สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสูญญากาศเพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูด

(Microwave vacuum dryer for study on drying characteristics of leech lime peels)

จัดทำโดย

นางสาว วิชุดา	ไทยอ่อน	รหัสนักศึกษา 47040889
นางสาว สุภัสนี	ดุลยเกษม	รหัสนักศึกษา 47040897
นางสาว โสภา	เกตุสุวรรณ์	รหัสนักศึกษา 47040898

วน.
Q5570
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 85391
วัน,เดือน,ปี 11 พ.ย. 2551

b 12010310
i.....

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

ใบรับรองปัญหาพิเศษ

เรื่อง

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ
เพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูด

(Microwave vacuum dryer for study on drying characteristics of leech lime peels)

จัดทำโดย

นางสาว วิชุดา	ไทยอ่อน	รหัส 47040889
นางสาว สุภัสนี	ดุลยเกษม	รหัส 47040897
นางสาว โสภา	เกตุสุวรรณ์	รหัส 47040898

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

.... 20 / มี.ค. / 2551

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

(ดร. กิตติชัย บรรจง)

วิชุดา ไทยอ่อน,สุภัสณี ดุลยเกษม และโสภา เกตุสุวรรณ์,2550 : เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศเพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูด (Microwave vacuum dryer for study on drying characteristics of leech lime peels)
สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กิตติชัย บรรจง

บทคัดย่อ

ปัญหาพิเศษนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศเพื่อศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของผิวมะกรูด ได้แก่ สี โดยใช้ผิวมะกรูดขนาดประมาณ 1×1 เซนติเมตร ปริมาณ 150 กรัม เป็นตัวอย่างในการทดลอง โดยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นใช้เตาอบไมโครเวฟดัดแปลงที่มีระดับความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต ตู้สุญญากาศซึ่งทำด้วยแผ่นอะคิลิกความหนา 10 มิลลิเมตร ขนาดภายใน 19×21×20 นิ้ว ต่อกับเครื่องปั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ Makashi รุ่น FY-1C และเกจวัดสุญญากาศ 0-760 มิลลิเมตรปรอท โดยทำการศึกษาที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ได้แก่ 90 และ 180 วัตต์ ระดับความดันสัมบูรณ์ 3 ระดับ ได้แก่ 710, 735 และ 760 มิลลิเมตรปรอท โดยใช้ตัวอย่างผิวมะกรูดจำนวน 2 ชุด ได้ผิวมะกรูดอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 14 ของน้ำหนักแห้ง จากผลการทดลองพบว่าระดับกำลังไมโครเวฟที่ 90 และ 180 วัตต์ มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งผิวมะกรูดในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (Falling Drying Rate Period) มีค่าเท่ากับ 1.65×10^{-2} ,3.77×10^{-2} และค่า Hue มีค่าเท่ากับ 74.12 และ 63.54 องศา ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยเมื่อระดับกำลังไมโครเวฟสูงขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง

วิชุดา ไทยอ่อน		
(นางสาววิชุดา ไทยอ่อน)	(ดร.กิตติชัย บรรจง)	20/03/51
สุภัสณี ดุลยเกษม	อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ	วัน/เดือน/ปี
(นางสาวสุภัสนี ดุลยเกษม)		
โสภา เกตุสุวรรณ์		
(นางสาวโสภา เกตุสุวรรณ์)		

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำรายงานปัญหาพิเศษในหัวข้อ เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศเพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูด ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ ดร.กิตติชัย บรรจง ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา คอยช่วยเหลือและเอาใจใส่ ให้คำปรึกษาคำแนะนำตลอดจนช่วยกรุณาชี้แจงข้อบกพร่อง รวมทั้งแก้ไขและคอยติดตามงานอยู่ตลอด จึงทำให้รายงานปัญหาพิเศษฉบับนี้มีความถูกต้องและมีความครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้กำลังทรัพย์อย่างมากมายและคอยให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำรายงานครั้งนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆและทุกท่านที่เกี่ยวข้องที่ให้คำแนะนำคำปรึกษาและกำลังใจมาโดยตลอด ประโยชน์อันใดที่เกิดจากรายงานเล่มนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้จัดทำซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นางสาววิชุดา ไทยอ่อน
นางสาวสุภัสณี ดุลยเกษม
นางสาวโสภา เกตุสุวรรณ์
18 มี.ค.2551

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 วารสารปริทัศน์	3
2.2 ประเภทของการอบแห้ง	4
2.3 การทำแห้งด้วยไมโครเวฟ	5
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ	11
2.5 การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหาร	14
2.6 การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ	16
2.7 ผลของความดัน ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟ ต่อการทำแห้ง	19
2.8 ข้อดี ข้อเสียของการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ	19
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	21
3.1 วัตถุดิบ	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	21
3.3 วิธีการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 การคำนวณปริมาณความชื้น	30
4.2 การคำนวณน้ำหนักสุดท้าย	31
4.3 การคำนวณค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง	31
4.4 การหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและค่าสีของผลิตภัณฑ์	32
4.5 ข้อสังเกตของผลการทดลอง	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 42
5.1 สรุปผล 42
5.2 ข้อเสนอแนะ 43
เอกสารอ้างอิง 49

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ	4
2.2	สรุปการใช้การทำแห้งด้วยไมโครเวฟกับอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท	14
4.1.1	แสดงปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	30
4.1.2	แสดงปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ผิวมะกรูดอบแห้ง	30
4.2	แสดงค่าน้ำหนักสุดท้ายของการอบแห้งผิวมะกรูด	31
4.3.1	แสดงค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งของตัวอย่างในตัวอย่างชุดที่ 1	31
4.3.2	แสดงค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งของตัวอย่างในตัวอย่างชุดที่ 2	32
4.4.1	แสดงผลการวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์ผิวมะกรูดอบแห้ง	36

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของแมกนีตรอน	6
2.2	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดสู่แอโนด	7
2.3	การเกิดไฟฟ้ากระแสสลับในแควิตี้	7
2.4	ลักษณะการจับกลุ่มของอิเล็กตรอน	7
2.5	ส่วนประกอบที่สำคัญของตู้ไมโครเวฟ	8
2.6	การหมุนตัวของสารประกอบมีประจุเนื่องจากไมโครเวฟ	10
2.7	กลไกการอบแห้งด้วยความร้อน	16
2.8	กลไกการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ	17
3.1	เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ	21
3.2	แสดงขนาดของตู้สุญญากาศ	22
3.3	ตู้สุญญากาศ	23
3.4	เตาอบไมโครเวฟและขาตั้ง	23
3.5	แสดงขนาดของแกนรับน้ำหนัก	24
3.6	แกนรับน้ำหนัก	25
3.7	เครื่องชั่งน้ำหนัก 1 ตำแหน่ง	25
3.8	ปั๊มสุญญากาศ	26
3.9	เกจสุญญากาศ	26
3.10	จานรองไมโครเวฟ	27
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 90 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 1	33
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 180 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 1	33
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 90 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 2	34
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 180 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 2	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งกำลังไมโครเวฟที่ระดับความดันต่างๆ ของตัวอย่างชุดที่ 1	35
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและกำลังไมโครเวฟที่ระดับความดันต่างๆ ของตัวอย่างชุดที่ 2	35
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของไมโครเวฟและค่า Hue ที่ระดับความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 1	37
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของไมโครเวฟและค่า Hue ที่ระดับความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 2	37
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 1	39
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 2	39
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่า Hue ของผลิตภัณฑ์ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 1	40
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่า Hue ของผลิตภัณฑ์ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 2	40
5.1 แสดงเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศที่ทำการปรับปรุงแล้ว	43
5.2 แสดงเตาอบไมโครเวฟแบบอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Panasonic	45
5.3 แสดง Vacuum bag and glass beads inside the vacuum chamber	45
5.4 แสดง Vacuum pump and power control	46
5.5 แสดง Pressure gauge PG-30	46
5.6 แสดง Constituent of condenser coil	47
5.7 แสดง Diagram of microwave vacuum dehydrator	47

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นฐานมาจากเกษตรกรรม จึงมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ผลผลิตเหล่านี้บางชนิดอาจมีจำนวนมากเกินความต้องการหรืออาจขาดแคลนได้ในบางฤดูจึงควรที่จะทำการเก็บรักษาผลผลิตที่ได้ให้มีระยะเวลาในการบริโภคให้ยาวนานขึ้น วิธีการที่นิยมอย่างหนึ่งสำหรับการเก็บรักษาผลผลิตเหล่านี้คือ วิธีการอบแห้ง

ในปัจจุบันการอบแห้งได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ซึ่งก็มีวัตถุประสงค์แตกต่างกันออกไป คือ นอกจากทำการอบแห้งผลผลิตให้สามารถเก็บรักษาไว้บริโภคยาวนานขึ้น ยังทำการอบแห้งเพื่อรักษาคุณค่าทางโภชนาการ เพื่อรักษารูปร่างและรสชาติ เพื่อความสะดวกในการปรุงแต่งอาหาร เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

วิธีการอบแห้งที่นิยมอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่ จะใช้แสงแดดเพื่อทำให้แห้ง ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาต่อผลผลิตมากและพลังงานจากแสงแดดที่ใช้ในการทำแห้งไม่คงที่ จึงทำให้เสียเวลามากในการทำแห้ง นอกจากนี้ผลผลิตที่ได้ยังจะเสื่อมคุณภาพและคุณสมบัติทางกายภาพของผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพราะว่าผลของการใช้อุณหภูมิที่สูงมากรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยาวนานเกินไป การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน โดยจะให้ความร้อนจากผิวของผลผลิตที่นำมาทำการอบแห้งถ่ายเทเข้าสู่แกนกลางของผลผลิต ซึ่งจากหลักการนี้มักจะทำให้สีผิวของผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งต่างไปจากเดิมได้ง่ายขึ้น

ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ เป็นผลเสียที่เกิดขึ้นกับผลผลิตเนื่องจากการอบแห้งทั่วๆไป ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการอบแห้งขึ้นมาใหม่ โดยที่ผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งนี้ยังสามารถรักษาคุณภาพเดิมไว้ได้ดี แต่ขณะเดียวกันก็สามารถนำปริมาณน้ำในผลผลิตออกมาได้มากและเร็วที่สุด วิธีนั้นก็คือ วิธีการอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ (ประเสริฐ และคณะ, 2542)

การอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ จะอาศัยคุณสมบัติการดูดกลืนไมโครเวฟของผลผลิตที่นำมาทำการอบแห้ง ดังนั้นผลผลิตจะเกิดความร้อนขึ้นภายในก่อน จากนั้นจึงกระจายความร้อนออกมาสู่ผิวนอก ด้วยหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิม ซึ่งการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศจะทำให้น้ำภายในผลผลิตระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งจึงใช้เวลาน้อยลง คุณค่าผลผลิตจึงไม่ถูกทำลายไปมาก จึงทำให้ผลผลิตมีรูปร่างสวยงามไม่เหี่ยวย่น ซึ่งแตกต่างจากการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ เนื่องจากพลังงานจากคลื่น

ไมโครเวฟจะทำให้ความร้อนเกิดขึ้นภายในผลผลิตที่ทำแห้ง ซึ่งการระเหยของน้ำในผลผลิตนี้เองจะทำให้ความดันไอออกมาสู่ผิวนอก (พรพรรณ และคณะ, 2546)

ปัญหาพิเศษนี้ได้ใช้ตัวอย่างเป็นผิวมะกรูดซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรโดยจัดเป็นพืชเครื่องเทศ และสมุนไพรที่มีการใช้ประโยชน์กันมากและยังสามารถเก็บรักษาอยู่ในรูปของใบมะกรูดและผิวมะกรูดได้อีกด้วย โดยจะทำการศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูดและทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกายภาพระหว่างผิวมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศและวิธีอบแห้งแบบไมโครเวฟที่สภาวะบรรยากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ทำการศึกษาการอบแห้งที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ ซึ่งใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต เป็นแหล่งพลังงาน

1.2.2 เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ รวมทั้งทำการเก็บผลข้อมูลการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูดคือ ระดับความดันสัมบูรณ์ (มิลลิเมตรปรอท) และระดับกำลังไมโครเวฟ (วัตต์)

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วารสารปริทัศน์

การอบแห้งแบบไมโครเฟร่วมกับสุญญากาศผสมผสานไปด้วยประโยชน์ของการอบแห้งแบบสุญญากาศและการอบแห้งแบบไมโครเวฟ และสามารถพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Cai, T. และคณะ,2004) พลังงานที่ให้แก่ผลิตภัณฑ์สามารถใช้ได้ทั้งการให้แบบเป็นช่วงๆ หรือแบบต่อเนื่อง แต่ว่าการอบแห้งโดยการให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงๆ จะมีประสทธิภาพมากกว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่อง ในทั้งสองกรณีนี้ ประสิทธิภาพในการอบแห้งสามารถปรับปรุงได้เมื่อใช้ความดันต่ำลง (Rahman, M.S. และคณะ ,1999) ความดันสุญญากาศจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันเพิ่มขึ้นระหว่างด้านในและด้านนอกของตัวอย่างเพื่อทำให้แห้ง และรักษาระดับอุณหภูมิต่ำซึ่งจำเป็นสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อน (thermalabile products) เนื้อสัมผัสของอาหารอาจจะถูกปรับปรุงได้ถ้าใช้การอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟและความดันสามารถควบคุมได้เพื่อขยายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์บางชนิด ทำให้เกิดโครงสร้าและเนื้อสัมผัสซึ่งหาไม่ได้จากวิธีอื่นๆ ดังนั้นวิธีการอบแห้งแบบนี้จึงมีความสำคัญต่อระดับอุตสาหกรรม เช่น ยา (Rahman , M.S. และ Perera , C.O.,2002)

Yongsawatdigul และ Gunasekaran (1996) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศของcranberries และพบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงๆมีประสิทธิภาพมากกว่าการให้พลังงานอย่างต่อเนื่อง และประสิทธิภาพนการอบแห้งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ความดันต่ำลง (5.33 กิโลปาสคาล) และการใช้ power-on สั้นลง และ power-off time ยาวนานขึ้นจะทำให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งูงขึ้นในขณะให้พลังงานเป็นช่วงๆ

Lin, T.M. และคณะ (1998) ศึกษาผลของการอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศที่มีต่อแครอทอบแห้งโดยการเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบสุญญากาศ พวกเขาพบว่าแครอทที่ผ่านการอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศนั้นมีความสามรถในการคืนรูป (rehydra potential) มีปริมาณแอลฟา แคโรทีน และวิตามินซีสูงกว่าแครอทที่อบแห้งด้วยลมร้อน นอกจากนี้ยังมีควมหนาแน่นต่ำกว่าและเนื้อสัมผัสที่นุ่มขึ้นอีกด้วย

2.2 ประเภทของการอบแห้ง

2.2.1 การอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง

เป็นการอบแห้งที่ความร้อนมีการสัมผัสโดยตรงกับผลผลิต กล่าวคือเป็นการอบแห้งที่อาศัยหลักขอการพาความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปสู่ผลผลิตที่นำมาอบแห้ง

ตัวอย่างของการอบแห้งแบบนี้ คือ

1) การอบแห้งแบบใช้ลมร้อน
2) การอบแห้งแบบ Fluidized bed
3) การอบแห้งแบบ Rotary Dryer

2.2.2 การอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยทางอ้อม

เป็นการให้ความร้อนแบบพลังงานรูปอื่น นอกเหนือจากการอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง

ตัวอย่างของการอบแห้งแบบนี้ คือ

1) การอบแห้งแบบ Microwave-Vacuum
2) การอบแห้งแบบแช่แข็ง
3) การอบแห้งแบบถังหมุน

นอกจากนี้ยังแบ่งได้ตามตารางดังนี้ (ประเสริฐ และคณะ,2542)

ตารางที่ 2.1 แสดงการแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ

รูปแบบการส่งผ่านความร้อน	เครื่องอบแห้ง	
	แบบ Batch	แบบต่อเนื่อง
1.การพาความร้อน	เครื่องอบแห้งแบบเตา	เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์
	เครื่องอบแห้งแบบถาดหรือชั้น	เครื่องอบแห้งแบบสายพาน
		เครื่องอบแห้งแบบฉีดพ่นฝอย
		เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด
2.การนำความร้อน	เครื่องอบแห้งแบบหม้อกวน	เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง
3.การแผ่รังสีความร้อน	เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ	
4.การเกิดความร้อนภายใน	เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟ	

ที่มา: ประเสริฐ และคณะ (2542)

2.3 การทำแห้งด้วยไมโครเวฟ

แนวความคิดเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเริ่มมากว่า 50 ปี เริ่มมาจากในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 นายเพอร์ซี สเปนเซอร์ได้นำเอาเรดาร์มาให้ความร้อนแก่อาหาร นำไปสู่กาพัฒนาการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับอาหาร การพัฒนาการใช้ไมโครเวฟกับอาหารเกิดขึ้นเรื่อยมาแต่ยังไม่มีการนำไปใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร จนกระทั่ง ค.ศ.1952 นายเพอร์ซี นำเอาระบบสายพานมาใช้จึงเกิดการพัฒนาการใช้ไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหาร ความเจริญเติบโตจากการใช้ไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหารจำเป็นต้องใช้ความรู้ในหลายศาสตร์ร่วมกัน คือ วิศวกรรมอาหาร วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และวิศวกรรมไมโครเวฟ ในกระบวนการทำแห้งอาหารไมโครเวฟมีประโยชน์มากในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง โดยช่วยเร่งการทำแห้งในช่วงนี้ ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น

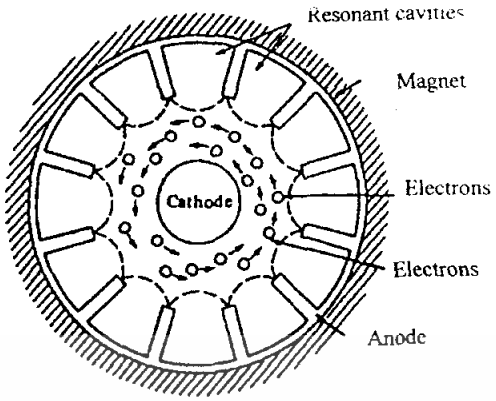
2.3.1 อุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Microwave generators) ส่วนนำท่อคลื่นไมโครเวฟ (Waveguides) ต้องเป็นวัสดุที่ไม่ดูดกลืน หรือดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่ำและส่วนบริเวณที่มีวัตถุดิบอยู่ (Applicators)

ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญทำหน้าที่โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกมา มี 2 แบบ โดยแบ่งตามลักษณะของการปล่อยอิเล็กตรอนคือ ชนิดโอ (Type O) ปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเป็นแนวเส้นตรง (Linear) เช่น Klystron และ Traveling wavetubes ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟชนิดโอนี้มีราคาแพง และไม่กะทัดรัด อีกชนิดหนึ่งที่คนนิยมใช้คือ ชนิดเอ็ม (Type M) ปล่อยอิเล็กตรอนออกมาในลักษณะไขว้ (Cross field) เช่น แมกนีตรอน

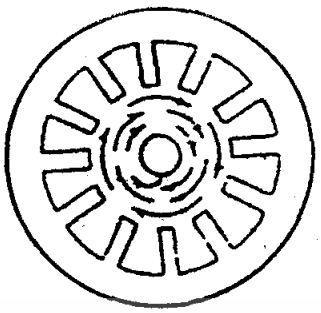
หลอดแมกนีตรอน (Magnetron) ทำหน้าที่ปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ มีโครงสร้างทำด้วยแม่เหล็กหุ้มห่อขั้วไฟฟ้า (Elect rob) ไว้ 2 อัน ประกอบด้วยแท่งแอโน(Anode) เป็นครีบโลหะต่อกันเป็นวงด้านนอกพุ่งเข้าหาแคโทด มักมีจำนวนคู่ มีความสามารถเป็นตัวนำที่ดี ทำหน้าที่กำหนดวงจรของไมโครเวฟ และไส้หลอดที่ทำหน้าที่เป็นแคโทด (Cathode) ทำหน้าทีปลดปล่อย Thermionic electron โดยวางอยู่ตรงกลางล้อมด้วยแท่งแอโนด ดังแสดงในภาพที่2.1

ภายในตัวแมกนีตรอนเป็นสุญญากาศ นอกจากนี้มีสายอากาศทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นต่อกับครีบและออกสู่ภายนอกโดยผ่านยอดโดม ซึ่งทำเป็นฉนวนกันสายอากาศช็อตกับตัวถังของแมกนีตรอนซึ่งตัวถังของแมกนีตรอนก็คือขั้วแอโนด

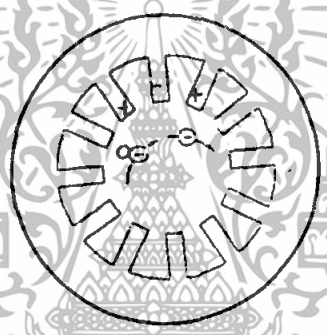


รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของแมกนีตรอน
ที่มา : เหมการ์ (2545)

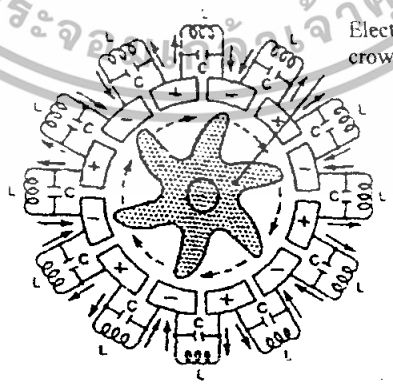
จากบริเวณระหว่างแคโทด และแอโนดจะมีช่องว่างอยู่เรียกว่า Resonance cavity เป็นบริเวณที่เกิดการประสานสัมพันธ์กัน เกิดเป็นกลุ่มก้อนของอิเล็กตรอนที่หมุนตัวได้ โดยเกิดขึ้นเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังแคโทดทำให้แคโทดร้อยขึ้น และปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบออกมาวนเวียนอยู่รอบๆแท่งแอโนดในสภาวะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก แต่ในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในแนวขนานกับแกนของท่ออิเล็กตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นวง (Orbital) มากกว่าจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดลักษณะกระแสสลับในคาวิตี้ ดังรูปที่ และในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแมกนีตรอนนั้นในความเป็นจริงแล้วอิเล็กตรอนจะรวมกลุ่มกันเป็นซี่วงล้อ ดังรูปที่ ซึ่งการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนนี้จะให้พลังงานได้สูงมาก การหมุนตัวกระโดดจากแคโทดไปที่แอโนดภายใต้ความดันไฟฟ้า 4000-6000 โวลต์ เป็นผลให้เกิดคลื่นไมโครเวฟขึ้น โดยมีสายอากาศ (Antenna) ที่ส่วนบนของท่อแมกนีตรอนเป็นตัวจับคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้นแล้วส่งผ่านท่อนำคลื่น (Waveguide) ผ่าน Stirrer เพื่อช่วยกระจายคลื่นไมโครเวฟสัมผัสอาหารได้ทั่วถึงภายในตู้ใส่อาหารดังภาพ



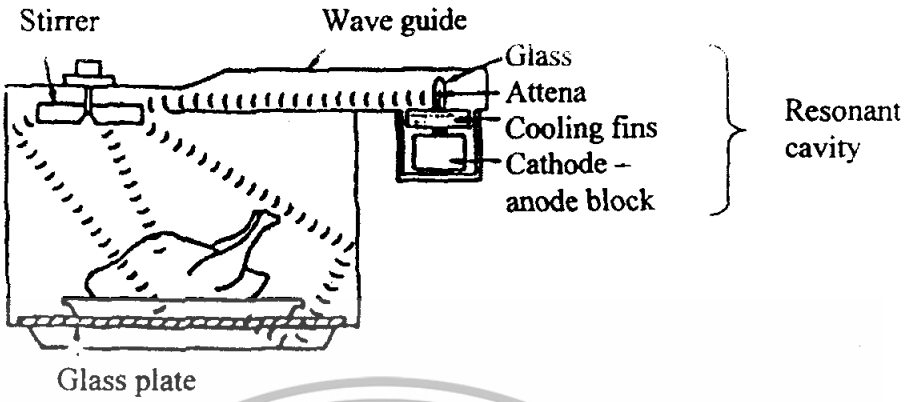
รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดสู่แอโนด
ที่มา : เหมการ์ (2545)



รูปที่ 2.3 การเกิดไฟฟ้ากระแสสลับในเควิตี้
ที่มา: เหมการ์ (2545)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการจับกลุ่มของอิเล็กตรอน
ที่มา : เหมการ์ (2545)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบที่สำคัญของตู้ไมโครเวฟ

ที่มา : เหมการ์ (2545)

ข้อดีของแมกนีตรอนคือ ขนาดเล็ก แต่ให้ประสิทธิภาพสูง มีเสถียรภาพในการทำงานที่ความถี่ตามต้องการได้ โดยจะสร้างความถี่ที่2450 ± 50 MHz เมื่อโหดมีการดึงกระแสสูงหรือต่ำ แมกนีตรอนยังสร้างความถี่ได้คงที่ นอกจากนี้แมกนีตรอนยังสร้างง่ายและมีราคาถูก

2.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของไมโครเวฟ

การใช้ประโยชน์จากการแผ่รังสีของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ในการแปรรูปอาหารเป็นเทคโนโลยีที่ก้อนข้างทันสมัยและก้าวหน้า โดนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. Non-Ionizing Radiation

เป็นรังสีของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ของคลื่นต่ำ แต่มีความยาวของคลื่นสูง ได้แก่ คลื่นวิทยุ ทั้งระบบคลื่นยาวและคลื่นสั้น คลื่นโทรทัศน์ คลื่นไมโครเวฟ จนถึงอินฟราเรด ซึ่งคลื่นความถี่สูงในระดับไมโครเวฟและอินฟราเรดนั้นสามารถทำให้เกิดพลังงานความร้อนกับสสารที่สามารถดูดซับคลื่นดังกล่าว ซึ่งนับว่าเป็นพลังงานรูปใหม่ที่นำมาใช้ในการแปรรูปอาหารได้หลายรูปแบบ

ข. Ionizing Radiation หรือ High Energy Radiation

เป็นรังสีของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกันแต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงที่มองได้ (Visible spectrum) และมีช่วงความถี่ของคลื่นสูงมาก ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอกซ์และรังสีบีตา ซึ่งในระดับความถี่ของคลื่นดังกล่าวจะก่อให้เกิดพลังงานสูงมากถึงขั้นที่ทำให้โมเลกุลของน้ำในเซลล์เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตแตกตัวได้ (Ionization) จึงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการถนอมอาหารและการแปรรูปอาหารในแบบอื่นๆ

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็น Non-Ionizing Radiation ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารได้โดยไมโครเวฟ คือ พลังงานที่เกิดจากการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงในช่วงคลื่น 300 MHz ถึง 300 GHz มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร จากการที่ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีองค์ประกอบเป็นสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า การที่คลื่นไมโครเวฟอยู่ในช่วงคลื่นใกล้เคียงกับคลื่นวิทยุ และทีวี ทำให้เกิดการรบกวนกัน จึงมีการกำหนดช่วงคลื่นในแต่ละช่วงการใช้งานในทางอุตสาหกรรมอาหาร **International Telecommunication Union (ITU)** กำหนดให้ใช้ช่วงระดับความถี่ของไมโครเวฟ 915 และ 2450 MHz เพื่อไม่ให้คลื่นไปรบกวนการใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

คลื่นไมโครเวฟมีคุณสมบัติทั่วๆไป คือ

1) การสะท้อนกลับ (Reflection)
   เมื่อเตาอบไมโครเวฟทำงาน จะส่งคลื่นออกมาที่ตัวอาหาร ถ้าภาชนะที่ใช้เป็นโลหะจะเกิดการสะท้อนกลับ เพราะไม่สามารถดูดกลืนเอาไว้ได้ เพราะฉะนั้นถ้าปรุงอาหารโดยใส่ภาชนะโลหะ อาหารจะไม่สุก
2) การส่งผ่าน (Transmission)
   อำนาจคลื่นสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระดาษ และพลาสติกได้ ฉะนั้นภาชนะเหล่านี้จะไม่ร้อน นอกจากตัวอาหารจะทำให้มันร้อน เพราะภาชนะเหล่านี้ไม่มีปฏิกิริยาที่จะดูดกลืนคลื่นไว้
3) การดูดกลืนคลื่น (Absorption)
   อาหารสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้เนื่องจากคุณสมบัติการเป็นไดอิเล็กตริกของอาหาร ดังนั้นเมื่อโมเลกุลของอาหารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ มันจะสั่นสะเทือนอย่างรวดเร็วถึง 2450 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานมีผลทำให้อาหารสุกภายในระยะเวลาสั้นๆ

ความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับพลังงานในการแทรกผ่านของคลื่นด้วย มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติการเป็นไดอิเล็กตริก และองค์ประกอบของวัสดุ โดยทั่วไปคลื่นที่ตกกระทบส่วนใหญ่สะท้อนกลับ ส่วนคลื่นที่แทรกผ่านในพื้นผิวจะค่อยๆลดลง

2.3.3 การเกิดความร้อน

การนำไมโครเวฟมาใช้ในการให้ความร้อนกับอาหารในการอบแห้ง จะอาศัยสมบัติของการเกิดความร้อน 2 แบบร่วมกันดังนี้

1) Ionic Polarization

เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากไอออนในสารละลายเมื่อเข้าอยู่ในสนามไฟฟ้า จะถูกกระตุ้นและเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่เกิดการเสียดสีกัน และจะวิ่งผ่านไปในสารละลายของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบ เกิดเป็นพลังงานจลน์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด พลังงานที่ได้จากไมโครเวฟจะมีค่าตามความสัมพันธ์ คือ

2) Dipole Rotation

จากการที่คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีผลไปเหนี่ยวนำให้ประจุของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติมีขั้ว (Dipole) ที่ตามปกติจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ การเคลื่อนที่ของประจุในโมเลกุลนี้ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดพลังงานความร้อนขึ้นดังภาพที่2.6

รูปที่ 2.6 การหมุนตัวของสารประกอบมีประจุเนื่องจากไมโครเวฟ
ที่มา: คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร(2543)

2.3.4 สมบัติการเป็นไดอิเล็กตริกของอาหาร

คุณสมบัติไดอิเล็กตริก คือ คุณสมบัติที่บ่งบอกว่าวัตถุนั้นสามารถทำให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และคลื่นที่อยู่ในช่วงความถี่คลื่นวิทยุได้ เมื่อทำการวิเคราะห์อาหารโดยทั่วไปพบว่า อาหารแทบทุกชนิดมีสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก แต่จะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ลักษณะทางกายภาพของอาหาร อุณหภูมิของอาหาร และระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ สมบัติทางไดอิเล็กตริกของอาหารสามารถแสดงเป็นค่าตัวเลขที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าต่างๆอยู่ 3 ค่า คือ

1) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บกักพลังงานที่ตกกระทบเข้าไปในวัตถุเมื่อนำวัตถุนั้นไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า

2) แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก คือค่าของพลังงานที่สูญเสียไป หรือที่แพร่กระจายไปในสารไดอิเล็กตริก เมื่อนำไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานที่สูญเสียไปนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในชิ้นอาหารนั้นๆ เนื่องจากถ้าค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกสูง แสดงว่าอาหารชิ้นนั้นสามารถเกิดความร้อนขึ้นได้สูง

3) loss tangent หรือ แฟกเตอร์การกระจาย (loss tangent or dissipation factor) คือลักษณะการสูญเสียพลังงานไมโครเวฟเมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าไปในวัตถุแล้วถูกดูดซับพลังงานไว้ ซึ่งคิดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไปจาก 90 ในภาพปกติทั่วไป วัตถุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟจะเรียกวัตถุนั้นว่า 'lossy' โดยวัตถุที่ lossy สูง จะสามารถดูดซับพลังงานได้สูง และให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ,2545)

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ

การทำแห้งด้วยไมโครเวฟมีปัจจัยมากมายหลายชนิดที่มีผลต่อคุณภาพอาหารที่ได้จากการทำแห้งจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาก่อนการทำแห้งเพื่อสามารถผลิตอาหารออกมาได้ดี ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

2.4.1 ปริมาณความชื้นในอาหาร

น้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงถึง 78 โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงของน้ำจะมีผลอย่างมากต่อวัตถุดิบชื้นในกระบวนการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ โดยวัตถุที่มีปริมาณความชื้นสูงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงด้วย เมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ในกระบวนการทำแห้ง น้ำในอาหารจะอยู่ใน 2 รูปแบบคือ น้ำอิสระ (Free water) กับน้ำที่เกาะอยู่กับโมเลกุลอาหาร (Bound water) ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำที่เกาะอยู่กับโมเลกุลอาหารมีค่าเท่ากับ 0.003 ในขณะที่น้ำอิสระมีค่าเท่ากับ 12 ส่งผลให้น้ำทั้ง 2 แบบเกิดการหมุนของอนุภาค (Rotation) เพื่อให้เกิดความร้อน แตกต่างกันเมื่อนำไปไว้ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นอาหารที่มีปริมาณน้ำอิสระอยู่มากจึงตอบสนองต่อการทำแห้งด้วยไมโครเวฟได้มากกว่าอาหารที่มีน้ำอิสระอยู่น้อย

2.4.2 ความหนาแน่น

โดยปกติอากาศจะเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ดังนั้นอาหารที่โปร่งหรือพอง มีอากาศแทรกอยู่มากจะทำให้ร้อนได้ช้า เนื่องจากค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของอากาศซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำหรือตัวทำละลายอื่น

2.4.3 อุณหภูมิ

ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะมีค่าต่ำมาก แต่ที่สภาวะอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น สำหรับของเหลวอุณหภูมิมักไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก แต่มีผลต่อค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

2.4.4 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะนี้ไม่มีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหาร แต่ช่วยอธิบายได้ว่าทำไมวัตถุแต่ละชนิดจึงสามารถให้ความร้อนได้เร็วแตกต่างกันไป ถ้าวัตถุมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำวัตถุนั้นจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เร็วกว่าวัตถุที่มีค่าความร้อนจำเพาะสูง ในกรณีที่อาหารมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนพลังงานต่ำ ค่าความร้อนจำเพาะจะมีส่วนช่วยให้การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นไปด้วยดี การควบคุมค่าความร้อนจำเพาะเป็นเทคนิคหนึ่งในการให้ความร้อนกับอาหารที่มีองค์ประกอบหลายประเภท โดยจัดสัดส่วนขององค์ประกอบให้มีค่าความร้อนจำเพาะใกล้เคียงกัน

2.4.5 ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับอาหารนั้นๆ ซึ่งค่าการนำความร้อนจะไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอาหาร แต่เป็นค่าสำคัญที่บ่งบอกถึงการถ่ายเทการกระจายพลังงานภายในชิ้นอาหาร เมื่อทำแห้งด้วยไมโครเวฟ วัตถุจะได้รับพลังงานไมโครเวฟ แล้วจึงเกิดถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ได้รับไปยังบริเวณข้างเคียง ดังนั้นถ้าอาหารนั้นมีค่าการนำความร้อนที่ดี จะแสดงให้เห็นว่าอาหารนั้นจะเกิดการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึง และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดจุดที่มีอุณหภูมิสูงมากเกิน (Overheating) ซึ่งอาจทำให้เกิดการไหม้ขออาหารได้

2.4.6 ความลึกที่คลื่นผ่านชิ้นอาหาร (Penetration depth)

ความลึกที่คลื่นผ่านชิ้นอาหารนี้คือ ความสามารถที่คลื่นไมโครเวฟที่ตกกระทบบริเวณพื้นผิวแทรกผ่านเข้าไปในชิ้นอาหาร และพลังงานลดลงร้อยละ 37 ค่าความลึกที่คลื่นผ่านชิ้น

อาหารนี้ไม่ใช่เป็นค่าคุณสมบัติเฉพาะของชิ้นอาหาร แต่เป็นผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติโดยรวมของชิ้นอาหารนั้น ค่าความยาวคลื่นไมโครเวฟ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกจะส่งผลต่อค่าความลึกที่คลื่นผ่านชิ้นอาหาร เมื่อค่าไดอิเล็กตริก และLoss tangent เพิ่มขึ้น ค่าความลึกที่คลื่นผ่านชิ้นอาหารจะยิ่งลดลง

2.4.7 ค่าความถี่

ความถี่ที่ใช้นอุตสาหกรรมอาหารมีอยู่ 2 ช่วงคือ 915 และ 2450 MHz ความถี่ที่ใช้จะมีผลต่อระดับความลึกที่คลื่นผ่านชิ้นอาหาร โดยทั่วไปค่าความถี่ต่ำ (915 MHz) จะสามารถให้ความร้อนได้ลึกกว่า

2.4.8 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าของระบบไมโครเวฟ

กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5-100 กิโลวัตต์ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงจะช่วยเร่งให้เกิดความร้อนกับอาหารได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการปรับกำลังไฟฟ้าของระบบเพื่อควบคุมความเร็วในการทำแห้งอาหารร้อนได้ อย่าไรก็ดีการเร่งความเร็วมากเกินไปอาจเกิดผลเสีย เช่น น้ำในอาหารไม่สามารถระบายออกด้วยการระเหยได้ ทำให้เกิดการเดือดขึ้นในเนื้ออาหาร และเมื่อมีปริมาณมากจะระเบิดออกมา ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย

2.4.9 รูปทรงของอาหาร

ลักษณะรูปทรงของอาหารที่นำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีความสำคัญดังนี้

1) ขนาด ถ้าขนาดของชิ้นอาหารนั้นใหญ่มาก คลื่นไมโครเวฟเข้าไม่ถึงจุดกึ่งกลาง ยังผลให้เกิดความร้อนไม่ทั่วทั้งชิ้น แต่ถ้าความหนาของชิ้นใกล้เคียงกับความสามารถของคลื่นไมโครเวฟที่จะแทรกผ่านถึงได้ จะทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางชิ้นมีอุณหภูมิสูงที่สุด การเอกขนาดความถี่ที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ถ้าเป็นอาหารที่มีลักษณะชิ้นหนาควรใช้ความถี่ 915 MHz
2) รูปร่าง อาหารที่มีรูปร่างขนาดกว้างยาวทั้งชิ้น สามารถทำให้ร้อนได้สม่ำเสมอกว่าควรหลีกเลี่ยงรูปร่างที่มีขอบแหลม หรือมีมุมซึ่งอาหารจะไหม้ได้ง่าย อาหารทรงกลมจะดีกว่าอาหารทรงเหลี่ยม ในกรณีที่อาหารมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เช่น น่องไก่ อาจใช้การลดกำลังไฟฟ้า และยืดเวลาการทำแห้งออกไป (เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ,2545)

2.5 การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหาร

ตั้งแต่ ค.ศ.1960 เริ่มมีการนำเอาคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการให้ความร้อนแก่อาหารหลายชนิด มีทั้งที่ประสบผลสำเร็จและไม่ประสบผลสำเร็จ เนื่องจากข้อจำกัดของตัวคลื่นไมโครเวฟเองหรือการขาดความรู้ ความเข้าใจอย่างแท้จริง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การทำแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับการทำแห้งแบบอื่นๆแสดงดังตารางที่ 2.2 (เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ,2545)

ตารางที่ 2.2 สรุปการใช้การทำแห้งด้วยไมโครเวฟกับอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท

ชนิดการทำแห้ง	ผลิตภัณฑ์	ข้อดี
ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	พาสต้า ไข่แดงผง นมผงเด็ก หัวหอม น้ำมะเขือเทศเข้มข้น ซีอกโกแลตผง เค้กข้าว ขนมขบเคี้ยว สาหร่ายทะเล เบคอน	■ ใช้พื้นที่ในการทำงานน้อยลงประมาณ4/5 เหลือ2/3เช่น ในพาสต้าใช้พื้นที่ในการวางอุปกรณ์ทำพาสต้าจาก 36 เมตร เหลือ 8.2 เมตร ■ ลดระยะเวลาในการทำความสะอาด เช่น พาสต้าใช้เวลาจาก 24 ชั่วโมง เหลือ 6 ชั่วโมง ■ คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น เช่น ลด starch sloughoff and better bite ป้องกันการเกิดการแห้งแข็งบริเวณผิว สีดีขึ้น(พาสต้า) ,คุณภาพเบคอนดีขึ้น และเมื่อนำเบคอนมาเจียวจะได้น้ำมันที่มีคุณภาพดี(ใช้ร่วมกับไอน้ำ) ■ ลดระยะเวลาในการทำแห้งลง เช่น จาก 8 ชั่วโมงเหลือ 0.5 ชั่วโมง(พาสต้า),ไข่แดงผงใช้เวลาลดลง 1ใน 13 ส่วน,8 ชั่วโมงเหลือ 6 นาที สำหรับนมผง ■ ลด infestation เช่น หัวหอมลดได้ร้อยละ 90 ■ ลดการใช้พลังงานลง เช่น หัวหอมลดลงร้อยละ30 พาสต้าลดลงร้อยละ 20-25 ■ สามารถควบคุมปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ ■ ผลผลิตเพิ่มขึ้น ■ เวลาที่เหลือสามารถนำไปใช้ทำอย่างอื่นได้ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ต่ำ

ตารางที่ 2.2 สรุปการใช้การทำแห้งด้วยไมโครเวฟกับอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท (ต่อ)

ชนิดการทำแห้ง	ผลิตภัณฑ์	ข้อดี
ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ	น้ำผลไม้ผง ธัญชาติ(ข้าวสาลี ถั่วเหลือง ข้าวเจ้า ข้าวไรย์) ยีสต์ ข้าวโพด ผลไม้ มะเขือเทศ พริกไทย เครื่องปรุงรส สารสกัดจากพืช การเตรียมโปรตีนสรสกัดจากเนื้อแป้ง	▪ เป็นระบบต่อเนื่อง ประหยัดค่าแรงงาน พลังงานและค่าดำเนินการผลิต ▪ ได้ผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ได้สะดวก และรวดเร็ว ▪ ประหยัดค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และแบบพ่นฝอย ▪ รักษากลิ่นรสได้ดี ▪ ลดระยะเวลาทำแห้งลงมาก เช่น ใช้เวลาในการทำแห้งน้ำผลไม้ผล40นาที หรือใช้เวลาในการทำแห้งถั่วเหลืองจาก 2 ชั่วโมงเหลือ 30นาที ▪ ไม่ต้องปรับสภาวะของภาชนะบรรจุ แต่ถ้าทำแห้งด้วยลมร้อนจำเป็นต้องทำ (ถั่วเหลือง) ▪ ปลอดภัยต่อการลุกติดไฟ (ธัญชาติ) หรือการระเบิดของฝุ่นผง ▪ ปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น อัตราการงอกของเมล็ดธัญชาติสูงขึ้น ไม่ต้องใช้ลมเป่าเพื่อกำจัดฝุ่น จึงสะอาด ▪ ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำแห้งมากกว่าร้อยละ48 ▪ สามารถปรับใช้ได้กับหลายผลิตภัณฑ์ ▪ ประยุกต์เครื่องมือให้ใช้งานได้กับหลายผลิตภัณฑ์(ธัญชาติ) ▪ ไม่มีเสียงดังรบกวน

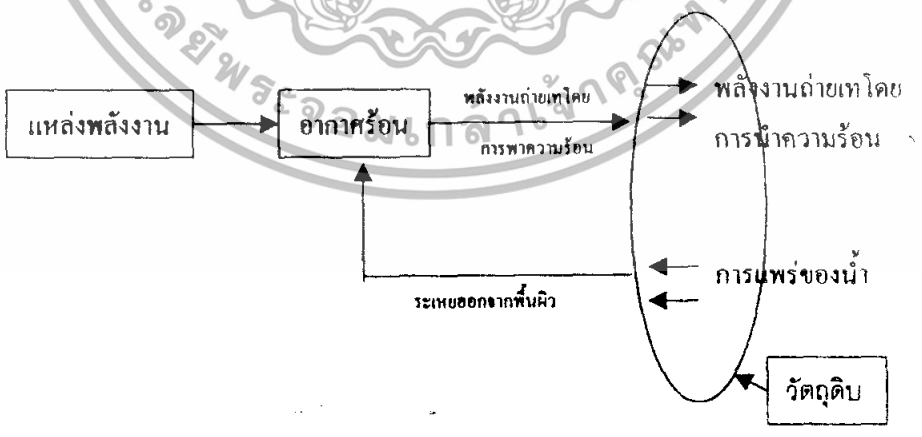
ตารางที่ 2.2 สรุปการใช้การทำแห้งด้วยไมโครเวฟกับอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท (ต่อ)

ชนิดการทำแห้ง	ผลิตภัณฑ์	ข้อดี
ไมโครเวฟร่วมกับการแช่เยือกแข็ง	กาแฟ/ชา เนื้อวัวฝานแผ่นบาง ชิ้นผัก ผลไม้ เห็ด เนื้อไก่ กุ้ง ปลา	■ รวดเร็ว เช่น ระยะเวลาในการทำแห้งลดลงเหลือ 6 ชั่วโมง จาก 12 ชั่วโมง(กาแฟ) ■ ค่าใช้จ่ายลดลงเมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างเดียวประมาณร้อยละ 47 ■ ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงร้อยละ25 ■ เครื่องเดียวสามารถใช้ได้กับหลายผลิตภัณฑ์ ■ ค่าใช้จ่ายการลงทุน และการดำเนินการต่ำ

ที่มา: เหมการ์ (2545)

2.6 การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

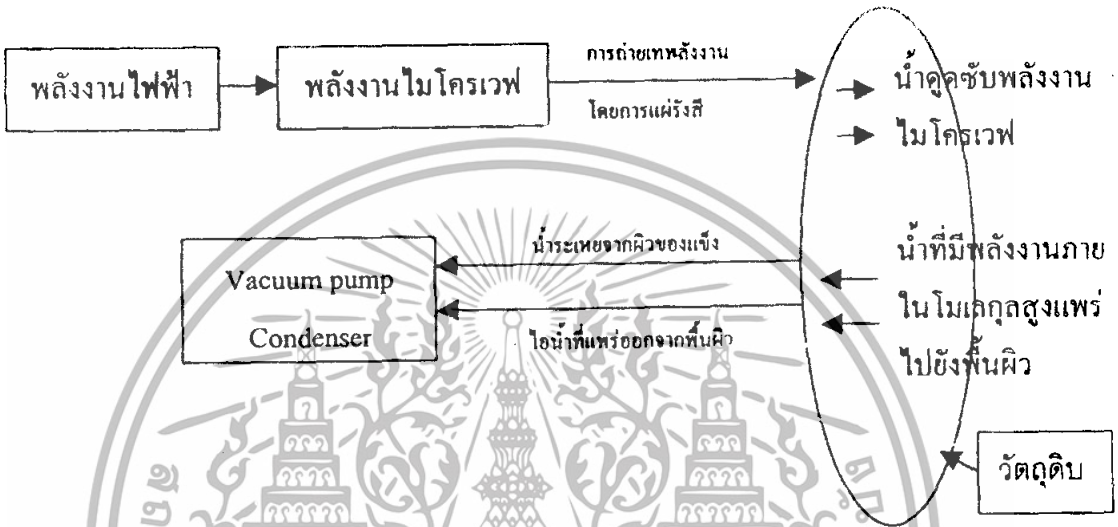
การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟเป็นเทคนิคหนึ่งในการนำพลังงานไฟฟ้ามาทำแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ กลไกการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟจะแตกต่างจากการทำแห้งด้วยอากาศร้อนดังแสดงในภาพ



รูปที่ 2.7 กลไกการอบแห้งด้วยความร้อน

ที่มา: Wadsworth, J.I. และคณะ (1990)

สำหรับกลไกการทำแห้งด้วยอากาศร้อน แหล่งพลังงานส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมันเพื่อทำให้อากาศร้อนจากนั้นพลังงานจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวธัญชาติด้วยการพาความร้อน น้ำจะคายสู่อากาศแห้งที่บริเวณพื้นผิว ความแตกต่างของความชื้นภายในวัตถุดิบเป็นตัวก่อให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลน้ำมาที่ผิว



รูปที่ 2.8 กลไกการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ
ที่มา: Wadsworth, J.I. และคณะ (1990)

ลักษณะรูปแบบโครงร่างของอุณหภูมิ และความชื้นภายในวัตถุดิบจะเป็นตัวกำหนดอัตราการแพร่ของเหลวไปยังผิว อุณหภูมิอากาศ ความชื้น และความเข้มข้นน้ำในพื้นผิววัตถุดิบจะเป็นตัวกำหนดอัตราการระเหยน้ำออกจากวัตถุน้อยกว่าอัตราที่น้ำแพร่จากภายในวัตถุดิบไปยังพื้นผิว อัตราการทำแห้งโดยรวมจะยังอยู่ในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant rate period) อย่าไรก็ตามเมื่ออัตราการแพร่น้อยกว่าอัตราการคายน้ำ กระบวนการทำแห้งจะถูกจำกัดด้วยการแพร่ของน้ำ การทำแห้งจะเข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (Falling rate period)

สำหรับการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟในตู้หมุน (Microwave vacuum rotary drum dryer) จะเกิดการทำแห้งขณะที่เกิดระบบสุญญากาศ และการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟขณะที่เกิดการหมุนของอนุภาคตัวอย่างอย่าสม่ำเสมอ นั่นคือการพิจารณาการทำแห้งจะประกอบด้วย 2 หลักใหญ่ๆ คือ

85391

1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

กระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานที่ให้กับระบบ หลอดแมกนีตรอนจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟ (915 และ 2450 MHz) คลื่นพลังงานไมโครเวฟจะส่งผ่านภาชนะบรรจุสู่วัตถุดิบ ไมโครเวฟจะแทรกซึมผ่านวัตถุดิบไปยังบริเวณที่มีโมเลกุลน้ำที่มีขั้วสูง พลังงานไมโครเวฟจะเปลี่ยนเป็นพลังงานพลังงานความร้อนภายในวัสดุอาหารที่มีความชื้น มีผลทำให้เกิดการดึงน้ำออกจากวัสดุอาหารอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันการทำแห้งด้วยไมโครเวฟที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 3 ช่วงคือ

ช่วงแรก เป็นช่วงให้ความร้อน ซึ่งพลังงานไมโครเวฟจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในวัสดุอาหารที่ชื้น และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันความดันไอความชื้นในอาหารจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเหนือความดันสิ่งแวดล้อม ทำให้เริ่มเกิดการเสื่อมเสียความชื้นออกจากชิ้นวัสดุแต่ยังเป็นอัตราการสูญเสียความชื้นต่ำๆอยู่

ช่วงที่สอง เป็นช่วงการทำแห้งอย่างรวดเร็ว เป็นช่วงที่พลังงานความร้อนเกือบทั้งหมดที่ได้จากการเปลี่ยนจากพลังงานไมโครเวฟจะใช้ในการระเหยไอความชื้น

ช่วงสุดท้าย เป็นช่วงที่อัตราการทำแห้งลดลง เพราะปริมาณความชื้นลดลง แต่อุณหภูมิยังคงสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอาจนำไปสู่การไหม้ได้ แต่พบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เกิดขึ้นมักไม่สม่ำเสมอจึงนำเอาระบบถังหมุน มาใช้ร่วมกับการทำแห้งเพื่อให้วัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งมีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อคุณภาพที่ได้ ระดับพลังงานไมโครเวฟมีผลต่อความชื้นสุดท้ายที่ได้ ส่วนระดับความดันในการทำแห้งมีผลต่ออุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ อัตราการทำแห้ง และประสิทธิภาพการทำแห้ง

2) การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศ

การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลน้ำที่มีพลังงานสูงจะแพร่ผ่านไปยังผิวอาหารที่สัมผัสกับอากาศภายนอกที่มีความดันต่ำ ทำให้น้ำถูกขับออกอย่างรวดเร็ว เพราะอากาศที่มีความดันต่ำจะมีความเข้มข้นของน้ำในอากาศแวดล้อมต่ำ จึงเป็นกาช่วยเพิ่มอัตราที่น้ำจะถูกกำจัดออกจากโมเลกุลไปยังพื้นผิวเร็วขึ้น ดังนั้นการลดความดันลงจะช่วยให้ทำแห้งผลิตภัณฑ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม (เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ,2545)

2.7 ผลของความดัน ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟ ต่อการทำแห้ง

2.7.1 ระดับความดัน

การทำแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำมาก จะทำให้อัตราการเร็วในการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันก็จะมีผลต่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ด้วย กล่าวคือการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ผลผลิตมีอุณหภูมิต่ำตามไปด้วย

2.7.2 ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟ

การทำแห้งโดยใช้ระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟสูงๆ จะทำให้ผลผลิตเกิดความร้อนสูง อัตราการทำแห้งจึงสูง แต่ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอาจมีผลต่อสีสัน และลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ได้ (เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ,2545)

2.8 ข้อดี ข้อเสียของการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

ข้อดี - ข้อเสียของการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟสามารถพิจารณาแยกได้ดังนี้

2.8.1 การทำแห้งภายใต้สุญญากาศ

ข้อดี

1. กระบวนการทำแห้งจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศ จึงเหมาะกับกรณีที่สภาพภูมิอากาศไม่เอื้ออำนวย
2. ใช้พลังงานในการทำแห้งน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่ำ เป็นการลดพลังงานความร้อนที่เป็นความร้อนสัมผัส
3. สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากทำการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ
4. ผลผลิตที่ได้มีความสะอาด เพราะไม่มีฝุ่นเข้ามาเกี่ยวข้องเหมือนกับการทำแห้งด้วยลมร้อน

ข้อเสีย

การออกแบบระบบเพื่อให้เกิดสุญญากาศทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก

2.8.2 การทำแห้งด้วยไมโครเวฟ

ข้อดี

1. กระบวนการผลิตเร็วขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาโดยรวมการกระจายตัวของความร้อนผ่านวัตถุดิบจะสม่ำเสมอ เป็นการหลีกเลี่ยงความแตกต่างของอุณหภูมิมากๆ ที่จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ระบบให้ความร้อนแบบการพาความร้อน นอกจากนั้นการทำแห้งด้วยไมโครเวฟจะเกิดการให้ความร้อนอย่างเฉพาะเจาะจง เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดภายในตัวทำละลาย ไม่ได้เกิดที่สาร ดังนั้นน้ำหรือตัวทำละลายจะเกิดความร้อนและระเหยออก ในขณะที่สารจะถูกให้ความร้อนโดยการนำความร้อน ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่อากาศ ผนังเตาอบ สายพานและส่วนอื่นๆ
2. เป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน เนื่องจากเป็นการให้พลังงานกับวัตถุดิบโดยตรง ความร้อนจะไม่สูญเสียไปกับอากาศ ตู้อบ สายพาน หรือส่วนอื่นๆซึ่งนำไปสู่การประหยัดพลังงาน
3. ควบคุมกระบวนการได้ดี และรวดเร็วกว่า เนื่องจากเป็นการให้ความร้อนที่สามารถเปิด/ปิดการให้ความร้อนได้ สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการควบคุมได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และถูกต้อง
4. พื้นที่ว่างที่ต้องการน้อย
5. ผลผลิตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระยะเวลาการทำแห้งแบบเดิม (ลมร้อน)
6. ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ผลผลิตที่ได้มีรูปร่างโป่งพองสวยงาม ไม่เหี่ยวย่น มีสีไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเป็นการหลีกเลี่ยงพื้นผิวที่จะสัมผัสความร้อนสูง การให้ความร้อนสูงเกินจะทำให้บริเวณผิวผลิตภัณฑ์เกิดการแห้งแข็ง
7. ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน และสะดวกกับผู้บริโภค
8. ประโยชน์ที่ได้แท้จริงของการทำแห้งด้วยไมโครเวฟคือกำไรที่เพิ่มขึ้น ได้มาจากการที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ค่าแรงลดลง ผลผลิตเพิ่มขึ้น คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์
9. เป็นทางเลือกให้ใช้กับกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อน

ข้อเสีย

การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในห้องทำแห้งไม่สม่ำเสมอ และหากผลผลิตไม่เคลื่อนที่กระจายตัวแล้ว จะทำให้ได้รับคลื่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่สม่ำเสมอ (เหมการ์ จินดาวัฒนภูมิ,2545)

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

ผิวมะกรูดหั่นขนาดประมาณ 1 X 1 ตารางเซนติเมตร

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง

3.2.1 ตู้สุญญากาศ ขนาด19 X 21 X 20 นิ้ว

3.2.2 เตาอบไมโครเวฟLG รุ่น

3.2.3 ขาตั้งไมโครเวฟ

3.2.4 แกนรับน้ำหนัก

3.2.5 เครื่องชั่ง รุ่น

3.2.6 ปั๊มสุญญากาศยี่ห้อ MAKASHI รุ่น FY-1C

3.2.7 เกจสุญญากาศ 0 - 760 mmHg.

3.2.8 จานรองไมโครเวฟ

รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ

3.2.1 ตู้สุญญากาศ

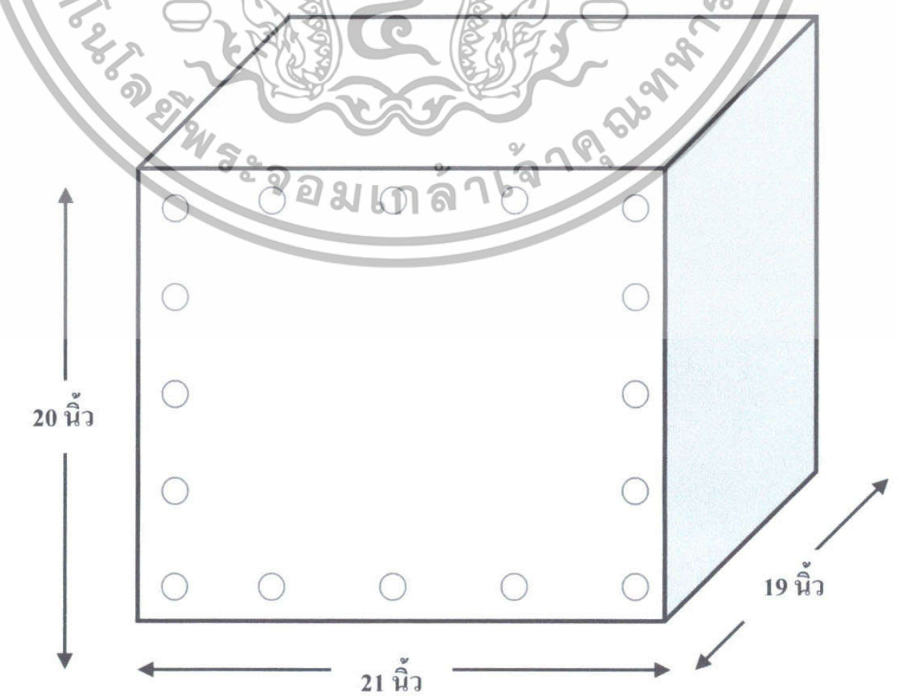
ตู้สุญญากาศ มีรูปร่างลักษณะเป็นกล่องทำจากแผ่นอะคริลิก ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนตัวตู้และฝาตู้ ดังรูปที่ 3.1

3.2.1.1 ส่วนตัวตู้ ทำจากแผ่นอะคิลิก ขนาดตู้ภายใน 19X21X20 นิ้ว ความหนาของผนังตู้ 10 มิลลิเมตร ความจุ 7,980 ลูกบาศก์นิ้ว ออกแบบให้มีขนาดเหมาะกับขนาดของเตาอบไมโครเวฟ ขาตั้ง และเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีอยู่ให้สามารถบรรจุอยู่ภายในได้ เลือกใช้วัสดุที่ทนต่อความดันต่ำได้ (สุญญากาศ) นอกจากนั้นพิจารณาการประกอบตัวตู้จากแผ่นอะคริลิกโดยเลือกใช้กาวยูวีเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศขณะเป็นสุญญากาศ จากนั้นเจาะรูเพื่อเดินสายไฟต่อกับเกจสุญญากาศ และปั๊มเพื่อดูดอากาศ ภายในมีเต้าเสียบปลั๊ก สำหรับเสียบไฟจากเตาไมโครเวฟ และเครื่องชั่งน้ำหนักและเนื่องจากมีรอยต่ออยู่มาก จึงต้องตรวจสอบรอยรั่ว โดยการปั๊มลมเข้าในตู้ ทดสอบโดยใช้ฟองน้ำชุบน้ำรูดลงบริเวณรอยต่อต่างๆ ถ้ารั่วจะมีฟองอากาศเกิดขึ้น

3.2.1.2 ส่วนฝาตู้ ต้องปิดได้สนิทจึงเลือกใช้ขอบยางติดฝาตู้ พร้อมทั้งใช้ประเก็นเป็นตัวล็อกรอบฝาตู้ด้านหน้าทั้งหมด 16 ตัวทำการเปิด – ปิดได้โดยการไขประเก็นทั้งหมด

ข้อดีของการทำตู้สุญญากาศจากอะคริลิก คือ

- ในระหว่างการอบสามารถอ่านค่าน้ำหนักจากเครื่องชั่งภายในตู้และเห็นเตาอบในขณะทำแห้งได้



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดของตู้สุญญากาศ

รูปที่ 3.3 ตู้สุญญากาศ

3.2.2 เตาอบไมโครเวฟ

ยี่ห้อ LG รุ่น MS- 202W ขนาดความจุ 20ลิตร ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2450 เมกะเฮิร์ต 800 วัตต์ สามารถอำนระดับกำลังไฟฟ้าได้ที่ 90, 180, 360, 600 และ 800 (สูงที่สุด) และตั้งเวลาได้สูงสุดที่ 60 นาที

3.2.3 ขาตั้งไมโครเวฟ

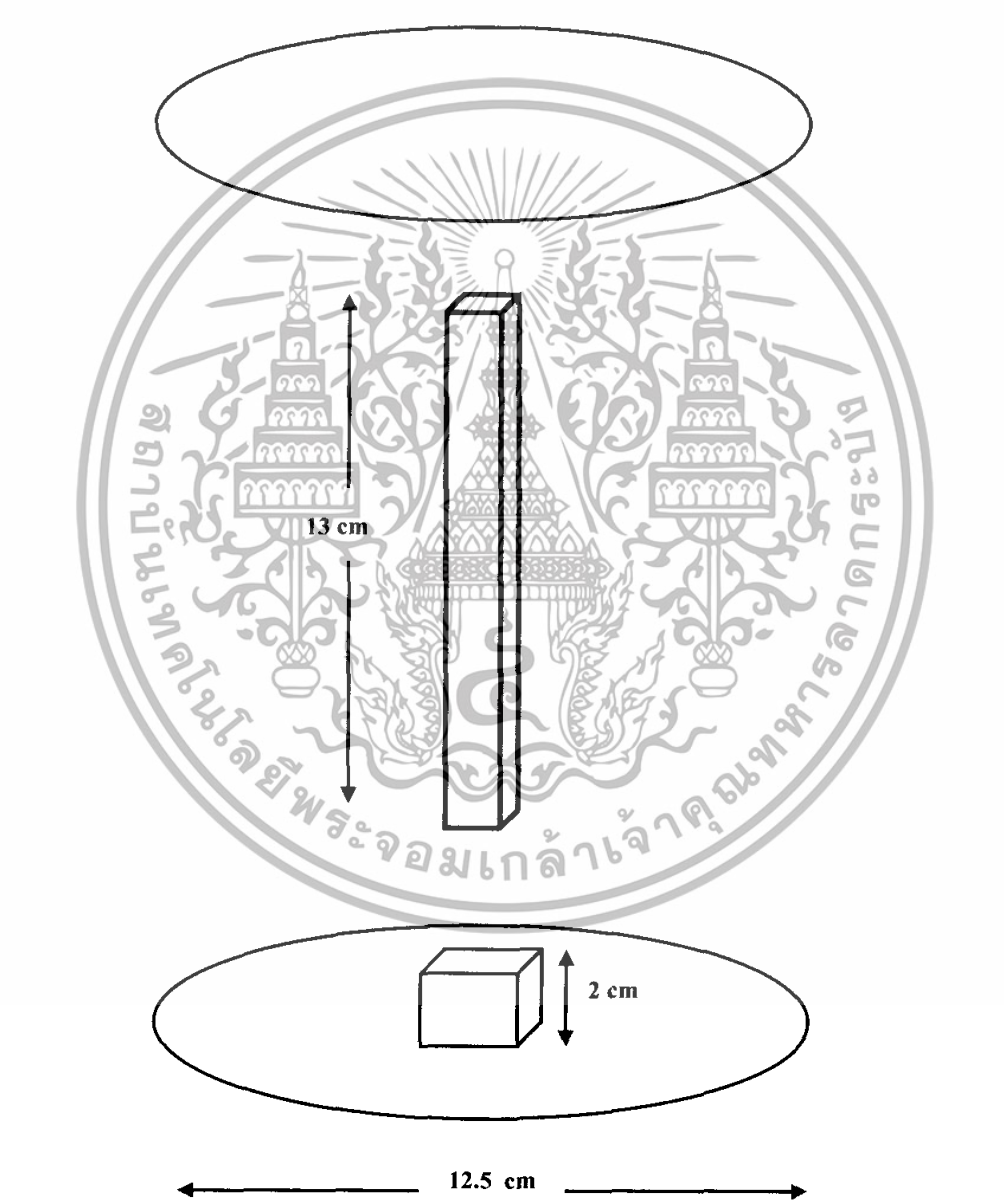
เป็นโครงเหล็กและใช้ไม้วางทับ เจาะรูตรงบริเวณที่ต่อให้แกนรับน้ำหนักผ่าน

รูปที่3.4 เตาอบไมโครเวฟและขาตั้ง

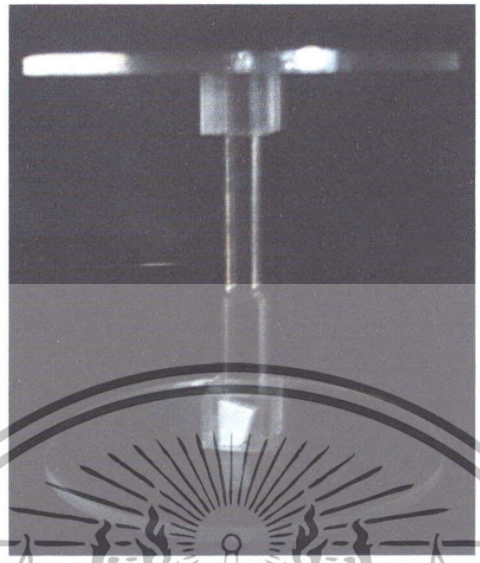
3.2.4 แกนรับน้ำหนัก

ทำจากแผ่นอะคริลิก สามารถรับน้ำหนักของจานรองไมโครเวฟเพื่อบรรจุวัสดุสำหรับอบแห้ง (ผิวมะกรูด) และทนต่ออุณหภูมิของไมโครเวฟได้ ทำจากอะคริลิกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่1 แท่งทรงกระบอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม ความสูง 13 เซนติเมตร
- ส่วนที่2 แผ่นวงกลมจำนวน 2 ชุดสำหรับต่อส่วนหัวและท้ายของแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดของแกนรับน้ำหนัก



รูปที่ 3.6 แกนรับน้ำหนัก

3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก

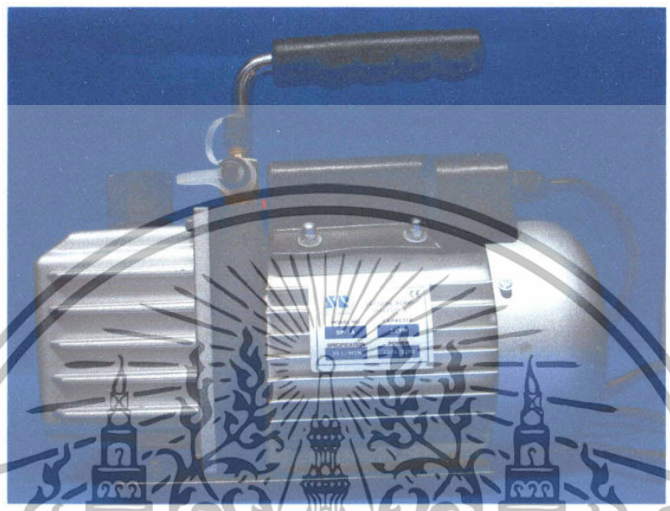
แบบทศนิยม 1 ตำแหน่ง สามารถชั่งน้ำหนักได้ที่ช่วง 0-600 กรัม

รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก 1 ตำแหน่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.6 ปั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ MAKASHI รุ่น FY-1C

เป็นปั๊มสุญญากาศราคาประหยัดแบบโรตารีเวนระบบหล่อลื่นด้วยน้ำมัน ผลิตในประเทศจีน ทำค่าสุญญากาศได้ต่ำสุด 0.1 มิลลิบาร์ หรือ ความดันสัมบูรณ์ 759.924 มิลลิเมตรปรอท



รูปที่3.8 ปั๊มสุญญากาศ

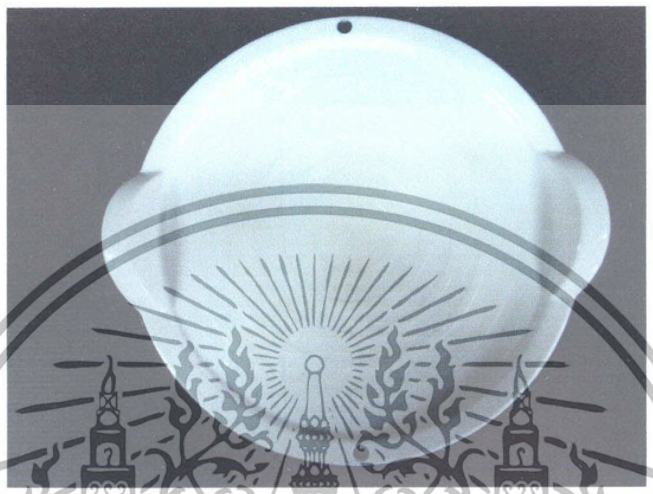
3.2.7 เกจสุญญากาศ

ยี่ห้อ Hi – Light ช่วงสเกล0-760 mmHg ขนาดหน้าปัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว

รูปที่ 3.9 เกจสุญญากาศ

3.2.8 จานรองไมโครเวฟ

ยี่ห้อ Microwave Server Tray ผลิตจากโพลีโพรพิลีน ทนอุณหภูมิที่-20 ถึง 140 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.10 จานรอง ไมโครเวฟ

3.3 วิธีการทดลอง

ในปัญหาพิเศษนี้ได้วางแผนการทดลองโดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำการอบแห้งและนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์อัตราการอบแห้งรวมทั้งศึกษาผลต่อสมบัติทางกายภาพของผิวมะกรูด ได้แก่ สี (ค่า Hue)

3.3.1 การเตรียมวัสดุและศึกษาวิธีการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

3.3.1.1 การเตรียมวัสดุ

หั่นผิวมะกรูดเป็นชิ้นขนาดเฉลี่ย 1x1 เซนติเมตร นำผิวมะกรูดที่หั่นมาชั่งน้ำหนักให้ได้ 150 กรัม นำมาอบแห้งที่สภาวะต่างๆบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุก 2 นาที ในชั่วโมงแรก และทุก 5 นาทีในชั่วโมงต่อมา

3.3.1.2 สภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ทำการทดลองการอบแห้งผิวมะกรูดที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ได้แก่ 90 และ 180 วัตต์ ระดับความดันสัมบูรณ์ 3 ระดับ ได้แก่ 710, 735 และ760 มิลลิเมตรปรอท โดยใช้ตัวอย่างผิวมะกรูดจำนวน 2 ชุด (ทำการทดลอง 2 ซ้ำ)

3.3.1.3 วิธีการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศที่สร้างขึ้น

1) เปิดฝาเตาอบไมโครเวฟ นำผิวมะกรูดสดที่ต้องการอบแห้งชั่งในจานรองซึ่งวางอยู่บนแกนรับน้ำหนัก จนได้น้ำหนัก 150 กรัม ปิดฝาเตาไมโครเวฟ
2) ตั้งระดับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และตั้งเวลาสูงสุดที่ 60 องศา
3) ปิดตู้สุญญากาศ ทำการขันประเก็นให้แน่น ตรวจสอบไม่ให้มีรูรั่ว และเปิดปั๊มสุญญากาศตามสภาวะที่ตั้งไว้ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเข็มของเกจสุญญากาศเริ่มตีขึ้น เมื่อได้ระดับความดันที่ต้องการแล้วให้ทำการปิดปั๊มและวาล์ว
4) ทำการจับเวลาอัตราการอบแห้งโดยบันทึกค่าน้ำหนักที่ลดลงทุก 2 นาที ในชั่วโมงแรกและทุก 5 นาทีในชั่วโมงถัดมา

3.3.2 การหาค่าความชื้น อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- Aluminium can
- ตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้
- โถดูดความชื้น (desiccator)
- ที่คีบ (Tong)

วิธีการทดลอง

1. นำ Aluminium can อบที่ 100 C 2 ชั่วโมง แล้วนำออกจากตู้อบ ใส่โถดูดความชื้น (desiccator)ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาชั่งจนได้น้ำหนักแน่นอน (4 ตำแหน่ง)
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างผิวมะกรูด 3 – 5 กรัม (ทำ 3 ซ้ำ)
3. นำไปอบในตู้ที่อุณหภูมิ 130 C 2 ชั่วโมงโดยเปิดฝา Aluminium can
4. เมื่อครบเวลา ปิดฝา นำมาทำให้เย็นใน desiccator ก่อนนำมาชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้งๆ ละ 30 นาที จนน้ำหนักคงที่ หรือผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้ 2 ครั้งต้องแตกต่างกันไม่เกิน 0.003 – 0.005 กรัม
5. คำนวณปริมาณความชื้นเริ่มต้น (วิธี AOAC)

$$\%M.C.(wet\ basis) = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100$$

การคำนวณน้ำหนักสุดท้าย

$$m_2 = m_1 \times \frac{(100 - \%M.C._2)}{(100 - \%M.C._1)}$$

3.3.3 การวัดค่าสี (ค่าHue) หลังการอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงสีของผิวมะกรูดหลังการอบแห้งถูกวัดด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter ถูกสอบเทียบกับแผ่นสีขาวมาตรฐานสำหรับของแข็งก่อนที่จะทำการวัดตัวอย่าง โดยผิวมะกรูดอบแห้งถูกวางบนกระดาษสีขาว ทำการวัดสีด้วยระบบฮันเตอร์ แต่ละตัวอย่างถูกสุ่มวัด 20 ชิ้น และแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย

3.3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองถูกออกแบบเป็นแบบ RCBD เชิง Factorial 2 ปัจจัย ได้แก่

- ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ได้แก่ 90 และ 180 วัตต์
- ระดับความดันสัมบูรณ์ 3 ระดับ ได้แก่ 710, 735 และ760 มิลลิเมตรปรอท

ดังนั้นจึงมีสภาวะการทดลองทั้งหมด 6 สภาวะ ต่อ 1 ชุดการทดลอง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การคำนวณปริมาณความชื้น

4.1.1 ปริมาณความชื้นเริ่มต้น

คำนวณปริมาณความชื้นเริ่มต้น โดยคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังการอบแห้งผิวมะกรูดด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที จึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง (AOAC,1984) นำไปคำนวณ จะได้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของผิวมะกรูดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีผิวมะกรูดจำนวน 2 ชุด ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1.1

ตารางที่ 4.1.1 แสดงปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ชุดตัวอย่าง	น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)	ปริมาณความชื้นเริ่มต้นฐานเปียก (% MC_{WB})	ปริมาณความชื้นเริ่มต้นฐานแห้ง (% MC_{DB})
1	3.29	0.91	72.34	261.53
2	3.89	1.13	70.87	243.28

4.1.2 ปริมาณความชื้นสมดุล

คำนวณปริมาณความชื้นสมดุล โดยคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของผิวมะกรูดอบแห้ง เก็บที่สภาวะปกติ คือ ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) เป็นเวลา 14 วัน ปริมาณความชื้นที่ได้ ถือว่าเป็นความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ผิวมะกรูดอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.1.2

ตารางที่ 4.1.2 แสดงปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ผิวมะกรูดอบแห้ง

ตัวอย่าง	**น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)**	**น้ำหนักตัวอย่างสุดท้าย (กรัม)**	**ปริมาณความชื้นสมดุลฐานเปียก (%MC_{WB})**	**ปริมาณความชื้นสมดุลฐานแห้ง (%MC_{DB})**
ผิวมะกรูด	3.11	2.73	12.26	14.00

4.2 การคำนวณน้ำหนักสุดท้าย

คำนวณน้ำหนักสุดท้ายของการอบแห้งผิวมะกรูด โดยคำนวณจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นของผิวมะกรูด มีค่าเท่ากับ 72.34% และ 70.87% ตามลำดับ และ ปริมาณความชื้นสมดุลของผิวมะกรูดอบแห้ง มีค่าเท่ากับ 12.26% จะได้ค่าน้ำหนักสุดท้ายหลังการอบแห้ง เมื่อน้ำหนักตัวอย่างอบแห้งเท่ากับ 150 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าน้ำหนักสุดท้ายของการอบแห้งผิวมะกรูด

ชุดตัวอย่าง	ปริมาณความชื้นเริ่มต้นฐานเปียก ($\%MC_{WB}$)	ปริมาณความชื้นสมดุลฐานเปียก ($\%EMC_{WB}$)	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)
1	72.34	12.26	47.30
2	70.87	12.26	49.80

4.3 การคำนวณค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง

คำนวณหาค่าคงที่อัตราการอบแห้ง โดยการ พลอตกราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นฐานแห้ง ($\%MC_{DB}$) กับเวลา กราฟที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant – Drying Rate Period , K_C) ลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงและช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Drying Rate Period , K_F) ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้งเล็กน้อย ซึ่งค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง คือ ค่าสัมบูรณ์ของความชันในแต่ละช่วง ดังแสดงในตารางที่ 4.3.1 และ 4.3.2

ตารางที่ 4.3.1 แสดงค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งของตัวอย่างในตัวอย่างชุดที่ 1

สภาวะการทดลอง		ค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง	
ความดันสัมบูรณ์ (mmHg)	กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ (Watt)	K_C	$K_F \times 10^{-2}$
760	90	2.1095	1.7501
760	180	5.8858	2.3480
735	90	1.7513	1.5472
735	180	5.8625	5.1532
710	90	2.1468	1.8875
710	180	5.8057	2.8467

ตารางที่ 4.3.2 แสดงค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งของตัวอย่างในตัวอย่างชุดที่ 2

สภาวะการทดลอง		ค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง	
ความดันสัมบูรณ์ (mmHg)	กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ (Watt)	K_C	$K_F \times 10^{-2}$
760	90	1.9126	1.4348
760	180	6.0514	4.2477
735	90	1.8766	1.4391
735	180	6.4408	3.9000
710	90	1.7213	1.8297
710	180	6.0540	4.1202

4.4 การหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและค่าสีของผลิตภัณฑ์

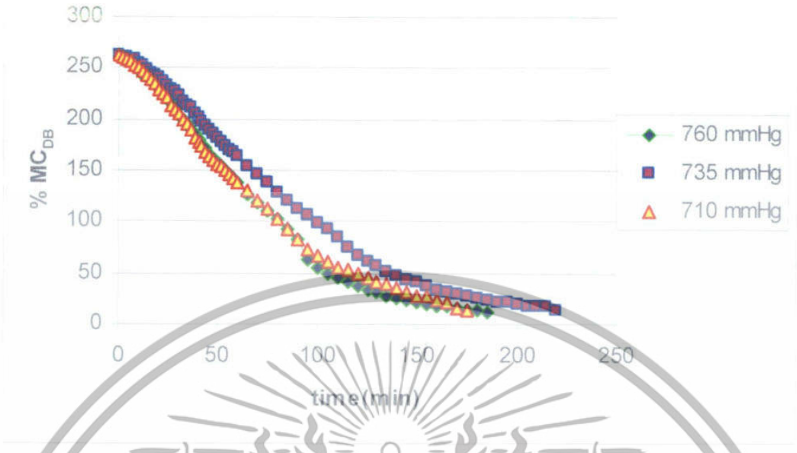
จากการทดลองการอบแห้งผิวมะกรูดที่สภาวะต่างๆ โดยคำนึงถึงปัจจัย 2 ปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ

1. ระดับความดันสัมบูรณ์ 3 ระดับ ได้แก่ 710 , 735 และ 760 มิลลิเมตรปรอท
2. ระดับกำลังของไมโครเวฟ 2 ระดับ ได้แก่ 90 และ 180 วัตต์

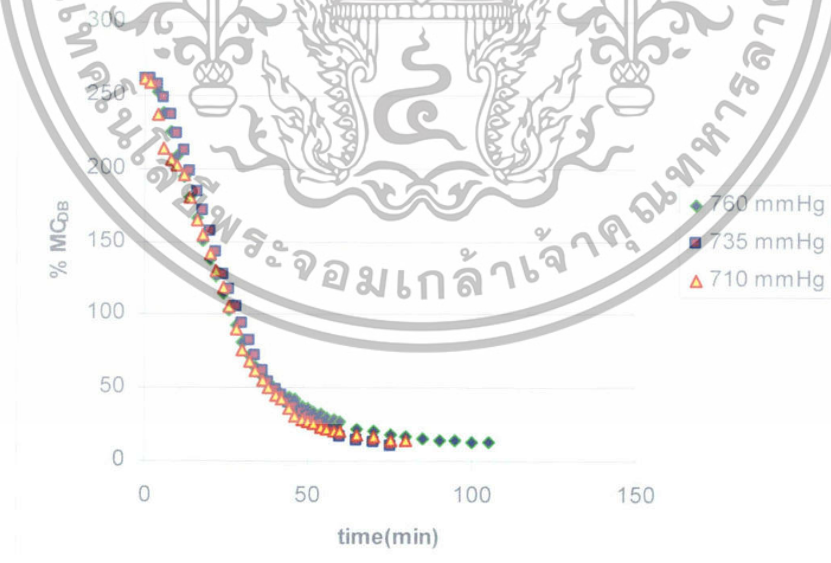
เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวกับค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านสีของผลิตภัณฑ์

4.4.1 ผลของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและค่าสีของผลิตภัณฑ์

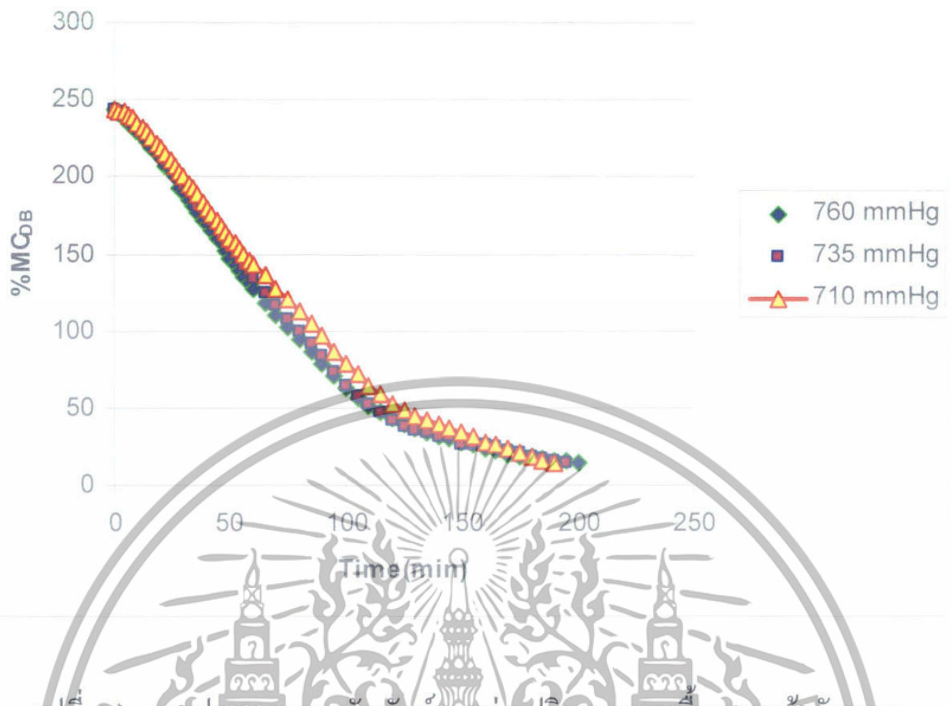
ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง มีความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ข้างต้น พิจารณาจากค่าคงที่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Drying Rate Period, K_F) เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากกราฟเมื่อค่ากำลังของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งค่าเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ให้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของผิวมะกรูดลดลงจนได้ปริมาณความชื้นสมดุลสุดท้ายมีค่าประมาณร้อยละ 14 ของน้ำหนักแห้ง เมื่อพิจารณาค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจากกำลังของไมโครเวฟ ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่การอบแห้งดังนี้ 1.65×10^{-2},3.77×10^{-2} ตามกำลังของไมโครเวฟที่ 90 และ 180 วัตต์ตามลำดับ เมื่อพลอตกราฟจะเห็นความสัมพันธ์ แสดงในรูปที่ 4.1 , 4.2 , 4.3, 4.4 , 4.5 และ 4.6



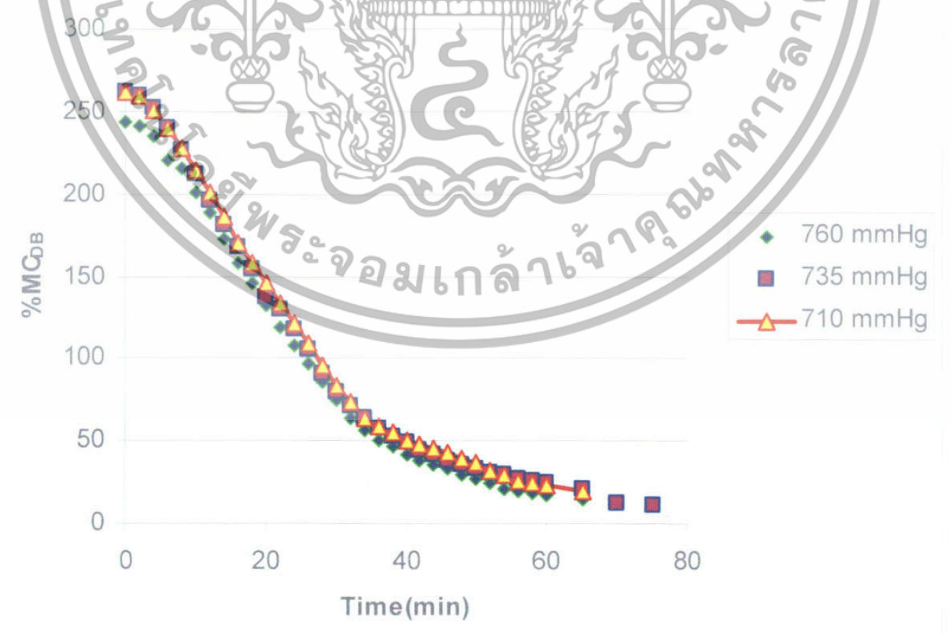
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 90 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 1



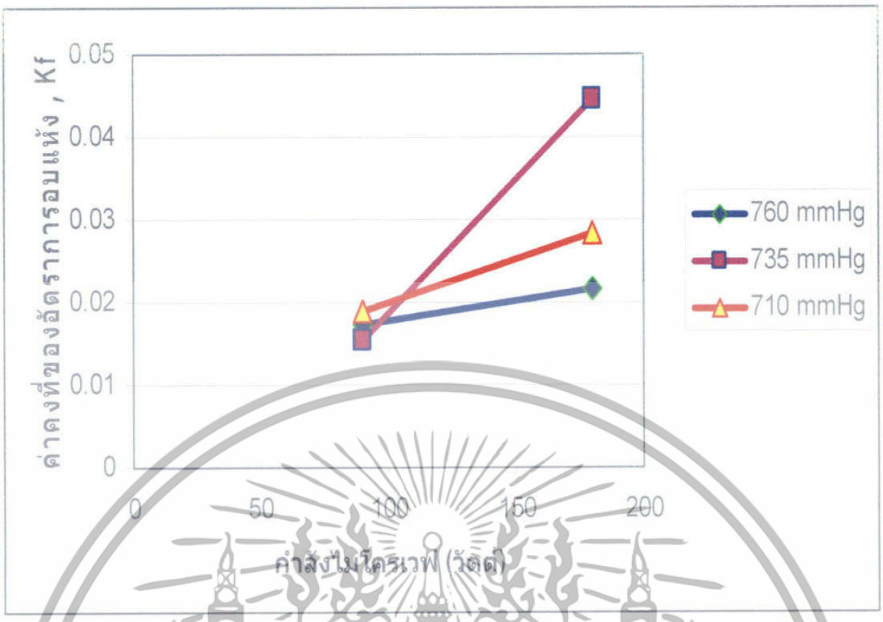
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 180 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 1



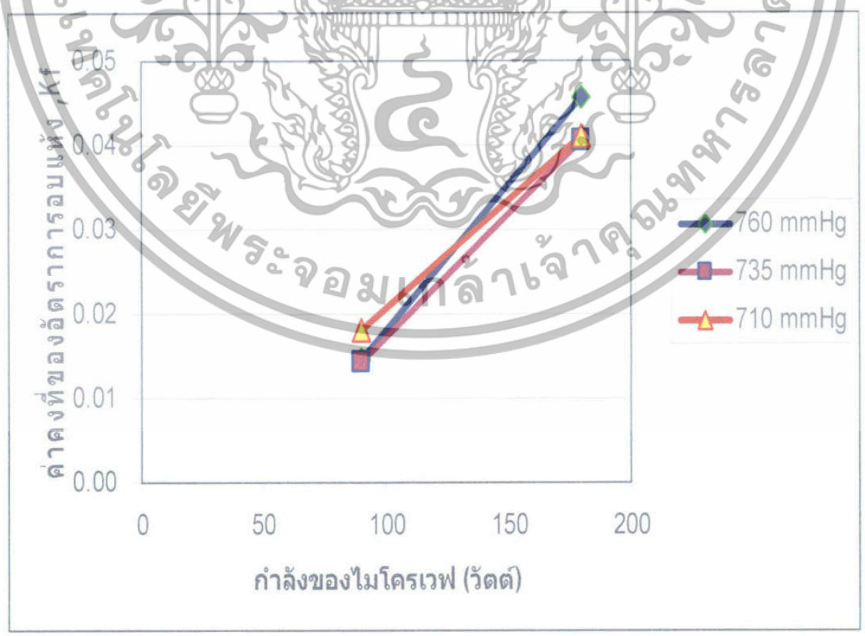
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 90 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานแห้งกับเวลา ที่ความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ที่กำลังของไมโครเวฟ 180 วัตต์ ของตัวอย่างชุดที่ 2



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง กำลังไมโครเวฟที่ระดับความดันต่างๆ ของตัวอย่างชุดที่ 1



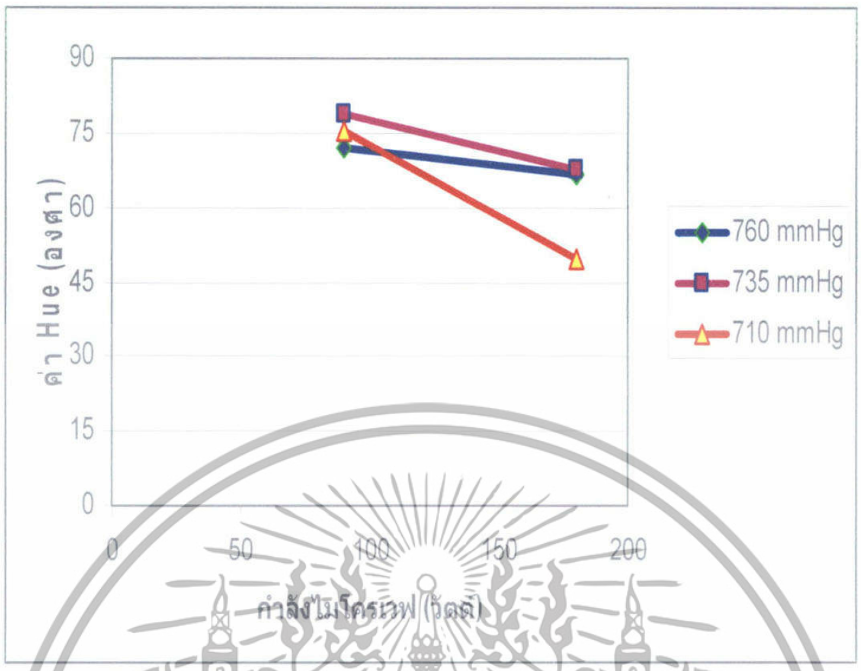
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและกำลังไมโครเวฟที่ระดับความดันต่างๆ ของตัวอย่างชุดที่ 2

ผลของกำลังของไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ได้ความสัมพันธ์ดังตาราง 4.4.1 พบว่า เมื่อกำลังของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ลักษณะของสีโดยรวม (Hue) จะมีค่าน้อยลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีสีในโทนเข้มขึ้น เมื่อพลอตกราฟจะเห็นความสัมพันธ์ แสดงรูปกราฟที่ 4.7 และ 4.8

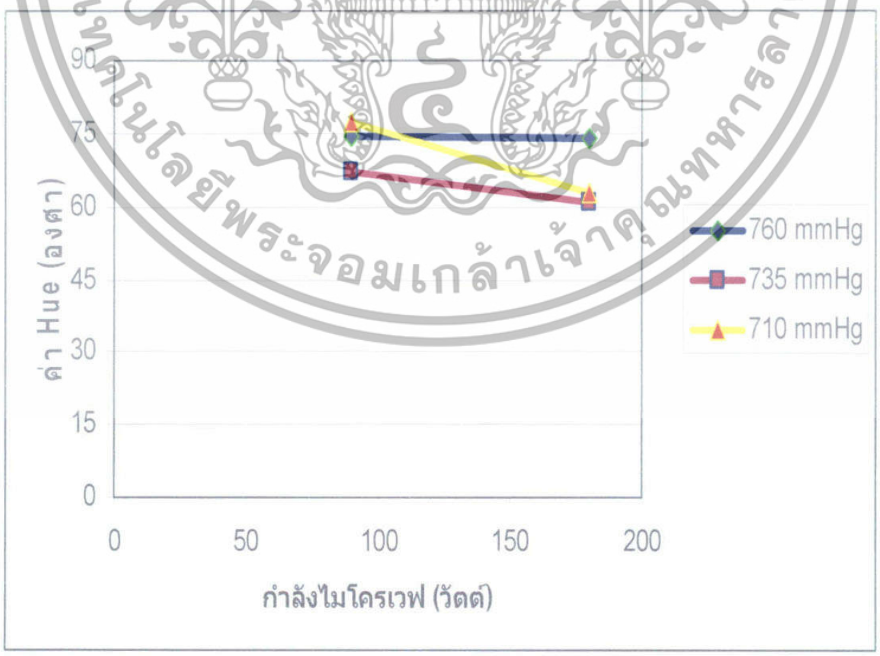
ตารางที่ 4.4.1 แสดงผลการวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์ผิวมะกรูดอบแห้ง

ชุดตัวอย่าง	สภาวะการทดลอง		ค่า L	ค่า a	ค่า b	Hue (Degree)	Chroma
	Pabs (mmHg)	Power (Watt)					
1	760	90	39.22	1.65	5.75	71.85	6.26
		180	45.56	2.78	6.89	66.55	7.68
	735	90	81.92	1.71	13.01	78.84	13.4
		180	86.58	4.94	12.64	67.69	14.07
	710	90	41.61	2.56	9.91	75.26	10.25
		180	38.08	3.08	4.27	49.49	5.7
2	760	90	41.25	2.6	10.21	74.48	10.67
		180	37.38	3.28	5.67	74.01	6.79
	735	90	38.92	2.85	8.42	66.96	9.06
		180	38.56	3.21	6.72	60.98	7.6
	710	90	40.11	1.84	9.09	77.31	9.39
		180	38.08	2.83	6.67	62.59	7.41

ผลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและค่าสีของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี RCBD เชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย จะเห็นว่าค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งและค่าสีของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของไมโครเวฟและค่า Hue ที่ระดับความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 1



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของไมโครเวฟและค่า Hue ที่ระดับความดันสมบูรณ์ 3 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 2

4.4.2 ผลของความดันสัมบูรณ์ที่มีต่อค่าคงที่ของอัตราการทำแห้งและค่าสีของผลิตภัณฑ์

ผลของความดันสัมบูรณ์ที่มีต่อค่าคงที่ของอัตราการทำแห้งได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ข้างต้น จากกราฟเมื่อระดับความดันสัมบูรณ์มีค่าลดลง ค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง(K_p)จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าคงของอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจากระดับความดันสัมบูรณ์ ได้ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งดังนี้ 1.59×10^{-2}, 1.49×10^{-2} และ 1.86×10^{-2} ตามลำดับความดันสัมบูรณ์ 760, 735 และ 710 mmHg ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 90 วัตต์และการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 180 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 3.30×10^{-2} ,4.23×10^{-2} และ 3.48×10^{-2} ตามลำดับ โดยที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 735 mmHg ค่าการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงกว่าที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 710 mmHg อาจเนื่องมาจากผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อน ส่งผลให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งในแต่ละสภาวะไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งที่ระดับความดันสัมบูรณ์ต่างกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งให้ผลตรงกับ

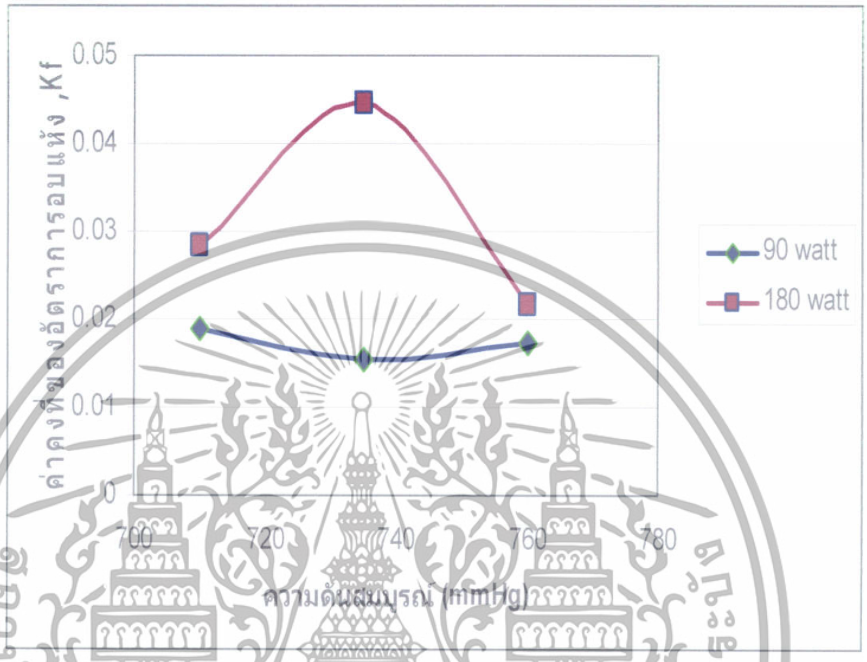
งานวิจัยของ Yongsawatdigul และ Gunasekaran (1996) ได้ทำการอบแห้งแครนเบอร์รี่แผ่นบาง จำนวน 100 กรัม ด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ ที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 39.97 และ 80.03 มิลลิเมตรปรอท และระดับกำลังไมโครเวฟ 250 และ 500 วัตต์ พบว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่องที่ระดับความดันสัมบูรณ์แตกต่างกันนั้น ไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของแครนเบอร์รี่ แต่ที่ระดับกำลังไมโครเวฟทั้งสองระดับและปริมาณความชื้น(%wet basis) ที่ 62% และ 76% จะมีผลต่ออัตราการอบแห้งแครนเบอร์รี่

และงานวิจัยของ สุวิช ศิริวัฒนโยธิน และคณะ (2545) ได้ทำการอบแห้งพริกไทย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 เซนติเมตร จำนวน 200 กรัม ด้วยเครื่องอบแห้งถังหมุนระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ ที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 157.51, 262.52 และ 360.03 มิลลิเมตร-ปรอทที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ พบว่าระดับความดันที่แตกต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

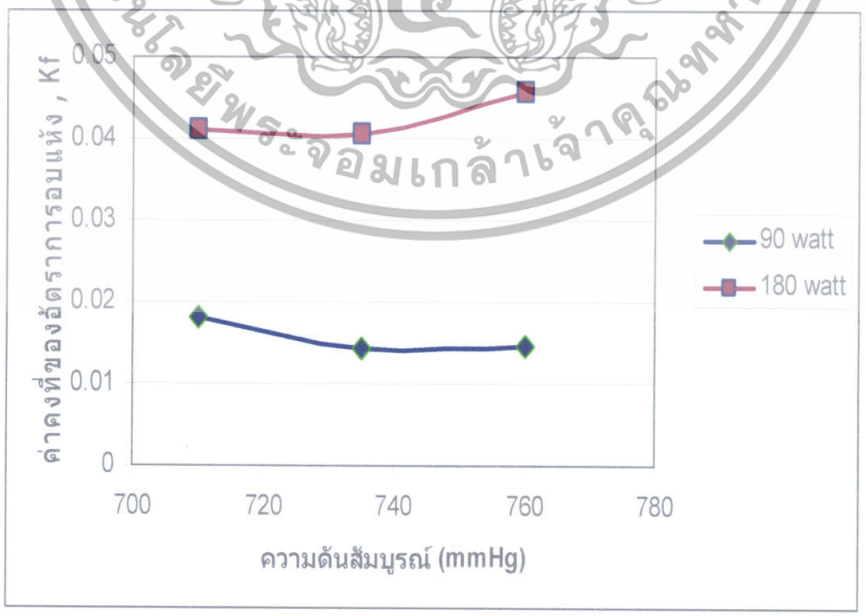
โดยงานวิจัยทั้งสองให้เหตุผลว่าการที่ระดับความดันไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งเนื่องมาจากการกำหนดช่วงความดันที่ใช้ในการทดลองนั้นอยู่ในช่วงที่แคบเกินไปจึงทำให้ที่ระดับความดันสัมบูรณ์ต่างๆจึงไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

ผลของความดันสัมบูรณ์ที่มีต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.4.1 เมื่อพิจารณาที่ค่า Hue ซึ่งเป็นค่าสีโดยรวมของผลิตภัณฑ์ จะเห็นว่า เมื่อระดับความดันสัมบูรณ์มีค่าลดลง ค่า Hue จะมีแนวโน้มไม่แน่นอนในแต่ละชุดตัวอย่าง ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.11 และ 4.12

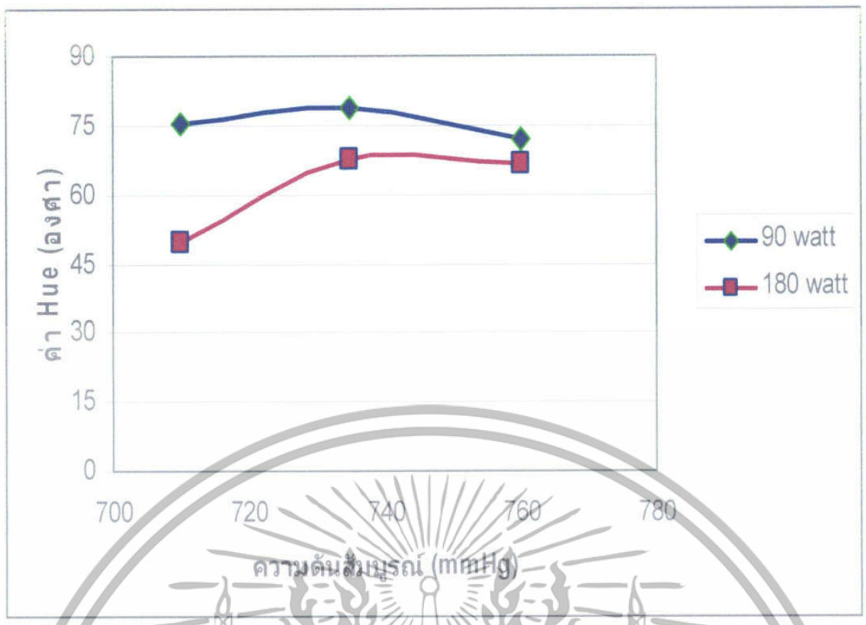
อาจเนื่องมาจากผลของกำลังของไมโครเวฟ เมื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติจะเห็นว่าค่าHue ที่ระดับความดันสัมบูรณ์ต่างกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



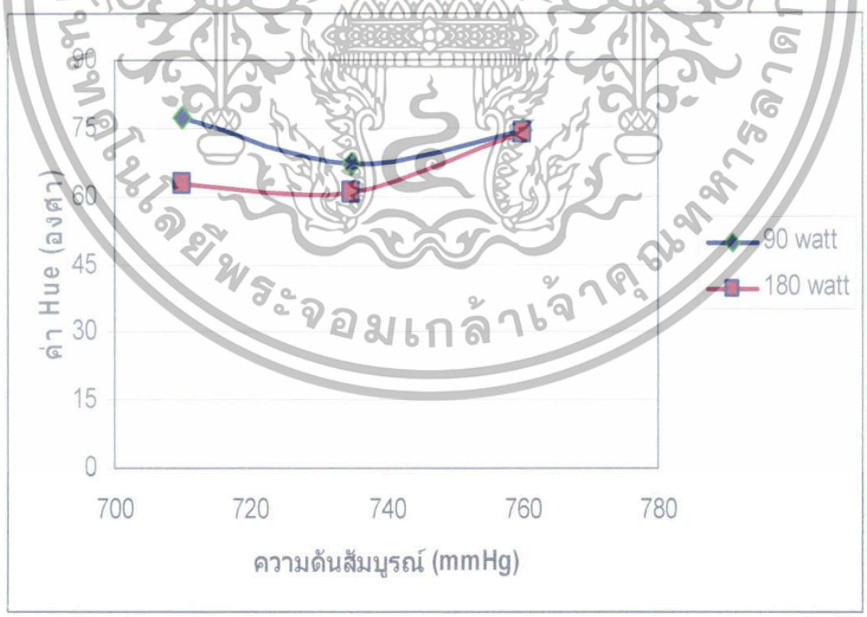
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 1



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 2



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่า Hue ของผลิตภัณฑ์ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 1



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์และค่า Hue ของผลิตภัณฑ์ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 2 ระดับ ของตัวอย่างชุดที่ 2

4.5 ข้อสังเกตของผลการทดลอง

1. ตู้สุญญากาศ (Vacuum Chamber) ซึ่งทำมาจากวัสดุที่เป็นอะคริลิก มีข้อจำกัดในเรื่องความหนาของแผ่นที่นำมาประกอบเป็นตู้ โดยที่ความหนา 10 มิลลิเมตรนี้มีความสามารถในการทนต่อระดับความดันสัมบูรณ์ได้สูงสุดที่ประมาณ 690 มิลลิเมตรปรอท ถ้าใช้ระดับความดันที่ต่ำกว่านี้อาจจะส่งผลให้ตู้สุญญากาศเกิดการรั่วซึมที่บริเวณระหว่างรอยต่อได้ เนื่องจากแผ่นอะคริลิกมีคุณสมบัติในการอ่อนตัว จึงมีผลต่อการเลือกช่วงความดันที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ค่อนข้างอยู่ในช่วงที่แคบ เป็นสาเหตุที่ทำให้ที่ระดับความดันต่างๆไม่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งผิวมะกรูดดังกล่าว

2. ระดับความดันสัมบูรณ์ ในการทดลองเมื่อทำการเริ่มระบบไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศขณะทำการอบแห้งตัวอย่างผิวมะกรูดนั้นจะพบว่าระดับความดันสัมบูรณ์ภายในตู้จะไม่คงที่เนื่องจากผลของไอน้ำที่ระเหยออกมาจากตัวอย่างในระหว่างการอบแห้ง ไม่ได้ผ่านกระบวนการการควบแน่น จึงมีผลทำให้ความดันสัมบูรณ์ภายในตู้เพิ่มขึ้น

3. อุณหภูมิของตัวอย่าง ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากการใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรดไม่สามารถผ่านเข้าไปภายในเตาอบไมโครเวฟ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อผิวมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศที่ได้สร้างขึ้น โดยใช้ปัจจัยในการทดลอง 2 ปัจจัยคือ ระดับความดันสัมบูรณ์ (710,735 และ 760 มิลลิเมตรปรอท) และระดับกำลังไมโครเวฟ (90 และ 180 วัตต์) พบว่า

1. ระดับกำลังไมโครเวฟมีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งผิวมะกรูดในช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (K_f) โดยที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 90 วัตต์ เท่ากับ 1.65×10^{-2} และที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 180 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 3.77×10^{-2} ตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์สีในค่า Hue มีค่าเท่ากับ 74.12 และ 63.54 องศา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

2. ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 180 วัตต์ จะใช้เวลาในการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายของผิวมะกรูดอบแห้งประมาณร้อยละ 14 ของน้ำหนักแห้ง น้อยกว่าที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 90 วัตต์ ในทุกๆสภาวะการทดลอง

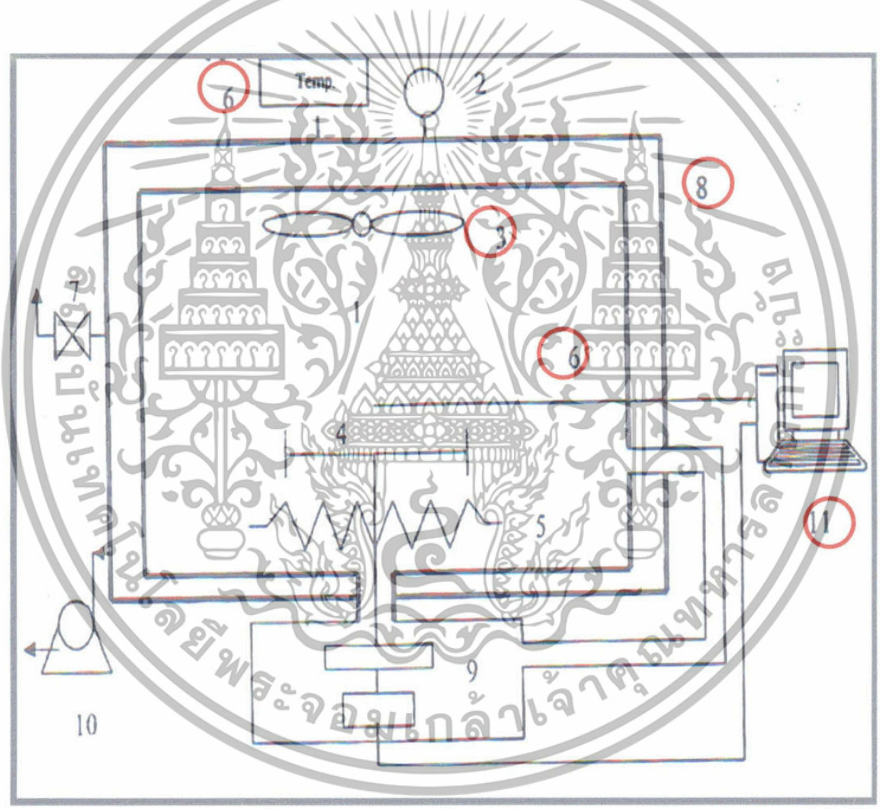
3. ระดับความดันสัมบูรณ์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากช่วงที่ทำการศึกษาอาจกำหนดให้ช่วงแคบเกินไป จึงทำให้ไม่เห็นผลความแตกต่างกันมากเท่าที่ควร

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าการใช้ความดันสัมบูรณ์ที่ระดับต่างๆจะไม่มีผลต่อค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้น จึงได้ทำการกำหนดข้อเสนอแนะเพื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ดังนี้

5.2.1 ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งเดิมที่ได้สร้างขึ้น

จากรูปที่ 5.1 เป็นรูปแสดงการปรับปรุงเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศเดิมที่ได้สร้างขึ้น โดยเพิ่มอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศที่ทำการปรับปรุงแล้ว

ที่มา : รณชัย ทองดีแท้ (2550)

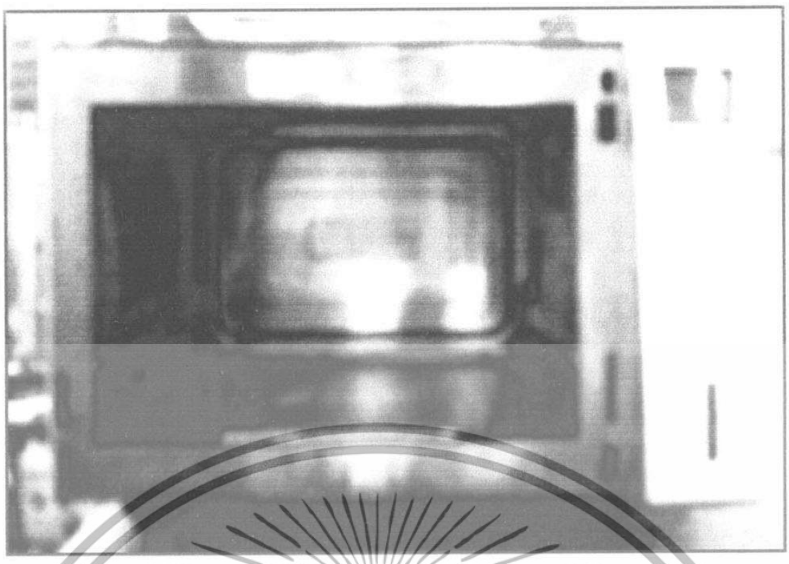
- เพิ่มขนาดความหนาของตู้สุญญากาศ (Chamber) ที่ทำจากแผ่นอะคริลิกหรือทำการเสริมความแข็งแรงให้กับตู้ เพื่อให้มีความสามารถในการทนความดันสัมบูรณ์ที่ระดับต่ำๆได้
- หมายเลข 3 คือ พัดลม ทำการติดตั้งภายในเตาอบไมโครเวฟ เพื่อช่วยกระจายความร้อนที่ได้รับจากคลื่นไมโครเวฟให้เข้าถึงตัวอย่างที่ทำการอบแห้งอย่างทั่วถึง และกระจายไอน้ำจากการระเหยออกจากตัวอย่างในระหว่างการอบแห้ง
- หมายเลข 6 คือ ตัวเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิหรือใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด โดยทำการเจาะรูเตาไมโครเวฟเพื่อที่จะให้แสงอินฟราเรดเข้าไปตกกระทบยังผิวหน้าของตัวอย่างที่ใช้ ทำให้สามารถทราบค่าอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งที่สภาวะต่างๆได้ โดยจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิในช่วงที่กำหนดไว้อย่างอัตโนมัติ
- หมายเลข 8 คือ ฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน จะติดตั้งบริเวณภายนอกของตู้สุญญากาศโดยรอบ เพื่อป้องกันการเกิดการควบแน่นของไอน้ำซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความดันสัมบูรณ์ภายในตู้สุญญากาศ
- หมายเลข 11 คือ คอมพิวเตอร์ โดยติดตั้งระบบ Data locker ซึ่งต่อเข้ากับ Load cell ในหมายเลข 9 โดยตรงเพื่อทำหน้าที่รวบรวมและแสดงข้อมูลโดยอัตโนมัติ

5.2.2 ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศโดยใช้แนวทางจากเครื่องที่ได้ทำการสร้างและทดลองแล้ว

เครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศเครื่องนี้ได้ถูกออกแบบและทำการสร้างขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

5.2.2.1 เตาอบไมโครเวฟ (Microwave inverter)

ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NN-GS595A ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ด้วยความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2450 เมกะเฮิร์ท แสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงเตาอบไมโครเวฟแบบอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อ Panasonic
ที่มา: อธิศ กัลพงษ์ (2549)

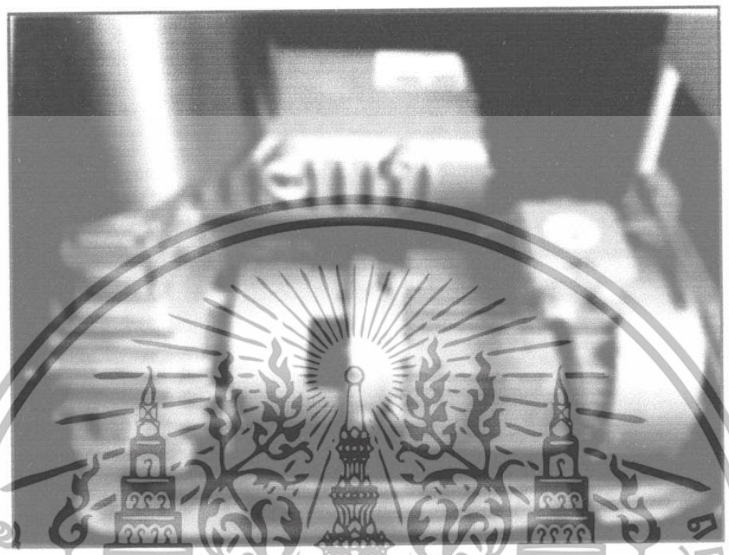
5.2.2.2 ตู้สุญญากาศ (Vacuum Chamber)

ใช้วัสดุคือขวดแก้ว Pyrex ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ภายในบรรจุ vacuum bag และลูกแก้วขนาดเล็ก ดังแสดงในรูป 5.3 เพื่อช่วยในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ โดยขวดแก้วดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับระบบสุญญากาศโดยตรง

รูปที่ 5.3 แสดง Vacuum bag and glass beads inside the vacuum chamber
ที่มา: อธิศ กัลพงษ์ (2549)

5.2.2.3 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ยี่ห้อ BUSCH รุ่น RA0063I ผลิตในประเทศเยอรมัน ใช้แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ใช้รับการทำระบบสุญญากาศในเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

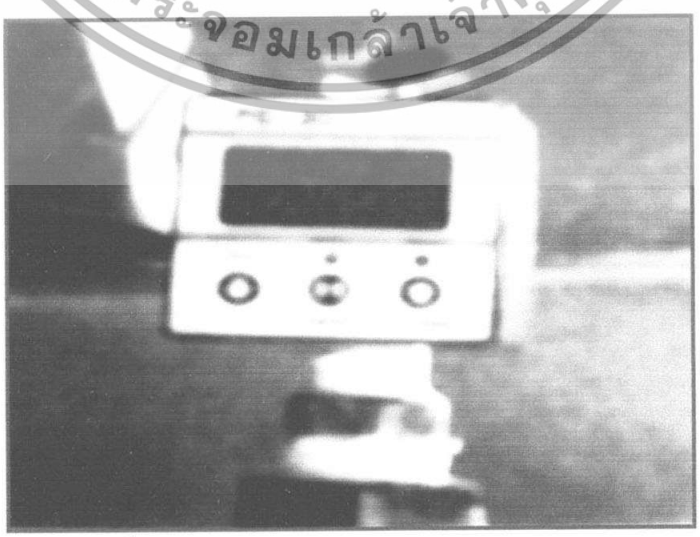


รูปที่ 5.4 แสดง Vacuum pump and power control

ที่มา: อธิศ กัลพงษ์ (2549)

5.2.2.4 เกจสุญญากาศ (Pressure gauge)

ยี่ห้อ COPAL ELECTRONIC รุ่น PG-30-103R-N โดยจะเชื่อมต่อเข้ากับท่อของระบบสุญญากาศ ใช้สำหรับวัดความดันสุญญากาศให้ตรงตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดง Pressure gauge PG-30

ที่มา: อธิศ กัลพงษ์ (2549)

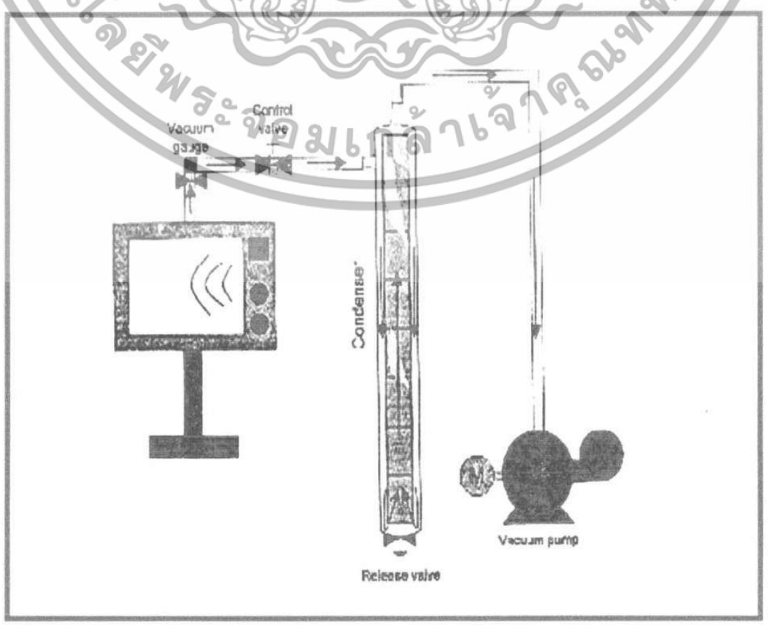
5.2.2.5 เครื่องควบแน่นไอน้ำ (Condenser)

ใช้สำหรับการควบแน่นไอน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ระหว่างทำการอบแห้งและเป็นตัวป้องกันไอน้ำไม่ให้เข้าไปภายในเครื่องปั๊มสุญญากาศ ส่วนประกอบของ Condenser coil แสดงไว้ในรูปที่ 5.6

รูปที่ 5.6 แสดง Constituent of condenser coil

ที่มา: อธิศ กัลพงษ์ (2549)

เมื่อประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันแล้ว จะได้เครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดง Diagram of microwave vacuum dehydrator

ที่มา: อธิศ กัลพงษ์ (2549)

จากรายงานการวิจัยของอธิศ กัลพงษ์ (2549) ได้ใช้เครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศนี้ในการศึกษาการอบแห้งเห็ดฟาง ที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 60,110 และ 160 มิลลิเมตรปรอท แลที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 180 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่า ที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 60 มิลลิเมตรปรอท เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้ง เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดและให้คุณภาพที่ดีที่สุดในแง่ของสี การหดตัวและเนื้อสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร,2543, **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**,คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 164 - 179

จันทนา จันโจมศึก , จันทร์จิรา ชุ่มจิตร และศิริพร ชาวแกลง, 2543, **การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน**, งานวิจัยวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,หน้า 21-27.

จรรยา เลิศอมรชัยกุล และ มนัสชนก สากิยะ, 2542 , **เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศสำหรับการศึกษาลักษณะการอบแห้งของถั่วเขียว** . วิชาปัญหาพิเศษ ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ประเสริฐ ประภามณฑล, พงษ์เอก สาภสุนทรพิทักษ์ และไพฑูรย์ ระดมกิจ , 2542 , **เครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟ-สุญญากาศ แบบต่อเนื่อง** , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พรพรรณ กอมนชัย และ ปราณี สุขสะอาด , 2546 , **การผลิตพริกแห้งโดยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน** ,งานวิจัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

รณชัย ทองดีแท้ และ อัมพวัน ตั้นสกุล , 2550 , **การอบแห้งเห็ดฟางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ** , รายงานการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

รวมพร เลี่ยมแก้ว , 2549 , **การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศในการอบแห้งฟักทองแผ่น** , รายงานการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุวิช ศิริวัฒนโยธิน,วีระชัย แก่นทรัพย์ และคณะ,2545.**แบบจำลองการทำแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งถังหมุนและระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ.**รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เหมการ์ จินดาวัฒนาภูมิ, 2545, **การศึกษาแบบจำลองการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟกับพริกไทย**.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,หน้า 17-34.

อธิศ กัลพงษ์,2549,**การทำแห้งกากแครอทอย่างรวดเร็วโดยการใช้เครื่องทำแห้งแบบไมโครเวฟสูญญากาศ.**วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

AOAC, 1984.**Official Methods of Analysis of Association of Office Analytical Chemists,14 th** ed: Officail Analytical Chemists.Washington D.C.

Cai,T.,Chen, F. and Qi,J. ,2004 , **Dehydratd Oriental Mushrooms , Leafy Vegettables , and Food Preparation Herbs and Condiment** , In Handbook of Vegetable Preservation & Processing , Hui , Y.H. , Ghazala , S. , Graham , D.M. , Murrel , K.D. and Nip W.K. (Ed.) Marcel Dekker , New York , p.382

Jongsawatdigul, J. and Gunasekaran, S., 1996,**Microwave – Vacuum Drying of Cranberries: Part I. Energy Use and Efficiency**, Jounal of Food Processing and Preservation,vol. 20,121-143.

Lin , T.M. , Durance , T.D. and Scaman , C.H. , 1998 , **Characterization of vacuum Microwave,Air and Freeze Dried Carrot Slices** , Food Research International , Vol. 31 No. 2 , pp. 111-117.

Rahman , M.S. and Perera , C.O.,1999 , **Dryig and Food Preservation** , In Handbook of Food Preservation , Rahman , M.S. (Ed.) , 2nd ed. , Vol.1 , Marcel Dekker , New York , pp.589-623.

Wadsworth, J.I., Veluppillai, L. and Verma, L.R.,1990, **Microwave – Vacuum Drying of Parboiled Rice**, Trasactions in Agriculture,vol.33,No.1,pp.199-210.