



การพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน
Development of Belt-conveyor Microwave Dryer

กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์

สุวิทย์ แพงกันยา

ปฐวีดี คมวชิรกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน
Development of Belt-conveyor Microwave Dryer

กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์

สุวิทย์ แพงกันยา

ปฐวีดี คมวชิรกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน ห้องอบแห้งมีขนาดความกว้าง 90 cm ความยาว 30 cm และความสูง 30 cm ห้องอบแห้งติดตั้งแมกนีตรอนขนาด 800 W จำนวน 2 ตัวที่ตำแหน่งด้านบนของห้องอบแห้ง จากการศึกษาพบว่า การกระจายคลื่นไมโครเวฟที่สม่ำเสมอพบในบริเวณตรงกลางของห้องอบแห้ง เงื่อนไขการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 400 W มีการกระจายของคลื่นไมโครเวฟที่สม่ำเสมอ การรั่วไหลของคลื่นอยู่ในมาตรฐานความปลอดภัยของคลื่นไมโครเวฟของ The US Department of Health and Human Services การศึกษานี้สามารถเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานได้ในอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้ง/ไมโครเวฟ/สายพานลำเลียง



Abstract

This research is the study of microwave distribution in the drying chamber to develop the belt-conveyor microwave dryer. The dimensions of the drying chamber are 90 cm width, 3 cm length and 30 cm height. Two 800 W magnetrons were installed at the top of the chamber. It was found that the uniform of microwave distribution was observed at the center area of drying chamber. The uniform microwave distribution in the drying chamber at 400 W is achieved. A microwave leakage from the prototype is within the microwave oven safety standard of the US Department of Health and Human Services. This study can be used as a guideline for an industrial design for belt-conveyor microwave dryer.

Keywords: Dryer/Microwave/ Belt conveyor



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนงบวิจัยสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้รับจากทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 รวมทั้งขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษวิจัย

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ
กิตติกรรมประกาศ
สารบัญ
สารบัญประกอบภาพ
สารบัญตาราง

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4	วิธีการนำเนินการวิจัย	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1	การอบแห้ง	3
2.1.1	ทฤษฎีการถ่ายเทมวล	4
2.1.2	ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	7
2.1.3	การถ่ายโอนมวลโดยการแผ่ความร้อน	8
2.2	ไมโครเวฟ	10
2.2.1	กลไกการเกิดความร้อนในไมโครเวฟ	11
2.2.2	สมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร	12
2.2.2.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	12
2.2.2.2	แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก	13
2.2.2.3	ค่าลอสแทนเจน	13
2.3	สมการแม็กซ์เวล	14
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

บทที่	หน้า	
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	20
3.1	การออกแบบ	20
3.2	การทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ	22
3.3	การทดสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ	23
4	ผลการวิจัย	24
4.1	การกระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้ง	24
4.2	การรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ	26
5	สรุปผลการทดลอง	27
	บรรณานุกรม	28
	ภาคผนวก	32
	ประวัติผู้วิจัย	34



สารบัญภาพประกอบ

บทที่	หน้า	
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
รูปที่ 2.1	กราฟแสดงการอบแห้งของวัสดุ	3
รูปที่ 2.2	การแพร่ของมวลระหว่างผิวของเมล็ดและของไหล	4
รูปที่ 2.3	แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	11
รูปที่ 2.4	กลไกการเกิดความร้อนคลื่นไมโครเวฟ	12
รูปที่ 2.5	การเดินทางของคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก	14
รูปที่ 2.6	ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์	15
รูปที่ 2.7	ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กตารกฎ	15
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	20
รูปที่ 3.1	แบบโครงสร้างห้องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ	20
รูปที่ 3.2	ชุดทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ	21
รูปที่ 3.3	การขยายเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน	21
รูปที่ 3.4	การวางตำแหน่งของน้ำในการทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ	22
รูปที่ 3.5	ตำแหน่งการวัดการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟของห้องอบแห้ง	23
4	ผลการวิจัย	24
รูปที่ 4.1	การดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ ที่ระดับไมโครเวฟ 800x2 W	24
รูปที่ 4.2	การดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ ที่ระดับไมโครเวฟ 600x2 W	25
รูปที่ 4.3	การดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ ที่ระดับไมโครเวฟ 400x2 W	25
รูปที่ 4.4	ค่าเฉลี่ยการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ (mW/cm ²)	26
	ภาคผนวก	32
	แบบของห้องอบแห้งของเครื่องไมโครเวฟแบบสายพาน	32

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการศึกษาการนำเทคนิคไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งผลไม้และพืชผัก เช่น การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นต้น การนำเทคนิคไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ เนื่องจากไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลให้สูงขึ้นตามไปด้วย และสามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Varith, et al., 2007; Kassem, et al., 2011) นอกจากนี้ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพทางด้านสีที่ดี (Alibas, 2006; Alibas, 2007) และการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งลดลง (Maskan, 2001) รวมทั้งคุณภาพการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ที่ดี (Askari, et al., 2009; Dev, et al., 2011)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังใช้ในระดับครัวเรือน ซึ่งจากข้อดีดังกล่าวข้างต้นในการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้ง ทำให้มีนักวิจัยได้พัฒนาเครื่องอบแห้งในเชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟ เช่น เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสเปาเต็ดเบด เครื่องอบแห้งไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ และเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานได้มีพัฒนาอย่างต่อเนื่องเนื่องจากเหมาะสมที่จะใช้ในระบอบอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้เพราะ สามารถป้อนวัสดุได้ที่ละมากๆ อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังทำให้วัสดุเคลื่อนที่ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟอย่างสม่ำเสมอและสามารถปรับความเร็วของสายพานเพื่อทำให้วัสดุที่ทำการอบแห้งได้รับพลังงานที่เวลาแตกต่างกันได้ จึงทำให้สามารถอบแห้งวัสดุที่แตกต่างกันและกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งได้ดียิ่งขึ้น (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

การนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งจำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อลดการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเกิดจุดร้อนและจุดเย็นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สูญเสียคุณภาพ ซึ่งการออกแบบระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการทำนายการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Jia, et al., 2003; Malofronte, et al., 2012) ซึ่งจะสามารถออกแบบเครื่องอบแห้งให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีข้อจำกัดอยู่มากเช่น การทำนายการกระจายคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งที่วัสดุมีการ

เคลื่อนที่หรือวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ ณ เวลานั้นๆ จึงจำเป็นต้องมีการทดลองเพิ่มเติม

จากบทความที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน และทดสอบการกระจายตัวของไมโครเวฟรวมทั้งตรวจสอบความปลอดภัยของการรั่วไหลของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งไมโครเวฟแบบสายพานและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งแมกนีตรอนรวมทั้งขนาดของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานโดยใช้แมกนีตรอนขนาด 800 W ที่ความถี่ 2,450 GHz
2. ทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟและการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้ง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. หาขนาดของเครื่องและตำแหน่งการติดตั้งแมกนีตรอนที่เหมาะสม
3. ทดลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบถึงรูปแบบการกระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งเพื่อที่จะนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาด้านอบแห้งด้วยไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรมได้

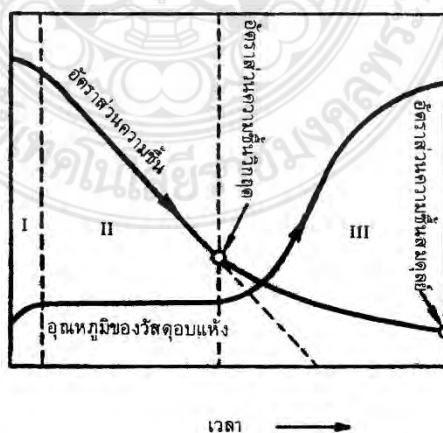
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง เพื่อนำความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหยน้ำ โดยความร้อนที่ได้รับส่วนใหญ่เป็นความร้อนแฝงของการระเหย (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2529) ยกเว้นกระบวนการอบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) ซึ่งกระบวนการเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดรวมสาม (Triple Point) ซึ่งจะทำให้เกิดการระเหย จากของแข็ง (น้ำแข็ง) กลายเป็นไอ (สีกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

โดยทั่วไปการอบแห้งจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนที่ถ่ายเทไปยังวัสดุทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ เมื่อน้ำวัสดุที่มีความชื้นๆ บางส่วนจะมีอยู่ที่ผิวไปอบแห้งด้วยลมร้อนภายใต้อุณหภูมิคงที่ในช่วงแรก (I) อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ในรูปที่ 2.1 หลังจากนั้นในช่วงเวลาต่อมา (II) อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่จนกว่าน้ำที่ผิวของวัสดุหมดไป ซึ่งในช่วงนี้ความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ไปกับการระเหยความชื้นเท่านั้นจะทำให้ความชื้นของวัสดุลดลงด้วยอัตราการระเหยคงที่ หรือเรียกช่วงนี้ว่า อัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อน้ำบริเวณที่ผิวของวัสดุลดลงในช่วงสุดท้าย (III) การถ่ายเทความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุถ่ายเทมาที่ผิวจะน้อยกว่าอัตราการระเหยความชื้นที่ผิวจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ได้รับไม่สามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนแฝงได้ ซึ่งจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง การอบแห้งสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นลดลงถึงความชื้นสมดุล (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2529)



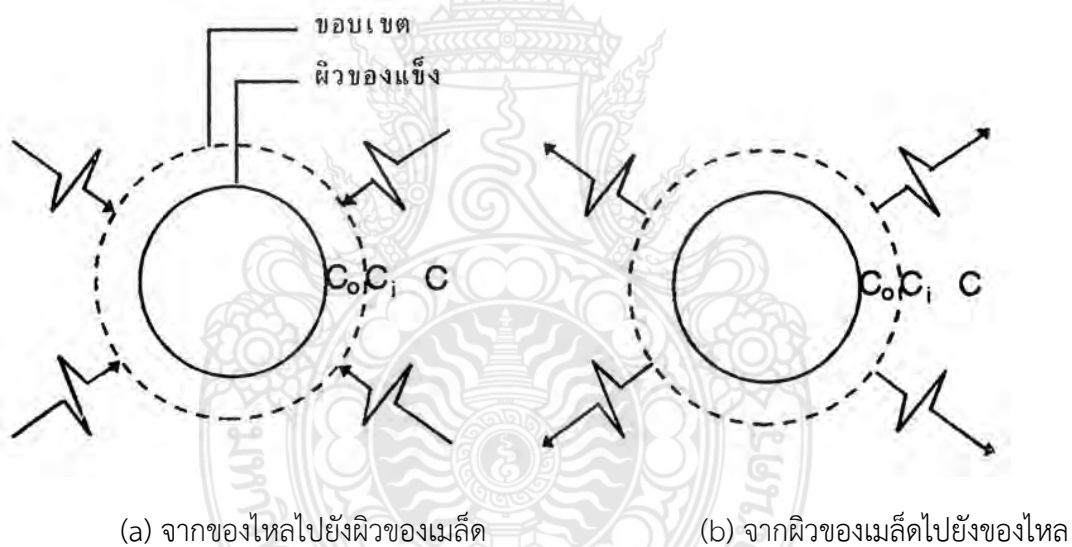
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการอบแห้งของวัสดุ

ที่มา : วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล (2529)

หลักการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปมีทฤษฎีการถ่ายโอนมวลและทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อนเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ แต่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมิได้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ผิวเท่านั้น ยังมีการถ่ายเทมวลโดยการแพร่ความชื้นภายในวัสดุอีกด้วย ซึ่งจะอธิบายหลักการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

2.1.1 ทฤษฎีการถ่ายเทมวล

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540) อธิบายทฤษฎีการถ่ายโอนมวลระหว่างผิวเมล็ดและของไหลสรุปได้ว่าปริมาณการถ่ายเทขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของสาร ซึ่งจะเคลื่อนที่จากสารที่มีความเข้มข้นสูงไปยังสารที่มีความเข้มข้นต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแพร่ของมวลระหว่างผิวของเมล็ดและของไหล

ที่มา : สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

การถ่ายโอนมวลสารมีลักษณะการพามวลสารแบบกำลังบังคับ (Forced convection mass transfer) ในรูปที่ 2.2a ความเข้มข้นของสารในกระแสของไหล (C) ต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ขอบเขต (C_i) และความเข้มข้นที่ขอบเขตต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ผิวของเมล็ด (C_0) ในทางตรงกันข้าม ถ้ามวลจากเมล็ดละลายหรือแพร่กระจายในกระแสของไหลดังในรูปที่ 2.2b ค่า C_0 ย่อมสูงกว่าค่า C_i และ C_i สูงกว่าค่า C การถ่ายเทของมวลสารที่ผิวของเมล็ดที่เป็นแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุล สามารถคำนวณได้จากสมการของ Fick คือ

$$N_A = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx} \quad (2.1)$$

เมื่อ N_A คือ ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท

D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจาย

A คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างเมล็ดและของไหล

C_A คือ ความเข้มข้นของสาร A

x คือ ระยะที่มวลสารเคลื่อนที่ไป

การถ่ายโอนมวลสารแบบใช้กำลังบังคับระหว่างขอบเขตจำกัดกับกระแสของการไหล ของระบบที่มีมวลจากเมล็ดละลายหรือแพร่กระจายไปในกระแสของไหล เขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$N_A = h_m A (C_{AS} - C_A) \quad (2.2)$$

เมื่อ h_m คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

C_{AS} คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว

เมื่อระบบอยู่ในสมดุล ปริมาณมวลสารในสมการที่ 2.1 เท่ากับปริมาณมวลสารในสมการที่ 2.2 จะได้

$$h_m A (C_{AS} - C_A) = -D_{AB} A \frac{dC_A}{dx}$$

เมื่อคูณด้วยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ด D_p และจัดเทอมใหม่ได้ดังนี้

$$h_m \frac{D_p}{D_{AB}} = - \left(\frac{dC_A}{dx} \right) / \left(\frac{(C_{AS} - C_A)}{D_p} \right) \quad (2.3)$$

เทอมของ $h_m \frac{D_p}{D_{AB}}$ เรียกว่า ตัวเลขเชอร์วูด (Sherwood number) สำหรับความเข้มข้นของสาร A ในกระแสของไหลนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของการไหลของ ๆ ไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของ ระบบทั้งหมด ซึ่งเมื่อกระจายออกไปแล้วเราสามารถแสดงอยู่ในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และตัวเลขชมิต (Schmid number) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$sh = sh_0 + a Re^m Sc^n \quad (2.4)$$

เมื่อ sh_0 คือ ค่าของตัวเลขเซอร์วูดที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุล
 อย่างเดียว

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ทำให้การถ่ายโอนมวลอยู่ในรูปแบบของการแพร่ของเหลวเพียงอย่างเดียว
 สามารถเขียนสมการสมดุลมวลที่เวลาและทิศทางต่างๆ ภายในเมล็ดข้าวในรูปแบบของสมการแพร่ความชื้น
 น้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น
 สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540) ได้อธิบายว่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วน
 โดยตรงกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นของความชื้นซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\dot{m}_w = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.5)$$

เมื่อ \dot{m}_w คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h

A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล, m^2

C คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m^3

x คือ ระยะ, m

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h

เมื่อพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าดังแสดงในสมการที่ (2.6) และออกจากปริมาตร
 บังคับ ดังแสดงในสมการที่ (2.7) โดยเริ่มที่แกน x ก่อน

$$\dot{m}_{w|x} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.6)$$

$$\dot{m}_{w|x+dx} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) \right] dx \quad (2.7)$$

และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรบังคับ

$$= A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx \quad (2.8)$$

เมื่อ t คือ เวลา, h

จากกฎทรงมวลจะได้ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับย่อมเท่ากับอัตราการ
 เปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรบังคับบวกกับอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับจะ
 ได้ว่า

$$-AD \frac{\partial C}{\partial x} = A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx - AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) \right] dx$$

จัดสมการใหม่จะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (2.9)$$

เมื่อสมการที่ (2.9) หาด้วยความหนาแน่นของวัสดุ และพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทางของ x,y,z จะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial M}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D \frac{\partial M}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D \frac{\partial M}{\partial z}) \quad (2.10)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ซึ่ง ค่า D สามารถคำนวณได้จากการลองผิดลองถูกให้ผลทำนายความชื้นสอดคล้องกับผลการทดลอง

2.1.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ในขณะที่มีการถ่ายโอนมวลสาร การถ่ายโอนความร้อนอาจเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนสรุปได้ว่า ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ จากรูปที่ 2.5a ถ้าของไหลที่บริเวณขอบเขตมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณผิวของเมล็ด ความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณของเขตสู่บริเวณผิวของเมล็ด การถ่ายโอนความร้อนบริเวณผิวของเมล็ดเป็นแบบการนำความร้อนเป็นไปตามกฎของ Fourier ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$q = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน

k คือ สภาพการนำความร้อนของๆ ไหล

T คือ อุณหภูมิของๆ ไหล

การถ่ายโอนความร้อนแบบใช้กำลังบังคับระหว่างขอบเขตกับกระแสของไหลของระบบที่ความร้อนจากเมล็ดถูกพาไปในกระแสของไหล เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q = h_c A (T_\infty - T_s) \quad (2.12)$$

เมื่อ h_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ด

T_∞ คือ อุณหภูมิของๆ ไหล

เมื่อระบบอยู่ในสมดุลและสมมติว่ามีการแผ่รังสีน้อยมาก อัตราการถ่ายโอนความร้อนในสมการที่ 2.11 และ 2.12 มีค่าเท่ากัน ได้ว่า

$$h_c A (T_\infty - T_s) = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.13)$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดจะจัดเทอมใหม่ได้ดังนี้

$$h_c \frac{D_p}{k} = - \left(\frac{dT}{dx} \right) / \left(\frac{T_\infty - T_s}{D_p} \right) \quad (2.14)$$

เทอม $h_c \frac{D_p}{k}$ เรียกว่าตัวเลขนัสเซล (Nusselt number) สำหรับอุณหภูมิของไหลขึ้นอยู่กับขนาดการไหลและสมบัติทางกายภาพของทั้งหมด เมื่อกระจายเทอมของตัวเลข (Reynolds number) และตัวเลขพรานเทิล (Prandtl number) ในรูปของตัวแปรไร้มิติสามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวเลขได้ดังสมการที่ 2.15

$$Nu = Nu_0 + a Re^m Pr^n \quad (2.15)$$

เมื่อ Nu_0 คือ ค่าตัวเลขนัสเซลที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว

ในการอบแห้งวัสดุต่างๆ ไปนั้น มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแอากาศไปยังเมล็ด ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปกับการระเหยน้ำ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.11 ในขณะที่อุณหภูมิของน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิวของเมล็ดมายังกระแอากาศซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.2 ถ้าผิวของเมล็ดมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย

2.1.3 การถ่ายโอนมวลโดยการแพร่ความชื้น

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ทำให้การถ่ายโอนมวลอยู่ในรูปแบบของการแพร่ของเหลวเพียงอย่างเดียว สามารถเขียนสมการสมดุลมวลที่เวลาและทิศทางต่างๆ ภายในเมล็ดข้าวในรูปของสมการแพร่ความชื้น น้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น

สมชาติ โสภณธนฤทธิ (2540) ได้อธิบายว่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นของความชื้นซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\dot{m}_w = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.16)$$

- เมื่อ \dot{m}_w คือ อัตราการถ่ายเทมวล, kg/h
- A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล, m^2
- C คือ ความเข้มข้นของความชื้น, kg/m^3
- x คือ ระยะ, m
- D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h

เมื่อพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าดังแสดงในสมการที่ (2.17) และออกจากปริมาตรบังคับ ดังแสดงในสมการที่ (2.18) โดยเริ่มที่แกน x ก่อน

$$\dot{m}_{w|x} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.17)$$

$$\dot{m}_{w|x+dx} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) \right] dx \quad (2.18)$$

และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรบังคับ

$$= A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx \quad (2.19)$$

เมื่อ t คือ เวลา, h

จากกฎทรงมวลจะได้ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรบังคับบวกกับอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับจะได้ว่า

$$-AD \frac{\partial C}{\partial x} = A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx - AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) \right] dx$$

จัดสมการใหม่จะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (2.20)$$

เมื่อสมการที่ (2.20) ทหารด้วยความหนาแน่นของวัสดุ และพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทางของ x,y,z จะได้ว่า

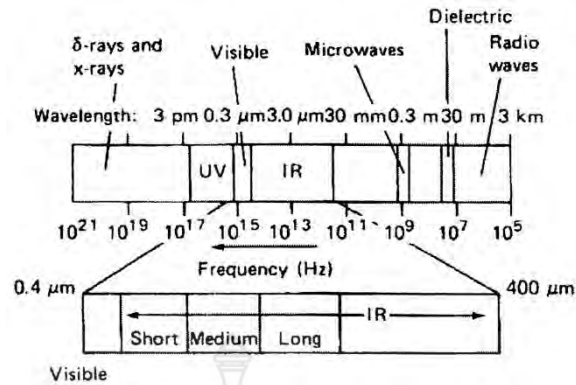
$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ซึ่ง ค่า D สามารถคำนวณได้จากการลองผิดลองถูกให้ผลทำนายความชื้นสอดคล้องกับผลการทดลอง

2.2 ไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ซึ่งอาจพบในธรรมชาติ เช่น จากดวงอาทิตย์ (สุรพล สุธีระเวช, 2542) มีความถี่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz มีความยาวคลื่นระหว่าง 100 cm ถึง 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ไมโครเวฟสามารถทำให้วัสดุเกิดความร้อนได้โดยไปทำให้เกิดการสั่นหรือการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนและเสียดสีกับโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง (พรพิมล สุทันฐรัตน์ และเสาวนีย์ เนตโรสง, 2550) คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านโลหะได้ แต่สามารถทะลุผ่านอากาศ แก้ว กระดาษและพลาสติกได้ คลื่นไมโครเวฟจะถูกดูดซับได้ดีในอาหารที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric) เมื่อคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับมากลับไปจะไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนในอาหารนั้น แต่เมื่ออาหารดูดซับคลื่นไมโครเวฟนั้นจะทำให้อาหารนั้นร้อนขึ้นโดยเปลี่ยนรูปพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน สารใดที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้สูงเรียกสารนั้นเป็นสาร lossy หรือ lossiness สูง (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) ในปัจจุบันการใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารกำลังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม เช่น การลวก (Blanching) การทำอาหาร (Cooking) การอบแห้ง (Drying) การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurizing) การอบ (Baking) เป็นต้น ผู้บริโภคมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการบริโภค ต้องการอาหารที่มีคุณภาพสูงใกล้เคียงกับของสด และสามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานมากยิ่งขึ้น อาหารที่ปรุงสุกได้อย่างรวดเร็วเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในสังคมปัจจุบัน การใช้ไมโครเวฟในกระบวนการแปรรูปอาหารทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพทางด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการดีกว่าแบบดั้งเดิม (พรพิมล สุทันฐรัตน์ และเสาวนีย์ เนตโรสง, 2550; Askari, et al., 2009; Dev et al., 2011)



รูปที่ 2.3 แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

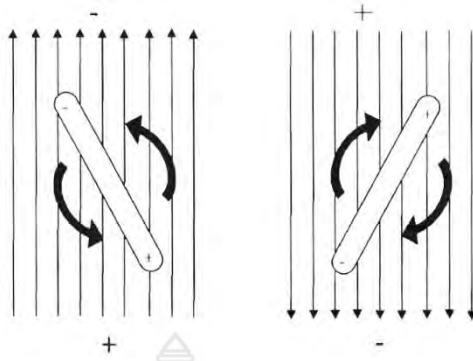
ที่มา : พรพิมล สุทันฐรัตน์ และเสาวนีย์ เนตโรสง (2550)

2.2.1 กลไกการเกิดความร้อนในไมโครเวฟ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ไม่ใช่พลังงานความร้อนแต่คลื่นเหล่านี้สามารถแปลงเป็นความร้อนได้เมื่อเกิดกับอัตรกิริยากับวัสดุ (Lossy Material) ซึ่งมีกลไกในการแปลงพลังงานที่สำคัญ ดังนี้ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าไปยังวัสดุจะสามารถทำให้เกิดความร้อนได้ 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่

1. Ionic Polarization เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายแล้วทำให้เกิดความร้อน แต่ละไอออน ซึ่งมีประจุไฟฟ้าถูกกระตุ้นให้มีการเคลื่อนที่ที่ทำให้มีการเสียดสีกับไอออนอื่น และมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนและมีการถ่ายเทไปยังส่วนอื่นๆ ต่อไป การเกิดความร้อนแบบนี้เกิดได้ในของเหลวภายในเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย
2. Dipole Rotation เป็นการเกิดความร้อนจากสารละลายที่มีขั้ว (Polar) คือ น้ำ เมื่อสารอยู่ในสภาวะปกติสารประกอบจะเรียงตัวประจุบวกและประจุลบไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประจุมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเพื่อเรียงตัวให้มีระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดความร้อนคลื่นไมโครเวฟ

ที่มา : พงษ์สิทธิ์ เนตรสว่าง (2552)

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็วขึ้นอยู่กับระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ประมาณ 915-2,450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งผลของการหมุนตัวและการเสียดสีเป็นรูปแบบหลักในการเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ รูปแบบดังกล่าวที่กล่าวมาข้างต้นเป็นผลมาจากการสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟโดยตรง ส่วนที่ไม่มีการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟก็จะได้รับความร้อนจากการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วและสูญเสียพลังงานน้อย เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน (พงษ์สิทธิ์ เนตรสว่าง, 2552)

2.2.2 สมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร

อาหารแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของอาหารแตกต่างกัน จึงทำให้สมบัติไดอิเล็กทริกต่างกันส่งผลทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟแตกต่างกัน ปริมาณน้ำและเกลือแร่รวมถึงน้ำที่เป็นองค์ประกอบในอาหารมีความสำคัญในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ น้ำที่อยู่ในรูปอิสระ (free water) สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าน้ำที่เกาะอยู่ในรูปสารประกอบอื่น เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเกลือแร่ เกลือแร่ถ้าอยู่ในรูปที่แตกตัว (dissociated) จะสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าเกลือแร่ที่รวมตัวกับสารอื่น (associated) ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของอาหาร อุณหภูมิของอาหารและระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ อาหารที่มีไขมันอยู่มากจะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ต่ำ สมบัติไดอิเล็กทริกของอาหารที่สำคัญมี 3 ค่า คือ (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550)

2.2.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant, ϵ')

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ วัสดุใดที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถเก็บพลังงานได้สูงเมื่ออยู่ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ความชื้น และความหนืดในอาหารนั้นๆ ϵ' เป็นตัวบ่งบอกค่าจำนวนซ้ำและการเปลี่ยนแปลงที่

เกิดขึ้นโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอาหาร อุณหภูมิของอาหารมีผลต่ออาหาร เช่น เมื่อน้ำเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งค่า ϵ' จะมีค่าลดลง (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550; Bai-Ngew et al., 2011)

2.2.2.2 แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss Factor, ϵ'')

แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก คือ ค่าของพลังงานที่สูญเสียไปหรือแพร่กระจายไปในสารไดอิเล็กตริก เป็นความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ดูดซับจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน (Bai-Ngew et al., 2011) เมื่อนำอาหารมาอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในอาหาร หลังจากนั้นความร้อนก็จะลดลงเนื่องจากการนำความร้อนและการพาความร้อนในอาหารในเวลาต่อมา เวลาในการนำความร้อนยังขึ้นอยู่กับขนาดของอาหารนั้นๆ ด้วย เช่น อาหารที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการนำความร้อนนานกว่าอาหารที่มีขนาดเล็กและบาง ค่า ϵ'' ของอาหาร ความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟเป็นตัวบ่งชี้ถึงความลึกที่คลื่นสามารถแทรกเข้าไปได้ หมายความว่า อาหารที่มีค่า ϵ'' สูงจะทำให้คลื่นไมโครเวฟแทรกเข้าไปในอาหารได้ลึกกว่าอาหารที่มี ϵ'' ต่ำ ก็เพราะว่าคลื่นไมโครเวฟจะสูญเสียพลังงานเป็นพลังงานความร้อนหมดก่อน (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550)

2.2.2.3 ค่าลอสแทนเจน (Loss Tangent หรือ Dissipation Factor, $\tan \delta$)

ค่าลอสแทนเจน หรือ แฟกเตอร์การกระจาย เป็นสัญลักษณ์ของการสูญเสียพลังงานของสารนั้น ซึ่งอยู่ในรูปของมุมที่ต่างจากมุม 90° ในสภาพกระแสไฟฟ้าปกติ อาหารแต่ละชนิดมีค่าลอสแทนเจนที่ต่างกัน ค่านี้ จะมีความสัมพันธ์กับค่า ϵ' กับ ϵ'' (กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550) ดังแสดงในสมการ 2.22

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.22)$$

เมื่อ $\tan \delta$ คือ ค่าลอสแทนเจน

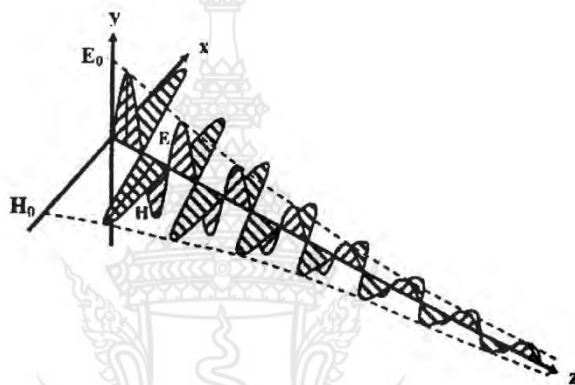
ϵ' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ϵ'' คือ แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก

ซึ่งค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาทำนายพลังงานที่ได้รับเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้สมการ แมกซ์เวล (Maxwell's Equation) ได้

2.3 สมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equation)

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551) ได้อธิบายการจำลองผ่านสมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equation) นั้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ตามเวลา เมื่อใส่ขอบเขตก็จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อคลื่นถูกดูดซับจากวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีการสูญเสียพลังงานจึงทำให้พลังงานลดลงตามระดับความลึกของวัสดุโดยมีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.5 สังเกตให้เห็นว่าขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นลดลงซึ่งเป็นตัวบ่งบอกระดับพลังงานของคลื่น



รูปที่ 2.5 การเดินทางของคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

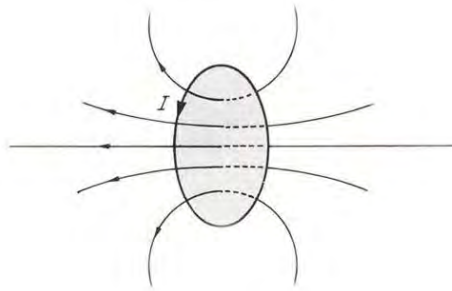
ที่มา : ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551)

สมการแรกของสมการแมกซ์เวล คือ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่เชื่อมสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลากับสนามแม่เหล็ก กล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าที่หมุนวนรอบๆ คอนทัวร์สนามแม่เหล็กเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์สนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเขียนในรูปของสมการไทม์ฮาร์โมนิก (Time Harmonic) ดังสมการที่ 2.23

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.23)$$

เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

B คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb/m²)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์

ที่มา : Grant et al. (1975)

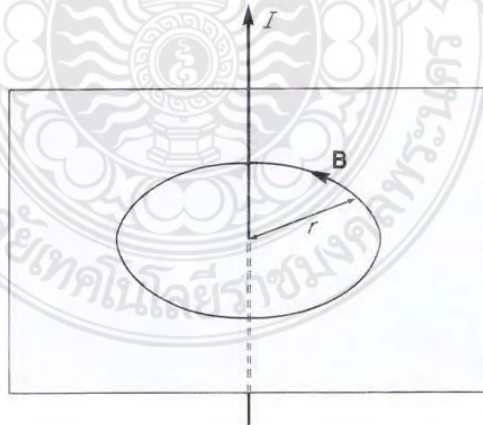
สมการที่สองของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของแอมแปร์ ที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม หรือกล่าวได้ว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หมุนรอบคอนทัวร์ เท่ากับกระแสสุทธิที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเขียนในรูปของสมการไทม์ฮาร์โมนิก ดังสมการที่ 2.24 (Time Harmonic)

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2.24}$$

เมื่อ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)

J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/m²)

D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (C/m²)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์

ที่มา : Grant et al. (1975)

เพื่อความสมบูรณ์จึงนำกฎของเกาส์ (Gauss's Law) มาวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า กล่าวคือฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ออกจากขอบเขตเท่ากับศูนย์และฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ออกจากขอบเขตจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของประจุภายในวัสดุนั้น จะได้สมการที่ 2.25 และ 2.26

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.25)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.26)$$

เมื่อ q คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า, A/m

ซึ่งความสัมพันธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (D) ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) และ ความหนาแน่นของกระแส (J) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ในรูปของสมการที่ 2.27, 2.28 และ 2.29 คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.27)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.28)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.29)$$

โดยที่ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า, s/m

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

μ คือ ค่าเปอร์มิบิลิตี (Permeability)

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ของแมกซ์เวลล์ได้ ดังสมการที่ 2.30 ถึง 2.33 ซึ่งถือว่าเป็นที่นิยมในการแก้ปัญหาที่เงื่อนไขของค่าขอบเขตต่างๆ โดยการแทนสมการที่ 2.27 ถึง 2.29 ลงในสมการที่ 2.24 ถึง 2.26 จะได้คือ

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.30)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.31)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} \quad (2.32)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.33)$$

ซึ่งสมการที่ 2.30 มาจากกฎของฟาราเดย์ และ สมการที่ 2.31 มาจากกฎของแอมแปร์ ส่วนสมการที่ 2.32 และ 2.33 มาจากกฎของเกาส์ สมการการดูดซับพลังงานภายในวัสดุไดอิเล็กตริกขณะเกิดอัตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริก สามารถนำสมการที่ 2.30-2.33 มาจัดสมการให้อยู่ในรูปของสมการอนุรักษ์พลังงานดังสมการที่ 2.34 คือ

$$\nabla(\vec{E} \times \vec{H}) + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.34)$$

ซึ่งในเทอมของผลคูณ (Cross Product) คือ $\vec{E} \times \vec{H}$ แสดงถึง ความหนาแน่นกำลังเชิงพื้นผิว (Surface Power Density) ซึ่งมีหน่วยเป็น W/m^2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการไหลของกำลัง ซึ่งในเทอมที่สองหมายถึง กำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก (Magnetic Power Density) และในเทอมสุดท้ายหมายถึงกำลังความหนาแน่นของไฟฟ้า (Magnetic Power Density) หากเราทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรและใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนส์ กับสมการ 2.34 เราก็สามารถลดรูปให้อยู่ในค่าของกำลังการดูดซับไมโครเวฟได้ ซึ่งเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดภายในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังสมการที่ 2.35 คือ

$$Q = \vec{E} \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma |\vec{E}|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' (\tan \delta) |E|^2 \quad (2.35)$$

โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุม, Rad/s

f คือ ความถี่, Hz

ϵ_0 คือ สมบัติไดอิเล็กตริกในสภาวะสุญญากาศ, F/m

ϵ_r' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant)

ϵ_r'' คือ เฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Loss Factor)

$\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient)

ในการคาบเกี่ยวกันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นของกระแสจากกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ 2.23 และการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กจากกฎของแอมแปร์ ดังสมการที่ 2.24 ซึ่งทำให้ได้สมการที่ทำนายการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหากนำสองสมการมารวมกันแล้วจัดรูปให้อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า (E) จะได้ดังสมการที่ 2.36

$$\left(\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) - \omega^2 \epsilon \vec{E} = 0 \quad (2.36)$$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการอบแห้งผักและผลไม้มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เช่น ผักขม กระเทียม แครอท เห็ด ถั่วลิสง แอปเปิล ทุเรียน กิวี เป็นต้น (Maskan, 2000; Maskan, 2001; Andrés et al., 2004; Sumnu, et al., 2005; Sharma และ Prasad, 2006; Ozkan et al., 2007; Bai-Ngew, et al., 2011; Lombraña et al., 2010) การนำเทคนิคไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้งสามารถลดเวลาในการอบแห้ง และประหยัดพลังงาน (Varith, et al., 2007) อีกทั้งยังเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Shama และ Prasad, 2001; Kassem, et al., 2011) เช่น ทำให้การหดตัวของผลิตภัณฑ์น้อย (Maskan, 2001) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่น การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Maskan, 2001; Andrés, et al., 2004; Varith, et al., 2007; Kassem, et al., 2011) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล (Wang และ Sheng, 2006) และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ (Giri, et al., 2007; Song, et al., 2009; Therdthai and Zhou, 2009; Bai-Ngew, et al., 2011) เป็นต้น

การอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งนานและสิ้นเปลืองพลังงาน มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงมีการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้งร่วมกับลมร้อน ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งเป็นพวกผักและผลไม้ ได้แก่ ลำไย องุ่น แอปเปิล กระเทียม และกิวี เป็นต้น (Maskan, 2001; Sharma และ Prasad, 2001; Andrés, et al., 2004; Varith, et al., 2007; Kassem, et al., 2011) ไมโครเวฟมีข้อดีหลายอย่างคือ สามารถทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง จึงสามารถดึงความชื้นออกจากภายในวัสดุได้อย่างรวดเร็ว การนำเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดเวลาในการอบแห้งประมาณ 60-90% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Sharma และ Prasad, 2001; Varith, et al., 2007)

จากข้อดีของกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน จึงทำให้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งในเชิงพาณิชย์โดยการสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพาน เนื่องจากข้อดีของระบบไมโครเวฟแบบสายพานทำให้สามารถอบแห้งวัสดุได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์และรูปแบบในการอบแห้งได้หลากหลายเนื่องจากสามารถปรับความเร็วของสายพานได้ทำให้วัสดุได้รับพลังงานได้มากน้อยแตกต่างกัน Prommas et al. (2012) ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานโดยใช้ทรายแก้ว (glass beads) และน้ำผสมกัน เสมือนเป็นวัสดุที่มีรูพรุน โดยเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียง

อย่างเดี่ยวเทียบกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยการเปิดแมกนีตรอนที่ตำแหน่งแตกต่างกันตามเงื่อนไข อีกทั้งยังเปรียบเทียบขนาดของทรายแก้วที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และ ตำแหน่งแมกนีตรอนซึ่งเป็นเรื่องสำคัญที่จะใช้ในการออกแบบ

การนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งจำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อลดการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเกิดจุดร้อนและจุดเย็นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สูญเสียคุณภาพ ซึ่งการออกแบบระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการทำนายการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ โดยในการออกแบบเครื่องอบแห้งจะพิจารณาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (Jeni, et al., 2010) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Jia, et al., 2003; Malofronte, et al., 2012) Malofronte et al. (2012) ได้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟได้และสามารถเชื่อมโยงกับแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งมันฝรั่งแบบ 2 มิติ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากการศึกษาพบว่า การทำนายอุณหภูมิของการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะการกระจายของอุณหภูมิและระยะความลึกในการส่องผ่านของคลื่นที่ใกล้เคียงกับการทดลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปออกแบบเครื่องอบแห้งรวมทั้งวิธีการจัดการในการอบแห้งที่เหมาะสมในขบวนการอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟ (Malofronte et al., 2012)

จากข้อดีในการนำเทคนิคไมโครเวฟมาประยุกต์ในการอบแห้งที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน โดยใช้การทดลองการกระจายคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้ง เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนและจำเป็นต้องใช้โปรแกรมและคอมพิวเตอร์ที่มีราคาสูง

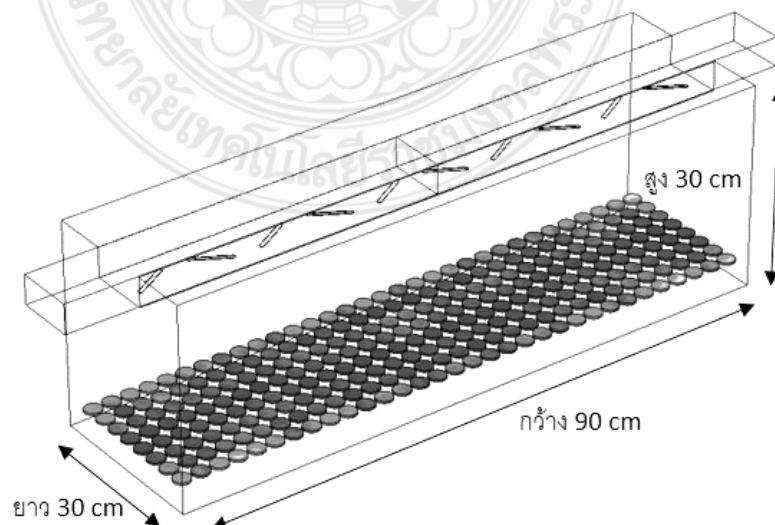
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบห้องอบแห้งของเครื่องไมโครเวฟแบบสายพาน หลังจากนั้นได้มีการทดสอบการกระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งรวมทั้งการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟของห้องอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบ

ในการออกแบบผู้วิจัยได้ใช้แมกนีตรอนขนาดกำลังไมโครเวฟ 800 W ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นกำลังไมโครเวฟที่ใช้โดยทั่วไปในครัวเรือนและหาซื้อได้ง่ายราคาถูก ติดตั้งกับท่อนำคลื่น (Waveguide) WR340 ขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ความกว้าง 43×86 cm และความยาวของท่อนำคลื่น 130.8 cm โดยท่อนำคลื่นได้พัฒนามาจากงานวิจัยของ Methlouthi และคณะ (2010) ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาการกระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งแบบสายพาน แต่ยังมีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยทั่วไปตำแหน่งการติดตั้งแมกนีตรอนของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานอยู่ด้านบนของเครื่องเพื่อการกระจายตัวของไมโครเวฟที่ดี (Methlouthi, et al., 2010) ขนาดของห้องอบแห้งจากงานวิจัยที่ผ่านมากแมกนีตรอน 1 ตัวสามารถใช้กับห้องอบแห้งที่มีขนาดความกว้าง ยาว และสูง อยู่ในช่วง 0.3-0.5 m ต่อ แมกนีตรอน 1 ตัว (Methlouthi, et al., 2010) โดยเครื่องอบแห้งที่ทำการออกแบบมีขนาด ความกว้าง 90 cm ความสูง 30 cm และความยาว 30 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากการออกแบบได้สร้างห้องอบแห้งเพื่อทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

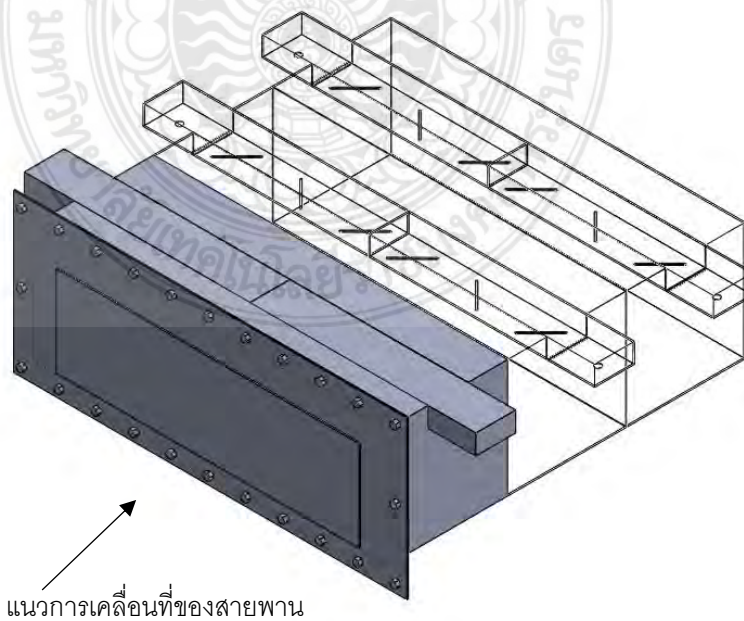


รูปที่ 3.1 แบบโครงสร้างห้องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ

เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณ การทดลองการกระจายคลื่นไมโครเวฟทำการทดลองได้เพียง 1 แถว ซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอนจำนวน 2 ตัว โดยเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานสามารถสร้างเครื่องจริงได้โดยการเพิ่มจำนวนแถวของแมกนีตรอนขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องและกำลังการผลิตที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต โดยลักษณะการเพิ่มแถวของแมกนีตรอนของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานสามารถทำได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การขยายเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน

3.2 การทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ

ในการทดสอบคลื่นไมโครเวฟทำการทดสอบโดยการรับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนของน้ำ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้สมการที่ 3.1 โดยใช้น้ำ 100 mL ใส่ในแก้วทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.7 cm สูง 9.8 cm ซึ่งเป็นวัสดุที่คลื่นไมโครเวฟผ่านทะลุได้ โดยวางตำแหน่งแต่ละแก้วดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยการทดลองวัดอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเปิดไมโครเวฟเป็นเวลา 122 วินาที โดย 2 วินาทีแรกเป็นช่วงที่ไมโครเวฟเริ่มเข้าสู่การทำงานเต็มพิกัด หลังจากนั้นวัดอุณหภูมิของน้ำ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ Type K ซึ่งต่อกับเครื่อง Fluke 78 Automotive Multimeter ในการทดสอบแต่ละเงื่อนไขทำการทดสอบ 3 ครั้ง

$$P_{\text{abs}} = m_w C_{p_w} \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad 3.1$$

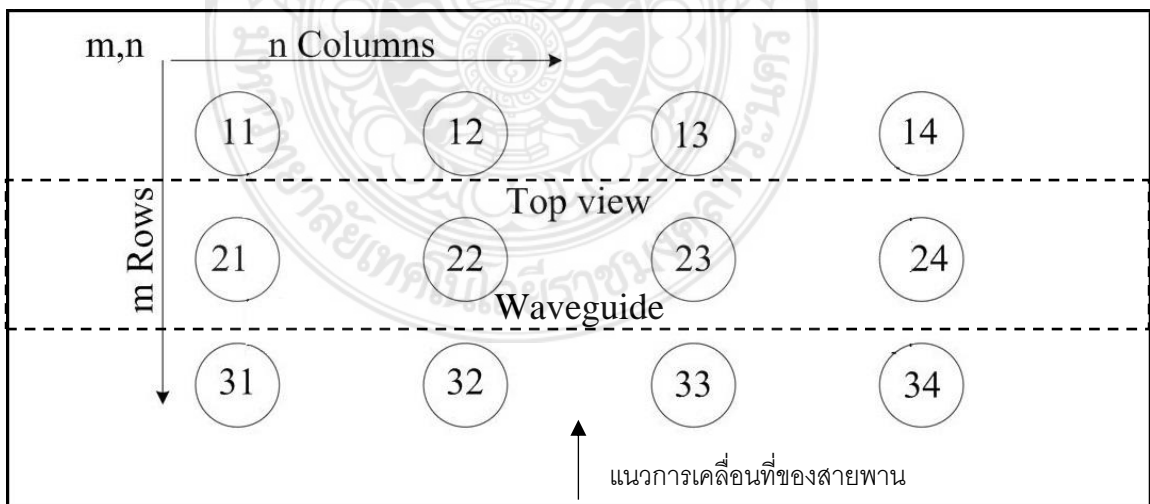
โดย P_{abs} คือ พลังงานการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ, W

M_w คือ มวลของน้ำ, kg

C_{p_w} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, (J/(kg·K))

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำ, K

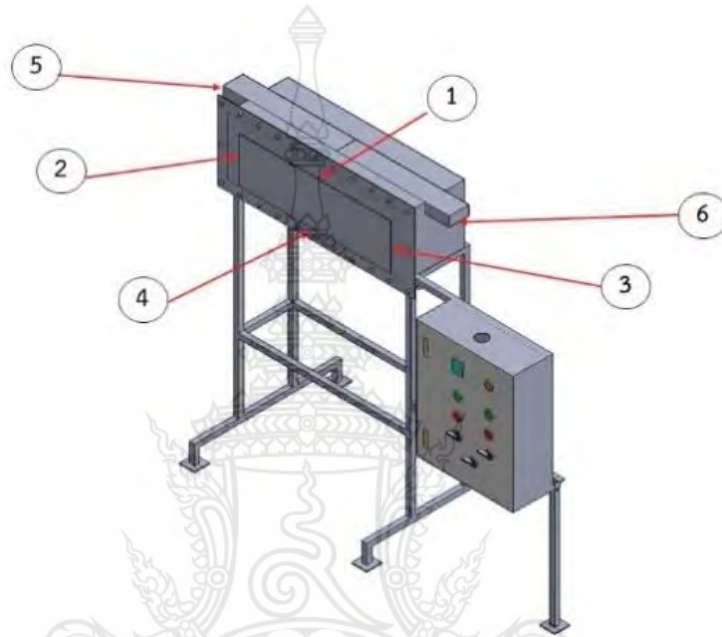
Δt คือ เวลา, s



รูปที่ 3.4 การวางตำแหน่งของน้ำในการทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ

3.3 การทดสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ

ในการวัดคลื่นไมโครเวฟทำการวัดคลื่นไมโครเวฟรอบๆ ของเครื่อง โดยใช้เครื่องวัด microwave leakage detector ยี่ห้อ Hti รุ่น HT-M2 ในการวัด โดยวัดห่างตัวเครื่อง 5 cm ซึ่งเป็นตามความปลอดภัยของ The US Department of Health and Human Services (DHHS) ซึ่งค่าความเข้มของเครื่องไมโครเวฟไม่เกิน 5 mW/cm^2 ซึ่งตำแหน่งการวัดแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการวัดการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟของห้องอบแห้ง

บทที่ 4

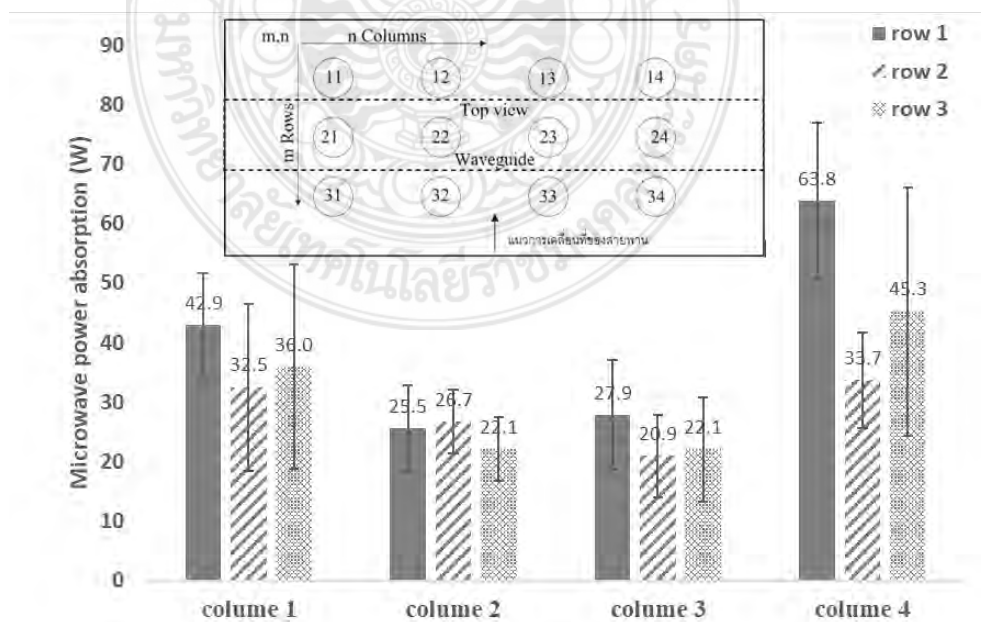
ผลการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองการกระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพาน และการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

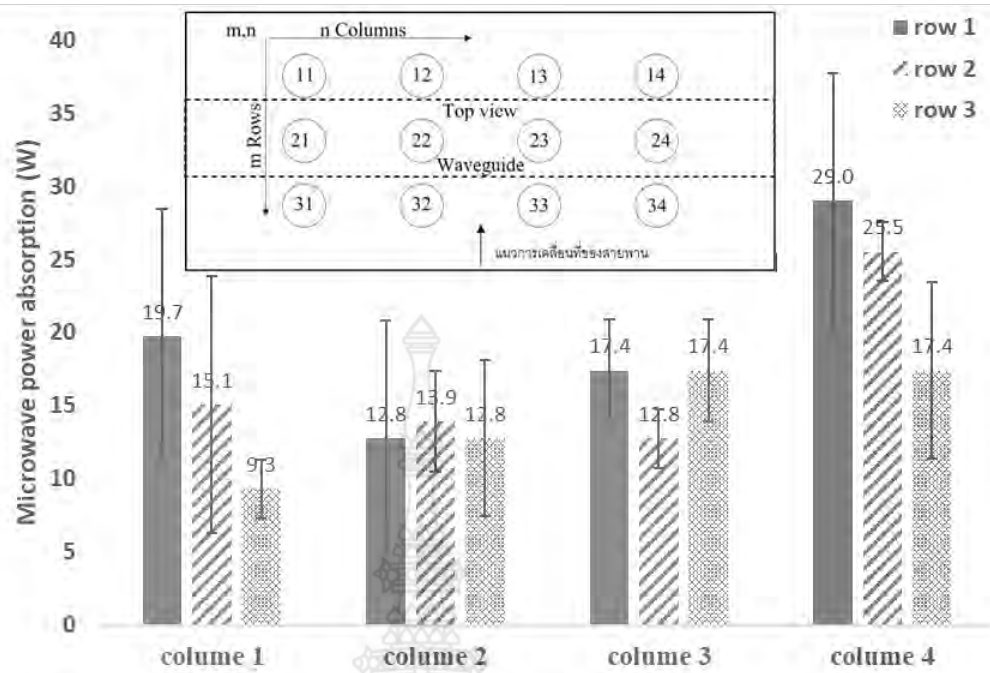
4.1 การกระจายของคลื่นไมโครเวฟในห้องอบแห้ง

ในการทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟโดยศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังไมโครเวฟแต่ละตัว 400 600 และ 800 W ซึ่งในห้องอบแห้งใช้แมกนีตรอนจำนวน 2 ตัว ติดตั้งในห้องอบแห้งขนาดความกว้าง 90 cm ความยาว 30 cm ความสูง 30 cm โดยใช้ น้ำ ในการทดสอบการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่า การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟมีความสม่ำเสมอที่บริเวณตรงกลางของเครื่องอบแห้ง ซึ่งพบได้ในทุกระดับกำลังไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 แสดงถึงการดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามบริเวณด้านข้างของห้องอบแห้ง (คอลัมน์ 1 และ 4) น้ำได้รับคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าบริเวณตรงกลาง (คอลัมน์ 2 และ 3) อาจเป็นเพราะคลื่นไมโครเวฟมีการสะท้อนกับผนังด้านข้างของห้องอบแห้งทำให้ความเข้มของคลื่นไมโครเวฟมีค่ามากกว่าบริเวณตรงกลางของห้องอบแห้ง จากผลการทดลองสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยหลีกเลี่ยงการวางวัสดุอบแห้งใกล้กับผนังของห้องอบแห้ง

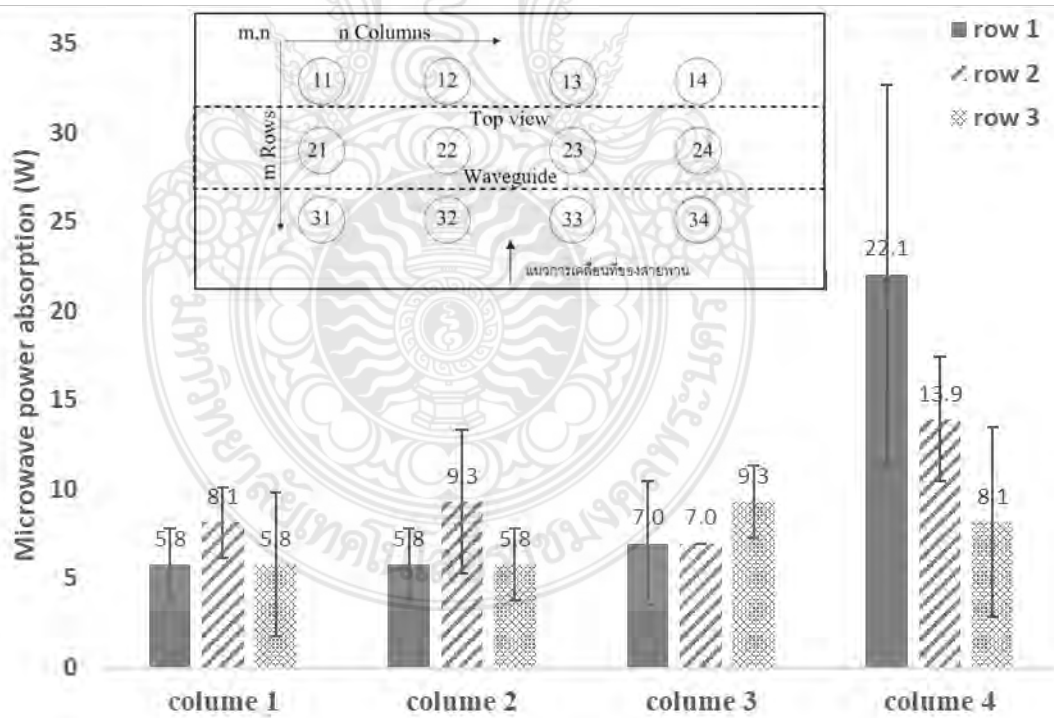
เมื่อพิจารณาความแตกต่างของระดับกำลังไมโครเวฟ เปรียบเทียบที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 600 W มีความสม่ำเสมอมากกว่าที่ระดับกำลังไมโครเวฟอื่น ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกระดับกำลังไมโครเวฟของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานได้ในอนาคต



รูปที่ 4.1 การดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 800x2 W



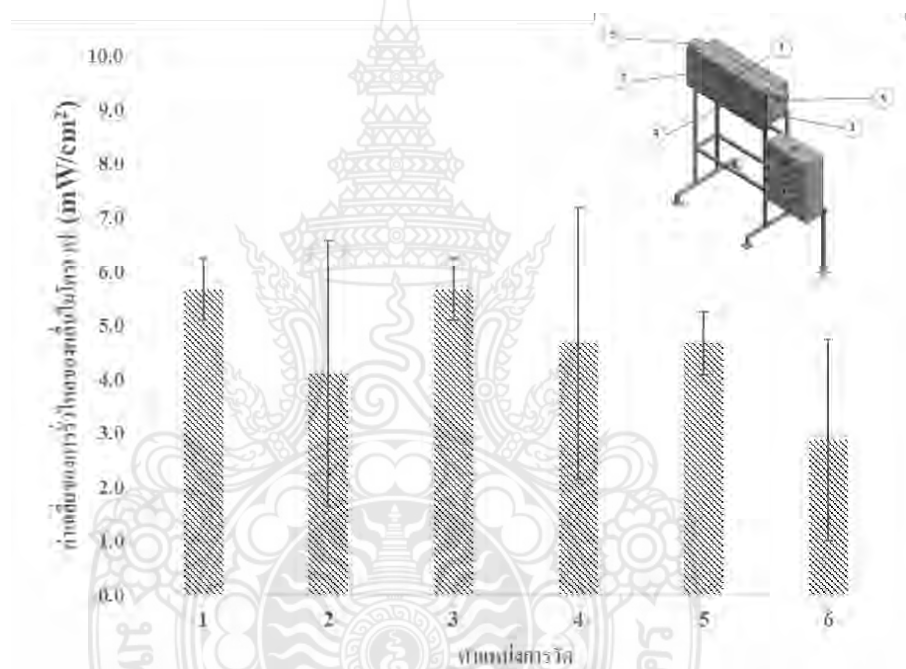
รูปที่ 4.2 การดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 600x2 W



รูปที่ 4.3 การดูดซับกำลังไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 400x2 W

4.2 การรื้อไหลของคลื่นไมโครเวฟ

การรื้อไหลของคลื่นไมโครเวฟทำการตรวจสอบรอบๆ ตัวเครื่องซึ่งตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 3.4 โดยค่าเฉลี่ยการรื้อไหลของคลื่นไมโครเวฟแต่ละตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4.4 จากการศึกษพบว่า การรื้อไหลของคลื่นไมโครเวฟส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ The US Department of Health and Human Services (DHHS) ซึ่งมีค่าไม่เกิน 5 mW/cm^2 แต่อย่างไรก็ตามมีการรื้อไหลของคลื่นไมโครเวฟเกินค่ามาตรฐานเล็กน้อยคือตำแหน่งที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งตรงประตูของห้องอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งประตูจะเป็นตำแหน่งทางเข้าของสายพานซึ่งสามารถติดตั้งตัวกันคลื่นไมโครเวฟได้ เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณวิจัยจึงไม่สามารถติดตั้งตัวกันคลื่นไมโครเวฟได้ซึ่งมีราคาที่สูง



รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยการรื้อไหลของคลื่นไมโครเวฟ (mW/cm^2)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟของห้องอบแห้งของเครื่องไมโครเวฟแบบสายพานซึ่งมีการติดตั้งแมกนีตรอนที่ตำแหน่งด้านบนของเครื่องพบว่า คลื่นไมโครเวฟมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในบริเวณตรงกลางของเครื่องในทุกระดับกำลังไมโครเวฟ เมื่อพิจารณากำลังไมโครเวฟที่ต่างกัน เงานไขกำลังไมโครเวฟ 600 W มีการกระจายที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเงานไขกำลังไมโครเวฟอื่น การรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในมาตรฐานความปลอดภัยของ The US Department of Health and Human Services (DHHS) ซึ่งมีค่าไม่เกิน 5 mW/cm^2



บรรณานุกรม

กอบพัชรกุล เป็นบุญ, 2550, การอบแห้งลำไยแผ่นโดยใช้เทคนิคผสมระหว่างเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์กับเตาอบลมร้อนและเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์กับเตาอบไมโครเวฟแบบสุญญากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 1-51.

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551, พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ หน้า 1-558.

พรพิมล สุทันฐรัตน์ และเสาวนีย์ เนตโรสง, 2550, การทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยคลื่นไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 21-40.

พฤทธิ เนตรสว่าง, 2552, การอบแห้งกล้วยหั่นแว่นด้วยไมโครเวฟ-สุญญากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, หน้า 11-17.

วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล, 2529, อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 3, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 1-3.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540, การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, พิมพ์ครั้งที่ 7, หนังสือในโครงการส่งเสริมการสร้างตำรามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 3.

สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555, การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ, ท้อป, กรุงเทพฯ, หน้า 1-306.

สุรพล สุธีระเวชช์, 2542, คู่มือเข้าใจและซ่อมเตาไมโครเวฟ, พิมพ์ครั้งที่ 2, อาร์ต เอ็จ กราฟฟิค, กรุงเทพฯ, หน้า 1-167.

Alibas, I., 2006, "Characteristics of Chard Leaves during Microwave, Convective and Combined Microwave-Convective Drying", *Drying Technology*, Vol. 24, No. 11, pp. 1425-1435.

Alibas, I., 2007, "Microwave, Air and Combined Microwave-Air-Drying Parameters of Pumpkin Slices", *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 40, No. 8, pp. 1445-1451.

Andrés, A., Bilbao, C. and Fito, P., 2004, "Drying Kinetics of Apple Cylinders under Combined Hot Air-microwave Dehydration", **Journal of Food Engineering**, Vol. 63, No. 1, pp. 71-78.

Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z., and Mousavi, S.M., 2009, "An Investigation of the Effects of Drying Methods and Conditions on Drying Characteristics and Quality Attributes of Agricultural Products during Hot Air and Hot Air/Microwave-Assisted Dehydration", **Drying Technology**, Vol. 27, No. 7, pp. 831-841.

Bai-Ngew, S., Therdthai, N. and Dhamvithee, P., 2011., "Characterization of Microwave Vacuum-dried Durian Chips", **Journal of Food Engineering**, Vol. 104, No. 1, pp. 114-122.

Dev, S.R.S., Geetha, P., Orsat, V., Gariépy, Y., and Raghavan, G.S.V., 2011, " Effects of Microwave-Assisted Hot Air Drying and Conventional Hot Air Drying on the Drying Kinetics, Color, Rehydration, and Volatiles of *Moringa oleifera*", **Drying Technology**, Vol. 29, No. 12, pp. 1452-1458.

Giri, S.K. and Prasad, S., 2007, "Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushroom", **Journal of Food Engineering**, Vol. 78, No. 2, pp. 512-521.

Jia, L.W., Islam, Md. R., and Mujumdar, A.S., 2003, "A Simulation Study on Convection and Microwave Drying of Different Food Products", **Drying Technology**, Vol. 21, No. 8, pp. 1549-1574.

Jeni, K., Yapa, M. and Rattanadecho, P., 2010, "Design and Analysis of the Commercialized Drier Processing Using a Combined Unsymmetrical Double-feed Microwave and Vacuum System (case study: tea leaves)", **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Vol. 49, No. 4, pp. 389-395.

Kassem, A.S., Shokr, A.Z., El-Mahdy A.R., Aboukarima A.M. and Hamed E.Y., 2011, "Comparison of Drying Characteristics of Thompson Seedless Grapes Using Combined Microwave Oven and Hot Air Drying", **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, Vol. 10, No. 1, pp. 33-40.

- Lombraña, J.I., Rodríguez, R. and Ruiz, U., 2010, "Microwave-drying of Sliced Mushroom", **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Vol. 11, No. 4, pp. 652-660.
- Malafrente, L., Lamberti, G., Barba, A.A., Raaholt, B., Holtz, E., and Ahrné, L., 2012, "Combined convective and microwave assisted drying: Experiments and modeling", **Journal of Food Engineering**, Vol. 112, No. 4, pp. 304-312.
- Maskan, M., 2000, "Microwave/air and Microwave Finish Drying of Banana", **Journal of Food Engineering**, Vol. 44, No.2, pp. 71-78.
- Maskan, M., 2001, "Drying Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying", **Journal of Food Engineering**, Vol. 48, No. 2, pp. 177-182.
- Ozkan, I.A., Akbudak, B. and Akbudak, N., 2007, "Microwave Drying Characteristics of Spinach", **Journal of Food Engineering**, Vol. 78, No. 2, pp. 577-583.
- Prommas, R., Rattanadecho, P. and Jindarat, W., 2012, , "Energy and Exergy Analyses in Drying Process of Non-hygroscopic Porous Packed Bed Using a Combined Multi-feed Microwave-convective Air and Continuous Belt System (CMCB)", **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Vol. 39, No. 2, pp. 242-250.
- Shama, G.P. and Prasad, S., 2001, "Drying of Garlic (*Allium Sativum*) Cloves by Microwave-hot air Combination", **Journal of Food Engineering**, Vol. 50, No. 2, pp. 99-105.
- Sharma, G.P. and Prasad, S., 2006, "Specific Energy Consumption in Microwave Drying of Garlic Cloves", **Energy**, Vol. 31, No. 12, pp. 1921-1926.
- Song, X.-J., Zhang, M., Mujamdar, A.S. and Fan, L., 2009, "Drying characteristics and kinetics of vacuum microwave-dried potato slices", **Drying Technology**, Vol. 27, No. 9, pp. 969-974.
- Sumnu, G., Turabi, E. and Oztop, M, 2005, "Drying of Carrots in Microwave and Halogen Lamp-microwave Combination Ovens", **LWT**, Vol. 38, No. 5, pp. 549-553.
- Therdthai, N. and Zhou, W., 2009, " Characterization of Microwave Vacuum Drying and Hot Air Drying of Mint Leaves (*Mentha cordifolia* Opizex Fresen)", **Journal of Food Engineering**, Vol. 91, No. 3, pp. 482-489.

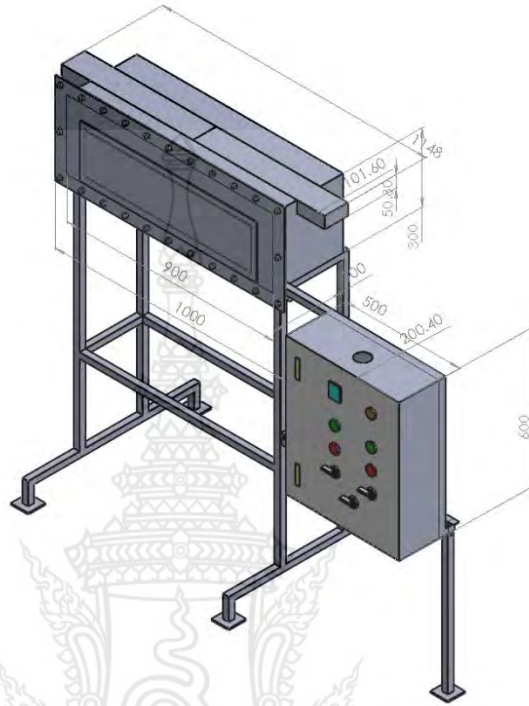
Varith, J., Dijknarakul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya S., 2007, “Combined Microwave-hot Air Drying of Peeled Longan”, **Journal of Food Engineering**, Vol. 81, No. 2, pp. 459-468.

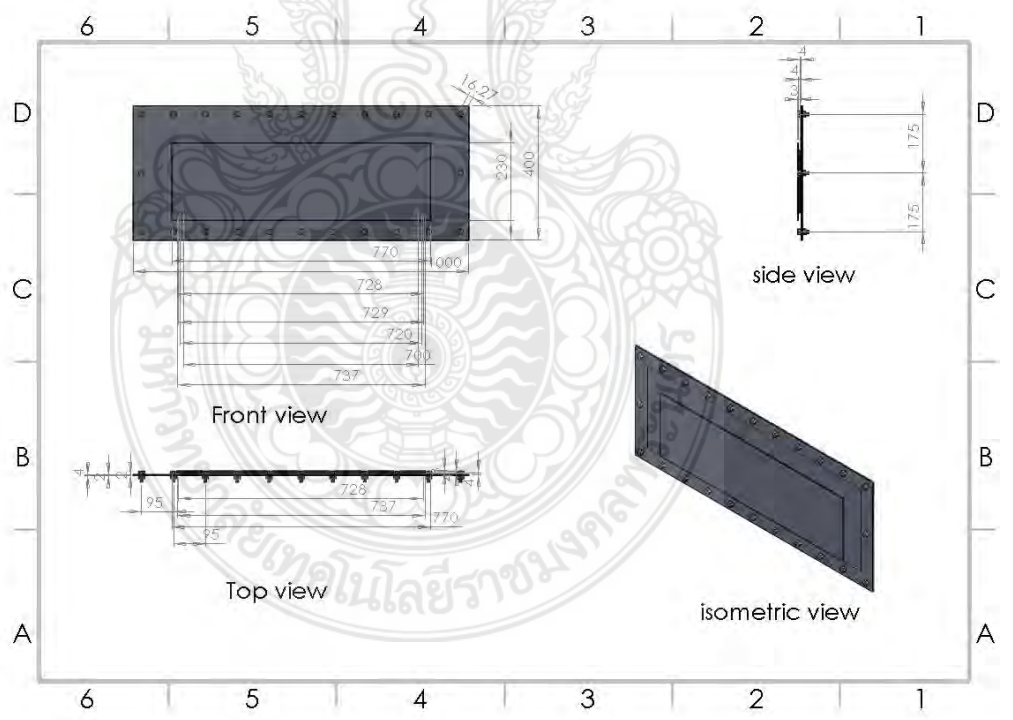
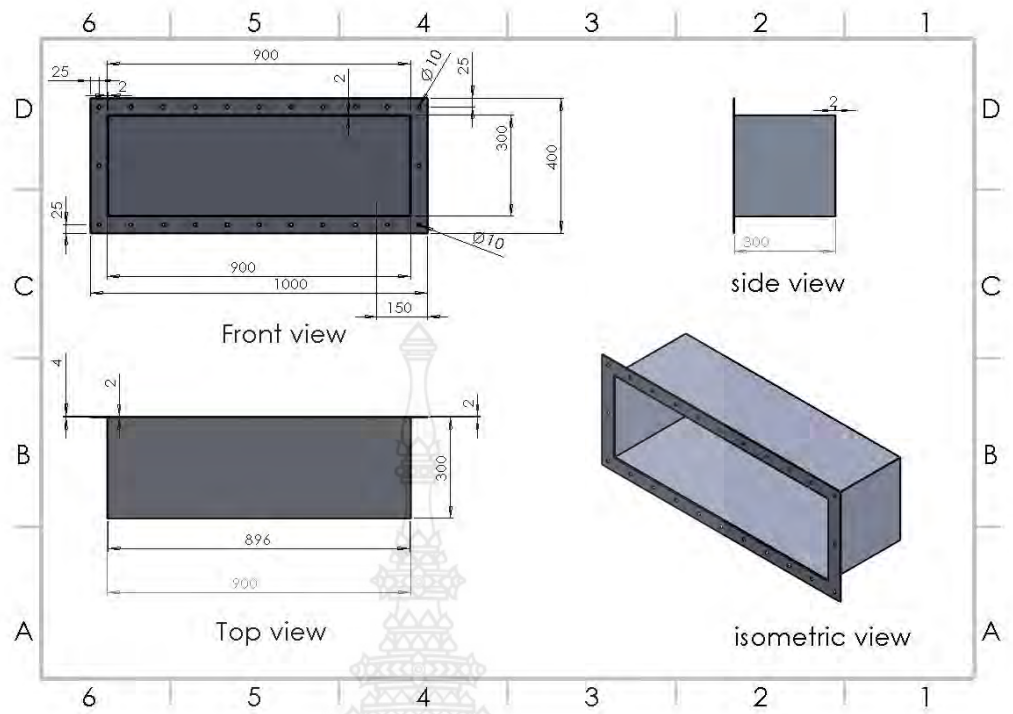
Wang, J. and Sheng, K., 2006, “Far-infrared and Microwave Drying of Peach”, **LWT**, Vol. 39, No. 3, pp. 247-255.



ภาคผนวก

แบบของห้องอบแห้งของเครื่องไมโครเวฟแบบสายพาน





ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): นายกฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Mr. Krit Apinyavisit

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ที่อยู่ 1381 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 02-836-3000 ext.4138, E-mail: krit.a@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญาโท วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน) : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปริญญาเอก ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): นายสุวิทย์ แพงกันยา

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Mr.Suwit Paengkaya

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ที่อยู่ 1381 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 02 882 8543 , E-mail: suwit.p@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมพลังงาน) : มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ปริญญาโท วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน) : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปริญญาเอก ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 2

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): นายปฎิวดี คมวชิรกุล

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Mr. Patiwat Khomwachirakul

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ที่อยู่ 1381 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 02 882 8543, E-mail: patiwat.k@mutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญาโท วศ.ม. (การจัดการทางวิศวกรรม) : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญาเอก พร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

