



การลดปริมาณจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยเทคโนโลยีเซอร์เดิลร่วมระหว่าง
เทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

ชื่อเรื่อง

การลดปริมาณจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยเทคโนโลยีเออร์เคิลร่วมระหว่าง
เทคนิคการฉายรังสีอัตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ

โดย

ภัทรสุดา วงษ์จักร์

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงษ์ วาฤทธิ)

วันที่ 25 เดือน ๗ พ.ศ. 2556

กรรมการที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธยา พิมพ์พิไล)

วันที่ 25 เดือน ๗ พ.ศ. 2556

กรรมการที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จรุงกล้าเลิศ)

วันที่ 25 เดือน ๗ พ.ศ. 2556

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงษ์ วาฤทธิ)

วันที่ 25 เดือน ๗ พ.ศ. 2556

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงษ์ วาฤทธิ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 25 เดือน ๗ พ.ศ. 2556

ชื่อเรื่อง	การลดปริมาณจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยเทคโนโลยี เฮอริเดิลร่วมระหว่างเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและ คลื่นไมโครเวฟ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวภัทรสุดา วงษ์จักร์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูป ผลผลิตเกษตร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงษ์ วาฤทธิ

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต และไมโครเวฟต่ออัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง ตลอดจนผลกระทบจากอิทธิพลร่วมของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟต่อเชื้อจุลินทรีย์ รวมไปถึงสมบัติทางกายภาพที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยอิทธิพลร่วมของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ เพื่อหาข้อสรุปในด้านเวลาในการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสอง และความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง การดำเนินการวิจัยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน การดำเนินการวิจัยในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาระหว่างอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟที่มีผลต่อจุลินทรีย์ทั้งหมด สปอร์ และยีสต์ราในเนื้อลำไยอบแห้ง ส่วนการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 2 เพื่อหาสภาวะร่วมของการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท ผลการวิจัยส่วนแรกพบว่าความเข้มของหลอด UV-C ที่ 42 63 ไมโครวัตต์-วินาทีต่อตร.ซม. เวลา 300 600 วินาที ทำให้จุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทได้มากที่สุด 1 log cycle ส่วนการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 1204 วัตต์ต้องใช้เวลา 300 วินาทีจึงลดจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทได้สูงสุด ส่วนการวิจัยในช่วงที่ 2 พบว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตอยู่ในช่วง โดส 25,000 ไมโครวัตต์-วินาทีต่อตร.ซม. (42 ไมโครวัตต์ ต่อตร.ซม. 600 วินาที) ถึง 33,000 ไมโครวัตต์-วินาทีต่อตร.ซม. (63 ไมโครวัตต์ต่อตร.ซม. 600 วินาที) ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟที่ 300 วินาทีสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทได้ตามที่มาตรฐานมกอช. 2549 กำหนด ค่าปริมาณน้ำอิสระ และสีของผลิตภัณฑ์ลำไยอบแห้งเนื้อสีทองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐานมกอช.2549 แต่ผลจากอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทจะทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนจากหุคควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

Title	Hurdle Technology using Combined UV-MW Technique for Microbial Reduction in dried Longan flesh
Author	Miss Pattarasuda Wongjak
Degree of	Master of Engineering in Agro-Process Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith

ABSTRACT

This project aims to study the impact of ultraviolet and microwave radiation on the microbial death rate in a dried longan flesh (the golden dried longan). Including the effects of the interaction between ultraviolet and the microwave radiation on microorganisms and changes physical properties of dried longan flesh to determine optimal time and intensity for UV-C and MW radiation suitable for microorganisms reduction. This research was divided into two parts. In first part, the influence of the ultraviolet and the microwave on reduction of total microorganisms, spores, and yeast and mold in dried longan flesh were determined. The second part of the study was to determine the combined effects of both electromagnetic wave. The results show that the optimal UV-C intensity to reduce all microorganisms was 42 and 63 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 300 and 600 sec, respectively with the maximum microbial reduction of 1 log cycle. The exposure of microwave of 1204 Watts for 300 sec reduced all microorganisms with the highest rate. The radiation of UV-C with the dose between 25,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ (42 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 600 sec) to 33,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ (63 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 600 sec) and microwave at 300 sec reduced the amount of microorganisms to meet the TACFS 2006 standard. Besides, the electromagnetic wave interaction can reduced the water activity (a_w) while give good color of the dried longan flesh according to the TACFS 2006 standard. However, the results of the UV-C and MW interaction made significantly different from the control treatment ($p < 0.05$).

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนวทางในการศึกษาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนในแนวทางการดำเนินชีวิต และการวิจัย อีกทั้งยังช่วยตรวจทานแก้ไขจนกระทั่งได้เป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จรุงกล้าเลิศ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรยา พิมพ์พิไล กรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนขอเสนอแนะที่ดีเสมอมา อีกทั้งยังกรุณาตรวจทานแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย วรรณัจฉริยาที่กรุณาได้รับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ข้อเสนอแนะ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีเนื้อหาที่สมบูรณ์ครบถ้วน และเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจศึกษาในอนาคต

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารารัตน์ ซื่อคอฟ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนขอเสนอแนะที่ดีเสมอมา ขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร และห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาทางอาหาร สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ในการดำเนินการวิจัยจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จ ขอบพระคุณบริษัท กริสปี เวจ แอนด์ ฟู้ด จำกัด ที่กรุณาสนับสนุนวัสดุคิบในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา (เลขที่สัญญา ภค./2555-กท.20) จนกระทั่งเล่มวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบุญศรี และคุณแม่บุญทอง วงษ์จักร์ รวมถึงครอบครัวที่ได้ส่งเสริม สนับสนุน ทั้งกำลังใจ กำลังทรัพย์ และคำปรึกษาที่ดีเสมอมา

สุดท้ายขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ สาขาวิศวกรรมแปรรูปผลผลิตเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รวมถึงอาจารย์และพี่ ๆ ศูนย์วิจัยพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ช่วยสนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ภัทรสุดา วงษ์จักร์

กรกฎาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์	4
ขอบเขตการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลำไย	5
สรีรวิทยาของผลลำไยสด	5
เนื้อลำไยอบแห้ง	8
องค์ประกอบคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง	8
กระบวนการอบแห้งเนื้อลำไย	10
คุณภาพอาหารทางจุลชีววิทยา	13
วิธีการมาตรฐานการตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา	13
จุลินทรีย์ทั้งหมด	13
จุลินทรีย์และเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้ง	14
เทคโนโลยีเซอร์เคิล	17
เทคโนโลยีการลดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร	18
การใช้การแผ่รังสี	18
เทคโนโลยีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอาหาร	19

คลื่นไมโครเวฟ	21
การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อลดเชื้อจุลินทรีย์	22
พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ	24
รังสีอัลตราไวโอเลต	25
การกำเนิด และหน่วยการวัดรังสีอัลตราไวโอเลต	27
การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อการฆ่าเชื้อโรค	28
ทฤษฎีการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์โดยรังสีอัลตราไวโอเลต	33
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
สรุปกรอบความคิด	52
สมมติฐานการทำการวิจัย	52
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	53
วัตถุประสงค์	53
เครื่องมือและอุปกรณ์	53
สารเคมี	54
วิธีดำเนินการวิจัย	54
การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมเบื้องต้น	
สำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ	54
การวิเคราะห์ด้านจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	58
การตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด	58
การตรวจสอบสปอร์	59
การตรวจสอบจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และรา	60
การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมเบื้องต้น	
สำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ	61
การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมร่วม	
จากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์	62

การวิเคราะห์สมบัติกายภาพจากอิทธิพลร่วมของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ	67
การทดสอบคุณภาพด้านสี	67
การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	67
การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าวอร์เทอร์แอกติวิตี	67
สถานที่ดำเนินการวิจัย	68
แผนภูมิการดำเนินการวิจัย	69
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	70
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น	70
ผลการวิเคราะห์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ	
จากอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทรังสีอัลตราไวโอเลต	70
อิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	
ในระดับที่แตกต่างกันที่มีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	70
กราฟอัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	
จากอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในระดับสภาวะที่แตกต่างกัน	74
ปัจจัยสำคัญสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	
จากอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในระดับสภาวะที่แตกต่างกัน	77
ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในเนื้อลำไยอบแห้ง	79
ช่วงค่าตอบสนองของปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด -	80
ช่วงค่าตอบสนองของปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในระยะสปอร์	82
ช่วงค่าตอบสนองของปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และรา	83
ผลการวิเคราะห์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ	
จากอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทคลื่นไมโครเวฟ	85
อิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟต่อเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	
ในระดับเวลาที่แตกต่างกัน	85
กราฟอัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	
จากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ	87

	หน้า
ระดับของปัจจัยด้านเวลาที่เหมาะสมสำหรับการให้คลื่นไมโครเวฟแก่เนื้อลำไยอบแห้ง	88
ผลการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟ (ใน ส่วนที่ 2)	90
ผลการเปลี่ยนแปลงด้านจุลินทรีย์หลังการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟ	90
ผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี (ระบบ CIE โดยใช้สเกล $L^* a^* b^*$) ของเนื้อลำไยอบแห้ง	99
การเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสเนื่องด้วยผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี และคลื่นไมโครเวฟต่อเนื้อลำไยอบแห้ง	102
ผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของเนื้อลำไยอบแห้ง	105
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	108
บรรณานุกรม	110
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบชุดกำเนิดยูวี	115
ภาคผนวก ข ประวัติผู้วิจัย	118

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีและสารอาหารของเนื้อลำไยสดและเนื้อลำไยอบแห้ง	6
2	ค่า L ของลำไยเกรดต่าง ๆ	8
3	ค่า a* ของลำไยเกรดต่าง ๆ	9
4	ค่า b* ของลำไยเกรดต่าง ๆ	9
5	ผลการวัดค่าเวอร์เตอร์แอกติวิตี	9
6	ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของลำไยเกรดต่าง ๆ	10
7	กรรมวิธีทำเนื้อลำไยแห้งแบบต่าง ๆ	11
8	เกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์	14
9	เกณฑ์กำหนดของจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งสี่ทองของทุกชั้นคุณภาพ	15
10	เกณฑ์กำหนดจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยสดอบแห้ง	16
11	ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	20
12	การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการการสเตอริไรส์อาหารเลี้ยงเชื้อ โดยวิธีต่าง ๆ	21
13	การแบ่งแถบรังสีอัลตราไวโอเล็ต	25
14	ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดรังสีประเภทต่าง ๆ	27
15	ขนาดความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ช่วงคลื่น 2537 Å) ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์	38
16	ความเข้มรังสี (kJ/m ²) และเวลาในการฉายรังสี UV-C ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ	44
17	ตัวแปรต้นและตัวแปรตามเพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตในเนื้อลำไยอบแห้ง	55
18	ตัวแปรต้นและตัวแปรตามเพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังวัตต์ 1204 วัตต์ต่อเนื้อลำไยอบแห้ง	56

ตาราง	หน้า	
19	เกณฑ์คุณภาพด้านจูลินทรีย์	61
20	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะร่วมที่เหมาะสมในการลดเชื้อจูลินทรีย์	62
21	การออกแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมจากปัจจัย ที่ผ่านการคัดกรองจากกาทดสอบภาวะเหมาะสมในเบื้องต้น	63
22	ความแปรปรวนเนื่องจากจำนวนหลอดที่เปิดฉายรังสีต่อเชื้อจูลินทรีย์ทั้งหมด	72
23	การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของการลดลงของจูลินทรีย์ทั้งหมด จากอิทธิพลของระดับจำนวนการเปิดหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต	72
24	การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของการลดลงของจูลินทรีย์	73
25	ประเภทสปอร์จากอิทธิพลของระดับจำนวนการเปิดหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความแปรปรวนเนื่องจากจำนวนหลอดที่เปิดฉายรังสีต่อเชื้อจูลินทรีย์ประเภท ยีสต์และราในเนื้อลำไยอบแห้ง	73
26	ระดับของปัจจัยสำหรับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต	79
27	เกณฑ์คุณภาพด้านจูลินทรีย์	80
28	สรุปช่วงปัจจัยด้านเวลา และความเข้มของการส่องสว่างที่เหมาะสม ต่อการลดเชื้อจูลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทในเนื้อลำไยอบแห้ง	84
29	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการลดลง ของจูลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ	86

ตาราง

หน้า

30	การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของการลดลง ของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ	86
31	ผลกระทบของเวลาการให้คลื่นที่มีต่อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ในเนื้อลำไยอบแห้ง	89
32	ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง	89
33	สรุปปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบอิทธิพลร่วมรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ	90
34	เกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	92
35	การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเนื้อลำไยอบแห้ง จากช่วงเหมาะสมของอิทธิพลร่วมรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ	98
36	ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง	109
37	เกณฑ์กำหนดของจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งสีทองของทุกชั้นคุณภาพ	110



สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	กระบวนการผลิตลำไยเนื้ออบแห้ง	2
2	กายวิภาคผลลำไยสด	5
3	เนื้อลำไยอบแห้ง	7
4	คุณภาพเนื้อลำไยอบแห้งตามคุณสมบัติทางสี	8
5	กรรมวิธีการผลิตลำไยอบแห้งเนื้อสีทอง	12
6	แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ	18
7	แถบสเปกตรัมของการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	20
8	ผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่ออนุภาค	26
9	การเกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดรังสีประเภทไอ ปรอทความดันต่ำ	27
10	การเกิดไทมีนไคเมอร์เนื่องจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของกรดนิวคลีอิกในสายดีเอ็นเอ (thymine doublets)	30
11	การเกิดไทมีนไคเมอร์เนื่องจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ของกรดนิวคลีอิกในสายดีเอ็นเอ (thymine doublets)	30
12	การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Fecal Coliform จากผลของ อัลตราไวโอเล็ตในระบบบำบัดน้ำเสียของ Zukovs	31
13	การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Enterococci จากผลของ อัลตราไวโอเล็ตในระบบบำบัดน้ำเสียของ Zukovs	32
14	การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Salmonella Spp. จากผลของ อัลตราไวโอเล็ตในระบบบำบัดน้ำเสียของ Zukovs	32

ภาพ		หน้า
15	เส้นกราฟการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับอัลตราไวโอเลต	33
16	การติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเลตที่ติดตั้งฉายขึ้นด้านบนในโรงพยาบาลสมัยใหม่	35
17	การผลิตยาที่ใช้หลอดอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรค	36
18	การใช้หลอดอัลตราไวโอเลตกับน้ำเสีย	36
19	การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตกับอุตสาหกรรมอาหาร	37
20	เส้นกราฟการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับอัลตราไวโอเลต	41
21	รูปแบบเครื่องมือในการทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด	45
22	การติดตั้งอุปกรณ์การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	45
23	กราฟแสดงผลผลของรังสีอินฟราเรด และรังสีอัลตราไวโอเลตต่อปฏิกิริยาของ <i>E. cloacae</i> ในช่วงเวลาเดียวกัน	46
24	ผลของรังสีอัลตราไวโอเลต และรังสีอินฟราเรดต่อ <i>B. subtilis endospores</i>	46
25	วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟในการทำลายสปอร์ของเชื้อ <i>Bacillus atrophaeus</i>	47
26	หลอดกำเนิดรังสีแบบ Microwave Plasma UV (MPUVL)	48
27	การติดตั้งและระบบการทดลองที่ใช้ในการทดลอง	48

ภาพ		หน้า
31	ผลของรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตต่อเม็ดแป้ง	51
32	ผลการขยายตัวของแป้งที่ผ่านการฉายรังสีรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดต่าง ๆ หลังจากที่ผ่านมาการอบจนสุก	51
33	ลักษณะของโคมสำหรับฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีที่ใช้ใน การวิจัย	57
34	การเจือจางที่ระดับ 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} ก่อนการลง เชื้อจุลินทรีย์	58
35	ลงในจานอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อทำให้ง่ายต่อการนับ เชื้อจุลินทรีย์	59
36	การ pour plate เพื่อทำให้เชื้อจุลินทรีย์ผสมเข้ากัน กับอาหารในจานอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์	60
37	การ Spread pate ใช้ในการนับเชื้อจุลินทรีย์เป็นเทคนิค ที่ทำให้โคโลนีเดี่ยวขึ้นจนง่ายต่อการนับจำนวน	69
38	แผนภูมิการดำเนินการวิจัย	71
39	จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตในระดับ ความเข้มรังสีที่แตกต่างกัน	74
40	กราฟอัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับรังสี อัลตราไวโอเลตในระดับความเข้มรังสีที่แตกต่างกันในเนื้อ ลำไยอบแห้ง	78
41	กราฟผลการตอบสนองการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อ เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเนื้อลำไยอบแห้ง	81
42	กราฟผลการตอบสนองการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อ เชื้อจุลินทรีย์ในระยะสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้ง	82

ภาพ	หน้า	
43	กราฟผลการตอบสนองการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อ เชื้อจุลินทรีย์ ประเภทีสต์ราในเนื้อลำไยอบแห้ง	83
44	จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในระดับเวลาที่แตกต่างกัน	85
45	กราฟสัดส่วนการรอดชีวิตของจำนวนเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับ คลื่นไมโครเวฟในระดับเวลาที่แตกต่างกัน	87
46	กราฟอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในระดับ ความเวลาที่แตกต่างกัน	88
47	กราฟผลกระทบบทด้านเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท	92
48	กราฟผลกระทบบทต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจากอิทธิพลร่วมจากการฉาย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท	93
49	กราฟผลกระทบบทต่อเชื้อสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้ง จากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท	94
50	กราฟผลกระทบบทต่อเชื้อประเภทีสต์และรา ในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	95
51	กราฟผลกระทบบทด้านเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท	96
52	กราฟแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสเกลค่าความสว่าง-มืด (L^*) ของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต (uv dose; $\mu\text{W s/cm}^2$) และ คลื่นไมโครเวฟ (sec)	99
53	กราฟแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสเกลสีเขียว-แดง (a^*) ของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต (uv dose; $\mu\text{W s/cm}^2$) และคลื่นไมโครเวฟ (sec)	100

ภาพ

หน้า

- 54 กราฟแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสเกลสีน้ำเงิน-เหลือง (b*)
ของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dose;
 $\mu\text{W s/cm}^2$) และคลื่นไมโครเวฟ (sec) 101
- 55 กราฟแสดงผลของแรงกระทำ (N) ต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้ง
ต่อเวลาในเงื่อนไขการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 104
- 56 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณน้ำอิสระในแต่ละทรีตเมนต์เนื่องจาก
อิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ 105
- 57 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณน้ำอิสระในแต่ละทรีตเมนต์เนื่องจาก
อิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ 107



สัญลักษณ์

ลาติน

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
k	ค่าคงที่การตายของเซลล์	ไร้หน่วย
I	ความเข้มแสงที่ตำแหน่งนั้น ๆ	W/cm^2
N	จำนวนจุลินทรีย์ที่ตำแหน่งใด ๆ ของการฉายรังสี	CFU/g.
N_0	จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นก่อนการฉายรังสี	CFU/g.
t	เวลาในการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต	second
M_i	จำนวนจุลินทรีย์ในระดับที่ i	CFU/g.
X	ปริมาณความเข้มของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	$\mu W s/cm^2$

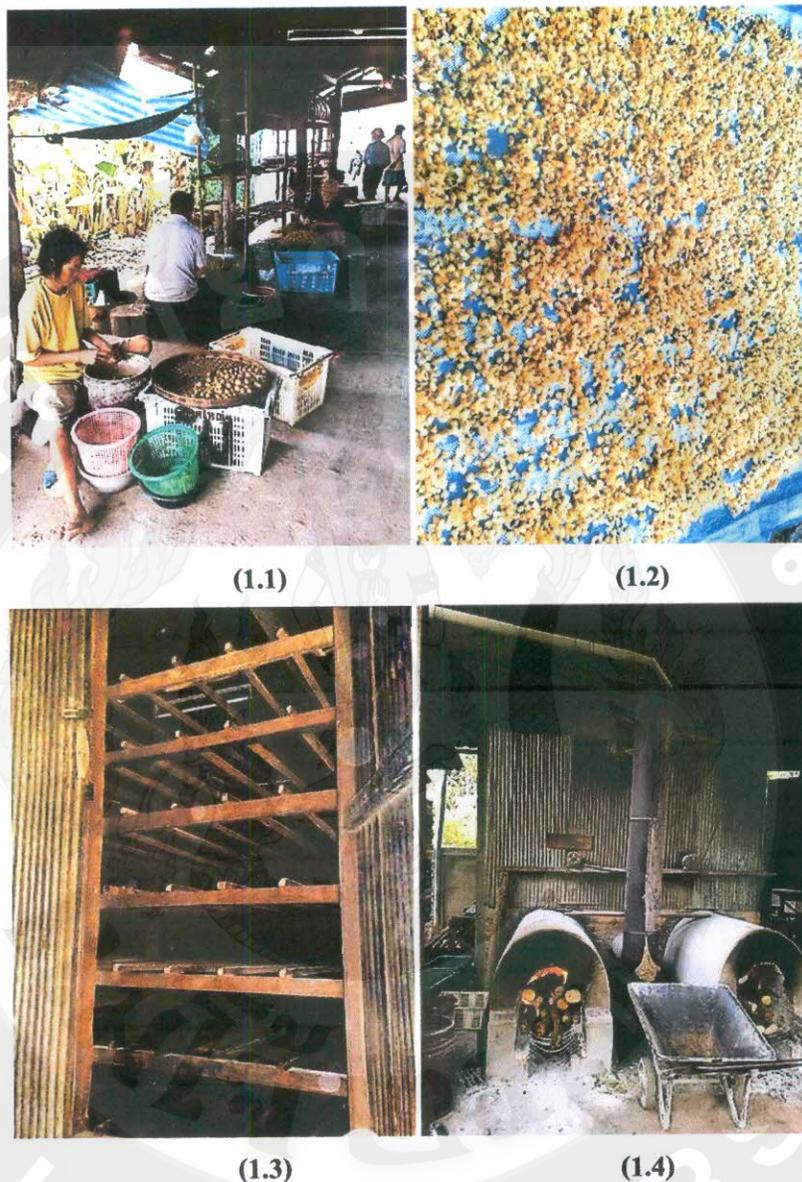
บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

เนื้อลำไยอบแห้งเป็นสินค้าเกษตรแปรรูปที่เป็นเอกลักษณ์สำคัญของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดทางภาคเหนือ จากการรวบรวมของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติพบว่ามูลค่าการส่งออกลำไยอบแห้งมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีมูลค่าสูงถึง 282,232,385 บาทในปีพ.ศ. 2555 (ม.ค.-มิ.ย.) มูลค่าของผลิตภัณฑ์ลำไยอบแห้งเนื้อสีทองผลให้เกิดการขยายกำลังการผลิต โดยเฉพาะการผลิตลำไยอบแห้งในระดับวิสาหกิจชุมชน โดยตลาดการบริโภคลำไยอบแห้งหลักสำคัญคือตลาดชาวจีนซึ่งมีถิ่นที่อยู่กระจายในทุกภูมิภาคของโลกส่งผลให้การส่งออกลำไยอบแห้งกระจายในทุกภูมิภาคของโลก ชาวจีนจะนิยมใช้ลำไยอบแห้งเป็นส่วนประกอบของยา เนื่องจากเชื่อว่าเนื้อลำไยมีคุณสมบัติช่วยให้หลับสบาย นอกจากนี้ลำไยอบแห้งยังถูกใช้เป็นองค์ประกอบในพิธีมงคลต่าง ๆ อีกด้วย (รพีพร, 2543)

เนื่องจากการผลิตเนื้อลำไยอบแห้งส่วนใหญ่ยังเป็นอุตสาหกรรมระดับชุมชนที่ต้องอาศัยแรงงานในการควั่นแกะเนื้อ การจัดเรียงในเดอบสำหรับอบ ตลอดจนเก็บรักษา บรรจุเพื่อจัดจำหน่าย ซึ่งขั้นตอนและกระบวนการในการผลิตเนื้อลำไยอบแห้งแสดงได้ดังภาพ 1 พบว่าตัวโรงเรือนที่ใช้เป็นสถานที่ในการผลิตส่วนมากต่อเติมจากที่พักอาศัยโดยไม่ได้มีการแยกสัดส่วนกันอย่างชัดเจนจากส่วนการผลิต กระบวนการผลิตเกือบทั้งหมดยังใช้การวางกับพื้นอาคาร รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตก็ยังคงเป็นวัสดุที่ไม่ได้มาตรฐานอุตสาหกรรมอาหาร ทั้งเดาสำหรับอบแห้ง ถาดรองอบแห้ง และเครื่องมือในการควั่นเมล็ดและแกะเปลือก รวมไปถึงการแต่งกายของแรงงานก็ไม่ได้มีความรัดกุม และไม่มี การป้องกันของสัตว์พาหะที่จะเข้าสู่โรงเรือนการผลิต การใช้แรงงานและกระบวนการผลิตตลอดจนเครื่องมือ ไม่ได้มาตรฐานตามความปลอดภัยอาหาร ส่งผลต่อการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ (pathogenic micro-organism) ในทุก ๆ ขั้นตอนของการผลิตเนื้อลำไยอบแห้ง แต่กระบวนการผลิตดังกล่าวกลับเป็นความกลมกลืนกับวิถีการดำเนินชีวิตของชุมชนในระดับรากหญ้า การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมจึงมีแนวโน้มเป็นไปได้น้อย ผนวกกับการผลิตเนื้อลำไยอบแห้งจะทำเพียงปีละครั้งในช่วงที่ผลผลิตลำไยสดล้นตลาดจึงส่งผลต่อการพัฒนากระบวนการผลิตให้เป็นอย่างไม่ต่อเนื่อง



ภาพ 1 กระบวนการผลิตลำไยเนื่ออบแห้ง(1.1)การคว้านเมล็ดและการแกะเปลือกลำไยสด(1.2)การตากเพื่อลดความชื้นเนื่อลำไยอบแห้งก่อนการบรรจุเพื่อจำหน่าย(1.3)และ ลักษณะเตาอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในการผลิต (1.4)

ตามมาตรฐานการส่งออกลำไยเนื่อเพื่อการบริโภค และการแปรรูป (มกช.8-2549) ของสำนักงานมาตรฐานอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้กำหนดมาตรฐานการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในเนื่อลำไยอบแห้งว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องน้อยกว่า 1×10^6 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

เพื่อเป็นไปตามของมาตรฐานสินค้าเกษตร และอาหารกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม ไม่สามารถควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งมีความเสี่ยงต่อการบริโภค กรณีเชื้อจุลินทรีย์มีสูงเกินมาตรฐานยังส่งผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษา อีกทั้งการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ยังเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาเพื่อการส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศที่มีมาตรฐานการกักกันสินค้าเกษตรและอาหารที่มีความเข้มงวดสูง การลดปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งจึงจัดว่ามีความจำเป็นอย่างมากทั้งต่อการบริโภคภายในประเทศ รวมถึงการส่งออก หากสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์จนอยู่ในระดับมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหาร ผู้บริโภคจะเกิดความเชื่อมั่นในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีเทคโนโลยีที่ช่วยลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์เพื่อคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง

ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีต่าง ๆ มาผสมผสานร่วมกันเพื่อเพิ่มความคงตัว ความปลอดภัย และคงคุณภาพของอาหารหรือที่เรียกว่า เทคโนโลยีเฮิร์ดเดิล (hurdle technology) เทคโนโลยีเฮิร์ดเดิลจัดว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร และยังสามารถคงคุณลักษณะที่ดีทางประสาทสัมผัสไว้ได้ (คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2553) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฮิร์ดเดิลในการเก็บรักษาเส้นก๋วยเตี๋ยวสด (ธงชัย, 2546) ที่ผสมผสานระหว่างการใช้ความเป็นกรด-ด่าง สภาวะในการเก็บรักษา เวลาในการให้ความร้อน และอุณหภูมิที่เหมาะสมพบว่า เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถยืดอายุการเก็บรักษาเส้นก๋วยเตี๋ยวสดได้เป็นเวลาเพิ่มเป็น 2 เดือนจากอายุการเก็บรักษาเดิมโดยยังคงคุณภาพด้านกายภาพ และประสาทสัมผัสได้ไม่แตกต่างจากเส้นก๋วยเตี๋ยวสด

การผสมผสานที่หลากหลาย และการประยุกต์ใช้ได้จริงของเทคโนโลยีเฮิร์ดเดิล ทำให้นักวิจัยครั้งนี้เลือกใช้การประยุกต์เทคโนโลยีเฮิร์ดเดิลที่ประยุกต์ระหว่างการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultra violet radiation, UV) และการใช้ไมโครเวฟ (microwave, MW) โดยทั้ง 2 เทคนิคต่างมีผลต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารมาประยุกต์ใช้กับเนื้อลำไยอบแห้ง การใช้เทคโนโลยีดังกล่าวจึงสามารถช่วยลดสปอร์ และเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งให้ได้ตามมาตรฐานอาหารปลอดภัย รวมถึงสามารถยืดอายุการเก็บรักษาเพื่อจำหน่ายในเวลาต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบด้านจุลินทรีย์ และกายภาพของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต และ/หรือไมโครเวฟ ตลอดจนผลกระทบรวมระหว่างการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว
2. เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และการใช้คลื่นไมโครเวฟต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้

ภายหลังจากการทำวิจัยครั้งนี้ จะทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซอร์เคิลที่ผสมผสานระหว่างการใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นไมโครเวฟสำหรับ เนื้อลำไยอบแห้ง เพื่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอันส่งผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้จะทำการผสมผสานระหว่างเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดซี (UV-C) ร่วมกับการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ (MW) เพื่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน ตลอดจนตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้ง

บทที่ 2

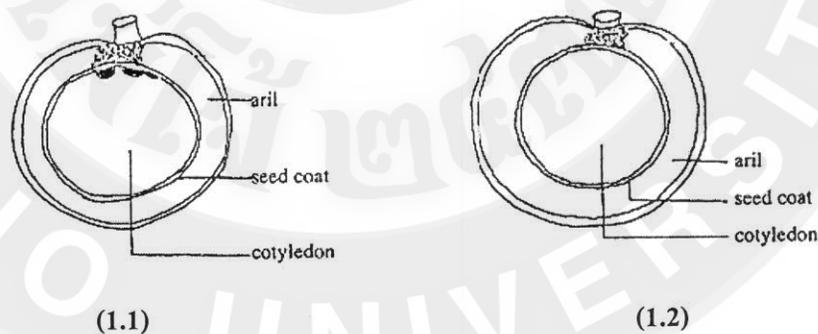
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลำไย

ลำไยเป็นพืชที่นิยมปลูกกันมากทางภาคเหนือ โดยพันธุ์ลำไยที่มีการส่งเสริมให้มีการปลูกกันมากในปัจจุบันมีอยู่ 4 พันธุ์ คือ พันธุ์ดอ พันธุ์แห้ว พันธุ์สีชมพู และพันธุ์เขียว ปัจจุบันลำไยถือว่าเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย (สุรภา, 2549)

สรีรวิทยาของผลลำไยสด

ลำไย (*Dimocarpus longan* Lour.) เป็นผลไม้ประเภทผลสด (fleshy fruit) เหมือนกับลิ้นจี่ มีรูปร่างทรงกลมปานกลาง ขนาดเล็กจนถึงใหญ่ โดยทั่วไปผลกว้าง 27.7 มิลลิเมตร ยาว 25.0 มิลลิเมตร ฐานผลอาจจะบวม เปลือกหนา ผิวสีน้ำตาล มีกระตักล้าตลอดผล เนื้อหนาและแน่นแห้ง กรอบ สีขาวขุ่น กลิ่นหอม ปริมาณน้ำตาล 21.2 องศาบริกซ์ โดยผลลำไยจะมีลักษณะแบบแอริล (aril) หรือผลแบบมีปุยหุ้มเมล็ด ซึ่งเนื้อหรือปุยหุ้มเมล็ดเกิดจากส่วนเจริญด้านนอกของเมล็ด (outgrowth of seed) ไม่ได้เกิดจากเนื้อเยื่อของผล



ภาพ 2 กายวิภาคผลลำไยสด (2.1) ผลสดอายุ 42 วัน และ (2.2) ผลสดอายุ 90 วัน

ที่มา: นุชจรินทร์ (มปป.)

ลำไยเป็นผลไม้ที่อายุการเก็บรักษาสั้น และมีน้ำตาลในปริมาณที่สูง ส่งผลให้ลำไยสดเน่าเสียง่าย การอบแห้งจึงเป็นอีกกรรมวิธีหนึ่งหนึ่งในการแปรรูปลำไยสดเพื่อสามารถเก็บไว้นาน และเป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตลำไยสดให้สูงขึ้น

เนื้อลำไยอบแห้ง

เนื้อลำไยอบแห้ง หมายถึง ผลไม้ที่ผ่านการนำผลลำไยที่สด และอยู่ในสภาพดีมาตัดขนาดผลแล้วให้ใกล้เคียงกัน ปอกเปลือก และแกะเอาเฉพาะเนื้อ อาจแช่ในสารช่วยทำให้กรอบ สารฟอกสี นำไปอบให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือแหล่งพลังงานอื่น โดยกระบวนการอบแห้งจะทำให้องค์ประกอบทางเคมี และสารอาหารของเนื้อลำไยแตกต่างกัน (สุรภา, 2548) ดังแสดงในตาราง 1

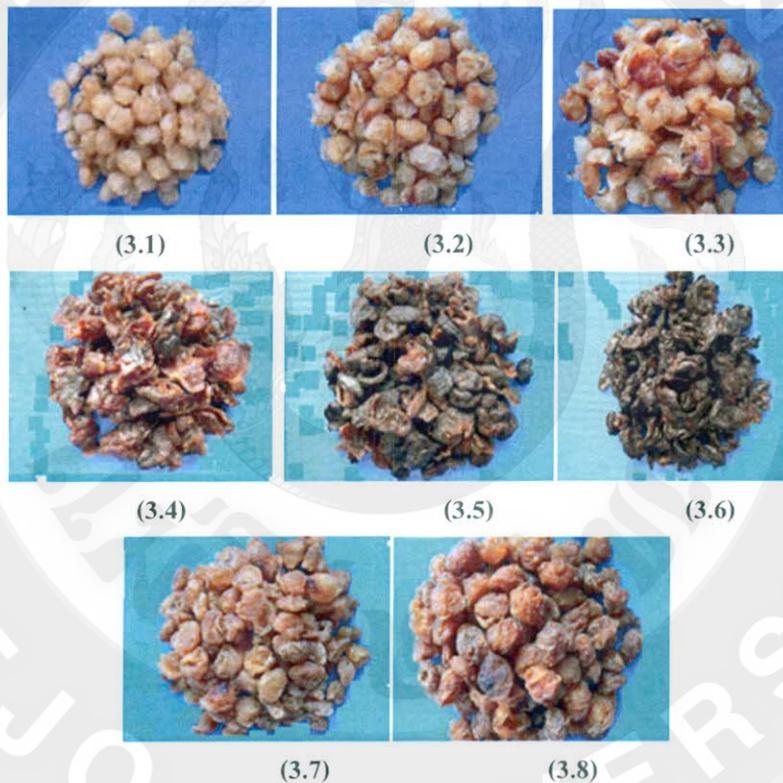
ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีและสารอาหารของเนื้อลำไยสดและเนื้อลำไยอบแห้ง

ส่วนประกอบ	หน่วย	เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยอบแห้ง
ความชื้น (มาตรฐานเปียก)	ร้อยละ	81.10	17.80
ไขมัน	ร้อยละ	0.11	0.40
เส้นใย	ร้อยละ	0.28	1.60
โปรตีน	ร้อยละ	0.97	4.60
เถ้า	ร้อยละ	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรต	ร้อยละ	16.98	72.70
ค่าพลังงานความร้อน	กิโลจูลต่อ 100 กรัม	72.79	311.80
แคลเซียม	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	5.70	27.70
เหล็ก	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	35.30	159.50
วิตามินซี	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	69.20	137.80
โซเดียม	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	-	4.50
โพแทสเซียม	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	-	2012.00
วิตามินบีสอง	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	-	0.375
ไนอาซีน	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	-	3.03
กรดแพนโททีนิก	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม	-	0.57

ที่มา : สุรภา (2548)

เกณฑ์การแบ่งคุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้งตามกลุ่มงานเคหะกิจเกษตร (2539) เป็นเกรดต่าง ๆ ดังนี้

เนื้อลำไยอบแห้งเกรดเอ หมายถึง เนื้อลำไยอบแห้งที่ทำมาจากลำไยร่วงคัด หรือ เกรดบี หรือเกรดซี ของโรงงานลำไยกระป๋องมาคว้านเอาเฉพาะเนื้อ แล้วอบจนแห้งอย่างสม่ำเสมอ เนื้อไม่ฝืดขาด มีสีเหลืองทอง ไม่มีสิ่งเจือปน ลำไยอบแห้งเกรดคละ หมายถึง เนื้อลำไยอบแห้งที่ทำมาจากลำไยร่วง คว้านเอาเฉพาะเนื้อ อบจนแห้ง เนื้อที่ได้อาจมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ กีบข้างเล็กน้อย มีสีเหลืองทอง ไม่มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ใช้บริโภคได้ทันที และลำไยอบแห้งเกรดรวม หมายถึง เนื้อลำไยแห้งที่นำมาจากเนื้อลำไยอบแห้งแบบทั้งเปลือก หรือจากเกรดอื่น ๆ มีสีน้ำตาลแดงถึงดำ มีสิ่งเจือปนมาก อาจอัดเป็นก้อนเพื่อใช้ทำน้ำลำไย



ภาพ 3 (3.1) ลำไยอบแห้งเนื้อสีทองชัด (3.2) ลำไยอบแห้งเนื้อสีทองกลาง (3.3) ลำไยอบแห้งเนื้อสีทองเข้ม (3.4)-(3.6) เป็นเนื้อลำไยที่ได้จากลำไยที่อบทั้งเปลือกโดยที่ (3.4) เนื้อลำไยอบแห้งสีน้ำตาลแดง (3.5) ลำไยอบแห้งเนื้อสีน้ำตาลดำ (3.6) ลำไยอบแห้งเนื้อสีน้ำตาลดำ (3.7) และ (3.8) เป็นเนื้อลำไยสีน้ำตาลดำที่ได้จากการอบเนื้อ

ที่มา : สุรภา (2548)

ลักษณะของเนื้อลำไยอบแห้งที่ต้องการคือ เป็นเนื้อลำไยที่ไม่มีขั้วเมล็ดติดที่เนื้อ และไม่มีเปลือกติด เนื้อสม่ำเสมอไม่บวมหรือแบน มีสีเหลืองทองผิวแห้งสนิท รสชาติหวานไม่ขม ไม่มีสิ่งแปลกปลอม เนื้อลำไยที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วจะมีกลิ่นหอมของลำไยไม่มีกลิ่นคาว มีลักษณะที่แตกต่างกันตามสีที่ปรากฏหลังจากการอบแห้งเช่น ลำไยอบแห้งสีทองซีด ลำไยอบแห้งเนื้อสีน้ำตาลแดง และลำไยอบแห้งเนื้อสีน้ำตาลดำ ดังแสดงในภาพ 4 เนื้อลำไยอบแห้งสามารถวัดคุณภาพโดยวัดความชื้น โดยทั่วไปความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 18 มาตรฐานเปียกโดยคุณภาพสีของเนื้อลำไยแห้งจะแบ่งเป็น 4 เกรดใหญ่ ๆ (มนัสวี, 2546) คือ สีเหลืองทอง สีน้ำตาลทอง สีน้ำตาลแดง และสีน้ำตาลดำ



ภาพ 4 คุณภาพเนื้อลำไยอบแห้งตามสมบัติทางสี
ที่มา: มนัสวี (2546)

องค์ประกอบคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง

จากงานวิจัยของ เพชรรัตน์ (2549) ได้อ้างอิงงานวิจัยของรัตนพร และคณะที่ทำการสุ่มตรวจลำไยอบแห้งเนื้อสีทองจากผลิตในเขตจังหวัดเชียงใหม่ และลำพูนเพื่อหาข้อกำหนดคุณภาพของลำไยอบแห้งเนื้อสีทอง เมื่อนำมาตรวจวัดค่าสีของเนื้อลำไย ค่าปริมาณน้ำอิสระ และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ สรุปเป็นค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตาราง 2 ค่า L* ของลำไยเกรดต่าง ๆ

เกรดของลำไย	ผลการวัดสี L		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
AA	53.08 ± 1.95	41.75 ± 2.50	47.76 ± 3.18
A	50.66 ± 3.10	42.42 ± 4.27	47.46 ± 2.66
B	51.50 ± 2.14	47.92 ± 2.24	49.71 ± 2.53

ที่มา: เพชรรัตน์ (2549)

ตาราง 3 ค่า a^* ของลำไยเกรดต่าง ๆ

เกรดของลำไย	ผลการวัดค่า a^*		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
AA	10.56 ± 1.80	6.01 ± 0.88	8.45 ± 1.31
A	13.37 ± 2.22	5.97 ± 1.68	9.67 ± 2.35
B	8.93 ± 1.55	8.29 ± 1.30	8.61 ± 0.45

ที่มา: เพชรรัตน์ (2549)

ตาราง 4 ค่า b^* ของลำไยเกรดต่าง ๆ

เกรดลำไย	ผลการวัดค่า b^*		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
AA	26.98 ± 1.99	11.91 ± 2.62	18.43 ± 4.78
A	26.88 ± 3.33	13.86 ± 1.88	19.42 ± 3.93
B	21.15 ± 3.11	17.58 ± 1.73	19.37 ± 2.52

ที่มา: เพชรรัตน์ (2549)

จากตาราง 2-4 พบว่าค่าเฉลี่ยของเนื้อลำไยอบแห้งสีทองทุกเกรดมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ ค่าสี L เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 47.46-49.71 ส่วนค่า a^* เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.45-9.67 และค่าเฉลี่ย b^* เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 18.43-19.42 สำหรับค่าของเนื้อลำไยอบแห้งของทุกเกรดมีค่า a_w น้อยกว่า 0.6 ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาได้นานโดยปราศจากการเน่าเสีย โดยรายละเอียดของค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity; a_w) แสดงดังตาราง 5

ตาราง 5 ค่า a_w ของคุณภาพเนื้อลำไยแต่ละชั้น

เกรดของลำไย	ปริมาณน้ำอิสระ		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
AA	0.580 ± 0.001	0.446 ± 0.001	0.525 ± 0.003
A	0.598 ± 0.006	0.495 ± 0.007	0.534 ± 0.03
B	0.542 ± 0.006	0.498 ± 0.002	0.520 ± 0.03

ที่มา: เพชรรัตน์ (2549)

ในส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของเนื้อลำไยอบแห้งเนื้อสีทองพบว่าเนื้อลำไยอบแห้งสีทองทุกเกรดมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เกิน 80 องศาบริกซ์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และอยู่ในช่วง 81.0-87.6 องศาบริกซ์แสดงในตาราง 6

ตาราง 6 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของลำไยเกรดต่าง ๆ

เกรดของลำไย	ปริมาณของแข็งที่ทั้งหมดที่ละลายน้ำได้		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
AA	87.6 ± 0.00	81.3 ± 0.42	84.56 ± 2.03
A	87.3 ± 0.42	82.8 ± 0.85	85.06 ± 0.85
B	85.8 ± 0.00	84.6 ± 0.85	85.2 ± 0.85

ที่มา: เพชรรัตน์ (2549)

กระบวนการหลักที่ทำให้เนื้อลำไยอบแห้งมีสีที่แตกต่างกันคือกรรมวิธีในการอบแห้ง ซึ่งนอกจากจะส่งผลต่อสีของเนื้อลำไยแล้วยังส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมี รวมไปถึงโอกาสของการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ในเนื้อลำไยแต่ละประเภทจากค่าความชื้นที่แตกต่างกัน

กระบวนการอบแห้งเนื้อลำไย

กรรมวิธีการอบแห้งลำไยมี 2 ลักษณะคือ ลำไยอบแห้งทั้งเปลือก (ทั้งลูก) ลำไยอบแห้งเฉพาะเนื้อ (แบบคว้านเมล็ดออก) สำหรับการอบแห้งแบบทั้งลูกนั้นจะเป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นที่ยอมรับของตลาดในเรื่องของความสะอาด ส่วนข้อเสียคือใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน เป็นผลทำให้ต้องใช้พลังงานในการอบสูง เสียค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง และการขนส่ง ข้อดีของการอบลำไยเฉพาะเนื้อคือ สะดวกในการนำไปบริโภค โดยไม่เสียเวลาในการแกะเปลือก และคว้านเมล็ดออก ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง และการขนส่ง ส่วนข้อเสียคือไม่เป็นที่ยอมรับของตลาดต่างประเทศในเรื่องความสะอาดของลำไย (ทศวรรษ, 2549) โดยการอบแห้งจะนิยมใช้ลำไยได้เกือบทุกชนิดแต่ที่นิยมได้แก่ พันธุ์ดอ พันธุ์เหหัว พันธุ์ชมพู และพันธุ์เขียว แต่อาจนิยมใช้พันธุ์ดอมากที่สุดเนื่องจากจะให้เนื้อสีเหลืองทองหลังจากการอบแห้ง และได้น้ำหนักมากกว่าพันธุ์อื่น ๆ

กระบวนการผลิตเนื้อลำไยอบแห้ง (ประสิทธิ์, 2548) มีขั้นตอนตั้งแต่การแกะเนื้อลำไยสด แล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ถ้าต้องการจำหน่ายทันทีหรือเก็บรักษาไว้ 3 เดือนให้ใช้สารโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 30 กรัมต่อน้ำ 10 ลิตร แช่ไว้ประมาณ 3-5 นาที ถ้าต้องการเก็บ 6-9 เดือนให้ใช้สารโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 50 กรัมต่อน้ำ 10 ลิตรแช่ประมาณ 5-7 นาที ต่อจากนั้นผึ่งลำไยให้สะเด็ดน้ำ และเรียงบนตะแกรง นำเข้าอบที่อุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียสใช้เวลาประมาณ 12-15 ชั่วโมงติดต่อกันไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ เพราะจะทำให้เกิดสีน้ำตาล และทำให้เนื้อด้านนอกแข็งซึ่งมีผลทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลงปล่อยให้เย็นแล้วบรรจุถุง

ตาราง 7 กรรมวิธีทำเนื้อลำไยแห้งแบบต่าง ๆ

วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	วิธีที่ 4
1. ลำไยสด	1. ลำไยสด	1. ลำไยสด	1. ลำไยสด
2. คว้านเมล็ด	2. คว้านเมล็ด	2. คว้านเมล็ด	2. คว้านเมล็ด
3. แกะเปลือก	3. แกะเปลือก	3. แกะเปลือก	3. แกะเปลือก
4. ล้างน้ำ	4. แช่สารส้ม 100 กรัม	4. ล้างน้ำปูนใส	4. ล้างน้ำ
5. เรียงบนตะแกรง	ต่อน้ำ 20 ลิตร เป็นเวลา	5. ซ้อนขึ้นให้สะเด็ด	5. แช่สาร
โปรง	5 นาที	6. เรียงบนตะแกรง	โพแทสเซียมเม
6. อบจนแห้ง	5. แช่แคลเซียมคลอ-	โปรง	ตาไบซัลไฟต์ 30
7. ปล่อยให้เย็น	ไรด์ 0.5 ซ้อนชาต่อน้ำ	7. อบจนแห้ง	กรัมต่อน้ำ 10 ลิตร
8. บรรจุถุง	20 ลิตรเป็นเวลา 5 นาที	8. ปล่อยให้เย็น	ต่อเนื้อ 10 กิโลกรัม
	6. เรียงบนตะแกรง	9. บรรจุถุง	เป็นเวลา 3-5 นาที
	โปรง		6. เรียงบนตะแกรง
	7. อบจนแห้ง		โปรง
	8. ปล่อยให้เย็น		7. อบจนแห้ง
	9. บรรจุถุง		8. ปล่อยให้เย็น
			9. บรรจุถุง

ที่มา: ประสิทธิ์ (2548)



ภาพ 5 กรรมวิธีการผลิตลำไยอบแห้งเนื้อสีทอง

จากกรรมวิธีการผลิตต่าง ๆ ในการผลิตลำไยอบแห้งเนื้อสีทองมีหลายขั้นตอนที่มีโอกาสให้ปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งการปนเปื้อนที่เกิดจากมนุษย์ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในกรรมวิธีการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานด้านอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้หน่วยงานต่าง ๆ ทางด้านอาหารและสาธารณสุขได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

คุณภาพอาหารทางจุลชีววิทยา

แนวคิดด้านคุณภาพของอาหารในทางจุลชีววิทยาจะประกอบด้วยความปลอดภัย (safety) อาหารที่มีคุณภาพต้องไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดอันตรายเมื่อนำไปบริโภค มีอายุการเก็บรักษาและเป็นที่ยอมรับ (acceptability and shelf-life) โดยอาหารที่มีคุณภาพต้องไม่มีจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย อายุอาหารสั้นจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค รวมไปถึงต้องมีความสม่ำเสมอ (consistency) ในการผลิตเพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในทุกหน่วย และทุกรุ่นของการผลิต การวิเคราะห์จุลินทรีย์ในอาหารจะมีตรวจทั้งในวัตถุดิบ ขั้นตอนกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์สุดท้าย หรือในขั้นตอนการผลิตที่เป็นจุดวิกฤตในระบบ HACCP รวมทั้งตรวจสอบสภาพวิเคราะห์สภาพแวดล้อมในการผลิต (อุยามาส, 2547)

วิธีการมาตรฐานการตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา

วิธีการตรวจวิเคราะห์ที่ใช้ในการตรวจสอบอาหารเพื่อบอกปริมาณ และชนิดของจุลินทรีย์ต้องระบุให้ชัดเจน ต้องเป็นวิธีการตรวจวิเคราะห์ที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล ซึ่งตามหลักสากลโดยสมัชชานานาชาติได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการตรวจวิเคราะห์คุณภาพด้านจุลินทรีย์ในอาหารตามมาตรฐาน ISO ซึ่งการตรวจสอบคุณภาพอาหารด้านจุลินทรีย์ได้แบ่งเป็นด้านต่าง ๆ ตามลักษณะการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารดังนี้ (อุยามาส, 2547)

จุลินทรีย์ทั้งหมด (total viable count)

เป็นวิธีที่ตรวจนับแบคทีเรียทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งนิยมเรียกเป็นวิธี standard plate count หรือ aerobic plate count ถ้าตัวอย่างอาหารตรวจพบแบคทีเรียทั้งหมดเกินมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบที่นำมาเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากจากกระบวนการผลิตที่ไม่ถูกสุขาภิบาล รวมถึงมีการเก็บอาหารในสถานะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่มนี้หากพบในปริมาณน้อยอาจไม่ทำให้เกิดโรค หากมีในอาหารเป็นปริมาณมากก็อาจก่อให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารได้เช่นกัน

จุลินทรีย์ และเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ลำไยอบแห้งเนื้อ

จากงานวิจัยของสุรภา (2548) ที่เก็บส้มเนื้อลำไยอบแห้งเนื้อ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ รา และ โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด พบว่าการที่ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ รา และ โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดสำหรับเนื้อลำไยอบแห้ง ซึ่งจากการสำรวจพบว่าสาเหตุของที่มีการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์มากกว่ามาตรฐานเนื่องจากระหว่างการแปรรูปเนื้อลำไยอบแห้งผู้ผลิตไม่ได้ใส่ใจในเรื่องการรักษาความสะอาด สุขลักษณะส่วนบุคคล การทำความสะอาดอุปกรณ์อบแห้ง การรักษาความสะอาดของสถานที่ผลิต ความล่าช้าของกระบวนการผลิต เช่นมีการรอให้ได้ผลลำไยสดที่คว้านเมล็ดแล้วตามจำนวนที่ต้องการก่อนจึงนำไปล้างน้ำ และแช่สาร โฟสเฟอรัส-คาโบซิลไฟต์ เนื่องจากลำไยสดมีปริมาณน้ำตาลสูงเป็นอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ จะทำให้จุลินทรีย์เจริญได้เร็วที่เนื้อลำไยสด รวมไปถึงการจัดเก็บรักษาเนื้อลำไยอบแห้งที่ยังไม่เหมาะสม โดยตามเกณฑ์ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ และมอก 919-2532 คุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผลไม้อบแห้งเป็นไปตามตาราง 8

ตาราง 8 เกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์

ชนิดจุลินทรีย์	ปริมาณที่กำหนด (โคโลนีต่อกรัม)	
	กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (2536)	มอก.919-2532
ยีสต์ ต่อกรัม	น้อยกว่า 1×10^4	ราและยีสต์รวมกันไม่เกิน 1×10^2
รา ต่อกรัม	น้อยกว่า 500	-
จุลินทรีย์ทั้งหมด ต่อกรัม	-	ไม่เกิน 1×10^4
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย ต่อกรัม	-	-
<i>Salmonella</i> ต่อ 25 กรัม	ไม่พบ	ไม่พบ
<i>E.coli</i> MPN / กรัม	น้อยกว่า 3	น้อยกว่า 3
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	ไม่พบใน 0.1 กรัม
<i>Clostridium perfringens</i>	-	ไม่พบใน 0.1 กรัม

ที่มา : สุรภา (2548)

สำหรับปริมาณจุลินทรีย์ที่อนุญาตให้มีได้ในเนื้อลำไยอบแห้งไม่เกินที่กำหนด
 ดังนี้จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องตรวจพบไม่เกิน 1×10^4 โคลิฟอร์มต่อกรัม รายีสต์ ต้องไม่เกิน 1×10^2
 โคลิฟอร์มต่อกรัม *Escherichia coli* โดยวิธีเอ็มพีเอ็น (Most Probable Number, MPN) ต้องน้อยกว่า 3
 โคลิฟอร์มต่อ 1 ตัวอย่าง 1 กรัม *Staphylococcus aureus* ต้องตรวจไม่พบในตัวอย่าง 0.1 กรัม
Salmonella spp. ต้องตรวจไม่พบในตัวอย่าง 25 กรัม และ *Clostridium perfringens* ต้องตรวจไม่พบ
 ในตัวอย่าง 0.1 กรัม ตามมาตรฐานสินค้าเกษตร และอาหารแห่งชาติได้กำหนดปริมาณการปนเปื้อน
 ของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยสดอบแห้งดังตาราง 9 และตาราง 10

ตาราง 9 เกณฑ์กำหนดของจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งสีทองของทุกชั้นคุณภาพ

ชนิดจุลินทรีย์	ปริมาณสูงสุดที่ตรวจพบ
ยีสต์	ไม่เกิน 10,000 โคลิฟอร์มต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g)
รา	ไม่เกิน 500 โคลิฟอร์มต่อตัวอย่าง 1 กรัม (CFU/g)
<i>Escherichia coli</i>	น้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม (MPN/g)
<i>Staphylococcus aureus</i>	ไม่พบในตัวอย่าง 0.1 กรัม
<i>Salmonella spp.</i>	ไม่พบในตัวอย่าง 25 กรัม
<i>Clostridium perfringens</i>	ไม่พบในตัวอย่าง 0.1 กรัม

ที่มา : ประสิทธิ์ (2548)

ตาราง 10 เกณฑ์กำหนดจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยสดอบแห้ง

ชนิดจุลินทรีย์	n	C	M	M
ยีสต์	5	2	1×10^4 CFU/g ^{1/}	1×10^6 CFU/g
รา	5	0	500 CFU/g	-
<i>Escherichia coli</i>	5	0	น้อยกว่า 3 MPN/g ^{2/}	-
<i>Staphylococcus aureus</i>	5	0	น้อยกว่า 10 CFU/g	-
<i>Salmonella spp.</i>	5	0	ไม่พบใน 25 g	-

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549)

หมายเหตุ ^{1/} CFU/g : colony forming unit per gram

^{2/} MPN/g : most probable number per gram

n หมายถึง จำนวนตัวอย่างที่ต้องนำมาตรวจสอบจากสินค้าแต่ละรุ่น (lot)

c หมายถึง จำนวนตัวอย่างสูงสุดที่พบจุลินทรีย์ในตัวอย่างที่ตรวจสอบได้สูงกว่า m

m หมายถึง จำนวนจุลินทรีย์ที่ยอมรับได้ในตัวอย่างที่ตรวจสอบ

M หมายถึง จำนวนจุลินทรีย์สูงสุดที่พบในตัวอย่างที่ตรวจสอบ ที่มีผลให้ไม่ยอมรับ
สินค้ารุ่น

การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์ รา และแบคทีเรียระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อสร้างความปลอดภัยในกับลำไยอบแห้ง เนื้อตลอดจนทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเสถียรในการเก็บรักษามากที่สุด



เทคโนโลยีเฮิร์ดเดิล (Hurdle technology)

เทคโนโลยีเฮิร์ดเดิล เป็นหลักการหนึ่งที่ใช้ในการเก็บรักษาอาหาร ซึ่งอาจใช้สารเคมีหรือกระบวนการใดก็ตามเพื่อยับยั้งกระบวนการเสื่อมสลายของอาหาร (substance or inhibiting deteriorative processes) โดยใช้สำหรับควบคุมการเสื่อมสลายอาหารที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพหรือจุลินทรีย์เท่านั้น สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ (คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2553) ได้ดังนี้

1. อุปสรรคทางกายภาพ (physical) ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน การควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ หรืออุณหภูมิในระหว่างการผลิต การใช้รังสีในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ การใช้พลังงานอิเล็กโทรมแมกเนติกส์ (electromagnetic energy) การใช้ภาชนะบรรจุในการควบคุมจุลินทรีย์ เช่นการเก็บในสภาพสุญญากาศ การควบคุมบรรยากาศ (การคัดแปลงบรรยากาศ) หรือแม้กระทั่งการใช้การบรรจุแบบปลอดเชื้อ (aseptic packaging)

2. อุปสรรคทางเคมี และ/หรืออุปสรรคทางกายภาพเคมี (physic-chemical) ได้แก่ การควบคุมปริมาณน้ำอิสระในอาหาร (water activity; a_w) การควบคุมความเป็นกรดต่าง การควบคุมปฏิกิริยารีดอกซ์ในอาหาร (redox potential; Eh) เช่นการใช้น้ำตาล หรือการใช้เกลือในการควบคุมแรงดันออสโมติกเพื่อปรับค่า a_w ในผลิตภัณฑ์ การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือการใช้ก๊าซออกซิเจนร่วมกับสารเคมี การใช้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด การรมควัน การใช้สมุนไพรและเครื่องเทศในการควบคุมปริมาณจุลินทรีย์

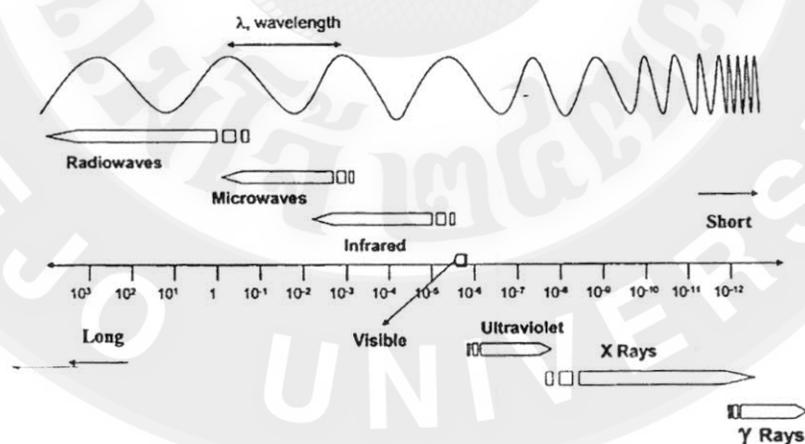
3. อุปสรรคจากตัวจุลินทรีย์หรือผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์ (microbial or microbial derived products) เช่น จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ แต่เป็นจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการแข่งขันสูงกว่าจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย (competitive flora) หัวเชื้อจุลินทรีย์ (starter cultures) ซึ่งมีจุลินทรีย์อยู่ในปริมาณที่สูง เมื่อนำไปใส่ในอาหาร (mass inoculation) ที่ต้องการบ่มให้ได้ผลิตภัณฑ์ เช่น ไวน์จะทำให้จุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ไม่สามารถเจริญได้ต่อไป สารที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นมาแล้วมีคุณสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เช่น bacteriocins สารปฏิชีวนะ (antibiotic) monolaurin free fatty acid, chitosan และ choline เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้อาจสร้างขึ้นระหว่างที่จุลินทรีย์เจริญหรือหลังจากสิ้นสุดการเจริญของจุลินทรีย์แล้ว แต่สารเหล่านี้จะทำให้จุลินทรีย์ชนิดอื่นเจริญต่อไปได้

เทคโนโลยีการลดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร (disinfection)

เทคโนโลยีการลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์จัดเป็นกระบวนการลดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ทั้งภายในเนื้อและ/หรือบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จนกระทั่งเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารตรงตามมาตรฐานของกฎหมายกำหนด ซึ่งปัจจุบันการลดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารนิยมทำในด้านกายภาพที่สามารถทำได้โดยให้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่ส่งผ่านจากระบบหนึ่งไปยังระบบอื่น ๆ ด้วยหลักการของการถ่ายทอดพลังงานทั้งการนำ การพา และการแผ่รังสีจากแหล่งพลังงาน สำหรับการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยเทคนิคการให้ความร้อนนั้นมีหลายหลายเทคนิคเช่น การใช้สารเคมี การเผาซึ่งเป็นการทำลายเชื้อแบบดั้งเดิม การอบด้วยไอน้ำร้อน (autoclaving) การใช้พลาสมา รวมถึงการใช้รังสีและคลื่นแม่เหล็กประเภทต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การใช้การแผ่รังสี

การแผ่รังสี (radiation) จะทำให้เกิดพลังงานจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่ไม่เสถียรจนอยู่ในสภาวะที่ปกติ อาจกล่าวได้ว่าการแผ่รังสีคือการปลดปล่อยพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเป็นการส่งผ่านพลังงานในรูปแบบคลื่นหรือรังสี ตัวอย่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีอัลตราไวโอเล็ตตามสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดภาพ 6



ภาพ 6 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ

ที่มา: McDonnell (2007)

เทคโนโลยีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอาหาร

ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่เพื่อความปลอดภัยรวมถึงการอายุการเก็บรักษาโดยหลีกเลี่ยงการใช้สารกันบูด โดยเทคนิคต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นในอุตสาหกรรมอาหารนั้นเกิดขึ้นเพื่อตอบสนองปัจจัยในเรื่องความรวดเร็ว ราคา และเรื่องของพลังงานในสายการผลิต การใช้ประโยชน์จากการฉายรังสี และไมโครเวฟถือเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างทันสมัยโดยเฉพาะกับการแปรรูปอาหารทั้งรังสี และไมโครเวฟคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) เหมือนกัน เพียงแต่มีความยาว และความถี่ของช่วงคลื่นที่แตกต่างกันตามภาพ 7 ซึ่งสามารถแบ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็น 2 กลุ่มคือ (สายสนม, 2547)

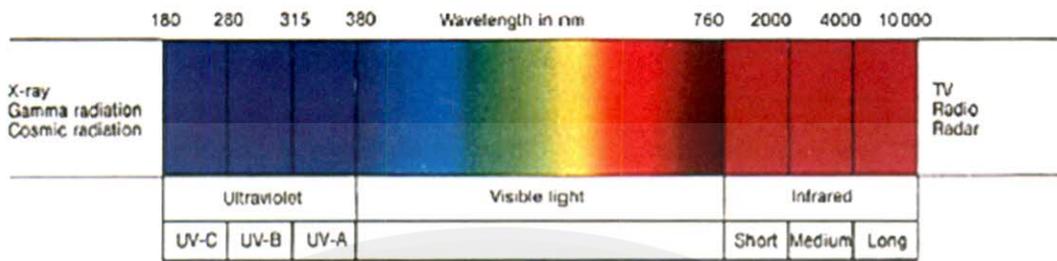
Non-Ionizing radiation เป็นรังสีของของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ของคลื่นต่ำแต่มีความยาวของคลื่นสูง ได้แก่คลื่นวิทยุทั้งระบบความยาวคลื่นยาว และความยาวคลื่นสั้น คลื่นโทรทัศน์ คลื่นไมโครเวฟ จนถึงอินฟราเรด สสารสามารถดูดซับคลื่นความถี่สูงในระดับไมโครเวฟ และอินฟราเรดจึงได้รับพลังงานความร้อน คลื่นดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการแปรรูปอาหารหลากหลายรูปแบบ

Ionization radiation หรือ High energy radiation เป็นรังสีของแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าคลื่นแสงที่มองเห็นได้ (visible spectrum) และมีความถี่ของคลื่นสูงมาก ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ และรังสีบีตา ซึ่งในระดับความถี่ดังกล่าวจะก่อให้เกิดพลังงานที่สูงมากในระดับที่ทำให้โมเลกุลน้ำในเซลล์เนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตแตกตัวได้ จึงถูกนำมาใช้ในการแปรรูปและถนอมอาหารต่าง ๆ โดยการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทสามารถสรุปได้ตามตาราง 11

ตาราง 11 ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแผ่รังสี	ความยาวคลื่น (m)	พลังงาน (J)
Non-Ionizing		
Radio wave	$>1 \times 10^{-1}$	$<2 \times 10^{-24}$
Microwave	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
IR	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Visible light	$7 \times 10^{-7} - 4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
UV	$4 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Ionizing		
X ray	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Gamma ray	$<1 \times 10^{-11}$	$>2 \times 10^{-14}$

ที่มา: McDonnell (2007)



ภาพ 7 แถบสเปกตรัมของการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: อุดม (2004)

นอกจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้ในการแปรรูป และการถนอมอาหาร คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทคลื่นไมโครเวฟ และรังสีอัลตราไวโอเล็ต ยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการทำลาย และลดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์อาหาร (disinfection) รวมถึงในบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้

คลื่นไมโครเวฟ (microwave)

ไมโครเวฟเป็นพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง มีลักษณะเหมือนแสงที่เป็นเส้นตรง และเจาะทะลุผ่านสสารซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งใส เมื่อเป็นสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจึงมีผลต่อระบบชีววิทยา เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุเมื่ออยู่ในสนามที่มีความถี่สูง โดยความถี่ที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟ คือ 915 และ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ (ล้านรอบต่อวินาที) เป็นความถี่ที่กำหนดให้ใช้ในอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์ สำหรับโครงสร้างของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไปจะประกอบด้วย แมกนีตรอน (magnetron) แอนเทนนา (antenna) ท่อนำคลื่น (waveguide) และใบพัด (stirrer) ไมโครเวฟจะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญที่เหนือกว่าการให้ความร้อนแบบอื่น ๆ (กิตติพงษ์, 2534) ไมโครเวฟจะทำให้อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิเร็วกว่าการให้ความร้อนวิธีอื่น ๆ คือใช้เวลาเพียง 1 ใน 4 ของเวลาที่ใช้ปกติ จึงทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหารน้อย แต่ไมโครเวฟกลับทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการแข็งตัว และการไหม้ที่ผิวทำให้ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานดี เนื่องจากการทะลุผ่านของคลื่นเข้าสู่อาหารโดยตรงจึงไม่สูญเสียความร้อนให้กับอากาศรอบข้าง

ส่วนการทำให้ปราศจากเชื้อ (sterilization) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าเมื่อให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้ผลึกต่างกันต่าง ๆ ปราศจากเชื้อโดยทั่วไปพบว่าเชื้อโรคต่าง ๆ (clinical-bacterial pathogens) จะถูกทำลายภายใน 60 วินาที ยกเว้นพวกที่มีสปอร์จะต้องใช้เวลานานถึง 5 นาที (สาวิตรี, 2538) โดยการลดเชื้อจุลินทรีย์ได้ในเวลาสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

ตาราง 12 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการการสเตอริไรส์อาหารเลี้ยงเชื้อโดยวิธีต่าง ๆ

วิธีการ	เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ
1 หม้อนึ่งความดันไอน้ำ	1-2 ชั่วโมง
2 ตู้อบความร้อนแห้ง	3-4 ชั่วโมง
3 gaseous sterilization	หลายชั่วโมง
4 เตาไมโครเวฟ	5-10 นาที

ที่มา: สาวิตรี (2538)

สำหรับข้อควรระวังในการใช้ไมโครเวฟเพื่อทำให้อยู่ในสภาวะปลอดเชื่อนั้น ต้องมีปริมาณพอเหมาะไม่มากเกินไป เพื่อให้ได้รับคลื่นอย่างทั่วถึง และควรรอให้เตาไมโครเวฟเย็นลงก่อนจึงบรรจุของชุดใหม่เข้าไป เพื่อไม่ให้เตาร้อนจัดเกินไป ส่วนเวลาที่จะทำให้อปลอดเชื่อนั้นต้องนานพอ โดยคำนึงถึงปริมาณ และเชื้อที่ปนเปื้อนด้วย

การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อลดเชื้อจุลินทรีย์

ช่วงความถี่ในช่วงไมโครเวฟนับว่าเป็นพลังงานควอนตัมที่มีผลกับการดูดซับคลื่นของวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้าจนส่งผลให้อาหารมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนเป็นปัจจัยสำคัญในการประยุกต์ใช้งานไมโครเวฟด้านต่าง ๆ กับอาหาร อาทิเช่น การอบแห้ง การปรุงอาหาร การลวกผักและผลไม้ รวมไปถึงการลดและทำให้ปลอดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร (pasteurization and disinfection)

การให้ความร้อนโดยเตาไมโครเวฟจะใช้เวลาน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาในการให้ความร้อนของการให้ความร้อนโดยทั่วไป (conventional heating) ผลของไมโครเวฟต่อการทำลายจุลินทรีย์นั้นขึ้นกับปัจจัยภายใน (intrinsic factors) ซึ่งเป็นสภาวะภายในอาหารอันได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณความชื้น ค่าศักย์ไฟฟ้า สารอาหาร สารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โครงสร้างทางชีวภาพ องค์ประกอบทางเคมี ขนาด และรูปร่างของชิ้นอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยภายนอก (extrinsic factor) ซึ่งหมายถึงสภาพแวดล้อมภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นอากาศ ก๊าซในบรรยากาศ ตำแหน่งของอาหารในไมโครเวฟ เป็นต้น นอกจากนี้องค์ประกอบทางกายภาพ และทางเคมีของจุลินทรีย์ สภาวะการเจริญเติบโต ช่วงการเจริญ ปริมาณความชื้นภายในเซลล์ ตลอดจนชนิด และจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหาร ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนแต่มีผลต่อการอยู่รอดของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ

การทำลายจุลินทรีย์ในอาหาร ในอาหาร โดยใช้เตาอบไมโครเวฟเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาหาร (thermal effect) เช่นเดียวกับการให้ความร้อนโดยวิธีทั่วไป ผลที่เกิดต่อจุลินทรีย์ คือการทำให้โปรตีน และกรดนิวคลีอิกเสียสภาพ (protein and nucleic acid denaturation) ซึ่งสาวิตรี (2538) ได้อ้างถึง Goldblith และ Wang (1967) ในการศึกษาการทำลาย *Escherichia coli* โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่าขณะที่ให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ สามารถยับยั้งการทำลาย *Escherichia coli* ได้ และในการศึกษาประสิทธิภาพของไมโครเวฟในการทำลายเซลล์ และสปอร์ของแบคทีเรียในสภาวะที่มีความชื้นต่ำมาก เช่น ในดินแห้ง ๆ พบว่าไม่สารทำลายเซลล์ และสปอร์เหล่านั้นได้ โดยช่วงความถี่คลื่นที่ระดับ 2450 MHz จะส่งผลให้เกิดกระบวนการเรโซแนนซ์ (resonance) ของคลื่นและถูกดูดซับโดยโมเลกุลของน้ำและส่งผลต่อการหมุนและปั่นป่วนของโมเลกุลส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มและกระจายออกไปในรูปของพลังงานความร้อน (Tonuci, 2007) ทำให้การลดเชื้อจุลินทรีย์โดยคลื่นไมโครเวฟไม่ใช้การลดเชื้อโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีโดยตรง แต่คลื่นจะเป็นตัวกลางที่ทำให้การสั่น (vibration) ของโมเลกุลน้ำเกิดการสั่นทำให้เกิดการส่งผ่านความชื้นในตัววัสดุ ผลดังกล่าวส่งผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงอุณหภูมิ 98-105 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลข้างต้นเป็นการพิสูจน์ได้ว่าไมโครเวฟมีผลต่อจุลินทรีย์ คือความร้อนที่เกิดขึ้นในอาหารเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และไม่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นนอกเหนือจากความร้อน อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยบางกลุ่มเสนอว่าการทำลายจุลินทรีย์โดยไมโครเวฟนั้นเป็นผลมาจากปัจจัยอื่นนอกเหนือจากความร้อน (thermal effect) เช่นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเจริญของ *Escherichia coli* หลังจากให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ สิวิตรี (2538) ได้อ้างถึง Fung และ Cunningham (1980) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสปอร์เชื้อรา หลังจากให้ความร้อนไมโครเวฟนาน 1-2 นาทีโดยเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนโดยการอุ่นด้วย water bath ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างไรก็ตามผลกระทบอันเกิดจากคลื่นไมโครเวฟ และการอยู่รอดของจุลินทรีย์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การให้ความร้อนแก่อาหารโดยใช้ไมโครเวฟนั้นจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อย ขึ้นกับองค์ประกอบของอาหารเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุลน้ำในอาหาร

2. การใช้ไมโครเวฟรวมกับการใช้ความร้อนประเภทอื่น ๆ จะช่วยในอาหารได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และทั่วถึงกว่าการใช้ไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟในอาหารจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก มีผลทำให้จุลินทรีย์สามารถรอดชีวิตอยู่ได้

3. ประสิทธิภาพของไมโครเวฟในการทำลายเชื้อแบคทีเรียนั้น มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสปีชีส์ของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียที่ต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการอยู่รอดที่ต่างกันไป และสปอร์ก็จะต้านทานต่อความร้อนมากกว่าเซลล์

การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารโดยเตาอบไมโครเวฟสำหรับใช้ในครัวเรือนนั้นจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนโดยวิธีการโดยทั่วไป แต่การใช้ความร้อนจากเตาไมโครเวฟเพื่อยับยั้งการเจริญของสปอร์ของแบคทีเรีย จะต้องใช้เวลา และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม แต่ช่วงเวลา และอุณหภูมิดังกล่าวไม่ได้นำมาใช้ในการปรุงอาหาร ดังนั้นการอุ่นอาหารด้วยไมโครเวฟอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระตุ้นให้สปอร์งอก และเพิ่มจำนวนเชื้อได้ จึงต้องพิจารณาในเรื่องความทนทานของแบคทีเรียแต่ละชนิดด้วย รา และยีสต์อาจสามารถกำจัดได้ง่ายกว่าแบคทีเรีย เช่นการให้ความร้อนแก่ถั่วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในเวลาสั้น ๆ จะสามารถลดอะฟลาทอกซิน (aflatoxin) ได้ 95 เปอร์เซ็นต์โดยไม่ทำให้ความเข้มข้นของโปรตีนและกรดไขมันเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นั้น มีผลต่อการลดจำนวนของจุลินทรีย์ด้วย

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Heddleson *et al.* (1994) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำลาย *Salmonella spp.* ในน้ำนมโดยใช้ไมโครเวฟ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างผล การทำลายเชื้อดังกล่าวตามปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ เวลาในการให้ความร้อน อุณหภูมิ ระดับพลังงาน ระยะเวลาหลังการให้ความร้อน (post-heating time) ปริมาณของเหลว ตลอดจนรูปร่าง และการเปิด ปิดภาชนะบรรจุ จนได้ข้อสรุปดังนี้

1. เวลา และอุณหภูมิมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (linear relationship) เวลาในการ ให้ความร้อนนานขึ้นย่อมมีผลต่อการทำลายเชื้อ *Salmonella spp.*
2. ระดับพลังงานของเตาอบไมโครเวฟ พบว่าการใช้ระดับพลังงานสูงกว่าจะมี ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อได้มากกว่ากัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากจำนวนรอบของแมกนีตรอน (magnetron cycling) ที่มากขึ้นจะสามารถทะลุทะลวงผ่านอาหารได้ดี
3. ระยะเวลาหลังการให้ความร้อน การตั้งอาหารทิ้งไว้หลังจากการให้ความร้อน แล้วนั้น จะมีการถ่ายเทความร้อนภายในอาหาร ทำให้เกิดสมดุลของการกระจายความร้อน ไปยังจุด ต่าง ๆ ของอาหารมากขึ้น (equilibrate) เป็นผลให้ประสิทธิภาพของการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มมก ขึ้น
4. รูปร่างของภาชนะบรรจุ และปริมาณอาหารไม่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโดยใช้ ไมโครเวฟ แต่ประสิทธิภาพของการทำลายเชื้อจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเวลาในการให้ความ ร้อน และอุณหภูมิของอาหาร
5. ผลของการปิดภาชนะบรรจุอาหาร จะมีผลต่อการกระจายความร้อนภายใน อาหารอย่างสม่ำเสมอมากกว่าการเปิดภาชนะ เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าอาหาร และที่บรรยากาศต่ำกว่า จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อสูงกว่า

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการฆ่าเชื้อเพื่อการยืดอายุของผลิตภัณฑ์ได้รับความนิยม อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ แต่ยังเป็นเรื่องที่ยังค่อนข้างใหม่ในประเทศไทย การฆ่าเชื้อด้วยคลื่น ไมโครเวฟในเชิงพาณิชย์หรือในระดับอุตสาหกรรมเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 10 ปีก่อนในประเทศ เนเธอร์แลนด์ โดยใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารที่บรรจุในถาดพีท (polyethylene terephthalate: PET) ที่ ปิดฝาด้วยพลาสติกใส แล้วทำการฆ่าเชื้อที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที สาเหตุที่การฆ่าเชื้อ ด้วยไมโครเวฟไม่เป็นที่นิยมมาก เพราะวาระบบนี้สามารถยืดอายุอาหารได้พอ ๆ กับการฆ่าเชื้อด้วย การพาสเจอร์ไรซ์เท่านั้น แต่มีอายุการเก็บรักษาไม่นานพอ และยังคงต้องจัดส่งในระบบแช่เย็นอีกด้วย (วิไล, 2547)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet, UV)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นรูปหนึ่งของของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างแถบสีน้ำเงินของสเปกตรัมแสงกับแถบของรังสีเอ็กซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยทั่วไปจะเกิดโดยการให้ความร้อนแก่สสารจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม หรือโดยการกระตุ้นให้เกิดการคายก๊าซออกมา โดยกรรมาธิการระหว่างประเทศว่าด้วยการส่องสว่าง (International Commission on Illumination, CIE) ได้แบ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกเป็น 3 แถบตามตาราง 13 (ทักษอร, 2547)

ตาราง 13 การแบ่งแถบรังสีอัลตราไวโอเล็ต

Region (Other name)	Wave length (nm.)
UV-A (near UV, longwave, blacklight)	315-400
UV-B (middle UV, erythral)	280-315
UV-C (far UV, germicidal)	100-280

ที่มา: ทักษอร (2547)

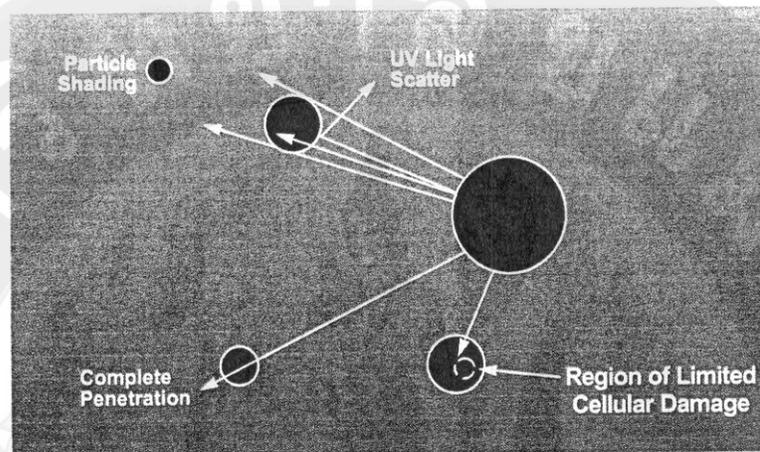
โดยรายละเอียดของรังสีทั้ง 3 ประเภทมีดังนี้ (อุดม, 2004)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิด เอ (UV-A) เป็นรังสีที่มีช่วงความยาวคลื่น 320–400 นาโนเมตร (1,360-4,000 อังสตรอม) เป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ไม่ค่อยมีอันตรายมากนัก สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะในด้านเคมี และฟิสิกส์ และสามารถพบได้ในแสงแดด

รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิด บี (UV-B) ช่วงความยาวคลื่น 280–320 นาโนเมตร (2,800-3,200 อังสตรอม) เป็นรังสีที่มีผลต่อร่างกาย และสิ่งของ ก่อให้เกิดการไหม้ของผิวหนัง (sun burn or erythematic) และการอักเสบของตาได้ จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านงานอุตสาหกรรมเคมี และรักษาโรคผิวหนังบางชนิดได้ มีประโยชน์สำหรับพืชในการสังเคราะห์อาหาร และอาจทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้เมื่อใช้เวลาพอเพียง

รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิด ซี (UV-C) เป็นรังสีที่มีอันตรายต่อร่างกายได้อย่างรุนแรง เช่น ผิวแดงไหม้เกรียม (erythema) หรือเยื่อตาอักเสบ (conjunctivitis) จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในอากาศ ผิวดิน น้ำ และน้ำเสียได้ดีที่สุด (disinfection) โดยใช้หลอดที่ให้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี ที่มีความยาวคลื่น 200-280 นาโนเมตร (UltraUVGI lamp)

รังสีทั้ง 3 นี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันมาก ทั้งในเรื่องการทะลุทะลวง และศักยภาพในการทำลายทางด้านชีววิทยา รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าจะถูกสกัดกั้นการทะลุทะลวงได้น้อยทั้งในสสารทั่วไปรวมไปถึงอากาศด้วย ทำให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 200 นาโนเมตรจะอันตรายมากกว่า (ทักษอร 2547) โดยผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่ออนุภาคดังภาพ 8



ภาพ 8 ผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่ออนุภาค

ที่มา: National Water Research Institute (2000).

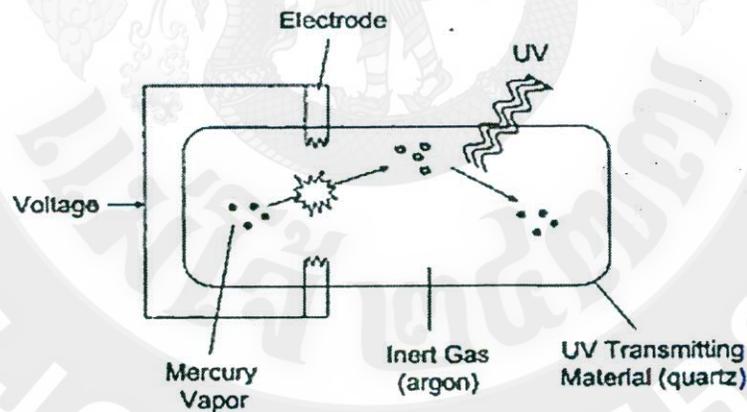
การกำเนิด และหน่วยการวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มโดยกลุ่มแรกเป็นประเภทแหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติซึ่งมีดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดสำคัญในรูปของแสงแดด ส่วนแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตอีกกลุ่มจะใช้แหล่งกำเนิดจากหลอดกำเนิดรังสี โดยอาศัยกระบวนการอาร์ค (arc) จากไส้หลอดกำเนิดรังสีที่ทำจากแก้วชนิดพิเศษ ซึ่งไส้หลอดสามารถทำได้จากโลหะหลากหลายชนิดที่ต่างเป็นตัวกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณที่แตกต่างกันดังแสดงตามตาราง 14 ดังนี้

ตาราง 14 ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดรังสีประเภทต่าง ๆ

ชนิดของหลอดกำเนิดรังสี	ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ร้อยละ)
คาร์บอนอาร์ค	5
ทังสเตนอาร์ค	16
ไอปรอทที่มีความดันต่ำ	28

ที่มา: สิริวัฒนา (2540)



ภาพ 9 การเกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดรังสีประเภทไอปรอทความดันต่ำ

ที่มา: McDonnell (2007).

การที่หลอดกำเนิดอัลตราไวโอเลตมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี จึงมีการประดิษฐ์หลอดไฟฟ้าที่สามารถให้กำเนิดช่วงความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลต ส่วนมากช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตจะมีความยาวคลื่นที่ 254 นาโนเมตรเกิดจากการเผาไอปรอทในหลอดแก้วพิเศษที่ขอมให้อัลตราไวโอเลตส่องทะลุผ่านได้ง่ายเช่น แก้วควอทซ์ หรือแก้วที่มีองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณสูง

การวัดรังสีอัลตราไวโอเลตแบ่งเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกสามารถวัดรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้สารเคมี (Chemical Dosage) สามารถแสดงปริมาณการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตได้ด้วยหน่วย ไมโครวัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตรซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างความเข้มข้นของรังสีในหน่วยพื้นที่ (ไมโครวัตต์ ต่อตารางเซนติเมตร) ต่อเวลาสัมผัสระหว่างแสงกับน้ำ (หน่วยวินาที) อีกประเภทเป็นการวัดรังสีอัลตราไวโอเลตโดยใช้หน่วยในรูปของพลังงานที่ใช้ในการวัดรังสีอัลตราไวโอเลตคือ หน่วยอิเล็กตรอนโวลท์ (electron volt; eV) โดยเป็นพลังงานที่อนุภาคซึ่งมีประจุของอิเล็กตรอนได้รับเมื่อเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ในสุญญากาศ หน่วย Ultrad มีค่าเท่ากับ 1 ไมโครวัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณการใช้รังสีอัลตราไวโอเลต (UV Dosage) สามารถวัดได้โดยใช้หน่วย ไมโครวัตต์-วินาที/ตารางเซนติเมตร ซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างความเข้มแสงใน 1 หน่วยพื้นที่ (หน่วยไมโครวัตต์ ต่อตารางเซนติเมตร) กับเวลาที่ใช้ในการสัมผัสอัลตราไวโอเลต สามารถเรียก 1 ไมโครวัตต์-วินาที/ตารางเซนติเมตรว่าเท่ากับ 1 ultrad

การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อฆ่าเชื้อโรค

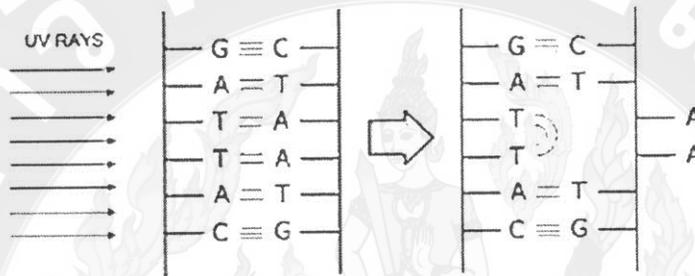
กลไกทั่วไปการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยรังสี รังสีโดยทั่วไปสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ 2 แบบโดยกลไกการฆ่าเชื้อแบบแรกคือ Target Theory รังสีจะเข้าไปทำลายในส่วนของกรคนิวคลีอิกของเซลล์โดยตรงจนเชื้อจุลินทรีย์เกิดการตายและเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพันธุกรรม (เกิดการผ่าเหล่า) ซึ่งกลไกการฆ่าเชื้อแบบ Target Theory จะเกิดกับการฆ่าเชื้อโดยรังสีอัลตราไวโอเลต กลไกการฆ่าเชื้อแบบที่ 2 รังสีจะเข้าไปทำลายเซลล์โดยอ้อม โดยการทำให้ น้ำในเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดการแตกตัวเป็นประจุบวกกลบ H^+ และ OH^- รบกวนการทำงานของเอนไซม์ ทำให้ขบวนการเมตาบอลิซึม และสารพันธุกรรมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุลเดิมของเซลล์เป็นสาเหตุทำให้จุลินทรีย์ตาย

กลไกดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อเชื้อได้รับรังสีประเภท X-ray และ Gamma เป็นต้น

ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้การทำงาน และการแบ่งตัวของโมเลกุล DNA เกิดการสับสนจึงทำให้เซลล์ไม่สามารถแบ่งตัว และตายในที่สุด โดยช่วงคลื่นที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงคลื่น 200-295 นาโนเมตร (อัลตราไวโอเล็ตชนิดช่วงความยาวคลื่นสั้น, UV-C) โดยเฉพาะที่ 254 นาโนเมตรจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ รังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีผลต่อโครงสร้างของเซลล์ที่ดูกลืนอัลตราไวโอเล็ตที่สำคัญได้ใน 2 ส่วนคือ โปรตีน และดีเอ็นเอ สำหรับโปรตีน กรดอะมิโนในส่วนของ Aromatic ring จะเป็นตัวดูกลืนอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร แต่ดีเอ็นเอสามารถดูกลืนอัลตราไวโอเล็ตได้ดีที่สุดใกล้เคียงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ผลกระทบจากอัลตราไวโอเล็ตในส่วนของ การดูกลืนจากดีเอ็นเอจะมีผลต่อเซลล์มากกว่าการดูกลืนในส่วนของโปรตีนเนื่องจากดีเอ็นเอเป็นสารพันธุกรรมที่สำคัญของเซลล์

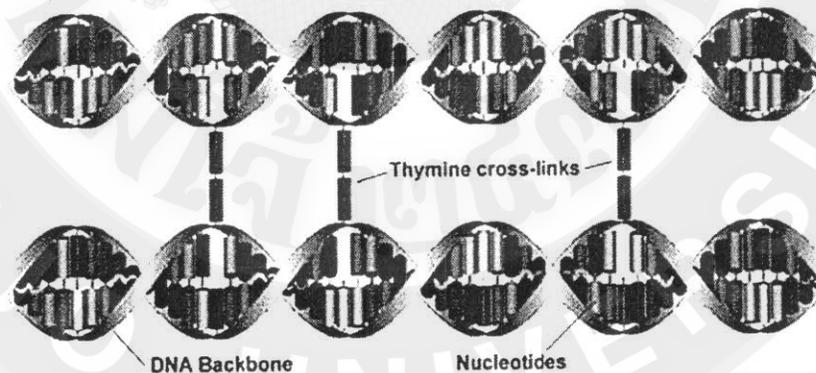
กลไกการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตนั้นเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการตาย หรือทำให้เกิดการหยุดการเจริญของเซลล์โดยเกิดจากการทำลายโครงสร้างของเซลล์จุลินทรีย์ที่ดูซับรังสีไว้ได้เช่น โปรตีน ดีเอ็นเอและอาร์เอ็นเอ โดยเฉพาะกับโครงสร้างประเภทดีเอ็นเอที่เป็นสารพันธุกรรมสำคัญในการควบคุมกระบวนการดำเนินชีวิตการของเซลล์ (photochemical changes) ดีเอ็นเอในรูปของกรดนิวคลีอิกเป็นสาระสำคัญในการดูกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยพบว่าส่วนประกอบของดีเอ็นเอในกลุ่มไพริมิดีน ไทมีนและไซโตซีนจะเป็นพวกที่มีความไวในการรับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจนทำให้โครงสร้างในกลุ่มของไทมีนเกิดการรวมตัวกันในลักษณะของไดเมอร์ (Thymine dimer) ที่ทำให้สายดีเอ็นเอเกิดการเสียสภาพจนทำให้เซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในสภาพผ่าเหล่าจนกระทั่งเกิดการตายหรือได้รับบาดเจ็บจากการรับรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเฉพาะในกรณีที่มีความเข้มข้นของรังสีสูง ๆ โดยจุลินทรีย์แต่ละประเภทจะดูกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ไม่เท่ากัน พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ประเภทราจะมีความต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีกว่าจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และแบคทีเรีย และราที่อยู่ในระยะสปอร์ก็จะมี ความต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตมากกว่าประเภทเส้นใย ส่วนยีสต์จะต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้สูงกว่าแบคทีเรียประมาณ 2-5 เท่า และแบคทีเรียที่มีสปอร์จะทนต่อรังสีได้ดีกว่าเซลล์ปกติ 2-5 เท่าเช่นกัน (สิริวัฒนา, 2540)

การเสียสภาพของดีเอ็นเอ ความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตนับเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิด ครอสลิงก์ (cross-link) ระหว่างกรดนิวคลีอิกในสายดีเอ็นเอซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะเกิดร่วมกับการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในกรดนิวคลีอิกอื่นด้วย แต่ละเกลียวคู่ของสายดีเอ็นเอประกอบด้วยน้ำตาลดีออกซีไรโบส ฟอสเฟต และเบส 2 ประเภทได้แก่เบสประเภท Pyrimidine (คือ Thymine และ Cytosine) อีกประเภทคือเบส Purine (ประกอบด้วย Adenine และ Guanine) มายึดเกาะกัน โดยแต่ละสายของดีเอ็นเอเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนในตำแหน่งของเบสแต่คู่ดังภาพ 10 และภาพ 11



ภาพ 10 การเกิดไทมีนไคเมอร์เนื่องจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตของกรดนิวคลีอิกในสายดีเอ็นเอ (thymine doublets)

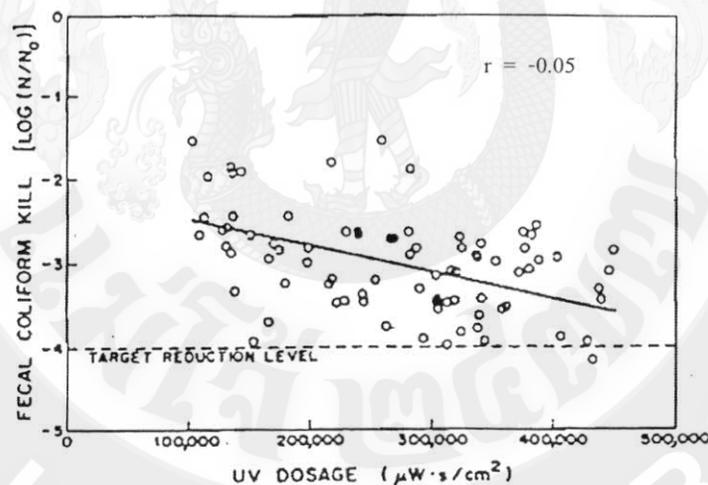
ที่มา: Kowalski (2009).



ภาพ 11 การเกิดไทมีนไคเมอร์เนื่องจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตของกรดนิวคลีอิกในสายดีเอ็นเอ (thymine doublets)

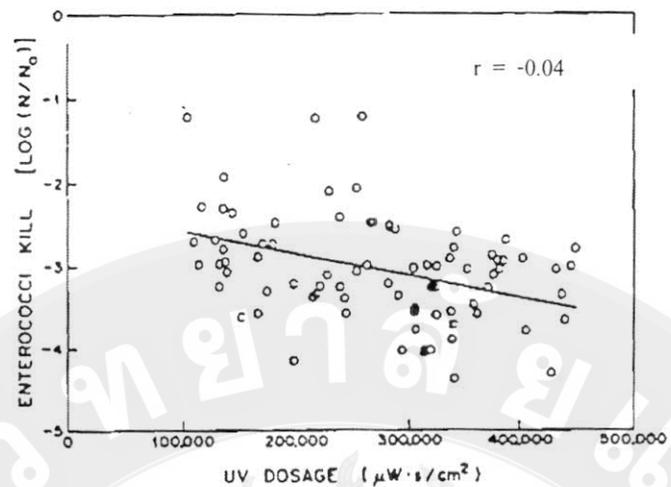
ที่มา: Kowalski (2009).

อรรณกร, 2529 ได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Zukovs, Kollar, Monteith Ho และ Ross (1986) ได้ใช้อัตราไวโอเลตในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้หลอดอัตราไวโอเลตจำนวน 4 หลอดโดยสามารถวัดความเข้มแสงสูงสุดที่ระยะลึกที่ตั้งฉากกับตัวหลอดได้ค่าดังนี้ ที่ระยะ 0.305 เมตรได้ความเข้มอัตราไวโอเลตสูงสุด 854.8 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะลึก 0.102 เมตรความเข้มอัตราไวโอเลตสูงสุดมีค่า 26184 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ระยะลึก 0.051 เมตรจากหลอดอัตราไวโอเลตค่าความเข้มอัตราไวโอเลตสูงสุด 5247.70 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการวิจัยพบว่าอัตราไวโอเลตมีศักยภาพสูงในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยทำให้อัตราการตายของจุลินทรีย์ประเภท Fecal Coliform และ Enterococci ลดลงแบบถดถอยเชิงเส้นตรงได้มากกว่า 3 Log scale โดยสาเหตุหลักในการแปรผันของข้อมูลขึ้นกับความเข้มข้นของของแข็งในน้ำ การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Fecal Coliform และ Enterococci เป็นไปดังภาพ 12 และ 13 แต่การทดลองดังกล่าวยังพบอัตราไวโอเลตอาจทำให้จุลินทรีย์บางประเภทมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นหรือไม่มีนัยสำคัญในการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ในทางสถิติได้อีกด้วยเช่นการลดลงของ *Salmonella Spp.* ดังในภาพ 14

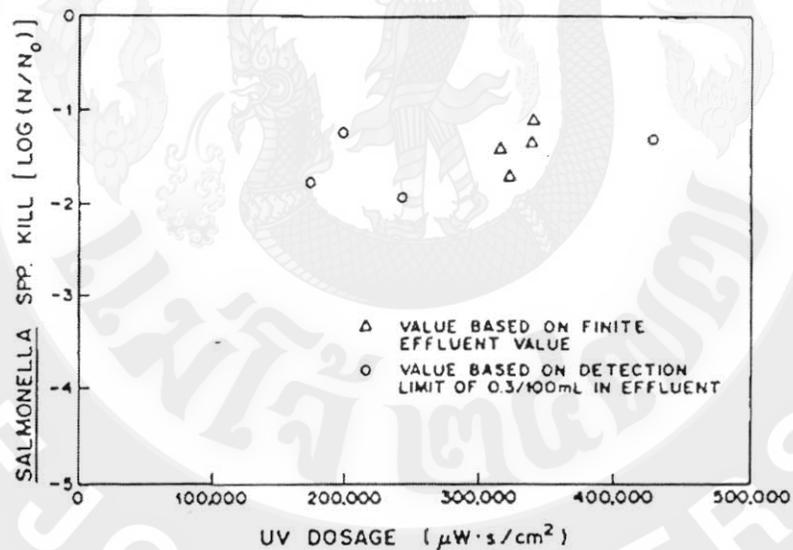


ภาพ 12 การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Fecal Coliform จากผลของอัตราไวโอเลตในระบบบำบัดน้ำเสียของ Zukovs และคณะ (1986) อ้างอิงโดยอรรณกร, 2529

ที่มา: อรรณกร (2529).



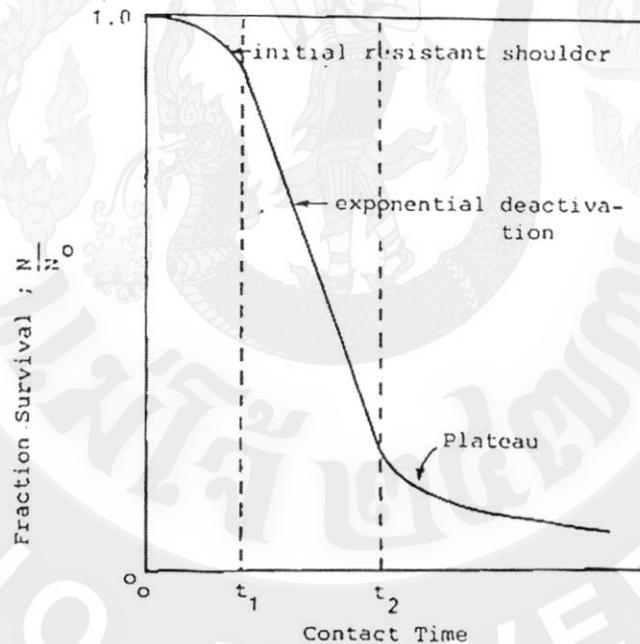
ภาพ 13 การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Enterococci จากผลของอัลตราไวโอเลตในระบบบำบัดน้ำเสียของ Zukovs และคณะ (1986) อ้างอิงโดยอรรถกร, 2529
ที่มา: อรรถกร (2529).



ภาพ 14 การลดลงของจุลินทรีย์ประเภท Salmonella Spp. จากผลของอัลตราไวโอเลตในระบบบำบัดน้ำเสียของ Zukovs และคณะ (1986) อ้างอิงโดยอรรถกร, 2529
ที่มา: อรรถกร (2529).

ทฤษฎีจลนศาสตร์ของการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์โดยรังสีอัลตราไวโอเลต

สำหรับการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำที่อาศัยเครื่องปฏิกรณ์อัลตราไวโอเลต หรือ อุปกรณ์ที่ทำให้อัลตราไวโอเลตได้สัมผัสกับน้ำเพื่อการฆ่าเชื้ออย่างมีประสิทธิภาพได้แก่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor) จากลักษณะการฆ่าเชื้อที่แตกต่างกันของอุปกรณ์ทั้ง 2 ประเภททำให้เกิดทฤษฎีทางจลนศาสตร์ของการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์สำหรับอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ ที่แตกต่างกันออกไป สำหรับการทดลองในระบบกะ (Batch system) จลนศาสตร์ของการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าเส้นกราฟที่แสดงลักษณะการตายของเชื้อจุลินทรีย์ (Death curve) เมื่อพบอัลตราไวโอเลต สามารถแสดงในรูปสัดส่วนการรอดชีวิต (Fraction survival; $\frac{N}{N_0}$) และเวลาสัมผัสแสง (contact time; t) ซึ่งเส้นกราฟการตายของเชื้อประกอบด้วยช่วง 3 ช่วงดังภาพ 15



ภาพ 15 เส้นกราฟการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับอัลตราไวโอเลต
ที่มา: อรรถกร (2529).

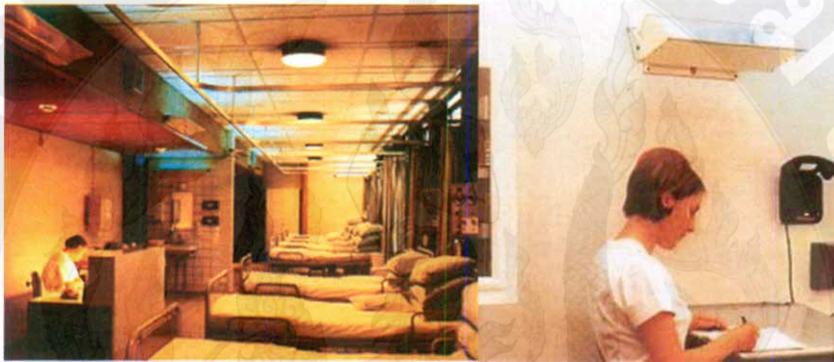
1.1 ช่วงต้านทานเริ่มแรก (initial resistant shoulder) เป็นช่วงที่เกิดการสะสมอัลตราไวโอเลตเพื่อทำให้เกิดความเสียหายภายในเซลล์จนทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความเสียหายในขั้นวิกฤตที่ทำให้เซลล์ตายได้

1.2 ช่วงการตายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential deactivation) ในกรณีที่จุลินทรีย์เป็นกลุ่มก้อนที่ขนาดเสมอกัน (uniform clump size) กราฟจะเป็นเส้นตรงในกราฟ semilog แสดงให้เห็นว่าช่วงนี้การตายของจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นรวดเร็วมก

1.3 ช่วงความต้านทานสุดท้าย (plateau) โดยจะเกิดกับกรณีที่เชื้อจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ (large clump size) ช่วงที่ 3 บนกราฟการตายของเชื้อคือ ช่วงความต้านทานสุดท้าย หรือ Plateau คือมีอัตราการตายของจุลินทรีย์จะช้ากว่าช่วงการตายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

รังสีอัลตราไวโอเลตนั้นสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งในน้ำ อากาศ และของแข็งซึ่งถูกนำไปลดเชื้อจุลินทรีย์โดยเฉพาะบนพื้นผิวทั้งในอาคาร และสิ่งของต่าง ๆ รวมไปถึงอาหาร ยา และเครื่องมือทางการแพทย์ โดยสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ได้ด้วย สาเหตุนี้จึงมีการนำรังสีอัลตราไวโอเลตมาฉายบนผลิตภัณฑ์น้ำดื่ม เนื้อสัตว์ ผลไม้ และพืชต่าง ๆ ที่ใช้ในการบริโภค รังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีที่มีความยาวคลื่นสั้น 253.7 นาโนเมตร มีผลในการฆ่าเชื้อโรคได้ โดยมีผลในการฆ่าเชื้อโรคได้โดยมีผลข้างเคียงน้อยกว่าการใช้ยาหรือสารเคมี จึงนำไปใช้ในหลายด้านดังนี้ (อุดม, 2004) การใช้งานหลอดอัลตราไวโอเลตเพื่อการฆ่าเชื้อโรคชนิดต่าง ๆ มีข้อจำกัด และข้อควรคำนึงในการใช้งาน เช่นรังสี UV-C ต้องถูกเชื้อโรคโดยตรงเท่านั้น ถ้าเชื้อโรคซ่อนอยู่ในเงาของวัตถุ เชื้อโรคนั้นอาจไม่ตาย รวมทั้งต้องมีระยะเวลาในการฉายรังสีที่เหมาะสมกับชนิดของเชื้อโรคซึ่งจะทนต่อรังสีได้ไม่เท่ากัน ควรใช้ที่ที่อากาศแห้งหากเป็นที่ที่อากาศชื้นอาจต้องมีการเพิ่มโดส (dose) เป็นสองเท่า เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้น ทำให้ในอุตสาหกรรมน้ำดื่มต้องใช้โดสเป็นจำนวนเพิ่มเป็นสิบเท่าในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตไม่ควรไม่ให้ถูกตาและผิวหนังโดยตรง การลดจุลินทรีย์ด้วยรังสี (redurization) โดยจะนำอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งผ่านกรรมวิธีการผลิตที่ถูกสุขลักษณะไปผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณรังสีที่ต่ำกว่า 10 กิโลเกรย์ (kGy) เพื่อลดแบคทีเรียหรือป้องกันการเจริญเติบโตของราซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเน่าเสียหรือเสื่อมคุณภาพ ดังนั้นอาหารที่ผ่านการฉายรังสีจึงเก็บได้นานขึ้น (ทักษอร, 2547) ผลของการฉายรังสีจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมโดยผลทางตรงทำให้เซลล์รวมไปถึง DNA เสียหายบางส่วน และผลในทางอ้อมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเรดิโอไลซิส (radiolysis) เนื่องจากพลังงานของรังสีทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระขึ้น นอกจากนั้นประโยชน์ของการฉายรังสีจะสามารถลดการสูญเสียของอาหาร เสริมสร้างความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ พยาธิ และสารเคมี

รังอัลตราไวโอเลตในโรงพยาบาล คลินิก ห้องผ่าตัด โรงภาพยนตร์ หอประชุม ห้องเรียน หรือค้ายทหาร เพื่อการปลอดเชื้อโรค โดยสามารถฆ่าเชื้อโรคที่ลอยอยู่ในอากาศ (air disinfection) ในสถานที่ที่มีคนอยู่เป็นจำนวนมากหรืออยู่เป็นเวลานาน ซึ่งลักษณะของการใช้งานนั้นจะสามารถติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเลตไว้เพดาน (ceiling - mounted UV lamp) เพื่อฉายรังสีสู่อากาศบนห้อง (upper air irradiation) หรือเป็นการฉายรังสีใ่อากาศที่พื้นห้อง (floor zone irradiation) หรือแม้กระทั่งติดตั้งในท่อลมหรือท่ออากาศ (air ducts) รวมทั้งอาจติดตั้งไว้ในที่กรองฝุ่น (dust filter) โดยสามารถติดตั้งด้วยโคมชนิดหันลงที่ติดตั้งให้สูงจากพื้นห้องประมาณ 60 เซนติเมตร



ภาพ 16 การติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเลตที่ติดตั้งฉายขึ้นด้านบนในโรงพยาบาลสมัยใหม่ ที่มา: อุดม (2004).

สำหรับอุตสาหกรรมผลิตอาหาร และยาหรือเวชภัณฑ์ (pharmaceutical) เป็นการฆ่าเชื้อโรคที่พื้นผิวของวัสดุ (surface disinfection) เพื่อความสะอาดตามมาตรฐานฆ่าเชื้อจุลินทรีย์กับอาหารด้วยรังสี ในหลายขั้นตอน เช่น ขณะผลิต ขณะบรรจุหีบห่อหรือจัดเก็บ เพื่อให้สิ่งของบริโภคจากโรงงาน สะอาดปลอดเชื้อโรค และไม่น่าเสียเร็ว การผลิตเภสัชภัณฑ์ซึ่งรวมไปถึงสารปฏิชีวนะ ยา และเครื่องสำอาง ต้องการสภาพอากาศที่สะอาด และปลอดเชื้อในทุกขั้นตอน ดังนั้นการลดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศโดยรอบต้องมีน้อยที่สุด ด้วยการฉายรังสีโดยตรงจากหลอดอัลตราไวโอเลตในห้องผลิตจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในขณะที่ผู้ทำงานในห้องผลิตต้องสวมเสื้อ ถุงมือ แว่นตาที่กันรังสีได้



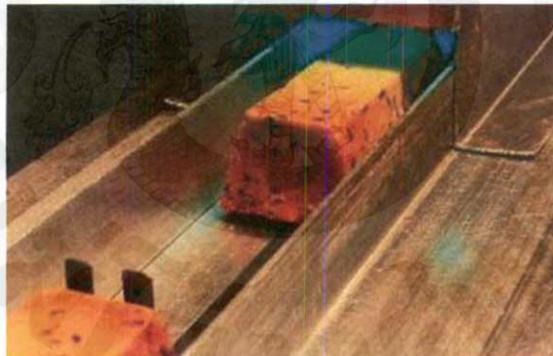
ภาพ 17 การผลิตยาที่ใช้หลอดอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อโรค
ที่มา: อุดม (2004).

ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำ และงานบำบัดน้ำเสีย (water purification) เป็นการฆ่าเชื้อโรคในของเหลว (liquid disinfection) เช่นการผลิตน้ำดื่ม (drinking water) ตู้ปลา (aquarium) สระว่ายน้ำ และงานบำบัดน้ำเสีย (supplementing chlorination)



ภาพ 18 การใช้หลอดอัลตราไวโอเลตกับน้ำเสีย
ที่มา: อุดม (2004).

การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในอุตสาหกรรมอาหารถูกใช้อย่างกว้างขวางในสำหรับการ สเตอริไรส์อาหารรวมถึงการลดเชื้อจุลินทรีย์บนพื้นผิวอาหารเพื่อยับยั้งและทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิต สถานที่ในการผลิต ในอุตสาหกรรมการบรรจุ (packaging) สามารถฉายรังสีอัลตราไวโอเลตกับหีบห่อก่อนการบรรจุ เช่นกล่องนม แต่ถ้าเป็นอาหารที่ห่อด้วยพลาสติกใส ควรฉายรังสีอัลตราไวโอเลต หลังจากการปิดผนึก (sealing) รวมไปถึงการลดเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้สด เป็นต้น คุณสมบัติในด้านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งอยู่ในช่วงสเปกตรัมชนิดซี และการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์จะดีที่สุดที่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่ 254 นาโนเมตรโดยเป็นช่วงที่กรดนิวคลีอิกในเชื้อจุลินทรีย์ดูดซับรังสีได้ดี การทรีตเมนต์อาหารด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตนับเป็นวิธีการที่ให้ประโยชน์อย่างมากเนื่องจากเป็นวิธีการที่เป็นไปได้ และไม่ทิ้งสารเคมีหลังการทรีตเมนต์ ทำให้การใช้งานรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งถูกนำมาเพื่อพัฒนาระบบความปลอดภัยในอาหารอย่างระบบ HACCP เพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ในพื้นผิว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในอุตสาหกรรมอาหารทั้งในรูปแบบต่อเนื่อง (continuous mode) และแบบช่วง (pulses) เพื่อลดจำนวนแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมถึงลดเวลาในสายการผลิต (Ortoneda, 2008)



ภาพ 19 การใช้รังสีอัลตราไวโอเลตกับอุตสาหกรรมอาหาร
ที่มา: อุดม (2004)

ตาราง 15 ขนาดความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ช่วงคลื่น 2537 Å) ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

Organisms	UV-dose ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)	Organisms	UV-dose ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)
<i>E. coil in air</i>	690	<i>S. typhimurium</i>	8000
<i>E.coil in water</i>	5400	<i>Sarcina lutea</i>	19700
<i>Bacillus anthracis</i>	4500	<i>Serrate marcescens</i>	2420
<i>B. enteritidis</i>	4000	<i>Dysentery bacilli</i>	2200
<i>B. meggatherium (veg.)</i>	1130	<i>Shigella</i>	1680
<i>B. megathypherium (spores)</i>	2700	<i>paradyscenteriae</i>	
<i>B parathyphosus</i>	3200	<i>Spirillum rubrum</i>	4400
<i>B. subtilis</i>	7100	<i>Staphylococcus albus</i>	1840
<i>Corynebact diptheriae</i>	3370	<i>Staphylococcus</i>	2600
<i>Phytomonas tomefficiens</i>	4400	<i>aureus</i>	
<i>Proteus vulgaris</i>	2640	<i>Streptococcus</i>	6150
<i>Pseudomans aeruginosa</i>	5500	<i>viridians</i>	
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	3600	Yeasts:	
<i>Microcaccus candidus</i>	6050	<i>Bakers' yeast</i>	3900
<i>Micrococcus sphearoides</i>	10000	<i>Brewers' yeast</i>	3300
		<i>Common yeast cake</i>	6000
		<i>Micrococcus</i>	8100
		<i>piltonencis</i>	
		<i>Neisseria catarrhalis</i>	4400

ที่มา: สุเมธ (2541)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรรถกร (2529) ได้ศึกษาอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตในน้ำประปาโดยใช้สมการที่อธิบายการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์สามารถอธิบายเบื้องต้นได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (จลนศาสตร์กำลังสองรวม) ซึ่งคิดเป็นอัตราเร็วในการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกำลังสองจากความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับหนึ่งของความเข้มแสง (I) กับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของจำนวนจุลินทรีย์ที่ยังมีชีวิต (N) ดังสมการ 1

$$-\frac{dN}{dt} = kIN \quad \dots (1)$$

เมื่อ $-\frac{dN}{dt}$ คือ อัตราเร็วการตายของเซลล์ที่ตำแหน่งใด ๆ (Local rate of deactivation)

k คือ ค่าคงที่การตายของเซลล์

I คือ ความเข้มแสงที่ตำแหน่งนั้น ๆ (local UV intensity)

N คือ จำนวนเซลล์ที่ยังมีชีวิตที่ตำแหน่งใด ๆ (local survival cell density)

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) รูปทรงแผ่นขนาน อัตราเร็วในการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงเอ็กซ์โปเนนเชียลเป็นแบบกำลังสองเป็น ดังสมการ 2 ซึ่งได้จากการอินทิเกรตสมการ 1

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k \bar{I} t \quad \dots (2)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนจุลินทรีย์ที่เวลา $t = 0$ (ก่อนถูกแสง)

\bar{I} คือความเข้มอัลตราไวโอเลตเฉลี่ย ในแนวตั้งฉากกับพื้นที่รับอัลตราไวโอเลต

t คือ เวลาในการสัมผัสอัลตราไวโอเลต

โดยมีสมมติฐานว่า จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากันตลอดความหนาของตัวกลาง กล่าวคือ N จะขึ้นกับเวลา t เพียงอย่างเดียว

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องที่มีรูปทรงวงแหวน (annular reactor) สามารถสร้างความสัมพันธ์ของการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์เป็นไปดังสมการ 3

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{1 + k I \tau} \quad \dots (3)$$

เมื่อ τ คือ residence time ในเครื่องปฏิกรณ์โดยที่ $\tau = \frac{V}{Q}$ ซึ่ง V คือปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และ Q คืออัตราการไหลของน้ำโดยปริมาตร

สมการ (3) มักไม่สามารถคาดคะเนผลในระบบต่อเนื่องได้แม่นยำจึงทำให้ระบบต่อเนื่องมักใช้สมการที่อธิบายอัตราการตายของเชื้อด้วยสมการแบบอนุกรม ซึ่งสามารถอธิบายการตายของจุลินทรีย์ 1 ตัวด้วยปฏิกิริยาเคมีอนุกรม (series chemical reaction) ด้วยอนุกรมดังนี้



โดยที่ M_i คือ จำนวนจุลินทรีย์ที่ระดับที่ i

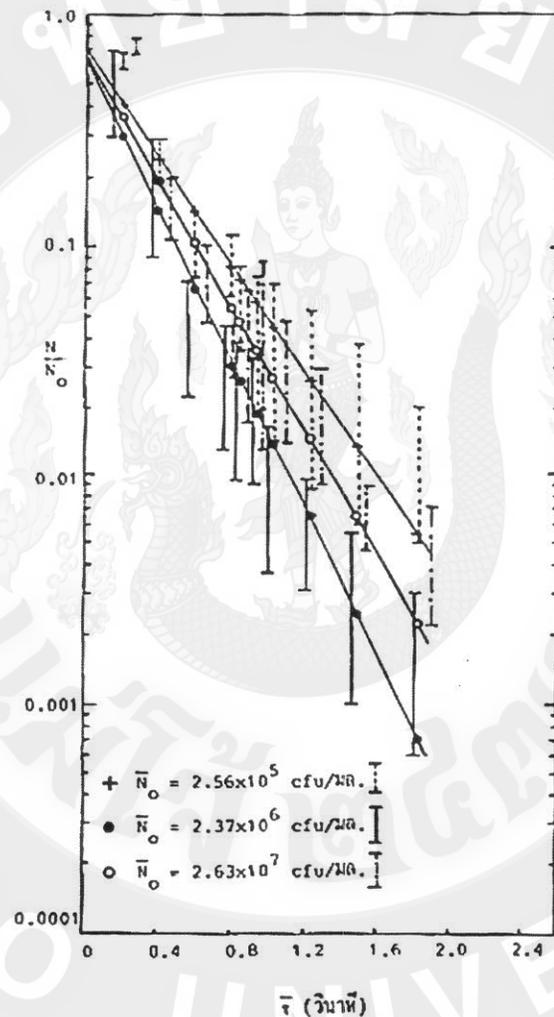
i คือ ดัชนีกำกับ

n คือ ระดับชั้นความเสียหายของเซลล์ เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต

จากลำดับอนุกรมดังกล่าวทำให้อัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องที่มีรูปทรงวงแหวน (annular reactor) สามารถสร้างความสัมพันธ์ของการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์เป็นไปดังสมการ 4

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \left[1 + \frac{1}{k I \tau} \right]^{-n} \quad \dots (4)$$

จากการศึกษาทางจลนศาสตร์ทางการตายของเชื้อ *E.coli* ของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิล์มบาง พบว่ากราฟของสัดส่วนการรอดชีวิตในแต่ละเวลาที่สัมผัสอัลตราไวโอเลตต่างๆ กันเชื้อ *E.coli* เริ่มต้นเฉลี่ยในระบบ 2.56×10^5 CFU/มิลลิลิตร 2.37×10^6 CFU/มิลลิลิตร 2.63×10^7 CFU/มิลลิลิตร ทำให้ได้กราฟ $\text{Log} \frac{N}{N_0}$ กับเวลาที่สัมผัสแสงโดยเฉลี่ยพบว่าได้กราฟเป็นเส้นตรงตามจลนศาสตร์กำลังสองรวมดังภาพ 20



ภาพ 20 เส้นกราฟการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับอัลตราไวโอเลต
ที่มา: อรรถกร (2529).

พบว่าการลดลงของเชื้อเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน การเสื่อมถอยของค่าความคาดเคลื่อนข้อมูลซ้อนทับกันอย่างเห็นได้ชัด จึงสรุปได้ว่าภายใต้พิสัยของการทดลองปริมาณเริ่มต้น (N_0) ไม่มีผลต่อจลศาสตร์การตายของเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแบบ Regression ได้สมการ (5) แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดลอง

$$\frac{N}{N_0} = 0.6535 e^{-3.1589t} \quad \dots (5)$$

โดยที่ค่า $R^2 = 0.8983$ จากภาพ จะไม่ช่วงความต้านทานเริ่มแรก เนื่องจากความเข้มข้นมีสูงจึงฆ่าเชื้อได้ทันที

สาวิตรี (2538) ได้ศึกษาการเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในอาหารเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยใช้ตาไมโครเวฟความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ พบว่าเชื้อ *E. coli* จะถูกทำลายได้หมดในเวลา 22 นาที และ 11 นาที ตามลำดับ จากปริมาณเชื้อเริ่มต้น 4.8×10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตรที่อุณหภูมิเฉลี่ย 97.5 องศาเซลเซียส ส่วนเชื้อ *B. stearothermophilus* สามารถทำลายได้หมดในเวลา 30 นาที และ 14 นาที ตามลำดับ จากปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1.17×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 97 องศาเซลเซียส

สุเมธ (2541) ได้พัฒนาเครื่องมือลดสิ่งปนเปื้อนในหอยแครงมีชีวิตโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตฆ่าเชื้อ การออกแบบเครื่องฉายอัลตราไวโอเลตจะขึ้นกับปริมาณหอยที่จะใช้ล้างว่าต้องการมากน้อยแค่ไหน ต้องการความหนาแน่นของหอย (จำนวนหอยต่อพื้นที่วางหรือจำนวนหอยต่อปริมาณน้ำที่ใช้ล้าง) ตลอดจนต้องการลดปริมาณจุลินทรีย์ในหอยเริ่มต้นเท่าไรให้ลดลงเหลือเท่าไร เพื่อนำไปออกแบบอ่างหรือบ่อ ระบบการหมุนเวียน อัตราการไหลของน้ำ และปริมาณแสงอัลตราไวโอเลต

จุฑารัตน์ (2545) ได้ศึกษาอิทธิพลของวอเตอร์แอกติวิตีต่อการฆ่าเชื้อ *Salmonella Senftenberg* ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต พบว่าระดับความเข้มข้นแสงอัลตราไวโอเลตไม่มีผลต่อการตายของเชื้อ *S. Senftenberg* ที่ปริมาณแสงอัลตราไวโอเลตเท่ากัน ซึ่งปริมาณแสงอัลตราไวโอเลตคือ ผลคูณของเวลาในการฆ่าเชื้อกับความเข้มข้นแสงอัลตราไวโอเลต แต่เมื่อปริมาณแสงอัลตราไวโอเลตเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการตายของเชื้อ *S. Senftenberg* ลดลง

ภูมิชาญ (2546) ได้ศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟ และ/หรือการตัดแปรสภาวะบรรยากาศต่อการเหลือรอดของ *Bacillus cereus* และนำเสนอผลที่เกิดภายหลังการรวมเทคโนโลยีเซอร์-เดิลดังกล่าวกับการเหลือรอดของเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4, 6 และ 8 หลังจากให้ความร้อนเป็นเวลา 16 วินาที เชื้อ *B.cereus* ได้ถูกทำลายหมด และพบว่าการตัดแปรสภาวะบรรยากาศมีผลต่อการอยู่รอดของเชื้อ โดยผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดจำนวนเชื้อ *B.cereus* อย่างไรก็ตามก๊าซผสมระหว่างก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 50 กับคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 50 มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งได้ศึกษาผลของการรวมของเทคโนโลยีเทคโนโลยีเซอร์เดิล ทั้ง 2 วิธี โดยเริ่มจากให้ความร้อนกับเชื้อจุลินทรีย์โดยไมโครเวฟก่อนจากนั้นนำเชื้อไปทำการตัดแปรสภาวะบรรยากาศ ผลการทดลองพบว่าสภาวะการใช้ไมโครเวฟมีผลในการลดปริมาณเชื้อเริ่มต้น และทำให้เชื้อมีสภาพอ่อนแอลง ส่วนสภาวะตัดแปรบรรยากาศนั้นจะช่วยลดปริมาณเชื้อที่ยังคงเหลือรอดหลังจากขั้นตอนแรก การรวมกันของ 2 วิธีดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์

ทักษอร (2547) ได้ศึกษาผลการฉายรังสี UV-C และรังสีแกมมาต่อการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus flavus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ พบว่าการฉายรังสี UV-C และแกมมาสามารถยับยั้งการงอกของสปอร์ได้อย่างสมบูรณ์ที่ 3.91 kJ/m² และร้อยละ 97 ที่ 5.62 kGy ตามลำดับ นอกจากนี้รังสีแกมมาตั้งแต่ 4.45 kGy สามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยได้ดี แต่รังสี UV-C สามารถชะลอการเจริญของเส้นใยได้เท่านั้น

สาวิตรี (2548) ได้ศึกษาการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟต่อการทำลายเชื้อ *Listeria monocytogenes* ในเนื้อวัวบดที่มีการเติมสารปรุงแต่งรสอาหาร ได้แก่เกลือ น้ำตาล น้ำปลาน้ำส้มสายชู พบว่าความเข้มข้นระดับต่าง ๆ กับเนื้อวัวบดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางอาหารเมื่อเทียบกับเนื้อวัวบดที่ไม่ได้เติมสารปรุงรสใด การใช้สารปรุงรสในปริมาณน้อยไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อ *L.monocytogenes* แต่ต้องใช้ในปริมาณสูง โดยเกลือต้องใช้ตั้งแต่ 12 เปอร์เซ็นต์ และน้ำส้มสายชูที่ 8 เปอร์เซ็นต์จึงจะช่วยให้การทำลายเชื้อที่ระดับความร้อนปานกลางเป็นเวลา 80 วินาที

จุฬาทิพย์ (2553) ศึกษาการลดเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* and *Salmonella* sp. โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซี การฉาย UV-C บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อสามารถลดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* และ *Salmonella* ได้เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ฉาย UV-C แต่อย่างไรก็ตาม การฉาย UV-C ที่ปริมาณแสงที่ดีที่สุดที่สามารถลดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ (3.6 kJ/m²) ไม่มีผลในการลดการเจริญของ *E. coli* *Salmonella* spp. ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด ยีสต์และราบนใบกะเพราที่ปนเปื้อนด้วยเชื้อจุลินทรีย์ อีกทางยังก่อให้เกิดจุดสีน้ำตาลขึ้นบนใบกะเพราและทำให้มีอายุการวางจำหน่ายเพียง 3 วัน

Coote *et al.* (1991) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ความร้อนจากเตาไมโครเวฟเพื่อยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* โดยให้ความร้อนจากเตาไมโครเวฟแก่อาหารเลี้ยงเชื้อจนอุณหภูมิสุดท้ายของอาหารอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียสทั้งไว้ 1 และ 2 นาทีพบว่าจำนวนเชื้อลดลง 10⁴-10⁰ เซลล์ต่อกรัม และมากกว่า 10⁰ เซลล์ต่อกรัมตามลำดับ และเมื่อให้ความร้อนจากเตาไมโครเวฟแก่หนัไก่ซึ่งมี *L. monocytogenes* ประมาณ 10⁰-10¹⁰ เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าเมื่อให้ความร้อนนาน 16 นาที อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียสถึงประมาณ 80 องศาเซลเซียสสามารถลดจำนวนเชื้อได้อยู่ระหว่าง 10⁴-10⁰ ต่อกรัมอาหาร โดยเซลล์ที่รอดชีวิตอาจเกิดจากการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอของเตาไมโครเวฟหรือเชื้อนั้นอยู่บริเวณที่ร้อนช้าที่สุด (cold spot) ของผลิตภัณฑ์

Craven และ Lillard (1974) ได้ศึกษาการรอดชีวิตของเซลล์ *Clostridium perfringens* ในเนื้อไก่ที่มีจำนวนเชื้อเริ่มต้น 3×10⁵ เซลล์ต่อกรัม พบว่าถูกทำลายหมดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 90 วินาที และในปี 1982 พบว่าการใช้ไมโครเวฟสามารถลดจำนวน *Escherichia coli* ในเนื้อสัตว์ที่ผ่านการทำให้สุก และเก็บในสถานะแช่เย็นจาก 10⁴ เซลล์ต่อกรัม ลดลงเหลือ 10² เซลล์ต่อกรัม

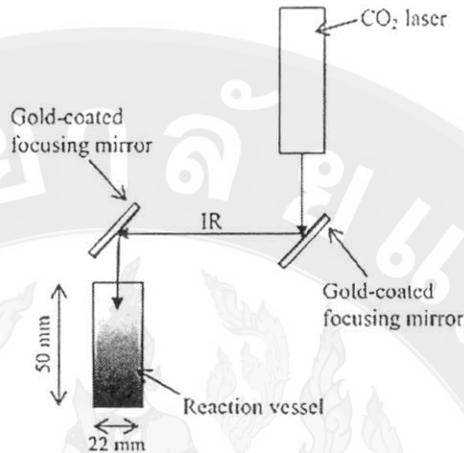
Stevens *et al.* (1997) ได้ทดลองฉายแสง UV-C เพื่อควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยวของผักผลไม้ โดยได้ทำการศึกษา Dose (kJ/m²) และเวลาในการฉายรังสีที่เหมาะสม ได้ผลดังตาราง 16

ตาราง 16 ความเข้มรังสี (kJ/m²) และเวลาในการฉายรังสี UV-C ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

product	Dose (kJ/m ²)	time (min)	Microorganism	disease
Sweet potato	3.6	6.75	<i>Rhizopus stolonifer</i>	Rhizopus soft rot
Tangerine	1.3	1.75	<i>Penicillium digitatum</i>	Green mold
Peach	7.5	10.10	<i>Monilinia fructicola</i>	Brown rot

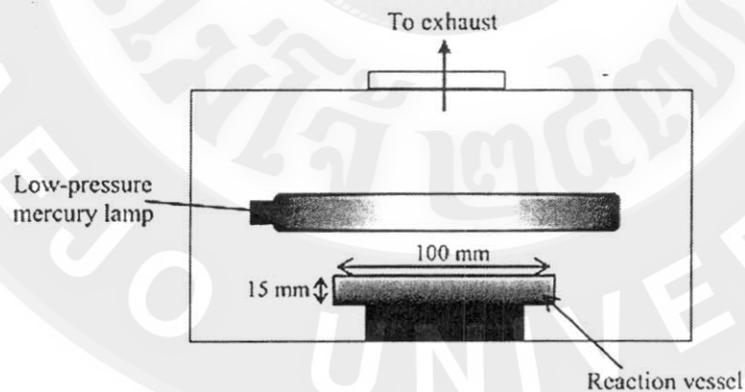
ที่มา: Steven *et al* (1997)

จากงานวิจัยของ Sarah (2006) ได้ศึกษาการลดปฏิกิริยา และการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของ *E. cloacae* และ *B. subtilis* endospores ในน้ำเสียโดยใช้การฉายแสงเลเซอร์ชนิด อินฟราเรด (10.6 μm) ตามภาพ 21



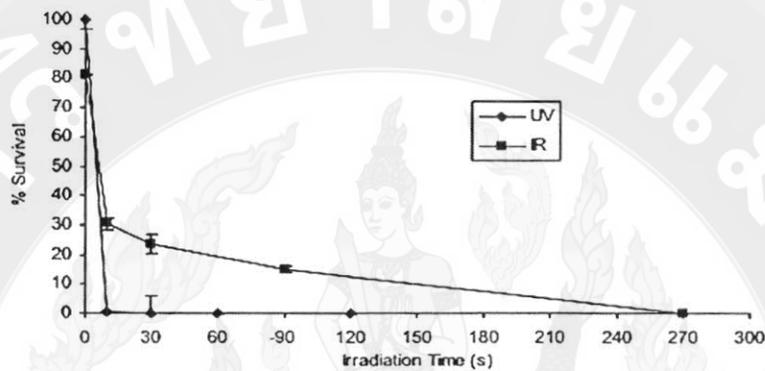
ภาพ 21 รูปแบบเครื่องมือในการทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด
ที่มา: Sarah (2006).

จากนั้น Sarah (2006) ได้ทำการเปรียบเทียบผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (10.6 μm) ที่มีต่อเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวโดยจัดอุปกรณ์การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV-C 254 nm) ดังภาพ 22



ภาพ 22 การติดตั้งอุปกรณ์การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต
ที่มา: Sarah (2006).

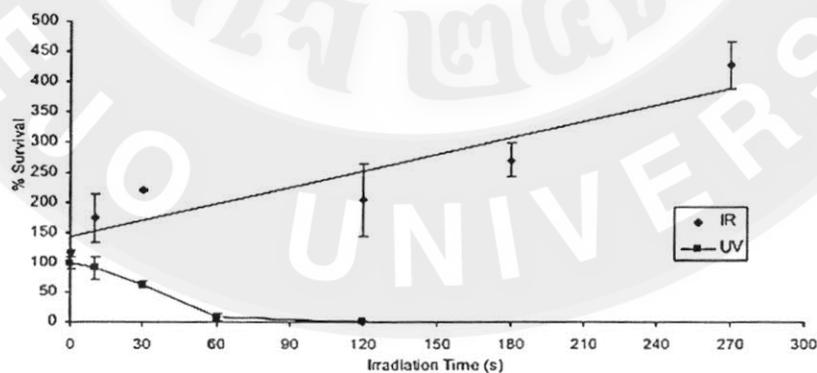
ผลการฉายรังสีทั้ง 2 ต่อจุลินทรีย์ *E. cloacae* เป็นไปตามกราฟอัตราการรอดชีวิต ในภาพ 23 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของปฏิกิริยาของ *E. cloacae* ระหว่างการฉายรังสีอินฟราเรด และรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยทั้ง 2 จะมีความเข้มข้นของเชื้อเท่ากัน หลังจากการฉายรังสีพบว่ารังสี อัลตราไวโอเล็ตชนิดซีจะใช้เวลาในการลดเชื้อมากกว่ารังสีอินฟราเรดโดยสามารถลดเชื้อได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์หลังจากการฉายรังสี 10 วินาทีซึ่งเท่ากับกรฉายรังสีอินฟราเรดถึง 270 วินาทีจึงสามารถ ลดเชื้ออยู่ในระดับเดียวกัน



ภาพ 23 กราฟแสดงผลของรังสีอินฟราเรด และรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อปฏิกิริยาของ *E. cloacae* ในช่วงเวลาเดียวกัน

ที่มา: Sarah (2006)

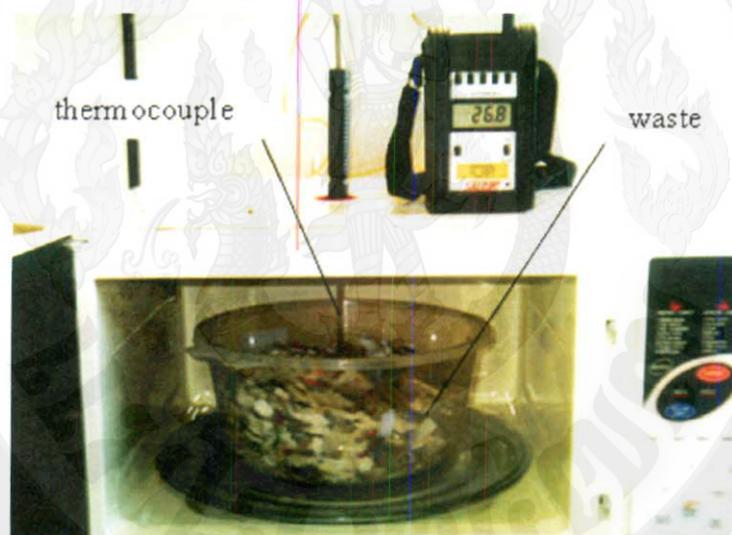
ส่วนผลของรังสีทั้ง 2 ต่อ *B. subtilis* ชนิดเอนโดสปอร์ แสดงให้เห็นว่ารังสีอินฟราเรดไม่มีความสามารถในการลดเชื้อแสดงดังภาพ 24 กราฟแสดงให้เห็นว่าหลังจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 60 วินาทีสามารถลดเชื้อได้ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรังสีอินฟราเรดไม่มีผลต่อการลดลงของเชื้อแต่มีผลในการเพิ่มเชื้อเป็น 270 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 24 ผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีอินฟราเรดต่อ *B. subtilis* endospores

ที่มา: Sarah (2006)

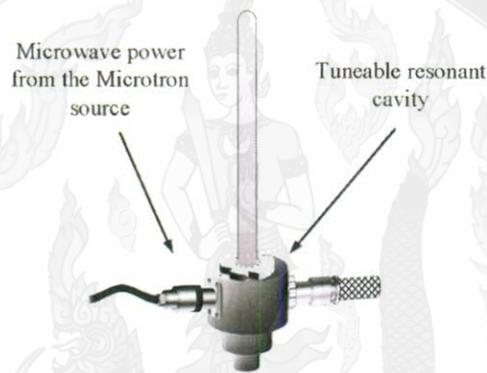
Oliveira (2006) ได้ศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟในการทำลายเชื้อ *Bacillus atrophaeus* ระยะสปอร์ในขณะระดับห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาผลของความชื้น (40, 50 และ 60 %w.b.) แรงดึงผิว กำลังวัตต์ต่อน้ำหนักของขยะ (100, 150 และ 200 w/kg) รวมไปถึงผลของการเปิดฉายคลื่นไมโครเวฟในช่วง 5 ถึง 40 นาที พบว่าเงื่อนไขที่มีผลต่อความร้อนในขณะเกี่ยวข้องกับ ความชื้นและการใช้สารลดแรงดึงผิวและส่งผลกระทบต่อการทำลายสปอร์ของเชื้อ *B. atrophaeus* ในฟังก์ชันของเวลา และกำลังวัตต์ต่อน้ำหนักของขยะ ตามหลักการของ Chick's and Arrhenius laws และวิเคราะห์ผลการทดลองใช้ระเบียบวิธีของ least squares method สามารถบ่งชี้ให้เห็นค่าของพลังงานในการยับยั้งเชื้อที่ 9203–5782 J/mol และมี Arrhenius pre-exponential factor ที่ 0.23 min^{-1} ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสรุปได้ว่าผลกระทบด้านพลังงานนั้นมีผลต่อการยับยั้งและทำลายเชื้อสปอร์ *B. atrophaeus* ซึ่งผลกระทบดังกล่าวจัดเป็นความสัมพันธ์โดยตรงการแผ่รังสีของคลื่นไมโครเวฟ



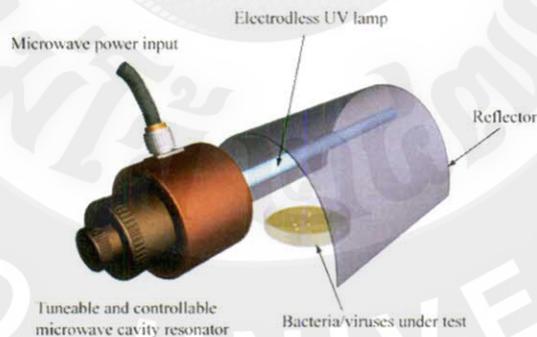
ภาพ 25 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟในการทำลายสปอร์ของเชื้อ *Bacillus atrophaeus*

ที่มา: Oliveira (2006).

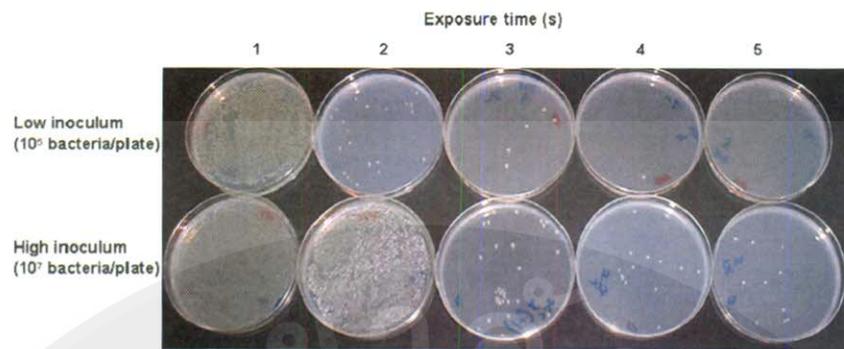
Monterrat (2008) ได้ออกแบบการทดลองเพื่อประเมินผลการลดเชื้อจุลินทรีย์จากหลอดกำเนิดรังสีแบบ Microwave Plasma UV (MPUVL) ดังแสดงดังภาพ 26 และ 27 เพื่อใช้งานด้านอาหาร โดยหลอด MPUVL ประกอบด้วยแมกนีตรอนขนาด 2.45 GHz. และหลอดกำเนิดรังสีทำด้วย ควอตซ์แก้วบริสุทธิ์ที่ด้านในประกอบด้วยก๊าซอาร์กอน และไอปรอทให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 254 และ 185 นาโนเมตร โดยความเข้มรังสีสูงสุดที่หลอดอัลตราไวโอเล็ตกำเนิดได้ที่ 10 W/m^2 การลดเชื้อจุลินทรีย์จากหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีที่แผ่รังสีจากกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ เมื่อพิจารณาการลดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีเชื้อเริ่มต้นที่ 10^7 ถึง 10^8 CFU เพลตของเชื้อเริ่มต้นจะวางใต้หลอด MPUVL ในระยะห่าง 10 เซนติเมตร ผลการลดเชื้อจุลินทรีย์จากหลอด MPUVL ได้มากกว่า 6 Log ดังภาพ 28



ภาพ 26 หลอดกำเนิดรังสีแบบ Microwave Plasma UV (MPUVL)
ที่มา: Monterrat (2008).



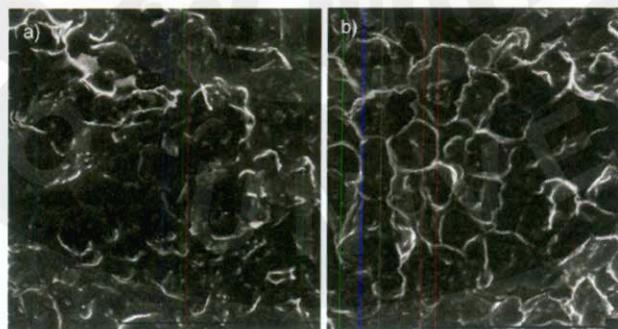
ภาพ 27 การติดตั้งและระบบการทดลองที่ใช้ในการทดลอง
ที่มา: Monterrat (2008).



ภาพ 28 ผลของโครงสร้างสีอัลตราไวโอเล็ตต่อเชื้อ *E. coli*

ที่มา: Ortoneda (2008).

Basaran (2009) ได้ศึกษาผลของการแผ่รังสีของคลื่นไมโครเวฟเพื่อควบคุมเชื้ออัสเพอริลลัสพาราซิติกัส (*Aspergillus parasiticus*) ในฮาเซลนัท โดยพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ 120 วินาที (2.450 GHz, 1250W) สามารถลดเชื้ออัสเพอริลลัสพาราซิติกัสที่ปนเปื้อนได้ถึง 3-Log ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของฮาเซลนัทที่ผ่านการฉายคลื่นไมโครเวฟเทียบกับชุดควบคุมโดยเทคนิค SEM ดังแสดงดังภาพ 29 ทำให้พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างทางจุลภาพของพื้นผิวที่เปลี่ยนไป โดยแสดงให้เห็นโครงสร้างรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ (morphology) มากขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งความพรุนของผิวฮาเซลนัทที่มีที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์ผันแปรกับความชื้นในผลิตภัณฑ์ การฉายคลื่นไมโครเวฟจึงส่งผลกระทบต่อฮาเซลนัทคล้ายกับการคั่วที่ใช้เวลาน้อยกว่า นอกจากนั้น Basaran (2009) ยังได้แนะนำการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไมโครเวฟสุญญากาศในการเพิ่มอายุการเก็บรักษา (shelf life) และรักษาคุณภาพของฮาเซลนัทในระดับอุตสาหกรรมอีกด้วย

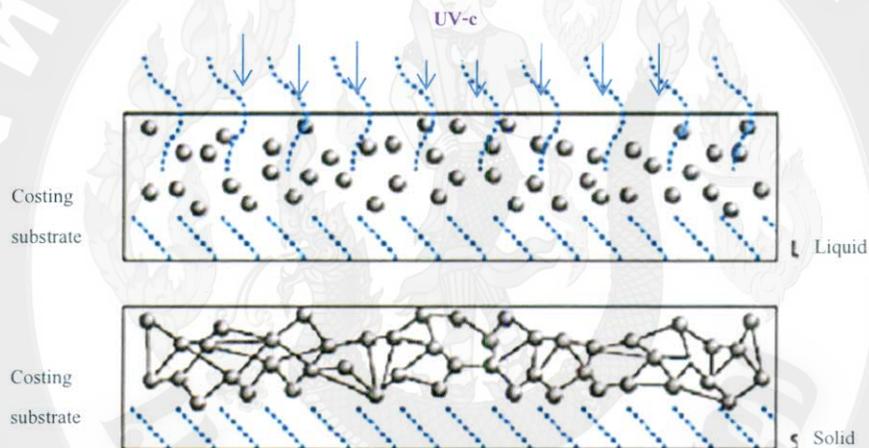


ภาพ 29 เปรียบเทียบผลกระทบจากคลื่นไมโครเวฟต่อพื้นผิวของฮาเซลนัท โดย a) แสดงพื้นผิวของชุดควบคุม ส่วน b) แสดงพื้นผิวฮาเซลนัทที่ผ่านคลื่นไมโครเวฟ 120 วินาทีตามการทดลอง

ที่มา: Basaran (2009).

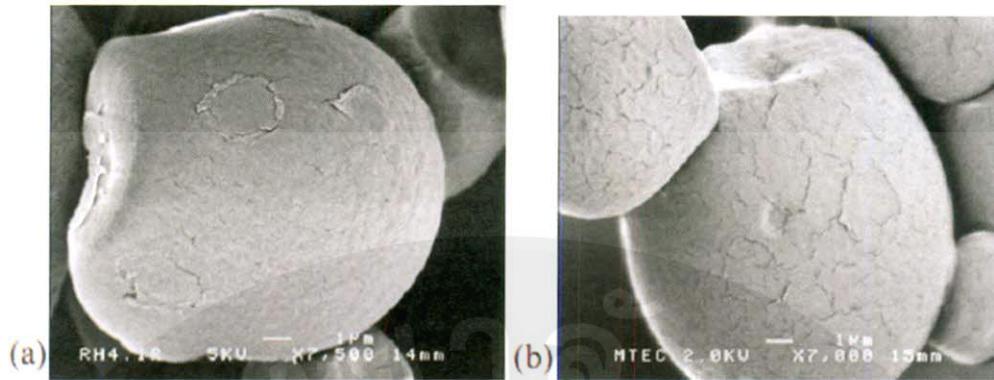
Hamanaka *et al.* (2011) ศึกษาการยับยั้งสปอร์ (*Penicillium*) จากผักและผลไม้สด โดยเฉพาะเลี้ยงบนอาหารวุ้น โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการฉายอินฟราเรดกับอัลตราไวโอเลต พบว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตจะให้ประสิทธิภาพในการลดสปอร์มากกว่าอินฟราเรด โดยอินฟราเรดสามารถลดได้ดีที่สุดที่ $2.3 \log$ ใช้เวลา 60 วินาที อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยผลของการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการดูดซับคลื่นของจุลินทรีย์แต่ละประเภท

Nednaps *et al.* (2011) ที่ทำการฉายรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดต่าง ๆ ลงบนแป้งสำหรับทำขนมปังก่อนนำไปอบ ผลของรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีจะมีผลกับผิวของเม็ดแป้งมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ และชนิดบี และส่งผลต่อการขยายตัวหลังการอบดังแสดงในภาพ 46 และภาพ 47



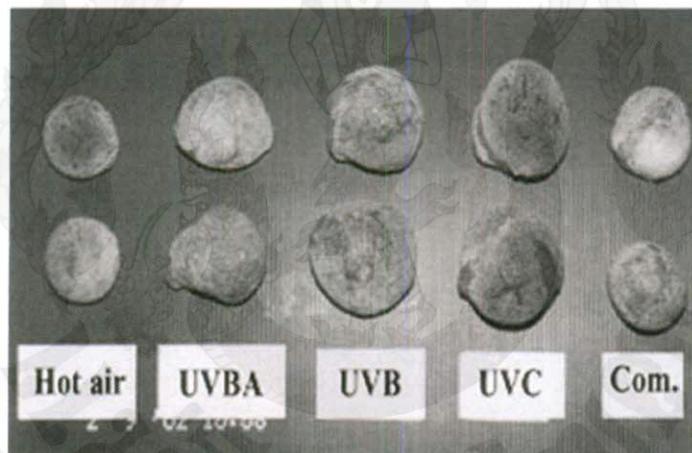
ภาพ 30 จำลองผลการเปลี่ยนแปลงของผิวด้านนอกของพื้นผิววัสดุที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงเพียงระดับพื้นผิวของเนื้อวัสดุเท่านั้น

ที่มา: Nednaps *et al.* (2011).



ภาพ 31 ผลของรังสีรังสีอิเล็กตราไวโอเลตต่อเม็ดแป้ง โดย (a) เป็นผลของการฉายรังสีรังสีอิเล็กตราไวโอเลตชนิดบีเป็นเวลา 9 ชั่วโมง และ (b) แสดงเม็ดแป้งที่ผ่านการฉายรังสีรังสีอิเล็กตราไวโอเลตชนิดซีเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ที่มา: Nednaps *et al.* (2011).



ภาพ 32 ผลการขยายตัวของแป้งที่ผ่านการฉายรังสีรังสีอิเล็กตราไวโอเลตชนิดต่าง ๆ หลังจากผ่านการอบจนสุก พบว่าแป้งที่ผ่านการฉายรังสีรังสีอิเล็กตราไวโอเลตชนิดซีจะมีการขยายตัวของเนื้อสัมผัสมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ผ่านการฉายรังสีรังสีอิเล็กตราไวโอเลตชนิดเอ และบี

ที่มา: Nednaps *et al.* (2011).

สรุปกรอบความคิดในการทำงานวิจัย

ข้อดีของการแปรรูปโดยการอบลำไยเฉพาะเนื้อคือ สะดวกในการนำไปบริโภค ประหยัดพลังงานในการอบแห้ง รวมถึงสะดวกในการการขนส่ง ส่วนข้อเสียคือ ความสะอาดของเนื้อลำไยอบแห้งที่มีโอกาสปนเปื้อนจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตได้ง่าย เนื่องจากกระบวนการแปรรูปลำไยสดด้วยการอบแห้งปัจจุบันเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้แรงงานคนส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้จะส่งผลกระทบต่อผู้บริโภค ยังส่งผลเสียต่ออายุการเก็บรักษา รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งกายภาพ และทางเคมี จากการตรวจเอกสารพบว่า การให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ปราศจากเชื้อ (sterilization) จากจุลินทรีย์ต่าง ๆ (clinical micro-organism pathogens) โดยเชื้อจะถูกทำลายภายใน 60 วินาที ยกเว้นพวกที่มีสปอร์จะต้องใช้เวลาจนถึง 5 นาที แต่การฆ่าเชื้อด้วยไมโครเวฟไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากระบบนี้สามารถยืดอายุอาหารได้ใกล้เคียงกับการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการพาสเจอร์ไรซ์เท่านั้น ทำให้มีอายุการเก็บรักษานานพอรวมทั้งยังต้องจัดส่งในระบบแช่เย็นอีกด้วย ถึงแม้ว่ารังสีอัลตราไวโอเลตจะมีสมบัติในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ แต่การฉายรังสีอัลตราไวโอเลตกลับมีจุดพร่องโดยเป็นเทคนิคที่ไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ประเภทรา โดยมีผลเพียงยับยั้งการงอกของสปอร์ราเท่านั้น ทำให้งานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อเสริมประสิทธิภาพในการลดเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากการใช้เทคนิคการดังกล่าวมีผลต่อการลด และยับยั้งเจริญของจุลินทรีย์ทั้งประเภท ยีสต์ รา และแบคทีเรียอย่างมีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน การประยุกต์ใช้งานร่วมกันของทั้ง 2 เทคนิคย่อมสามารถลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งได้อย่างสมบูรณ์ และส่งผลทำให้เนื้อลำไยอบแห้งมีคุณภาพด้านจุลินทรีย์ตรงตามมาตรฐานความปลอดภัยในอาหาร

สมมติฐานการทำวิจัย

ความเข้มของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอัลตราไวโอเลต และคลื่นไมโครเวฟ มีผลกระทบต่อการลดจำนวนของจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษาการลดปริมาณจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยเทคโนโลยีฮีลเลอร์ร่วมระหว่างเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ มีวัสดุ อุปกรณ์ รวมถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยละเอียดดังนี้

วัตถุดิบ

เนื้อลำไยอบแห้งเนื้อสีทอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตามิโครเวฟแนวตั้งกำลังไฟฟ้า 1204 วัตต์ (จากพวงส์และคณะ, 2551.)
2. ชุดให้รังสียูวีประกอบด้วยหลอดให้รังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซี (TUV 8 wattage, Philips, Poland.)
3. เครื่องชั่งดิจิทัล (CP3202S, Sartorius, Gottingen, Germany.)
4. เครื่องวัดสี (MiniScan XE plus & Colorflex, Hunter lab, USA.)
5. เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (series 3TE, Aqua lab, USA.)
6. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA-XT plus, Texture technology Inc., UK.)
7. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (744, Metrohm, Switzerland.)
8. เครื่องบดย่อย (Moulinex, China.)
9. ตู้ถ่ายเชื้อ (HB2472, lamina flow Holten Laminar, Denmark.)
10. ตู้บ่มเชื้อ (B12, Heraeus, Germany.)
11. หม้อนึ่งความดัน
12. เตาอบเครื่องแก้ว
13. งานเพาะเชื้อ พร้อมกระบอกสำหรับการเก็บและฆ่าก่อนการทดลอง
14. บีเปตขนาด 10 มิลลิลิตร พร้อมกระบอกเก็บ
15. หลอดทดลองพร้อมจุกปิด
16. ขวดคูแรนขนาด 500 และ 1000 มิลลิลิตร
17. ไมโครบีเปต และไมโครทิป

สารเคมี

1. อาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ดังนี้
 - 1.1. Plate count ager
 - 1.2. Potato dextrose ager
 - 1.3. Tryptic soy ager
2. Sodium Chloride
3. Di sodium Hydrodgen Phosphate
4. Potassium Di sodium Hydrodgen Phosphate
5. Peptone Bacto
6. Tartaric acid
7. 70 % Ethanol

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมเบื้องต้นสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟ

เบื้องต้นการวิจัยแบ่งปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบต่อด้านจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งเป็น 2 กรณี ได้แก่ การศึกษาผลกระทบจากการให้เนื้อลำไยอบแห้งสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีความยาวคลื่น 200-280 นาโนเมตร ความเข้มของรังสีแต่ละหลอดอยู่ที่ระดับ 21 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (โดยอ้างอิงระดับความเข้มของรังสีจากคู่มือการใช้งานของหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต) ในการศึกษาในกรณีแรก การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะใช้แผนการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล 3×3 (3×3 Factorial Experiment) ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคือจำนวนหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่จะเปิดให้แก่เนื้อลำไยอบแห้งแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ การเปิดใช้หลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต 1, 2 และ 3 หลอด (ความเข้มรังสีเท่ากับ 21, 42 และ 63 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) ส่วนอีกปัจจัยคือ เวลาที่ใช้ในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตคิดเป็น 3 ระดับคือ 60, 180 และ 300 วินาที ทำการทดลอง 2 ซ้ำดังตาราง 17 เพื่อทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ส่วนการศึกษาค้นคว้าผลกระทบบนการฉายคลื่นไมโครเวฟแก่เนื้อลำไยอบแห้งใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Randomized Completely Randomized Design, RCRD) โดยใช้เวลาเป็นตัวแปรต้นที่ระยะเวลา 60, 180 และ 300 วินาทีในการให้เนื้อลำไยอบแห้งผ่านคลื่นไมโครเวฟทำการทดลอง 2 ซ้ำที่ระดับกำลังวัตต์ 1204 วัตต์คงที่ตลอดการทดลองดังตาราง 18 การศึกษาอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทนี้ ประเภทต่อการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ 3 เช่นเดียวกัน การพิจารณาอัตราการลดลงของเชื้อทั้ง 3 ประเภทเปรียบเทียบกับหน่วยทดลองชุดควบคุม

ตาราง 17 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามเพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตในเนื้อลำไยอบแห้ง

หน่วยการทดลอง	ตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม		
	จำนวนหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (วินาที)	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด	จำนวนสปอร์	จำนวนยีสต์และรา
1	0	0			
2	3	60			
3	2	180			
4	1	300			
5	2	180			
6	1	180			
7	1	60			
8	3	180			
9	1	300			

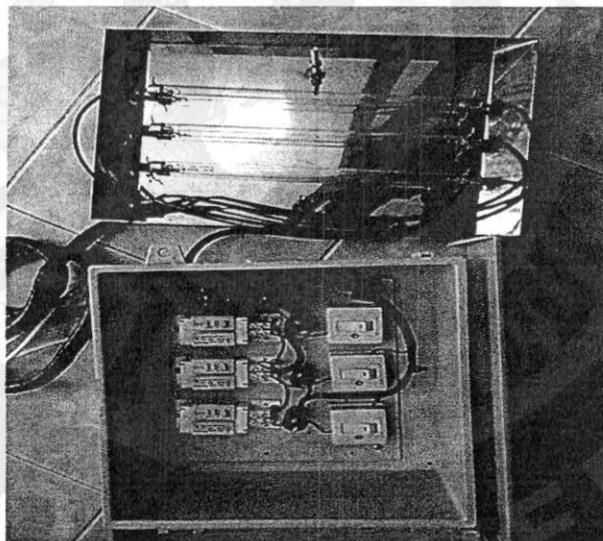
ตาราง 17 (ต่อ)

หน่วยการ ทดลอง	ตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม		
	จำนวนหลอด กำเนิดรังสี อัลตราไวโอเล็ต	เวลาในการฉายรังสี อัลตราไวโอเล็ต (วินาที)	จำนวน จุลินทรีย์ ทั้งหมด	จำนวน สปอร์	จำนวน ยีสต์และ รา
	10	3	300		
11	3	180			
12	1	180			
13	3	300			
14	2	60			
15	2	300			
16	1	60			
17	2	300			
18	2	60			
19	3	60			

ตาราง 18 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามเพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังวัตต์ 1204 วัตต์ต่อเนื้อลำไยอบแห้ง

หน่วยการ ทดลอง	ตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม	
	เวลาในการฉายคลื่น ไมโครเวฟ (วินาที)	จำนวนจุลินทรีย์ ทั้งหมด	จำนวน สปอร์	จำนวน ยีสต์ และรา
1	0			
2	60			
3	180			
4	300			
5	60			
6	180			
7	300			

เนื้อล้าไยอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยเป็นล้าไยอบแห้งเนื้อสีทองที่ผลิตช่วงพ.ศ. 2554 - 2555 เนื้อล้าไยอบแห้งก่อนการทดลองจะถูกเก็บในภาชนะทึบแสง ในบรรจุภัณฑ์แบบ polyethylene ภายในตู้เย็นที่ระดับความเย็น 10 องศาเซลเซียส เพื่อรักษาทั้งคุณภาพทางกายภาพ และจุลินทรีย์ก่อนการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท ตัวอย่างเนื้อล้าไยอบแห้งจะถูกแบ่งออกเป็น 200 กรัมต่อ 1 ทริตเมนต์ กลุ่มตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ชุดควบคุม หน่วยทดลองที่จะผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต และหน่วยทดลองที่จะผ่านการฉายคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้สอดคล้องกับความเหมาะสม และความสะดวกในการใช้งานในการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงใช้ในลักษณะโคมเพื่อควบคุมรังสีให้ตกกระทบกับเนื้อล้าไยอบแห้งภายใต้การสะท้อนของโคมดังภาพ 33 โดยติดตั้งโคมกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ระยะสูงจากถาดสำหรับใส่เนื้อตัวอย่างทดสอบสูง 20 เซนติเมตร ข้อระวังในการใช้งานหลอดกำเนิดยูวี ก่อนการใช้งานต้องมีการอุ่นหลอดยูวีประมาณ 2 นาทีเพื่อเป็นการทดสอบและเพิ่มประสิทธิภาพส่องสว่างของหลอด และต้องมีการทำความสะอาดผิวด้านนอกของหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตอย่างสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกมาเคลือบหลอดกำเนิดรังสีจนเสียประสิทธิภาพการทำงานในการลดเชื้อจุลินทรีย์



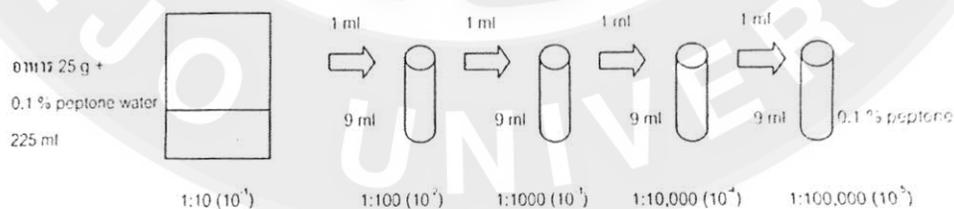
ภาพ 33 ลักษณะของโคมสำหรับฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีที่ใช้ในการวิจัย

การวิเคราะห์ด้านจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

การทดลองในแต่ละทรีตเมนต์จะใช้เนื้อลำไยอบแห้งน้ำหนัก 200 กรัมเพื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีจำนวน 1, 2 และ 3 หลอดโดยใช้เวลาในการฉายในแต่ละหลอดเป็นเวลา 60, 180 และ 300 วินาที หลังจากนั้นเนื้อลำไยอบแห้งจำนวน 50 กรัมจะถูกสุ่มเก็บเพื่อตรวจเชื้อจุลินทรีย์ เช่นเดียวกับการฉายคลื่นไมโครเวฟจะใช้กำลังวัตต์ 1204 วัตต์ในเวลา 60, 180 และ 300 วินาที จากนั้นเนื้อลำไยอบแห้งจำนวน 50 กรัมจะถูกสุ่มเก็บเพื่อตรวจเชื้อจุลินทรีย์ที่รอดชีวิต โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท จะแบ่งการตรวจเป็น 3 ประเภทได้แก่

การตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count)

การเจือจางจะใช้ตัวอย่างเนื้อลำไยอบแห้ง 25 กรัมลงในถุงพลาสติกสำหรับตีบค จากนั้นเท buffered peptone water ปริมาณ 225 มิลลิลิตร จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องตีผสมจนเข้ากันใช้เวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงทำการเจือจางโดยถือให้น้ำตัวอย่างดังกล่าวเป็นน้ำตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^0 จากนั้นจึงการเจือจางที่ระดับ 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} จากนั้นตัวอย่างที่ระดับการเจือจาง 10^0 ปริมาณ 1 มิลลิลิตรลงใน buffered peptone water 9 มิลลิลิตรเป็นเจือจางที่ระดับ 10^{-1} จากนั้นจึงนำน้ำตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตรจากหลอดทดลองที่เจือจางที่ระดับ 10^{-1} ลงสู่หลอดทดลองที่มี buffered peptone water 9 มิลลิลิตร เพื่อเป็นการเจือจางที่ระดับ 10^{-2} และ 10^{-3} จึงเพียงพอต่อการนับเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าว 32 สำหรับการลงเชื้อจุลินทรีย์ จะใช้น้ำตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตรที่ระดับการเจือจางต่าง ๆ ลงบนอาหารแข็ง plate count agar แล้วเกลี่ยให้ทั่วหน้าอาหารแข็งด้วยแท่งแก้วรูปสามเหลี่ยมที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแอลกอฮอล์ 70 เปอร์เซ็นต์แล้วลนไฟ เพื่อให้ตัวอย่างซึมเข้าสู่เนื้ออาหารต้องทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาทีจึงนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

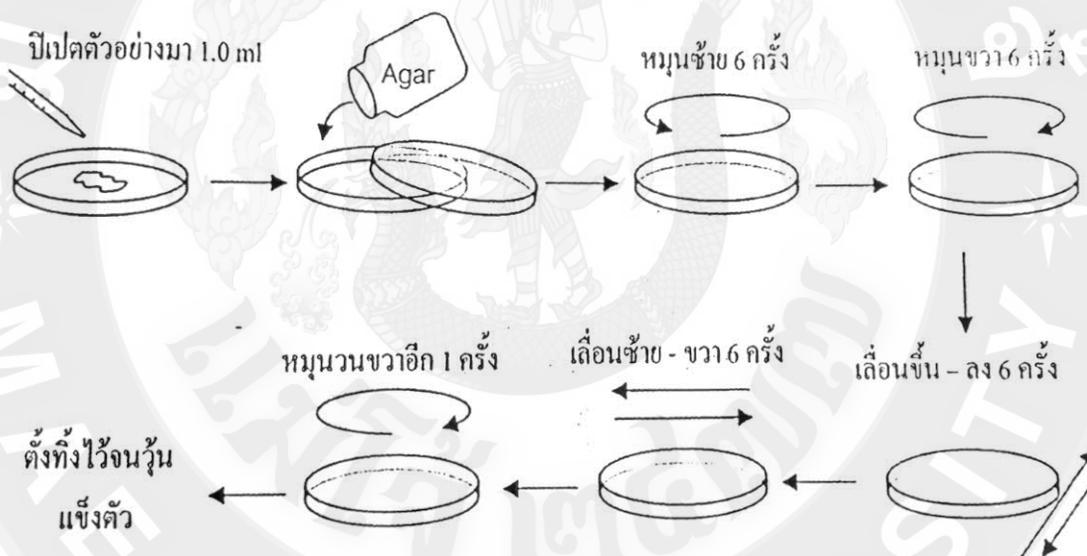


ภาพ 34 การเจือจางที่ระดับ 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} ก่อนการลงเชื้อจุลินทรีย์ลงในจานอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อทำให้ง่ายต่อการนับเชื้อจุลินทรีย์

ที่มา: ธารารัตน์ (2554).

การตรวจสอบสปอร์ (spore forming bacteria)

การตรวจสอบสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้งต้องการการเจือจางเนื้อตัวอย่างด้วยสารละลาย buffered peptone water ปริมาตร 225 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางในระดับความเข้มข้นของน้ำตัวอย่าง ที่ระดับ 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} (1:10) จากนั้นจึงใช้เทคนิค pour plate การตรวจสอบเชื้อสปอร์โดยเปิดน้ำตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตรจากน้ำตัวอย่างที่ผ่านการ จนมีระดับเจือจางที่ 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} จากนั้นจึง pour plate ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA (typticase soy agar) ที่ยังอยู่ในสภาวะหลอมเหลว (อุณหภูมิประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส) ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อแล้วทำการ pour plate เพื่อเป็นการเขย่าผสมเชื้อกับอาหารเลี้ยงเชื้อใส่ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อดังกล่าว 33 ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะทำให้สามารถตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ที่ค่อนข้างไวต่อการเพาะเลี้ยงได้สูง หลังจากที่ลงเชื้อจุลินทรีย์แล้วต้องตั้งทิ้งให้อาหารเหลวแข็งตัว จึงบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยบ่มในลักษณะกลับจานอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อ



ภาพ 35 การ pour plate เพื่อทำให้เชื้อจุลินทรีย์ผสมเข้ากันกับอาหารในจานอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

ที่มา: ธารรัตน์ (2554).

การตรวจสอบจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และรา (Yeast and Mold Count)

ทำการเจือจางตัวอย่างเนื้อลำไยอบแห้งในลักษณะเดียวกันกับวิธี total plate count จากนั้นจึงเปิดน้ำตัวอย่างที่ถูกเจือจางที่ระดับความเจือจางต่าง ๆ มา 0.1 มิลลิลิตรใส่ในจานอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อ PDA (potato dextrose agar) ที่ผ่านการปรับค่า pH แล้วจากการเติม 10 % tartaric acid 1.1 มิลลิลิตรต่อ PDA 100 มิลลิลิตรเพื่อทำให้อาหารเลี้ยงเชื้อมีสภาพเป็นกรดและเหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อยีสต์และราโดยเติมที่อุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้เทคนิค Spread plate ลงบนอาหารแข็งจึงนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วันโดยไม่กลับจานเพาะเลี้ยงเชื้อ และควรทำการตรวจสอบการเจริญของเชื้อทุกวันเพราะโคโลนีของเชื้อรามีการเจริญที่รวดเร็วซึ่งการเจริญดังกล่าวอาจไปทับเจริญโคโลนีอื่น ๆ จนทำให้การนับโคโลนีของเชื้อมีการผิดพลาดได้



ภาพ 36 การ Spread pate ใช้ในการนับเชื้อจุลินทรีย์เป็นเทคนิคที่ทำให้โคโลนีเดี่ยวขึ้นจนง่ายต่อการนับจำนวน

ที่มา: ชารารัตน์ (2554).

การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะเหมาะสมเบื้องต้นสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพล ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟ

การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดทำให้ได้เวลา และความเข้มรังสี (ในรูปของจำนวนหลอดกำเนิดรังสี) ที่เหมาะสมสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท ส่วนการฉายคลื่นไมโครเวฟการวิเคราะห์จะทำให้ได้เวลาที่เหมาะสมในการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทโดยเกณฑ์มาตรฐานเบื้องต้นได้อย่างอิงจากสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549) ดังตาราง 19

การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นจะทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทของอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ โดยสภาวะที่เหมาะสมจากอิทธิพลแยกดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองร่วมระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมร่วมของการลดเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงการพิจารณาในเรื่องสมบัติทางกายภาพ (สี เนื้อสัมผัส และค่าปริมาณน้ำอิสระ) ร่วมด้วย

ตาราง 19 เกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์

ชนิดจุลินทรีย์	ปริมาณที่กำหนด (โคโลนีต่อกรัม)
จุลินทรีย์ทั้งหมด	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
ยีสต์และรา	$< 1 \times 10^4$

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549)

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมร่วมจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นไมโครเวฟสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์

การวิเคราะห์ผลในขั้นต้นทำให้สามารถเลือกปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมร่วมระหว่างการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นไมโครเวฟในการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ปัจจัยแรกคือจำนวนหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ปัจจัยที่สองคือ เวลาที่ใช้ รังสีอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ และปัจจัยสุดท้ายคือ เวลาที่ใช้คลื่นไมโครเวฟในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ สามารถสรุปปัจจัยที่ใช้ในการทดลองดังตาราง 20 โดยค่าเป้าหมาย และค่าขอบเขตสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทให้ ได้มากกว่าการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทในช่วงแรกของการทดลอง

ตาราง 20 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะร่วมที่เหมาะสมสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์

ปัจจัย	จำนวน level	ระดับ		
		-	0	+
1. จำนวนหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต	2	-1		1
2. เวลาที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อ	3	-1	0	1
3. เวลาที่ใช้คลื่นไมโครเวฟในการฆ่าเชื้อ	2	-1		1

ตาราง 21 การออกแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมจากปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองจากการทดสอบภาวะเหมาะสมในเบื้องต้น

หน่วยการทดลอง	ตัวแปรต้น				ตัวแปรตาม					
	จำนวนหลอด กำเนิดรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉายรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉาย คลื่นไมโครเวฟ	จำนวนจุลินทรีย์ (CFU/g)	สมบัติทางกายภาพ					
					จุลินทรีย์ ทั้งหมด	สปอร์	ยีสต์และรา	เนื้อสัมผัส	ค่าสี	ค่า a_w
1	-1	1	-1							
2	1	0	1							
3	1	1	-1							
4	1	1	1							
5	-1	1	1							
6	1	1	1							
7	1	1	-1							
8	1	0	1							
9	1	1	1							
10	1	0	-1							
11	1	-1	-1							

ตาราง 21 (ต่อ)

หน่วยการทดลอง	ตัวแปรต้น			ตัวแปรตาม				สมบัติทางกายภาพ	
	จำนวนหลอด กำเนิดรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉายรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉาย คลื่นไมโครเวฟ	จำนวนจุลินทรีย์ (CFU/g)			เนื้อสัมผัส	ค่าสี	ค่า a_w
				จุลินทรีย์ ทั้งหมด	สปอร์	ยีสต์และรา			
12	-1	1	1						
13	-1	-1	-1						
14	-1	-1	-1						
15	-1	-1	1						
16	-1	1	1						
17	-1	0	1						
18	1	-1	1						
19	1	-1	1						
20	-1	1	-1						
21	-1	0	-1						
22	1	0	-1						

ตาราง 21 (ต่อ)

หน่วยการทดลอง	ตัวแปรต้น			ตัวแปรตาม					
	จำนวนหลอด กำเนิดรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉายรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉาย คลื่นไมโครเวฟ	จำนวนจุลินทรีย์ (CFU/g)			สมบัติทางกายภาพ		
				จุลินทรีย์ ทั้งหมด	สปอร์	ยีสต์และรา	เนื้อสัมผัส	ค่าสี	ค่า a_w
23	1	0	1						
24	-1	-1	1						
25	1	-1	-1						
26	-1	-1	-1						
27	-1	0	1						
28	1	-1	-1						
29	1	0	-1						
30	1	-1	1						
31	-1	-1	1						
32	-1	1	-1						
33	-1	0	1						

ตาราง 21 (ต่อ)

หน่วยการทดลอง	ตัวแปรต้น			ตัวแปรตาม					
	จำนวนหลอด กำเนิดรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉายรังสี อัลตราไวโอเลต	เวลาในการฉาย คลื่นไมโครเวฟ	จำนวนจุลินทรีย์ (CFU/g)			สมบัติทางกายภาพ		
				จุลินทรีย์ ทั้งหมด	สปอร์	ยีสต์และรา	เนื้อสัมผัส	ค่าสี	ค่า a_w
34	1	1	-1						
35	-1	0	-1						
36	-1	0	-1						

การวิเคราะห์สมบัติกายภาพจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟ

เนื้อลำไยอบแห้งหลังจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟจะถูกเก็บในถุงที่ปิดสนิทเพื่อนำไปตรวจสอบสมบัติกายภาพสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางด้านสี เนื้อสัมผัส และค่าออร์เตอร์แอกติวิตีของเนื้อลำไยอบแห้งก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ

การทดสอบคุณภาพด้านสี

ใช้มาตรฐานการวัดตามระบบการวัดสี CIE (Commission International de l'Eclairage) แสดงค่าสเกลสี L^* , a^* และ b^* ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมฐานการวัดของกล้อง 10 องศา (D65/10°) โดยมีการสอบเทียบค่ามาตรฐานของการวัดโดยแผ่นกระเบื้องมาตรฐานทั้งสีขาวและดำ ในการวัดค่าสีของเนื้อลำไยอบแห้งใช้เนื้อตัวอย่างใส่ลงในถ้วยแก้วคริสตัลทรงกระบอก การวางเนื้อตัวอย่างจะต้องเกลี่ยเนื้อตัวอย่างให้เรียบเสมอกัน

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบค่าที่สำคัญของคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสคือค่าความแข็งที่แปรผลมาจาก ค่าของแรงกระทำสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสในรูปแบบของกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (deformation) กับค่าแรงสูงสุด (peak force) ของชิ้นตัวอย่าง ลักษณะการทดสอบใช้แรงกดแบบแทงทะลุโดยหัวกดเป็นสแตนเลสทรงกระบอก (P/2) ความเร็วก่อนกดกระทำต่อชิ้นตัวอย่าง 30 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วหลังสัมผัสกับชิ้นตัวอย่าง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

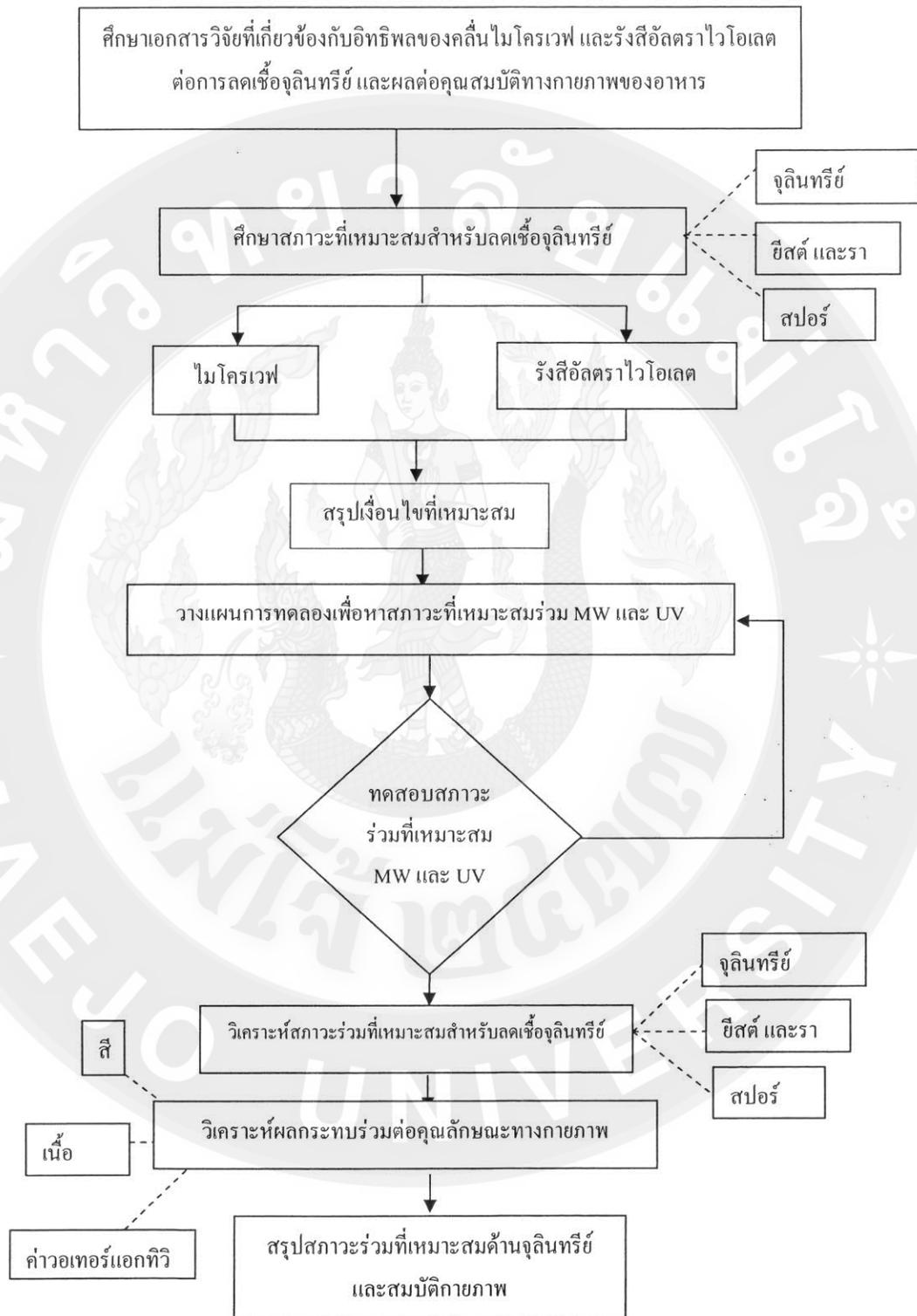
ขั้นตอนการตรวจสอบปริมาณน้ำอิสระที่มีผลกับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งโดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ ก่อนตรวจจะทำการอุ่นเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระทิ้ง 30 นาที จากนั้นตัดเนื้อลำไยอบแห้งเป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ลงในถ้วยสำหรับวัดค่าในปริมาณ 2/3 ของถ้วย (ประมาณ 2-3 กรัม) จึงใส่ในช่องสำหรับวัดค่าและรายงานผลเป็นค่า a_w

สถานที่ดำเนินการวิจัย

การวิจัยและการวัดคุณสมบัติการกายภาพของเนื้อลำไยอบแห้งได้ทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยการแปรรูปผลผลิตเกษตร และห้องปฏิบัติการวัดสมบัติกายภาพของอาหาร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ส่วนการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ เชื้อจุลินทรีย์ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาทางอาหาร สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่



แผนภูมิการดำเนินการวิจัย



ภาพ 37 แผนภูมิการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

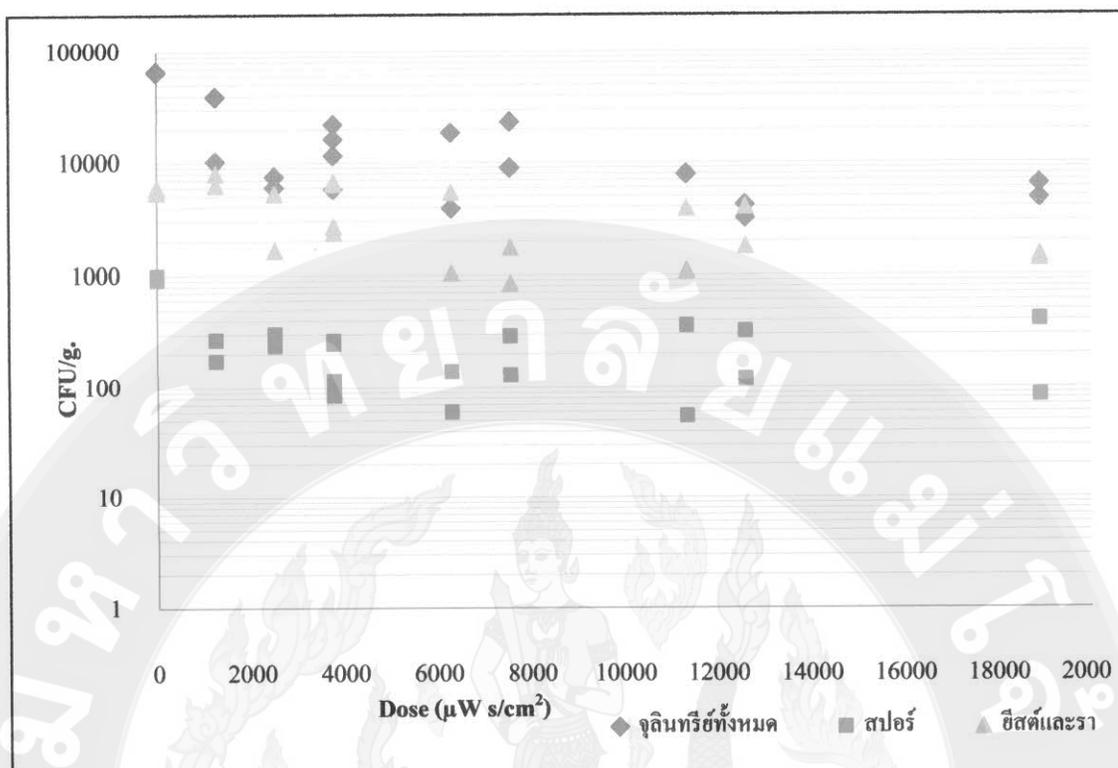
การศึกษาระดับของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟเพื่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็น 2 ส่วน ในเบื้องต้นการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการทดสอบได้แยกผลวิเคราะห์อิทธิพลของการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท (จุลินทรีย์ทั้งหมด สปอร์ ยีสต์และรา) ตามโดยใช้ปัจจัยที่ด้านเวลา และความเข้มข้นของคลื่นแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการวิจัยในส่วนแรกจะมีส่วนในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับทดลองผลในส่วนที่สองของการวิจัย ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินแนวโน้มของผลกระทบร่วมจากคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทต่อคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของเนื้อลำไยอบแห้งมีรายละเอียดดังนี้

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

1. ผลการวิเคราะห์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ จากอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทรังสีอัลตราไวโอเล็ต

1.1. อิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในระดับที่แตกต่างกันมีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

รังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีที่ใช้ในการทดลองจะส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สปอร์ และยีสต์ราในเนื้อลำไยอบแห้ง โดยสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทได้ประมาณ 1 log cycle ซึ่งสามารถแสดงผลการลดเชื้อจุลินทรีย์ได้ดังภาพ 38 กราฟระหว่างจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ (log CFU/g.) และความเข้มข้นของรังสี (dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) กราฟแสดงให้เห็นภาพโดยรวมของการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 จากอิทธิพลของรังสี จำนวนหลอดที่เปิดใช้ในการฉายรังสี ซึ่งถือปัจจัยสำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์



ภาพ 38 จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในระดับความเข้มรังสีที่แตกต่าง

การทดลองเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตเกิดการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยใช้ปัจจัยด้านจำนวนหลอดที่ใช้ในการในรังสีจำนวน 3 หลอดแต่ละดับใช้เวลา 60, 180 และ 300 วินาที ความแปรปรวนเนื่องมาจากอิทธิพลของระดับของปัจจัยหลัก (variance of treatment effects) สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (completely randomized single factor anova) เมื่อพิจารณาความแปรปรวนของข้อมูลเนื่องมาจากการฉายรังสี พบว่าระดับการเปิดหลอดจำนวนหลอดที่ใช้ในการทดลองจะมีผลต่อความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการฉายรังสีมีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งดังนี้

ตาราง 22 แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของระดับจำนวนหลอดกำเนิดรังสีที่มีผลต่อจุลินทรีย์ทั้งหมด ค่าสถิติ P เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันตามนัยยะทางสถิติ การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey method ดังตาราง 23 การเปรียบเทียบเชิงพหุคูณของค่าเฉลี่ยของค่าจุลินทรีย์ทั้งหมดตามระดับการเปิดฉายรังสี แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างการตัวแปรควบคุมและหน่วยการทดลองที่ผ่านการฉายรังสีมีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตาราง 22 ความแปรปรวนเนื่องจากจำนวนหลอดที่เปิดฉายรังสีต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

แหล่งความแปรปรวน	sum of square (second)	Degree of Freedom (df)	Mean square (Ms)	F	P
ระหว่างกลุ่ม	1.5205	3	0.5068	6.02	0.006
ภายในกลุ่ม	1.3479	16	0.0842		
รวม	2.8684	19			

ระดับนัยสำคัญ $p < .05$

ตาราง 23 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของการลดลงของจุลินทรีย์ทั้งหมดจากอิทธิพลของระดับจำนวนการเปิดหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต

ระดับการเปิดหลอดกำเนิดรังสี	จำนวนจุลินทรีย์ (log CFU/กรัม) ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	4.82 \pm 0.0082 ^a
1	4.10 \pm 0.3780 ^b
2	3.85 \pm 0.3021 ^b
3	3.93 \pm 0.1882 ^b

อักษรที่เหมือนกันในแนวคอลัมน์แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ

เช่นเดียวกับผลของอิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีต่อจุลินทรีย์ประเภทสปอร์ ระดับของการเปิดฉายรังสีอัลตราไวโอเลตจะมีผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างชุดตัวแปรควบคุมและหน่วยทดลองที่ผ่านการฉายรังสี ดังแสดงตามตาราง 24

ตาราง 24 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของการลดลงของจุลินทรีย์ประเภทสปอร์จากอิทธิพลของระดับจำนวนการเปิดหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต

ระดับการเปิดหลอดกำเนิดรังสี	จำนวนจุลินทรีย์ (log CFU/กรัม) ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	2.98 \pm 0.0224 ^a
1	2.16 \pm 0.2642 ^b
2	2.34 \pm 0.1917 ^b
3	2.21 \pm 0.3563 ^b

อักขระที่เหมือนกันในแนวคอลัมน์แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05

สำหรับจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และรา การวิเคราะห์ผลการลดเชื้อด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลที่ได้พบว่าอิทธิพลหลักจากการการเปิดฉายรังสีไม่ได้มีผลทำให้ค่าเฉลี่ยการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทนี้ลดลงดังแสดงตามตาราง 25 ในวิเคราะห์ในเบื้องต้นจะบ่งชี้ให้เห็นเพียงความแตกต่างทางสถิติของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์รา

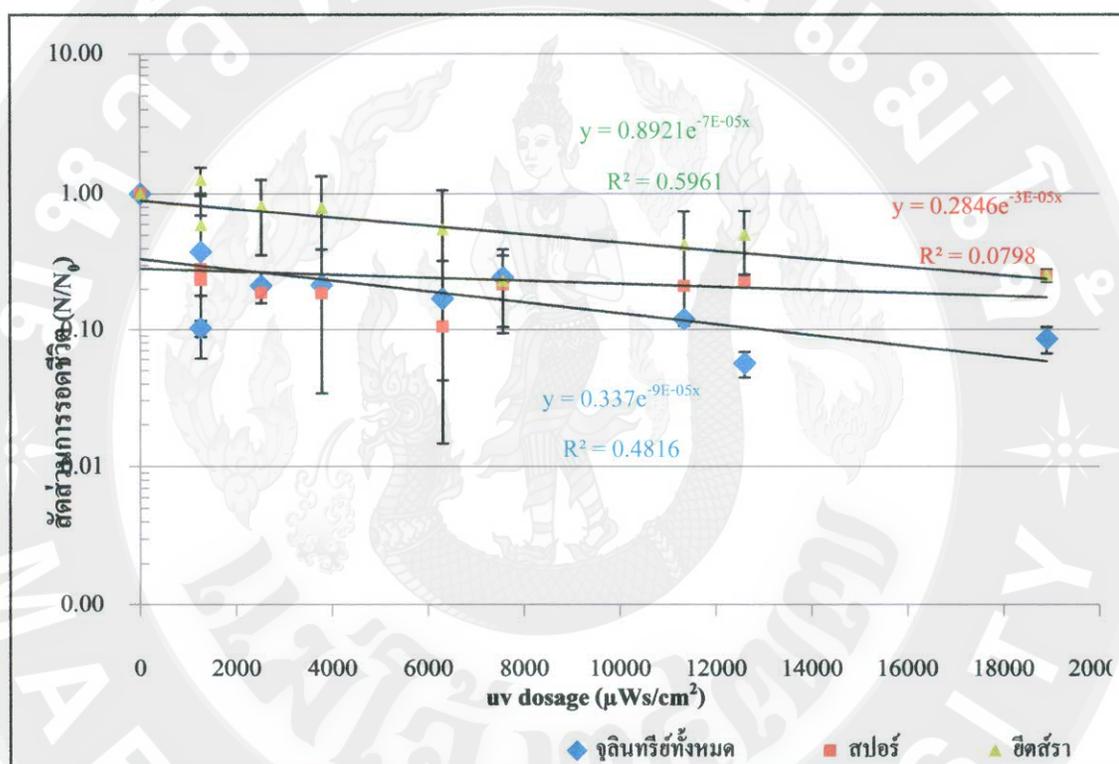
ตาราง 25 ความแปรปรวนเนื่องจากจำนวนหลอดที่เปิดฉายรังสีต่อเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และราในเนื้อลำไยอบแห้ง

แหล่งความแปรปรวน	Sum of square (secend)	Degree of Freedom (df)	Mean square (Ms)	F	P
ระหว่างกลุ่ม	0.4625	3	0.1542	1.69	0.210
ภายในกลุ่ม	1.4617	16	0.0914		
รวม	1.9241	19	-		

ระดับนัยสำคัญ $p \leq .05$

1.2 กราฟอัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในระดับสถานะที่แตกต่างกัน

กราฟอัตราการรอดชีวิต เป็นกราฟที่สร้างระหว่างความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นต่อเชื้อที่คงเหลือ (N/N_0) และผลคูณระหว่างเวลาและความเข้มการฉายรังสีของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) หลังผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทเป็นดังภาพ 33



ภาพ 39 กราฟอัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในระดับความเข้มรังสีที่แตกต่างกันในเนื้อลำไยอบแห้ง

เมื่อนำข้อมูลวิเคราะห์เพื่อหาสมการอัตราส่วนการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) ของข้อมูลพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจะมีอัตราส่วนการรอดชีวิตสัมพันธ์ปริมาณความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ดังสมการ 6

$$\frac{N}{N_0} = 0.337 e^{-9 E - 05 x} \quad \dots(6)$$

โดยที่

N คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ตำแหน่งใดของการฉายรังสี (CFU /g.)

N_0 คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นก่อนการฉายรังสี (CFU /g.)

X คือ ปริมาณความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ซึ่งเป็นคุณระหว่างเวลาและความเข้มของการส่องสว่างของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

สำหรับสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้งเมื่อผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ระดับความเข้มต่าง ๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนการรอดชีวิตที่เปลี่ยนไปตามปริมาณความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) สมการ (7)

$$\frac{N}{N_0} = 0.2846 e^{-3 E - 05 x} \quad \dots(7)$$

โดยที่

N คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ตำแหน่งใดของการฉายรังสี (CFU /g.)

N_0 คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นก่อนการฉายรังสี (CFU /g.)

X คือ ปริมาณความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ซึ่งเป็นคุณระหว่างเวลาและความเข้มของการส่องสว่างของหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ส่วนสมการ (8) แสดงความสัมพันธ์ยีสต์และราในเนื้อลำไยอบแห้งคือ

$$\frac{N}{N_0} = 0.2846 e^{-7E - 05 x} \quad \dots(8)$$

โดยที่

N คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ตำแหน่งใดของการฉายรังสี (CFU /g.)

N_0 คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นก่อนการฉายรังสี (CFU /g.)

X คือ ปริมาณความเข้มของอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ซึ่งเป็นคูณระหว่างเวลาและความเข้มของการส่องสว่างของหลอดอัลตราไวโอเล็ต

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จะพบว่าสัดส่วนของการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดต่อการสัมผัสปริมาณความเข้มของอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{W.s}/\text{cm}^2$) ที่ระดับต่าง ๆ จะมีค่า R^2 เป็น 0.48 เชื้อจุลินทรีย์ประเภทสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้งกราฟสัดส่วนการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อพล็อตต่อค่าปริมาณความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{W.s}/\text{cm}^2$) จะทำให้ค่า R^2 มีค่าเป็น 0.08 สำหรับเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และราค่า R^2 ของกราฟสัดส่วนการรอดชีวิตต่อค่าปริมาณความเข้มของอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{W.s}/\text{cm}^2$) มีค่าเป็น 0.60 การพิจารณาค่า R^2 ของกราฟสัดส่วนการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดทำให้มองเห็นอิทธิพลของเวลาและความเข้มของการส่องสว่างของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (intensity; Ws/cm^2) ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าสัดส่วนการรอดชีวิตของยีสต์และรามากที่สุด มีผลกระทบรองลงมาในจุลินทรีย์ทั้งหมด และมีผลกระทบน้อยมากสำหรับจุลินทรีย์ในระบะสปอร์

1.3 ปัจจัยสำคัญสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในระดับที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทด้วยกราฟอัตราการตายของเชื้อโดยคิดเป็นอัตราส่วนของเชื้อเริ่มต้นต่อเชื้อที่เหลือในแต่ละระดับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามสมการ (9)

$$Deathrate = \text{Log} \left(\frac{N_0 - N}{N_0} \right) \quad \dots (9)$$

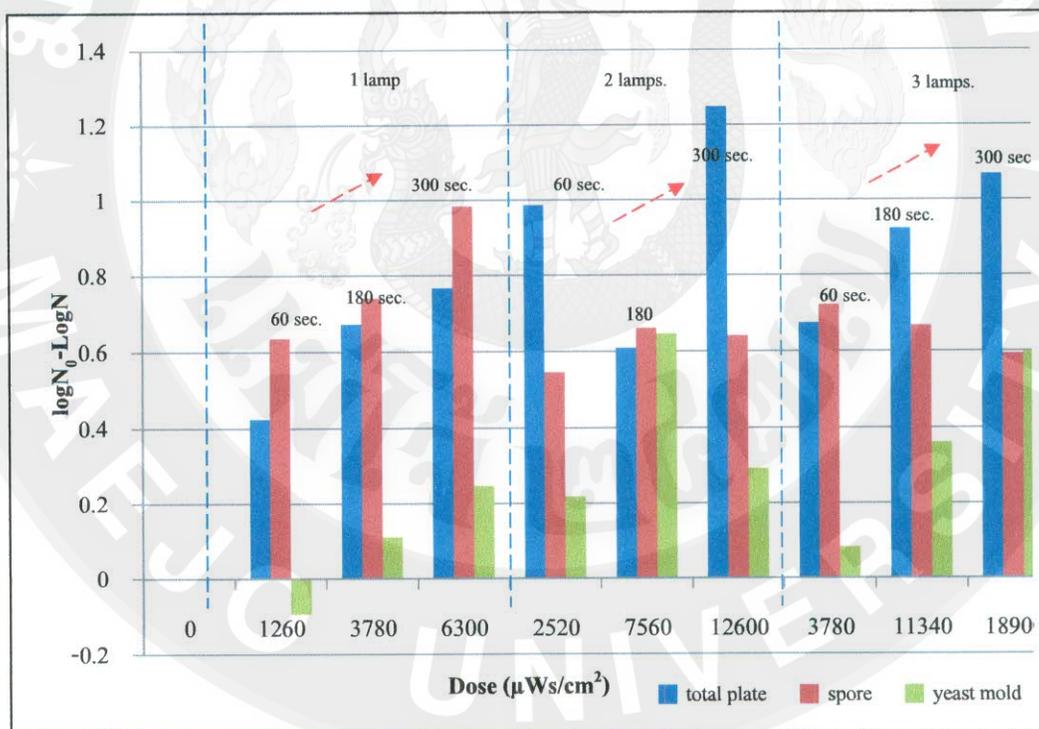
กำหนดให้ N_0 เป็นจำนวนเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทในเนื้อลำไยอบแห้งก่อนการผ่านการฉายรังสี และ N แทนจำนวนเชื้อที่เหลือรอดหลังจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแต่ละทริตเมนต์

พบว่าอัตราการตายจุลินทรีย์แปรผันตามค่าปริมาณความเข้มของอัลตราไวโอเล็ต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ดังภาพ 3 ถ้าพิจารณาผลของปริมาณความเข้มของอัลตราไวโอเล็ตแยกตามจำนวนหลอดที่เปิดขณะการฉายรังสีแก่เนื้อลำไยอบแห้งจะพบว่าอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจะเพิ่มตามเวลาที่เปิดฉายรังสี เมื่อทำการฆ่าเชื้อ โดยจะเห็นได้ชัดเจนเปิดการฉายรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี 1 หลอด อัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจะเพิ่มขึ้นตามเวลา

กล่าวคืออัตราการตายของเชื้อจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากการฉายรังสีเป็นเวลา 60 วินาที 180 วินาที และ 300 วินาทีตามลำดับเวลา และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันเมื่อเปิดฉายรังสีจากหลอดกำเนิดรังสีจำนวน 2 และ 3 หลอด กราฟอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ดังภาพ 34 ทำให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของการทดลองที่สำคัญของการลดเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต คือการให้เวลาในการสัมผัสรังสีของเนื้อลำไยอบแห้งมากขึ้นจะส่งผลกระทบต่อการอยู่รอดของเชื้อเพิ่มขึ้น

กราฟแสดงอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ (ภาพ 40) ยังบ่งชี้ให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับจุลินทรีย์ที่อยู่ในระยะสปอร์การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในอัตราโดสรังสีที่เพิ่มสูงขึ้นผลการลดเชื้อกลับมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์ทั้งหมด และจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และรา ประสิทธิภาพของการลดเชื้อของรังสีอัลตราไวโอเล็ตขึ้นอยู่กับช่วงวงจรชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับจุลินทรีย์ที่อยู่ในระยะสปอร์ซึ่งเป็นระยะในวงจรชีวิตที่จุลินทรีย์ต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีที่สุด การเพิ่มโดส (เวลา และความเข้มของการส่องสว่าง) ในการทดลองนี้ยังไม่เพียงพอต่อการเพิ่มอัตราการตายของสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

ความสำคัญของเวลาสัมผัสแสงอัลตราไวโอเลต (contact time) ต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทแสดงได้เด่นชัดโดยใช้กราฟแท่งแสดงอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง ความสัมพันธ์ปริมาณความเข้มของอัลตราไวโอเลต (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ดังภาพ 40 การให้รังสีอัลตราไวโอเลตแก่เนื้อลำไยอบแห้งในช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้นจะส่งผลให้อัตราการตาย (Death rate) ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการลดเชื้อคือการฉายแสงอัลตราไวโอเลตโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเพียง 1 หลอดจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการลดเชื้อจากการฉายรังสีจากแหล่งกำเนิดแสงที่มากขึ้น การทดลองชี้ให้เห็นว่าการฉายรังสีจากแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 และ 3 หลอด จะทำให้อัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทเกิดความแปรปรวนมากกว่าการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดเนื่องจากคุณสมบัติในการกระเจิงแสงของรังสีที่สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มจำนวนหลอดกำเนิดรังสี ซึ่งการแปรปรวนของเชื้อจุลินทรีย์อาจมีผลทำให้ค่าอัตราการตายเกิดการติดลบได้ภายในกรณีของยีสต์และรา



ภาพ 40 กราฟอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตในระดับความเข้มรังสีที่แตกต่างกันเมื่อพิจารณาแยกในรูปแบบของกราฟแท่ง

1.4 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตแก่เนื้อลำไย อบแห้ง

ระดับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เหมาะสมแก่เนื้อลำไยอบแห้งในการทดลองครั้งนี้พิจารณาจากระดับโดสความเข้ม (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) สามารถแยกเป็นผลคูณระหว่างความเข้มของแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv intensity; $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) และเวลาที่ใช้เนื้อลำไยอบแห้งสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (contact time; second) โดยตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทพิจารณาจากกราฟแสดงผลตอบสนอง (contour plot) ที่สร้างขึ้นระหว่างความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต และเวลาที่ใช้เนื้อลำไยอบแห้งสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยทั้ง 2 ปัจจัยสามารถแบ่งเป็นระดับสูง-ต่ำดังตาราง 26

ตาราง 26 ระดับปัจจัยสำหรับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับที่ใช้ในการทดลอง		
		-1	0	1
1.	uv intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	21	42	63
2.	contact time (second)	60	180	300

การพิจารณาความเหมาะสมของการลดเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทนั้นจะใช้เกณฑ์มาตรฐานมอก. 919-2532 ด้านเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งดังแสดงตามตารางที่ 4 สำหรับเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระยะการเป็นสปอร์ ซึ่งโดยธรรมชาติแล้ว เมื่อมีอาหารมากเพียงพอ จึงจะเจริญเติบโตตามปกติ ในรูปที่เป็น vegetative cell ต่อเมื่ออาหารในธรรมชาติขาดแคลนจะเปลี่ยนรูปแบบเป็น spore ซึ่งจะมีความทนทานต่อสิ่งแวดล้อม สารเคมี และความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น เมื่อจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในอาหารเมื่อผ่านความร้อนก็จะถูกทำลายหมด คงเหลือแต่สปอร์ของแบคทีเรีย (*C.botulinum*) ที่มีความทนทานต่อความร้อน และสปอร์ที่ผ่านความร้อน ก็จะเปลี่ยนรูปเป็น vegetative cell และเริ่มต้นเพิ่มจำนวนในอาหารโดยปราศจากการแข่งขันจากแบคทีเรียอื่น ๆ รวมทั้งมีการสร้างสารพิษ อย่างไรก็ตามสปอร์ของแบคทีเรีย ไม่ได้สร้างสารพิษขณะที่เพิ่มจำนวนในอาหาร แต่จำนวนสปอร์ของแบคทีเรียจำนวนมากที่สะสมในอาหาร เมื่อผ่านเข้าสู่ร่างกายจะสร้างสารพิษก่อให้เกิดปัญหาในร่างกาย

อย่างไรก็ตามจากมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) ได้แนะนำการตรวจหาและ/หรือนับจำนวนจุลินทรีย์ (Detection and/or Enumeration) โดยมากแล้วจะเน้นเซลล์ที่สามารถเพิ่มจำนวนได้อย่างกรณีของจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์ราดังแสดงตามตาราง 27 มิได้เน้นสปอร์โดยตรง ตามที่มกอช. ได้ให้ไว้ในความคิดในกรณีของ สปอร์ของ *C.botulinum* ที่ทนความร้อนเป็นอย่างมาก จึงไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานของจำนวนสปอร์ของ *C.botulinum* แต่กลับเน้นที่กระบวนการให้ความร้อนที่สามารถทำลายสปอร์ของ *C.botulinum* ให้ได้อย่างน้อย 10^{12} หรือ ล้านล้านสปอร์ แทนการกำหนดระดับการปนเปื้อนที่ยอมรับให้มีได้ในอาหาร นอกจากนั้นสำหรับกรณีของสปอร์ของรายังจะมีปัญหาในเชิงการตรวจวิเคราะห์เช่น ระยะเวลาการวิเคราะห์สปอร์นานเกินไป เป็นต้น ดังนั้นจึงมิได้มีการกำหนดมาตรฐานระดับการปนเปื้อนของสปอร์ในอาหาร การทดลองครั้งนี้จึงกำหนดค่าเป้าหมายในการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทโดยรังสีอัลตราไวโอเลตให้อยู่ในช่วง 3.5-4.0 log CFU/g. ($1 \times 10^{3.5}$ - 1×10^4 CFU/g) เท่ากัน

ตาราง 27 เกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์

ชนิดจุลินทรีย์	ปริมาณที่กำหนด (โคโลนีต่อกรัม)
จุลินทรีย์ทั้งหมด	1×10^2 - 1×10^4
ยีสต์และรา	$< 1 \times 10^4$

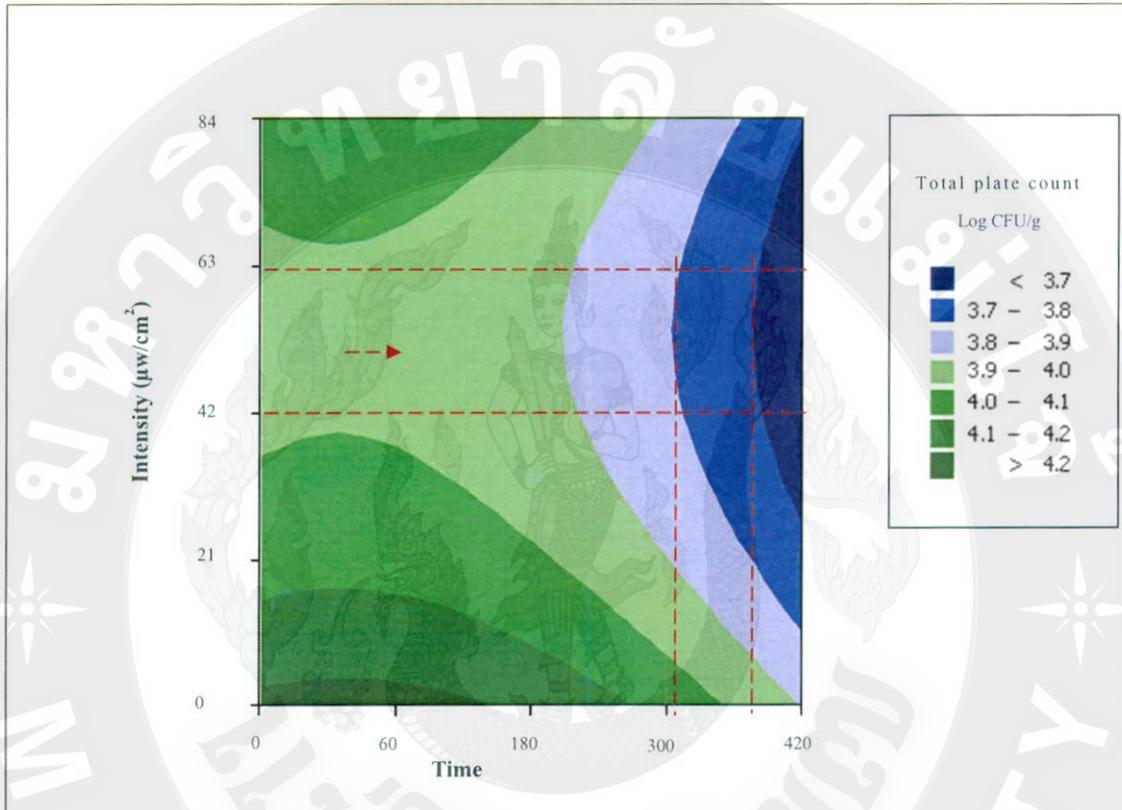
ที่มา : สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549)

ซึ่งสามารถแยกพิจารณาค่าตอบสนองที่สำคัญตามชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดังนี้

1.4.1). ช่วงค่าตอบสนองของปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มสำหรับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตจากกราฟผลตอบสนองระหว่างความเข้มข้นของการส่องสว่างรังสี และเวลาที่ให้ดังภาพ 36 ผลการตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเลตพบว่าการเพิ่มปัจจัยด้านเวลาที่มากขึ้นสามารถที่จะส่งผลกระทบต่ออัตราการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด เมื่อเพิ่มจำนวนการเปิดแหล่งกำเนิดรังสี แต่ช่วงการตอบสนองที่ดีที่สุดต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจะอยู่ในช่วงกราฟที่มีสีม่วง (ช่วง 3.8-3.9 log CFU/g.) น้ำเงินอ่อน (ช่วง 3.7-3.8 log CFU/g.) และน้ำเงินเข้ม (ช่วง < 3.7 log CFU/g.)

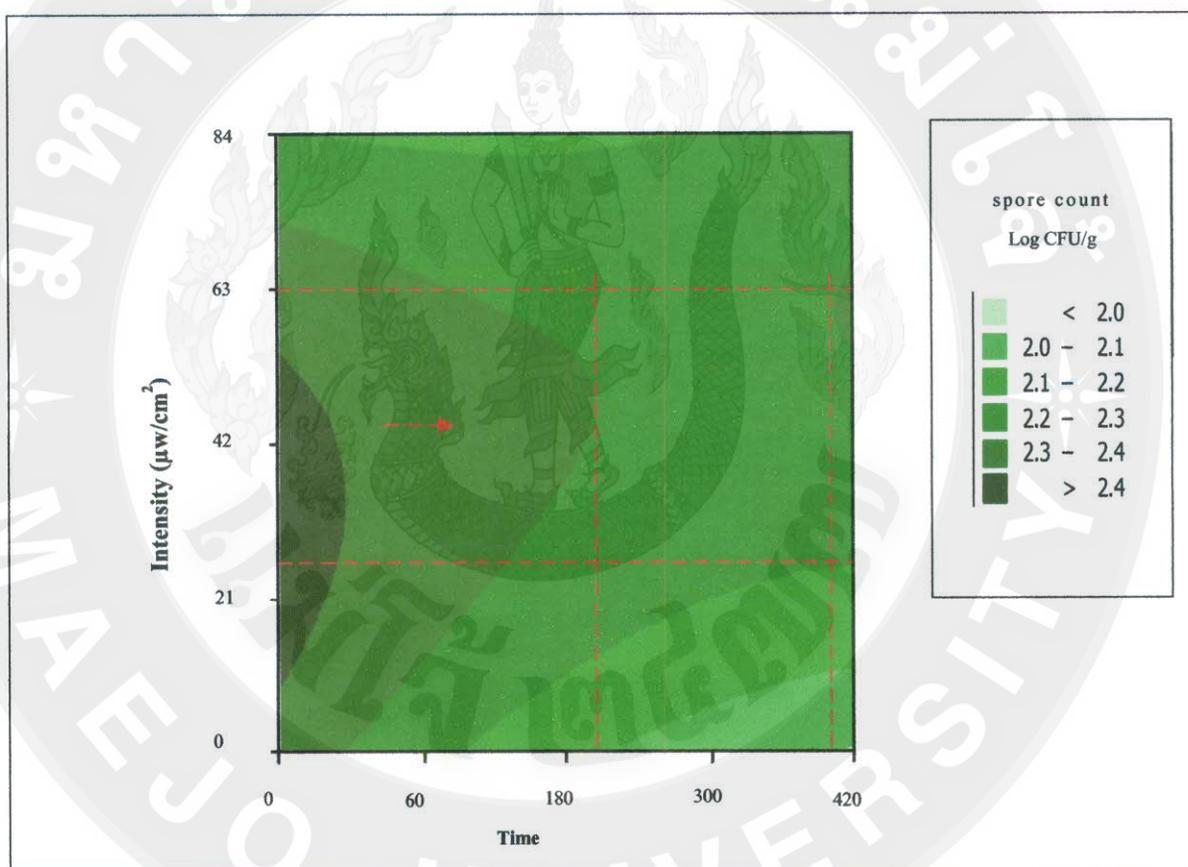
ถ้าพิจารณาค่าของผลการตอบสนองไม่ให้เสี่ยงต่อการหลุดจากช่วงที่กำหนดช่วงกราฟสีน้ำเงินเข้ม (ช่วง 3.7-3.8 log CFU/g.) จะเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงน้อยที่สุดสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ดังนั้นผลการตอบสนองในช่วงที่ดีของการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจึงเกิดจากการการใช้ช่วงความเข้มของการส่องสว่าง 42-63 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ใช้เวลาประมาณ 300-370 วินาที



ภาพ 41 กราฟผลการตอบสนองการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเนื้อลำไย 089
อบแห้ง

1.4.2). ช่วงค่าตอบสนองของปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในระยะสปอร์

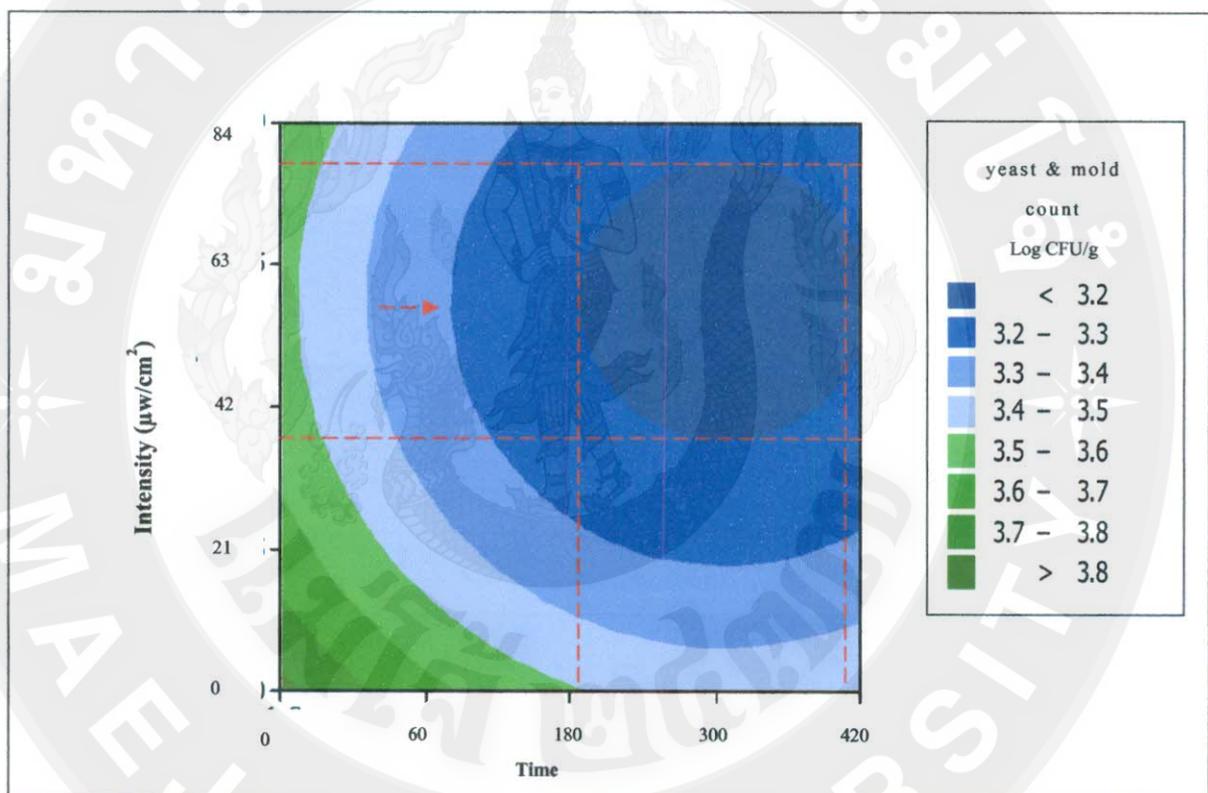
สำหรับจุลินทรีย์ที่อยู่ในระยะสปอร์ค่าของผลการตอบสนองจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเห็นได้ว่าจำนวนสปอร์ค่อนข้างจะอยู่นอกช่วงขอบเขตการลดเชื้อที่กำหนด ถ้าพิจารณาในช่วงที่ทำการฉายรังสีจากความเข้มของการส่องสว่างในช่วง $21-63 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ จะพบว่าสปอร์สามารถลดได้คือในช่วง $2.1-2.2 \log \text{CFU}/\text{g}$. ใช้เวลา $200-400$ วินาที แต่อิทธิพลของรังสีจะน้อยมากเมื่อเทียบกับผลที่มีต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และเชื้อยีสต์รา



ภาพ 42 กราฟผลการตอบสนองการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อเชื้อจุลินทรีย์ในระยะสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

1.4.3). ช่วงค่าตอบสนองของปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ประเภท ยีสต์และรา

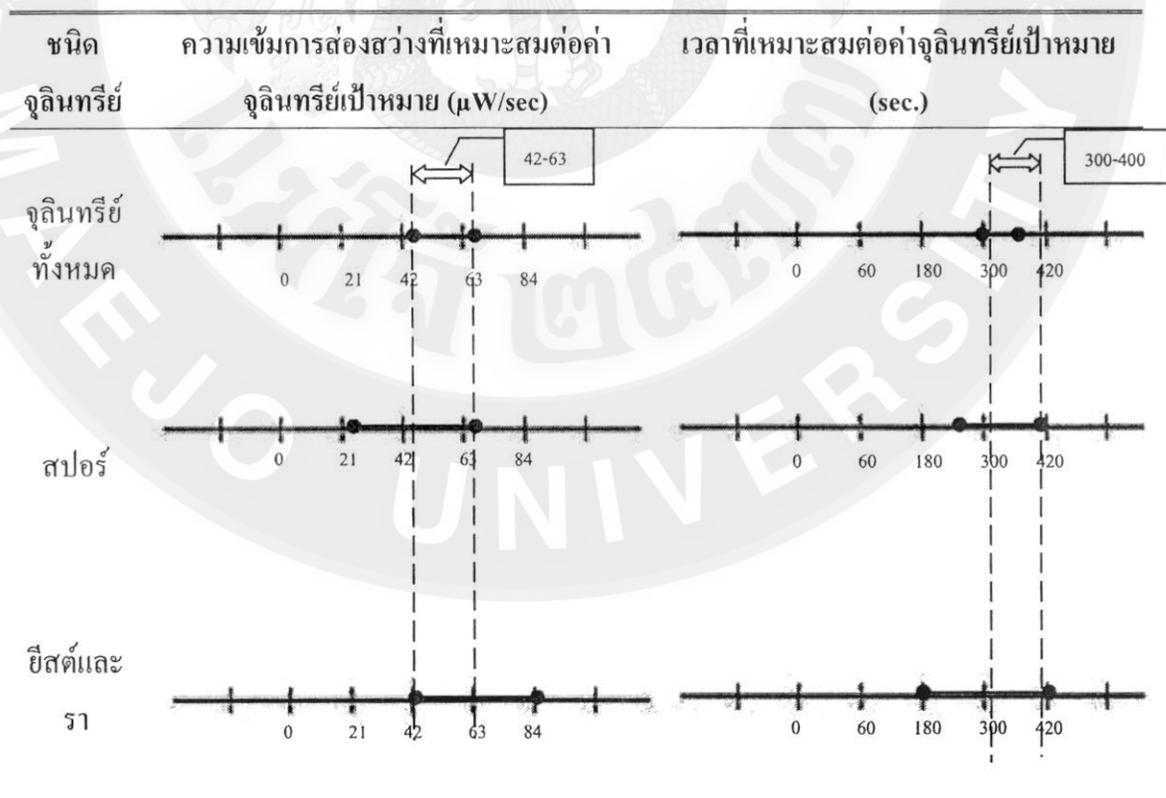
ลำดับสุดท้ายสำหรับจุลินทรีย์ประเภทยีสต์รา จากค่าผลการทดลองตาม ภาพ 38 พบว่าแนวโน้มของการลดเชื้อจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มของการส่องสว่าง และเวลาในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต โดยค่าผลการตอบสนองจากรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถทำให้จุลินทรีย์ประเภทนี้ลดลงได้ดีที่สุดในช่วงน้อยกว่า 3.2 log CFU/g. ซึ่งเป็นผลจากการฉายรังสีจากความเข้มของการส่องสว่างในช่วงประมาณ 42-84 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ใช้เวลาประมาณ 180 – 420 วินาที



ภาพ 43 กราฟผลการตอบสนองการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์ราในเนื้อ ลำไยอบแห้ง

สรุปภาพรวมของค่าการตอบสนองของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทโดยการพิจารณาช่วงการช้อนทับกันของปัจจัยด้านเวลา และความเข้มของการส่องสว่างของหลอดกำเนิดรังสีจากกราฟผลตอบสนอง ทำให้สามารถระบุช่วงความเข้มส่องสว่างของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลกระทบต่อเชื้อทั้ง 3 ประเภทอยู่ในช่วงความเข้มส่องสว่างประมาณ 42-63 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (หรือจากแหล่งกำเนิดรังสี 2 และ 3 หลอด) และผลการตอบสนองของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทยังยืนยันว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการฉายจะมีผลทำให้การลดเชื้ออยู่ในค่าเป้าหมายมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเวลาในช่วง 300-400 วินาทีจะทำให้แนวโน้มของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทอยู่ในช่วงเป้าหมายมากที่สุด (3.5-4.0 log CFU./g. (หรือ 1×10^3 - 1×10^4 CFU./g.)) การเลือกช่วงที่เหมาะสมของทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวสามารถแสดงสรุปตามตาราง 28 โดยที่ช่วงที่เหมาะสมของทั้ง 2 ปัจจัยเป็นเพียงการเลือกที่เหมาะสมตามการลดจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดเท่านั้นยังไม่ได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมในเรื่องของผลด้านลักษณะทางกายภาพ (สี, ค่า a_w และเนื้อสัมผัส) เนื่องจากการทดลองในเบื้องต้นจะเน้นการพิจารณาด้านจุลินทรีย์เป็นหลัก

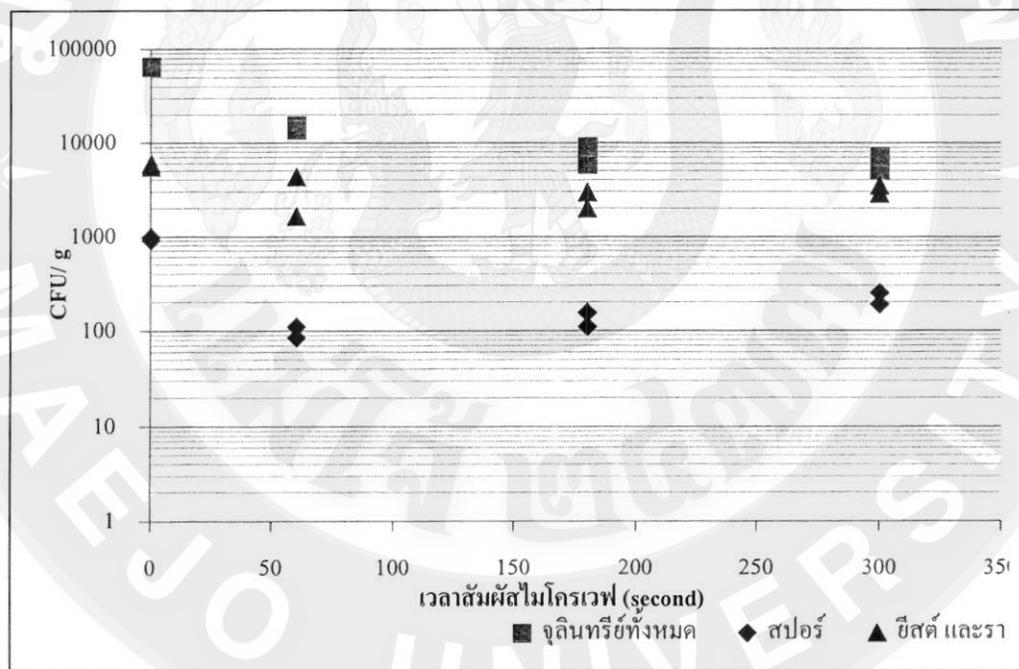
ตาราง 28 สรุปช่วงปัจจัยด้านเวลา และความเข้มของการส่องสว่างที่เหมาะสมต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทในเนื้อลำไยอบแห้ง



2. ผลการวิเคราะห์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ จากอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทคลื่นไมโครเวฟ

2.1) อิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟต่อเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

อิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทคลื่นไมโครเวฟต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์เป็นผลจากความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปยังเนื้อสาร เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเนื้อวัสดุจนกระทั่งมีผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เกิดการบาดเจ็บ และตายของเชื้อดังกล่าว กลไกการลดเชื้อด้วยคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวจะมีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทในเนื้อลำไยอบแห้งโดยรวมดังภาพ 44 และชี้ให้เห็นเด่นชัดว่าคลื่นไมโครเวฟจะมีผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาแยกถึงผลกระทบต่อผลกระทบบนเชื้อจุลินทรีย์ประเภทสปอร์ และยีสต์รา พบว่าช่วงเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟยังมีผลกระทบต่อเชื้อทั้ง 2 ประเภทมากกว่าเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด



ภาพ 44 จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

การพิจารณาความแปรปรวนเนื่องจากอิทธิพลด้านเวลาที่ใช้ในการทดลอง พบว่าค่าเฉลี่ยของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทมีความแตกต่างกัน สามารถพิจารณาความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเชิงซ้อนของการทดลองในจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทด้วย Tukey Method พบว่าอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังตาราง 29 และ 30

ตาราง 29 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ

แหล่งความแปรปรวน	sum of squares (ss)	Degree of Freedom (df)	Mean square (Ms)	F	P
ระหว่างกลุ่ม	13.319	2	6.660	49.13	0.000
ภายในกลุ่ม	2.846	21	0.139		
รวม	16.166	23	-		

ระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$

ตาราง 30 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของการทดลองของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ

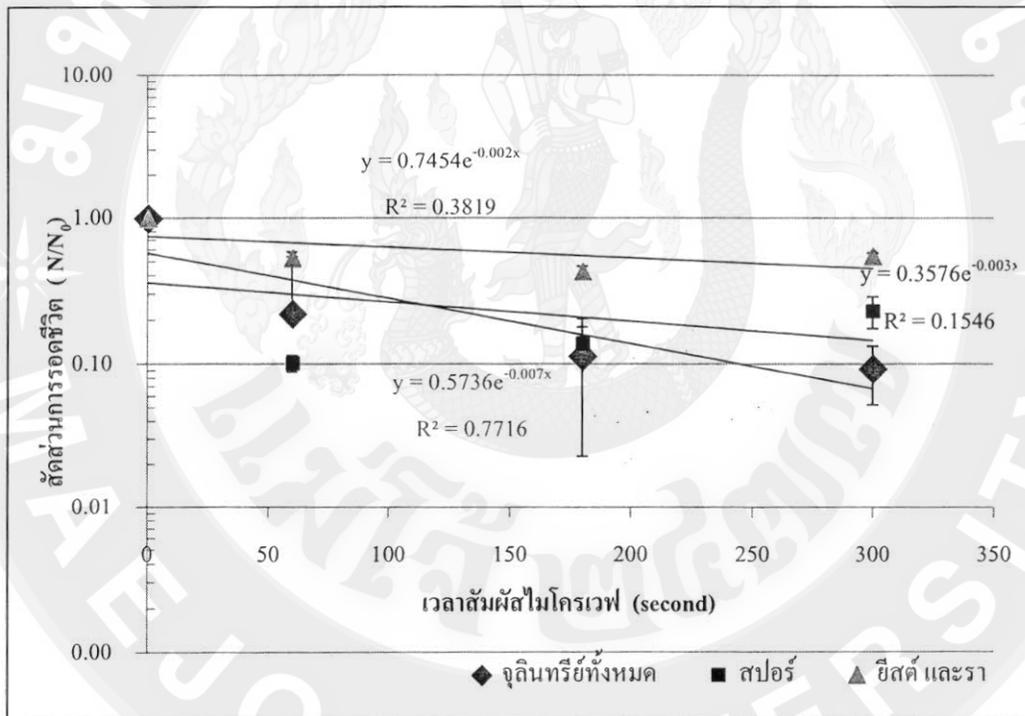
ประเภทจุลินทรีย์	จำนวนจุลินทรีย์ (log CFU/กรัม) ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
จุลินทรีย์ทั้งหมด	4.16 \pm 0.44 ^a
สปอร์	2.36 \pm 0.41 ^b
ยีสต์ และรา	3.52 \pm 0.20 ^c

อักษรที่เหมือนกันในแนวคอลัมน์แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $p <$

0.05

2.2) กราฟอัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ

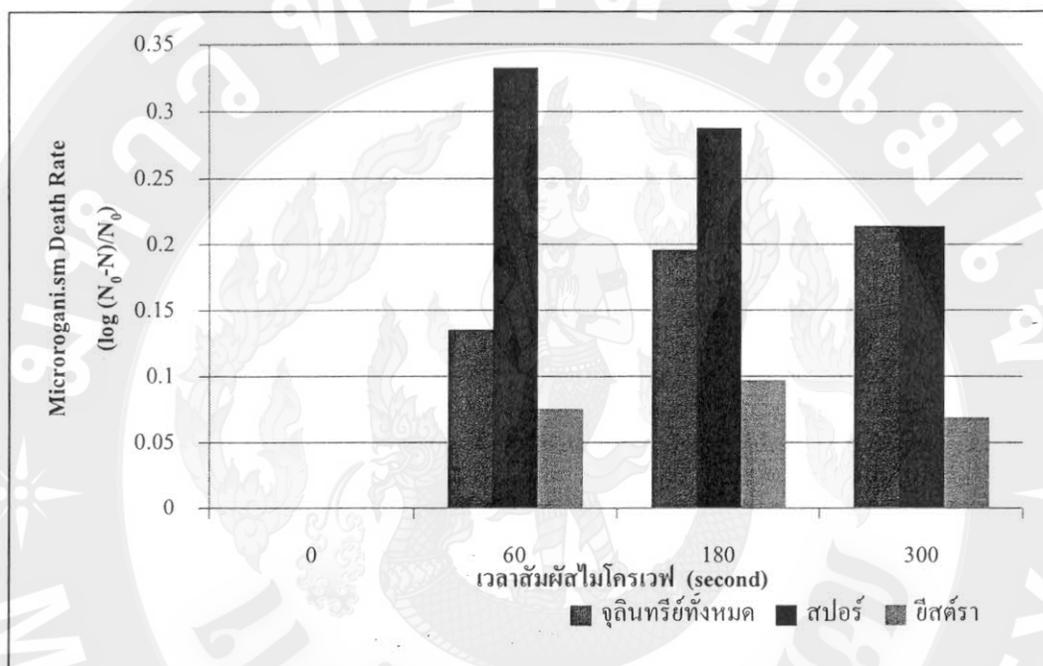
ปัจจัยที่สำคัญต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อสัดส่วนของการรอดชีวิตจุลินทรีย์คือเวลาที่คลื่นจะสัมผัสกับเนื้อลำไยอบแห้งดังภาพ 45 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุด และมีแนวโน้มที่เป็นไปได้ต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง ได้มาจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับเชื้อจุลินทรีย์ประเภทสปอร์และยีสต์ค่า R^2 บ่งชี้ให้เห็นว่าคลื่นไมโครเวฟจะมีอิทธิพลต่อสัดส่วนการรอดชีวิตเชื้อทั้ง 2 ประเภทค่อนข้างน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลในภาพ 45 ที่แสดงให้เห็นว่าคลื่นไมโครเวฟลดเชื้อสปอร์ และยีสต์ได้น้อยกว่า 1 log



ภาพ 45 จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในระดับเวลาที่แตกต่างกัน

2.3) ระดับของปัจจัยด้านเวลาที่เหมาะสมสำหรับการให้คลื่นไมโครเวฟแก่เนื้อลำไยอบแห้ง

การพิจารณาเวลาที่เหมาะสมต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทสามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงอัตราการตายของเชื้อที่แสดงดังภาพ 46 ซึ่งกราฟอัตราการตายของเชื้อจะมีเพียงเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงชีวิตที่เหมาะสมกับการลดเชื้อโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟ



ภาพ 46 กราฟอัตราการตายของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในระดับความเวลาที่แตกต่างกัน

ถ้าพิจารณาช่วงเป้าหมายที่เหมาะสมต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ตรงตามมาตรฐาน มกอช. จึงกำหนดค่าเป้าหมายในช่วง 3.0-4.0 log CFU./g. (1×10^3 - 1×10^4 CFU./g.) เมื่อพิจารณาตามตาราง 31 ทำให้ทราบถึงเวลาที่เหมาะที่ทำให้เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงที่กำหนดคือ 180 และ 300 นาที

ตาราง 31 ผลกระทบของเวลาการให้คลื่นไมโครเวฟที่มีต่อจุลินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ในเนื้อลำไยอบแห้ง

เวลา (วินาที)	ชนิดจุลินทรีย์ (log CFU/g.)		
	จุลินทรีย์ทั้งหมด	สปอร์	ยีสต์และรา
0	4.89	2.98	3.75
60	4.16	1.98	3.47
180	3.87	2.12	3.39
300	3.78	2.34	3.49

จากผลการวิจัยในช่วงแรกจะทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์จากผลกระทบของคลื่นไมโครเวฟ และรังสีอัลตราไวโอเลต จึงใช้เป็นปัจจัยในการกำหนดสภาวะของการทดลองในช่วงที่สองดังตาราง 32

ตาราง 32 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย	จำนวน level	ระดับ		
		-	0	+
1 ความเข้มต่อจำนวนหลอด รังสีอัลตราไวโอเลต ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์	2	42		63
2 เวลาที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์	3	180	300	600
3 เวลาที่ใช้คลื่นไมโครเวฟในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์	2	300		420

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ (ในส่วนตัวที่ 2)

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในเบื้องต้นเป็นข้อมูลสำคัญในการบ่งบอกถึงการเลือกระดับในการออกแบบสำหรับการการวิจัยในส่วนตัวที่ 2 อิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท โดยผลการวิจัยช่วงนี้จะบ่งชี้จุดที่เหมาะสมสำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท รวมถึงบ่งบอกถึงลักษณะสำคัญของการเปลี่ยนแปลงด้านกายภาพ (สี เนื้อสัมผัส และค่าค่ากิจกรรมของน้ำ) ของเนื้อลำไยอบแห้งหลังการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง โดยผลการวิจัยในส่วนต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

3. ผลการเปลี่ยนแปลงด้านจุลินทรีย์หลังผ่านการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ

จากการวิเคราะห์ผลในรอบแรกทำให้สามารถเลือกปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมร่วมระหว่างการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นไมโครเวฟในการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ปัจจัยแรกคือจำนวนหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ จำนวน 2 และ 3 หลอด ปัจจัยที่สองคือ เวลาที่ใช้ รังสีอัลตราไวโอเลต ในการฆ่าเชื้อ เวลา 180, 300 และ 600 วินาที และปัจจัยสุดท้ายคือ เวลาที่ใช้คลื่นไมโครเวฟในการฆ่าเชื้อ ที่ 180 และ 420 วินาที โดยสามารถสรุปปัจจัยต่าง ๆ ที่จะใช้ในการทดสอบเพื่อหาสภาวะร่วมที่เหมาะสมได้ดังตาราง 33

ตาราง 33 สรุปปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบอิทธิพลร่วมรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ

ชนิด เมล็ด	จำนวน หลอด	ความเข้มรังสี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	เวลาดำย UV (sec)	ยูวีโดส ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)	เวลาดำย MW (sec)
1	2	42	180	7,560	300
2	2	42	180	7,560	420
3	2	42	300	12,600	300

ตาราง 33 (ต่อ)

ทรีตเมนต์	จำนวนหลอด	ความเข้มรังสี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	เวลาดำย UV (sec.)	ยูวีโดส ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)	เวลาดำย MW (sec)
4	2	42	300	12,600	420
5	2	42	600	25,200	300
6	2	42	600	25,200	420
7	3	63	180	11,340	300
8	3	63	180	11,340	420
9	3	63	300	18,900	300
10	3	63	300	18,900	420
11	3	63	600	37,800	300
12	3	63	600	37,800	420

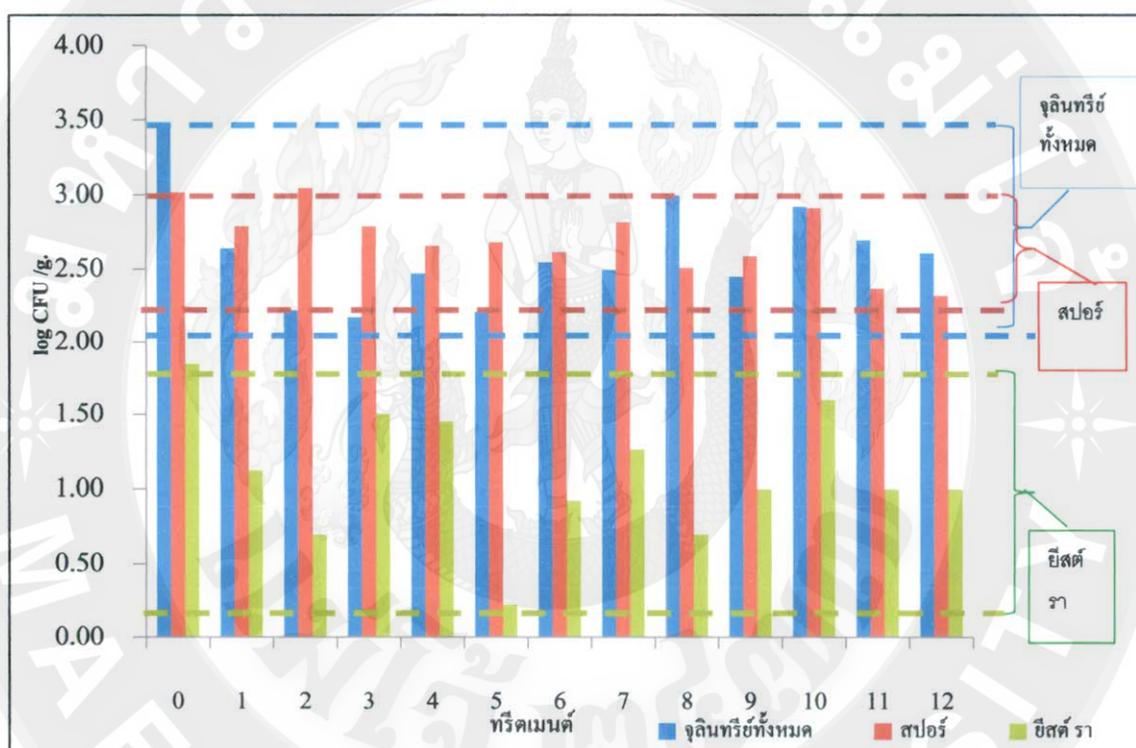
ผลกระทบร่วมระหว่างการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่น ไมโครเวฟต่อเนื่องกัน แก่เนื้อลำไยอบแห้งจะมีผลกระทบต่อจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทแตกต่างกัน เมื่อเทียบจำนวนเชื้อจุลินทรีย์จากข้อกำหนดจากมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ตามตาราง 34 พบว่า การให้เนื้อลำไยอบแห้งสัมผัสกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท อิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท (เฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ซ้ำ) ดังภาพ 47 อิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อเชื้อประเภทเชื้อจุลินทรีย์จำนวนทั้งหมดได้มากกว่า 2 log cycle เช่นเดียวกับการลดเชื้อประเภทยีสต์และราได้สูงสุดถึง 2 log cycle ส่วนอิทธิต่อการลดจำนวนสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้งสามารถลดจำนวนได้มากที่สุดประมาณ 0.5 log cycle

ผลของการลดเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวเป็นผลจากช่วงชีวิตของจุลินทรีย์เป็นหลักที่ส่งผลให้การลดเชื้อประเภทจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์ราได้มากกว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในช่วงสปอร์ที่จัดว่าเป็นช่วงวงจรชีวิตที่จุลินทรีย์ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีที่สุด ตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติพบว่าอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ได้ตามมาตรฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตาราง 34 เกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง

ชนิดจุลินทรีย์	ปริมาณที่กำหนด	
	CFU/g.	Log CFU/g.
จุลินทรีย์ทั้งหมด	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$	2-4
ยีสต์และรา	$< 1 \times 10^4$	<4

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2549)

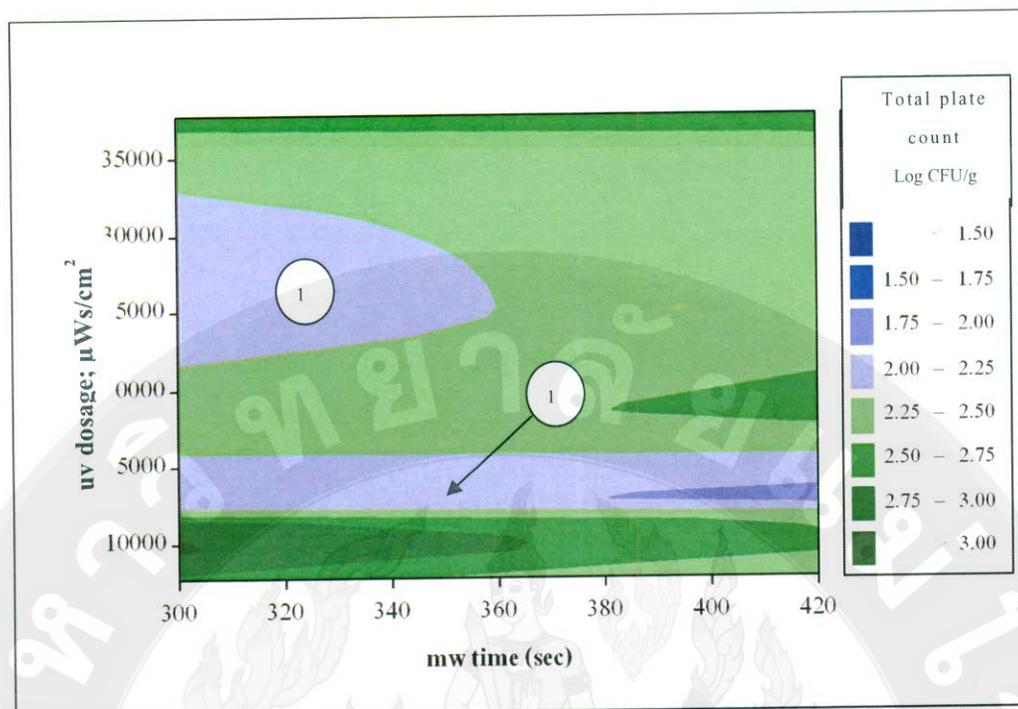


ภาพ 47 ผลกระทบร่วมทางด้านเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท

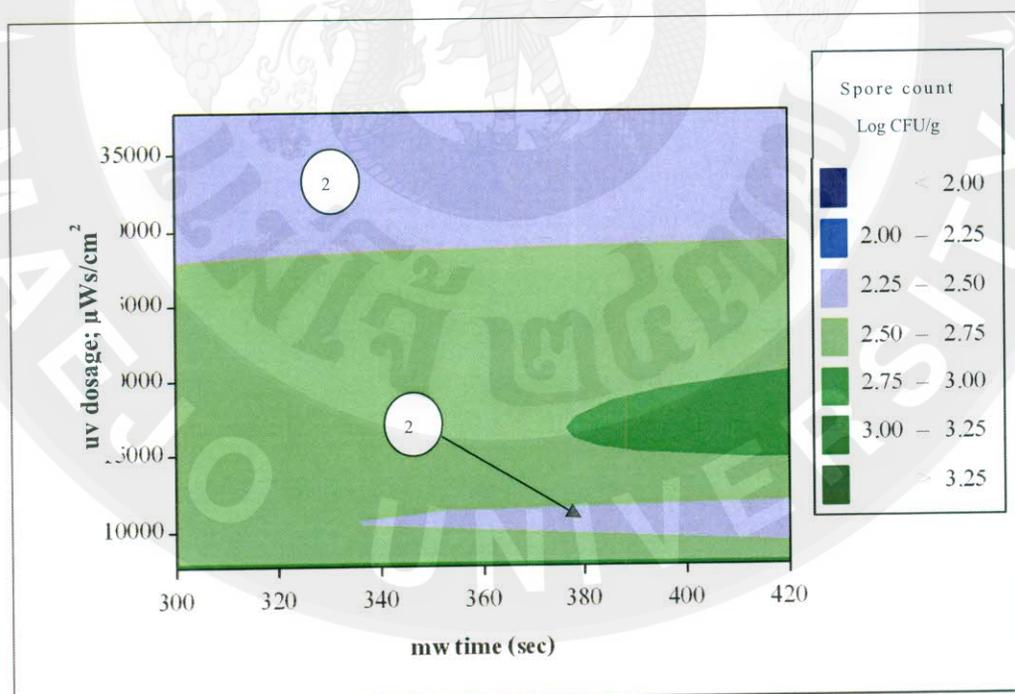
โดยรายละเอียดของผลการศึกษาค้นคว้าผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงได้จากแผนภาพคอนทัวร์ดังภาพ 48-50 แสดงอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตในรูปของโดสความเข้มในการฆ่าเชื้อของรังสี (uv dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) และเวลาในการฉายคลื่น ไมโครเวฟ (second)

จากภาพ 47 ความสัมพันธ์ของการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเนื่องจากอิทธิพลร่วมของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟพบว่าจำนวนเชื้อที่เหลือหลังจากผ่านการทรีตเมนต์ส่วนใหญ่จะเหลืออยู่ในช่วง $\log 2.25-2.5$ และสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ได้สูงสุดได้ในช่วง $\log 2.00-2.25$ สำหรับเชื้อจุลินทรีย์ในสภาพสปอร์นั้นจะพบว่าอิทธิพลร่วมของการฉายรังสีดังกล่าวจะลงผลกระทบต่อจำนวนเชื้อลดลงจนอยู่ในช่วง $\log 2.25-2.75$ และอิทธิพลร่วมยังทำให้ลดสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้งได้สูงสุดถึง $\log 2.25-2.50$

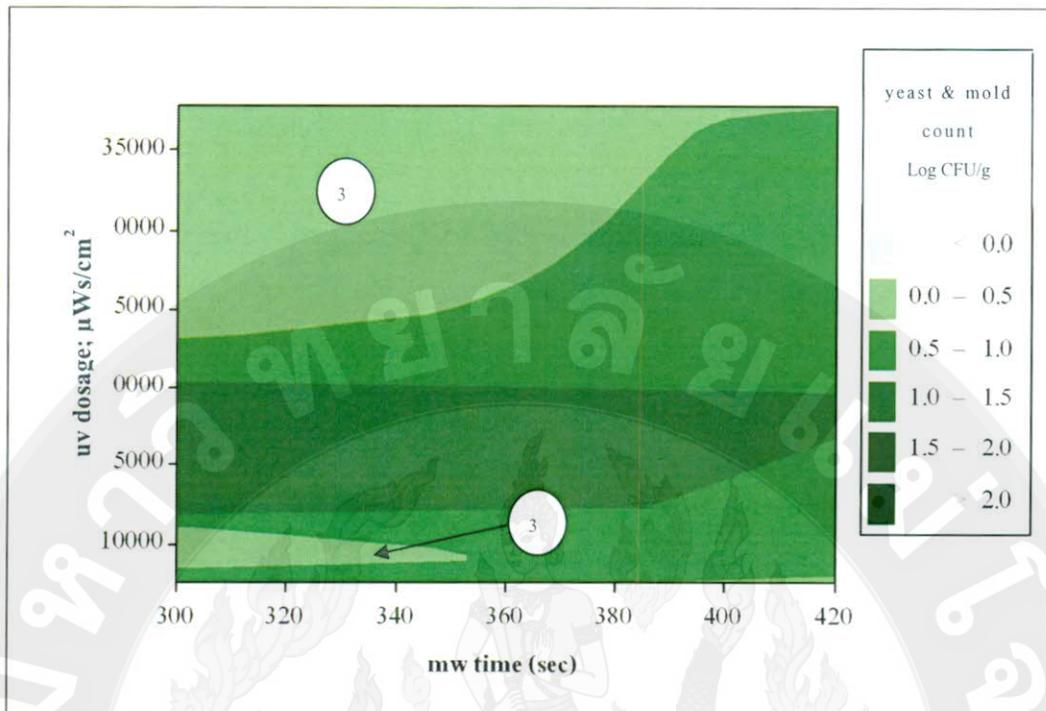
ตามกราฟคอนทัวร์ในภาพ 48 และจะพบว่าอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และราโดยส่งผลให้จำนวนเชื้อที่เหลือรอดหลังการฉายรังสีมีจำนวนในช่วง $0.5-1.0$ จนกระทั่งอัตราการเหลือรอดเป็น 0 เปอร์เซ็นต์ในบางทรีตเมนต์ดังภาพ 49 ซึ่งผลกระทบจากการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟนับเป็นเทคนิคที่ส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทน้อยกว่าข้อกำหนดของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการใช้คลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวจะเสริมประสิทธิภาพในการลดเชื้อจุลินทรีย์โดยรังสีอัลตราไวโอเลตจะส่งผลกระทบต่อสายพันธุ์กรรมของเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนความร้อนจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟเป็นอิทธิพลร่วมที่ส่งผลกระทบต่อกับเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง



ภาพ 48 ผลกระทบร่วมต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท โดยตำแหน่งที่ 1 เป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับการลดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด



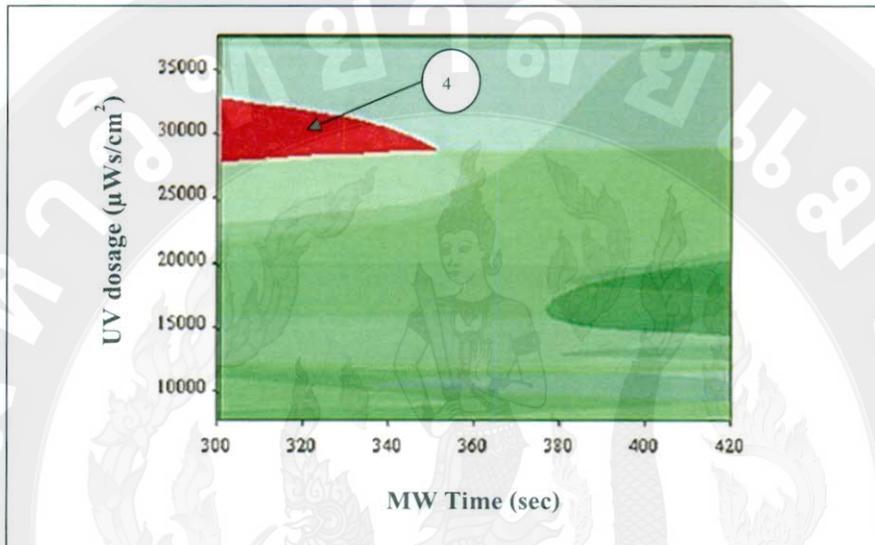
ภาพ 49 ผลกระทบร่วมต่อจุลินทรีย์ที่มีสปอร์ในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทโดยตำแหน่งที่ 2 เป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับการลดจำนวนสปอร์



ภาพ 50 ผลกระทบร่วมต่อเชื้อประเภทยีสต์และราในเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตำแหน่งที่ 3 เป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับการลดจำนวนยีสต์และรา

เมื่อนำกราฟจากอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทมาซ้อนทับกันเพื่อหาจุดที่เหมาะสมร่วมของการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง โดยอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ทั้งหมดโดยผลจากอิทธิพลร่วมจะส่งผลให้จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลง ซึ่งจากกราฟคอนทัวร์ตามภาพ 50 จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่อิทธิพลร่วมส่งผลกระทบมากที่สุดได้ถึงช่วง Log 2.25-2.00 หรือมีช่วงที่เหมาะสมในตำแหน่งที่ 1 สำหรับจุลินทรีย์ในช่วงสปอร์อิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทจะส่งผลให้สปอร์ลดจนอยู่ในช่วง Log 2.25-2.50 ซึ่งช่วงดังกล่าวตามตำแหน่งที่ 2 กราฟคอนทัวร์ดังภาพ 54 และผลของอิทธิพลร่วมดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และราดังภาพ 51 จากกราฟคอนทัวร์แสดงให้เห็นช่วงจุลินทรีย์สามารถลดลงได้สูงสุดในช่วง Log 0.0-0.5 ดังตำแหน่งที่ 3

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการฉายรังสีร่วมในการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทด้วยการซ้อนทับ (overlay) ช่วงดังกล่าวดังภาพ 51 จะพบว่าจุดที่มีการซ้อนทับของช่วงที่เหมาะสมของอิทธิพลร่วมที่เหมาะสมในการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทจะอยู่ในช่วงโคสของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV dosage) ในช่วง 25,000 ถึง 33,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ และใช้เวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟที่ 300-350 วินาที แสดงในตำแหน่งที่ 4



ภาพ 51 ผลกระทบร่วมด้านเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลร่วมจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท โดยตำแหน่งที่ 4 เป็นจุดแสดงสภาวะเหมาะสมร่วมของการลดปริมาณจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท

พิจารณาขอบเขตความเหมาะสมของอิทธิพลของโคสของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV dosage) ที่ 25,000-33,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ ช่วงดังกล่าวเกิดขึ้นได้จากการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตใน 2 กรณี สำหรับโคสของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV dosage) ที่ประมาณ 25,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ เกิดจากอิทธิพลของการเปิดหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้มรังสี 42 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (2 หลอด) ที่เวลา 600 วินาที ส่วนโคสของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ประมาณ 33,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ เกิดจากอิทธิพลของการเปิดหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้มรังสี 63 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (3 หลอด) ที่เวลา 600 วินาที ขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตดังกล่าวชี้ให้เห็นว่านอกจากปัจจัยในด้านความเข้มรังสีที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท

ปัจจัยที่เป็นผลกระทบร่วมในด้านเวลาของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตยังถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้การลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ และเมื่อรับอิทธิพลร่วมจากคลื่นไมโครเวฟจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดเชื้อจุลินทรีย์ได้สูงซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยเบื้องต้นที่ชี้ให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มแนวโน้มในการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตให้เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดเชื้อจุลินทรีย์ได้สูงขึ้น เช่นเดียวกับอิทธิพลการลดเชื้อจุลินทรีย์ของคลื่นไมโครเวฟที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการฉายกับเนื้อลำไยอบแห้ง

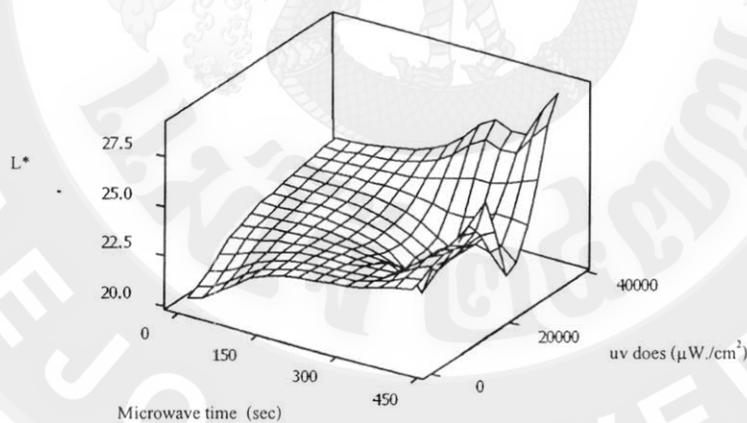
ช่วงที่เหมาะสมในการลดเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลร่วมของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟนอกจะส่งผลกระทบต่อด้านจุลินทรีย์แล้ว ยังส่งผลกระทบต่อด้านลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของเนื้อลำไยอบแห้งดังแสดงดังตาราง 33 โดยส่งผลกระทบต่อารเปลี่ยนแปลงของค่าสีจะพบว่าแนวโน้มของสีทั้ง 3 สเกล (L^* , a^* , b^*) มีแนวโน้มไปทางบวกเมื่อเทียบกับค่าของเนื้อลำไยที่ไม่ผ่านการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงดังกล่าว ทำให้เนื้อลำไยอบแห้งมีแนวโน้มสว่าง และอยู่ในโทนสีแดง-เหลืองเมื่อสังเกตด้วยตา สำหรับค่า a_w หรือปริมาณน้ำอิสระหลังจากผ่านการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทแล้วอิทธิพลร่วมดังกล่าวส่งผลให้ค่า a_w ลดลงจนอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด ส่วนเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถพิจารณาได้จากกราฟในภาพ 55 พบว่าแรงกระทำสูงสุดต่อเนื้อลำไยอบแห้งหลังรับอิทธิพลร่วมจะอยู่ในช่วง 20-25 นิวตัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับชุดควบคุมที่ค่าแรงกระทำสูงสุดที่ 2 นิวตัน แต่เปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับทรีดเมนต์อื่น

ตาราง 35 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเนื้อลำไยอบแห้งจากช่วงเหมาะสมของอิทธิพลร่วมรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ

จำนวน หลอด	ความเข้มรังสี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	เวลาดำย UV (sec)	ยูวีโดส ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$)	เวลาดำย MW (sec)	สี			a_w
					L*	a*	b*	
0	0	0	0	0	20.35±1.0	4.02 ±0.4	6.24 ±0.8	0.68 ±0.0
2	42	600	25,000	300	21.03 ±0.0	5.54 ±0.2	9.19 ±0.7	0.52 ±0.0
3	63	600	33,600	300	26.63 ±0.2	7.07 ±0.2	13.52 ±0.3	0.42 ±0.0

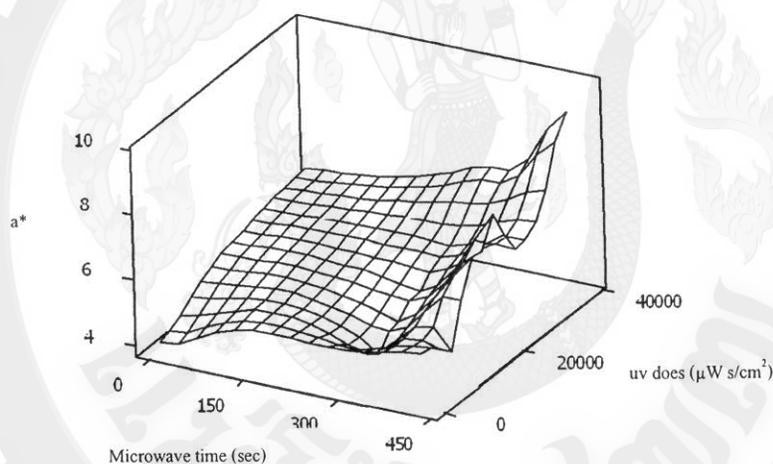
4. ผลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี (ระบบ CIE โดยใช้สเกล L^* , a^* และ b^*) ของเนื้อลำไยอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงด้านสีของเนื้อลำไยอบแห้งสามารถแยกพิจารณาเป็น 3 กรณีตามมาตรฐานการวัดในระบบ CIE ได้แก่ผลกระทบต่อมาตราส่วนสเกลความสว่าง-มืด (ค่า L^*) การเปลี่ยนแปลงสเกลของสีเขียว-แดง (a^*) และการเปลี่ยนแปลงสเกลสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ผลกระทบจากการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองประเภทจะทำให้ค่าความสว่างของเนื้อลำไยอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังภาพ 52 กราฟสามมิติแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ให้คลื่นไมโครเวฟ (second; sec) และความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลต (dose; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ที่ให้แก่เนื้อลำไยอบแห้ง ผลการเปลี่ยนแปลงชี้ให้เห็นว่าค่าความสว่างเริ่มต้นเนื้อลำไยอบแห้ง (ชุดควบคุม) มีค่าที่ 20.3 แต่เมื่อผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้มของการส่องสว่าง $63 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ เป็นเวลา 600 วินาที และฉายคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 420 วินาทีซึ่งเป็นระดับสูงสุดของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง พบว่าค่าความสว่างจะเพิ่มมากที่สุดอยู่ที่ 28.8 ส่วนการเปลี่ยนแปลงของสเกลสีเขียว-แดง และสเกลสีน้ำเงิน-เหลืองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับสเกลของมาตราส่วนค่าความสว่างแสดงดังภาพ 53 และภาพ 54 ตามลำดับ

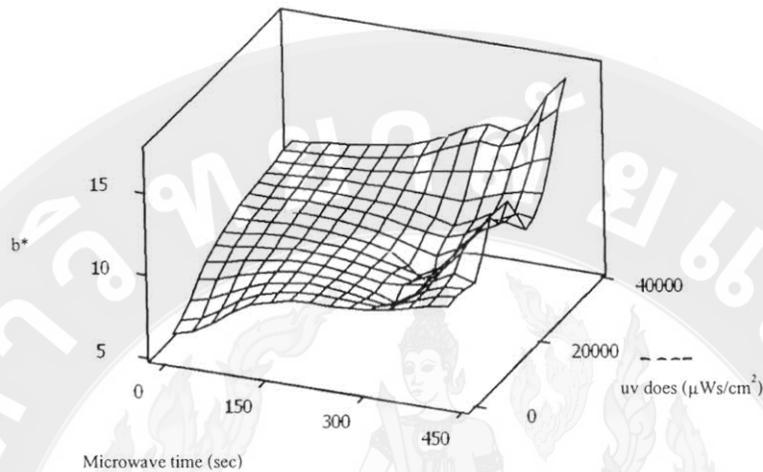


ภาพ 52 กราฟแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสเกลค่าความสว่าง-มืด (L^*) ของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต (uv dose; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) และ คลื่นไมโครเวฟ (sec)

การเปลี่ยนแปลงสเกลสีเขียว-แดงจะเป็นไปดังภาพ 53 กราฟสามมิติแสดงให้เห็นว่าเมื่อทรีดเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงขึ้น เนื้อลำไยอบแห้งจะมีสัดส่วนสเกลของสีแดงที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบในสเกลสีเขียว-แดงของชุดควบคุมพบว่าการเปลี่ยนแปลงสเกลสีเขียว-แดงจะเพิ่มจากระดับ 9.0 จนมีค่ามากที่สุดถึงในระดับ 9.2 ส่วนการเปลี่ยนแปลงด้านสเกลสีน้ำเงิน-เหลืองของเนื้อลำไยอบแห้งเป็นไปดังภาพ 3 กราฟสามมิติพบว่าการฉายคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทจะทำให้สเกลของสีเหลืองเพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองสเกลสีเหลืองมีการเพิ่มจากระดับ 6.2 ในชุดควบคุม จนอยู่ในระดับ 17.1 แสดงให้เห็นว่าหลังการฉายคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทแล้วสีเนื้อลำไยอบแห้งมีแนวโน้มอยู่ในช่วงสีเหลืองเพิ่มขึ้น



ภาพ 53 กราฟแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสเกลสีเขียว-แดง (a^*) ของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (uv dose; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) และคลื่นไมโครเวฟ (sec)



ภาพ 54 กราฟแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสเกลสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) ของเนื้อลำไยอบแห้งจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต (uv dose; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) และคลื่นไมโครเวฟ (sec)

การเปลี่ยนแปลงของสเกลค่าสีทั้ง 3 ประเภท (L^* , a^* และ b^*) เนื่องจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน พบว่าคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ช่วงส่งผลกระทบต่อตรงกับการเปลี่ยนแปลงเม็ดสีโดยเฉพาะบริเวณผิวหนังด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้ง เป็นผลโดยตรงจากอิทธิพลของความร้อนที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลให้ผิวหนังด้านนอกเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เม็ดสีในบริเวณนั้นเกิดการขยายตัวตาม จนกระทั่งสเกลสีของเนื้อวัสดุเกิดแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในเชิงบวก ทำให้ค่าสังเกตที่ได้มีสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับอัตราการฉายคลื่นแม่เหล็กในแต่ละ ทรีตเมนต์ นอกจากนี้อิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภท จะส่งผลกระทบต่อสเกลค่าสี (L^* , a^* and b^*) แล้วยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติกายภาพด้านเนื้อสัมผัส (texture) และค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity) ของเนื้อลำไยอบแห้งอีกด้วย

5. การเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสเนื่องด้วยผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซี และคลื่นไมโครเวฟต่อเนื้อลำไยอบแห้ง

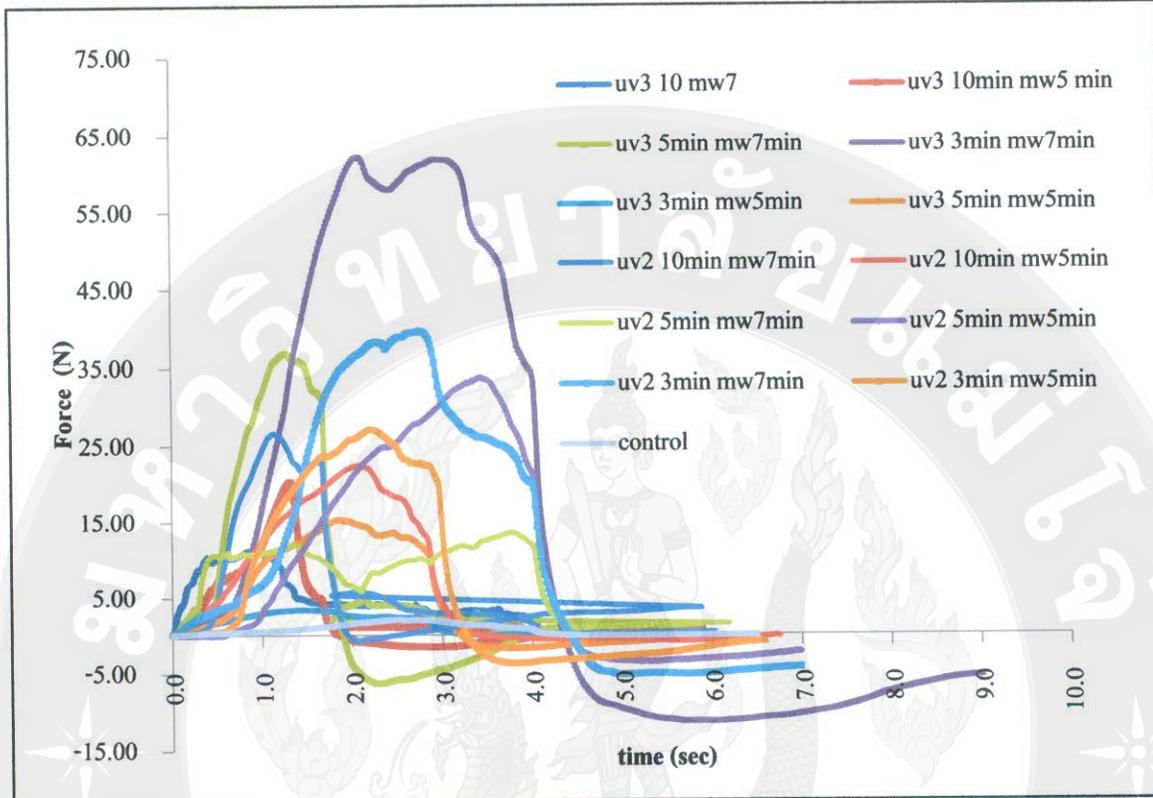
การเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งเนื่องจากอิทธิพลร่วมจากคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทเป็นผลกระทบสืบเนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นทั้ง 2 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน สำหรับลำดับการฉายคลื่นแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองเริ่มจากการให้เนื้อลำไยอบแห้งสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำเป็นผลทำให้เซลล์บริเวณผิวด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจนอยู่ในลักษณะคล้ายการเคลือบแข็ง (coating substrate) บนผิวหนังด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดความชื้นบริเวณผิวด้านนอกที่สัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีจนความชื้นบริเวณนั้นระเหยออกไป จนทำให้เซลล์ด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้งเกิดการจับตัวกันหนาแน่นขึ้น ถ้าใช้มือสัมผัสจะพบว่าผิวด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้งหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตแล้วจะมีลักษณะที่หยาบขึ้นเมื่อเทียบกับเนื้อลำไยอบแห้งในชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Nednapls *at el.* (2011) ที่ทำการฉายรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดต่าง ๆ ลงบนแป้งสำหรับทำขนมปังก่อนนำไปอบ ผลของรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีจะมีผลกับผิวของเม็ดแป้งมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ และชนิดบี และส่งผลต่อการขยายตัวหลังการอบของแป้งขนมปังดังกล่าว โดยพบว่าก้อนแป้งขนมปังที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีจะเกิดการขยายตัวของก้อนแป้งหลังการอบมากที่สุด

หลังจากเนื้อลำไยอบแห้งผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีแล้วเนื้อลำไยอบแห้งในชุดเดียวกันจะถูกให้ความร้อนอีกครั้งโดยคลื่นไมโครเวฟที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่า จึงส่งผลกระทบต่อโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในรูปความชื้นภายในเนื้อลำไยอบแห้งให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำไปตามกระแสคลื่นแม่เหล็กของคลื่นไมโครเวฟจนเกิดพลังงานในรูปความร้อน และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการขยายตัวของเนื้อลำไยอบแห้งเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนดังกล่าว ประกอบกับการมีพื้นผิวแข็งที่เกิดจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีเคลือบวัสดุอยู่ก่อนแล้ว พื้นผิวแข็งดังกล่าวจะเป็นตัวกั้นการเคลื่อนที่ออกของโมเลกุลน้ำที่ร้อนขึ้น เมื่อโมเลกุลร้อนดังกล่าวไม่มีช่องทางระบายออกสู่บรรยากาศด้านนอกจึงขยายตัวเองจนส่งผลให้เนื้อลำไยอบแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส โดยเฉพาะความแข็งที่เพิ่มขึ้นตามการให้คลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทมากขึ้นดังแสดงในภาพ 48 แสดงให้เห็นด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งโดยเป็นผลมาจากการให้สัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากผลกระทบร่วมของการให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเนื่องกัน

ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer) พบว่าเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งแต่ละพรีดเมนต์จะมีค่าแรงที่กระทำต่อเนื้อลำไยอบแห้งแตกต่างจากพรีดเมนต์ควบคุมดังภาพ 55 การฉายคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทต่อเนื่องกันจะส่งผลให้เนื้อลำไยมีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างโดยสามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในรูปภาพของแรงกด (N) แรงกดทำให้สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสได้เป็น 2 กรณีได้แก่เนื้อสัมผัสที่ให้แรงกดกระทำมีค่าเป็นส่วนเส้นกราฟที่มีการติดลบซึ่งแสดงให้เห็นเป็นเส้นกราฟที่มีค่าแรงกระทำต่อเนื้อลำไยอบแห้งน้อยกว่าศูนย์นิวตัน อีกกรณีคือเนื้อสัมผัสที่ไม่ให้ส่วนเส้นกราฟของแรงกดกระทำน้อยกว่าศูนย์ (ไม่มีกราฟติดลบ)

สำหรับกรณีแรกจะพบว่าเส้นกราฟเนื้อสัมผัสที่มีส่วนเส้นกราฟที่น้อยกว่าศูนย์นิวตัน เนื้อตัวอย่างลำไยอบแห้งจะมีเนื้อสัมผัสมีความเหนียวติดกับหั่วกด ส่วนกรณีสองเนื้อลำไยอบแห้งจะไม่ติดกับหั่วกดเมื่อถอนออกจากเนื้อตัวอย่างส่งผลให้แรงไม่มีกราฟเนื้อสัมผัสมีค่าติดลบ โดยทั้งสองกรณีเป็นผลที่สัมพันธ์จากผลของความร้อนระหว่างการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กทั้งสองประเภทที่ส่งผลให้เนื้อสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการฉายคลื่นทั้งสองประเภทในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟเนื้อสัมผัสระหว่างเนื้อลำไยอบแห้งในชุดควบคุมที่พบว่ามีค่าความแข็งที่ 0.3 นิวตันซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภท

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงกราฟเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กพบว่าคลื่นไมโครเวฟจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งมากกว่าอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต จากกราฟ 55 พบว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่ระดับต่ำ 5 นาทีจะทำให้เส้นกราฟของเนื้อสัมผัสเกิดส่วนที่ติดลบ แสดงให้เห็นว่าการให้เวลาในการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่ระดับดังกล่าวจะยังทำให้เนื้อลำไยอบแห้งยังมีความชื้นเหลืออยู่ ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยยังคงความเหนียว แต่การเพิ่มเวลาในการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟในระดับสูงที่ 7 นาทีจะส่งผลให้ความแข็งของเนื้อลำไยอบแห้งสูงขึ้น โดยแสดงผ่านกราฟเนื้อสัมผัสที่ไม่มีส่วนของเส้นกราฟที่ไม่มีส่วนติดลบแสดงให้เห็นว่าเนื้อลำไยอบแห้งที่ผ่านการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่ 7 นาทีจะสามารถลดความชื้นภายในเนื้อลำไยอบแห้งได้สูงกว่าการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่ 5 นาที ส่วนความแปรปรวนของแรงกระทำต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งเป็นผลมาจากธรรมชาติของเนื้อวัสดุ โดยเฉพาะความชื้นในผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลจากความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา

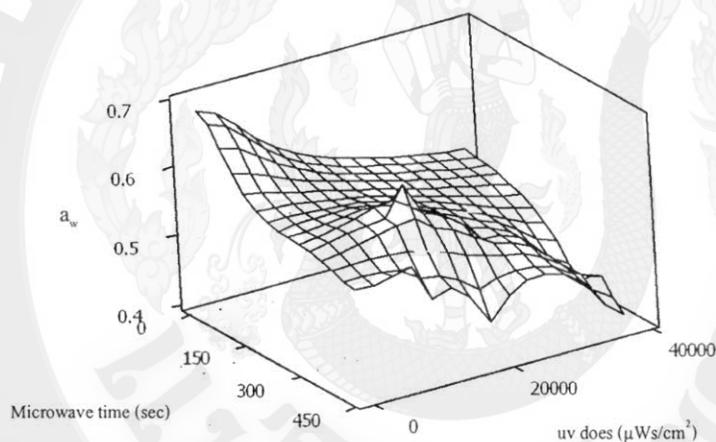


ภาพ 55 กราฟแสดงผลของแรงกระทำ (N) ต่อเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งต่อเวลาในเงื่อนไขการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีเปรียบเทียบกับเนื้อสัมผัสของชุดควบคุมพบว่า การเปลี่ยนแปลงจะเกิดมากที่สุดกับการฉายรังสีจากหลอดกำเนิดรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซี 3 หลอดซึ่งความเข้มของรังสีสูง ส่งผลให้เกิดการระเหยความชื้นบริเวณผิวด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้งได้มาก เมื่อทำการฉายคลื่นไมโครเวฟต่อเนื่องจะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสมากขึ้น แต่การฉายรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตที่ระดับ 2 หลอดต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟในเวลาเท่ากันกลับให้ผลการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสที่น้อยกว่า การรักษาระดับของการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งจึงต้องใช้ในการฉายคลื่นแม่เหล็กในระดับต่ำ สำหรับรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีให้ใช้ระดับของรังสี (dosage; $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) ในระดับต่ำเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสจากผลของคลื่นไมโครเวฟในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

6. ผลของรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของเนื้อลำไยอบแห้ง

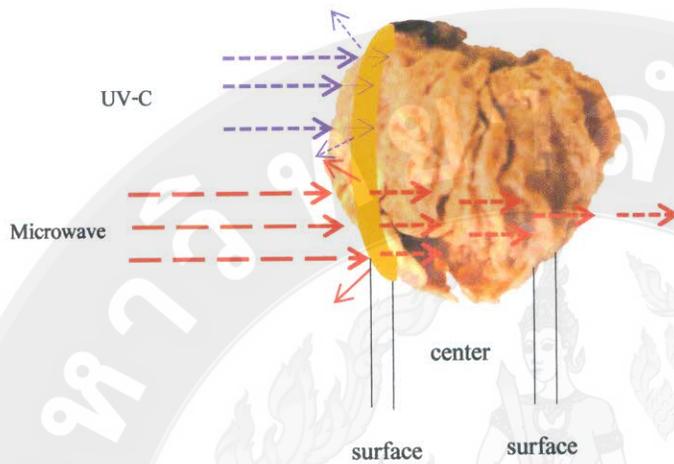
ปริมาณน้ำอิสระ (water activity; a_w) คือปริมาณน้ำในอาหารที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดเจริญได้ในอาหารที่มีค่า a_w ต่างกัน แบคทีเรียเจริญได้ดีในอาหารที่มี a_w สูง ส่วนยีสต์และเชื้อราทนต่อสภาพ a_w ต่ำได้ดีกว่า (ทำให้เชื้อราเป็นสาเหตุของการเน่าเสียในอาหารแห้ง) ทั่วไปอาหารที่มีระดับค่าปริมาณน้ำอิสระ ต่ำกว่า 0.70 จะสามารถระงับการเจริญของจุลินทรีย์ทำให้สามารถเก็บได้นานขึ้น (สุคนธ์, 2546)



ภาพ 56 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณน้ำอิสระในแต่ละทรีตเมนต์เนื่องจากอิทธิพลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟ

นอกจากนี้สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรแห่งชาติแห่งชาติ (มกอช.2538) ได้กำหนดระดับค่าปริมาณน้ำอิสระมาตรฐานของเนื้อลำไยอบแห้งที่ระดับไม่เกิน 0.6 เพื่อลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์รวมถึงช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อลำไยอบแห้ง การทดลองฉายคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทแสดงให้เห็นผลกระทบต่อค่า a_w ของเนื้อลำไยอบแห้งดังภาพ 56 กราฟสามมิติแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างคลื่นไมโครเวฟและรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซี

กราฟสามมิติแสดงผลจากการผสมผสานระหว่างคลื่นไมโครเวฟและรังสีอัลตราไวโอเลตมีส่วนช่วยให้ค่า a_w มีแนวโน้มลดลงตามระดับทรินิเมนต์ โดยผลของการฉายคลื่นแม่เหล็กทำให้ค่า a_w โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.6-0.4 ซึ่งตรงตามข้อกำหนดของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรแห่งชาติ การเปลี่ยนแปลงค่า a_w เป็นผลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอิสระในเนื้อลำไยอบแห้ง การปล่อยให้เนื้อลำไยอบแห้งได้สัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลตและคลื่นไมโครเวฟจะช่วยลดปริมาณน้ำอิสระที่มีในเนื้อลำไยอบแห้งโดยเป็นผลจากการกระบวนการผลิตด้วยการอบแห้งด้วยระบบลมร้อน การส่งผ่านความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กแต่ละประเภทจะมีผลในระดับที่แตกต่างกัน โดยรังสีอัลตราไวโอเลตช่วงความยาวคลื่นชนิดซี จะมีผลต่อการไล่ความชื้นที่บริเวณผิวด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้ง ส่วนคลื่นไมโครเวฟที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงที่มากกว่าจะมีส่วนไล่ความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ เมื่อความชื้น (ปริมาณน้ำอิสระ) ระบายออกโดยผลจากระยะเวลาในการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงส่งผลให้ค่า a_w ลดลงตามลำดับการให้สัมผัสคลื่นแม่เหล็กในทรินิเมนต์ที่แตกต่างกันไปนอกจากนี้กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทดังภาพ 56 ยังแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของการให้โดสของรังสีอัลตราไวโอเลตจะช่วยลดค่าปริมาณน้ำอิสระของเนื้อลำไยอบแห้งดีกว่าอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟ โดยพบว่าการใช้เวลาในการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟสูงสุดในขณะที่โดสของรังสีอัลตราไวโอเลตที่ $0 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ จะช่วยลดระดับปริมาณน้ำอิสระในเนื้อลำไยอบแห้งจนอยู่ที่ระดับ 0.5 แต่การให้รังสีอัลตราไวโอเลตตัวอย่างเนื้อลำไยอบแห้งจะสามารถลดค่าปริมาณน้ำอิสระจะอยู่ที่ระดับ 0.4 การที่อิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีสามารถลดค่าปริมาณน้ำอิสระได้มากกว่าอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตส่งผลกระทบต่อทั้งใน 2 ด้านในด้านแรกคือความชื้นรวมถึงรังสีอัลตราไวโอเลตยังสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ได้โดยตรง ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟนั้นจะมีอิทธิพลหลักเพียงด้านความร้อนที่ส่งผลต่อเนื้อลำไยอบแห้งจนเกิดการลดปริมาณน้ำอิสระได้



ภาพ 57 แผนภาพแสดงแบบจำลองการทะลุทะลวงของรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีแสดงด้วยสัญลักษณ์ ลูกศร -> ส่วนสัญลักษณ์ลูกศร -> แสดงแบบจำลองในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทสามารถปริมาณน้ำอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอิทธิพลร่วมจะใช้ผลการนำพาความชื้นหรือปริมาณน้ำอิสระออกจากเนื้อลำไยอบแห้ง โดยขึ้นกับคุณสมบัติในการทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทแสดงดังภาพ 57 โดยรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำ จึงเป็นตัวนำความชื้นที่บริเวณผิวด้านนอกของเนื้อลำไยอบแห้งออกสู่บรรยากาศ ส่วนคลื่นไมโครเวฟที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงที่สูงกว่าจะเป็นตัวนำพาความชื้นที่ด้านในของเนื้อลำไยอบแห้งออกสู่บรรยากาศภายนอก โดยเนื้อลำไยอบแห้งส่วนใหญ่จะสามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไว้จนเกิดความร้อนสะสมและนำพาออกจากเนื้อวัสดุ และมีคลื่นแม่เหล็กส่วนน้อยที่สะท้อนกลับออกจากเนื้อวัสดุเป็นบางส่วน นอกจากจะนำพาความชื้นออกจากตัววัสดุจนลดสามารถค่า a_w แล้ว ผลกระทบร่วมของคลื่นแม่เหล็กทั้ง 2 ประเภทยังส่งผลให้เนื้อสัมผัส รวมถึงของการเปลี่ยนแปลงด้านจุลินทรีย์ของเนื้อลำไยอบแห้ง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาระดับของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟเพื่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้ง การทดลองเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นผลการวิจัยตามอิทธิพลของการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดโดยใช้ปัจจัยที่ด้านเวลา และความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ส่วนการวิจัยในส่วนที่ 2 เป็นผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินแนวโน้มของผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมทั้ง 2 ประเภทเพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมต่อคุณลักษณะทั้งด้านจุลินทรีย์ และสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของเนื้อลำไยอบแห้ง โดยสามารถสรุปผลการวิจัยรายละเอียดดังนี้

ผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละประเภทจะส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทแตกต่างกัน จากการพิจารณาผลตอบสนองของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภท (จุลินทรีย์ทั้งหมด สปอร์ และยีสต์รา) ในเนื้อลำไยอบแห้ง โดยการเพิ่มปริมาณโดสของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ประเภทยีสต์และรามามากที่สุด รองลงมาเป็นเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และส่งผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ประเภทสปอร์ โดยจะพบว่าค่าช่วงการตอบสนองที่เหมาะสมในการลดเชื้อจุลินทรีย์จากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตนั้นจะอยู่ในช่วงโดสรังสี 12,600-25,200 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ ส่วนการลดเชื้อจากอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 1204 วัตต์เมื่อทำการเพิ่มปัจจัยในด้านเวลาจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ทั้งหมด รองมาเป็นสปอร์ และมีอิทธิพลน้อยที่สุดต่อยีสต์และรา โดยเวลา 300 วินาทีจะให้ค่าการตอบสนองของเชื้อจุลินทรีย์ต่อช่วงคลื่นดังกล่าวได้มากที่สุด

สำหรับผลการศึกษาอิทธิพลร่วมของการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกันต่อเชื้อจุลินทรีย์จะพบว่าช่วงคลื่นของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะอยู่ในช่วง 25,000-33,000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ และเวลาในการฉายคลื่นไมโครเวฟที่ 300 วินาทีจะส่งผลให้จำนวนเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทลดลงสูงสุดได้ถึง 2-2.5 Log ซึ่งช่วงค่าการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพโดยเฉพาะปริมาณน้ำอิสระในเนื้อลำไยอบแห้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.2538) โดยอิทธิพลร่วมของคลื่นแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำสุดที่ 0.4 ส่วนค่าสีอิทธิพลร่วมจะส่งผลให้เนื้อลำไยอบแห้งมีแนวโน้มขึ้นเมื่อเปรียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้อิทธิพลร่วมจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เพิ่มจากชุดควบคุมที่ 10 นิวตันจนเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเป็น 65 นิวตัน

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองประเภทพบว่ามีความเป็นไปได้สำหรับการลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์พื้นฐานในการศึกษาความเป็นไปได้ของอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว ได้แก่จุลินทรีย์ทั้งหมด สปอร์ และยีสต์ราในเนื้อลำไยอบแห้ง แต่มาตรฐานฐานสินค้าเกษตรและอาหาร (มกอช. 2459) ยังได้กำหนดกฎเกณฑ์สำหรับมาตรฐานด้านจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งเพิ่มเติม ซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญที่สามารถระบุความสะอาดของสถานที่ผลิต รวมไปถึงความอันตรายต่อการบริโภค จึงน่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นไมโครเวฟต่อเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าว



บรรณานุกรม

- กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์. 2534. กระบวนการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร.
คณะเทคโนโลยีการเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
153 น.
- กองวิศวกรรมการแพทย์. 2548. ริงส์อัลตราไวโอเลต. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://203.157.80.3/education/> (2 สิงหาคม 2553).
- คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2553. เทคโนโลยีเซอร์
เคิล (Hurdle technology). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://agi.nu.ac.th/amis/download/publication/120.file.pdf>. (22 พฤษภาคม 2553).
- จาดุงศ์ วาฤทธิ์ และคณะ. 2551. เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศแนวตั้งเพื่อการอบแห้ง
ผลผลิตเกษตร. เชียงใหม่. สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 61น.
- ทักษอร บุญชู. 2547. ผลของรังสี UV-C รังสีแกมมา และวิธีการบรรจุ ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ
รา *Aspergillus flavus* และการปนเปื้อนของแอฟลาทอกซิน B1 ในข้าวกล้องพันธุ์ขาว
ดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บ
เกี่ยว. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 98 น.
- ทศวรรษ ปัญญาบุตร. 2549. การอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 175 น.
- เทวี คุ่มวงศ์ และสิริชัย ส่งเสริมพงษ์ มปป. ผลของสารชะลอการเกิดริโทเกรเคชันในข้าวสำเร็จรูป
พร้อมรับประทานบรรจุกระป๋อง. กรุงเทพฯ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการ
อาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธารรัตน์ ชื่อดอฟ และกรพกา อรรถนิตย์. 2554. คู่มือประกอบการคู่มือประกอบการศึกษาจุล
ชีววิทยาทางอาหาร ภาคปฏิบัติ. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร.
เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 99น.
- ธงชัย พุฒทองศิริ. 2546. การเก็บรักษาเส้นก๋วยเตี๋ยวสดโดยใช้เทคโนโลยีเซอร์เคิล. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 135 น.
- นุชจรินทร์ บุญธรรม. 2538. การทำลายผลของหนอนเจาะข้าวผลลันจี่และลำไย. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 112 น.

- ประสิทธิ์ แก่นแก้ว. 2548. ผลของออกซิเจนและค่าอาร์เตอร์แอกทีวิตีต่อคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง ระหว่างการเก็บรักษา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 278 น.
- เพชรรัตน์ ใจบุญ. 2549. การศึกษาการเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 169 น.
- ภูมิชาญ สิงห์รัตน์. 2546. การศึกษาผลของเทคโนโลยี hurdle ด้วยวิธีการไมโครเวฟ และ/หรือการ ตัดแปรสภาวะบรรยากาศต่อการเหลือรอดของเชื้อจุลินทรีย์ *Bacillus cereus*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 159 น.
- มนัสวี สุกุลแก้ว. 2546. การปรับปรุงระบบกระจายอากาศของเครื่องอบแห้งลำไยแบบกะเปาะเปลือก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 134 น.
- รพีพร สุทาธรรม. 2543. ผลไม้: ถูทางตลาดลำไยอบแห้งของไทย. Food-Insight. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันอาหาร.
- วัชรินทร์ ปิยะรัตน์. 2531. การให้ความร้อนในระบบไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหาร. 18(1): 41-47น.
- สาวิตรี วัฏญูไพศาล. 2538. การใช้เตาอบไมโครเวฟทำลายเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในอาหารเลี้ยงเชื้อ ในห้องปฏิบัติการ. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร. สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 51 น.
- สาวิตรี วัฏญูไพศาล. 2548. ผลของการให้ความร้อนด้วยเตาอบไมโครเวฟต่อการทำลายเชื้อ *Listeria monocytogenes* ในเนื้อวัวบดที่มีการเติมสารปรุงแต่งรสอาหาร. ว.วิชาการพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ 13 (4): 164-169.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2547. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 528 น.
- สินชัย โตโส. 2533. เตาไมโครเวฟ. สมอ สาร 18(180): 3-11น.

สิริวัฒนา จิตตรีพล. 2540. การตรวจสอบจุลินทรีย์ในน้ำตาลทรายขาวและผลของการทำลายโดย
อัลตราไวโอเลตในน้ำเชื่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

130น.

สุรภา จิระสันติกุล. 2548. ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ของเนื้อลำไยอบแห้งที่
ผลิตในจังหวัดเชียงใหม่ และลำพูน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาเทคโนโลยีการ
 อาหาร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 135น.

สุชาดา ศรีเพ็ญ และสรัญญา วัชรโรทัย. 2545. **กายวิภาคผลไม้**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
http://botany.sci.ku.ac.th/learn/student.php?lesson=lesson13&lesson_id=13 .
 (25 กุมภาพันธ์ 2553).

สมคิด ใจตรง นิธยา รัตนาปนนท์ และคนัย บุญเกียรติ. 2548. ลักษณะทางกายวิภาคของผลลำไย.
 ใน การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 5. 26-29 เมษายน ณ โรงแรมเวลคัม
 จอมเทียนบีช พัทยา จังหวัดชลบุรี. 55 น.

สมบัติ สิงฆราช. 2551. **การพัฒนาวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตลำไยอบแห้งเนื้อสีทอง**. การจัดการความรู้
 ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อพัฒนาวิสาหกิจชุมชนในการผลิตลำไยอบแห้งเนื้อสีทองของกลุ่ม
 วิสาหกิจชุมชนบ้านเมืองแก้ว หมู่ 5 ต.มะเขือแจ้ อ.เมือง จ.ลำพูน. คณะวิทยาการจัดการ.
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. 14 น.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ๒๕๕๐. **มผช.๑๓๘๕/๒๕๕๐**. [ระบบออนไลน์]
 แหล่งที่มา <http://www.tisi.go.th/cgi-bin/otop/stdsearch.pl>. (27 ธันวาคม 2550).

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2549. **เนื้อลำไยสดอบแห้ง (มอช. 8-2549)**.
 [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.mof.or.th/food_standard/dried_longan_flesh.pdf (11 มิถุนายน 2553).

อัมรา ชินภูติ และประวีติ ต้นบุญเอก. 2543. การวิเคราะห์การ ปนเปื้อนของสารอัลฟลาทอกซินใน
 ผลผลิตเกษตร โดยวิธี ELISA และวิธีการลดปริมาณสารพิษ. ใน การประชุมวิชาการ
 กองโรคพืช และจุลชีววิทยา. 8-10 มีนาคม 2543. ณ โรงแรมลองบีช เพชรบุรี, 10 น.

- อรรถกร คำธิตา. 2529. จดศาสตร์ของการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี. 93 น.
- อุยามาส วังชัยสุนทร. 2547. คุณภาพอาหารทางจุลชีววิทยาคืออะไร (what is the Microbiological quality of food). วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย. 24, 2 (พฤษภาคม-สิงหาคม).
- อุดม สิทธีการุณ. 2004. หลอดไฟพิเศษในงานพิเศษ ระบบแสงยูวีฆ่าเชื้อโรค. สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.TIEA.net. (2 สิงหาคม 2552).
- Basaran, P. and Ü. Akhan. 2010. Microwave irradiation of hazelnuts for the control of a aflatoxin producing *Aspergillus parasiticus*. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 11: 113-117.
- Coote, P.J., C.D. Holyoak, and M.B. Cole. 1991. Thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* during a process stimulating temperature active during microwave heating. **Journal of Applied Bacteriology**. 70: 489-494.
- Craven, S.E and H.S. Lillard. 1991. Effect of microwave heating and precooked chicken on *Clostridium perfringens*. **Journal of Food Science**. 39: 211-212.
- Erkan, M., C.Y. Wang and D.T. Krizek. 2001, UV-C irradiation reduces microbial population and deterioration in *Cucurbita pepo* fruit tissue. **Environmental and Experimental Botany**, 45 : 1-9.
- Fruin, J.T. and L.S.Gutherstz. 1982. Survival of bacteria in food cook by microwave oven, conventional oven and slow cookers. **Journal of Food Protection**. 45(8): 695-698.
- Fung, D.Y.C. and F.E.Cunningham, 1980. Effect of microwave on microorganisms in food. **Journal of Food Protection**. 43(8): 641-650.
- Goldblith, S.A. and D.I.C.Wang. 1998. Effect of microwave on *Escherichia coil* and *Bacillus subtilis*. **Applied Protection**. 43(8): 641-650.
- Heddleson, R.A., S. Doores. and R.C. Anantheswaran. 1994. Parameters affecting destruction of *Salmonella* spp. By microwave heating. **Journal of Food Science**. 59(2): 447-451.

- Kowski, W. 2009. **Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook**. Springer Heidelberg Dordrecht. London: New York. 273p.
- Macconnell, C.E. 2007. **Antisepsis Disinfection and Sterilization.: Type, action, and resistance**. ASM Press. Washington, DC. 256p.
- Monterrat, O., O.K. Sinead, D. C. Jeff, I. A. Ahmed, and A. P. David, 2008. Experimental investigations of microwave plasma UV lamp for food applications. **Journal of food Science**. 42(4): 447-459.
- Oliveira, E.A., N.G.P. Nogueira, M.D.M. Innocentini, and R. Pisani Jr. 2010. Microwave inactivation of *Bacillus atrophaeus* spores in healthcare waste. **Waste Management**: 30 2327–2335.
- Oppenheimer, J and W. Montgomery. 2000. pp 85-88. Impact of Water Quality Parameters, Turbidity, and Transmittance on UV Disinfection Performance and By-product Formation. **In** National Water Research Institute. Costa Mesa, California. Department of health Services.
- Nednapis, V., N. Onanong., C.Sanguansri, and S.Klanarong. (2003): Effects of Different UV Irradiations on Properties of Cassava Starch and Biscuit Expansion. **Kasetsart Journal**, 37: 334 – 344.
- Rosenberg, U. and W. Bogl. 1987. Microwave pasteurization, sterilization, blanching, and pest control in the food industry. **Food technology**. 41(6): 92-99.
- Sarah, E. 2006. **Infrared and Photocatalytic studies of model Bacterial species for water treatment**. Doctor of Philosophy. Queensland University of technology. UK. 267 P
- Stevens, C., V.N. Lu. Khan., J. Y. Wilson., C. L. Pusey., P.L., Igwegbe., E.C.K. Kabwe., K. Mafolo, Y. Lin., J. E Chalutz. and S.Droby., 1997. Integration of ultraviolet (UV-c) light with yeast treatment for control of postharvest storage Rots of fruits and vegetables. **Biological Control**. 10:98-103.
- Yanned, J. 2002. **Effect of Water Activity on Salmonella Senftenberg Inactivity by UV Irradiation**. Master of Engineering (Food Engineering). King Mongkut's University of Technology Thonburi. 72 p.

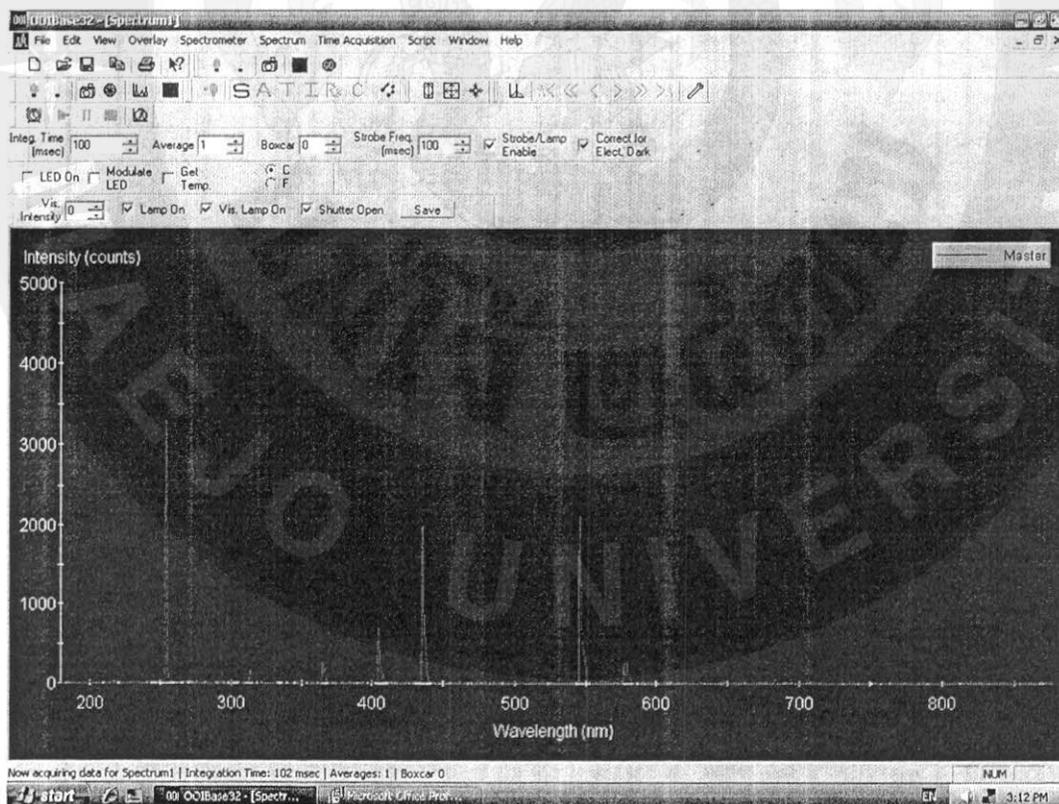


ภาคผนวก ก

การตรวจสอบความเข้มแสงของชุดกำเนิดรังสียูวี

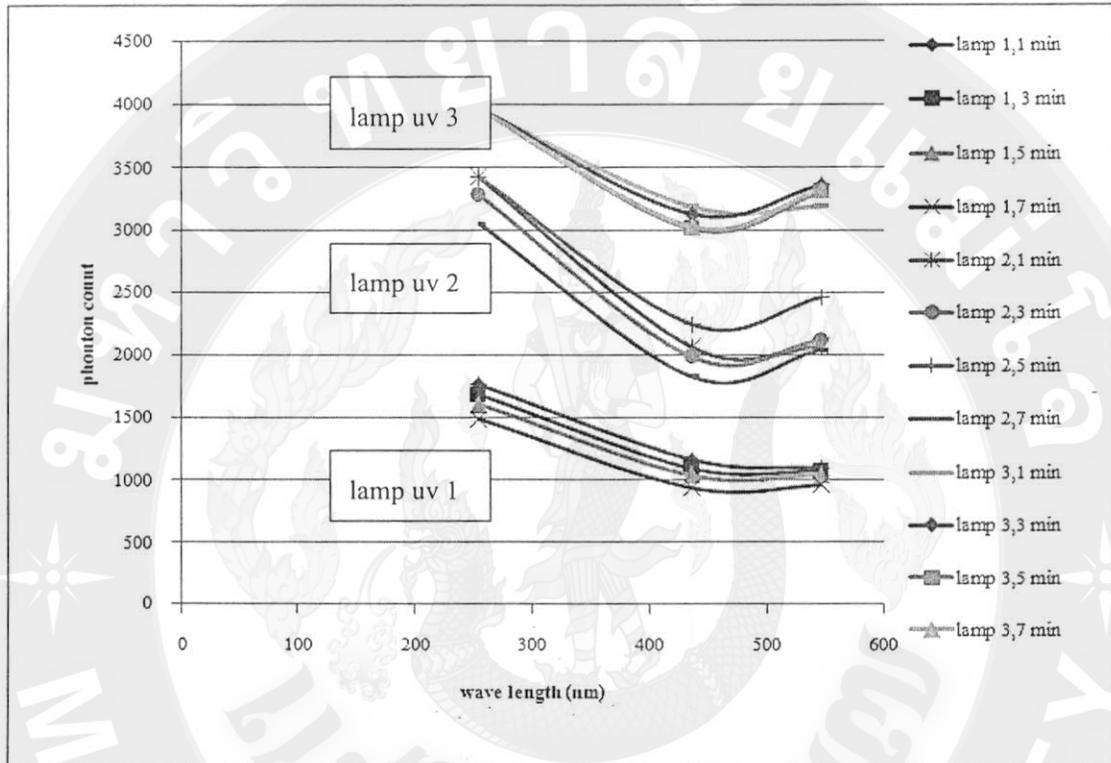
ผลการตรวจสอบการความเข้มของการส่องสว่างของหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการตรวจสอบการความเข้มของการส่องสว่างของหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีที่ประกอบด้วยหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซีขนาด 8 วัตต์และชุดโคมสะท้อน โดยติดตั้งให้มีระยะห่างจากโพรบวัดความเข้มแสง 20 เซนติเมตรอยู่ในสภาวะจำลองให้มีแหล่งกำเนิดแสงเดียวจากตัวหลอดยูวี การตรวจสอบความเข้มแสงจะใช้เครื่องมือวัดยี่ห้อ Ocean optics รุ่น OOIIrrad c: KZ39bFO405 ผลจากการวัดความเข้มของการส่องสว่างจะได้ผลอยู่ในรูปของ photon count และความยาวคลื่น (nm) ตัวโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังภาพผนวก 1 ผลการตรวจสอบความยาวคลื่นของชุดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตพบว่าชุดดังกล่าวสามารถให้ความยาวคลื่นในช่วงใหญ่ 3 ช่วงคือ 254.51, 435.89 และ 545.92 นาโนเมตร ซึ่งที่ช่วง 254.51 นาโนเมตรเป็นจุดที่ตรงกับความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดซี



ภาพผนวก 1 โปรแกรมแสดงผลการวัดพลังงานจากชุดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต

ผลการวิเคราะห์พลังงานที่เกิดจากชุดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตนั้นจะเป็นไปดังภาพ
 ผนวก 2 โดยเป็นการคิดในรูปของ photon count ซึ่งผลการตรวจวัดเป็นไปตามผลการวิจัยที่พบว่า การ
 เปิดให้หลอดกำเนิดรังสีเพิ่มขึ้นจะมีพลังงานเพิ่มขึ้น



ภาพผนวก 2 ผลการตรวจสอบช่วงพลังงานของชุดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลต



ภาคผนวก ข

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล (ไทย)

นางสาว ภัทรสุดา วงษ์จักร์

วัน เดือน ปีเกิด

5 กันยายน 2528

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2552

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.บ. วัสดุศาสตร์)
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พ.ศ. 2546

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนคาราวีวิทยาลัย
เชียงใหม่

พ.ศ. 2540

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนคาราวีวิทยาลัย
เชียงใหม่

ผลงานทางวิชาการ

ภัทรสุดา วงษ์จักร์ จาดุพงษ์ วาฤทธิ ชารารัตน์ ชื่อดอฝ สุชญา พิมพ์พิไล และ สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ. 2554. แบบจำลองการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อลำไยอบแห้งโดยเทคนิคการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและคลื่นไมโครเวฟ. ใน การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22, 6-7 ตุลาคม พ.ศ. 2554. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กมลดารา เจริญสุวรรณ ฉวีวุฒิ ดุษฎี ชีโนรส ศรีศิริ ภัทรสุดา วงษ์จักร์ และ ชัชชวาลย์ คำวงศ์. 2556. ศักยภาพหญ้าเนเปียร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ. ใน การถ่ายทอดผลงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ. (ครั้งที่ 12): 14-15 มีนาคม 2556. โรงแรมอิมพีเรียลโกลเด้นไทรแองเกิ้ล รีสอร์ท. อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.