



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

งานวิจัยและพัฒนาระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้
ไมโครเวฟ ร่วมระบบสุญญากาศ; กรณีศึกษา: ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง

(Research and Development on The Multi-Purpose Commercialized
Drier using a Combined Microwave and Vacuum System;
Case Study: High Quality Products)

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

15 กันยายน 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

งานวิจัยและพัฒนาระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้
ไมโครเวฟ ร่วมระบบสุญญากาศ;กรณีศึกษา: ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง
(Research and Development on the Multi-Purpose
Commercialized Drier using a Combined Microwave
and Vacuum System; Case Study: High Quality Products)

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอ)

รับเมื่อ _____ หมายเลข _____

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

“โครงการการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม”

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) งานวิจัยและพัฒนาระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟ ร่วมระบบสุญญากาศ;กรณีศึกษา: ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง

(ภาษาอังกฤษ) **Research and Development on the Multi-Purpose**

Commercialized Drier using a Combined Microwave and Vacuum System; **Case Study:**

High Quality Products

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

รองศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี

หมายเลขโทรศัพท์.....025643001-9 ต่อ 3153 โทรสาร.....02 5643010

E-mail ratphadu@engr.tu.ac.th

3. สาขาอุตสาหกรรมที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

อุตสาหกรรมยา

อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์

4. คำหลัก (keyword) ของโครงการวิจัย (3 – 5 คำ)

อบแห้ง ไมโครเวฟ ระบบสุญญากาศ อาหาร ยา พลังงาน

6. ระยะเวลาดำเนินงาน _____ 2 ปี _____

7. ได้เสนอโครงการนี้หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งทุนอื่นที่ใดบ้าง

☐ ไม่ได้เสนอต่อแหล่งทุนอื่น

☐ เสนอต่อ _____

ชื่อโครงการที่เสนอ _____

กำหนดทราบผล (หรือสถานภาพเท่าที่ทราบ)

หมายเหตุ : สกว. ไม่มีข้อห้ามในการส่งโครงการไปยังแหล่งทุนหลาย ๆ แห่งในเวลาเดียวกันและอาจเป็นการดีที่แหล่งทุนมากกว่า 1 แหล่งจะร่วมกันให้ทุนอุดหนุนการวิจัย สกว. สามารถทำหน้าที่เชื่อมโยงและเสริมการให้ทุนได้แต่ขอให้ระบุดตามความจริง

8. ความเชื่อมโยงกับหุ้นส่วนวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

8.1 ชื่อผู้ประกอบการที่เป็นหุ้นส่วนวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

บริษัท ศรีพิพัฒน์เอ็นจิเนียริง จำกัด

ประเภทธุรกิจ งานด้านวิศวกรรม ขายเครื่องมือและระบบทางวิศวกรรม

ผู้รับผิดชอบโครงการ นายมงคล ไบโพธิ์วงศ์

ตำแหน่ง _____ Chief Executive _____

ที่อยู่ _____ 165/1 ซอย สุขุมวิท 93 ถ. สุขุมวิท แขวงบางจาก เขตพระโขนง กรุงเทพฯ 10260

โทรศัพท์ _____ 023319103 _____ โทรสาร

_____ 023330061 _____

E-mail Address _____

โทรศัพท์มือถือ _____ 0819081261 _____

การสนับสนุนจากภาคอุตสาหกรรม

1. In cash มูลค่า 300,000 บาท

2. In kind (ระยะการดำเนินการ 6 เดือน)***

2.1 อุปกรณ์เครื่องมือ ในการทำชิ้นส่วนและอะไหล่ประกอบเครื่อง(คิดประเมินเป็นค่าเช่าต่อเดือน)

- เครื่องปั๊ม	คิดเป็นมูลค่า 270,000 บาท
- เครื่องเชื่อมอาร์กอน	คิดเป็นมูลค่า 18,000 บาท
- เครื่องกลึง	คิดเป็นมูลค่า 192,000 บาท
- อุปกรณ์ในการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่อง	คิดเป็นมูลค่า 150,000 บาท
โดยอุปกรณ์เครื่องมือทั้งหมดตั้งอยู่ใน บ.ศรีพิพัฒน์เอ็นจิเนียริง จำกัด	

2.2 บุคลากรร่วมงาน จำนวน 6 คน คิดเป็นมูลค่า 360,000 บาท (คิดประเมินจากเงินเดือน)

*** ส่วนสนับสนุนที่นอกเหนือจากงบประมาณ 3 ล้านบาท

8.2 ระดับความร่วมมือกับหุ้นส่วน (เลือกข้อใดข้อหนึ่ง)

- ☐ ภาคอุตสาหกรรมให้การสนับสนุนงบประมาณเพื่อการวิจัย (in cash) ระยะเวลาหนึ่งแล้ว (กรุณาสรุปรูปแนวทางและรูปแบบความร่วมมือที่ผ่านมา)

ให้งบประมาณมาสร้างเครื่องต้นแบบระดับ Pilot Scale

- ☐ ภาคอุตสาหกรรมให้การสนับสนุนด้านสถานที่ โครงสร้างพื้นฐาน เครื่องมือ วัสดุสำหรับการวิจัย ฯลฯ (in kind) ระยะเวลาหนึ่งแล้ว

(กรุณาสรุปรูปแนวทางและรูปแบบความร่วมมือที่ผ่านมา)

- ทำการขึ้นรูปวัสดุโดยใช้วัสดุและเครื่องมือภายในโรงงานของผู้ประกอบการ
- ทำการทดสอบภาคสนามภายในโรงงานของผู้ประกอบการ

- ☐ อยู่ระหว่างการเจรจาความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรม

(กรุณาระบุแนวทางและรูปแบบการเจรจาพร้อมประมาณการระยะเวลาที่คาดว่าจะเริ่มความร่วมมือได้)

- ☐ อื่น ๆ โปรดระบุ

8.3 สรุปรูปแบบของผลผลิตหรือการนำผลงานไปใช้ประโยชน์

(ดูตัวอย่างในแบบเสนอโครงการ)

- ได้ระบบต้นแบบที่สามารถนำไปประโยชน์ได้จริงในอุตสาหกรรม
- ในส่วนของตัวเทคโนโลยีการออกแบบสามารถปรับเปลี่ยน Sizing และปริมาณการผลิตตามความต้องการลูกค้าได้ (made to order)

9. ความเชื่อมโยงกับนักวิจัยที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาและ/หรืออุตสาหกรรมที่ทำการวิจัย

- ทำวิจัยร่วมกับ Prof. Kazuo Aoki แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีนาโกะ ประเทศญี่ปุ่นในโครงการ “Microwave Heating of Dielectric Materials”
- ทำวิจัยร่วมกับ Prof. H. Ted Davis แห่งมหาวิทยาลัย Minnesota, Twin Cities ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ “Development of Numerical Schemes Based on Lattice Boltzmann Method for Flow and Dispersion in Porous Media”

- ทำวิจัยร่วมกับ Prof. Z.F. Cui แห่งมหาวิทยาลัยออกฟอร์ด ประเทศอังกฤษ ในหัวข้อ“การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในงานวิศวกรรมแผ่นเยื่อ (tissued engineering)”
- ทำวิจัยร่วมกับ ศาสตราจารย์ ดร. สมชาย วงศ์วิเศษ แห่งมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรีในหัวข้อ Multi-Phase Flow Problem
- ทำวิจัยร่วมกับ ดร. ดวงเดือน อางองค์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในหัวข้อ “Analysis of Heating Process in Dielectric Materials Using a Continuous Microwave Belt Furnace”
- ทำวิจัยร่วมกับ รศ. ดร. สักกมล เทพหัสดิน ณ อยุธยา แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในโครงการ “Research and Development of Heat and Mass Transfer in Food Stuff”
- ทำวิจัยร่วมกับ สวทช และ บริษัท เทรนด์ จำกัด ภายใต้ทุนโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมไทย (ITAP) ในโครงการวิจัยและพัฒนาเครื่องกำจัดมูลฝอยติดเชื้อด้วยคลื่นไมโครเวฟ

10. ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นฐานมาจากเกษตรกรรม และเป็นแหล่งผลิตสินค้าทางเกษตรกรรมรายใหญ่ของโลก จึงมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมากผลผลิตเหล่านี้บางชนิดอาจมีจำนวนมากเกินความต้องการหรืออาจคลาดเคลื่อนได้ในบางฤดู จึงควรที่จะทำการเก็บรักษาผลผลิตที่ได้ให้มีระยะเวลาในการบริโภคให้ยาวนานขึ้น วิธีการที่นิยมอย่างหนึ่งสำหรับการเก็บรักษาผลผลิตเหล่านี้ คือ วิธีการอบแห้งในปัจจุบันนี้การอบแห้งได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป คือ นอกจากทำการอบแห้งผลผลิตให้สามารถเก็บรักษาไว้บริโภคยาวนานขึ้น ยังทำการอบแห้งเพื่อรักษาคุณค่าทางโภชนาการ เพื่อรักษารูปร่างและรสชาติ เพื่อความสะดวกในการปรุงแต่งอาหาร เพื่อความรวดเร็ว และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวิธีการอบแห้งที่นิยมอบแห้งทางการเกษตรส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีภูมิปัญญาชาวบ้าน หรือ เทคโนโลยีแบบดั้งเดิม เช่น ใช้แสงแดดหรือป้อนลมร้อนเพื่อให้แห้ง ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาต่อผลผลิตมาก ทั้งนี้เนื่องจากแมลงหรือสัตว์ต่าง ๆ มาทำลายปริมาณและพลังงานที่ใช้ เช่น จากแสงแดด ใช้ในการทำแห้งไม่คงที่ จึงทำให้เสียเวลามากในการทำแห้งนอกจากนี้ผลผลิตที่ได้ยังจะเสื่อมคุณภาพทั้งด้านรูปร่าง สี กลิ่น รส ไปจากเดิม ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน มักจะทำให้คุณภาพและคุณภาพของผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพราะว่าผลของการใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการอบแห้งรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยาวนานเกินไป การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้หลักการ

ของการถ่ายเทความร้อน โดยจะให้ความร้อนจากผิวของผลผลิตที่นำมาทำการอบแห้งถ่ายเทเข้าสู่แกนกลางของผลผลิต เนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่บริเวณผิวกับแกนกลางของผลผลิต ซึ่งจากหลักการนี้ มักจะทำให้ผิวของผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งต่างไปจากเดิมได้ง่ายขึ้นทั้งหมดที่กล่าวมานี้ เป็นผลเสียที่เกิดขึ้นกับผลผลิตเนื่องจากการอบแห้งโดยทั่ว ๆ ซึ่งปัจจุบันระบบการอบแห้งแบบธรรมชาติมีการใช้กันมาก อันเนื่องมาจากเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากมากนักและเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่เน้นถึงคุณภาพมากนัก

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันผู้บริโภคนิยมบริโภคอาหารหรือสารธรรมชาติ หรือสมุนไพรที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง รวมทั้งระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการนวัตกรรมใหม่ที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงที่สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการอบแห้งขึ้นมาใหม่ โดยที่ผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งนี้ยังสามารถรักษาคุณภาพเดิมได้ดี และคงคุณค่าทางโภชนาการดั้งเดิมไว้เป็นอย่างดี แต่ขณะเดียวกันก็สามารถนำปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ออกได้มากและเร็วที่สุด วิธีการนั้นก็คือวิธีการนำเอาพลังงานรูปแบบใหม่ที่เป็นพลังงานสะอาด เช่น พลังงานไมโครเวฟก็เป็นตัวอย่างหนึ่งที่เหมาะกับกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์สำหรับบริโภคที่เน้นคุณค่าทางโภชนาการ เทคโนโลยีไมโครเวฟสำหรับกระบวนการทางความร้อน/พลังงานเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ในกระบวนการทางวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ยังมีการนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมไม่แพร่หลายมากนัก ยกเว้นไมโครเวฟสำหรับปรุงอาหารในครัวเรือน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอย่างง่ายที่คนส่วนใหญ่รู้จัก (อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาวิจัย กล่าวคือ เทคโนโลยีไมโครเวฟสำหรับกระบวนการทางความร้อนในงานอุตสาหกรรม ต้องอาศัยความรู้พื้นฐานหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความรู้พื้นฐานทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic Theory) ความรู้พื้นฐานทางความร้อน (Thermal Science) ความรู้พื้นฐานทางด้านวัสดุศาสตร์ (Material Science) ความรู้พื้นฐานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้ากำลัง (Electronic and Electric Power Science) รวมถึงความรู้พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง (Advanced Mathematics) รวมกับเทคโนโลยีการคำนวณตัวเลข (Numerical Technique) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Programming) จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีไมโครเวฟจะต้องอาศัยองค์ความรู้ในลักษณะเชิงสหวิทยาการ (Multi-disciplinary knowledge) ซึ่งจะนำสู่ความสำเร็จในการสร้างเทคโนโลยีดังกล่าว ซึ่งพบว่าในปัจจุบันกลุ่มนักวิจัยในโลกที่สนใจวิจัยพัฒนาในเทคโนโลยีในระดับเป็นที่ยอมรับและต่อยอดพัฒนาเข้าสู่ระดับอุตสาหกรรมมีเพียงไม่กี่กลุ่ม ผลงานวิจัยของผู้วิจัยเองในศูนย์ก็ถือว่าเป็นกลุ่มหนึ่งที่ได้สร้างผลงานวิจัยเป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติทุกมิติ โดยเนื้อหาที่ศึกษาประกอบด้วยมิติของงานวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) งานวิจัยประยุกต์ (Applied Research) และการทำวิจัยพัฒนาออกมาในระดับ Pilot scale จนถึงระดับ Commercial scale ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างแท้จริงในปัจจุบัน ซึ่งผลงานวิจัยในมิติต่าง ๆ นี้มีประโยชน์อย่างสูงต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของไทยในเชิงแข่งขันกับตลาดโลก

สรุปข้อได้เปรียบของระบบที่ประดิษฐ์ในโครงการวิจัยและพัฒนานี้ เมื่อเทียบกับระบบการให้ความร้อนแบบธรรมชาติทั่วไป (Conventional heating) ก็คือ

- (1) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านทะลุเข้าไปในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุที่จะกระจายสม่ำเสมอทำให้ความแห้งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ในทุกตำแหน่ง ด้วยเหตุนี้ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ง่าย
 - (2) เวลาที่ใช้ในกระบวนการมีระยะเวลาสั้น คือประมาณ หนึ่งในสิบของกระบวนการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดาทั่วไป และเหมาะสมใช้งานกับวัสดุขึ้นหนา
 - (3) รักษาคุณภาพดั้งเดิมของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ เปลี่ยนแปลงไว้ อาทิเช่น รูปทรง สี กลิ่น และน้ำหนัก เนื่องจากระบบทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้ความชื้นภายในวัสดุระเหยตัวที่อุณหภูมิต่ำ และไม่มีปฏิกิริยา oxidization ภายในวัสดุ
 - (4) มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง กล่าวคือประมาณ 60% - 70% ในขณะที่ใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบวิธีธรรมดามี ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แค่ประมาณ 20% - 30%
 - (5) เนื่องจากไม่มีการปล่อยควันไอเสียออกมาในระหว่างกระบวนการ ทำให้ไม่มีปัญหากับสิ่งแวดล้อม
 - (6) เนื่องจากในกระบวนการมีชิ้นส่วนทำงานที่มีลักษณะเคลื่อนไหวมีน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง
 - (7) เนื่องจากในกระบวนการมีชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
- ผลงานประดิษฐ์นี้จะเน้นการใช้วัสดุที่มีอยู่ภายในประเทศและใช้งบประมาณในการสร้างที่ไม่สูงเกินไป แต่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศได้เป็นอย่างดี

11. วัตถุประสงค์

ในเชิงวิชาการ

- 1 ทำการศึกษาการอบแห้งที่เกี่ยวกับการอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ ซึ่งใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 MHz เป็นแหล่งพลังงานเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ยา สมุนไพรและอาหาร
- 2 ทำการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ รวมทั้งเก็บผลข้อมูลการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ในส่วนงานวิจัยนี้ถือว่าเป็น ผลงานชิ้นแรกของประเทศไทย และได้นำไปใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติอย่างแท้จริงและผลงานวิจัยสามารถจดสิทธิบัตรเป็นของคนไทยได้
- 3 ส่งเสริมความร่วมมือกับภาคเอกชน และทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคเอกชน
- 4 เสริมสร้างความเข้มแข็งของอุตสาหกรรมไทยและศักยภาพในการแข่งขันในเวทีโลก
- 5 สามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนขณะมีการเปลี่ยนสถานะภายใต้พลังงานไมโครเวฟในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในงานทางวิศวกรรม และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติหลายสาขา อาทิเช่น การวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการถนอมอาหาร การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน Packed Bed ในงานวิศวกรรมเคมี รวมถึงเทคโนโลยีการเก็บรักษาเนื้อเยื่อในงานด้านการแพทย์ องค์ความรู้ที่ได้ โดยเฉพาะในภาคทฤษฎี รวมถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง กับโปรแกรมคำนวณที่ประดิษฐ์ขึ้นในโครงการวิจัยครั้งนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ครบวงจรในศาสตร์ด้านการถ่ายเทความร้อนและมวล

สารในวัสดุพูนที่มีการเปลี่ยนสถานะ ที่ผู้วิจัยมุ่งหวังให้เกิดขึ้นภายในประเทศไทย ตัวอย่างหัวข้อวิจัยที่ผู้วิจัยที่สำเร็จแล้วและกำลังดำเนินการอยู่ทั้งที่อยู่ภายใต้ทุนสนับสนุนจากองค์กรภายนอก และงานวิจัยอิสระ เช่น จลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งในวัสดุที่มีหลายชั้น (Drying of multi-layered sample), กระบวนการเย็นเยือก (freezing)(ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ศาสตราจารย์ ดร. สมชาย วงศ์วิเศษ), กระบวนการทำละลาย (ทุนเมธีวิจัย สกว.) กระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ (combined microwave and vacuum drying) รวมถึงปัญหาการไหลที่มีหลายสถานะ (multi-phase flow problem) และหัวข้ออื่นๆ ปัจจุบันผู้วิจัยได้สร้างห้องปฏิบัติการที่ทันสมัยภายใต้ทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์และองค์กร JICA จากประเทศญี่ปุ่น

6. โครงการวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างสูงโปรแกรมการพัฒนาการเรียนการสอน ทั้งในระดับปริญญาตรี โท และเอกต่อไปในอนาคต รวมถึงการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรม

ในเชิงนโยบาย

- สร้างองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาประเทศ และเพื่อขยายผลงานวิจัยของกลุ่มนักวิจัยไทยให้ครอบคลุมถึงสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประเทศและเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะขีดความสามารถในการแข่งขัน และสร้างเทคโนโลยีเป็นของตนเองในอนาคต
- ยกย่องงานวิจัยไทยทางด้านเทคโนโลยีไมโครเวฟและเทคโนโลยีวัสดุพูน (Porous media) ให้เข้าสู่มาตรฐานสากล ผลของงานวิจัยที่ได้ทำขึ้นจะนำไปลงตีพิมพ์ในวารสารการวิจัยในระดับนานาชาติที่มี Impact Factor สูง อาทิ เช่น ASME J. Heat Transfer, AIAA J., AIChE. J., Chemical Engineering Science, Int. Journal of Heat and Mass Transfer และ Int. J. Numerical Method for Engineer เป็นต้น ซึ่งเป็นการเผยแพร่ ชื่อเสียงให้ประเทศในระดับนานาชาติ และยกระดับมาตรฐานงานวิจัยของประเทศให้เข้าสู่ระดับสากล นอกจากนี้ผลงานวิจัยที่ต่อยอด (สิ่งประดิษฐ์เครื่องต้นแบบ) ที่สามารถนำไปจดสิทธิบัตรได้

- สร้างเสริมความร่วมมือและความสัมพันธ์กับองค์กรวิจัยที่มีคุณภาพสูงในต่างประเทศ ซึ่งจะ เป็นประโยชน์อย่างสูงในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการวิจัย และเครื่องมือวิจัยและการเชื่อม ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศไทยกับประเทศนั้นๆในโครงการอื่นๆ
- เสริมสร้างสมรรถนะการแข่งขันของประเทศในเชิงเทคโนโลยี โดยผู้วิจัยมีเป้าหมายที่จะทำ การวิจัยเชิงลึกที่ครอบคลุมในด้านต่างๆดังต่อไปนี้ (หัวข้องานวิจัยครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมาย)

เทคโนโลยีเป้าหมาย:

- เทคโนโลยีอาหารและวิศวกรรมเคมี ; กระบวนการถนอมอาหารแบบพิเศษและ
- เทคโนโลยีกระบวนการอบแห้งขั้นสูงสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
- วิศวกรรมเนื้อเยื่อในด้านการแพทย์
- เทคโนโลยีเมมเบรน

กลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมาย:

- อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร
- อุตสาหกรรมยาและเวชภัณฑ์
- อุตสาหกรรมอบแห้งในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

12. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เน้นวิจัยเชิงสหวิทยาการ (Multi-disciplinary) และบูรณาการ กล่าวคือได้ผลลัพธ์ในหลายมิติ มิติแรกคือองค์ความรู้เชิงลึก (งานวิจัยภาคทฤษฎี) ที่สามารถนำไปตอบปัญหาในเชิงปฏิบัติได้ รวมทั้งตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติได้ มิติที่สองคือการประดิษฐ์คิดค้นนวัตกรรมใหม่ที่สามารถตอบสนองภาคการผลิตภายในประเทศและสามารถจดสิทธิบัตรเป็นของคนไทยได้

ในปัจจุบันแม้จะมีนักวิจัยบางกลุ่มพยายามพัฒนาใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในอุตสาหกรรม แต่ก็ยังเป็นเพียงแค่ดัดแปลงไมโครเวฟบ้าน (Domestic microwave oven) และติดตั้งอุปกรณ์บางตัวเข้าไป ซึ่งพบว่ายังไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องเทคโนโลยีที่ใช้และมีปัญหาเกี่ยวกับความปลอดภัยโดยเฉพาะการรั่วของรังสี และยังไม่สามารถออกแบบตัวระบบที่มีขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ระบบไมโครเวฟสำหรับการให้ความร้อนทั่วไปยังจำกัดอยู่ในประเภทที่วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะต้องอยู่นิ่ง (fixed materials) และมีปริมาณที่ไม่มากนัก ข้อด้อยของระบบไมโครเวฟที่วัสดุอยู่นิ่งคือ ทำให้การกระจายตัวของคลื่นหรือความร้อนภายในวัสดุจะไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดโซนความร้อน (hot spot zone) และโซนเย็น (cold zone) ซึ่งไม่มีอันตรกิริยากับคลื่น ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การวิจัยและพัฒนาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟเป็นลักษณะหลายโหมด (multi-mode) ด้วยเหตุผลของการกระจายตัวของคลื่นรวมถึงความร้อนในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่ดี ตลอดจนถึงการควบคุมตำแหน่งของการกระจายตัวที่ดีของความร้อนภายในวัสดุ จึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยครั้งนี้

ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่สามารถนำเอาเทคโนโลยีไมโครเวฟนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งสิ่งทอ อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก การบ่มคอนกรีต การ vulcanize ยางพารา การทำ Pasteurization และ Sterilization และอื่นๆอีกมากมาย กระบวนการไมโครเวฟยังได้ถูกนำไปใช้งานทางการแพทย์ เช่น การคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือด และ กำจัดเนื้องอก นอกจากนี้ ไมโครเวฟยังสามารถนำไปใช้ในงานแยกส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยจากวัสดุ เช่น การแยกกำมะถันออกจากถ่านหินโดยการ Pre-combustion treatment และการแยกสารสกัดออกจากดิน เป็นต้น

วิธีการอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟ-สุญญากาศ ถือว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ที่ต้องใช้เทคโนโลยีออกแบบขั้นสูงที่ต้องคาบเกี่ยวกับศาสตร์ทาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้านวัสดุศาสตร์ การถ่ายเทความร้อนและมวล คณิตศาสตร์ขั้นสูง ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และอิเล็กทรอนิกส์-ไฟฟ้าควบคุม และเป็นงานวิจัยเชิงสหวิทยาการที่ครอบคลุมถึงงานวิจัยเชิงทฤษฎีตลอดจนถึงงานวิจัยเชิงประยุกต์ที่สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นนวัตกรรมหรือสิ่งประดิษฐ์ใหม่ใหม่ที่สามารถตอบสนองภาคการผลิต

เครื่องอบแห้งอเนกประสงค์โดยใช้ระบบไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง (เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม ผลิตภัณฑ์ยา และสมุนไพร) ที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในโครงการวิจัยครั้งนี้) ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้คือ 2450 MHz) แสดงดังรูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบโดยปกติจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ กล่าวคือ ส่วนแรก คือ แมกนีตรอนและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Magnetron and Power Supply) ซึ่งมีหน้าที่ในการปล่อยคลื่นไมโครเวฟเพื่อนำไปกำเนิดความร้อนในวัสดุที่อยู่ในกระบวนการ โดยจะมีอุปกรณ์ส่วนที่สองคือ ท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งทำ

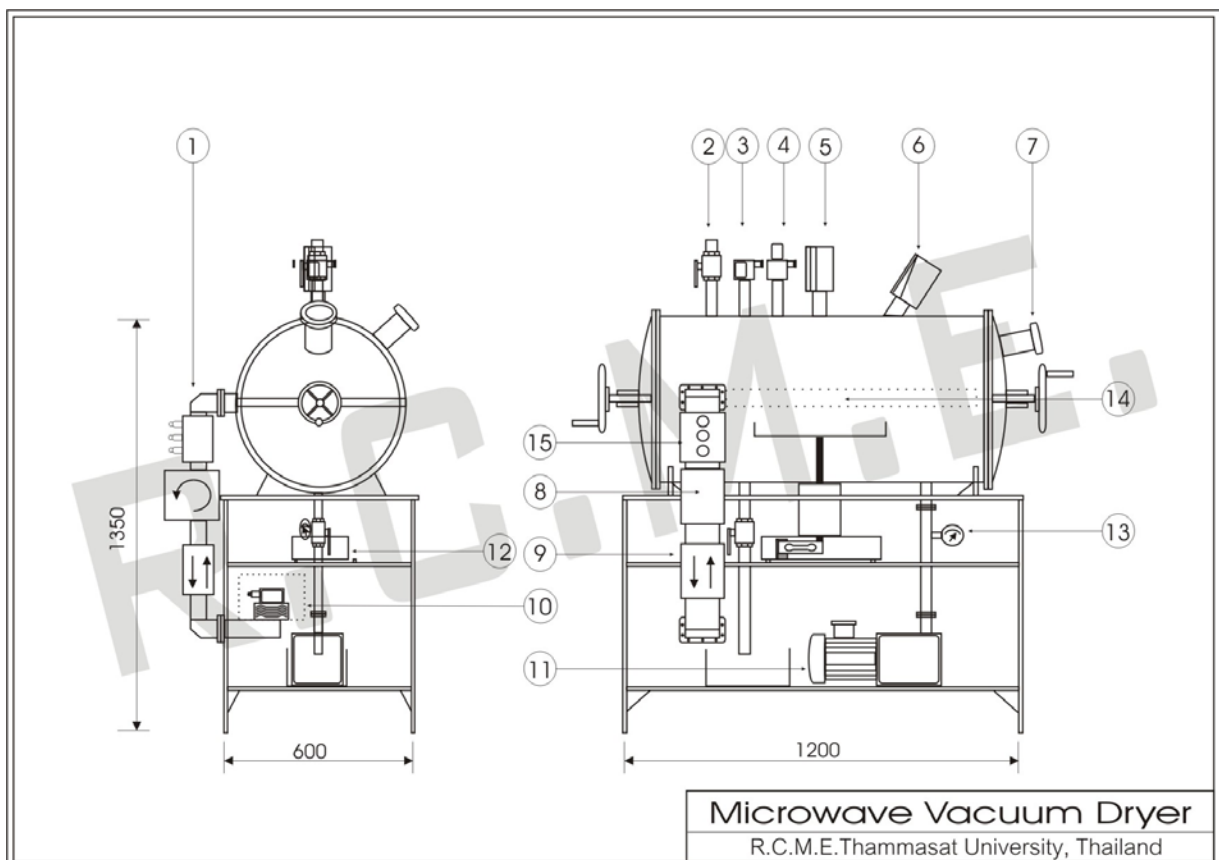
หน้าที่ลำเลียงคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้น เพื่อส่งไปยังตู้อบสุญญากาศ (vacuum cavity) ที่มีฝาเปิดได้ทั้งสองด้าน ซึ่งภายใน vacuum cavity จะเป็นที่ติดตั้งวัสดุที่นำผ่านในกระบวนการ ส่วนล่างของ vacuum cavity จะต่อเชื่อมอยู่กับปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เพื่อควบคุมความดันให้ได้ในพิสัยประมาณ 20-100 mbar ด้านบนของ vacuum cavity จะติดตั้งระบบเครื่องมือวัดหลายระบบ เช่น ช่องมอง (sigh glass front) กล้อง Infrared (IR camera) เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ วาล์วระบายอากาศ (false air valve) ตัววัดความดันภายในถัง (pressure transmitter) ส่วนอื่นๆของระบบ คือ ระบบเครื่องมือป้องกันและเครื่องมือวัด เช่น circulator และ stub tuner หรือ zs-transformer manual และ เครื่องวัดกำลัง (power monitor) เป็นต้น โดยปกติที่อุณหภูมิห้อง จะต่อเข้าสู่เครื่องวัดกำลังเพื่อจะได้ทราบกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง โดย circulator ทำหน้าที่ให้คลื่นผ่านไปได้ในทางเดียว ภายในระบบจะมีน้ำหมุนวนเพื่อดูดซับคลื่นที่ย้อนกลับเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับไปทำลายตัวแมกนีตรอน stub tuner ใช้ในการปรับแต่งค่าอิมพีแดนซ์ ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟปล่อยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องและควบคุมโดยใช้ อุปกรณ์ควบคุม ภายใน cavity จะมีถาดหมุน (PTFE turntable) และใบกวน (mode stirrer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของคลื่น ซึ่งส่งผลต่อการกำเนิดความร้อนอย่างทั่วถึงในวัสดุที่นำผ่านในกระบวนการ มวลความชื้นภายในวัสดุที่เปลี่ยนไปสามารถประมวลโดย load cell-online scale นอกจากนี้ระบบยังสามารถวัดอุณหภูมิภายในวัสดุ ด้วย optical fiber optic และวัดความดันภายในวัสดุ ด้วย differential pressure probe ตลอดการทดลอง ในระบบดังกล่าวนี้ จะมีระบบควบคุมอัตโนมัติและการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ (Full automated microwave system) ระบบจะมีซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ และสามารถเชื่อมโยงกับระบบอินเตอร์เน็ต สิ่งสำคัญคือการออกแบบอย่างไรที่สามารถควบคุมการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด (มาตรฐานสากลกำหนดให้ไม่เกิน 10 mW/cm²) เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน ผู้วิจัยจึงเน้นให้ความสำคัญในเรื่องนี้ ผลงานประดิษฐ์นี้ได้ออกแบบให้สามารถป้องกันการรั่วของไมโครเวฟในจุดต่างๆ

สำหรับข้อมูลเชิงเทคนิค (Technical Data) ของระบบที่จะจัดทำขึ้นดังแสดงดังข้างล่างนี้

Technical Data

1 Microwave Generator	Industrial Magnetron, water-cooled
2 Microwave Power	2 kW (Max)/2450 MHZ, continuous Adjustable (But operating power=1kW)
3 Electrical power consumption	3kVA
4 Operation Modes	Continuous
5 Max Product Temperature	150°C
6 Load Cell	0.5000g, 10.000 digits
7 Vacuum	Atmosphere to 20 mbar due to Vacuum system and application
8 Ambient Climate	1-30 °C, max. 90% humidity not condensing
9 Cooling	Water-cooling approx. 3l/min,max. 25 °C
10 Compressed Air	3-4bar
11 Max Wall Temperature	80°C

12 Temperature Measurements for	
IR-Camera	0-200°C
13 Microwave Window Sealing	0-250°C
14 Pressure Measurement	0-1600mbar (absolute)
15 Vacuum Pump	
Principle	Rotary Vane Pump
Electrical Power	0.5kw
Pump power	approx.5qm/h due to pressure level
16 Capacity	approx. 20 kg/ Batch
17 Applications (Products)	
	Pharmaceutical products
	Herb
	Food Stuffs



รูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบ The Multi-Purpose Commercialized Drier using a Combined Microwave and Vacuum System

Equipments List

No	Components	Remark
1	Microwave Waveguides	
2	Manual Valve	
3	Pressure Transducer	
4	Magnetic False air Salve for Pressure Control	
5	IR-Camera 0-200 °C	
6	CCD-Camera	
7	View finder	
8	Circulator	
9	Directional Coupler	
10	Magnetron	
11	Vacuum Pump	
12	Online scale 0-30 Kg	
13	Dial-gauge	
14	Slotted Waveguide (Option)	

ความแตกต่างที่ชัดเจนจากโครงการเดียวกันนี้รับทุนจาก Funding agency ที่อื่น ๆ***

ผู้วิจัยเคยได้รับทุนจาก Funding agency ที่อื่น ๆ ในระบบที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงาน แต่เป็นคนละ Applications กับโครงการนี้ โครงการอื่นที่เคยทำมาจะเน้นการทำความร้อนและทำแห้งภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ ซึ่งมี Concept ในการออกแบบหลักการทำงานที่แตกต่างจากโครงการนี้ ซึ่งโครงการที่รับทุนครั้งนี้มีเทคนิคในการออกแบบที่ยู่งยากกว่ามาและต้องการอุปกรณ์ชนิดพิเศษหลายรายการ

indicatorsชี้วัดความสำเร็จของโครงการ***

- 1 ได้เครื่องต้นแบบของระบบอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ ร ผลงานชิ้นแรกของประเทศไทย และได้นำไปใช้ประโยชน์ ในทางปฏิบัติอย่างแท้จริงและผลงานวิจัยสามารถจดสิทธิบัตรเป็นของคนไทยได้
- 2 ส่งเสริมความร่วมมือกับภาคเอกชน และทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคเอกชน
- 3 เสริมสร้างความเข้มแข็งของอุตสาหกรรมไทยและศักยภาพในการแข่งขันในเวทีโลก
- 4 สามารถผลิตบัณฑิตศึกษาและส่งเสริมทักษะให้นักวิจัยรุ่นใหม่หลายคน

13. จำนวนโครงการที่คณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการอยู่ โดยขอให้ระบุระยะเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละโครงการแหล่งทุนและงบประมาณสนับสนุนที่ได้รับ เวลาที่ใช้ทำโครงการวิจัยในแต่ละโครงการ เป็นกี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ทั้งในฐานะหัวหน้าโครงการ ผู้ร่วมโครงการของแต่ละโครงการที่กำลังดำเนินการอยู่

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่าการร่วมกันระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับระบบสุญญากาศในการอบวัสดุชีวภาพจะช่วยเพิ่มศักยภาพด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ความรู้ที่ดีเกี่ยวกับจลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุชีวภาพสามารถพัฒนาการออกแบบและระบบการทำงานที่มีประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ระบบที่พัฒนาแบ่งออกเป็นสามระดับ ได้แก่ ระดับทดลองซึ่งมีตำแหน่งป้อนคลื่นไมโครเวฟระดับต่ำเพียงตำแหน่งเดียว ระดับอุตสาหกรรมซึ่งมีตำแหน่งป้อนคลื่นไมโครเวฟระดับต่ำสองตำแหน่ง และมีตำแหน่งป้อนคลื่นไมโครเวฟระดับสูงตำแหน่งเดียว กำลังงานไมโครเวฟสร้างจากแมกนีตรอนตามหลักการการออกแบบซึ่งได้อธิบายไว้ในเนื้อหา ในการศึกษาครั้งนี้ระบบสามารถทำงานได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบกะในแต่ละการทดลอง ระดับของความดันสุญญากาศสูงสุดประมาณ 95 kPa งานวิจัยนี้สนใจในการออกแบบและสร้างระบบการอบแห้งวัสดุชีวภาพ โดยการร่วมกันระหว่างตำแหน่งการป้อนคลื่นไมโครเวฟที่ไม่สมมาตรและสภาวะสุญญากาศ นอกจากนี้จุดประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้คือหาความเป็นไปได้ของการใช้ไมโครเวฟอบแห้งวัสดุชีวภาพและทดลองศึกษาลักษณะการอบแห้งในสภาวะไมโครเวฟที่ต่างกัน ซึ่งประกอบด้วย เวลาในการอบ ระดับความดันสุญญากาศ และระบบการทำงานที่ต่างกัน ในขณะเดียวกันผลของงานวิจัยยังเป็นประโยชน์ด้านทฤษฎีพื้นฐานเพื่อการศึกษาและประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งวัสดุชีวภาพต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟในสภาวะสุญญากาศ, การถ่ายเทความร้อนและมวล, คุณภาพ, แบบจำลอง

Abstract

It is well known that a combined microwave (MW) and vacuum drying of biomaterials has a promising potential for high-quality dehydrated products. A better knowledge of the drying kinetics of biomaterial products could improve the design and operation of efficient dehydration systems. In this study, the system developed can be classified in three scales including; lab scale with single feed low power magnetron, commercial scale with double-feed low power magnetrons and commercial scale with single feed high power magnetron. The microwave power was generated by means of magnetrons according to design concept as described in relevant chapter. In this study, the system can be operated either in continuous or intermittent mode in each experiments. The maximum vacuum degree was about 95 kPa. This research project focuses on the design and fabrication of a commercialized biomaterials drier using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system. Furthermore, the objective of this project is to examine the feasibility of using MV drying to dry biomaterials and experimentally explore drying characteristics of dried samples in different MV conditions, including microwave radiation time, vacuum level and different modes of operation. At the same time, the research results would be beneficial to present a theory basis for further study and industrial application of MV technology in drying of biomaterials in the future.

Keywords: microwave vacuum drying, heat and mass transfer, quality, simulation

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นฐานมาจากเกษตรกรรม และเป็นแหล่งผลิตสินค้าทางเกษตรกรรมรายใหญ่ของโลก จึงมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมากผลผลิตเหล่านี้บางชนิดอาจมีจำนวนมากเกินความต้องการหรืออาจตลาดแคบได้ในบางฤดู จึงควรที่จะทำการเก็บรักษาผลผลิตที่ได้ให้มีระยะเวลาในการบริโภคให้ยาวนานขึ้น วิธีการที่นิยมอย่างหนึ่งสำหรับการเก็บรักษาผลผลิตเหล่านี้ คือ วิธีการอบแห้งในปัจจุบันนี้การอบแห้งได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป คือ นอกจากทำการอบแห้งผลผลิตให้สามารถเก็บรักษาไว้บริโภคยาวนานขึ้น ยังทำการอบแห้งเพื่อรักษาคุณค่าทางโภชนาการ เพื่อรักษารูปร่างและรสชาติเพื่อความสะดวกในการปรุงแต่งอาหาร เพื่อความรวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวิธีการอบแห้งที่นิยมอบแห้งทางการเกษตรส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีภูมิปัญญาชาวบ้าน หรือ เทคโนโลยีแบบดั้งเดิม เช่น ใช้แสงแดดหรือป้อนลมร้อนเพื่อให้แห้ง ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาต่อผลผลิตมาก ทั้งนี้เนื่องจากแมลงหรือสัตว์ต่าง ๆ มาทำลายปริมาณและพลังงานที่ใช้ เช่น จากแสงแดด ใช้ในการทำแห้งไม่คงที่ จึงทำให้เสียเวลามากในการทำแห้งนอกจากนี้ผลผลิตที่ได้ยังจะเสื่อมคุณภาพทั้งด้านรูปร่าง สี กลิ่น รส ไปจากเดิม ส่วนการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน มักจะทำให้คุณภาพและคุณภาพของผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพราะว่าผลของการใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการอบแห้งรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยาวนานเกินไป การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน โดยจะให้ความร้อนจากผิวของผลผลิตที่นำมาทำการอบแห้งถ่ายเทเข้าสู่แกนกลางของผลผลิต เนื่องจากผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่บริเวณผิวกับแกนกลางของผลผลิต ซึ่งจากหลักการนี้มักจะทำให้สีผิวของผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งต่างไปจากเดิมได้ง่ายขึ้นทั้งหมดที่กล่าวมานี้ เป็นผลเสียที่เกิดขึ้นกับผลผลิตเนื่องจากการอบแห้งโดยทั่ว ๆ ซึ่งปัจจุบันระบบการอบแห้งแบบธรรมชาติมีการใช้กันมาก อันเนื่องมาจากเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากมากนักและเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่เน้นถึงคุณภาพมากนัก

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันผู้บริโภคนิยมบริโภคอาหารหรือสารธรรมชาติ หรือสมุนไพรที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง รวมทั้งระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการนวัตกรรมใหม่ที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงที่สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการ

อบแห้งขึ้นมาใหม่ โดยที่ผลผลิตที่ผ่านการอบแห้งนี้ยังสามารถรักษาคุณภาพเดิมได้ดี และคงคุณค่าทางโภชนาการดั้งเดิมไว้เป็นอย่างดี แต่ขณะเดียวกันก็สามารถนำปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ออกได้มากและเร็วที่สุด วิธีการนั้นก็คือวิธีการนำเอาพลังงานรูปแบบใหม่ที่เป็นพลังงานสะอาด เช่นพลังงานไมโครเวฟก็เป็นตัวอย่างหนึ่งที่เหมาะกับการกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์สำหรับบริโภคที่เน้นคุณค่าทางโภชนาการ เทคโนโลยีไมโครเวฟสำหรับกระบวนการทางความร้อน/พลังงานเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในการบวนการทางวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ยังมีการนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมไม่แพร่หลายมากนัก ยกเว้นไมโครเวฟสำหรับปรุงอาหารในครัวเรือน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอย่างง่ายที่คนส่วนใหญ่รู้จัก (อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาวิจัย กล่าวคือ เทคโนโลยีไมโครเวฟสำหรับกระบวนการทางความร้อนในงานอุตสาหกรรม ต้องอาศัยความรู้พื้นฐานหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความรู้พื้นฐานทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic Theory) ความรู้พื้นฐานทางความร้อน (Thermal Science) ความรู้พื้นฐานทางด้านวัสดุศาสตร์ (Material Science) ความรู้พื้นฐานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้ากำลัง (Electronic and Electric Power Science) รวมถึงความรู้พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง (Advanced Mathematics) รวมกับเทคโนโลยีการคำนวณตัวเลข (Numerical Technique) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Programming) จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีไมโครเวฟฯจะต้องอาศัยองค์ความรู้ในลักษณะเชิงสหวิทยาการ (Multi-disciplinary knowledge) ซึ่งจะนำสู่ความสำเร็จในการสร้างเทคโนโลยีดังกล่าว ซึ่งพบว่าในปัจจุบันกลุ่มนักวิจัยในโลกที่สนใจวิจัยพัฒนาในเทคโนโลยีในระดับเป็นที่ยอมรับและต่อยอดพัฒนาเข้าสู่ระดับอุตสาหกรรมมีเพียงไม่กี่กลุ่ม ผลงานวิจัยของผู้วิจัยเองในศูนย์ก็ถือว่าเป็นกลุ่มหนึ่งที่ได้สร้างผลงานวิจัยเป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติทุกมิติ โดยเนื้อหาที่ศึกษาประกอบด้วย มิติของงานวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) งานวิจัยประยุกต์ (Applied Research) และการทำวิจัยพัฒนาออกมาในระดับ Pilot scale จนถึงระดับ Commercial scale ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างแท้จริงในปัจจุบัน ซึ่งผลงานวิจัยในมิติต่างๆนี้มีประโยชน์อย่างสูงต่อการพัฒนาวงการอุตสาหกรรมของไทยในแข่งขันกับตลาดโลก

สรุปข้อได้เปรียบของระบบที่ประดิษฐ์ในโครงการวิจัยและพัฒนานี้ เมื่อเทียบกับระบบการให้ความร้อนแบบธรรมดาทั่วไป (Conventional heating) ก็คือ

- (1) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านทะลุเข้าไปในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุที่จะกระจายสม่ำเสมอทำให้ความแห้งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ในทุกตำแหน่ง ด้วยเหตุนี้ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ง่าย
- (2) เวลาที่ใช้ในกระบวนการมีระยะเวลาสั้น คือประมาณ หนึ่งในสิบของกระบวนการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดาทั่วไป และเหมาะสมใช้งานกับวัสดุขึ้นหนา
- (3) รักษาคุณภาพดั้งเดิมของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ เปลี่ยนแปลงไว้ อาทิเช่น รูปทรง สี กลิ่น และน้ำหนัก เนื่องจากกระบวนการภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้ความชื้นภายในวัสดุระเหยตัวที่อุณหภูมิต่ำ และไม่มีปฏิกิริยา oxidization ภายในวัสดุ
- (4) มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง กล่าวคือประมาณ 60% - 70% ในขณะที่ใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบวิธีธรรมดามี ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แค่ประมาณ 20% - 30%
- (5) เนื่องจากไม่มีการปล่อยควันไอเสียออกมาในระหว่างกระบวนการ ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม
- (6) เนื่องจากในกระบวนการมีชิ้นส่วนทำงานที่มีลักษณะเคลื่อนไหวมีน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง
- (7) เนื่องจากในกระบวนการมีชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย

ผลงานประดิษฐ์นี้จะเน้นการใช้วัสดุที่มีอยู่ภายในประเทศและใช้งบประมาณในการสร้างที่ไม่สูงเกินไป แต่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในเชิงวิชาการ

1. ทำการศึกษาการอบแห้งที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศซึ่งใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 MHz เป็นแหล่งพลังงานเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ยา สมุนไพร และอาหาร
2. ทำการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งระบบไมโครเวฟสุญญากาศ รวมทั้งเก็บผลข้อมูลการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ในส่วนงานวิจัยนี้ถือว่าเป็น ผลงานชิ้นแรกของประเทศ

ไทย และได้นำไปใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติอย่างแท้จริงและผลงานวิจัยสามารถจดสิทธิบัตรเป็นของคนไทยได้

3. ส่งเสริมความร่วมมือกับภาคเอกชน และทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคเอกชน

4 .เสริมสร้างความเข้มแข็งของอุตสาหกรรมไทยและศักยภาพในการแข่งขันในเวทีโลก

5. สามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนขณะมีการเปลี่ยนสถานะภายใต้พลังงานไมโครเวฟในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในงานทางวิศวกรรม และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติหลายสาขา อาทิ เช่น การวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการถนอมอาหาร การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน Packed Bed ในงานวิศวกรรมเคมี รวมถึงเทคโนโลยีการเก็บรักษาเนื้อเยื่อในงานด้านการแพทย์ องค์ความรู้ที่ได้โดยเฉพาะในภาคทฤษฎี รวมถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง กับโปรแกรมคำนวณที่ประดิษฐ์ขึ้นในโครงการวิจัยครั้งนี้ จะเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ครบวงจรในศาสตร์ด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่มีการเปลี่ยนสถานะ ที่ผู้วิจัยมุ่งหวังให้เกิดขึ้นภายในประเทศไทย ตัวอย่างหัวข้อวิจัยที่ผู้วิจัยที่สำเร็จแล้วและกำลังดำเนินการอยู่ทั้งที่อยู่ภายใต้ทุนสนับสนุนจากองค์กรภายนอก และงานวิจัยอิสระ เช่น จลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งในวัสดุที่มีหลายชั้น (Drying of multi-layered sample), กระบวนการเย็นเยือก (freezing)(ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ศาสตราจารย์ ดร. สมชาย วงศ์วิเศษ), กระบวนการทำละลาย (ทุนเมธีวิจัย สกว.) กระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ (combined microwave and vacuum drying) รวมถึงปัญหาการไหลที่มีหลายสถานะ (multi-phase flow problem) และหัวข้ออื่นๆ ปัจจุบันผู้วิจัยได้สร้างห้องปฏิบัติการที่ทันสมัยภายใต้งบประมาณสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์และองค์กร JICA จากประเทศญี่ปุ่น

6. โครงการวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์อย่างสูงโปรแกรมการพัฒนาการเรียนการสอน ทั้งในระดับปริญญาตรี โท และเอกต่อไปในอนาคต รวมถึงจนถึงการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรม

ในเชิงนโยบาย

- สร้างองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาประเทศ และเพื่อขยายผลงานวิจัยของกลุ่มนักวิจัยไทยให้ครอบคลุมถึงสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประเทศและเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะขีดความสามารถในการแข่งขัน และสร้างเทคโนโลยีเป็นของตัวเองในอนาคต

- ยกกระต๊บบงานวิจัยไทยทางด้านเทคโนโลยีไมโครเวฟและเทคโนโลยีวัสดุพรุน (Porous media) ให้เข้าสู่มาตรฐานสากล ผลของงานวิจัยที่ได้ทำขึ้นจะนำไปลงตีพิมพ์ในวารสารการวิจัยในระดับนานาชาติที่มี Impact Factor สูง อาทิ เช่น ASME J. Heat Transfer, AIAA J., AIChE. J., Chemical Engineering Science, Int. Journal of Heat and Mass Transfer และ Int. J. Numerical Method for Engineer เป็นต้น ซึ่งเป็นการเผยแพร่ชื่อเสียงให้ประเทศในระดับนานาชาติ และยกกระต๊บบมาตรฐานงานวิจัยของประเทศให้เข้าสู่ระดับสากล นอกจากนี้ผลงานวิจัยที่ต่อยอด (สิ่งประดิษฐ์เครื่องต้นแบบ) ที่สามารถนำไปจดสิทธิบัตรได้
- สร้างเสริมความร่วมมือและความสัมพันธ์กับองค์กรวิจัยที่มีคุณภาพสูงในต่างประเทศ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงในการแลกเปลี่ยนข้อมูลการวิจัย และเครื่องมือวิจัยและการเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างประเทศไทยกับประเทศนั้นๆ ในโครงการอื่นๆ
- เสริมสร้างสมรรถนะการแข่งขันของประเทศในเชิงเทคโนโลยี โดยผู้วิจัยมีเป้าหมายที่จะทำการวิจัยเชิงลึกที่ครอบคลุมในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้ (หัวข้องานวิจัยครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมาย)

เทคโนโลยีเป้าหมาย:

- เทคโนโลยีอาหารและวิศวกรรมเคมี ; กระบวนการถนอมอาหารแบบพิเศษและ
- เทคโนโลยีกระบวนการอบแห้งขั้นสูงสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
- วิศวกรรมเนื้อเยื่อในด้านการแพทย์
- เทคโนโลยีเมมเบรน

กลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมาย:

- อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร
- อุตสาหกรรมยาและเวชภัณฑ์
- อุตสาหกรรมอบแห้งในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิและความดันภายในภาชนะได้

2. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา คือ กำลังป้อนคลื่น ความดันสุญญากาศและลักษณะการป้อนคลื่น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งของระบบที่สร้างขึ้น
3. ทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น เพื่อหาค่าความชื้น อุณหภูมิ รวมถึงคุณภาพวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งได้

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เน้นวิจัยเชิงสหวิทยาการ (Multi-disciplinary) และบูรณาการ กล่าวคือ ได้ผลลัพธ์ในหลายมิติ มิติแรกคือ องค์ความรู้เชิงลึก (งานวิจัยภาคทฤษฎี) ที่สามารถนำไปตอบปัญหาในเชิงปฏิบัติได้ รวมทั้งตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติได้ มิติที่สองคือการประดิษฐ์คิดค้นนวัตกรรมใหม่ที่สามารถตอบสนององภาคการผลิตภายในประเทศและสามารถจดสิทธิบัตรเป็นของคนไทยได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นพื้นฐานความรู้ด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
2. ทราบพฤติกรรมของพารามิเตอร์ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ
3. ยกระดับงานวิจัยไทยทางด้านการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง
4. ผลงานวิจัยได้รับการตีพิมพ์ในงานวิจัยระดับประเทศและนานาชาติ

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันกระบวนการอบแห้งในผลิตภัณฑ์เกษตรกรรมไม่จำกัดแต่มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก เนื่องจากการอบแห้งแบบเดิมนั้นมีการกระจายตัวของความร้อนและความชื้นไม่ทั่วถึงตลอดชิ้นวัสดุจึงก่อให้เกิดความเสียหายให้กับวัตถุที่ได้นำมาอบ ทั้งยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ทำให้เกิดเชื้อรา สี และสภาพของวัตถุที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการอบนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ประกอบกับการอบทั่วไปจากเชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดมลภาวะ ปัจจุบันจึงมีการคิดกระบวนการอบแห้งใหม่ขึ้นมาหลากหลายวิธี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการอบให้สูงขึ้น รวมทั้งเพิ่มคุณภาพของวัสดุให้มีมูลค่ามากขึ้น การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการที่ยังใช้กันอยู่มากในกรรมวิธีการอบแห้งอาหาร อย่างไรก็ตามกรรมวิธีนี้ยังมีข้อเสียอีกมาก รวมถึงคุณภาพที่ต่ำของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้ง มีประสิทธิภาพของพลังงานต่ำและใช้เวลาในการอบแห้งนาน แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งอาหารด้วยลมร้อนใช้เวลาที่ยืดเยื้อ เพื่อที่จะประเมินผลของอุณหภูมิของการอบแห้งที่มีผลต่อการเสื่อมลงของวัตถุดิบในด้านคุณภาพ เช่น สี สารอาหาร รสชาติ และรูปลักษณะ (Bouraout et al. [2-1], Maskan [2-2] และ Yongsawatdigul and Gunasekaran [2-3])

การอบแห้งของวัสดุในช่วงที่มีอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในวัสดุจะมีค่าน้อย ทำให้การไล่ความชื้นจากภายในออกสู่ผิวเป็นไปค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องขจัดปัญหาเหล่านี้เพื่อเพิ่มความรวดเร็วและประสิทธิภาพของกรรมวิธีการอบแห้ง ในปี ค.ศ. 1940 Mermelstein [2-4] ได้ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในการอบแห้งอาหาร ซึ่งเทคนิคนี้ได้นำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารและวิศวกรรมเคมี (Ayappa et al. [2-5] และ Chatterjee et al. [2-6]) Fu et al. [2-7] ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายของพลังงานดูดซับภายในเครื่องไมโครเวฟที่มีคลื่นเป็นลักษณะคลื่นผสม (Multi-mode Cavity) แบบ 3 มิติ ผลจากการคำนวณเชิงทฤษฎีและการทดลองนั้นสอดคล้องกัน Tada et al. [2-8] ได้ศึกษาเชิงการคำนวณเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องไมโครเวฟแบบคลื่นผสม (บริเวณทำความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุทดสอบ เช่น เครื่องไมโครเวฟแบบครัวเรือน) งานวิจัยนี้แสดงอิทธิพลของตำแหน่งวัสดุที่วางในบริเวณทำความร้อนและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่อการดูดซับพลังงาน Ratanadecho et al. [2-9] ศึกษากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุทดสอบที่มีหลายชั้น (Multi-layer Material) โดยเน้นการศึกษาความสามารถใน

การส่งผ่านพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในวัสดุทดสอบโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นป้องกันการสะท้อนและตำแหน่งของชั้นป้องกันการสะท้อน Ratanadecho et al. [2-10] ศึกษากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่วัสดุทดสอบที่เป็นของเหลว มีการคิดอิทธิพลของแรงตึงผิว (Surface Tension) ต่อกระบวนการพาความร้อนในชั้นของเหลว ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี Ratanadecho et al. [2-11] ใช้แบบจำลอง 1 มิติเพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งวัสดุพูน ในที่นี้ตัวแปรที่ศึกษาคือขนาดของอนุภาคและสัดส่วนของความชื้นเริ่มต้นของวัสดุทดสอบที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้ง Drouzas และ Tsami [2-12] ทำการทดลองโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งสุญญากาศของวัสดุผลไม้เพื่อเพิ่มศักยภาพในการไล่ความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตู้อบพบว่ามีความไม่สม่ำเสมอ สีที่ได้จากการอบด้วยไมโครเวฟระบบสุญญากาศจะมีสีที่อ่อนกว่าสีที่ได้จากการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน Shivhare et al. [2-13] ศึกษาการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งข้าวโพดเพื่อวิเคราะห์ระดับความชื้นเริ่มต้น การดูดซับพลังงาน อุณหภูมิ และความเร็วเบื้องต้นของอากาศ โดยการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมในช่วงที่เส้นโค้งของการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพด แบบจำลองการแพร่ของความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพดเพื่อใช้อธิบายขบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ Tulasidas [2-14] ศึกษาการอบแห้งองุ่นโดยการใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในการอบแห้งองุ่นเพื่อทำลูกเกด พบว่าเมื่อมีการจุ่มองุ่นตามวิธีการผลิตลูกเกดในอุตสาหกรรม การอบแห้งด้วยไมโครเวฟไม่เพียงแต่รวดเร็วเท่านั้นยังต้องการพลังงานต่ำอีกด้วย ลูกเกดที่ได้มีคุณภาพที่ดีสีไม่เข้มเนื่องจากไม่มีการรมควันของสารซัลไฟด์ ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีความเป็นไปได้ในการลดปริมาณสารเคมีและพลังงานที่ใช้ในการคงสภาพผลิตภัณฑ์อาหาร การหดตัวและความหนาแน่นขององุ่นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้น Feng and Tang [2-15] ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการอบแห้งแอปเปิ้ลจำนวน 3 พันธุ์ (Red Delicious Golden และ Granny Smith) โดยใช้เทคนิควิธีการที่รวมเอาไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบดเข้ามาช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอของการเกิดความร้อน พบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีการพัฒนาคุณภาพสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงด้านสีต่ำและอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการอบแห้งด้วยแบบลมร้อนปกติหรือแบบสเปาเต็ดเบดธรรมดาสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 80% เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดแบบไม่ใช้ไมโครเวฟร่วมด้วย โดยอัตราการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟยังสมมุติให้มีการกระจายสม่ำเสมอ Ratanadecho

et al. [2-16] ทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดลองของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัว โดยศึกษาเน้นในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและความชื้น การแพร่ของไอน้ำในระบบ 1 มิติ พบว่าวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาพิลลารีสูงกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า วัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานชิ้นนี้ไม่ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ไมโครเวฟและค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า Ratanadecho et al. [2-17] ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งวัสดุพูนชนิดคาพิลลารีที่มีหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟโดยศึกษาถึง การกระจายของสนามไฟฟ้า ความชื้นและอุณหภูมิในระบบ 2 มิติ พบว่าวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการถ่ายเทความชื้นได้สูงกว่าวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และรูปแบบของการจัดเรียงชั้นวัสดุตัวอย่างมีผลต่อการถ่ายเทความชื้น Wang et al. [2-18] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-Bed) ร่วมกับไมโครเวฟ Adonis et al [2-19] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอาหารและผลผลิตทางการเกษตรสำหรับการอบแห้งโดยใช้ระบบลมร้อนและการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาไม่เชิงเส้นของสมการอนุพันธ์ตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง ซึ่งระบบนี้มีจุดเด่นคือสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและยังช่วยรักษาคุณภาพของวัสดุหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง นอกจากนั้นเทคนิคการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสามารถใช้อบแห้งสมุนไพร (Giese [2-20]) แอปเปิล และ เห็ด (Funebo and Ohlsson [2-21] และ Giri and Prasad [2-22]) แครอท (Litvin [2-23]) และใบชา เป็นต้น ซึ่งในส่วนของใบชานั้นการใช้ไมโครเวฟเพื่อยับยั้งเอนไซม์ Polyphenol Oxidase ในกระบวนการทำแห้งใบชา สามารถรักษาระดับของสาร Total Phenolic และ Catechins ได้สูง (Gulati [2-24]) อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟเป็นที่รู้กันดีถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำเมื่อประยุกต์ใช้อย่างไม่เหมาะสม (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [2-25])

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศโดยใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงเป็นวัสดุทดสอบ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟ ความดันสุญญากาศและลักษณะการป้อนคลื่นที่มีผลต่อปริมาณความชื้นและอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความซับซ้อน ซึ่งอาศัยองค์ความรู้หลาย ๆ ด้านในการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น ความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน ความรู้ทางด้านพลังงานไมโครเวฟ รวมไปถึงความรู้ทางด้านคุณภาพของใบชา ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟต่อไป

3.1.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างแท้จริงในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนถือเป็นสิ่งสำคัญ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะเกิดกระบวนการพื้นฐานสองกระบวนการพร้อมกัน (ผดุงศักดิ์รัตน์เดโช [3-1]) ซึ่งได้แก่

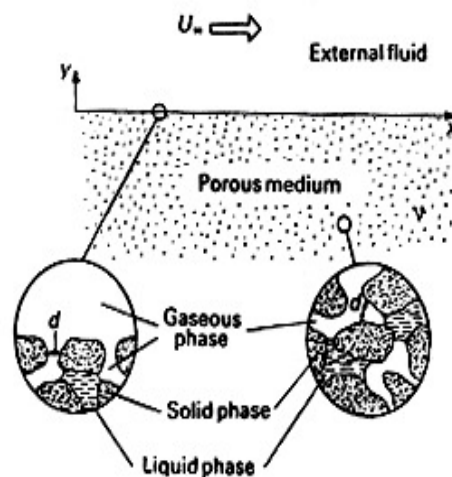
1. กระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการที่ถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำ เป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหย ความชื้นที่มีอยู่
2. กระบวนการถ่ายเทมวลสารเป็นกระบวนการที่ขับเคลื่อนของไหล (สถานะของเหลวและก๊าซ) ภายในเนื้อวัสดุหรือที่ผิววัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุ เป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

เป็นที่ทราบกันดีว่าการอบแห้งวัสดุพูนจะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นหรือมวลสาร (ประกอบไปด้วยของเหลว ไอน้ำและอากาศ) ขึ้นพร้อมกัน แต่การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเชิงทฤษฎีทำได้ยากมากเนื่องจากสมการที่ใช้วิเคราะห์หลายชุดมีลักษณะไม่เชิงเส้นและเงื่อนไขขอบเขตมีความซับซ้อนกว่าปกติ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงไม่เป็นที่ยอมรับ แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงสามารถใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีเงื่อนไขซับซ้อนได้ ดังนั้นทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารจึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

3.1.2 รูปแบบโครงสร้าง กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน

หัวข้อที่แล้วกล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูนแบบคาพิลลารี ซึ่งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารีเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพูน แต่ในทางปฏิบัติวัสดุพูนมีโครงสร้างซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



ภาพที่ 3.1

ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

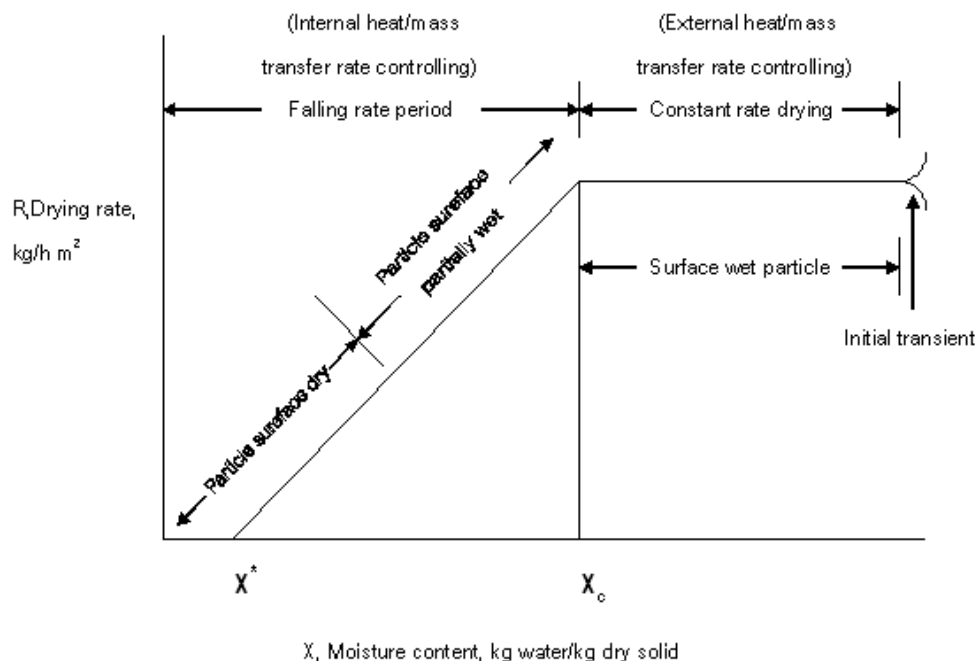
จากภาพที่ 3.1 เมื่อวัสดุพูนเปียกขึ้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคือ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการ

ทดสอบ การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่าง ๆ จะปรากฏขึ้น โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้น (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-2]) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันคาพิลลารี
2. การแพร่กระจายตัว (Diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว (Evaporation-Condensation Mechanism) ภายในรูพรุน
4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (Thermo-Diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการอบแห้งวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจน เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้ง ทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุรวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์กลไกหลักด้วย

จากภาพที่ 3.2 กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพูนที่เติมเต็มผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content, x_c) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุ เมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) โดยปกติคาบเวลานี้กินระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าสู่ใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้ง ค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) อย่างไรก็ตามจุดสำคัญในภาพที่ 3.2 สามารถอธิบายได้เป็นข้อย่อย ๆ ดังนี้



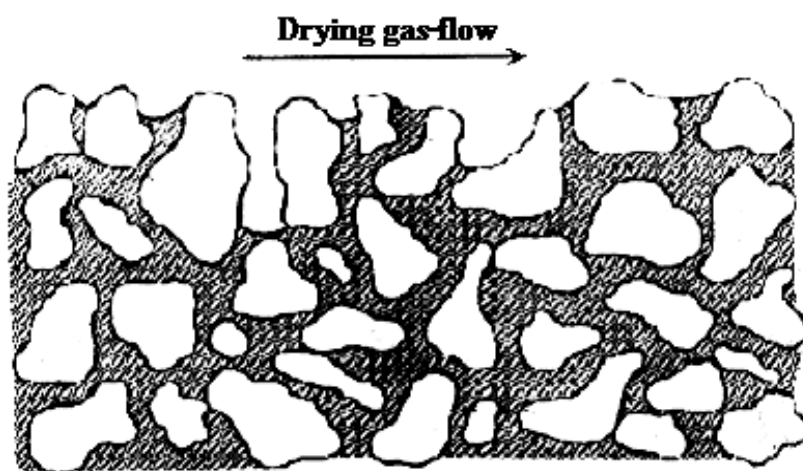
ภาพที่ 3.2

คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร (Mujumdar [3-3])

1. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) โดยปกติเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมาก ๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไอน้ำ หากอิทธิพลภายนอกถูกควบคุมให้คงที่ อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุพูนที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้าทำให้มีฟิล์มของเหลวปกคลุมที่ผิวหน้าวัสดุตลอดเวลา ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้ คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารออกจากผิววัสดุ

การถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion) เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุสามารถประมาณได้ด้วยอุณหภูมิกระเปาะเปียก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่าย โดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Force Convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์

2. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป ทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นความแห้งในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3

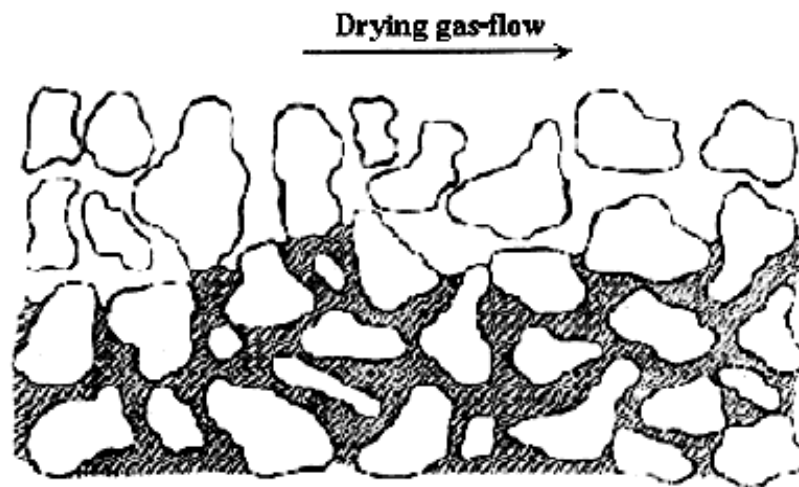
ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

หลังจากกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งก็เข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ ในช่วงต้นของในคาบเวลานี้อัตราการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลง บางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของความแห้งก่อดำขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ผิวของวัสดุและเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 3.4 ช่วงนี้เรียกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period) การระเหยความชื้นในช่วงนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแห้ง (ความชื้นในวัสดุบริเวณนี้ระเหยออกหมด) กับชั้นวัสดุเปียก (เนื้อวัสดุบริเวณที่ยังมีความชื้นอยู่) ซึ่งเรียกว่าผิวการระเหย (Evaporation Front) หรือผิวการอบแห้ง (Drying Front) หรือขอบเขตของการเคลื่อนที่ (Moving Boundary) โดยที่ผิวการ

ระเหยจะเคลื่อนที่ตลอดคาบเวลาของการอบแห้ง การระเหยตัวของความชื้นที่ผิวของการระเหย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกฎของเคลวิน (Kelvin's Law)

ในคาบเวลานี้อัตราการเคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้อาจสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ คาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์

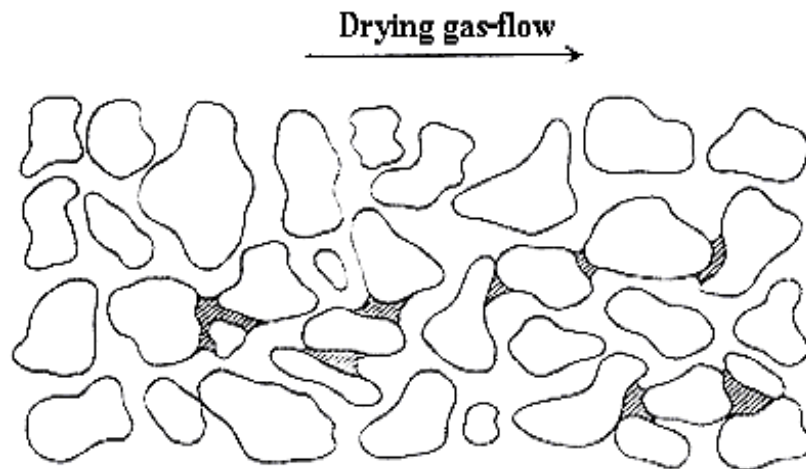


ภาพที่ 3.4

ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period)

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่า ความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้ อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้ ความชื้นที่เหลืออยู่เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)



ภาพที่ 3.5

ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย (End Stage of Drying)
(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

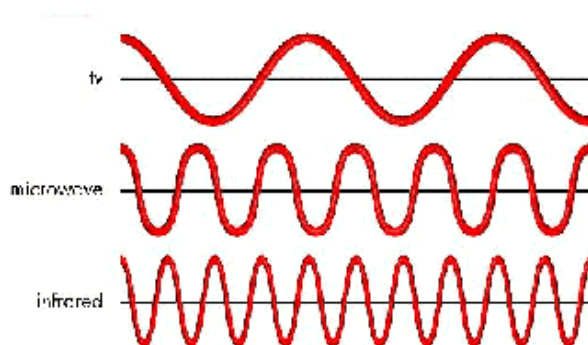
3.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนโดยใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทำความร้อน กระบวนการอบแห้ง กระบวนการฆ่าเชื้อ เป็นต้น เนื่องจากเป็นหัวใจหลักของงานวิจัย ถ้าทำการวิจัยโดยขาดความรู้พื้นฐาน งานวิจัยดังกล่าวจะขาดความน่าเชื่อถือ และไม่มีคุณภาพ และหากงานวิจัยเน้นการศึกษาในเชิงทฤษฎี ความรู้พื้นฐานเชิงทฤษฎีทางด้านไมโครเวฟยิ่งมีความจำเป็น เพราะหากขาดองค์ความรู้พื้นฐานดังกล่าวก็ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟได้ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีดังนี้

3.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นของไมโครเวฟ (0.3 - 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm - 0.3 mm ดังภาพที่ 3.6) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนในทางอุตสาหกรรมดังแสดงในเอกสารอ้างอิง ([3-4]-[3-10]) การให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่า

ที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุรังสีไมโครเวฟมีความลึกในการทะลุทะลวงเท่ากับ 2 cm ในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในน้ำ พลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในน้ำ ซึ่งในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า คือการใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ ซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น



ภาพที่ 3.6

ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-2])

3.2.2 ข้อดีของไมโครเวฟ (Advantages of Microwave Heating)

1. ร้อนขึ้นทันที (Rapid Heating) ไมโครเวฟจะเข้าสู่วัสดุและทำให้ร้อนขึ้นทันที โดยไม่รวม เวลาการนำความร้อนในเนื้อวัสดุ
2. มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Rapid Response) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีสมบัติของความเร็วคล้ายความเร็วแสง (3×10^8 m/s)
3. ให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Heating) ทุกส่วนของวัสดุถูกทำให้ร้อน จึงมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและด้านในน้อยกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา มาก จึงเรียกว่าเป็นการทำความร้อนอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ
4. การเลือกวัสดุในการรับความร้อน (Selective Heating) วัสดุบางอย่างสามารถดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟได้ทันที แต่วัสดุบางอย่างก็ไม่สามารถดูดซับพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น น้ำในแก้วเซรามิกส์ น้ำจะถูกทำให้ร้อนก่อนเพราะดูดซับคลื่นได้ดีกว่าแก้วเซรามิกส์

5. ประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) เนื่องจากวัสดุถูกทำให้ร้อนด้วยตัวเอง จึงไม่มีการสูญเสียต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก

6. เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการทำงานและเป็นเทคโนโลยีสะอาดมากกว่า การให้ความร้อนโดยวิธีอื่น เนื่องจากกระบวนการมีชิ้นส่วนการทำงานที่มีลักษณะเคลื่อนไหวน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและมีชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยและไม่มีการปล่อยควันไอเสียออกมาในระหว่างกระบวนการทำให้ไม่มีปัญหากับสิ่งแวดล้อม

3.2.3 การแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่

ในการแบ่งการแผ่รังสีของคลื่นตามความถี่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อคือ

1. การแผ่รังสีแบบไม่ทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (Nonionizing Rays) ได้แก่ คลื่นวิทยุ ทีวี ไมโครเวฟ เรดาร์ อินฟราเรด และแสงที่ตามองไม่เห็น ซึ่งคลื่นเหล่านี้เป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตน้อย

2. การแผ่รังสีแบบทำให้อะตอมภายในสสารแตกตัว (Ionizing Rays) ได้แก่ แสงอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ซึ่งคลื่นเหล่านี้ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตได้ถ้าได้รับรังสี ในปริมาณมาก เช่น การฉายรังสีแกมมาเพื่อกำจัดเซลล์มะเร็งจะทำให้เซลล์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงหรือตายไป

3.2.4 คุณลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

1. การสะท้อนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟเมื่อตกกระทบโลหะจะเกิดการสะท้อนออกและคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านโลหะไปได้

2. การทะลุผ่านของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิดได้ คล้ายช่องกระจกหน้าต่างที่ยอมให้แสงธรรมดาส่องผ่านตัวมันได้ วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้ คือ แก้ว โดยทั่ว ๆ ไป (ยกเว้นแก้วเจียระไนที่มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นโลหะ) แก้วทนความร้อน เครื่องถ้วยเซรามิกเคลือบ กระดาษ และพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารตัวภาชนะจะไม่ร้อน จะร้อนเฉพาะอาหาร

3. การดูดกลืนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถดูดกลืนได้โดยน้ำในอาหาร หรือวัสดุที่มีส่วนผสมของน้ำอยู่ทำให้กำลังของคลื่นลดลงไป ซึ่งกำลังที่ถูกกลืนไว้จะเปลี่ยนสภาพทำให้

วัสดุร้อนขึ้น วัสดุที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนอกจากจะเป็นอาหาร น้ำ หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ยังประกอบไปด้วยเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบทั้งหมด เนื่องมาจากเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบจะมีรูพรุนมากมายทำให้มีความชื้นหรือละอองน้ำแทรกอยู่รูพรุนนั้น เมื่อนำมาใช้ในเตาไมโครเวฟละอองน้ำจะร้อน ส่งผลให้ตัววัสดุร้อนไปด้วย วัสดุที่เป็นพลาสติกบางประเภทมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) เป็นฉนวนสูง เมื่อนำมาเข้าในเตาไมโครเวฟจะถูกทำให้ร้อนขึ้น ตัวพลาสติกจะหลอมละลาย

3.2.5 ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Magnetron) ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (Waveguide) และบริเวณทำความร้อน (ที่ใส่วัสดุทำความร้อน (Applicator)) การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดผ่านมายังท่อนำคลื่นและเข้าสู่บริเวณทำความร้อนตามลำดับ

คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อชนกับวัสดุทำความร้อนอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ ดังนั้นโดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น (Isolator) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อนเพื่อให้ระบบไมโครเวฟเกิดประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

บริเวณทำความร้อนเป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นเดี่ยว (Single-mode) หรือคลื่นผสม (Multi-mode) สำหรับบริเวณทำความร้อนที่ออกแบบมาเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเป็นคลื่นเดียวนั้นจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณทำความร้อน วัสดุทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังในการเลือกขนาดและชนิดวัสดุ เครื่องไมโครเวฟชนิดคลื่นเดี่ยว (Single-mode) เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กหรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นน้อย (Low-Lossy Materials) แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ สำหรับเครื่องไมโครเวฟที่มีลักษณะเป็นคลื่นผสม (Multi-mode) สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าโดยทำให้บริเวณทำความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุและมีการเพิ่มความถี่จากแหล่งกำเนิดคลื่นทำให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การทำความร้อนภายในวัสดุมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นเครื่องไมโครเวฟลักษณะคลื่นผสมจึงเหมาะสำหรับการทำความร้อนวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นสูง (High-lossy Materials) หรือเมื่อต้องการให้วัสดุที่ทำความร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

โดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟที่ผลิตมีอยู่สองชนิด คือ แบบเตาอบ (มีลักษณะเป็น คลื่นผสม) และแบบท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว) ที่ผ่านมาเครื่องไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิต แบบเตาอบ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบนั้นทำได้ยากมาก มี กระบวนการซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบ และตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดียวเป็นหลัก

3.2.6 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก

1. หลักการพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก เมื่อ ถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลาย ล้านครั้ง โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 3.7 โมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีสภาพเชิงขั้ว (Dipole) ที่ เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วย ขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลเรียง ตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่น การสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็ว ของสภาพเชิงขั้วทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในรูป ของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (Megahertz, MHz) ซึ่งข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (Radio frequency) และคลื่นความถี่สำหรับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave Application) (Jones and Rowley [3-7]) กำหนดความถี่วิทยุไว้ดังนี้

1) $13.56 \text{ MHz} \pm 0.05\% (\pm 0.00678 \text{ MHz})$

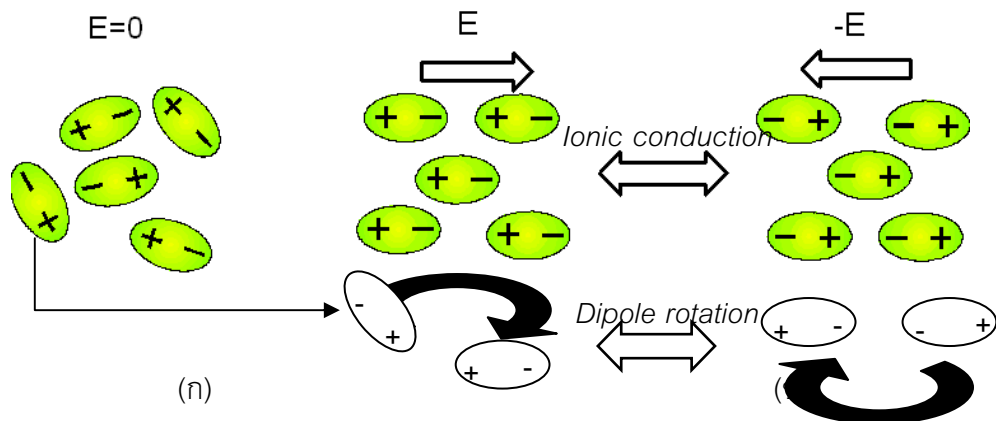
2) $27.12 \text{ MHz} \pm 0.6\% (\pm 0.16272 \text{ MHz})$

3) $40.68 \text{ MHz} \pm 0.05\% (\pm 0.02034 \text{ MHz})$

และได้กำหนดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟไว้ดังนี้

1) 900 MHz (ขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศ)

2) $2450 \text{ MHz} \pm 50 \text{ MHz}$



ภาพที่ 3.7

ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

(ก) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า

(ข) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้า

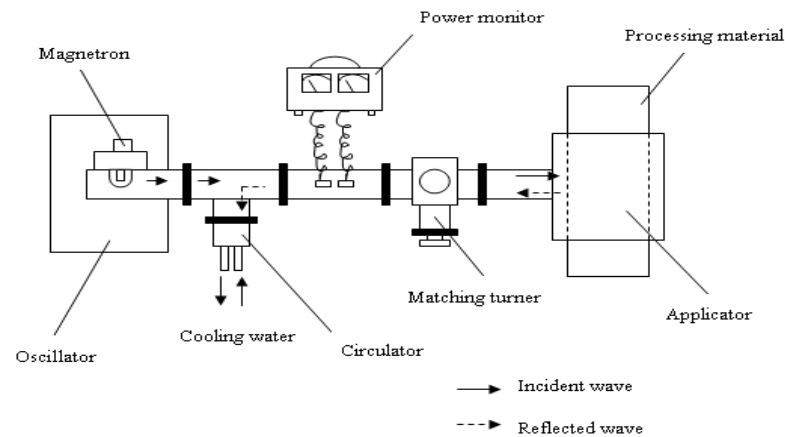
ซึ่งในปัจจุบัน เตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 inch (12.192 cm) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 13 inch (33.02 cm) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 kW สามารถทำให้น้ำจำนวน 2.5 lb (1.134 Kg) ระเหยได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ปัญหาของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของอุณหภูมิ การกระจายของความชื้น รวมทั้งตัวขึ้นทดสอบ (Sample) ซึ่งเป็นสมบัติวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) ดังนั้น การรู้สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) จึงมีความจำเป็น รวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้นและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเอง

3.2.7 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

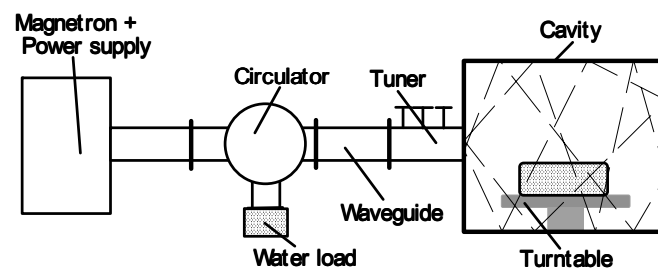
ในระบบไมโครเวฟทั่วไปประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่น (Generator) ท่อนำคลื่น (Waveguide) และเตาอบ (Cavity) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีความสำคัญตามหน้าที่ของมัน เมื่อเราเข้าใจว่าเตาอบทำงานอย่างไร การทำงานภายในของไมโครเวฟ จะทำให้

ภาระร้อนได้นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบส่วนประกอบและเอาส่วนประกอบเหล่านี้มารวมกันเป็นระบบเดียวกัน เมื่อเราเข้าใจถึงอิทธิพลต่าง ๆ ของเงื่อนไขไมโครเวฟเราก็จะสามารถนำความเข้าใจที่มีอยู่ไปออกแบบไมโครเวฟขึ้นได้นั้นอย่างน้อยเราต้องเข้าใจการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จะสรุปถึงความถี่ของไมโครเวฟที่มาประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนชนิดของส่วนประกอบไมโครเวฟที่นำไปใช้งานได้

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กทริกมีกลไกเช่นเดียวกันแต่มีวิธีการในการที่ทำให้บรรลุเป้าหมายแตกต่างกัน โดยระบบพื้นฐานของระบบเหล่านี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์และใช้ท่อนำคลื่นไปยังชิ้นงาน (Load) ที่อยู่ภายในแอปพลิเคชัน (Applicator) ดังภาพที่ 3.8



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.8

องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในลักษณะต่าง ๆ

(ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

จากภาพที่ 3.8 พบว่าแมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่นทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในคาวิตีหรือแอปพลิเคชัน เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุ จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) ไป ซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุและคุณลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟขณะชนกับวัสดุ อาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่น หรือที่เรียกทั่วไปว่า เซอร์คูลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนั้นยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นเพื่อที่จะลดพลังงานสะท้อนกลับนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) มาติดตั้งระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ปรับให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับในตัววัสดุได้ดีขึ้นโดยการสะท้อนของคลื่นที่ผิววัสดุลดลง ส่งผลทำให้ระบบไมโครเวฟทำงานที่ประสิทธิภาพสูงที่สุดอีกด้วย

3.2.8 ระบบควบคุมการรั่วไหลและความปลอดภัย (Leakage and Safety Control Systems)

ในการใช้คลื่นไมโครเวฟจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณการรั่วของรังสีจากระบบการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทั้งการลดการแทรกของคลื่นที่รบกวนในย่านความถี่คลื่นวิทยุให้อยู่ภายในข้อจำกัดที่ยอมรับได้และเพื่อความปลอดภัยของบุคคล ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ ไซค์ (Chokes) หรือโพรงลดกำลัง (Attenuating Tunnels) โดยทำการติดตั้งไซค์ที่บริเวณช่องเปิดของสายพานลำเลียง รอบประตู หรือหน้าต่าง รอยต่อ และบริเวณอื่นซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน โดยหลักการออกแบบที่ดีในทางวิศวกรรมคือ การรักษาระดับการรั่วให้อยู่ในระดับต่ำข้อกำหนดซึ่งถูกควบคุมโดยองค์กรของรัฐบาล โดยคลื่นไมโครเวฟนี้จัดเป็นคลื่นที่ปลอดภัยไม่มีสารกัมมันตรังสีตกค้าง แต่คลื่นไมโครเวฟก็ยังมีอันตรายเมื่อโดนคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลานานและในปริมาณมาก โดยอาจมีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์หากมีไมโครเวฟรั่วไหลและรับคลื่นไมโครเวฟมากกว่า 5 mW/cm^2 เช่น มะเร็งผิวหนัง ตาเป็นต้อกระจก ผู้หญิงมีครรภ์อาจแท้งบุตรได้ ทำให้เกิดการเป็นหมันชั่วคราวสำหรับผู้ชาย การไหลเวียนของเลือดผิดปกติ เกิดอาการหน้ามืด

และวงเวียน ทำให้มีอาการความจำเสื่อมได้ แต่ในกรณีที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟน้อยกว่า 5 mW/cm^2 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย



ภาพที่ 3.9

เครื่องตรวจสอบการรั่วไหล (Portable Microwave Leakage Detector)

3.2.9 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

ความรู้เกี่ยวกับคุณลักษณะของสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกกระบวนการของไมโครเวฟมีความจำเป็นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม การแผ่รังสีเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่าง อากาศ วัตถุได้ ไมโครเวฟนั้นประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการที่จะควบคุมความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ เราจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยเริ่มจากการกำหนดไดอิเล็กตริกเปอริมิตติวิตี (Dielectric Permittivity) ของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Osepchuk [3-11])

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0\left(\varepsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ϵ คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Complex Dielectric Permittivity) (โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ϵ_0 คือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (Free Space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ϵ'_r เป็นจำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ϵ''_r เป็นจำนวนจินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor)) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric Loss Factor กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (3.2)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่า ประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$))

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'_r \epsilon_0} \quad (3.3)$$

ประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ ($\tan \delta$) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

Von Hippel [3-9] รวบรวมคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุต่าง ๆ (เช่น คริสตัล เซรามิค แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และ ไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200$ °C

3.2.10 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept)

ค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ สำหรับคลื่นไมโครเวฟชนิดโหมด TE₁₀ ที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อผ่านเข้าไปในท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในเท่ากับ $a \times b$ ความยาวคลื่น (λ_g) ภายในท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถหาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2 - \left(\frac{0 \cdot \lambda_0}{2b}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (3.4)$$

เมื่อความยาวคลื่นในสุญญากาศ (λ_0) มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$ ดังนั้นความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริก (λ_{mg}) สามารถคำนวณได้จาก (Barringer et al. [3-12])

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ

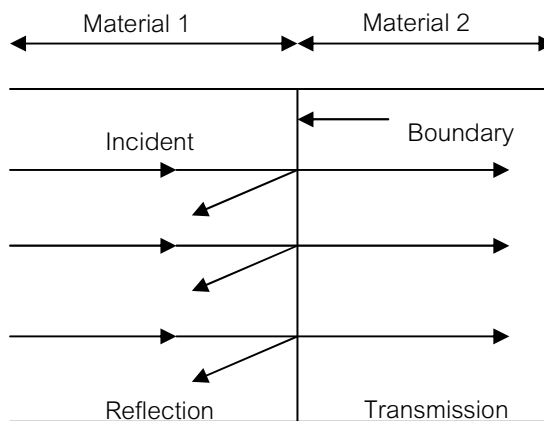
ความลึกในการทะลุทะลวง (D_p) หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้สามารถหาได้จาก

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (3.6)$$

เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและลอสแทนเจนท์เปลี่ยนไป ค่าความลึกในการทะลุทะลวงภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

3.2.11 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflection, Transmission and Absorption)

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการกล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับพลังงานโดยวัสดุใดๆ ได้ (ดังภาพที่ 3.10) ซึ่งความสามารถทั้งสามอย่างนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย



ภาพที่ 3.10

รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [3-1])

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่มาปะทะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด (เช่น รอยต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับอากาศ) คลื่นส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ของวัสดุทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{reflect} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (3.7)$$

สมการนี้ใช้ได้กับสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัสดุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุทดสอบ

สำหรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกสองชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{Transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (3.8)$$

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกบางชนิด (เช่น แก้วและพลาสติก) คลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านโดยไม่มีการดูดซับและสะท้อนกลับของพลังงาน

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกวัสดุจะถูกดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations: Q) ซึ่งปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังแสดงตามสมการต่อไปนี้ (Metaxas [3-12])

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (3.9)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง H คือสนามแม่เหล็ก เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีสภาพเชิงขั้วทางแม่เหล็ก จึงไม่มีการดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.10) ใหม่ได้เป็น

$$Q = \sigma |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (3.10)$$

ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square Value) ของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generation) ดังรูปสมการต่อไปนี้ (Ratanadecho et al. [3-14])

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r (\tan \delta) E^2 \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.11) ค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริกลอสมแพกเตอร์ และค่าสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนี้ยังแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าประสิทธิภาพลอสมแพกแทนเจนท์ของวัสดุอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังมีผลจากปัจจัยอื่น ๆ อีกเช่น ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และขนาดของวัสดุทดสอบ เป็นต้น

สมการ (3.11) มีความสำคัญมากในการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

3.2.12 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อน

ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในภาควัตถุนั้นสามารถหาได้จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ตามรายละเอียดต่อไปนี้ (Metaxas [3-13])

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left[\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right] E = 0 \quad (3.12)$$

$$\epsilon_r = n^2 \quad (3.13)$$

เมื่อ

E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity, V/m)

H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, A/m)

k_0 คือ การแผ่ของคลื่น (Propagation of Wave)

j คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density, A/m²)

σ คือ สมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity, S/m)

μ_r คือ สมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Magnetic Permeability)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (Angular Frequency, rad/s)

ϵ_0 คือ สมบัติไดอิเล็กตริกในสภาวะสุญญากาศ (Permittivity of Vacuum, F/m)

n คือ ดัชนีหักเห (Refractive Index)

ϵ_r คือ สมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใด ๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ การส่งผ่านและการสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ

ในส่วนของการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจะทำการวิเคราะห์เฉพาะความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโหลดภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในภาควัตถุ 3 มิติ (อากาศไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน) โดยสมมติให้ภายในโหลดมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และโหลดเองสามารถที่จะกำเนิดความร้อน

ภายในด้วยการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน สมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการถ่ายเทความร้อนในโหมดการถ่ายเทความร้อนเป็นดังนี้

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3.14)$$

เมื่อ

δ_{ts} คือ สัมประสิทธิ์เชิงเวลา (Time-Scaling Coefficient)

T คือ อุณหภูมิ (Temperature, K)

t คือ เวลา (Time, s)

C_p คือ ความจุความร้อนของสสาร (Heat Capacity at Constant Pressure, $J/(kg \cdot K)$)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density, kg/m^3)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity, $W/(m \cdot K)$)

Q คือ ปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (Local Volumetric Heat Generation Term, W/m^3) ซึ่งได้จากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

3.3 กระบวนการไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Microwave Vacuum Processing)

กระบวนการเชิงอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องทำงานที่สภาวะความดันต่ำ เพื่อต้องการลดอุณหภูมิจุดเดือดของสารละลาย (Solvent) ที่อยู่ภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ รวมทั้งเพิ่มความแตกต่างของอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion Rate) ของสสาร ในทุกกระบวนการที่อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศขณะรับพลังงานความร้อน พบว่าการถ่ายเทความร้อนไปยังตัววัสดุกลับยากขึ้นทั้งนี้เพราะข้อจำกัดของการถ่ายเทความร้อนในโหมดของการพาความร้อนซึ่งปกติจะมีความสำคัญมากสำหรับกรณีกระบวนการที่ทำงานในสภาวะบรรยากาศปกติ แต่การพาความร้อนกลับกลายเป็นสิ่งไม่สำคัญสำหรับกรณีกระบวนการที่ทำงานที่สภาวะความดันต่ำหรือกระบวนการสุญญากาศ

กลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญในกระบวนการสุญญากาศทั่ว ๆ ไปจึงอยู่บนพื้นฐานของโหมดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนที่มาจากแหล่งความร้อนที่เป็นของไหล และในบางกระบวนการจะประยุกต์ใช้วิธีการฉีดไอน้ำที่ความดันต่ำเข้าไปในระบบเพื่อทำ

ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการกลั่นตัว (Condensation) ของไอน้ำบนตัววัสดุ การนำความร้อนโดยปกติจะช้าและยากต่อการควบคุมและยังต้องการพื้นผิวในแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาก ดังนั้นในหลายกรณีเทคนิคการใช้ไอน้ำที่กลั่นตัวนี้ จึงไม่เป็นที่ยอมรับ

กระบวนการทำความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศมักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมโลหะ เช่นกระบวนการหลอมละลายโลหะเพื่อทำให้มันบริสุทธิ์มากขึ้นโดยที่กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดายังมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพ ดังนั้นในอุตสาหกรรมหลอมละลายโลหะส่วนใหญ่จะอาศัยกระบวนการหลอมละลายโดยใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (Low Frequency Introduction) เพราะตัววัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง (High Electrical Inductivity) เช่นกัน การใช้เทคนิคไมโครเวฟในกระบวนการหลอมละลายโลหะก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเพราะสามารถเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สภาวะสุญญากาศ เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ

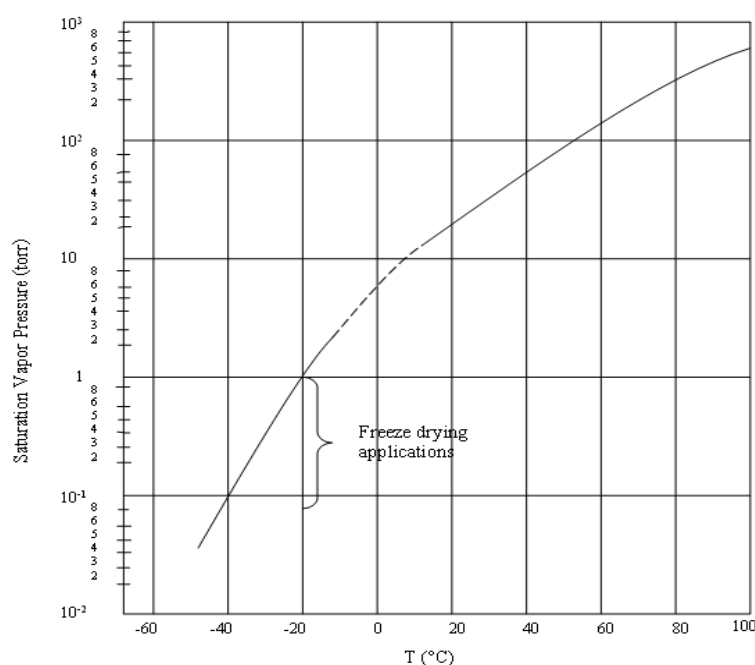
หากเราทราบอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ค่ากำลังกำลังการดูดซับทั้งหมดก็สามารถประเมินได้เช่นกัน ในขั้นตอนนี้เราสามารถที่จะประมาณค่าปริมาตรวัสดุที่น้อยที่สุดที่สามารถบรรจุไว้ภายในแอพพลิเคเตอร์ โดยปกติขนาดของแอพพลิเคเตอร์เพื่อทำความร้อนจะออกแบบมาเป็นรูปแบบเฉพาะสำหรับแต่ละกระบวนการ ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร อาทิ เช่น ชนิดของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ อุณหภูมิสูงสุดภายในระบบและความถี่ที่ใช้ในระบบ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในแง่ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ระบบเชิงอุตสาหกรรมนิยมใช้ความถี่ที่ 2450 MHz มากกว่า 915 MHz

สำหรับแอพพลิเคเตอร์หรือควิตตี้ที่ใช้กับกระบวนการไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown) ของสนามไฟฟ้าที่สภาวะความดันนั้น ๆ ด้วย ในการออกแบบสร้างแอพพลิเคเตอร์นั้น ส่วนใหญ่มาจากการขึ้นรูปของแผ่นโลหะที่สามารถทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ โดยการออกแบบจะต้องอิงตามโค้ดมาตรฐานสากล เช่น British Standard Specification No.5500)

พื้นฐานของการดำเนินการในระบบการอบแห้งสุญญากาศก็คือ การดำเนินการในส่วนความดันเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของสารละลายที่อยู่ภายในวัสดุให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด นั่นคือควบคุมให้อุณหภูมิจุดเดือดให้ต่ำลงนั่นเอง ซึ่งข้อกำหนดของอุณหภูมินี้มักขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการและชนิดของกระบวนการด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบเพื่อใช้งานจริงจะต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและดีที่สุดสำหรับแต่ละกระบวนการ จุดสำคัญที่ต้องพิจารณาต่อไปก็คือ จุดเดือดของสารละลายที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (เช่น สารละลาย

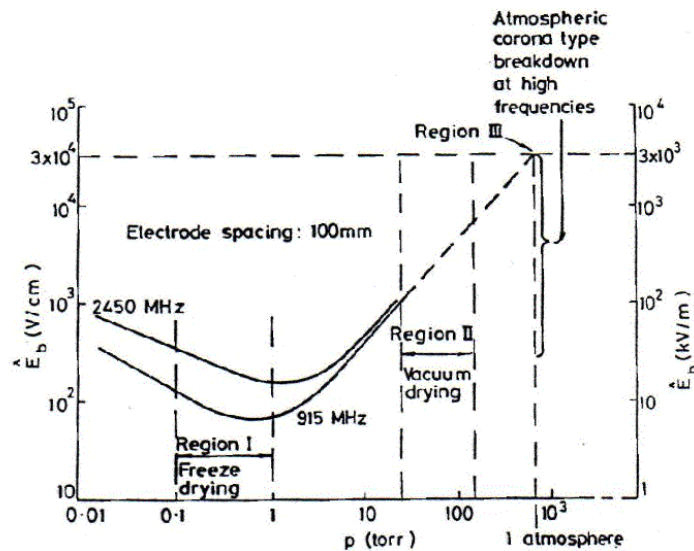
น้ำตาล-น้ำ) กรณีนี้เราอาจต้องออกแบบกระบวนการให้ทำงานที่ความดันต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ได้แสดงไว้ในกราฟคุณลักษณะของอุณหภูมิจุดเดือดและความดันซึ่งเป็นกรณีสารละลายบริสุทธิ์ ภาพที่ 3.11 แสดงอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำกับความดันในช่วง 1-133 kPa (หรือประมาณ 0.01 ถึง 1000 torr) จะสังเกตเห็นว่าเส้นโค้งลาดลดลงอย่างต่อเนื่อง (จุดเยือกแข็งเปลี่ยนแปลงตามความดันบรรยากาศ) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C แสดงถึงบริเวณของการเกิดการระเหิด (Sublimation) ซึ่งมีการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งกลายเป็นไอ สำหรับกระบวนการการทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze Drying) สามารถดำเนินการได้ที่ความดันในช่วง 13-133 Pa (ประมาณ 0.1 ถึง 1 torr) ดังแสดงในช่วง I ของภาพที่ 3.12

พิจารณาจากภาพที่ 3.12 ค่าความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ควรหลีกเลี่ยง โดยอาจใช้ติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งกำลังไมโครเวฟที่มีคุณภาพที่ตัวแหล่งจ่าย เพื่อลดค่าของมัลลิ่ง โดยปกติการเกิดเบรกดาวนของสแนมไฟฟ้าจะลดลงตามสภาวะสุญญากาศ ยกเว้นในช่วง I ค่าสแนมไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่ลดลง หากความเข้มข้นของสแนมไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวนมีค่าสูงเกินไป อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์การอาร์คหรือเกิดพลาสมาขึ้นมาได้



ภาพที่ 3.11

ความดันที่สภาวะอิ่มตัวด้วยไอน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (1 torr=133.31 Pa) (Metaxas [3-13])



ภาพที่ 3.12

การเกิดเบรกดาวนซ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอากาศ (ค่าสูงสุด)
ที่ขึ้นอยู่กับความดันที่ความถี่สองค่า (1 torr=133.31 Pa) (Metaxas [3-13])

3.3.1 ข้อดีของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยทั่วไป ไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้ด้วยความลึกที่มากกว่า สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการเกิดความร้อนทั่วทั้งปริมาตร (Volume Heating) มีข้อได้เปรียบดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะถ่ายเทจากภายในไปสู่ผิวนั่นคือ อุณหภูมิภายในจะสูงกว่าภายนอก ความดันบางส่วนที่เพิ่มขึ้นจะขับดันให้ของเหลวระเหยออกสู่ผิวน้ำ
2. เนื่องจากชั้นที่อยู่นอกสุดไม่ได้แห้งแบบสมบูรณ์ ผิวน้ำจึงยังคงแพร่กระจายอยู่
3. ของเหลวจะระเหยจากภายในผลิตภัณฑ์ออกมาตามโครงสร้างรูพรุนของวัสดุ เป็นแบบ Macro-Capillary ทำให้วัสดุแห้งอย่างรวดเร็ว
4. ความร้อนของน้ำและสารละลายที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่มีการเลือกอย่างเหมาะสม เนื่องจากการสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกของน้ำที่มีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่แห้ง

5. ความชื้นของผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้แห้งอย่างรวดเร็วและทั่วถึงด้วยความสามารถการนำความร้อนที่ต่ำ

6. มีการแห้งที่คงที่ของพื้นผิว ปราศจากการสูญเสียจากความเสียดทาน

7. มีประสิทธิภาพสูงเมื่อพิจารณาจากพลังงานที่ใส่เข้าไป

8. ควบคุมด้วยความเร็วสูงของการส่งถ่ายพลังงาน

9. ใช้เวลาในกระบวนการน้อยนั่นคือ เหมาะสมกับการผลิตที่คุมโดยระบบ

อัตโนมัติ

ด้วยความเหมาะสมของเทคโนโลยีการอบแห้งสุญญากาศ จะเกิดประโยชน์กับผลิตภัณฑ์ดังนี้

1. อุณหภูมิอบแห้งต่ำทำให้รักษาสภาพของผลิตภัณฑ์

2. ไม่มีออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์

3. คงคุณค่าทางโภชนาการสูง

4. มีกลิ่น รสที่ดี

5. ผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำ

6. สูญเสียผลิตภัณฑ์น้อยมาก

7. การแห้งของชั้นผิวคงที่ ปราศจากการสูญเสียจากความเสียดทาน เพราะไม่มีความเค้นทางกลต่อผลิตภัณฑ์

ผลของเทคโนโลยีไมโครเวฟสุญญากาศเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะกระบวนการเทคโนโลยี ซึ่งให้ประโยชน์ดังนี้

1. การควบคุมขอบเขตทั่วไปของพลังงานด้วยการควบคุมความเร็วสูง

2. กำหนดและใช้เวลาสั้นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์

3. บริเวณที่หล่อเย็นอยู่ที่ทางออกสำหรับผลิตภัณฑ์ที่หนึ่ง

4. เป็นระบบปิด

5. การตั้งค่าการทำงานที่แตกต่างกันของเครื่องทำได้ง่ายในแต่ละผลิตภัณฑ์

6. การทำงานต่อเนื่องสามารถทำได้

7. ใช้เวลาน้อย ประสิทธิภาพสูงและคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจ

8. เครื่องขนาดเล็กกว่าระบบการอบแห้งโดยเครื่องสุญญากาศแบบธรรมดา

9. ทำงานได้ดีเพราะระบบสามารถนำมาปรับเข้ากันได้ดีและมีความสะอาด

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ

โดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟที่ผลิตมีอยู่สองชนิด คือ แบบเตาอบ (มีลักษณะเป็นคลื่นผสม) และแบบท่อนำคลื่น (มีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว) ที่ผ่านมาเครื่องไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตแบบเตาอบ ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมในการทำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาอบนั้นทำได้ยากมาก มีกระบวนการซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบและตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดียวเป็นหลัก

จากการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) (ภาพที่ 4.1) มาแล้วนั้น ผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งวัสดุทดสอบในหลายชนิดซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ จึงได้ทำการขยายขนาดของระบบอบแห้งเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้นอีก 2 ระบบ คือ ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron (ภาพที่ 4.2) และแบบ Single-Feed High Power Magnetron (ภาพที่ 4.3)

งานวิจัยในบทนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทั้งแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron และ Single-Feed High Power Magnetron แต่จะเน้นในแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron ที่สามารถอบแห้งวัสดุที่มีคุณภาพสูงในปริมาณ 15 ถึง 20 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง (กรณีไม่บรรจุถึงหมุน) โดยตัวเครื่องมีความกว้าง 700 mm ยาว 1500 mm และสูง 1800 mm คาวิตีที่ใช้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและมีลักษณะการเกิดคลื่นแบบหลายโหมด (Multi-mode) กำลังแมกนีตรอน 1600 W (ป้อนคลื่นสองตำแหน่ง) ความถี่ 2.45 GHz และใช้ท่อนำคลื่นในโหมด TE_{10} (Transverse Electric Wave) ในส่วนของคาวิตีจะมีลักษณะการเกิดคลื่นแบบหลายโหมด (Multi-mode) ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในคาวิตี จึงได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยจุดประสงค์หลักของงานวิจัยในบทนี้คือ

1. ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทั้งแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron และ Single-Feed High Power Magnetron
2. วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควิตีแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย
3. สร้างเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทั้งแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron และ Single-Feed High Power Magnetron

เมื่อทำการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยแล้วนั้น จะนำผลที่ได้ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ และประกอบเป็นเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทั้งชนิด Multi-Feed Low Power Magnetron และ Single-Feed High Power Magnetron ต่อไป



ภาพที่ 4.1 ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
(Laboratory Scale)



ภาพที่ 4.2 ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
(Multi-Feed Low Power Magnetron)

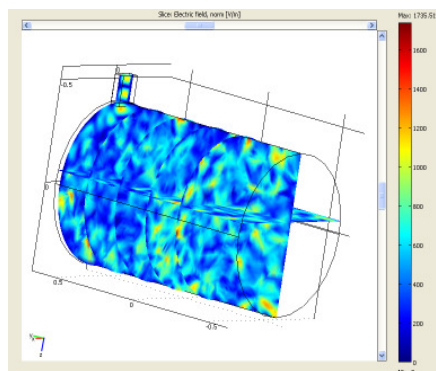


ภาพที่ 4.3 ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศ
(Single-Feed High Power Magnetron)

4.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิตี้แบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย

ปัจจุบันกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟได้มีบทบาทเป็นอย่างมาก เนื่องจากใช้เวลาน้อย มีประสิทธิภาพสูงและเป็นกระบวนการสะอาด จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมาก ในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการอบแห้งอาหารเพราะสามารถที่จะถนอมและเก็บได้เป็นเวลานาน ประเด็นหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการศึกษานี้ คือ ลักษณะการเกิดความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในโหลด (Heating Non-uniformity in Loaded) ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอภายในควาวิตี้ ทำให้เกิดจุดร้อนและจุดเย็น (Hot and Cold Spots) (Tse et al. [4-1]) ตัวอย่างปรากฏการณ์จุดร้อนและจุดเย็นได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal Runaway) ในบางส่วนของวัสดุเซรามิคส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายหรือมีคุณภาพต่ำ (จุดร้อน) หรือในบางกรณีเช่นอาหารที่ต้องการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อน แต่ความร้อนบางจุดนั้นมีค่าไม่มากพอส่งผลให้แบคทีเรียยังสามารถเจริญเติบโตขึ้นได้ และทำให้อาหารเป็นพิษ (จุดเย็น) (George et al. [4-2]) สาเหตุดังกล่าวทำให้นักวิจัยมีความต้องการที่จะออกแบบระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟให้สามารถเกิดความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุหรือโหลดเพื่อให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [4-3])

ดังนั้นในส่วนของการออกแบบควาวิตี้จึงได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิตี้แบบ 3 มิติ เพื่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ดีภายในควาวิตี้ ของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทั้งชนิด Multi-Feed Low Power Magnetron ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป และแบบ Single-Feed High Power Magnetron (ภาพที่ 4.4)

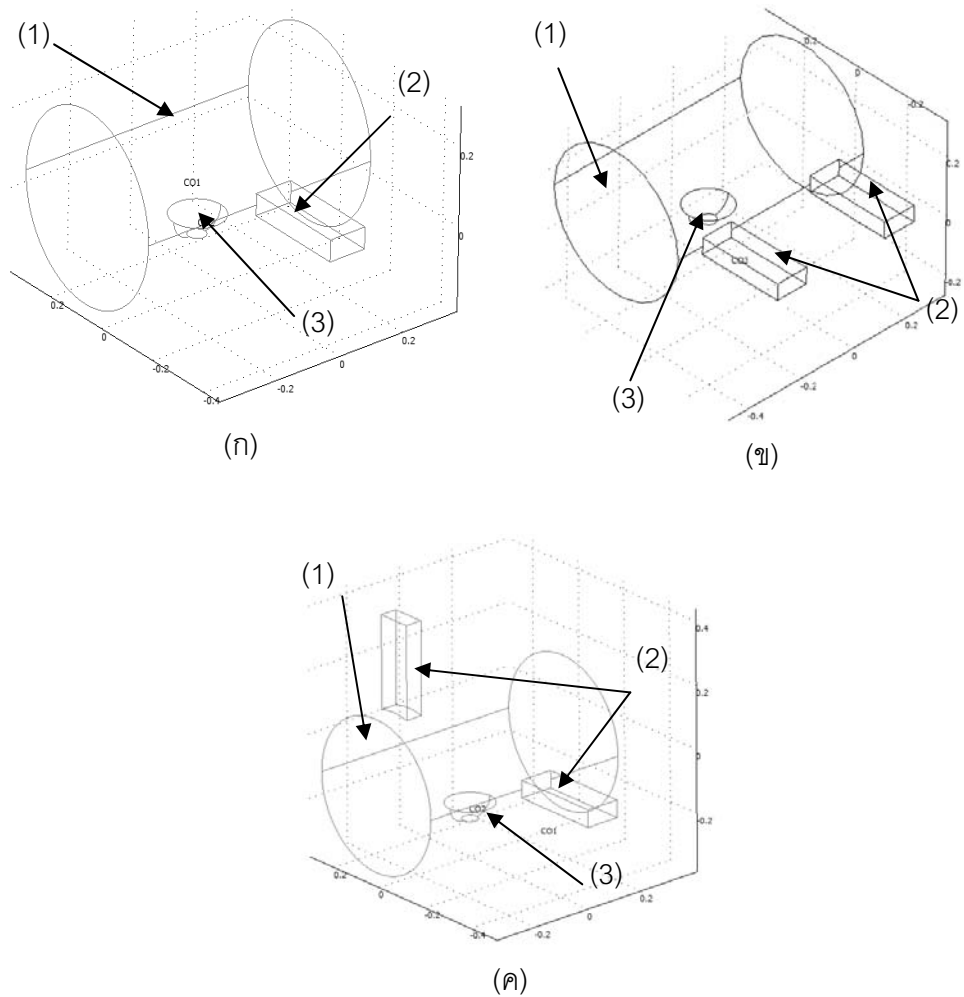


ภาพที่ 4.4

การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 3 มิติ

4.1.1 แบบจำลองทางกายภาพ

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิ้แบบ 3 มิติ สำหรับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้น จะใช้แบบจำลองทางกายภาพดังภาพที่ 4.1 โดยจะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว กรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรและกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร



ภาพที่ 4.5

แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการวิเคราะห์การทำความร้อน

วัสดุไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(ก) กรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว (ข) กรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร

และ (ค) กรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร

จากภาพที่ 4.5 แสดงส่วนประกอบของการจำลองระบบไมโครเวฟโดยมีตำแหน่งป้อนคลื่นรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คาวิตีแบบมัลติโหมด (Multimode Cavity) เป็นที่บรรจุโหลด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm ผนังของคาวิตีกำหนดให้เป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfect Conducting Wall) ส่งผลให้ผนังไม่มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ
2. ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟในโหมด TE_{10}
3. โหลดเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ในที่นี้จะใช้น้ำ (Relative Permittivity = 78-12j) ลักษณะเป็นถ้วยครึ่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm

ในส่วนของการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในโหลดและคาวิตี ได้ตั้งสมมติฐานที่ใช้วิเคราะห์ดังนี้

1. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของโหลดมีค่าคงที่
2. ค่าสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของโหลดมีค่าคงที่
3. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของอากาศภายในคาวิตีเป็นค่าคงที่
4. โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
5. ไม่มีการถ่ายเทมวลสารออกจากโหลด
6. ไม่มีการถ่ายเทพลังงานออกจากโหลด
7. ไม่มีอิทธิพลของการพาความร้อนระหว่างโหลดและสิ่งแวดล้อม
8. ผนังทุกด้านของคาวิตีเป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfect Conducting Wall)

4.1.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในคาวิตี

ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในคาวิตีนั้น สามารถหาได้จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ (ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13)) ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left[\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right] E = 0 \quad (4-1)$$

$$\epsilon_r = n^2 \quad (4-2)$$

เงื่อนไขขอบเขตของการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและ
ควาร์ตี่โดยกำหนดให้เป็นตัวนำยิ่งยวด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$n \times E = 0 \quad (4-3)$$

เงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องของคลื่นไมโครเวฟที่ผิวรอยต่อระหว่างโหลด
และอากาศภายในควาร์ตี่ สามารถเขียนได้เป็นดังนี้

$$n \times (H_1 - H_2) = 0 \quad (4-4)$$

$$n \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (4-5)$$

สำหรับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำหนดให้

$$E_x(t_0), E_y(t_0), E_z(t_0) = 0 \quad (4-6)$$

4.1.3 การวิเคราะห์ความร้อนภายในโหลด

ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจะทำการวิเคราะห์เฉพาะความ
ร้อนที่เกิดขึ้นภายในโหลดภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาร์ตี่กรณี 3 มิติ (อากาศไม่มีผลต่อ
การดูดซับพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน) โดยสมมติให้ภายในโหลดมีการถ่ายเทความร้อนด้วย
การนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และโหลดเองสามารถที่จะกำเนิดความร้อนภายในด้วยการ
เปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน สมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการ
ถ่ายเทความร้อนในโหมดการถ่ายเทความร้อน (ดังสมการ (3-15)) เป็นดังนี้

$$\delta_{is} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (4-7)$$

ในการวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะพิจารณาที่โหลดเพียงอย่างเดียว
ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนจะมีเฉพาะที่ผิวโหลดเท่านั้นและไม่มีการถ่ายเทความร้อนออก
จากโหลด (ผนังโหลดเป็นฉนวน) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n \cdot (k\nabla T) = 0 \quad (4-8)$$

ส่วนเงื่อนไขเริ่มต้นของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนกำหนดให้

$$T(t_0) = 0 \quad (4-9)$$

4.1.4 วิธีการหาผลเฉลย

การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกจะวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควิตี้อย่างเดียว ส่วนกรณีที่สองจะวิเคราะห์ทั้งการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหนดและควิตี้อวมถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหนด

ในกรณีวิเคราะห์การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควิตี้อย่างเดียว กำหนดให้เวลาไม่มีผลต่อพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถือว่าปัญหาดังกล่าวอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) จึงทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม COMSOLTM Multiphysics 3.4 [4-4]

สำหรับกรณีวิเคราะห์สมการทางความร้อนซึ่งเวลาจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโหนด ปัญหาดังกล่าวจึงเป็นปัญหาที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Transient) จึงทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม COMSOLTM Multiphysics 3.4 [4-4]

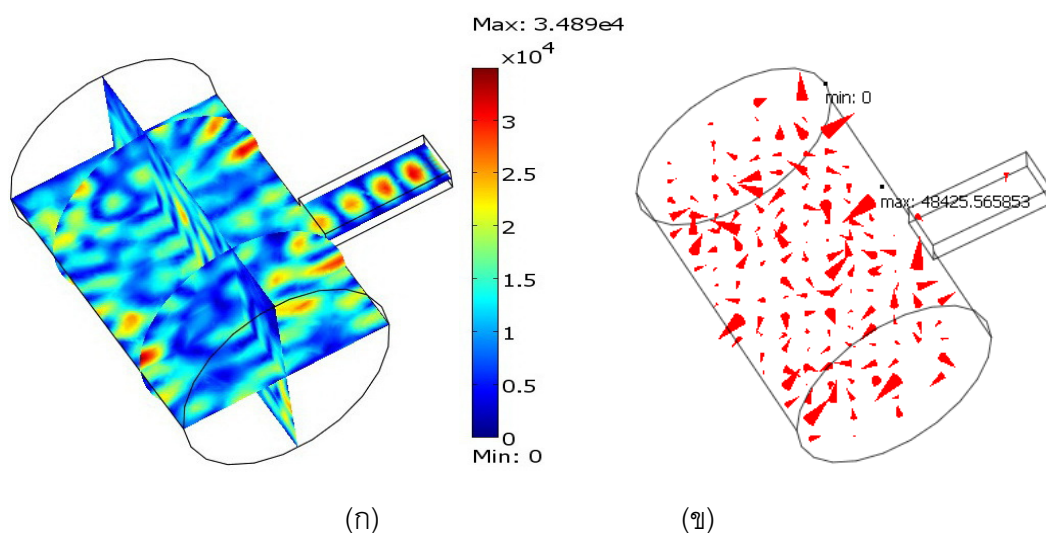
4.1.5 ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

1. ผลการศึกษาแบบจำลองสนามแม่เหล็กในสภาวะที่ไม่มีโหนด

จากภาพที่ 4.6 - 4.8 พบว่าค่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดภายในควิตีที่มีการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว ป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรและป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะมีค่าเท่ากับ 3.48×10^4 V/m, 3.51×10^4 V/m และ 7.70×10^4 V/m ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรมีค่าใกล้เคียงกับกรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว แต่จะมีค่าต่างจากกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรมาก และเมื่อมาพิจารณาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอว่าการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและการป้อน

คลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร เนื่องจากการป้อนคลื่นแบบสมมาตรมีโอกาสเกิดการทับซ้อนของคลื่นที่อยู่ระนาบเดียวกันได้มากเพราะคลื่นที่ออกจากท่อนำคลื่นอยู่ระนาบเดียวกัน ในขณะที่การป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรโอกาสเกิดการทับซ้อนคลื่นมีน้อยเนื่องจากการเคลื่อนตัวของคลื่นไม่ได้อยู่ระนาบเดียวกัน ดังนั้นการป้อนคลื่นแบบสมมาตรจะส่งผลให้พลังงานที่ป้อนเข้าไปเกิดการสูญเสีย หรือกล่าวได้ว่าพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แต่เกิดการสูญเสียพลังงานจากการครอสคัปปลิงกันเองของคลื่น

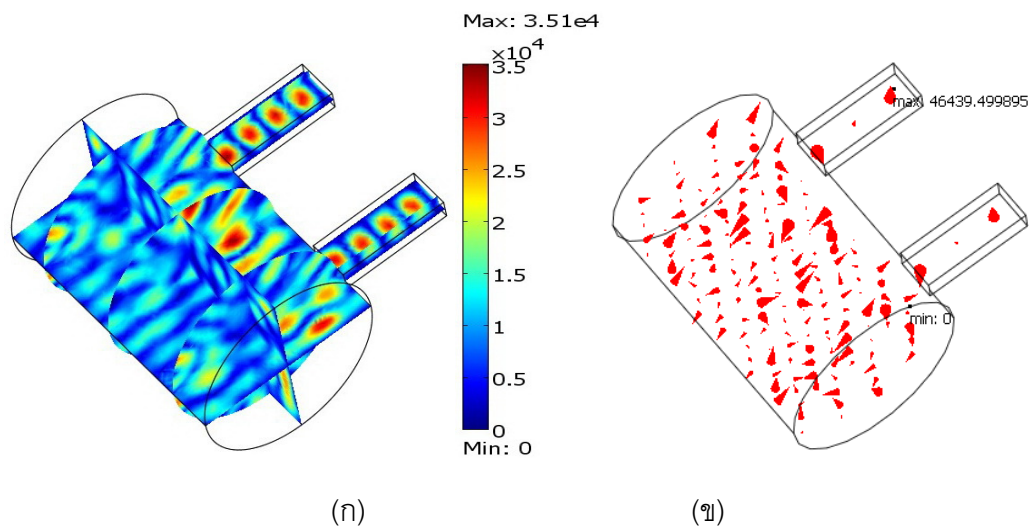
จากภาพที่ 4.6(ข) และ 4.7(ข) พบว่า เวกเตอร์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอของขนาดเวกเตอร์น้อยกว่าภาพที่ 4.8(ข) แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาิตี้ที่มีการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรจะมีความสม่ำเสมอของขนาดเวกเตอร์น้อยกว่าที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร นอกจากนั้นยังพบอีกว่าภาพที่ 4.6(ข) และ 4.7(ข) ยังพบอีกว่าเวกเตอร์ในท่อนำคลื่นเกิดคลื่นนิ่งขึ้น ส่วนภาพที่ 4.8(ข) ไม่พบเวกเตอร์ในท่อนำคลื่น หมายความว่าไม่มีคลื่นนิ่งเกิดขึ้น จากความแตกต่างของเวกเตอร์ภายในท่อนำคลื่นของภาพที่ 4.6(ข), 4.7(ข) และ 4.8(ข) นี้ แสดงว่า หากสภาวะที่ไม่มีโหมดควาิตี้ที่มีการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและสองตำแหน่งแบบสมมาตรมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายต่อแมกนีตรอนจากคลื่นไมโครเวฟย้อนกลับมากกว่ากรณีที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร



ภาพที่ 4.6

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว

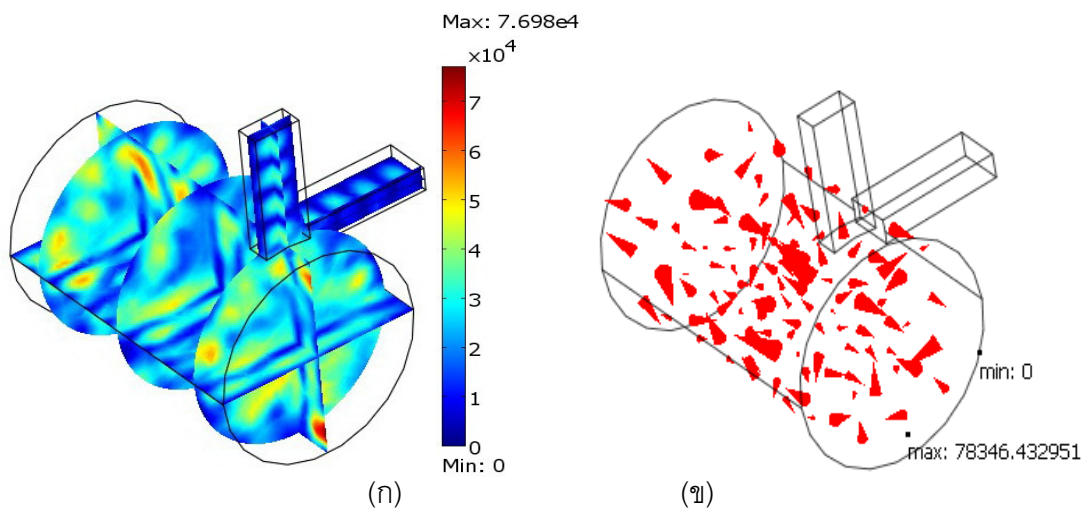
(ก) Slice Plot Type (V/m), (ข) Arrow Plot Type



ภาพที่ 4.7

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร

(ก) Slice Plot Type (V/m), (ข) Arrow Plot Type



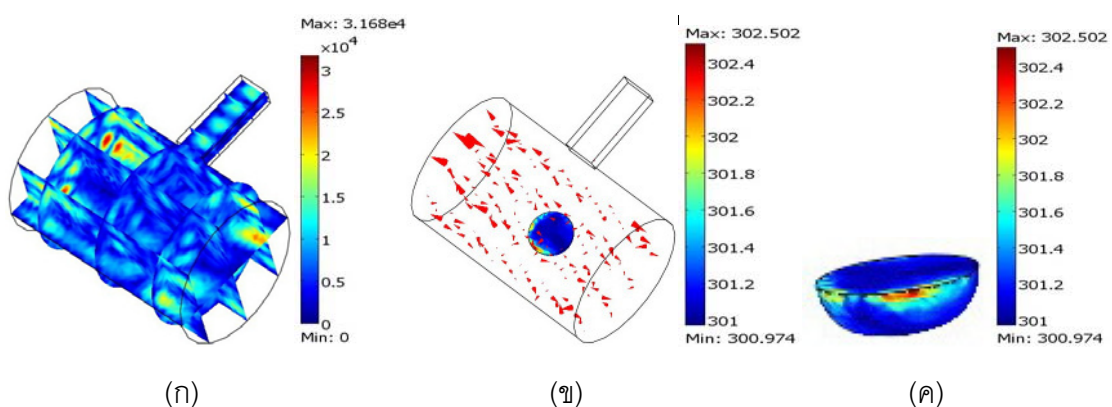
ภาพที่ 4.8

การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร

(ก) Slice Plot Type (V/m), (ข) Arrow Plot Type

2. ผลการศึกษาแบบจำลองในสภาวะที่มีไหล

จากภาพที่ 4.6(ก) และ 4.9(ก) ซึ่งเป็นการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว พบว่าค่ามากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 3.48×10^4 V/m และ 3.17×10^4 ตามลำดับ จากภาพที่ 4.6(ก) พบว่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงและต่ำ (จุดร้อนและจุดเย็น) กระจายทั่วทั้งควาวิตี้แต่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะต่างจากภาพที่ 4.9(ก) ซึ่งมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่เพียง 0.5×10^4 V/m ถึง 1×10^4 V/m ดังนั้นจะเห็นว่าไหลมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้ และจากภาพที่ 4.9(ก) และ 4.9(ข) พบว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงจนมีค่าน้อยมาก (บริเวณที่มีไหล) เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของไหลภายในควาวิตี้



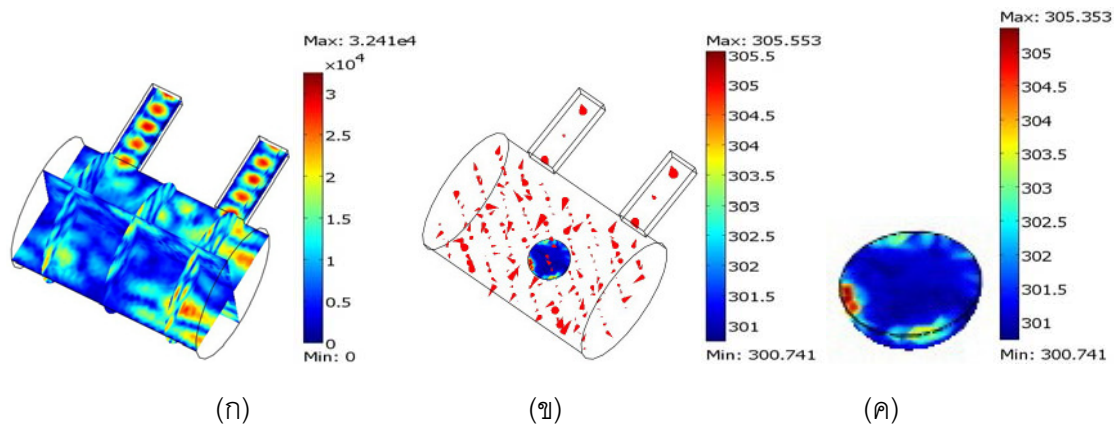
ภาพที่ 4.9

แสดงถึงกรณีที่ควาวิตี้ในสภาวะมีไหลโดยมีการป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว

- (ก) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m), (ข) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/M) และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K) และ (ค) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K)

จากภาพที่ 4.7(ก) และ 4.10(ก) พบว่าค่ามากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 3.51×10^4 V/m และ 3.24×10^4 V/m ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับภาพที่ 4.6(ก) และ 4.9(ก) กล่าวคือ บริเวณที่มีไหลจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยลง (ดู

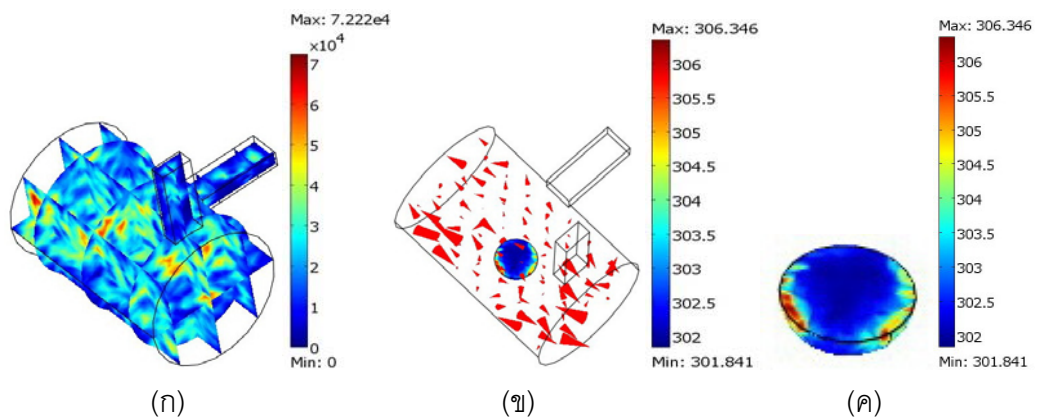
จากเวกเตอร์ภาพที่ 4.10(ข)) และยังเห็นอีกว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรจะดีกว่ากรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียว



ภาพที่ 4.10

แสดงถึงกรณีที่ควิตู้ในสภาวะมีโหลดโดยมีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร

(ก) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m), (ข) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/M) และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K) และ (ค) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K)



ภาพที่ 4.11

แสดงถึงกรณีที่ควิตู้ในสภาวะมีโหลดโดยมีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร

(ก) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m), (ข) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/M) และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K) และ (ค) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด (K)

ส่วนภาพที่ 4.8(ก) และ 4.11(ก) ค่ามากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 7.7×10^4 V/m และ 7.22×10^4 V/m ตามลำดับ ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับกรณีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ กล่าวคือ บริเวณที่มีโหลดจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยลง (ดูจากเวกเตอร์ภาพที่ 4.10(ก) และยังเห็นอีกว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะดีกว่ากรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียวและป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร แสดงให้เห็นว่าโหลดมีผลอย่างมากต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งกรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียวและป้อนคลื่นสองตำแหน่ง ดังนั้นในการวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่ไม่บรรจุโหลดไม่สามารถอธิบายถึงแนวโน้มการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีที่บรรจุโหลดในควิตี้ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากโหลดมีสมบัติไดอิเล็กตริกต่างจากอากาศและยังส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพที่ 4.9(ค), 4.10(ค) และ 4.11(ค) พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในโหลดเมื่อทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 5 วินาที มีค่า 302.5 K และ 305.5 K และ 306.3 K ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทำความร้อนโดยการป้อนคลื่นสองตำแหน่งจะให้ความร้อนที่ดีกว่าการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลด พบว่าการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่าการป้อนคลื่นเพียงตำแหน่งเดียวและการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร แสดงให้เห็นว่ากรณีการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีแล้วยังส่งผลให้เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในโหลดด้วย

จากการศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในโหลดในควิตี้ 3 มิติ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลที่ได้จากแบบจำลองของตำแหน่งป้อนคลื่นรูปแบบต่าง ๆ ภายในควิตี้เปล่าไม่สามารถนำมาอ้างอิงกับการวิเคราะห์ในกรณีที่มีโหลดได้ เนื่องจากมีอันตรกิริยาระหว่างคลื่นกับโหลด
2. การติดตั้งตำแหน่งป้อนคลื่นที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิดครอสคัปปลิงได้ แต่ไม่ทั้งหมด
3. การป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรอาจเกิดการครอสคัปปลิงมากกว่าการป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตร เนื่องจากเกิดการซ้อนทับของคลื่นในระนาบเดียวกัน

4. การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในควิตี้กรณีนี้อ่อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรจะดีกว่ากรณีนี้อ่อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตรและอ่อนคลื่นตำแหน่งเดียว เนื่องจากมีคลื่นรูปแบบใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น

ผลที่ได้จากแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบควิตี้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ดีที่สุด

4.2 การออกแบบ

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควิตี้แบบ 3 มิติในหัวข้อที่ผ่านมา จึงได้ทำการออกแบบในส่วนของควิตี้และระบบอบแห้งโดยรวมเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศทั้งชนิด Multi-Feed Low Power Magnetron และ Single-Feed High Power Magnetron ภาพที่ 4.12 รายละเอียดของระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (Multi-Feed Low Power Magnetron) ที่ได้ทำการออกแบบ โดยมีควิตี้รูปทรงกระบอกสามารถป้อนคลื่นได้หลายตำแหน่งแบบไม่สมมาตร ซึ่งในส่วนของควิตี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อให้คลื่นที่เกิดภายในควิตี้เป็นแบบหลายโหมด มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในควิตี้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm ภายในประกอบด้วยถังหมุนทำจากวัสดุโพสิโพรพิลีนซึ่งปรับความเร็วรอบได้สามารถบรรจุวัสดุไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง ระบบสุญญากาศจะควบคุมโดยใช้ปั๊มขนาด 1.5 Hp 1425 RPM 208-230V -IP 23 ซึ่งจะทำงานแบบอัตโนมัติ ความชื้นถูกดูดออกจากควิตี้โดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดผ่านถังควบแน่นเพื่อให้ไอน้ำให้กลั่นตัวเป็นของเหลวแล้วมาแยกน้ำและอากาศที่ถังควบคุมก่อนเข้าปั๊ม สุญญากาศของระบบสามารถควบคุมได้ แต่ไม่ควรเกิน 390 torr (Operated) อุณหภูมิในควิตี้จะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type K) โดยข้อมูลเชิงเทคนิค (Technical Data) ของระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศชนิด Multi-Feed Low Power Magnetron สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่ควิตี้มีจุดต่อท่อนำคลื่น 6 จุด
2. สามารถเลือกใช้ลักษณะการป้อนคลื่นได้
3. กำลังของแมกนีตรอนสามารถปรับได้ (100 – 1600 W)
4. สามารถปรับตั้งเวลาการทำงานได้ (1 sec – 30 h)

5. ความดันของระบบสามารถทำงานตัดต่ออัตโนมัติและปรับตั้งค่าได้
(0 – (- 50) kPa)
6. อุณหภูมิภายในควาวิดีสามารถกำหนดค่าได้ (30 – 500°C)
7. เครื่องสามารถบวกลักษณะวัสดุอยู่กับที่ได้และสามารถอบโดยใช้ถังหมุน
ให้วัสดุเคลื่อนที่ได้
8. ถังหมุนสามารถปรับรอบการหมุนได้ (5 – 30 rpm)
9. เครื่องสามารถสร้างความร้อนแบบผสมได้ (ใช้ลมร้อน + ไมโครเวฟ)

ส่วนภาพที่ 4.13 รายละเอียดของระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (Single-Feed High Power Magnetron) ที่ได้ออกแบบองค์ประกอบพื้นฐานของระบบโดยปกติจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ กล่าวคือ ส่วนแรก คือ แมกนีตรอนและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Magnetron and Power Supply) ซึ่งมีหน้าที่ในการปล่อยคลื่นไมโครเวฟเพื่อนำไปกำเนิดความร้อนในวัสดุที่อยู่ในกระบวนการ โดยจะมีอุปกรณ์ส่วนที่สองคือ ท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้น เพื่อส่งไปยังตู้อบสุญญากาศ (vacuum cavity) ที่มีฝาเปิดได้ทั้งสองด้าน ซึ่งภายใน vacuum cavity จะเป็นที่ตั้งวัสดุที่นำผ่านในกระบวนการ ส่วนล่างของ vacuum cavity จะต่อเชื่อมอยู่กับปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เพื่อควบคุมความดันให้ได้ในพิสัยประมาณ 20-100 mbar ด้านบนของ vacuum cavity จะติดตั้งระบบเครื่องมือวัดหลายระบบ เช่น ช่องมอง (sigh glass front) กล้อง Infrared (IR camera) เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ วาล์วระบายอากาศ (false air valve) ตัววัดความดันภายในถัง (pressure transmitter) ส่วนอื่นๆของระบบ คือระบบเครื่องมือป้องกันและเครื่องมือวัด เช่น circulator และ stub tuner หรือ zs-transformer manual และ เครื่องวัดกำลัง (power monitor) เป็นต้น โดยปกติท่อนำคลื่น จะต่อเข้าสู่เครื่องวัดกำลังเพื่อจะได้อ่านกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง โดย circulator ทำหน้าที่ให้คลื่นผ่านไปได้ในทางเดียว ภายในระบบจะมีน้ำหมุนวนเพื่อดูดซับคลื่นที่ย้อนกลับเพื่อป้องกันไม่ให้คลื่นสะท้อนกลับไปทำลายตัวแมกนีตรอน stub tuner ใช้ในการปรับแต่งค่าอิมพีแดนซ์ ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟปล่อยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องและควบคุมโดยใช้ อุปกรณ์ควบคุม ภายใน cavity จะมีถาดหมุน (PTFE turntable) และ ใบกวน (mode stirrer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวของคลื่น ซึ่งส่งผลต่อการกำเนิดความร้อนอย่างทั่วถึงในวัสดุที่นำผ่านในกระบวนการ มวลความร้อนภายในวัสดุที่เปลี่ยนไปสามารถ

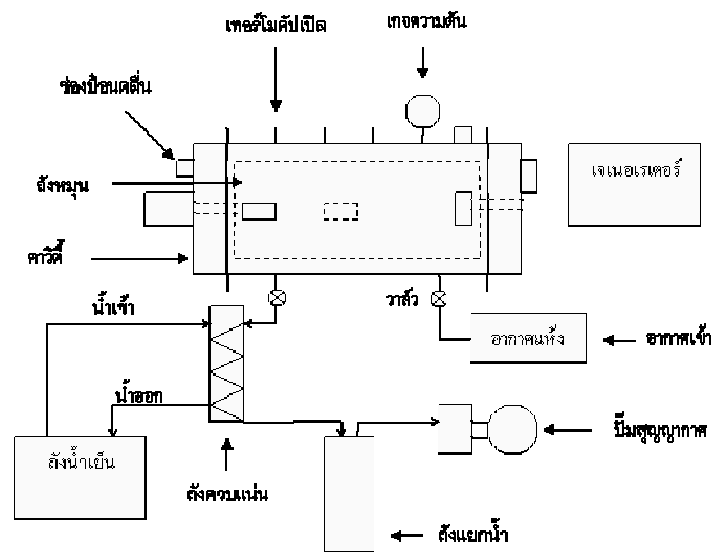
ประมวลโดย load cell-online scale นอกจากนี้ระบบยังสามารถวัดอุณหภูมิภายในวัสดุ ด้วย optical fiber optic และวัดความดันภายในวัสดุ ด้วย differential pressure probe ตลอดการทดลอง ในระบบดังกล่าวนี้ จะมีระบบควบคุมอัตโนมัติและการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ (Full automated microwave system) ระบบจะมีซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์ และสามารถเชื่อมโยงกับระบบอินเทอร์เน็ต สิ่งสำคัญคือการออกแบบอย่างไรที่สามารถควบคุมการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด (มาตรฐานสากลกำหนดให้ไม่เกิน 10 mW/cm^2) เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน ผู้วิจัยจึงเน้นให้ความสำคัญในเรื่องนี้ ผลงานประดิษฐ์นี้ได้ออกแบบให้สามารถป้องกันการรั่วของไมโครเวฟในจุดต่างๆ

สำหรับข้อมูลเชิงเทคนิค (Technical Data) ของระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศชนิด Single-Feed High Power Magnetron ดังแสดงดังข้างล่างนี้

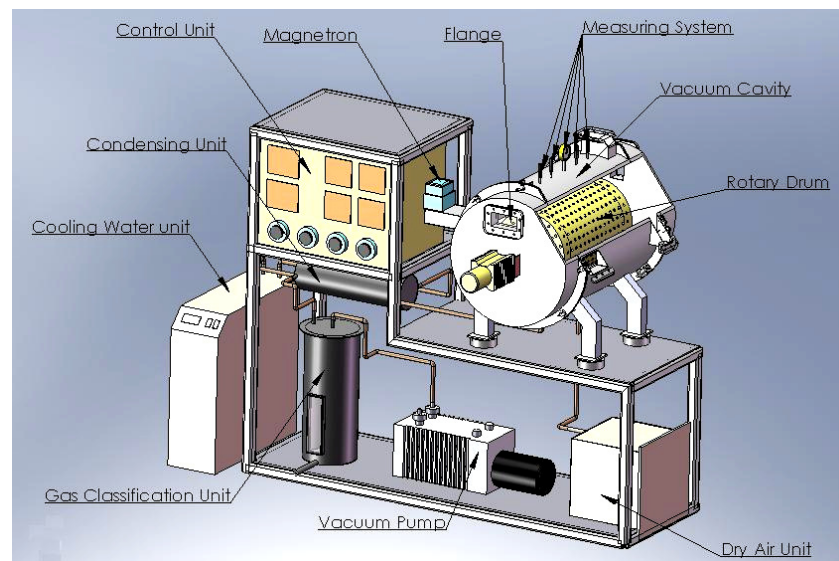
Technical Data

1 Microwave Generator	Industrial Magnetron, water-cooled
2 Microwave Power	2 kW (Max)/2450 MHZ, continuous Adjustable (But operating power=1kW)
3 Electrical power consumption	3kVA
4 Operation Modes	Continuous
5 Max Product Temperature	150°C
6 Load Cell	0.5000g, 10.000 digits
7 Vacuum	Atmosphere to 20 mbar due to Vacuum System and application
8 Ambient Climate	$1-30^{\circ}\text{C}$, max. 90% humidity not Condensing
9 Cooling	Water-cooling approx. 3l/min, Max. 25°C
10 Compressed Air	3-4 bar
11 Max Wall Temperature	80°C

12 Temperature Measurements for	
IR-Camera	0-200°C
13 Microwave Window Sealing	0-250°C
14 Pressure Measurement	0-1600 mbar (absolute)
15 Vacuum Pumps	
Principle	Rotary Vane Pump
Electrical Power	0.5kw
Pump power	approx.5qm/h due to pressure level
16 Capacity	approx. 20 kg/ Batch
17 Applications (Products)	Pharmaceutical products
	Herb
	Food Stuffs



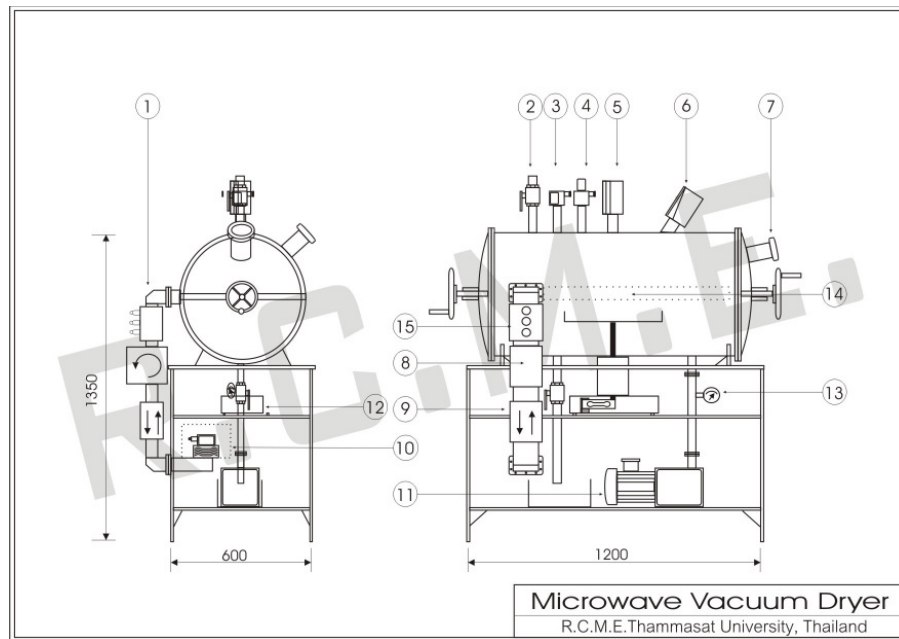
(ก)



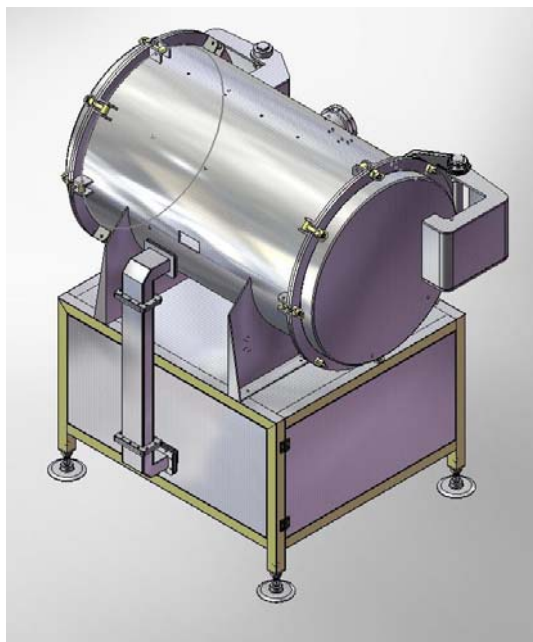
(ข)

ภาพที่ 4.12 การออกแบบเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบ
สุญญากาศ (Multi-Feed Low Power Magnetron)

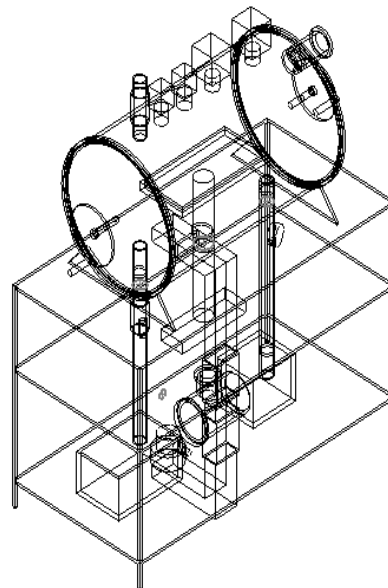
(ก) โครงร่างการออกแบบ และ (ข) ภาพ 3 มิติของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น



(ก)



(ข)



ภาพที่ 4.13 ระบบอบแห้งเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศ
(Single-Feed High Power Magnetron)

(ก) โครงร่างการออกแบบ และ (ข) ภาพ 3 มิติของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น

จากภาพที่ 4.13 มีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

No	Components	Remark
1	Microwave Waveguides	
2	Manual Valve	
3	Pressure Transducer	
4	Magnetic False air Salve for Pressure Control	
5	IR-Camera 0-200 °C	
6	CCD-Camera	
7	View finder	
8	Circulator	
9	Directional Coupler	
10	Magnetron	
11	Vacuum Pump	
12	Online scale 0-30 Kg	
13	Dial-gauge	
14	Slotted Waveguide (Option)	

4.3 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อประกอบเป็นเครื่องต้นแบบ

ภาพที่ 4.14 และ 4.15 เป็นภาพถ่ายจริงของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์ โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron และ Single-Feed High Power Magnetron ที่สร้างขึ้นและใช้ได้จริงตามลำดับ ในที่นี้ทาง บริษัท ศรีพิพัฒน์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่อง โดยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron มีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบเครื่องดังนี้



ภาพที่ 4.14 เครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
แบบ Multi-Feed Low Power Magnetron ที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 4.15 เครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
แบบ Single-Feed High Power Magnetron ที่สร้างขึ้น

4.3.1 คาวิตี (Cavity)

คาวิตีของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron (ภาพที่ 4.16(ก)) ขึ้นรูปจากแผ่นสแตนเลส AISI 304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm และหนา 6 mm (รวมฝาถึง) โดยมีตำแหน่งป้อนคลื่น 6 ตำแหน่ง ส่วนคาวิตีของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Single-Feed High Power Magnetron (ภาพที่ 4.16(ข)) ขึ้นรูปจากแผ่นสแตนเลส AISI 304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 780 mm ยาว 1200 mm และหนา 6 mm



(ก)

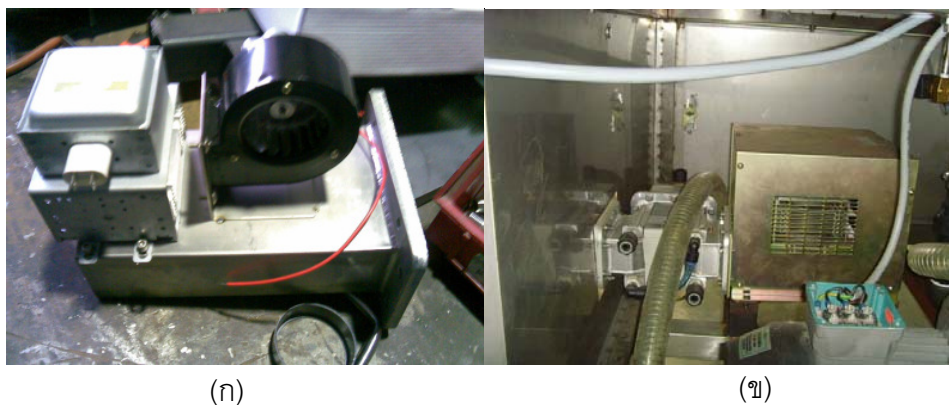
(ข)

ภาพที่ 4.16 คาวิตีที่สร้างขึ้น

(ก) Multi-Feed Low Power Magnetron และ (ข) Single-Feed High Power Magnetron

4.3.2 เจเนอเรเตอร์ (Generator)

เจเนอเรเตอร์ของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron (ภาพที่ 4.17(ก)) ประกอบด้วยแมกนีตรอนกำลัง 800 W ความถี่ 2.45 GHz และท่อนำคลื่นชนิด WR403 ที่มีความกว้าง 55 mm ยาว 110 mm และสูง 210 mm ทำจากสแตนเลส AISI 304 ส่วนเจเนอเรเตอร์ของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Single-Feed High Power Magnetron (ภาพที่ 4.17(ข)) จะให้กำลังไมโครเวฟสูงถึง 2 kW

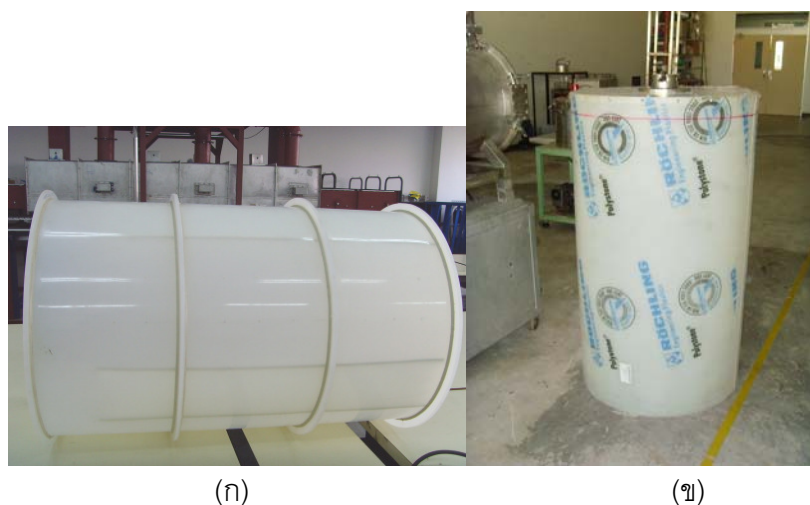


ภาพที่ 4.17 เจเนอเรเตอร์ (Generator)

(ก) Multi-Feed Low Power Magnetron และ (ข) Single-Feed High Power Magnetron

4.3.3 ถังหมุน (Rotary Drum)

ถังหมุนที่ใช้ในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron (ภาพที่ 4.18(ก)) นี้ทำจากแผ่นวัสดุโพลีโพรพิลีนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ยาว 500 mm สามารถบรรจุวัสดุอบแห้งได้ไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อการอบแห้ง เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Single-Feed High Power Magnetron (ภาพที่ 4.18(ข)) ซึ่งใช้วัสดุเดียวกันในการทำถังหมุน สามารถบรรจุวัสดุอบแห้งได้ไม่เกิน 30 กิโลกรัมต่อการอบแห้ง



ภาพที่ 4.18 ถังหมุนทำจากวัสดุโพลีโพรพิลีน

(ก) Multi-Feed Low Power Magnetron และ (ข) Single-Feed High Power Magnetron

4.3.4 ถังควบแน่น (Condensing Unit)

ถังควบแน่นทำจากเหล็ก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 126 mm สูง 450 mm และหนา 2 mm โดยจะมีน้ำหล่อเย็นจากถังหล่อเย็นเวียนอยู่ในถัง เพื่อที่จะควบคุมการควบแน่นของไอน้ำให้กลายเป็นน้ำ



ภาพที่ 4.19 ถังควบแน่น (Condensing Tank)

4.3.5 ถังแยกน้ำและไอร้อน (Gas Classification Unit)

ถังแยกน้ำและไอร้อนทำจากเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 196 mm สูง 500 mm และหนา 2 mm ทำหน้าที่ในการแยกน้ำและไอร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำผ่านเข้าไปยังปั๊มสุญญากาศ



ภาพที่ 4.20 ถังแยกไอร้อน (Gas Classification Tank)

4.3.6 ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน (Motor)

ในการขับเคลื่อนภายในตัวนี้ จะใช้มอเตอร์ยี่ห้อ Panasonic กำลัง 90 W



ภาพที่ 4.21 มอเตอร์ขับเคลื่อน

4.3.7 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

ปั๊มสุญญากาศของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟ ร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron (ภาพที่ 4.22(ก)) ยี่ห้อ ACATEL ขนาด 1.5 Hp 1425 RPM 208-230V -IP 23 ซึ่งจะทำงานแบบอัตโนมัติ หล่อเย็นด้วย น้ำมันหล่อเย็น ส่วนปั๊มสุญญากาศของเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟ ร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Single-Feed High Power Magnetron (ภาพที่ 4.22(ข)) ยี่ห้อ ACATEL ขนาด 2 Hp



(ก)

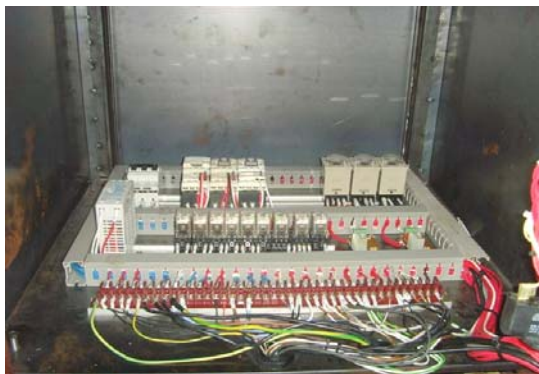
(ข)

ภาพที่ 4.22 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

(ก) Multi-Feed Low Power Magnetron และ (ข) Single-Feed High Power Magnetron

4.3.8 วงจรควบคุม (Magnetic Control)

วงจรควบคุมนี้มีหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น เช่น ควบคุมกำลังแมกนีตรอน เวลาการเปิดและปิดแมกนีตรอน ควบคุมอุณหภูมิภายในคาวีตี้



ภาพที่ 4.23 วงจรควบคุม (Magnetic Control)

4.4 สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในคาวีตี้ จะเห็นได้ว่ากรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรนั้นจะมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ดีกว่ากรณีป้อนคลื่นตำแหน่งเดียวและกรณีป้อนคลื่นสองตำแหน่งแบบสมมาตร ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างคาวีตี้ของระบบอบแห้งเพื่อประสิทธิภาพของการอบแห้งที่ดีขึ้น

บทที่ 5

การทดลองสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงโดยใช้เครื่องอบแห้ง อเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น

ในทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไป สามารถแบ่งประเภทของกระบวนการอบแห้งได้ตามลักษณะการให้ความร้อนเช่น การอบแห้งโดยการพาความร้อน (Convective Drying) การอบแห้งโดยการแผ่รังสีจากภายนอก (External Radiative Drying) การอบแห้งโดยระบบสุญญากาศ (Vacuum Drying) และการอบแห้งโดยการนำความร้อน (Conductive Drying) สำหรับการอบแห้งโดยใช้การผลิตความร้อนภายในเช่น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave Drying) นั้นจัดอยู่ในกรณีพิเศษ

สำหรับความรู้ทางทฤษฎีในกระบวนการอบแห้งนั้นมีการศึกษามากมายหลายทฤษฎี เช่น ทฤษฎีการแพร่ (Diffusion Theory) (Lewis [5-1], Sherwood [5-2] และ Cealgske et al. [5-3]) ทฤษฎีการไหลคาพิลลารี (Capillary Flow Theory) (Buckingham [5-4]) และทฤษฎีการระเหยและกลั่นตัว (Evaporation-Condensation Theory) (Henry [5-5]) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานเดียวกันว่าวัสดุในกระบวนการอบแห้งคือวัสดุพอร์ (เป็นวัสดุที่มีสสารหลายสถานะปะปนกันอยู่ภายใน โดยมีโครงสร้างหลักเป็นวัสดุที่มีสถานะเป็นของแข็ง) และมีการพัฒนาต่อไปให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Philip and De Vries [5-6], Harmathy [5-7], Berger and Pei [5-8] และ Huang [5-9]) โดยจุดเริ่มต้นของทฤษฎีเหล่านี้พัฒนามาจากทฤษฎีของลุยคอฟ (Luikov's theory) และทฤษฎีของวิทเทอร์ (Whitaker's theory)

สำหรับในการทดลองนั้นได้มีการศึกษามากมายเช่นเดียวกัน Wadsworth et al. [5-10] ได้ทำแห้งข้าวหนึ่งโดยใช้การทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ พบว่าอัตราการทำแห้งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับพลังงานไมโครเวฟ โดยยังทำแห้งในสภาวะความดันต่ำจะทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น และลดอุณหภูมิในการทำแห้งลง ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่สูงนัก นอกจากนั้นจากการวัดความหนาแน่นของเม็ดข้าว แสดงให้เห็นว่าเม็ดข้าวจะไม่มี การหดตัว ซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟเมื่อเปรียบเทียบกับ การทำแห้งด้วยการพาความร้อนของอากาศ Drouzas et al. [5-11] ศึกษาการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้ตัวอย่างเป็นแบบจำลองงุ่นผลไม้ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูงซึ่ง ความรู้ความเข้าใจในกลไกการทำแห้งที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การออกแบบและดำเนินการระบบทำแห้งให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น Pominski et al. [5-12] ศึกษาการทำแห้งแบ่งถั่วลิสงด้วยระบบ

สุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ พบว่าอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งมีผลอย่างยิ่งต่อกลิ่นของถั่วลิสงดิบ เมื่อใช้วิธีนี้แล้วสามารถลดการเกิดกลิ่นดิบของถั่วลิสงได้ ต่อมา Clary and Ostrom [5-13] ทำแห้งองุ่นไร้เมล็ดพันธุ์ทอมสันด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยมีเป้าหมายเพื่อรักษาคุณลักษณะองุ่นสดให้ได้มากที่สุด เช่น สี กลิ่น รส ลักษณะพองฟู โดยไม่ใช้วัตถุกันเสีย พบว่าใช้อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส ความชื้นสุดท้ายขององุ่นแห้ง (ลูกเกิด) ประมาณร้อยละ 5 หรือน้อยกว่า ได้ลักษณะลูกเกิดตามต้องการ นอกจากนั้นลูกเกิดที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัสกรุบกรอบ (Crunchy) และเมื่อเก็บรักษาในถุงสามารถเก็บได้นานอย่างน้อย 1 ปี นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคต่างๆ มาใช้ในกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ อย่างเช่นงานวิจัยของ Gunasekarn [5-14] ได้ศึกษาการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วงๆ พบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วงๆ นี้จะเป็นการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการให้พลังงานไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง ถ้า Pulsing ratio มาก (ตัวอย่างเช่น Power-off time นานกว่า Power-on time) จะได้ประสิทธิภาพสูง ผลิตภัณฑ์จากการให้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วงๆ จะมีคุณภาพดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการให้พลังงานไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง และยังสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ทนต่ออุณหภูมิ การเลือกวัฏจักร Power-on time และ Pulsing ratio ที่เหมาะสมจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ Hu et al. [5-15] ทำการศึกษาลักษณะพิเศษของการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศโดยใช้ถั่วแระญี่ปุ่นเป็นวัตถุดิบ พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการนำระบบใช้ร่วมกันของขั้นตอนกระบวนการอบแห้งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของเวลาการอบแห้งที่สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบธรรมดา และเป็นการลดภาระโดยมวลดีที่สุดบนเครื่องอบไมโครเวฟสุญญากาศ Yanyang et al. [5-16] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการนำกะหล่ำปีที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมาทำการอบแห้งด้วย ลมร้อนร่วมกับระบบไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ พบว่าใช้เวลาในการทำแห้งลดลงกว่าครึ่งชั่วโมงและมีค่าของสารอาหารและคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนกะหล่ำปลีที่ได้จากกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ พบว่าที่ผิวจะมีรูพรุนมากกว่าและยังพบอีกว่าวิธีนี้สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียในกะหล่ำปลีได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับอีกด้วย

งานวิจัยในบทนี้ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics) ในเชิงทดลอง โดยใช้เครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่ส่วข้างขึ้น ซึ่งเกิดคลื่นในลักษณะหลายโหมด (Multi-mode) ที่ความถี่ 2.45 GHz ชนิดของคลื่นเดี่ยวในท่อนำ

คลื่นเป็นแบบ TE₁₀ mode (Transverse Electric Wave) ตัวอย่างวัสดุทดสอบเป็นใบชาสด นำมาจากไร่ชาของโรงงานผลิตใบชาตราแม่คำ ต.เจดีย์ อ.เวียงป่าเป้า จ.เชียงราย ในแต่ละรอบของการทดลองจะใช้ใบชาหนัก 1 kg การทดลองอ้างอิงข้อมูลกระบวนการอบแห้งเชิงวิเคราะห์จากงานวิจัยเกี่ยวข้องที่ได้กล่าวข้างต้น และมีกลไกการส่งถ่ายความร้อนและมวลสารเหมือนดังทฤษฎีวัสดุพูนในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยในบทนี้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics) ของใบชา ด้วยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ ที่สร้างขึ้น โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาการอบแห้งและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในคาวีตกับเวลาการอบแห้ง แต่ไม่คำนึงถึงผลทางด้านคุณภาพของใบชา ตัวแปรสำคัญสำหรับงานวิจัยในบทนี้คือ ผลของความชื้นและอุณหภูมิในช่วงระหว่างการอบแห้งที่เกิดจากอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นสนามไฟฟ้า (กำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า) ความดันสุญญากาศและลักษณะการป้อนคลื่นไมโครเวฟที่ต่างกัน

5.1 หลักการพื้นฐาน

ในการอบแห้งโดยทั่วไปจะเป็นการให้ความร้อนจากผิวสู่ภายในซึ่งจะทำให้ผิวภายนอกนั้นเกิดการแห้งก่อน หากให้ความร้อนเป็นเวลานานอาจทำให้ผิวเกิดการแตกหรือเหี่ยวยุบเป็นผลจากการหดตัวของโครงสร้างวัสดุ ส่วนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟนั้นจะเป็นการให้ความร้อนแบบทั่วทั้งปริมาตร (Volumetric Heating) ทำให้เกิดความร้อนทั่วทั้งปริมาตร ทำให้สามารถไล่ความชื้นออกได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงหากมีการนำความเป็นสุญญากาศมาช่วยด้วยแล้วจะทำให้สามารถไล่ความชื้นได้เร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากที่ความเป็นสุญญากาศต่ำจะทำให้จุดเดือดของน้ำต่ำลง จึงทำให้น้ำเดือดและกลายเป็นไอที่อุณหภูมิไม่สูงมาก จึงใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง

5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

5.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือ ใบชาสดพันธุ์อัสสัมที่นำมาจากไร่ชาของโรงงานผลิตใบชาตราแม่คำ ต.เจดีย์ อ.เวียงป่าเป้า จ.เชียงราย โดยในแต่ละรอบของการอบแห้งจะใช้ใบชาหนัก 1 kg ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 172 มาตรฐานแห้ง ลักษณะของใบชาพันธุ์อัสสัมดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1

ใบชาอัสสัมสด

สำหรับการเลือกใช้ใบชาอัสสัมสดนั้น เนื่องจากในกระบวนการทำชาผงบดนั้นจะมีขั้นตอนการตากแดดเพื่อไล่ความชื้น ซึ่งต้องเวลาหลายวันถึงจะได้เปอร์เซ็นต์ความชื้นตามที่ต้องการ การควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เช่น ดิน ฟ้า อากาศ พื้นที่ตาก พื้นที่เก็บและอื่นๆ ดังนั้นในช่วงกระบวนการตากแดดที่ได้กล่าวมานั้น จึงได้คิดที่จะนำกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตชาผงบด เพื่อที่จะลดต้นทุนการผลิตและหลีกเลี่ยงปัจจัยที่ไม่เอื้ออำนวย

5.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

ภาพที่ 5.2 รายละเอียดของระบบอบแห้งที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น มีขนาดโดยรวม กว้าง 700 mm ยาว 1500 mm และสูง 1800 mm คาวิตีมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสามารถป้อนคลื่นได้หลายตำแหน่ง ซึ่งในส่วนของคาวิตีจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อให้คลื่นที่เกิดภายในคาวิตีเป็นแบบหลายโหมด มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในคาวิตี โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm ยาว 720 mm ภายในประกอบด้วยถังหมุนทำจากวัสดุโพสิโพรฟีนซึ่งปรับความเร็วรอบได้ สามารถบรรจุวัสดุไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง ระบบสุญญากาศจะควบคุมโดยใช้ปั๊มขนาด 1.5 Hp 1425 RPM 208-230V -IP 23 ซึ่งจะทำงานแบบอัตโนมัติ ความชื้นถูกดูดออกจากคาวิตีโดยใช้ปั๊มสุญญากาศดูดผ่านถังควบแน่น (Condensing Tank) เพื่อให้ไอน้ำให้กลั่นตัวเป็นของเหลวแล้วมาแยกน้ำและอากาศที่ถังแยกน้ำ (Gas classification Tank) ก่อนเข้าปั๊ม ความเป็นสุญญากาศของ

ระบบสามารถควบคุมได้ แต่ไม่ควรเกิน 390 torr (Operated) อุณหภูมิในคาวิตีจะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type K)



ภาพที่ 5.2
เครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น

5.2.3 วิธีการทดลอง

1) การอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น

ในส่วนของการทดลองนี้จะใช้ใบชาหนัก 1 กิโลกรัมต่อรอบการอบแห้ง ซึ่งเก็บในถังเย็น มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 172 มาตรฐานแห้ง โดยมีเงื่อนไขของการทดลองดังนี้

- 1.1) ป้อนคลื่นหนึ่งตำแหน่งที่กำลัง 800 W ภายใต้ความดัน 385 torr
- 1.2) ป้อนคลื่นหนึ่งตำแหน่งที่กำลัง 800 W ภายใต้ความดัน 535 torr
- 1.3) ป้อนคลื่นสองตำแหน่งที่กำลัง 1600 W ภายใต้ความดัน 385 torr
- 1.4) ป้อนคลื่นสองตำแหน่งที่กำลัง 1600 W ภายใต้ความดัน 535 torr

โดยในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองนั้นจะมีลักษณะการทำงานของแมกนีตรอนที่ต่างกัน 2 กรณี คือ การสร้างคลื่นแบบต่อเนื่องตลอดระยะเวลาของการอบแห้งและการสร้างคลื่นแบบเป็นจังหวะ ซึ่งการสร้างคลื่นแบบเป็นจังหวะนั้นแมกนีตรอนจะทำงานเป็นเวลา 60 นาที หยุด 60 นาทีตลอดระยะเวลาของการอบแห้งและทำการควบคุมอุณหภูมิภายในคาวิตีไม่ให้เกิน 70°C หากเกินอุณหภูมิที่กำหนดระบบจะหยุดการป้อนคลื่นไมโครเวฟ (ระบบอื่นๆ ทำงานปกติ) แต่เวลา

ตัด – ต่อ การทำงานของแมกนีตรอนนั้นยังคงทำงานตามปกติ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดแล้วแมกนีตรอนก็จะทำงาน (หากอยู่ในช่วงเวลาของการหยุดการป้อนคลื่นไมโครเวฟ แมกนีตรอนก็จะไม่ทำงาน)

ในส่วนของการควบคุมความดันสุญญากาศนั้น ปัมสุญญากาศจะทำงานแบบอัตโนมัติ (ทำงานแบบตัดต่อตามช่วงความดันที่กำหนด) โดยในทุกรอบการอบแห้งจะเก็บค่าน้ำหนักทุกๆ 10 นาที จนใบชามีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 มาตรฐานแห้ง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชาใบ (ชาจีน) [17] ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะนำไปทดสอบทางด้านคุณภาพต่อไป

2) การวัดปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นแห้ง (Dry Bulb) ของใบชาที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบระบบกำจัดความชื้นด้วยคลื่นไดอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสุญญากาศสามารถวัดได้ดังนี้

$$M_d = (w - d) / d \quad (5.1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

w คือ น้ำหนักของวัสดุชื้น

d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง

ความชื้นแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ [5-18]

5.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

จากการทดลองการอบแห้งใบชาโดยใช้เครื่องดันแบบระบบกำจัดความชื้นด้วยคลื่นไดอิเล็กทริกร่วมกับระบบสุญญากาศ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังวัตต์ป้อนเข้า ความดันสุญญากาศและลักษณะของการป้อนคลื่นที่มีผลต่อความชื้น อุณหภูมิ และลักษณะทางกายภาพของใบชา สามารถวิเคราะห์ผลในลักษณะความสัมพันธ์ต่าง ๆ ซึ่งแบ่งย่อยได้ดังนี้

5.3.1 ความชื้น

จากภาพที่ 5.3 - 5.6 พบว่าปริมาณความชื้นในใบชาที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นจะสามารถไล่ความชื้นได้เร็วหากมีการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องที่ความดันต่ำกว่าและยังมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ไฟฟ้าหรือกำลังวัตต์ป้อนเข้าสูง การไล่ความชื้นออกจากใบชาจะทำได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้อย่างคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

น้ำหรือความชื้นเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มาก ดังนั้นเมื่อความชื้นได้รับพลังงานไมโครเวฟอุณหภูมิของใบชาจึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะปริมาณความชื้น (น้ำ) ภายในโครงสร้าง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในใบชาจะส่งผลต่อกลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารในใบชา (รายละเอียดในทฤษฎีพื้นฐานวัสดุพุนบทที่ 3 หัวข้อ 3.1) โดยที่ปริมาณความชื้นหรือกำลังวัตต์ป้อนเข้ามีผลกับการผลิตปริมาณความร้อนด้วย ส่วนความเป็นสุญญากาศจะมีผลต่อกลไกการไล่ความชื้น เนื่องจากที่ความดันต่ำจุดเดือดของความชื้นหรือน้ำก็จะต่ำลง สามารถเปลี่ยนสถานะจากน้ำกลายเป็นไอน้ำได้เร็วขึ้นทำให้ใช้เวลาในการไล่ความชื้นน้อยลง ภาพที่ 5.3 และ 5.4 เห็นได้ว่าที่กำลังการป้อนคลื่นเดียวกัน ที่ความดันต่ำจะให้อัตราการอบแห้งที่เร็วกว่า ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับภาพที่ 5.5 และ 5.6

5.3.2 อุณหภูมิ

ศึกษาถึงพฤติกรรมทางด้านความร้อนที่เกิดขึ้นของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของใบชา คือพลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้า (ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ไฟฟ้าหรือกำลังวัตต์) ความดันสุญญากาศและลักษณะของการป้อนคลื่น (แบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ภาพที่ 5.7 – 5.10 เป็นการเปรียบเทียบการป้อนพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 1600 และ 800 วัตต์ ที่มีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ พบว่าเมื่อค่ากำลังวัตต์ป้อนเข้าต่างกันความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนจะมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อให้

พลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์สูงนั้น ใบชาจะสามารถผลิตความร้อนภายในได้มากกว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟที่กำลังต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เข้มข้นขึ้นทำให้อัตราการผลิตพลังงานความร้อนมากขึ้น ดังนั้นการใช้กำลังวัตต์ป้อนเข้าสูงทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงได้ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้กำลังวัตต์ป้อนเข้าต่ำ (เช่นภาพที่ 5.11 – 5.12 และ 5.15 – 5.16) นอกจากนั้นการอบแห้งที่ใช้กำลังวัตต์สูงอุณหภูมิสูงสุดก็มีค่าสูงกว่าด้วย ส่วนลักษณะการป้อนคลื่นนั้นมีผลต่อการผลิตความร้อนภายในใบชาด้วยเช่นกัน เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นจะมีผลโดยตรงต่อพลังงานไมโครเวฟ หากไม่ได้รับพลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องส่งผลให้การผลิตความร้อนภายในไม่ต่อเนื่องด้วยเช่นกัน อุณหภูมิของวัสดุก็จะเพิ่มขึ้นไม่รวดเร็วนัก ภาพที่ 5.13 – 5.14 และ 5.17 – 5.18 จะเห็นได้ว่าความดันสุญญากาศมีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น เนื่องจากที่ความดันต่ำอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำก็จะต่ำลง เป็นผลให้อุณหภูมิสูงสุดของการอบแห้งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับที่ความดันสูงกว่า

เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นมีค่าไม่คงที่ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีสาเหตุหลักจากความสามารถในการดูดซับพลังงานและเปลี่ยนพลังงานดูดซับเป็นพลังงานความร้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เกิดจากปัจจัยหลัก ๆ คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในใบชา (อุณหภูมิของวัสดุมีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก Von Hippel [5-19]) และการระเหยของน้ำหรือความชื้นออกจากใบชา (น้ำเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูง) และเกิดโพรงช่องว่างในใบชาขึ้น (อากาศหรือช่องว่างภายในโครงสร้างมีความสามารถในการดูดซับพลังงานต่ำมาก) สำหรับการวิเคราะห์ผลดังกล่าวจะแบ่งคาบเวลาออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้น (เกิดในช่วงต้นของกระบวนการ) และช่วงที่อุณหภูมิกิ่งที่ (ช่วงสุดท้ายของกระบวนการ)

1. ช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น)

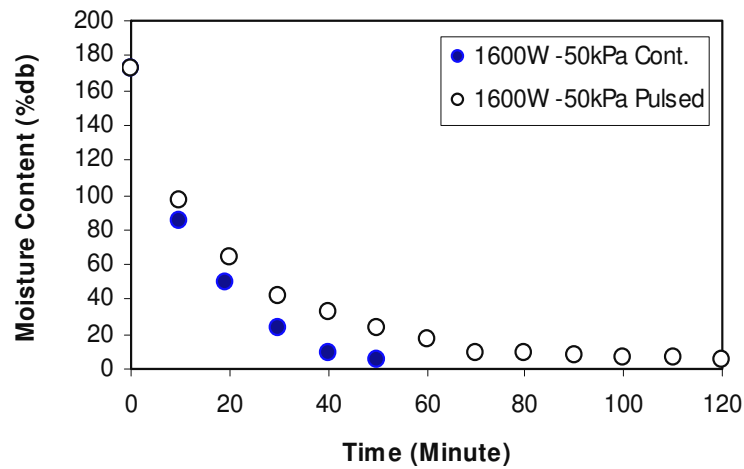
ในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นปริมาณความชื้นหรือน้ำในใบชามีเปอร์เซ็นต์สูงมาก (ประมาณร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง) ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟเมื่อผ่านใบชาจะถูกดูดซับพลังงานด้วยโครงสร้างของใบชาและน้ำภายในใบชาทั้งหมด และเปลี่ยนพลังงานดูดซับดังกล่าวเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิใบชามีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำในโครงสร้างขอบใบชาเกิดการระเหยออกจากวัสดุ เมื่อปริมาณน้ำลดลงความสามารถในการดูดซับพลังงานโดยรวมของใบชาจึงลดลง และส่งผลต่อการผลิตพลังงานความร้อนในใบชาเอง

2. ช่วงที่อุณหภูมิคงที่

ภาพที่ 5.7 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที่อุณหภูมิจะเริ่มคงที่ค่าหนึ่งอยู่ที่ประมาณ 85°C (กรณีกำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 385 torr ป้อนคลื่นแบบต่อเนื่อง) เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ถูกสะท้อนและทะลุผ่านใบชาไป แต่ก็ยังมีพลังงานส่วนหนึ่งถูกดูดซับไว้ในอัตราค่อนข้างคงที่ เมื่อถึงอิทธิพลของปริมาณความชื้นพบว่า ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณความชื้นคงเหลือในใบชาน้อยมากหรืออาจไม่มีเหลือเลย (ดังภาพที่ 5.3) แสดงว่าพลังงานที่ถูกดูดซับดังกล่าวเกิดจากการดูดซับโดยโครงสร้างของแข็งภายในใบชา ซึ่งสามารถผลิตพลังงานในความร้อนได้ในระดับหนึ่งที่ประมาณ 85°C และเมื่อศึกษาในกรณีกำลังวัตต์ป้อนเข้าที่มีค่าต่างกัน เช่น 800 วัตต์ พบว่าปรากฏพฤติกรรมทางความร้อนในลักษณะเดียวกันแต่แตกต่างกันในส่วนของการคายน้ำ เช่น ช่วงระยะเวลาการยวขึ้น อุณหภูมิต่ำลงดังภาพที่ 5.9 และ 5.10

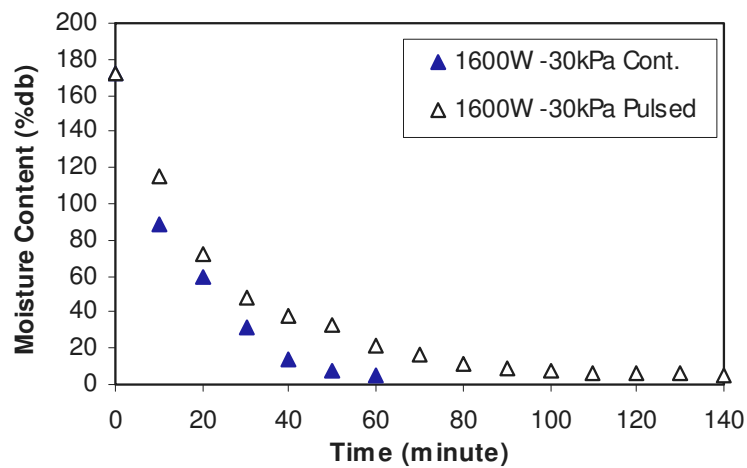
5.3.3 ลักษณะทางกายภาพ

จากภาพที่ 5.19 – 5.20 เป็นลักษณะของใบชาที่ผ่านการอบแห้งกรณีที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 torr โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะตามลำดับ พบว่าใบชาที่ผ่านการอบแห้งในกรณีป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องนั้นจะมีลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างจากเดิม ต่างจากกรณีป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะซึ่งใบชาที่ได้นั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงเดิม โดยในกรณีป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องนั้นความชื้นในใบชาจะได้รับพลังงานคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาการอบแห้ง ซึ่งจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในใบชาเกิดความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอสูงมาก ปริมาณความร้อนที่มากนั้นจะมีผลต่อโครงสร้างภายในใบชา ทำให้ใบชาที่ผ่านการอบแห้งกรณีป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องจะมีลักษณะทางกายภาพที่ต่างจากเดิม และเมื่อศึกษากรณีที่กำลังวัตต์ป้อนเข้าและความดันสุญญากาศต่างกัน เช่น 1600 W ความดัน 535 torr พบว่ามีลักษณะทางกายภาพเป็นไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ กรณีป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องจะมีลักษณะทางกายภาพของใบชาที่ต่างจากเดิม ส่วนกรณีป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะจะมีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงเดิม



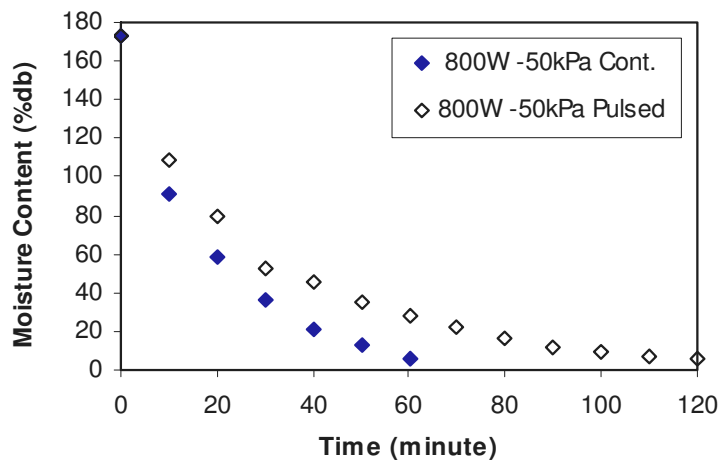
ภาพที่ 5.3

เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Dry basis) ของใบชาเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
ที่สร้างขึ้น ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



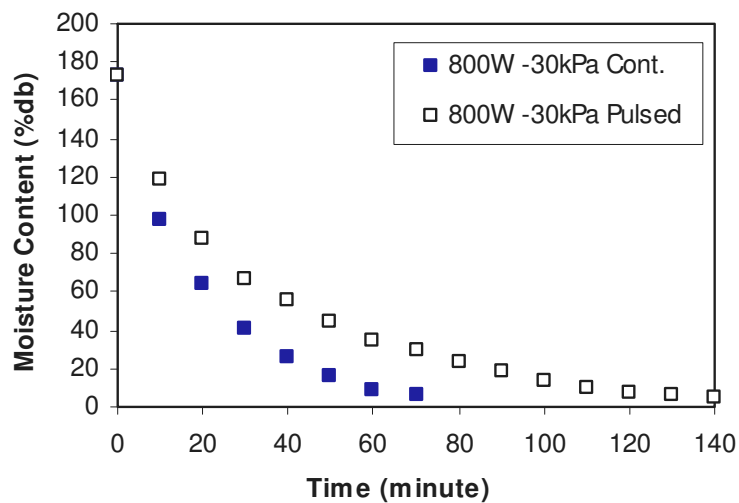
ภาพที่ 5.4

เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Dry basis) ของใบชาเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
ที่สร้างขึ้น ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



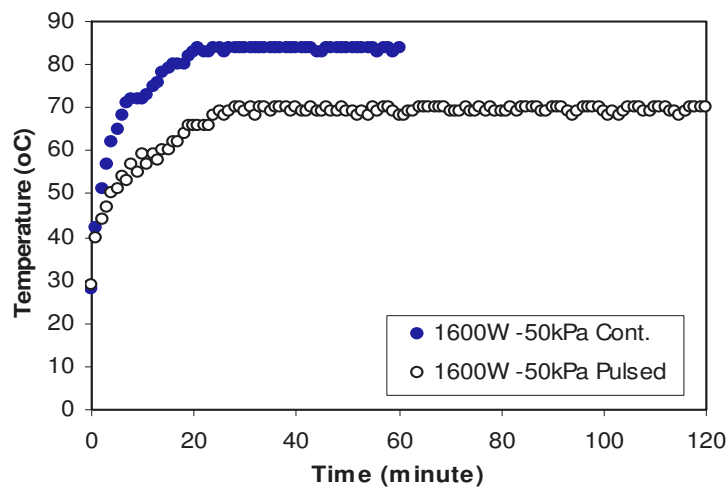
ภาพที่ 5.5

เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Dry basis) ของใบชาเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
ที่สร้างขึ้น ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



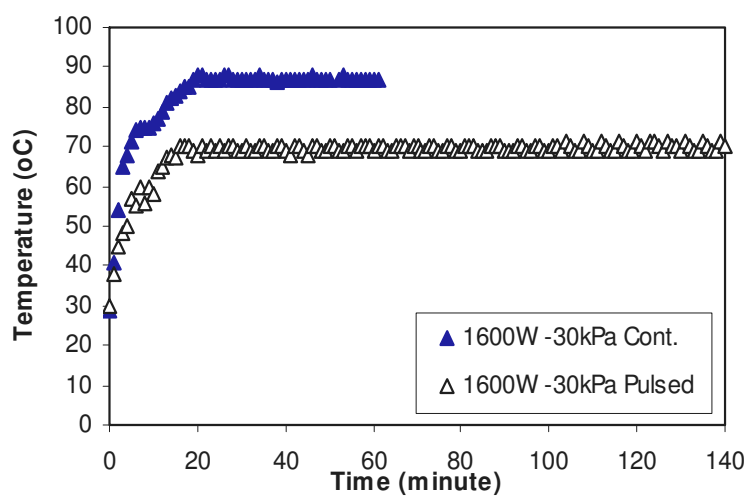
ภาพที่ 5.6

เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Dry basis) ของใบชาเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
ที่สร้างขึ้น ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



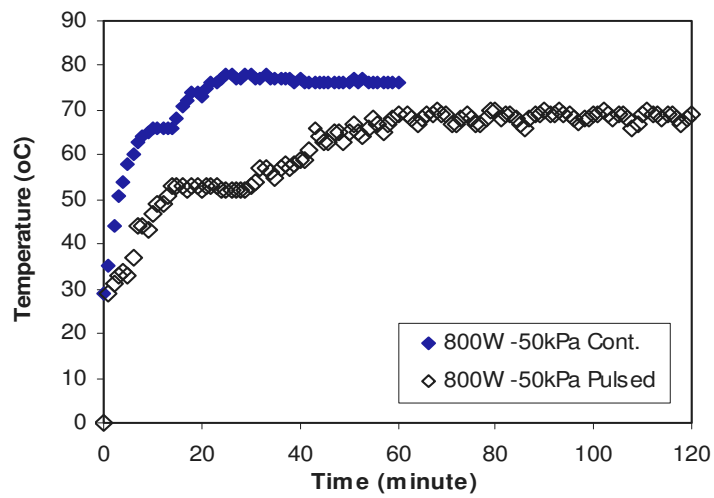
ภาพที่ 5.7

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



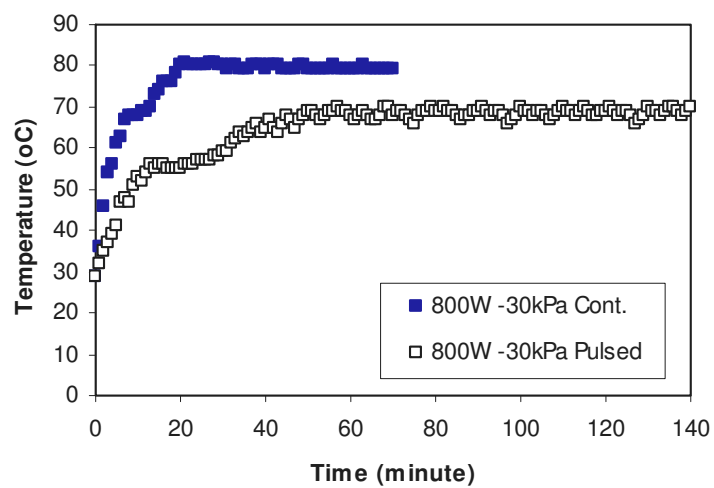
ภาพที่ 5.8

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



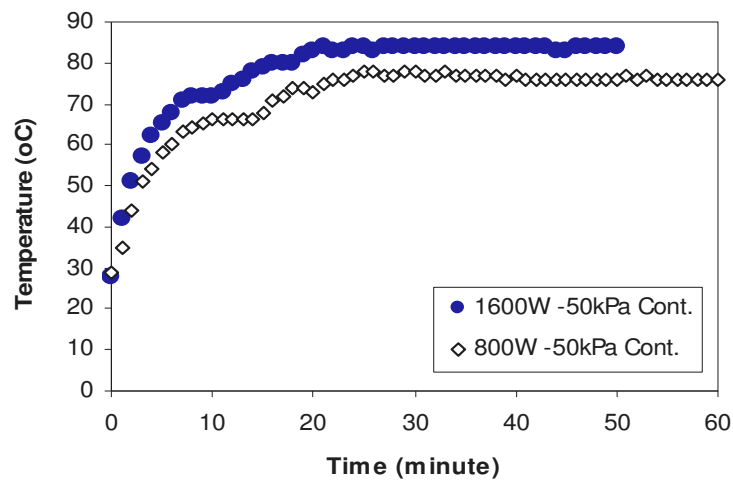
ภาพที่ 5.9

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



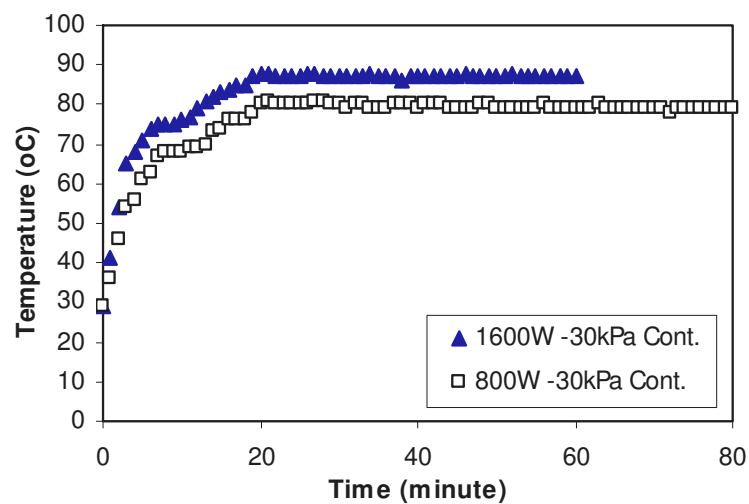
ภาพที่ 5.10

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่องและเป็นจังหวะ



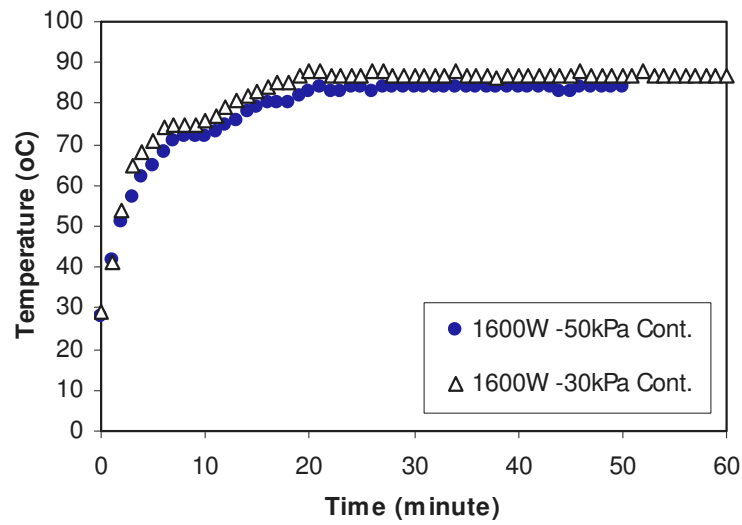
ภาพที่ 5.11

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W และ 800 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่อง



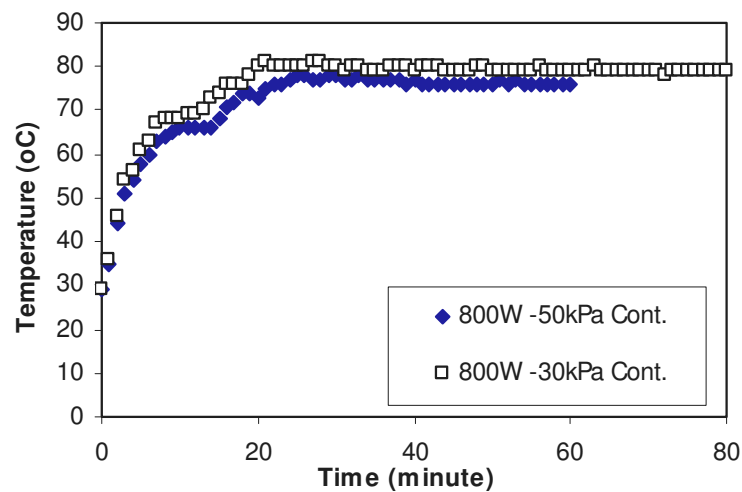
ภาพที่ 5.12

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W และ 800 W ความดัน 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่อง



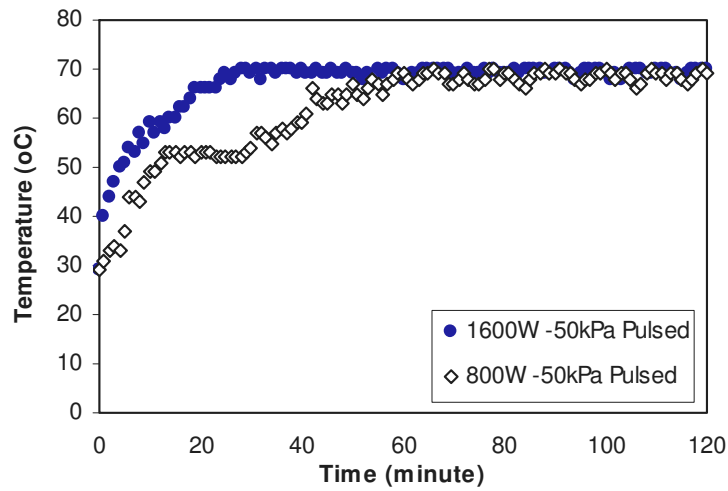
ภาพที่ 5.13

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 385 และ 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่อง



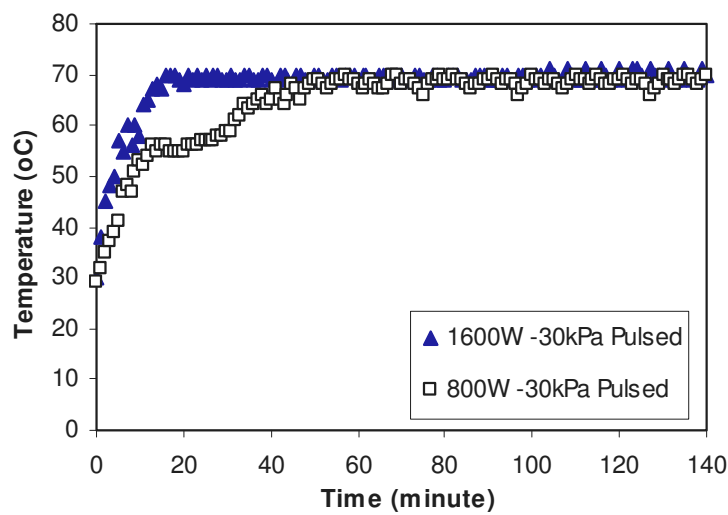
ภาพที่ 5.14

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 และ 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่อง



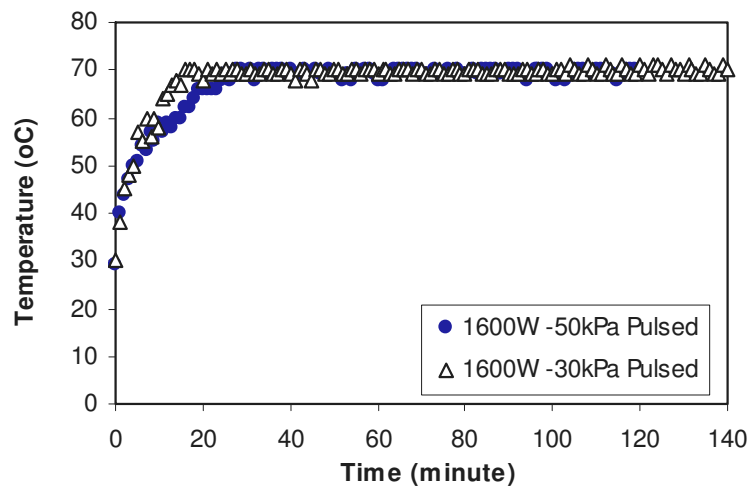
ภาพที่ 5.15

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W และ 800 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะ



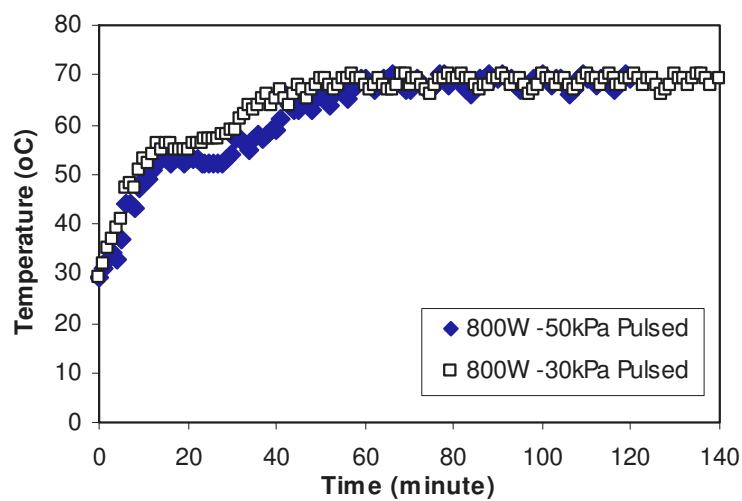
ภาพที่ 5.16

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W และ 800 W ความดัน 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะ



ภาพที่ 5.17

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 1600 W ความดัน 385 และ 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะ



ภาพที่ 5.18

อุณหภูมิของการอบแห้งใบชาด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น
ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 และ 535 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะ



ภาพที่ 5.19

ใบชาอบแห้งที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 5.20

ใบชาอบแห้งที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 385 torr
โดยมีลักษณะการป้อนคลื่นแบบเป็นจังหวะ

5.4 สรุปผลการศึกษา

พลังงานไมโครเวฟหรือกำลังวัตต์ป้อนเข้ามีผลต่อความสามารถในการผลิตปริมาณความร้อนและการลดปริมาณความชื้นในใบชา กล่าวคือพลังงานป้อนเข้ามากส่งผลให้เกิดการผลิตปริมาณความร้อนได้มากขึ้นและลดปริมาณความชื้นได้เร็วขึ้น

ความดันสุญญากาศมีผลต่อการลดปริมาณความชื้นในใบชา กล่าวคือความดันต่ำจะส่งผลให้ลดปริมาณความชื้นได้เร็วขึ้น

การดูดซับพลังงานไมโครเวฟส่งผลโดยตรงต่อการผลิตพลังงานความร้อนในใบชา ถ้ามีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟมาก จะทำให้เกิดการผลิตพลังงานความร้อนมากส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น

บทที่ 6

การทดลองอบแห้งภาคสนามด้วยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ

จากการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ (Laboratory scale) (ภาพที่ 1) มาแล้วนั้น ผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งวัสดุทดสอบพบว่าได้ผลที่น่าพอใจ จึงได้ทำการขยายขนาดของระบบอบแห้งเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้นอีก 2 ระบบ คือ ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศแบบ Multi-Feed Low Power Magnetron (ภาพที่ 2) และแบบ Single-Feed High Power Magnetron

งานวิจัยในบทนี้เป็นการทดลองอบแห้งภาคสนามด้วยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ แบบ Multi-Feed Low Power Magnetron ซึ่งทางผู้ประกอบการ คือ บริษัทศรีพิพัฒน์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ได้นำไปทดลองอบแห้งภาคสนามกับวัสดุทดสอบประกอบด้วย พริกขี้หนูสด พริกขี้พ้าแดง ข้าว ตระไคร้ชอย ใบหลากซาและรากผักชี จุดประสงค์หลักของงานวิจัยในบทนี้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics) ของวัสดุทดสอบ ลักษณะทางกายภาพหลังการอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้น โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาการอบแห้งและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในควิตี้ ตัวแปรสำคัญสำหรับการทดลองนี้คือ ผลของความชื้นและอุณหภูมิในช่วงระหว่างการอบแห้งที่เกิดจากอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นไฟฟ้า (กำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า) ความดันสุญญากาศและอุณหภูมิลมร้อนที่ต่างกัน



ภาพที่ 6.1 ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมระบบสุญญากาศ
(Laboratory Scale)



ภาพที่ 6.2 ระบบอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
(Multi-Feed Low Power Magnetron)

**ข้อมูลการทดลองอบแห้งภาคสนามของวัสดุหลายชนิดด้วยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิง
พาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ
(Multi-Feed Low Power Magnetron)**

วัตถุประสงค์การทดลอง

ทางผู้ประกอบการ คือ บริษัทศรีพิพัฒน์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ได้ทำการทดลองอบแห้งภาคสนามด้วยเครื่องอบแห้งอเนกประสงค์เชิงพาณิชย์โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศชนิด Multi-Feed Low Power Magnetron กับวัสดุหลายชนิด เพื่อปรับตั้งค่าการทำงานของเครื่องที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการทดสอบ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องที่สร้างขึ้นในด้านจลนพลศาสตร์และลักษณะทางกายภาพ สุดท้ายจะวิเคราะห์ถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและจุดคุ้มทุนเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดและวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน โดยข้อมูลที่ได้นั้นจะเป็นแนวทางในการออกแบบหรือปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

วิธีการทดลอง

1. ทำการอบแห้งพืชผลทางการเกษตร (พริกขี้หนูสด, พริกขี้พ้าแดง, ข้าว, ตระไคร้ซอย, ใบหลากซา, รากผักชี)
2. ทำการปรับตั้งค่าการทำงานของเครื่องในแต่ละรอบของการอบ
3. อบจนความชื้นสุดท้ายเหลือใกล้เคียงกับตัวอย่างต้นแบบที่อยู่ในกระบวนการผลิตจริงบันทึกระยะเวลาในการอบและลักษณะของผลิตภัณฑ์
4. บันทึกค่าการทำงานของเครื่องเพื่อหาจุดที่ใช้ระยะเวลาในการอบสั้นที่สุดและผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เกิดความเสียหาย

การอบแห้งพริกชี้หนูสดที่ความชื้นเริ่มต้น 97%db

ในที่นี้จะทำการอบแห้งพริกชี้หนูสดที่ความชื้นเริ่มต้น 97%db ซึ่งให้ผลการทดลองดังที่แสดงต่อไปนี้
การทดลองที่ 1



ภาพที่ 6.3 ลักษณะของพริกชี้หนูสดก่อนทำการอบแห้ง



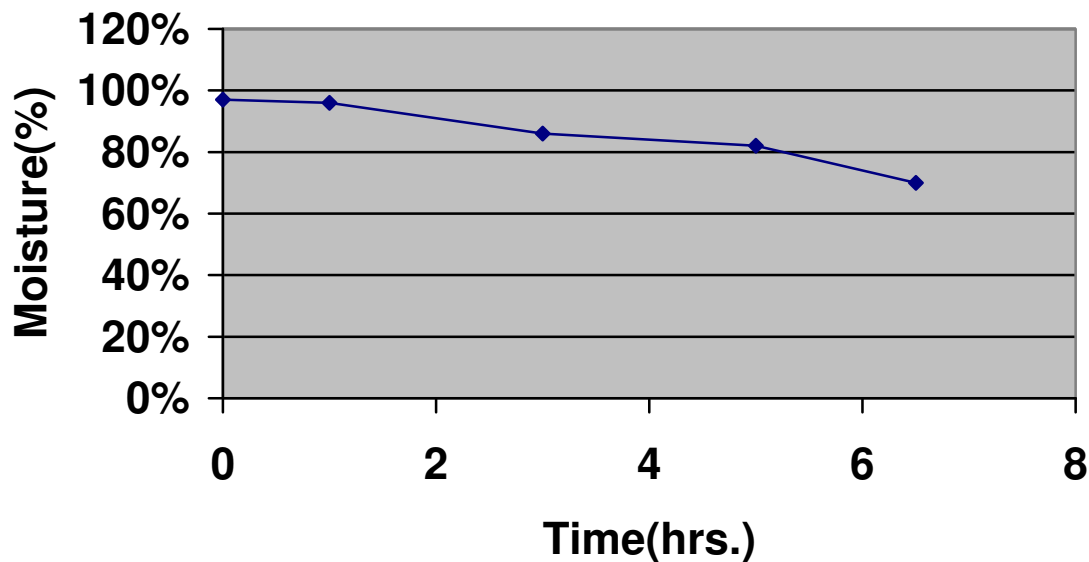
ภาพที่ 6.4 ลักษณะการบรรจุพริกชี้หนูในห้องอบ

ผลการทดลองที่ 1

Date: 17/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
1	45	655	610,760	96	Open	ยังคล้ายพริกสดอยู่
3	45	655	572.5,760	86	“	มีการแตกออกเล็กน้อย
5	45	655	497.5,760	82	“	ก้านหลุดและแตกออกมากขึ้น ทำให้เม็ดด้านในหลุดออกมา
6.5	50	727.3	497.5,760	70	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.5 เปอร์เซนต์ความชื้นของพริกชี้หนูสดเมื่อผ่านการอบแห้งเป็นเวลา 6.5 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 655 W ความดันในช่วง 760-497.5 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูสดในการทดลองที่ 1 โดยพริกชี้หนูสดมีความชื้นเริ่มต้น 97 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (ภาพที่ 3) พบว่าหากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งและปริมาณการดูดอากาศออกค่อนข้างต่ำ (มีความเป็นสุญญากาศต่ำ) ส่งผลให้ความชื้นลดลงช้ามาก ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง แต่ใช้เวลาอบแห้งเป็นเวลา 6.5 ชั่วโมง (ภาพที่ 5) ส่วนลักษณะทางกายภาพของพริกหลังอบแห้งนั้นพบว่าพริกส่วนใหญ่ยังคงมีความชื้นอยู่มากและมีบางส่วนที่เกิดการแตกเสียหายเนื่องจากเกิดความดันไภายในพริก (ภาพที่ 6 และ 7)



ภาพที่ 6.6 แสดงลักษณะของพริกชี้หนูเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง



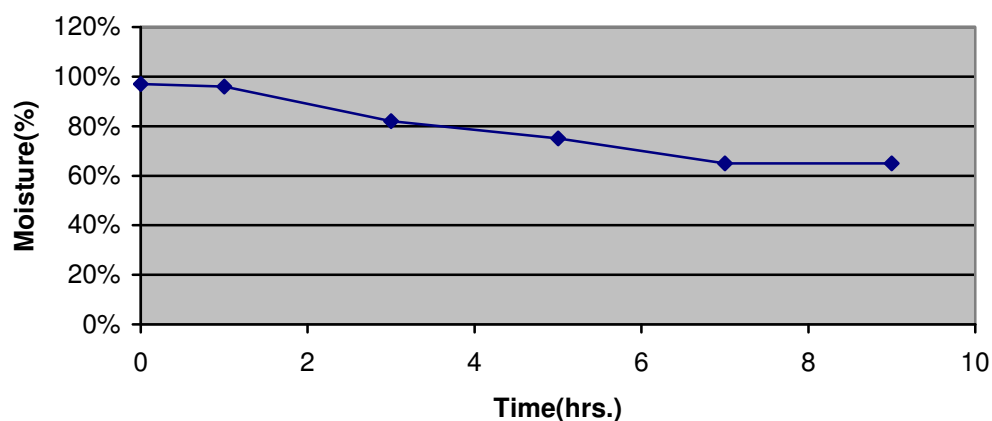
ภาพที่ 6.7 แสดงลักษณะของพริกขี้หนูที่ผ่านการอบด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้นเป็นเวลา 6.5 ชั่วโมง

ผลการทดลองที่ 2

Date: 18/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
1	50	655	460,760	96	Open	ยังคงล้ายพริกสด
3	50	655	460,760	82	“	มีการแตกออกเล็กน้อย
5	50	655	460,760	75	“	ก้านหลุดและแตกออกมากขึ้น ทำให้เม็ดด้านในหลุดออกมา
7	50	655	460,760	65	“	“
9	50	655	460,760	65	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.8 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของพริกชี้หนูสดเมื่อผ่านการอบแห้ง 9 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 655 W ความดัน 460 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 655 W ความดัน 460 torr เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบขึ้นเป็น 50°C พบว่าอัตราการลดลงของความชื้นยังคงน้อยอยู่และผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีการปริแตกเสียหายเกิดขึ้น แสดงว่าควรจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบมากกว่า 50°C ในการทดลองครั้งต่อไป



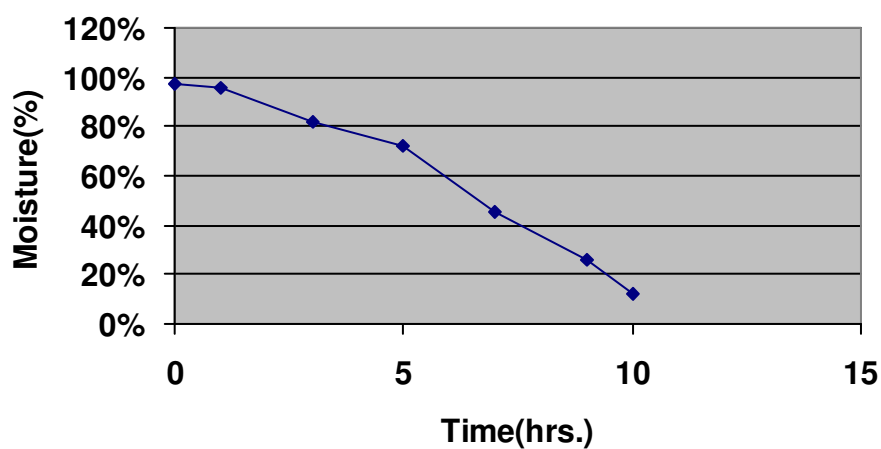
ภาพที่ 6.9 แสดงลักษณะของพริกชี้หนูที่ผ่านการอบด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้นเป็นเวลา 9 ชั่วโมง

ผลการทดลองที่ 3

Date: 19/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
1	60	727.3	385,760	96	Open	เริ่มปริออก
3	60	727.3	385,760	82	“	มีการแตกออกเล็กน้อย
5	60	727.3	385,760	72	“	ก้านหลุดและแตกออกมากขึ้น ทำให้เมล็ดด้านในหลุดออกมา
7	60	727.3	385,760	45	“	“
9	60	727.3	385,760	26	“	“
10	60	727.3	385,760	12	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.10 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของพริกชี้หนูสดเมื่อผ่านการอบแห้ง 10 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 727.3 W ความดัน 385 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 3

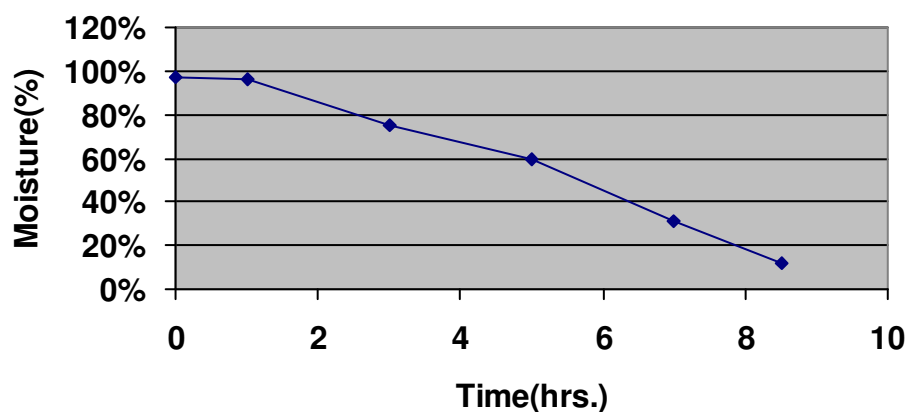
จากการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 727.3 W ความดัน 385 torr เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในห้องอบขึ้นเป็น 60°C และทำการอบแห้งด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้นจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง 10 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าใช้เวลาในการอบแห้งมากเกินไปอีกทั้งยังคงเกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ที่ได้เช่นเดิม

ผลการทดลองที่ 4

Date: 20/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของ ผลิตภัณฑ์ที่ได้
1	50	690	235, 385	96	Open	ยังคล้ายพริกสด
3	50	690	235, 385	75	“	มีการแตกออก เล็กน้อย
5	60	690	235, 385	60	“	“
7	60	690	235, 385	31	“	“
8.5	60	690	235, 385	12	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.11 เปอร์เซนต์ความชื้นของพริกชี้หนูสดเมื่อผ่านการอบแห้ง 8.5 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 235 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 4

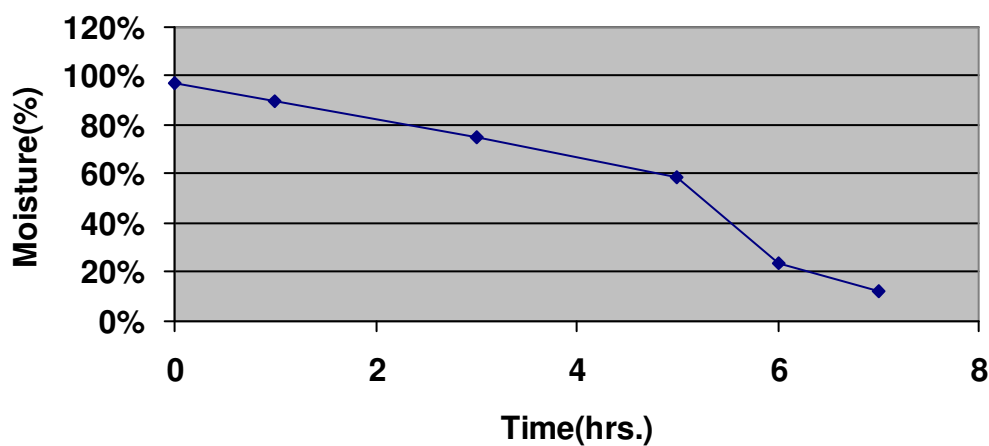
เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้เกิดความเสียหายค่อนข้างมาก ในการทดลองครั้งนี้จึงลองให้ความร้อนต่ำในช่วงแรกและเพิ่มแรงดูดอากาศมากขึ้นผลปรากฏว่าใช้เวลา 8.5 ชั่วโมง ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 12% มาตรฐานแห้ง และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้เกิดความเสียหายน้อยลง จึงตั้งสมมติฐานว่าแรงดูดอากาศไม่น่าจะมีผลต่อความเสียหายของพริกชี้หนูและสามารถเพิ่มอัตราการสูญเสียความชื้นได้โดยเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60°C

ผลการทดลองที่ 5

Date: 21/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ ได้
1	60	690	160,310	90	Open	ยังคล้ายพริกสด
3	60	690	160, 310	75	“	“
5	60	690	160, 310	59	“	“
6	60	690	160, 310	24	“	เริ่มมีการแตกหักเสียหาย
7	60	690	160, 310	12	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.12 เปอร์เซนต์ความชื้นของพริกชี้หนูสดเมื่อผ่านการอบแห้ง 7 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 5

จากการทดลองอบแห้งพริกชี้หนูสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของห้องอบเป็น 60°C ผลปรากฏว่ามีอัตราการลดลงของความชื้นเร็วขึ้น แต่ในช่วงท้ายของการอบแห้งเริ่มมีการแตกหักเสียหายของพริกเกิดขึ้นทั้งที่พริกมีความชื้นเหลืออยู่น้อย จึง

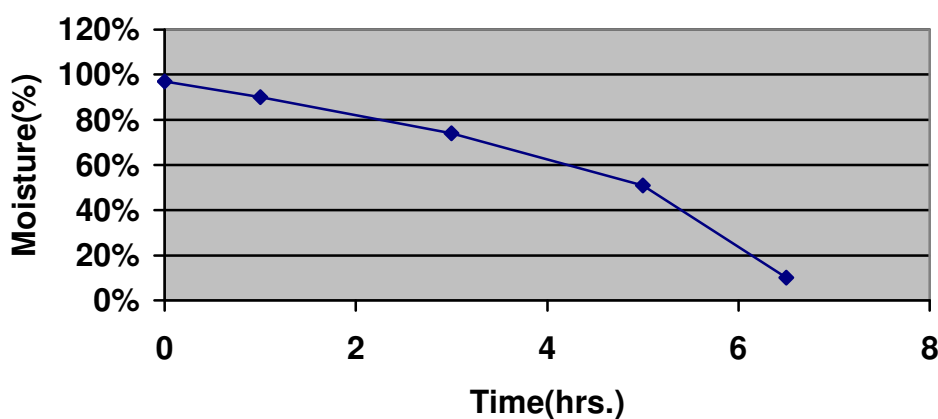
ตั้งสมมติฐานว่าอาจจะเกิดจากการหมุนของถังบรรจุ เพราะผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วหากเกิดการกระทบต่อดังหมุนอย่างสม่ำเสมออาจเปราะและเกิดการแตกหักได้

ผลการทดลองที่ 6

Date: 22/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
1	60	690	160, 310	90	Close	ยังคล้ายพริกสด
3	60	690	160, 310	74	“	“
5	60	690	160, 310	51	“	“
6.5	60	690	160, 310	10	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.13 เปอร์เซนต์ความชื้นของพริกชี้หนูสดเมื่อผ่านการอบแห้ง 6.5 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 6

การทดลองครั้งนี้เป็นการตรวจสอบสมมติฐานจากการทดลองที่ผ่านมา (Date: 21/06/2009) เนื่องจากว่าพริกเป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบน้อย (Low-lossy materials) จึงไม่จำเป็นต้องให้วัสดุมีการเคลื่อนที่ โดยปิดการทำงานของ Rotary Drum ผลปรากฏว่าได้พริกออกมา

มีลักษณะที่ดีมาก ไม่มีการแตกหักเสียหายเกิดขึ้น อีกทั้งยังมีสีใกล้เคียงกับพริกสดมากและใช้เวลาในการอบแห้ง 6.5 ชั่วโมง จนเหลือความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง



ภาพที่ 6.14 แสดงลักษณะของพริกขี้หนูที่ผ่านการอบด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้นเป็นเวลา 6.5 ชั่วโมง

การอบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงที่ความชื้นเริ่มต้น 97%db

ในที่นี้จะทำการอบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงที่ความชื้นเริ่มต้น 97%db ซึ่งให้ผลการทดลองดังที่แสดงต่อไปนี้
การทดลองที่ 1



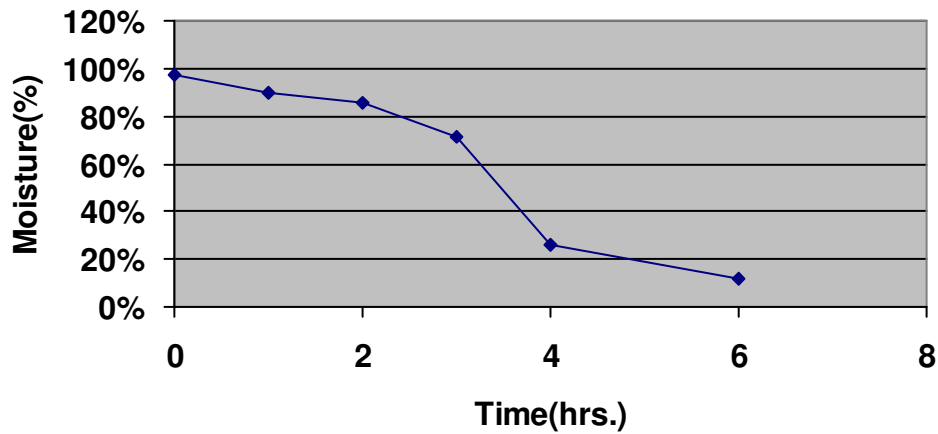
ภาพที่ 6.15 แสดงลักษณะของพริกชี้ฟ้าแดงแช่เย็นก่อนทำการอบ

ผลการทดลองที่ 1

Date: 22/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ที่ได้
1	60	690	160,310	90	Close	ยังคงล้าพริกสด
2	60	690	160, 310	86	“	น้ำระเหยออกมาจากพริก เหนียวพริกติดกับถัง
3	60	690	160, 310	71	“	“
4	60	690	160, 310	26	“	ช่วงตรงกลางของพริกเริ่ม มีการไหม้
6	60	690	160, 310	12	“	รอยไหม้เข้มกว่าเดิม

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.16 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของพริกชี้ฟ้าแดงเมื่อผ่านการอบแห้ง 6 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองอบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 60°C ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 6 ชั่วโมง พบว่าความชื้นที่ออกมาจากพริกชี้ฟ้าแดงมีลักษณะค่อนข้างเหนียว จึงทำให้ระหว่างทำการอบแห้งพริกจะเกาะติดตามผนังถังหมุน ทำให้บริเวณตรงกลางของเม็ดพริกมีรอยไหม้เกิดขึ้น



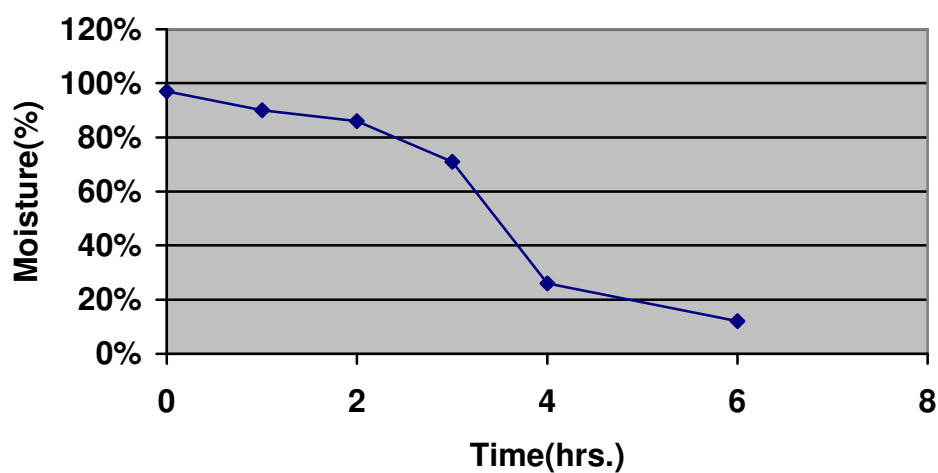
ภาพที่ 6.17 แสดงลักษณะรอยไหม้ของพริกชี้ฟ้าแดงเมื่อผ่านการอบด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้น

ผลการทดลองที่ 2

Date: 23/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ ที่ได้
1	60	690	160,310	90	Close	ยังคล้ายพริกสด
2	60	690	160, 310	86	“	น้ำระเหยออกมาจากพริก เหนียวพริกติดกับถัง
3	60	690	160, 310	71	“	ช่วงตรงกลางของพริกเริ่ม มีการไหม้แต่ไม่มาก
4	50	690	160, 310	34	“	ไม่มีรอยไหม้เพิ่มเติม
5	50	690	160, 310	22	“	“
6.5	50	690	160, 310	13	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.18 เปอร์เซนต์ความชื้นของพริกชี้ฟ้าแดงเมื่อผ่านการอบแห้ง 6 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองอบแห้งพริกชี้ฟ้าแดงสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 690 W ความดัน 160 torr โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 50 และ 60°C ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 6.5 ชั่วโมง เนื่องจากความชื้นที่ออกมาจากพริกชี้ฟ้าแดงมีลักษณะค่อนข้างเหนียว จึงทำให้ในช่วงท้ายของการอบแห้งพริกจะเกาะติดตามผนังถังหมุน ส่งผลให้ตรงกลางของเม็ดพริกมีรอยไหม้เกิดขึ้น หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเหลือเพียง 50°C เป็นเวลาสามชั่วโมง ผลปรากฏว่าไม่มีรอยไหม้เพิ่มขึ้นแต่ใช้เวลาอบแห้งนานขึ้น ในการทดลองครั้งถัดไปเมื่อเพิ่มกำลังแมกนีตรอนเป็น 727.3 W และควบคุมอุณหภูมิในการอบอยู่ที่ 60°C ผลปรากฏว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 4.5 ชั่วโมง โดยความชื้นของพริกชี้ฟ้าเหลืออยู่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อีกทั้งไม่เกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

การทดลองที่ 3 (รากผักชีความชื้นเริ่มต้น 98%db)

ในที่นี้จะทำการอบแห้งพริกากผักชีที่ความชื้นเริ่มต้น 98%db ซึ่งให้ผลการทดลองดังที่แสดงต่อไปนี้



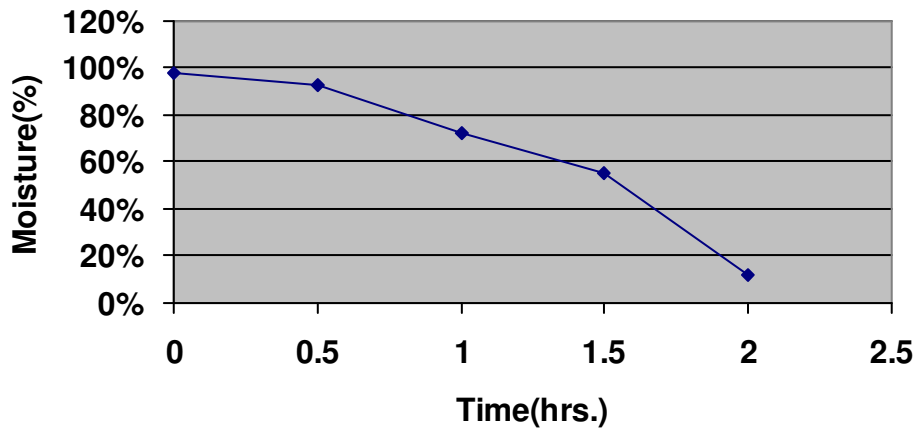
ภาพที่ 6.19 แสดงลักษณะของรากผักชีสดก่อนทำการอบ

ผลการทดลองที่ 1

Date: 24/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ ได้
0.5	60	800	160,310	93	Open	
1	60	800	160,310	72	“	โคนต้นเริ่มหึง เช่นเดียวกับการตากแดด
1.5	60	800	160,310	55	“	“
2	60	800	160,310	12	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



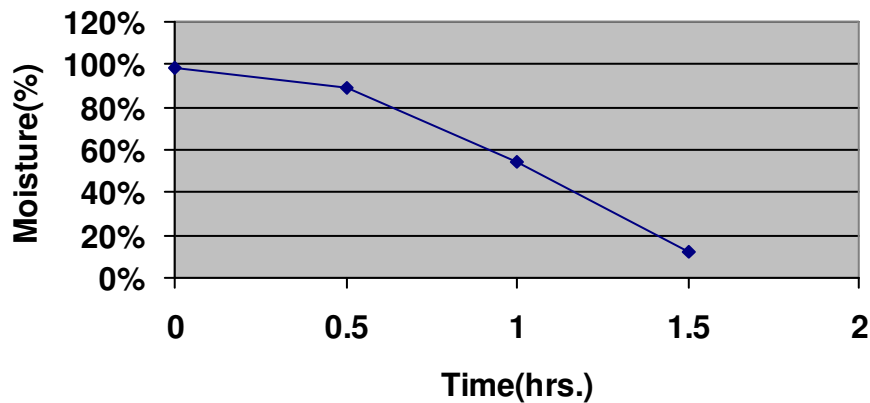
ภาพที่ 6.20 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของรากผักชีเมื่อผ่านการอบแห้ง 2 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองอบแห้งรากผักชีสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 160 torr โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 60°C ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ปรากฏว่าบริเวณโคนต้นมีการเหี่ยวงอกเกิดขึ้น ซึ่งการเหี่ยวงอกของโคนต้นเป็นเรื่องที่ยอมรับได้เนื่องจากเป็นธรรมชาติของรากผักชีเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้งได้อีกเพื่อลดระยะเวลาในการอบ

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
0.5	70	800	160,310	89	Open	โคนต้นเริ่มเหี่ยวงอก เช่นเดียวกับการตากแดด
1	70	800	160,310	54	“	“
1.5	70	800	160,310	12	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.21 เปอร์เซนต์ความชื้นของรากผักชีเมื่อผ่านการอบแห้ง 1.5 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองอบแห้งรากผักชีสด โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 800 W ความดัน 160 torr โดยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็น 70°C ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 12 เปอร์เซนต์มาตรฐานแห้ง จะใช้เวลาประมาณ 1.5 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง อีกทั้งลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็เป็นที่น่าพอใจเช่นกัน



ภาพที่ 6.22 แสดงลักษณะของรากผักชีแห้งที่ผ่านการอบด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้น

การทดลองที่ 4 การอบแห้งใบหลากซาที่ความชื้นเริ่มต้น 99%db

ในที่นี้จะทำการอบแห้งใบหลากซาที่ความชื้นเริ่มต้น 99%db ซึ่งให้ผลการทดลองดังที่แสดงต่อไปนี้



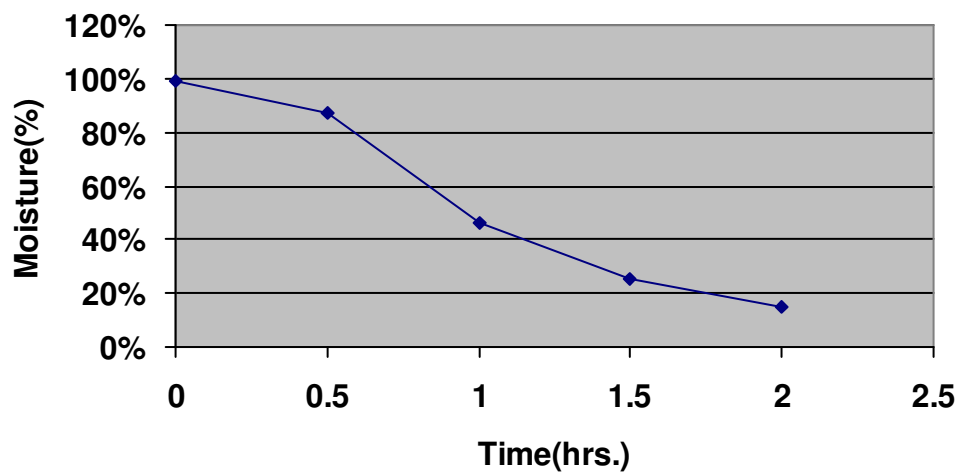
ภาพที่ 6.23 แสดงลักษณะของใบหลากซาสดก่อนทดลองอบแห้ง

ผลการทดลอง

Date: 24/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ ได้
0.5	50	727.3	160,310	87	Open	
1	50	727.3	160,310	46	“	ใบเหี่ยวมากกว่าการอบ ด้วยลมร้อน
1.5	50	727.3	160,310	25	“	“
2	50	727.3	160,310	15	“	“

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.24 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบหาลากซาเมื่อผ่านการอบแห้ง 2 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 727.3 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งใบหาลากซา โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 727.3 W ความดัน 160 torr โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็น 50°C ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 15 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง พบว่าใบหาลากซาที่ผ่านการอบแห้งมีการหึงงอได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากใบหาลากซามีลักษณะค่อนข้างที่จะอ่อนนุ่ม แต่ก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออบด้วยสภาวะดังกล่าวข้างต้นและสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้อีก

การทดลองที่ 5 การอบแห้งข้าสดหั่นสไลด์ ที่ความชื้นเริ่มต้น 98%db

ในที่นี้จะทำการอบแห้งข้าสดหั่นสไลด์ ที่ความชื้นเริ่มต้น 98%db ซึ่งให้ผลการทดลองดังที่แสดงต่อไปนี้



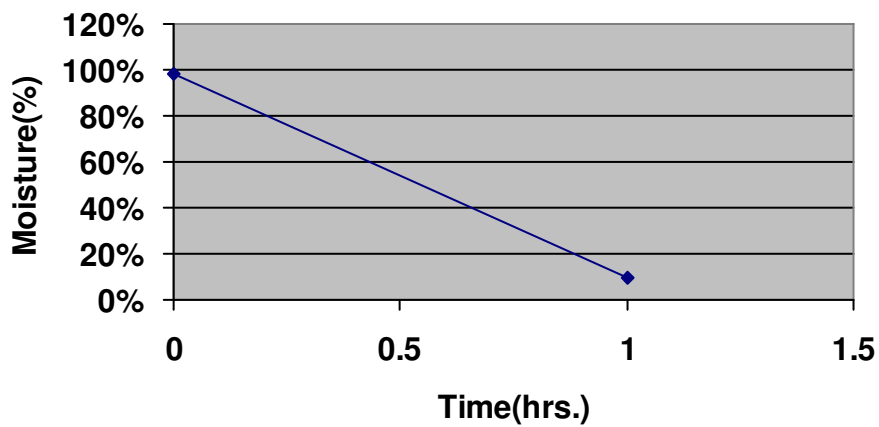
ภาพที่ 6.25 แสดงลักษณะของข้าสดหั่นสไลด์ก่อนทดลองอบ

ผลการทดลอง

Date: 25/06/2009

Time (h)	Temp. °C	Magnetron Power (watt)	Vacuum Pressure (torr)	Moisture Content (%db)	Rotary Drum	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ ได้
1	80	763.6	160,310	10	Open	สีขาวสวยเหมือนของสด

อัตราการสูญเสียความชื้น



ภาพที่ 6.26 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของขาสตั้นสไลด์เมื่อผ่านการอบแห้ง 1 ชั่วโมง
ที่กำลังแมกนีตรอน 763.6 W ความดัน 160 torr

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งขาสตั้นสไลด์ โดยใช้กำลังแมกนีตรอน 763.6 W ความดัน 160 torr โดยมีอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็น 80°C ซึ่งความชื้นลดลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เป็นที่น่าพอใจ แต่ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 80°C นั้นจะส่งผลให้ฝาดึงหมุนตรงบริเวณ Bearing เกิดการละลาย ดังนั้นจึงไม่ควรใช้อุณหภูมิอบแห้งเกิน 70°C เพราะเกิดความเสียหายต่อถังหมุนได้