วัตต์และอัตราการไหลเท่ากับ 0.36 ลิตรต่อนาทีสามารถลดจำนวน *E. coli* ในนํ้าแอปเปิ้ลได้เท่ากับ 5.2 ลอการิทึม

2.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

Wu และ Yao (2010) รายงานว่าไมโครเวฟมีประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญของ *Aspergillus versicolor* ซึ่งเป็นราในอากาศที่อยู่ในรูปของละอองลอยชีวภาพ (bioaerosol) ผลการวิจัยแสดงอัตราการรอดชีวิตของ *A. versicolor* เท่ากับ 6% หลังการได้รับพลังงานไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้า

ขนาด 700 วัตต์เป็นเวลา 1.7 นาที และภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงสภาพเซลล์ *A. versicolor* มีลักษณะถูกบีบอัด ในขณะที่ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นจุดดำ (dark spot) ซึ่งเป็นโปรตีนที่รวมตัวกันในไซโตพลาซึมของเซลล์ *A. versicolor* ผลการวิจัยดังกล่าวยังบ่งชี้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 50-60 องศาเซลเซียส เอนไซม์โปรตีน และกรดนิวคลีอิกจะถูกทำลาย ทำให้เมมเบรนจะแตกออกซึ่งเป็นผลที่เกี่ยวข้องกับความร้อนรวมทั้งยังเกิดผลที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อนอีกด้วย เช่น การรบกวนกิจกรรมเมแทบอลิซึมและการดูดกลืนพลังงานภายในเซลล์

2.4.4 ด้านเกษตรกรรม

นอกจากการศึกษาประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อด้วยไมโครเวฟโดยตรงแล้วยังมีการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในงานด้านเกษตรกรรม พบว่าการใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 1250 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาที สามารถลดการเจริญของ *Aspergillus parasiticus* ซึ่งเป็นราที่สร้างอะฟลาทอกซินในเฮเซลนัท โดยไม่ทำให้คุณค่าทางโภชนาการของถั่วเปลี่ยนไป กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวเฮเซลนัทจะต้องมีการอบแห้งเพื่อไม่ให้ราปนเปื้อน ซึ่งวิธีการใช้ไมโครเวฟดีกว่าวิธีการอบด้วยความร้อนแบบดั้งเดิมเนื่องจากให้ความร้อนได้ในเวลาอันสั้น ความร้อนเกิดขึ้นภายในทำให้เปลือกเฮเซลนัทไม่แตกและยังช่วยลดเวลา รวมทั้งค่าใช้จ่ายอีกด้วย (Basaran และ Akhan, 2010) นอกจากนี้การยับยั้งการเจริญของราโดยตรงแล้ว การควบคุมประชากรจุลินทรีย์โดยไมโครเวฟยังเป็นการลดสารพิษจากรา (mycotoxin) ซึ่งเป็นเมแทบอลิซึมทุติยภูมิที่ราผลิตขึ้นในช่วง log phase โดยสารพิษจากราที่ปนเปื้อนในผลผลิตทางการเกษตรนั้นส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ทั้งทางการบริโภคโดยตรง และการบริโภคผลผลิตจากสัตว์ที่ได้รับสารพิษจากราที่ปนเปื้อนในอาหารสัตว์อีกทอดหนึ่ง (Mobeen และคณะ, 2011) สารพิษจากราที่มักปนเปื้อนในธัญพืช เช่น ถั่ว ข้าว ข้าวโพด คืออะฟลาทอกซินปีหนึ่ง และอะฟลาทอกซินปีสอง โดยการวิจัยของ Mobeen และคณะ (2011) ระบุว่า การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียสด้วยไมโครเวฟ เป็นเวลา 5 นาที สามารถลดปริมาณของอะฟลาทอกซินปีหนึ่งที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ถั่วลิสงได้ 55 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณเริ่มต้น 183.2 นาโนกรัมต่อกิโลกรัม และตรวจไม่พบอะฟลาทอกซินปีสองจากปริมาณเริ่มต้น 100.3 นาโนกรัมต่อกิโลกรัม

นอกจากการศึกษาประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟโดยตรงแล้วยังมีการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Bhattacharjee และคณะ (2009) ศึกษาการใช้ไมโครเวฟเพื่อเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อแทนการใช้เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อสำหรับ *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของโรคปริทันต์อักเสบและโรคเยื่อหุ้มหัวใจอักเสบ เมื่อเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยเตาไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ โดยใช้เวลา 90 วินาทีหลังจากที่อาหารเดือด พบว่า *A. actinomycetemcomitans* เจริญเติบโตในอาหารที่เตรียมด้วยไมโครเวฟได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อที่เจริญในอาหารที่เตรียมจากเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ เนื่องจากเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงจึงเกิดสาร amadori จากการรวมตัวของไลซีนและกลูโคสในอาหารโดยปฏิกิริยา Maillard หรือการเกิดสีน้ำตาลนั้นไปยับยั้งการเจริญของเชื้อ ทำให้เชื้อเจริญช้าและตายเร็ว อย่างไรก็ตามการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อโดยใช้เวลามากกว่า 90 วินาทีทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญของเชื้อเช่นเดียวกับวิธีการปกติเนื่องจากความร้อน Kothari และคณะ (2011) รายงานว่าการใช้ไมโครเวฟนอกจากเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำให้อาหารเลี้ยงเชื้อปลอดเชื้อแล้ว จุลินทรีย์ยังสามารถเจริญเติบโตรวดเร็วและเพิ่มจำนวนเซลล์ได้ดีอีกด้วย อาหารเลี้ยงเชื้อเหลวที่เตรียมโดยการใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 900 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาทีช่วยส่งเสริมการเจริญจุลินทรีย์และฟื้นฟูการเจริญของแบคทีเรียไลโอฟิลิไซ์ได้ดีกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมโดยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนในอาหารที่เตรียมโดยไมโครเวฟนั้นเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น จึงทำให้คุณภาพของสารอาหารสูญเสียไปน้อยกว่าวิธีการเตรียมที่ใช้เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ วิธีการใช้ไมโครเวฟยังใช้เวลาน้อยทำให้สะดวกต่อการนำอาหารเลี้ยงเชื้อไปใช้ได้ทันที เนื่องจากวิธีการใช้ไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์นี้มีข้อดีในด้านการประหยัดเวลาและพลังงาน ซึ่งอาจจะได้รับการยอมรับมากขึ้นในด้านปฏิบัติการทางจุลชีววิทยา ถ้าหากมีการพัฒนาวิธีที่เหมาะสมกับการทำให้ปราศจากเชื้อในอุปกรณ์และสารเคมีอื่น

เนื่องจากวิธีการใช้ไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์นี้มีข้อดีในด้านการประหยัดเวลาและพลังงาน ซึ่งอาจจะได้รับการยอมรับมากขึ้นในด้านเกษตรกรรม รวมทั้งมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ประยุกต์กับไมโครเวฟโดยใช้หลักการทางวิศวกรรมร่วมด้วยเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม (Kothari และคณะ, 2011) จากงานวิจัยของ Stratakos และคณะ (2016) ซึ่งได้ศึกษาการใช้ระบบไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์เพื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องสำหรับทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน

ในน้ำมะเขือเทศระดับอุตสาหกรรม พบว่าสามารถลดจำนวนแบคทีเรีย รา และยีสต์ที่ปนเปื้อนได้โดยที่ไม่ทำให้คุณภาพเชิงเคมีและอนุมูลอิสระในน้ำมะเขือเทศสูญเสียไปเช่นเดียวกับการใช้ความร้อนแบบปกติ แต่ลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรเซชันได้มากจึงเหมาะที่จะใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และงานวิจัยของ Prapuchanay และคณะ (2012) ประดิษฐ์ระบบให้ความร้อนโดยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว (Single Mode Cylindrical Microwave Cavity) เพื่อพัฒนาให้เป็นระบบให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม โดยทดสอบประสิทธิภาพของระบบกับของเหลว คือ น้ำ นม น้ำมันปาล์ม และไบโอดีเซล พบว่าระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 23 องศาเซลเซียสถึง 85 องศาเซลเซียสซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มด้วยเตาไมโครเวฟครัวเรือนในเวลาเท่ากันคือ 120 วินาที

2.5 การเพาะปลูกข้าวในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีผลผลิตข้าวรวม (นาปีและนาปรัง) เพิ่มขึ้นทุกปีตั้งแต่ พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2558 โดยใน พ.ศ. 2558 มีผลผลิตข้าว 28,240,000 ตัน และนับเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายที่ 5 ของโลก ข้าวจึงเป็นพืชไร่เศรษฐกิจที่สำคัญของไทย (มาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2555) สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2558) แสดงข้อมูลการพยากรณ์ผลผลิตข้าวนาปีในปีเพาะปลูก 2559/60 มีจำนวน 25,406,786 ตัน โดยเพิ่มขึ้น 1,095,247 ตัน ช่วงเวลาที่ผลผลิตออกสู่ตลาดนั้น เริ่มจากข้าวนาปีออกสู่ตลาดตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2559 ถึงพฤษภาคม 2560 โดยคาดการณ์ว่าผลผลิตจะออกสู่ตลาดมากในเดือนพฤศจิกายน 2559 ปริมาณ 14,104,000 ตัน คิดเป็นร้อยละ 56.36 ของผลผลิตข้าวนาปีทั้งหมด

ใน พ.ศ.2559 กระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (USDA) ประเมินการส่งออกข้าวของประเทศไทยอยู่ที่ 9.80 ล้านตัน มีส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 24 ทำให้ประเทศไทยยังคงเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับหนึ่งของโลก (สมาคมโรงสีข้าวไทย, 2559) นอกจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเศรษฐกิจที่ส่งผลต่อการแข่งขันด้านราคาระหว่างประเทศผู้ส่งออกข้าวในภูมิภาค ปัจจัยด้านการพัฒนาวิธีการควบคุมคุณภาพข้าวให้ได้มาตรฐานและมีคุณภาพดี จึงมีส่วนสำคัญมากในการกำหนดราคาข้าว

สำหรับเกณฑ์การคัดเลือกข้าวเปลือกสำหรับขายภายในประเทศหรือเพื่อการส่งออกต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานสินค้าเกษตรพ.ศ. 2555 กล่าวคือ ข้าวเปลือกต้องมีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

- (1) มีความชื้นไม่เกิน 15% ยกเว้นในกรณีข้าวเปลือกสดที่มีความชื้นมากกว่า 15% ควรนำไปผ่านกระบวนการลดความชื้นที่เหมาะสมให้ได้ไม่เกิน 15% ทันที
- (2) กรณีข้าวเปลือกที่จะนำไปเก็บรักษาจะต้องมีความชื้นไม่เกิน 14%
- (3) ไม่มีกลิ่นผิดปกติเช่น กลิ่นเหม็นเปรี้ยว
- (4) กรณีข้าวเปลือกแห้ง คุณภาพการสีได้ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวขาวไม่ต่ำกว่า 34%
- (5) มีข้าวในกลุ่มเดียวกันไม่น้อยกว่า 95%
- (6) มีข้าวและวัตถุอื่นที่อาจมีปนได้ในข้าวเปลือกสดและข้าวเปลือกแห้งตามกำหนดของมาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2555

2.6 การปนเปื้อนราในข้าวเปลือก

การปนเปื้อนของราในข้าวเปลือกเกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการเพาะปลูก ต่อเนื่องมาจนถึงกระบวนการเก็บเกี่ยวและกระบวนการเก็บรักษา โดยการปนเปื้อนของราจากความชื้นที่มากเกินไปในข้าวเปลือกทำให้สูญเสียผลผลิตของข้าว 10–15% ต่อปี (Park และคณะ, 2012) ราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกส่วนมากเป็นราที่ก่อโรคในพืช และราที่สร้างไมโคทอกซิน ซึ่งราส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกเป็นสกุล *Aspergillus*, *Fusarium* และ *Penicillium* ที่สามารถสร้างอะฟลาทอกซิน ฟูโมนิซิน และโอคราทอกซินได้ ราคากลุ่มนี้เจริญได้ดีในภูมิประเทศที่มีสภาพอากาศร้อนชื้น ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ในขณะที่ผลผลิตข้าวเปลือกที่เพาะปลูกในประเทศที่มีเขตอากาศหนาวเย็น พบการปนเปื้อนของไมโคทอกซินได้น้อยกว่า (Reddy, 2007) จากงานวิจัยของ Kiran และคณะ (2015) ได้คัดแยกและตรวจหาไมโคทอกซินที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวในเขต Telangana ประเทศอินเดีย หลังจากอุบัติการณ์น้ำท่วมในช่วงปี 2012-2013 พบว่ามีการปนเปื้อนจากราจำนวน 34 สายพันธุ์ใน 16 สกุล แสดงให้เห็นว่าสภาพความชื้นในพื้นที่เพาะปลูกมีผลต่อความหลากหลายของสายพันธุ์รา ซึ่งทำให้ไมโคทอกซินที่ตรวจพบมีหลากหลายประเภทตามไปด้วย Trung และคณะ (2001) รายงานการปนเปื้อนราในข้าว 25 ตัวอย่างที่เพาะปลูกในบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำโขง พบราสกุล *Aspergillus* มากที่สุด รองลงมาคือ *Fusarium* และ *Penicillium* ตามลำดับและ

พบโอคราทอกซินเอที่ผลิตจาก *A. ochraceus* ในปริมาณที่สูงเกินค่ามาตรฐาน (21.3-26.2 ppb) แสดงให้เห็นว่าภาวะในการเก็บรักษา และสภาพภูมิอากาศในการเพาะปลูกส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเปลือกอย่างมาก

2.7 การลดความชื้นในข้าวเปลือก

ในประเทศแถบเขตร้อนชื้นนั้นเมื่อเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกในระยะเวลาที่เหมาะสม ข้าวเปลือกจะมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 20-25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการลดความชื้นโดยเร็ว เนื่องจากปริมาณความชื้นระดับนี้จะส่งเสริมให้จุลินทรีย์เจริญและผลิตข้าวมีอัตราการหายใจสูง ดังนั้นก่อนกระบวนการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ได้จากการนวดข้าวไว้ในยุ้งข้าวหรือส่งต่อไปที่โรงสี จึงต้องลดความชื้นข้าวเปลือกให้เท่ากับ 12-14 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งก่อน (Jittanit, 2011, Park และคณะ, 2012) ดังนั้นกระบวนการลดความชื้นจึงจัดเป็นวิธีการหนึ่งในการควบคุมการปนเปื้อนของจุลินทรีย์

วิธีการลดปริมาณความชื้นในธัญพืชให้เป็นไปตามมาตรฐานการเก็บรักษา นอกจากช่วยลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์แล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาอีกด้วย ซึ่งมีทั้งการทำให้แห้งโดยวิธีทางเคมี เช่น การใช้เกลือลดความชื้นภายในเมล็ดข้าวด้วยกระบวนการออสโมซิสซึ่งใช้เวลานานจึงไม่นิยมใช้วิธีการนี้ แต่จะนิยมใช้วิธีการทำให้แห้ง (drying) ซึ่งถือเป็นวิธีการหลัก โดยวิธีนี้เป็นกระบวนการที่สูญเสียพลังงานมากและยังมีผลต่อคุณภาพข้าวเต็มเมล็ดหรือข้าวสารหลังจากผ่านกระบวนการสีอีกด้วย (Jittanit, 2011) ซึ่งหลักการที่ทำให้ข้าวเปลือกแห้ง คือ การให้ความร้อนแก่เมล็ดข้าวโดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลางพาความร้อนไปสู่เมล็ด ทำให้น้ำในเมล็ดระเหยออกมาและอากาศยังเป็นตัวพาน้ำออกไปจากเมล็ดอีกด้วย กระบวนการลดความชื้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกัน คือ การระเหยของความชื้นที่ผิวเมล็ดสู่บรรยากาศรอบ ๆ เมล็ด และการพาความชื้นที่อยู่ภายในเมล็ดออกมาแทนที่ความชื้นบริเวณผิว โดยตอนที่ความชื้นภายในเมล็ดเคลื่อนออกมาที่ผิว เรียกว่า tempering period อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นนี้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาของกระบวนการ (International Rice Research Institute, 2016)

ปัจจุบันเกษตรกรเลือกใช้วิธีการลดความชื้นหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การตากแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปเนื่องจากค่าใช้จ่ายน้อย และทำได้ง่าย แต่ใช้เวลานาน ในประเทศไทยแบ่งการตากข้าวออกเป็น 2 แบบ คือการตากข้าวในนาและการตากลาน โดยการตากข้าวในนาทำให้ข้าวเปลือกเกิดความเสียหายได้มากกว่า เนื่องจากสัตว์ศัตรูพืชเข้าทำลายและการสูญเสียความชื้นในเวลากลางวันเกิดขึ้นสลับกับการดูดความชื้นกลับมาในเวลากลางคืน ทำให้เมล็ดข้าวร้าวและแตกหักง่ายเมื่อผ่านกระบวนการสีข้าว แต่อย่างไรก็ตามการตากโดยใช้แสงอาทิตย์ทั้ง 2 วิธีนี้ต้องใช้พื้นที่และแรงงานมาก อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมคุณภาพข้าวได้และไม่สามารถทำได้ในฤดูฝน (International Rice Research Institute, 2016, โนทัย กิตติกำแหง, 2554)

นอกจากวิธีการตากที่เกษตรกรนิยมใช้นั้นยังมีวิธีการทำให้แห้งโดยใช้เครื่องจักร ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในโรงสีระดับเล็กถึงใหญ่ โดยการใช้เครื่องอบลมร้อนซึ่งแบ่งตามรูปแบบการใช้งานได้เป็น 2 แบบ คือ เครื่องอบลมร้อนแบบกะ (batch) ได้แก่ fixed bed dryer และ re-circulating batch dryer ส่วนอีกแบบคือเครื่องอบลมร้อนแบบต่อเนื่อง (continuous flow dryer) ซึ่งมีประสิทธิภาพลดปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกได้สม่ำเสมอ แต่มีความซับซ้อนมากกว่าแบบกะ เครื่องอบทั้งสองแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดการใช้งานและต้นทุน (International Rice Research Institute, 2016)

ความชื้นในแต่ละระดับเป็นสิ่งกำหนดคุณภาพของข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวในแต่ละสายพันธุ์ มีผลต่อระยะเวลาในการเก็บรักษา รวมถึงคุณภาพข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษาเปลี่ยนแปลงได้ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 จึงเห็นได้ว่าวิธีการอบแห้งข้าวเปลือกที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องที่ได้จากข้าวเปลือก เช่น ข้าวกล้อง ข้าวสาร และแป้งข้าวเจ้า มีสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน โดยเฉพาะการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เมล็ดข้าวภายในเปลือกข้าวและเปลว (โนทัย กิตติกำแหง, 2554)

ตารางที่ 2.1 ระดับปริมาณความชื้นสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ และปัญหาที่พบ (International Rice Research Institute, 2016)

ระยะเวลาในการเก็บรักษา	ปริมาณความชื้น	ปัญหาที่พบ
2-3 สัปดาห์	14-18%	การเจริญของรา การเปลี่ยนสี อัตราการหายใจของเมล็ดลดลง
8-12 เดือน	13% หรือน้อยกว่า	การทำลายข้าวโดยแมลง
มากกว่า 1 ปี	9% หรือน้อยกว่า	สูญเสียการมีชีวิตของเมล็ด

Norkaew และคณะ (2016) ได้ศึกษาคุณภาพของข้าวเปลือกชนิดข้าวกำลังผิว หลังจากผ่านกระบวนการตากแห้งเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพในเมล็ดข้าวนี้ คือ รงควัตถุชนิดแอนโทไซยานิน และวิตามินอีถูกทำลายมากกว่าเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน นอกจากนี้กระบวนการทำให้แห้งและการสีที่เหมาะสมยังเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยรักษารสชาติประกอบของข้าวกล้องและคุณภาพในการงอก Park และคณะ (2012) ได้ศึกษาคุณภาพของข้าวกล้องเมื่อผ่านการทำให้แห้งด้วยวิธีใช้ลมเป่าที่อุณหภูมิ 15, 30 และ 45 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการใช้ไมโครเวฟและระบบไมโครเวฟแบบสุญญากาศที่กำลังไฟฟ้า 100 และ 200 วัตต์ตามลำดับ เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกจาก 22 เปอร์เซ็นต์ให้เป็น 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการใช้ลมเป่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส สามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของข้าวกล้องที่ผ่านการสีไว้ได้ โดยใช้เวลามากกว่าการใช้ไมโครเวฟ ในขณะที่ระบบการใช้ไมโครเวฟแบบสุญญากาศลดอัตราการงอก และปริมาณกรดไขมันในเมล็ดข้าวมากกว่าการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์เท่ากัน

มีการศึกษาประสิทธิภาพของไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนเพื่อลดความชื้นในเมล็ดข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) ซึ่งปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีผลต่อกระบวนการไม่ข้าวสาลีเป็นแป้งสาลี โดยใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 700 วัตต์ทดสอบกับตัวอย่างเมล็ดข้าวสาลีปริมาณ 20 กรัมที่เวลา 150 วินาที พบว่าสามารถลดความชื้นได้มากถึง 10.6×10^{-4} กิโลกรัมของน้ำต่อน้ำหนักแห้งต่อวินาที

(Walde และคณะ, 2002) ต่อมามีการพัฒนากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือก จากงานวิจัยของ Sangdao และ Krairiksh (2008) ได้ประยุกต์ ไมโครเวฟร่วมกับวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดชนิดต่อเนื่องเพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือก โดย ออกแบบให้ท่อนำคลื่นเชื่อมต่อกับ cavity ทรงกระบอกในแนวตั้งฉาก และมีลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป่าขึ้นมาในด้านตรงข้ามกับด้านที่ใช้บรรจุข้าว ผลการวิจัยพบว่าไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 900 วัตต์จากแต่ละแมกนีตรอนต่อปริมาณข้าวเปลือก 40 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรภาชนะ บรรจุด้วยอัตราการใช้ 3.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ใช้พลังงานทั้งสิ้น 5.2 กิโลวัตต์ งานวิจัยที่พัฒนา ระบบอบแห้งโดยประยุกต์กับไมโครเวฟมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเพื่อจุดประสงค์ที่จะลดข้อจำกัดในเรื่อง เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งของวิธีการอบลมร้อน หากการอบแห้งใช้เวลานานย่อมส่งผลต่อ คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง และสิ้นเปลืองพลังงานรวมทั้งค่าใช้จ่าย Assawarachan และคณะ (2011) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแอฟฟลิเคเตอร์ชนิดโหมดเดี่ยวและแอฟฟลิเคเตอร์ชนิดหลาย โหมดที่กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ผลการวิจัยบ่งชี้ว่าแอฟฟลิเคเตอร์ชนิดโหมดเดี่ยวมีความเข้มของ สนามไฟฟ้ามากกว่าเมื่อทดสอบระบบกับน้ำกลั่นปริมาณ 500 มิลลิลิตร จึงพัฒนาแอฟฟลิเคเตอร์ ชนิดโหมดเดี่ยวร่วมกับระบบอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดสั้นสะเทือน เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือก ภายใต้ภาวะอุณหภูมิสูง (150 องศาเซลเซียส) และภาวะอุณหภูมิต่ำ (60 องศาเซลเซียส) พบว่า ระบบดังกล่าวในภาวะอุณหภูมิต่ำลดความชื้นในข้าวเปลือกจาก 27 เปอร์เซ็นต์มาเท่ากับ 17 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้ภาวะอัตราเร็วของอากาศเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที และรอบการสั่นเท่ากับ 1,200 รอบต่อนาที

นอกเหนือจากวิธีการลดความชื้นยังมีวิธีการควบคุมประชากรจุลินทรีย์ในผลผลิตทางการเกษตรกลุ่มธัญพืชอีกหลายวิธี ซึ่งมักจะขึ้นกับประเภทของธัญพืช โดยอาศัยหลักการควบคุมปัจจัย ของภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเจริญของเรา คือ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่าง เช่น การเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาฟาเรนไฮต์ การใช้สารเคมีที่เป็นกรดอินทรีย์ คือ กรด โพรพิโอนิก (propionic acid) เพื่อลดค่า pH ให้ต่ำกว่า 4.5 (Chakraverty และคณะ, 2003) นอกจากนี้ยังมีการฉายรังสีชนิดแกมมาและรังสีอินฟราเรด และการใช้โอโซน (O₃) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระ เพื่อเป็นสารรม (fumigant) ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ที่บริเวณผิวของธัญพืชใน ขั้นตอนการเก็บรักษา จากงานวิจัยของ Jian และคณะ (2013) พบว่าโอโซนปริมาณ 50 ppm เป็น

เวลา 3 วันสามารถลดจำนวนราที่ปนเปื้อนในชั้นตอนเก็บรักษาผลผลิตได้ 63 เปอร์เซ็นต์ และโอโซน ปริมาณ 5–30 ppm ลดปริมาณสารพิษจากราได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้โอโซนปริมาณมากและ ต่อเนื่องเป็นเวลานานก่อความเสียหายโดยกักร่อนอุปกรณ์ที่เป็นยาง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์โดยไมโครเวฟ คริวเรือน และระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว และประยุกต์ผลที่ได้กับการใช้ ไมโครเวฟเพื่อลดความชื้นและลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือก โดยคงคุณภาพที่ดีของ ข้าวเปลือก และไม่เป็นอันตรายกับสิ่งแวดล้อม เพื่อพัฒนาวิธีการนี้ให้ใช้ได้ระดับอุตสาหกรรมขนาด ใหญ่ในอนาคต



บทที่ 3

อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์

1. กระบอกฉีดยา (syringe) ขนาด 1 มิลลิลิตร ของบริษัท Nipro, ประเทศไทย
2. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) รุ่น CH30 ของบริษัท Olympus, ประเทศญี่ปุ่น
3. กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (stereomicroscope) ของบริษัท Olympus, ประเทศญี่ปุ่น
4. ขวดก้านดูแรน (duran) ขนาด 500 มิลลิลิตร ของบริษัท Schott, ประเทศเยอรมนี
5. ขวดแก้วฝาเกลียว (vial) ขนาด 22 มิลลิลิตร (screw cap with teflon liner) ของบริษัท Lab System, ประเทศไทย
6. เครื่องกำเนิดเสียงความถี่สูง (ultrasonicator) ชนิดอ่าง รุ่น Sonorex super RK 100 ของบริษัท Banderlin Electronic, ประเทศเยอรมนี
7. เครื่องชั่งรุ่น ME3002 ของบริษัท Mettler Toledo, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
8. เครื่องปั่นผสม (vortex mixer) รุ่น G-560E ของบริษัท Scientific Industries, ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) รุ่น Genesis20 ของบริษัท Thermo Fisher Scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น S20 SevenEasy ของบริษัท Mettler Toledo, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
11. เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (vector network analyzer) รุ่น MS2036A ของบริษัท Anritsu, ประเทศญี่ปุ่น
12. เครื่องหมุนเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (refrigerated centrifuge) รุ่น 6500 ของบริษัท Kubota, ประเทศญี่ปุ่น และหัวหมุนเหวี่ยง (rotor) ขนาดใหญ่ รุ่น RA 22
13. เครื่องหมุนเหวี่ยงชนิดตั้งโต๊ะ (bench-top centrifuge) รุ่น FORCE1418 ของบริษัท Select Bioproducts, ประเทศสหรัฐอเมริกา

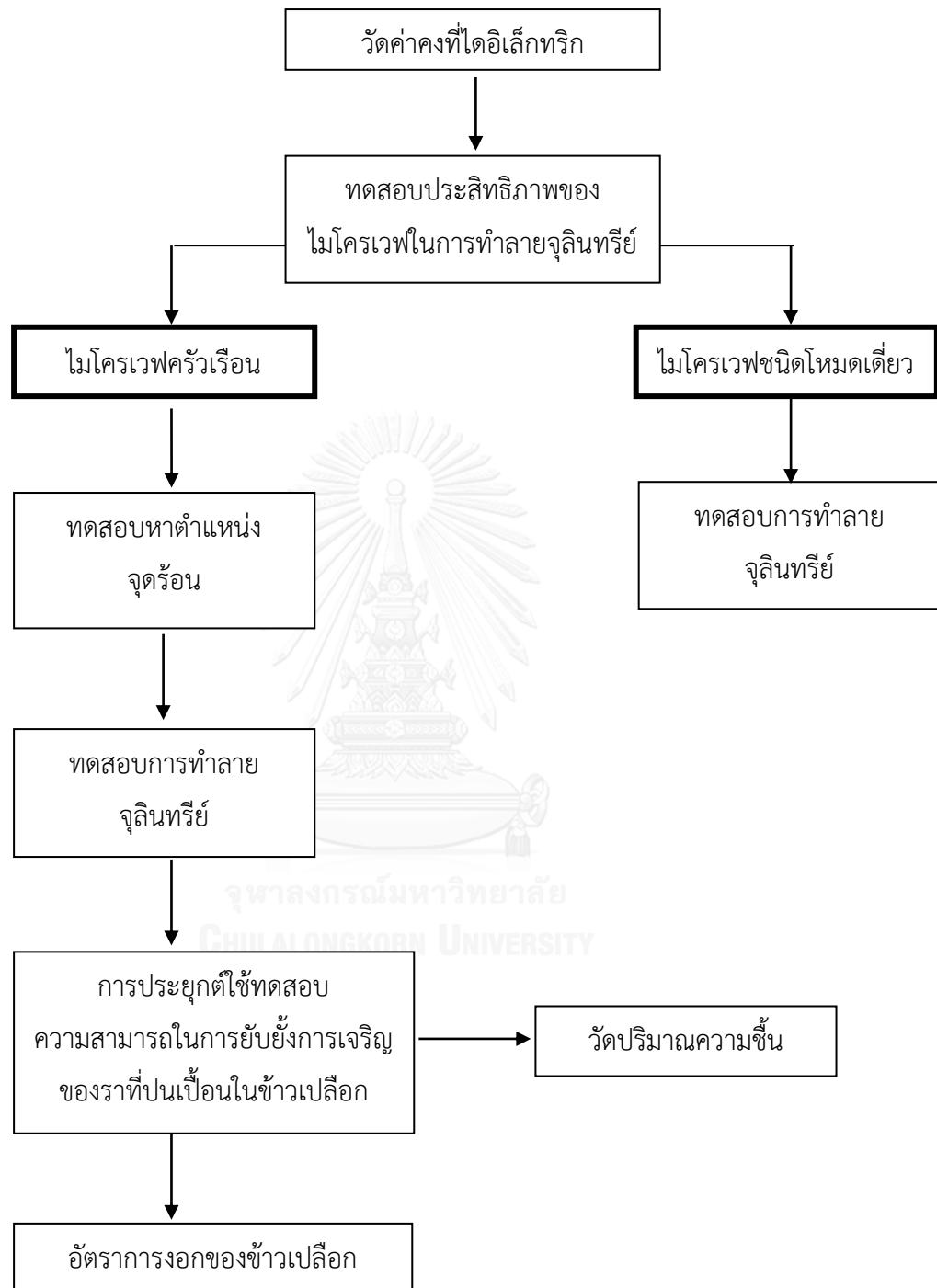
14. เครื่องอบนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) รุ่น ES-315 ของบริษัท Tomy digital biology, Japan และรุ่น HV-25 ของบริษัท Hirayama Manufacturing, ประเทศญี่ปุ่น
15. ตู้เขี่ยเชื้อแบบ ISSCO (laminar air flow) รุ่น BVT-124 ของบริษัท International Scientific Supply, USA และรุ่น LV1250 ของบริษัท Official Equipment Manufacturing, ประเทศไทย
16. ตู้แช่แข็งจุดเยือกแข็งต่ำ (deep freezer) อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส รุ่น SF-PC697 ของบริษัท Panasonic, ประเทศไทย
17. ตู้ดูดควัน (fume hood) รุ่น FH150DC ของบริษัท Official Equipment Manufacturing, ประเทศไทย
18. ตู้บ่มเชื้อชนิดควบคุมอุณหภูมิ (incubator) ของบริษัท Weiss Technik, UK และรุ่น BE800 ของบริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี
19. ตู้บ่มเชื้อแบบเขย่า (incubator shaker) รุ่น Innova4000 ของบริษัท New Brunswick Scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา
20. ตู้อบฆ่าเชื้อ (hot air oven) รุ่น UE600 ของบริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี
21. ตู้อบแห้ง (oven) ของบริษัท Contherm Scientific, New Zealand
22. โถดูดความชื้น (desiccator) ของบริษัท Scientific Industries, ประเทศสหรัฐอเมริกา
23. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ของบริษัท New Brunswick Scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา
24. แผ่นพาราฟิล์ม (parafilm) Parafilm M ของบริษัท Bemis, ประเทศสหรัฐอเมริกา
25. ไมโครปิเปต (micropipette) ขนาด 20, 100, 200, 1000 และ 5000 ไมโครลิตร ของบริษัท Gilson, ประเทศฝรั่งเศส
26. เตาไมโครเวฟ (microwave) รุ่น MS2127CW ของบริษัท LG Electronics, ประเทศไทย
27. เครื่องให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว (single mode cylindrical microwave applicator) ของห้องปฏิบัติการความถี่วิทยุและไมโครเวฟ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสิรินธร ไทย-เยอรมัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

28. หลอดเก็บเชื้อแช่แข็ง (cryotube) ของบริษัท Nalgene Nunc International, ประเทศเดนมาร์ก
29. หลอดทดลองก้นแหลม (conical centrifuge tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร ของบริษัท SPL Life Scientific, ประเทศเกาหลี
30. หลอดไมโครเซ็นทริฟิวจ์ (microcentrifuge tube) ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ของบริษัท Axygen, ประเทศสหรัฐอเมริกา
31. อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ (water bath) รุ่น W270 ของบริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี
32. อุปกรณ์วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกชนิด cavity resonator (วัดค่าโดยต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์) ของห้องปฏิบัติการความถี่วิทยุและไมโครเวฟบัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
33. ฮีมาไซโตมิเตอร์ (haemocytometer) ของบริษัท HBG, ประเทศเยอรมนี

เคมีภัณฑ์

1. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว potato dextrose broth (PDB) ของบริษัท Himedia, ประเทศอินเดีย
2. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว tryptone soya broth (TSB) ของบริษัท Himedia, ประเทศอินเดีย
3. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง dichloran glycerol agar (DG18) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
4. ทวิน 80 (Tween 80), ($C_{64}H_{124}O_{26}$) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
5. กลีเซอรอล (glycerol), ($C_3H_5(OH)_3$) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
6. ผงสกัดจากยีสต์ (yeast extract) ของบริษัท Bio Springer, ประเทศฝรั่งเศส
7. ผงสกัดจากมอลต์ (malt extract) ของบริษัท Difco Laboratories, ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. แบคโตเปปโตน (bactopeptone) ของบริษัท Difco Laboratories, ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. กลูโคส (glucose) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
10. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (hydrochloric acid 37%) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
12. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
13. เอทานอล (C_2H_5OH) ของบริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี
14. สีแลคโตฟีโนล อะนิลีน บลู (lactophenol aniline blue)
15. สีมาลาไคท์กรีน (malachite green)
16. สีแกรมซาฟรานิน (Gram safranin)

การดำเนินงานวิจัย



วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 จุลินทรีย์และการเพาะเลี้ยง

3.1.1 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวประกอบด้วยแบคทีเรีย (ตารางที่ 3.1) และจุลินทรีย์กลุ่มราและยีสต์ (ตารางที่ 3.2)

ก. แบคทีเรีย

ตารางที่ 3.1 แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย

แบคทีเรีย	ฟีโนไทป์	ที่มา
<i>Escherichia coli</i> MSCU 0349 / TISTR 780 / ATCC 8739	แกรมลบ	คลังจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
<i>Bacillus subtilis</i> MSCU 0271 / ATCC 16633	แกรมบวกสร้าง สปอร์	
<i>Staphylococcus aureus</i> MSCU 0353 / TISTR 118 / ATCC 6538-P	แกรมบวกไม่สร้าง สปอร์	
<i>Micrococcus luteus</i> MSCU 0350 / TISTR 884	สปอร์	
<i>Listeria monocytogenes</i> DMST 17303	แกรมบวกไม่สร้าง สปอร์	

ข. ราและยีสต์

ตารางที่ 3.2 ราและยีสต์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย

รา	<i>Aspergillus niger</i> MSCU 0361 / TISTR 3254 <i>Penicillium chrysogenum</i> MSCU 0390 / TISTR 3554	คลังจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
	<i>Rhizopus. oryzae</i> MSCU 0209 / NBRC 31005 <i>Aspergillus nidulans</i> MSCU 0053	ได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.ปาหนัน เรืองสำราญ
	<i>Aspergillus nidulans</i> ATK 16	ได้รับความอนุเคราะห์จาก อ.ดร.ธัญนุช เกரியงไกรพิพัฒน์
ยีสต์	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> MSCU 0360 / TISTR 5049	คลังจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

3.1.2 การเพาะเลี้ยง

ก. แบคทีเรีย

เพาะเลี้ยงหัวเชื้อแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ยกเว้น *M. luteus* บ่มที่ 30 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อปริมาณ 1% (v/v) มาใส่อาหาร TSB ปริมาณ 300 มิลลิลิตรในขวดดูแรน (Duran) ขนาด 500 มิลลิลิตร บ่มตามวิธีการที่กล่าวข้างต้น ระหว่างบ่มให้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตรที่เวลา 5-7 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อมีความเข้มข้นประมาณ 10^8 - 10^{10} CFU ต่อมิลลิลิตร โดยเทียบจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรให้มีค่าเท่ากับ 0.8-1 และเทคนิค drop plate

ข. เอนโดสปอร์ของแบคทีเรีย (ดัดแปลงจากวิธีของ Chaisri และ Chuaybamroong (2011))

ซิดเชื้อ *B. subtilis* ให้เติมผิวหน้าอาหารแข็ง TSA บ่มที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน เก็บสปอร์โดยหยดน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตรบนผิวหน้าอาหาร และซูดเชื้อ *B. subtilis* ด้วยแท่งแก้วออกจากนั้นย้ายสารแขวนลอยใส่รวมกันในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร กำจัดเซลล์ปกติของแบคทีเรีย (vegetative cell) โดยแช่ขวดในอ่างน้ำร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อตกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงชนิดตั้งโต๊ะ (bench-top centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนสารละลายใสออกมาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนับจำนวนเอนโดสปอร์เริ่มต้นด้วยเทคนิค drop plate

ค. ยีสต์

เพาะเลี้ยงหัวเชื้อบ่มยีสต์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ YM เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นถ่ายเชื้อ 3 มิลลิลิตรลงในขวด Duran ที่มีอาหารเหลว YM 300 มิลลิลิตรหรือเท่ากับ 1% (v/v) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 3-6 ชั่วโมง แล้วปรับให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10^9 - 10^{10} CFU ต่อมิลลิลิตร โดยเทียบจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรให้มีค่าเท่ากับ 0.8-1 และเทคนิค drop plate

ง. สปอร์ของรา

การเตรียมสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ (asexual spore) ทำได้โดยบ่มราบนอาหารแข็ง PDA ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 วัน จนโคโลนีราขึ้นเต็มผิวหน้าอาหาร จากนั้นชะล้างสปอร์บนผิวหน้าอาหารด้วยสารละลาย 0.1 % Tween 80 ในสารละลาย 0.85 % โซเดียมคลอไรด์ จากนั้นเก็บสปอร์โดยการปั่นเหวี่ยง และล้างสปอร์ในสารละลาย 0.85 % โซเดียมคลอไรด์ 2 ครั้ง เก็บสารแขวนลอยสปอร์ใส่ในหลอดทดลองกันแหลมขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วนับสปอร์ได้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยฮีมาไซโตมิเตอร์เพื่อปรับให้สปอร์มีความเข้มข้นเท่ากับ 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร (Kang และ Kato, 2013) และใช้เทคนิค spread plate เพื่อยืนยันความเข้มข้นของสปอร์

การเตรียมสปอร์แบบอาศัยเพศ (แอสโคสปอร์; ascospore) เตรียมโดยใช้สารแขวนลอยสปอร์ของ *Emericella nidulans* MSCU 0053 และ *E. nidulans* ATK 16 บ่ม *A. nidulans* ATK 16 บนอาหารแข็ง PDA ที่เติมอาร์จินีนและเมไทโอนีน และเก็บสปอร์ตามวิธีในขั้นต้น ถ่ายสารแขวนลอยสปอร์ของราทั้งสองสายพันธุ์อย่างละ 500 ไมโครลิตรลงในขวดฝาเกลียวขนาดเล็กที่บรรจุอาหารเหลว PDB ปลอดเชื้อ 5 มิลลิตร เพื่อให้เกิดการผสมแบบข้ามสายพันธุ์ (out crossing) ทำให้ cleistothecium มีขนาดใหญ่ขึ้นและได้แอสโคสปอร์จำนวนมากขึ้น จากนั้นบ่มในที่มืดเป็นเวลา 7 วัน หรือจนกว่าจะเกิดการแผ่ของเส้นใย (mycelium) เต็มผิวหน้าอาหารเหลว คีบเส้นใยรามาวางบนอาหารแข็ง PDA โดยป้องกันการระเหยของน้ำในอาหารด้วยการใช้พาราฟิล์มพันปิดจานอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยสปอร์รุ่นลูกที่ได้จะเป็น wildtype ทั้งหมด นำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ระหว่างการบ่มให้สังเกตการเจริญของราและเมื่อพบว่ามี การสร้าง cleistothecium แล้วจึงเขี่ยออกมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดเส้นใยรวมถึง Hülle cells ที่ติดมาให้มากที่สุด โดยเขี่ยบน 3% water agar และเก็บใส่ลงในหลอดไมโครเซ็นทริฟิวจ์ที่มีน้ำกลั่นปลอดเชื้ออยู่ 500 ไมโครลิตร จากนั้นบิบให้ cleistothecium แตกด้วยปลายทิวเพื่อให้ออสโคสปอร์ที่อยู่ภายในออกมา (เห็นแอสโคสปอร์เป็นสายสีม่วงแดง) จะได้ส่วนของสารแขวนลอยของแอสโคสปอร์ จากนั้นนับแอสโคสปอร์ได้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยฮีมาไซโตมิเตอร์เพื่อปรับให้แอสโคสปอร์เริ่มต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 10^6 สปอร์ต่อมิลลิตร (ดัดแปลงจากวิธีของ Kaminskyj (2001))

3.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

3.2.1 ตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเจริญของจุลินทรีย์

เตรียมหัวเชื้อ *S. cerevisiae* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ YM บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเพาะเลี้ยง *B. subtilis* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยเชื้อทั้งสองชนิดบ่มพร้อมเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อปริมาณ 1% (v/v) มาใส่อาหาร YM หรือ TSB ปริมาณ 100 มิลลิตร บ่มตามวิธีการที่กล่าวในขั้นต้น ระหว่างการบ่มให้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร ในช่วงเวลา 5-7 ชั่วโมงแรก เมื่อค่าการดูดกลืนแสงของ *S. cerevisiae* และ *B. subtilis* เท่ากับ 0.5 และ 1 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^8 - 10^{10}

CFU ต่อมิลลิลิตร ถ่ายเชื้อมาเก็บใส่ขวดฝาเกลียวปลอดเชื้อที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและทดลองต่อในชั้นวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกทันที

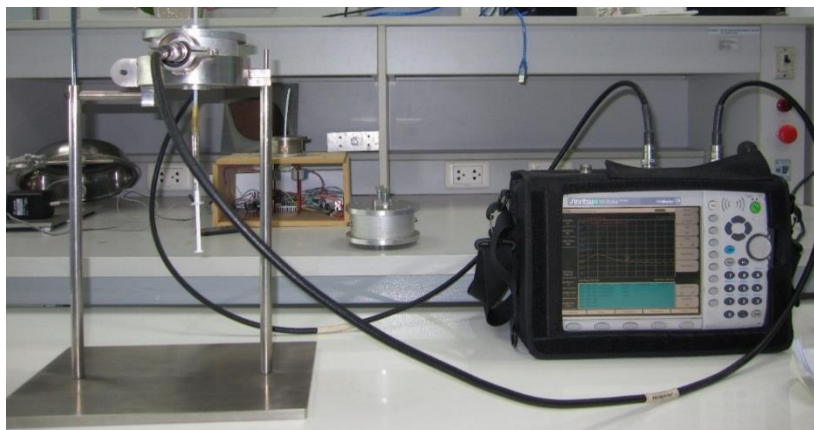
3.2.2 ตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อและสารที่ใช้ทดสอบอื่น ๆ

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว TSB และ YM อย่างละ 10 มิลลิลิตร โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามที่กำหนดสำหรับอาหารแต่ละชนิด เก็บใส่ขวดแก้วฝาเกลียวปลอดเชื้อ ส่วนสารทดสอบอื่น ๆ โดยเตรียมน้ำกลั่น น้ำมันดีเซล (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)) เพื่อเป็นชุดควบคุมของสารที่ไม่มีชีวเอทานอลที่มีความเข้มข้น 95% (v/v) เพื่อเป็นชุดควบคุมของสารที่มีความเป็นขี้ด่ำ และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ 2 โมลาร์ และ 0.145 โมลาร์ (เท่ากับ 0.85% (w/v)) อย่างละ 10 มิลลิลิตรในขวดฝาเกลียวปลอดเชื้อ

3.2.3 การวัดความถี่ของตัวอย่างสารที่ใช้ทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์เพื่อเลือกช่วงความถี่ที่ใช้งาน โดยเลือกค่าความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 2.7 GHz และความถี่สุดท้าย 3.2 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ cavity resonator สามารถวัดค่าได้ จากนั้นตั้งค่า power เท่ากับ 0 และค่า reference level ที่ -30 dB ต่อมาวัดสอบเทียบโดยใช้ calibration kits ได้แก่ Short, Open, Load 50 Ohm และ Thru ตามลำดับ

นำ Cavity resonator ต่อเข้ากับวงจรที่ตั้งค่าไว้ดังรูปที่ 3.1 วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ไมโครเวฟโดยเทคนิคการส่งผ่าน (transmission technique) เริ่มจากต่อหลอด PTFE เข้ากับ cavity resonator บันทึกค่าความถี่เรโซแนนซ์และ Log Magnitude S21 สำหรับนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของหลอด PTFE ที่ไม่มีการบรรจุสารตัวอย่าง เมื่อต้องการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์และ Log Magnitude S21 ของแต่ละสารตัวอย่างจึงโหลดสารนั้นเข้าไปในหลอด PTFE โดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร จากนั้นคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ต่อวงจรกับ cavity resonator ที่มีขนาดความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

3.2.4 การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

นำค่าความถี่เรโซแนนซ์และ Log Magnitude S21 ของสารแต่ละตัวอย่างคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามวิธีของกิตติยา พงศาภาสิริทัต และ กุลจิรา บรมเจตน์ (2558) ดังสมการ

$$\epsilon'_r = 0.539 \left(\frac{R_c}{R_s} \right)^2 \frac{(f_0 - f_l)}{f_l} + 1$$

และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกดังสมการ

$$\epsilon''_r = 0.269 \left(\frac{R_c}{R_s} \right)^2 \left(\frac{1}{Q_l} - \frac{1}{Q_0} \right)$$

โดยที่ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Quality factor; Q) คำนวณได้จากสมการ

$$Q = \frac{f}{B}$$

โดยที่กำหนดให้ R_c	คือ รัศมีของ Cavity resonator (มีค่าเท่ากับ 0.3845 เมตร)
R_s	คือ รัศมีของช่องสำหรับใส่สารตัวอย่าง (มีค่าเท่ากับ 0.001 เมตร)
f_0	คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของ Cavity ที่ไม่โหลดสารตัวอย่าง
f_l	คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของ Cavity ที่มีการโหลดสารตัวอย่าง
Q_0	คือ ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของ Cavity ที่ไม่โหลดสารตัวอย่าง
Q_l	คือ ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของ Cavity ที่มีการโหลดสารตัวอย่าง
B	คือ ค่าแบนด์วิดท์ซึ่งเป็นผลต่างของความถี่ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำกว่าแอมพลิจูดของความถี่เรโซแนนซ์อยู่ 3 เดซิเบล

3.3 การทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟคร้วร้อน

3.3.1 การทดสอบหาจุดร้อน (hotspot) ในไมโครเวฟคร้วร้อน (Kharkovsky และ Hasar (2003))

วางกระดาษแพคเกจขนาด 27x30 เซนติเมตร 58 แกรม ที่พรมน้ำเล็กน้อยจนทั่วเสมอกันทั้งแผ่นในเตาไมโครเวฟคร้วร้อน (LG Electronics (ประเทศไทย) Co., Ltd, รุ่น MS02127CW) นำจานหมุนออก ปรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด 800 วัตต์ ใช้เวลา 30 และ 120 วินาที จากนั้นตรวจสอบรูปแบบการเกิดจุดร้อนในเตาไมโครเวฟจากการเปลี่ยนสีของกระดาษแพคเกจ เพื่อนำมากำหนดตำแหน่งสำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ในขั้นตอนถัดไป

3.3.2 การวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่น

เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรในขวด Duran ขนาด 500 มิลลิลิตร คลายเกลียวฝาเล็กน้อย ตั้งขวดไว้ที่จุดร้อนในไมโครเวฟจากข้อ 3.3.1 ทดสอบโดยใช้กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 และ 300 วินาที โดยเมื่อครบเวลาให้นำออกมาวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ทันที เพื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นโดยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว

3.3.3 การกระทำจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟครัวเรือน

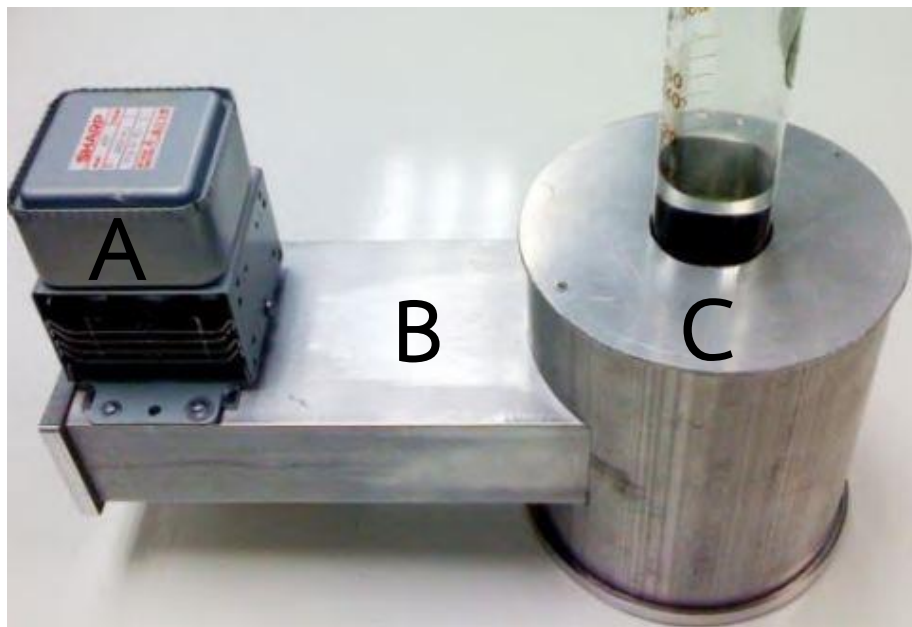
เตรียมเซลล์หรือสปอร์ของจุลินทรีย์ตามข้อ 3.1 ปริมาตร 300 มิลลิลิตรในขวด Duran ฝาเกลียวขนาด 500 มิลลิลิตรซึ่งมีแบคทีเรียหรือยีสต์อยู่ประมาณ 10^9 - 10^{10} CFU ต่อ มิลลิลิตร และสปอร์ของราประมาณ 10^6 สปอร์ต่อ มิลลิลิตร นำไปวางตรงบริเวณที่เกิดจุดร้อนสูงสุด (hotspot) ในเตาไมโครเวฟโดยไม่ใช้ถาดหมุน ปรับระดับความร้อนที่ขนาดกำลังไฟสูงสุด (800 วัตต์) ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 วินาที ยกเว้นสปอร์ของ *B. subtilis* ใช้เวลา 60, 120, 180, 240 และ 300 วินาที โดยชุดควบคุมคือชุดทดลองที่ไม่ทดสอบด้วยไมโครเวฟ นำไปหาจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเมื่อผ่านการทดสอบกับไมโครเวฟโดยเทคนิค drop plate ทันทีหลังจากทดสอบไมโครเวฟแล้วบนอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA และ YMA สำหรับแบคทีเรียและยีสต์ตามลำดับ

สปอร์ราใช้เทคนิค spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA โดยภาวะในการบ่มขึ้นอยู่กัษณิตของจุลินทรีย์ ทำชุดทดลองละ 3 ซ้ำ

3.4 การทำลายจุลินทรีย์ด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว

3.4.1 การวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่น

เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรเติมในกระบอกแก้วทนไฟที่มีความสูง 38 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 เซนติเมตร ใช้ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม Magnetron power control (กำลังไฟฟ้า 100 เอร์เซ็นต์เท่ากับ 850 วัตต์) ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้เวลา 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, และ 300 วินาที โดยเมื่อครบเวลาให้นำออกมาวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ทันที เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นโดยไมโครเวฟครัวเรือน



รูปที่ 3.2 ไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่ความถี่ 2.45 GHz ประกอบด้วยแมกนีตรอน (A), ท่อนำคลื่น (B), cavity (C) และภาชนะบรรจุทรงกระบอก (Prapuchanay และคณะ, 2012)

3.4.2 การกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว

เตรียมเซลล์หรือสปอร์ของจุลินทรีย์ตามข้อ 3.1 ปริมาตร 300 มิลลิลิตรในขวด Duran ฝาเกลียวขนาด 500 มิลลิลิตร ถ่ายลงในกระบอกแก้วทนไฟ ตั้งค่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟตามข้อ 3.4.1 เป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 วินาที ยกเว้นสปอร์ของ *B. subtilis* ใช้เวลา 60, 120, 180, 240 และ 300 วินาที โดยชุดควบคุม คือ ชุดทดลองที่ไม่ทดสอบด้วยไมโครเวฟ นำไปหาจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเมื่อผ่านการทดสอบกับไมโครเวฟโดยเทคนิค drop plate ทันทีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA และ YMA สำหรับแบคทีเรียและยีสต์ตามลำดับ สปอร์ราใช้เทคนิค spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA โดยภาวะในการบ่มขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ ทำชุดทดลองละ 3 ซ้ำ

3.5 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การรอดของจุลินทรีย์

นับจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อหลังจากทดสอบกับไมโครเวฟ ครัวร์เรอและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวเพื่อหาค่าเฉลี่ย จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การรอดของ จุลินทรีย์ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การรอดเฉลี่ย} = \frac{\log \text{ค่าเฉลี่ยจำนวนของโคโลนีที่นับได้ (CFU/ml)}}{\log \text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีเริ่มต้น (CFU/ml)}} \times 100$$

3.6 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของสปอร์และเซลล์ของจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

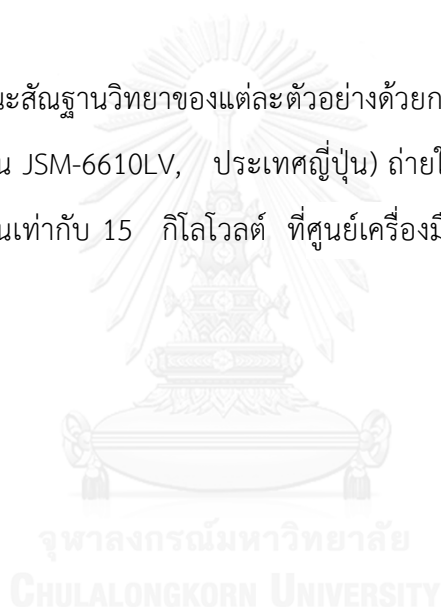
3.6.1 การเตรียมตัวอย่างจุลินทรีย์เพื่อส่งตรวจ

ถ่ายสารแขวนลอยสปอร์ เซลล์แบคทีเรีย และเซลล์ยีสต์ในชุดควบคุมและสารแขวนลอยที่ ทดสอบโดยไมโครเวฟครัวร์เรอเป็นเวลา 60 และ 90 วินาที ยกเว้นสปอร์ของ *B. subtilis* ใช้เวลา 180 วินาที ใส่กระบอกเซ็นทริฟิวจ์ขนาด 250 มิลลิลิตร หมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงชนิดควบคุม อุณหภูมิ (refrigerated centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดอาหารเหลวแยกออกจากส่วนที่ตกตะกอนอยู่ให้ได้มากที่สุด และถ่ายใส่ หลอดไมโครเซ็นทริฟิวจ์ ขนาด 1.5 มิลลิลิตร และนำไปหมุนเหวี่ยงเพื่อตกตะกอนอีกครั้งด้วยเครื่อง หมุนเหวี่ยงแบบตั้งโต๊ะที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาทีดูดเอาส่วนอาหารเหลวที่ เหลืออยู่ออก และใส่สารละลาย 2.5% กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) เพื่อรักษาสภาพของ ตัวอย่างก่อนจะเตรียมสไลด์ตัวอย่างโดยการกรองเพื่อตรึงตัวอย่างกับเยื่อกรอง กรองตัวอย่างด้วยเยื่อ กรองชนิดพอลิคาร์บอเนต เลือกขนาดของรูเยื่อกรองให้เหมาะสมกับขนาดของตัวอย่าง แช่ตัวอย่าง ในน้ำยา 2.5% กลูตารัลดีไฮด์ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.2 เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ล้างน้ำยา ออกด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 2 ครั้ง แล้วตามด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที กำจัดน้ำออกจาก ตัวอย่างด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้น 30, 50, 70 และ 95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ครั้งละ 5 นาที แล้ว ตามด้วย 99 เปอร์เซ็นต์ เปลี่ยน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที ทำให้แห้ง ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่อง critical point dryer (Quorum รุ่น K850, สหราชอาณาจักร) ติดตัวอย่างบนแท่งวาง (stub) ด้วยเทปกาว สองหน้าแล้วนำไปฉาบทอง (sputter coater, Balzers รุ่น SCD040, ประเทศเยอรมนี) หรือเตรียม

ตัวอย่างโดยตรงกับกระจกหลังจากคงสภาพของตัวอย่าง กำจัดน้ำออกด้วยการเติมเอทานอลที่มีความเข้มข้น 30, 50, 70, 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ (absolute ethanol) ซึ่งเปลี่ยน 3 ครั้ง นานครั้งละ 5 นาที จากนั้นหยดสารตัวอย่างลงบนกระจก ตากให้แห้งในตู้ดูดควันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บกระจกในเดซิเคเตอร์ ติดตัวอย่างบนแท่งวาง (stub) ด้วยเทปกาวสองหน้า ก่อนส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะฉาบตัวอย่างด้วยแพลตินัม (sputter coater, Balzers รุ่น SCD040, ประเทศเยอรมนี)

3.6.2 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของแต่ละตัวอย่างด้วยกล้อง SEM (scanning electron microscope) (Jeol รุ่น JSM-6610LV, ประเทศญี่ปุ่น) ถ่ายในโหมดความเป็นสุญญากาศสูง ที่ศักดาไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนเท่ากับ 15 กิโลโวลต์ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



3.7 การยับยั้งราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟครัวเรือน

3.7.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก

เก็บตัวอย่างข้าวเปลือก 10 ตัวอย่างมีแหล่งที่มาและพันธุ์ข้าวที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.3 วัดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกทันทีที่รับตัวอย่างตามวิธีในข้อ 3.7.5 โดยข้าวเปลือกทุกตัวอย่างได้รับความอนุเคราะห์จากเกษตรกรโดยตรง ผ่านกระบวนการตากแห้งแล้วและเก็บรักษาในยุ้งข้าวเพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการสี ยกเว้นตัวอย่าง P 2 และ P 5 ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี ซึ่งผ่านกระบวนการตากแห้งแล้วเก็บรักษาในธนาคารพันธุ์ข้าวสำหรับเกษตรกรในฤดูกาลเพาะปลูกถัดไป

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างข้าวเปลือก ชนิดของพันธุ์ข้าว ระยะเวลาเก็บเกี่ยว และแหล่งที่มา

ตัวอย่างข้าวเปลือก	พันธุ์ข้าว	ระยะเวลาเก็บเกี่ยว	แหล่งที่มา
P 2	กข 57	เดือนมิถุนายน 2558	ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี
P 5	กข 41	เดือนสิงหาคม 2558	ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี
P 6	ชาวบ้านนา	เดือนธันวาคม 2557	จังหวัดนครนายก
P 8	ทองมาเอง	เดือนมกราคม 2558	จังหวัดนครนายก
P 11	ทองมาเอง	เดือนธันวาคม 2557	จังหวัดนครนายก
P 13	เหลืองทอง	เดือนธันวาคม 2557	จังหวัดนครนายก
P 17	หอมมะลิ 405	เดือนธันวาคม 2557	จังหวัดฉะเชิงเทรา
P 18	หอมประทุม	เดือนตุลาคม 2558	จังหวัดชัยนาท
P 19	หอมมะลิ	เดือนตุลาคม 2558	จังหวัดอุบลราชธานี
P 20	กข 31	เดือนตุลาคม 2558	จังหวัดสุพรรณบุรี

3.7.2 การลดความชื้นในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ

ซึ่งข้าวเปลือก 100 กรัมในจานแก้วที่มีฝาปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร เคลี่ยให้มีความหนาสม่ำเสมอประมาณ 1.5 เซนติเมตร นำเข้าเตาไมโครเวฟครัวเรือนโดยมีจานหมุนเพื่อกระจายความร้อน โดยตั้งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 และ 120 วินาที สังเกตการแตกพองของข้าวเปลือก เมื่อครบเวลาจึงนำมาวัดปริมาณความชื้นตามข้อ 3.7.4 พร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพการงอก คัดแยกแกลและหาปริมาณราที่ปนเปื้อนตามวิธีในข้อ 3.7.5–3.7.6

3.7.3 การลดความชื้นในข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแห้ง

ซึ่งข้าวเปลือก 100 กรัม เคลี่ยให้มีความหนาสม่ำเสมอประมาณ 1.5 เซนติเมตรในถาดกระดาษขนาดความกว้าง 20x25 เซนติเมตร วางไว้ในบริเวณที่ได้รับแดดเต็มที่และไม่ถูกความชื้นติดต่อกันเป็นเวลา 3 วัน วันละ 10 ชั่วโมงตั้งแต่ 7.00 ถึง 17.00 นาฬิกา เมื่อครบเวลาจึงซังใส่ภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าที่ได้อบแห้งและบันทึกน้ำหนักแล้ว 15 กรัม (ตัวอย่างละ 3 ซัง) นำไปอบแห้งและคำนวณปริมาณความชื้นตามข้อ 3.7.4 พร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพการงอก คัดแยกแกลและหาปริมาณราที่ปนเปื้อนตามวิธีในข้อ 3.7.5–3.7.6

3.7.4 การวัดปริมาณความชื้นเริ่มต้นโดยวิธีของ ASAE (1982)

นำภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าที่มีความสูง 6 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ออบแห้งในตู้อบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาใส่โถดูดความชื้นจนน้ำหนักคงที่ จึงซังน้ำหนักภาชนะอะลูมิเนียมเปล่า และซังข้าวเปลือกตัวอย่างละ 15 กรัม (ตัวอย่างละ 3 ซัง) นำมาอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำมาใส่โถดูดความชื้นจนน้ำหนักคงที่ จึงซังน้ำหนักด้วยเครื่องซังละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แล้วคำนวณปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกตามสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{(w_1 - w_2)}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือกก่อนอบ}} \times 100$$

โดยที่ w_1 คือ น้ำหนักของภาชนะรวมกับข้าวเปลือกก่อนอบ

w_2 คือ น้ำหนักของภาชนะรวมกับข้าวเปลือกหลังอบ

3.7.5 อัตราการงอกของข้าวเปลือก (International Seed Testing Association (2003))

ใช้วิธีการตรวจสอบคุณภาพความงอกของเมล็ดมาตรฐาน (Standard germination test) แบบ Top paper (TP) เปรียบเทียบข้าวเปลือกที่กระทำด้วยไมโครเวฟและวิธีการตาก โดยแช่เมล็ดข้าวเปลือกตัวอย่างละ 20 กรัมในน้ำกลั่น 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาเลือกเฉพาะเมล็ดที่จมน้ำ เตรียมกระดาษเยื่อแบบหนาซึ่งเป็นวัสดุที่ดูดซับน้ำได้ดีวางรอง 3 ชั้นบนจานแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร พรมด้วยน้ำกลั่นให้กระดาษชุ่มน้ำจนทั่ว จากนั้นใช้ปากคีบวางเมล็ดข้าวเปลือกเรียงกัน 5 แถว แถวละ 20 เมล็ด (ตัวอย่างละ 4 ซ้ำ) ใช้ข้าวเปลือกที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบเป็นชุดควบคุม บ่มที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) สังเกตและบันทึกจำนวนเมล็ดที่มีรากงอกในวันที่ 4 และ 7 ของการบ่มเพื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวเปลือกตามสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การงอก} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่มีรากงอก}}{\text{จำนวนเมล็ดข้าวเปลือกทั้งหมด}} \times 100$$

3.7.6 การคัดแยกและหาจำนวนราทั้งหมดที่ปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวเปลือก

3.7.6.1 การคัดแยกราในข้าวเปลือกด้วยวิธี direct plating

สุ่มหยิบข้าวเปลือกจำนวน 50 เมล็ดต่อตัวอย่าง จากตัวอย่างข้าวเปลือกที่รับมา ตัวอย่างข้าวเปลือกที่กระทำด้วยไมโครเวฟและวิธีการตาก ใช้ปากคีบวางเมล็ดข้าวเปลือกบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Dichloran 18% glycerol (DG18) โดยวางเมล็ดข้าวเปลือก 10 เมล็ดต่อจานเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 วัน บันทึกจำนวนโคโลนีของราเพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนราตามสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การติดเชื้อรา} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่มีการติดเชื้อรา}}{\text{จำนวนเมล็ดข้าวเปลือกทั้งหมด}} \times 100$$

3.7.6.2 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือก

คัดแยกราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกที่มีลักษณะโคโลนีแตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างนำมาจัดจำแนกโดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphological characterization) ได้แก่ ลักษณะที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (macroscopic) คือ ขนาด สี ลักษณะของโคโลนี และทำสไลด์กึ่งถาวร (slide culture) นำไปส่องดูลักษณะของสปอร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 400 เท่า เพื่อศึกษาโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์ คือ ลักษณะของสปอร์ เส้นใย และโครงสร้างพิเศษอื่น ๆ เพื่อจำแนกชนิดของราตามคู่มือการจัดจำแนกของ Samson และคณะ (2004) เพื่อเปรียบเทียบชนิดของราที่ถูกระงับด้วยการเจริญด้วยไมโครเวฟจากวิธีการตากและชุดควบคุม

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดียว รวมทั้งการลดความชื้นและการยับยั้งราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อน โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics version 24 วิเคราะห์จาก one way-ANOVA แบบ Duncan's multiple range test กำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกสามารถบอกถึงความสามารถในการเก็บสะสมและดูดซับคลื่นจากไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนของสาร ทำให้ทราบว่า การเกิดความร้อนในสารแต่ละชนิดเมื่อได้รับคลื่นจะมากหรือน้อย เนื่องจากการทดสอบด้วยไมโครเวฟในชั้นถัดไป กระทำต่อจุลินทรีย์ที่เป็นแบคทีเรียและยีสต์ซึ่งแขวนลอยในสารละลายที่เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อและสปอร์ราซึ่งแขวนลอยในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.85% (v/w) จึงได้วัดความถี่เรโซแนนซ์ของสารละลายเหล่านี้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของของเหลวก่อน และยืนยันว่าการทดสอบด้วยสารละลายก่อให้เกิดความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์ได้เล็กน้อยเพียงใด ซึ่งการวัดความถี่เรโซแนนซ์ในอุปกรณ์ cavity resonator เป็นวิธีหนึ่งในการหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารที่นำมาทดสอบ (กิตติยา พงศาภาสิริทัต และ กุลจิรา บรมเจตน์, 2558)

จากการวัดความถี่เรโซแนนซ์ของสารตัวอย่างทั้งหมด 12 ตัวอย่าง โดยทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้งเพื่อยืนยันค่าความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อกำหนดหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก กำหนดให้น้ำเป็นตัวแทนของตัวทำละลายที่มีขั้ว และน้ำมันดีเซลเป็นตัวแทนของสารที่ไม่มีขั้ว รูปที่ 4.1 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของสารทดสอบ พบว่าน้ำมันดีเซลมีความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุดใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของ PTFE ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการไหลตสารตัวอย่าง โดยก่อนการทดลองได้ปรับให้ตรงกับความถี่ของ cavity resonator (3 กิกะเฮิร์ตซ์) เนื่องจากน้ำมันดีเซลจัดเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ไม่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่น จึงวัดความถี่ของคลื่นที่ส่งออกมาจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 (S_{21}) ได้มาก โดยสูญเสียไปเพียงเล็กน้อย กราฟจึงเลื่อนมาทางซ้ายเล็กน้อย และมีความถี่เรโซแนนซ์มากกว่าของเอทานอล 95% (v/v) และน้ำกลั่น ซึ่งเป็นสารที่มีขั้วทั้งสองชนิด เนื่องจากเอทานอลมีความเป็นขั้วต่ำกว่าน้ำ กราฟจึงอยู่ระหว่างน้ำมันดีเซลและน้ำกลั่น โดยน้ำกลั่นมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำที่สุด

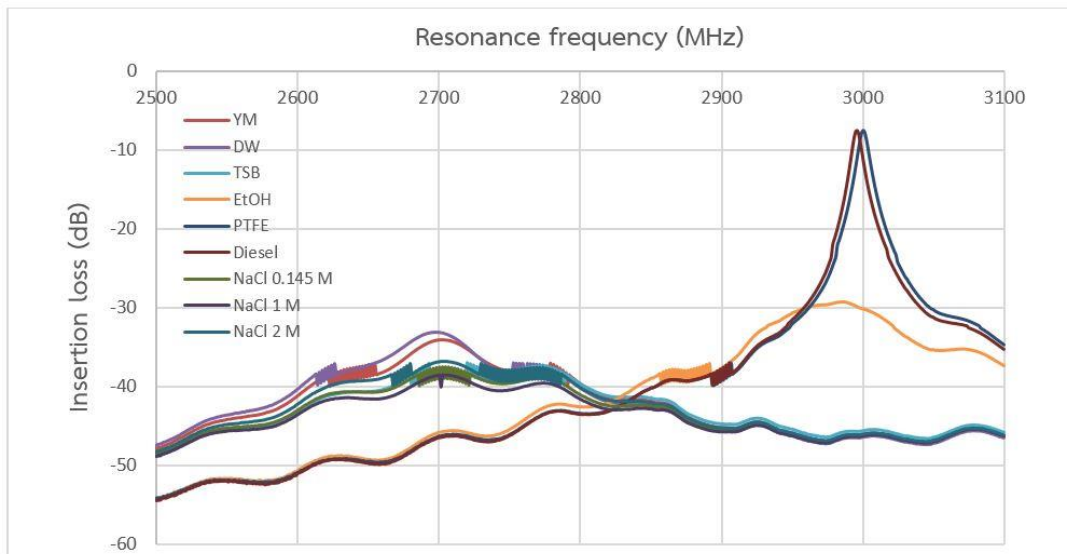
เมื่อคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (ตารางที่ 4.1) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำกลั่นมีค่ามากที่สุด คือ 90.23195 โดยเอทานอล 95% (v/v) และน้ำมันดีเซลมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำกว่าของน้ำกลั่น คือ 5.07631 และ 2.16031 ตามลำดับ ส่วนค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ได้จากการคำนวณมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพซึ่งคำนวณจากแบนด์วิดท์ที่ได้จากกราฟ โดยสารที่มีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพมาก จะมีค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ พบว่าเอทานอลมีค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำกลั่นและน้ำมันดีเซล

กราฟของสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน (ตั้งแต่ 0.145–2 โมลาร์) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายนั้นต่ำลง เนื่องจากอัตราส่วนของน้ำกลั่นที่ลดลง โดยสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.145 โมลาร์มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว 2 ชนิด คือ TSB และ YM ซึ่งใช้สำหรับ *B. subtilis* และ *S. cerevisiae* ที่ได้นำมาวัดความถี่เรโซแนนซ์ด้วย พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับน้ำกลั่นเนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายในชั้นการเตรียมอาหาร แสดงให้เห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์แปรผกผันค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และส่วนของ Insertion loss บอถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของสาร หากพิกของกราฟสูงกว่าแสดงว่าเกิดความร้อนได้ช้ากว่าจากการที่สารดูดซับพลังงานไว้ได้น้อยกว่า

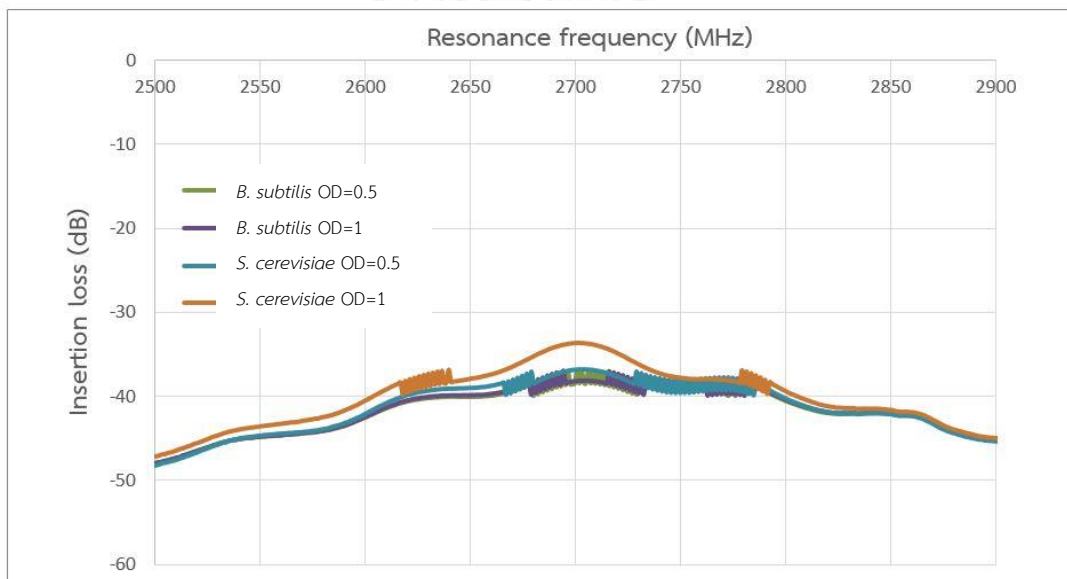
จากกราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ของ *B. subtilis* และ *S. cerevisiae* ที่มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.5 และ 1 (รูปที่ 4.2) พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเจริญของจุลินทรีย์ที่มีค่าการดูดกลืนแสงน้อยกว่า มีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับความถี่ของอาหารที่ปลอดเชื้อชนิดเดียวกัน โดยอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ที่มีการเจริญของ *B. subtilis* ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรเท่ากับ 0.5 และ 1 มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.699636 และ 2.714909 ตามลำดับ น้อยกว่าความถี่ของอาหาร TSB ปลอดเชื้อที่เท่ากับ 2.721455 ในขณะที่อาหารเลี้ยงเชื้อ YM ที่มีการเจริญของ *S. cerevisiae* ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรเท่ากับ 0.5 และ 1 มีค่าความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.701818 และ 2.704000 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความถี่เทียบเท่าและเพิ่มขึ้นจากความถี่ของอาหาร YM ที่ปลอดเชื้อที่เท่ากับ 2.701818

เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหารเลี้ยงเชื้อและอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเจริญของ จุลินทรีย์ พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ที่มีการเจริญของ *B. subtilis* มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่า อาหาร TSB ที่ปลอดเชื้อ แสดงว่ามีโมเลกุลที่มีขั้วเพิ่มจำนวนมากขึ้นในอาหารเลี้ยงเชื้อ และค่า สูญเสียไดอิเล็กทริกของอาหารที่มีการเจริญของ *B. subtilis* มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอาหาร TSB ที่ปลอดเชื้อ ในขณะที่อาหารเลี้ยงเชื้อ YM ที่มีการเจริญของ *S. cerevisiae* ซึ่งมีการดูดกลืน แสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรเท่ากับ 1 และ 0.5 เช่นเดียวกัน มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกน้อยกว่า และใกล้เคียงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร YM ที่ปลอดเชื้อ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเซลล์มี ผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกน้อยมาก โดยที่ *S. cerevisiae* ที่มีการดูดกลืนแสงเท่ากับ 1 มีค่าสูญเสีย ไดอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้นจากอาหาร YM ที่ปลอดเชื้อ และ *S. cerevisiae* ที่มีการดูดกลืนแสง เท่ากับ 0.5

ตารางที่ 4.1 ยังได้แสดง $\tan\delta$ ซึ่งเป็นค่าที่บอกลถึงการสูญเสียพลังงานของสาร โดยสาร ประเภทที่สูญเสียพลังงานเล็กน้อย มีค่า $\tan\delta < 0.01$ (ฐิติมา เอ็งเจริญ, 2554) จากทดสอบพบว่า น้ำมันดีเซลมีค่า $\tan\delta$ เท่ากับ 0.000682 จึงเป็นสารตัวอย่างชนิดเดียวที่จัดอยู่ในสารประเภท ดังกล่าว และเอทานอลมีค่า $\tan\delta$ มีค่ามากที่สุดคือ 2.119433 โดยน้ำกลั่นมีค่า $\tan\delta$ เท่ากับ 0.086780 ในขณะที่สารทดสอบอื่นที่มีน้ำกลั่นประกอบอยู่เป็นส่วนใหญ่ มีค่า $\tan\delta$ ใกล้เคียงกัน ระหว่าง 0.093106 ถึง 0.336326



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการตอบสนองต่อความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ของสารตัวอย่าง



รูปที่ 4.2 การตอบสนองต่อความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ของ *B. subtilis* และ *S. cerevisiae* ที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรเท่ากับ 0.5 และ 1

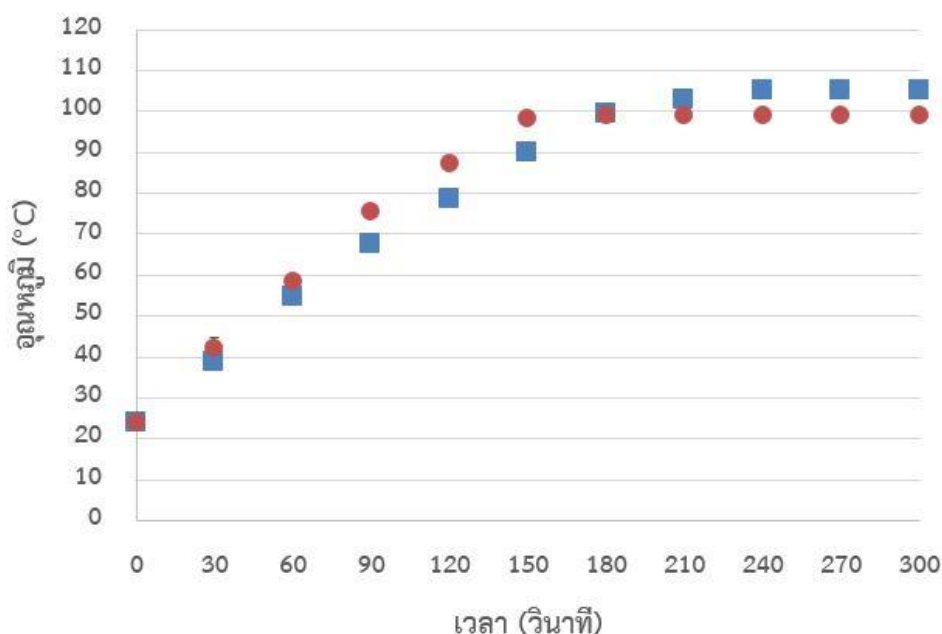
ตารางที่ 4.1 ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก	$\tan\delta$
PTFE	3.000727	← ใช้เป็นค่า f_0 เพื่อคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก		
น้ำมันดีเซล	2.996364	2.16031	0.00147	0.000682
เอทานอล 95%	2.985455	5.07631	10.75889	2.119433
น้ำกลั่น	2.698545	90.23195	7.83032	0.086780
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.145 M	2.702909	88.80131	17.60708	0.198275
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 M	2.705091	88.08771	25.45078	0.288925
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 M	2.706182	87.73135	24.15762	0.275359
อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว TSB	2.721455	82.77258	33.58141	0.405707
อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว YM	2.701818	89.15853	8.301223	0.093106
<i>B. subtilis</i> (OD = 0.5)	2.699636	89.87385	28.71832	0.319540
<i>B. subtilis</i> (OD = 1)	2.714909	84.89107	28.55106	0.336326
<i>S. cerevisiae</i> (OD = 0.5)	2.70181	89.15853	8.301371	0.093108
<i>S. cerevisiae</i> (OD = 1)	2.704000	88.44437	23.21518	0.262483

จากผลการทดลองเรื่องความถี่เรโซแนนซ์และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ทำให้ทราบว่าน้ำกลั่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.145 โมลาร์ (0.85% (w/v) ซึ่งใช้ในงานวิจัย) และอาหารเลี้ยงเชื้อมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกันมาก โดยสารชนิดที่มีโซเดียมคลอไรด์ปริมาณมากกว่า จะมีแนวโน้มความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่มากกว่าและเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า จึงใช้เป็นตัวกลางในการนำความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์ โดยทดสอบกับไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวในขั้นต่อไป

4.2 การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นเมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟ

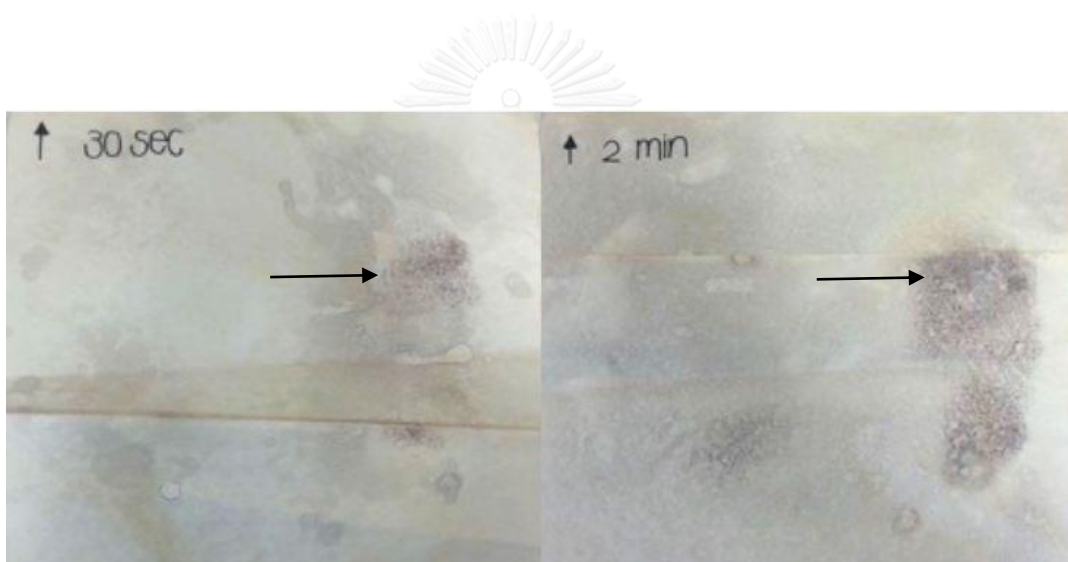
เนื่องจากการค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำกลั่นมีค่าเท่ากับ 90.23195 ใกล้เคียงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB, YM และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.85% (w/v) ซึ่งเป็นตัวกลางในการนำความร้อนที่ทำลายจุลินทรีย์ จึงเลือกมาเป็นตัวแทนในทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดียว (รูปที่ 4.3) พบว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรที่ทดสอบโดยไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำกลั่นที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนตั้งแต่เวลาที่เริ่มต้นถึง 150 วินาที จากนั้นอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ทดสอบโดยไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวจึงคงที่ที่จุดเดือด (100 องศาเซลเซียส) ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนเพิ่มไปจนถึง 105 องศาเซลเซียสเนื่องจากระบบที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทั้งสองชนิดแตกต่างกัน การทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนนั้นบรรจุน้ำกลั่นในขวดดูแรนที่คล้ายเกลียวฝาเล็กน้อยวางที่บริเวณจุดร้อน (hotspot) ภายในเตาไมโครเวฟ ทำให้มีความดันในระบบมากกว่าแอมพลิเคเตอร์ของไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวที่เป็นกระบอกแก้วทรงสูงปลายเปิด



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อน (■) และไมโครเวฟชนิดโหมดเดียว(●)

4.3 จุดร้อน (hotspot) ภายในไมโครเวฟครัวเรือน

จากการทดสอบหาจุดร้อน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการสะสมความร้อนสูงสุดในช่องว่างของไมโครเวฟครัวเรือนเพื่อกำหนดตำแหน่งสำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ในขั้นตอนถัดไป โดยสังเกตความเข้มของสีบนกระดาษแพคเกจ ใช้เวลา 30 และ 120 วินาที ที่ระดับความร้อนสูงสุด 800 วัตต์ พบว่าที่เวลา 30 วินาที กระดาษแพคเกจมีสีเข้มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณริมขวาของกระดาษแพคเกจซึ่งอยู่ด้านที่มีแมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟมีสีเข้ม และพบสีเข้มเป็นบริเวณกว้างมากขึ้นเมื่อทดสอบที่เวลา 120 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 4.4



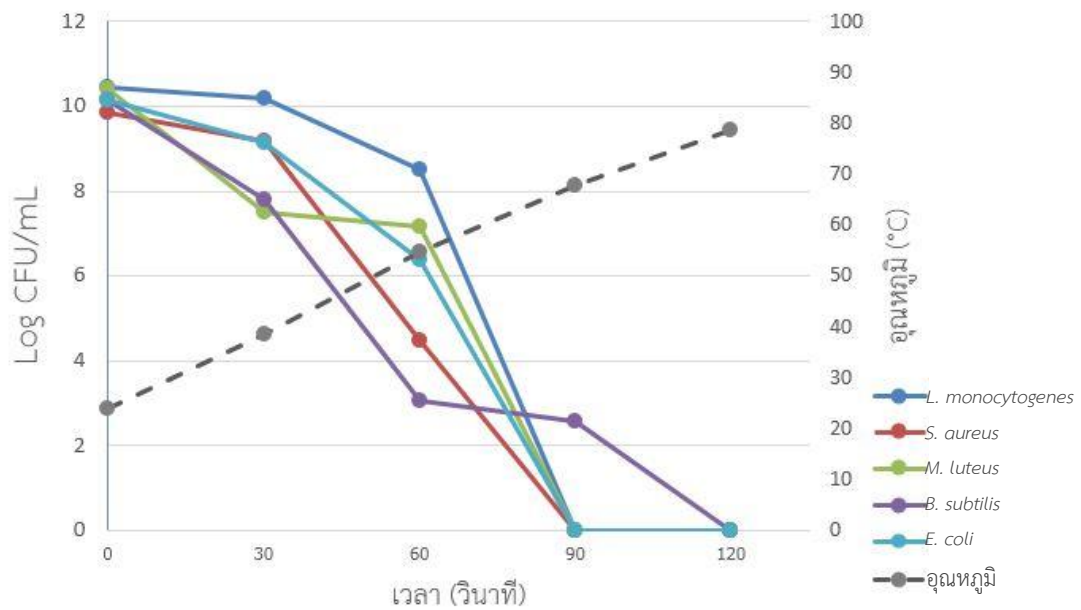
รูปที่ 4.4 กระดาษแพคเกจแสดงตำแหน่งจุดร้อนภายในไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 30 วินาที (ซ้าย) และ 120 วินาที (ขวา)

4.4 การทำลายจุลินทรีย์โดยไมโครเวฟ

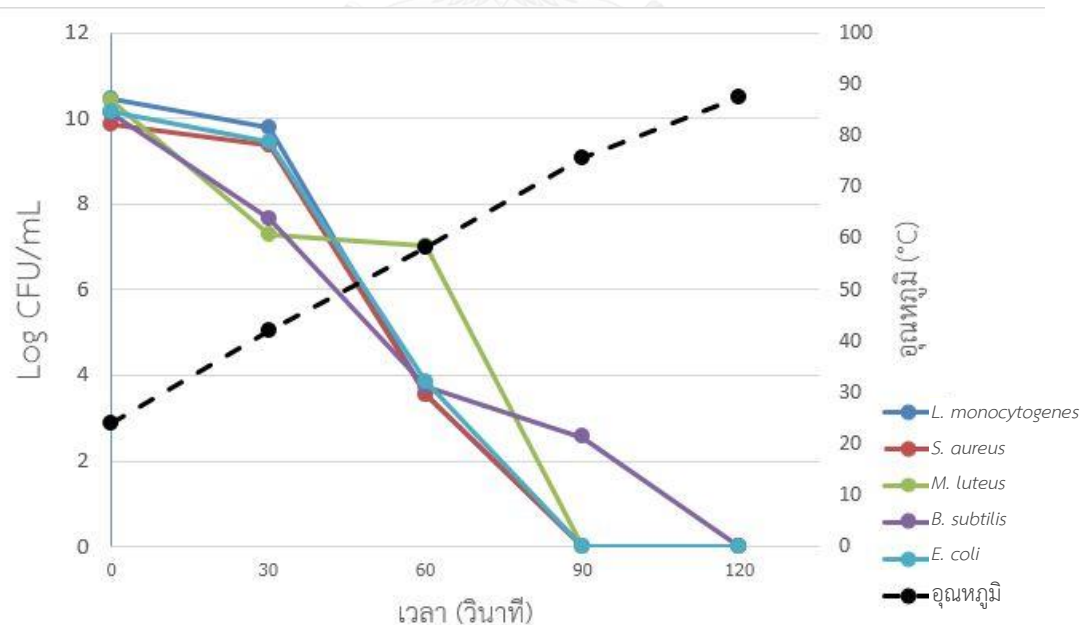
4.4.1 แบททีเรีย

ทดสอบความสามารถในการทำลายจุลินทรีย์แต่ละชนิดด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าสูงที่สุด (800 วัตต์) และไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ที่เวลาเท่ากัน คือ 0-120 วินาที ยกเว้นเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* ใช้เวลา 0-300 วินาที ไมโครเวฟทั้ง 2 แบบมีความความถี่เท่ากัน คือ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ ทดสอบโดยบรรจุอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ที่มีการเจริญของจุลินทรีย์ในขวดดูแรนเมื่อทดสอบกับไมโครเวฟครัวเรือน หรือภาชนะแก้วทนไฟทรงกระบอก ปลายเปิดเมื่อทดสอบกับไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวตามขั้นตอนในข้อ 4.2

แบคทีเรียในงานวิจัยนี้ได้แก่ *E. coli*, *L. monocytogenes*, *S. aureus*, *M. luteus* และ *B. subtilis* พบว่าไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถทำลายจุลินทรีย์ทุกชนิดได้ภายในเวลา 90 วินาที ยกเว้น *B. subtilis* ใช้เวลา 120 วินาทีดังแสดงในกราฟของรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ที่เวลา 60 วินาทีด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวดีกว่าไมโครเวฟครัวเรือนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อทดสอบกับ *E. coli*, *L. monocytogenes* และ *B. subtilis* ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่มากกว่าในเวลาเริ่มต้นที่ 24 องศาเซลเซียสถึงเวลาสุดท้ายคือ 120 วินาที โดยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวและไมโครเวฟครัวเรือนมีอุณหภูมิ 87.33 ± 0.58 และ 78.67 ± 0.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ไมโครเวฟครัวเรือนสามารถทำลาย *B. subtilis* ได้มากกว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่ 60 วินาที ซึ่งไม่พบในแบคทีเรียชนิดอื่น แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) สรุปว่าผลของอัตราการรอดชีวิตของ *M. luteus* และ *S. aureus* ที่ 60 วินาที รวมทั้ง *B. subtilis* ที่ 90 วินาทีโดยการทดสอบของไมโครเวฟทั้ง 2 แบบให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลของอัตราการรอดชีวิตในจุลินทรีย์แต่ละชนิดแตกต่างกัน อาจเกิดจากจุลินทรีย์มีองค์ประกอบโครงสร้างของเซลล์และกลไกในการปรับตัวให้ทนต่อความร้อนแตกต่างกัน รวมทั้งจำนวนเซลล์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 10^{10} CFU/mL อาจส่งผลต่อจำนวนเซลล์ที่รอดชีวิตเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ทำให้สรุปได้ว่าชนิดของแบคทีเรียไม่มีผลต่ออัตราการรอดชีวิตเมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



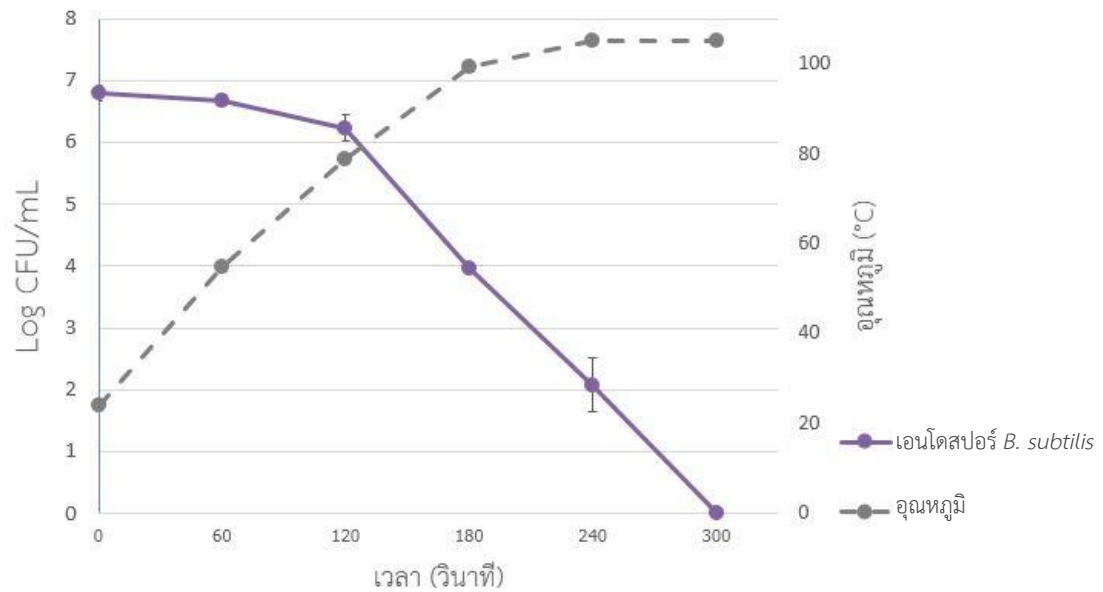
รูปที่ 4.5 จำนวนแบคทีเรียและอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ



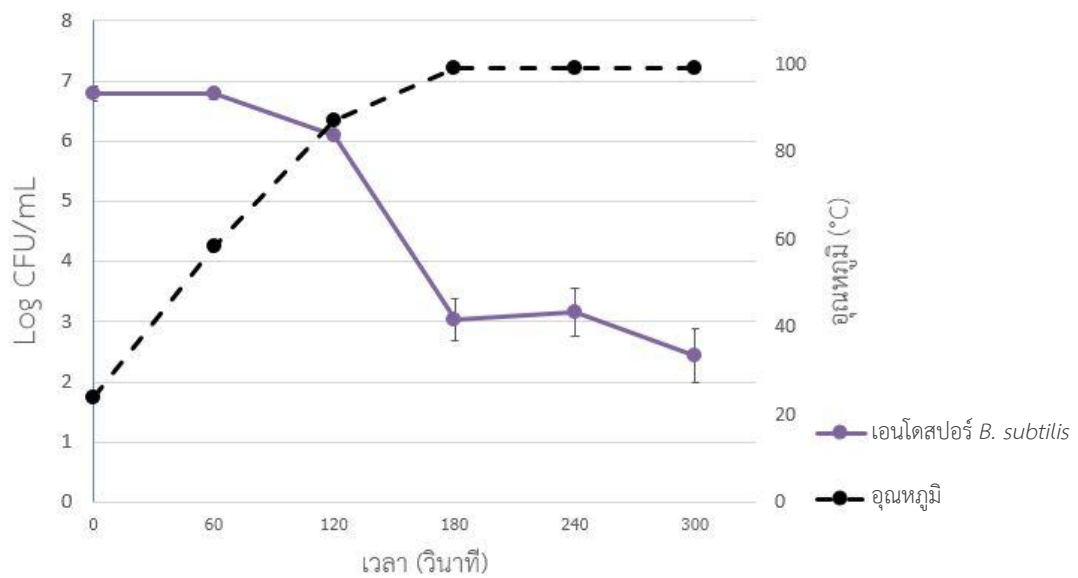
รูปที่ 4.6 จำนวนแบคทีเรียและอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ

4.4.2 เอนโดสปอร์ของ *B. subtilis*

เนื่องจากเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* ทนต่อสภาพแวดล้อมได้มากกว่าส่วนที่เป็นเซลล์ปกติ จึงปรับช่วงเวลาในการทดสอบเป็นช่วงละ 60 วินาที พบว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการทำลายเอนโดสปอร์ได้ดีกว่าไมโครเวฟครีวเรื่อนที่เวลา 180 วินาที สอดคล้องกับอุณหภูมิที่มากกว่า ณ ช่วงเวลาดังกล่าว แต่ยังพบการรอดชีวิตของเอนโดสปอร์ที่ 300 วินาที (รูปที่ 4.8) ในขณะที่ไมโครเวฟครีวเรื่อนสามารถยับยั้งการเจริญของเอนโดสปอร์ได้ดีกว่าหลังจาก 240 วินาที โดยไม่พบการรอดชีวิตของเอนโดสปอร์ที่ 300 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยไมโครเวฟครีวเรื่อนที่เพิ่มขึ้นเป็น $105 (\pm 0.00)$ องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.7) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ทดสอบโดยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่เท่ากับ $99 (\pm 0.58)$ องศาเซลเซียส ซึ่งคงที่หลังจาก 180 วินาทีแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่จุดเดือด (100 องศาเซลเซียส) ที่มีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิจากการทดสอบด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดียวนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้สปอร์เสียสภาพในการงอกเป็นเซลล์ใหม่ จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) แสดงว่าอัตราการรอดชีวิตของเอนโดสปอร์ที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟครีวเรื่อนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่เวลา 180, 240 และ 300 วินาทีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.7 จำนวนเอนโดสปอร์ *B. subtilis* และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่ กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 จำนวนเอนโดสปอร์ *B. subtilis* และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่ กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ

4.4.3 ยีสต์และสปอร์รา

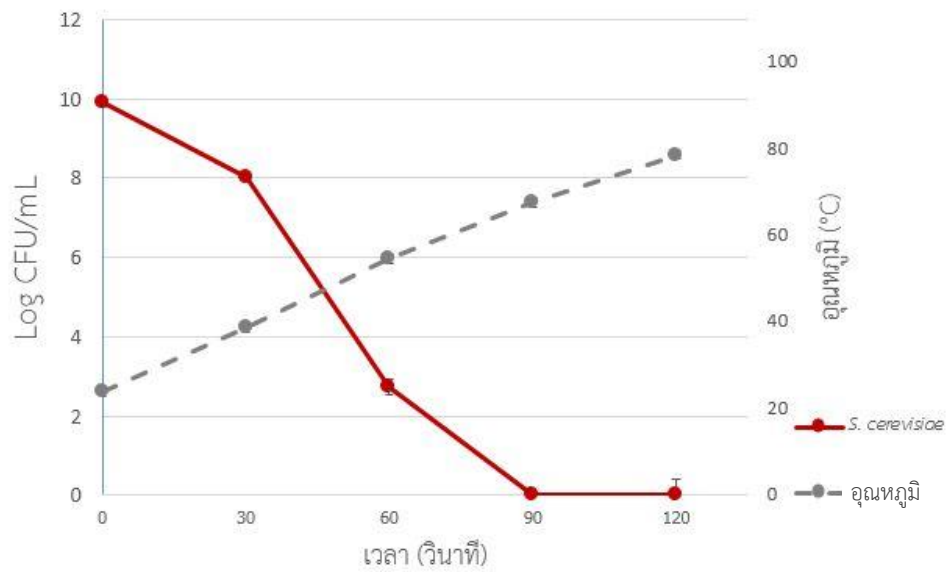
เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และสปอร์ราด้วยไมโครเวฟ ครัวเรือน เปรียบเทียบกับไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่เวลาเท่ากัน พบว่า *S. cerevisiae* ถูกทำลายทั้งหมดภายในเวลา 90 วินาที คล้ายกับแบคทีเรีย ยกเว้นเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* โดยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการทำลายเซลล์ได้มากกว่าไมโครเวฟครัวเรือน เนื่องจากลดจำนวน *S. cerevisiae* เหลือเพียง 1.3 ลอการิทึมในเวลา 1 นาทีดังแสดงในกราฟของรูปที่ 4.10 ในขณะที่ไมโครเวฟครัวเรือนลดจำนวนเหลือมากกว่า 2.7 ลอการิทึม สอดคล้องกับประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิในน้ำกลั่นดังแสดงในกราฟของรูปที่ 4.9 จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการลดจำนวน *S. cerevisiae* ได้มากกว่าไมโครเวฟครัวเรือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทำลายสปอร์รา *A. niger*, *A. nidulans* และ *P. chrysogenum* มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ *S. cerevisiae* (รูปที่ 4.11 และ 4.12) คือ ไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถทำลายสปอร์ราที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10^6 - 10^7 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ได้ทั้งหมดภายในเวลา 90 วินาที ในทางตรงข้าม สปอร์ของ *R. oryzae* ยังคงมีเหลืออยู่เมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่เวลา 90 วินาที (รูปที่ 4.12) ทั้งนี้อาจเกิดจากองค์ประกอบของทรีฮาโลสในสปอร์ที่มีปริมาณแตกต่างกันในราแต่ละชนิด (Krijgsheld และคณะ, 2016) จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการทำลายของสปอร์ราทุกชนิดที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่เวลา 60 วินาทีแตกต่างกัน ในขณะที่ประสิทธิภาพของไมโครเวฟทั้ง 2 แบบจากการทดสอบกับสปอร์ของ *R. oryzae* และ *A. nidulans* ที่เวลา 30 วินาที ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

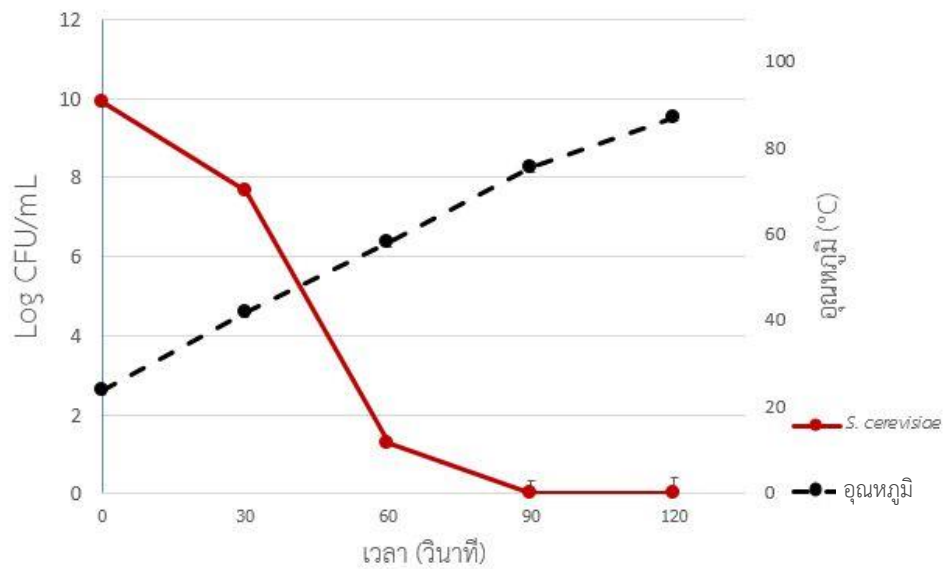
เนื่องจากแอสโคสปอร์ของ *E. nidulans* ทนต่อสภาพแวดล้อมได้มากกว่าสปอร์แบบที่ไม่อาศัยเพศหรือโคนิไดโอสปอร์ (Dijksterhuis, 2016) ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการทำลายแอสโคสปอร์ด้วยไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว รูปที่ 4.11 แสดงการลดลงของโคนิไดโอสปอร์ที่มากกว่าแอสโคสปอร์ เมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนในเวลา 60 วินาที เมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 90 วินาที ไมโครเวฟครัวเรือนสามารถทำลายแอสโคสปอร์ได้ทั้งหมด การทำลาย

สปอร์ด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวยังแสดงให้เห็นว่าแอสโคสปอร์ทนต่อความร้อนได้มากกว่าโคนิดีโอสปอร์ เช่นเดียวกับผลการทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวเร็ว ซึ่งยังพบแอสโคสปอร์หลงเหลือที่เวลา 90 วินาทีและไม่พบการเจริญของโคนิดีโอสปอร์ที่เวลาทดสอบเดียวกัน (รูป 4.12)

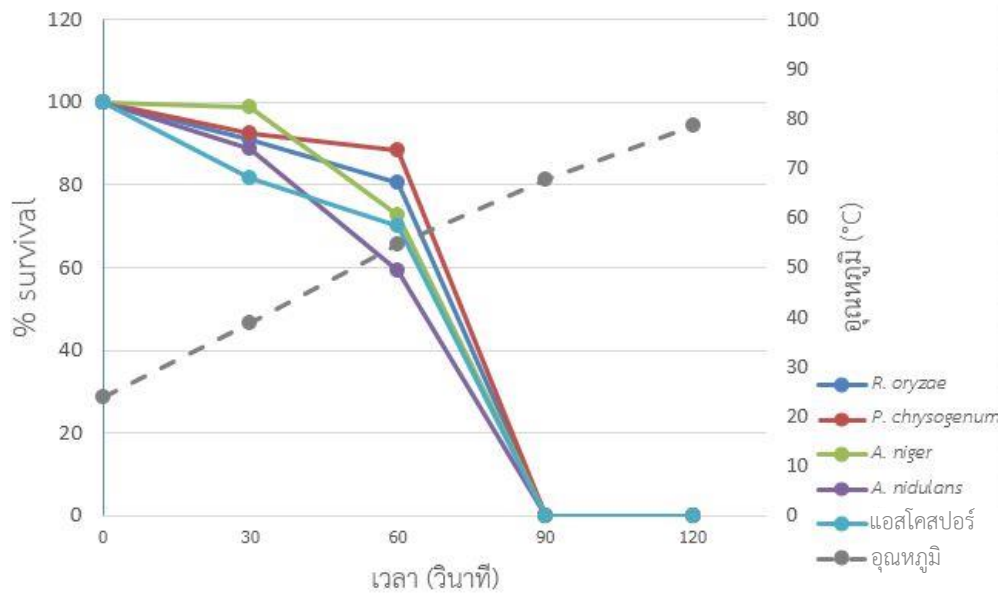
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำลายแอสโคสปอร์ระหว่างการใช้ไมโครเวฟคร่าวเร็วกับการใช้ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว พบว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถลดจำนวนแอสโคสปอร์เหลือ 58.9% ในขณะที่ไมโครเวฟคร่าวเร็วลดจำนวนแอสโคสปอร์เหลือ 70.1% ที่เวลา 60 วินาที แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของสปอร์โดยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวดีกว่า แต่ในเวลา 90 วินาที กลับพบว่าไมโครเวฟคร่าวเร็วสามารถทำลายแอสโคสปอร์ได้ทั้งหมด ในขณะที่ยังพบการเจริญของรา 14.8% จากการทดสอบด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว ทำให้สรุปได้ว่าไมโครเวฟคร่าวเร็วมีประสิทธิภาพที่ดีมากกว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว อาจเป็นไปได้ว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์ จึงไม่สามารถทำลายสปอร์ราที่ทนต่อความร้อนได้



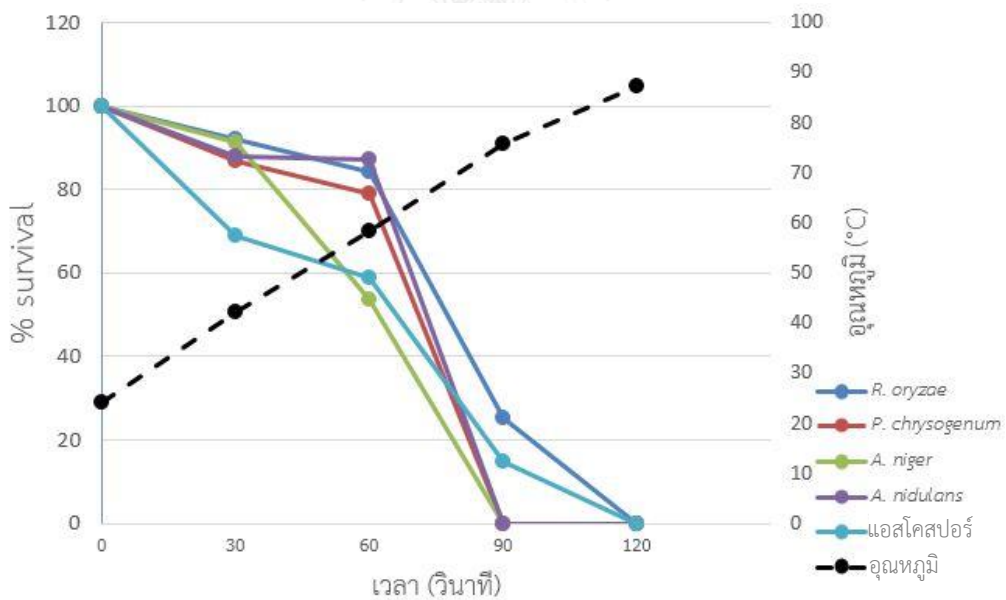
รูปที่ 4.9 จำนวน *S. cerevisiae* และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 จำนวน *S. cerevisiae* และอุณหภูมิหลังถูกกระทำด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ ในเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำลายสปอร์ราด้วยไมโครเวฟครัวเรือน และอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการทำลายสปอร์ราด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว และอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวและไมโครเวฟคร้วเรือนในการทำลายแบคทีเรีย ยีสต์ และสปอร์รา จึงคำนวณค่า D-value (Decimal reduction time) จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแบคทีเรียที่รอดชีวิต (CFU/mL) และเวลาที่ใช้ทดสอบกับไมโครเวฟแต่ละประเภท (นาที) โดยที่ $D\text{-value} = -1/\text{slope}$ (นาที) คือเวลาที่ใช้ในการลดจำนวนจุลินทรีย์ลง 1 ลอการิทึม (ทิพาพร อยู่วิทยา, 2558)

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่า D-value ในการทำลายจุลินทรีย์แต่ละชนิดด้วยไมโครเวฟคร้วเรือน และไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว ค่า D-value ของไมโครเวฟคร้วเรือนต่อแบคทีเรีย คือ *E. coli*, *L. monocytogenes*, *M. luteus*, *S. aureus* และเซลล์ปกติของ *B. subtilis* มีค่าใกล้เคียงกับค่า D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว (ความแตกต่างระดับ ± 0.05 นาที) และค่า D-value ของการใช้ไมโครเวฟคร้วเรือนสำหรับเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* เท่ากับ 0.704 นาที น้อยกว่าค่า D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่มีค่าเท่ากับ 1.009 นาที

ตารางที่ 4.2 ค่า D-value ของจุลินทรีย์เมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟ

จุลินทรีย์		ค่า D-value (นาที)	
		ไมโครเวฟครัวเรือน	ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว
แบคทีเรีย	<i>E. coli</i>	0.151	0.139
	<i>L. monocytogenes</i>	0.152	0.133
	<i>M. luteus</i>	0.158	0.159
	<i>S. aureus</i>	0.146	0.141
	<i>B. subtilis</i>	0.196	0.197
	เอนโดสปอร์ <i>B. subtilis</i>	0.704	1.009
ยีสต์และสปอร์รา	<i>S. cerevisiae</i>	0.143	0.140
	<i>A. niger</i>	0.218	0.211
	<i>P. chrysogenum</i>	0.232	0.229
	<i>R. oryzae</i>	0.251	0.293
	<i>A. nidulans</i>	0.218	0.240
	Ascospore	0.284	0.344

ค่า D-value ของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวของยีสต์และสปอร์รา คือ *S. cerevisiae*, *A. niger*, *P. chrysogenum* และ *A. nidulans* มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นแอสโคสปอร์ที่มีค่า D-value ในไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวเท่ากับ 0.344 นาที ในขณะที่ไมโครเวฟครัวเรือนมีค่า D-value น้อยกว่า (0.284 นาที) (ความแตกต่างมากกว่าระดับ ± 0.05 นาที) ซึ่งหมายความว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีประสิทธิภาพดีไปกว่าไมโครเวฟครัวเรือนในการทำลายจุลินทรีย์ที่ทนความร้อน

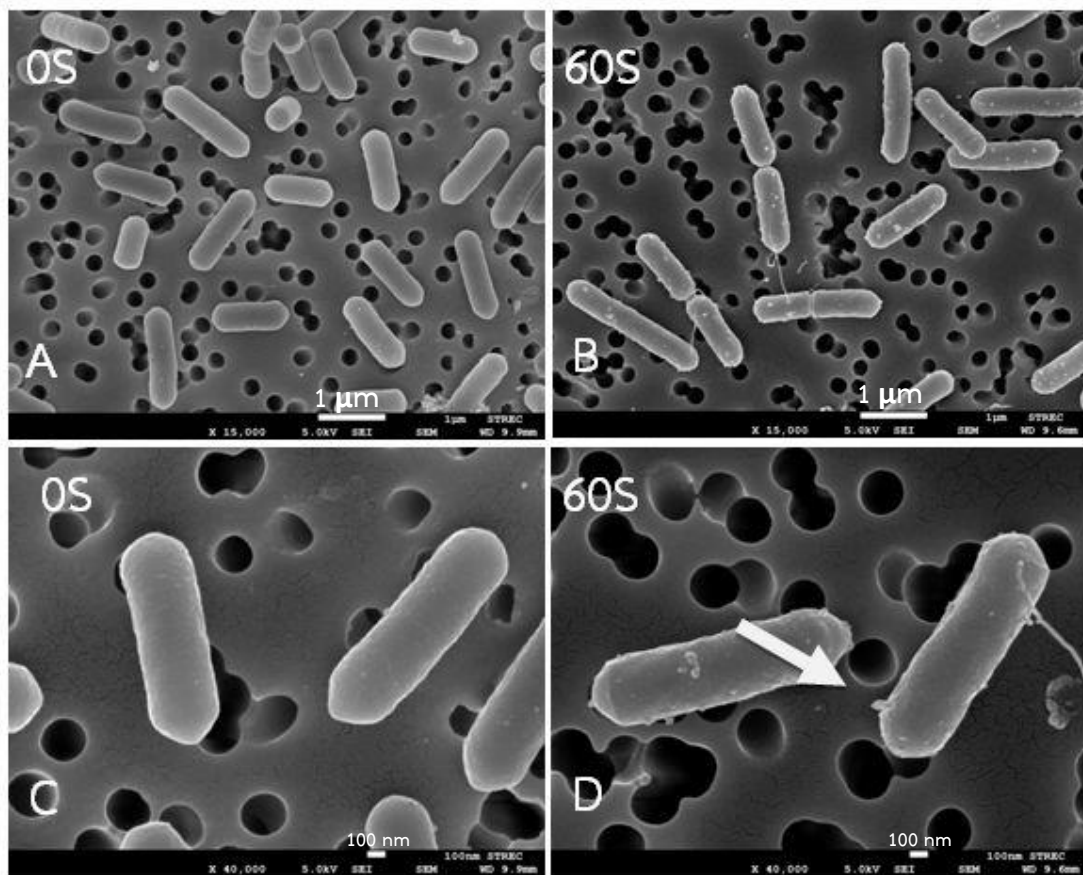
ค่า D-value ของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวต่อสปอร์รา 4 สายพันธุ์ และแอสโคสปอร์มากกว่า *S. cerevisiae* และแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์เล็กน้อย แต่ยังคงน้อยกว่าค่า D-value ของเอนโดสปอร์ ดังนั้นจึงจัดเรียงลำดับความทนของจุลินทรีย์แต่ละประเภทจากการทนต่อการถูกทำลายด้วยไมโครเวฟได้ดังนี้ (มากไปน้อย)

เอนโดสปอร์ของแบคทีเรีย > สปอร์ราแบบอาศัยเพศ > สปอร์ราแบบไม่อาศัยเพศ > เชลล์ยีสต์และแบคทีเรีย

4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

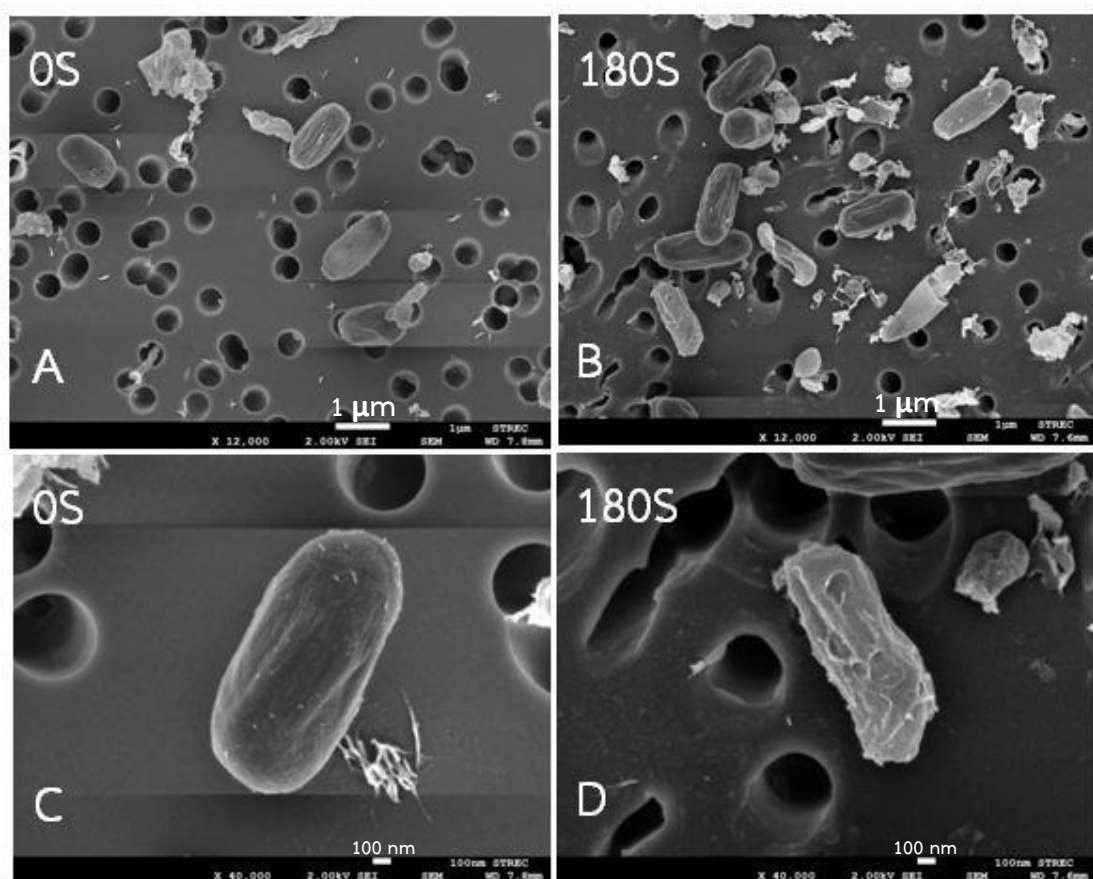
4.5.1 เชลล์แบคทีเรียและเอนโดสปอร์ของแบคทีเรีย

จากการทดสอบการทำลายแบคทีเรียด้วยไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ในเวลาอันสั้นและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เป็นที่น่าสนใจว่าการตายของจุลินทรีย์อาจเกิดขึ้นจากความร้อนโดยรังสีไมโครเวฟ ร่วมกับกลไกของรังสีต่อเซลล์ในรูปแบบอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์เพิ่มเติมโดยงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานการเปลี่ยนแปลงของ *E. coli* และ *B. subtilis* ต่อรังสีไมโครเวฟ (Woo และคณะ, 2000, Zhou และคณะ, 2010) ผู้วิจัยจึงเลือก *L. monocytogenes* เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวกที่ไม่สร้างสปอร์ เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเมื่อได้รับรังสีไมโครเวฟซึ่งมีรายงานยังไม่มากนัก หลังจากทดสอบการทำลาย *L. monocytogenes* ด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์เป็นเวลา 60 วินาที นำตัวอย่างเซลล์ไปตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปของเซลล์ รูปที่ 4.13B แสดงให้เห็นผิวเซลล์ที่ผ่านการทดสอบมีลักษณะไม่เรียบ มีจุดสีขาวเกิดขึ้นทั่วเซลล์ ในรูปที่ 4.13D ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า เห็นการปริแตกของผนังเซลล์บางส่วน และจุดสีขาวที่เกิดบนผิวเซลล์ การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยานี้สอดคล้องกับอัตราการรอดชีวิตที่ลดลงใน 60 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม



รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *L. monocytogenes* (A, C) และเซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือน (B, D) ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า (รูปบน) และ 40,000 เท่า (รูปล่าง)

มีงานวิจัยที่รายงานการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ *B. subtilis* เมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Woo และคณะ, 2000) แต่รายงานที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของเอนโดสปอร์ยังไม่พบมากนัก หลังการให้พลังงานด้วยไมโครเวฟกับเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยไมโครเวฟคริวเร็นเป็นเวลา 180 วินาที พบว่าเอนโดสปอร์ที่ผ่านการฉายรังสีมีลักษณะไม่เรียบและหดตัว (รูปที่ 4.14B, ที่กำลังขยาย 12,000 เท่า) รูปที่ 4.14D ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า จะพบการปริแตกของผนังสปอร์บางส่วน และพบเอนโดสปอร์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับชุดควบคุม ซึ่งอาจออกเป็นเซลล์ใหม่ได้ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับอัตราการรอดชีวิตที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม



รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเอนโดสปอร์ *B. subtilis* (A, C) และเซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟคริวเร็น (B, D) ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า (รูปบน) และ 40,000 เท่า (รูปล่าง)

4.5.2 ยีสต์และสปอร์รา

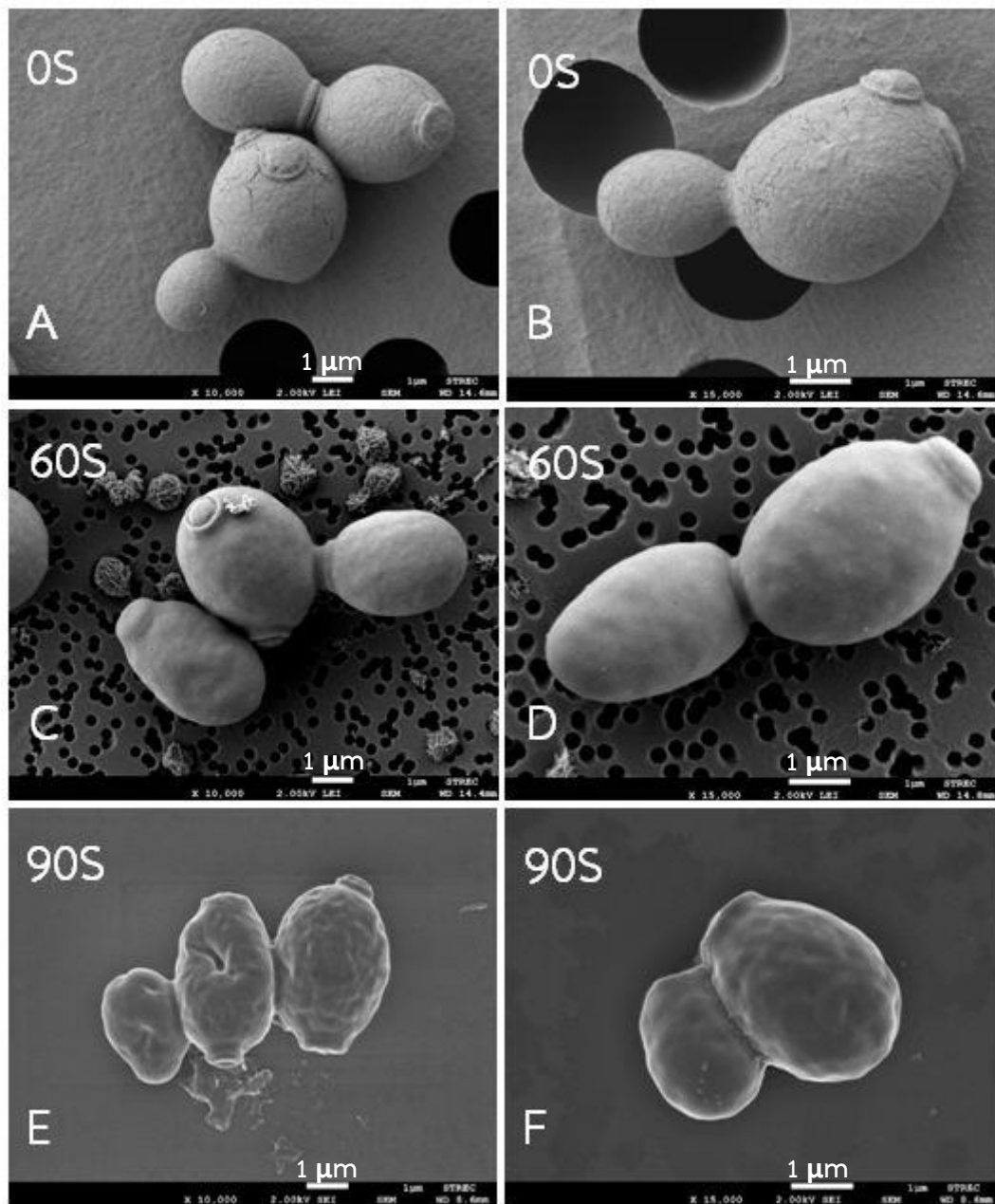
ตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของยีสต์และสปอร์ราเช่นเดียวกับแบคทีเรีย เพื่อเปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดกับเซลล์จุลินทรีย์แต่ละประเภท โดยให้พลังงานกับ *S. cerevisiae* ด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 และ 90 วินาที พบว่าเมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนเป็นเวลานานขึ้น ผิวของเซลล์ไม่เรียบและหดตัวมากขึ้นที่เวลา 60 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15C ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม(รูปที่ 4.15A) ในรูปที่ 4.15E ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบรอยยุบขนาดใหญ่บนเซลล์ *S. cerevisiae* ที่เวลา 90 วินาที โดยที่เวลาดังกล่าวไม่พบการรอดชีวิตของเซลล์

จากการทดสอบสปอร์ราแบบไม่อาศัยเพศ 4 สายพันธุ์ คือ *A. niger*, *P. chrysogenum*, *R. oryzae* และ *A. nidulans* ด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่เมื่อเพิ่มเวลาทดสอบเป็น 90 วินาที สังเกตเห็นความเสียหายของสปอร์ราเกิดอย่างชัดเจน รูปที่ 4.16A และรูปที่ 4.16B ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าและ 20,000 เท่า ตามลำดับ แสดงสปอร์ของ *A. niger* ในชุดควบคุม มีการหลุดลอกของผนังสปอร์ชั้นนอกบางส่วน ในรูปที่ 4.16C ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เห็นผนังสปอร์หลุดออกมากขึ้น ผิวของสปอร์มีความหยาบเพิ่มขึ้น และเกิดรอยฉีกขาดโดยรอบที่บริเวณผนังสปอร์เมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 90 วินาที เกิดรูที่ผนังสปอร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.16E และ 4.16F ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 20,000 เท่าตามลำดับ)

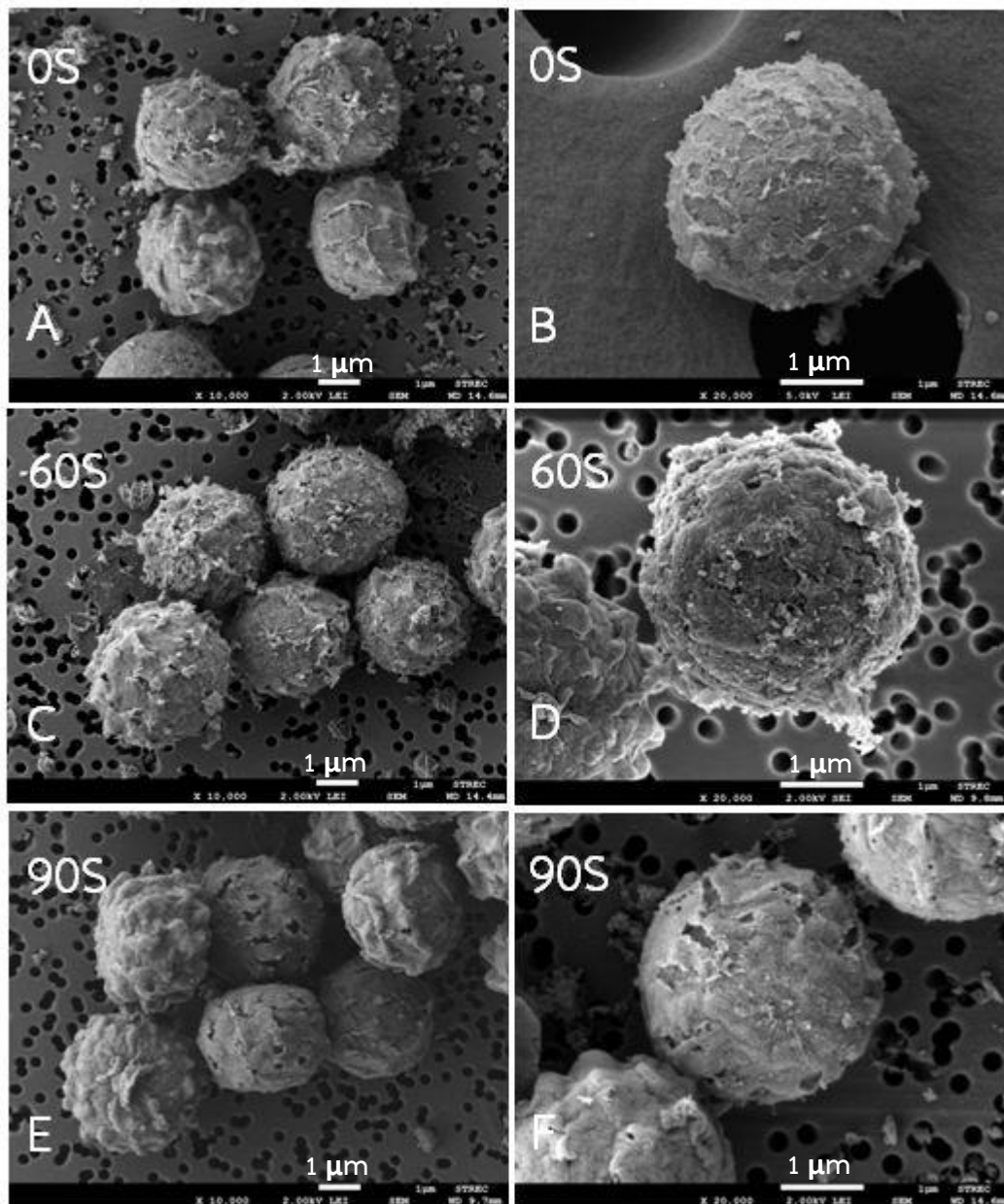
รูปที่ 4.17D ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงให้เห็นว่าสปอร์ *P. chrysogenum* เกิดการหดตัว จากการให้พลังงานด้วยไมโครเวฟคร่าวร้อนเป็นเวลา 60 วินาที โดยผนังของสปอร์หลุดลอกมากขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (รูปที่ 4.17B) และเมื่อเวลาที่ให้พลังงานด้วยไมโครเวฟเพิ่มเป็น 90 วินาที พบว่าผนังสปอร์ชั้นนอกหลุดออกมาทั้งหมด (รูปที่ 4.21F ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า) แม้ว่าจะพบสปอร์ในการตรวจสอบด้วย SEM แต่ไม่พบการเจริญของราจากสปอร์ จึงเป็นไปได้ว่าสปอร์อาจถูกทำลายจนไม่สามารถงอกใหม่ในสภาพนี้ได้

รูปที่ 4.18D ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะสปอร์ของ *R. oryzae* เมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที สังเกตเห็นสภาพของผนังสปอร์เริ่มปริแตก ผนังสปอร์ชั้นนอกหลุดลอกเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มเวลาการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็น 90 วินาที พบว่าผนังสปอร์หลุดออกทั้งหมดอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.18F ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า) โดยที่ไม่พบการรอดชีวิตของสปอร์ที่เวลาทดสอบนี้ เช่นเดียวกันกับสปอร์ราอื่นที่ใช้ในการทดลอง

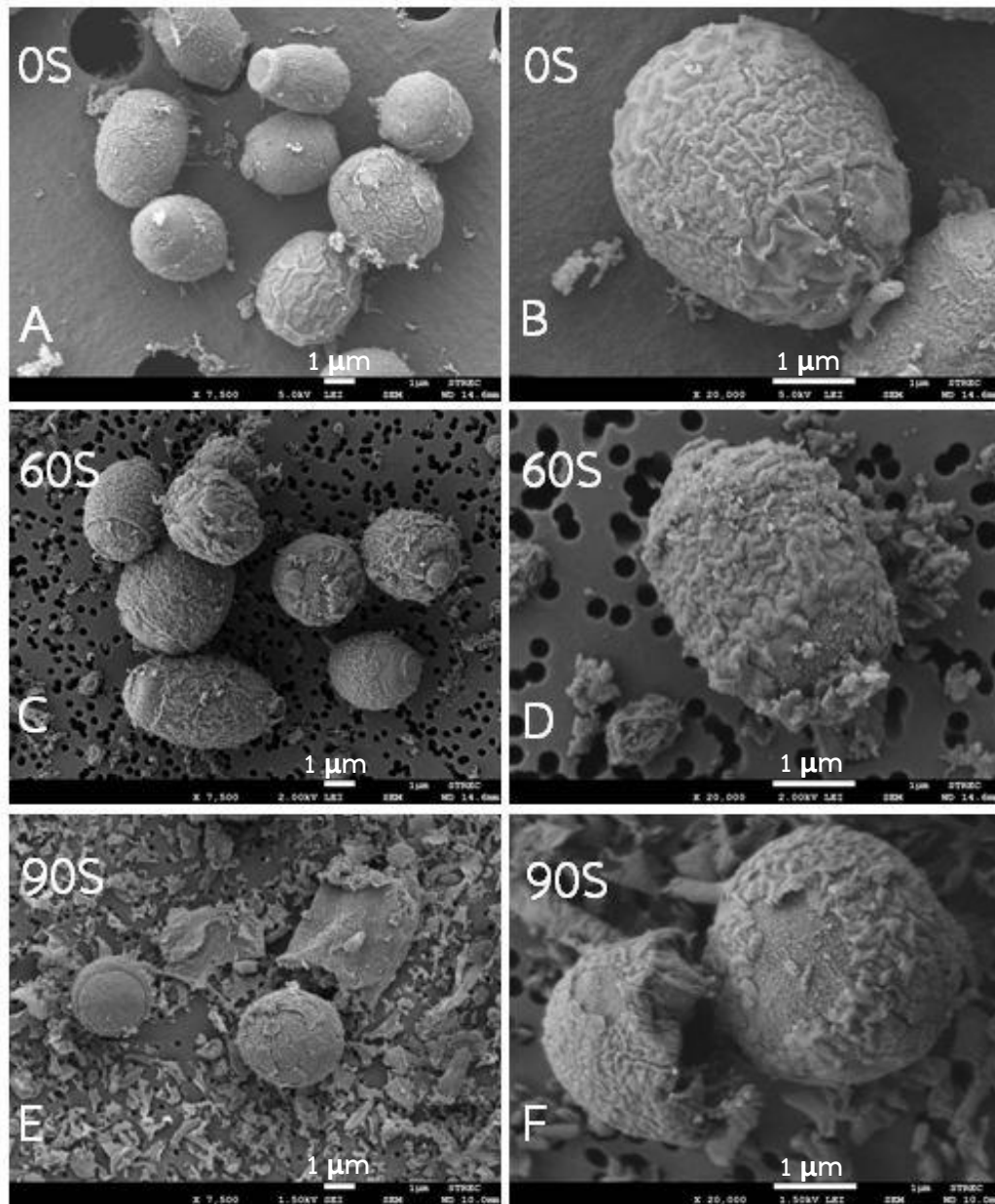
จากการทดสอบการทำลายโคนิดีโอสปอร์ของ *A. nidulans* ด้วยไมโครเวฟคร่าวเร็ว พบว่าการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที ทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (รูปที่ 4.19C ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า) ในรูปที่ 4.19D ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าสปอร์มีการหดตัวเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มเวลาการให้พลังงานเป็นเวลา 90 วินาที สังเกตเห็นผนังสปอร์ชั้นนอกได้หลุดออกไปเกือบทั้งหมด (รูปที่ 4.19F ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า) ในขณะที่ไม่พบการงอกของสปอร์ราที่ 90 วินาที บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA จึงเป็นไปได้ว่าสปอร์เสียหายจนไม่สามารถงอกใหม่ได้ ซึ่งตรงกันข้ามกับแอสโคสปอร์ซึ่งทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวเร็วที่เวลา 60 และ 90 วินาที รูปที่ 4.20C ที่กำลังขยาย 12,000 เท่าและรูปที่ 4.20D ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า แสดงแอสโคสปอร์ที่ได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาใกล้เคียงกับชุดควบคุม โดยพบจุดขนาดเล็กบนผิวของผนังสปอร์ ไม่มีการหดตัวเกิดขึ้น ในรูปที่ 4.20E และ 4.20F ที่กำลังขยาย 12,000 เท่าและ 25,000 เท่าตามลำดับ แสดงลักษณะของแอสโคสปอร์ที่ให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นเวลา 90 วินาที ไม่พบความเสียหายชัดเจนที่ผนังสปอร์เช่นเดียวกัน แม้ว่าที่เวลาทดสอบดังกล่าวไม่พบการรอดชีวิตของแอสโคสปอร์ แสดงให้เห็นว่าลักษณะภายนอกของแอสโคสปอร์ไม่มีผลต่อการเจริญ แต่การตายของแอสโคสปอร์อาจเกิดจากกลไกอื่นที่เกิดขึ้นภายในสปอร์



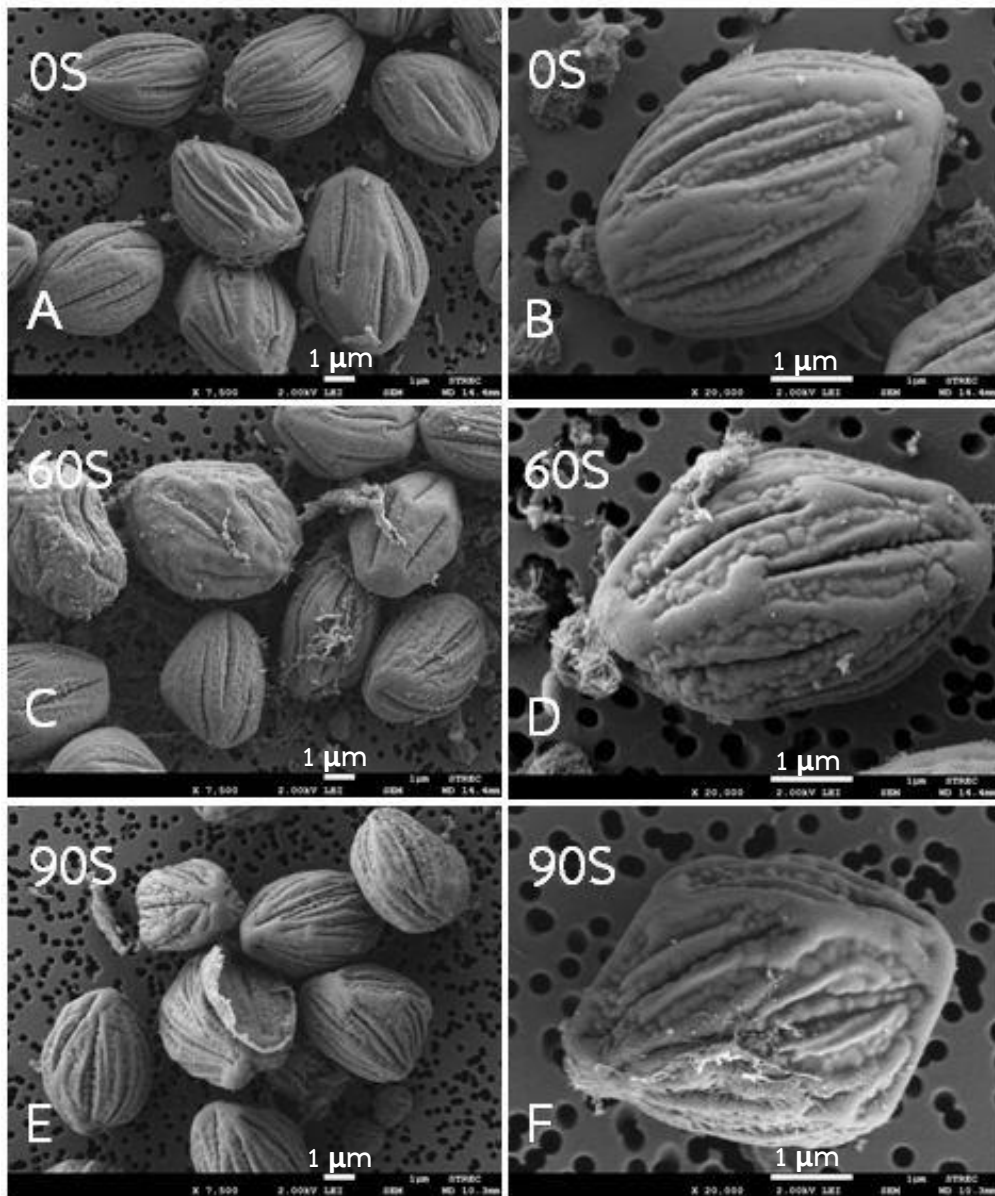
รูปที่ 4.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *S. cerevisiae* (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วย ไมโครเวฟคร้วเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ซ้าย) และ 15,000 เท่า (ขวา)



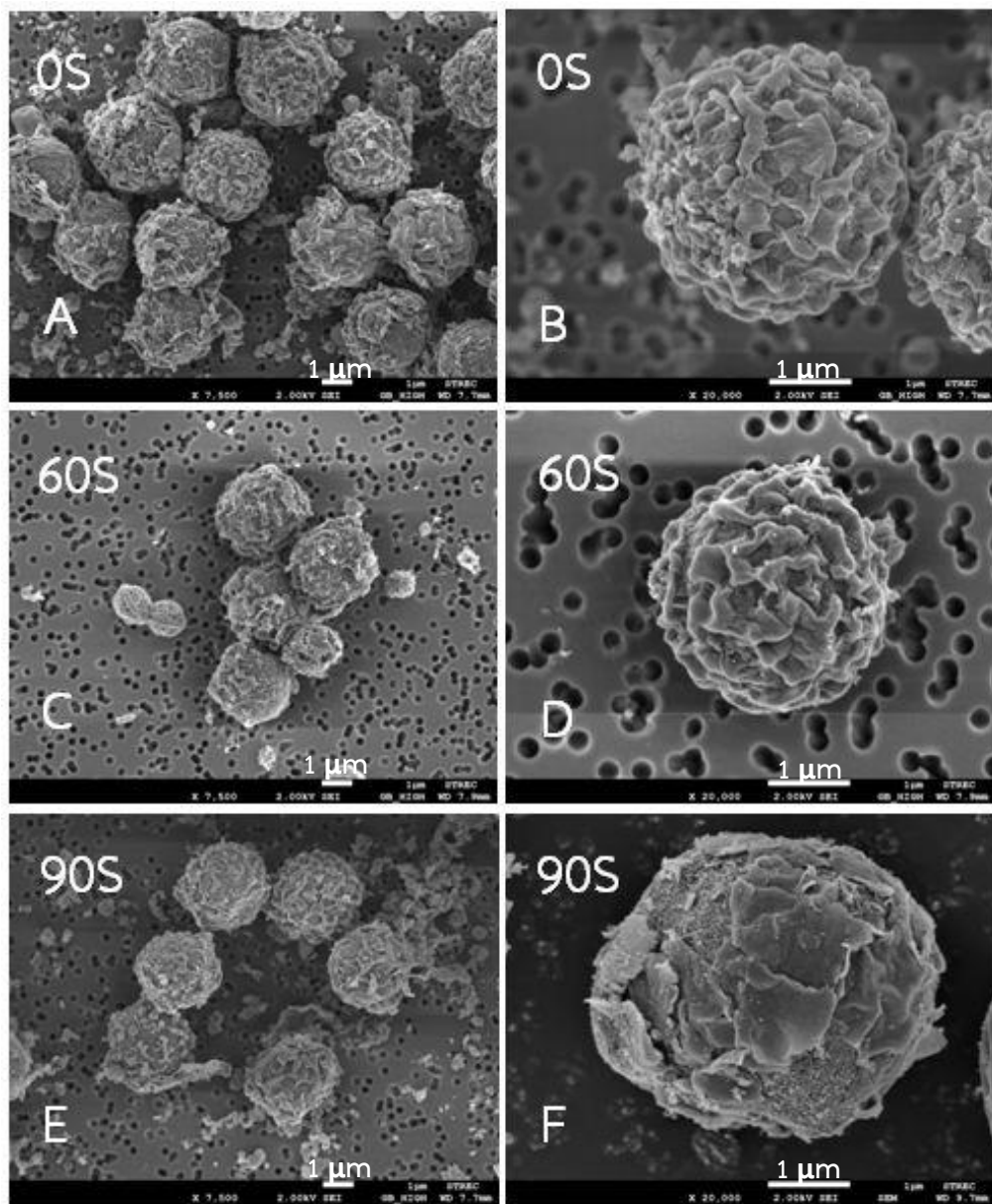
รูปที่ 4.16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ *A. niger* (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟคริวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา)



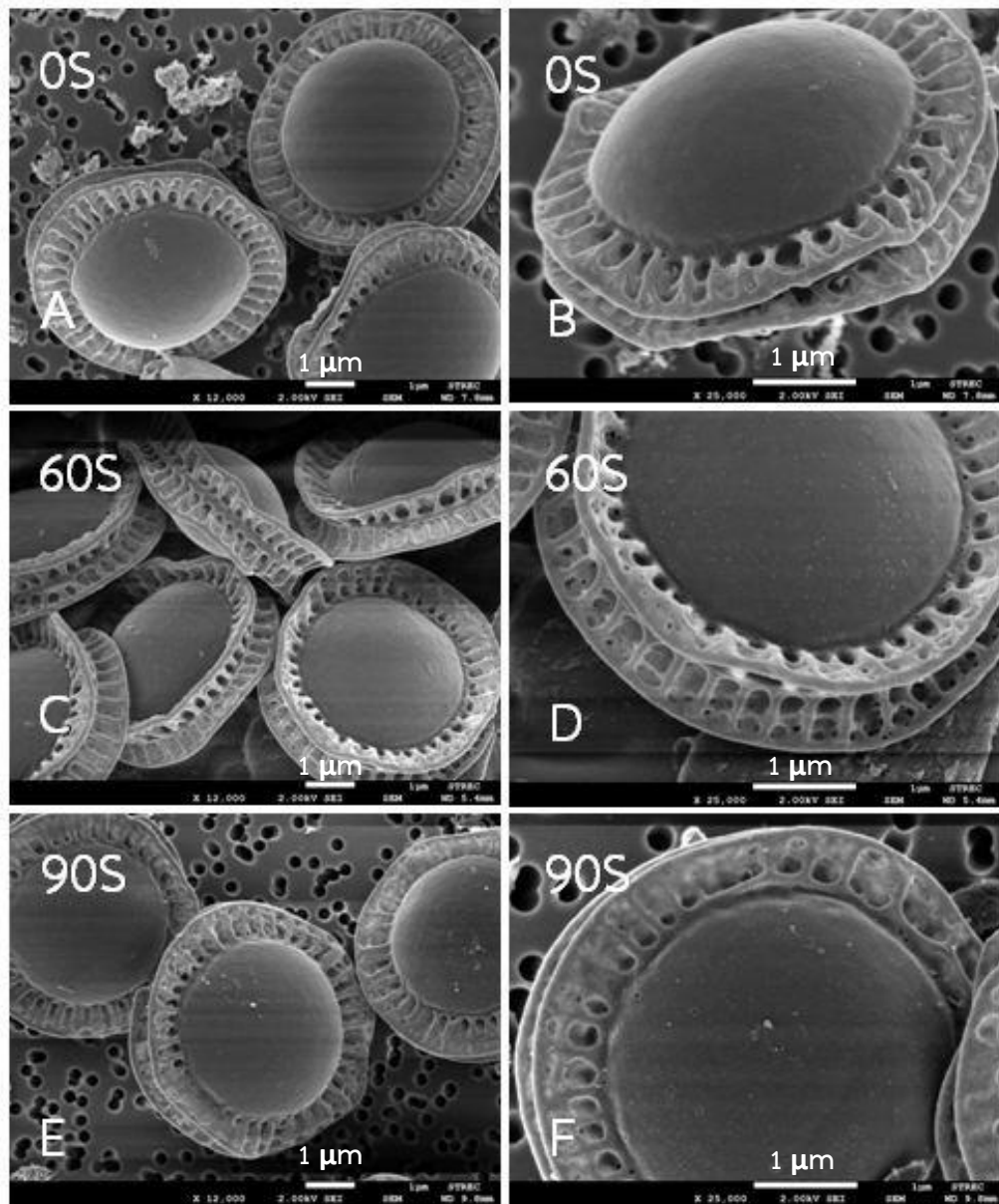
รูปที่ 4.17 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ *P. chrysogenum* (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.18 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ *R. oryzae* (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟคร่าวเร็วที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ *A. nidulans* (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วย ไมโครเวฟคร่าวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า (ซ้าย) และ 20,000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแอสโคสปอร์ (A, B) เซลล์ที่ผ่านการทดสอบด้วยไมโครเวฟ คร่าวเรือนที่เวลา 60 วินาที (C, D) และ 90 วินาที (E, F) ที่กำลังขยาย 12,000 เท่า (ซ้าย) และ 25,000 เท่า (ขวา)

4.6 การยับยั้งจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ

4.6.1 การลดความชื้นในข้าวเปลือก

หลังจากกระบวนการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก เกษตรกรส่วนใหญ่จะแบ่งข้าวเปลือกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่จะไปเป็นข้าวพันธุ์ในฤดูกาลเพาะปลูกถัดไป และส่วนที่เข้าสู่กระบวนการสีเอาเปลือกออก ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้ต้องมีการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับแต่ละจุดประสงค์ ข้าวเปลือกที่จะนำไปสี ต้องมีความชื้นไม่เกิน 15% ของน้ำหนักแห้งเพื่อไม่ให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ แต่ต้องไม่ต่ำจนเกินไปเนื่องจากมีผลต่อคุณภาพของข้าวสาร ในขณะที่ข้าวเปลือกพันธุ์ ต้องลดความชื้นให้ต่ำกว่า 10% ของน้ำหนักแห้ง เนื่องจากต้องเก็บรักษาไว้ในระยะที่นานกว่าข้าวเปลือกที่จะเข้าสู่กระบวนการสี (ชวลิต หาญดี, 2558)

จากผลการทดสอบการทำลายสปอร์ราด้วยไมโครเวฟคร้วเรือน พบว่าสามารถลดจำนวนของสปอร์ *A. niger*, *P. chrysogenum*, *A. nidulans* และ *R. oryzae* จากสปอร์เริ่มต้นประมาณ 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตรได้ภายในเวลา 90 วินาที จึงทดสอบการฉายรังสีไมโครเวฟเพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกตัวอย่างละ 100 กรัม โดยใช้ไมโครเวฟคร้วเรือนที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 60 วินาที และ 90 วินาที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการลดความชื้นในข้าวเปลือกตัวอย่างด้วยไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการตากแห้งด้วยแสงแดด ซึ่งทดลองตากตัวอย่างข้าวเปลือกติดต่อกันเป็นเวลา 3 วัน และเก็บในที่ร่มในเวลากลางคืนเพื่อป้องกันน้ำค้าง วิธีการนี้เป็นวิธีที่เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ในการลดความชื้นในข้าวเปลือก ในงานวิจัยนี้ทดลองตากข้าวเปลือก 10 ตัวอย่าง เป็นเวลา 3 วัน ตั้งแต่วันที่ 28–30 มกราคม 2559 โดยสภาพภูมิอากาศในระยะเวลาที่ตากข้าวเปลือกมีผลต่อการลดปริมาณความชื้นของตัวอย่าง ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิสูงสุด/ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ และความดันบรรยากาศในช่วงเวลาของการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลสภาพภูมิอากาศในวันที่ 28–30 มกราคม 2559

วันที่	อุณหภูมิสูงสุด/ต่ำสุด ที่ 12.00 น. (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความดัน บรรยากาศ (มิลลิบาร์)
28 มกราคม 2559	31/29	54	1,012
29 มกราคม 2559	34/33	72	1,015
30 มกราคม 2559	33/33	58	1,011

อ้างอิงจาก กรมอุตุนิยมวิทยา (www.tmd.go.th)

ตารางที่ 4.4 แสดงความชื้นในข้าวเปลือกก่อนและหลังการลดความชื้นด้วยวิธีการตาก และการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 และ 90 วินาที ก่อนการทดสอบข้าวเปลือกตัวอย่างมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 9.89%–12.52% เนื่องจากได้ผ่านกระบวนการตากแล้วครั้งหนึ่งเพื่อเก็บรักษาโดยเกษตรกร เมื่อลดความชื้นด้วยการตากเป็นเวลา 3 วัน พบว่าความชื้นในข้าวเปลือกมีเปอร์เซ็นต์การลดลงตั้งแต่ 9.85% ไปจนถึง 33.41% ของความชื้นเริ่มต้น ในขณะที่การลดความชื้นด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 60 วินาที มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้ 15.70% ไปจนถึง 32.85% ของความชื้นเริ่มต้น และการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่เวลา 90 วินาที ทำให้ความชื้นลดลงได้ 28.81%–48.18% ของความชื้นเริ่มต้น ซึ่งมากกว่าการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนเป็นเวลา 60 วินาทีและวิธีการตาก โดยตัวอย่างข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ จะมีอัตราการระเหยออกของน้ำต่ำลงไปด้วย ในขณะที่เดียวกันถ้ามีความชื้นเริ่มต้นในตัวอย่างมาก การลดความชื้นจะเกิดขึ้นได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การใช้ไมโครเวฟที่ 60 วินาที ลดความชื้นได้ไม่แตกต่างจากวิธีการตากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ใช้เวลาสั้นกว่ามาก แม้ว่าการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่ 90 วินาที มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นในข้าวเปลือกดีที่สุด แต่ทำให้ข้าวเปลือกเกิดความร้อนจากภายในขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดการแตกพองขึ้น (ประมาณ 0.01% ต่อตัวอย่าง) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งข้าวเปลือกที่สูญเสียไป ทำให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการสีเป็นข้าวสาร และการเก็บเป็นข้าวพันธุ์ พบว่าการใช้ไมโครเวฟที่ 90 วินาทีทำให้เกิดการแตกพองของข้าวเปลือกทุกตัวอย่าง และพบว่าการใช้ไมโครเวฟที่ 60 วินาที ทำให้ข้าวเปลือกตัวอย่าง P2 แตกพองอีกด้วย เนื่องจากตัวอย่าง P2 มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ จึงเกิดการแตกพองได้เร็วกว่าตัวอย่างอื่น



รูปที่ 4.21 ลักษณะข้าวเปลือกที่แตกพองจากการทดสอบกับไมโครเวฟ เวลา 90 วินาที



ตารางที่ 4.4 ความชื้นในข้าวเปลือกก่อนและหลังการลดความชื้นด้วยวิธีต่างๆ

ตัวอย่างข้าวเปลือก	ความชื้นเริ่มต้น (%)	การตาก		ไม่โครเวฟครัวเรือน 60 วินาที		ไม่โครเวฟครัวเรือน 90 วินาที	
		ความชื้น (%)	% การลดลง	ความชื้น (%)	% การลดลง	ความชื้น (%)	% การลดลง
P2	9.89 (± 0.09) ^d	8.92 (± 0.23) ^b	9.85	8.01 (± 0.07) ^{c,d*}	19.03	6.52 (± 0.05) ^{c*}	34.10
P5	10.26 (± 0.11) ^c	8.00 (± 0.02) ^f	22.05	7.34 (± 0.07) ^e	28.46	6.47 (± 0.18) ^{c*}	36.95
P6	12.52 (± 0.02) ^d	9.46 (± 0.09) ^a	24.42	8.41 (± 0.04) ^{b,c}	32.85	6.49 (± 0.20) ^{c*}	48.14
P8	12.16 (± 0.10) ^b	8.34 (± 0.09) ^{d,e,f}	31.37	8.92 (± 0.47) ^{a,b}	26.64	7.78 (± 0.08) ^{a*}	36.04
P11	10.41 (± 0.34) ^c	8.55 (± 0.03) ^{c,d}	17.82	8.77 (± 0.11) ^{d,e}	15.70	6.28 (± 0.07) ^{c*}	39.64
P13	11.52 (± 0.05) ^c	9.30 (± 0.40) ^a	19.30	8.64 (± 0.16) ^{a,b}	24.97	7.13 (± 0.05) ^{b*}	38.08
P17	11.66 (± 0.01) ^b	8.13 (± 0.03) ^{f,e}	30.30	8.46 (± 0.05) ^{b,c}	27.45	7.22 (± 0.08) ^{b*}	38.10
P18	10.16 (± 0.02) ^a	8.83 (± 0.38) ^{b,c}	13.06	7.53 (± 0.15) ^{a,b,c}	25.92	7.23 (± 0.05) ^{b*}	28.81
P19	12.34 (± 0.00) ^b	8.22 (± 0.07) ^{d,e,f}	33.41	8.98 (± 0.05) ^{a,b}	27.23	7.84 (± 0.08) ^{a*}	36.42
P20	12.43 (± 0.04) ^b	8.45 (± 0.10) ^{d,e}	32.05	9.14 (± 0.05) ^a	26.43	7.99 (± 0.07) ^a	35.72

*พบการแตกพองของข้าวเปลือก 0.01% ของจำนวนเมล็ดข้าวเปลือกทั้งหมด

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงค่าความแตกต่างของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA)

4.6.2 การงอกของข้าวเปลือก

เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ แสดงประสิทธิภาพในการลดความชื้นในข้าวเปลือกตัวอย่างได้ในเวลาอันรวดเร็ว และลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เราไม่สามารถเจริญได้ จึงอาจนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการลดความชื้นข้าวเปลือกที่จะสีได้ แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการลดความชื้นเพื่อเก็บข้าวเปลือกเป็นเมล็ดพันธุ์ จำเป็นต้องศึกษาการงอกของข้าวเปลือกที่ทดสอบกับไมโครเวฟ เป็นเวลา 60 วินาทีและเปรียบเทียบกับวิธีการตาก เพาะเมล็ดข้าวเปลือกด้วยเทคนิค top paper (รูปที่ 4.22) จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าในข้าวเปลือก 10 ตัวอย่าง มีเพียง 5 ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการตากแล้วยังพบการงอกของเมล็ด คือ P2, P5, P11, P18 และ P19 โดยตัวอย่าง P2 มีอัตราการงอกมากที่สุด คือ $97.0 \pm 1.2\%$ และเมื่อผ่านการตากจึงมีการงอกลดลง เช่นเดียวกับตัวอย่าง P5, P18 และ P19 แต่ในตัวอย่าง P11 พบว่ามีอัตราการงอกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไม่พบการงอกของเมล็ดในทุกตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที แสดงว่าการใช้ไมโครเวฟที่ภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะใช้ลดความชื้นในข้าวเปลือกที่เป็นข้าวพันธุ์

การงอกของเมล็ดต้องอาศัยปัจจัยด้านความชื้น อากาศ อุณหภูมิ และเอนไซม์ในเมล็ด จึงเป็นไปได้ที่การเกิดความร้อนในเมล็ดจากคลื่นไมโครเวฟทำให้เอนไซม์ที่ใช้ในการงอกเสียหายไปหรือความชื้นที่เหลืออยู่ไม่เพียงพอต่อการงอก



รูปที่ 4.22 การงอกของเมล็ดข้าวเปลือกตัวอย่าง P11 ที่ผ่านกระบวนการตากเป็นเวลา 3 วัน

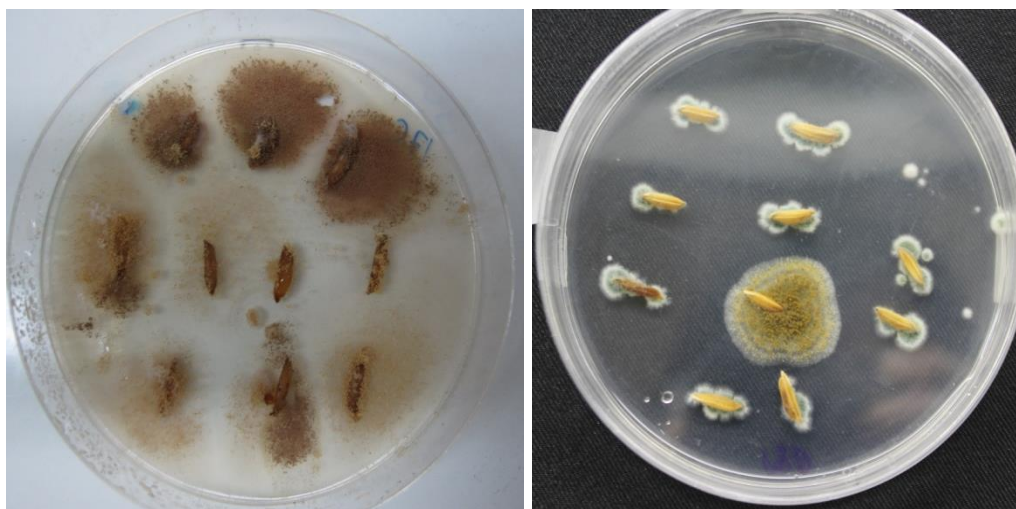
ตารางที่ 4.5 การงอกของข้าวเปลือกตัวอย่างหลังผ่านการลดความชื้นด้วยไมโครเวฟและการตาก

ตัวอย่าง ข้าวเปลือก	อัตราการงอก (%)		
	ชุดควบคุม	การตาก	ไมโครเวฟคริวเรือน 60 วินาที
P2	97.0 (± 1.2)	54.0 (± 17.7)	0
P5	95.3 (± 3.0)	89.5 (± 2.7)	0
P6	0	0	0
P8	0	0	0
P11	21.0 (± 4.1)	71.5 (± 5.8)	0
P13	0	0	0
P17	0	0	0
P18	89.5 (± 5.1)	85.3 (± 5.5)	0
P19	87.0 (± 2.0)	48.5 (± 13.3)	0
P20	0	0	0

4.6.3 การทำลายราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกตัวอย่าง

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายสปอร์รา *A. niger*, *P. chrysogenum*, *R. oryzae* และ *A. nidulans* ด้วยไมโครเวฟคริวเรื่อนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ในข้อ 4.4.3 พบว่าสามารถทำลายสปอร์ราที่มีความเข้มข้น 10^6 - 10^7 สปอร์ต่อมิลลิลิตรได้ทั้งหมดในเวลา 90 วินาที จึงสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการลดจำนวนราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกได้ นอกเหนือจากการใช้ไมโครเวฟเพื่อลดความชื้น ตรวจสอบจำนวนราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือก 10 ตัวอย่าง โดยวิธี direct plating บนอาหารเลี้ยงเชื้อ DG18 เปรียบเทียบกับจำนวนราที่ปนเปื้อนหลังจากผ่านการให้พลังงานด้วยไมโครเวฟคริวเรื่อนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์เป็นเวลา 60 และ 90 วินาที และเปรียบเทียบกับจำนวนราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยวิธีการตาก

ตารางที่ 4.6 แสดงการปนเปื้อนราในข้าวเปลือกแต่ละตัวอย่างที่ก่อนและหลังการลดความชื้นด้วยวิธีการตาก และการใช้ไมโครเวฟคริวเรื่อนเป็นเวลา 60 และ 90 วินาทีตามลำดับ โดยข้าวเปลือกทุกตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนราสูง ตั้งแต่ 90-100% ยกเว้นตัวอย่าง P2 ที่พบการปนเปื้อนราต่ำที่สุดที่ 74% เมื่อผ่านการลดความชื้นด้วยวิธีการตากเป็นเวลา 3 วัน ในทุกตัวอย่างยังคงมีการปนเปื้อนราสูงกว่า 70% โดยพบว่าข้าวเปลือก P17, P11 และ P18 มีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนราเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ข้าวเปลือก P5 มีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนราลดลงและข้าวเปลือก P2 ยังคงเท่ากับชุดควบคุม และข้าวเปลือก P6, P8, P13, P19 และ P20 ยังคงพบการปนเปื้อนของราที่ 100% แสดงให้เห็นว่าการตากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพต่ำที่ใช้ในการลดการปนเปื้อนราในข้าวเปลือก ตรงกันข้ามกับวิธีการใช้ไมโครเวฟคริวเรื่อนเป็นเวลา 60 วินาทีที่สามารถลดจำนวนราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกเหลือ 5.33-83.33% และทำลายราทั้งหมดในตัวอย่าง P2, P8 และ P17 ประสิทธิภาพในการทำลายราในข้าวเปลือกอาจขึ้นกับจำนวนของราที่ปนเปื้อนเริ่มต้น และความชื้นเริ่มต้นในข้าวเปลือก ซึ่งเห็นได้จากตัวอย่าง P2 ที่มีราปนเปื้อนเริ่มต้น 74% และมีความชื้นเริ่มต้นต่ำที่ $9.89 \pm 0.09\%$ นอกจากนี้ได้ทดสอบการทำลายราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟคริวเรื่อนเป็นเวลา 90 วินาที พบว่าสามารถทำลายราที่ปนเปื้อนในตัวอย่างได้เพิ่มเติมจากการใช้เวลา 60 วินาที ทั้งนี้การใช้ไมโครเวฟคริวเรื่อนลดจำนวนราที่ปนเปื้อนทั้งหมดในตัวอย่าง P11 ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟลดความชื้นในข้าวเปลือกเป็นเวลานาน ทำให้ข้าวเปลือกเสียหายจากการแตกพอง แม้ว่าจะช่วยลดจำนวนราที่ปนเปื้อนได้ดีกว่า



รูปที่ 4.23 ราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกตัวอย่าง P6 (ซ้าย) และราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกตัวอย่าง P6 ที่ผ่านกระบวนการตาก (ขวา)

ตารางที่ 4.6 การปนเปื้อนราในตัวอย่างข้าวเปลือกก่อนและหลังการลดความชื้นด้วยการตากและการใช้ไมโครเวฟ

ตัวอย่างข้าวเปลือก	เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนรา (%)			
	ชุดควบคุม	การตากแห้ง	ไมโครเวฟคร้วเรือน 60 วินาที	ไมโครเวฟคร้วเรือน 90 วินาที
P2	74	74	0.00 (± 0.00)	0.00 (± 0.00)
P5	98	90	34.67 (± 8.08)	18.67 (± 5.03)
P6	100	100	32.67 (± 19.63)	2.67 (± 2.31)
P8	100	100	0.00 (± 0.00)	0.00 (± 0.00)
P11	98	100	5.33 (± 5.03)	0.00 (± 0.00)
P13	100	100	28.67 (± 16.65)	5.33 (± 5.03)
P17	96	100	0.00 (± 0.00)	0.00 (± 0.00)
P18	90	98	25.33 (± 13.32)	7.33 (± 4.16)
P19	100	100	83.33 (± 10.26)	34.00 (± 7.21)
P20	100	100	57.33 (± 25.17)	20.67 (± 1.15)

4.6.4 ชนิดของราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือก

จากการตรวจสอบการปนเปื้อนราในข้าวเปลือก 10 ตัวอย่าง คัดแยกราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกก่อนและหลังทดสอบด้วยไมโครเวฟคริวเรื่อน จัดจำแนกโดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphological characterization) ได้แก่ ขนาด สี ลักษณะของโคโลนี และทำสไลด์กึ่งถาวร (slide culture) ตรวจสอบลักษณะของสปอร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 400 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะของสปอร์ เส้นใย และโครงสร้างพิเศษอื่น ๆ เพื่อจำแนกชนิดของราตามคู่มือการจัดจำแนกของ Samson และคณะ (2004) และศึกษาชนิดของราที่ทนต่อการทำลายด้วยไมโครเวฟที่เวลาทดสอบดังกล่าว พบว่าหลังจากทดสอบข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟคริวเรื่อนที่เวลา 60 และ 90 วินาที ยังคงพบราสกุล *Rhizopus* ปนเปื้อนอยู่ แสดงให้เห็นว่าชนิดของราที่ปนเปื้อนมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำลายสปอร์รา นอกเหนือจากปัจจัยของจำนวนราที่ปนเปื้อนเริ่มต้น และชนิดของราที่พบในตัวอย่างข้าวเปลือก ส่วนมากเป็นราที่ปนเปื้อนจากขั้นตอนการเก็บรักษา (โนทัย กิตติกำแหง, 2554) ผลการทดลองพบราในสกุล *Aspergillus* 6 ไอโซเลต, *Penicillium* 1 ไอโซเลต และ *Rhizopus* 1 ไอโซเลต ซึ่งจัดจำแนกลักษณะได้ดังต่อไปนี้

- สกุล *Aspergillus*

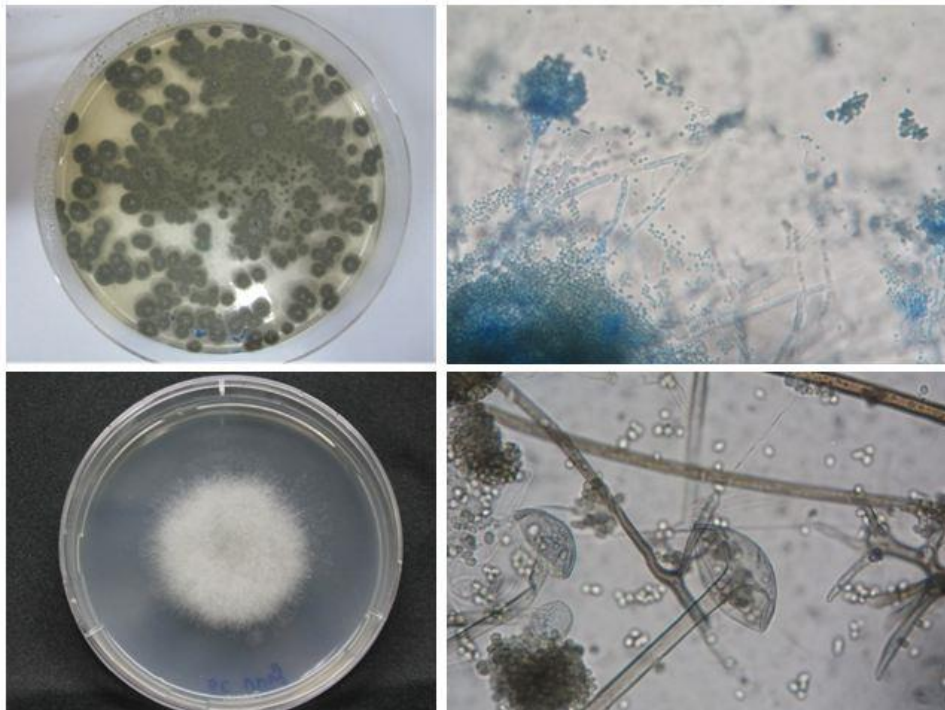
พบลักษณะโครงสร้าง conidial head และจำแนกการจัดเรียงของสเตอริกมา คือแบบ uniseriate หรือ biseriate ซึ่งเป็นส่วนของ phialides และ metulae ที่ต่อจาก vesicle และสายใยมีผนังกันจากภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และจัดกลุ่มไอโซเลตด้วยสีของสปอร์ (รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26)

- สกุล *Penicillium*

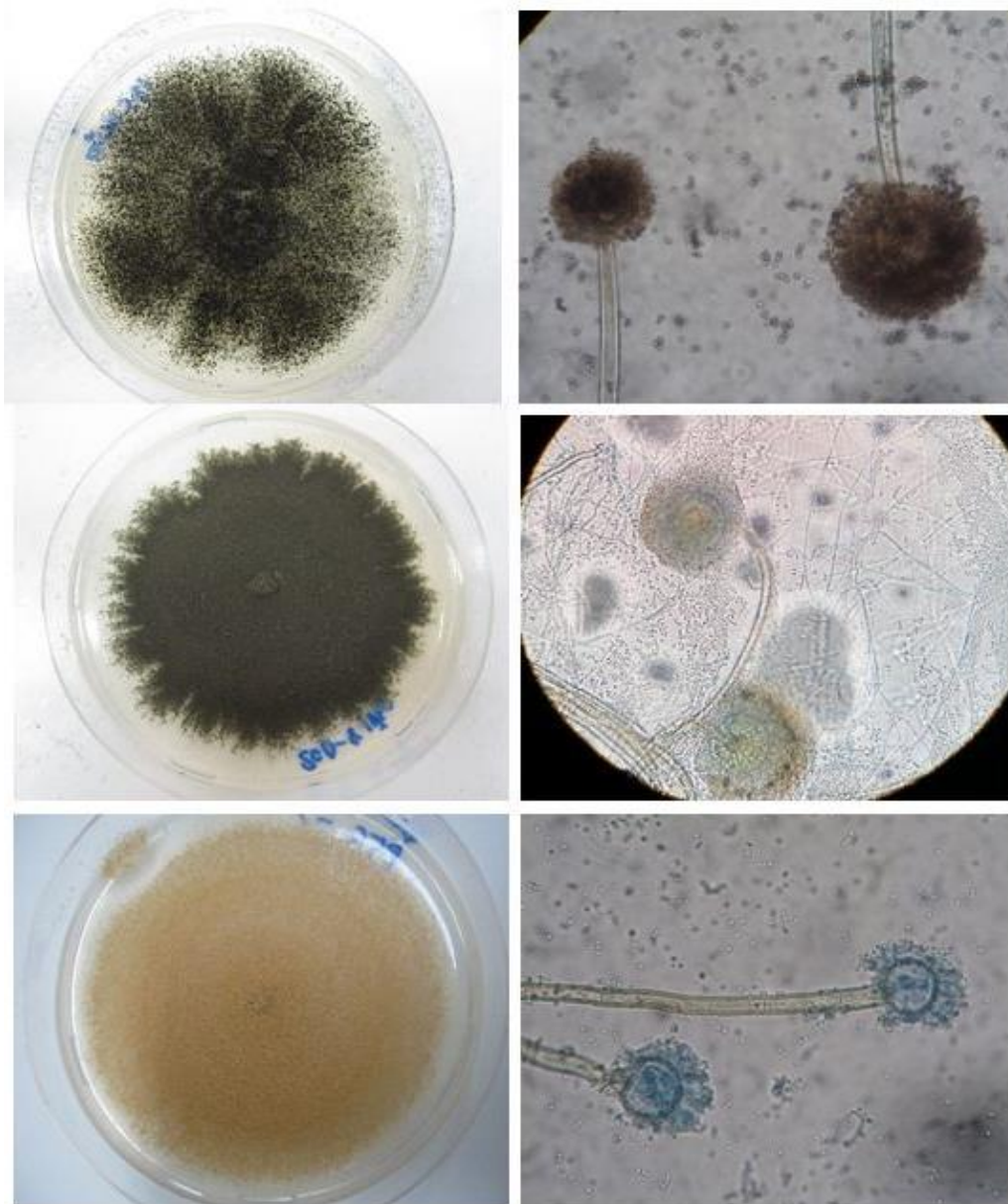
พบส่วนของ phialides ต่อกออกจาก conidiophore และ conidia รูปร่างกลมต่อกันเป็นสายจากภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ สปอร์มีสีเขียวเข้ม (รูปที่ 4.24 บน)

- สกุล *Rhizopus*

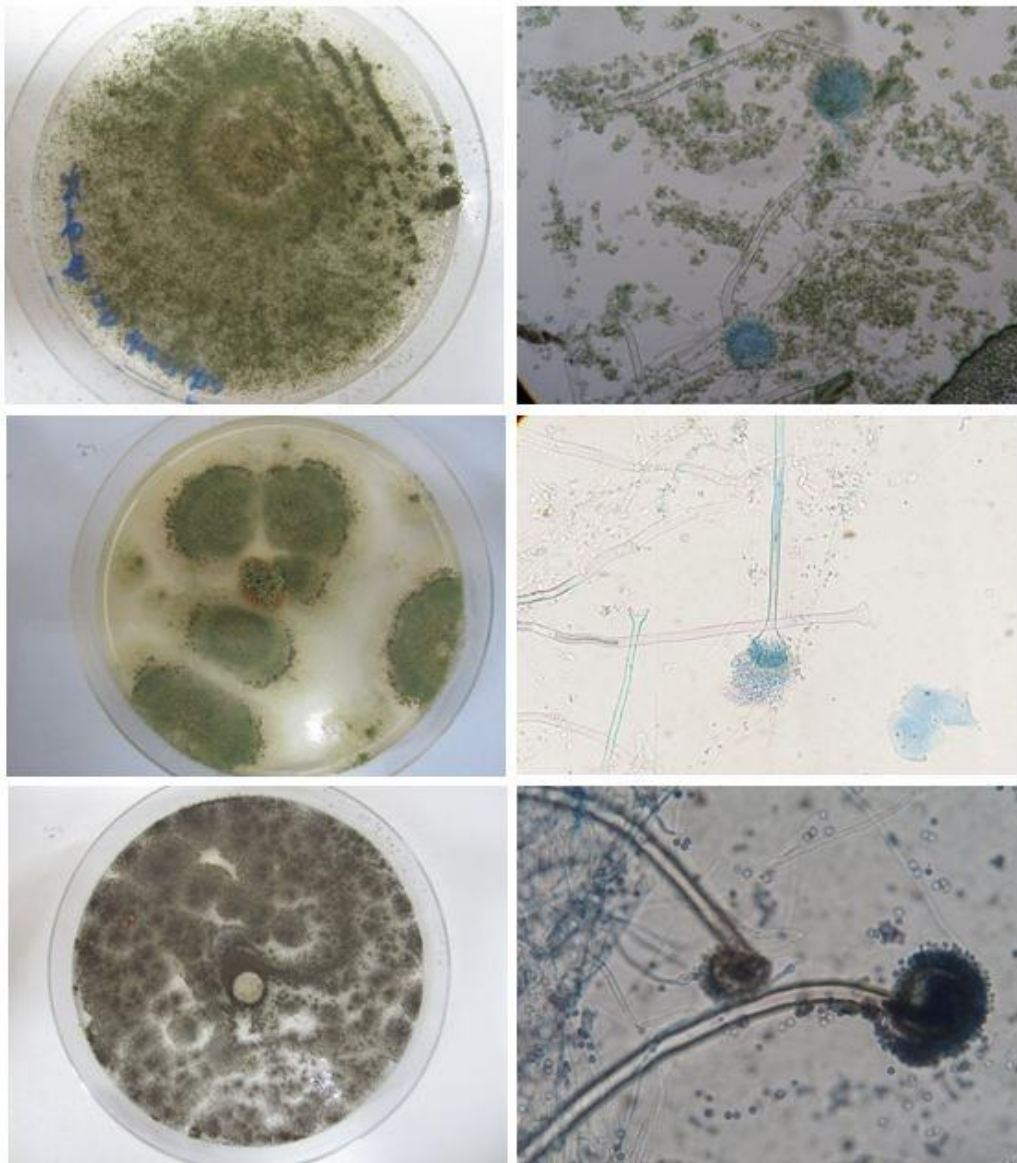
ลักษณะสายใยไม่มีผนังกัน และ sporangium รูปร่างกลมจากภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ลักษณะสำคัญ คือ Rhizoid แตกแขนงออกมาจาก sporangiophore (รูปที่ 4.24 ล่าง)



รูปที่ 4.24 ราในสกุล *Penicillium* (บน) และ *Rhizopus* (ล่าง) ที่คัดแยกได้จากข้าวเปลือกที่
กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4.25 ราในสกุล *Aspergillus* ที่ตัดแยกได้จากข้าวเปลือกที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4.26 ราในสกุล *Aspergillus* ที่คัดแยกได้จากข้าวเปลือกที่กำลังขยาย 400 เท่า (ต่อ)

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริก แสดงออกในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Bhargava และคณะ, 2013) จากการวัดผลตอบสนองของสารทดสอบต่อความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์พบว่าสารทดสอบที่เป็นสารไม่มีขั้วคือ น้ำมันดีเซลมีความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับ PTFE มากที่สุด โดย PTFE ถือเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำมันดีเซลที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 2.996364 สอดคล้องกับผลวิจัยของ กิตติยา พงศาภาสิริทัต และ กุลจิรา บรมเจตน์ (2558) ที่แสดงผลการตอบสนองของน้ำมันเตาต่อความถี่ที่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยน้ำมันเตามีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.9955 ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส แสดงว่าไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมันเตา หรือน้ำมันดีเซลมีสมบัติไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากสารที่ไม่มีขั้วสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าได้ไม่ดี ซึ่งเห็นได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำ และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำยังแสดงถึงการที่สารนั้นไม่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มน้ำมันจึงมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเช่นเดียวกับชีวมวล (biological material)

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความถี่เรโซแนนซ์ของสารทดสอบ พบว่าน้ำกลั่นมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำที่สุดเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีความเป็นขั้วสูง ในขณะที่เอทานอล 95% (v/v) มีความเป็นขั้วต่ำ (เอทานอล 96% (v/v) มีค่า polarity index = 5.35; น้ำกลั่นมีค่า polarity index = 9) (Borowitzka และ Moheimani, 2013) จากการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ (f) ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำกลั่นสูงที่สุด รองลงมาคือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.145, 1 และ 2 โมลาร์ตามลำดับ เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์ได้แตกตัวออกเป็นประจุบวกและลบได้สร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลน้ำอิสระที่ตอบสนองต่อความถี่มีจำนวนลดลง สารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำจึงมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกน้อยกว่าน้ำ Chandrasekaran และคณะ (2012) รายงานว่าสารละลายของเกลือมีสมบัติในการนำไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสภาพยอมเชิงซ้อน (ϵ^*) ที่ลดลงส่งผลให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้นตามสมการ $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$

กิตติยา พงศาภาสิริทัต และ กุลจิรา บรมเจตน์ (2558) ยังได้ทดลองเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำมันเตาที่มีส่วนผสมของน้ำ 20% (v/v) เท่ากับ 2.989091 ลดลงจากความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำมันเตาที่มีส่วนผสมของน้ำ 15% ที่มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.990909 โดยพบว่าการพลีเอินมาทางซ้ายเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของน้ำมันเตาที่ไม่มีน้ำผสม และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว คือ span 80 เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีประจุมากขึ้น ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มสูงตาม นอกจากนี้การตอบสนองต่อความถี่ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกันส่งผลให้กราฟเลื่อนไปทางขวาตั้งแต่ 4.364-7.637 เมกะเฮิรตซ์ขึ้นกับความเข้มข้นของสาร และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สูงกว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำกลั่นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลของการตอบสนองต่อความถี่ของสารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลต่างกันที่สามารถตรวจวัดและคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ จากงานวิจัยของ Chalermwisutkul (2013) ที่ได้เสนอการใช้ไมโครเวฟที่ความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดเพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลในน้ำอัดลมที่จำหน่ายในท้องตลาด 3 ชนิด พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.1-0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กราฟมีการเลื่อนมาทางขวามากขึ้น และมีค่า Insertion loss ลดลง

เมื่อพิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ของอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB สำหรับเพาะเลี้ยงแบคทีเรียและ YM สำหรับเพาะเลี้ยงยีสต์ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกคำนวณในงานวิจัย พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 2 ชนิดน้อยกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำกลั่นที่เป็นตัวทำละลาย เช่นเดียวกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB มีองค์ประกอบที่เป็นคาร์โบไฮเดรต โซเดียมคลอไรด์ และโปรตีน (จากเคซีนและถั่วเหลือง) และ YM ประกอบด้วยโปรตีนจากผงสกัดยีสต์และน้ำตาลจากกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบหลักในอาหาร ตารางที่ 3.1 ยังแสดงให้เห็นว่า TSB มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกน้อยกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อ YM เนื่องจากในการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ต้องละลายอาหารที่เป็นผง 30 กรัมต่อลิตร ในขณะที่อัตราส่วนของผงอาหารต่อน้ำของ YM คือ 24 กรัมต่อลิตร จึงทำให้ใน YM มีโมเลกุลน้ำอิสระมากกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ ของ YM นั้นมีค่ามากกว่า แปรผกผันกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าของอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ซึ่งเป็นไปตามรายงานของ Sun (2005) ที่กล่าวว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหารขึ้นกับปริมาณของโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร รวมทั้งอุณหภูมิและความถี่ที่ใช้ในการตรวจวัด โดย

อุณหภูมิและความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะไปเร่งการเกิดอันตรกิริยาของไอออนในอาหาร ส่งผลให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้น (Chandrasekaran และคณะ, 2012)

จากการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากความถี่เรโซแนนซ์ของอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเจริญของ *B. subtilis* และ *S. cerevisiae* ที่ตอบสนองต่อความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ พบว่าในอาหารที่มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดเท่ากับ 10^8 - 10^{10} CFU/mL มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำกว่าน้ำกลั่นทั้งหมด เนื่องจากองค์ประกอบในอาหารเลี้ยงเชื้อดังที่ได้กล่าวไปแล้ว อีกทั้งเซลล์ของจุลินทรีย์ที่มีองค์ประกอบเป็นไกลโคลิพิด โพลีแซคคาไรด์ ฟอสโฟลิพิด ที่ตอบสนองต่อความถี่ได้ต่ำกว่าน้ำ (Ray และ Ward, 2008) ในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ที่มีการเจริญของ *B. subtilis* ที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร เท่ากับ 1 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกน้อยกว่าตัวอย่างที่มีจำนวนเซลล์น้อยกว่า (ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร เท่ากับ 0.5) เช่นเดียวกับในอาหารเลี้ยงเชื้อ YM ที่มีการเจริญของ *S. cerevisiae* ที่ทดสอบโดยใช้จำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากันกับ *B. subtilis* แต่อย่างไรก็ตามในอาหารเลี้ยงเชื้อ YM ที่มี *S. cerevisiae* มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ที่มี *B. subtilis* ทั้งนี้อาจเกิดจากยีสต์สามารถเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสในอาหารให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์รวมตัวกับน้ำในอาหารทำให้เกิดโปรตอน (H^+) ที่ทำให้อาหารมีความเป็นกรดมากขึ้น (Walker, 1998) การเพิ่มขึ้นของโปรตอน ซึ่งเป็นไอออนบวกส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนที่ตอบสนองต่อความถี่ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ลดลงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร เท่ากับ 0.5 ตอบสนองต่อความถี่ได้ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของน้ำกลั่น เนื่องจากมีความเข้มข้นของเซลล์น้อยจึงทำให้การตอบสนองต่อความถี่ของโมเลกุลน้ำมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่าจากจุลินทรีย์ Asami (2002) รายงานการติดตามค่าไดอิเล็กทริกของ *S. cerevisiae* เพื่อประเมินจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตระหว่างกระบวนการหมักเบียร์และวิสกี พบว่าในช่วงที่มีเจริญของจุลินทรีย์มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มสูง จนมาถึงช่วงที่เกิดการตายของเซลล์ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงลดลงเนื่องจากเซลล์ที่ตายแล้วจะไม่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยกลไกการจัดเรียงตัวของสารที่มีขั้ว

5.2 การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นด้วยไมโครเวฟคร้วเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว

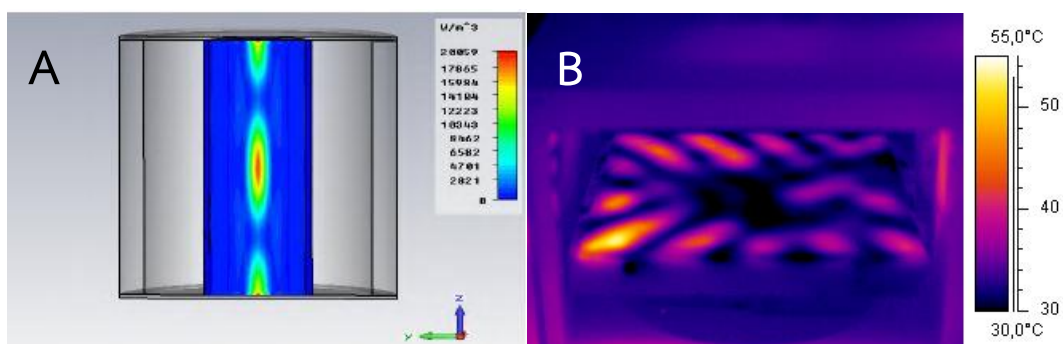
จากการทดลองเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรด้วยไมโครเวฟคร้วเรือนเปรียบเทียบกับไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว พบว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นสูงกว่าไมโครเวฟคร้วเรือนตั้งแต่เวลาเริ่มต้นที่ 24 องศาเซลเซียสจนถึงจุดเดือดที่ 100 ± 0.5 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 150 วินาทีแล้วจึงคงที่ไปจนครบเวลาการทดลองที่ 300 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Prapuchanay และคณะ (2012) ซึ่งได้ทดลองใช้ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว (TM₀₁₀) ที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ น้ำมันปาล์ม และนมเปรียบเทียบกับเตาไมโครเวฟคร้วเรือน พบว่าภายในเวลา 2 นาที ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 23 ไปที่ 85 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไมโครเวฟคร้วเรือนเพิ่มอุณหภูมิของน้ำได้เป็น 63 องศาเซลเซียสที่เวลาเท่ากัน

นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำด้วยไมโครเวฟคร้วเรือน คือ ปริมาตรของโหลด Ojha และคณะ (2016) ใช้ไมโครเวฟคร้วเรือนที่ขนาดกำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ทำลายสปอร์ของ *Clostridium difficile* โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยสปอร์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10^7 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร พบว่าอุณหภูมิเพิ่มจาก 25 องศาเซลเซียสถึงจุดเดือดภายใน 30 วินาที แสดงให้เห็นว่าปริมาณของโหลดที่น้อยช่วยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในเวลาอันสั้น ในงานวิจัยนี้ผลของการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรเมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว 150 วินาที พบว่าไมโครเวฟคร้วเรือนสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลั่นได้สูงกว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว เนื่องจากภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำกลั่นในการทดลองการเพิ่มอุณหภูมิด้วยไมโครเวฟคร้วเรือนเป็นขวดตูแรนที่มีฝาเกลียวปิด โดยคลายฝาเล็กน้อยเพื่อลดความดันที่เกิดจากการขยายตัวของไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในขวด ทำให้เกิดความดันขึ้นเล็กน้อย จึงอาจทำให้อุณหภูมิของน้ำกลั่นขึ้นไปสูงกว่าจุดเดือดได้ที่ 105 ± 0.0 องศาเซลเซียส และคงที่ไปตลอดจนครบเวลาการทดลองที่ 300 วินาที ในขณะที่ภาชนะบรรจุน้ำกลั่นของระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวเป็นกระบอกแก้วทรงสูงปลายเปิดซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบนี้ จึงทำให้ไอน้ำระเหยออกไปจากระบบได้ ทำให้อุณหภูมิของน้ำคงที่ที่จุดเดือด เนื่องจากจากความดันของระบบเท่ากับความดันของบรรยากาศ อุณหภูมิของน้ำกลั่นที่เพิ่มสูงหลังจาก 150 วินาที ทำให้ไมโครเวฟคร้วเรือนมี

ประสิทธิภาพในการทำละลายจุลินทรีย์ที่ทนความร้อนได้ดีกว่าไมโครเวฟโหมดเดียวในจุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อน ซึ่งถูกทำลายด้วยอุณหภูมิที่มากกว่า 100 องศาเซลเซียส

5.3 จุดร้อนในไมโครเวฟคร้วเรื้อน

เพื่อให้ตัวแปรในการทดลองด้วยไมโครเวฟคร้วเรื้อนไม่แตกต่างจากไมโครเวฟชนิดโหมดเดียว จึงตรวจหาจุดร้อนใน cavity ของเตาไมโครเวฟคร้วเรื้อน เนื่องจากรูปแบบการเกิดความร้อนชนิดหลายโหมดเกิดแบบกระจาย (nonuniform) จากกระดาษแพคเกจซึ่งเปลี่ยนสีเมื่อมีความร้อนโดยไม่ใส่จานหมุน พบว่ากระดาษแพคเกจมีสีเข้มขึ้นทุกบริเวณของกระดาษที่มีขนาดเท่ากับพื้นของ cavity ตำแหน่งที่ใกล้กับแมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟมีสีเข้มที่สุดจากงานวิจัยของ Vollmer (2004) ทดสอบหาตำแหน่งการเกิดจุดร้อนในเตาไมโครเวฟคร้วเรื้อนกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ โดยไม่ใช้จานหมุนเป็นเวลา 15 วินาทีโดยใช้วิธีถ่ายภาพจากอินฟราเรด พบว่าจุดร้อนของเตาไมโครเวฟเกิดขึ้นหลายจุดทั่วทั้งเตา (รูปที่ 5.1B) ในขณะที่ Kharkovsky และ Hasar (2003) ทดสอบการเกิดจุดร้อนโดยใช้กระดาษแพคเกจภายในเตาไมโครเวฟกำลังไฟฟ้าขนาด 360 วัตต์ เวลา 30 วินาทีทั้งแนวราบและแนวตั้งของเตา พบว่าการเกิดจุดร้อนไม่เป็นระเบียบและไม่เป็นหนึ่งเดียว เมื่อทดสอบกับโหลด พบว่าบริเวณโหลดมีความเข้มขึ้นเป็นบริเวณกว้างมากกว่าจุดอื่น และการใส่จานหมุน ทำให้รูปแบบการเกิดจุดร้อนเป็นจุดเดียวกัน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องใช้จานหมุนในเตาไมโครเวฟคร้วเรื้อนเพื่อกระจายความร้อนให้ให้เกิดทั่วอาหาร ในงานวิจัยนี้ทดสอบการทำละลายจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในอาหารเลี้ยงเชื้อหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.85% (w/v) จึงใช้วิธีการวางที่จุดร้อนที่เกิดความร้อนมากที่สุดภายในเตาไมโครเวฟคร้วเรื้อนเพื่อให้เปรียบเทียบได้กับการเกิดจุดร้อนภายใน cavity ของไมโครเวฟชนิดโหมดเดียว (รูปที่ 5.1A)



รูปที่ 5.1 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในไมโครเวฟชนิดโหมดเดียว (A) (Prapuchanay และคณะ, 2012) และรูปแบบการเกิดจุดร้อนในเตาไมโครเวฟคร้วเรื้อน (B) (Vollmer, 2004)

5.4 ประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟ

การทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพดีกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการปกติ เช่น การต้มเดือด เนื่องจากการใช้เวลาที่สั้นกว่า ทำให้คงคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร หรือคงสภาพของวัสดุไว้ได้ในขณะที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน (Al-Hilphy และ Ali, 2013, Stratakos และคณะ, 2016) ในงานวิจัยนี้ทดสอบการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟ 2 รูปแบบ ที่มีโหมดในการสร้างความร้อนแตกต่างกัน คือ ไมโครเวฟครัวเรื้อนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวทำลายแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ได้รวดเร็วกว่าการใช้ไมโครเวฟครัวเรื้อน สอดคล้องกับการเพิ่มอุณหภูมิที่มากกว่าในเวลา 60 วินาที ในทางตรงข้ามไมโครเวฟครัวเรื้อนสามารถทำลายเอนโดสปอร์ *B. subtilis* ซึ่งทนต่อความร้อนได้มากกว่าจุลินทรีย์อื่นได้ทั้งหมดในเวลา 300 วินาทีที่สอดคล้องกับการเพิ่มอุณหภูมิได้มากถึง 105 องศาเซลเซียส ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวยังคงอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส ผลของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ไมโครเวฟครัวเรื้อนที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ และไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวขนาด 850 วัตต์ที่มีความถี่เท่ากันที่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ สามารถลดจำนวน *L. monocytogenes*, *S. aureus*, *E. coli*, *M. luteus* และ *B. subtilis* ได้ 6 ลอการิทึม ในเวลา 90 วินาที และการใช้ไมโครเวฟครัวเรื้อนทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นแบคทีเรีย มีค่า D-value มากกว่าค่า D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวในการทำลาย *L. monocytogenes*, *S. aureus* และ *E. coli* และเทียบเท่ากับค่า D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวในการทำลาย *M. luteus* และ *B. subtilis* นอกจากนี้ไมโครเวฟครัวเรื้อนมีค่า D-value ในการทำลายเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* เท่ากับ 0.704 นาทีน้อยกว่าค่า D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าเท่ากับ 1.009 นาที แสดงให้เห็นว่าขนาดกำลังไฟฟ้า รูปแบบการสร้างคลื่นของไมโครเวฟ และชนิดของจุลินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้

จากผลการวิจัยที่เปรียบเทียบค่า D-value ของไมโครเวฟครัวเรื้อนที่ใช้ทำลาย *L. monocytogenes* เท่ากับ 9.12 วินาที ในขณะที่ D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวเท่ากับ 7.98 วินาที ซึ่งน้อยกว่างานวิจัยของ Benlloch-Tinoco และคณะ (2014) ที่ทดสอบการใช้ไมโครเวฟครัวเรื้อนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 900 และ 1,000 วัตต์ ทำลาย *L. monocytogenes* ในอาหารที่ทำจาก

เนื้อกวี พบว่าค่า D_{60} เท่ากับ 17.35 วินาที ที่กำลังไฟฟ้า 900 วัตต์ และลดลงเป็น 17.04 วินาที เมื่อเพิ่มเป็น 1,000 วัตต์ ซึ่งใช้เวลาสั้นกว่าการให้ความร้อนตามวิธีดั้งเดิม ($D_{60} = 37.45$ วินาที)

เนื่องจากการส่งผ่านความร้อนไปที่เซลล์แบคทีเรียต้องผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อกวี แต่ในงานวิจัยนี้ตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจึงพาความร้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้ผลในงานวิจัยยังแสดงว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 850 วัตต์ยังทำลาย *E. coli*, *B. subtilis*, *S. aureus* ได้ทั้งหมด 6 ลอการิทึมหมายถึงประสิทธิภาพของไมโครเวฟที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของ Gedikli และคณะ (2008) ที่ทดสอบการทำลาย *E. coli* ATCC 25922, *B. cereus* NRRL 3711 และ *S. aureus* ATCC 25923 ด้วยไมโครเวฟครัวเรือน พบว่าไมโครเวฟที่มีขนาดกำลังไฟฟ้า 900 วัตต์จำนวนแบคทีเรียได้ประมาณ 5 ลอการิทึม ในเวลา 60 วินาที มากกว่าที่ขนาดกำลังไฟฟ้าอื่นที่เวลาเท่ากัน นอกจากนี้ผลการวัดปริมาณกรดนิวคลีอิกด้วยแสงอุลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร ยืนยันการเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณของนิวคลีอิกที่อยู่นอกเซลล์เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ทดสอบ ผลการวิจัยนี้พบว่าการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่มีขนาดกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ทำลายเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* ที่มีจำนวน 10^7 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ได้ทั้งหมดในเวลา 300 วินาที ซึ่งงานวิจัยหลายชิ้นสนับสนุนผลการทดลองดังกล่าว เช่น การใช้ไมโครเวฟครัวเรือนขนาด 800 วัตต์เป็นเวลา 60 วินาทีในการทำลายสปอร์ของ *C. difficile* ได้ทั้งหมด 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร (Ojha และคณะ, 2016) พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และส่งผลต่อการลดจำนวนของจุลินทรีย์ (Woo และคณะ, 2000) ในงานวิจัยนี้ยังพบการรอดชีวิตของเอนโดสปอร์ที่ต้มในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 300 วินาทีเท่ากับเวลาที่ไมโครเวฟสามารถทำลายเอนโดสปอร์ได้ทั้งหมด (ผลการทดลองไม่แสดง) แสดงให้เห็นว่าคลื่นไมโครเวฟอาจมีกลไกอื่นที่สร้างความเสียหายแก่เซลล์โดยที่ไม่เกี่ยวกับกลไกที่ก่อให้เกิดความร้อน และพบว่าเมื่อทดสอบการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟกับจุลินทรีย์ที่ทนต่อความร้อนได้มาก เช่น เอนโดสปอร์ของแบคทีเรีย จะต้องใช้เวลามากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้คงที่ (ไมโครเวฟครัวเรือน 800 วัตต์ และไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว 850 วัตต์) จึงเกิดข้อจำกัดในการใช้ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวเพื่อทำลายเอนโดสปอร์ของแบคทีเรียขึ้น เพราะกระบอกแก้วทรงสูงที่ใช้บรรจุไหลดเป็นแบบปลายเปิด จึงทำให้สารแขวนลอยสปอร์เหวี่ยงขึ้นเมื่อใช้เวลาทดสอบมากกว่า 300 วินาที และทำให้

อุณหภูมิในระบบสูงสุดเพียง 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผลจากงานวิจัยของ Celandroni และคณะ (2004) ซึ่งได้ทดสอบการทำลายเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* ด้วยไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยว เพื่อให้การเกิดความร้อนเกิดที่จุดเดียว พบว่าต้องใช้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จึงสามารถทำลายเอนโดสปอร์ได้ และยังพบว่าประสิทธิภาพของไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวในการทำลายเอนโดสปอร์เท่ากับการให้ความร้อนแบบปกติที่อุณหภูมิเท่ากัน จากผลการทดสอบเอนโดสปอร์ด้วยไมโครเวฟคร้วเรือนในงานวิจัยนี้ สามารถทำลายเอนโดสปอร์ทั้งหมดได้ในเวลา 300 วินาที ซึ่งอุณหภูมิของระบบ ณ เวลาดังกล่าวสูงขึ้นเป็น 105 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีอุณหภูมิคงที่ที่ 100 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถทำลายเอนโดสปอร์ได้ทั้งหมด กลไกในการทำลายเอนโดสปอร์ด้วยไมโครเวฟอาจเกิดจากการที่คลื่นไมโครเวฟส่งเสริมให้เกิดโครงสร้างระหว่างกรดไตรโคลินิกกับองค์ประกอบอื่นในสปอร์ เช่น ไอออนของแคลเซียม และความร้อนที่เกิดขึ้นในเอนโดสปอร์ทำให้โปรตีนในเอนโดสปอร์นั้นเสียสภาพ และทำให้เอนโดสปอร์ไม่สามารถเจริญได้ต่อไป (Celandroni และคณะ, 2004) เมื่อพิจารณาจากมุมมองด้านอุณหภูมิและประเภทของไมโครเวฟจึงสรุปได้ว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ที่ไม่สร้างสปอร์ได้ดีกว่าไมโครเวฟคร้วเรือน ในขณะที่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าเมื่อใช้ในการทำลายเอนโดสปอร์

ในงานวิจัยนี้ยังพบว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถลดจำนวน *S. cerevisiae* และสปอร์รา คือ *A. niger* และ *P. chrysogenum* ได้มากกว่าไมโครเวฟคร้วเรือน และค่า D-value ของ *S. cerevisiae* กับสปอร์ *A. niger* และ *P. chrysogenum* จากการใช้ไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวน้อยกว่าไมโครเวฟคร้วเรือนเหมือนกับในแบคทีเรีย ยกเว้น เอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* แต่อย่างไรก็ตามไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวต้องใช้เวลามากกว่าไมโครเวฟคร้วเรือน จาก 90 วินาทีเพิ่มเป็น 120 วินาที จึงทำลายสปอร์ *R. oryzae* และแอสโคสปอร์ของ *E. nidulans* จำนวน 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตรได้ทั้งหมด ขัดแย้งกับผลของการเพิ่มอุณหภูมิในน้ำกลั่นด้วยไมโครเวฟ ที่พบว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้เป็น 75.67 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไมโครเวฟคร้วเรือนเพิ่มอุณหภูมิได้เท่ากับ 67.67 องศาเซลเซียส จึงเป็นไปได้ว่านอกจากกลไกของความร้อนจากไมโครเวฟที่ใช้ในการทำลายสปอร์รา ความเสียหายของสปอร์อาจเกิดจากกลไกในการตอบสนองของสปอร์ราต่อคลื่นไมโครเวฟแต่ละโหมตที่แตกต่างกัน ผลจากงานวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าโหมตของไมโครเวฟมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลต่อความเสียหายของสปอร์ สอดคล้องกับงานของวีรลพัชร ธัญญาภิชาติพิทยา

(2559) ที่ทดสอบการทำลายสปอร์ *A. niger*, *A. flavus*, *R. oryzae* และ *P. chrysogenum* จำนวน 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ พบว่าสามารถทำลายสปอร์ทั้งหมดในเวลา 60 วินาที ดังนั้นปัจจัยของกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่สูงขึ้น และใช้โหลดในปริมาณที่น้อยกว่า จึงส่งเสริมประสิทธิภาพในการทำลายสปอร์มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยนี้ที่ใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์

ในงานวิจัยนี้พบว่าสปอร์ของราจะถูกทำลายได้ ต้องใช้เวลาที่นานกว่าการทำลายเซลล์แบคทีเรีย เช่น *S. aureus*, *E. coli*, *L. monocytogenes* และ *M. luteus* พบว่าค่า D-value ของการทำลายสปอร์ราทุกชนิดด้วยไมโครเวฟมีมากกว่า 0.211 นาทีขึ้นไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากองค์ประกอบในสปอร์ราที่เป็น non-reducing disaccharide คือ ทรีฮาโลส และ alcoholic sugar คือ แมนนิทอล ช่วยให้สปอร์ทนต่อความร้อนได้ดี (Dijksterhuis, 2016, Krijgsheld และคณะ, 2016) ทรีฮาโลสพบได้ในโคโคนิเดียของ *A. niger* เท่ากับ 3.6%, พบในโคโคนิเดียของ *A. nidulans* เท่ากับ 4-6% และพบในโคโคนิเดียของ *P. chrysogenum* เท่ากับ 5% ในขณะที่สปอร์ของ *R. oryzae* มีทรีฮาโลสในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับสปอร์ของราชนิดอื่น เนื่องจาก *R. oryzae* มีกลไกในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตมาเป็นทรีฮาโลสสะสมไว้ในเซลล์เช่นเดียวกับไกลโคเจน เมื่ออยู่ในภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น การขาดแหล่งไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มสูง แร่ด่าง และความชื้น มีรายงานว่า *R. oryzae* สามารถสังเคราะห์ทรีฮาโลสเพิ่มขึ้น 5 เท่า เมื่อบ่มในอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (Uyar และคณะ, 2010) จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สปอร์ *R. oryzae* ทนต่อการถูกทำลายด้วยไมโครเวฟได้มากกว่าสปอร์ของราชนิดอื่น

นอกจากนี้ผลการวิจัยพบว่าสปอร์แบบอาศัยเพศ และสปอร์แบบไม่อาศัยเพศของรา จะถูกทำลายด้วยไมโครเวฟได้แตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างของสปอร์แบบอาศัยเพศแข็งแรงกว่าสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ (Dijksterhuis, 2016) ในงานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดียวในการทำลายสปอร์แบบอาศัยเพศ (แอสโคสปอร์) และสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ (โคนิดิโอสปอร์) ของ *A. nidulans* พบว่าค่า D-value ในการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดียวเพื่อทำลายแอสโคสปอร์ เท่ากับ 0.284 และ 0.344 นาทีตามลำดับ ในขณะที่การทำลายโคนิดิโอสปอร์มีค่า D-value เท่ากับ 0.218 กับ 0.240 นาทีตามลำดับ แสดงว่าแอสโคสปอร์ทนต่อการถูกทำลายด้วยไมโครเวฟได้มากกว่าโคนิดิโอสปอร์ และยังแสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟ

คร้วเรือนมีประสิทธิภาพในการทำลายแอสโคสปอร์ดีกว่าไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวที่เวลาเดียวกัน จึงทำให้ค่า D-value ของไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวสูงกว่า

5.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของจุลินทรีย์หลังจากทดสอบด้วยไมโครเวฟ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทดสอบการทำลายจุลินทรีย์ด้วยผลของไมโครเวฟที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อนด้วยการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าต่ำ และรักษาอุณหภูมิของการทดลองให้อยู่ในระดับที่ต่ำ (Salmen, 2016) จึงสรุปว่าประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟคร้วเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมตเดี่ยวเกิดจากผลที่เกี่ยวข้องกับความร้อน เลือกเซลล์ที่จะศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เซลล์ที่ผ่านการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟคร้วเรือนที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ในเวลา 60 วินาที เนื่องจากที่เวลาดังกล่าว อัตราการรอดชีวิตของเซลล์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เลือก *L. monocytogenes* เป็นตัวแทนของจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรีย เนื่องจากมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ รูปแท่ง แกรมบวกหลังการฉายรังสีไมโครเวฟ ในขณะที่แบคทีเรียอื่น เช่น *E. coli* หรือ *B. subtilis* ที่มีการศึกษาแล้วจำนวนมาก (Gedikli และคณะ, 2008) ผลจากงานวิจัยนี้พบว่าผนังเซลล์ของ *L. monocytogenes* มีการเปลี่ยนแปลงไปจากชุดควบคุม พบว่าผนังเซลล์มีความขรุขระมากขึ้นจากความร้อนที่เกิดขึ้น ทำให้โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในชั้นผนังเซลล์เสียหาย แต่ไม่ทำให้เซลล์เสียหายไป คล้ายกับผลการวิจัยของ Woo และคณะ (2000) ที่แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ *E. coli* และ *B. subtilis* ซึ่งทดสอบกับไมโครเวฟคร้วเรือนที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ ที่อุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบคทีเรียในชุดควบคุมมีผิวเรียบ ในขณะที่ *E. coli* ที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟมีลักษณะขรุขระและบวมเล็กน้อย และไม่พบการเปลี่ยนแปลงใน *B. subtilis* จึงยืนยันผลการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟเพิ่มเติมโดยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในเซลล์ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบจุดดำภายในไซโตพลาซึมของแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด ซึ่งอาจเกิดจากการตกตะกอนของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของเอนโดสปอร์ของ *B. subtilis* โดยการทดสอบด้วยไมโครเวฟครัวเรือนเป็นเวลา 180 วินาที เนื่องจากอัตราการรอดชีวิตของเอนโดสปอร์ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลของ SEM แสดงว่าเอนโดสปอร์บางส่วนแตกออก และบางส่วนหดตัวลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ทำให้เอนโดสปอร์ไม่สามารถงอกเป็นเซลล์ใหม่ได้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในชั้นคอร์เท็กซ์ของเอนโดสปอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Celandroni และคณะ (2004) ที่พบว่าชั้นคอร์เท็กซ์มีการขยายตัวเพิ่มถึง 10 เท่า เมื่อฉายรังสีไมโครเวฟ 100 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที จึงเป็นไปได้ว่าเอนโดสปอร์ *B. subtilis* ในงานวิจัยนี้อาจมีการขยายตัวของชั้นคอร์เท็กซ์ จนทำให้เซลล์แตกออก เนื่องจากกำลังไฟฟ้าและเวลาที่ทดสอบมากกว่า

เพื่อทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยีสต์และสปอร์ราด้วยไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ผิวเซลล์ของ *S. cerevisiae* เที่ยวย่นมากขึ้นเมื่อทดสอบในเวลาที่นานขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuanbin และคณะ (1998) ที่พบว่าผนังเซลล์ของ *S. cerevisiae* มีการเที่ยวย่นมากขึ้นเมื่อใช้ไมโครเวฟขนาดกำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ที่เวลา 30 วินาที และที่ 60 วินาที มีรอยปริแตกที่ผิวเซลล์ เนื่องจากโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่ในแควิวโอลภายในเซลล์ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เกิดการสั่นสะเทือนและขยายตัวในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากไมโครเวฟ การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสปอร์ราด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ พบว่าสปอร์ราในชุดควบคุมมีลักษณะใกล้เคียงกับสปอร์ราที่ผ่านการทดสอบในเวลา 60 วินาที เมื่อทดสอบที่เวลา 90 วินาทีพบว่าสปอร์ราเกิดรูรั่วที่ผนังสปอร์และผิวของสปอร์เที่ยวย่นใกล้เคียงกับสปอร์ของ *A. niger*, *P. chrysogenum* และ *R. oryzae* เมื่อทดสอบด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ เวลา 45 วินาที (วิรัชพัชร ชาญญาติพิทยา, 2559) พบว่าเปลือกหุ้มสปอร์ชั้นนอกของราทุกชนิดที่ทดสอบได้หลุดลอกออก เมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 90 วินาที และสปอร์ราได้เสียสภาพจนไม่สามารถงอกใหม่ได้ อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของแอสโคสปอร์หลังจากทดสอบกับไมโครเวฟที่เวลา 90 วินาที แต่ไม่พบการงอกของแอสโคสปอร์ แสดงว่าอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแอสโคสปอร์ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการงอกใหม่ มีรายงานว่าแอสโคสปอร์ของ *E. nidulans* สีม่วงดำ มีผนังห่อหุ้ม (peridium) 2 ชั้น และมีสารประกอบบิเล็คตรอนที่เรียกว่า cleistin อยู่ที่ช่องว่างภายในแอสโคสปอร์ และยังไม่พบรายงานหน้าที่สารประกอบนี้อย่างชัดเจน (Dyer และ O'Gorman, 2012) อาจเป็นไปได้ว่าผนังของแอสโคสปอร์มีความหนาแน่นมาก จึงไม่

เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 67.67 องศาเซลเซียสจากไมโครเวฟในเวลา 60 วินาที และองค์ประกอบภายในแอสโคสปอร์ คือ cleistin อาจมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับกลไกในการป้องกันตัวของสปอร์จากความเครียดต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อม ทั้งนี้ควรศึกษาเพิ่มเติมด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในแอสโคสปอร์เมื่อได้รับความร้อน และตรวจวัดปริมาณของทรีฮาโลสที่เป็นองค์ประกอบของแอสโคสปอร์ซึ่งมีผลต่อการทนความร้อนที่พบได้มากในโคนิดีโอสปอร์ แต่ไม่พบในแอสโคสปอร์ของ *E. nidulans* ที่มีอายุมาก (Dijksterhuis, 2016)

ในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น เวลาที่ใช้ทดสอบ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ความถี่ของแมกนีตรอน โหมดของไมโครเวฟ รูปทรงและปริมาตรของ cavity ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุหรือตัวกลางในการนำความร้อน และประเภทของจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์เริ่มต้น รวมทั้งองค์ประกอบในโครงสร้างของจุลินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟให้สร้างความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหาร หรือสิ่งแวดล้อมจึงต้องพิจารณาเรื่องเหล่านี้ประกอบด้วย

5.6 การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟเพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือก

การลดความชื้นในข้าวเปลือก เป็นการลดปัจจัยหนึ่งในการเจริญของรา ทำให้คุณภาพและราคาของข้าวเปลือกดีขึ้น และยังเป็นที่ยึดอายุในการเก็บรักษาข้าวเปลือกอีกด้วย (Park และคณะ, 2012) งานวิจัยนี้ทดลองใช้ไมโครเวฟเพื่อทำลายสปอร์รา พบว่าไมโครเวฟคร่าวเรือนและไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวมีประสิทธิภาพที่ดีในการทำลายสปอร์ของ *A. niger*, *P. chrysogenum*, *R. oryzae* และ *A. nidulans* จำนวนเริ่มต้น 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร การทดลองแสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟคร่าวเรือนมีประสิทธิภาพดีกว่าไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวเนื่องจากสามารถทำลายสปอร์ *R. oryzae* และแอสโคสปอร์ของ *E. nidulans* ได้ในเวลา 90 วินาที ในขณะที่ไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวใช้เวลา 120 วินาที อีกทั้งการเกิดความร้อนในไมโครเวฟชนิดโหมดเดียวเกิดขึ้นที่จุดเดียว จึงกระจายความร้อนในตัวกลางที่เป็นของแข็งได้ยากกว่าของเหลว ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครเวฟคร่าวเรือนที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ลดความชื้นในข้าวเปลือก 10 ตัวอย่าง เป็นเวลา 60 และ 90 วินาที โดยมีจานหมุนเพื่อกระจายความร้อนเนื่องจาก

ภาชนะบรรจุข้าวเปลือกมีขนาดใหญ่ พบว่าการใช้ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นในข้าวเปลือกปริมาณ 100 กรัมเทียบเท่ากับการตากแห้งซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบัน แต่ลดเวลาที่ต้องใช้ในการตาก 72 ชั่วโมงเหลือเพียง 60 วินาที ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟใช้เวลา 90 วินาที สามารถลดความชื้นได้ดีกว่าการใช้เวลา 60 วินาทีและวิธีการตาก แต่เกิดผลเสียคือทำให้ข้าวเปลือกเกิดการพองตัว (puffed paddy) และสูญเสียข้าวเปลือกไป 0.01% เนื่องจากน้ำที่มีอยู่ภายในเมล็ดเกิดการขยายตัวจากความร้อนสูงในเวลาอันสั้น โครงสร้างข้าวข้างในจึงดันให้เปลือกแตกออก (Chanlat และ Songsermpong, 2015) อัตราการลดความชื้นในตัวอย่างข้าวเปลือกเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นในข้าวเปลือกต่ำอยู่แล้ว เพราะข้าวเปลือกเคยผ่านกระบวนการตากมาก่อนที่รับตัวอย่างมาทำการวิจัย อย่างไรก็ตามสามารถใช้ตัวอย่างเพื่อทดลองการลดความชื้นซ้ำได้ เพราะข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำมาก มักจะดูดความชื้นกลับเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานในสถานที่ที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น จากการทดลองพบว่าข้าวเปลือกตัวอย่าง P2 มีความชื้นเริ่มต้นต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่เป็นข้าวที่จะใช้เป็นเมล็ดพันธุ์จึงต้องลดความชื้นให้ต่ำกว่า 10% เพื่อยืดเวลาการเก็บรักษาให้นานจนถึงฤดูกาลเพาะปลูกถัดไป ในขณะที่ข้าวเปลือกที่จะนำไปสีเพื่อเป็นข้าวสารถูกลดความชื้นในระดับ 14-15% เท่านั้น เพื่อให้ข้าวไม่เปราะแตกและสูญเสียคุณภาพการสี (ชวลิต หาญดี, 2558) แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟอาจทำให้ข้าวเปลือกเกิดการพองน้อยลงเมื่อข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้นสูง (Chanlat และ Songsermpong, 2015) ศึกษาการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ ทดสอบกับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเท่ากับ 10, 13 และ 16% พบว่าที่ระดับความชื้นสูงทำให้ได้ปริมาณข้าวพองน้อย เนื่องจากแรงดันภายในเมล็ดต่ำจนไม่สามารถขยายตัวได้ นอกจากนี้อัตราการผลิตความชื้นจากผลการวิจัยยังสอดคล้องกับผลของการใช้ไมโครเวฟภายใต้สูญญากาศที่กำลังไฟฟ้าขนาด 560 วัตต์ เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 18% เหลือ 14% ในเวลา 480 วินาที และพบว่าคุณภาพข้าวหลังจากหุงเพื่อรับประทานมีจำนวนข้าวหักเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาทดสอบนานขึ้น (Cheenkachorn, 2007)

ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตผลทางการเกษตร และเวลาที่ใช้มีผลต่อการลดความชื้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Velu และคณะ (2006) ที่ศึกษาการใช้ไมโครเวฟครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 390 วัตต์เป็นเวลา 9 นาที ลดความชื้นในข้าวโพด 200 กรัมที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้น ตั้งแต่ 9.6-32.5% โดยที่ปริมาณของแป้ง และ

โปรตีนในเมล็ดไม่เปลี่ยนแปลง และคุณภาพของสีเมล็ดสว่างขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุมและเมล็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการปกติ ในขณะที่งานวิจัยนี้ใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่า (800 วัตต์) เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกที่มีปริมาณ 100 กรัม จึงทำให้เกิดความร้อนภายในเมล็ดสูง และเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของข้าวเปลือก ดังนั้นหากปรับให้กำลังไฟฟาลดต่ำลง แต่ใช้เวลานานขึ้น อาจช่วยลดจำนวนข้าวที่แตกพอง และคงประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้

5.7 การงอกของเมล็ดข้าว

จากการทดลองลดความชื้นในตัวอย่างข้าวเปลือกด้วยวิธีการตาก พบการงอกของเมล็ดข้าวเปลือก 5 ตัวอย่างเท่ากับจำนวนตัวอย่างข้าวเปลือกในชุดควบคุม ในขณะที่ไม่พบการงอกของเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยไมโครเวฟที่เวลา 60 วินาทีเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ถึงแม้ว่าความชื้นที่เหลืออยู่ภายในข้าวเปลือกที่ทดสอบด้วยไมโครเวฟที่เวลา 60 วินาทีใกล้เคียงกับข้าวเปลือกจากการตาก แสดงให้เห็นว่าการระเหยของน้ำออกจากเมล็ดอย่างรวดเร็วจากไมโครเวฟอาจส่งผลต่อโครงสร้างภายในข้าวเปลือกหรือเอนไซม์เฉพาะที่จำเป็นต่อกระบวนการงอกของเมล็ด (Talei และคณะ, 2013) ซึ่งคล้ายกับผลจากงานวิจัยของ Ambrose และคณะ (2015) ที่พบว่าการใช้ไมโครเวฟสามารถยับยั้งไม่ให้เมล็ดข้าวโพดเกิดการงอก เมื่อทดสอบการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าวโพดเท่ากับ 0% สอดคล้องกับการทดสอบการงอกของข้าวเปลือกจากไมโครเวฟครัวเรือนในงานวิจัยนี้ โดยกระบวนการงอกของเมล็ดนั้นเกี่ยวกับการแบ่งตัวของเซลล์ราก (radicle) ซึ่งมีเอนไซม์ H^+ ATPase มาเกี่ยวข้อง การใช้ไมโครเวฟจึงเป็นการยับยั้งเอนไซม์ดังกล่าวทำให้เมล็ดไม่สามารถงอกได้ ในทางตรงข้าม Talei และคณะ (2013) พบว่าการใช้ไมโครเวฟที่ความถี่ต่ำ 945 เมกะเฮิร์ตซ์สามารถส่งเสริมการงอกของเมล็ดข้าวได้เมื่อทดสอบว่าความถี่ของไมโครเวฟครัวเรือนที่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ แต่ปรับให้กำลังไฟฟ้าเป็น 1.58 มิลลิวัตต์ พบว่าส่งเสริมการงอกของเมล็ดข้าวได้เช่นกัน จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การงอก อัตราการงอกของข้าว และระยะเวลาในการงอกของข้าว MR 219 พบว่าการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟวันละ 10 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 วัน ส่งเสริมเปอร์เซ็นต์การงอกได้ดีที่สุดถึง 100% และพัฒนาความยาวของรากและต้นปฐมภูมิอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าการใช้ไมโครเวฟกำลังไฟฟ้าที่ต่ำมากเป็นเวลานาน อาจช่วยลดความชื้นในข้าวเปลือกได้ดี ในขณะที่คงคุณภาพการงอกของเมล็ดไว้ได้เช่นกัน

ซึ่งผลจากการทดสอบการให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟกับตัวอย่างข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้บ่งชี้ว่าการใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟฟ้าสูงมากเกินไปในเวลาอันสั้นส่งผลเสียต่อกระบวนการงอกของเมล็ด

5.8 การยับยั้งราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกด้วยไมโครเวฟ

กระบวนการเก็บรักษาข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวในปัจจุบัน มักมีการปนเปื้อนราและแมลงศัตรูพืช เนื่องจากการลดความชื้นที่ไม่เหมาะสม หรือไม่ควบคุมภาวะในการเก็บรักษาให้มีความชื้นและอุณหภูมิต่ำ (Asri Bin Nik Ismail, 2014) ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าข้าวเปลือกทุกตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนราสูง 79-100% เนื่องจากภาวะในการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม แต่พบการปนเปื้อนราในข้าวเปลือกตัวอย่าง P2 น้อยที่สุด อาจมีสาเหตุมาจากความชื้นเริ่มต้นที่ต่ำที่สุด ราที่พบจัดอยู่ในสกุล *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* และ *Fusarium* จากมากไปน้อยตามลำดับคล้ายกับงานวิจัยของโนทัย กิตติกำแหง (2554) ที่รายงานการปนเปื้อนของ *A. flavus*, *A. tamarii*, *A. niger*, *A. carbonarius*, *A. aculeatus* และ *A. oryzae* ในข้าวเปลือกในนาและข้าวเปลือกในโรงสี ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าข้าวเปลือกที่ลดความชื้นโดยการตากแห้ง มีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนราสูงขึ้นในทุกตัวอย่าง (ยกเว้นตัวอย่าง P2) น่าจะมีสาเหตุมาจากการตากในที่โล่งจึงทำให้สปอร์ราในอากาศปนเปื้อนในข้าวเปลือกมากขึ้น และพบว่าการปนเปื้อนราลดลงในข้าวเปลือกที่ให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 60 วินาที ราที่พบจัดอยู่ในสกุล *Rhizopus* และ *Aspergillus* ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการทำลายสปอร์ราด้วยไมโครเวฟคร้วเรือนที่ไม่สามารถทำลายสปอร์ราทั้งหมดได้ภายใน 60 วินาที และเมื่อให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟนานถึง 90 วินาทียังพบการปนเปื้อนของราในข้าวเปลือก ซึ่งอาจเกิดจากจำนวนราที่ปนเปื้อนเริ่มต้นมีสูงมาก จึงไม่สามารถทำลายราได้ทั้งหมดในเวลา 60 และ 90 วินาที และการปนเปื้อนราที่หลงเหลืออยู่อาจเกิดจากราที่มาจากแมลงรบกวนที่อยู่ในข้าวเปลือกซึ่งถูกทำลายด้วยคลื่นไมโครเวฟได้ยาก Das และคณะ (2013) รายงานว่าการปนเปื้อนของแมลงศัตรูพืชในข้าวเปลือกทำให้ผลผลิตข้าวเปลือกเสียหายได้มากถึง 40% และศึกษาการใช้ไมโครเวฟในการทำลายแมลงรบกวน พบว่าไมโครเวฟทำให้แมลงลดจำนวนลงในขณะที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับธัญพืช ไมโครเวฟคร้วเรือนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์สามารถลดจำนวนแมลงที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกได้ในเวลา 80 วินาที ส่งผลต่อการลดจำนวนราที่ปนเปื้อน

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟคริวรีนที่กำลังไฟฟ้าขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาทีสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพดี โดย 2 กลไกหลัก คือ ไมโครเวฟทำลายสปอร์ราที่ปนเปื้อนในข้าวเปลือกโดยตรงจากความร้อน และไมโครเวฟสามารถลดความชื้นในข้าวเปลือกซึ่งเป็นการลดปัจจัยหลักในการเจริญของรา ทั้งนี้การใช้ไมโครเวฟลดความชื้นในข้าวเปลือกไม่เหมาะกับข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้เป็นพันธุ์ข้าว แต่เหมาะกับข้าวเปลือกที่จะเข้าสู่กระบวนการสีเพื่อเป็นข้าวสารต่อไป

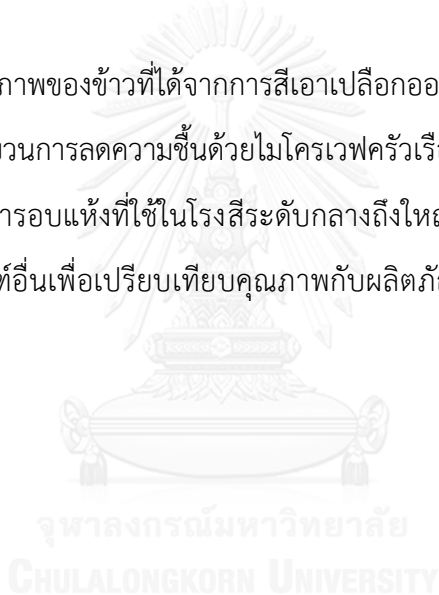
5.9 ข้อเสนอแนะ

- ควรทดสอบประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยว ที่พัฒนาให้ระบบการให้ความร้อนเกิดขึ้นภายใต้ความดัน เช่น การเพิ่มฝาเกลียวที่กระบอกแก้วทรงกระบอกที่เป็นภาชนะสำหรับโหลด เพื่อให้เทียบเท่ากับประสิทธิภาพของไมโครเวฟคริวรีนที่ทดลองในขวดดูแรนที่มีฝาปิด เนื่องจากกระบอกแก้วทรงสูงที่ใช้ทดสอบการทำลายจุลินทรีย์ด้วยไมโครเวฟชนิดโหมดเดี่ยวเป็นแบบปลายเปิด ทำให้อุณหภูมิของน้ำไม่เพิ่มสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส อีกทั้งทำให้เกิดการเดือดล้นได้เมื่อใช้เวลาทดสอบที่นานกว่า 300 วินาทีซึ่งเป็นข้อจำกัดในการวิจัย
- การให้พลังงานด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถทำให้ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เสียหาย และมีรูรั่ว จึงทำให้องค์ประกอบภายในเซลล์รั่วไหลออกนอกเซลล์ อาจนำมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการสกัดดีเอ็นเอของจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการวิจัย หรือสารอื่นที่จุลินทรีย์ผลิตแล้วสะสมไว้ในเซลล์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป
- ควรทดสอบประสิทธิภาพของไมโครเวฟในการทำลายจุลินทรีย์ทนร้อนชนิดอื่น เช่น เอนโดสปอร์ *B. stearothermophilus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียบ่งชี้สำหรับการทำให้ปลอดเชื้อด้วยเครื่องนึ่งอบฆ่าเชื้อภายใต้แรงดัน (autoclave) เพื่อแสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟมีประสิทธิภาพดีในการทำลายเอนโดสปอร์ของแบคทีเรียทนร้อน และอาจใช้เวลาน้อยกว่า autoclave

- ตรวจสอบโครงสร้างภายในของแอสโคสปอร์ของ *E. nidulans* โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อศึกษาองค์ประกอบของสปอร์ เช่น cleistin ซึ่งยังไม่มีกรายงานที่แน่ชัดเรื่องหน้าที่ขององค์ประกอบชนิดนี้ เพื่อตรวจสอบว่าแอสโคสปอร์มีกลไกในการปรับตัวเมื่ออยู่ในภาวะอุณหภูมิสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโคนิดีโอสปอร์และสปอร์ของราทนร้อนชนิดอื่น

- วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของข้าวเปลือก เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการลดความชื้นด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุตัวกลาง ในที่นี้คือข้าวเปลือกซึ่งถือว่าเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกสูง และยังช่วยให้ทราบปริมาณของน้ำในข้าวเปลือกได้

- ตรวจสอบคุณภาพของข้าวที่ได้จากการสีเอาเปลือกออก เช่น ความยืดหยุ่น กลิ่น และสีที่พึงประสงค์ เมื่อผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยไมโครเวฟคร่าวๆ เปรียบเทียบกับวิธีการตากแห้งซึ่งเป็นวิธีการปกติ หรือการอบแห้งที่ใช้ในโรงสีระดับกลางถึงใหญ่ โดยการนำมาปรุงสุกเป็นอาหารหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพกับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวที่มีจำหน่ายในท้องตลาด



รายการอ้างอิง

กิตติยา พงศาภาสิริทัต & กุลจิรา บรมเจตน์ (2558) การใช้คลื่นไมโครเวฟในการวิเคราะห์หาจุด CMC ในเชื้อเพลิงอิมัลชันของน้ำในน้ำมันเตา. ปรียญานิพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ชวลิต หาญดี. เจ้าพนักงานเกษตรชำนาญงาน ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สัมภาษณ์ 20 ธันวาคม 2558
ฐิติมา แซ่เจริญ (2554) การวัดสภาพยอมเชิงซ้อนของของเหลวที่ความถี่ไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ทิพาพร อยู่วิทยา (2558) การใช้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้ออาหาร. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

โนทัย กิตติกำแหง (2554) การปนเปื้อนราสกุล *Aspergillus* ที่ผลิตอะฟลาทอกซินปี 1 และโอคราทอกซินเอในเมล็ดข้าวไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตร: ข้าว พ.ศ. 2551 (มาตรฐานสินค้าเกษตร พ.ศ. 2555). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 129

พันธ์พิทยา จังโส (2556) การวิเคราะห์เชิงทดลองการอบแห้งไม้อย่างพาราด้วยระบบไมโครเวฟป้อนคลื่นหลายตำแหน่งและการพาความร้อนร่วมกับสายพานลำเลียงต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วิรัชพัชร ธัญญากิจพิทยา (2559) ผลของไมโครเวฟต่อสายใยและสปอร์ของรา. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ระดับปริญญาบัณฑิต. ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมาคมโรงสีข้าวไทย (2559) สถานการณ์ข้าวประจำเดือนพฤศจิกายน 2559. [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.thairicemillers.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1366&Itemid=58. [2 ตุลาคม 2559]

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2558) ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร: ข้าว. [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.oae.go.th/economicdata/majorrice57-58.html>. [2 ตุลาคม 2559]

- Ahmed J. & Ramaswamy H. S. (2007) Microwave pasteurization and sterilization of foods. *Handbook of Food Preservation*, Vol. 2 p. 691-710. John Wiley & Sons, New York.
- Al-Hilphy A. R. S. & Ali H. I. (2013) Milk flash pasteurization by the microwave and study its chemical, microbiological and thermo physical characteristics. *J Food Process Technol* **4**.
- Ambrose A., Lee W. H. & Cho B. K. (2015) Effect of microwave heat treatment on inhibition of corn seed germination. *J Biosystems Eng* **40**: 224-231.
- Anwar J., Shafique U., Waheed-uz Z., Rehman R., Salman M. & Dar A. (2015) Microwave chemistry: Effect of ions on dielectric heating in microwave ovens. *Arabian J Chem* **8**: 100-104.
- Asami K. (2002) Characterization of biological cells by dielectric spectroscopy. *J Non-Cryst Solids* **305**: 268-277.
- Asri Bin Nik Ismail N. M. (2014) Optimisation of microwave system for rice treatment. Master's degree. Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- Assawarachan R., Nookong M., Chailungka N & Amornlerdpison D. (2011) Effects of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of *Spirogyra* sp. *J food agric and environ* **11**: 15-18.
- Banana A. A. S., Nik NorulainiJamilah Baharom N. A. & Lailaatul ZuraidaMohd M. Y. (2013) Inactivation of pathogenic micro-organisms in hospital waste using a microwave. *J Mater Cycles Waste* **15**: 393-403.
- Banik S., Bandyopadhyay S. & Ganguly S. (2003) Bioeffects of microwave-a brief review. *Bioresour Technol* **87**: 155-159.
- Banwart G. (1989) *Basic Food Microbiology*. AVI/Van Nostrand Reinhold, New York.

- Basaran P. & Akhan Ü. (2010) Microwave irradiation of hazelnuts for the control of aflatoxin producing *Aspergillus parasiticus*. *Innovative Food Sci Emerg Technol* **11**: 113-117.
- Benlloch-Tinoco M. , Pina-Pérez M. C., Martínez-Navarrete N. & Rodrigo D. (2014) *Listeria monocytogenes* inactivation kinetics under microwave and conventional thermal processing in a kiwifruit puree. *Innovative Food Sci Emerg Technol* **22**: 131-136.
- Bhargava N., Jain R., Joshi I. & Sharma K. S. (2013) Dielectric Properties Of Cereals at Microwave Frequency and Their Biochemical Estimation. *IJEST* **2**: 369-374.
- Bhattacharjee M. K., Sugawara K. & Ayandjeji O. T. (2009) Microwave sterilization of growth medium alleviates inhibition of *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* by Maillard reaction products. *J Microbiol Methods* **78**: 227-230.
- Borowitzka M. A. & Moheimani N. R. (2013) *Algae for Biofuels and Energy*. Springer Science & Business Media, Berlin.
- Brondani M. A., Samim F. & Feng H. (2012) A conventional microwave oven for denture cleaning: A critical review. *Gerodontology* **29**: 6-15.
- Budihardja D. & Mayser P. (2014) The effect of microwave irradiation on the vitality of various dermatophytes. *Mycoses* **57**: 209-213.
- Campanha N. H., Jorge J. H., Giampaolo E. T., Martins de Oliveira C. S., Dovigo L. N., Maia D. C. & Pavarina A. C. (2013) Cell membrane integrity of *Candida Albicans* after different protocols of microwave irradiation. *Am J Infect Dis* **1**: 38-45.
- Celandroni F., Longo I., Tosoratti N., Giannessi F., Ghelardi E., Salvetti S., Baggiani A. & Senesi S. (2004) Effect of microwave radiation on *Bacillus subtilis* spores. *J Appl Microbiol* **97**: 1220-1227.

- Chaisri R. & Chuaybamroong P. (2011) Disinfection of *Bacillus subtilis* spores in water using Fenton. *KKU Res J* **16**: 63-71.
- Chakraverty A., Mujumdar A. S. & Ramaswamy H. S. (2003) *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices*. CRC Press, London.
- Chalermwisutkul S. (2013) Microwave sensors. In Thailand-Japan Microwave, Bangkok, Thailand,
- Chandrasekaran S., Ramanathan S. & Basak T (2012) Microwave material processing-a review. *AIChE J* **58**: 330-363.
- Chanlat N. & Songsermpong S. (2015) Microwave puffing of various paddy varieties: effects of moisture content and calcium chloride. In The 16th TSAE National Conference and the 8th TSAE International Conference : TSAE 2015, Bangkok, 17-19 March 2015
- Cheenkachorn K. (2007) Drying of rice paddy using a microwave-vacuum dryer. In Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6), Copenhagen, 16-20 September 2007
- Chuanbin L., Jian X., Fengwu B. & Zhiguo S. (1998) Trehalose extraction from *Saccharomyces cerevisiae* after microwave treatment. *Biotechnol Tech* **12**: 914-943.
- Cockrell A. R., Fitzgerald L. A., Cusick K. D., *et al.* (2015) A comparison of the physical and biochemical properties of *Thermus scotoeductus* SA-01 cultured with microwave radiation and conventional heating. *Appl Environ Microbiol* **82**: 1-36.
- Cowan M. K. & Bunn J. (2014) Physical and Chemical Control of Microbes. *Microbiology Fundamentals: A Clinical Approach*, p. McGraw-Hill Education, New York.
- Das I., Kumar G. & Shah N. G. (2013) Microwave heating as an alternative quarantine method for disinfestation of stored food grains. *Int J Food Sci* **2013**: 1-14.

- Dijksterhuis J. (2016) Heat-resistant ascospores. *Food Mycology: A Multifaceted Approach to Fungi and Food*, p. 107-113. CRC Press, London.
- Dovigo L. N., Pavarina A. C., Ribeiro D. G., de Oliveira J. A., Vergani C. E. & Machado A. L. (2009) Microwave disinfection of complete dentures contaminated *in vitro* with selected bacteria. *J Prosthodont* **18**: 611-617.
- Dyer P. S. & O'Gorman C. M. (2012) Sexual development and cryptic sexuality in fungi: insights from *Aspergillus* species. *FEMS* **36**: 165-192.
- Ferrer D. E., Edwards M. A., Fumagalli L., Juarez A. & Gomila G. (2014) Electric polarization properties of single bacteria measured with electrostatic force microscopy. *ACS Symp Ser Am Chem Soc* **8**: 9843-9849.
- Gedikli O. , Tomsuk O. & Çabuk A. (2008) Effect of microwaves on some Gram negative and Gram positive bacteria. *JAEBS* **2**: 67-71.
- Gentry T. S. & Roberts J. S. (2005) Design and evaluation of a continuous flow microwave pasteurization system for apple cider. *LWT-Food Sci Technol* **38**: 227-238.
- Giuliani R., Bevilacqua A., Corbo M. R. & C. Severini (2010) Use of microwave processing to reduce the initial contamination by *Alicyclobacillus acidoterrestris* in a cream of asparagus and effect of the treatment on the lipid fraction. *Innovative Food Sci Emerg Technol* **11**: 328-334.
- González-Arenzana L., Santamaría P., López R., Garijo P., Gutiérrez A. R. & Garder-Cerdán T. (2013) Microwave technology as a new tool to improve microbiological control of oak barrels: A preliminary study. *Food Control* **30**: 536-539.
- Hofkin B (2011) *Living in a Microbial World*. Garland Science, New York.
- International Rice Research Institute (2016) Paddy drying system. [online], Source: http://www.knowledgebank.irri.org/index.php?option=com_zoo&view=item&layout=item&Itemid=812. [27 July 2016]

- International Seed Testing Association (2003) Passport to Higher Quality Seed. [online], Source: <https://www.seedtest.org/en/seed-testing-international-content---1--1085.html>. [7 January 2016]
- Janković S. M. , Milošev M. Z. & Novaković M. L. (2014) The effects of microwave radiation on microbial cultures. *Am J Hosp Pharm* **1**: 102-108.
- Jeevitha G. C., Sowbhagyab H. B. & Hebbara H. U. (2016) Application of microwaves for microbial load reduction in black pepper (*Piper nigrum* L.). *J Sci Food Agric* **96**: 4243–4249.
- Jian F., Jayas D.S. & White N. D. G. (2013) Can ozone be a new control strategy for pests of stored grain? *Agricultural Research* **2**: 1-8.
- Jittanit W. (2011) Kinetics and the temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying. *Kasetsart Journal (Natural Science)* **45**: 147-158.
- Kaminskyj S. G. W. (2001) Fundamentals of growth, storage, genetics and microscopy of *Aspergillus nidulans*. *Fungal Genet Newsl* **48**: 25-31.
- Kang Y. & Kato S. (2013) Thermal and non-thermal germicidal effects of microwave radiation on microbial agents. *Indoor Built Environ* **23**: 1080-1091.
- Kharkovsky S. N. & Hasar U. C. (2003) Measurement of mode patterns in a high-power microwave cavity. *IEEE Trans Instrum Meas* **52**: 1815-1819.
- Kim S. Y., Jo E. K., Kim H.J., Bai K. & Park J. K. (2008) The effects of high-power microwaves on the ultrastructure of *Bacillus subtilis*. *Lett Appl Microbiol* **47**: 35-40.
- Kiran S. , Surekha M. & Reddy S. M. (2015) Fungal infestation and mycotoxins contamination of paddy of flooded areas of Godavari belt region of Telangana State, India. *Sci Res Repot* **5**: 30-35.
- Kothari V., Patadia M. & Trivedi N. (2011) Microwave sterilized media supports better microbial growth than autoclaved media. *Biotechnol Res Int* **2**: 63-72.

- Krijgheld P., Bleichrodt R., Van Veluw G. J., Wang F., Müller W. H., Dijksterhuis J. & Wösten H. A. B. (2016) Development in *Aspergillus*. *Stud Mycol* **74**: 1-29.
- Magan N. & Aldred D. (2007) Post-harvest control strategies: minimizing mycotoxins in the food chain. *Int J Food Micro* **119**: 131-139.
- Mahon C. R., Lehman D. C. & Manuselis Jr G. (2015) *Textbook of Diagnostic Microbiology*. Elsevier Health Sciences, Amsterdam.
- Maktabi S., Watson I. & Parton R. (2011) Synergistic effect of UV, laser and microwave radiation or conventional heating on *E. coli* and on some spoilage and pathogenic bacteria. *Innovative Food Sci Emerg Technol* **12**: 129-134.
- Mello P. A., Barin J. S. & Guarnieri R. A. (2014) *Microwave heating. Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Determination*. Waltham: Elsevier Inc., Cambridge.
- Mishra T. , Kushwah P. , Dholiya K. & Kothari V. (2013) Effect of low power microwave radiation on microorganisms and other life forms. *INT J MICROW WIREL T* **1**: 4-11.
- Mobeen A. K., Aftab A. , Asif A. & Zuzzer A. S. (2011) Aflatoxins B1 and B2 contamination of peanut and peanut products and subsequent microwave detoxification. *J Pharm Nutr Sci* **1**: 1-3.
- Mujumdar A. S. (2014) *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, London.
- Nelson S. O. (2010) Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. *J Microw Power Electromagn Energy* **44**: 98-113.
- Norkaew O., Boontakham P., Dumri K., Lampang A., Noenplab N. , Sookwong P. & Mahatheeranont S. (2016) Effect of post-harvest treatment on bioactive phytochemicals of Thai black rice. *Food Chem* **217**: 98-105.
- Ohlsson T. & Bengtsson N. (2001) Microwave technology and foods. *Adv Food Nutr Res* **43**: 65-140.

- Ojha S. C. , Chankhamhaengdecha S. , Singhakaew S. , Ounjai P. & Janvilisri T. (2016) Inactivation of *Clostridium difficile* spores by microwave irradiation. *J Anaerobe* **38**: 14-20.
- Ozkoc O. S., Sumnu G. & Sahin S. (2014) *Recent developments in microwave heating*. Academic Press, Worcester.
- Park C. E. , Kim Y. S. , Park K. J. & Kim B. K. (2012) Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. *J Stored Prod Res* **48**: 25-29.
- Pommerville J. C. (2013) *Alcama's Fundamentals of Microbiology: Body Systems*. Jones & Bartlett Publishers, Burlington.
- Prapuchanay E., Puangngernmak N. & Chalermwisutkul S. (2012) A single mode cylindrical microwave cavity for heating applications of liquid material. In 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Phetchaburi, 16-18 May 2012
- Puligundla P. , Abdullah S. A. , Choi W. , Jun S., Oh S. E. & Ko S. (2013) Potentials of microwave heating technology for select food processing applications-a brief overview and update. *J Food Process Technol* **4**: 1-9.
- Rattanadecho P. & Suwannapum N. (2008) Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by using a continuous microwave thermal processor. *Mater Sci Eng* **427**: 299-307.
- Ray R. C. & Ward O. P. (2008) *Microbial Biotechnology in Horticulture*. CRC Press, London.
- Reddy C. S. (2007) Mycotoxin contamination of rice. *Rice Knowledge Management Portal*, p. 1-29. Bayer CropScience, Monheim am Rhein.
- Saini B. L. (2010) *Introduction to Biotechnology*. Laxmi Publications, New Delhi.

- Salazar-González C. , Martín-González M., López-Malo Maria A. & Sosa-Morales E. (2012) Recent studies related to microwave processing of fluid foods. *Food Bioprocess Tech* **5**: 31-46.
- Salmen S. H. (2016) Non-thermal biological effects of electromagnetic field on bacteria-a review. *AJRC* **4**: 16-28.
- Samson R. A., Hoekstra E. S., de Boer E. & Frisvad J. C. (2004) *Introduction to Food and Airborne Fungi*. ASM Press, N.W. Washington, D.C.
- Sangdao C. & Krairiksh M. (2008) Analysis of a Continuous Fluidized-bed Microwave Paddy Drying System. In the 9th Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, Chiang Mai, Thailand, 31 January-1 February 2008
- Sastri V. R. (1957) (1957) *Plastics in Medical Devices: Properties, Requirements, and Applications*. Waltham: Elsevier Inc., Cambridge.
- Shamis Y., Taube A. , Mitik-Dineva N., Croft R., Crawford R. J. & Ivanova E. P. (2011) Specific electromagnetic effects of microwave radiation on *Escherichia coli*. *J Appl Environ Microbiol* **77**: 3017–3023.
- Stratakos A. C., Delgado-Pando G., Linton M., Patterson M. F. & Koidis A. (2016) Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. *Food Chem* **190**: 622-628.
- Sun D. W. (2005) *Thermal food processing: new technologies and quality issues*. CRC Press, London.
- Sung H. J. & Kang D. H. (2014) Effect of a 915 MHz microwave system on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in salsa. *LWT-Food Sci Technol* **59**: 754-759.
- Talei D., Valdiani A., Maziah M. & Mohsenkhah M. (2013) Germination Response of MR 219 Rice Variety to Different Exposure Times and Periods of 2450 MHz Microwave Frequency. *ScientificWorldJournal* **2013**: 1-7.

- Thostenson E. T. & Chou T. W. (1999) Microwave processing: Fundamentals and applications. *Composites: Part A* **30**: 1055-1071.
- Todar K. (2008) Control of Microbial Growth. [online], Source: <http://textbookofbacteriology.net/control.html>. [27 July 2016]
- Trung T. S. , Bailly J.D. , Querin A. , Bars P. L. & Guerre P. (2001) Fungal contamination of rice from south Vietnam, mycotoxinogenesis of selected strains and residues in rice. *Revue Méd Vét* **152**: 555-560.
- Tyagi V. K. & Lo S. L. (2013) Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery. *Renew Sust Energ Rev* **18**: 288-305.
- Uyar E. O. , Hamamci H. & Türkel S. (2010) Effect of different stresses on trehalose levels in *Rhizopus oryzae*. *J Basic Microbiol* **50**: 368-372.
- Velu V., Nagender A., Rao P. & Rao D. G. (2006) Dry milling characteristics of microwave dried maize grains (*Zea mays* L.). *J of Food Eng* **74**: 30-36.
- Vollmer M. (2004) Physics of the microwave oven. *Phys Educ* **39**: 74-81.
- Walde S. G., Balaswamy K., Velu V. & Rao D.G. (2002) Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). *J Food Eng* **55**: 271-276.
- Walker G. M. (1998) *Yeast Physiology and Biotechnology*. John Wiley & Sons, New York.
- Woo I. S., Rhee I. K. & Park H. D. (2000) Differential damage in bacterial cells by microwave radiation on the basis of cell wall structure. *Appl Environ Microbiol* **66**: 2243-2247.
- Wu Y. & Yao M. (2010) Inactivation of bacteria and fungus aerosols using microwave irradiation. *J Aerosol Sci* **41**: 682-693.
- Xing-jun L., Xin W. , Yang L. , Ping J. & Hui L. (2016) Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during drying. *Comput Electron Agric* **128**: 112-119.

Zhou B. W., Shin S. G., Hwang K. H., Ahn J. H. & Hwang S. (2010) Effect of microwave irradiation on cellular disintegration of Gram positive and negative cells. *Appl Microbiol Biotechnol* **87**: 765–770.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

1. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Potato Dextrose Broth (PDB)

อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Broth (บริษัท Himedia, India)	24	กรัม
--	----	------

ซึ่งสารทั้งหมดละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัลให้เป็น 6.0 ± 0.2 (ที่ 25 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

2. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Potato Dextrose Agar (PDA)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับการเตรียมอาหารเหลว PDB แล้วเติมผงวุ้น 20 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรลงไป ในอาหาร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

3. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Dichloran Glycerol Agar (DG18)

อาหารเลี้ยงเชื้อ Dichloran Glycerol Agar	31.6	กรัม
(บริษัท Merck, Germany)		

กลีเซอรอล (glycerol)	175	มิลลิลิตร
----------------------	-----	-----------

ซึ่งอาหารเลี้ยงเชื้อ DG18 ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรจนหมด ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัลให้เป็น 5.6 ± 0.2 (ที่ 25 องศาเซลเซียส) เติมกลีเซอรอล ปริมาตร 175 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

4. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Tryptic Soy Broth (TSB)

อาหารเลี้ยงเชื้อ Soybean Caswin Digest Medium (บริษัท Himedia, อินเดีย)	30	กรัม
--	----	------

ซังสารทั้งหมดละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัลให้เป็น 7.3 ± 0.2 (ที่ 25 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

5. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Tryptic Soy Agar (TSA)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับการเตรียมอาหารเหลว TSB แล้วเติมผงวุ้น 15 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรลงไป ในอาหาร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

6. อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Yeast Maltose (YM)

กลูโคส (glucose)	10	กรัม
แบคโตเปปโตน (peptone)	5	กรัม
ผงสกัดจากยีสต์ (yeast extract)	3	กรัม
ผงสกัดจากมอลต์ (malt extract)	3	กรัม

ซังสารทั้งหมดละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 นอร์มัลให้เป็น 4.5 ± 0.2 (ที่ 25 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

7. อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Yeast Maltose (YM agar)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกับการเตรียมอาหารเหลว YM แล้วเติมผงวุ้น 20 กรัมต่ออาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรลงไป ในอาหาร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที



ภาคผนวก ข

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.85%

ชั่งโซเดียมคลอไรด์ 0.85 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

2. สารละลาย Tween 80 0.1%

เติม Tween 80 ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.85% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

3. เอทานอล 70%

เตรียมเอทานอล 99 % ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ละลายในน้ำกลั่นที่ปลอดประจุ 300 มิลลิลิตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ปูนหอม เหลืองอ่อน เกิดวันที่ 28 มกราคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาจุลชีววิทยา สาขาวิชาจุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556

ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้เข้าร่วมเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติในงาน The 27 th Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference Innovative Biotechnology ระหว่างวันที่ 17-20 พฤศจิกายน 2558 ณ โรงแรมแมนดาริน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในหัวข้อเรื่อง Effects of household and single mode microwave on selected microorganisms and applications



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY