

การออกแบบเครื่องอบในกระบวนการผลิตหนังปลากระพงแห้งด้วยไมโครเวฟ
ร่วมกับลมร้อนสำหรับกลุ่ม เกาะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดักส์

Design of Dried Machine with Combined Microwave and Hot-Air in
Drying Seabass Skins Process for Koh Yo - T. M. P. Products Group

นายศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์ Mr. Sugchai Tantivivat
นายวีระยุทธ จันทรักษา Mr. Virayuth Jantaragsa



ชื่อ : นายศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์ และนายวีระยุทธ จันทร์รักษา
ชื่อโครงการวิจัย : การออกแบบเครื่องอบในกระบวนการผลิตหนังปลากะพงแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสำหรับกลุ่ม เกษะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดักส์
หน่วยงาน : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ประเภททุนวิจัย : งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2558

บทคัดย่อ

การทำแห้งอาหารและวัสดุด้วยไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลาย สำหรับการศึกษาการอบหนังปลากะพงด้วยไมโครเวฟเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถอบได้ดีและใช้เวลาในการอบน้อย จากการศึกษาความชื้นที่เหมาะสมหลังจากการอบด้วยไมโครเวฟเมื่อค่าอุณหภูมิของห้องสำหรับจ่ายพลังงานของแมกนีตรอนและมีการส่งถ่ายลมร้อนมายังห้องอบหนังปลากะพงมีค่าประมาณ 70-80 °C โครงการวิจัยนี้ได้มีการทดลองเพื่อหาค่าความเหมาะสมสำหรับการอบ โดยควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแมกนีตรอนแต่ละตัว (1000 W) ที่มีค่าประมาณ 60 %, 50 %, 30 % ศึกษาและทดลองการเปิดสวิตช์ควบคุมสำหรับการจ่ายพลังงานในช่วงเวลา 15-30 นาที พร้อมทั้งการพิจารณาการใช้งานของแมกนีตรอน ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองจะได้แนวทางของการควบคุมความสัมพันธ์ตัวแปรในการอบและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาหารหรือวัสดุอื่นสำหรับการอบด้วยไมโครเวฟได้ต่อไปในอนาคต

(โครงการวิจัยมีจำนวนทั้งสิ้น 48 หน้า)

คำสำคัญ : การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การคายน้ำ อัตราการทำแห้ง

Name : Mr. Sugchai Tantivivat and Mr. Virayuth Jantaragsa
Title : Design of Dried Machine with Combined Microwave and Hot-Air in Drying Seabass Skins Process for Koh Yo - T. M. P. Products Group
University : Rajamangala University of Technology Srivijaya Songkhla Campus
Category: : Government budget of the year 2015

Abstract

Microwave drying is a dehydration process that is often used to preserve a food or material. In this study, sea bass leathers were dried by microwave technique. In order to improve the productivity, the microwave energy was applied to decrease the drying time. The sea bass leathers were dried to the desired final moisture content, whereby 70-80 °C hot air for baking are generated by the heating process from magnetrons and three levels, power microwave consists of approximately 60 %, 50 %, 30 % and drying time are 15-30 minutes based on power ON per unit of total magnetron respectively. The relation between the final applied parameters of microwave power, number of magnetron and the temperature is presented as well. This method can be applied in dehydration with microwave techniques.

(Total 48 pages)

Keywords : Microwave drying, Dehydration, Rate of drying.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ ได้ดำเนินการจนเสร็จตามวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยตั้งใจไว้ทุกประการโดยงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยคามอนุเคราะห์จากงบประมาณแผ่นดินประจำปี งบประมาณ 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอกราบพระคุณอย่างสูงไว้ในที่นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยฝ่ายสนับสนุนทุกคน ที่ช่วยงานประสานงานด้านเอกสารในงานวิจัยรวมถึงคำแนะนำในการจัดการด้านค่าใช้จ่ายในโครงการวิจัย

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินเพิ่มเติมและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จโครงการ

คณะผู้วิจัย

ศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์

วีระยุทธ จันทรักษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.3 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีการอบด้วยไมโครเวฟ	4
2.2 วรรณกรรมของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ	14
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	17
3.1 การศึกษาปัญหาสำหรับการอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ	17
3.2 การศึกษากระบวนการอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	18
3.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ	20
3.4 การสร้างเครื่องอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ	23
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	33
4.1 การวัดค่าความชื้นของแห้งปลากะพงด้วยการอบแบบดั้งเดิม	33
4.2 การวัดอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับเวลาของการอบด้วยไมโครเวฟ	35
4.3 การวัดค่าความเข้มของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการอบด้วยไมโครเวฟ	37
4.4 การหาค่าเหมาะของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการอบด้วยไมโครเวฟ	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก ก เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่	43

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2-1	ระบบในภาพรวมของการอบด้วยไมโครเวฟ	4
2-2	แม่กนีตรอนและโครงสร้างของแม่กนีตรอน	5
2-3	โครงสร้างภายในของแม่กนีตรอน	5
2-4	ภาพตัดขวางของแอโนดในแม่กนีตรอน	7
2-5	โครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	9
2-6	มิติพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรู	13
2-7	การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า	16
3-1	โครงสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการอบแห้งปลากระพงขาว	18
3-2	ชุดลมร้อนสำหรับอบแห้งปลากระพง	19
3-3	การประกอบชุดลมร้อนกับห้องอบแห้งปลากระพง	19
3-4	โครงสร้างห้องอบและตำแหน่งติดตั้งแม่กนีตรอนจำนวน 6 ตัว	20
3-5	การกระจายตัวของคลื่นนิ่งของสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น	21
3-6	การกระจายตัวของคลื่นนิ่งของสนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่น	22
3-7	การกระจายตัวของคลื่นนิ่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดต่าง ๆ ภายในท่อนำคลื่น	22
3-8	การออกแบบโครงสร้างแบบ 3D ของเครื่องอบแห้งปลากระพง	23
3-9	โครงสร้างของเครื่องอบแห้งปลากระพง	26
3-10	การวางอุปกรณ์ชุดกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟด้วยแม่กนีตรอน	26
3-11	การประกอบชุดอุปกรณ์และชุดควบคุมเข้ากับตู้อบไมโครเวฟ	27
3-12	การออกแบบชั้นสำหรับใส่ถาดเข้ากับตู้อบไมโครเวฟ	28
3-13	การประกอบชุดมอเตอร์เข้ากับชั้นวางสำหรับใส่ถาด	28
3-14	การวางถาดสำหรับอบแห้งปลากระพงด้วยไมโครเวฟ	29
3-15	การออกแบบโครงสร้างท่อนำคลื่น	29
3-16	ขนาดของโครงสร้างท่อนำคลื่น	30
3-17	การควบคุมและแสดงผลหน้าตู้อบไมโครเวฟ	32
4-1	เครื่องอบแห้งปลากระพงแบบดั้งเดิมของกลุ่ม TMP	34
4-2	ตัวอย่างการวัดค่าความชื้นของหนังปลากระพง	34
4-3	การใส่หนังปลากระพงในห้องอบไมโครเวฟ	35
4-4	การวัดอุณหภูมิหลังจากการอบด้วยไมโครเวฟ	36
4-5	ผลการวัดความชื้นของหนังปลากระพงหลังการอบด้วยไมโครเวฟ	37
4-6	การวัดความชื้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	38

บทที่ 1

บทนำ

ในปีพ.ศ. 2512 กรมประมง ได้เข้ามาส่งเสริมการเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชัง ชาวเกาะยอจึงได้ยึดอาชีพการเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชังตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา และในปัจจุบันเกาะยอ ถือได้ว่าเป็นแหล่งเลี้ยงปลากะพงขาว ในกระชังที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และเป็นแหล่งปลากะพงขาวที่อร่อยที่สุด เนื่องจากปลากะพงขาวที่เลี้ยงโดยรอบ บริเวณเกาะยอ เป็นปลา 3 น้ำ ทั้งน้ำจืด น้ำเค็มและน้ำกร่อย เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงฤดูกาล ในรอบแต่ละปี จึงเป็นแหล่งปลากะพงขาวที่ขึ้นชื่อ เป็นที่นิยมของทั้งชาวไทย และมาเลเซีย รวมทั้งโรงงานอุตสาหกรรมแช่เย็น นิยมนำปลากะพงขาวที่เลี้ยงรอบเกาะยอ มาชำแหละ นำเนื้อปลาส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่น ทำให้มีเศษเหลือจากโรงงานจำนวนมาก และส่วนหนึ่งที่ได้คือหนังปลากะพงขาว ทางกลุ่มฯ เห็นความสำคัญของ By Products ดังกล่าวจึงได้นำมาทดลองตากแห้ง และทอดกรอบ จำหน่ายในท้องถิ่น จนได้รับความนิยมแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ [1]

กระบวนการผลิต หนังปลากะพงขาวทอดกรอบ ของกลุ่ม “เกาะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดักส์” มีขั้นตอนการผลิตหลักๆ อยู่ 10 ขั้นตอนดังนี้ จัดหาวัตถุดิบ ตกแต่งและทำความสะอาด หมักเครื่องปรุง ตากแห้ง ตัดหนังปลา ทอดหนังปลา คลุกเคล้าผงปรุงรสกับหนังปลาทอดกรอบ สะเด็ดน้ำมัน อบหนังปลาทอดกรอบ และบรรจุหีบห่อ ส่งออกจำหน่าย จากขั้นตอนการผลิตข้างต้น พบว่าขั้นตอนการตากแห้งเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดความล่าช้ามากที่สุดในการผลิตเพื่อให้ได้เป็นผลผลิตหนังปลาทอดกรอบ เป็นปัญหาที่ กลุ่มเกาะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดักส์ ประสบอยู่จนถึงปัจจุบัน ก่อนหน้าที่ชาวบ้านที่ให้ความสนใจในการแปรรูปหนังปลากะพงขาวทอดกรอบนั้นจะทำการตากแห้งของหนังปลาโดยที่สำหรับการตากแห้งโดยใช้การตากแดดกลางแจ้งนั้น ใช้เวลาในกระบวนการเป็นระยะเวลานานประกอบกับภาคใต้มีฝนตกตลอดปีผลผลิตที่จะนำส่งสู่ท้องตลาดนั้นลดน้อยลงต่อมาได้มีการพัฒนาการอบแห้งหนังปลาโดยใช้ลมร้อนช่วยในการทำให้หนังปลานั้นแห้งลงได้ อย่างไรก็ตามจากการสอบถามจากชาวบ้านและประธานกลุ่มของกลุ่ม เกาะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดักส์ นั้น ยังยืนยันว่าการอบแห้งของปลาในการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวนั้นยังใช้เวลาในการอบแห้งนานพอสมควร

จากปัญหาดังกล่าวทั้งกลุ่มผู้วิจัยร่วมกับประธานกลุ่มเล็งเห็นว่าปัจจุบันมีเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาเกี่ยวข้องกับงานด้านอบแห้งในปริมาณเยอะพอสมควรอาทิเช่น การอบด้วย solar drying [2], vacuum drying [3], freeze drying [4], microwave drying [5], microwave vacuum drying [6], microwave freeze drying [7], infrared radiation drying [8] จากการศึกษาได้เล็งเห็นประเด็นต่างจากการทำ ความร้อนเพื่ออบหนังปลากะพงขาวจึงได้ข้อสรุปมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องอบหนังปลากะพงที่ประยุกต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแก่ชาวบ้านกลุ่มเกาะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดักส์ ซึ่งเป็น กระบวนการอบที่นำจะ

เหมาะกับกลุ่มชาวบ้าน โดยคลื่นไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ในด้านอุตสาหกรรมใช้ในระบบการผลิตจะใช้คลื่นไมโครเวฟในการผลิตความร้อนในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร ธัญพืชผลไม้ ไม้ดอก ไม้ประดับ สมุนไพร การอบแห้งเซรามิก การอบแห้งกระดาษ การอบแห้งพลาสติก และ ฯลฯ เป็นต้น [9]-[12] เช่นเดียวกันกับงานในครัวเรือนคือ การผลิตความร้อนใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบอาหารเหมือนเตาแก๊สและเตาไฟฟ้าในการอุ่นอบหรือหนึ่ง

อย่างไรก็ตามถึงแม้มีการประยุกต์ใช้การอบด้วยอบไมโครเวฟเพื่อประยุกต์กับงานทางด้านวิศวกรรมมากมาย แต่จำเป็นต้องมีการพัฒนาองค์ความรู้ในด้านสมบัติของวัสดุหรือเทคนิคสำหรับการอบที่เปลี่ยนแปลงไปจากการใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านคุณภาพของผลผลิต วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิตการอบหนึ่งปลากะพงโดยใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ซึ่งในการอบหนึ่งปลากะพงอาจแตกต่างจากการอบผลิตภัณฑ์อื่น [13]-[17] เนื่องจากหนึ่งปลากะพงขาวที่สามารถนำไปสู่กระบวนการก่อนการส่งออกเพื่อจำหน่ายนั้นเป็นหนึ่งปลาที่มีขนาดบางหากควบคุมอุณหภูมิในการอบไม่เหมาะสมอาจเกิดการไหม้ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียรูปได้ ทั้งนี้ในงานวิจัยคำนึงถึงจำนวนหรือปริมาณของหนึ่งปลาหลังจากการอบต้องเพียงพอกับความต้องการของกลุ่มและเพื่อให้ได้หนึ่งปลากะพงอบแห้งที่มีคุณภาพ รวมถึงการวิเคราะห์ควบคุมชุดต้นแบบเครื่องอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ในกระบวนการผลิตหนึ่งปลากะพงแห้งให้เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้ในการดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยีทางด้านระบบควบคุมให้แก่ชุมชน เพื่อเป็นแนวทางให้แก่ชุมชนหรือกลุ่มเกาะยอ ที.เอ็ม.พี. โปรดัคส์ เพื่อการพัฒนาเครื่องต้นแบบเครื่องเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.1.1 เพื่อศึกษาการออกแบบวงจรรวมไมโครเวฟที่สามารถส่งคลื่นไมโครเวฟสำหรับการอบหนึ่งปลากะพงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.1.2 เพื่อศึกษาตัวประกอบเวลาระหว่างการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

1.1.3 เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของหนึ่งปลาจากการอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวกับการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

1.1.4 เพื่อศึกษาผลการดูคลื่นคลื่นไมโครเวฟของหนึ่งปลากะพง

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 ควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาอบหลังจากการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนให้เหมาะสมกับการอบหนึ่งปลากะพง

1.2.2 วิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

1.2.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการอบหนึ่งปลากะพงเพื่อหาการควบคุมตัวแปรที่เหมาะสม

1.2.4 สร้างเครื่องอบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่ชาวบ้านสามารถเข้าใจกลไกการทำงานของเครื่องซึ่งสามารถซ่อม ด้ดแปลง และพัฒนาต่อยอดได้

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพร้อมศึกษาดูงานของกลุ่มคณะที่ดำเนินการจัดทำที่มีชื่อเสียงพร้อมหาแนวทางมาปรับปรุงหรือพัฒนาในกระบวนการออกแบบเพื่อได้งานวิจัยที่เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย และศึกษาปัญหาที่เกิดจากการวิเคราะห์การรอบด้วยวิธีต่างๆ คิดค้นวิธีการแก้ปัญหาผลตอบสนองของพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นที่เป็นปัจจัยหลักต่อการส่งผลในการอบแห้งปลากะพง หลังจากนั้นทำการออกแบบและสร้างเพื่อทดสอบชิ้นงานจริง หลังจากนั้นทำการ สรุปผลและรายงานผลการวิจัย เผยแพร่ผลการวิจัย และถ่ายทอดผลงานงานวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

- 1.4.1 เครื่องมือต่างๆ สำหรับการทำโครงสร้างเครื่อง
- 1.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการอบ
- 1.4.3 เครื่องวัดความชื้น
- 1.4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ
- 1.4.5 อุปกรณ์ควบคุม

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.5.1 ประโยชน์ด้านวิชาการ
 - 15.1.1 สามารถนำโครงสร้างที่ออกแบบเพื่อเป็นสื่อการเรียนสำหรับนักศึกษา
 - 15.1.2 สามารถนำโครงสร้างและกระบวนการในการอบพัฒนาเป็นงานวิจัยต่อไปในอนาคต
- 1.5.2 ประโยชน์ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์
 - 15.2.1 เพิ่มผลิตภัณฑ์แห้งปลากะพงให้แก่ชาวบ้านกลุ่มเกาะยอ TMP Product
- 1.5.3 ประโยชน์ด้านเผยแพร่วารสาร
 - 1.5.3.1 สามารถนำผลงานวิจัยไปตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ ระดับชาติและระดับนานาชาติหลังจากได้ผลจากการวิเคราะห์
 - 1.5.3.2 สามารถนำเครื่องต้นแบบที่ได้จากออกแบบเพื่อบริการวิชาการสู่ชาวบ้านเพื่อพัฒนาต่อยอดสู่เชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

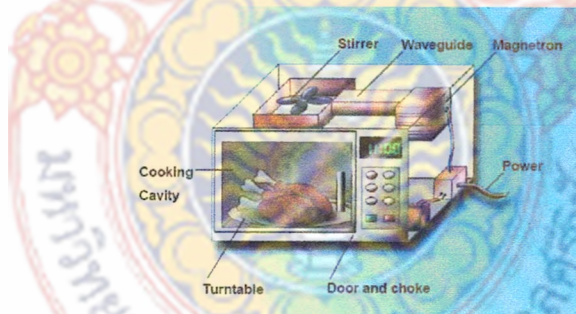
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

นับตั้งแต่การทดลองงานทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Dr. Percy Spencer ในปี ค.ศ. 1946 ซึ่งสามารถแสดงการทดลองคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นทำให้เกิดความร้อนได้ และงานทางด้านความร้อนที่ได้คิดขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับอาหารนั้นสามารถจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1950 ต่อมาได้มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจในเรื่องความร้อนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำแนวคิดที่ได้มาประยุกต์กับงาน ด้านอาหาร ด้านยารักษาโรค ด้านวิศวกรรมเคมี เป็นต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในการทำความร้อน คำนิยามต่างๆ รวมทั้งลักษณะการสร้างความร้อนด้วยไมโครเวฟ เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบเครื่องอบต่อไปในอนาคตได้

2.1 ทฤษฎีการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การอบด้วยคลื่นไมโครเวฟมีพื้นฐานจากการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟย่านความถี่ประมาณ 2.45 GHz โดยมีองค์ประกอบหลักๆ สำหรับการอบโดยรวม 5 ส่วน แสดงได้ดังภาพที่ 2-1 ซึ่งในแต่ละภาคส่วนประกอบด้วยส่วนที่กำเนิดคลื่นคือแม็กนีตรอน ส่วนที่เป็นกำลังจ่ายไฟให้แม็กนีตรอนซึ่งเป็นการจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง ส่วนที่เป็นสายส่งสัญญาณสำหรับคลื่นไมโครเวฟ ส่วนที่เป็นตู้สำหรับการอบ และส่วนที่เป็นการควบคุมของระบบ

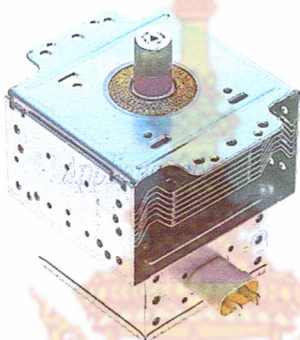


ภาพที่ 2-1 ระบบในภาพรวมของการอบด้วยไมโครเวฟ

2.1.1 แม็กนีตรอน

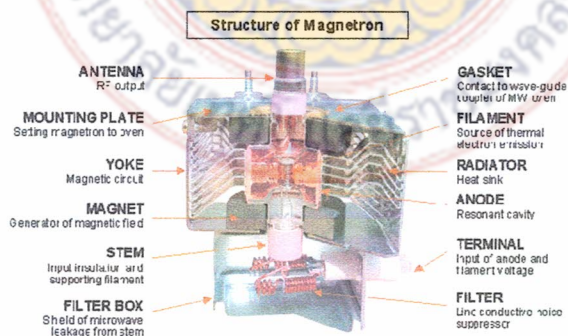
แม็กนีตรอน (Magnetron) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการอบด้วยเตาไมโครเวฟดังภาพที่ 2-1 โดยแม็กนีตรอนเป็นอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ประกอบด้วยไส้หลอด (Filament) คาโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด และถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบๆจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมา

ภายนอกโดย Antenna สำหรับการทำงานของแม็กนีตรอนนั้นแม็กนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ใส่หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอน ออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมากกว่า 4,000 โวลต์ไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทด เทียบกับขั้วแอโนด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ถาวร ซึ่งจะทำให้แม็กนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูก กำหนดด้วยโครงสร้างภายในของสุญญากาศระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนดให้เท่ากับ 2.45 GHz [18]



ภาพที่ 2-2 แม็กนีตรอนและโครงสร้างของแม็กนีตรอน

โครงสร้างภายในของแม็กนีตรอนดังภาพที่ 2-3 ส่วนที่สร้างคลื่นไมโครเวฟเรียกว่าไดโอด (diode) ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกทำจากทองแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 3.2 เซนติเมตร โดยหลอดจะถูกปิดหัวท้ายด้วยแผ่นทองแดง เพื่อให้ภายในเป็นสุญญากาศภายในหลอด ไดโอด จะประกอบด้วยแผ่นทองแดง (vanes) ซึ่งมีประมาณ 12 แผ่น วางในแนวตั้งโดยหันสันด้านหนึ่งมาเรียง กันในแนววงกลม โดยเว้นช่องว่างตรงกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.95 เซนติเมตรไว้ ให้เป็นที่อยู่ของไส้ (filament) ที่เป็นเกลียวทำหน้าที่เป็นแคโทด (cathode) และเรียกท่อทองแดงทรงกระบอกและ vanes ว่า เป็นส่วนแอโนด (anode)



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างภายในของแม็กนีตรอน

การทำงานของแอนโตนในแม็กนีตรอนในการทำให้เกิดคลื่นไมโครเวฟแสดงดังภาพที่ 2-4 และเป็นไปตามลำดับดังนี้

1. ใยที่เป็นเกลียว (filament) ถูกทำให้ร้อน
2. อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของสันแผ่นทองแดงจะถูกกระตุ้นทำให้เกิดหมอกอิเล็กตรอนบริเวณตรงกลางของไดโอด
3. เมื่อผ่านความต่างศักย์ประมาณ 4,000 โวลต์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นระหว่างแอนโตนและใย filament และเร่งอิเล็กตรอนให้ไปยังแอนโตนในแนวรัศมีวงกลม
4. สนามแม่เหล็ก (ที่ถูกสร้างขึ้นจากการนำวงแหวนแม่เหล็ก (ferrite) 2 วง มาวางไว้ด้านบนและล่างของแอนโตน สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับแกนของใย filament และมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าจะบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งเป็นทางโค้งถ้าความแรงของสนามแม่เหล็กมีขนาดที่พอเหมาะ อิเล็กตรอนจะถูกกวาดออกจากพื้นผิวบริเวณปลายสุดของสันแผ่นทองแดง ถ้าสนามแม่เหล็กอ่อนเกินไปจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนกับแผ่นทองแดงและถ้ามีความแรงเกินไปจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ย้อนกลับและชนกับใย filament
5. ทันที่ที่อิเล็กตรอนวิ่งถึงแผ่นทองแดง จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นภายในแผ่นทองแดง ถ้าแผ่นทองแดงนี้ถูกเชื่อมต่อกันด้วยกระแสไฟฟ้า (เรียกว่า strapping และจุดที่มีการเชื่อมต่อเรียกว่า straps) กับแผ่นทองแดงอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ถัดออกไปจากเดิม 2 แผ่น จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกเช่นกัน แผ่นทองแดงที่อยู่ระหว่างแผ่นที่มีประจุบวก จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุลบและมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับแผ่นที่มีประจุบวก ทำให้แผ่นทองแดงมีสภาพประจุบวกและลบสลับกันไปทั้งวง
6. จากการที่มีแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างประจุที่ต่างและเหมือนกัน ทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งวนอยู่ถูกเร่งเข้าไปหาแผ่นทองแดงที่มีประจุบวก ในขณะที่เดียวกันแผ่นทองแดงที่มีประจุลบจะผลักอิเล็กตรอนเหล่านี้ไว้ ทำให้กลับมารวมอยู่กับอิเล็กตรอนในกลุ่มที่ถูกเร่งจนกลายเป็นกลุ่มก้อนของอิเล็กตรอน
7. ทันที่ที่กลุ่มอิเล็กตรอนนี้วิ่งผ่านแผ่นทองแดงที่อยู่ถัดมา จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นในแผ่นทองแดงนั้น ส่วนแผ่นทองแดงที่กลุ่มอิเล็กตรอนนี้วิ่งผ่านมาก่อนหน้านี้เปลี่ยนจากสภาพประจุบวกเป็นลบ และเมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนวิ่งต่อไปเรื่อย ๆ ตามวงโคจร จะทำให้แผ่นทองแดงแต่ละแผ่นเกิดสภาพประจุที่สลับกันไปมาจากบวกเป็นลบและเป็นบวกอีกครั้ง โดยถ้าอิเล็กตรอนมีความเร็วที่เหมาะสมกับช่องว่างระหว่างแผ่นทองแดง จะสามารถเปลี่ยนประจุสลับไปมาได้ 2.45 พันล้านครั้งต่อวินาที ประจุที่สลับกันดังกล่าวนี้จะถูกเชื่อมต่อกับเส้นลวดจากแผ่นทองแดงไปยังสายอากาศ (antenna) เพื่อจับคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้น แล้วส่งต่อผ่านท่อนำคลื่น (wave guide) และผ่านไปยังใบพัด (stirrer) ทำให้เกิดการแผ่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีสัญญาณขนาด 2.45 GHz ในช่องใส่อาหารถ้าคลื่นไมโครเวฟถูกสร้างขึ้นและ

ปล่อยให้ส่งผ่านในอากาศ พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่ถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ได้ตามความต้องการ จึงมักใส่สายอากาศ (antenna) เพื่อจับคลื่นและส่งผ่านท่อทรงกระบอกที่เรียกว่า wave guide ซึ่งจะนำทางคลื่นไมโครเวฟให้ตรงไปสู่ช่องใส่อาหารโดยอาจมีใบพัด (stirrer) เพื่อกระจายคลื่นไปสัมผัสกับอาหาร ใบพัดจะช่วยทำให้คลื่นไมโครเวฟไปทำให้จุดร้อนและจุดเย็นในอาหารร้อนขึ้นสม่ำเสมอและทั่วถึง ปัญหาที่สำคัญในการใช้ไมโครเวฟคือการที่อาหารแต่ละจุดถูกทำให้ร้อนไม่ทั่วถึง ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากเตาไมโครเวฟและมีความเกี่ยวข้องกับความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเตาไมโครเวฟ นอกจากนี้การจัดเรียงของอาหารภายในไมโครเวฟและคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหารจะมีผลต่อความร้อนที่สม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อไมโครเวฟถูกปล่อยให้เข้ามาในช่องใส่อาหาร (cavity) จะสะท้อนที่ผนังโลหะ การสะท้อนของโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางเดียวกันกับผนังโลหะถูกทำให้ลัดวงจร โดยโลหะเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ในส่วนของใบพัดทำมาจากโลหะ เป็นใบพัดที่หมุนอยู่ในช่องใส่อาหาร โดยใช้มอเตอร์ขนาดเล็กหรือใช้แรงลมที่ได้จากระบบระบายความร้อนให้แก่แม่กนิตรอนและพาความร้อนขึ้นออกไปด้านนอกเตาไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่น ๆ ในการกระจายความร้อน เช่น การใช้จานแก้วหรือเซรามิกส์ที่สามารถหมุนและถอดออกได้ ในระบบนี้คลื่นไมโครเวฟจะสัมผัสกับอาหารที่ทำให้หมุนบนจาน ทำให้จุดร้อนและเย็นได้รับพลังงานโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เตาไมโครเวฟอาจใช้ระบบใดระบบหนึ่งหรือใช้ควบคู่ทั้งสองระบบ เพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความร้อนแก่อาหารให้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 2-4 ภาพตัดขวางของแอนโนดในแม่กนิตรอน

2.1.2 ท่อนำคลื่น [19-21]

ท่อนำคลื่นเป็นสายส่งชนิดหนึ่งที่ใช้ส่งสัญญาณในรูปคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติตั้งนี้ใช้งานงานในย่าน TEM Mode โดยมีโครงสร้างเป็นตัวนำเดี่ยวหรือฉนวนก็ได้ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในย่านแบนด์ที่แคบและมีการสูญเสียน้อย ในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นสามารถวิเคราะห์ได้จากโหมดของท่อนำคลื่นโดยใช้สมการของ Maxwell ในรูปของ Curl Equation ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -j\omega\mu H \\ \nabla \times H &= j\omega\varepsilon E\end{aligned}\quad (2-1)$$

ความสัมพันธ์ของ E และ H ในทิศทางที่เคลื่อนที่ในแนวแกน z จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$E_i, H_i \propto e^{-\gamma z} \quad (i = x, y, z) \quad (2-2)$$

จากสมการ $\nabla \times E = -j\omega\mu H$ สามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในระนาบ x, y, z ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma E_y &= -j\omega\mu H_x \\ -\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -j\omega\mu H_z\end{aligned}\quad (2-3)$$

จากสมการ $\nabla \times H = j\omega\varepsilon E$ สามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในระนาบ x, y, z ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y &= j\omega\varepsilon E_x \\ \varepsilon -\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega\varepsilon E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= -j\omega\varepsilon E_z\end{aligned}\quad (2-4)$$

พิจารณาสมการที่ความสัมพันธ์ข้างต้น ในเทอมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เคลื่อนที่ z ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}H_y &= \frac{\gamma}{j\omega\mu} E_z + \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ E_x &= -\frac{1}{h^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (2-5)$$

เขียนความสัมพันธ์ในรูปขององค์ประกอบในแนวขวางได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{1}{h^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \\ E_y &= -\frac{1}{h^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} - j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ H_x &= -\frac{1}{h^2} \left(-j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ H_y &= -\frac{1}{h^2} \left(j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2-6)$$

เมื่อ $h^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \varepsilon$

โหมดของคลื่น คือ ลักษณะองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางการแพร่กระจายคลื่นมีดังนี้

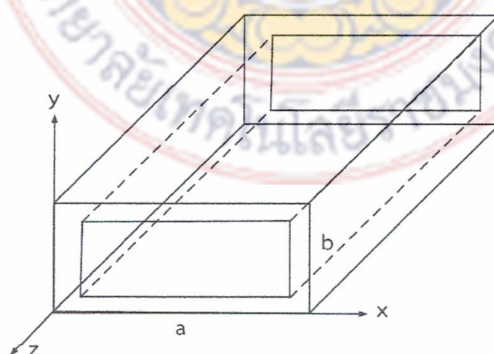
- TEM Modes เป็นโหมดที่ $E_z = H_z = 0$ และเมื่อ $h^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \varepsilon = 0$ ใช้งานสำหรับสายส่งหรือคลื่นระนาบหรือในท่อนำคลื่นที่มีขนาดหน้าตัดจำกัด

- TE Modes เป็นโหมดที่ $E_z = 0$ ใช้งานสำหรับท่อนำคลื่นที่เป็นโลหะ

- TM Modes เป็นโหมดที่ $H_z = 0$ ใช้งานสำหรับท่อนำคลื่นที่เป็นโลหะ

โดยลำดับของโหมด เป็นค่าลำดับของโหมดใดโหมดหนึ่งที่แสดงค่าเป็น 2 หรือ 3 Dimensions ที่ประกอบด้วยโหมดพื้นฐาน และโหมดสูงกว่า

งานทางด้าน Microwave Heating จะใช้สายส่งสัญญาณในรูปแบบของท่อนำคลื่นโลหะที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมมีขนาดกว้างคูณยาวคือ $b \times a$ แสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

สมการความสัมพันธ์ของคลื่นเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\nabla^2 E_z + k^2 E_z &= 0 \\ \nabla^2 H_z + k^2 H_z &= 0\end{aligned}\quad (2-7)$$

เมื่อ $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ หากพิจารณาของสนามที่เคลื่อนที่ในแนวแกน z หรือการแพร่กระจายในรูปแบบ $e^{-\gamma z}$ ดังนั้นได้สมการคือ

$$\nabla^2 E_z \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial z^2} e^{-\gamma z} = \gamma^2 e^{-\gamma z} \quad (2-8)$$

เมื่อ $h^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu\epsilon$ และ ∇_t^2 : Transverse Laplacian Operator

$$\begin{aligned}\gamma &= \alpha + j\beta = \sqrt{h^2 - \omega^2 \mu\epsilon} \\ \gamma &= jk\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}\end{aligned}\quad (2-9)$$

เมื่อ f_c หมายถึงความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) จะได้ว่า

$$f_c = \frac{h}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2-10)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของสมการเทียบความถี่ f จะได้ดังต่อไปนี้

$f > f_c$: $\gamma = \text{Image}$ (Propagation Mode) $f < f_c$: $\gamma = \text{Real}$ (Non-Propagation

Mode)

ท่อนำคลื่นโหมด TM

จากสมการความสัมพันธ์ $E_z \neq 0$, $H_z = 0$ จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_z + \frac{\partial^2}{\partial y^2} E_z + h^2 E_z = 0 \quad (2-11)$$

สมการของ E_z สามารถเขียนอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_z = X(x)Y(y)e^{-\gamma z} \quad (2-12)$$

ดังนั้น $X''(x)Y(y)e^{-\gamma z} + X(x)Y''(y)e^{-\gamma z} + h^2 X(x)Y(y)e^{-\gamma z} = 0$

หารสมการด้วย $X(x)Y(y)e^{-yz}$ จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} + h^2 &= 0 \\ -k_x^2 - k_y^2 + h^2 &= 0\end{aligned}\quad (2-13)$$

สามารถเขียนสมการได้ดัง $\frac{d^2X}{dx^2} + k_x^2X = 0$, $\frac{d^2Y}{dy^2} + k_y^2Y = 0$

สมการทั่วไปในรูปของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function)

$$\begin{aligned}X(x) &= A\cos(k_x x) + B\sin(k_x x) \\ Y(y) &= C\cos(k_y y) + D\sin(k_y y)\end{aligned}\quad (2-14)$$

ดังนั้น $E_z = (A\cos(k_x x) + B\sin(k_x x))(C\cos(k_y y) + D\sin(k_y y))e^{-yz}$

พิจารณาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ขอบของท่อนำคลื่นตำแหน่ง $x = 0$ และ $y = 0$ ได้ว่า

$$\begin{aligned}E_z|_{(x=0)} &= (A\cos(0) + B\sin(0))(C\cos(k_y y) + D\sin(k_y y))e^{-yz} = 0 \\ E_z|_{(y=0)} &= (A\cos(k_x x) + B\sin(k_x x))(C\cos(0) + D\sin(0))e^{-yz} = 0\end{aligned}\quad (2-15)$$

จะเห็นว่าสมการจะเป็นจริงเมื่อ $A, C = 0$ เท่านั้น ดังนั้น

$$E_z = E_0 \sin(k_x x) \sin(k_y y) e^{-yz}\quad (2-16)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ขอบของท่อนำคลื่นที่ตำแหน่ง $x = a$ และ $y = b$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}E_z|_{(x=a)} &= E_0 \sin(k_x a) \sin(k_y y) e^{-yz} \\ E_z|_{(y=b)} &= E_0 \sin(k_x x) \sin(k_y b) e^{-yz}\end{aligned}\quad (2-17)$$

จะได้ว่า $k_x = \frac{m\pi}{a}$, $k_y = \frac{n\pi}{b}$ เมื่อ m, n คือ 1, 2, 3, 4 ...

ความสัมพันธ์ทั้งหมด

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-yz}\quad (2-18)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2-19)$$

$$\gamma_{mn} = \alpha + j\beta_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon} \quad (2-20)$$

$$\gamma_{mn} = jk \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(mn)}}{f}\right)^2} \quad (2-21)$$

$$f_{c(mn)} = \frac{1}{2\sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2-22)$$

ท่อนำคลื่นโหมด TE

จากสมการความสัมพันธ์ $E_z = 0$, $H_z \neq 0$ จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} H_z + \frac{\partial^2}{\partial y^2} H_z + h^2 H_z = 0 \quad (2-23)$$

สมการทั่วไปในรูปของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function)

$$\begin{aligned} X(x) &= A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x) \\ Y(y) &= C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y) \end{aligned} \quad (2-24)$$

$$\text{ดังนั้น } H_z = (A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x))(C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y))e^{-\gamma z}$$

พิจารณาท่อนำคลื่นที่ตำแหน่ง $x=0$ และ $y=0$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} H_z|_{(x=0)} &= (-k_x A \sin(0) + k_x B \cos(0))(C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y))e^{-\gamma z} = 0 \\ H_z|_{(y=0)} &= (A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x))(-k_y C \sin(0) + k_y D \cos(0))e^{-\gamma z} = 0 \end{aligned} \quad (2-25)$$

จะเห็นได้ว่าสมการจะเป็นจริงเมื่อ $B, D = 0$ เท่านั้น ดังนั้น

$$H_z = H_0 \cos(k_x x) \cos(k_y y) e^{-\gamma z} \quad (2-26)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ขอบของท่อนำคลื่นที่ตำแหน่ง $x=a$ และ $y=b$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} H_z|_{(x=a)} &= -k_x H_0 \sin(k_x a) \cos(k_y y) e^{-\gamma z} \\ H_z|_{(y=b)} &= -k_x H_0 \cos(k_x x) \sin(k_y b) e^{-\gamma z} \end{aligned} \quad (2-27)$$

จะได้ว่า $k_x = \frac{m\pi}{a}$, $k_y = \frac{n\pi}{b}$ เมื่อ m, n คือ 1, 2, 3, 4 ...

ความสัมพันธ์ทั้งหมด

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z} \quad (2-28)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2-29)$$

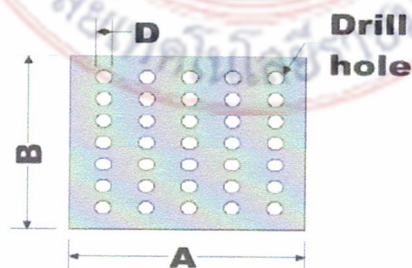
$$\gamma_{mn} = \alpha + j\beta_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon} \quad (2-30)$$

$$\gamma_{mn} = jk \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(mn)}}{f}\right)^2} \quad (2-31)$$

$$f_{c(mn)} = \frac{1}{2\sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2-32)$$

2.1.3 การเจาะรูห้องอบ (Microwave Cavity) [22]

การรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟจากช่องทางเข้าออกนี้ สามารถควบคุมได้หลายเทคนิค อย่างไรก็ตามหลักการออกแบบระบบเบื้องต้นที่สามารถควบคุมการรั่วไหลของคลื่น ไม่ให้เกินพิกัดเพื่อความปลอดภัยมีดังนี้ จะต้องจำกัดขนาดรูหรือช่องเจาะต่างๆ ให้เล็กกว่าช่วงความยาวคลื่นคัตออฟในช่วงความถี่ทำงานนั้น ในทางปฏิบัติขนาดและจำนวนของรูหรือช่องเจาะดังกล่าวต้องสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรูดังภาพที่ 2-6 ซึ่งมีหลักการออกแบบเบื้องต้นดังนี้



ภาพที่ 2-6 มิติพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรู

- โดยทั่วไปแนะนำให้ขนาดรูเจาะ (D) ควรให้น้อยกว่า 4 mm $D < 4mm$
- พื้นที่ของรูที่เจาะจะต้องน้อยกว่า 30% ของพื้นที่หน้าตัดของแผ่นที่ทำการเจาะรู ($A \times B$) ดังสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{3.14 \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times N}{A \times B} \right) \leq 30\% \quad (2-33)$$

โดยที่ D คือขนาดรูหรือช่องเจาะ (Hole Diameter)

N คือจำนวนรู

A, B คือมิติพื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่ทำการเจาะรู

โดยขอบรูที่เจาะนี้ควรมีลักษณะที่เรียบเพื่อป้องกันการอาร์ค และห้ามนำวัสดุใดๆมาติดแปะหรือสอดใส่ในบริเวณรูที่เจาะนี้เพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่นบริเวณดังกล่าว

2.2 วรรณกรรมของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ [23-25]

เทคโนโลยีไมโครเวฟได้พัฒนาขึ้นในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 และได้เริ่มมีการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหาร และในกลางปี ค.ศ. 1960 ได้เริ่มใช้ไมโครเวฟในการพาสเจอร์ส์ผลิตภัณฑ์นมอบและในการสเตอริไลส์อาหาร และโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้มีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงกับวัสดุต่าง ๆ และอุตสาหกรรมอื่นๆ เป็นต้น

2.2.1 การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric heating)

พลังงานไดอิเล็กทริก (dielectric energy) จากคลื่นไมโครเวฟและความถี่วิทยุ (radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปของคลื่น(wave) และแทรก (penetrate) เข้าไปในอาหารและพลังงานนี้จะถูกดูดซับ (absorb) และเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนขึ้น โดยทั่วไปเราสามารถทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้ทั้งโดยตรง (direct method) ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวของอาหาร เช่น ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ และโดยทางอ้อม (indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอกและส่งผ่านพื้นผิวหน้าของอาหารไปยังด้านใน โดยเกิดจากการแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) หรือการนำความร้อน (conduction)

2.2.2 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของอาหารและวัตถุ

กระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัตถุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อการสร้างสูตรอาหารเพื่อใช้กับไมโครเวฟ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญและแสดงเป็นค่าตัวเลข ได้แก่ 1. Relative dielectric constant (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก แต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของอาหาร 2. relative dielectric loss (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulating ability) ของวัตถุ ซึ่งอาหารเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นอาหารจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น โดยค่า dielectric loss และ dielectric constant มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta \quad (2-34)$$

จากสมการ ค่า loss tangent ($\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัตถุจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น

2.2.3 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ

จากการที่วัตถุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัตถุโดยการเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟนั้นมีสาเหตุมาจากกลไก 2 ประการได้แก่ การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization) และ การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

1. การเคลื่อนที่ของไอออน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization)

ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่อนุภาคที่มีประจุในอาหารสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในอาหารนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในอาหารจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม - โปตัสเซียม - หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้

อ็อนบวก (cations) และอ็อนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน

2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

ในอาหารประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้า กระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางการตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟคือ 915 หรือ 2,450 พันล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในอาหาร แสดงดังภาพที่ 2-7 ในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็งเช่น น้ำแข็งนั้นโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงเพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้เช่นเดียวกัน โดยอันตรกิริยาชนิดนี้มีความสำคัญที่สุดในอาหาร ยกเว้นในอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือสูงมากเช่น แอม เป็นต้น



ภาพที่ 2-7 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

ปกติแล้วการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นการให้พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาหารสามารถดูดคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ซึ่งขึ้นกับสมบัติของอาหารชนิดนั้น เมื่ออาหารได้รับไมโครเวฟ จะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน โดยไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิ หรือโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดการเคลื่อนที่และการเสียดสีกัน จนเกิดความร้อนขึ้น อาหารจึงร้อนทั่วทั้งชิ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้ไมโครเวฟ ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาการอบแห้งนั้นสามารถอบได้เร็วกว่าวิธีอื่น ๆ ระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ พบว่า ค่าเพคเตอร์ในการสูญเสียของผลิตภัณฑ์แห้งจะลดลง ในขณะที่ อุณหภูมิและความดันในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ พองตัว และมีโครงสร้างรูพรุนภายใน ทำให้เกิดการคืนตัวดี สำหรับการวิเคราะห์และสร้างตู้อบแห้งหนึ่งปลากะพงด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยให้กลุ่ม TMP Product สามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นและเพิ่มกำลังการผลิตได้มากขึ้น ได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

3.1 การศึกษาปัญหาสำหรับการอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ

จากการสอบถามข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งปลากะพงขาวเบื้องต้นจากประธานกลุ่ม TMP พบว่า กระบวนการอบในการแปรรูปหนึ่งปลากะพงขาวเป็นหนึ่งปลากะพงขาวทอดกรอบนั้นมีกระบวนการทั้งหมด 2 กระบวนการคือ กระบวนการที่ 1 เป็นการอบแห้งปลากะพงสดก่อนเข้าสู่กระบวนการทอดกรอบ ซึ่งในกระบวนการนี้เป็นการนำหนึ่งปลากะพงที่เหลือจากการชำแหละเนื้อปลาเพื่อส่งออกเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำหนึ่งปลาที่ได้มาทำความสะอาดพร้อมทั้งนำเกล็ดปลาออกเรียบร้อยแล้ว โดยปกติที่ผ่านมาทางกลุ่มชุมชนได้มีการทำหนึ่งปลาแห้งอยู่ 2 วิธีด้วยกัน ประกอบด้วย การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวช่วยในการทำความร้อนและการใช้พลังงานความร้อนแบบลมร้อนซึ่งทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมานั้นใช้เวลานานพอสมควร ซึ่งการทำให้หนึ่งปลากะพงแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลาในการทำแห้งประมาณ 2-3 ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมได้ยาก ในส่วนของการทำแห้งด้วยการใช้ลมร้อนนั้นทำให้การอบแห้งหนึ่งปลากะพงลดลงแต่ก็ยังคงเวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง จากนั้นได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับพลังงานได้เข้ามาช่วยเหลือในกระบวนการอบแห้งหนึ่งปลากะพงขาวก่อนเข้าสู่กระบวนการทอดกรอบคือการใช้โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถลดต้นทุนได้ดีเนื่องจากเป็นโรงเรือนขนาดใหญ่สามารถทำแห้งหนึ่งปลากะพงได้ปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่ากระบวนการนี้ไม่มีความจำเป็นใดๆ ที่จะต้องใช้วิธีการอบด้วยไมโครเวฟถึงแม้การอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลานานแต่ปริมาณที่ได้และความคุ้มทุนก็เพียงพอต่อความต้องการ

ของประธานกลุ่ม จากนั้นผู้วิจัยได้สอบถามถึงกระบวนการในการอบแห้งในกระบวนการที่ 2 คือ การอบแห้งหลังจากทอดและสลัดน้ำมันเรียบร้อยแล้ว ในกระบวนการนี้การอบแห้งแบบดั้งเดิมคือการใช้ตู้อบที่ใช้พลังงานความร้อนจาก Heater ซึ่งกระบวนการในการอบนั้นจะอบด้วยปริมาณครั้งละ 2 กิโลกรัม และใช้เวลาสำหรับการอบครั้งละประมาณ 40 นาที ซึ่งในกระบวนการนี้ทำให้เกิดความล่าช้าต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์ เพราะใช้เวลานานและได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นผู้วิจัยและประธานกลุ่มจึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งปลากะพงขาวในกระบวนการด้วยไมโครเวฟหลังจากการทอดและสลัดน้ำมันเป็นที่เรียบร้อยแล้วนี้ โดยมีเป้าประสงค์ในการทำให้เครื่องอบที่ลดระยะเวลาในการอบแต่ยังคงซึ่งความกรอบของแห้งปลากะพง

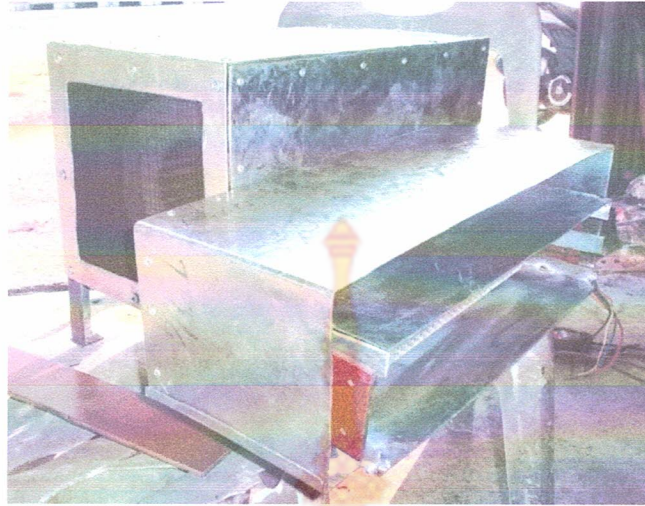
3.2 การศึกษากระบวนการอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

หลังจากการศึกษาองค์ประกอบต่างๆ สำหรับการอบแห้งปลากะพงด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเบื้องต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่สร้างชุดต้นแบบสำหรับการอบโดยการสร้างชุดต้นแบบนั้นเป็นการสร้างตู้อบที่มีขนาดยาวประมาณ 50 เซนติเมตร กว้าง 35 เซนติเมตร สูงประมาณ 30 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 โครงสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการอบแห้งปลากะพงขาว

เมื่อออกแบบเครื่องต้นแบบเรียบร้อยแล้วผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างเครื่องซึ่งภายในโครงสร้างประกอบด้วยชุดที่ให้ความร้อนด้วย Heater และการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟแสดงการสร้างชุดต้นแบบได้ดังภาพที่ 3-2 โดยภาพที่ 3-2 เป็นชุดส่งผ่านความร้อนด้วย Heater และมี Blower เป็นอุปกรณ์สำหรับการเป่าลมร้อนเข้าห้องอบ ภาพที่ 3-3 เป็นการประกอบชุดลมร้อนเข้ากับห้องอบ โดยมีมอเตอร์เป็นตัวหมุนพัดสำหรับการอบ ซึ่งการทดลองสำหรับการอบนั้นเป็นการผสมผสานระหว่างลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยจะมีการทดลองการอบแห้งปลากะพงด้วยลมร้อน 10-30 นาที ต่อด้วยการอบด้วยไมโครเวฟ 5-20 นาที จากการทดลองเบื้องต้นจะเห็นว่า การอบจากเครื่องต้นแบบนี้สามารถนำแนวทางไปประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างเครื่องอบได้ แต่การสร้างเครื่องอบที่ขนาดใหญ่ขึ้นอาจจะต้องคำนึงถึงการแผ่กระจายของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมทั้งการควบคุมอุณหภูมิที่ทั่วถึงสำหรับการอบแห้งปลากะพงขาว



ภาพที่ 3-2 ชุดลมร้อนสำหรับอบแห้งแผงกะพง



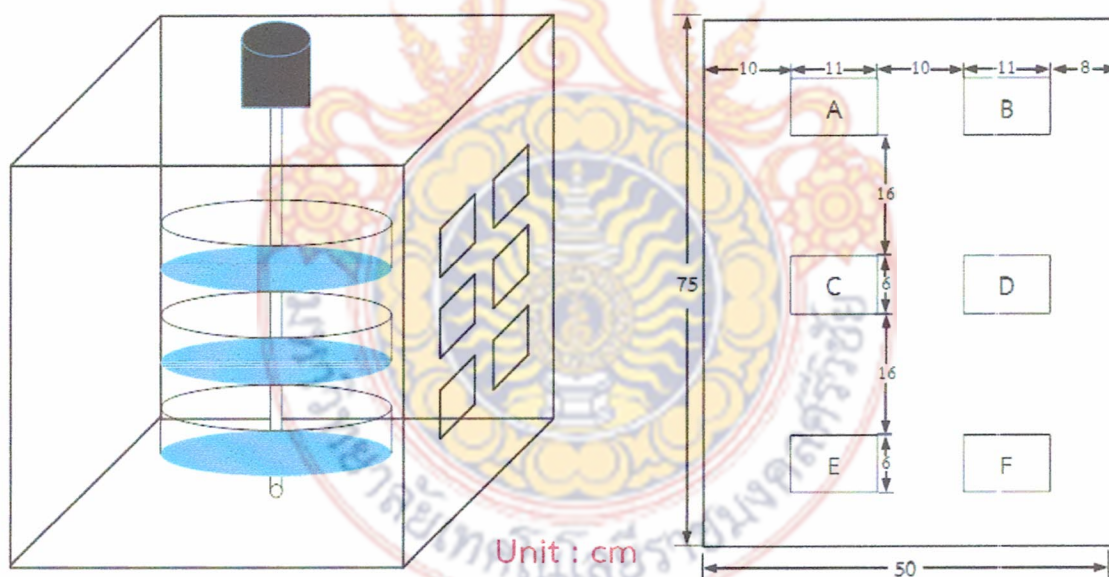
ภาพที่ 3-3 การประกอบชุดลมร้อนกับห้องอบแห้งแผงกะพง

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของพลังงานพบว่า แม้การอบแห้งแผงกะพงด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะให้ผลการอบที่น้ำพึงพอใจแต่พลังงานที่สูญเสียไปกับการอบนั้นเยอะพอสมควรเนื่องจากการการอบด้วยลมร้อนนั้นจะประกอบด้วยชุด Heater และ Blower ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง ผู้วิจัยจึงได้ค้นคว้าและหาแนวทางเพื่อลดปัญหาในการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลืองนี้จึงได้ข้อสรุปว่ายังคงมีการอบแห้งแผงกะพงด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแต่จะใช้พลังงานความร้อนที่เกิดจากห้องควบคุมแมกนีตรอนเนื่องจากในห้องควบคุมนั้นโดยปกติแล้วจะมีอุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นในระบบอย่างแน่นอนแต่อาจเป็นอุณหภูมิที่ไม่สามารถควบคุมได้ เมื่อได้รับความร้อนจากตู้ควบคุมจากนั้นได้ทำการส่งถ่ายพลังงานความร้อนจากตู้ควบคุมไปยังห้องอบเพื่อลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการออกแบบอุปกรณ์สร้างความร้อนแบบ Heater และข้อดีทางอ้อมคือได้มีการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ต่างๆ ในห้องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟจากแมกนีตรอน

3.3 การออกแบบเครื่องอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ

จากการศึกษาปัญหาแนวทางและประเด็นต่างๆ พร้อมทั้งการทดลองในการสร้างเครื่องต้นแบบเบื้องต้นสำหรับการอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ พบว่าการอบแห้งปลากะพงขาวที่ได้จากการทอดเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น ในการอบด้วยไมโครเวฟนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอบได้แต่จะต้องคำนึงถึงปริมาณที่ได้จากการอบ เวลาในการอบ และพลังงานทั้งหมดที่สูญเสียไปสำหรับการอบแห้งปลากะพงขาว นอกจากนี้เมื่ออบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องพิจารณาถึงความชื้นที่ยังคงเหลือในหนังปลากระพงและความกรอบที่ยังคงเหมือนกับการอบด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งการออกแบบเครื่องที่สามารถตอบสนองได้หลากหลายปัจจัยตามที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการออกแบบดังนี้

ในส่วนของการส่งคลื่นที่กำหนดจากแมกนีตรอน ผู้วิจัยเลือกใช้แมกนีตรอนที่กำหนดสัญญาณความถี่ 2.45 GHz ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย โดยแบ่งการส่งพลังงานที่เกิดจากการแผ่กระจายคลื่นของแมกนีตรอนรวมทั้งสิ้น ทั้งหมด 6 ตัว โดยกำลังไฟฟ้าของแมกนีตรอนจะมีขนาดแต่ละตัวเท่ากับ 1000 W เพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างห้องอบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ โดยมีการออกแบบโครงสร้างห้องอบและระยะห่างระหว่างแมกนีตรอนสำหรับการส่งสัญญาณความถี่ย่านไมโครเวฟได้ดังภาพที่ 3-4

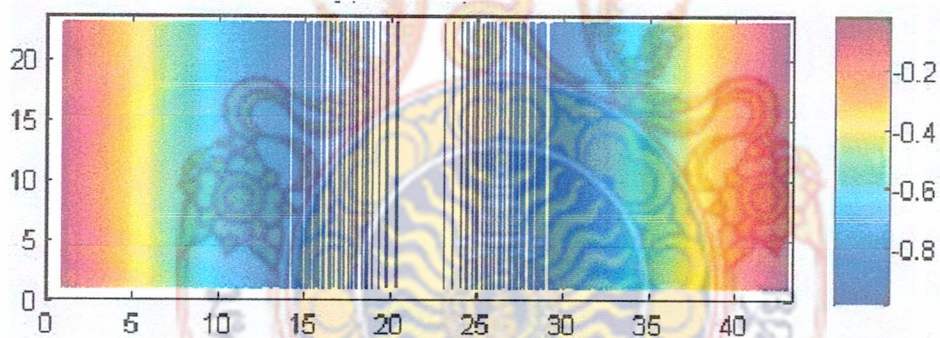


ภาพที่ 3-4 โครงสร้างห้องอบและตำแหน่งติดตั้งแมกนีตรอนจำนวน 6 ตัว

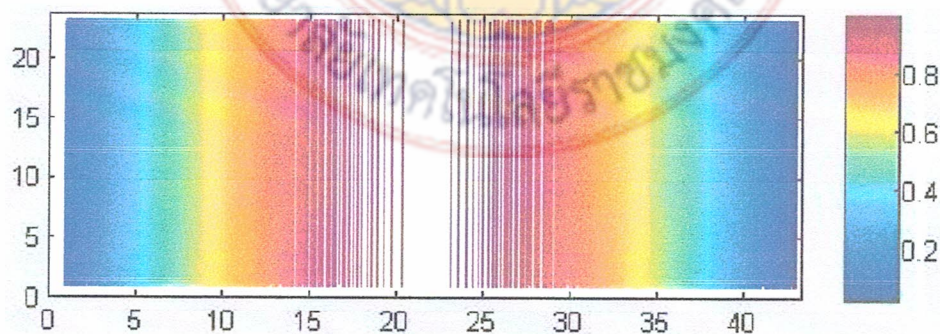
ภาพที่ 3-4 เป็นการออกแบบในการสร้างเครื่องอบด้วยการทำความร้อนด้วยแมกนีตรอนทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งในการวางระยะระหว่างแมกนีตรอนเป็นการวางแบบสมมาตรเพื่อให้การกระจายคลื่นนั้นครอบคลุมได้ทั่วห้องอบ อย่างไรก็ตามนอกจากระยะห่างระหว่างแมกนีตรอนที่เหมาะสมแล้วยังมีประเด็นของการวิเคราะห์ในส่วนของการนำคลื่น เพราะเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการส่งสัญญาณไมโครเวฟ จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงความถี่คัตออฟที่เหมาะสมอันเนื่องมาจากการออกแบบค่าของความกว้างและความยาวของขนาดท่อนนั่นเอง

จากทฤษฎีการออกแบบท่อนำคลื่นในบทยที่ผ่านมา เมื่อแทนค่า a และ b ก็จะสามารถหาค่าของความถี่คัตออฟของโหมด TE และ โหมด TM ได้ จากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแลบเพื่อหาค่าความถี่คัตออฟ โดยเริ่มต้นจากการแทนค่า $a = 11$ cm และ $b = 6$ cm โดยการพิจารณาโหมดคลื่นกรณิโหมดพื้นฐาน $m = 1, n = 0$ จะได้ความถี่คัตออฟเท่ากับ 1.36 GHz จากเพื่อความเหมาะสมในการออกแบบค่าความยาวและความกว้าง a และ b จะมีค่าประมาณ $b=(1/2)a$ สำหรับการออกแบบความถี่คัตออฟของท่อนำคลื่นเพื่อนำไปใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาตามสมการ $f_c < f_o$ โดยที่ f_c คือความถี่คัตออฟ และ f_o คือความถี่มูลฐานที่ต้องการส่งคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในที่นี่จะใช้ $f_o = 2.45$ GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่เกิดจากการกำเนิดคลื่นด้วยแมกนีตรอน

จากการจำลองสามารถแสดงผลของคลื่นนิ่งภายในท่อได้ดังภาพที่ 3-5 ซึ่งในโปรแกรมนั้นอาจตั้งค่าความยาว a ความกว้าง b ในหน่วยของนิ้วก็ได้โดยที่ $a = 11$ cm นั้น 4.33 นิ้ว มีค่าเท่ากับ และ $b = 6$ cm มีค่าเท่ากับ 2.36 นิ้ว ตามลำดับ โดยภาพที่ 3-5 นั้น แสดงถึงค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าในโหมด 10 ซึ่งจะแสดงค่าของโหมด TE₁₀ และโหมด TM₁₀ และภาพที่ 3-6 นั้น แสดงถึงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในโหมด 10 ตามลำดับ

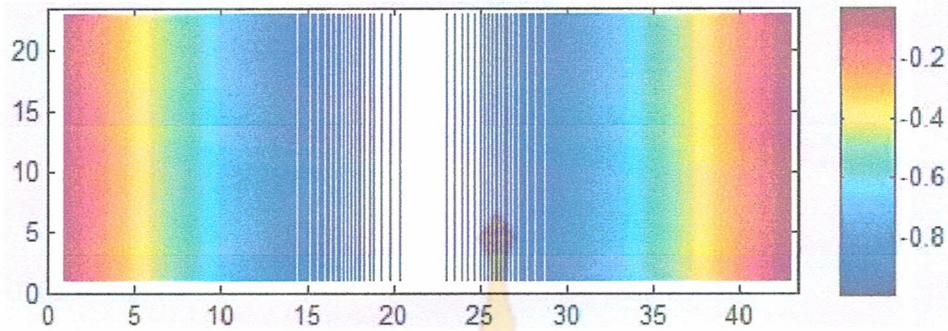


(ก) ค่าความเข้มแบบสเกลาร์ของสนามไฟฟ้าในแนวแกน y โหมด TM₁₀

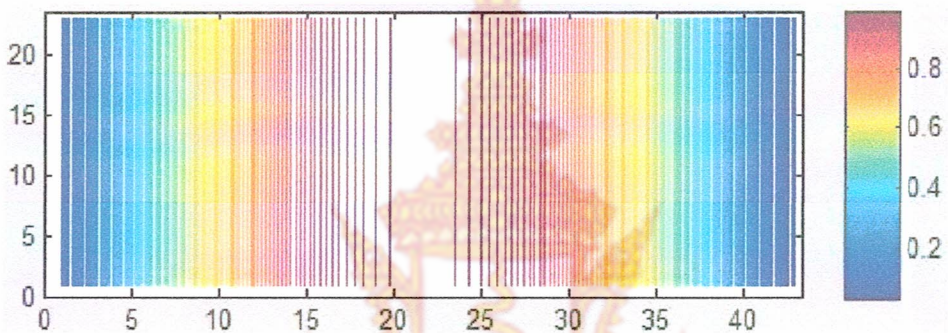


(ข) ค่าความเข้มแบบสเกลาร์ของสนามไฟฟ้าในแนวแกน y โหมด TE₁₀

ภาพที่ 3-5 การกระจายตัวของคลื่นนิ่งของสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น



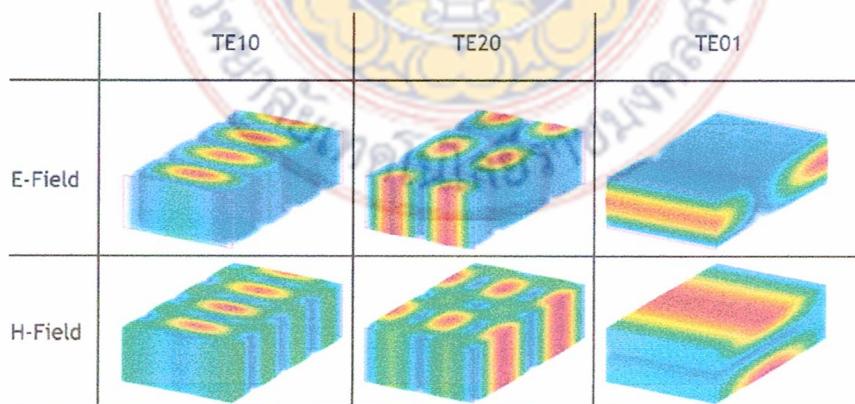
(ก) ค่าความเข้มแบบสเกลาร์ของสนามแม่เหล็กในแนวแกน x โมด TM_{10}



(ข) ค่าความเข้มแบบสเกลาร์ของสนามแม่เหล็กในแนวแกน x โมด TE_{10}

ภาพที่ 3-6 การกระจายตัวของคลื่นนิ่งของสนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่น

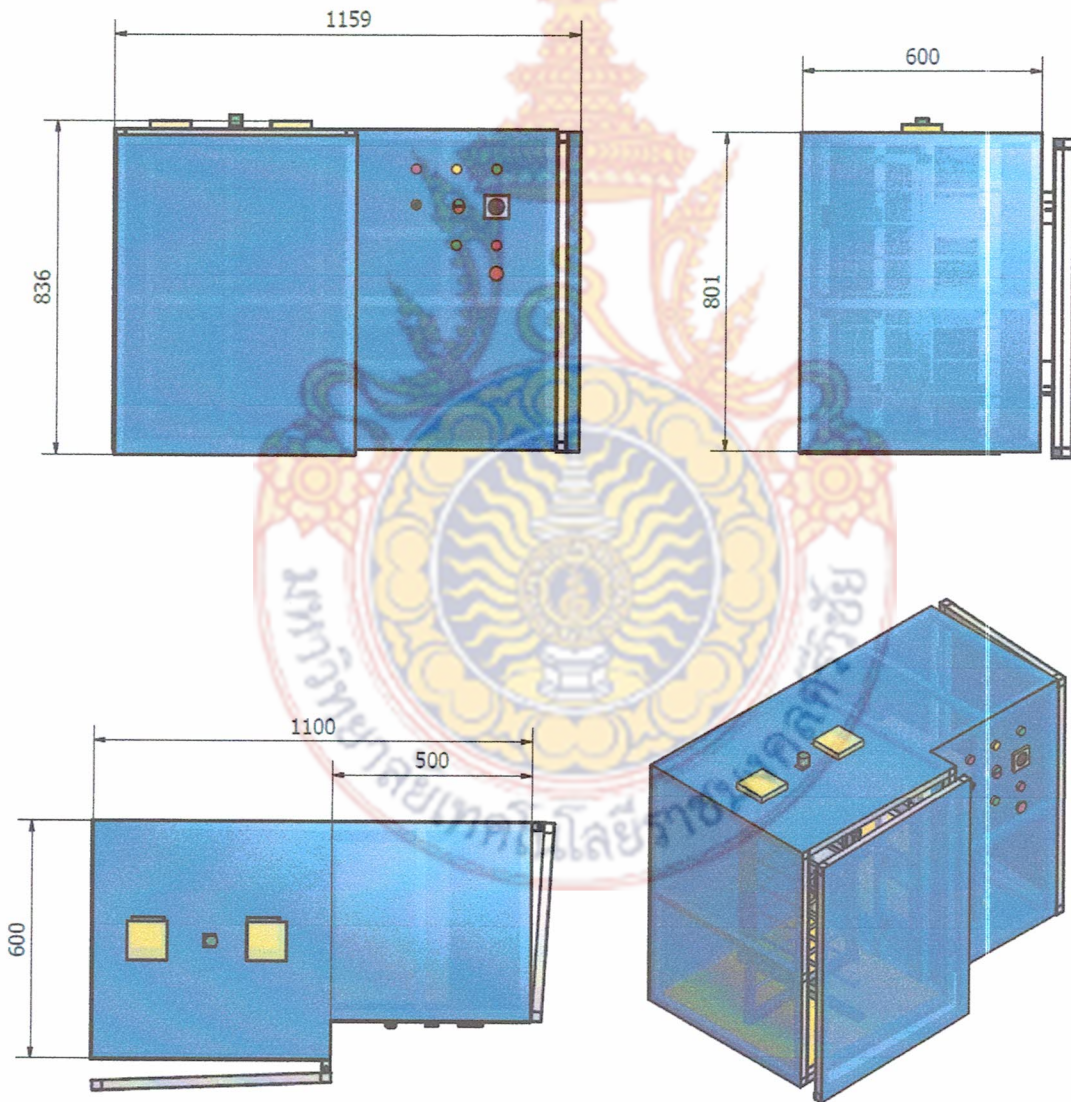
จากผลการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมแมทแลบสามารถวิเคราะห์ความถูกต้องตามทฤษฎีของโปรแกรมในเชิงพานิชย์ได้เช่นกัน ซึ่งอาจจะพิจารณาโหมดคลื่นในรูปแบบอื่นได้ดังตัวอย่างที่แสดงดังภาพที่ 3-7



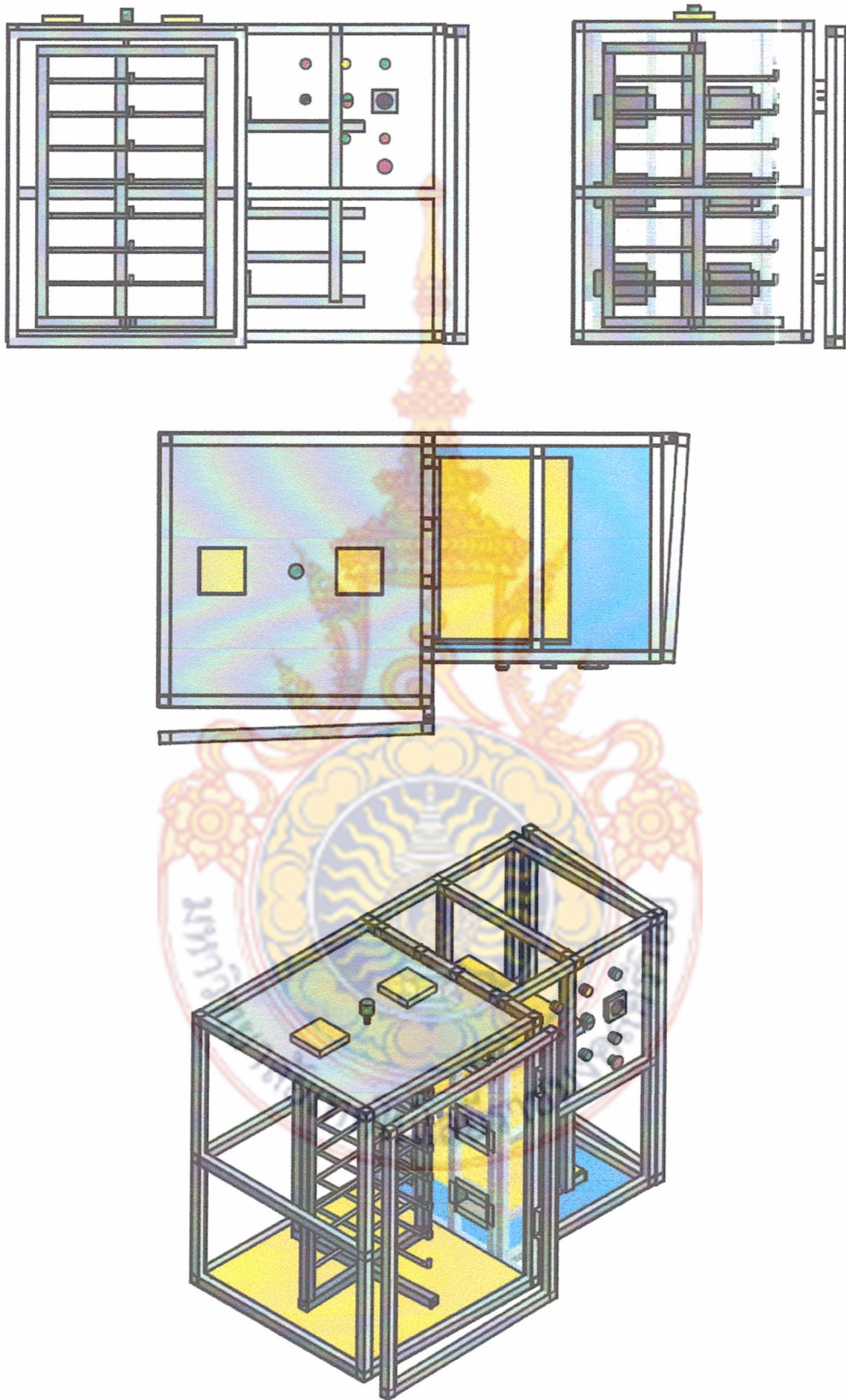
ภาพที่ 3-7 การกระจายตัวของคลื่นนิ่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดต่าง ๆ ภายในท่อนำคลื่น

3.4 การสร้างเครื่องอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบ

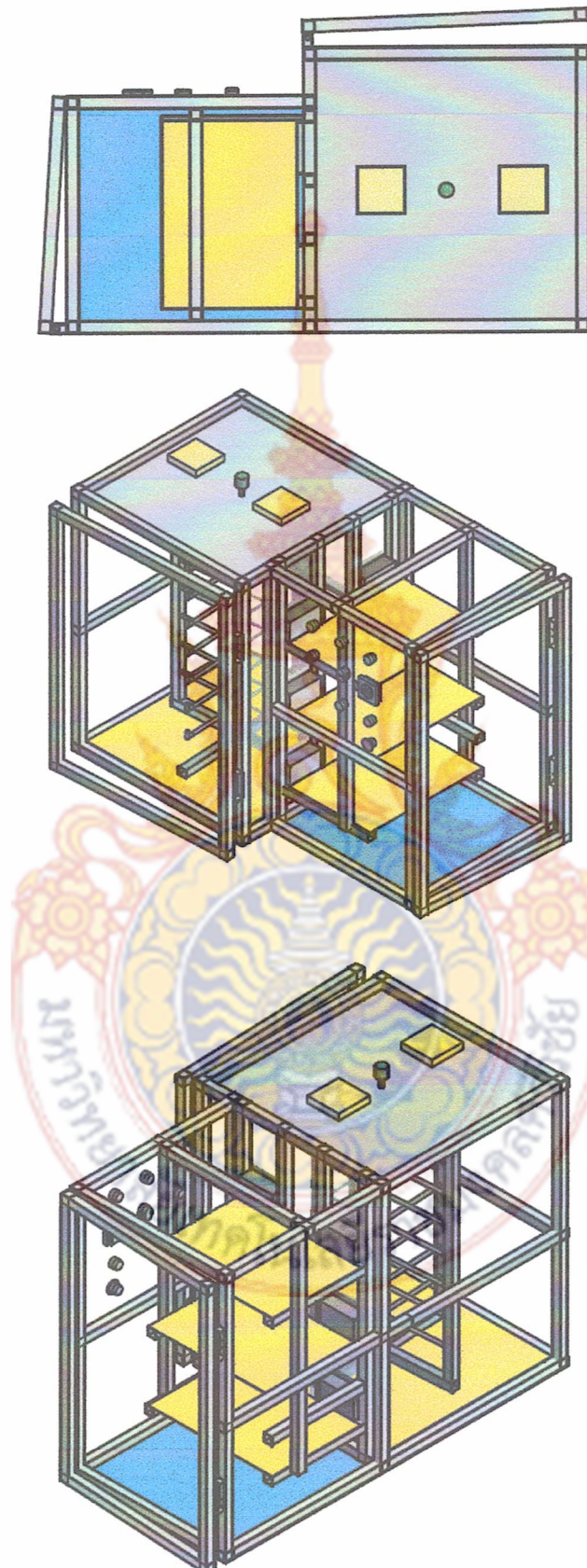
เมื่อได้แนวทางการสร้างเครื่องอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบรวมทั้งการวางอุปกรณ์และระบบควบคุมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3-8 เรียบร้อยแล้วจากนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบสำหรับการสร้างได้ดังภาพที่ 3-9 ถึง ภาพที่ 3-11 โดยที่ ภาพที่ 3-9 คือการออกแบบโครงสร้างตู้ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นตู้อบและส่วนที่เป็นตู้สำหรับวางอุปกรณ์ควบคุมและแมกนีตรอนโดยส่งตรงกลางของตู้จะเป็นส่วนของการวางท่อนำคลื่นเพื่อส่งคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตู้อบ ภาพที่ 3-10 ถึง ภาพที่ 3-11 คือการวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุมซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นชุดก้านเนิดสัญญาณไมโครเวฟ อุปกรณ์ควบคุมและภาคจ่ายกำลังไฟฟ้าในทุกภาคส่วน



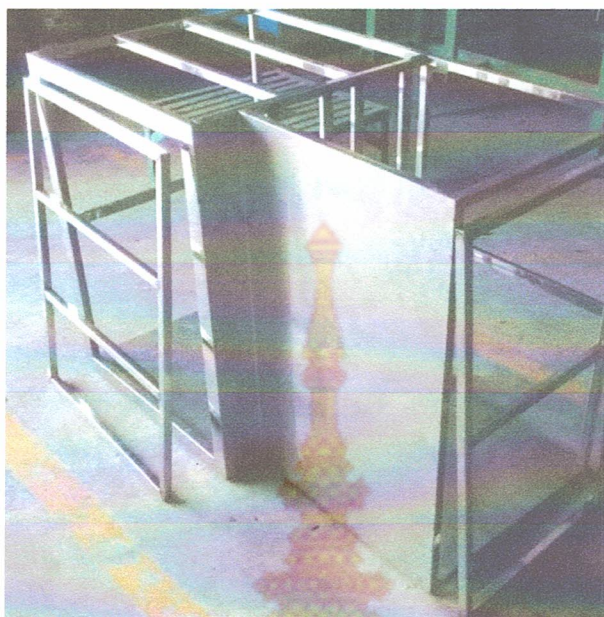
ภาพที่ 3-8 การออกแบบโครงสร้างแบบ 3D ของเครื่องอบแห้งปลากะพง



ภาพที่ 3-8 (ต่อ) การออกแบบโครงสร้างแบบ 3D ของเครื่องอบแห้งปลากระพง



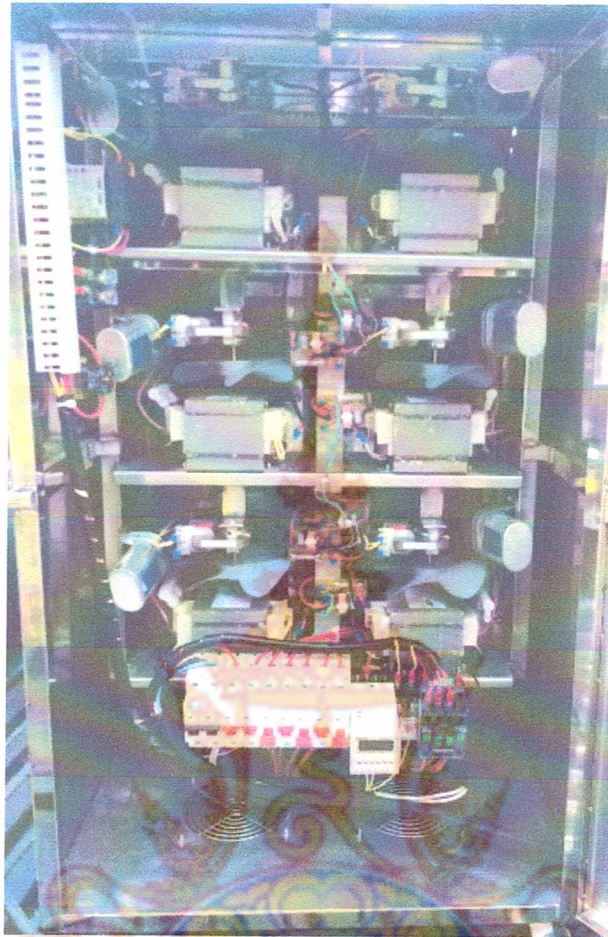
ภาพที่ 3-8 (ต่อ) การออกแบบโครงสร้างแบบ 3D ของเครื่องอบแห้งปลากะพง



ภาพที่ 3-9 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งปลากระพง



ภาพที่ 3-10 การวางอุปกรณ์ชุดกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟด้วยแมกนีตรอน



ภาพที่ 3-11 การประกอบชุดอุปกรณ์และชุดควบคุมเข้ากับตู้อบไมโครเวฟ

ในส่วนของห้องอบไมโครเวฟได้ออกแบบฐานรองสำหรับใส่หนึ่งปลากะพงแบบถาดทั้งหมด 8 ชั้น ซึ่งลักษณะของถาดสามารถอบได้ทั้งหนึ่งปลาสดและหนึ่งปลากะพงที่ทอดเสร็จเรียบร้อยแล้วได้เช่นกัน ในลักษณะของการออกแบบทั้งหมดสำหรับถาดอบหนึ่งปลานั้น สามารถนำถาดหลังจากการอบทำความ สะอาดได้ง่ายและสะดวก เนื่องจากถาดรองสำหรับอบและฐานนั้นแยกเป็นส่วนๆ สามารถแสดง องค์ประกอบห้องอบพร้อมทั้งการประกอบถาดเข้ากับชุดมอเตอร์ซึ่งสามารถหมุนและควบคุมความเร็ว ของถาดได้ตามความต้องการ ดังภาพที่ 3-12 ถึง ภาพที่ 3-14 ในการประกอบเข้ากับชุดมอเตอร์นั้นเมื่อ ต้องการนำถาดที่ใช้ในการอบออกจากฐานรองห้ามหมุนแกนมอเตอร์เนื่องจากมอเตอร์เป็นมอเตอร์เกียร์ แต่สามารถกดปุ่มควบคุมมอเตอร์ให้สามารถหมุนและสามารถนำถาดอบออกจากฐานรองได้ตามลำดับ



ภาพที่ 3-12 การออกแบบชั้นสำหรับใส่ถาดเข้ากับตู้อบไมโครเวฟ



ภาพที่ 3-13 การประกอบชุดมอเตอร์เข้ากับชั้นวางสำหรับใส่ถาด



ภาพที่ 3-14 การวางถาดสำหรับอบแห้งปลากะพงด้วยไมโครเวฟ



ภาพที่ 3-15 การออกแบบโครงสร้างที่นำคลื่น

สำหรับการออกแบบช่องสำหรับประกอบกับท่อนำคลื่นสามารถแสดงโครงสร้างได้ดังภาพที่ 3-15 ถึงภาพที่ 3-16 โดยช่องท่อนำคลื่นมีทั้งหมด 6 ช่อง และวางแบบสมมาตรเพื่อให้สามารถควบคุมการกระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วห้องอบ



ภาพที่ 3-16 ขนาดของโครงสร้างท่อนำคลื่น

การควบคุมและแสดงผลสำหรับผู้ใช้งานเครื่องอบแห้งปลากะพงขาวทอดกรอบด้วยไมโครเวฟนั้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3-17 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ สำหรับชุดไฟแสดงผลจะประกอบด้วยไฟแสดงผลทั้งหมด 3 สถานะและปุ่มสำหรับการควบคุม คือ



สีแดง หมายถึง การเปิดและการปิดกระแสไฟฟ้าก่อนจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ



สีเหลือง หมายถึง สถานะพร้อมทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการอบไมโครเวฟ



สีเขียว หมายถึง สถานะที่แมกนีตรอนและเครื่องอบกำลังทำงาน



สวิตช์ควบคุม สามารถเปิดปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าทั้งระบบของตู้อบไมโครเวฟ



สวิตช์ควบคุมแมกนีตรอน สามารถควบคุมการเปิดปิดการทำงานของแมกนีตรอน



Timer สามารถควบคุมเวลาสำหรับเปิดการทำงานของแมกนีตรอน



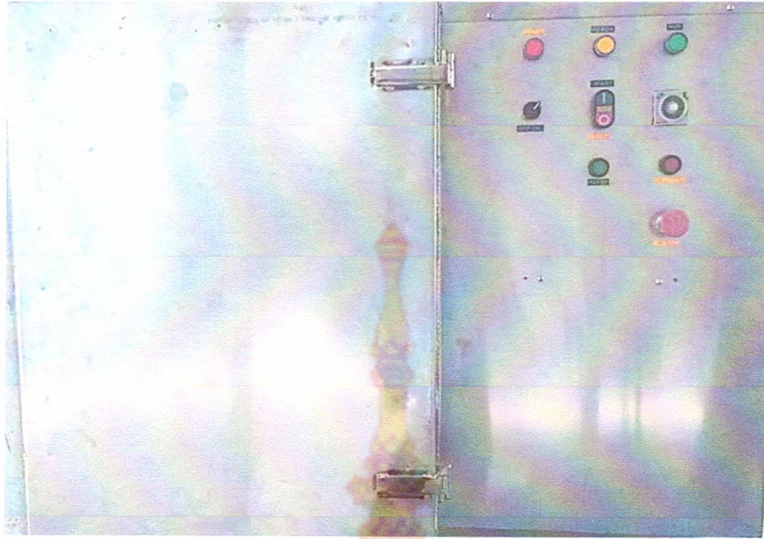
สวิตช์ควบคุมมอเตอร์ สามารถควบคุมการหมุนของถาดเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน



สวิตช์ Reset สามารถ Reset ระบบการทำงานของอุปกรณ์ใหม่อีกครั้ง



สวิตช์ Emergency สามารถปิดอุปกรณ์ทุกตัวในกรณีฉุกเฉิน



ภาพที่ 3-17 การควบคุมและแสดงผลหน้าตู้อบไมโครเวฟ



บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ผ่านมาเป็นส่วนของทฤษฎีและหลักการออกแบบและสร้างเครื่องหนึ่งปลากะพงแห้งด้วยไมโครเวฟโดยแนวคิดในการสร้างเครื่องนอกจากการใช้ไมโครเวฟแล้วยังมีส่วนของลมร้อนที่สามารถช่วยให้กระบวนการอบนั้นมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งการอบนั้นยังคงความรู้จากภูมิปัญญาพื้นฐานของชาวบ้านในลักษณะของแนวทางและขั้นตอนในการอบโดยใช้เครื่องสำหรับอบหนึ่งปลากะพงหลังจากกระบวนการทอดที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว และรวมถึงความกรอบ รสชาติ ที่ยังคงเดิม

วิธีการวัดทดสอบจะประกอบด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ทดสอบวัดค่าความชื้นจากหนึ่งปลากะพงจากการแปรรูปอาหารด้วยแนวคิดดั้งเดิมที่กลุ่ม TMP ทั้งก่อนและหลังการอบ ตลอดจนความกรอบของหนึ่งปลาที่ได้จากการอบ
2. วัดอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับเวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการอบด้วยไมโครเวฟ
3. วัดทดสอบการรั่วของไมโครเวฟบริเวณรอบตู้
4. หาค่าความเหมาะสมทั้งปริมาณของอุณหภูมิ เวลา กำลังไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ถึงความชื้นและความกรอบของหนึ่งปลากะพง

4.1 การวัดค่าความชื้นของหนึ่งปลากะพงด้วยการอบแบบดั้งเดิม

การทดสอบหนึ่งปลากะพงจากการอบวิธีดั้งเดิมโดยใช้วิธีการอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวของกลุ่ม TMP โดยใช้เครื่องอบดังภาพที่ 4-1 ซึ่งในกระบวนการอบนั้นจะเป็นการนำหนึ่งปลากะพงที่ได้จากการทอดเสร็จเรียบร้อยแล้วเข้าห้องอบประมาณ 40-60 นาที เบื้องต้นผู้วิจัยวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการวัดทดสอบคือ ค่าความชื้น (สามารถวิเคราะห์ได้เป็นค่าในเชิงปริมาณ) โดยใช้เครื่องวัดความชื้นยี่ห้อ Sartorius และความกรอบของหนึ่งปลาตลอดจนผิวของหนึ่งปลาเพื่อให้สอดคล้องกับหนึ่งปลากะพงตามต้นแบบ (สามารถวิเคราะห์ได้เป็นค่าในเชิงปริมาณได้แต่อาจพิจารณาด้วยการชิมหนึ่งปลากะพงที่ผ่านการแปรรูปเรียบร้อยแล้วด้วยผู้ประกอบการเอง) ซึ่งกระบวนการสำหรับการวัดความชื้นเป็นการวัดความชื้นของหนึ่งปลากะพงของกลุ่มตัวอย่างแบบไม่เจาะจงเพื่อดูค่าความชื้นในภาพรวมทั้งก่อนอบและหลังอบ โดยผลการวัดทดสอบความชื้นของหนึ่งปลากะพงเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความชื้นดังภาพที่ 4-2 พบว่าความชื้นของหนึ่งปลากะพงก่อนการอบจำนวน 20 ชิ้น (วัดค่าความชื้นครั้งละ 1 ชิ้น) จะมีค่าความชื้นเท่ากับ 3.63-4.75 % และค่าความชื้นหลังการอบจะมีค่าความชื้นของหนึ่งปลากะพงจำนวน 20 ชิ้น (วัดค่าความชื้นครั้งละ 1 ชิ้น) จะมีค่าความชื้นเท่ากับ 2.30-3.80 %



ภาพที่ 4-1 เครื่องอบแห้งปลากะพงแบบดั้งเดิมของกลุ่ม TMP



ภาพที่ 4-2 ตัวอย่างการวัดค่าความชื้นของแห้งปลากะพง

จากการวัดค่าความชื้นของหนังปลากระพงทั้งก่อนอบและหลังอบพบว่าค่าความชื้นของหนังปลากระพงก่อนอบและหลังอบต่างกันเพียงเล็กน้อยผลที่ได้นั้นอาจเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพิจารณาในการอบหนังปลากระพงด้วยไมโครเวฟอย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าการอบวัสดุหรือชิ้นงานที่มีความชื้นที่น้อยและกระบวนการที่สามารถลดความชื้นให้น้อยลงอาจเป็นเรื่องที่ยากแต่ผู้วิจัยคาดว่า การอบด้วยไมโครเวฟนั้นก็จะเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถอบวัสดุที่มีความชื้นน้อยให้มีความชื้นลดลงจากเดิมได้แต่จะต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและต้นทุนสำหรับการใช้พลังงานและเวลาในการอบตลอดจนปริมาณที่สามารถอบได้ในแต่ละครั้ง แต่ในทางความเป็นจริงแล้วจะต้องคำนึงถึงผิวของหนังปลาจะได้ไม่มีรอยไหม้เกรียม หรือเสียรูปหลังจากการอบ ตลอดจนรสชาติจะต้องยังคงเดิมตามต้นฉบับแบบดั้งเดิม

4.2 การวัดอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับเวลาของการอบด้วยไมโครเวฟ

หลังจากการวัดค่าความชื้นเริ่มต้นและเมื่อวัดความชื้นด้วยเครื่องอบโดยใช้วิธีการอบแบบดั้งเดิมของกลุ่ม TMP แล้ว ทำให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้ คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอบ จำนวนหนังปลาที่ใช้ในการอบ เวลาที่ใช้ในการอบ และความชื้นของหนังปลาที่ได้หลังจากการอบเสร็จเรียบร้อย ซึ่งเมื่อทดสอบเครื่องอบไมโครเวฟโดยการใส่หนังปลาในห้องอบโดยปริมาณของหนังปลาในการอบที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-3 แล้วสามารถสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิภายในห้องอบนั้นสูงถึง 50-80 องศาเซลเซียส สามารถแสดงภาพตัวอย่างได้ดังภาพที่ 4-4

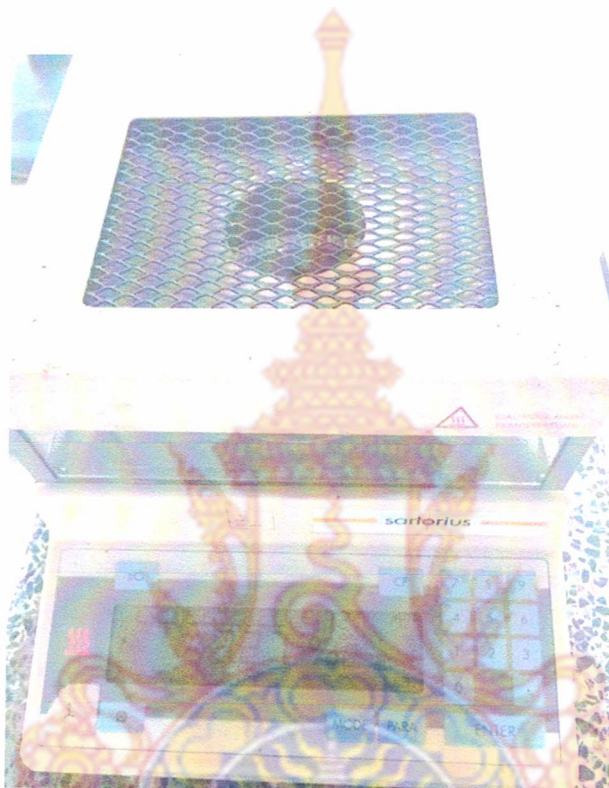


ภาพที่ 4-3 การใส่หนังปลากระพงในห้องอบไมโครเวฟ



ภาพที่ 4-4 การวัดอุณหภูมิหลังจากการอบด้วยไมโครเวฟ

การวัดอุณหภูมิของห้องอบหลังจากการอบด้วยไมโครเวฟเรียบร้อยแล้วสามารถสังเกตเห็นอุณหภูมิในภาพรวมโดยมีการวัดอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามลำดับขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดโดยสามารถวิเคราะห์ได้ผลเบื้องต้นแล้วจากนั้นทำการวัดความชื้นของหนังปลากะพงด้วยเครื่องมือวัดความชื้นหลังจากการอบด้วยไมโครเวฟดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ผลการวัดความชื้นของหนังปลากะพงหลังการอบด้วยไมโครเวฟ

4.3 การวัดค่าความเข้มของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการอบด้วยไมโครเวฟ

นอกจากการวัดทดสอบค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญต่อการอบแล้ว ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากการอบด้วยไมโครเวฟนั้นหากมีการออกแบบเครื่องอบไม่สมบูรณ์หรือมีการรั่วไหลของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้งานได้ ดังนั้นสำหรับเครื่องอบหนังปลากะพงด้วยไมโครเวฟนี้ ผู้วิจัยได้ทดสอบสำหรับการวัดค่าความเข้มของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ เครื่องอบ ซึ่งประกอบด้วย การวัดทดสอบในด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลังของตู้อบ โดยแสดงการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถบอกเป็นสถานะในลักษณะของความอันตรายมากน้อยเพียงใดได้ดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.4 การหาค่าเหมาะของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการอบด้วยไมโครเวฟ

กระบวนการสำหรับการหาค่าความเหมาะสมทั้งปริมาณของอุณหภูมิ เวลา กำลังไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ถึงความขึ้นและความรอบของหนังปลากระพง นั้น อาจจะต้องพิจารณาและคำนึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลลัพธ์ที่ได้คือความขึ้นของหนังปลาที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เนื่องจากเครื่องอบนี้ใช้แมกนีตรอนรวมทั้งสิ้น 6 ตัว แต่ในทางความเป็นจริงเพื่อให้ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายสามารถแสดงการทดลองการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และผลลัพธ์ของความขึ้นในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หนังปลาที่กรอบตามความต้องการดังตารางที่ 4-1 เมื่ออบด้วยการใช้ตัวแปรดังตารางที่ 4-1 (กำลังไฟฟ้าของแมกนีตรอน 60 % โดยใช้แมกนีตรอน 3 ตัว ตัวที่ (A, D, E) หรือ (B, C, F)) พบว่าค่าความขึ้นของหนังปลากระพงนั้นจะมีค่าประมาณ 2.30-2.70 % ซึ่งค่าความขึ้นที่ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ประกอบการและเมื่อทดสอบโดยการชิมแล้วผู้ประกอบการก็มีความพึงพอใจในระดับดีเนื่องจากหนังปลากระพงนั้นยังคงมีความกรอบเหมือนการอบแบบดั้งเดิมแต่สามารถลดเวลาในการอบได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองการอบด้วยตัวแปรที่แตกต่างกัน

กำลังไฟฟ้าของแมกนีตรอน	จำนวนแมกนีตรอน (ตัวที่)	อุณหภูมิ (องศา °C)	เวลาในการอบ
60 %	2 (C, D)	50-70	20 นาที
60 %	3 (A, D, E), (B, C, F)	60-80	15 นาที
50 %	2 (C, D)	50-70	25 นาที
50 %	3 (A, D, E), (B, C, F)	50-70	20 นาที
30 %	2 (C, D)	50-60	30 นาที
30 %	3 (A, D, E), (B, C, F)	50-60	25 นาที
30 %	4 (A, C, D, F)	50-70	20 นาที

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าการอบในแต่ละครั้งอาจขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ประกอบการซึ่งอาจมีผลของการพิจารณาในส่วนของกำลังไฟฟ้าหรือเวลาที่ใช้ทั้งหมดสำหรับการอบ โดยจากตารางนั้นเก็บข้อมูลมาจากการทดลองในการอบหลาย ๆ ครั้ง โดยหาค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้ค่าของความขึ้นของหนังปลากระพงหลังจากการอบนั้นอยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งการอบแต่ละครั้งจะอบคราวละ 2 กิโลกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้งปลากะพงด้วยไมโครเวฟ โดยมีการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องหลังจากนั้นมีการสร้างเครื่องในแต่ละภาคส่วนนอกจากนี้ได้มีการวัดทดสอบการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อความเหมาะสมในการอบแห้งปลากะพงสำหรับกลุ่ม T.M.P

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และสร้างเครื่องอบแห้งปลากะพงด้วยไมโครเวฟ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างเหมาะสม ผลของการอบแห้งเครื่องหนังกะพงด้วยไมโครเวฟสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง จากพลังงานด้วยไมโครเวฟของแมกนีตรอน สามารถลดเวลาการอบแห้งของหนังปลากะพง แต่จะต้องมีการควบคุมตัวแปรเพื่อหนังปลากะพงไม่เกิดการไหม้ หรือบิดเบือน จากความต้องการหลังอบ ค่าพารามิเตอร์การอบแห้งที่ศึกษา มีอุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส และค่ากำลังไฟฟ้าของแมกนีตรอนมีค่าประมาณ 60% 50% และ 30% ซึ่งการอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันทำให้ผลนั้นเปลี่ยนแปลงตามค่าที่กำหนด อย่างไรก็ตามผลที่เหมาะสมที่ยอมรับได้จากผู้ประกอบการสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-1 ซึ่งทำให้ตัวแปรหลักคือความชื้นและความกรอบของหนังปลากะพงนั้นมีความเหมาะสมเหมือนดังการอบด้วยวิธีดั้งเดิม แต่การอบด้วยไมโครเวฟนั้นสามารถลดเวลาในการอบได้ดีกว่าการอบในอดีต

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับการเก็บผลการทดลองที่กล่าวมาเบื้องต้นเป็นการวิเคราะห์เชิงทดลองเนื่องจากตัวแปรที่สามารถสังเกตเห็นได้คือความชื้นในหนังปลากะพง นอกจากความชื้น ตัวแปรที่จะต้องคำนึงถึงคือการคงสภาพของความกรอบ และความไม่เสียรูปจากการอบแห้งปลากะพง การเก็บผลนั้นจะต้องใช้ประสบการณ์จากผู้ประกอบการเป็นตัวกำหนดว่าเมื่ออบด้วยตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาค่าความเหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางสำหรับการอบเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดคุณภาพสูงสุดของการอบที่ได้จากการอบด้วยไมโครเวฟ

5.2.1 ควรมีการพิจารณาถึงความคุ้มทุนในการอบว่ากำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ควรเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและเวลาที่ยอมรับได้

5.2.2 ควรมีการวิเคราะห์ถึงค่าของความกรอบของหนังปลากะพง เนื่องจากตัวแปรในส่วนของความชื้นนั้นอาจไม่เพียงพอต่อการพิจารณาเพราะเบื้องต้นที่ได้ทำการทดลองนั้นจะเห็นว่าความชื้นในหนังปลากะพงนั้นมีค่าเปอเซนต์ความชื้นต่ำและเมื่ออบเรียบร้อยแล้วความชื้นที่ได้นั้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

5.2.3 ควรพิจารณาถึงการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับกรอบแบบดั้งเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษะยอ ที.เอ็ม.พี โปรตักส์ (ออนไลน์). สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2558 จาก <http://www.thaitambon.com/tambon/tsmedesc.asp?ID=900106&SME=03918145158>
- [2] B. M. A. Amer, M. A. Hossain and K. Gottschalk, "Design and Performance Evaluation of New Hybrid Solar Dryer for Banana," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 4, pp. 813-820, April 2010.
- [3] F. R. Reis, "Studies on Conventional Vacuum Drying of Foods," *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, pp. 7-18, July 2014.
- [4] M. Bettge, H. Niculescu and P. J. Gielisse, "Engineered porous ceramics using a directional freeze-drying process," *28th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2005*, Wiener Neustadt, 2005, pp. 28-34. 19-20 May 2005.
- [5] J. Vrba, M. Stejskal and M. Pourova, "Microwave Drying Machine for Textile Materials," *Microwave Conference, 2009 (EuMC 2009)*, pp. 1121-1124, 29 Sept. - 1 Oct. 2009.
- [6] R. L. Monteiro, B. A. M. Carciofi, A. Marsaioli Jr. and J. B. Laurindo, "How to make a microwave vacuum dryer with turntable," *Journal of Food Engineering*, vol. 166, pp. 276 – 284, December 2015.
- [7] X. Duan, M. Zhang, A. S. Mujumdar and Shaojin Wang, "Microwave Freeze Drying of Sea Cucumber," *Journal of Food Engineering*, vol. 96, no. 4, pp. 491 –497, February 2010.
- [8] Z. Pan, C. Shih, T. H. McHugh and E. Hirschberg, "Study of Banana Dehydration Using Sequential Infrared Radiation Heating and Freeze-drying," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 41, no. 10, pp. 1944–1951, December 2008.
- [9] L. Reynolds, "The history of the microwave oven," *Microwave World*, Vol. 10, no. 5, pp. 11–15, 1989.
- [10] R. V. Decareau. *Microwave in the food processing industry*. Academic Press Inc. 1985
- [11] G. Roussy and J.A. Pearce, *Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields*, John Wiley & Sons, 1995.

- [12] J. M. Osepchuk, "A History of Microwave Heating Application," IEEE transactions on microwave theory and technique, vol. 32, no.9, pp. 1200-1224, September 1984.
- [13] T. Funebo and T. Ohlsson, "Microwave Assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom," Journal of Food Engineering, vol. 38, no.3, pp. 353-367, November 1998.
- [14] L. W. Jia, M. R. Islam and A. S. Mujumdar, "A simulation study on convection and microwave drying of different food products," Drying Technology, vol. 21, no. 8, pp. 1549-1574, 2003.
- [15] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2551.
- [16] N. Mousa and M. Farid, "Microwave vacuum drying of banana slices," Drying Technology, vol. 20, no. 10, pp. 2055-2066, 2003.
- [17] H. Schubert and M.Regier. The Microwave Processing of Foods. Taylor and Francis Group, 2005.
- [18] J. M. Osepchuk, "Microwave power applications," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 3, pp. 975-985, March 2002.
- [19] สมศักดิ์ อรรถทิมากุล. คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า. เอกสารประกอบการสอน. 2549.
- [20] D. M. Pozar. Microwave engineering. New York: Addison-Wesley, 1990.
- [21] Tse V. Chow Ting Chan and Howard C. Reader. Understanding Microwave Heating Cavities. Artech house: Boston, London, 2000.
- [22] C. R. Buffler. Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamental for the Food Scientist. Van Nostrand Reinheld, New York, 1993.
- [23] P. J. Fellows. Dielectric, ohmic and infrared heating: Food Processing Technology Principles and Practice. 2nd ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Ch. 18, pp. 365-384, 2000.
- [24] R. P. Singh and D. R. Heldman. Microwave Heating: Introduction to Food Engineering. 3rd ed. Academic Press, London, pp. 306 – 331, 2001.
- [25] R.E. Mudgett. Electrical properties of foods in microwave processing. Engineering Properties of Foods, (M. A. Rao and S. S. H. Rizvi eds.), New York: Marcel Dekker, February 1986.

ภาคผนวก ก
เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่





Acceptance and Invitation Letter

2016 International Conference on Advanced Materials Science and Environmental Engineering (AMSEE2016)

<http://www.amsee2016.org/>

June 26-27, 2016, Chiang Mai, Thailand

Paper ID:

Paper title: Microwave Drying Machine for Sea Bass Leathers

Authors: Tantivivat Sugchai, Sudram Arkom, Chanthong Apirun and Kerdthongmee Priwan

Dear Authors,

Thank you for submitting the above paper to the 2016 International Conference on Advanced Materials Science and Environmental Engineering (AMSEE2016). AMSEE2016 will be published by Atlantis Press on Advances in Engineering Research (ISSN 2352-5401) and will be online available in full text via the press platform. All accepted papers will be submitted for indexing by ISI, CPCIS (ISTP indexing) and EI Compendex. Excellent papers will be selected and published on SCI and EI journals.

As a result of the reviews and revisions, we are pleased to inform you that the paper above has been formally accepted for publication on the above AMSEE2016 conference proceedings. We appreciate if you could send the final version of the manuscript at your earliest convenience, to ensure a timely publication of the paper. When submitting the final version, please highlight any changes or amendments made to the manuscript.

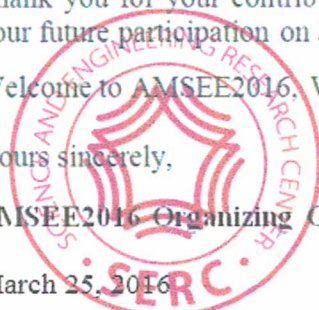
Thank you for your contribution to the AMSEE2016 and we are looking forward to your future participation on June 26-27, 2016, Chiang Mai, Thailand.

Welcome to AMSEE2016, Welcome to Chiang Mai, Thailand.

Yours sincerely,

AMSEE2016 Organizing Committee

March 25, 2016



Microwave Drying Machine for Sea Bass Leathers

Tantiviwat Sugchai^{1*}, Sudram Arkom¹, Chanthong Apirun² and Kerdthongmee Priwan³

¹ Faculty of Industrial Education and Technology Rajamangala University of Technology Srivijaya,
1 Ratchadammoenok Rd, Boryang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand

² College of Industrial Technology and Management Rajamangala University of Technology Srivijaya,
99 Thongnien Sub-district, Khanom district, Nakhon Sri Thammarat, 80210, Thailand

³ The Center for Scientific and Technology Equipment, Walailak University,
222 Thaiburi Sub-district, Thasala District Nakhonsithammarat 80161, Thailand

*Corresponding author

Abstract— Microwave drying is a dehydration process that is often used to preserve a food or material. In this study, sea bass leathers were dried by microwave technique. In order to improve the productivity, the microwave energy was applied to decrease the drying time. The sea bass leathers were dried to the desired final moisture content, whereby 70-80 °C hot air for baking are generated by the heating process from magnetrons and three levels, power microwave consists of approximately 60 %, 50 %, 30 % and drying time are 15-30 minutes based on power ON per unit of total magnetron respectively. The relation between the final applied parameters of microwave power, number of magnetron and the temperature is presented as well. This method can be applied in dehydration with microwave techniques.

Keywords— Microwave drying; Dehydration; Rate of drying; Sea bass leathers.

I. INTRODUCTION

Microwaves refer to the electromagnetic waves in the frequency range of 300 MHz up to 300 GHz. Since the great experiments were carried out by Dr. Percy Spencer in 1946, microwave heating has been used widely in food industry [1]. Once the microwave energy is absorbed, polar molecules and ions inside the food will rotate or collide, according to the alternating electromagnetic field and heat is subsequently generated from cooking. Nevertheless, and in agreement with the industrial, only 915 MHz and 2.45 GHz are used for food applications, especially the second due to its worldwide availability. The dissimilar process of dehydration has been reported by other authors, indicating some example of this process is solar drying [2], vacuum drying [3], freeze drying [4], microwave drying [5], microwave vacuum drying [6], microwave freeze drying [7], infrared radiation drying [8], etc.

In general, technology of microwave for food in Thailand domestic is widely used only in household cooking. Nowadays, for the use of microwave technology in the industry, there is no widespread usage. Because of the lack of understanding in the application of microwave heating. In addition, entrepreneurs think that microwave on high technology are composite and may cause more harm than the investigations in the baking process, rather than using another method. In Songkhla, Thailand is the source of the most delicious Seabass because the surrounding white Seabass. The Ko Yo Island area contains both salt water and fresh water, brackish water changes according to the each season of the year, it is the source of the

famous sea bass. When the frozen industrial came to carve sea bass and fish meat exported to Japan. There is still leather by the remaining fish. The idea of entrepreneurs (T.M.P.) were converted fish leather to food. The importance of the remaining sea bass leather has dried and fried tried a local distributor. As well as the widely popular both at country and abroad. Usually baked seabass skins, it will consist of 2 ways: baking with solar drying and hot air, but the two methods, it will use for a long period of time to bake. By baking with hot air, frying fish leather successfully will take about 40-50 minutes.

Therefore, this research presents ideas to design with baking by using microwave [9-11], which can reduce production time, and consider the value of food, such as the crunchy and still the same softness as well as storage for long periods as with the traditional hot air drying. There is also a concept that combination of heat from microwave and the hot-air for baking are generated by the heating process from magnetrons.

II. RELATED OF MICROWAVE HEATING THEORIES

The basic equation in microwave heating is a model of transverse electromagnetic (TEM) mode. The microwave with x - and y - components of the electromagnetic fields and they are assumed to propagate at frequency 915 MHz or 2450 MHz along the z - component direction. Maxwell's equations manage microwave heating, the electromagnetic wave collaboration with materials [12-13] is expressed in four equations:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -j\omega\mu H, \\ \nabla \times H = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} = (\sigma + j\omega\epsilon) E, \\ \nabla \cdot E = 0, \nabla \cdot H = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{or} \quad \begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \mu_0 \mu_r \frac{\partial H_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x, \end{cases} \quad (2)$$

where E is the electric field intensity (V/m), H is the magnetic field intensity (A/m), B is the magnetic flux density (Wb/m²), D is the electric flux density (C/m²), t is the time, and $D = \epsilon E$.

Waveguide is a structure that guides waves for electromagnetic waves, it able a signal to propagate with minimal loss of energy by restricting expansion. In microwave oven, the waveguide transfers power from the magnetron, where waves are formed in the baking food. Electromagnetic waveguides are evaluated by explaining Maxwell's equations or their reduced form the electromagnetic wave equation with boundary conditions are determined by the properties of the materials. From Maxwell's equations leading to curl equation is given by

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H, \quad \nabla \times H = j\omega\epsilon E \quad (3)$$

The relationship of E and H in the direction of movement in the z -axis, where $E_z, H_z \propto e^{-\gamma z}$ ($t = x, y, z$) can be expressed as

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial y} + \gamma E_y &= -j\omega\mu H_x, & \frac{\partial H_x}{\partial y} + \gamma H_y &= j\omega\epsilon E_x, \\ -\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega\mu H_y, & -\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega\epsilon E_y, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_z}{\partial y} &= -j\omega\mu H_z, & \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_z}{\partial y} &= -j\omega\epsilon E_z, \end{aligned} \quad (4)$$

where $h^2 = \gamma^2 + \omega^2\mu\epsilon$, written in the form of a relationship element in the transverse is as follows:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{1}{h^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right), & E_y &= -\frac{1}{h^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} - j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right), \\ H_x &= -\frac{1}{h^2} \left(-j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial x} \right), & H_y &= -\frac{1}{h^2} \left(j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

TEM mode, electromagnetic wave is $E_z = H_z = 0$, TE mode is $E_z = 0$ and TM mode is $H_z = 0$ respectively. The Microwave heating is used in the form of the signal transmission cable outlet metal wave that has a rectangular shape with dimensions width by length $b \times a$ is given by

TM mode $E_z = 0$, $H_z = 0$ and $E_z = X(x)Y(y)e^{-\gamma z}$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + h^2 E_z = 0 \quad (6)$$

$$X''(x)Y(y)e^{-\gamma z} + X(x)Y''(y)e^{-\gamma z} + h^2 X(x)Y(y)e^{-\gamma z} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + k_x^2 X = 0, \quad \frac{d^2 Y}{dy^2} + k_y^2 Y = 0 \quad (8)$$

The general equation is in the form of a sine function.

$$X(x) = A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x) \quad (9)$$

$$Y(y) = C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)$$

The electric field at the edge of the waveguide, leading the waves to the position $x = 0$ and $y = 0$

$$E_z |_{(x=0)} = (A \cos(0) + B \sin(0))(C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y))e^{-\gamma z} = 0 \quad (10)$$

$$E_z |_{(y=0)} = (A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x))(C \cos(0) + D \sin(0))e^{-\gamma z} = 0$$

For TM mode, consider the relationship of the electric field at the edge of the waveguide, leading the waves to the position $x = a$ and $y = b$

$$E_z |_{(x=a)} = E_0 \sin(k_x a) \sin(k_y y) e^{-\gamma z}$$

$$E_z |_{(y=b)} = E_0 \sin(k_x x) \sin(k_y b) e^{-\gamma z} \quad (11)$$

Substituting $k_x = \frac{m\pi}{a}$, $k_y = \frac{n\pi}{b}$ where m, n are 1, 2, 3, 4, ...

$f_{c(mn)}$ is cut off frequency with m, n mode whereby all relations leading to the equation are as follows:

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z}$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

$$\gamma_{mn} = \alpha + j\beta_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon} \quad (12)$$

$$\gamma_{mn} = jk \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(mn)}}{f}\right)^2}, \quad f_{c(mn)} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

For TE mode, equation is as follows:

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-\gamma z}, \quad f_{c(mn)} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (13)$$

Sea bass leathers are lossy material, they absorb microwave power and leads to temperature increase. The temperature variation is governed by heat transfer equation [10], [14] which describes the space and time behavior of the temperature field is given by

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_t \nabla T) = P, \\ \rho C_p \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} - k_t \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} = P(z,t), \\ \rho C_p \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} - k_t \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{2} \sigma(z,t) |E_x(z,t)|^2, \\ \rho C_p \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} - k_t \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E_x(z,t)|^2 \end{cases} \quad (14)$$

where ρ , C_p and k_t are material density, specific heat capacity and thermal conductivity respectively. T is the temperature. P is (EM) microwave power dissipation, and $\omega = 2\pi f$ with f being the applied frequency. σ is the effective dielectric conductivity, ϵ_0 is the permittivity of free space and ϵ'' is the imaginary part of the permittivity of the material.

The rehydration capacity [15] is described as water gain as follow:

$$\text{Weight gain} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (15)$$

where W_t is weight after rehydration at time t and W_d is weight before rehydration at time t respectively.

The Lewis model has been widely applied to predict the thin-layer drying data of food products exhibiting a decreasing drying rate [16], which only takes into account the surface resistance to moisture transfer. The moisture ratio (MR) was calculated using the following equation:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (16)$$

where M_t is the experimental moisture content, M_e is the equilibrium moisture content and M_0 is the initial moisture content respectively.

For constant microwave power, decrease in drying rate was same primarily for all pulse ratios [17]. The PR was calculated using the following equation:

$$PR = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{on}} \quad (17)$$

where t_{on} is magnetron power ON time and t_{off} magnetron power OFF time, for the example, when ON time and OFF time 30 s / 30 s (PR = 2.0, t_{on}/t_{off}), 20 s / 40 s (PR = 3.0), and 10 s / 50 s (PR = 6.0).

III. PROTOTYPE OF MICROWAVE DRYING MACHINE

The dimension of rectangular waveguide is important because waveguides are used to transfer electromagnetic power efficiently, has been applied to the construction of heating. Based of theoretical in topic II consideration of prototype of microwave drying machine, the size of this waveguide (b, a) are 11, 6 cm respectively. From the simulation with Matlab to find out the cutoff frequency by considering cases of basic mode $n=1, n=0$. The cutoff frequency is 1.36 GHz, for cutoff frequency design must less than fundamental frequency $f_c < f_o$ where $f_o = 2.45$ GHz. The machine was presented in fully parameterized model develop for microwave drying. All geometrical is shown in Fig. I. This microwave machine consists of many drying cells (6 cell in cavity), each of them is based on the idea of open resonator, each of cell in cavity has own magnetron located in waveguide owner. In addition, the steam can also rotate the containers so that heating it across all sectors. All the element of a machine is as shown geometric shapes machine, 3D schematics in Fig. II.

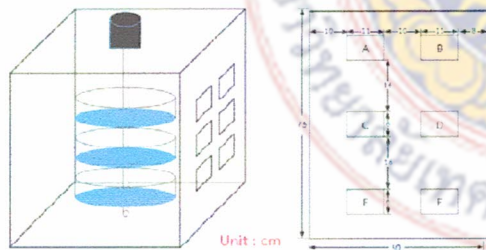


FIGURE I. THE LAYOUT OF WAVEGUIDE IN MACHINE

The microwave drying machine is constructed, as shown in Fig. III, for using the machine can control ON and OFF power of the magnetron, (the power of magnetron had for each size, equal to 1000 W.) with the switch and it can control pulse ratios (PR) for heating sea bass leathers. It can also be control a time for operating of magnetron in microwave cavity by using timer controller. The packaging is composed of a total of eight shelves and can be baked seabass leathers with 2 kg at a time.

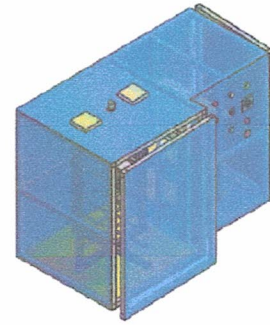


FIGURE II. THE GEOMETRIC'S SHAPES 3D SCHEMATICS



FIGURE III. THE PROTOTYPE OF MICROWAVE DRYING MACHINE

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Preliminary testing machine, the results of moisture in the sea bass leather, found that the moisture content of 20 pieces before baking (measuring 1 piece at a time), there will be moisture equals 3.63 - 4.75% moisture after baking and it will have a value of 20 sea bass leather moisture (determination moisture per 1 piece). The moisture equals 2.30 - 3.80%. From the results it can be seen that the baking of sea bass leather moisture are slightly changed. The results are preliminary information for consideration in baking by microwave drying. However, the problem that is occurring, we can see that the baking material is moist and the process can reduce rate of moisture. This research will have to take into consideration the cost-effectiveness and cost for energy consumption and time needed, as well as the quantity that can be baked in each time. In fact, regardless of the sea bass leathers are not burn or scorch distortion after baking. As well as the taste must remain the same as the original, traditional. From the tested machines can summarize in the Table I. The measured results of microwave drying machine for sea bass leather in Table I are in good agreement with the measured results of the traditional process but can reduce the time to be a better than in the past of drying.

TABLE I THE PARAMETER OF MICROWAVE DRYING MACHINE

Power of magnetron	The number of magnetron (Position ON)	Range of Temp.(°C)	Time (Min)
60 %	2 (C, D)	50-70	20
60 %	3 (A, D, E), (B, C, F)	60-80	15
50 %	2 (C, D)	50-70	25
50 %	3 (A, D, E), (B, C, F)	50-70	20
30 %	2 (C, D)	50-60	30
30 %	3 (A, D, E), (B, C, F)	50-60	25
30 %	4 (A, C, D, F)	50-70	20

V. CONCLUSIONS

The results of microwave drying machine for sea bass leathers revealed the following conclusion, increasing drying temperature with microwave power of magnetron can reduce the drying time of sea bass leathers, but sea bass leathers are not burn or scorch distortion after baking. Among the drying parameters are studied, range of temperature are 50 - 80 °C and 60 % , 50 % and 30 % microwave power of magnetron could be mentioned for drying are in good agreement with the measured results of the traditional process but can reduce the time to be a better than in the past methods of drying.

ACKNOWLEDGMENT

Financial support from government budget of the year 2015, Rajamangala University of Technology Srivijaya is gratefully acknowledged. This work was supported by the Center for Scientific and Technology Equipment, Walailak University.

REFERENCES

- [1] Percy L. Spencer, "Method of treating food stuffs," United state patent office, Application October 8, 1945, Senal No. 620, 919.
- [2] B. M. A. Amer, M. A. Hossain and K. Gonschalk, "Design and Performance Evaluation of New Hybrid Solar Dryer for Banana," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 4, pp. 813-820, April 2010.
- [3] F. R. Reis, "Studies on Conventional Vacuum Drying of Foods," *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, pp. 7-18, July 2014.
- [4] M. Bettge, H. Niclescu and P. J. Gielisse, "Engineered Porous Ceramics Using a Directional Freeze-drying Process," 28th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2005, Wiener Neustadt, 2005, pp. 28-34, 19-20 May 2005.
- [5] J. Vrba, M. Stejskal and M. Pourova, "Microwave Drying Machine for Textile Materials," *Microwave Conference, 2009 (EuMIC 2009)*, pp. 1121-1124, 29 Sept. - 1 Oct. 2009.
- [6] R. L. Monteiro, B. A. M. Carciofi, A. Marsaioli Jr. and J. B. Laurindo, "How to Make a Microwave Vacuum Dryer with Tantalum," *Journal of Food Engineering*, vol. 166, pp. 276-284, December 2015.
- [7] X. Duan, M. Zhang, A. S. Mijundar and Shaolin Wang, "Microwave Freeze Drying of Sea Cucumber," *Journal of Food Engineering*, vol. 96, no. 4, pp. 491-497, February 2010.
- [8] Z. Pan, C. Shih, T. H. McHugh and E. Hirschberg, "Study of Banana Dehydration Using Sequential Infrared Radiation Heating and Freeze-drying," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 41, no. 10, pp. 1944-1951, December 2008.
- [9] E. Horuz and M. Maskan, "Hot Air and Microwave Drying of Pomegranate (Punica Granatum L.) Arils," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 285-293, January 2015.
- [10] C. Liu and D. Sheen, "Analysis and Control of the Thermal Runaway of Ceramic Slab Under Microwave Heating," *Science in China Series E: Technological Sciences*, vol. 51, no. 12, pp. 2233-2241, December 2008.
- [11] R. L. Monteiro, B. A.M. Carciofi and J. B. Laurindo, "A Microwave Multi-flash Drying Process for Producing Crispy Bananas," *Journal of Food Engineering*, vol. 178(2016), pp. 1-11, June 2016.
- [12] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 2nd ed. New York: Wiley, 1998.
- [13] X. Zhao, L. Yan and K. Huang, "Review of Numerical Simulation of Microwave Heating Process," *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*, Prof. Stanisław Grundas (Ed.), InTech, pp. 27-48 ch.2, February 2011.
- [14] F. Ying, T. Wang, and L. Johan, "Microwave-transmission, Heat and Temperature Properties of Electrically Conductive Adhesive," *IEEE Transactions on CPMT, Part A*, vol. 26, no. 1, pp.193-198 March 2003.
- [15] S. Tontand and N. Therdthai, "Preliminary Study of Chili Drying Using Microwave Assisted Vacuum Drying Technology," *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, vol. 2, no. 2, pp. 80-86, April 2009.
- [16] D. Zhao, K. An, S. Ding, L. Liu, Z. Xu and Z. Wang, "Two-Stage Intermittent Microwave Coupled with Hot-Air Drying of Carrot Slices: Drying Kinetics and Physical Quality," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 7, no. 8, pp. 2308-2318, August 2014.
- [17] S. Gunasekaran, "Pulsed Microwave-vacuum Drying of Food Materials," *Drying Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 395-412, March 1995.