วิทยานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่อ อบแห้งสมุนไพร

Development of A Microwave Assisted Heat Pump Dryer for Herbal Drying

นางสาวเทวรัตน์ ทิพยวิมล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๑

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร	วิศวกรรมเกษตร
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่ออบแห้งสมุนไพร

Development of A Microwave Assisted Heat Pump Dryer for Herbal Drying

นามผู้วิจัย นางสาวเทวรัตน์ ทิพยวิมล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ ....
(รองศาสตราจารย์สมยศ เชิญอักษร, Ph.D.)

กรรมการ ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)

กรรมการ ....
(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)

กรรมการ ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....
(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 4 **เดือน** เมษายน **พ.ศ.** ๒๕๕๑

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่ออบแห้งสมุนไพร

Development of A Microwave Assisted Heat Pump Dryer for Herbal Drying

โดย

นางสาวเทวรัตน์ ทิพยวิมล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
พ.ศ. 2551

เทวรัตน์ ทิพยวิมล 2551: การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่ออบแห้งสมุนไพร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สมยศ เชิญอักษร, Ph.D. 213 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งเพื่อทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน ให้สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในเบื้องต้นได้ทำการหาแนวทางในการเสริมพลังงานไมโครเวฟเข้ากับระบบการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยดัดแปลงตู้อบไมโครเวฟเป็นตู้อบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแล้วทำการทดลองอบแห้งพริกและไพล 5 แนวทางคือ 1. การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว 2. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง 3. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ความร้อนในช่วงต้น 4. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ความร้อนในช่วงท้าย 5. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง ซึ่งพบว่าการอบแห้งเป็นช่วงใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด มีอัตราการอบแห้งและประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงสุดโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ จากนั้นได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครวเฟขึ้น เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด 0.6885 m^3 ชุดระบบปั๊มความร้อนขนาด 1¼ ตันความเย็น ชุดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟขนาด 700 W จำนวน 3 ชุด ทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียวโดยใช้ พริกและไพล จำนวน 20 kg เป็นวัสดุทดสอบการอบแห้ง ซึ่งผลจากการทดสอบอบแห้งพริกพบว่าการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 25 % และลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ 21.91 % สำหรับผลการอบแห้งไพลพบว่าการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟในระบบการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 20% และลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ 15.64% นอกจากนี้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งยังสดกว่าสีของผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด และสารประกอบทางเคมีในไพลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับไพลสด สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งคือ อุณหภูมิ 50°C อัตราการไหล 0.621 $m^{3/}$/s และอากาศ bypass 75-80% ผลจากการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์พบว่าเมื่อนำไปใช้ในเชิงธุรกิจจะสามารถคืนทุนได้ในเวลา 1.70 ปี

เทวรัตน์ ทิพยวิมล | | 24 / 03 / 2551

ลายมือชื่อนิสิต | ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Tawarat Tipyavimol 2008: Development of A Microwave Assisted Heat Pump Dryer for Herbal Drying. Doctor of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Somyot Chirnaksorn, Ph.D. 213 pages.

A heat pump dryer was developed by adding microwave power into the drying system. Prior to develop the prototype of microwave combination dryer, the phenomenon of microwave combination drying was studied by modified a household microwave oven to hot air – microwave combination dryer. The dryer was tested to evaluate the drying performance by using chili and Phlai. Five methods of drying were used: 1. only hot air drying, 2. hot air-microwave together drying, 3. hot air-microwave preheating drying, 4. hot air-microwave finished drying, and 5. hot air-microwave pulse drying. The results showed that hot air-microwave pulse drying was the suitable method to apply microwave energy into conventional hot air drying of chili and Phlai because of the shortest drying time and highest of SMER and non-damaged of product by microwave heating. The prototype of microwave assisted heat pump dryer was designed and developed. The dryer consisted of 0.6885 m^3 of drying chamber, a heat pump system of 1 ¼ ton of regeration, three sets of microwave generator system at 2450 MHz (Daewoo, KOR-63D7) maximum power of 700 W contained in metal boxes to avoid microwave leakage. Experiments were performed with heat pump drying and microwave assisted heat pump drying to evaluate performance of the dryer by drying of 20 kg. chilli and Phlai. The results found that microwave assisted heat pump drying reduced 25% and 20% of drying time and 21.91% and 15.64% of specific energy consumption for chilli and Phlai, respectively, when compare with only heat pump drying. Dried products were better color than product from local market. Both drying methods had no significant effect to chemical compound of dried Phlai. The optimum operating contions of the dryer were 50 ^{o}C of temperature, 0.621 m^3/s of air flow rate and 75-80 % of evaporator bypass air. The result form economic evaluation was found that payback period is 1.70 years.

Tawarat Tipyavimol   [signature]   24 / 03 / 2008

Student's signature   Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สมยศ เชิญอักษร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์ กรรมการวิชาเอก อาจารย์สุกัญญา วิชชุกิจ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษา และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ที่จัดสรรห้องทำงานที่สะดวกแก่การทำงานและเป็นสัดส่วนพร้อมการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพื่อความสะดวกในการสืบค้นข้อมูล คุณศักดา จันทร์ทอง คุณประสาน รุ่งโรจน์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ คุณกระวี ตรีอำนรรค คุณณัฐพงศ์ รัตนเดช เพื่อนๆ ป.เอก และน้องๆ ป.โท ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมา

เทวรัตน์ ทิพยวิมล

มีนาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	149
สรุป	149
ข้อเสนอแนะ	150
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	151
ภาคผนวก	156
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	157
ภาคผนวก ข โปรแกรม MHPD 1.0	170
ภาคผนวก ค แบบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	208

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	ขอบเขตของอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งสมุนไพร	5
2	การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง	6
3	ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของสารละลายอิ่มตัวบางชนิด	12
4	ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัว	54
5	ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงานทั้ง 7 ระดับของตู้อบไมโครเวฟ	59
6	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER, kg/kWh) ของการอบแห้งพริก	79
7	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER, kg/kWh) ของการอบแห้งไพล	87
8	ผลการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ	94
9	ผลการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ	97
10	รายละเอียดการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ	103
11	ผลการตรวจสีพริกที่ได้จากการทดลอง	105
12	รายละเอียดการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ	110
13	รายละเอียดการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ	111
14	เปรียบเทียบค่าอัตราการอบแห้ง (DR) ในเทอมความสามารถในการระเหยน้ำและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เฉลี่ยของไพลตลอดการทดลอง	112
15	ผลการวิเคราะห์สีของไพลจากการอบแห้ง	113
16	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไพล	115
17	ค่าความชื้นสมดุลของไพลที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ	116
18	ค่าประมาณของค่าคงที่ในสมการความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ผลการทดลองอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลอง	142
20	ผลการทดลองอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง	143
21	สภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	144
22	ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	148

ตารางผนวกที่

1	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 1	158
2	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 2	158
3	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 3	159
4	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 1	159
5	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 2	160
6	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 3	160
7	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 1	161
8	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 2	161
9	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 3	162
10	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 1	162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

11	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 2	163
12	ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 3	163
13	ผลการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C	164
14	ผลการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C	165
15	ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C	166
16	ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C	167
17	ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C	168
18	ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C	169

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	พฤติกรรมการอบแห้งวัสดุอาหาร	7
2	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาและอัตราการอบแห้งที่สัมพันธ์กัน	9
3	ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 35 ^{o}C	11
4	หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	16
5	ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	17
6	องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	22
7	ตู้อบไมโครเวฟ DAWOO รุ่น KOR6D7	28
8	ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ	29
9	การวัดอุณหภูมิหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	30
10	ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	30
11	ลักษณะของชิ้นไพลที่ใช้ในการทดลอง	32
12	แผนภูมิอากาศชื้นแสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นของการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	36
13	ผลการจำลองสถานการณ์หาอัตราการไหลของอากาศต่อเวลาในการอบแห้ง	37
14	เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	41
15	โครงสร้างชั้นถาดใส่วัสดุอบแห้ง	42
16	ตำแหน่งติดตั้งเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น	43
17	ตำแหน่งติดตั้งพัดลม	43
18	ลักษณะของแมกนีตรอน	44
19	ส่วนประกอบภายในแมกนีตรอน	45
20	ขั้วแอโนดของแมกนีตรอน	45
21	อุปกรณ์สร้างแรงดันไฟฟ้าสูง	46
22	จุดวัดความเร็วลมของหน้าตัดทางเข้า กึ่งกลาง และทางออกของห้องอบแห้ง	47
23	จุดวัดความเร็วลมของท่ออากาศ bypass และเครื่องทำระเหย	48
24	ตำแหน่งวางแก้วน้ำเพื่อวัดอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากไมโครเวฟ	48
25	(ก) ชุดเครื่องวัดสี Hunter Lab colorFlex model JC801 (ข) ตัวอย่างในการวัดสี	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
26	วงจรตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง	52
27	วงจรตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดันของระบบปั๊มความร้อน	53
28	ลักษณะการวางตัวอย่างในโหลปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว	55
29	ปริมาตรควบคุมของส่วนประกอบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	57
30	การกระจายอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ เมื่อถาดอยู่นิ่ง	60
31	การกระจายอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ เมื่อถาดหมุน	61
32	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน	62
33	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน	63
34	อุณหภูมิของพริกในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน	64
35	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบไพลพริกด้วยลมร้อน	65
36	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อน	66
37	อุณหภูมิของไพลในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน	67
38	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ	68
39	อุณหภูมิของพริกขณะทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ	69
40	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งไพลด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ	70
41	ลักษณะของการไหม้ภายในเนื้อไพลเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ	70
42	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพลขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟ	71
43	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	72
44	อุณหภูมิของพริกขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	ลักษณะของพริกที่เกิดความเสียหายเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ	73
46	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying	74
47	อุณหภูมิของพริกขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ preheating drying	75
48	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบfinish drying	76
49	อุณหภูมิของพริกขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying	77
50	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบpulse drying	78
51	อุณหภูมิของพริกขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying	78
52	ลักษณะของพริกที่ได้หลังการอบแห้ง	80
53	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	81
54	อุณหภูมิของไพลขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	81
55	ลักษณะการเกิดรอยไหม้ขึ้นในเนื้อไพล	82
56	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying	83
57	อุณหภูมิของไพลขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying	83
58	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบfinish drying	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	อุณหภูมิของไพลขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying	85
60	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบpulse drying	86
61	อุณหภูมิของไพลขณะทำการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying	86
62	ลักษณะของไพลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับไพลแห้งจากการตากแดดของเกษตรกร	88
63	ลักษณะการกระจายของอากาศที่หน้าตัดบริเวณทางเข้า ตรงกลาง และทางออกห้องอบแห้ง	89
64	ลักษณะการกระจายของอากาศที่ท่อผ่านเครื่องทำระเหย และท่ออากาศ bypass	90
65	ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำในชั้นถาดที่เกิดจากหัวแมกนีตรอน	91
66	การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 40 ^{O}C	92
67	การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง	93
68	การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{O}C	95
69	การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง	96
70	การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (plot จาก 0-60 นาที)	96
71	การลดลงของน้ำหนักน้ำในแต่ละชั้นถาดเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{O}C	98
72	การลดลงของน้ำหนักน้ำในแต่ละชั้นถาดเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง	99
73	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	ลักษณะของพริกแห้งที่ได้หลังการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C	100
75	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C	101
76	ลักษณะของพริกหลังการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง	102
77	เปรียบเทียบการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนกับระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง	104
78	ลักษณะของผงพริกที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ	105
79	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C	106
80	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ40 ^{O}C	107
81	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C	108
82	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C	109
83	สีของผงไพลที่ได้จากการอบแห้ง ไพลสด และไพลจากตลาด	114
84	ความชื้นสมดุลของไพลจากการทดลอง	117
85	ตัวอย่างการหาค่า k และ n ในสมการของ Page ด้วยวิธีกราฟฟิคของการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C	121
86	ปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	123
87	วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอเมื่อมีความร้อนยิ่งยวดที่เครื่องทำระเหย	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่		หน้า
88	แผนภาพขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสม	137
89	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 1	138
90	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 2	139
91	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 3	140
92	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 4	141

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

n_w คือ อัตราการระเหยความชื้น

h_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

k_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

T_{abs} คือ อุณหภูมิ, ^{O}K

P_v คือ ความดันย่อยของไอ้น้ำ

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

m_w คือ มวลของความชื้น, kg

m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง, kg

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, %db

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ, kJ/kmol ^{O}K

$M_{0.5}$ คือ ความชื้นสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.5, %db

M_m คือ ความชื้นใน 1 ชั้นโมเลกุล, %db

T คือ อุณหภูมิ, ^{O}C

MW_{abs} คือ พลังงานไมโครเวฟที่ดูดกลืนโดยน้ำ, W

m คือ มวลของวัสดุ, kg

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ, J/kg ^{O}C

Δt คือ เวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟ, วินาที

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วน

M_f คือ ความชื้นสุดท้าย, เศษส่วน

q_e คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย, kW

H คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศ, $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

m_a คือ อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง, $kg_{dry\ air}/h$

h_{fg} คือ ความร้อนแผงของการระเหยน้ำ, kJ/kg

q_{MW} คือ พลังงานความร้อนจากไมโครเวฟ, kJ/h

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

c_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ/kg ^{O}C

c_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, kJ/kg ^{O}C

m_{bpf} คือ อัตราการไหลอากาศแห้งที่ไม่สัมผัสขดท่อเครื่องทำระเหย, kg $_{dry\ air}$/h

m_p คือ อัตราการไหลอากาศแห้งที่สัมผัสขดท่อเครื่องทำระเหย, kg $_{dry\ air}$/h

m_{ap} คือ อัตราการไหลอากาศแห้งผ่านเครื่องทำระเหย, kg $_{dry\ air}$/h

m_{abp} คือ อัตราการไหลอกาศแห้งข้ามเครื่องทำระเหย, kg $_{dry\ air}$/h

m_f คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น, kg/s

h คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็น, kJ/kg

U_e คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องทำระเหย, kW/m^{2} ^{O}C

U_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องควบแน่น, kW/m^{2} ^{O}C

A_e คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำระเหย, m^{2}

A_c คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น, m^{2}

BP คือ อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย, เศษส่วน

q_{comd} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวใน, kJ/h

W_s คือ กำลังงานเพลาขับเคลื่อนพัดลม, kJ/h

Q_{loss} คือ ความร้อนสูญเสีย , kJ/h

P_{motor} คือ กำลังงานที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า, kJ/h

E_m คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์, เศษส่วน

W_{com} คือ กำลังของเครื่องอัดไอ, MW

P_{r1} คือ ความดันของสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัดไอ, MPa

P_{r2} คือ ความดันของสารทำความเย็นออกจากเครื่องอัดไอ, MPa

V_c คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดไอ, m^{3}/kg

η_v คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องอัดไอ, เศษส่วน

CD คือ piston displacement, m^{3}/rev.

C_r คือ clearance volume, เศษส่วน

A คือ ค่าคงที่

B คือ ค่าคงที่

C คือ ค่าคงที่

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

D	คือ	ค่าคงที่
n	คือ	ค่าคงที่
k	คือ	ค่าคงที่

การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่ออบแห้งสมุนไพร

Development of A Microwave Assisted Heat Pump Dryer for Herbal Drying

คำนำ

สมุนไพรไทยกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ดังจะเห็นได้จากการมีสินค้าที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากสมุนไพร โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์เพื่อสุภาพและความงามวางจำหน่ายอยู่ทั่วไปทั้งในห้างสรรพสินค้า ร้านขายยาและร้านค้าทั่วไป การใช้ประโยชน์จากสมุนไพรสามารถทำได้ทั้งในรูปของสมุนไพรสดและสมุนไพรแห้ง การทำแห้งนอกจากจะทำให้สมุนไพรสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานแล้วยังช่วยให้สมุนไพรมีเสถียรภาพทางยาดีอีกด้วย เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสมุนไพรส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพ ดังนั้นกรรมวิธีในการผลิตจึงควรที่จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภคด้วย การทำแห้งสมุนไพรของไทยนิยมใช้การตากแดดเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ในปัจจุบันความนิยมสมุนไพรมีมากขึ้นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการทำแห้งสมุนไพร

การอบแห้งโดยทั่วไปจะเป็นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งอาจใช้ขดลวดไฟฟ้า น้ำมัน หรือแก๊ส เป็นแหล่งกำเนิดลมร้อนซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีการนี้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ การอบแห้งต้องขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศภายนอก การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูง สามารถทำการอบแห้งได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และอบแห้งได้ที่อุณหภูมิการอบแห้งต่ำจึงไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง โดยเฉพาะการอบแห้งวัสดุที่มีความไวต่อการเสียหายเนื่องจากความร้อน แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งโดยอาศัยหลักการพาความชื้นออกจากผิววัสดุจึงใช้ระยะเวลานานในการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งยังมีความชื้นไม่สม่ำเสมอโดยพบว่าวัสดุที่สัมผัสกับอากาศทางเข้าของห้องอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่าส่วนที่อยู่ด้านทางออก ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนโดยการนำเอาพลังงานไมโครเวฟเข้ามาเสริมเพื่อช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลง โดยจะทำการออกแบบ สร้าง ตลอดจนทดสอบประสิทธิภาพและประเมินสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนในด้านการใช้พลังงาน อัตราการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นแบบสำหรับอบแห้งสมุนไพรในระดับอุตสาหกรรม

2. ศึกษาทิศทางการกระจายของอากาศอบแห้งภายในห้องอบแห้ง

3. หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

4. ศึกษาผลตอบแทนและค่าใช้จ่ายในเชิงเศรษฐศาสตร์

การตรวจเอกสาร

สมุนไพร

สมุนไพรมีความหมายตาม พระราชบัญญัติยา พ.ศ. 2510 คือ ยาที่ได้จากพฤกษชาติ สัตว์ หรือแร่ซึ่งยังมิได้ผสมปรุงหรือแปรสภาพ (สมพร, 2527) ประโยชน์ของสมุนไพรไม่เพียงแค่ใช้เป็นยาเท่านั้นบางชนิดยังสามารถใช้เป็นอาหาร หรือใช้เป็นตัวช่วยเพิ่มรสชาติของอาหารได้ด้วย

วันดี (2537) ได้กล่าวถึงข้อดีข้อเสียของการใช้สมุนไพรในการบำบัดโรคไว้ดังนี้

ข้อดี

1. ทำให้เกิดอาการพิษได้น้อย เนื่องจากสมุนไพรส่วนมากมีฤทธิ์อ่อนก่อให้เกิดอาการพิษหรืออาการข้างเคียงได้น้อยกว่าการใช้ยาแผนปัจจุบัน

2. ช่วยประหยัดรายจ่าย เนื่องจากสมุนไพรมีราคาถูกกว่ายาแผนปัจจุบันมาก อีกทั้งสามารถปลูกและเตรียมเป็นยาใช้ได้เอง ซึ่งจะช่วยประหยัดรายจ่ายของครอบครัว และช่วยประหยัดเงินตราของประเทศชาติในการสั่งนำเข้ายาแผนปัจจุบันจากต่างประเทศ จึงสมควรที่จะสนับสนุนให้นำสมุนไพรมาใช้ประโยชน์ให้มากยิ่งขึ้น เพราะจะเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยลดการเสียเปรียบดุลการค้ากับต่างประเทศลงได้

3. เป็นที่พึ่งของคนในชนบทห่างไกล คนไข้ที่อยู่ตามชนบทห่างไกลซึ่งไม่สะดวกที่จะเดินทางมารับการตรวจรักษาจากสถานบริการทางการแพทย์แผนปัจจุบันได้ หากในหมู่บ้านมีสมุนไพรที่เชื่อถือได้ปลูกไว้ ก็จะสามารถใช้รักษาโรคได้โดยเฉพาะโรคที่อาการพื้นๆ เช่น อาการท้องอืด ท้องเฟ้อ ท้องผูก ท้องร่วง เป็นต้น

4. ช่วยขจัดปัญหาการขาดแคลนยาในภาวะคับขัน ยาแผนปัจจุบันและวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยาแผนปัจจุบันจำนวนมากต้องสั่งนำเข้าจากต่างประเทศหากเกิดสภาวะการขาดแคลนยาหรือในภาวะสงคราม การใช้สมุนไพรแทนยาแผนปัจจุบันจะเป็นสิ่งอำนวยประโยชน์อย่างยิ่ง

ข้อเสีย

1. ใช้ไม่สะดวก ยุ่งยาก เสียเวลา เช่นในการรับประทานยาหม้อต้องเสียเวลาอุ่นยาทุกเช้าและเย็น

2. ฤทธิ์ไม่แน่นอน ยาสมุนไพรมีฤทธิ์อ่อน ออกฤทธิ์ช้า ต้องรับประทานเป็นเวลานานๆ และเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากในสมุนไพรมีสารหลายชนิดอยู่รวมกัน ทำให้มีฤทธิ์ต้านกันเอง

ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากสมุนไพรที่เป็นพืชมิได้จำกัดอยู่เพียงแค่เป็นยารักษาโรคสำหรับมนุษย์เท่านั้นแต่ว่าได้มีการนำไปใช้เป็นยารักษาโรคให้กับสัตว์ด้วย เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตสัตว์ในเชิงธุรกิจเนื่องจากสมุนไพรมีราคาถูกกว่ายาแผนปัจจุบัน จากข้อมูล สุปรียา (http://herbal.pharmacy.psu.ac.th/Article/01-46/herbal-animal.pdf) ได้รายงานว่ามีการนำสมุนไพรมาเป็นยารักษาสัตว์ ทั้งสัตว์บก สัตว์ปีก และสัตว์น้ำ โดยระบุว่านอกจากประโยชน์ที่ใช้เป็นยารักษาโรคแล้วยังใช้เป็นยาบำรุงอีกด้วย สมุนไพรที่นิยมนำมาใช้มีหลายชนิด เช่น ขมิ้นชัน มีฤทธิ์ลดการอักเสบใช้ในการรักษาโรคผิวหนังที่เกิดจากเชื้อรา ฟ้าทะลายโจร ใช้แก้หวัด ทอนซิลอักเสบ ไพล มีฤทธิ์ในการขยายหลอดลม ใช้ภายนอกเป็นยาประคบร้อน พอกแก้อาการฟกช้ำ บวม ลดอาการอักเสบ บอระเพ็ด ต้นและเถาเป็นยาบำรุงกำลัง ลดไข้ นอกจากนี้ยังมีสมุนไพรอื่นๆ อีกหลายชนิดที่มีการนำมาใช้ โดยเฉพาะผู้ที่ทำการเพาะเลี้ยงไก่ชน ได้มีการนำเอาสมุนไพรมาเพื่อใช้เป็นยารักษาโรคและเป็นยาบำรุงเพื่อเพิ่มความสามารถของไก่ชนด้วย

ความตื่นตัวในเรื่องของสมุนไพร ได้มีอย่างกว้างขวางในปัจจุบันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากในปัจจุบันได้มีอาหารเสริมเพื่อบำรุงสุขภาพที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร หรือมีส่วนประกอบของสมุนไพร เช่น บุก และว่านหางจระเข้ ในสินค้าอุปโภคหลายชนิด เช่น แป้งทาตัว สบู่ ยาสีฟัน เครื่องสำอางก็ได้มีการนำเอาสมุนไพรมาเป็นจุดขายเพื่อให้ผู้บริโภคเกิดความมั่นใจในคุณภาพและเกิดความเชื่อถือว่ามีความปลอดภัย เนื่องจากตามความคิดที่ว่าสมุนไพรเป็นสิ่งที่เป็นธรรมชาติและมีการออกฤทธิ์แต่น้อยไม่เป็นอันตราย กรมการแพทย์กระทรวงสาธารณสุข (http://www.dms.moph.go.th/Section4/402.htm) ได้มีคำแนะนำสำหรับการใช้สมุนไพรสำหรับสาธารณสุขมูลฐาน เพื่อเป็นแนวทางในการใช้สมุนไพรที่ถูกต้อง และได้มีการแนะนำอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งสมุนไพรไว้ดังนี้

ตารางที่ 1 ขอบเขตของอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งสมุนไพร

ชนิดของสมุนไพร	อุณหภูมิที่ทำให้แห้ง (°C)
ดอก ใบ ทั้งต้น	20 – 30
ราก กิ่งราก ผิว	30 – 65
ผล	70 – 90
สมุนไพรที่มีน้ำมันหอมระเหย	25 – 30
สมุนไพรที่มีไกลโคไซด์และอัลคาลอยด์	50 – 60

ที่มา : http://www.dms.moph.go.th/Section4/402b.htm

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสมุนไพรค่อนข้างต่ำ และการทำแห้งสมุนไพรโดยทั่วไปจะใช้การตากแดด ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนและเกิดความความเสียหายเนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศ เช่นมีฝนตก อากาศชื้น ทำให้สมุนไพรแห้งที่ได้มีคุณภาพที่ต่ำ เกิดเชื้อรา ดังนั้นเครื่องอบแห้งจึงมีความสำคัญในการช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แต่เนื่องจากเครื่องอบแห้งทั่วไปจะมีการใช้พลังงานที่สิ้นเปลืองจากรายงานของ Jay and Oliver(1994) พบว่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าประมาณ 20% ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมในประเทศอังกฤษ ดังนั้นควรมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นการลดความชื้นที่มีความสำคัญกระบวนการหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและผลิตผลทางการเกษตร โดยจุดมุ่งหมายหลักของการอบแห้งก็เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการลดน้ำหนักและปริมาตรเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการบรรจุ การจัดการการเก็บรักษาและการกระจายผลิตภัณฑ์ ระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตัวผลิตภัณฑ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ (Physical) เคมี (chemical) ชีวภาพ เช่นเนื้อสัมผัส สี กลิ่นและคุณค่าทางอาหาร ดังนั้นจุดประสงค์รองของการอบแห้งคือผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีคุณภาพที่ดีและมีคุณค่าทางอาหารตามที่มาตรฐานกำหนด

การจำแนกเครื่องอบแห้งจำแนกได้จาก วิธีการให้ความร้อน ชนิดของเครื่องมือในการอบแห้ง วิธีการลำเลียงผลิตภัณฑ์และสถานะในการป้อน สภาวะการทำงาน เป็นต้น ตัวอย่างการจำแนกเครื่องอบแห้งตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนแสดงในตารางที่ 2

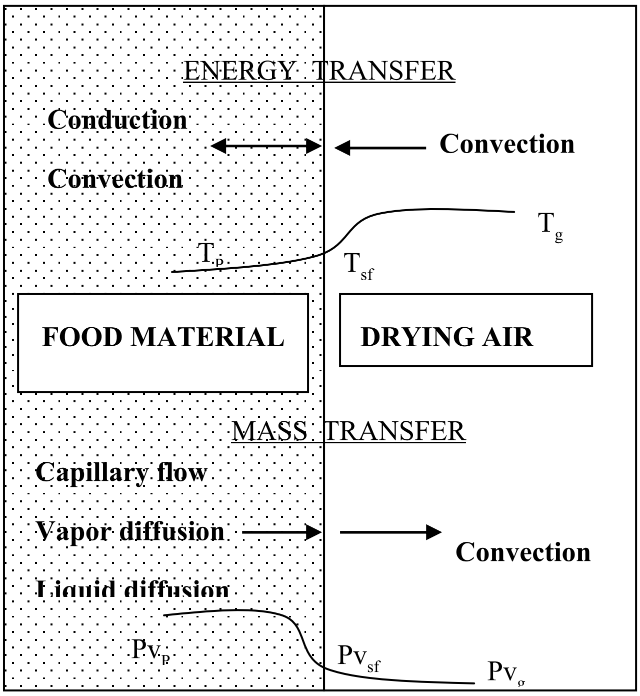
ตารางที่ 2 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง

Mode of Heat Transfer	Dryers	
	Batch operation	Continuous operation
Convection	Kiln dryer	Tunnel dryer
	Cabinet dryer	Conveyor dryer
	Heat pump dryer	Spray dryer
		Fluidized bed dryer
		Heat pump dryer
Conduction	Heat-shelf dryer	Drum dryer
	Agitated pan dryer	
Radiation	Infrared dryer	
Internal generation of heat	Microwave oven	Dielectric continuous dryer
		Microwave tunnel
Mixed	Shelf dryer	Rotary dryer

ที่มา: สมบัติ (2529)

กลไกการถ่ายเทมวลสารและความร้อนในการอบแห้ง

การอบแห้งอยู่บนพื้นฐานความรู้เรื่องคุณสมบัติของอากาศและวัสดุ โดยที่ความสัมพันธ์ของไอน้ำในอากาศ และ Psychometric properties ของอากาศชื้น คุณสมบัติการดูดกลืนความชื้น และ thermo-physical properties ของวัสดุหาได้จากการทดลองในห้องแลป หรือทำนายจากแบบจำลอง ภาพที่ 1 แสดงการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างวัสดุอบแห้งกับสิ่งแวดล้อมโดยการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมสู่ผิวของวัสดุ ในระหว่างการอบแห้งจะมีการส่งผ่านความร้อนภายในเนื้อวัสดุด้วย ขณะเดียวกันจะมีการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในเนื้อวัสดุไปสู่ผิวของวัสดุ แล้วถ่ายเทความชื้นสู่สิ่งแวดล้อม การระเหยเป็นไอเกิดขึ้นได้ทั้งที่ผิวและภายในเนื้อวัสดุทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อนในการอบแห้งมีทั้งแบบการพาความร้อนเกิดขึ้นเมื่อพลังงานสำหรับการระเหยได้รับจากกระแสอากาศร้อนที่ไหลผ่านวัสดุดังเช่น การอบแห้งแบบถาด, belt-conveyor, flash, fluid-bed และ spray drying และการนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสัมผัสกับผิวร้อนดังในกรณีของ เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหรือ rotary dryer



ภาพที่ 1 พฤติกรรมการอบแห้งวัสดุอาหาร

ที่มา: Guillermo et al. (1997)

การส่งผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นโดยการนำเนื่องจาก internal gradient ของอุณหภูมิและมีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการพาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้น การเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุอาหารอาจเกิดขึ้นจากกลไกที่ต่างกันคือ

1. Capillary flow เนื่องจาก gradients ของ capillary suction pressure
2. การแพร่กระจายของเหลวเนื่องจาก gradient ของความเข้มข้น
3. การแพร่กระจายของไอเนื่องจาก partial vapor-pressure gradients
4. Viscous flow เนื่องจาก total pressure gradient ซึ่งมีสาเหตุมาจากความดันภายนอกหรืออุณหภูมิที่สูง

การถ่ายเทมวลจากผลิตภัณฑ์ไปสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นเนื่องจากการพาความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและผลิตภัณฑ์ การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศอย่างเช่นในกรณีนี้ของ vacuum drying และ freeze drying

การสมดุลความร้อนอย่างง่ายของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน Brooker et al. (1992) ได้แนะนำสมการซึ่งทำการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุ โดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุชื้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศ ซึ่งมีรูปสมการคือ

$$m_w h_{fg} = \dot{m}_a c_a (T_{ai} - T_{af}) t \qquad (1)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

c_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg ^{O}C)

T_{ai} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง (^{O}C)

T_{af} คือ อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง (^{O}C)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

สำหรับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของวัสดุ ดังสมการคือ

$$m_w = m_{pi}\left(1-\frac{M_f+1}{M_i+1}\right) \tag{2}$$

เมื่อ m_{pi} คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (kg)

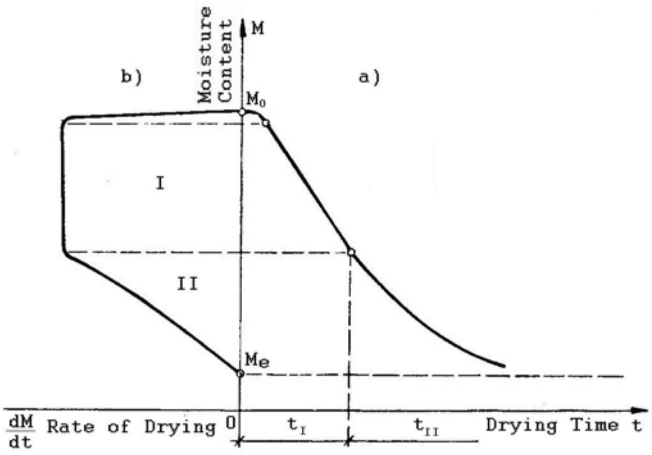
M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics)

ข้อมูลการอบแห้งส่วนใหญ่ได้มาจากการทดลองหรือได้มาจากการทำนายด้วยแบบจำลอง พฤติกรรมการอบแห้งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมักแสดงอยู่ในรูปของ Drying curve หรือ drying rate curve โดย Drying curve สามารถที่จะแบ่งเป็นบริเวณที่แตกต่างกัน คือ ช่วงเริ่มต้นซึ่งการระเหยเกิดขึ้นที่ผิวและอุณหภูมิจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นอุณหภูมิกระเปาะเปียกซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกว่าเป็นช่วงการอบแห้งคงที่ ผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุเกษตรส่วนใหญ่จะไม่มีพฤติกรรมนี้เนื่องจากไม่มีปริมาณน้ำอิสระที่ผิววัสดุ จุดที่เกิดอัตราการอบแห้งลดลงจะเริ่มจากจุดซึ่งเรียกว่า ความชื้นวิกฤต ระหว่างช่วงนี้ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุมีค่าลดลงส่วนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเหนืออุณหภูมิกระเปาะเปียกเกิดการพัฒนา non-flat internal moisture and temperature profiles โซนการระเหยจะย้ายจากผิววัสดุเข้าสู่เนื้อวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้งและคุณสมบัติของวัสดุ

ขณะที่ความชื้นลดลง ความต้านทานภายในสำหรับการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นและชัดเจนขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นประมาณอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ทำให้เกิดช่วงที่สองของอัตราการอบแห้งลดลง กลไกการควบคุมก็คืออัตราการเคลื่อนที่ความชื้นภายในวัสดุ โดยมีการแพร่กระจายของไอน้ำเป็นหลัก ปริมาณความชื้นมาถึง M_e ซึ่งเป็นค่าสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาและอัตราการอบแห้งที่สัมพันธ์กัน

ที่มา: Pabis et al. (1998)

ความชื้นวัสดุ

ปริมาณความชื้นของวัสดุจะอธิบายอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางการค้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_d} \qquad (3)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ความชื้นมาตรฐานแห้งหาได้จาก

$$M_d = \frac{m_w}{m_d} \qquad (4)$$

จากสมการ (3) และ (4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้งดังนี้

$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w} \quad (5)$$

และ

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (6)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b, อัตราส่วน)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b, อัตราส่วน)

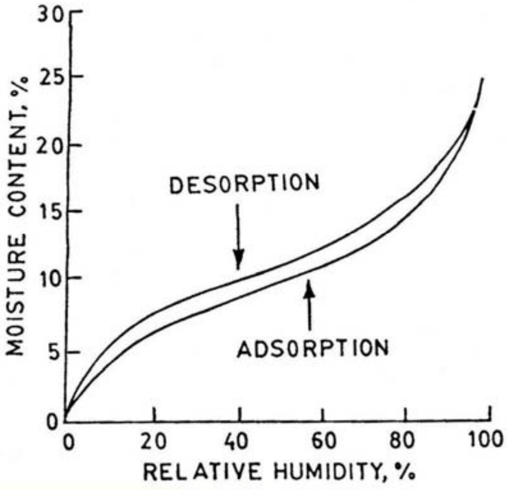
m_w คือ มวลของความชื้น (kg)

m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการอบแห้งและการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตร ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทำการอบแห้งหรือเก็บรักษาวัสดุเกษตรที่สภาวะคงที่ความชื้นของวัสดุจะลดจนถึงความชื้นสมดุลซึ่งมีความดันไอภายในวัสดุเท่ากับความดันไอในบรรยากาศ

ความชื้นสมดุลของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปตาม ชนิดของวัสดุ อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิค่าหนึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปตัว S (ภาพที่ 3) เรียกว่าไอโซเทอม



ภาพที่ 3 ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 35 ^{o}C
ที่มา: Bala (1997)

ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุหาได้จากการนำเอาวัสดุไว้ในที่สภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศคงที่เป็นเวลานานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นกับบรรยากาศแวดล้อมอย่างสมบูรณ์ ซึ่งวิธีการหาค่าความชื้นสมดุลที่วัสดุเกษตรและอาหารหลายชนิดจะใช้การนำเอาวัสดุใส่ไว้ด้านบนตะแกรงซึ่งอยู่ในภาชนะปิดสนิทที่บรรจุสารละลายเกลือหรือกรดอิ่มตัวซึ่งจะให้สภาวะอากาศภายในภาชนะดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของสารละลายอิ่มตัวบางชนิด

Salt	Equilibrium relative humidity (%)		
	30 ^{o}C	40 ^{o}C	50 ^{o}C
KOH	7.38	6.26	5.72
$MgCl_2$	32.38	31.59	30.54
N_2CO_3	43.17	42.30	40.91
$NaNO_3$	72.75	71.00	69.04
KCl	83.62	82.32	81.26
$BaCl_2$	89.90	89.10	88.23

ที่มา: Lahsasni et al. (2002)

ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสมดุลของวัสดุและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุได้

อารีย์ (2532) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของสับปะรดแช่อิ่มโดยทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิระหว่าง 50-72 ^{O}C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10-80 % โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว แล้วนำค่าความชื้นสมดุลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมจากรูปแบบสมการ 6 รูปแบบคือ

แบบจำลองของ Brunauer et al.

$$\frac{rh}{(1-rh)} = \frac{1}{CM_m} + \frac{(C-1)rh}{CM_m} \qquad (7)$$

แบบจำลองของ Iglesias & Chirife

$$\ln\left[M_{eq} + \sqrt{M_{eq}^2 + M_{0.5}}\right] = A + B(rh) \qquad (8)$$

แบบจำลองของ Oswin

$$M_{eq} = A\left[rh/(1-rh)\right]^n \qquad (9)$$

แบบจำลองของ Halsey

$$rh = \exp\left[\frac{-AM_{eq}^2}{R(T+273)}\right] \qquad (10)$$

แบบจำลองของ Chung & Pfost

$$\ln(rh) = \frac{-A\exp(-BM_{eq})}{R(T+273)} \qquad (11)$$

แบบจำลองของ Henderson

$$1 - rh = \exp\left[-A(T+273)M_{eq}^B\right] \qquad (12)$$

เมื่อ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%db)

T คือ อุณหภูมิ (^{O}C)

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ = 8.314 kJ/kmol K

A, B, C, n คือ ค่าคงที่

$M_{0.5}$ คือ ความชื้นสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.5 (%db)

M_m คือ ความชื้นใน 1 ชั้นโมเลกุล (%db)

สมการที่สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด คือ สมการของ Iglesias & Chirife โดยมีค่า A=3.40318-0.020486 T, B=1/[0.728827-0.005964 T] และ $M_{0.5}$= 1/[0.0100346-0.00063 T]

Kaleemullah and Kailappan (2004) ทำการหาค่า sorption isotherms ทั้งในรูปแบบของ adsorption และ desorption ของพริกโดยสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ในช่วง 11.15-86.50 % อุณหภูมิของอากาศ 25, 35 และ 45 ^{O}C จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 10 รูปแบบคือ

Oswin
$$rh = \frac{\left(M_{eq}/a\right)^{1/b}}{1 + \left(M_{eq}/a\right)^{1/b}} \quad (13)$$

Smith
$$rh = 1 - \exp\left\{(a - M_{eq})/b\right\} \quad (14)$$

Halsey
$$rh = \exp\left\{- a/(T_{abs} M_{eq}^{b})\right\} \quad (15)$$

Henderson
$$rh = 1 - \exp(-a T_{abs} M_{eq}^{b}) \quad (16)$$

Day and Nelson
$$rh = 1 - \exp(-a T_{abs}^{b} M_{eq}^{cT^{d}}) \quad (17)$$

Modified Henderson
$$rh = 1 - \exp\left\{- a(T + b) M_{eq}^{c}\right\} \quad (18)$$

Modified Halsey
$$rh = \exp\left[\left\{- \exp(a + bT_{abs})\right\}/M_{eq}^{c}\right] \quad (19)$$

Modified Chung and Pfost $$rh = \exp\left\{\frac{-a\exp(-bM_{eq})}{(T_{abs}+c)}\right\} \quad (20)$$

Modified Oswin $$rh = \frac{1}{\left[\left\{(a+bT_{abs})/M_{eq}\right\}^{c}+1\right]} \quad (21)$$

Kaleemullah $$rh = a - b\exp(-cT_{abs}M_{eq}^{d}) \quad (22)$$

เมื่อ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (เศษส่วน)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%db)

T_{abs} คือ อุณหภูมิ (^{O}K)

a, b, c, d คือ ค่าคงที่

ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่าสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของพริกในกระบวนการ adsorption คือ แบบจำลอง Modified Halsey และ แบบจำลอง Kaleemullah ในขณะที่สมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของพริกในกระบวนการ desorption คือ แบบจำลอง Modified Oswin แบบจำลอง Kaleemullah และ แบบจำลอง Oswin โดยแบบจำลองที่สามารถทำนายได้ทั้งกระบวนการ adsorption และกระบวนการ desorption คือ แบบจำลอง Kaleemullah

Ajibola et al. (2003) ได้ทำการหาไอโซเทอมความชื้นสมดุลของถั่ว cowpea โดยใช้แบบจำลอง 4 แบบ คือ

Henderson $$M_{eq} = \left[-\ln(1-rh)/AT_{abs}\right]^{1/B} \quad (23)$$

Chung-Pfost $$M_{eq} = -1/b\left[\ln(-T_{abs}/A)\right]\ln(rh) \quad (24)$$

Modified Henderson $$M_{eq} = \left[\ln(1-rh)/(-A(T+B)\right]^{1/C} \quad (25)$$

Modified Halsey $$M_{eq} = \left[-\ln(rh)/\exp(A + BT_{abs})\right]^{1/C} \tag{26}$$

เมื่อ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%db)

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

A, B, C คือ ค่าคงที่

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (^{O}K)

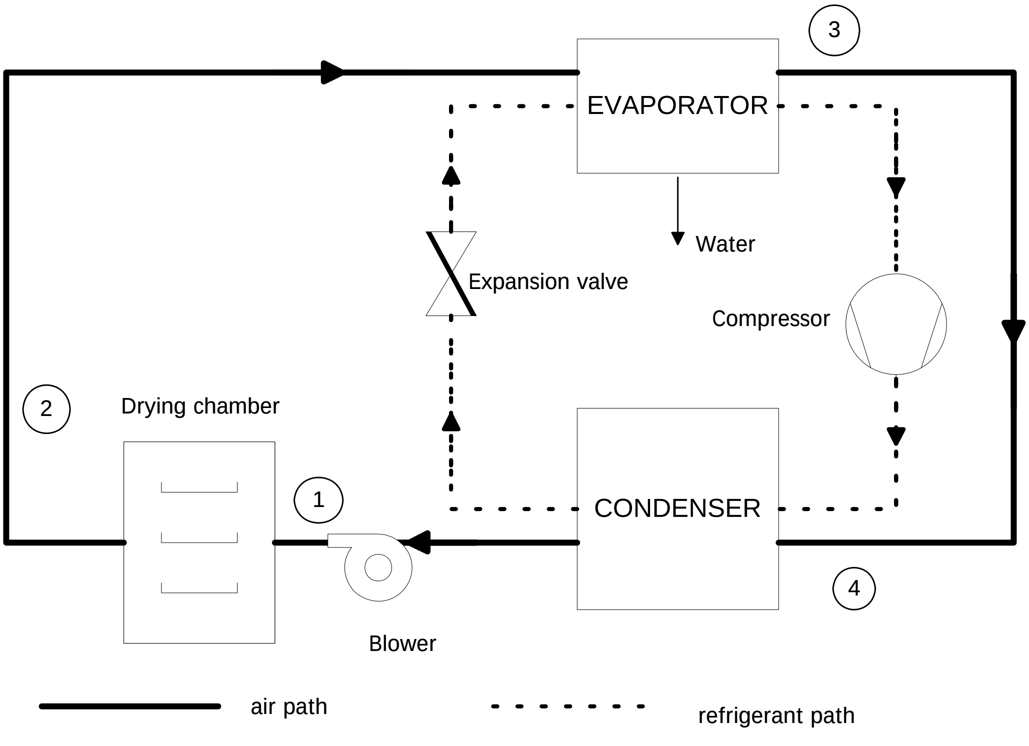
T คือ อุณหภูมิ (^{O}C)

จากการฟิตค่าข้อมูลที่ได้กับแบบจำลองทั้ง 4 แบบข้างต้นพบว่า Modified Henderson เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดให้การทำนายค่าความชื้นสมดุล

รูปแบบสมการที่ใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและพันธุ์ที่ใช้ การเลือกรูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุดจึงจำเป็นต้องทำการทดลองฟิตค่าที่ได้จากการทดลองกับรูปแบบสมการหลายๆ แบบแล้วทำการเปรียบเทียบหารูปแบบสมการที่เหมาะสมต่อวัสดุที่ต้องการหาค่าความชื้นสมดุลมากที่สุด

การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

การทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแสดงในภาพที่ 4 โดยอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 1 อากาศได้รับความชื้นจากวัสดุเป็นอากาศร้อนชื้นและออกจากห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 2 และเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นโดยการควบแน่นน้ำออกจากอากาศ กระบวนการจาก 2–3 ความร้อนแฝงของการระเหยจะถูกใช้ในการระเหยสารทำความเย็นภายในเครื่องทำระเหย จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงแล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) อากาศเย็นที่ผ่านการลดความชื้นจะได้รับความร้อนคืนกลับเมื่อไหลผ่านเครื่องควบแน่นจากตำแหน่ง 4-1 ส่วนสารทำความเย็นก็จะไหลจากเครื่องควบแน่นสู่เครื่องทำระเหยโดยผ่านวาล์วขยายเพื่อทำการลดความดันให้ต่ำลง การอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ 3 ระบบคือ



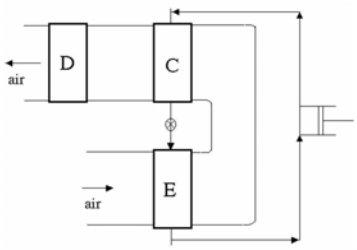
ภาพที่ 4 หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chua et al. (2000)

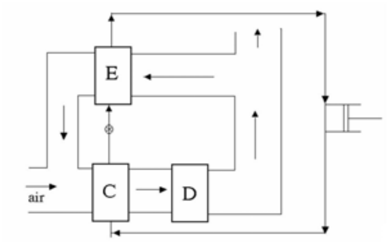
1. การอบแห้งระบบเปิด (open system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วทำให้มีความชื้นสูงขึ้น อากาศนี้จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศทั้งหมด ซึ่งการอบแห้งระบบเปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียว หรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยสู่บรรยากาศก็ได้ ลักษณะการอบแห้งระบบเปิดแสดงในภาพที่ 5 (ก)

2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (partial closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้ว จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งจะถูกลดความชื้นก่อนนำกลับมาใช้ผสมกับอากาศใหม่ การอบแห้งรูปแบบนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและลดความชื้นอากาศ ลักษณะการอบแห้งระบบปิดบางส่วนแสดงในภาพที่ 5 (ข)

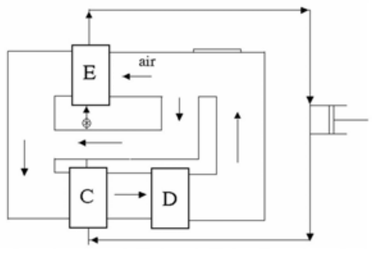
3. การอบแห้งระบบปิด (closed system) การอบแห้งรูปแบบนี้จะนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด โดยอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านการลดความชื้นแล้ว การอบแห้งระบบปิดนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้น ลักษณะการอบแห้งระบบปิดแสดงในภาพที่ 5 (ค)



(ก) ระบบเปิด



(ข) ระบบปิดบางส่วน



(ค) ระบบปิด

ภาพที่ 5 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นการรวมเอาส่วนประกอบหลักสองส่วนเข้าด้วยการคือ ส่วนอบแห้ง กับระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นการออกแบบระบบปั๊มความร้อนจึงต้องมีความสัมพันธ์กับส่วนอบแห้ง สำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนแบบปิด เมื่อพิจารณาที่วงจรอากาศ (ภาพที่ 5 (ค)) จะพบว่าอากาศหลังการอบแห้งที่เวียนกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนจะไหลข้ามเครื่องทำระเหย (bypass) ไปผสมกับอากาศส่วนแรก แล้วนำไปอุ่นที่เครื่องควบแน่นต่อไป การออกแบบจึงเริ่มจากการหาขนาดของเครื่องทำระเหย ซึ่งจากการสมดุลความพลังงานจะได้ว่า

$$Q_e = \dot{m}_{ae} c_a (T_{ei} - T_{eo}) \qquad (27)$$

เมื่อ Q_e คือ อัตรการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย (kW)

$\dot{m}_{ae}$ คือ อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องทำระเหย (kg/s)

T_{ei} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย (^{O}C)

T_{eo} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย (^{O}C)

ในการอบแห้งระบบปิดจะมีเครื่องควบแน่น 2 ชุด เป็นชุดเครื่องควบแน่นตัวในซึ่งใช้ในการอุ่นอากาศ และเครื่องควบแน่นตัวนอกใช้สำหรับระบายความร้อนส่วนเกินออกจากระบบ ในการหาขนาดเริ่มจากเครื่องควบแน่นตัวใน ซึ่งจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิของอากาศผสมระหว่างอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยกับอากาศ bypass ซึ่งเป็นสภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่นซึ่งจากการสมดุลความร้อนสัมผัสของอากาศผสมจะได้ว่า

$$\dot{m}_a T_{ci} = \dot{m}_{bp} T_f + \dot{m}_{ae} T_{eo} \qquad (28)$$

เมื่อ $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลของอากาศผสม (kg/s)

$\dot{m}_{bp}$ คือ อัตราการไหลของอากาศ bypass (kg/s)

T_{ci} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (^{O}C)

T_f คือ อุณหภูมิของอากาศหลังการอบแห้ง (^{O}C)

เมื่อทราบอุณหภูมิของอากาศผสมแล้ว ก็สามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวในได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนคือ

$$Q_{cin} = \dot{m}_a c_a (T_{co} - T_{ci}) \tag{29}$$

เมื่อ Q_{cin} คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)

T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องควบแน่น (^{O}C)

เมื่อได้ขนาดของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นตัวในแล้ว สามารถนำไปหาขนาดของเครื่องอัดไอได้จาก catalogue ของบริษัทผู้ผลิต และเมื่อได้เครื่องอัดไอแล้วสามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวนอกได้จาก

$$Q_{cex} = Q_e + W_c - Q_{in} \tag{30}$$

เมื่อ Q_{cex} คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)

W_c คือ กำลังของเครื่องอัดไอ (kW)

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนจะพิจารณาเป็นสองส่วนคือ

1. ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) ซึ่งหาได้จาก

$$COP = \frac{\text{useful heat output}}{\text{power input}} = \frac{Q_{cin}}{W_c} \tag{31}$$

ค่าประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีของปั๊มความร้อนคือ Carnot efficiency ซึ่งหาได้จาก

$$COP_{carnot} = \frac{T_{condenser}}{T_{condenser} - T_{evaporator}} \tag{32}$$

ซึ่งค่า ประสิทธิภาพการใช้งานจะมีค่าประมาณ 40 ถึง 50% ของค่าทางทฤษฎี Chua et al. (2000)

2. ประสิทธิภาพทางด้านการอบแห้งแบ่งสามารถพิจารณาได้จาก

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง คือ

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \tag{33}$$

$$DR = \frac{M_i - M_f}{t} \tag{34}$$

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง

$$SMER = \frac{W_i - W_f}{Pe} \tag{35}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER

$$SEC = \frac{3.6\,Pe}{W_i - W_f} \tag{36}$$

อัตราควบแน่น (Moisture Extraction Rate, MER) คือปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหยต่อเวลาที่ใช้อบแห้ง

$$MER = \frac{M_{wc}}{t} \tag{37}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, kg/h หรือ %db/h

m คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg

M คือ ความชื้นวัสดุ, %db

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h

SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg/kWh

Pe คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/h

MER คือ อัตราควบแน่นน้ำ, kg/h

ตัวห้อย

i คือ ก่อนอบแห้ง

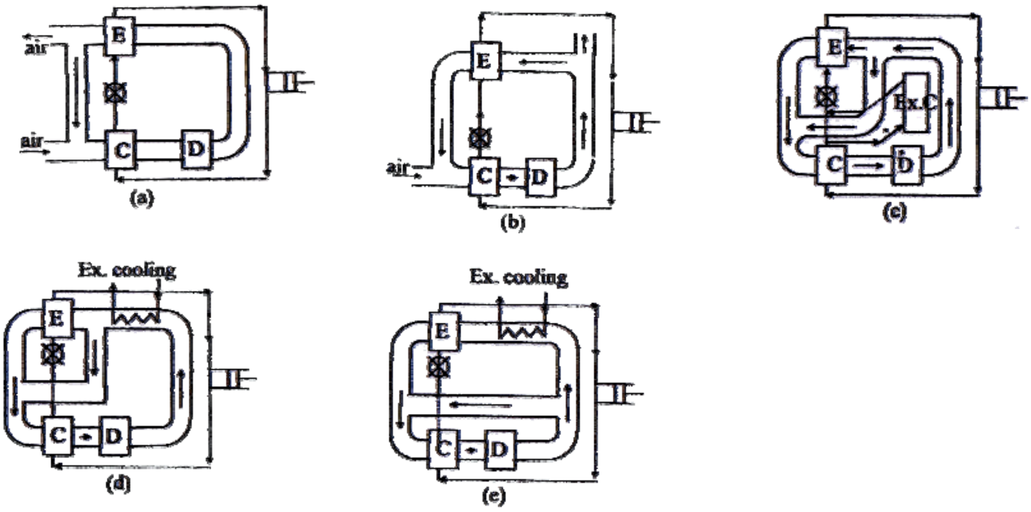
f คือ หลังอบแห้ง

wc คือ ควบแน่นน้ำ

Sosle et al. (2003) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนโดยปั๊มความร้อนมีขนาด 2.3 kW และมี external condenser เป็นแบบ water-cooled ทำการทดลองอบแห้ง apple เปรียบเทียบกับ hot air drying พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมีการคืนน้ำกลับได้ดีกว่า และมีค่า water activity ต่ำกว่าที่ค่าความชื้นเท่ากัน แต่ในด้านความสิ้นเปลืองพลังงานกับพบว่าเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนของระบบออกไปทาง external condenser ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Prasertsan and Sean-saby (1998) ที่ทำการทดลองอบแห้งกล้วยโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้ก๊าซหุงต้มและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะเสียค่าใช้จ่ายในการทำงานที่ต่ำกว่าซึ่งผลการศึกษาที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับ Meyer and Greyvenstein (1992) ที่นำเอาระบบปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งเมล็ดพืชแทนที่การอบแห้งโดยใช้พลังงานจากขดลวดความร้อนและเชื้อเพลิงดีเซล แต่เนื่องจากการอบแห้งเมล็ดพืชจะกระทำเพียงไม่กี่ครั้งในรอบปี ดังนั้นเพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนจึงแนะนำว่าควรที่จะนำระบบปั๊มความร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นร่วมด้วย เช่นการทำน้ำอุ่นเป็นต้น

นอกจากนี้ Saensabai and Prasertsan (2003) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งเป็นการศึกษาทั้งสามรูปแบบการทำงานคือ ระบบเปิด ระบบปิดบางส่วน ระบบปิด โดยมุ่งเน้นหาระบบการทำงานที่เหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น โดยการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Prasertsan et

al. (1996) พัฒนาขึ้นซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบเปิดและระบบปิดบางส่วนมาใช้ในการจำลองสถานการณ์และใช้ผลการทดลองของ Prasertsan et al. (1997) มาทำการพิสูจน์เปรียบเทียบ แต่ว่าผลการทดลองในปี 1997 ของ Prasertsan et al. นี้ไม่ครอบคุมถึงช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาและการศึกษานี้ไม่ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการจัดเรียงตำแหน่งของอุปกรณ์ในรูปแบบ (d) และ (e) ด้วย ผลจากการศึกษาทั้ง 5 รูปแบบนี้พวกเขาสรุปว่าเครื่องอบแห้งที่ทำงานเป็นแบบระบบปิดบางส่วนมีความเหมาะสมกับสภาวะอากาศร้อนชื้นมากที่สุดและยังพบว่าการทำงานที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งและสภาวะอากาศแวดล้อมด้วย



C = condenser, D = dryer, E =e vaporator, Ex.C = external condenser,

Ex. Cooling = extenal cooling

ภาพที่ 6 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: Saensabi and Prasertsan, 2003

สมยศและสุทธิศักดิ์ (2543) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งทำงานเป็นแบบระบบปิด โดยการนำชุดกาลักความร้อนมาช่วยลดความชื้นและการคืนความร้อนกลับของอากาศ เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด 0.65 ×0.58×0.55 m^3 ภายในบรรจุผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 8 ถาด มีพื้นที่ใช้งาน 2.5 m^2 ใช้ระบบปั๊มความร้อนขนาดหนึ่งตันความเย็นและชุดกาลักความร้อนขนาด 1.6 กิโลวัตต์ การทำงานของเครื่องเป็นระบบปิดมีอุณหภูมิอบแห้ง 50 ^0C จากการประเมินสมรรถนะจากการระเหยน้ำจำนวน 4 กิโลกรัม ที่อัตราการไหล

อากาศ 0.363, 0.447 และ 0.536 kg/s อัตราส่วนอากาศ Bypass 60-67% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ค่า SMER (Specific Moisture Extraction Rate) ของระบบอยู่ในช่วง 0.330-0.3338 kg/kWh ค่า MER (Moisture Extraction Rate) ทำได้สูงสุด 0.590 kg/h และค่า COP (Coefficient Of Performance) ของระบบปั๊มความร้อนอยู่ในช่วง 3.31-4.09 ประสิทธิภาพของกาลักความร้อนอยู่ในช่วง 0.194-0.212 และจากการทดลองอบแห้งเห็ดฟางจำนวน 6 การทดลอง ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.544 - 0.568 kg/s อัตราส่วนอากาศ Bypass ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 65.42 -67.82 % เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.530 - 1.019 kg/h โดยอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลผลิตและความชื้นเริ่มต้นของแต่ละการทดลอง ในด้านการใช้พลังงานพบว่ามีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงอยู่ระหว่าง 1.71- 1.83 kWh ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำที่ระเหยต่อหน่วยพลังงาน (SMER) ได้ค่าระหว่าง 0.305 -0.594 kg/kWh คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจากการทดสอบเทียบสีมาตรฐานพบว่ามีความสม่ำเสมออยู่ในค่ามาตรฐานเดียวกัน ซึ่งต่อมา สมยศและเทวรัตน์ (2546) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่พัฒนาขึ้นมานี้โดยใช้หลักการสมดุลมวลสารและพลังงานของอากาศและผลิตภัณฑ์บนปริมาตรควบคุมร่วมกับกระบวนการอุณหพลศาสตร์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง จากนั้นทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HPD 1.0 เพื่อใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ และทำการพิสูจน์แบบจำลองโดยการทดลองอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนต้นแบบที่อุณหภูมิ 45 ^{o}C และ 50 ^{o}C อุณหภูมิละ 2 การทดลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้งในด้านความชื้น และสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ลมโดยทั่วไปเมื่อการอบแห้งมาถึงความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะลดลงเนื่องจากความชื้นจะต้องเคลื่อนที่จากภายในเนื้อวัสดุมาสู่ผิวของวัสดุ ซึ่งการอบแห้งวัสดุส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง เมื่ออัตราการเคลื่อนที่ความชื้นมาสู่ผิวของวัสดุช้าลง บริเวณผิวของวัสดุจะแห้งและเกิดการหดตัวยิ่งเป็นการทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นเป็นไปได้ยากขึ้น หากการอบแห้งดำเนินต่อไปอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้ง เช่น มีการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เป็นต้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวการนำเอาไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้งจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้เนื่องจากไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนแก่วัสดุได้จากภายในไม่เฉพาะเพียงแต่ที่ผิวของวัสดุเท่านั้น Schiffmann (1987) ได้แนะนำการนำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนไว้ 3 แบบ คือ Preheating โดยการให้พลังงานไมโครเวฟที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง ภายในเนื้อวัสดุจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการระเหย จึงทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนความชื้นสู่ผิวด้านนอกทำให้เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ Booster Dying จะทำการเสริมพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่เครื่องอบแห้งเมื่ออัตราการอบแห้งถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากบริเวณผิววัสดุแห้งแต่ความชื้นภายในยังสูง เมื่อใส่พลังงานไมโครเวฟความร้อนภายในจะทำให้เกิดแรงดันไอขับเคลื่อนความชื้นออกสู่ผิววัสดุ Finish Drying เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยการเสริมการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่บริเวณทางออกของเครื่องอบแห้งเพื่อเป็นการควบคุมปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุและหลีกเลี่ยงการอบแห้งที่นานเกินไป

Tulasidas et al. (1995) ได้นำเอาไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งองุ่นเพื่อทำลูกเกดร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยทำการศึกษาปัจจัย 3 อย่างคือ อุณหภูมิของอากาศ ความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟ (microwave power density) และ ความเร็วอากาศ ต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพของลูกเกดที่ได้นอกจากนี้ยังได้ทำการหาสภาพที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลทำให้ได้คุณภาพของลูกเกดที่ดีกว่า ส่วนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟจะทำให้คุณภาพของลูกเกดลดลงและเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของลูกเกดที่ได้จากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน กับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวพบว่าลูกเกดที่ได้มีคุณภาพในด้านความสว่างของสีที่ดีกว่า

Tomas and Thomas (1998) นำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับ hot air drying เพื่อทำการลดความชื้นของแอปเปิ้ลและเห็ดหอม พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพในด้านสีที่ดีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด และสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ครึ่งหนึ่งจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวสำหรับการอบแห้งแอปเปิ้ล และลดระยะเวลาอบแห้งลงได้ 75 เปอร์เซ็นต์สำหรับการอบแห้งเห็ดหอม นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำกว่า 1 m/s จะทำให้เกิดสีน้ำตาลที่ผลิตภัณฑ์ได้

Sharma and Prasad (2001) ทำการเปรียบเทียบการอบแห้งกระเทียมโดยการอบแห้งโดยลมร้อน กับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยการให้พลังงานไมโครเวฟขนาด 40 W ในลักษณะต่อเนื่อง ทำการอบแห้งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอากาศ 60 และ 70 องศาเซลเซียสที่การไหลของอากาศ 2 m/s ทำการประเมินสมรรถนะโดยใช้ค่า เวลาในการอบแห้ง (drying time) สีและรสชาติ (ใช้การหาปริมาณสารประกอบน้ำมันในตัวอย่าง) พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้ 80-90% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่ดีกว่า

จะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนและการนำเอาไมโครเวฟเข้ามาใช้ในระบบการอบแห้งจะช่วยทำให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้เป็นอย่างมากดังนั้นในการอบแห้งสมุนไพรซึ่งต้องการคุณภาพของสมุนไพรหลังการอบแห้งการใช้ระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟจะช่วยให้สมุนไพรที่ได้หลังการอบแห้งมีคุณภาพที่ดี และใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ไพลเป็นสมุนไพรหลักในการทดสอบเครื่องอบแห้งเนื่องจากไพลเป็นสมุนไพรที่มีน้ำมันหอมระเหยซึ่งจะมีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิสูง นอกจากนี้จะทำการทดลองอบพริกเนื่องจากพริกเป็นทั้งพืชสมุนไพร และเครื่องเทศที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบ มีรายละเอียดแสดงในหัวข้อวิธีการ

2. เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบ มีรายละเอียดแสดงในหัวข้อวิธีการ

3. ตู้อบหาความชื้นแบบลมร้อน (Hot air oven) ใช้สำหรับอบชิ้นตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย

4. อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer) ยี่ห้อ Dwyer รุ่น 471 ใช้สำหรับวัดความเร็วลมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและความเร็วในท่อ Bypass

5. สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type K) สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม และสารทำความเย็น

6. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Shinko

7. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Campbell Scientific รุ่น 21X ใช้สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่วัดโดยสายเทอร์โมคับเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ

8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Precisa รุ่น 6200 CS ความละเอียด 0.01 กรัม สำหรับชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้ง

9. อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure gage) ใช้สำหรับวัดความดันของสารทำความเย็นในระบบปั๊มความร้อน

10. คลิปแอมป์ (Clip amp) ยี่ห้อ ITT Instrument รุ่น MX 200 ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เครื่องอัดไอ

11. อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter) ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง

12. นาฬิกาจับเวลา

13. สมุนไพร พริก และไพล ใช้เป็นวัสดุอบแห้ง

14. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

15. ซอฟแวร์ระบบปฏิบัติการ Window 95 ขึ้นไป โปรแกรม Visual Basic 6.0 และโปรแกรม MHPD 1.0 ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของระบบ

วิธีการ

การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีรายละเอียดของวิธีการในการดำเนินงานดังนี้

การศึกษาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเบื้องต้น

เพื่อทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งระบบปั๊มความร้อนโดยทำการศึกษาจากตู้อบไมโครเวฟซึ่งใช้สำหรับครัวเรือนยี่ห้อ DAEWOO รุ่น KOR-63D7 ซึ่งให้พลังงานสูงสุด 700 วัตต์ (ภาพที่ 7) ซึ่งการศึกษาเบื้องต้นนี้ประกอบด้วย

ภาพที่ 7 ตู้อบไมโครเวฟ DAWOO รุ่น KOR63D7

1. การศึกษาเพื่อหาค่าพลังงานจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ทำการทดสอบโดยวัดค่าพลังงานที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานไมโครเวฟที่น้ำดูดกลืนไว้สามารถหาได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำต่อหน่วยเวลาดังแสดงในสมการที่ (38)

$$MW_{abs} = \frac{mC_p \Delta T}{\Delta t} \qquad (38)$$

เมื่อ MW_{abs} คือ พลังงานที่ดูดกลืนโดยน้ำ (W)

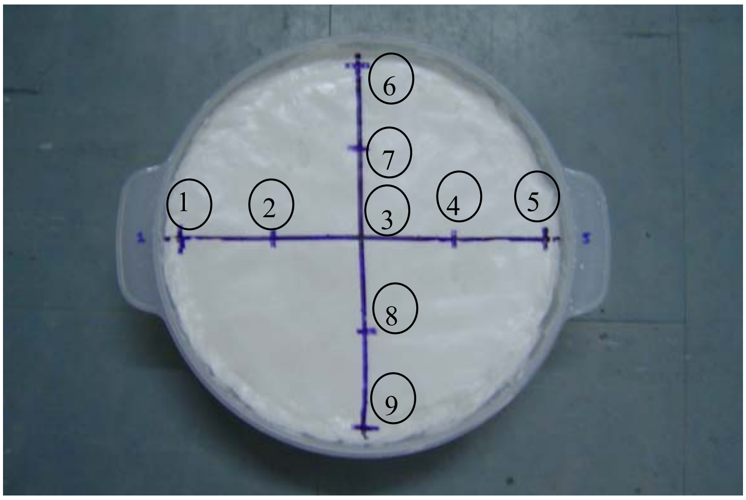
m คือ มวลของวัสดุ (kg)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (J/kg ^{O}C)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (^{o}C)

Δt คือ เวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟ (s)

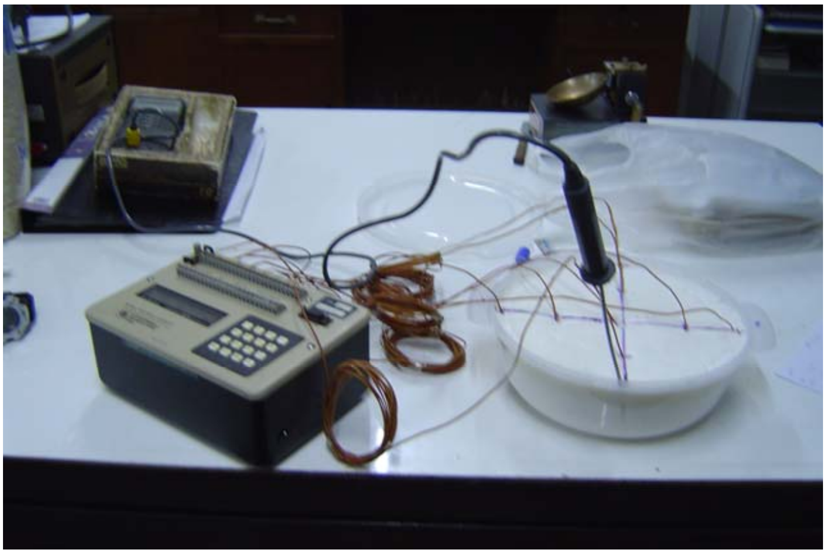
2. ศึกษาถึงทิศทางการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบไมโครเวฟ โดยการนำแป้งข้าวเหนียวมานวดกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำแป้งที่ได้มาใช้ในชามพลาสติกจำนวน 500 กรัม ทำการกำหนดตำแหน่งตามภาพที่ 8 เพื่อเป็นจุดสำหรับวัดอุณหภูมิ เนื่องจากโดยปกติตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในบ้านเรือนจะมีระบบทำให้อาหารที่นำไปอุ่นได้รับพลังงานอย่างสม่ำเสมอด้วยการหมุนถาดรองภาชนะบรรจุอาหาร



ภาพที่ 8 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ

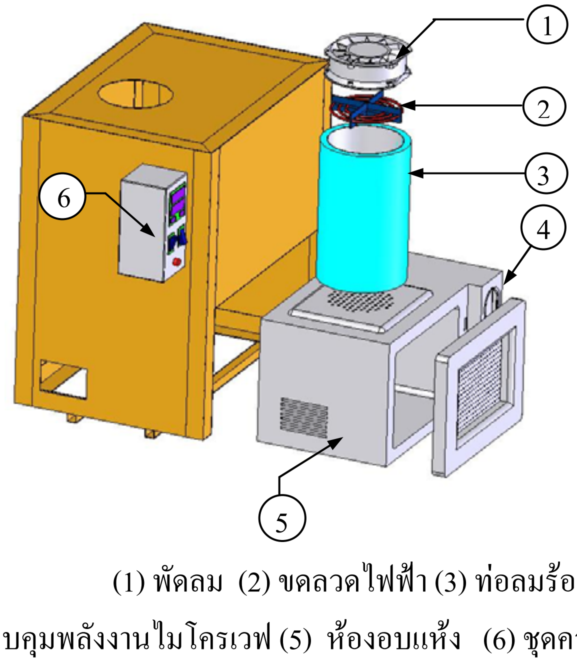
ในการทดลองเบื้องต้นนี้จึงทำการตรวจสอบการกระจายอุณหภูมิทั้งระบบถาดหมุน และถาดอยู่นิ่งโดยทำการทดสอบที่ระดับไมโครเวฟสูงสุดคือ 700 วัตต์ โดยให้ถาดแก้วภายในตู้อบหมุนตามปกติ เป็นระยะเวลา 2 นาที แล้วนำออกมาวัดอุณหภูมิด้วย thermocouple type K ซึ่งต่อกับ data logger (ภาพที่ 9) ที่บริเวณผิว ต่ำกว่าผิว 3 เซนติเมตร และที่ก้นภาชนะ

สำหรับการทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิของถาดอยู่นิ่ง ทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีถาดหมุนแต่ทำการบังคับให้ถาดลอยอยู่เหนือแกนหมุน



ภาพที่ 9 การวัดอุณหภูมิหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

3. ทำการดัดแปลงตู้อบไมโครเวฟเป็นตู้อบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (ภาพที่ 10) จากตู้อบไมโครเวฟ ขนาด 700 W 2450 MHz (DAEWOO KOR-63D7) ซึ่งปรับระดับการใช้พลังงานได้ 7 ระดับ



(1) พัดลม (2) ขดลวดไฟฟ้า (3) ท่อลมร้อน

(4) ชุดควบคุมพลังงานไมโครเวฟ (5) ห้องอบแห้ง (6) ชุดควบคุมอุณหภูมิอากาศ

ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

. การดัดแปลงทำโดยต่อท่อลมร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm. ยาว 350 mm. ซึ่งติดตั้งขดลวดไฟฟ้าขนาด 1.5 kW ไว้ภายใน ด้านบนติดพัดลมแบบ axial flow ขนาด 40 W ปลายท่ออีกด้านติดตั้งอยู่ด้านบนของตู้ไมโครเวฟซึ่งเจาะเป็นตะแกรง ขนาดรูตะแกรงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm. บริเวณด้านข้างเจาะเป็นรูตะแกรงสำหรับเป็นช่องลมออก ทำการหุ้มแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันคลื่นรั่วออกด้านนอก และควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Shinko model JCS-33A-R/M)

การทดลองอบแห้งเพื่อหาแนวทางในการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ทำโดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ชุด คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟโดยใช้ พริกและไพลเป็นวัสดุในการอบแห้ง โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

3.1 การอบแห้งด้วยลมร้อน

สำหรับการอบแห้งพริก

1. นำพริกชี้ฟ้าแดงสด จำนวน 300 กรัม จัดเรียงบนตะแกรงแบบชั้นบาง และนำอีกส่วนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้น โดยนำไปอบด้วยตู้อบแบบ hot air oven ที่อุณหภูมิ 103 ^{O}C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

2. นำพริกเข้าตู้อบ เปิดสวิทซ์ให้เครื่องทำงานเฉพาะลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{O}C ความเร็วลม 1 m/s

3. ระหว่างการอบแห้งนำพริกออกมาชั่งน้ำหนัก ทุกช่วง 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม และบันทึกค่าพลังงานที่ใช้จาก kWh มิเตอร์จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.1 กรัมจึงหยุดการทดลอง

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศเป็น 60 และ 70 ^{O}C

สำหรับการอบแห้งไพล

1. นำไพลที่ซื้อมาหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด $1.25 \times 3 \times 6$ cm^3 (ภาพที่ 11) แล้วนำจัดเรียงบนถาดพลาสติกจำนวน 250 กรัม

2. นำไพลอีกส่วนหนึ่งไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นโดยการอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 ^{o}C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3. นำไพลที่จัดเรียงเรียบร้อยแล้วเข้าตู้อบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ เปิดสวิทซ์ให้เครื่องทำงานเฉพาะส่วนลมร้อน โดยตั้งอุณหภูมิอากาศอบแห้งไว้ที่ 40 ^{o}C

4. ระหว่างการอบแห้งนำไพลออกมาชั่งน้ำหนัก ทุกช่วง 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม และบันทึกค่าพลังงานที่ใช้จาก kWh มิเตอร์จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.1 กรัมจึงหยุดการทดลอง

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเป็น 50 ^{o}C ทั้งนี้เนื่องจากไพลเป็นพืชที่มีน้ำมันหอมระเหยจำเป็นที่จะต้องอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งต่ำๆ

ภาพที่ 11 ลักษณะของชิ้นไพลที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

สำหรับการอบแห้งพริก

1. นำพริกชี้ฟ้าแดงสด จำนวน 300 กรัม จัดเรียงบนตะแกรงแบบชั้นบาง และนำอีกส่วนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้น โดยนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 103 ^{o}C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

2. นำพริกเข้าตู้อบ ตั้งระดับพลังงานไมโครเวฟไว้ที่ระดับ 1 ตั้งเวลาให้เครื่องทำงาน 5 นาที

3. เมื่อครบ 5 นาที นำพริกออกมาชั่งน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม วัดอุณหภูมิของพริกด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และบันทึกค่าพลังงานที่ใช้จาก kWh มิเตอร์ ทำเช่นเดียวกันนี้จนกระทั่งน้ำหนักของพริกเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.1 กรัมหรือเกิดการไหม้ของพริกจึงหยุดการทดลอง

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนระดับพลังงานไมโครเวฟเป็นระดับ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

สำหรับการอบแห้งไพล

1. นำไพลที่หั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด $1.25\times3\times6$ cm^3 จัดเรียงบนถาดพลาสติกจำนวน 250 กรัม

2. นำไพลอีกส่วนหนึ่งไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นโดยการอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 ^{o}C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3. นำไพลที่จัดเรียงเรียบร้อยแล้วเข้าตู้อบ เปิดสวิทซ์ให้เครื่องทำงานเฉพาะส่วนของไมโครเวฟโดยตั้งระดับพลังงานไว้ที่ระดับ 1 ตั้งเวลาให้เครื่องทำงาน 5 นาที

4. นำไพลออกมาชั่งน้ำหนัก ทุกช่วง 5 นาที ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม วัดอุณหภูมิของไพลด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดและบันทึกค่าพลังงานที่ใช้จาก kWh มิเตอร์จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.1 กรัมหรือเกิดรอยไหม้ที่ชิ้นไพลจึงหยุดการทดลอง

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนระดับพลังงานไมโครเวฟเป็นระดับ 2, 3, 4, 5, 6, 7 ตามลำดับ

3.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ จะทำเสริมพลังงานไมโครเวฟระดับ 1 เข้าไปในการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนตามข้อ 3.1 สำหรับพริกและไพล โดยมีรูปแบบการเสริมพลังงานไมโครเวฟเข้าไปในระบบลมร้อน 3 รูปแบบดังนี้

1. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง จะเสริมพลังงานไมโครเวฟพร้อมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง

2. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying จะให้พลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 120 นาทีก่อนการอบแห้งด้วยลมร้อน

3. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying จะเสริมพลังงานไมโครเวฟในช่วงท้ายของการอบแห้งโดยอ้างอิงค่าจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวซึ่งในช่วงที่ให้พลังงานไมโครเวฟจะทำการปิด heater แต่ยังคงเปิดพัดลมไว้

4. การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying จะให้พลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 15 นาทีทุกช่วงเวลา 120 นาที โดยในช่วงเวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟจะทำการปิดสวิทซ์ heater แต่ยังคงเปิดพัดลมไว้

การออกแบบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

การออกแบบห้องอบแห้ง

การออกแบบห้องอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบนั้นทำการออกแบบโดยอ้างอิงจากคุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ทดสอบในการอบแห้ง ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องจะใช้ไพลเป็นวัสดุในการทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ซึ่งในการทดสอบจะทำการอบแห้งไพลจำนวน 20 กิโลกรัม

จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นของไพลสดพบว่าที่ระดับความชื้นเฉลี่ยของไพลสด 425.02 %db จะมีค่าความหนาแน่น 1.101 g/cm^3 หรือ 1101 kg/m^3

ดังนั้นไพลสดจำนวน 20 กิโลกรัมจะมีปริมาตร $\frac{20}{1101} = 0.0182$ m^3

กำหนดให้ขนาดของไพลเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $8 \times 5 \times 0.5 = 20$ cm^3

ดังนั้นจะได้จำนวนชิ้นของไพล $\frac{0.0182 \times 10^6}{20} = 910$ ชิ้น

กำหนดมิติของถาดกว้าง 60 เซนติเมตร ลึก 65 เซนติเมตร ขอบหนา 2 เซนติเมตร

จะได้พื้นที่ใช้สอยของถาด $65 \times 60 = 3900$ cm^2 ซึ่งบรรจุไพลได้ $\frac{3900}{40} = 97.5$ ชิ้น

เนื่องจากขนาดรูปร่างของไพลตามความเป็นจริงไม่สามารถวางชิดกันได้จึงจำเป็นต้องเผื่อระยะไว้ 25 % ดังนั้นแต่ละถาดสามารถจัดเรียงได้ $97.5 \times 0.75 = 73$ ชิ้น

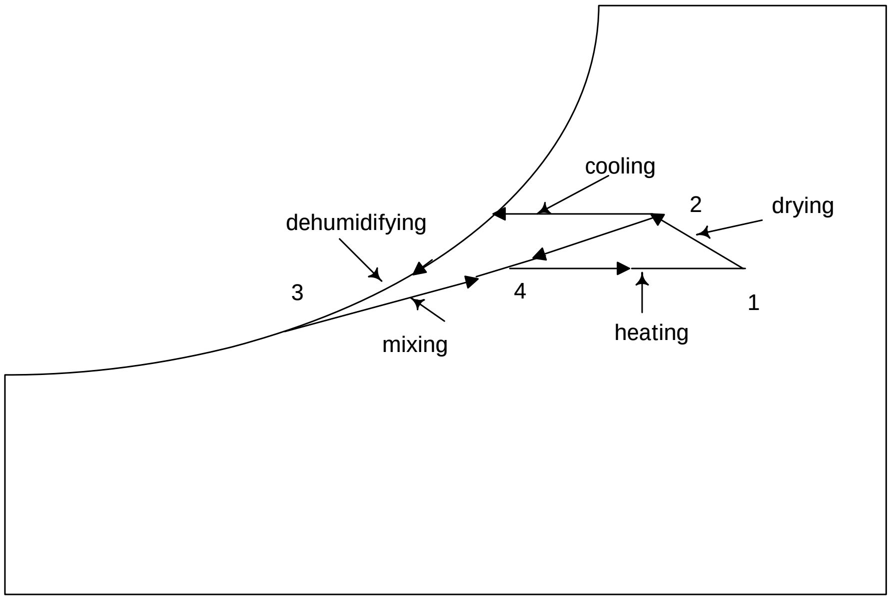
ดังนั้นต้องใช้ถาดทั้งสิ้น $\frac{910}{73} = 13$ ถาด

กำหนดระยะระหว่างถาด 7 cm จากขอบถาดถึงก้นถาดถัดไป 5 cm
ระยะเผื่อจากผนังด้านบนถึงถาดบน 15 cm ระยะเผื่อก้นถาดล่างถึงผนังด้านล่าง 10 cm
ดังนั้นจะได้ความสูงของห้องอบแห้ง $(7\times11)+15+10=102$ cm
ความกว้างเผื่อระยะด้านขวา-ซ้ายด้านละ 15 cm
ดังนั้นได้ความกว้างของห้องอบแห้ง $60+30=90$ cm
ความลึกของห้องอบแห้งเผื่อระยะด้านหลัง 10 cm ดังนั้นได้ความลึก $65+10=75$ cm
ดังนั้นขนาดของห้องอบแห้ง $ก\times ล\times ส=90\times75\times102$ cm^3

การออกแบบระบบปั๊มความร้อน

จากห้องอบแห้งซึ่งออกแบบให้ทำการอบแห้งไพลสดได้ 20 กิโลกรัม โดยความชื้นเริ่มต้นของไพลสดคือ 425 %db. โดยทำการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้เหลือ 10 %db.

กำหนดให้อุณหภูมิอบแห้งสูงสุด 50 ^{O}C โดยพิจารณาจากกระบวนการอบแห้งจากแผนภาพไซโครเมตริก (Psychrometric) ตามภาพที่ 12 ดังนี้



ภาพที่ 12 แผนภาพไซโครเมตริกแสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นของการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

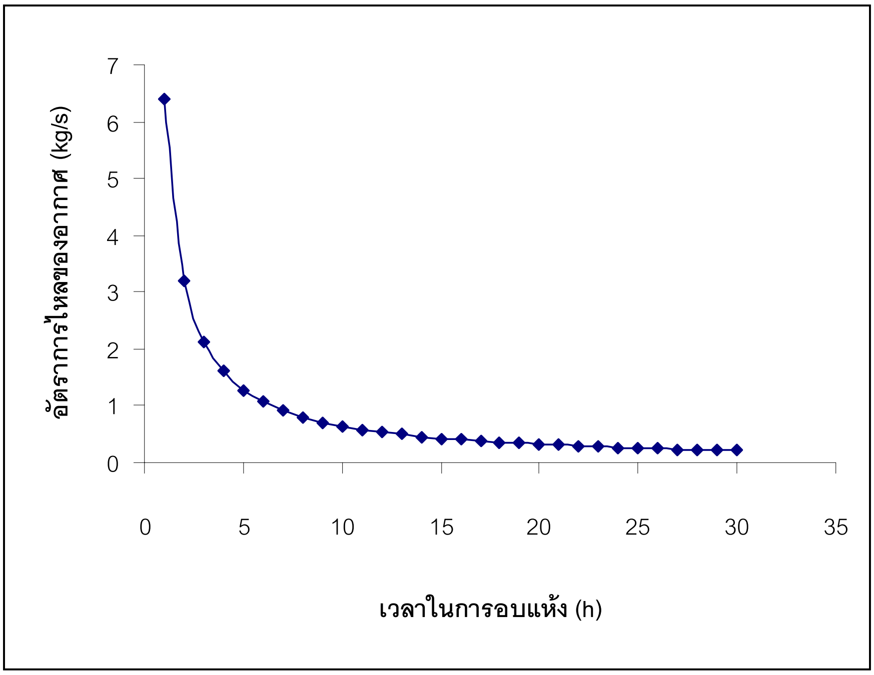
กระบวนการอบแห้ง (drying) จากจุด 1 ไปจุด 2 จะเป็นการใช้อากาศเป็นตัวกลางพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์กำหนดให้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 ^{o}C หลังอบแห้งลดลงเหลือ 48 ^{o}C

กระบวนการลดความชื้น (cooling and dehumidifying) จากจุด 2 ไปจุด 3 จะเป็นการทำให้อากาศชื้นเย็นลงพร้อมทั้งลดความชื้นในอากาศโดยอุณหภูมิลดลงจาก 48 ^{o}C เหลือ 23 ^{o}C

กระบวนการผสมอากาศ (mixing) อากาศที่ผ่านการลดความชื้นจากจุด 3 ผสมกับอากาศ bypass จากจุด 2 มาผสมกันที่ จุด 4 โดยอากาศที่ผ่านการผสม จะมีอุณหภูมิ 43 ^{o}C

กระบวนการให้ความร้อน (heating) จากจุด 4 ไปจุด 1 เป็นการเพิ่มความร้อนให้กับอากาศที่อุณหภูมิ 43 ^{o}C จนถึงอุณหภูมิอบแห้งที่ต้องการคือ 50 ^{o}C

จากสมการ (1) และ (2) เมื่อทำการจำลองสถานการณ์เพื่อหาอัตราการไหลของอากาศ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากภาพที่ 13 เลือกเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 10 ชั่วโมงจะได้ อัตราการไหลของอากาศ 0.640 kg/s



ภาพที่ 13 ผลจากการจำลองสถานการณ์หาอัตราการไหลของอากาศต่อเวลาในการอบแห้ง

คิดเป็นปริมาณน้ำที่ระเหยคือ

$$m_w = m_{p,i}\left(1-\frac{(M_f+1)}{(M_i+1)}\right) = 20\left(1-\frac{(\frac{10}{100}+1)}{(\frac{425}{100}+1)}\right) = 15.81\ \text{kg}$$

หรือมีอัตราการระเหยน้ำ เท่ากับ 1.58 kg/h จากสภาวะการทำงานตามภาพที่ 12 หาขนาดของเครื่องทำระเหยได้ดังนี้

1. การออกแบบเครื่องทำระเหย

สภาวะอากาศออกจากห้องอบแห้ง 48 ^{O}C อัตราการไหลของอากาศ 0.64 kg/s คิดเป็นอัตราการไหลของมวลอากาศแห้งคือ 0.609 $kg_{dry\ air}/s$ แต่เนื่องจากรายงานผลการจำลองสถานการณ์ที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหย 80 % จะมีความเหมาะสมในการดำเนินกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องทำระเหยมีค่าเท่ากับ 0.122 $kg_{dry\ air}/s$ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย 23 ^{O}C ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (c_a) และไอน้ำ (c_v) 1.0069 kJ/$kg_{dry\ air}$ ^{O}C และ 1.5524 kJ/$kg_{dry\ air}$ ^{O}C จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนได้ดังนี้

$$q_e = m_{ap}\left[(c_a + c_v H_f)T_{ei} + H_f h_{fg}\right] - m_{ap}\left[(c_a + c_v H_{eo})T_{eo} + H_{eo} h_{fg}\right]$$

$$q_e = 0.122[(1.0069 + (1.5524 \times 0.01676))48 + 0.01676 \times 2376.09]$$
$$- 0.122[(1.0069 + (1.5524 \times 0.01231))23 + 0.01231 \times 2447.663]$$

$$q_e = 4.35 \quad \text{kW}$$

2. การออกแบบเครื่องควบแน่น

ก่อนที่อากาศจะเข้าสู่เครื่องควบแน่น จะเกิดกระบวนการผสมอากาศขึ้น คือ อากาศที่ผ่านการลดความชื้นที่เครื่องทำระเหยกับอากาศที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย (bypass) เมื่อคิดการผสมอากาศเป็นกระบวนการอะเดียแบติกจะได้สภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่นดังนี้

$$T_{ci} = \frac{m_{bp}T_f + m_{ap}T_{eo}}{m_a}$$

$$T_{ci} = \frac{(0.487 \times 48) + (0.122 \times 23)}{0.609} = 42.99 \ {}^{0}C$$

$$H_{mix} = \frac{m_{bp}H_f + m_{ap}H_{eo}}{m_a} = \frac{(0.487 \times 0.01676) + (0.122 \times 0.01231)}{0.609} = 0.01587 \ kg/kg_{dry\,air}$$

คิดเป็นความชื้นสัมพัทธ์ 29.17%

$$q_{cond} = m_a(c_a + c_v H_d)(T_{co} - T_{mix})$$

$$q_{cond} = 0.609(1.0069 + (1.5524 \times 0.01587))(50 - 42.99)$$

$$q_{cond} = 4.404 \quad kW$$

จากขนาดของเครื่องทำระเหยที่มี cooling load 4.35 kW คิดเป็นความเย็น 14795 Btu/h หรือ 3728.57 kcal/hr สามารถเลือกเครื่องอัดไอจาก Catalogue ของ hermetic compressor ในท้องตลาดได้ขนาด 1 ½ hp. Cooling load 15400 Btu/h ใช้สารทำความเย็น R-22 ควบคุมสารทำความเย็นโดย Capillary tube

การหาขนาดพลังงานไมโครเวฟ

สำหรับการเสริมพลังงานไมโครเวฟหาได้จาก กำหนดให้เริ่มต้นชิ้นวัสดุมีอุณหภูมิภายในเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ คือ 33 ^{o}C ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 50 ^{o}C ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มการขับเคลื่อนไอน้ำภายในเนื้อวัสดุให้ออกสู่ผิววัสดุได้เร็วขึ้นเป็นการเพิ่มอัตราการอบแห้ง

เนื่องจากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็คทริกของไพลดังนั้นจึงคิดโหลดความร้อนจากปริมาณน้ำเทียบเท่าในวัสดุซึ่งในที่นี้คือ 15.81 กิโลกรัมต้องการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น 17 ^{o}C ภายในเวลา 10 นาที ดังนั้นจะสามารถหาพลังงานสมมูลได้จากสมการ (38)

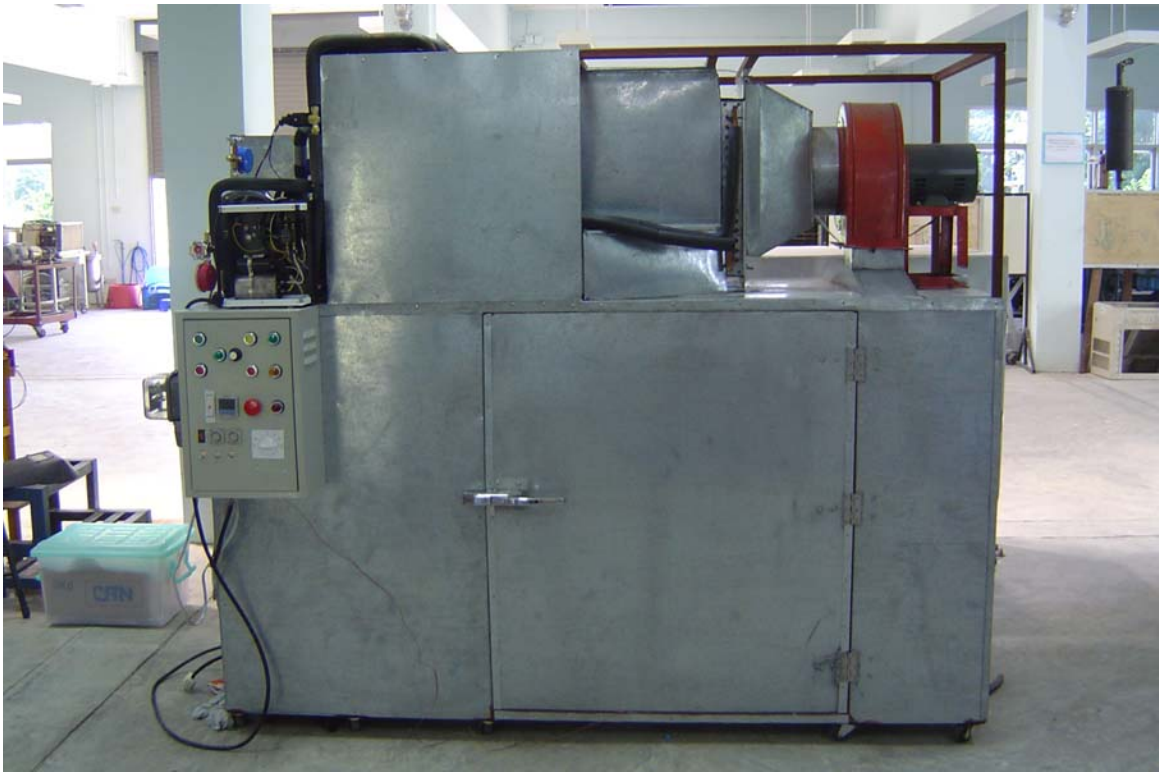
$$MW_{abs} = \frac{(15.81 \times 1000\,g) \times 4.2\,J/g^{0}C \times 17^{0}\,C}{600\,s}$$

$$= 1881.39 \quad W$$

เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของระบบชุดแมกนีตรอนในท้องตลาดในที่นี้จึงเลือกใช้หัวแมกนีตรอน ขนาด 700 W จำนวน 3 หัว

เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนต้นแบบ

เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 14โดยมีขนาดกว้าง X ลึก X สูง คือ 1.73 X 0.80 x 1.72 เมตร ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้



ภาพที่ 14 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ห้องอบแห้ง

ห้องอบแห้งมีปริมาตรภายในเท่ากับ ก$\times$ล$\times$ส$=90\times75\times102$ cm^3 บุด้วยฉนวนใยแก้วกันความร้อนหนา 3 นิ้ว ภายในประกอบด้วยถาดใส่วัสดุขนาด 65×60 cm^2 จำนวน 13 ถาด ตัวถาดทำจากพลาสติกโพลีโพพีลีนเกรดอาหาร ชุดโครงสร้างรับถาดทำจาก อะคีลิคแข็งหนา 15 mm. แต่ละชั้นถาดสามารถรับน้ำหนักได้ 1.65 กิโลกรัม ลักษณะของชั้นถาดแสดงในภาพที่ 15

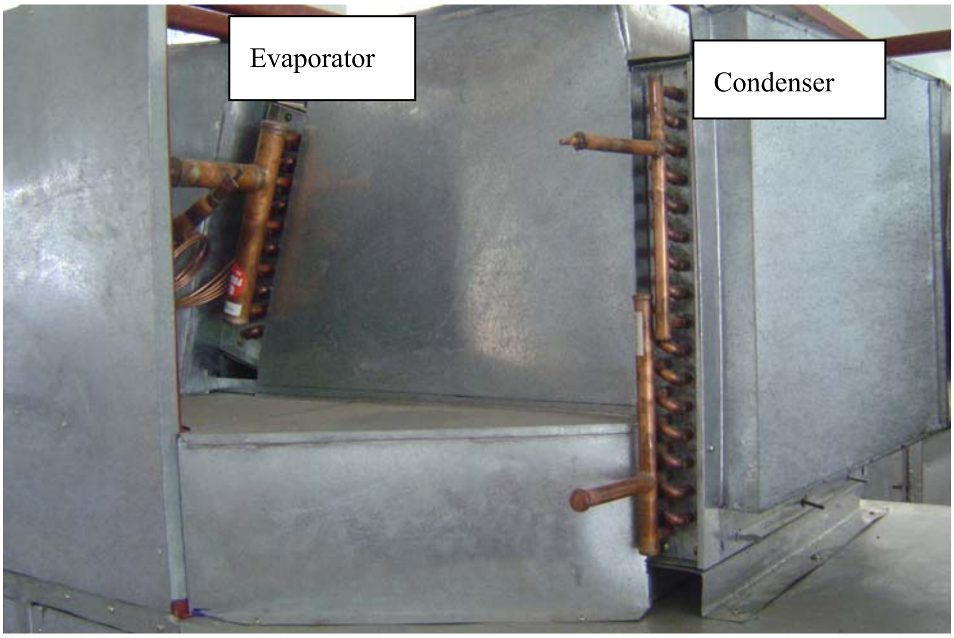
ภาพที่ 15 โครงสร้างชั้นถาดใส่วัสดุอบแห้ง

ชุดปั๊มความร้อน

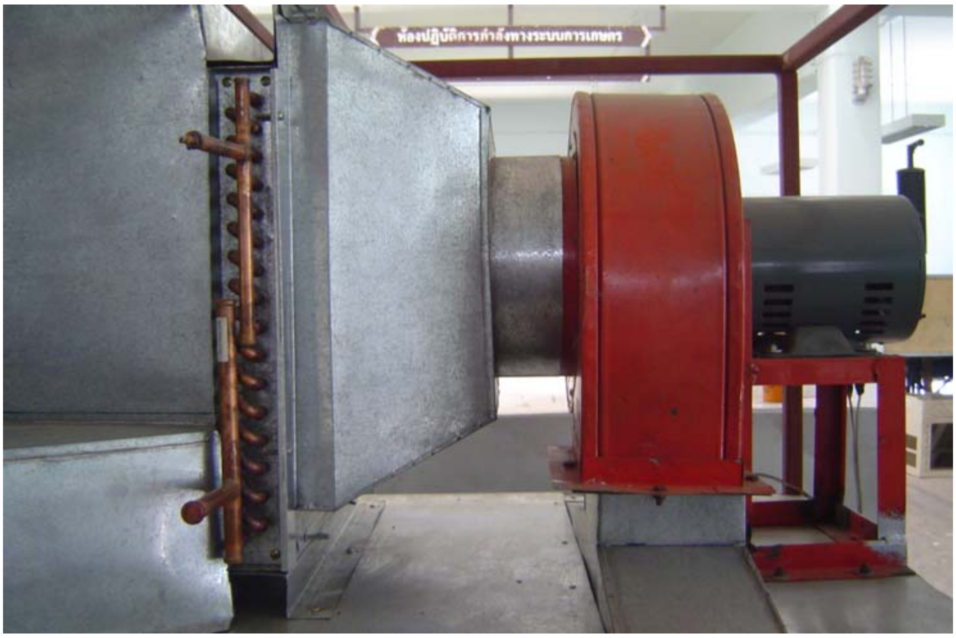
ชุดปั๊มความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขนาด 1 ½ hp ใช้สารทำความเย็น R-22 เครื่องทำระเหย (evaporator) แบบ 3 แถวขนาด 4.35 kW ทำจากท่อทองแดงขนาด 9.5 mm. ประกอบด้วยครีบอะลูมิเนียมแบบลอนคลื่นจำนวน 13 ครีบต่อนิ้ว พร้อมวาล์วลดความดันชนิดท่อรูเข็ม เครื่องควบแน่นตัวใน แบบ 2 แถว ขนาด 4.5 kW ทำจากท่อทองแดงขนาด 9.5 mm. ประกอบด้วยครีบอะลูมิเนียมแบบลอนคลื่นจำนวน 13 ครีบต่อนิ้ว และเครื่องควบแน่นตัวนอก ขนาด 2.5 kW พร้อมชุดพัดลมระบายความร้อนขนาด 40 W โดยชุดปั๊มความร้อนจะถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของห้องอบแห้งโดยมีตำแหน่งการติดตั้งเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นดังแสดงในภาพที่ 16

พัดลม

พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ใบพัดโค้งหน้า ขับด้วยมอเตอร์ขนาด ½ แรงม้า ความเร็วรอบ 1420 rpm จะมีความดันสถิต 12 นิ้วน้ำ ตำแหน่งติดตั้งพัดลมแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 16 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น



ภาพที่ 17 ตำแหน่งติดตั้งพัดลม

ระบบไมโครเวฟ

ระบบไมโครเวฟมีอุปกรณ์หลักที่สำคัญคือ

แหล่งกำเนิดคลื่น

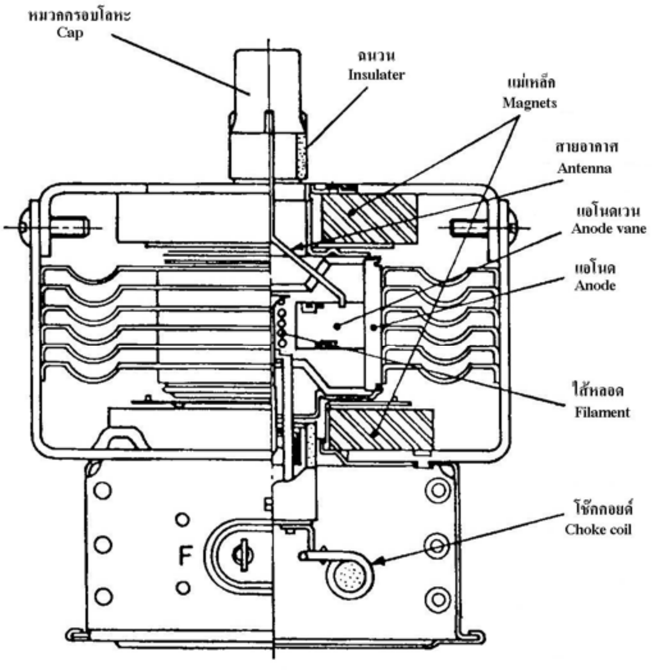
เครื่องต้นแบบนี้ใช้แม็กนีตรอน (Magnetron) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น แมกนีตรอนนี้มีค่าพลังงาน output 700 W ความถี่ 2450 MHz จำนวน 3 หัว ลักษณะของแมกนีตรอนแสดงในภาพที่ 18

ภาพที่ 18 ลักษณะของแมกนีตรอน

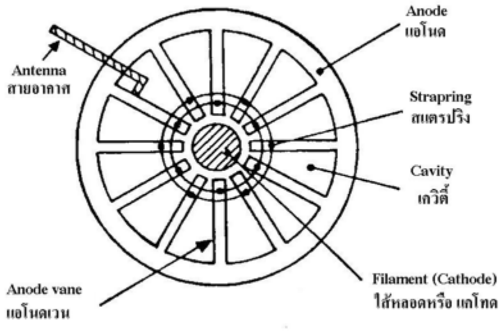
โครงสร้างของแมกนีตรอนประกอบไปด้วยไส้หลอด (Filament or heater) ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด (Cathode) ด้วย แอโนด (Anode) และสายอากาศ (Antenna) ส่วนประกอบภายในของแมกนีตรอนแสดงในภาพที่ 19

ภาพที่ 20 แสดงขั้วแอโนด ซึ่งทำเป็นครีบโลหะต่อกับวงแอโนดด้านนอกพุ่งเข้าไปหาแคโทดภายในตรงกลาง ซึ่งครีบนี้เรียกว่าแอโนดเวน (Anode vane) ปกติมักจะมีจำนวนครีบเป็นเลข

คู่ โดยมีช่องว่างระหว่างครีบเรียกว่า เควิตี้ (Cavity) ภายในหลอดแมกนีตรอนนี้เป็นสูญญากาศ ตัวสายอากาศถูกต่ออยู่ที่ครีบและออกสู่ภายนอกโดยผ่านยอดกลม (Dome) ซึ่งทำเป็นฉนวนกันสายอากาศซ๊อตกับขั้วแอโนด ฉนวนนี้มักทำด้วยเซรามิค ต่อจากปลายของสายอากาศเหนือฉนวนขึ้นไปจะทำเป็นหมวกทรงกระบอกกลม (Cap) มาครอบอีกครั้งหนึ่ง



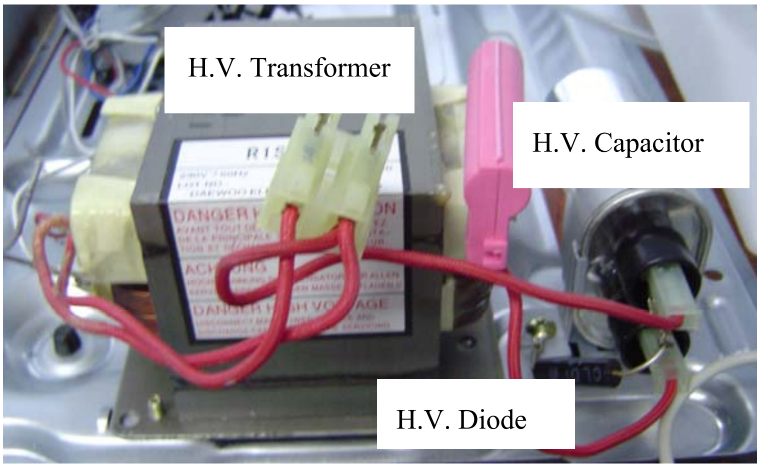
ภาพที่ 19 ส่วนประกอบภายในแมกนีตรอน



ภาพที่ 20 ขั้วแอโนดของแมกนีตรอน

วงจรสร้างความดันไฟฟ้าสูง

ในส่วนนี้ของวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงประกอบด้วย High Voltage Transformer High Voltage Diode และ High Voltage Capacitor เพื่อสร้างความต่างศักย์ของแรงดันระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ลักษณะของอุปกรณ์วงจรสร้างความดันไฟฟ้าสูงแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 อุปกรณ์สร้างแรงดันไฟฟ้าสูง

ท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่นหรือ wave guide เป็นแบบ rectangular wave guide ทำหน้าที่เป็นท่อนำคลื่นเข้าสู่ห้องอบ

ชุดควบคุม

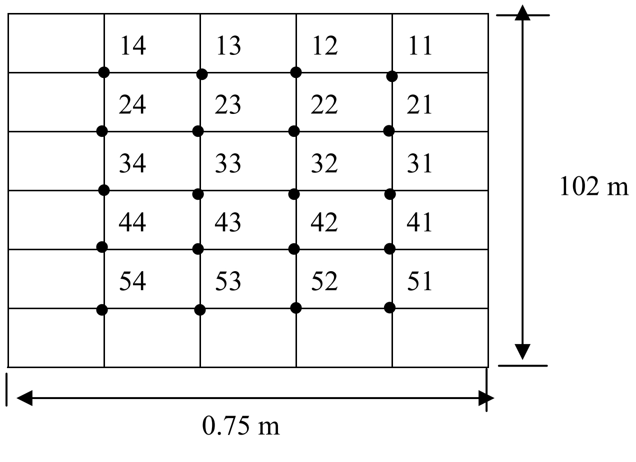
ชุดควบคุมประกอบด้วยส่วนควบคุมระบบปั๊มความร้อน ชุดควบคุมและปรับรอบพัดลม ชุดควบคุมการทำงานของไมโครเวฟ โดยกำหนดให้ไมโครเวฟทำงานสลับกันพร้อมทั้งสามารถปรับช่วงเวลาของพลังงานไมโครเวฟที่จะเข้าสู่ห้องอบแห้งได้ เพื่อให้เหมาะสมกับวัสดุที่นำมาใช้ในการอบแห้ง ควบคุมความปลอดภัยจากการเปิดประตูด้วยลิมิตสวิทซ์ เพื่อตัดพลังงานไมโครเวฟเมื่อประตูตู้อบเปิด

การทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องต้นแบบ

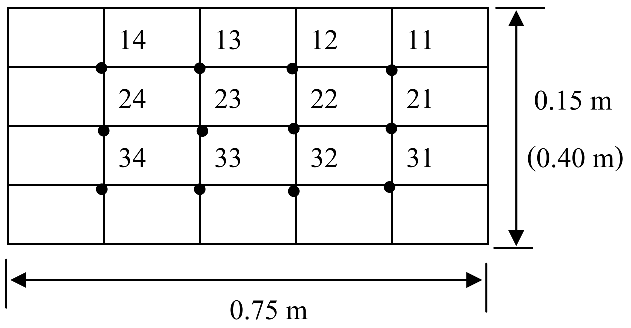
การทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟได้แบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ ทดสอบการทำงานเฉพาะระบบปั๊มความร้อน และทดสอบการทำงานระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่ได้จากการเพิ่มระบบไมโครเวฟในระบบปั๊มความร้อนโดยมีแนวทางการทดสอบดังนี้

อัตราการไหลและการกระจายของอากาศ

ทำการวัดความเร็วลมของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้ง 3 ตำแหน่ง ตำหน่งละ 20 จุด คือ หน้าตัดที่ทางเข้าห้องอบแห้ง หน้าตัดกึ่งกลางห้องอบแห้ง หน้าตัดทางออกจากห้องอบแห้ง โดยการกำหนดจุดการวัดดังแสดงในภาพที่ 22 เพื่อดูการกระจายของอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง ส่วนตำแหน่งการวัดความเร็วลมของอากาศที่ท่อลม bypass และท่ออากาศผ่านเครื่องทำระเหย แสดงในภาพที่ 23 โดยทำการวัดตำแหน่งละ 12 จุด



ภาพที่ 22 จุดวัดความเร็วลมของหน้าตัดทางเข้า กึ่งกลาง และทางออกของห้องอบแห้ง



พื้นที่หน้าตัดท่อ bypass $0.75 \times 0.15\,m^2$

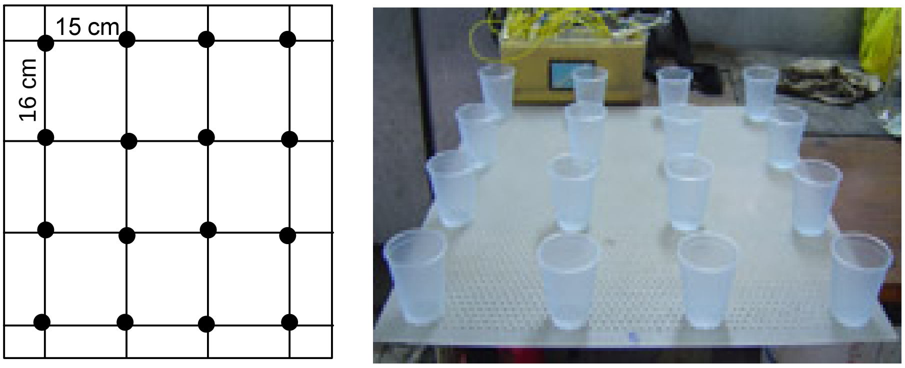
พื้นที่หน้าตัดท่อเครื่องทำระเหย $0.5 \times 0.40\,m^2$

ภาพที่ 23 จุดวัดความเร็วลมของท่ออากาศ bypass และ เครื่องทำระเหย

การทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิเนื่องจากไมโครเวฟ

การทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งอันเนื่องมาจากพลังงานไมโครเวฟ มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งบนถาดอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 24 เพื่อวางแก้วพลาสติกสำหรับใส่น้ำ



ภาพที่ 24 ตำแหน่งวางแก้วน้ำเพื่อวัดอุหณภูมิที่เพิ่มขึ้นจากไมโครเวฟ

2. ตวงน้ำปริมาณ 50 cc. โดยใช้กระบอกตวง เทใส่ลงในแก้วน้ำ ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น บันทึกค่าไว้

3. นำถาดเข้าตู้อบที่ถาดที่ 1 (ตำแหน่งชั้นถาดบนสุด) เปิดให้พลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 5 นาที จากแมกนีตรอนตัวที่ 1

4. เมื่อครบ 5 นาที ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำทั้ง 16 แล้วบันทึกค่าไว้

5. ทำตามขั้นตอน 1-4 โดยเปลี่ยนตำแหน่งชั้นถาดเป็นถาดที่ 3, 5, 7, 9, 11 และ 13 เมื่อครบทั้ง13 ชั้นถาด ทำการทดลองชุดใหม่โดยใช้พลังงานไมโครเวฟจากแมกนีตรอนตัวที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

การทดสอบความสามารถในการระเหยน้ำ

การทดสอบความสามารถในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50 ^{O}C กลุ่มที่สองเป็นการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50 ^{O}C ร่วมกับการให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงเปิด 5 นาที ปิด 5 นาที เนื่องจากการทดสอบต้องใช้ไมโครเวฟด้วยจึงทำการทดสอบด้วยวิธีการระเหยน้ำออกจากผ้าเปียกโดยมีวิธีการดังนี้ ทำการชั่งน้ำหนักของถาดและผ้าด้ายดิบจากนั้นทำการจุ่มน้ำ บิดให้พอหมาด ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น นำเข้าตู้อบเพื่อทำการระเหยน้ำเป็นเวลา 120 นาที ระหว่างการทดลองนำออกมาชั่งและวัดอุณหภูมิผ้าทุก 30 นาที บันทึกอุณหภูมิของอากาศและสารทำความเย็นทุก 5 นาที บันทึกค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าจาก Watt-hour Meter

การทดสอบความสามารถในการอบแห้ง

การทดสอบความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟทำโดยการอบแห้งสมุนไพรตัวอย่าง 2 ชนิดคือ พริกและไพล โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดคือการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียวและการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (เนื่องจากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าการอบแห้งโดย

ใช้ไมโครเวฟแบบเป็นช่วงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด ประหยัดเวลาและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสุด)

การทดลองอบแห้งพริกใช้พริกจินดาจำนวน 20 กิโลกรัม ทำการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C อัตราการไหลอากาศผ่านวัสดุอบแห้ง 0.621 m^3/s และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 445.52 วัตต์แบบเป็นช่วงเปิด 5 นาทีปิด 5 นาที อย่างละ 3 การทดลอง โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. น้ำหนักถาดเปล่าแต่ละถาดจากนั้นนำพริกมาจัดเรียงใส่ถาดทั้ง 13 ถาด สุ่มหยิบตัวอย่างในแต่ละถาดนำไปหาความชื้นเริ่มต้น โดยนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

2. นำพริกที่จัดเรียงแล้วชั่งน้ำหนัก นำเข้าห้องอบแห้ง ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักของพริกทุกๆ 3 ชั่วโมง จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงของหน้ำหนักลดลงน้อยกว่า 10 กรัมจึงหยุดทำการทดลอง

3. บันทึกค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าจาก Watt-hour Meter

4. นำพริกที่ได้หลังการอบแห้งไปตรวจสอบคุณภาพโดยการนำพริกแห้งเด็ดขั้วออกจำนวน 10 กรัมไปปั่นด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 2 นาที นำผงพริกที่ได้ไปตรวจสีด้วยเครื่องวัดสี (HunterLab ColorFlex model JC801) ดังแสดงในภาพที่ 25

การอบแห้งไพลใช้ไพลสดจำนวน 20 กิโลกรัมทำการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50 ^{O}C อัตราการไหลอากาศผ่านวัสดุอบแห้ง 0.621 m^3/s และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟที่ระดับพลังงาน 445.52 วัตต์แบบเป็นช่วงเปิด 5 นาทีปิด 5 นาที อย่างละ 3 การทดลอง โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. นำไพลสดมาล้างทำความสะอาด แล้วหั่นแบบสุ่มเป็นชิ้นตามแง่งไพลความหนาอยู่ในช่วง 3-5 มิลลิเมตร

2. ชั่งน้ำหนักถาด นำไพลที่หั่นมาจัดเรียงบนถาดแบบชั้นบาง ทั้ง 13 ถาด

3. สุ่มหยิบชิ้นไพลในแต่ละถาดไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยการนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

4. ชั่งน้ำหนักไพลที่จัดเรียงไว้แล้วนำเข้าห้องอบแห้ง ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักและอุณหภูมิของไพลทุกๆ 3 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักไพลในแต่ละถาดลดลงน้อยกว่า 10 กรัมจึงหยุดการทดลอง

5. บันทึกค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าจาก Watt-hour Meter

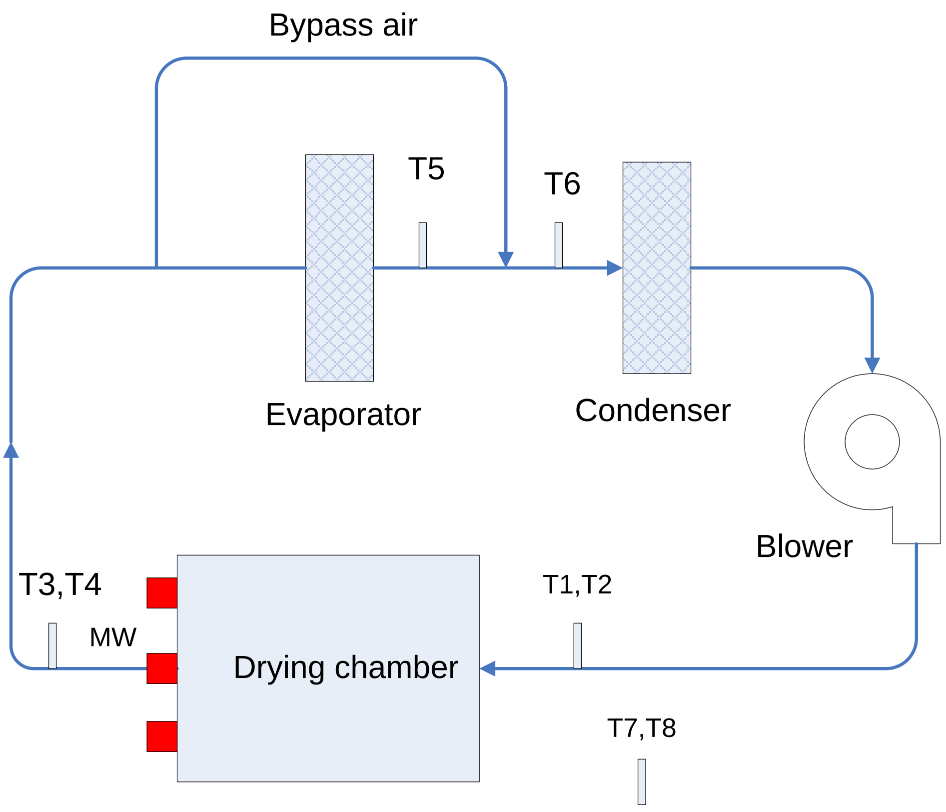
6. นำไพลแห้งที่ได้จำนวน 20 กรัมมาทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 90 วินาทีแล้วนำผงไพลที่ได้ไปตรวจสีด้วยเครื่องวัดสี (HunterLab ColorFlex model JC801)

(ก)

(ข)

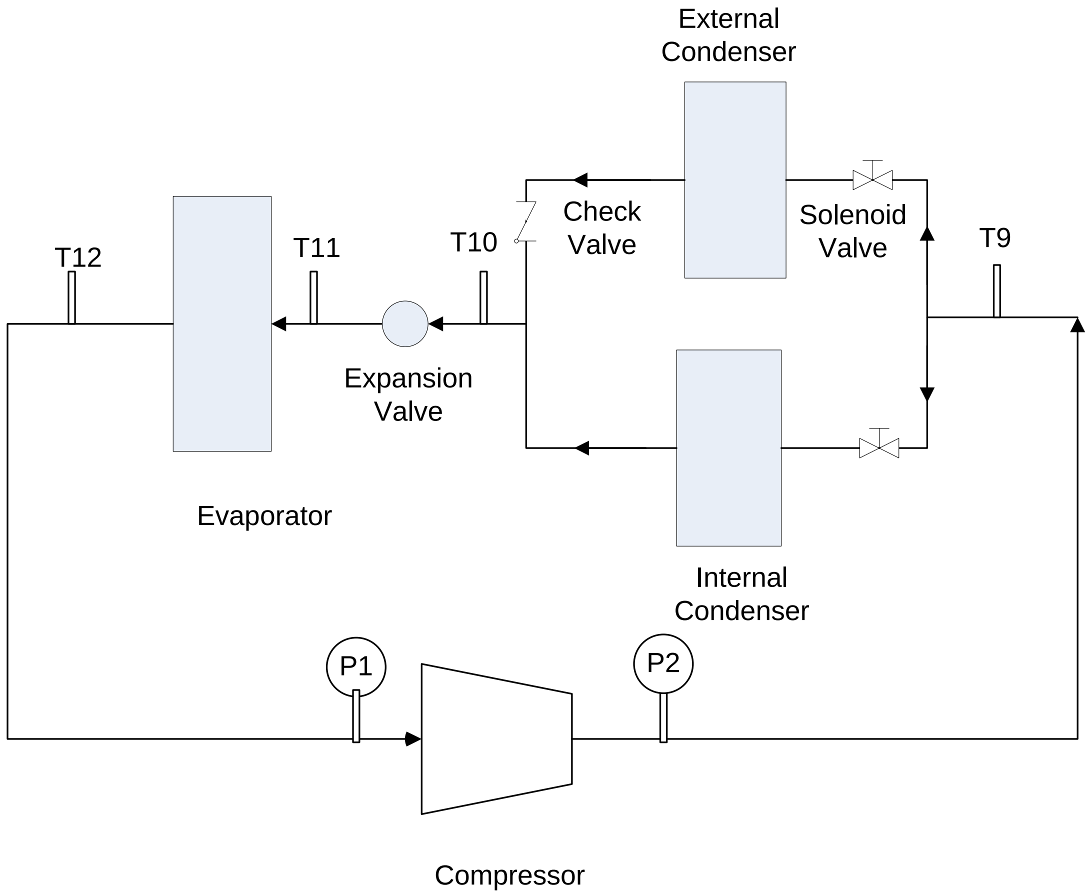
ภาพที่ 25 (ก) ชุดเครื่องตรวจวัดสี HunterLab ColorFlex model JC801 (ข) ตัวอย่างในการวัดสี

การวัดอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงในภาพที่ 26 และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็นแสดงในภาพที่ 27



T1 อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง
T2 อุณหภูมิกระเปาะเปียกอากาศก่อนอบแห้ง
T3 อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง
T4 อุณหภูมิกระเปาะเปียกอากาศหลังอบแห้ง
T5 อุณหภูมิอากาศผ่านเครื่องทำระเหย
T6 อุณหภูมิอากาศผสม
T7 อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
T8 อุณหภูมิกระเปาะเปียกอากาศแวดล้อม

ภาพที่ 26 วงจรตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง



T9 อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องควบแน่น

T10 อุณหภูมิสารทำความเย็นออกจากเครื่องควบแน่น

T11 อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องทำระเหย

T12 อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอ

P1 ความดันสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอ

P2 ความดันสารทำความเย็นออกจากเครื่องอัดไอ

ภาพที่ 27 วงจรตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดันของระบบปั๊มความร้อน

การหาความชื้นสมดุลของไพล

การหาความชื้นสมดุลของไพลเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการสร้างสมการการอบแห้งสำหรับทำนายพฤติกรรมการอบแห้งไพลจะใช้วิธีการแบบสถิตโดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวดังแสดงในตารางที่ 4 และการเตรียมสารละลายมีขั้นตอนดังนี้

1. เทน้ำกลั่นใส่ลงในบิ๊กเกอร์จำนวน 300 ml.

2. ค่อยๆ เติมสารเคมี KOH ลงไป แล้วคนให้สารเคมีละลาย จนกระทั่งเป็นสารละลายอิ่มตัว

3. หากสารละลายอิ่มตัวที่ได้น้อยกว่า 580 ml เติมน้ำกลั่นแล้วเพิ่มสารเคมีลงไปให้ได้ปริมาณสารละลายอิ่มตัวมากกว่า 580 ml

4. ทำการแบ่งสารละลายออกเป็นสามชุด ๆ ละขนาด 187. 5 ml ด้วยกระบอกตวง

5. นำสารละลายที่เตรียมได้ใส่ลงในโหลแก้ว

6. เตรียมสารละลายอีก 5 ชนิดด้วยวิธีเดียวกัน

ตารางที่ 4 ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัว

Temperature	Relative humidity (decimal)					
(^{O}C)	KOH	MgCl2	K2CO3	Mg(NO3)2	NaCl	KCl
30	0.0738	0.3238	0.4317	0.558	0.7540	0.8362
35	0.0682	0.3199	0.4274	0.5240	0.7495	0.8297
40	0.0626	0.3159	0.423	0.4900	0.7450	0.8232
50	0.0572	0.3054	0.4091	0.4300	0.7490	0.8120

ที่มา: Mabel Vullioud et al., 2004 and S. Lasani et al. 2004

เมื่อได้สารละลายเกลืออิ่มตัวแล้วทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของไพลโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดหัวไพล

2. ทำการหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด กว้าง*ยาว*หนา = 5 * 5 *2 mm^3

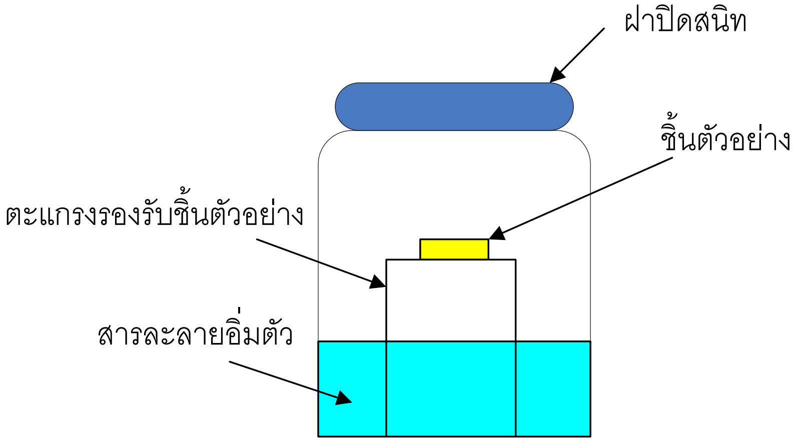
3. นำตัวอย่างที่หั่นแล้วมาชั่งน้ำหนักแล้ววางไว้บนตะแกรงในโหลแก้วสารละลายอิ่มตัวดังแสดงในภาพที่ 28

4. นำโหลทั้งหมดเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 35 ^{o}C

5. นำชิ้นตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 48 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง

6. จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำการหาความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 ^{o}C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนเป็นอุณหภูมิ 40 และ 50 ^{o}C



ภาพที่ 28 ลักษณะการวางตัวอย่างในโหลปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว

การหาสมการความชื้นสมดุลจะใช้รูปแบบสมการ 5 รูปแบบ (Aviara et al., 2004) ดังต่อไปนี้

Modified Henderson $$M_{eq} = \left[\frac{-\ln(1-rh)}{A\left(T_{abs}+B\right)}\right]^{1/C} \quad (39)$$

Modified Chung-Pfost $$M_{eq} = \frac{-1}{C}\ln\left[-\frac{\left(T_{abs}+B\right)}{A}\ln(rh)\right] \quad (40)$$

Modified Halsey $$M_{eq} = \left[\frac{-\ln(rh)}{\exp\left(A+BT_{abs}\right)}\right]^{-1/C} \quad (41)$$

Modified Oswin $$M_{eq} = \left(A+BT_{abs}\right)\left[\frac{rh}{1-rh}\right]^{1/C} \quad (42)$$

Modified GAB $$M_{eq} = \frac{AB\left(\frac{C}{T_{abs}}\right)rh}{\left(1-B(rh)\right)\left(1-B(rh)+\left(\frac{C}{T_{abs}}\right)B(rh)\right)} \quad (43)$$

เมื่อ M_{eq} คือความชื้น (%db)

rh คือความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

T_{abs} คืออุณหภูมิ (^{O}K)

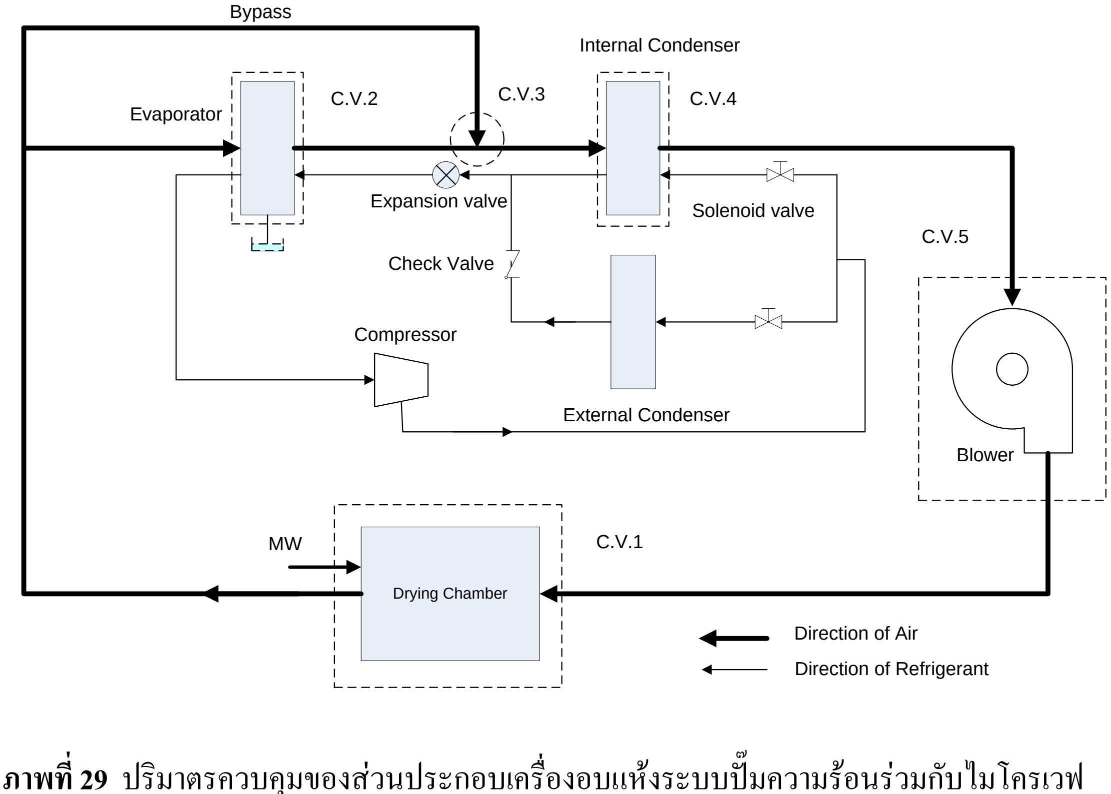
A, B, C คือค่าคงที่ของสมการ

การหาค่าคงที่ A, B และ C ในแต่ละสมการนั้นทำโดยใช้ nonlinear regression ของโปรแกรม SPSS 11.5 for window โดยการเลือกใช้รูปแบบสมการนั้นจะประเมินโดยดูจากค่า R^2 และค่า standard error of estimate

การหาสภาพที่เหมาะสมของการดำเนินการอบแห้ง

การวิเคราะห์ระบบเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ระบบเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบ จะพิจารณาได้จากแผนภาพระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบซึ่งพิจารณาเป็นปริมาตรควบคุม (control volume) ดังแสดงในภาพที่ 29 หลักการทำงานเริ่มจากอากาศอบแห้งเข้าสู่ห้องอบแห้ง C.V.1 เพื่อทำการลดความชื้นวัสดุ จากนั้นอากาศจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งผ่านเครื่องทำระเหยที่ C.V.2 เพื่อทำการลดความชื้นอากาศ อากาศที่ผ่านการลดความชื้นแล้วจะถูกนำมาผสมกับอากาศอีกส่วนหนึ่งที่ bypass ข้ามเครื่องทำระเหยที่ C.V.3 จากนั้นอากาศไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่นตัวใน C.V.4 เพื่อทำการคืนความร้อนในกับอากาศ จากนั้นพัดลม C.V.5 ทำหน้าที่ส่งอากาศอบแห้งเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ C.V.1



ภาพที่ 29 ปริมาตรควบคุมของส่วนประกอบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ใช้หลักการสมดุลมวลและพลังงาน (mass and energy balance) สำหรับปริมาตรควบคุมโดยทำการวิเคราะห์ระบบของเครื่องอบแห้งออกเป็นปริมาตรควบคุมดังแสดงในภาพที่ 28 เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งและการทำงานของอุปกรณ์ในระบบของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบ

การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบแล้ว สมการเหล่านี้จะถูกนำมาหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MHPD1.0 ขึ้นมาเพื่อทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) พฤติกรรมการอบแห้งและการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเพื่อให้ได้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สนใจคือ เป็นจุดที่เครื่องทำงานได้โดยมีใช้จ่ายในด้านพลังงานต่ำสุด

การพิสูจน์แบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับการทำงานจริงของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกพิสูจน์ด้วยค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนที่ใช้ในการสร้างเครื่องและจากค่าวัตถุดิบ (ไพล) จะถูกนำมาคำนวณตามวิธีการทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเพื่อหาระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ผลและวิจารณ์

การศึกษาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเบื้องต้น

การศึกษาเพื่อหาค่าพลังงานจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

ผลจากการหาค่าพลังงานไมโครเวฟที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟของตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนยี่ห้อ DAWOO รุ่น KOR 63D7 ซึ่งระบุขนาดพลังงานสูงสุดไว้ที่ nameplate คือ 700 W แสดงในตารางที่ 5

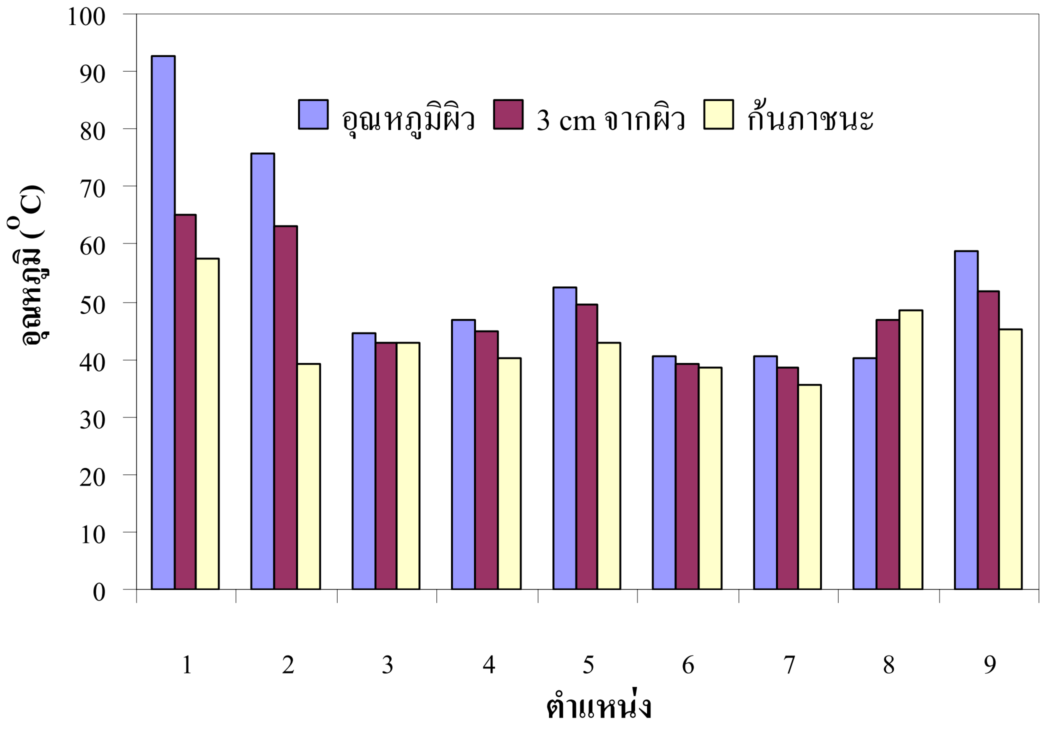
ตารางที่ 5 ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ระดับพลังงานทั้ง 7 ระดับของตู้อบไมโครเวฟ

ระดับพลังงาน	พลังงาน output (W)
1	106.93
2	154.45
3	249.49
4	350.48
5	445.52
6	540.57
7	594.03

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าพลังงานที่แท้จริงซึ่งออกมาจากตัวกำเนิดคลื่นของตู้อบไมโครเวฟที่ได้ออกมานั้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่ระบุไว้บน nameplate ของเครื่องคือ 700 W ซึ่งค่าพลังงานที่ออกมามีค่าเท่ากับ 594.03 W ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ประมาณ 15.14%

การศึกษาการกระจายคลื่นไมโครเวฟภายในตู้อบไมโครเวฟ

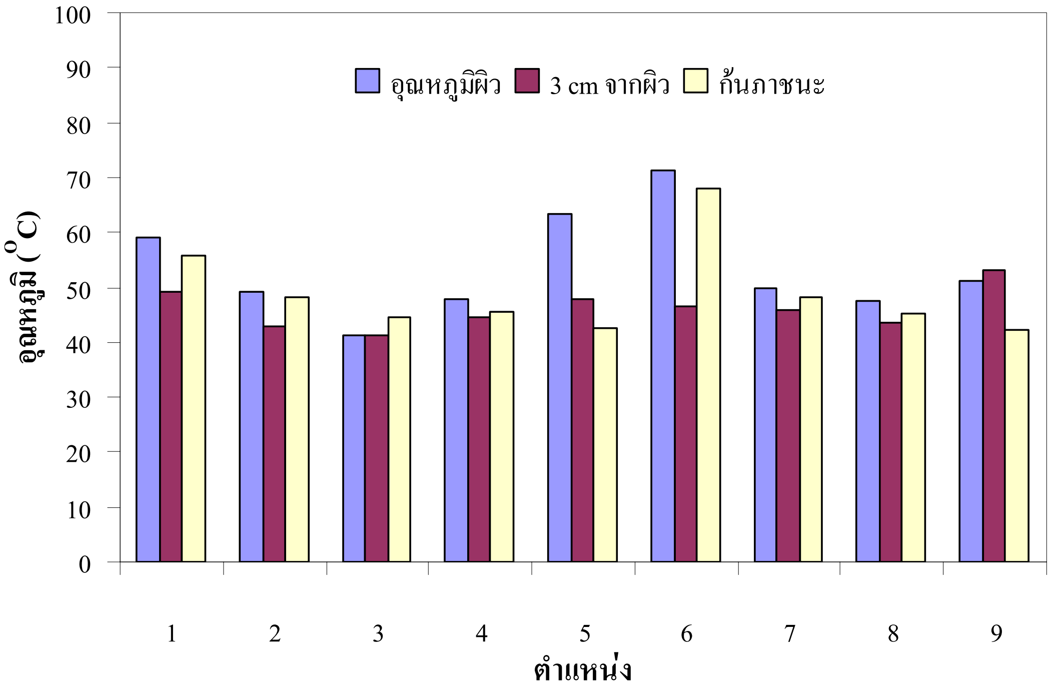
ตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในบ้านเรือนการวัดการกระจายคลื่นไมโครเวฟภายในตู้อบไมโครเวฟ โดยดูจากค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแป้งชิ้นเมื่อกำหนดให้ถาดอยู่นิ่งแสดงผลดังในภาพที่ 30 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิของแป้งเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวหน้าซึ่งเป็นตำแหน่งที่ 1 มากที่สุด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟมากที่สุด และจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิมากโดยเฉพาะที่บริเวณผิวหน้า



ภาพที่ 30 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อถาดหยุดนิ่ง

สำหรับการกระจายอุณหภูมิเมื่อถาดหมุนจะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าเมื่อถาดหยุดนิ่ง ถึงแม้ว่าผนังตู้อบจะมีการออกแบบให้มีการสะท้อนคลื่นแต่เมื่อเพิ่มโหมดให้ถาดหมุนร่วมด้วยจะทำให้มีการกระจายของคลื่นได้ดีกว่าถาดหยุดนิ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาอบในตู้อบไมโครเวฟได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงมากกว่าแบบถาดหยุดนิ่ง

เมื่อคิดค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่วัดได้จากถาดอยู่นิ่งและถาดหมุนพบว่ามีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่า 49.08 และ 49.49 ^{o}C สำหรับถาดอยู่นิ่งและถาดหมุนตามลำดับ โดยมีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิคือ 12.89 และ 7.81 สำหรับถาดอยู่นิ่งและถาดหมุนตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าโหมดมีการกระจายคลื่นสม่ำเสมอมากกว่าแบบถาดอยู่นิ่ง



ภาพที่ 31 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อถาดหมุน

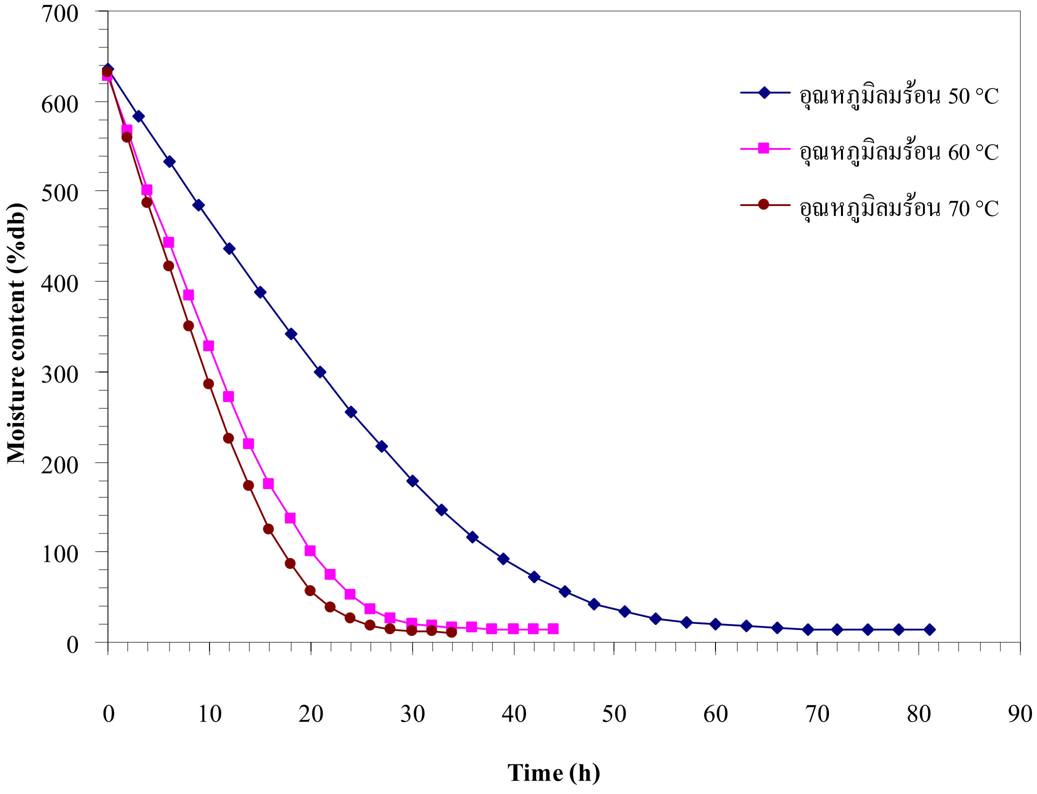
ถึงแม้ว่าโหมดถาดหมุนจะให้การกระจายของอุณหภูมิที่ดีกว่าแต่เนื่องจากข้อจำกัดของการดำเนินการสร้างเครื่องจึงเลือกใช้โหมดถาดอยู่นิ่ง

การศึกษาหาแนวทางในการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

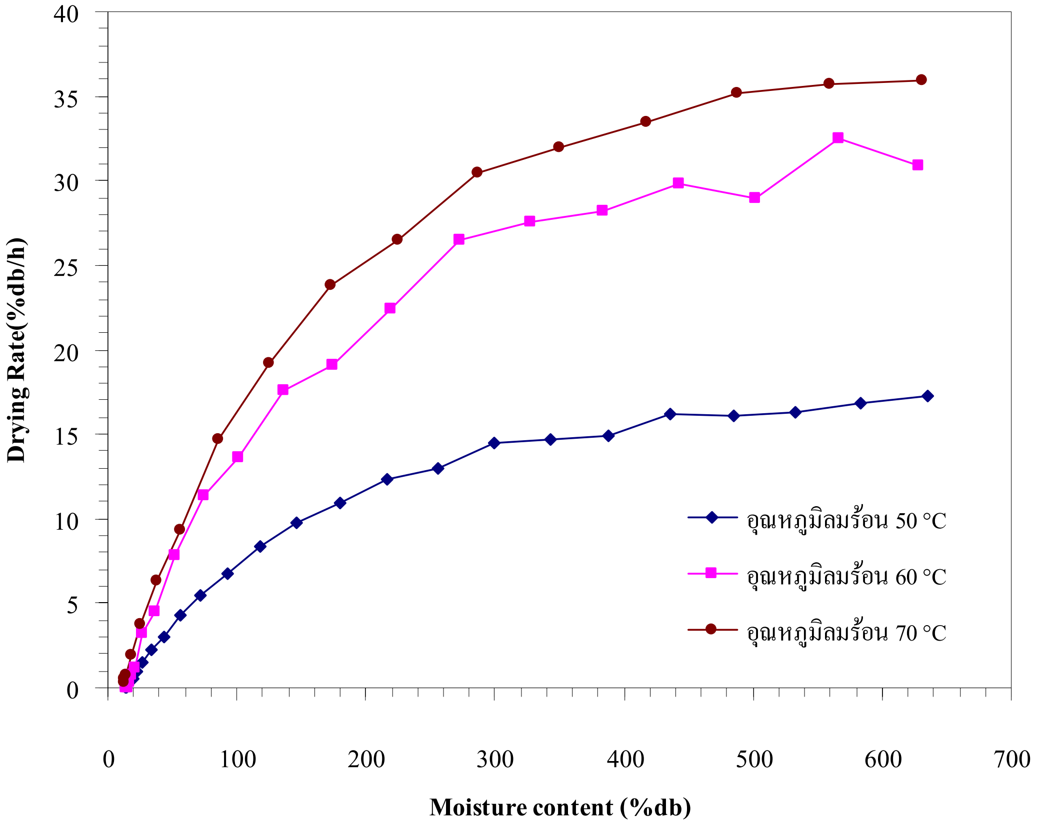
การอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งพริก

การอบแห้งพริกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C 60 ^{o}C และ 70 ^{o}C พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งที่นานมากเนื่องจากพริกที่ใช้เป็นพริกชี้ฟ้าเม็ดใหญ่มีความชื้นสูง โดยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 ^{o}C ใช้เวลานานถึง 81 ชั่วโมง ในการลดความชื้นพริกจาก 635.22 %db ให้ลดลงเหลือ 13.43 %db เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 32



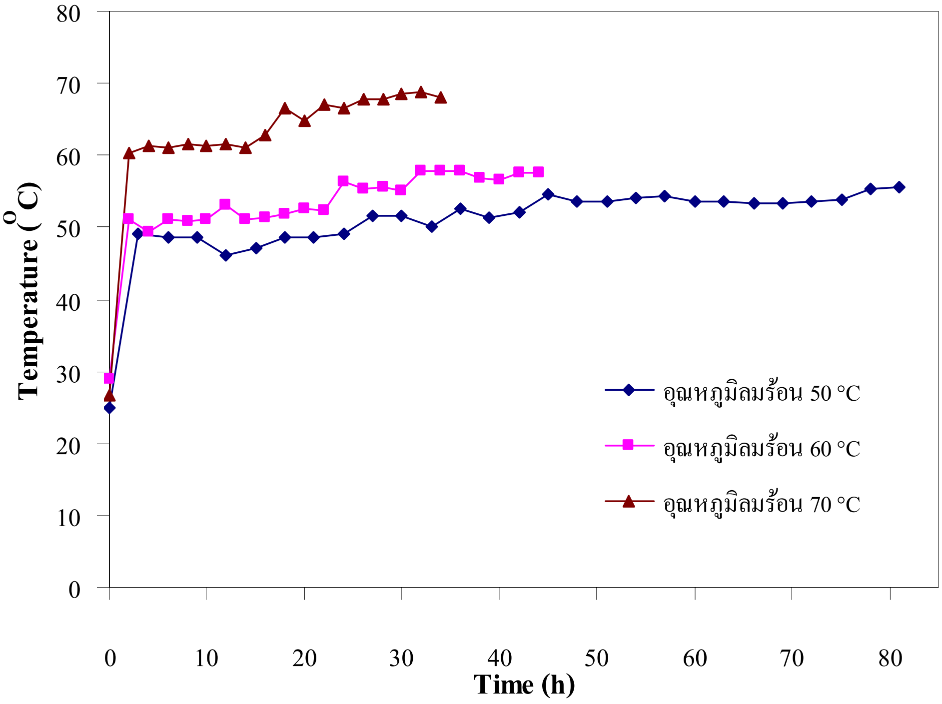
ภาพที่ 32_ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน



ภาพที่ 33_ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อน

อัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนพบว่าอยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลง (ภาพที่ 33) โดยอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่อุณหภูมิลมร้อน 70, 60 และ 50 ^{o}C คือ 20.72, 13.94 และ 7.93 %db/h ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 ^{o}C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{o}C ประมาณ 2.6 เท่า ดังนั้นการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงจำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ค่อนข้างสูงเพื่อเป็นการเพิ่มแรงในการขับความชื้นให้ระเหยออกจากตัววัสดุ จากภาพที่ 33 จะพบว่าในช่วงเริ่มต้นที่วัสดุมีความชื้นสูงจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงเนื่องจากความชื้นอิสระที่อยู่ใกล้บริเวณผิวจะถูกขับเคลื่อนออกสู่ผิวได้โดยง่าย และเมื่อความชื้นส่วนนี้หมดไปชั้นของความชื้นที่อยู่ภายในตัววัสดุจะเคลื่อนตัวออกสู่ผิวได้ช้าลงทำให้อัตราการอบแห้งลดลงซึ่งในการอบแห้งพริกนี้ก็เช่นเดียวกันความชื้นที่ชั้นเปลือกของพริกจะได้รับความร้อนและระเหยออกมาก่อนทำให้ผิวของพริกเหี่ยวและมีการหดตัวส่วนความชื้นที่ไส้พริกซึ่งเป็นความชื้นส่วนใหญ่เมื่อได้รับความร้อนแล้วระเหยออกมาจะถูกชั้นผิวพริกที่แห้งขัดขวางการเคลื่อนที่ออกสู่ผิวนอกทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน เช่นเดียวกับวัสดุเกษตรหลายชนิดที่มีพฤติกรรมการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

(Maskan, 2000) ซึ่งการอบแห้งที่ใช้เวลานานนั้นส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่สิ้นเปลืองซึ่งผลจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 70, 60 และ 50 °C มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) คือ 13.80, 11.41, 8.29 g/kWh ตามลำดับ สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพริกในระหว่างการอบแห้งแสดงในภาพที่ 34 โดยอุณหภูมิของพริกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นเข้าสู่อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง

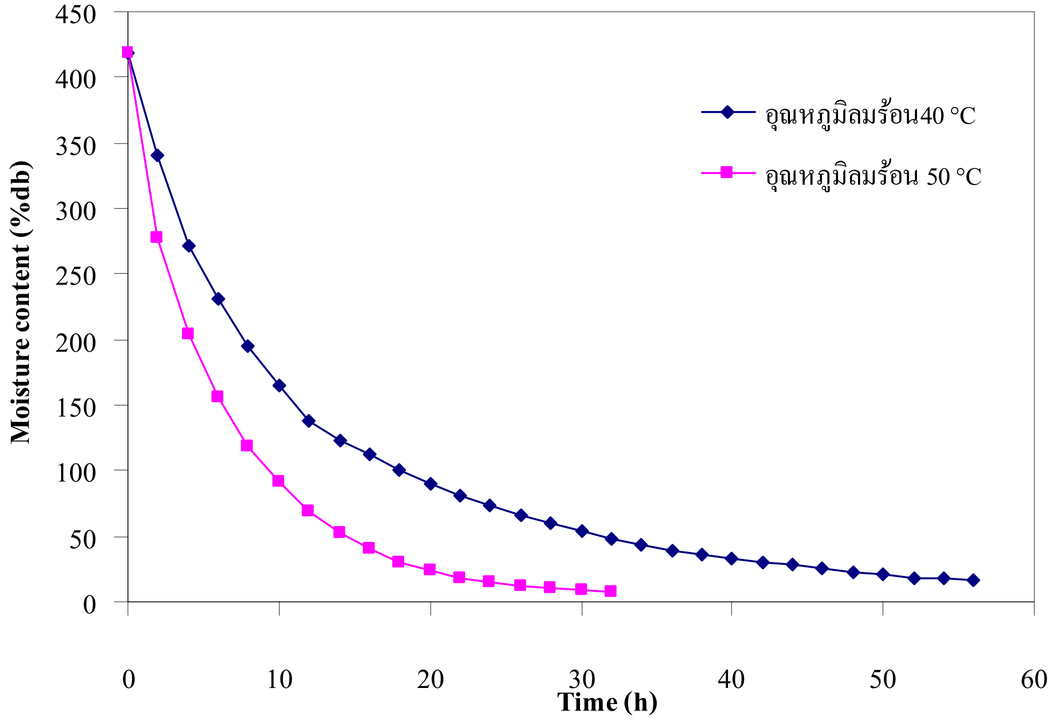


ภาพที่ 34 อุณหภูมิของพริกในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C (HA50), 60 °C (HA60) และ 70 °C (HA70)

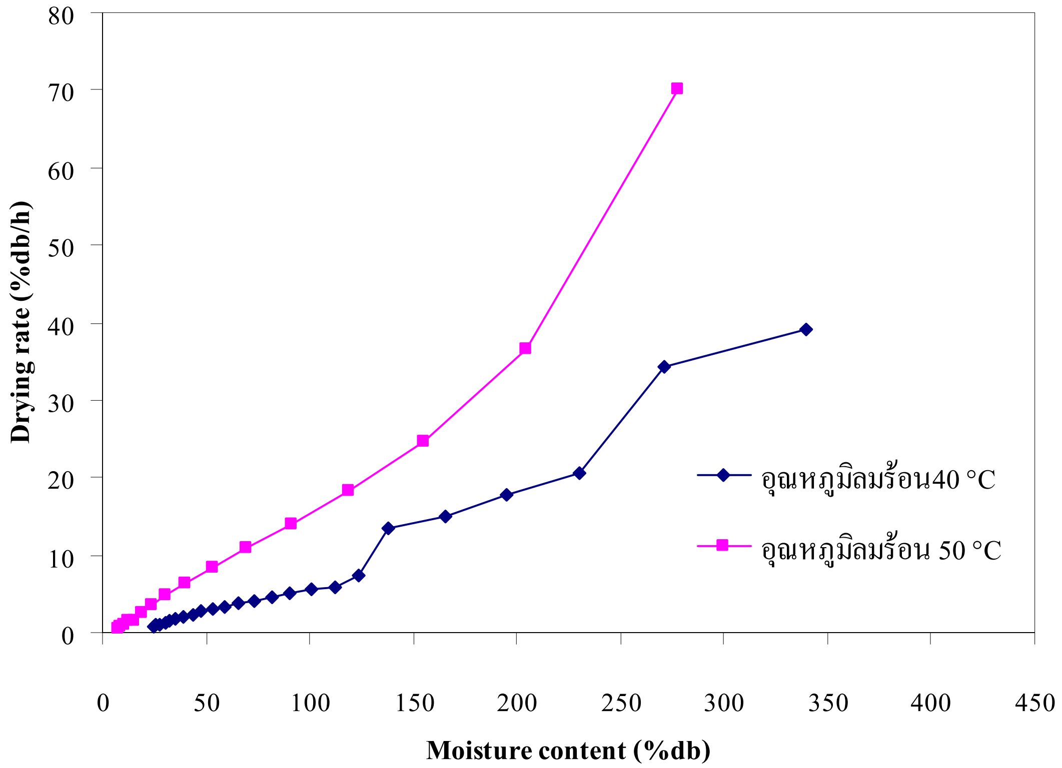
การอบแห้งไพล

ผลจากการทดลองอบแห้งไพลในระดับห้องปฏิบัติการด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 40 และ 50 °C (ภาพที่ 35) พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งจากความชื้น 418.32 %db จนถึงความชื้น 7.89%db 32 ชั่วโมงในขณะที่อุณหภูมิ 40 °C ใช้เวลาในการอบแห้งนานถึง 48 ชั่วโมง และความชื้นสุดท้ายที่ได้มีค่า 24.38%db ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากตัววัสดุสู่

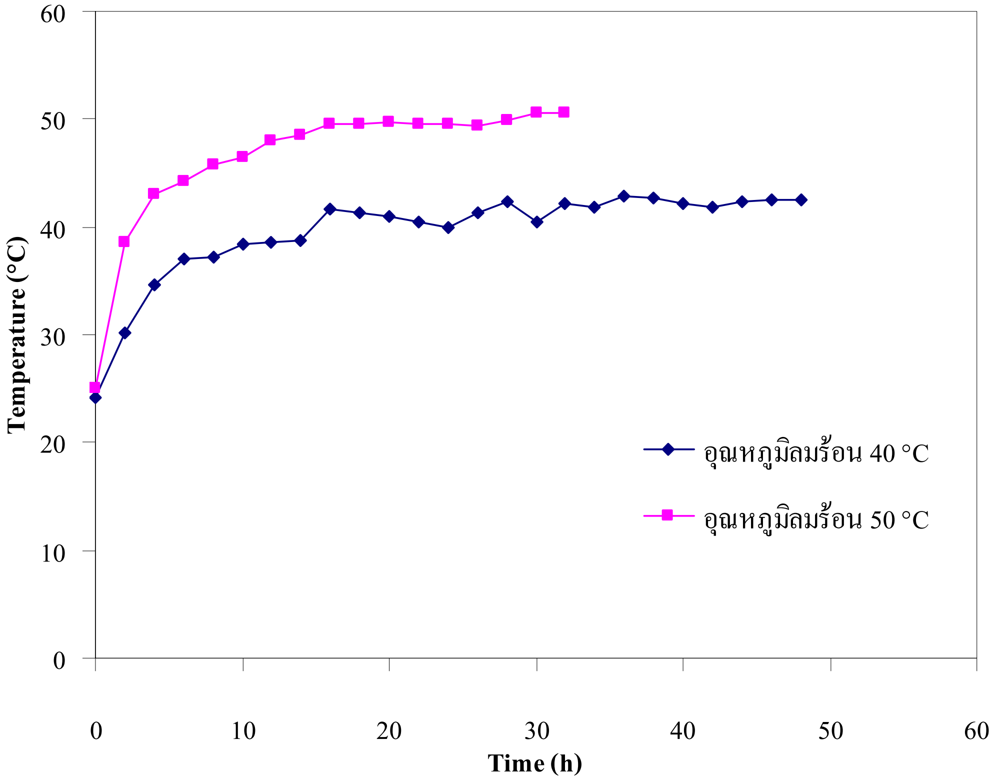
อากาศได้น้อยกว่าจึงมีอัตราการอบแห้งที่นานกว่า (ภาพที่ 36) และประสบกับปัญหาไม่สามารถอบแห้งวัสดุให้ถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการได้ ส่วนค่า SMER เมื่อคิดในปริมาณน้ำระเหยที่เท่ากัน คือ 16.96 และ 25.77 g/kWh ที่อุณหภูมิ 40 และ 50 ^{o}C ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 37 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพลในระหว่างการอบแห้งซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิของไพลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากอุณหภูมิเริ่มต้นไปสู่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อน



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อน



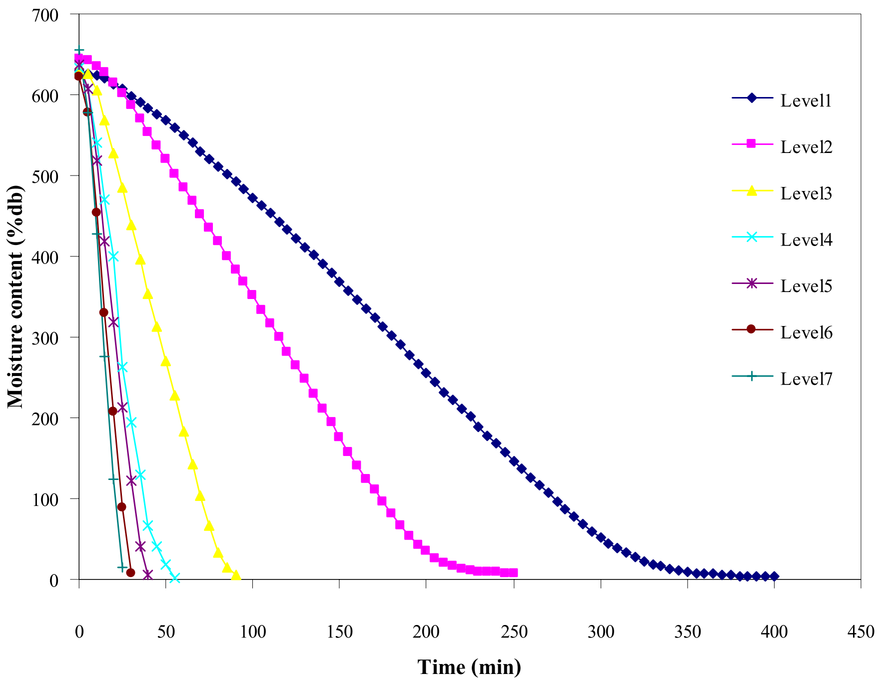
ภาพที่ 37 อุณหภูมิของไพลในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

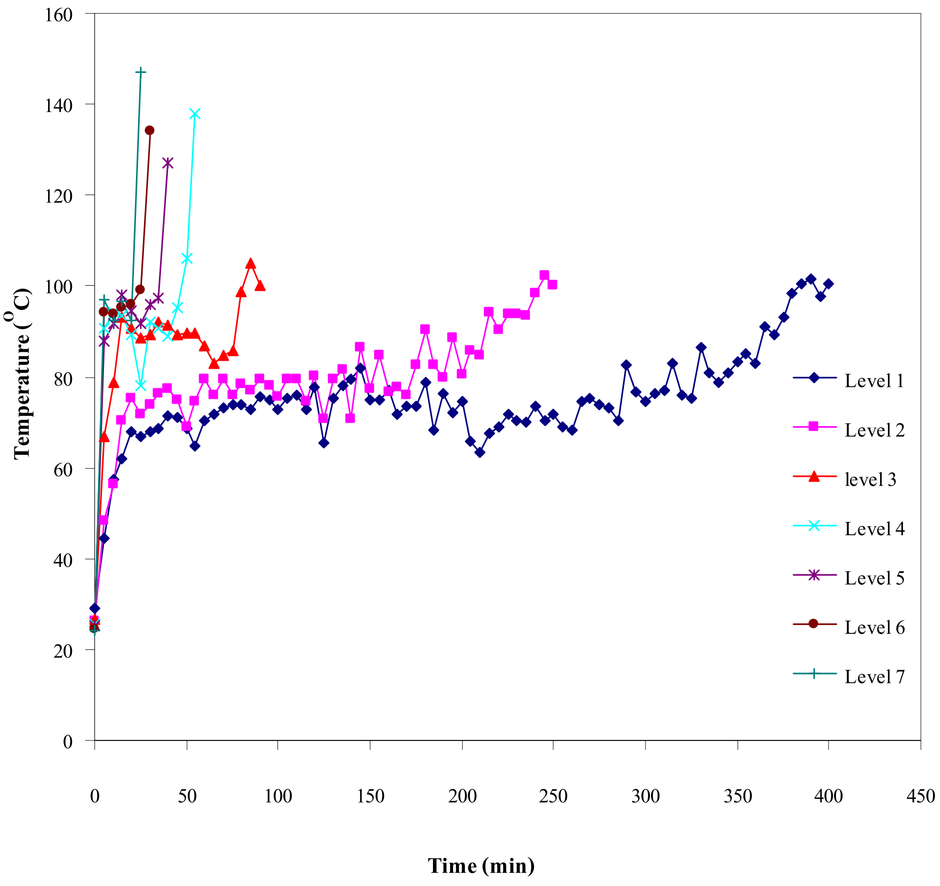
การอบแห้งพริก

ผลการอบแห้งพริกด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับต่างๆ ทั้ง 7 ระดับแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งจะพบว่าระยะเวลาในการอบแห้งลดลงอย่างมากเมื่อทำการอบแห้งด้วยระดับพลังงานที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความร้อนภายในอย่างรวดเร็วทำให้ภายในเนื้อวัสดุมีความดันไอมากส่งผลให้ในระหว่างการอบแห้งพริกเกิดการแตกระเบิดทำให้มีเมล็ดพริกกระจายอยู่ภายในห้องอบ เมื่อทำการอบแห้งต่อไปพริกที่ได้หลังการอบแห้งเกิดรอยไหม้จนถึงติดไฟได้ ซึ่งจากภาพที่ 39 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผิวของพริกในช่วงท้ายของการอบแห้งจะมีค่าสูงมากโดยที่ระดับพลังงานสูงอุณหภูมิที่ผิวของพริกจะถึง 100 ^{o}C ก่อนที่ระดับต่ำกว่า ซึ่งผลจากการทดสอบนี้ทำให้ทราบว่าระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงเกินกว่าระดับ 1 จะทำให้พริกเสียหายอย่างมากและก่อให้เกิดการติดไฟขึ้นภายใน

ห้องอบได้ ดังนั้นในการทดสอบการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟจึงใช้พลังงานไมโครเวฟระดับ 1 เท่านั้น



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับแวลา ของการอบแห้งพริกด้วยไมโครเวฟที่ระดับความพลังงานต่างๆ

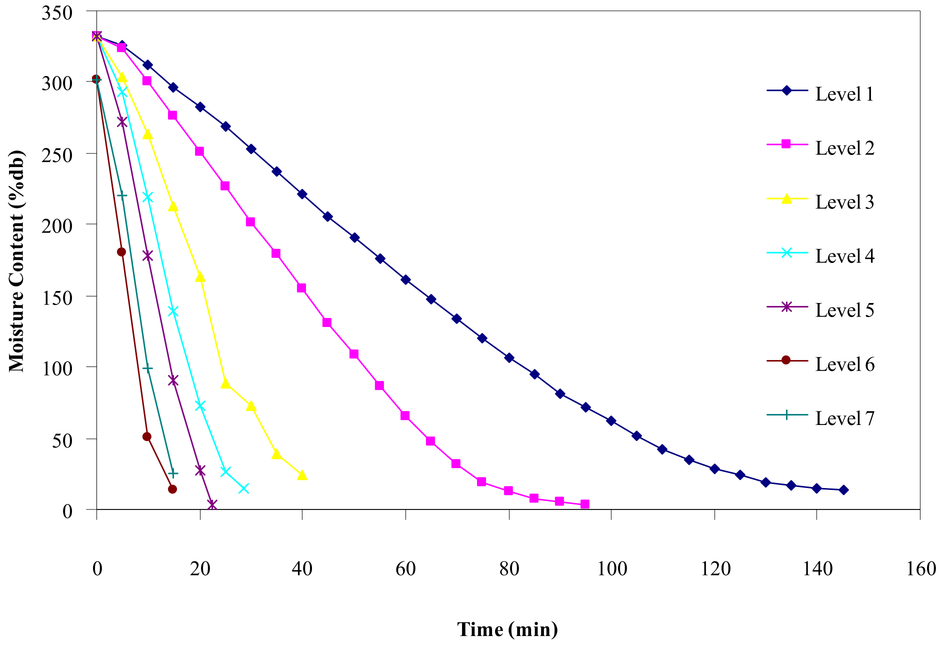


ภาพที่ 39 อุณหภูมิของพริกขณะทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ

การอบแห้งไพล

พฤติกรรมการอบแห้งไพลด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ ทั้ง 7 ระดับ แสดงในภาพที่ 40 ซึ่งจะเห็นเส้น drying curve จะมีความชันมากขึ้นเมื่อใช้ระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายเดียวกัน โดยความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งระหว่างระดับพลังงานที่ 1 และระดับพลังงานที่ 2 มีช่วงห่างค่อนข้างสูง แต่เมื่อระดับพลังงานไมโครเวฟสูงกว่าระดับพลังงานที่ 3 จะมีความแตกต่าง ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง หากคำนึงถึงเฉพาะการลดความชื้น การเพิ่มระดับพลังงานไมโครเวฟมีแนวโน้มที่จะทำการอบแห้งได้เร็วขึ้น แต่เมื่อคำนึงถึงคุณภาพของไพลที่ได้หลังจากการอบแห้งด้วยพบว่าการอบแห้งด้วยระดับพลังงานไมโครเวฟตั้งแต่ระดับ 2 ขึ้นไปจะทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้นภายในชิ้นไพล สังเกตได้จากการหักชิ้นไพลเพื่อดูที่ด้านใน (ภาพที่ 41 (ก)) ส่วนการอบแห้งที่ระดับ 3 ขึ้นไปชิ้นไพลจะไหม้ทำอย่างเห็นได้ชัดและจะทำให้เกิดไฟลุกไหม้ภายในตู้อบก่อนเสร็จสิ้นการอบแห้งทั้งนี้

เนื่องจากมีการสะสมความร้อนที่สูงมากภายในเนื้อไพลซึ่งจะเห็นได้จากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของชิ้นดัง แสดงในภาพที่ 42 ดังนั้นเช่นเดียวกับการอบแห้งพริก การทดสอบอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟจึงใช้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 1 เท่านั้น

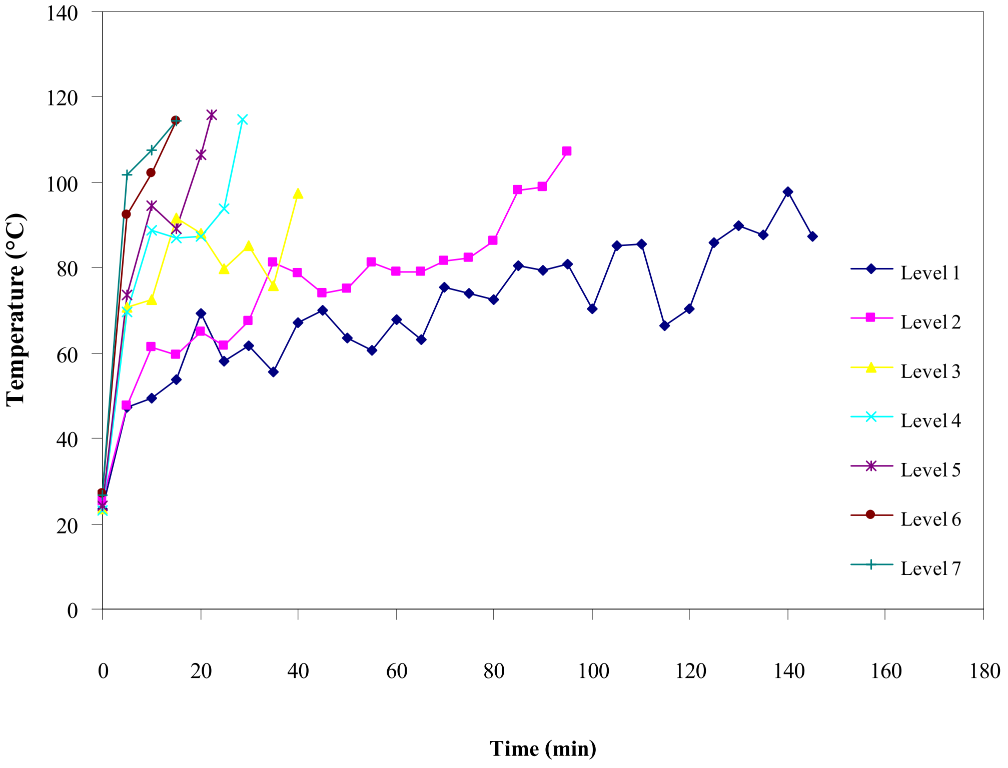


ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยไมโครเวฟที่ระดับพลังงานต่างๆ

(ก) ที่ระดับ 2 รอยไหม้เกิดขึ้นอยู่ภายใน

(ข) ที่ระดับ 3 รอยไหม้เกิดขึ้นอย่างชัดเจน

ภาพที่ 41 ลักษณะของการไหม้ภายในเนื้อไพลเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ



ภาพที่ 42 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไพลขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

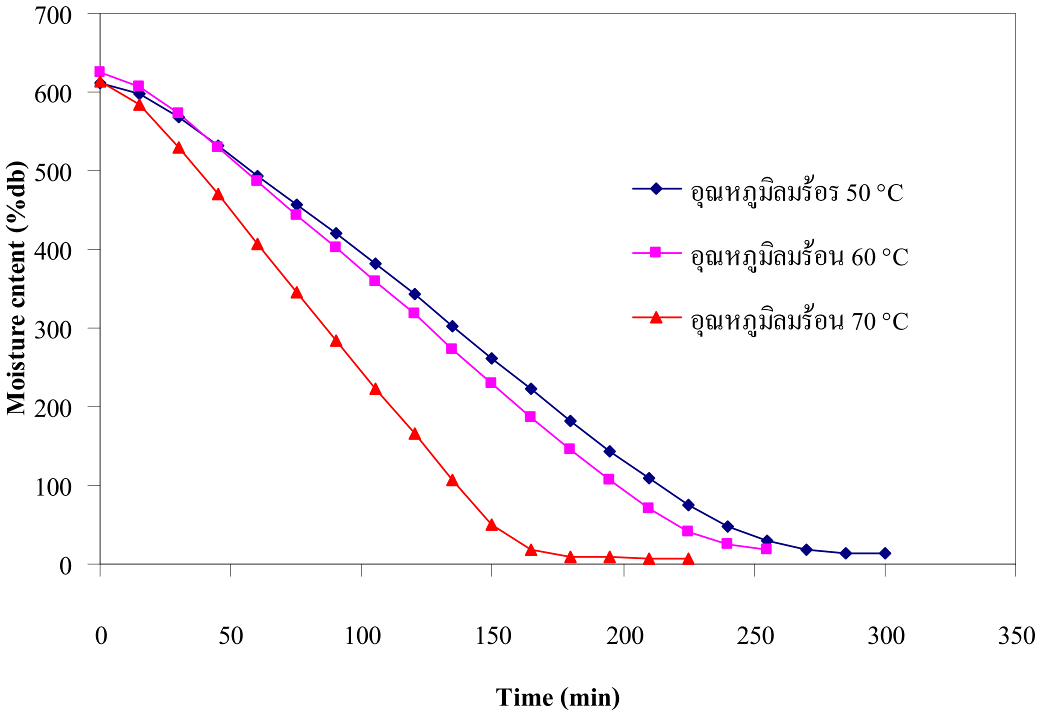
การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

สำหรับการอบแห้งพริก

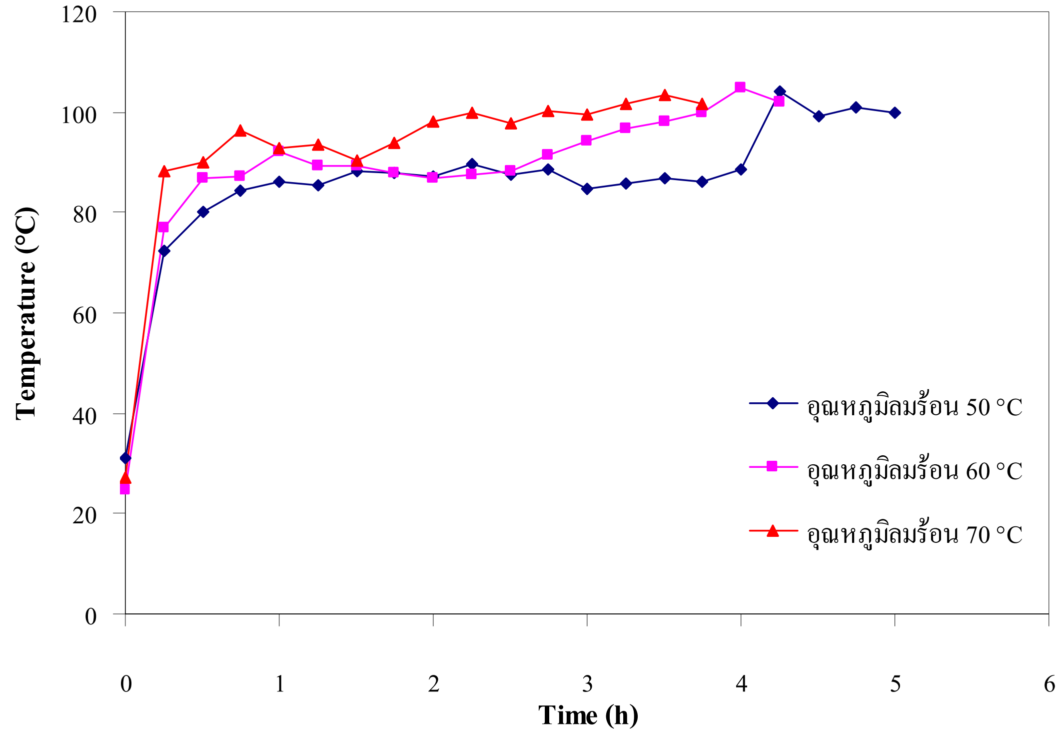
การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่องมีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 43 ซึ่งพบว่าการอบแห้งเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว (ที่ระดับ 1) ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟความชื้นจะถูกขับออกมาสู่บริเวณผิวด้านนอกเมื่อมีลมร้อนไหลผ่านความชื้นที่บริเวณผิวหน้าวัสดุจะระเหยออกไปจึงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่อย่างไรก็ตามการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องย่อมก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งจากภาพที่ 44 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของพริกค่อนข้างสูงจึงเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายก่อนที่ความชื้นของพริกจะลดลงได้ตามที่ต้องการคือน้อยกว่า 14 %db และในระหว่างการอบแห้งผิวหน้าของเม็ดพริกจะมีการแยกชั้น

ออกจากกัน มีการแตกของพริกเนื่องจากความดันไอภายในสูงขึ้น และเกิดรอยไหม้เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวที่ระดับพลังงาน 1 โดยที่อุณหภูมิลมร้อนสูงกว่า (70 °C) ความเสียหายของพริกเนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นเร็วและมากกว่าที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำ (50 °C) ทั้งนี้อาจมีเหตุผลเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อวัสดุมาสู่อากาศอบแห้งได้มากกว่าจึงทำให้อุณหภูมิของพริกลดต่ำลง

ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องที่ทำการทดสอบไม่เหมาะสมต่อการอบแห้งพริกเนื่องจากส่งผลเสียหายต่อผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ (ภาพที่ 45)



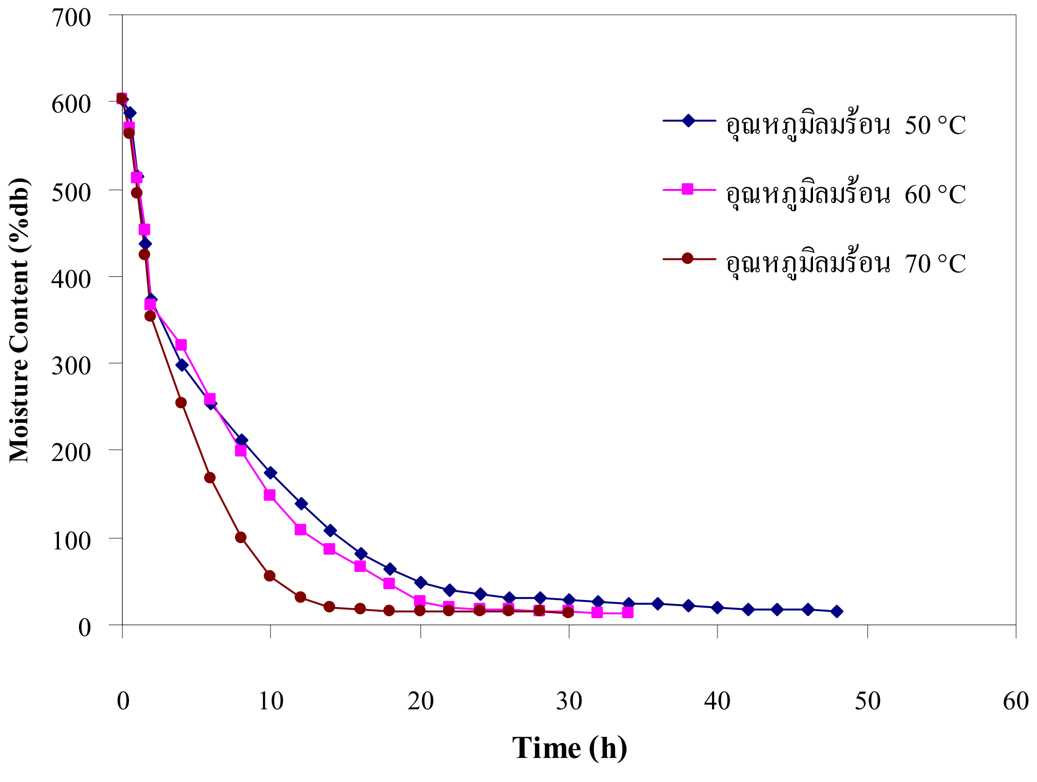
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง



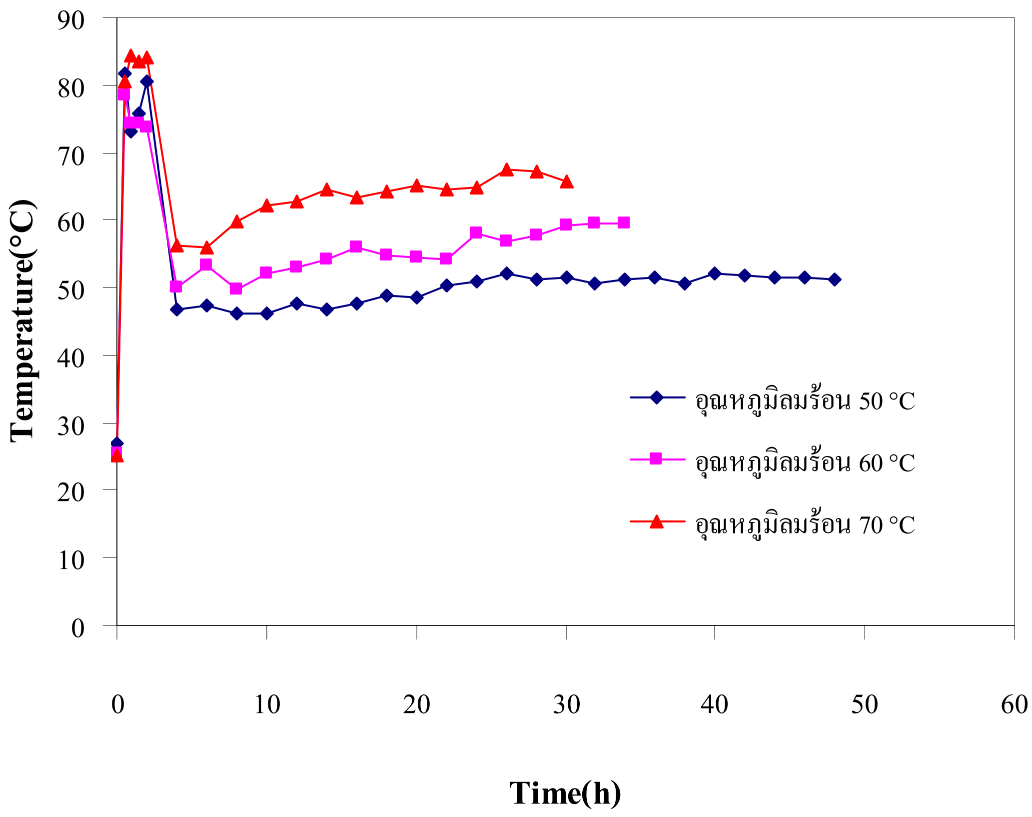
ภาพที่ 44 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพริกขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

ภาพที่ 45 ลักษณะของพริกที่เกิดความเสียหายเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying มีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 46 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกที่ให้พลังงานไมโครเวฟความชื้นของไพลลดลงอย่างรวดเร็วทุกๆ อุณหภูมิลมร้อน เนื่องจากไมโครเวฟจะช่วยทำให้ความชื้นภายในพริกระเหยเคลื่อนที่ออกมาจากไส้พริกสู่ผิวด้านนอกได้อย่างรวดเร็ว และความชื้นที่ออกมาสู่ผิวด้านนอกจะถูกอากาศร้อนพาความชื้นออกจากห้องอบแห้ง เมื่อหยุดให้พลังงานไมโครเวฟลักษณะพฤติกรรมการอบแห้งจะเป็นไปตามการอบแห้งด้วยลมร้อนแต่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวในภาพที่ 32 จะเห็นว่าระยะเวลาในการอบแห้งลดลงมาก นอกจากนี้การให้พลังงานไมโครเวฟในช่วงที่พริกยังมีความชื้นสูงอยู่จะช่วยลดความเสียหายของพริกเนื่องจากวัสดุไม่เกิด overheating ขึ้น (Schiffmann, 1995) ซึ่งจากภาพที่ 47 จะเห็นว่าอุณหภูมิของพริกมีค่าสูงในช่วงแรกที่ให้พลังงานไมโครเวฟแต่ก็ไม่สูงจนขนาดทำให้เกิดความเสียหายต่อพริกที่ทำการอบแห้ง



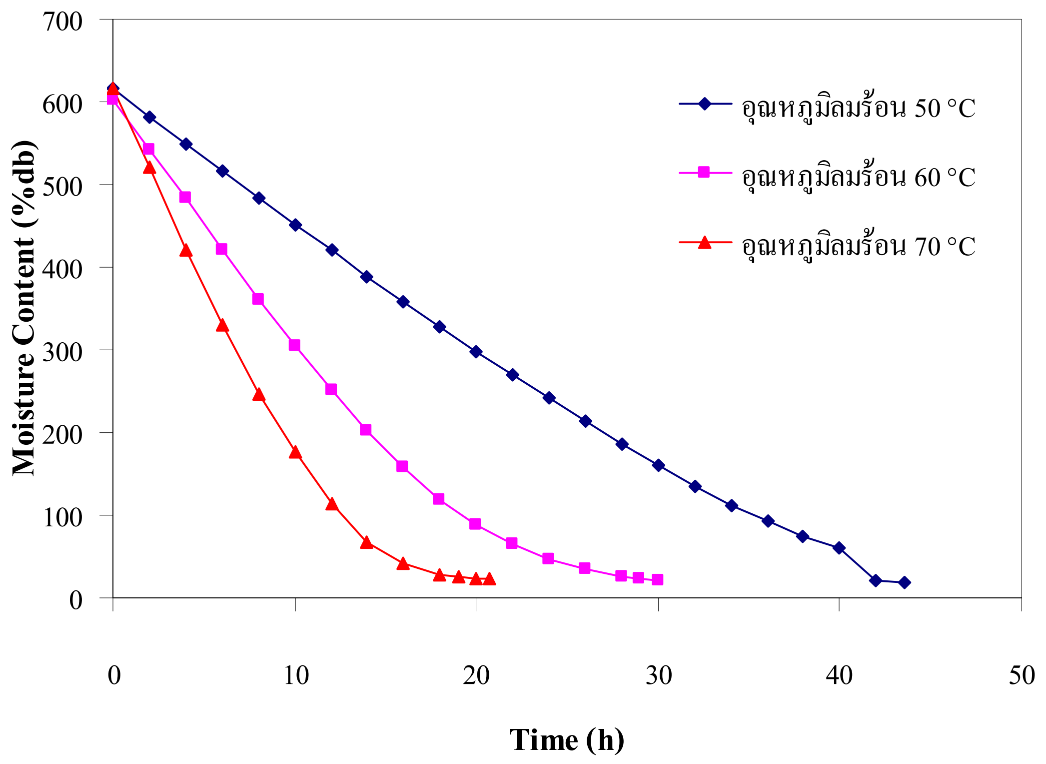
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา ของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying



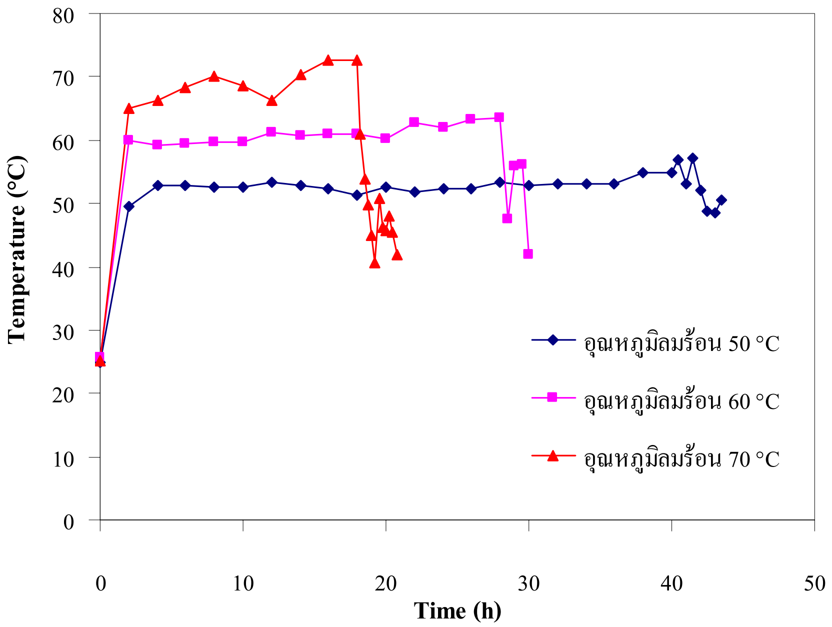
ภาพที่ 47 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพริกขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying

การอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying เป็นการนำไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งเพื่อช่วยลดปัญหาการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานานในช่วงท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในสู่ผิวด้านนอกเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการระเหยความชื้นที่ผิว ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งลดลงจากการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ภาพที่ 48 แสดงพฤติกรรมการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying จะเห็นว่าช่วงสุดท้ายของการอบแห้งใช้ระยะเวลาสั้นลง เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวโดยเฉพาะที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{o}C หากใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวต้องใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่า 80 ชั่วโมง เมื่อนำไมโครเวฟมาช่วยในช่วงท้ายของการอบแห้งที่ความชื้นเคลื่อนที่ออกมาระเหยที่ผิวได้ลดลงจะทำให้ประหยัดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 46.30 31.82 และ 38.97% เมื่อทำการอบแห้งร่วมกับลมร้อนอุณหภูมิ 50 60 และ 70 ^{o}C ตามลำดับ สำหรับ

อุณหภูมิที่ผิวของพริกที่อยู่ในระหว่างการอบแห้งแสดงในภาพที่ 49 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงที่ให้ไมโครเวฟได้ทำการปิด heater แต่ยังคงเปิดพัดลมเพื่อช่วยระบายความร้อนส่วนเกินที่เกิดขึ้นภายในเม็ดพริกทำให้อุณหภูมิของพริกไม่สูงเกินจนเกิดความเสียหาย

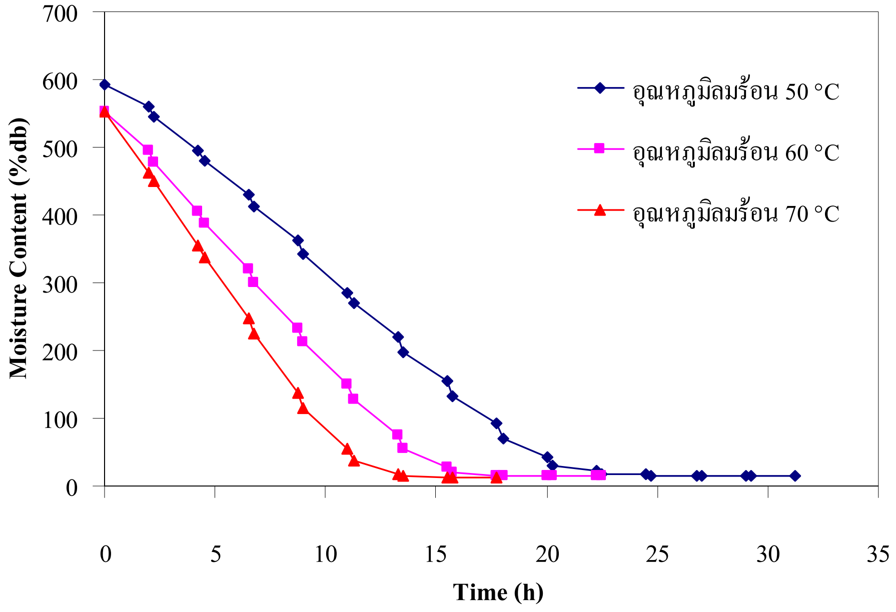


ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying

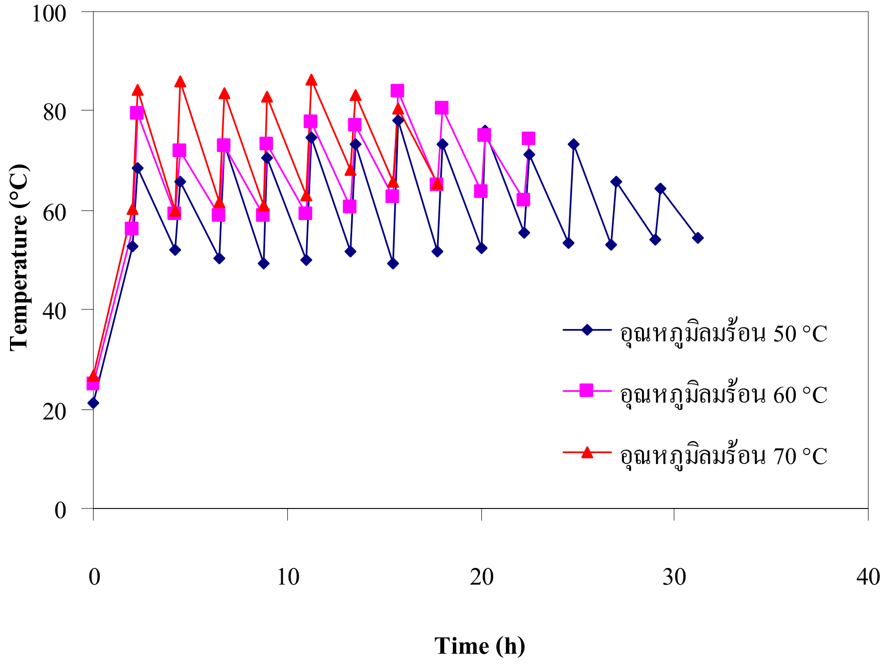


ภาพที่ 49 อุณหภูมิของพริกขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying.

การอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying เป็นการกำหนดช่วงให้พลังงานไมโครเวฟเข้าไปในการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมของความร้อนภายในเนื้อวัสดุซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง โดยมีพฤติกรรมการอบแห้งแสดงในภาพที่ 50 ซึ่งจะเห็นว่าความชันของเส้น drying curve เพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวและน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating และ finish drying ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Shivhare et al. (1992a,b) ที่พบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องจะให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบเป็นช่วงในการอบแห้งข้าวโพดแต่ก็จะส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งคือมีการแตกและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดข้าวโพดและยังก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานที่มากกว่าอีกด้วยเพราะมีความร้อนสูญเสียเข้าสู่อากาศอบแห้งจึงได้แนะนำว่าการอบแห้งโดยให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงมีความเหมาะสมกว่าเนื่องจากไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ เนื่องจากไมโครเวฟจะทำหน้าที่กระตุ้นให้มีการขับเคลื่อนความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอกและลมร้อนจะเป็นตัวพาความชื้นออกจากวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิของพริกในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying จึงขึ้นลงตามช่วงเวลาที่ให้ไมโครเวฟและลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying



ภาพที่ 51 อุณหภูมิของพริกขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying

เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จาก ตารางที่ 6 จะเห็นว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟทั้ง 3 แบบ คือ แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (HA-MWPre) แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงท้าย (HA-MWF) และ แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (HA-MWPulse) จะมีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงให้ค่า SMER สูงสุด และพบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 ^{O}C สามารถเพิ่มอัตราการระเหยน้ำออกจากพริกได้ถึง 1.6 เท่าของการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 ^{O}C อีกทั้งยังใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า ดังนั้นการใช้พลังงานไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งได้

ตารางที่ 6 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER, g/kWh) ของการอบแห้งพริก

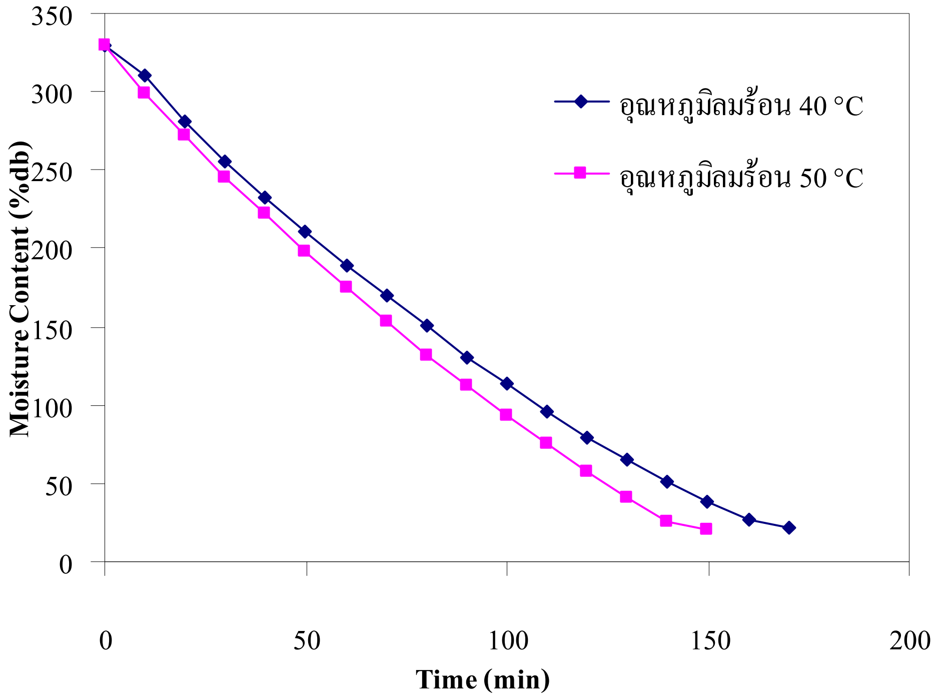
Temperature. (^{O}C)	HA	HA- MWPre	HA-MWF	HA-MWPulse
50	8.93	14.31	16.08	22.12
60	11.41	15.91	18.37	24.12
70	13.79	15.21	22.68	25.62

ผลที่ได้จากการทดสอบยังปรากฏว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบให้ความร้อนในช่วงท้ายและการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงจะทำให้ผิวของเม็ดพริกมีความเหี่ยวย่นลดลงทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนความชื้นที่ผิวด้านนอกของพริกจะค่อยๆ ระเหยออกก่อนเมื่อสูญเสียความชื้นที่ผิวทำให้เกิดการหดตัวขึ้นทำให้เกิดความต้านทานในการระเหยความชื้นออกจากพริกอีกทั้งลักษณะของพริกจะมีรูปแบบเป็นหลอดกลวงที่มีแกนกลางเป็นไส้ซึ่งมีความชื้นสูง การหดตัวของพริกจะกักความชื้นที่ไส้พริกเอาไว้ทำให้พริกแห้งมักเกิดราขึ้นที่ไส้พริกได้ แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟความร้อนในไส้พริกอันเนื่องมาจากไมโครเวฟจะทำให้เกิดความดันไอจากภายในเม็ดพริกขับความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอกทำให้ผิวของพริกที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟทั้งสามวิธีนี้มีความเหี่ยวย่นน้อยกว่า (ภาพที่ 52)

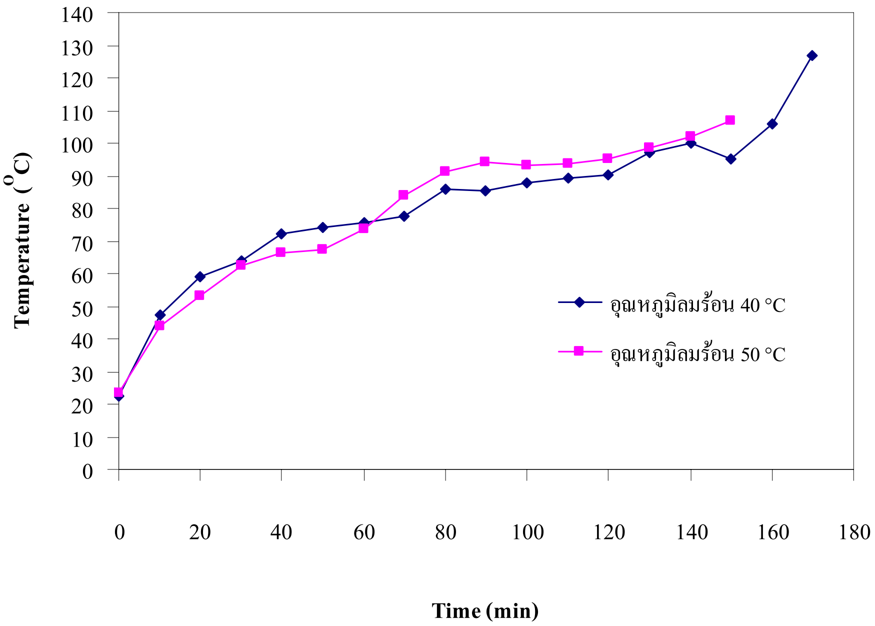
ภาพที่ 52 ลักษณะของพริกที่ได้หลังการอบแห้ง

สำหรับการอบแห้งไพล

ผลการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่องมีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 53 ซึ่งจะเห็นว่าการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบต่อเนื่องกับไพลนั้นจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงมากเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะเป็นตัวทำให้เกิดความร้อนภายในชิ้นไพลแล้วเกิดความดันไอของความชื้นขับให้ความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอกจากนั้นลมร้อนที่อยู่ด้านนอกจะทำหน้าที่ในการพาความชื้นออกจากผิววัสดุ ผลที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิสูงกว่าจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการใช้ลมร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่เนื่องจากการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดปริมาณความร้อนสะสมขึ้นภายในเนื้อวัสดุทำให้เกิดการ overheating ในตัววัสดุ ทำให้ก่อนที่จะถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ (14%db) โดยความชื้นสุดท้ายของไพลที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่องคือ 21.45 และ 20.94 %db สำหรับอุณหภูมิลมร้อน 40 และ 50 ^{o}C ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิของไพลมีค่าสูงเกินกว่า 100 ^{o}C (ภาพที่ 54) และเกิดควันขึ้นภายในห้องอบแห้งจึงยุติการอบแห้งลงและพบชิ้นไพลเกิดการไหม้ขึ้นภายในเนื้อข้างใน ซึ่งหากดูภายนอกจะไม่พบว่ามีรอยไหม้ แต่เมื่อหักชิ้นไพลออกดูจะพบว่ามีลักษณะเป็นสีน้ำตาลไหม้อยู่ภายใน (ภาพที่ 55) วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมกับไพลถึงแม้ว่าใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นก็ตาม



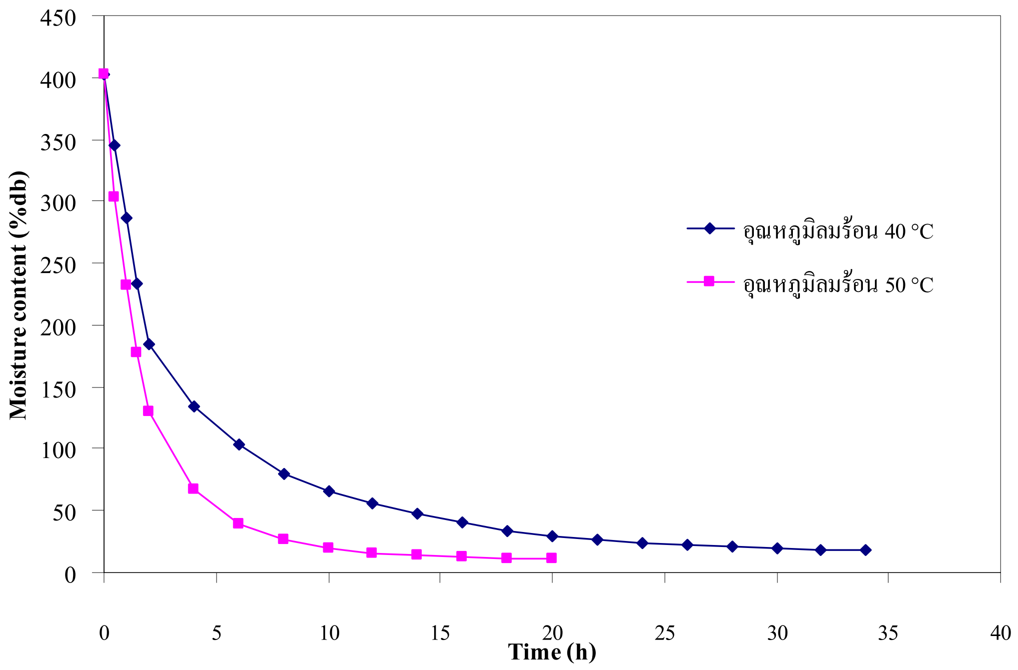
ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง



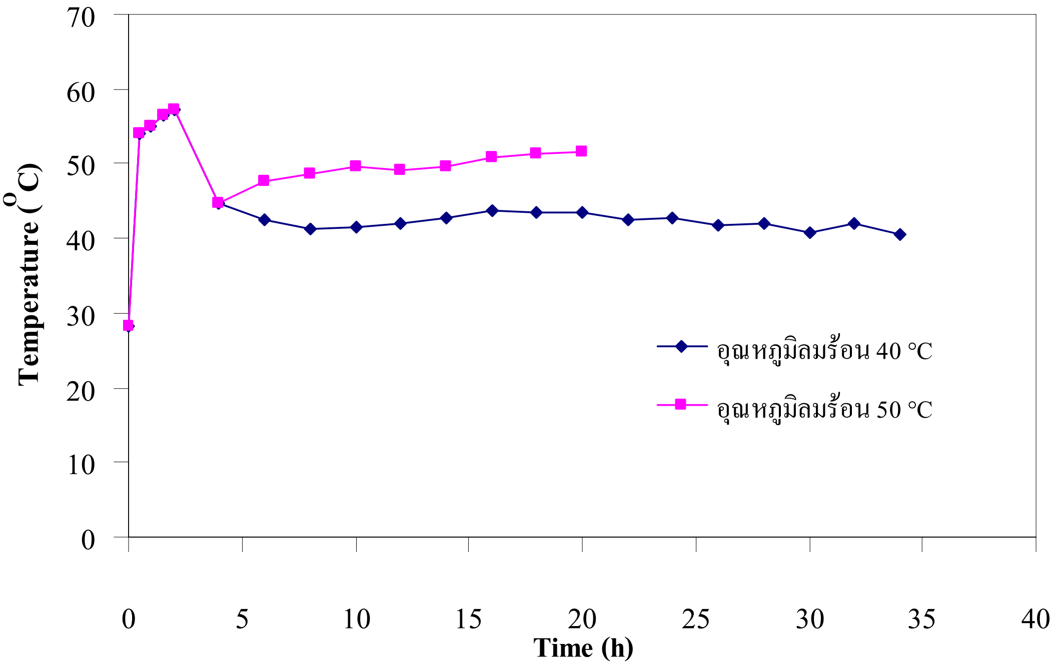
ภาพที่ 54 อุณหภูมิของไพลขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง

ภาพที่ 55 ลักษณะการเกิดรอยไหม้ขึ้นกับเนื้อไพล

ผลการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying มีพฤติกรรมการอบแห้งแสดงในภาพที่ 56 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงที่ให้พลังงานไมโครเวฟความชื้นของไพลลดลงอย่างรวดเร็วและส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และการให้พลังงานไมโครเวฟกับไพลในช่วงที่ไพลยังมีความชื้นสูงอยู่จึงทำให้ไพลไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากไมโครเวฟ โดยอุณหภูมิของไพลระหว่างการอบแห้งแสดงในภาพที่ 57 โดยในช่วงแรกที่ไพลได้รับพลังงานไมโครเวฟอุณหภูมิของไพลมีค่าสูงเมื่อหยุดให้พลังงานไมโครเวฟอุณหภูมิของไพลจะลดต่ำลงจนมีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง

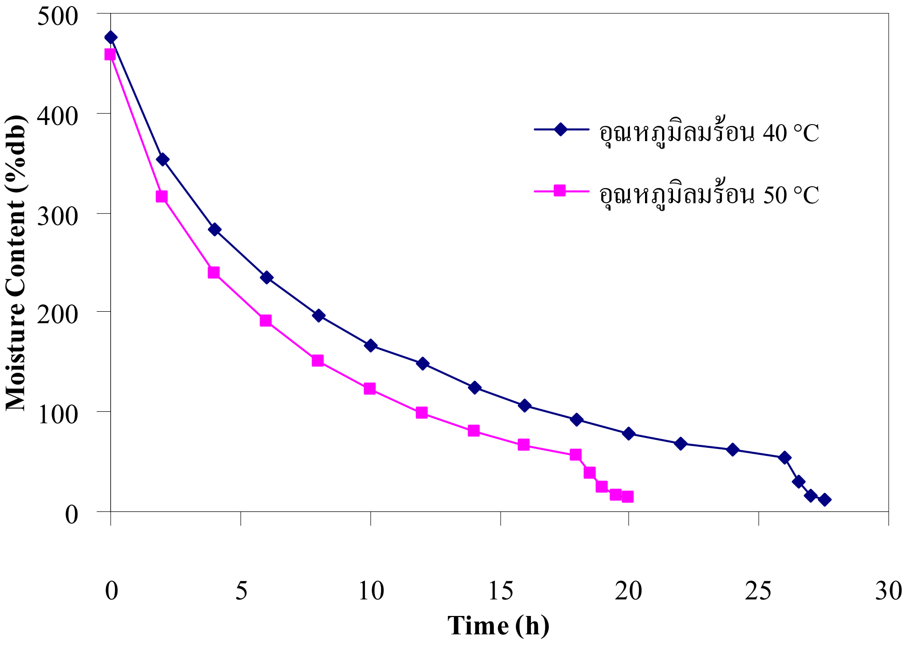


ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบpreheating drying

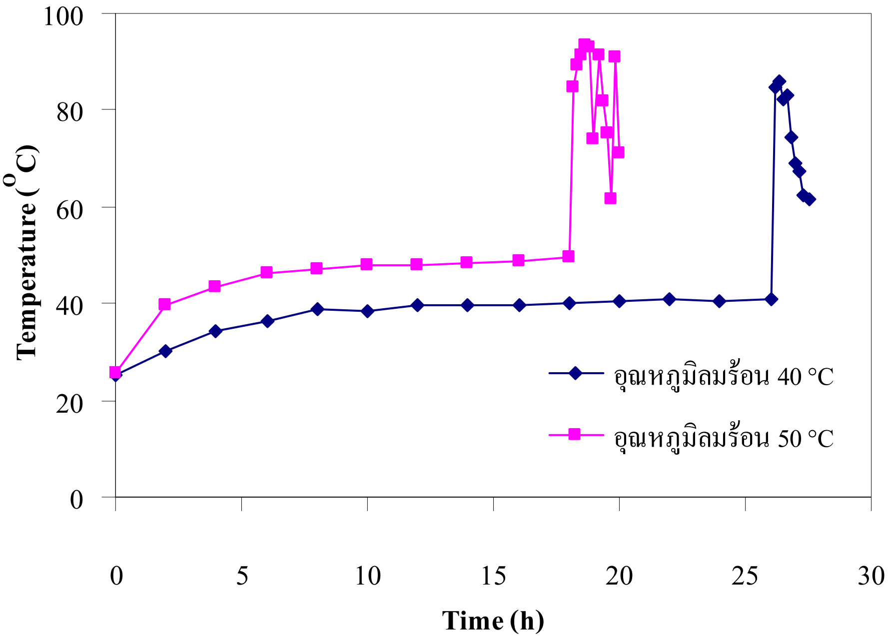


ภาพที่ 57 อุณหภูมิของไพลขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ preheating drying.

ผลที่ได้จากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying แสดงในภาพที่ 58 ซึ่งจะพบว่าการอบแห้งด้วยวิธีนี้สามารถช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งลงจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวและสามารถทำการอบแห้งให้ได้ความชื้นที่ต้องการ (14%db) ได้ เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ 40 °C นอกจากนี้การอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังไม่ก่อให้เกิดการไหม้ขึ้นภายในเนื้อวัสดุเนื่องจากปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุมีค่าต่ำลงทำให้มีปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่ภายในน้อยกว่าการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง ภาพที่ 59 แสดงอัตราการอบแห้งของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟพบว่าเมื่อความชื้นวัสดุลดต่ำลงอัตราการอบแห้งก็ลดต่ำลงด้วยหากเราทำการอบแห้งต่อด้วยลมร้อนจะต้องใช้ระยะเวลานานมากขึ้นทำให้สิ้นเปลืองพลังงานแต่เมื่อทำการอบแห้งต่อด้วยไมโครเวฟจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้เราสามารถอบแห้งได้ถึงความชื้นที่ต้องการเร็วขึ้น

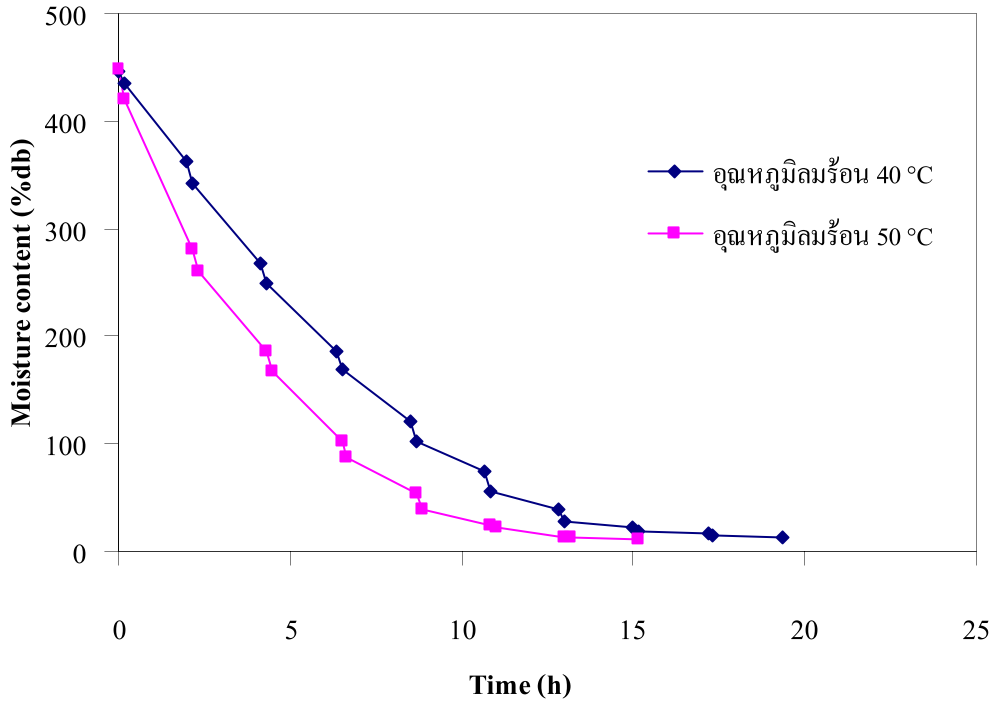


ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying

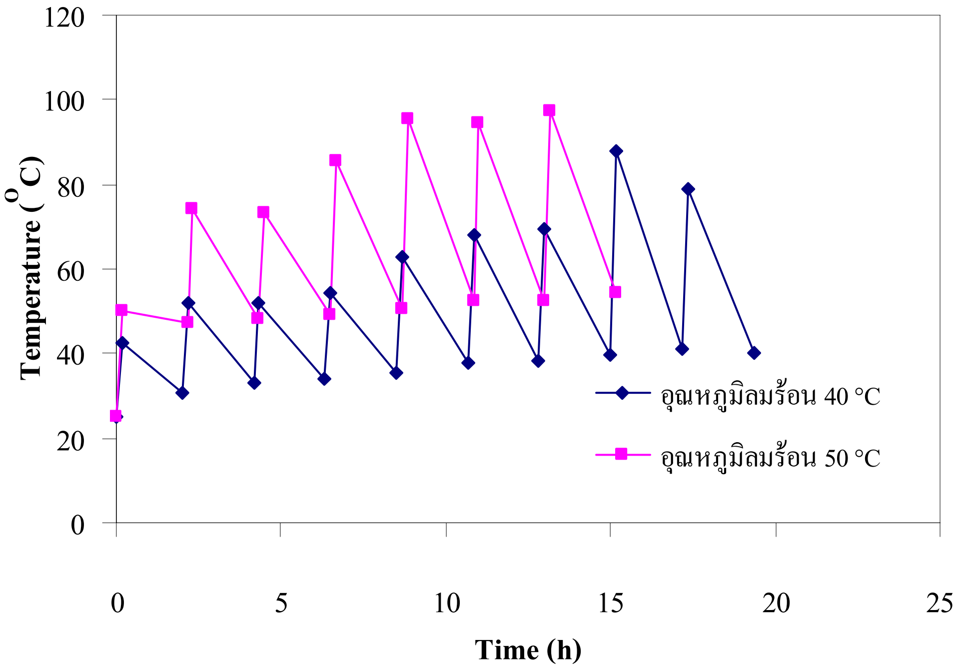


ภาพที่ 59 อุณหภูมิของไพลขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying.

ผลการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying มีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 60 เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งเพื่อต้องการที่จะลดเวลาในการอบแห้งให้สั้นลงการอบแห้งแบบให้พลังงานไมโครเวฟแบบเป็น pulse จึงน่าสนใจทั้งนี้เพราะว่านอกจากระดับพลังงานไมโครเวฟแล้วระยะเวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟก็มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์การให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการสะสมของของความร้อนภายในตัววัสดุทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนแต่การกำหนดช่วงสั้นๆ จะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากตัววัสดุให้อุณหภูมิของวัสดุไม่สูงจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการอบแห้งพริกและการให้ไมโครเวฟแบบเป็นช่วงๆ ก็จะก่อให้เกิดการระเหยของความชื้นออกจากเนื้อวัสดุอย่างต่อเนื่อง สำหรับอุณหภูมิของไพลในระหว่างการอบแห้งแสดงในภาพที่ 61 โดยอุณหภูมิของไพลมีลักษณะขึ้นลงตามช่วงเวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟ



ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying



ภาพที่ 61 อุณหภูมิของไพลขณะอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ pulse drying.

เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จากตารางที่ 7 จะเห็นว่า การอบแห้งการอบแห้งไพลด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟทั้ง 3 แบบ คือ แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (HA-MWPre) แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงท้าย (HA-MWF) และ แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (HA-MWPulse) จะมีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวทั้งสามรูปแบบการอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิลมร้อนเดียวกัน และเมื่อพิจารณารูปแบบการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟร่วมเข้าไปกับการอบแห้งด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน จะพบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงให้ค่า SMER สูงสุด ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งพริกข้างต้น แต่จะแตกต่างกันตรงที่ในการอบแห้งพริกนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 50 °C เป็น 60 °C แล้วค่า SMER เพิ่มขึ้น แต่การอบแห้งไพลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 40 °C เป็น 50 °C แล้วค่า SMER กับมีค่าลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของระยะเวลาในการอบแห้งเมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟเข้าไปนั้นช่วยให้อัตรการระเหยน้ำออกจากวัสดุเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ขดลวดความร้อนทำงานนานขึ้น ซึ่งสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานมีค่ามากกว่าจึงทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะลดลง

ตารางที่ 7_ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER, g/kWh) ของการอบแห้งไพล

Temperature. (^{O}C)	HA	HA- MWPre	HA-MWF	HA-MWPulse
40	14.82	28.63	31.12	54.78
50	16.68	30.00	28.44	37.23

จากการศึกษาหาแนวทางในการนำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งจากการอบแห้งพริกและไพลพบว่าการให้ไมโครเวฟแบบเป็นช่วงหรือ hot air-microwave pulse drying มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงนอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งยังคงมีคุณภาพที่ดี โดยลักษณะของไพลที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟจะมีลักษณะของสีไพลที่สดกว่าไพลที่ทำแห้งโดยการตากแดด (ภาพที่ 62) ซึ่งหากมีการนำไพลแห้งไปแปรรูปต่อเป็นไพลผงหรือส่วนผสมผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีของไพล การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟก็จะมีให้ไพลที่มีสีสันสวยงามมากกว่า

(ก) ตากแดด

(ข) จากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ finish drying

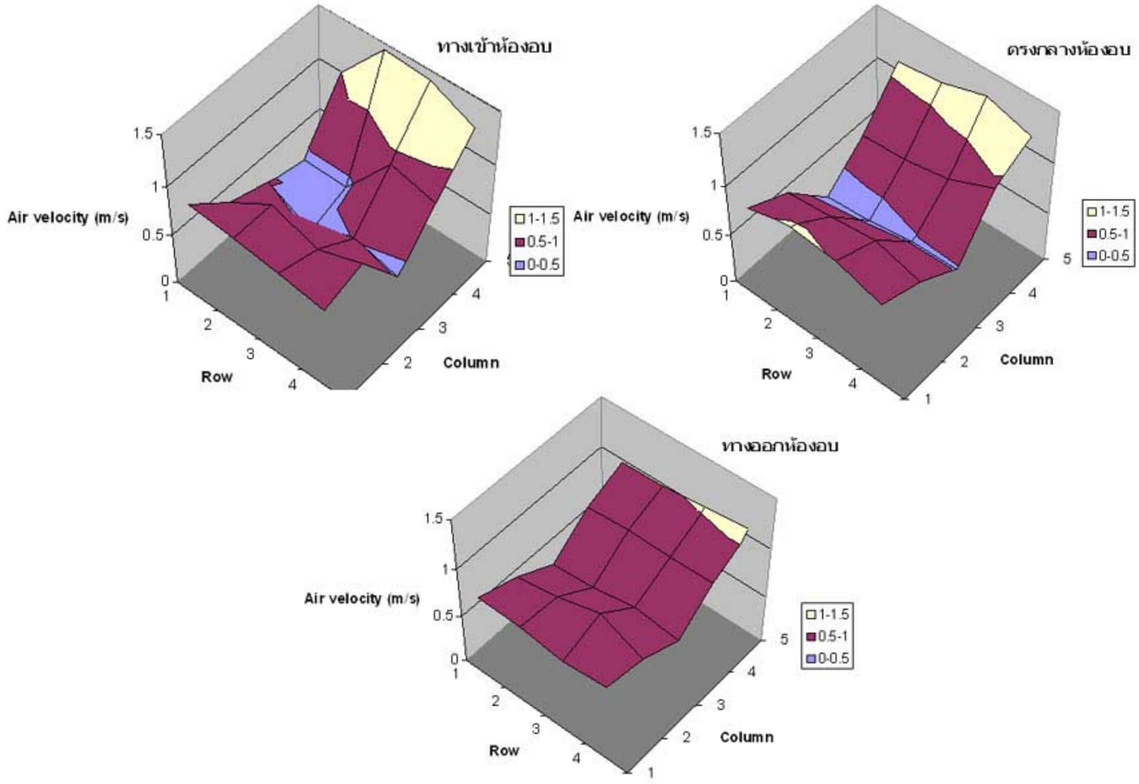
ภาพที่ 62 ลักษณะของไพลแห้งที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับจากการตากแดดของเกษตรกร

ดังนั้นการทดสอบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ทำการพัฒนาขึ้น จะดำเนินการทดสอบโดยใช้การอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง

การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

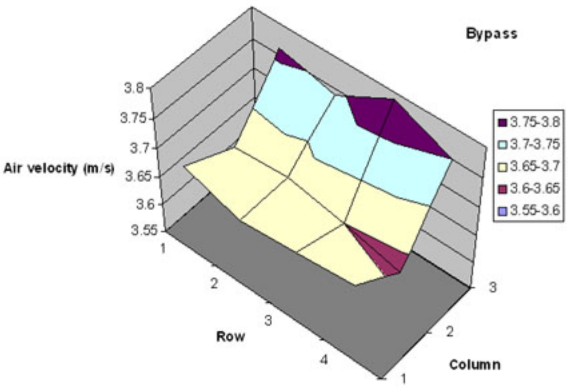
อัตราการไหลและการกระจายของอากาศ

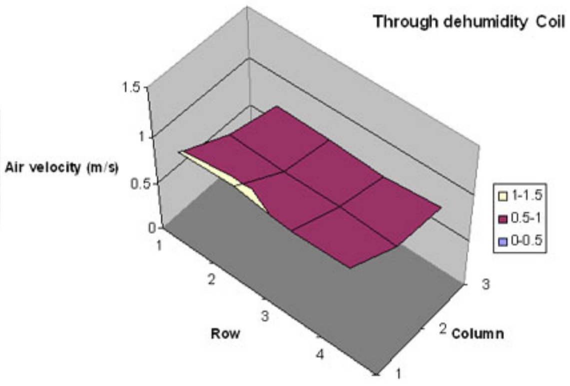
อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งเฉลี่ย 0.621 m^3/s โดยมีการกระจายของอากาศที่หน้าตัดบริเวณเข้าสู่ห้องอบแห้ง กลางห้องอบแห้ง และทางออกของห้องอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 63 โดยจะพบว่าอัตราการไหลของอากาศร้อนที่บริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งจะมีค่าสูงกว่าบริเวณด้านบน(ตลอดแนวของคลอลัมน์ที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากการส่งลมแบบเป่าเข้าสู่ท่อโดยตรงทำให้เกิดการปะทะของอากาศกับพื้นผิวโค้งของท่อลมจึงเกิดการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณนี้จึงมีความเร็วลมสูงกว่าบริเวณด้านบน



ภาพที่ 63 ลักษณะการกระจายตัวของอากาศที่หน้าตัดบริเวณทางเข้า ตรงกลาง และทางออกห้องอบ (ตำแหน่ง Row และ Column ตามภาพที่ 22)

สำหรับอัตราการไหลของอากาศข้ามเครื่องทำระเหย (bypass air) จากการวัดพบว่ามีอัตราการไหล 0.416 m^3/s คิดเป็น 66.95% ของอัตราการไหลรวมและอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยคือ 0.167 m^3/s คิดเป็น 26.88% ซึ่งจะพบว่าผลรวมของอากาศข้ามเครื่องทำระเหยและอากาศผ่านเครื่องทำระเหยไม่ได้ 100% ทั้งนี้เนื่องจากตอนทำการทดลองนั้นได้ทำการถอดผนังของตู้อบออกแล้วแทนที่ด้วยแผ่นโฟมจึงอาจมีการรั่วของอากาศออกจากระบบไปได้ สำหรับลักษณะการกระจายของอากาศที่ไหลในท่อ Bypass และ ผ่านเครื่องทำระเหยแสดงในภาพที่ 64





ภาพที่ 64_ ลักษณะการกระจายของอากาศที่ท่อผ่านเครื่องทำระเหยและท่ออากาศ Bypass (ตำแหน่ง Row และ Column ตามภาพที่ 23)

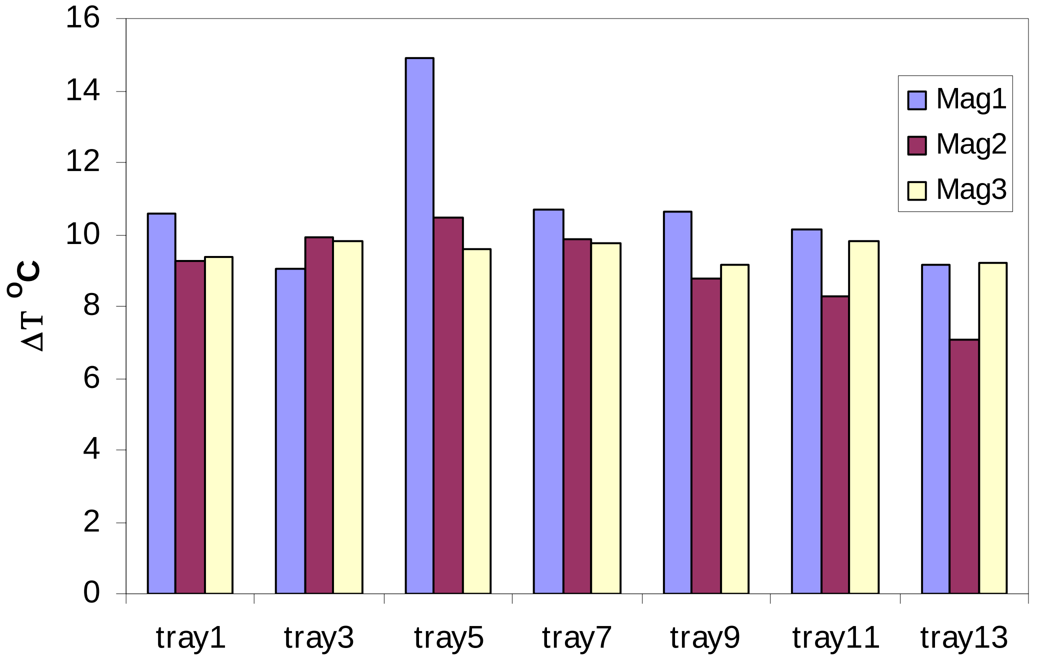
การกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ

ผลการทดลองหาการกระจายอุณหภูมิพบว่าเมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟจากเครื่องกำเนิดไมโครเวฟตัวที่ 1 อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นเฉลี่ยทุกจากทุกจุดคือ 10.73 $\pm$ 3.84 ^{o}C โดยชั้นถาดที่ 5 มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด 14.92 ^{O}C และที่ชั้นถาดที่ 3 มีค่าการเพิ่มขึ้นต่ำสุดคือ 9.05 ^{O}C

เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟจากเครื่องกำเนิดไมโครเวฟตัวที่ 2 ได้อุณหภูมิเฉลี่ยจากทุกจุดวัดอุณหภูมิคือ 9.10 $\pm$ 2.13 ^{o}C โดยชั้นถาดที่ 5 มีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงสุดคือ 10.48 ^{O}C และชั้นถาด 13 มีค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุดคือ 7.09 ^{O}C

เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟจากเครื่องกำเนิดไมโครเวฟตัวที่ 3 ได้อุณหภูมิเฉลี่ยจากทุกจุดวัดอุณหภูมิคือ 9.52 $\pm$ 1.62 ^{o}C โดยชั้นถาดที่ 11 มีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงสุดคือ 9.82 ^{o}C และชั้นถาดที่ 9 มีค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุดคือ 9.13 ^{o}C

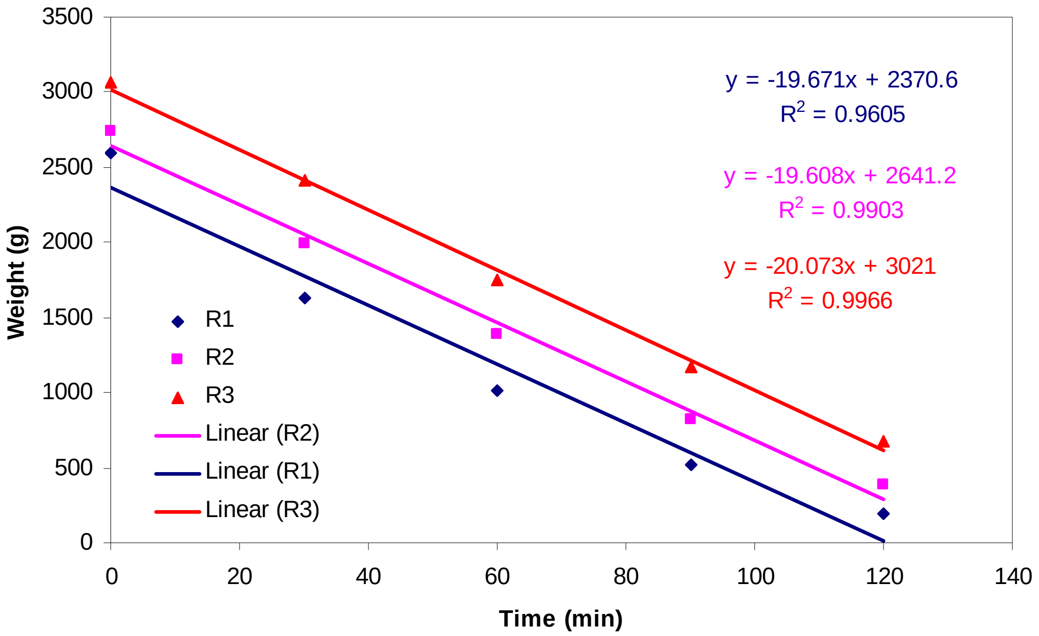
จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟแต่ละตัวในห้องอบแห้งมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอในทุกๆ จุดบนชั้นถาดและทุกชั้นถาด ที่ทำการทดลองดังแสดงในภาพที่ 65 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดความร้อนเป็นจุดบนผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้งได้เนื่องจากในการทดสอบเบื้องต้นพบว่าที่ระดับพลังงานนี้ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าไปอบแห้ง



ภาพที่ 65 ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำในชั้นถาดที่เกิดจากหัวแมกนีตรอน

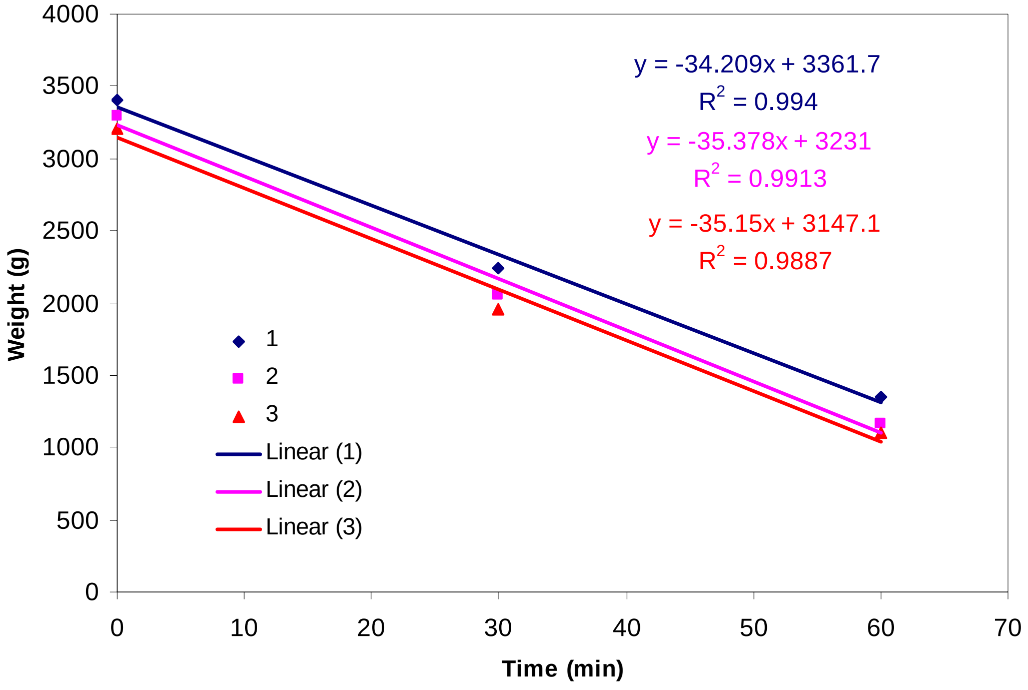
ผลการประเมินประสิทธิภาพจากการระเหยน้ำ

ผลจากการทดสอบระเหยน้ำด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C แสดงในภาพที่ 66 เนื่องจากในการทดลองทั้งสามการทดลองไม่สามารถควบคุมปริมาณน้ำหนักเริ่มต้นของน้ำได้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ได้จากการชุบด้วยผ้าแต่ละครั้งไม่เท่ากัน จึงใช้การตรวจสอบด้วยอัตราการลดลงของปริมาณน้ำจากค่าความชันของเส้นกราฟในภาพที่ 66 ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ตารางที่ 8 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองทดลองระเหยน้ำด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ซึ่งพบว่าอัตราการระเหยน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 1.176-1.198 kg/h และค่า SMER อยู่ในช่วง 0.598-0.631 kg/kWh



ภาพที่ 66 การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C

เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มพลังงานไมโครเวฟขนาด 445.52 วัตต์ โดยให้ทำงานแบบเป็นช่วงทำงาน 5 นาที พัก 5 นาที พบว่าอัตราการระเหยน้ำเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 67



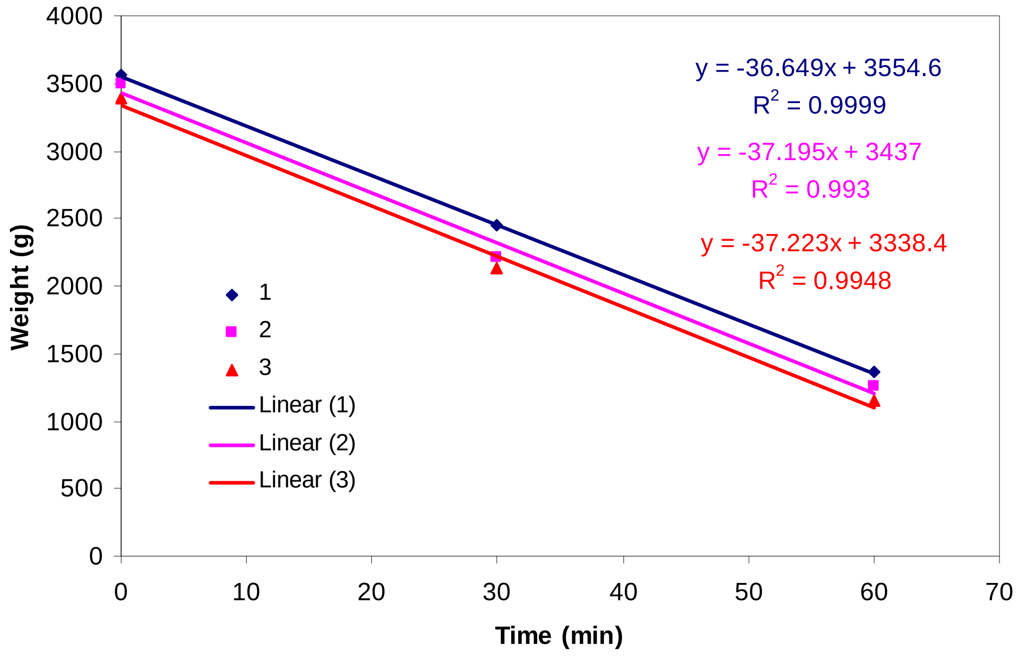
ภาพที่ 67 การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 40 ^{o}C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง

เมื่อพิจารณาภาพที่ 66 และภาพที่ 67 ร่วมกันจะพบว่าเส้นกราฟที่ได้จากการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีความชันมากกว่าโดยการอบแห้งด้วยวิธีการนี้มีอัตราการระเหยน้ำ 1.53-1.61 kg/h และค่า SMER อยู่ในช่วง 0.556-0.587 kg/kWh รายละเอียดของสภาวะการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการประเมิณสมรรถนะเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ

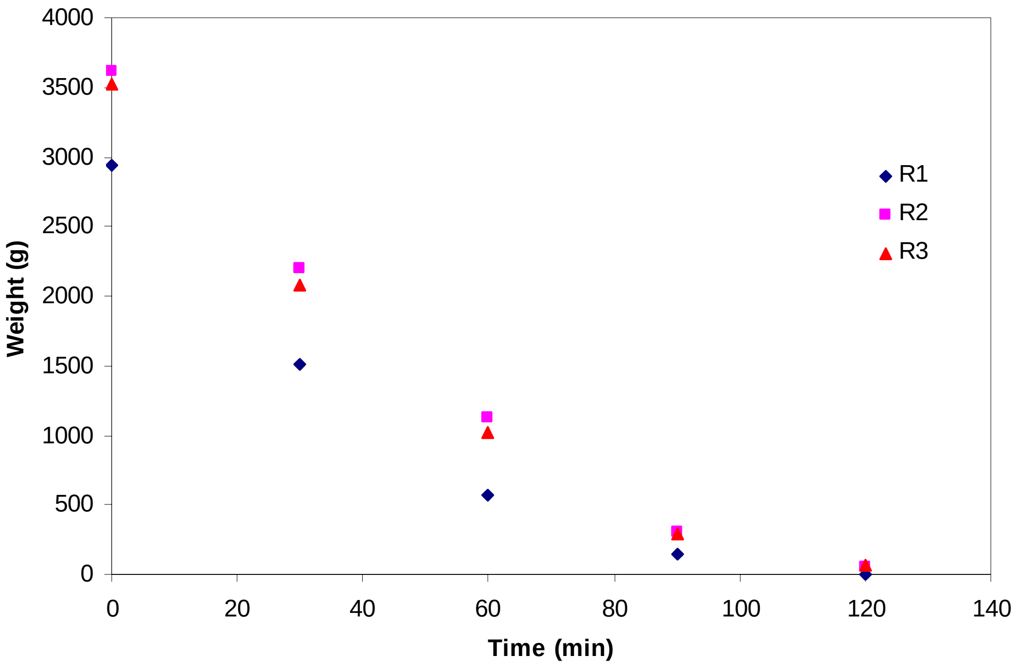
รายการ	ปั๊มความร้อน 40 ^{O}C			ปั๊มความร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
อากาศอบแห้ง						
-อุณหภูมิลมร้อน (^{O}C)	39.96	39.4	41.42	41.364	41.328	41.402
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ Bypass						
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
-อัตราส่วน Bypass (%)	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (g)	2591.24	2741	3067.8	3407.62	3288.37	3212.28
น้ำหนักน้ำสุดท้าย (g)	194.97	388.83	676.49	181.20	193.06	154.48
อัตราการระเหยน้ำ (kg/h)	1.198	1.176	1.196	1.613	1.548	1.529
MER (kg/h)	1.21	1.40	1.38	1.592	1.386	1.388
SMER (kg/kWh)	0.599	0.631	0.598	0.587	0.563	0.556
SEC (MJ/kg)	6.009	5.709	5.940	6.137	6.397	6.475

ผลการทดลองระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ดังแสดงในภาพที่ 68 ซึ่งจะพบว่าอัตราการระเหยน้ำค่อนข้างสูงโดยมีอัตราการระเหยน้ำอยู่ในช่วง 1.655-1.688 kg/h และค่า SMER อยู่ในช่วง 0.602-0.614 kg/kWh

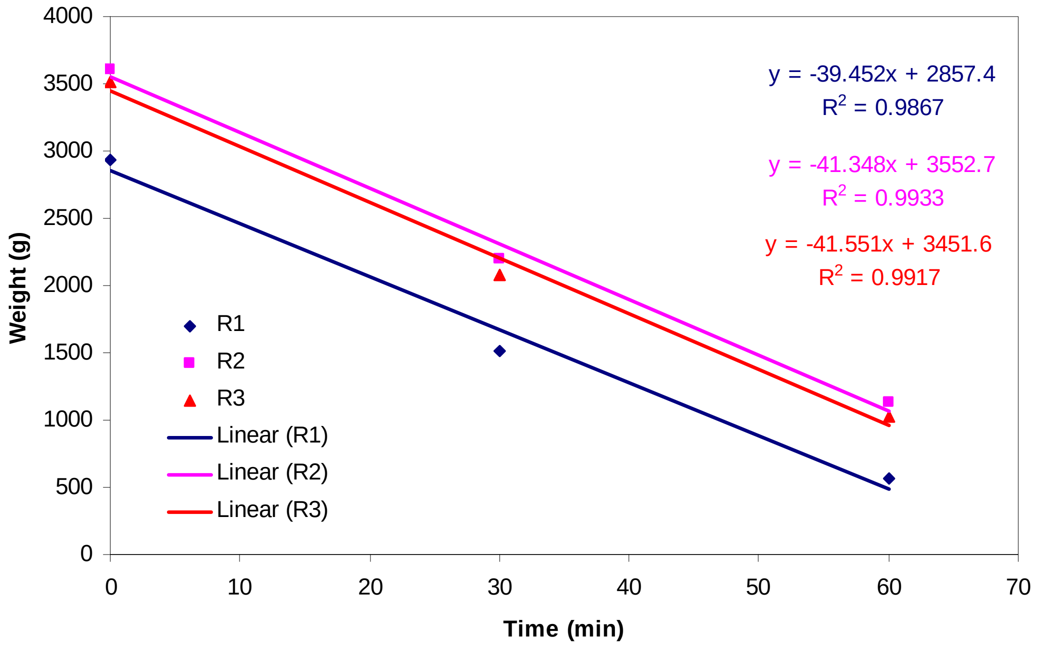


ภาพที่ 68 การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C

ผลการทดลองระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง แสดงในภาพที่ 69 ซึ่งจะพบว่าเส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งในช่วงปลายทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณน้ำอิสระที่อยู่บนผ้านั้นระเหยออกทำให้ผ้าเริ่มที่จะแห้งมาดปริมาณที่เหลืออยู่เป็นความชื้นในเส้นใยเนื้อผ้าทำให้โดยมีอัตราการระเหยน้ำอยู่ในช่วงลดลงดังนั้นจึงทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เหลืออยู่กับเวลาใหม่โดยใช้ช่วงเวลา 60 นาทีซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ดังในภาพที่ 70 ซึ่งจะได้อัตราการระเหยน้ำอยู่ในช่วง 2.312-2.493 kg/h และค่า SMER อยู่ในช่วง 0.771-0.845 kg/kWh และรายเอียดข้อมูลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 9



ภาพที่ 69 การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง

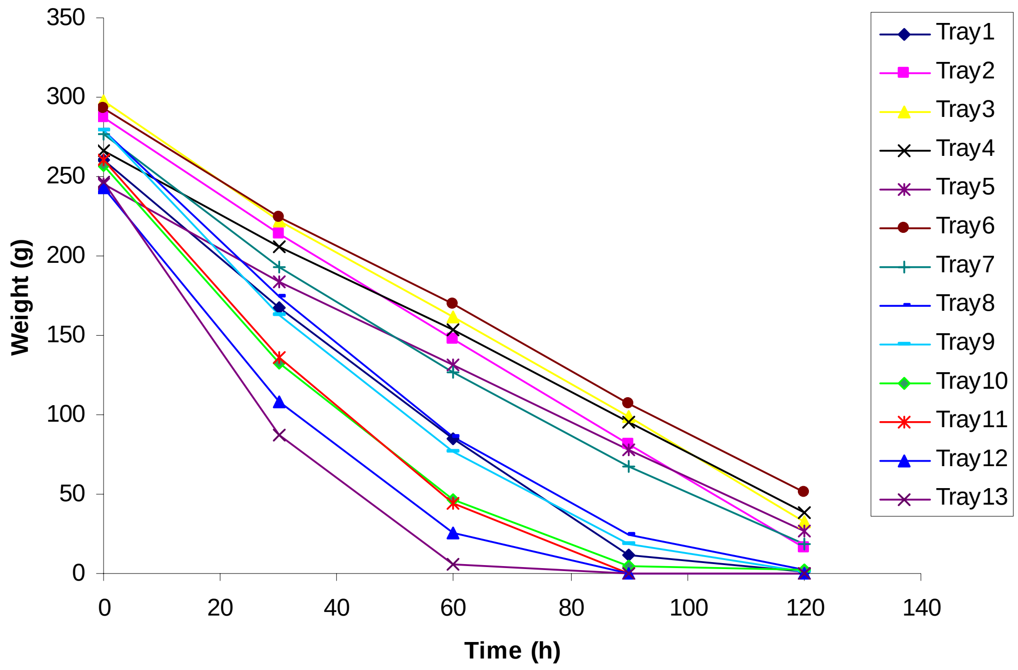


ภาพที่ 70 การลดลงของน้ำหนักน้ำเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (plot จาก 0-60 นาที)

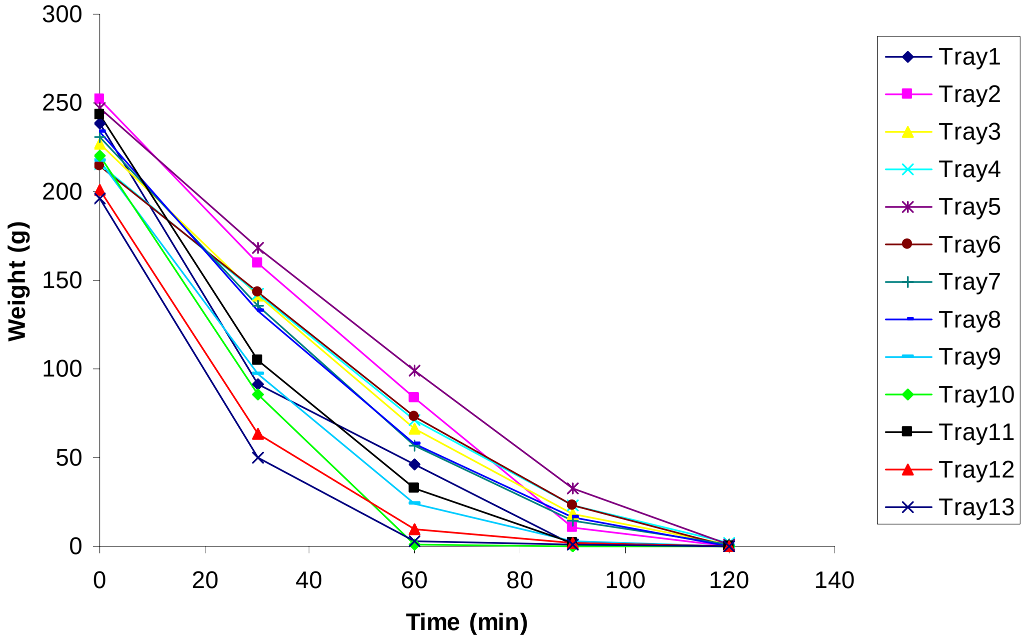
ตารางที่ 9 ผลการประเมิณสมรรถนะเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ

รายการ	ปั๊มความร้อน 50 ^{O}C			ปั๊มความร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
อากาศอบแห้ง						
-อุณหภูมิลมร้อน (^{O}C)	49.02	49.63	49.57	49.34	49.27	48.86
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ Bypass						
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
-อัตราส่วน Bypass (%)	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (g)	3559.39	3490.95	3384.91	2936.64	3611.26	3517.5
น้ำหนักน้ำสุดท้าย (g)	183.07	181.61	145.61	5.34	56.93	67.75
อัตราการระเหยน้ำ (kg/h)	1.658	1.655	1.688	2.312	2.480	2.493
MER (kg/h)	1.052	1.052	0.906	1.002	1.072	1.102
SMER (kg/kWh)	0.614	0.602	0.614	0.771	0.800	0.845
SEC (MJ/kg)	5.862	5.983	5.866	4.671	4.498	4.260

เมื่อพิจารณาความสามารถในการระเหยน้ำในแต่ละชั้นถาดพบว่ามีความสอดคล้องกับค่าการกระจายความเร็วลมตามที่แสดงในภาพที่ 63 นั่นคือที่บริเวณส่วนด้านล่างตั้งแต่ถาดชั้นที่ 7 -13 ของเครื่องอบแห้งจะมีอัตราการระเหยน้ำสูงกว่าที่บริเวณด้านบนอยู่ในช่วงชั้นถาด 1-2 และบริเวณตรงกลางช่วงชั้นถาด 3-6 จะมีอัตราการระเหยน้ำต่ำที่สุด โดยลักษณะการลดลงของปริมาณน้ำในแต่ละชั้นถาดเมื่อทำการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C แสดงในภาพที่ 71 เมื่อทำการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟทำให้มีอัตราการอบแห้งที่เร็วขึ้น โดยทุกชั้นถาดมีอัตราการระเหยที่ค่อนข้างสม่ำเสมอแต่ที่บริเวณชั้นถาดที่ 1 และ ช่วงถาดที่ 10-13 ก็ยังคงมีอัตราการระเหยน้ำที่สูงกว่าบริเวณอื่นอยู่ (ภาพที่ 72) ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงโดยการหาครีบพลาสติกมาติดที่บริเวณทางเข้าเพื่อบังคับให้การกระจายความเร็วลมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น



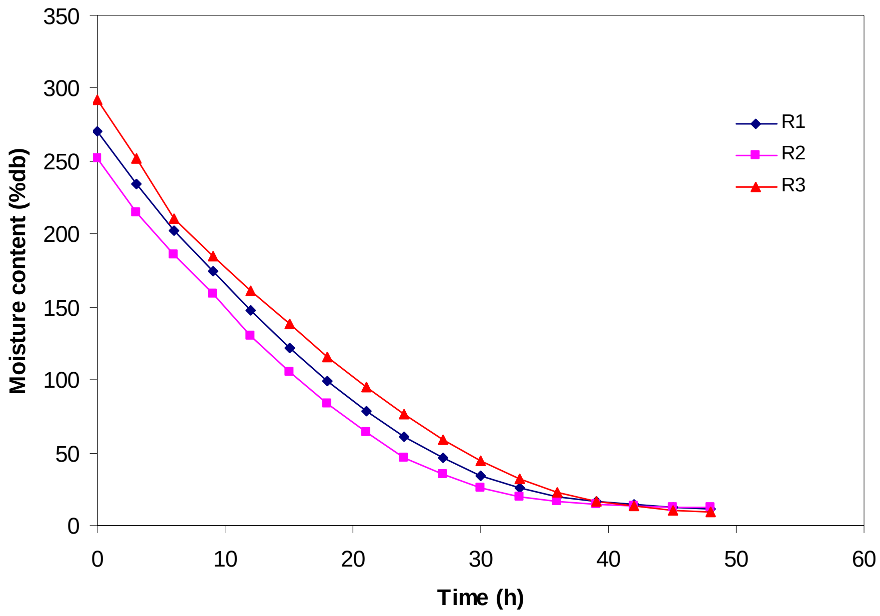
ภาพที่ 71 การลดลงของน้ำหนักน้ำในแต่ละชั้นถาดเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 ^{o}C



ภาพที่ 72 การลดลงของน้ำหนักน้ำในแต่ละชั้นถาดเมื่อระเหยด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง

ผลการอบแห้งพริก

สำหรับผลการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนพบว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 48 ชั่วโมง สามารถลดความชื้นของพริกที่มีความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 251.88-291.92 %db (71.58-74.48 %wb) ลดลงเหลือ 9.22-12.20 %db (8.44-10.88 %wb) โดยมีอัตราการการอบแห้ง 4.93-5.89 %db/h ภาพที่ 73 แสดงพฤติกรรมการอบแห้งพริกด้วยระปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C และภาพที่ 74 แสดงลักษณะของพริกที่ได้หลักจากการอบแห้ง เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานตลอดการอบแห้งในรูปแบบของปริมาณน้ำระเหยต่อพลังงานที่ใช้ (SMER) อยู่ในช่วง 0.101-0.112 kg/kWh หรือคิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ต่อกิโลกรัมน้ำระเหย (SEC) 32.21-35.78 MJ/kg โดยรายละเอียดของการทดลองอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C แสดงในตารางที่ 10

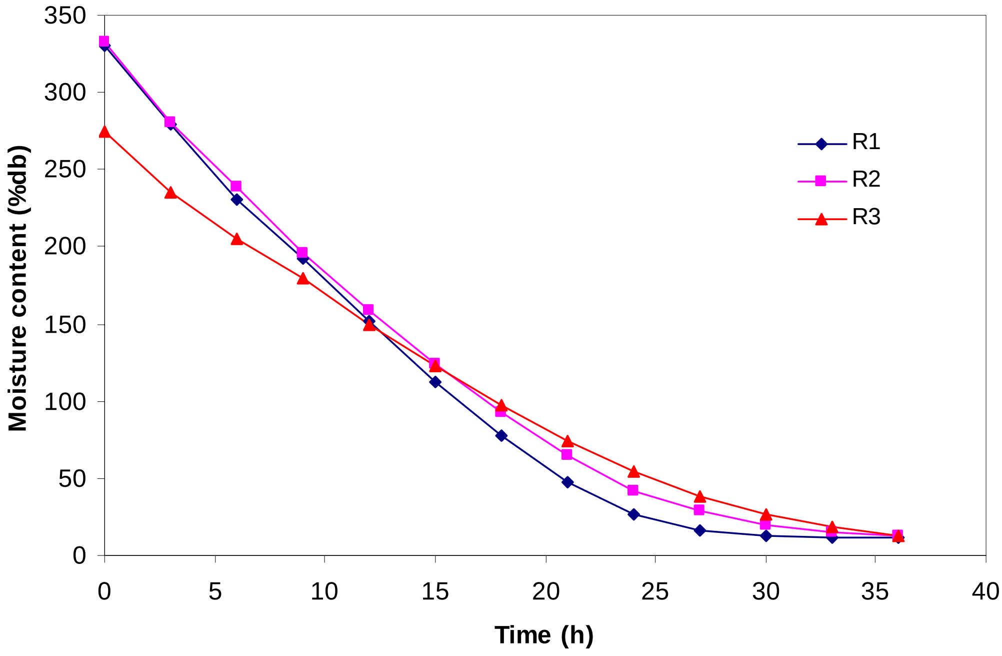


ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C

ภาพที่ 74 ลักษณะของพริกแห้งที่ได้หลังการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนอุณหภูมิ 50 ^{o}C

สำหรับการอบแห้งพริกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงโดยใช้ระดับพลังงานไมโครเวฟ 445.52 วัตต์ สามารถลดความชื้นพริกจาก 274.79-329.90 %db 73.32-76.74 %wb) ลดลงเหลือ 11.46-13.20 % db (10.28-11.66%wb) โดยใช้เวลา 36 ชั่วโมง โดยมีอัตราการอบแห้ง 7.266-8.245 %db/h ภาพที่ 75 แสดงพฤติกรรมการอบแห้งของพริกด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง และภาพที่ 76 แสดงลักษณะของพริกที่ได้หลังจากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟซึ่งจะพบว่าลักษณะของพริกที่ได้หลังจากการอบแห้งมีลักษณะผิวที่เรียบว่าพริกที่ได้จากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียวทั้งนี้เนื่องจากความดันไอภายในเม็ดพริก ช่วยขับความชื้นออกมาสู่ผิวพริกได้เร็วขึ้นจึงเกิดปรากฏการณ์หดตัวที่ผิวของพริกน้อยกว่า

สำหรับประสิทธิภาพการใช้พลังงานตลอดการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงมีค่า SMER อยู่ในช่วง 0.139-0.148 kg/kWh หรือคิดเป็นค่า SEC อยู่ในช่วง 24.30-29.98 MJ/kg รายละเอียดของข้อมูลการทดลองอยู่ในตารางที่ 10



ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C

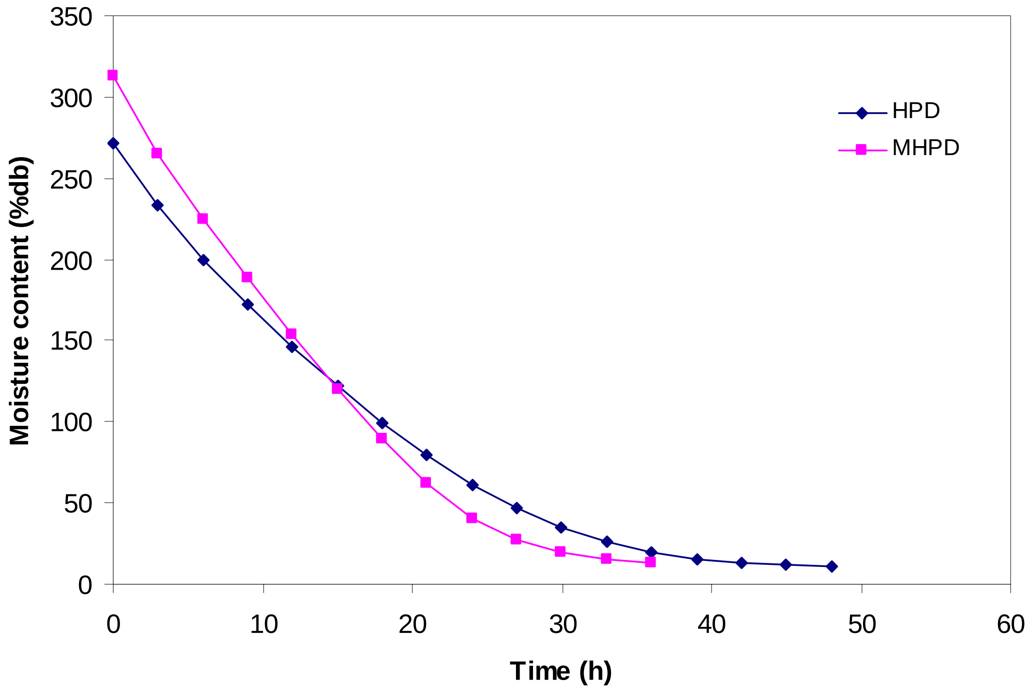
ภาพที่ 76 ลักษณะของพริกแห้งหลังอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง

ตารางที่ 10 รายละเอียดการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ

รายการ	ปั๊มความร้อน 50 ^{O}C			ปั๊มความร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
อากาศอบแห้ง						
-อุณหภูมิลมร้อน (^{O}C)	49.44	49.54	48.76	49.46	49.80	49.29
-อุณหภูมิหลังอบแห้ง(^{O}C)	47.17	47.13	46.35	47.25	47.82	47.02
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ Bypass						
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
-อัตราส่วน Bypass (%)	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (kg)	20	20	20	20	20	20
ความชื้นเริ่มต้น(%wb)	73.01	71.58	74.48	76.74	76.90	73.32
น้ำหนักน้ำสุดท้าย (kg)	5.97	6.38	5.57	5.18	5.19	6.04
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	11.84	12.20	8.44	10.28	11.47	11.67
อัตราการอบแห้ง						
-อัตราน้ำระเหย (kg/h)	0.292	0.283	0.301	0.412	0.411	0.388
-อัตราลดลงของความชื้น (%db/h)	5.388	4.993	5.890	8.845	8.220	7.266
MER (kg/h)	0.186	0.221	0.245	0.107	0.113	0.220
SMER (kg/kWh)	0.102	0.101	0.112	0.148	0.142	0.139
SEC (MJ/kg)	35.37	35.78	32.22	24.30	25.40	29.98

หมายเหตุ ค่าที่ได้เป็นการคำนวณจากค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง

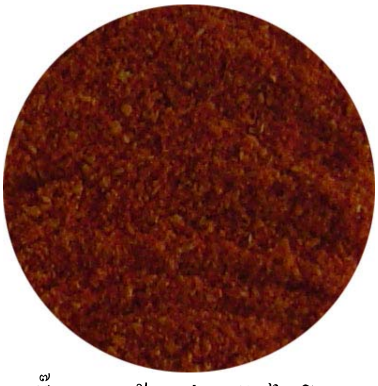
ภาพที่ 77 แสดงการเปรียบเทียบการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C กับการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง จากการเปรียบเทียบพบว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกให้มีความชื้นลดลงน้อยกว่า 13 %db เมื่อเสริมพลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงจะทำให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 25% และลดค่าอัตราการใช้พลังงานจำเพาะลงได้ 22.91% ดังนั้นการเสริมพลังงานไมโครเวฟเข้าไปในระบบปั๊มความร้อนนอกจากจะช่วยในการประหยัดเวลาแล้วยังช่วยในการประหยัดพลังงานอีกด้วย



ภาพที่ 77 เปรียบเทียบการอบแห้งพริกด้วยระบบปั๊มความร้อนกับระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง

พริกแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงได้นำไปตรวจสอบคุณภาพของพริกทางด้านสี โดยภาพที่ 78 แสดงลักษณะของผงพริกที่ได้จากการปั่นซึ่งจากการสังเกตด้วยตาปล่าจะพบว่าสีของผงพริกที่ได้ ไม่แตกต่างกันแต่เมื่อทำการตรวจสีพริกแห้งในเทอมของค่า L*, a* และ b* แล้วแสดงในตารางที่ 11 ซึ่งจะพบว่าค่า ความสว่าง (L*) นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันส่วนค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟเพิ่มเข้าไป

(ก) ปั๊มความร้อน



(ข) ปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ภาพที่ 78 ลักษณะของผงพริกที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ตารางที่ 11 ผลการตรวจสีของพริกที่ได้จากการทดลอง

Methods	Color parameters[1)]		
	L*	a*	b*
[2)]HPD50R1	51.977[a]	20.077[a]	47.530[a]
HPD50R2	52.220[ab]	20.110[a]	47.662[a]
HPD50R3	52.547[b]	20.277[a]	47.710[a]
[3)]MHPD50R1	52.135[ab]	21.512[b]	49.952[b]
MHPD50R2	51.985[b]	21.567[b]	50.017[b]
MHPD50R3	52.065[b]	21.737[b]	50.207[b]

หมายเหตุ [1)]ค่าที่เหมือนกันในคลอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

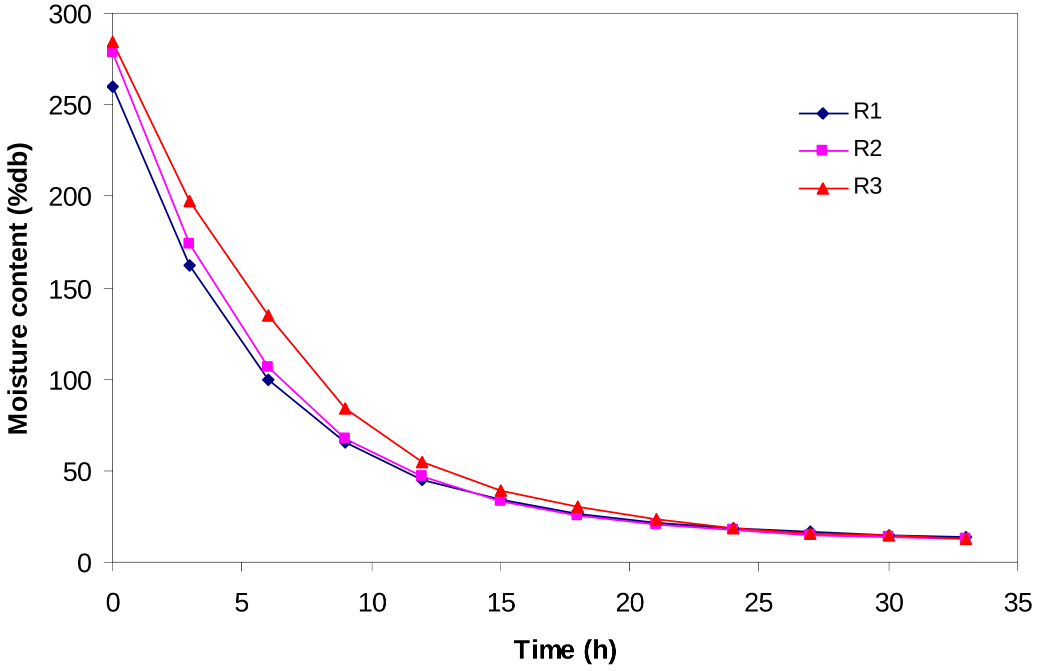
[2)] การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน (Heat Pump Drying, HPD)

[3)]การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ(Microwave assisted Heat Pump drying, MHPD)

ผลการอบแห้งไพล

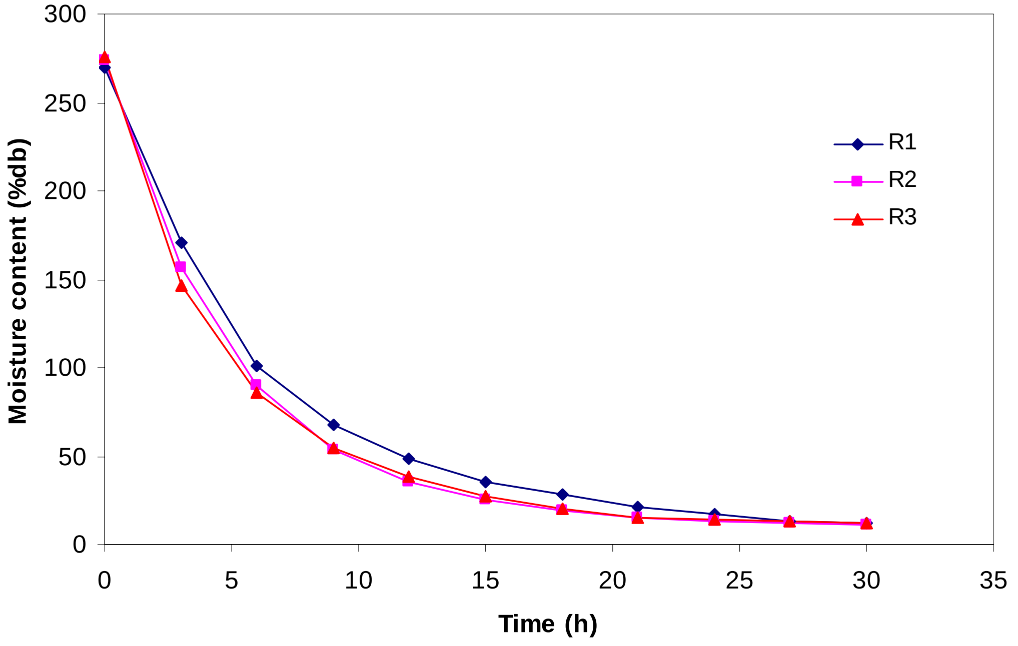
ผลการอบแห้งไพลด้วยระบบปั๊มความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 40 ^{o}C พบว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 33 ชั่วโมง ในการลดความชื้นไพลจากความชื้นเริ่มต้น 260.24-284.63 %db ลดลงเหลือ 12.93-13.55 %db โดยมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดช่วงของการอบแห้ง 7.46-8.23%db/h ภาพที่ 79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งจะพบว่าการอบแห้งอยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลงทั้งหมด

สำหรับประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานตลอดการอบแห้งเมื่อคิดรูปแบบของปริมาณน้ำระเหยต่อพลังงานที่ใช้ (SMER) อยู่ในช่วง 0.185-0.198 kg/kWh หรือคิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ต่อกิโลกรัมน้ำระเหย (SEC) 18.17-19.45 MJ/kg โดยรายละเอียดของการทดลองแสดงในตารางที่ 12



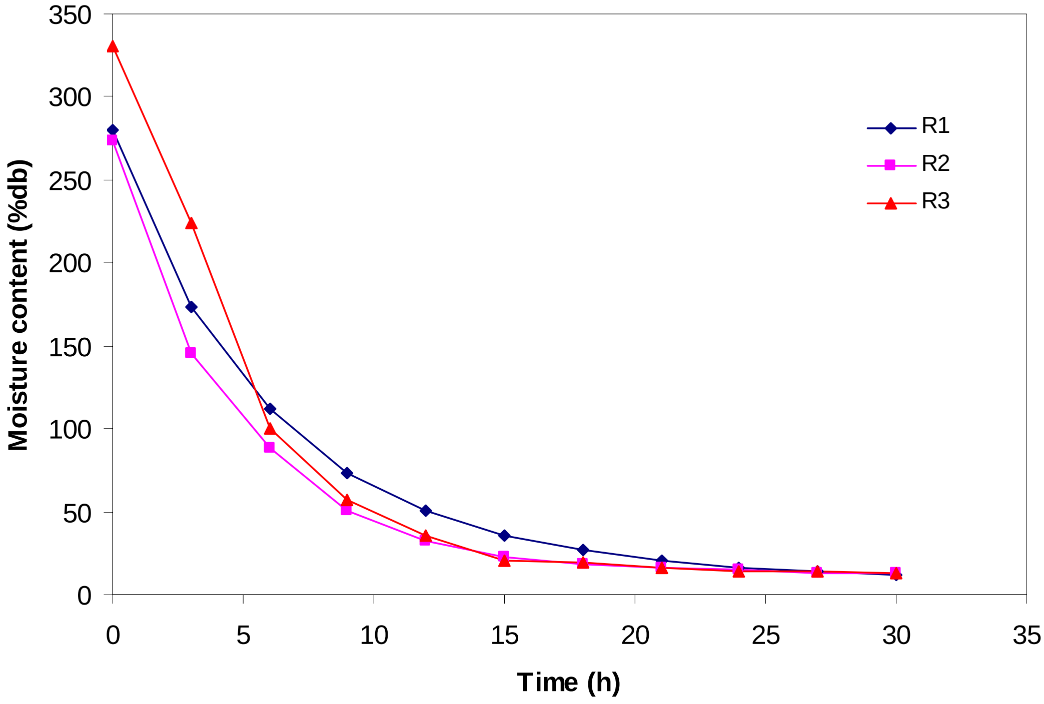
ภาพที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 ^{o}C

เมื่อทำการเสริมพลังงานไมโครเวฟขนาด 445.52 วัตต์เข้าไปพบว่าใช้เวลา 30 ชั่วโมงในการลดความชื้นของไพลจากความชื้นเริ่มต้น 269.91-276.15 %db) ให้ลดลงเหลือ 10.97-11.97 %db โดยมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดช่วงการอบแห้ง 8.60-8.81 %db/h โดยมีพฤติกรรมการอบแห้งแสดงในภาพที่ 80 สำหรับประสิทธิภาพในการอบแห้งพบว่ามีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ อยู่ในช่วง 0.177-0.181 kg/kWh คิดเป็นค่าพลังงานจำเพาะคือ 19.92-20.28 MJ/kg



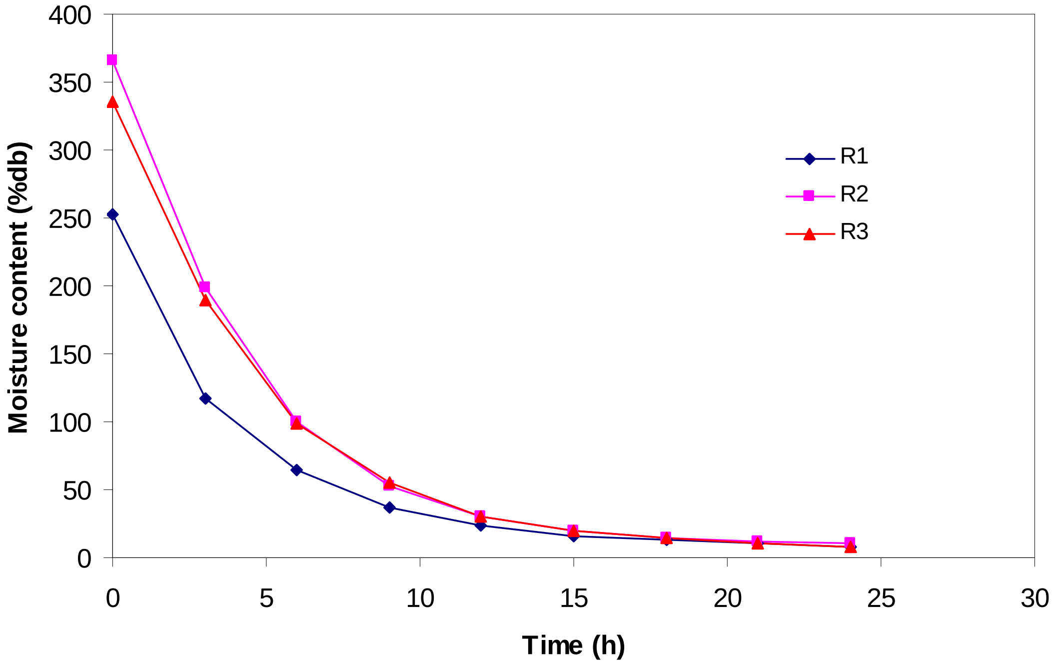
ภาพที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา ของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 40 ^{o}C

สำหรับการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 50 ^{o}C พบว่าใช้เวลาในการลดความชื้นไพลให้มีความชื้น 280.40-331.03 %db ลดลงเหลือ 11.95-12.97 %db 30 ชั่วโมง โดยมีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 8.68-10.60 %db/h โดยมีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 81 ในด้านประสิทธิภาพการอบแห้งพบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C มีค่า SMER อยู่ในช่วง 0.179-0.193 kg/kWh หรือคิดเป็นค่า SEC อยู่ในช่วง 18.61-20.07 MJ/kg



ภาพที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C

เมื่อทำการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟขนาด 445.52 วัตต์ให้กับการอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C พบว่าใช้เวลาในการลดความชื้นให้ต่ำกว่า 14 %db ลดลงเหลือ 24 ชั่วโมง ซึ่งผลจากการทดลองสามารถลดความชื้นไพลจาก 252.17-366.24%db ลดลงเหลือ 8.40-10.32 %db โดยมีอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง 10.52-14.83 %db/h ซึ่งพฤติกรรมการอบแห้งแสดงในภาพที่ 82 ในด้านประสิทธิภาพการอบแห้งพบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโคเวฟแบบเป็นช่วงที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่า SMER อยู่ในช่วง 0.207-0.233 kg/kWh หรือคิดเป็น SEC คือ 15.47-17.42 MJ/kg โดยรายละเอียดแสดงในตารางที่ 13



ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 50 °C

ตารางที่ 12 รายละเอียดการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ

รายการ	ปั๊มความร้อน 40 ^{O}C			ปั๊มความร้อน 40 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
อากาศอบแห้ง						
-อุณหภูมิลมร้อน (^{O}C)	41.35	41.87	41.27	41.54	41.89	41.68
-อุณหภูมิหลังอบแห้ง(^{O}C)	39.14	39.86	39.15	39.41	40.38	40.26
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ Bypass						
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
-อัตราส่วน Bypass (%)	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (kg)	20	20	20	20	20	20
ความชื้นเริ่มต้น(%db)	260.24	278.77	284.63	269.91	273.64	276.15
น้ำหนักน้ำสุดท้าย (kg)	6.30	5.96	5.87	6.05	5.94	5.95
ความชื้นสุดท้าย (%db)	13.55	12.94	12.93	11.91	10.97	11.97
อัตราการอบแห้ง						
-อัตราน้ำระเหย (kg/h)	0.415	0.425	0.428	0.465	0.469	0.468
-อัตราลดลงของความชื้น (%db/h)	7.46	8.05	8.23	8.60	8.76	8.81
MER (kg/h)	0.755	0.956	0.917	0.678	0.906	0.930
SMER (kg/kWh)	0.185	0.189	0.198	0.181	0.177	0.177
SEC (MJ/kg)	19.45	19.05	18.17	19.92	20.28	19.99

หมายเหตุ ค่าที่ได้เป็นการคำนวณจากค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง

ตารางที่ 13 รายละเอียดการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ

รายการ	ปั๊มความร้อน 50 ^{O}C			ปั๊มความร้อน 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟ		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
อากาศอบแห้ง						
-อุณหภูมิลมร้อน (^{O}C)	49.48	49.48	49.66	49.55	49.80	49.58
-อุณหภูมิหลังอบแห้ง(^{O}C)	46.88	46.69	47.00	47.03	47.24	47.22
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ Bypass						
-อัตราการไหล (m^3/s)	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
-อัตราส่วน Bypass (%)	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95	66.95
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (kg)	20	20	20	20	20	20
ความชื้นเริ่มต้น(%db)	280.40	273.01	331.03	252.17	366.24	334.92
น้ำหนักน้ำสุดท้าย (kg)	5.89	6.04	5.24	6.16	4.73	4.99
ความชื้นสุดท้าย (%db)	11.98	12.75	12.97	8.40	10.32	8.52
อัตราการอบแห้ง						
-อัตราน้ำระเหย (kg/h)	0.471	0.465	0.492	0.577	0.636	0.625
-อัตราลดลงของความชื้น (%db/h)	8.95	8.68	10.60	10.52	14.83	13.60
MER (kg/h)	0.145	0.144	0.117	0.178	0.368	0.198
SMER (kg/kWh)	0.193	0.179	0.187	0.207	0.233	0.221
SEC (MJ/kg)	18.61	20.07	19.27	17.42	15.47	16.31

หมายเหตุ ค่าที่ได้เป็นการคำนวณจากค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการอบแห้งไพลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งไพลโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าการอบแห้งไพลด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ^{O}C ร่วมกับไมโครเวฟมีความเหมาะสมกับเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุดนั้นคือจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งมากกว่าวิธีการอื่นๆ ซึ่งดูได้จากการเปรียบเทียบค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 14 ซึ่งจะเห็นว่าการเสริมพลังงานไมโครเวฟที่ระดับอุณหภูมิ 50 ^{O}C จะช่วยทั้งการเพิ่มอัตราการอบแห้งทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน แต่การเพิ่มพลังงานไมโครเวฟในระดับที่เท่ากันนี้ให้กับระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นนั้นมีสัดส่วนที่น้อยกว่าค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการอบแห้งไพลมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพโดยการระเหยน้ำ

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบค่าอัตราการอบแห้ง (DR) ในเทอมความสามารถในการระเหยน้ำและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เฉลี่ยของไพลตลอดการทดลอง

Methods	Performance of drying	
	DR (kg/h)[1)]	SEC (MJ/kg)[1)]
HPD40	0.4234[a]	18.8689[a]
MHPD40	0.4582[ab]	19.4156[a]
HPD50	0.4739[b]	20.4304[a]
MHPD50	0.6128[c]	16.4004[b]

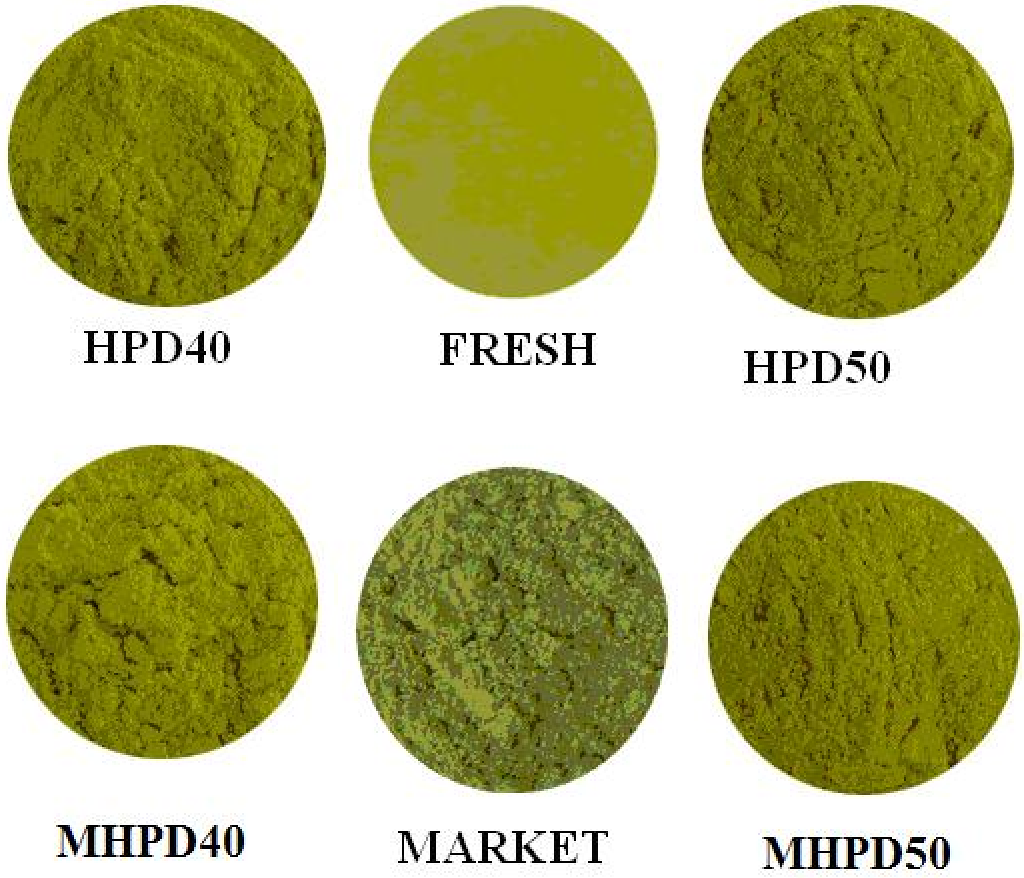
หมายเหตุ [1)]อักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

ภาพที่ 83 แสดงลักษณะของผงไพลแห้งที่ได้จากการอบแห้งทั้ง 4 วิธี และผงไพลที่วางขายในท้องตลาด ผงไพลที่ได้จากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนและปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีลักษณะสีเหลืองสดใสไม่แตกต่างกันในด้านคุณภาพของสีเมื่อมองด้วยตาเปล่าแต่จะเห็นได้ชัดเจนว่าสีของไพลที่ได้จากท้องตลาดมีลักษณะของสีเหลืองซีด เมื่อทำการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีจะได้ค่าสีของแต่ละวิธีการทดลองดังแสดงในตารางที่ 15 ซึ่งจะพบว่าค่าความแตกต่างระหว่างไพลสดและไพลที่ได้จากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนและปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟไม่แตกต่างกัน (P>0.05) แต่จะแตกต่างกับไพลที่ได้จากท้องตลาด

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์สีของไพลจากการอบแห้ง

Methods	Parameter			
	L*	a*	b*	ΔE[1)]
Fresh	66.97	10.49	75.89	-
Market	74.7200	-2.7433	48.7300	31.1877[a]
HPD40	81.2200	-2.9400	72.2178	19.2872[b]
HPD50	81.6733	-3.5789	79.8567	20.7874[b]
MHPD40	81.7467	-2.8089	79.3011	20.2266[b]
MHPD50	80.4567	-2.1756	83.1544	19.9455[b]

หมายเหตุ [1)]อักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)



ภาพที่ 83 สีของผงไพลที่ได้จากการอบแห้ง ไพลสด และไพลจากตลาด

สำหรับค่าองค์ประกอบทางเคมีของไพลสดและไพลแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนและปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแสดงในตารางที่ 16 ซึ่งจะพบว่าการอบแห้งด้วย HPD และ MHPD ไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีภายในน้ำมันไพลที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของไพลสดจากแหล่งเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตราฐานขององค์ประกอบสารเคมีในน้ำมันไพลของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.) และค่าที่กำหนดไว้ของสภาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พบว่า ค่าองค์ประกอบทางเคมีของไพลทุกการทดลองอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานยกเว้นค่า α-terpine ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงทั้งสองมาตรฐานส่วนค่า DMPBD สูงกว่ามาตรฐานทั้งค่าที่ได้จากไพลสดและไพลผ่านการอบแห้งทุกวิธีการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากแหล่งการผลิต

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไพล

Compound	Percent of compound in essential oil						
	ผลจากการตรวจ					ค่าอ้างอิง	
	Fresh	HPD40	HPD50	HPMD40	HPMD50	TIS[2)]	TISTR[3)]
α-pinene	0.94	1.13	1.01	0.93	1.06	1-3	0.90-4.14
sabinene	31.56	45.15	40.22	37.78	38.11	31-48	25.70-40.31
α-terpine	2.39	2.26	2.02	2.08	2.88	3-8	6.25-16.50
γ-terpine	4.44	4.14	3.66	3.92	5.07	6-10	2.00-12.66
Terpinen-4-ol	23.57	18.31	15.14	16.96	33.28	19-36	25.40-41.50
DMPBD[1)]	23.71	17.01	24.52	25.22	8.55	-	0.5-5.88
Essential oil (%yield)	0.88	1.50	2.17	2.16	1.47	-	-

หมายเหตุ [1)](E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl) butadiene

[2)]สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2541)

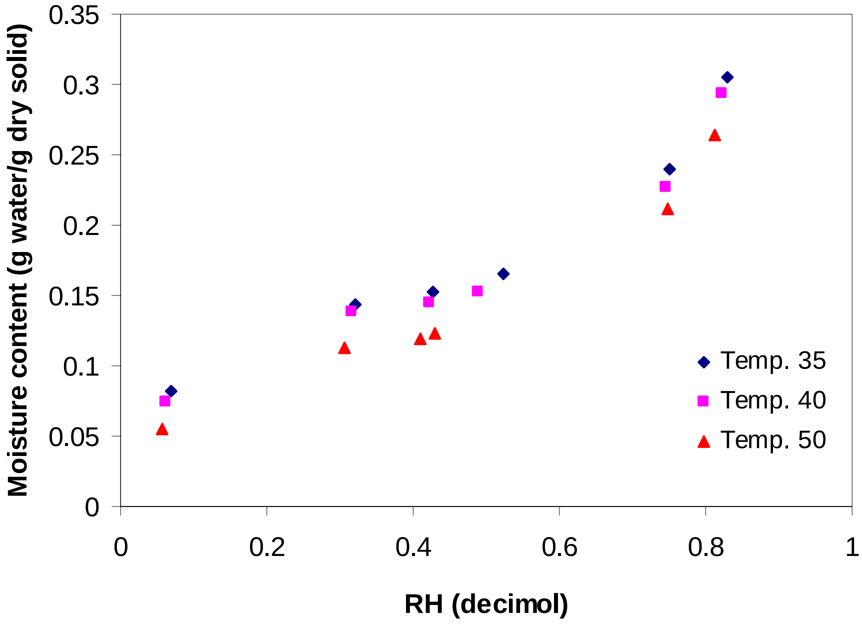
[3)]Thailand Institute of Scientific and Technology Research

<u>สมการความชื้นสมดุลของไพล</u>

ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของไพลที่อุณหภูมิ 35, 40, และ 50 ^{O}C แสดงในตารางที่ 17 เมื่อนำมา plot หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแสดงในภาพที่ 84 ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นรูปตัว S เช่นเดียวกับวัสดุเกษตรอื่นๆ เช่น มันฝรั่ง (Chen, 2002) ถั่วเหลือง (Aviara et al., 2004) และพริก (Kaleemulah and Kilappan, 2004) เป็นต้น เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของไพลพบว่าที่ระดับความชื้นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความชื้นสมดุลของไพลจะมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศนั้นพบว่าค่าความชื้นสมดุลของไพลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 17 ค่าความชื้นสมดุลของไพลที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

Temperature(^{O}C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%rh)	ความชื้นสมดุล (%db)
35	6.82	8.26
35	31.99	14.37
35	42.74	15.31
35	52.40	16.49
35	74.95	23.96
35	82.97	30.54
40	6.26	7.39
40	31.59	13.88
40	42.30	14.52
40	49.00	15.30
40	74.50	22.74
40	82.32	29.34
50	5.72	5.55
50	30.54	11.29
50	40.91	11.98
50	43.00	12.34
50	74.90	21.21
50	81.20	26.36



ภาพที่ 84 ความชื้นสมดุลของไพลจากการทดลอง

เมื่อทำการวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมกับค่าความชื้นสมดุลของไพลโดยวิธีการ non linear regression ด้วยโปรแกรม SPSS สำหรับ window เวอร์ชั่น 11.5 ได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการดังแสดงในตารางที่ 18 ซึ่งจะพบว่ารูปแบบสมการ Modified Halsay และ Modified GAB นั่นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 และมีค่า standard error of estimate ต่ำกว่าอีก 3 แบบจำลอง แต่เนื่องจาก แบบจำลอง Modified Halsay มีรูปแบบสมการเป็นฟังก์ชั่น exponential ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการหาความสัมพัทธ์ของค่าพารามิเตอร์กับอุณหภูมิก็จะส่งกระทบต่อผลลัพธ์อย่างมากในที่นี้ แบบจำลอง Modified GAB จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการการทำนายค่าความชื้นสมดุของไพลมากที่สุด เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ A, B และ C กับค่าอุณหภูมิจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = 0.1304T - 14.956 \quad \text{เมื่อ} \quad 35 \leq T \leq 50 \ ^{o}C, R^2 = 0.9709 \qquad (44)$$

$$B = 1.251T + 92.422 \quad \text{เมื่อ} \quad 35 \leq T \leq 50 \ ^{o}C, R^2 = 0.977 \qquad (45)$$

$$C = 1.266T + 268.69 \quad \text{เมื่อ} \quad 35 \leq T \leq 50 \ ^{o}C, R^2 = 0.9999 \qquad (46)$$

ตารางที่ 18 ค่าประมาณของค่าคงที่ในสมการความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่าง

Parameters		Estimated value				
		Modified Henderson	Modified Chung-Pfost	Modified Halsey	Modified Oswin	Modified GAB
35 ^{O}C	A	-0.000046074	520.012	-223877.593	4.9997	-10.2615928
	B	-345.495487	-226.998	726.54	0.0399	-49.74557728
	C	2.073744966	0.1244	2.1875	3.001	313.0783108
	Std.err	1.871	1.544	0.771	1.125	0.879
	R^2	0.9467	0.9602	0.9903	0.9802	0.9876
40 ^{O}C	A	-0.000081131	1359.870207	612917.8464	5.002087631	-9.935485204
	B	-338.8844583	-91.84832132	-1957.248405	0.03713975	-40.71681023
	C	2.034484323	0.12677402	2.126078708	2.933650605	319.2679779
	Std.err	1.778	1.517	0.907	1.123	0.959
	R^2	0.9494	0.9598	0.9859	0.9793	0.9845
50 ^{O}C	A	-0.000080027	790.8690247	185606.6612	4.998871734	-8.370723409
	B	-394.109991	-162.1161028	-574.3528836	0.029220769	-30.42534599
	C	1.769074878	0.128709567	1.870256327	2.575543926	332.0481373
	Std.err	1.374	1.354	0.678	0.808	0.615
	R^2	0.9691	0.9671	0.9918	0.9889	0.9934

สมการการอบแห้งไพล

สมการการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อน

สมการการอบแห้งไพลจะทำการพัฒนามาจากสมการการอบแห้งแบบชั้นบางของ Page (Page's model) ซึ่งมีรูปแบบสมการทั่วไปดังนี้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \exp\left(-kt^n\right) \quad (47)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (เศษส่วน)

M คือ ความชื้นวัสดุ (%db)

k,n คือ ค่าคงที่

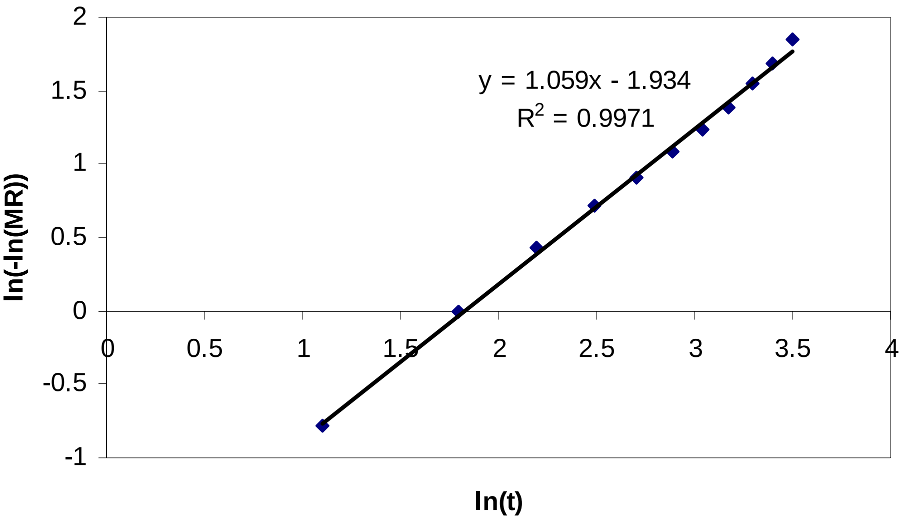
ตัวห้อย i คือ ค่าเริ่มต้น

eq คือ ค่าที่สภาวะสมดุล

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำให้ได้ค่าสมการการอบแห้งไพลแบบชั้นบางตามรูปแบบสมการของPage สำหรับการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนโดยวิธีทางกราฟฟิค (Bala, 1997) โดยจัดรูปสมการ (47) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\ln\left[-\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right)\right] = \ln(k) + n\ln(t) \quad (48)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (48) ในรูป $y = mx + c$ จะได้ $y = \ln\left[-\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right)\right]$, $x = \ln(t)$, $m = n$ และ $c = \ln(k)$ จากนั้นทำการ plot ค่า $\ln\left[-\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right)\right]$ และค่า $\ln(t)$ จากนั้นทำการหาค่า n และ k จากค่า slope และ intercept ของเส้นกราฟดังภาพที่ 85 ซึ่งเป็นตัวอย่างในการหาค่า n และ k ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40 °C ซึ่งจะได้ค่า 1.059 และ 0.144569 ตามลำดับ



ภาพที่ 85 ตัวอย่างการหาค่า k และ n ในสมการของ Page ด้วยวิธีกราฟฟิคของการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C

จากสมการ (47) สามารถจัดรูปเพื่อใช้ในการหาค่าความชื้นของไพลขณะทำการอบแห้งได้ดังสมการ (49) และทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า n และ k ในช่วง $40 \le T \le 50\ ^{o}C$ ได้ดังสมการที่ (51) และ (52) ตามลำดับ

$$M = M_{eq} + (M_0 - M_{eq})\exp\left(-kt^{n}\right) \qquad (49)$$

โดยที่

$$M_{eq} = \frac{AB\left(\frac{C}{T+273.16}\right)rh}{\left(1-B(rh)\right)\left(1-B(rh)+\left(\frac{C}{T+273.16}\right)B(rh)\right)} \qquad (50)$$

$$n = -0.006T + 1.299 \qquad (51)$$

$$k = 0.0032T + 0.017 \qquad (52)$$

ค่าคงที่ A, B และ C ในสมการ (50) หามาจากสมการ (44) ถึง (46) ตามลำดับ

สมการการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

สำหรับสมการการอบแห้งแบบชั้นบางของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง ได้ตั้งสมติฐานว่าการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟสามารถทำการอบแห้งได้จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายมีค่าเป็น 0 จะทำให้สมการ (49) ลดรูปเป็นสมการ (53) และใช้วิธีทางกราฟฟิคเช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว ในการหาค่า n และ k เมื่อได้ค่า n และ k ที่แต่ละอุณหภูมิจึงมาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสองกับค่าอุณหภูมิในช่วง $40 \le T \le 50\ ^{o}C$ ได้ค่า k และ n ดังสมการ (54) และ (55) ตามลำดับ

$$M = M_i \exp\left(-kt^n\right) \tag{53}$$

เมื่อ

$$k = 0.0011T + 0.2233 \tag{54}$$

$$n = 0.0079T + 0.4407 \tag{55}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

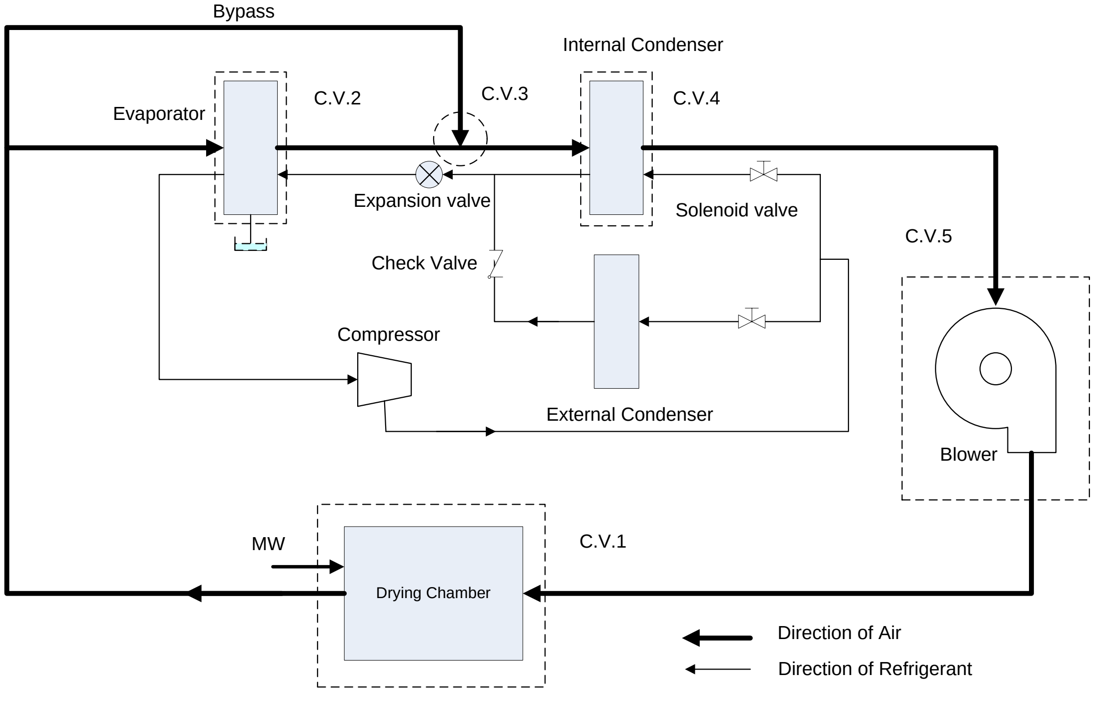
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ใช้หลักการสมดุลมวลและพลังงานของปริมาตรควบคุมโดยพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ เป็นปริมาตรควบคุมดังแสดงในภาพที่ 86

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องอบแห้ง

พิจารณาปริมาตรควบคุมของห้องอบแห้ง (CV.1) ในภาพที่ 86 จากการสมดุลมวลสารของอากาศชื้นที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมจะได้ว่า ความแตกต่างของอัตราส่วนความชื้นอากาศขาเข้ากับขาออกมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_a(H_2 - H_1)\Delta t = M_w \qquad (56)$$

ซึ่งปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวัสดุเริ่มต้น ความชื้นก่อนอบแห้งและความชื้นหลังอบแห้งดังนี้



ภาพที่ 86 ปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

$$M_w = M_p(M_i - M_f) \quad (57)$$

เมื่อ m_a คือ อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง ($kg_{dry\,air}/h$)

M_p คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

M_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของช่วงเวลาที่พิจารณา (db, เศษส่วน)

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของช่วงเวลาที่พิจารณา (db, เศษส่วน)

H_1 คือ อัตราส่วนความชื้นก่อนเข้าห้องอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\,air}$)

H_2 คือ อัตราส่วนความชื้นออกจากห้องอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\,air}$)

Δt คือ ช่วงเวลา (h)

จากการสมดุลพลังงานของอากาศอบแห้งที่ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งจะได้ว่าผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความร้อนของกระแสอากาศที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในเนื้อวัสดุอบแห้ง

$$M_w h_{fg} = m_a \Delta t \left[\left(c_a + c_v H_1\right) T_1 - \left(c_a + c_v H_2\right) T_2 + h_{fg}\left(H_1 - H_2\right) \right] + q_{MW} \Delta t \quad (58)$$

เมื่อ m_a คือ อัตราการไหลมวลอากาศแห้ง (kg/h)

c_a คือ ความร้อนจำเพาะอากาศ (kJ/kg ^{O}C)

c_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg ^{O}C)

T_1 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง (^{O}C)

T_2 คือ อุณหภูมิออกจากเครื่องอบแห้ง (^{O}C)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

q_{MW} คือ พลังงานความร้อนจากไมโครเวฟ (kJ/h)

แบบจำลองของเครื่องทำระเหย

ในส่วนของเครื่องทำระเหยจะมีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารคือมีการควบแน่นของน้ำเกิดขึ้นด้วย เมื่อพิจารณากระบวนการทำความเย็นและลดความชื้นอากาศบน

แผนภูมิอากาศชื้นจะพบว่าอากาศที่ผ่านเข้าสู่เครื่องทำระเหยจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่สัมผัสกับขดท่อซึ่งกระแสอากาศที่สัมผัสกับขดท่อจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิผิวท่อส่วนอากาศที่ไม่สัมผัสกับขดท่อจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าดังนั้นอุณหภูมิของกระแสอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยจะเป็นอุณหภูมิของอากาศผสม พิจารณาปริมาตรควบคุมของเครื่องทำระเหย (CV.2) ในภาพที่ 86

สมดุลมวลของอากาศแห้งจะได้ว่าผลรวมของมวลอากาศแห้งที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับมวลของอากาศแห้งที่ออกจากปริมาตรควบคุม

$$m_{bpf} + m_{p} = m_{ap} \tag{59}$$

เมื่อ m_{bpf} คือ อัตราการไหลอากาศแห้งที่ไม่สัมผัสขดท่อ ($kg_{dry\ air}/h$)

m_{p} คือ อัตราการไหลอากาศแห้งที่สัมผัสกับขดท่อ ($kg_{dry\ air}/h$)

สมดุลมวลของไอน้ำในอากาศจะได้ว่าผลต่างระหว่างมวลไอน้ำที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย

$$m_{ap}H_{2} = m_{ap}H_{3} + MER \tag{60}$$

และ

$$m_{bpf}H_{2} + m_{p}H_{fe} = m_{ap}H_{3} \tag{61}$$

เมื่อ H_{3} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผ่านเครื่องทำระเหย ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

H_{fe} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่สัมผัสกับขดท่อ ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

MER คือ อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย (kg/h)

สมดุลความร้อนของกระแสอากาศเข้าและออกจากเครื่องทำระเหยจะได้ว่าผลรวมของความร้อนกระแสอากาศขาเข้ามีค่าเท่ากับความร้อนของกระแสอากาศขาออกจากปริมาตรควบคุม

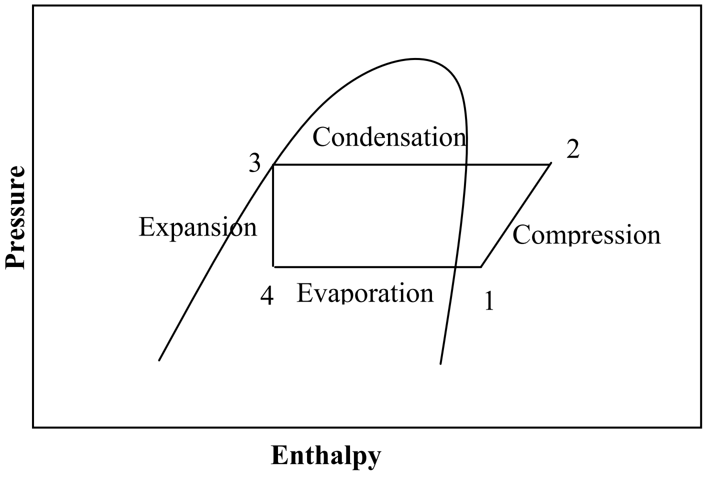
โดยพิจารณากระแสอากาศที่เข้าสู่เครื่องทำระเหยเป็นสองส่วนคือส่วนที่สัมผัสกับขดท่อและไม่สัมผัสกับขดท่อสมการสมดุลความร้อนคือ

$$m_{bpf}\{(c_a + c_v H_2)T_3 + H_2 h_{fg}\} + m_p\{(c_a + c_v H_{fe})T_e + H_{fe} h_{fg}\} \\ = m_{ap}\{(c_a + c_v H_3)T_3 + H_3 h_{fg}\} \quad (62)$$

เมื่อ T_e คือ อุณหภูมิอากาศที่ผิวขดท่อ (^{O}C)

T_3 คือ อุณหภูมิอากาศขาออกจากเครื่องทำระเหย (^{O}C)

สำหรับการหาอุณหภูมิของสารทำความเย็นจะพิจารณาตามแผนภาพ P-h ไดอะแกรม ดังแสดงในภาพที่ 87 โดยมีสมมติฐานว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นคงที่แต่เกิดความร้อนยวดยิ่ง(superheat) ที่ออกจากเครื่องทำระเหยและมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิอิ่มตัวกับอุณหภูมิไอร้อนยวดยิ่งมีค่าเท่ากับ 12 ^{O}C จะได้สมการสำหรับการถ่ายเทความร้อนคือ



ภาพที่ 87 วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอเมื่อเกิดไอร้อนยวดยิ่งที่เครื่องทำระเหย

$$q_e = m_f(h_1 - h_4) \quad (63)$$

$$q_e = U_e A_e \frac{(T_2 - T_e) - (T_3 - T_e)}{\ln[(T_2 - T_e)/(T_3 - T_e)]} \quad (64)$$

$$h_3 = h_4 \quad (65)$$

เมื่อ q_e คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำระเหย (kW)

U_e คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($kW/m^2\ ^OC$)

A_e คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)

T_e คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ เครื่องทำระเหย (^OC)

h_1 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นออกจากเครื่องทำระเหย (kJ/kg)

h_3 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น(kJ/kg)

h_4 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องทำระเหย (kJ/kg)

m_f คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น (kg/s)

และจากการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนพบว่าความแตกต่างของความร้อนของกระแสอากาศไหลเข้าและไหลออกจากปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหย

$$q_e = m_{ap}c_aT_2 + m_{ap}c_vH_2T_2 + m_{ap}h_{fg}H_2 - (m_{ap}c_aT_3 + m_{ap}c_vH_3T_3 + m_{ap}h_{fg}H_3) \quad (66)$$

แบบจำลองอากาศผสม

จากปริมาตรควบคุมอากาศผสม(CV.3) ในภาพที่ 86 จะได้ว่ามวลของอากาศแห้งที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับมวลอากาศแห้งที่ออกจากปริมาตรควบคุม

$$m_a = m_{ap} + m_{abp} \quad (67)$$

และมวลของไอน้ำในอากาศก่อนเข้าปริมาตรควบคุมเท่ากับมวลของไอน้ำในอากาศออกจากปริมาตรควบคุม

$$m_a H_1 = m_{ap} H_3 + m_{abp} H_2 \quad (68)$$

หารสมการที่ (67) ด้วยค่า m_a จะได้

$$1 = \frac{m_{ap}}{m_a} + \frac{m_{abp}}{m_a} \quad (69)$$

กำหนดให้ $\frac{m_{abp}}{m_a} = BP$ แล้วแทนค่า (69) ลงใน (68) จะได้

$$H_1 = (1 - BP)H_3 + BPH_2 \quad (70)$$

เมื่อ BP คือ อัตราส่วนอากาศ bypass

จากปริมาตรควบคุม C.V.3 กระบวนการผสมอากาศที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ adiabatic คือไม่มีการรับหรือสูญเสียความร้อนออกจากปริมาตรควบคุม จะได้ว่าปริมาณความร้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนออกจากปริมาตรควบคุม

$$m_{abp}(c_a + c_v H_2)T_2 + m_{ap}(c_a + c_v H_3)T_3 = m_a(c_a + c_v H_1)T_4 \quad (71)$$

เมื่อ T_4 คือ อุณหภูมิอากาศผสม (^{O}C)

แบบจำลองของเครื่องควบแน่น

พิจารณาปริมาตรควบคุมของเครื่องควบแน่น(CV. 4) ในภาพที่ 86 จากหลักทรงพลังงาน จะได้ว่าความแตกต่างของปริมาณความร้อนขาเข้าและขาออกจากปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$m_a(c_a + c_v H_1)(T_5 - T_4) = q_{condi} \tag{72}$$

เมื่อ $q_{condi.}$ คือ ความร้อนถ่ายที่เครื่องควบแน่นตัวใน (kJ/h)

เมื่อพิจารณาเครื่องควบแน่นโดยสมมติว่าไม่มีการเกิดของเหลวเย็นยวดยิ่งเกิดขึ้นจะได้การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นคือ

$$q_{condi} = U_c A_c \frac{(T_c - T_4) - (T_c - T_5)}{\ln(T_c - T_4)/(T_c - T_5)} \tag{73}$$

และเมื่อพิจารณาที่สารทำความเย็นจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทรัลปีของสารทำความเย็นมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$q_{condi} = m_f(h_3 - h_2) \tag{74}$$

เมื่อ U_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องควบแน่น (kW/m^2 ^{O}C)

A_c คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (m^2)

T_c คือ อุณหภูมิที่ผิวท่อ/อุณหภูมิควบแน่นของสารทำความเย็น (^{O}C)

h_2 คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)

m_f คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น (kg/s)

แบบจำลองความสิ้นเปลืองไฟฟ้าของพัดลมหลัก

พิจารณาปริมาตรควบคุมของพัดลมหลัก(CV.5) ในภาพที่ 86 จากหลักทรงพลังงานจะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ของอากาศขาเข้าและอากาศขาออกจากปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับพลังงานเพลาที่ขับเคลื่อนพัดลมและความร้อนสูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม

$$m_a(c_a + c_v H_1)(T_1 - T_5) = W_s + Q_{loss} \tag{75}$$

เมื่อ W_s คือ กำลังงานเพลาขับเคลื่อนพัดลม (kJ/h)

Q_{loss} คือ ความร้อนสูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม(kJ/h)

สมมติว่าค่าความร้อนสูญเสียระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมมีค่าน้อยมากเนื่องจากเป็นระบบปิดสมการ (75) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$m_a(c_a + c_v H_1)(T_1 - T_5) = W_s \tag{76}$$

กำลังงานที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมคำนวณจาก

$$P_{motor} = W_s / E_m \tag{77}$$

เมื่อ P_{motor} คือ กำลังงานที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า(kJ/h)

E_m คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (กำหนด 80 %)

แบบจำลองของเครื่องอัดไอ

แบบจำลองของเครื่องอัดไอใช้สำหรับทำนายค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบและกำลังงานของระบบปั๊มความร้อนเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน แบบจำลองของเครื่องอัดไอสร้างขึ้นโดยมีสมมติฐานว่ากระบวนการอัดไอเป็นกระบวนการ Polytropic ซึ่ง Penyala et.al (1990) ได้สร้างไว้ซึ่งสามารถหากำลังของเครื่องอัดไอ และหาอุณหภูมิของสารทำความเย็นออกจากเครื่องอัดไอ

$$W_{com} = P_{r1} m_f v_1 \left(\frac{n}{n-1}\right)\left[\left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] \tag{78}$$

$$m_f = \frac{(CD)N\eta_v}{v_1} \tag{79}$$

$$\eta_v = 1 + C - C\left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (80)$$

$$T_{r2} = (273.16 + T_{r1})\left(\frac{P_{r2}}{P_{r1}}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 273.16 \quad (81)$$

เมื่อ W_{com} คือ กำลังของเครื่องอัด (MW)

P_{r1} คือ ความดันของสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัด (Mpa)

P_{r2} คือ ความดันของสารทำความเย็นออกจากเครื่องอัด (Mpa)

v_1 คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัด (m^3/kg)

η_v คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องอัด

CD คือ Piston displacement (m^3/rev)

N คือ ความเร็วรอบของการอัด (rpm)

C คือ Clearance Volume

n คือ Polytropic index (สำหรับสารทำความเย็น R-22 = 1.15)

หาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวนอก

จากไดอะแกรมเมื่อพิจารณาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่วงจรทำความเย็น จากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่าความร้อนที่ถ่ายเทที่เครื่องควบแน่นตัวในรวมกับความร้อนที่ถ่ายเทที่เครื่องควบแน่นตัวนอก(ภาพที่ 86 และ ภาพที่ 87) มีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทที่เครื่องทำระเหยรวมกับกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ

$$q_{condi} + q_{conde} = q_e + W_{com} \quad (82)$$

เมื่อ q_{conde} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวนอก (kJ/h)

คุณสมบัติอากาศที่เกี่ยวข้อง

1. อัตราส่วนความชื้นอากาศ (ASAE STANDARDS, 1994)

$$H = \frac{0.6219P_v}{P_{atm} - P_v} \quad \text{เมื่อ} \quad 255.38^{\circ}K \le T \le 533.16^{\circ}K \quad : P_v < P_{atm} \qquad (83)$$

2. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

$$h_{fg} = 2{,}502{,}535.259 - 2{,}385.76424(T - 273.16) : 273.16^{\circ}K \le T \le 338.72 \qquad (84)$$

$$h_{fg} = (7{,}329{,}155{,}978{,}000 - 15{,}998964.08T^2)^{0.5} : 338.72^{\circ}K < T \le 533.16^{\circ}K \qquad (85)$$

3. ความดันไออิ่มตัว

$$\ln\left(\frac{P_s}{R}\right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \; : \; 273.16^{\circ}K < T \le 533.16^{\circ}K \qquad (86)$$

เมื่อ $R = 22{,}105{,}649.25$ $\quad D = 0.12558 \times 10^{-3}$

$A = -27405.526$ $\quad E = -0.48502 \times 10^{-7}$

$B = 97.5413$ $\quad F = 4.34903$

$C = -0.146244$ $\quad G = 0.39381 \times 10^{-2}$

4. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ

$$V_{sa} = \frac{287T}{P_{atm} - P_v} \qquad (87)$$

เมื่อ $255.38^{\circ}K \le T \le 533.16^{\circ}K \; : \; P_v < P_{atm}$

5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

$$rh = \frac{P_v}{P_s} \tag{88}$$

6. เอนทาลปีของอากาศ

$$h_a = 1.0069T + W[2512.131 + 1.5524T]:\ 0 \leq T(^{\circ}C) \leq 100 \tag{89}$$

คุณสมบัติของสารทำความเย็นที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22 ได้จากการการทำ Equation fitting จากข้อมูลของ Borgnakke and Sonntag (1997) มีดังนี้

1. สารทำความเย็นที่สภาวะของเหลวอิ่มตัว

$$T_{sat} = -0.3076P^4 + 4.2031P^3 - 22.599P^2 + 71.405P - 29.587 \tag{90}$$

$$h = 0.0066T_{sat}^2 + 0.8454T_{sat} + 48.0946 \tag{91}$$

2. สารทำความเย็นที่สภาวะไอร้อนยวดยิ่ง

เมื่อ $0.4 \leq P \leq 0.8$ MPa

$$\begin{aligned} h = {} & (229.57 + 59.86P - 37.068P^2) + (0.563 + 0.3476P - 0.118P^2)(T - T_{sat}) \\ & + (0.0004 + 0.0002P - 0.0011P^2)(T - T_{sat})^2 \end{aligned} \tag{92}$$

$$v = (0.1183P^2 - 0.2273P + 0.1355) + (-0.0004P^2 + 0.0002P + 0.0003)(T - T_{sat}) \tag{93}$$

เมื่อ $2 \leq P \leq 3.5$ MPa

$$h = (-8.1733P^3 + 62.24P^2 - 154.64P + 391.33) + (0.4188P^3 - 3.2926P^2 + 8.5924P - 6.476)(T - T_{sat}) + (-0.0029P^3 + 0.023P^2 - 0.0594P + 0.0501)(T - T_{sat})^2 \qquad (94)$$

$$v = (0.0013P^2 - 0.011P + 0.0292) + (0.00001P^2 - 6\times10^{-5}P + 0.0001)(T - T_{sat}) \qquad (95)$$

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ประเมินได้จากอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) ดังนี้

$$SMER = \frac{M_p(M_i - M_f)}{P_{total}} \qquad (96)$$

เมื่อ M_p คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของช่วงเวลาที่พิจารณา (db, เศษส่วน

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของช่วงเวลาที่พิจารณา (db, เศษส่วน)

P_{total} คือ คือพลังงานรวม (kWh) ซึ่งหาได้จาก

$$P_{total} = (P_{motor} + W_{com} + P_{MW})\Delta t \qquad (97)$$

เมื่อ P_{motor} คือ กำลังงานที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า (kW)

P_{MW} คือ กำลังงานที่ให้กับไมโครเวฟ (kW)

W_{com} คือ กำลังของเครื่องอัดไอ (kW)

หรือสามารถประเมินได้จากค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ดังนี้

$$SEC = \frac{3.6P_{total}}{M_p(M_i - M_f)} = \frac{3.6}{SMER} \tag{98}$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์บ่งบอกสมรรถนะ (Coefficient Of Performance) หาได้ดังนี้

$$COP_{use} = \frac{q_{condi}}{W_{com}} \tag{99}$$

สภาวะการทำงานที่หมาะสมของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

การหาค่าที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครวเวฟที่สร้างนี้จะดูจากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดโดยมีค่าซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจาก อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราส่วนอากาศ bypass อัตราการไหลของอากาศ ซึ่งสามารถเขียนเป็น Objective function คือ

$$y = y(BP, T, m_a) \rightarrow \text{minimize} \tag{100}$$

โดยมีค่า constrain function คือ

$$0.5 \leq BP < 0.9 \tag{101}$$

$$40 \leq T_{di} < 55 \tag{102}$$

$$0.3 < m_a \leq 0.625 \tag{103}$$

ขั้นตอนการหาค่า optimization

1. เริ่มจากการจำลองสถานการณ์การอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยการกำหนดค่าเริ่มค่าเริ่มต้นของตัวแปรคือ อากาศอบแห้ง 30 ^{o}C อัตราการไหลของอากาศ เริ่มต้น 0.3 kg $_{dry\ air}$ /s ค่าอัตราส่วนอากาศ bypass 0.5 ปริมาณของไพลเริ่มต้นกำหนดให้คงที่ที่ 20 kg

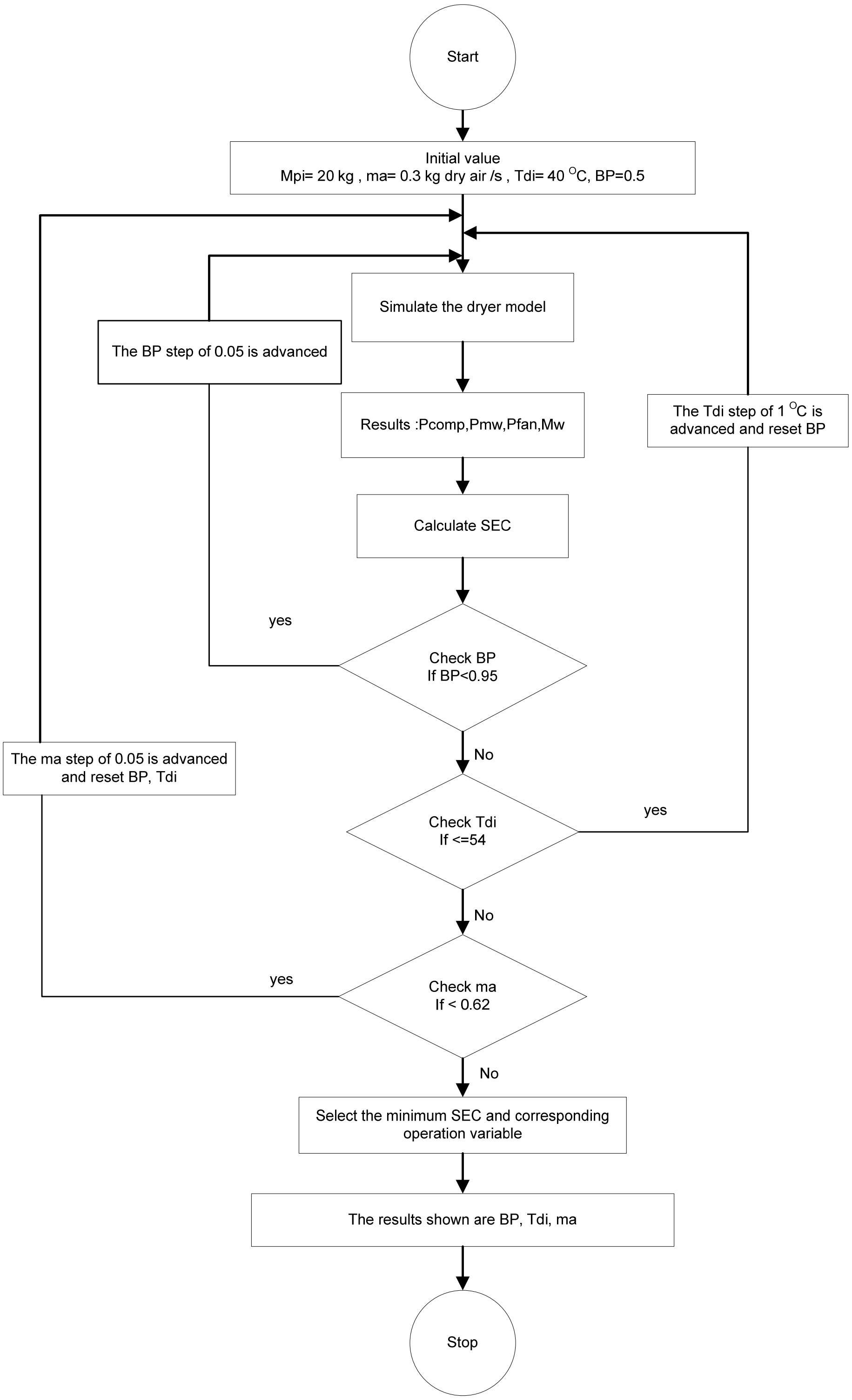
2. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จะถูกคำนวณด้วยสมการ (98) โดยสภาวะการทำงานที่ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดจะถูกเลือกโดยการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ก่อนหน้า

3. ทำการตรวจสอบค่า BP โดยถ้าค่า BP ยังอยู่ในช่วงของสมการ (101) ให้เริ่มคำนวนใหม่โดยใช้การเพิ่มค่า BP ที่ละ 0.05

4. ทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิของอากาศอบแห้งหากอยู่ในช่วงสมการ (102) ให้เริ่มคำนวณใหม่โดยเพิ่มค่าที่ละ 1 ^{o}C และค่า BP กลับไปสู่ค่าเริ่มต้น

5. ทำการตรวจสอบค่าอัตราการไหลของอากาศ ถ้ายังอยู่ในช่วงของสมการ (103) ให้เริ่มคำนวณใหม่โดยเพิ่มค่าที่ละ 0.025 kg dry air/s และกำหนดให้ค่า BP และ Tdi กลับไปสู่ค่าเริ่มต้น

ขั้นตอนตั้งแต่ 1-5 จะทำการทำซ้ำจนกระทั่งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในทุกช่วงสภาวะการทำงานได้ถูกคำนวณ และค่าสภาวะที่ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดคือค่าการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งนี้ ภาพที่ 88 แสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่าสภาวะการทำงานในการจำลองสถานการณ์หาค่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้ง

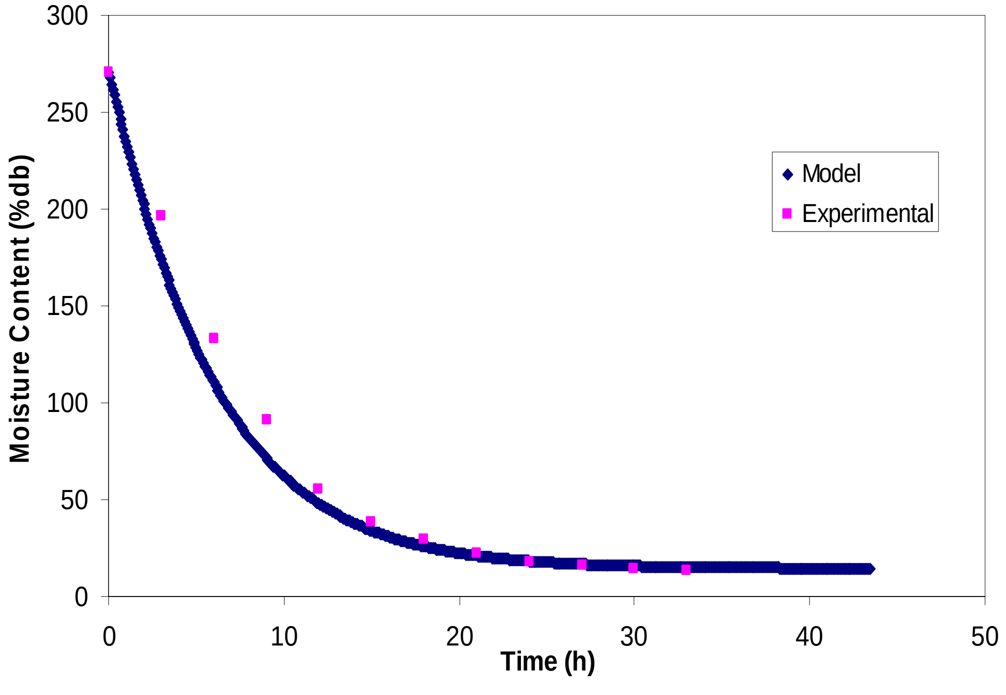


ภาพที่ 88 แผนภาพขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสม

การพิสูจน์แบบจำลอง

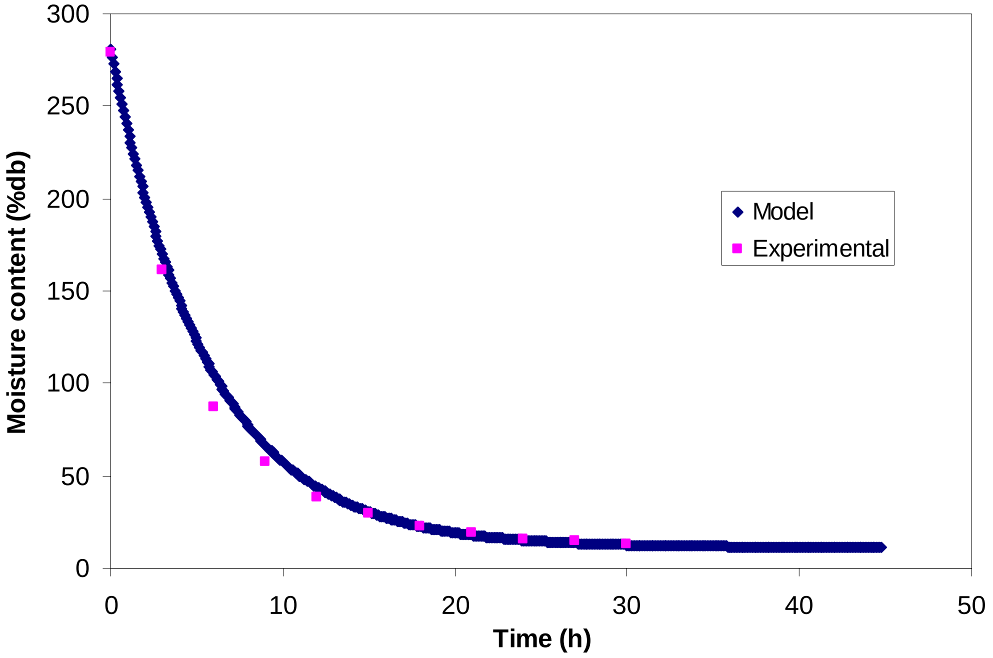
ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วคำนวณด้วยโปรแกรม MHPD 1.0 นั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองอบแห้งไพลที่สภาวะดังต่อไปนี้คือ

การทดลองที่ 1 อบแห้งไพลด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้ง 41.36 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 30.9 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ ไพลหนัก 19.94 กิโลกรัมความชื้นเริ่มต้น 270.43 %db เมื่อนำผลการลดความชื้นที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองแสดงผลในภาพที่ 89 ซึ่งจะเห็นว่า drying curve ที่ได้จากวิธีการทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน



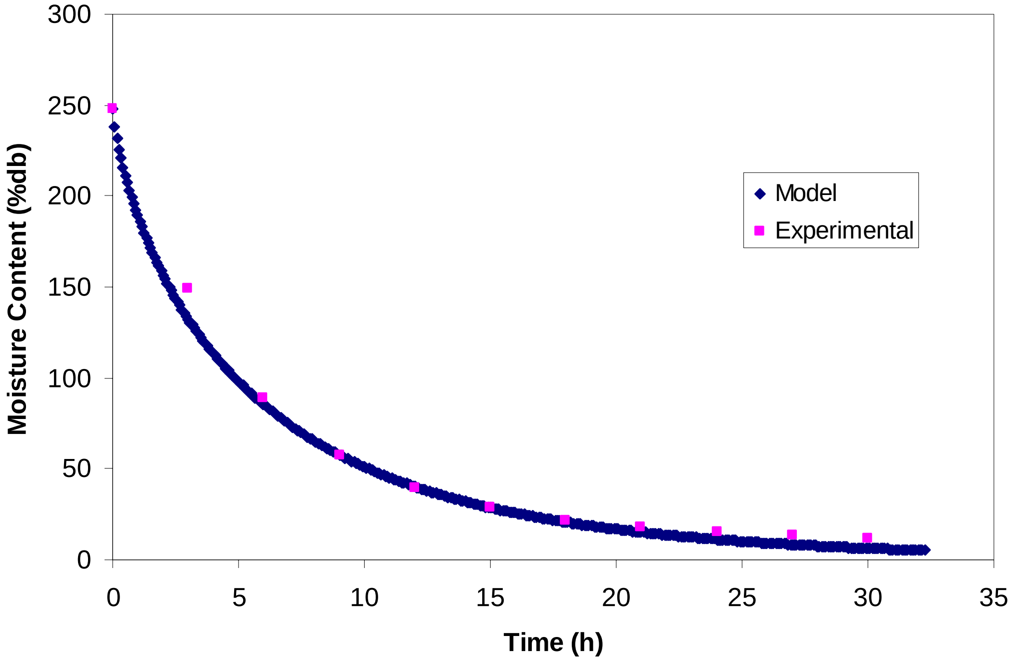
ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 2 อบแห้งไพลด้วยระบบปั๊มความร้อนด้วยอุณหภูมิ 49.55 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 23.14 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักไพลเริ่มต้น 19.07 กิโลกรัม ความชื้นไพลเริ่มต้น 278.67 %db. เมื่อนำค่าสภาวะเดียวกันนี้ใส่ให้โปรแกรมเพื่อทำการคำนวณตามแบบจำลอง ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ Drying curve ของไพลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณตามแบบจำลองแสดงในภาพที่ 90



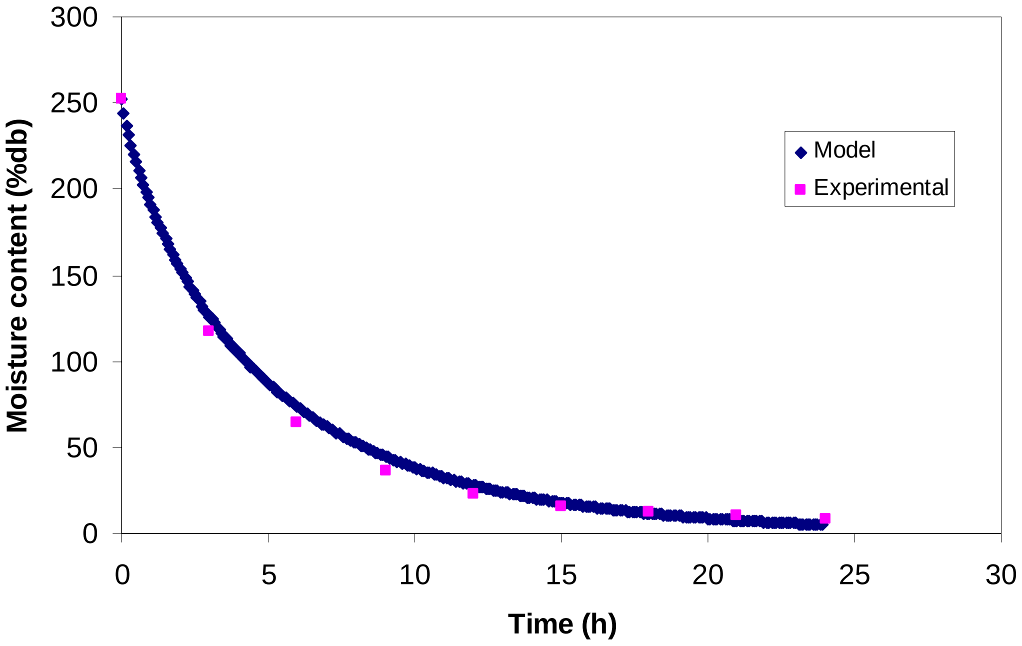
ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 3 ทำการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 41.54 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 31.82 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงโดยให้พลังงานไมโครเวฟ 5 นาทีพัก 5 นาที โดยใช้ไพลหนัก 18.52 กิโลกรัมความชื้นเริ่มต้น 247.56 %db เมื่อนำค่าที่ได้จากสภาวะการอบแห้งใส่ให้โปรแกรมเพื่อคำนวณค่าตามแบบจำลอง Drying curve ที่ได้จากแบบจำลองและจากผลการทดลองอบแห้งไพลแสดงในภาพที่ 91



ภาพที่ 91 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 4 ทำการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 49.57 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 23.71 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงโดยให้พลังงานไมโครเวฟ 5 นาทีพัก 5 นาที โดยใช้ไพลหนัก 17.74 กิโลกรัมความชื้นเริ่มต้น 252.17 %db เมื่อนำค่าที่ได้จากสภาวะการอบแห้งใส่ให้โปรแกรมเพื่อคำนวณค่าตามแบบจำลอง Drying curve ที่ได้จากแบบจำลองและจากผลการทดลองอบแห้งไพลแสดงในภาพที่ 92



ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเปรียบเทียบกับแบบจำลองด้วยสภาวะการอบแห้งของการทดลองที่ 4

สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องกับการทดลองสำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนการทดลองที่ 1 และ 2 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม MHPD 1.0 แสดงในตารางที่ 19 ส่วนค่าที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟการทดลองที่ 3 และ 4 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม MHPD 1.0 แสดงในตารางที่ 20 โดยค่า COP ในตารางที่ 19 และ 20 จะแบ่งออกเป็น $COP_{hp(used)}$ ซึ่งคำนวณจากปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องควบแน่นต่อพลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ ส่วนค่า $COP_{hpd\ (used)}$ เป็นผลรวมของ $COP_{hp(used)}$ ที่ได้จากเครื่องควบแน่นและค่า COP_{ref} ที่ได้เครื่องทำระเหย ทั้งนี้เนื่องจากระบบปั๊มความร้อนของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟนี้มีการใช้ประโยชน์จากการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่เครื่องควบแน่นเพื่อใช้ในการอบแห้งและการดึงความร้อนกลับจากอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วทำให้เกิดการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหยอากาศที่นำกลับมาใช้อบแห้งจึงมีความชื้นต่ำลง

ตารางที่ 19 ผลการทดลองอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

รายการ	การทดลองที่ 1		การทดลองที่ 2	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
น้ำหนักไพลเริ่มต้น (kg)	19.94	19.94	19.07	19.07
น้ำหนักไพลหลังอบแห้ง (kg)	6.08	6.08	5.68	5.68
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	270.43	270.43	278.67	278.67
ความชื้นหลังอบแห้ง (%db)	13.03	12.998	12.78	12.98
ความชื้นสมดุล	-		-	
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(h)	33	33.75	30	26.83
สภาวะแวดล้อม				
อุณหภูมิอากาศ เฉลี่ย (^{O}C)	26.54	-	27.02	-
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย (%)	74.56	-	75.08	-
สภาวะการอบแห้ง				
อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย (^{O}C)	41.36	40	49.55	50
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งเฉลี่ย (%)	30.9	16.5	23.14	14.57
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย (^{O}C)	39.14	39.11	46.70	48.89
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย (%)	50.46	17.89	37.74	15.94
อัตราการไหลอากาศ (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ ข้ามเครื่องทำระเหย (%)	66.95	66.95	66.95	66.95
สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง				
อัตราการอบแห้ง (%db/h)	7.80	7.628	8.86	9.902
MER (kg/h)	0.755	0.039	0.145	0.045
SMER (kg/kWh)	0.187	0.23	0.179	0.245
SEC (MJ/kg)	19.22	15.664	20.03	14.703
$COP_{hp(used)}$	4.27	4.319	3.69	3.877
COP_{hpd}	7.73	7.64	6.39	6.75
เครื่องอัดไอ				
Suction Pressure เฉลี่ย (MPa)	2.034	2.138	2.549	2.805
Discharge Pressure เฉลี่ย (MPa)	0.533	0.677	0.655	0.717

หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าที่ได้จากค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง

ตารางที่ 20 ผลการทดลองอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง

รายการ	การทดลองที่ 3		การทดลองที่ 4	
	การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
น้ำหนักไพลเริ่มต้น (kg)	18.51	18.51	17.38	17.38
น้ำหนักไพลหลังอบแห้ง (kg)	5.96		5.35	
ความชื้นเริ่มต้น (%db)	247.56	247.56	252.17	252.17
ความชื้นหลังอบแห้ง (%db)	11.92	11.86	8.43	8.396
ความชื้นสมดุล	-	-	-	-
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(h)	30	24.83	24	20
สภาวะแวดล้อม				
อุณหภูมิอากาศ เฉลี่ย (^{O}C)	26.99	-	26.75	-
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย (%)	70.21	-	64	-
สภาวะการอบแห้ง				
อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย (^{O}C)	41.54	40	49.57	50
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งเฉลี่ย (%)	31.82	17.01	21.82	14.35
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย (^{O}C)	39.41	38.91	47.05	38.95
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศหลังอบแห้งเฉลี่ย (%)	47.62	18.42	38.06	16.09
อัตราการไหลอากาศ (m^3/s)	0.621	0.621	0.621	0.621
อากาศ ข้ามเครื่องทำระเหย (%)	66.95	66.95	66.95	66.95
สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง				
อัตราการอบแห้ง (%db/h)	7.85	9.49	10.16	12.189
MER (kg/h)	0.678	0.048	0.178	0.055
SMER (kg/kWh)	0.164	0.252	0.180	0.266
SEC (MJ/kg)	21.94	14.310	20.05	13.521
$COP_{hp(used)}$	4.48	4.319	3.72	3.887
COP_{hpd}	7.96	7.64	6.44	6.77
เครื่องอัดไอ				
Suction Pressure เฉลี่ย (MPa)	2.24	2.138	2.55	2.805
Discharge Pressure เฉลี่ย (MPa)	0.52	0.677	0.64	0.717

หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าที่ได้จากค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง

จากการหาค่าความเหมาะสมในการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟพบว่าสภาวะการอบแห้งไพลที่เหมาะสมเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการซึ่งในที่นี้หมายถึงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งคำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดช่วงการอบแห้งน้อยที่สุด เมื่อกำหนดให้สภาวะของไพลที่ทำการอบแห้งคือ อบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น 300 %db เหลือ 12%db แล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรม MHPD 1.0 ซึ่งพัฒนามาจากโปรแกรม HPD 1.0 (เทวรัตน์, 2545) จะได้สภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 21 ซึ่งจะพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีค่าเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟแบบเป็นช่วงที่เพิ่มเข้าไปในระบบการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการลดความชื้นวัสดุ และค่าพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มเข้าไปมีค่าคงที่เนื่องจากหากกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานไมโครเวฟ อาจจะส่งผลกระทบต่อตัวผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง ดังนั้นจึงทำให้สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟก็คือสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบปั๊มความร้อนนั้นเอง

ตารางที่ 21 สภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

สภาวะการอบแห้ง	กรณีใช้ปั๊มความร้อนอย่างเดียว	กรณีใช้ร่วมกับไมโครเวฟ
อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)	0.621	0.621
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง(^{O}C)	50	50
อากาศ bypass (%)	75-80	75-80
เวลาในการอบแห้ง (h)	30.3	18.75
ค่า SEC (MJ/kg_{water})	15.27	10.50

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่แสดงในตารางที่ 23 สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขต่างๆ ของการคำนวณดังนี้

- ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งรวม 85013.98 บาท
- สามารถอบแห้งไพลได้ครั้งละ 20 กิโลกรัม
- ราคาไพลสดเฉลี่ยอยู่ที่ 10 บาทต่อกิโลกรัม
- ใช้เวลาในการอบแห้งครั้งละ 18 ชั่วโมง (ลดความชื้นจาก 300 %db เหลือ 12 %db)
- ราคาไพลแห้งกิโลกรัมละ 160 บาท (อ้างอิงจาก ศูนย์กลางวัตถุดิบ จ. ปราจีนบุรี, http://www.thaipun.com/webboard/sale_Question.asp?GID=56)
- ทำการอบแห้งสัปดาห์ละ 6 วัน ดังนั้นทำงานปีละ 312 วัน
- สมมติให้มีการอบแห้งผลผลิตอื่นรวมด้วยตลอดปี ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน
- อัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงเท่ากับ 2.75 kWh
- อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 7.75%
- ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 10 ปี
- มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของต้นทุน
- ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5% ของต้นทุน
- ค่าไฟฟ้าราคา 2.5 บาท/kWh
- ค่าแรงงาน 2 คน คนละ 180 บาท/วัน

ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง

$$= 85013.98(A/P,7.75\%,10) - 85013.98(0.1)(A/F,7.75\%,10)$$

$$= 85013.98\left(\frac{0.0775(0.0775+1)^{10}}{(0.0775+1)^{10}-1}\right) - 85013.98(0.1)\left(\frac{0.0775}{(0.0775+1)^{10}-1}\right)$$

$$= 11933.24 \quad \text{บาท}$$

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี

$=$ ชั่วโมงการทำงานรวม $\times$ อัตราการใช้ไฟฟ้า $\times$ ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย

$= 312 \times 18 \times 2.75 \times 2.5$

$= 38610$ บาท

ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษารายปี

$= 85013.98 \times 0.05$

$= 4250.70$ บาท

ค่าใช้จ่ายรวมรายปี

$= 11933.24 + 38610 + 4250.70$

$= 54793.94$ บาท

ค่าใช้จ่ายต่อปริมาณผลผลิตคิดแยกประเภทตามต้นทุน

ต้นทุนเครื่อง $= 11933.24 / 1747.2$

$= 6.83$ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง

ค่าไฟฟ้า $= 38610 / 1747.2$

$= 22.09$ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง

บำรุงรักษา $= 4250.70 / 1747.2$

$= 2.43$ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง

วัตถุดิบ $= 6240 \times 10 / 1747.2$

$= 35.71$ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง

แรงงาน $= 2 \times 180 \times 312 / 1747.2$

$= 64.29$ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง

ค่าใช้จ่ายรวม $= \frac{54793.94}{1747.2} + 35.71 + 64.29 = 130.65$ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง

ดังนั้นผลตอบแทนรายปี

$=$ ปริมาณวัสดุแห้ง $\times$ ราคาขาย

$= 312 \times 5.6 \times 160$

$=$ 279,552.00 บาท

กำไรสุทธิรายปี

$=$ ผลตอบแทน - ต้นทุนการผลิต

$= 279{,}552.00 - (54793.94 + 62409 + 112320)$

$=$ 500029.06 บาท

ระยะเวลาคืนทุน

$=$ ต้นทุนสร้างเครื่อง / กำไรสุทธิรายปี

$=$ 85013.98 / 50029.06

$=$ 1.70 ปี

ตารางที่ 22 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
1	เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเบอร์ 28 ขนาด $1.2 \times 2.4\ m^2$	14 แผ่น	385	5390(5767.3)
2	เหล็กกล่องนิ้วหนา 2 mm	8 เส้น	220	1760 (1883.2)
3	ฉนวน	6 ม้วน	290	1740
4	ชุดพัดลมหลักและมอเตอร์	1 ชุด	4050	4050 (4333.5)
5	ชุดพัดลมเครื่องควบแน่นตัวนอกและมอเตอร์	1 ชุด	450	450 (481.5)
6	โซลีนอยด์วาล์ว	2 ชุด	1250	2500(2675)
7	วาล์วกันกลับ	2 ชุด	550	1100 (1177)
8	แผ่นพลาสติกโพลีโพพีลีน	13 แผ่น	650	8450 (9041.5)
9	เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขนาด 1 1/2 hp	1 ชุด	8370	8370 (8955.9)
10	Capacitor start	1 ตัว	756	756 (808.92)
11	ชุดแผงคอยด์	1 ชุด	3650	3650 (3905.5)
12	ชุดกลอนประตูแบบมือจับพร้อมบานพับ	1 ชุด	670	670 (716.9)
13	อะคิลิคหนา 1.5 cm			4800
14	ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล	1 ตัว	3500	3500 (3745)
15	ชุดอุปกรณ์ตู้ควบคุม	1 ชุด	3210	3210 (3434.7)
16	ชุดอุปกรณ์ไมโครเวฟ	3 ชุด	2000	6000
17	มิเตอร์ และสายไฟหลัก	1 ชุด	658	658
18	วัสดุสิ้นเปลือง (เหมาจ่าย)			5000
รวมค่าวัสดุอุปกรณ์				62054 (66397.78)
ค่าแรงคิดเป็น 30% (18616.2) รวมเป็นเงิน				80670.2 (85013.98)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บเป็นค่าเมื่อรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟต้นแบบที่ทำการพัฒนาขึ้น ประกอบด้วย เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด 0.6885 m^3 ชุดระบบปั๊มความร้อนขนาด 1¼ ตันความเย็น ชุดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟขนาด 700 W จำนวน 3 ชุด การให้พลังงานไมโครเวฟเพิ่มเข้าไปในระบบการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเป็นแบบเป็นช่วง โดยควบคุมช่วงการให้พลังงานไมโครเวฟด้วยชุดไทม์เมอร์ การทำงานของเครื่องอบแห้งเป็นแบบระบบปิด จากการทดลองอบแห้งพริกและไพลจำนวน 20 กิโลกรัม พบว่าชนิดของวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยการอบแห้งพริกจะใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าไพลเมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะการอบแห้งเดียวกัน และการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟช่วยประหยัดเวลาการอบแห้งได้ โดยในการทดลองอบแห้งพริกสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 25 เปอร์เซ็นต์ และลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ 21.91 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 °C เมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟ 445.52 วัตต์ แบบเป็นช่วงทำงาน 5 นาทีพัก 5 นาทีเข้าไป โดยพริกที่ได้จากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีสีแดงสวยและมีรอยย่นบนผิวของพริกน้อยกว่าพริกที่อบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว

สำหรับผลการอบแห้งไพลพบว่าการเพิ่มพลังงานไมโครเวฟในระบบการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 20 เปอร์เซ็นต์ และลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ 15.64 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 °C เมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟ 445.52 วัตต์ แบบเป็นช่วงทำงาน 5 นาทีพัก 5 นาทีเข้าไป สีของไพลที่ได้หลังการอบแห้งมีสีเหลืองสดกว่าสีของไพลในท้องตลาด สารประกอบทางเคมีในไพลไม่เกิดเปลี่ยนแปลงในทางลดลงเมื่อเทียบกับไพลสดและส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและมาตรฐานของสถาบันมาตรฐานอุตสหกรรม มีเพียงสาร DMPBD ที่มีมากกว่ามาตรฐานซึ่งมากกว่าทั้งไพลสดและไพลแห้ง ทั้งนี้อาจส่งผลเนื่องจากพื้นที่เพาะปลูก

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟจากการจำลองสถานการ์พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะแก่การอบแห้ง คือ 50 ^{O}C อากาศข้าม

เครื่องทำระเหย 75-80 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของอากาศ 0.621 m^3/s ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำสุด

จากการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ตามเงื่อนไขที่กำหนดพบว่าการอบแห้งไพล มีค่าใช้จ่ายรวมในการดำเนินการอบแห้ง 130.65 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต โดยแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 6.83 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า 22.09 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต ค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษา 2.43 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต ค่าวัตถุดิบ 35.71 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิด ค่าแรงงาน 64.29 บาทต่อกิโลกรัมผลผลิต เมื่อนำไปใช้ในเชิงธุรกิจจะสามารถคืนทุนได้ในเวลา 1.70 ปี

ข้อเสนอแนะ

1. อาจเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้โดยการนำระบบถาดหมุนเข้ามาร่วมเนื่องจากผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับอากาศอบแห้งและได้รับคลื่นไมโครเวฟอย่างสม่ำเสมอ

2. ควรมีการศึกษาช่วง pulse ให้มากขึ้นช่วงขึ้นเพื่อจะได้ช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการอบแห้งมากที่สุด

3. หากมีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นควรศึกษาหาช่วงเวลาในการให้พลังงานไมโครเวฟในเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีความไว ต่อพลังงานไมโครเวฟไม่เท่ากัน

ข้อควรระวัง

1. ระบบไมโครเวฟประกอบขึ้นด้วยชุด high voltage ซึ่งเป็นอันตราย จะต้องมีการระมัดระวังและทำการ short circuit ก่อนทำการปรับเปลี่ยนระบบ

2. เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟไปสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าในระหว่างที่เครื่องทำงานอยู่ จึงไม่ควรเข้าไปอยู่ใกล้เป็นเวลานาน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. **สมุนไพรกับงานสารธารณสุขมูลฐาน.** http://www.dms.moph.go.th/Section4/402.htm.

กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. **สมุนไพรกับงานสาธารณสุขมูลฐาน การทำแห้งสมุนไพร.** http://www.dms.moph.go.th/Section4/402b.htm

ฐานิตย์ เมธิยานนท์. 2541. **การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม.** วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ทรงกฤต ก๋าบุญเรือง, ศรเพชร เขียวอ้าย และสารศิลป์ พิมสาร. 2541. **เครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับเตาอบลำไย.** โครงงานปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 70 น.

เทวรัตน์ ทิพยวิมล. 2545. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.** วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

วสันต์ ด้วงคำจันทร์. 2541. **เครื่องอบแห้งผักและผลไม้ในระบบ Heat Pump Dryer.** โครงงานวิศวกรรมการอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ. นครปฐม. 58 น.

วันดี กฤษณพันธ์. 2537. **สมุนไพรน่ารู้.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 257 น.

สมบัติ ขอวิวัฒนา. 2529. **กรรมวิธีการอบแห้ง.** ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 284 น.

สมพร หิรัญรามเดช (ภูติยานันท์). 2527. **เอกสารงานวิจัยเรื่องการสำรวจการใช้สมุนไพรของแพทย์แผนโบราณ.** ภาควิชาเภสัชเวท คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 71 น.

สมยศ เชิญอักษร และสุทธิศักดิ์ ภัทรสถาพรกุล. 2543. **การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนด้วยชุดกาลักความร้อน.** รายงานการประชุมประจำปี 2543. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 137-145.

สมยศ เชิญอักษร และเทวรัตน์ ทิพยวิมล. 2546. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน**. รายงานการประชุมประจำปี 2546. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 367-374.

สุทธิศักดิ์ ภัทรสถาพรกุล. 2543. **การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ. นครปฐม. 123 น.

สุปรียา ยืนยงสวัสดิ์. **การนำสมุนไพรมาเป็นยาสัตว์**. ภาควิชาเภสัชเวทและเภสัชพฤกษศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ http://herbal.pharmacy.psu.ac.th/Article/01-46/herbal-animal.pdf.

ศูนย์กลางวัตถุดิบสมุนไพรครบวงจร. **ราคาสมุนไพร.** http://www.thaipun.com/webboard/sale_Question.asp?GID=56

Aviara, N.A., O.O. Ajibala, S.A. Oni. 2004. **Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characterics of Soya Bean.** Biosystem Engineering, 87(2): 179-190.

Bala, B. K. 1997. **Drying and storage of cereal grains**. Science Publishers, Inc., USA.

Brooker, Donald B., Fred W. Bakker-Arkema and Carl W. Hall. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. Van Nostrand Reinhold, USA.

Chau Kian Jon, Arun S. Mujumdar, Chou Siaw Kiang, Ho Juay Choy and Mohammad Nural Alam Hawlader. 2000. **Heat Pump Drying Systems : Principles, Applications and Potential**, P 95-134. In Development in Drying Volume II Drying of Food and Agro-

Product, ed. Arun S. Mujumdar and Sirikalaya Suvachittanont. Kasetsart university Bangkok, Thailand.

Guillermo H. Crapiste and Enrique Rotstein. 1997. **Design and Performance Evaluation of Dryers**, P 125-166. In Handbook of Food Engineering Practice, ed. Kenneth J. Valentas, Enrique Rotstein and R. Paul Singh. CRC Press, Boca Raton.

Kaleemullah, S. and R. Kailappan. 2004. **Moisture Sorption Isotherms of Red Chillies**. Biosystems Engineering, 88(1):95-104.

Jay S., Oliver T.N. 1994. Energy **Consumption for Industrial Drying Process in the United Kingdom**. Drying 94, Vol. A, Proc 9th International Drying Symposium (IDS'94), Gold Coast, Australia, pp. 683-690.

Jia X., S. Clements and P. Jolly. 1993. **Study of heat pump assisted microwave drying**. Drying Technology 11(7): 1583-1616.

Khraisheh M. A. M., T.J.R. Cooper and T. R. A. Magee. 1997. **Microwave and air drying I. Fundamental Considerations and Assumptions for the Simplified Thermal Calculations of Volumetric Power Absorption.** Journal of Food Engineering, 33: 207-219.

Lashsasni, S., M. Kouhila, M. Mahrouz, N. Kechaou. 2002. **Experimental study and modeling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*).** Journal of Food Engineering, 55:201-207.

Mayer, J. P. and G. P. Greyvenstein. 1992. **The drying of grain with heat pumps in south africa : A techno-economic analysis**. Int. J. Energy Res., 16: 13-20.

Maskan, M. 2001. **Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying**. Journal of Food Engineering, 48: 177-182.

Pabis, S., Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. 1998. **Grain Drying theory and Practice**. John Wiley & Sons, Inc., USA.

Prasertsan, S., P. Sean-saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul. 1996. **Heat pump dryer Part1: Simulation of the Model.** Int. J. Energy Res., 20: 1067-1079.

Prasertsan, S., P. Sean-saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul. 1997. **Heat pump dryer Part2: Results of Simulation.** Int. J. Energy Res, 21 : 1-20.

Prasertsan, S. and P. Sean-saby. 1998. **Heat pump drying of agricultural materials.** Drying Technology, 16(1&2): 235-250.

Ryozo Toei, Morio Okazaki and Hajime Tamon. 1994. **Conventional Basic Design for Convection or Conduction Dryers.** Drying Technology, 12(1&2): 59-97.

Schiffmann, R. F. 1987. **Microwave and Dielectric Drying**, P327-356. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A.S. Mujumdar. Maecel Dekker, New York.

Sharma G.P. and Suresh Prasad. 2001. **Drying of garlic (Allium sativum) cloves by microwave-hot air combination.** Journal of Food Engineering, 50: 99-105.

Sharma G.P. and Suresh Prasad. 2002. **Dielectric properties of garlic (Allium sativum) at 2450 MHz as function of temperature and moisture content.** Journal of Food Engineering, 52: 343-348.

Shivhare, U.S., G.S.V. Raghavan and R.G. Bosisio. 1992a. **Microwave drying of corn: II. Constant Power, Continuous Operation.** Transactions of the ASAE, 35(3): 925-957.

_________. 1992b. **Microwave drying of corn: III Constant Power, Intermittent Operation.** Transactions of the ASAE, 35(3): 959-962.

Sosle V., G.S.V. Raghavan and R. Kittler. 2003. Low-**Temperature Drying Using a Versatile Heat Pump Dehumidifier.** Drying Technology, 21(3): 539-554.

Tulasidas T.N., G.S.V. Raghavan and A.S. Mujumdar. 1995. **Microwave drying of Grapes in a Single mode cavity at 2540 MHz-I: Drying Drying Kinetics.** Drying Technology, 13(8&9):1949-1971.

Tomas Funebo and Thomas Ohlsson. 1998. **Microwave-assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom.** Journal of Food Engineering, 38: 353-367.

Zylla, R., S.P. Abbas, K.W. Tai, S. Devotta, F.A. Watson and F.A. Holland. 1982. **The potential for heat pumps in drying and dehumidification system I: Theoretical considerations.** Int. J. Energy Res., 6: 305-322.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงา ไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	181.17	180.43	194.6	196.6	212	205.84	194.61	210.85	194.71	196.51	207.51	213.52	202.89	-
30	98.57	114.57	131.59	141.17	155.61	139.98	125.92	135.33	112.03	107.23	124.76	135.03	110.66	1
60	47.99	79.65	94.99	106.47	121.81	99.94	86.86	87.57	58.59	50.75	62.43	71.11	41.29	1
90	12.92	45.03	58.93	75.01	86.85	66.22	52.08	46.67	20.59	15.84	20.45	21.07	2.05	1
120	0.11	11.55	24.54	37.84	49.76	31.2	20.23	12.49	2.31	1.35	0.71	2.53	0.35	1

ตารางผนวกที่ 2 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงา ไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	208.3	199.83	211.81	209.26	205.08	208.06	207.09	202.63	235.71	212.31	198.5	207.25	235.17	-
30	134.03	147.54	166.86	166.22	168.06	166.21	154.86	142.47	170.85	147.31	133.15	140.72	156.5	1
60	82.9	110.97	129.55	133.01	130.37	132.37	114.78	95.2	113.62	94.36	77.2	82.3	85.74	0.9
90	38.68	72.38	93.52	96.72	100.36	101.66	78.53	51.37	60.45	42.64	30.61	27.92	21.89	1
120	7.97	38.03	57.11	58.94	67.12	65.14	41.92	15.17	19.26	11.17	4.61	1.33	1.06	0.9

ตารางผนวกที่ 3 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{o}C การทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงาไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	208.86	237.1	264.57	245.36	254.37	244.56	257.83	246.59	205.12	227.28	228.6	210.08	237.48	-
30	145.25	193.39	223.49	207.56	217.25	207.39	217.99	203.63	157.92	170.15	170.73	141.74	157.99	1
60	79.99	150.62	178.95	169.98	179.36	170.41	178.42	159.29	111.08	114	113.23	80.76	63.17	1
90	50.94	105.46	134.6	130.75	139.83	131.36	138.4	114.16	68.19	60.56	56.18	20.81	23.93	1
120	23.5	67.01	89.39	92.1	101.81	93.15	97.64	68.76	14.13	5.65	9.03	7.02	7.3	1

ตารางผนวกที่ 4 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{o}C การทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงาไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	256.12	295.91	261.05	269.64	261.09	261.53	263.71	274.9	264.45	258.86	252.91	236.32	251.13	-
30	164.63	217.82	192.36	201.47	202.03	203.67	187.98	179.95	162.86	153.75	141.98	119.43	115.64	1.5
60	90.21	157.59	135.15	150.58	153.58	153.8	127.98	107.23	81.45	73.24	58.61	40.11	25.53	1.3
90	19.24	89.9	73.58	92.29	100.55	98.95	64.97	39.72	21.66	13.74	7.83	2.74	1.24	1.2
120	1.41	22.37	16.48	32	40.86	43.64	18.12	5.75	0.05	0.59	0.06	1.77	0.2	1.5

ตารางผนวกที่ 5 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงา ไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	247.73	260.1	255.15	238.03	226.73	250.83	263.03	234.04	265.46	275.05	236.98	277.09	258.15	-
30	148.08	178.39	178.18	177.65	166.79	183.93	185.24	130.33	154.83	149.25	113.19	150.78	108.18	1.5
60	74	117.65	119.03	116.99	119.78	134.14	95.31	62.49	79.58	68.47	36.24	60.6	21.43	1.5
90	9.57	48.42	53.41	57.27	64.3	74.5	57.33	15.46	18.1	6.72	-0.9	3.31	1.13	1
120	0.29	2.3	4.38	8.19	14.66	21.12	14.98	3.48	0.01	0	0	3.65	0	1.5

ตารางผนวกที่ 6 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C การทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงา ไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	208.86	237.1	264.57	245.36	254.37	244.56	257.83	246.59	205.12	227.28	228.6	210.08	237.48	-
30	145.25	193.39	223.49	207.56	217.25	207.39	217.99	203.63	157.92	170.15	170.73	141.74	157.99	1.5
60	79.99	150.62	178.95	169.98	179.36	170.41	178.42	159.29	111.08	114	113.23	80.76	63.17	1.5
90	50.94	105.46	134.6	130.75	139.83	131.36	138.4	114.16	68.19	60.56	56.18	20.81	23.93	1
120	23.5	67.01	89.39	92.1	101.81	93.15	97.64	68.76	14.13	5.65	9.03	7.02	7.3	1.5

ตารางผนวกที่ 7 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงาไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	224.98	244.37	280.39	276.27	285.31	271.01	298.43	264.12	249.18	288.99	298.33	271.86	306.15	-
30	119.28	162.2	193.99	201.03	218.81	210.87	227.74	180.76	153.81	193.81	204.63	176.85	201.8	1.4
60	49.5	98.22	137.52	129.21	118.97	144.53	148.91	97.32	68.11	98.8	108.01	77.25	84.1	1.4
90	1.46	40.12	94.94	75	66.18	100.21	91.82	32.18	11.73	24.72	23.98	7.24	3.43	1.3
120	0	1.29	28.2	44.7	27.03	41.19	32.82	1.33	0.62	2.75	0.82	1.57	0.75	1.3

ตารางผนวกที่ 8 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงาไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	260.19	287.27	297.41	266.68	244.95	292.75	276.76	278.8	278.9	257.4	260.42	243.06	246.36	-
30	167.67	213.68	221.85	205.58	184.24	224.44	193.49	174.61	163.2	132.7	136.53	108.54	86.81	1.3
60	84.59	148.07	161.87	153.23	131.16	169.87	126.34	85.47	77.02	46.69	43.75	25.28	5.94	1.4
90	11.75	81.07	98.61	95.52	77.59	106.56	67.2	24.91	19.01	4.29	0	0.2	0.36	1.5
120	0.74	16.11	32.26	38.77	26.84	51.74	18.22	2.22	0.72	1.82	0	0.16	0.01	1.3

ตารางผนวกที่ 9 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{o}C การทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงา ไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	219.16	268.91	260.4	260.36	252.7	260.59	280.2	267.46	282	248.32	248.24	254.26	282.31	-
30	119.66	175.66	165.76	189.11	177.34	187.76	191.56	166.17	202.05	129.52	138.6	142.27	143.26	1.4
60	51.44	109.76	106.61	137.48	129.87	101.32	125.26	85.56	122.32	53.79	50.45	45.45	32.2	1.3
90	22	34.85	42.64	76.04	76.63	77.06	78.65	33.67	37.66	28	16	12	11	1.3
120	6	3	7	13.37	17.26	19.09	19.89	14	17	13	7	6	3	1.5

ตารางผนวกที่ 10 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{o}C การทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงา ไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	238.65	251.51	226.48	215.34	247.53	214.73	230.82	233.55	217.46	220.19	243.13	201.24	196.01	-
30	91.34	159.36	141.04	142.01	168.07	143.72	135.54	132.95	97.2	85.87	105.24	63.04	49.85	1.5
60	36.13	73.79	56.37	61.13	89.04	68.27	56.37	58.05	24.19	0.92	32.7	9.8	2.75	1.5
90	1.09	10.39	18	22.93	32.87	22.76	14.22	16.43	3.21	0.02	1.99	2	0.84	1.5
120	0	0.3	0.09	0.27	0.6	0	0.93	0.1	0	0	0.05	0	0	1.5

ตารางผนวกที่ 11 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงาไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	251.22	194.71	224.47	291.16	305	328.8	279.74	289.8	284.62	310.21	312.2	261.08	278.25	-
30	123.4	102.67	139.15	214.64	210.01	254.36	181.59	177.86	169.01	183.71	162.08	138.95	137.57	1.5
60	31.78	22.27	71.58	144.58	162.33	176.35	100.74	91	72.59	86.34	85.97	48.42	36.42	1.5
90	3.02	2.34	12.09	62.52	76.29	87.54	24	10.91	11.54	10.77	7.67	0.63	0.16	1.7
120	0.53	1.47	1.41	9.2	13.93	23.51	1.51	0	2.89	0.44	2.04	0	0	1.5

ตารางผนวกที่ 12 ผลการระเหยน้ำด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C การทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)													พลังงาไฟฟ้า (kWh)
	ถาดที่1	ถาดที่2	ถาดที่3	ถาดที่4	ถาดที่5	ถาดที่6	ถาดที่7	ถาดที่8	ถาดที่9	ถาดที่10	ถาดที่11	ถาดที่12	ถาดที่13	
0	267.76	244.58	262.24	281.31	293.27	287.07	244.05	276.05	262.58	290.46	297.15	270.6	240.38	-
30	156.47	144.6	172.82	191.92	204.8	197	139.39	162.77	143.93	155.98	162.58	126.91	114.2	1.4
60	55.77	41.84	86.29	82.72	149.09	158	88.73	79.59	67.86	71.01	76.64	53.44	13.44	1.5
90	1.3	2.2	21.51	55.76	73.96	75.78	24.21	20.91	4.21	4.03	1.85	0.36	0.19	1.5
120	0	0.23	5.95	10.54	23.67	24.51	2.5	0.12	0.23	0	0	0	0	1.5

ตารางผนวกที่ 13 ผลการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
(นาที)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน(kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน(kWh)
0	20012.08	270.49	-	19997.54	251.88	-	20001.54	291.92	-
3	17843.49	234.11	9.7	17898.43	214.91	8.0	17983.83	252.41	8.3
6	16128.07	201.99	8.1	16265.41	186.17	8.8	15833.14	210.27	8.0
9	14649.37	174.31	8.5	14696.28	158.57	8.4	14552.20	185.17	8.3
12	13234.59	147.81	8.8	13084.98	130.22	8.6	13332.36	161.26	8.0
15	11861.71	122.11	8.7	11681.39	105.52	8.4	12140.21	137.90	8.2
18	10619.42	98.85	9.0	10412.84	83.20	8.7	11021.04	115.97	7.8
21	9512.95	78.13	8.8	9304.98	63.71	8.3	9970.85	95.39	8.1
24	8571.63	60.50	8.6	8332.93	46.61	8.3	9008.57	76.53	8.2
27	7810.42	46.25	8.4	7680.86	35.14	8.5	8117.50	59.07	8.2
30	7182.87	34.50	8.4	7158.00	25.94	8.5	7364.37	44.31	8.0
33	6727.34	25.97	8.3	6805.34	19.73	8.3	6727.79	31.84	8.2
36	6409.37	20.01	8.5	6605.93	16.22	8.4	6270.64	22.88	8.3
39	6201.02	16.11	8.6	6492.35	14.23	8.5	5961.80	16.83	7.8
42	6088.50	14.01	8.4	6422.38	13.00	8.6	5769.55	13.06	8.0
45	6012.77	12.59	8.6	6394.42	12.50	8.6	5640.78	10.54	7.7
48	5973.10	11.84	8.4	6377.36	12.20	8.5	5573.31	9.22	8.0

ตารางผนวกที่ 14 ผลการอบแห้งพริกด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
(นาที)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน(kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)
0	20008.16	329.90	8.7	20000.92	332.94	9.0	19997.86	274.79	8.2
3	17633.09	278.87	8.8	17577.12	280.49	8.5	17907.52	235.58	8.1
6	15409.09	231.08	8.2	15657.61	238.94	9.5	16266.22	204.82	8.5
9	13583.07	191.85	8.2	13656.86	195.63	8.8	14900.26	179.23	8.5
12	11732.96	152.10	8.6	11950.71	158.69	9.2	13288.83	149.03	8.5
15	9911.66	112.96	9.0	10333.15	123.68	8.5	11882.67	122.68	8.5
18	8244.85	77.15	9.5	8894.96	92.55	9.0	10515.07	97.05	8.7
21	6866.25	47.53	8.3	7640.49	65.39	8.0	9278.45	73.87	8.5
24	5887.55	26.50	8.7	6538.40	41.54	8.5	8213.06	53.91	8.3
27	5407.81	16.19	8.0	5980.22	29.45	8.5	7348.44	37.71	8.5
30	5261.13	13.04	7.0	5534.55	19.81	8.0	6746.70	26.43	8.0
33	5206.26	11.86	7.0	5304.69	14.83	9.0	6298.47	18.03	8.2
36	5187.66	11.46	8.7	5218.40	12.96	9.0	6041.10	13.21	8.2

ตารางผนวกที่ 15 ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
(นาที)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน(kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)
0	20001.83	260.24	-	20001.99	278.77	-	19998.98	284.63	-
3	14579.15	162.58	7.0	14462.67	173.87	7.3	15488.41	197.88	6.8
6	11091.14	99.76	7.0	10911.90	106.63	6.7	12188.06	134.41	7.0
9	9167.06	65.10	7.0	8826.24	67.14	7.0	9560.87	83.88	6.5
12	8073.40	45.40	6.7	7740.28	46.57	6.8	8058.29	54.98	6.5
15	7448.59	34.15	6.5	7056.06	33.62	6.5	7234.73	39.14	6.7
18	7031.32	26.64	6.8	6644.06	25.82	6.7	6761.34	30.04	6.5
21	6762.98	21.80	6.5	6356.50	20.37	6.8	6404.29	23.17	6.5
24	6598.34	18.84	6.7	6195.09	17.31	6.5	6163.12	18.53	6.8
27	6480.47	16.72	6.8	6064.85	14.85	6.8	6020.10	15.78	6.5
30	6349.59	14.36	7.0	6003.34	13.68	6.7	5954.77	14.53	4.0
33	6304.88	13.55	6.0	5963.96	12.94	6.5	5872.00	12.93	7.5

ตารางผนวกที่ 16 ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
(นาที)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน(kWh)
0	20005.28	280.40	-	19993.94	273.01	-	19998.52	331.03	-
3	14391.87	173.66	7.5	13177.06	145.83	7.7	15047.96	224.33	7.7
6	11161.11	112.23	7.2	10065.52	87.78	7.3	9304.07	100.53	7.8
9	9124.79	73.51	7.3	8055.17	50.28	7.6	7268.39	56.66	7.5
12	7905.14	50.32	7.7	7066.16	31.83	7.7	6289.25	35.55	8.0
15	7153.17	36.02	7.8	6579.00	22.74	8.0	5587.27	20.42	8.0
18	6671.95	26.87	7.8	6339.79	18.28	7.7	5542.42	19.46	8.0
21	6349.64	20.74	7.2	6213.50	15.92	8.0	5403.59	16.46	8.0
24	6125.32	16.47	7.0	6139.76	14.54	8.0	5308.04	14.40	8.0
27	5988.78	13.88	6.7	6060.72	13.07	7.8	5268.52	13.55	8.0
30	5887.34	11.95	6.8	6039.23	12.67	8.0	5241.30	12.97	8.0

ตารางผนวกที่ 17 ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 40 ^{O}C

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
(นาที)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)
0	20003.14	269.91	-	19997.98	273.64	-	19997.35	276.15	-
3	14615.97	170.29	7.7	13739.29	156.70	8.0	13081.26	146.06	7.5
6	10858.44	100.80	7.9	10139.61	89.45	8.2	9873.14	85.71	8.2
9	9065.18	67.64	7.7	8234.82	53.86	7.8	8229.32	54.79	8.0
12	8041.66	48.71	7.7	7262.85	35.70	7.8	7363.87	38.51	7.8
15	7337.55	35.69	7.7	6723.72	25.63	8.1	6774.34	27.43	7.5
18	6917.59	27.92	7.7	6357.65	18.79	7.9	6377.02	19.95	7.0
21	6572.62	21.54	7.7	6169.17	15.26	7.8	6121.77	15.15	7.7
24	6330.72	17.07	7.7	6072.96	13.47	7.9	6069.94	14.18	7.8
27	6099.87	12.80	7.7	5979.80	11.73	7.8	5992.49	12.72	9.0
30	6051.67	11.91	7.7	5939.15	10.97	7.9	5952.82	11.97	7.5

ตารางผนวกที่ 18 ผลการอบแห้งไพลด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศ 50 ^{O}C

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
(นาที)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)	น้ำหนัก (g)	ความชื้น (%db)	พลังงาน (kWh)
0	20005.30	252.17	-	20001.29	366.24	-	19997.86	334.92	-
3	12370.23	117.76	7.0	12810.60	198.62	8.2	13332.34	189.96	8.5
6	9347.01	64.54	8.0	8557.69	99.48	8.0	9123.14	98.41	8.5
9	7755.63	36.53	9.0	6547.09	52.62	8.2	7132.67	55.12	7.5
12	6995.46	23.15	8.0	5587.86	30.26	8.9	5999.06	30.47	8.0
15	6579.79	15.83	8.5	5110.49	19.13	7.6	5501.60	19.65	8.5
18	6397.95	12.63	9.0	4910.32	14.46	8.3	5239.86	13.96	9.4
21	6245.36	9.94	8.5	4785.75	11.56	8.2	5086.51	10.62	8.6
24	6157.72	8.40	9.0	4732.48	10.32	8.2	4989.97	8.52	9.0

ภาคผนวก ข

โปรแกรม MHPD1.0

โปรแกรม MHPD1.0

```
VERSION 5.00
Object = "{5E9E78A0-531B-11CF-91F6-C2863C385E30}#1.0#0"; "msflxgrd.ocx"
Object = "{F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0"; "comdlg32.ocx"
Begin VB.Form Form1
  AutoRedraw     =  -1  'True
  BackColor      =  &H80000005&
  Caption        =  "PHDSIMULATION"
  ClientHeight   =  5745
  ClientLeft     =  75
  ClientTop      =  1950
  ClientWidth    =  11685
  FillColor      =  &H00404000&
  ForeColor      =  &H80000000&
  LinkTopic      =  "Form1"
  ScaleHeight    =  5745
  ScaleWidth     =  11685
  WindowState    =  2  'Maximized
  Begin MSFlexGridLib.MSFlexGrid MSFlexGrid1
    Height         =  4095
    Left           =  120
    TabIndex       =  38
    Top            =  4200
    Width          =  11775
    _ExtentX       =  20770
    _ExtentY       =  7223
    _Version       =  393216
    AllowUserResizing=  3
  End
  Begin VB.Frame Frame2
```

```
Caption        =   "Simulation Result"
Height         =   3735
Left           =   6120
TabIndex       =   20
Top            =   240
Width          =   5175
Begin VB.Label Label36
  BorderStyle    =   1  'Fixed Single
  Height         =   495
  Left           =   2520
  TabIndex       =   37
  Top            =   2760
  Width          =   1455
End
Begin VB.Label Label35
  Caption        =   "COP"
  Height         =   375
  Left           =   240
  TabIndex       =   36
  Top            =   2880
  Width          =   615
End
Begin VB.Label Label34
  Caption        =   "MJ/kg"
  Height         =   495
  Left           =   4080
  TabIndex       =   35
  Top            =   2400
  Width          =   975
End
```

```
Begin VB.Label Label33
   BorderStyle     =   1  'Fixed Single
   Height          =   495
   Left            =   2520
   TabIndex        =   34
   Top             =   2280
   Width           =   1455
End
Begin VB.Label Label32
   Caption         =   "SEC"
   Height          =   375
   Left            =   240
   TabIndex        =   33
   Top             =   2400
   Width           =   735
End
Begin VB.Label Label31
   Caption         =   "kg/kW hr"
   Height          =   375
   Left            =   4080
   TabIndex        =   32
   Top             =   1920
   Width           =   855
End
Begin VB.Label Label30
   BorderStyle     =   1  'Fixed Single
   Height          =   495
   Left            =   2520
   TabIndex        =   31
   Top             =   1800
```

```
  Width          =  1455
End
Begin VB.Label Label29
  Caption        =  "SMER"
  Height         =  375
  Left           =  240
  TabIndex       =  30
  Top            =  1920
  Width          =  975
End
Begin VB.Label Label28
  Caption        =  "kg/hr"
  Height         =  375
  Left           =  4080
  TabIndex       =  29
  Top            =  1440
  Width          =  615
End
Begin VB.Label Label27
  BorderStyle    =  1  'Fixed Single
  Height         =  495
  Left           =  2520
  TabIndex       =  28
  Top            =  1320
  Width          =  1455
End
Begin VB.Label Label26
  Caption        =  "Moisture  extraction  Rate"
  Height         =  375
  Left           =  240
```

```
  TabIndex      =  27
  Top           =  1320
  Width         =  2295
End
Begin VB.Label Label25
  Caption       =  "%db./hr"
  Height        =  375
  Left          =  4080
  TabIndex      =  26
  Top           =  960
  Width         =  735
End
Begin VB.Label Label24
  BorderStyle   =  1  'Fixed Single
  Height        =  495
  Left          =  2520
  TabIndex      =  25
  Top           =  840
  Width         =  1455
End
Begin VB.Label Label23
  Caption       =  "%db."
  Height        =  375
  Left          =  4080
  TabIndex      =  24
  Top           =  360
  Width         =  735
End
Begin VB.Label Label22
  Caption       =  "Final  moisture  content"
```

```
      Height         =   495
      Left           =   240
      TabIndex       =   23
      Top            =   360
      Width          =   1815
   End
   Begin VB.Label Label21
      BorderStyle    =   1  'Fixed Single
      Height         =   495
      Left           =   2520
      TabIndex       =   22
      Top            =   360
      Width          =   1455
   End
   Begin VB.Label Label20
      Caption        =   "Drying Rate"
      Height         =   375
      Left           =   240
      TabIndex       =   21
      Top            =   840
      Width          =   1215
   End
End
Begin MSComDlg.CommonDialog CommonDialog1
   Left           =   11400
   Top            =   3360
   _ExtentX       =   847
   _ExtentY       =   847
   _Version       =   393216
   DialogTitle    =   "Export to Excel"
```

```
End
Begin VB.Frame Frame1
  Caption       =  "Drying  Conditions"
  Height        =  3735
  Left          =  120
  TabIndex      =  0
  Top           =  240
  Width         =  5655
  Begin VB.Label Label19
    Caption       =  "hr"
    Height        =  375
    Left          =  4080
    TabIndex      =  19
    Top           =  2880
    Width         =  975
  End
  Begin VB.Label Label18
    BorderStyle   =  1  'Fixed Single
    Height        =  495
    Left          =  2400
    TabIndex      =  18
    Top           =  2640
    Width         =  1335
  End
  Begin VB.Label Label17
    Caption       =  "Period  of  drying"
    Height        =  495
    Left          =  120
    TabIndex      =  17
    Top           =  2640
```

```
  Width         =  1815
End
Begin VB.Label Label16
  Caption       =  "%db."
  Height        =  495
  Left          =  4080
  TabIndex      =  16
  Top           =  2280
  Width         =  1455
End
Begin VB.Label Label15
  BorderStyle   =  1  'Fixed Single
  Height        =  495
  Left          =  2400
  TabIndex      =  15
  Top           =  2160
  Width         =  1335
End
Begin VB.Label Label14
  Caption       =  "Initail  moisture  content"
  Height        =  615
  Left          =  120
  TabIndex      =  14
  Top           =  2280
  Width         =  2055
End
Begin VB.Label Label13
  Caption       =  "kg"
  Height        =  375
  Left          =  4080
```

```
  TabIndex      =  13
  Top           =  1800
  Width         =  1335
End
Begin VB.Label Label12
  BorderStyle   =  1  'Fixed Single
  Height        =  495
  Left          =  2400
  TabIndex      =  12
  Top           =  1680
  Width         =  1335
End
Begin VB.Label Label11
  Caption       =  "Initail  weight  of  product"
  Height        =  495
  Left          =  120
  TabIndex      =  11
  Top           =  1800
  Width         =  1815
End
Begin VB.Label Label10
  Caption       =  "kg water/kg dry air"
  Height        =  615
  Left          =  4080
  TabIndex      =  10
  Top           =  1320
  Width         =  1455
End
Begin VB.Label Label9
  BorderStyle   =  1  'Fixed Single
```

```
  Height        =  495
  Left          =  2400
  TabIndex      =  9
  Top           =  1200
  Width         =  1335
End
Begin VB.Label Label8
  Caption       =  "Humidity Ratio  of  hot  air"
  Height        =  495
  Left          =  120
  TabIndex      =  8
  Top           =  1320
  Width         =  1935
End
Begin VB.Label Label7
  Caption       =  "kg/s"
  Height        =  615
  Left          =  4080
  TabIndex      =  7
  Top           =  840
  Width         =  975
End
Begin VB.Label Label6
  BorderStyle   =  1  'Fixed Single
  Height        =  495
  Left          =  2400
  TabIndex      =  6
  Top           =  720
  Width         =  1335
End
```

```
Begin VB.Label Label5
   Caption         =   "Mass  flow rate  of  hot  air"
   Height          =   615
   Left            =   120
   TabIndex        =   5
   Top             =   840
   Width           =   2175
End
Begin VB.Label Label4
   Caption         =   "C"
   Height          =   255
   Left            =   4200
   TabIndex        =   4
   Top             =   360
   Width           =   615
End
Begin VB.Label Label3
   Caption         =   "o"
   Height          =   255
   Left            =   4080
   TabIndex        =   3
   Top             =   240
   Width           =   255
End
Begin VB.Label Label2
   BorderStyle     =   1  'Fixed Single
   Height          =   495
   Left            =   2400
   TabIndex        =   2
   Top             =   240
```

```
      Width          =  1335
    End
    Begin VB.Label Label1
      Caption        =  "Temperature of  hot air"
      Height         =  615
      Left           =  120
      TabIndex       =  1
      Top            =  360
      Width          =  2175
    End
  End
  Begin VB.Menu mnSim
    Caption        =  "&Simutation"
    Begin VB.Menu mnCal
      Caption        =  "&Calculate"
    End
    Begin VB.Menu mnExit
      Caption        =  "&Exit"
    End
  End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub mnCal_Click()
Form2.Show
'Form1.Enabled = False
End Sub
```

```
Private Sub mnExit_Click()
End
End Sub

Private Sub mnExport_Click()
Dim n As Integer, J   As Integer
'Form2.Show
DT = Form2.Text6.Text
deltat = 0.5
num = DT / deltat
Dim GbtTable  As String
CommonDialog1.CancelError = True
On Error GoTo ErrHandler
CommonDialog1.Filter = "Microsolf  Excel (*.XLS)|*.XLS"
CommonDialog1.ShowSave
GbtTable = CommonDialog1.FileName
Open GbtTable For Output As 3
For I = 0 To num + 1
  For J = 0 To 20
    Form1.MSFlexGrid1.Row = I
    Form1.MSFlexGrid1.Col = J
    Print #3, Form1.MSFlexGrid1.Text; "                    ";
  Next J
  Print #3, " "
Next I

ErrHandler:
    Exit Sub
Close #3
End Sub
```

```
Private Sub mnPrint_Click()
CommonDialog1.ShowPrinter
End Sub

Private Sub MSFlexGrid1_RowColChange()
'Form1.Caption = MSFlexGrid1.Text
End Sub
****************End of form1****************************
VERSION 5.00
Begin VB.Form Form2
  BackColor      =  &H80000005&
  BorderStyle    =  1  'Fixed Single
  Caption        =  "  "
  ClientHeight   =  5355
  ClientLeft     =  1800
  ClientTop      =  2205
  ClientWidth    =  6900
  FillColor      =  &H80000006&
  ForeColor      =  &H80000000&
  LinkTopic      =  "Form2"
  MaxButton      =  0   'False
  MinButton      =  0   'False
  ScaleHeight    =  5355
  ScaleWidth     =  6900
  Begin VB.OptionButton Option2
    BackColor      =  &H80000004&
    Caption        =  "MHPD"
    Height         =  495
    Left           =  3840
```

```
   TabIndex        =   23
   Top             =   3720
   Width           =   1215
End
Begin VB.OptionButton Option1
   BackColor       =   &H80000004&
   Caption         =   "HPD"
   Height          =   495
   Left            =   2160
   TabIndex        =   22
   Top             =   3720
   Value           =   -1  'True
   Width           =   1215
End
Begin VB.CommandButton Command1
   Caption         =   "Clear"
   Height          =   375
   Left            =   3240
   TabIndex        =   21
   Top             =   4680
   Width           =   1215
End
Begin VB.CommandButton cmdCancel
   Caption         =   "Cancel"
   Height          =   375
   Left            =   4560
   TabIndex        =   18
   Top             =   4680
   Width           =   1215
End
```

```
Begin VB.CommandButton cmdCal
   Caption         =   "OK"
   Height          =   375
   Left            =   1920
   TabIndex        =   17
   Top             =   4680
   Width           =   1215
End
Begin VB.TextBox Text7
   Height          =   495
   Left            =   2760
   TabIndex        =   16
   Text            =   "64.36"
   Top             =   2640
   Width           =   2055
End
Begin VB.TextBox Text5
   Height          =   495
   Left            =   2760
   TabIndex        =   14
   Text            =   "350"
   Top             =   2160
   Width           =   2055
End
Begin VB.TextBox Text4
   Height          =   495
   Left            =   2760
   TabIndex        =   11
   Text            =   "20"
   Top             =   1680
```

```
  Width          =  2055
End
Begin VB.TextBox Text3
  Height         =  495
  Left           =  2760
  TabIndex       =  8
  Text           =  "0.01715"
  Top            =  1200
  Width          =  2055
End
Begin VB.TextBox Text2
  Height         =  495
  Left           =  2760
  TabIndex       =  5
  Text           =  "0.621"
  Top            =  720
  Width          =  2055
End
Begin VB.TextBox Text1
  Height         =  495
  Left           =  2760
  TabIndex       =  1
  Text           =  "50"
  Top            =  240
  Width          =  2055
End
Begin VB.Label Label19
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "%"
  Height         =  375
```

```
  Left        =  5160
  TabIndex      =  20
  Top         =  2760
  Width        =  1095
End
Begin VB.Label Label18
  BackStyle     =  0  'Transparent
  Caption       =  "Bypass Air"
  Height       =  495
  Left        =  120
  TabIndex      =  19
  Top         =  2640
  Width        =  1455
End
Begin VB.Label Label11
  BackStyle     =  0  'Transparent
  Caption       =  "%db"
  Height       =  375
  Left        =  5160
  TabIndex      =  15
  Top         =  2160
  Width        =  495
End
Begin VB.Label Label10
  BackStyle     =  0  'Transparent
  Caption       =  "Initail  moisture  content"
  Height       =  495
  Left        =  120
  TabIndex      =  13
  Top         =  2280
```

```
  Width         =  1935
End
Begin VB.Label Label9
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "kg"
  Height         =  495
  Left           =  5160
  TabIndex       =  12
  Top            =  1680
  Width          =  975
End
Begin VB.Label Label8
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "Initail  weight  of  product"
  Height         =  375
  Left           =  120
  TabIndex       =  10
  Top            =  1800
  Width          =  1815
End
Begin VB.Label Label7
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "kg water/kg dry air"
  Height         =  495
  Left           =  5160
  TabIndex       =  9
  Top            =  1200
  Width          =  1455
End
Begin VB.Label Label6
```

```
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "Humidity ratio of hot air"
  Height         =  495
  Left           =  120
  TabIndex       =  7
  Top            =  1320
  Width          =  2055
End
Begin VB.Label Label5
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "kg/s"
  Height         =  375
  Left           =  5160
  TabIndex       =  6
  Top            =  720
  Width          =  495
End
Begin VB.Label Label4
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "Mass flow rate of hot air"
  Height         =  375
  Left           =  120
  TabIndex       =  4
  Top            =  840
  Width          =  2175
End
Begin VB.Label Label3
  BackStyle      =  0  'Transparent
  Caption        =  "C"
  Height         =  375
```

```
      Left          =   5280
      TabIndex       =   3
      Top           =   360
      Width          =   375
   End
   Begin VB.Label Label2
      BackStyle      =   0  'Transparent
      Caption        =   "o"
      Height         =   375
      Left           =   5160
      TabIndex       =   2
      Top            =   240
      Width          =   255
   End
   Begin VB.Label Label1
      BackStyle      =   0  'Transparent
      Caption        =   "Temperature  of  hot  air"
      Height         =   375
      Left           =   120
      TabIndex       =   0
      Top            =   360
      Width          =   1935
   End
End
Attribute VB_Name = "Form2"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Dim Start  As Integer, Finish As Integer, III As Integer, num As Integer
```

```
Dim Ma As Single, Map As Single, Mabp As Single, Mp As Single, BP As Single, BPF As
Single
Dim W1 As Single, W2 As Single, W3 As Single, Wfe As Single
Dim Qcdi As Single, Qe As Single, UAc As Single, UAe   As Single, MER As Single, SMER As
Single
Dim Pr1 As Single, Pr2 As Single, Tr1 As Single, Tr2 As Single, Tsatc As Single, Tsate As
Single, Tsup As Single
Dim C As Single, nv As Single, z As Single
Dim T As Single, deltat As Single, MR   As Single, M As Single, Mi As Single, Min As Single,
Meq As Single
Dim h1 As Single, h2 As Single, h3 As Single, v1 As Single, Mf As Single, Nrev As Single, CD
As Single, Wcom As Single
Function Hhfg(Tfg As Single) As Single
   Hhfg = 2502.535259 - 2.38576424 * Tfg
End Function
Function AA(TT, A, B, C, D, E As Single) As Single
AA = A + (B * (TT + 273.16)) + (C * (TT + 273.16) ^ 2) + (D * (TT + 273.16) ^ 3) + (E * (TT +
273.16) ^ 4)
End Function
Function AAA(TT, F, G As Single) As Single
AAA = (F * (TT + 273.16)) - (G * (TT + 273.16) ^ 2)
End Function
Function ABC(TT, B, C, D, E As Single) As Single
ABC = B + 2 * C * (TT + 273.16) + 3 * D * (TT + 273.16) ^ 2 + 4 * E * (TT + 273.16) ^ 3
End Function
Function FG(TT, F, G As Single) As Single
FG = F - 2 * G * (TT + 273.16)
End Function
Function Ps(AA, AAA, R As Single) As Single
Ps = (Exp(AA / AAA)) * R
```

```
End Function
Function PAVS(Pvs) As Single
   PAVS = (19.5322 + 13.6626 * (Log(0.00145 * Pvs)) + 1.17678 * (Log(0.00145 * Pvs)) ^ 2 - 
0.189693 * (Log(0.00145 * Pvs)) ^ 3 + 0.087453 * (Log(0.00145 * Pvs)) ^ 4 - 0.0174053 * 
(Log(0.00145 * Pvs)) ^ 5 + 0.00214768 * (Log(0.00145 * Pvs)) ^ 6 - 0.138343 * 10 ^ -3 * 
(Log(0.00145 * Pvs)) ^ 7 + 0.38 * 10 ^ -5 * (Log(0.00145 * Pvs)) ^ 8) + 255.38
End Function
Function FNFD1(Wfe, Ps As Single) As Single
FNFD1 = Wfe - 0.6219 * Ps / (101325 - Ps)
End Function
Function FNFD2(Map, W3, Mbpf, W2, Mp, Wfe)
FNFD2 = Map * W3 - Mbpf * W2 - Mp * Wfe
End Function
Function FNFD3(T3, T4, Te, UAe) As Single
FNFD3 = T3 - Te - (T4 - Te) * Exp((UAe * (T3 - T4) / (Qe * 3600)))
End Function
Function FNFD4(Map, Mbpf, Mp, ca, cv, W2, W3, Wfe, hfg, T3, T4, Te)
FNFD4 = Mbpf * ((ca + cv * W2) * T3 + W2 * hfg) + Mp * ((ca + cv * Wfe) * Te + Wfe * hfg) - 
Map * ((ca + cv * W3) * T4 + W3 * hfg)
End Function
Function FNFD12(Ps, AA, AAA, ABC, FG As Single) As Single
FNFD12 = -0.6219 * Ps * (101325 / (101325 - Ps) ^ 2) * ((AAA * ABC - AA * FG) / (AAA ^ 2))
End Function
Function FNFD21(Mp)
FNFD21 = -Mp
End Function
Function FNFD23(Map)
FNFD23 = Map
End Function
Function FNFD32(T3, T4, Te, UAe, Qe)
```

```
FNFD32 = Exp(UAe * (T3 - T4) / (Qe * 3600)) - 1
End Function
Function FNFD34(T3, T4, Te, UAe, Qe)
FNFD34 = Exp(UAe * (T3 - T4) / (Qe * 3600)) * (((UAe / (Qe * 3600) * (T4 - Te))) - 1)
End Function
Function FNFD41(Mp, Te, cv, hfg)
FNFD41 = Mp * (cv * Te + hfg)
End Function
Function FNFD42(Mp, ca, cv, Wfe)
FNFD42 = Mp * (ca + cv * Wfe)
End Function
Function FNFD43(Map, cv, T4, hfg)
FNFD43 = -Map * (cv * T4 + hfg)
End Function
Function FNFD44(Map, ca, cv, W3)
FNFD44 = -Map * (ca + cv * W3)
End Function
Private Sub Command1_Click()
Text1.Text = ""
Text2.Text = ""
Text3.Text = ""
Text4.Text = ""
Text5.Text = ""
Text6.Text = ""
Text7.Text = ""
Text8.Text = ""
Text9.Text = ""
Text1.SetFocus
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
Unload Form2
End Sub

Private Sub cmdCal_Click()
Open "c:\pui\th2.dat" For Output As 1
Open "c:\pui\th3.dat" For Output As 2
Dim A(4, 4) As Single, B(4) As Single, D(4) As Single, E(4) As Single, Qd As Single, Qp As Single, SUMmer As Single
Dim T1 As Single, T2   As Single, T3 As Single, T4 As Single, T5 As Single, T6 As Single, T7 As Single, Te As Single, Tc As Single
Dim Mwd As Single, DT As Single, Pv As Single, rh As Single, Vsa As Single, Qthe As Single
Dim A1 As Single, B1 As Single, C1 As Single, D1 As Single, R1 As Single, Ws As Single
Dim TB As String, CR As String, C2     As String, GBIN As String
Dim I  As Integer, IL As Integer, J As Integer, K As Integer, n As Integer
Dim Athxe As Single, Afh As Single, Re As Single, dens As Single, Pr  As Single, hm As Single
Dim Vmax As Single, V As Single, Mew As Single, Nud As Single, kon As Single
Dim QQ As Single, RR As Single, SS As Single, PP As Single, Pfan As Single
Dim AN(4, 4) As Single, BN(4) As Single, DN(4) As Single, EN(4) As Single, CN As Single
Dim Km As Single, nm As Single
Dim time, Int1, Int2 As Single
Dim Mf As Single
Const A3 = -27405.526
Const B3 = 97.5413
Const C3 = -0.146244
Const D3 = 0.12558 * 10 ^ (-3)
Const E3 = -0.48502 * 10 ^ (-7)
Const F3 = 4.34903
Const G3 = 0.39381 * 10 ^ (-2)
Const R3 = 22105649.25
```

```
Const St = 25.4
Const Dai = 9.5
If Text1.Text = "" Then
   MsgBox ("Input  data  is  Zero :Input new value")
ElseIf Text2.Text = "" Or Text2.Text = 0 Then
  MsgBox ("Input  data  is  Zero :Input new value")
ElseIf Text3.Text = "" Or Text3.Text = 0 Then
    MsgBox ("Input  data  is  Zero :Input new value")
ElseIf Text4.Text = "" Or Text4.Text = 0 Then
    MsgBox ("Input  data  is  Zero :Input new value")
ElseIf Text5.Text = "" Or Text5.Text = 0 Then
   MsgBox ("Input  data  is  Zero :Input new value")
ElseIf Text7.Text = "" Or Text7.Text = 0 Then
    MsgBox ("Input  data  is  Zero :Input new value")
Else

'Input DATA
If Text1.Text < 38 Or Text1.Text > 55 Then
MsgBox ("Range  of  temperatue  38-55 C")
Else
Form1.MSFlexGrid1.Rows = 1
Form1.MSFlexGrid1.FixedRows = 0
Form1.MSFlexGrid1.FixedCols = 0
TB = Chr$(9)
CR = Chr$(13)

Form1.MSFlexGrid1.Cols = 22
GBIN = "Time" & TB & "MR" & TB & "M" & TB & "T1" & TB & "T2" & TB & "T3" & TB &
"T4" & TB & "T5" & TB & "T6" & TB & "T7" & TB & "W1" & TB & "W2" & TB & "W3" &
```

```
TB & "Te" & TB & "Tc" & TB & "Ws" & TB & " Ptotal" & TB & " MER" & TB & "Qe" & TB
& "Qc"
 Form1.MSFlexGrid1.AddItem GBIN
Print #1, "Time"; "                "; "MR"; "                "; "M"; "                "; "T1"; "                ";
"T2"; "                "; "T3"; "                "; "T4"; "                "; "T5"; "                "; "T6"; "
"; "T7"; "                "; "W1"; "                "; "W2"; "                "; "W3"; "                "; "Te"; "
"; "Tc"; "                "; "Ws"; "                "; "Ptotal"; "                "; "MER"; "                ";
"Qae"; "                "; "Qc"
T = 0
deltat = 0.08333
T1 = Text1.Text
Ma = Text2.Text
W1 = Text3.Text
Mwd = Text4.Text
Min = Text5.Text
Mf = 11.92
BP = Text7.Text / 100: bbp = BP * 100: Print #2, bbp
'Pr1 = Text8.Text
'Pr2 = Text9.Text
'num = DT / deltat
Form1.Label2.Caption = T1
Form1.Label6.Caption = Ma
Form1.Label9.Caption = W1
Form1.Label12.Caption = Mwd
Form1.Label15.Caption = Min

Ma = Ma * 3600
Mi = Min
Mwd = Mwd / (1 + Min / 100)
```

```
Const Patm = 101325
Const ca = 1.0069
Const cv = 1.5524
Const hfg = 2512.131

'Constants
BPF = 0.35
Vsa = 287 * (T1 + 273.16) / (Patm - Pv)
Ma = Ma / (1.095 * Vsa)
Mp = Ma * (1 - BP) * (1 - BPF)
Mbpf = Ma * (1 - BP) * BPF
Mabp = Ma * BP
Map = Ma * (1 - BP)
UAe = 780
UAc = 810
CD = 0.0000327
Nrev = 48
z = 1.15
Int1 = 0

'For IL = 1 To num
Do
Int1 = Int1 + 1
qmw = 0
'Do
T = T + deltat
Pv = Patm * W1 / (0.6219 + W1)
rh = Pv / Ps(AA(T1, A3, B3, C3, D3, E3), AAA(T1, F3, G3), R3)
If Option2.Value = True Then
```

```
Meq = Mf
Km = 0.0011 * T1 + 0.2233
nm = 0.0079 * T1 + 0.4407
M = Min * Exp(-Km * T ^ nm)
   If Int1 Mod 2 <> 0 Then qmw = 0.44552
Else

Aeq = 0.13 * T1 - 14.956
Beq = 1.251 * T1 + 92.422
Ceq = 1.266 * T1 + 268.69

Km = 0.0032 * T1 + 0.017
nm = -0.006 * T1 + 1.299

Meq = (Aeq * Beq * (Ceq / (T1 + 273.16)) * rh) / ((1 - rh) * (1 - Beq * rh + (C / (T1 + 273.16)) *
Beq * rh))
M = Meq + (Min - Meq) * Exp(-Km * T ^ nm)
End If

Mi = Mi / 100
M = M / 100
'Refrigerance  side
Pr2 = 0.055 * T1 - 0.1726
Pr1 = 0.0115 * T1 + 0.078

Tsup = 12
Tsate = -0.3076 * Pr1 ^ 4 + 4.2031 * Pr1 ^ 3 - 22.599 * Pr1 ^ 2 + 71.405 * Pr1 - 29.587
Tsatc = -0.3076 * Pr2 ^ 4 + 4.2031 * Pr2 ^ 3 - 22.599 * Pr2 ^ 2 + 71.405 * Pr2 - 29.857
Tr1 = Tsate + Tsup
Tr2 = (273.2 + Tr1) * (Pr2 / Pr1) ^ ((z - 1) / z) - 273.2
```

```
h3 = 0.0066 * Tsatc ^ 2 + 0.8454 * Tsatc + 48.0946
h1 = (229.57 + 59.865 * Pr1 - 37.068 * Pr1 ^ 2) + (0.5632 + 0.3473 * Pr1 - 0.118 * Pr1 ^ 2) *
(Tr1 - Tsate) + (0.0004 + 0.0002 * Pr1 - 0.0011 * Pr1 ^ 2) * (Tr1 - Tsate) ^ 2
h2 = (-8.1733 * Pr2 ^ 3 + 62.24 * Pr2 ^ 2 - 154.68 * Pr2 + 391.33) + (0.4188 * Pr2 ^ 3 - 3.2926 *
Pr2 ^ 2 + 8.5924 * Pr2 - 6.4793) * (Tr2 - Tsatc) + (-0.0029 * Pr2 ^ 3 + 0.023 * Pr2 ^ 2 - 0.0594 *
Pr2 + 0.0501) * (Tr2 - Tsatc) ^ 2
v2 = (0.0013 * Pr2 ^ 2 - 0.0111 * Pr2 + 0.0292) + (0.00001 * Pr2 ^ 2 - 6 * 10 ^ -5 * Pr2 + 0.0001)
* (Tr2 - Tsatc)
v1 = (0.1183 * Pr1 ^ 2 - 0.2273 * Pr1 + 0.1355) + (-0.0004 * Pr1 ^ 2 + 0.0002 * Pr1 + 0.0003) *
(Tr1 - Tsate)
nv = 1 + 0.05 - 0.05 * (Pr2 / Pr1) ^ (1 / z)
Mf = CD * Nrev * nv / v1
Qcdi = Mf * (h2 - h3)
Qe = Mf * (h1 - h3)
Wcom = Pr1 * 1000 * Mf * v1 * (z / (z - 1)) * ((Pr2 / Pr1) ^ ((z - 1) / z) - 1)
mw = Mwd * (Mi - M)
W2 = W1 + mw / (Ma * deltat)
Mi = M * 100
T2 = (((ca + cv * W1) * T1 + hfg * (W1 - W2)) - (((mw * hfg) - (qmw * deltat)) / (Ma * deltat))) /
(ca + cv * W2)
'T2 = (Ma * (ca * T1 + W1 * (hfg + cv * T1)) - Ma * (hfg * W2) - mw * Hhfg(T1)) / (Ma * (ca +
cv * W2))
T2 = T2 + 273.16
Mew = (-2 * 10 ^ -11) * T2 ^ 2 + (5 * 10 ^ -8) * T2 + 4 * 10 ^ -6
dens = (-4 * 10 ^ -9) * T2 ^ 3 + (10 ^ -5) * T2 ^ 2 - 0.0083 * T2 + 2.9076
kon = 6 * 10 ^ -5 * T2 + 0.0095
Athxe = 0.3 * 0.381
V = Map / (dens * Athxe) / 3600
Vmax = (V * St) / (St - Dai)
Re = dens * Vmax * Dai / (1000 * Mew)
```

```
Nud = 0.46 * 0.75 * Re ^ 0.565
heo = Nud * kon / Dai * 1000
Afh = 2 * ((0.0254 * 0.019) - (3.414 * (0.0095 ^ 2) / 4)) * (551 * 0.3) + (3.314 * 0.0095 * 0.3)
Afh = Afh * 30
T2 = T2 - 273.16
T3 = 35.13 + Exp(-Afh * heo * 3.6 / (Map * (ca + cv * W2))) * (T2 - 35.13)
Qthe = Map * (ca + cv * W2) * (T2 - T3)
T3 = T2
'Guess   T4,Te,W3,Wfe
Wfe = 0.02
Te = 12
W3 = 0.028
T4 = 20
Do
III = III + 1
    Rem --------------------Read  Metrix  AX=B---------------------
    AN(1, 1) = 1
    AN(1, 2) = FNFD12(Ps(AA(Te, A3, B3, C3, D3, E3), AAA(Te, F3, G3), R3), AA(Te, A3,
B3, C3, D3, E3), AAA(Te, F3, G3), ABC(Te, B3, C3, D3, E3), FG(Te, F3, G3))
    AN(1, 3) = 0
    AN(1, 4) = 0

    AN(2, 1) = FNFD21(Mp)
    AN(2, 2) = 0
    AN(2, 3) = FNFD23(Map)
    AN(2, 4) = 0

    AN(3, 1) = 0
    AN(3, 2) = FNFD32(T3, T4, Te, UAe, Qe)
    AN(3, 3) = 0
```

```
AN(3, 4) = FNFD34(T3, T4, Te, UAe, Qe)

AN(4, 1) = FNFD41(Mp, Te, cv, hfg)
AN(4, 2) = FNFD42(Mp, ca, cv, Wfe)
AN(4, 3) = FNFD43(Map, cv, T4, hfg)
AN(4, 4) = FNFD44(Map, ca, cv, W3)

BN(1) = FNFD1(Wfe, Ps(AA(Te, A3, B3, C3, D3, E3), AAA(Te, F3, G3), R3))
BN(2) = FNFD2(Map, W3, Mbpf, W2, Mp, Wfe)
BN(3) = FNFD3(T3, T4, Te, UAe)
BN(4) = FNFD4(Map, Mbpf, Mp, ca, cv, W2, W3, Wfe, hfg, T3, T4, Te)

DN(1) = BN(1)
DN(2) = BN(2)
DN(3) = BN(3)
DN(4) = BN(4)

EN(1) = Wfe
EN(2) = Te
EN(3) = W3
EN(4) = T4
n = 4
Rem-------------------Forword----------------------------
For K = 1 To n - 1
        For I = K + 1 To n
                CN = AN(I, K) / AN(K, K)
                For J = K + 1 To n
                        AN(I, J) = AN(I, J) - CN * AN(K, J)
                Next J
                BN(I) = BN(I) - CN * BN(K)
```

```
        Next I
Next K

Rem --------------------------Backsubstitute--------------------------

BN(n) = BN(n) / AN(n, n)
For ii = 1 To n - 1
        I = n - ii
        CN = 1 / AN(I, I)
        BN(I) = CN * BN(I)
        For K = I + 1 To n
                BN(I) = BN(I) - CN * AN(I, K) * BN(K)
        Next K
Next ii
For I = 1 To n
        BN(I) = EN(I) - BN(I)
Next I
        Wfe = BN(1)
        Te = BN(2)
        W3 = BN(3)
        T4 = BN(4)
        Wfee = Format(Wfe, "##0.0000")
        Tee = Format(Te, "##0.0000")
        W33 = Format(W3, "##0.0000")
        T44 = Format(T4, "##0.0000")
        f1 = Format(DN(1), "##0.0000")
        f2 = Format(DN(2), "##0.0000")
        ff3 = Format(DN(3), "##0.0000")
        f4 = Format(DN(4), "##0.0000")
```

```
            'GBIN = III & TB & Wfee & TB & Tee & TB & W33 & TB & T44 & TB & f1 &
TB & f2 & TB & ff3 & TB & f4
            'Print #1, III; "           "; Wfee; "           "; Tee; "          "; W33; "
"; T44; "           "; f1; "           "; f2; "           "; ff3; "          "; f4
            'Form1.MSFlexGrid1.AddItem GBIN
Loop Until Abs(DN(1)) < 0.00001 And Abs(DN(2)) < 0.00001 And Abs(DN(3)) < 0.00001 And
Abs(DN(4)) < 0.01
 Wfe = BN(1)
 Te = BN(2)
 W3 = BN(3)
 T4 = BN(4)
  If W3 > W2 Then
  W3 = W2
  Wfe = W2
 Pvs = Patm * Wfe / (0.6219 + Wfe)
 Te = PAVS(Pvs)
 Te = Te - 273.16
 T4 = BPF * T3 + (1 - BPF) * Te
 End If
MER = Map * (W2 - W3) * deltat
SUMmer = SUMmer + MER * deltat
Qae = Map * ca * T3 + Map * cv * W2 * T3 + Map * hfg * W2 - (Map * ca * T4 + Map * cv *
W3 * T4 + Map * hfg * W3)
T4 = T4 + 273.16
'Mew = (-2 * 10 ^ -11) * T4 ^ 2 + (5 * 10 ^ -8) * T4 + 4 * 10 ^ -6
'dens = (-4 * 10 ^ -9) * T4 ^ 3 + (10 ^ -5) * T4 ^ 2 - 0.0083 * T4 + 2.9076
'kon = 6 * 10 ^ -5 * T4 + 0.0095
'Athxc = 0.3 * 0.381
'V = Map / (dens * Athxc) / 3600
'Vmax = (V * St) / (St - Dai)
```

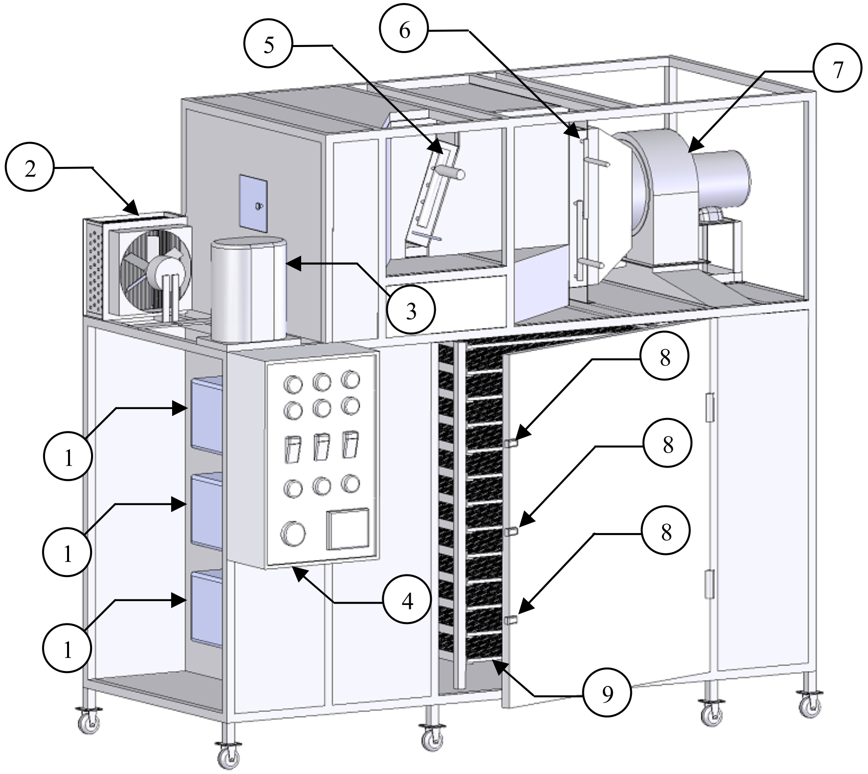
```
'Re = dens * Vmax * Dai / (1000 * Mew)
'Nud = 0.46 * 0.75 * Re ^ 0.565
'heo = Nud * kon / Dai * 1000
T4 = T4 - 273.16
'T5 = 35.13 - Exp(-Afh * heo * 3.6 / (Map * (ca + cv * W3))) * (35.13 - T4)
W1 = (1 - BP) * W3 + BP * W2
T5 = T4
T6 = (Mabp * (ca + cv * W2) * T2 + Map * (ca + cv * W3) * T5) / (Ma * (ca + cv * W1))
Qd = Ma / 1.095 / 3600
Qp = Map / 1.095 / 3600
 P = 291.91 * Qd ^ 2 + 80 * Qp ^ 2 + 270
 Ws = P * Ma / 1000 / 0.6
 BB = Ws / (Ma * (ca + cv * W1))
T7 = T1 - (Ws / Ma * (ca + cv * W1))
Tc = (T7 * Exp(UAc * (T7 - T6) / (Qcdi * 3600)) - T6) / (Exp(UAc * (T7 - T6) / (Qcdi * 3600)) -
1)
 Pfan = Ws / (0.8 * 3600)
 Ptotal = (Pfan + Wcom + 0.2 + qmw) * deltat
 SumPw = SumPw + Ptotal

 MRR = Format(MR, "#0.0000")
 Mii = Format(Mi, "##0.0000")
 T11 = Format(T1, "##0.0000")
  T22 = Format(T2, "##.0000")
 T33 = Format(T3, "##0.0000")
 T44 = Format(T4, "##0.0000")
  T55 = Format(T5, "##0.0000")
  T66 = Format(T6, "##0.0000")
  T77 = Format(T7, "##0.0000")
  W11 = Format(W1, "##0.00000")
```

```
  W22 = Format(W2, "##0.00000")
  W33 = Format(W3, "##0.00000")
   Tee = Format(Te, "##0.0000")
   Tcc = Format(Tc, "##0.0000")
    Wss = Format(Ws, "##0.000")
    MERR = Format(MER, "##0.000")
    Qaee = Format(Qe, "##0.000")
    Qcc = Format(Qcdi, "##0.000")
    TT = Format(T, "##0.00")
    Power = Format(Ptotal, "##0.0000")
GBIN = TT & TB & MRR & TB & Mii & TB & T11 & TB & T22 & TB & T33 & TB & T44 &
TB & T55 & TB & T66 & TB & T77 & TB & W11 & TB & W22 & TB & W33 & TB & Tee &
TB & Tcc & TB & Wss & TB & Power & TB & MERR & TB & Qaee & TB & Qcc
Print #1, T; "                "; MRR; "                "; Mii; "                "; T11; "                "; T22; "
"; T33; "                "; T44; "                "; T55; "                "; T66; "                "; T77; "
"; W11; "                "; W22; "                "; W33; "                "; Tee; "                "; Tcc; "
"; Wss; "                "; Power; "                "; MERR; "                "; Qaee; "                "; Qcc;
"                "; rh * 100; "                "; qmw
Form1.MSFlexGrid1.AddItem GBIN
'Next IL
Loop Until Mii < 8.43
DR = (Min - Mi) / T
AverMER = SUMmer / T
SMER = Mwd * ((Min - Mi) / 100) / SumPw
SEC = 3.6 * SumPw / (Mwd * ((Min - Mi) / 100))
COP = Qcdi / Wcom
AverMER = Format(AverMER, "##0.000")
SMER = Format(SMER, "##0.000")
SEC = Format(SEC, "##0.000")
COP = Format(COP, "##0.000")
```

```
DR = Format(DR, "##0.000")
Form1.Label18.Caption = TT
Form1.Label21.Caption = Mii
Form1.Label24.Caption = DR: Print #2, DR
Form1.Label27.Caption = AverMER
Form1.Label30.Caption = SMER
Form1.Label33.Caption = SEC
Form1.Label36.Caption = COP
Unload Form2
Form1.Enabled = True
End If
End If
Close #2
Close #1
End Sub
Private Sub cmdCancel_Click()
Unload Form2
Form1.Enabled = True
End Sub
```

ภาคผนวก ค
แบบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ



1 = ชุดไมโครเวฟ

2 = เครื่องควบแน่นตัวนอก

3 = เครื่องอัดไอ

4 = ชุดควบคุมอุณหภูมิและพลังงานไมโครเวฟ

5 = เครื่องทำระเหย

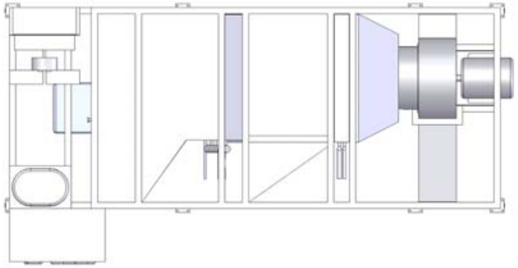
6 = เครื่องควบแน่นตัวใน

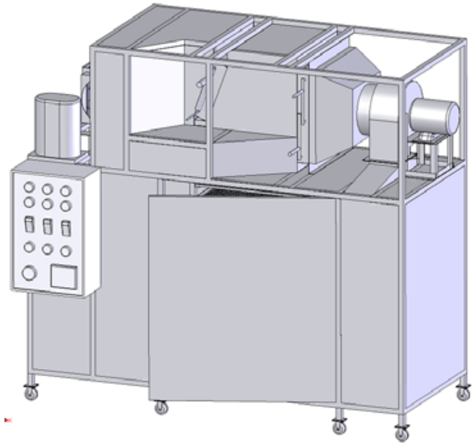
7 = พัดลม

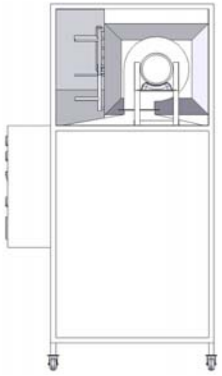
8 = Safety switch ของประตู

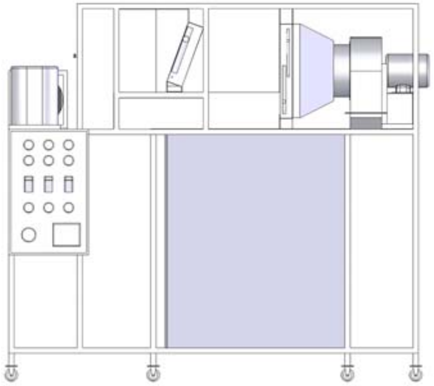
9 = ชุดชั้นถาด

Title	เครื่องอบแห้ง			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	เทวรัตน์ ทิพยวิมล			
Approved	รศ.ดร.สมยศ เชิญอักษร			
DWG No.	1	UNIT	-	

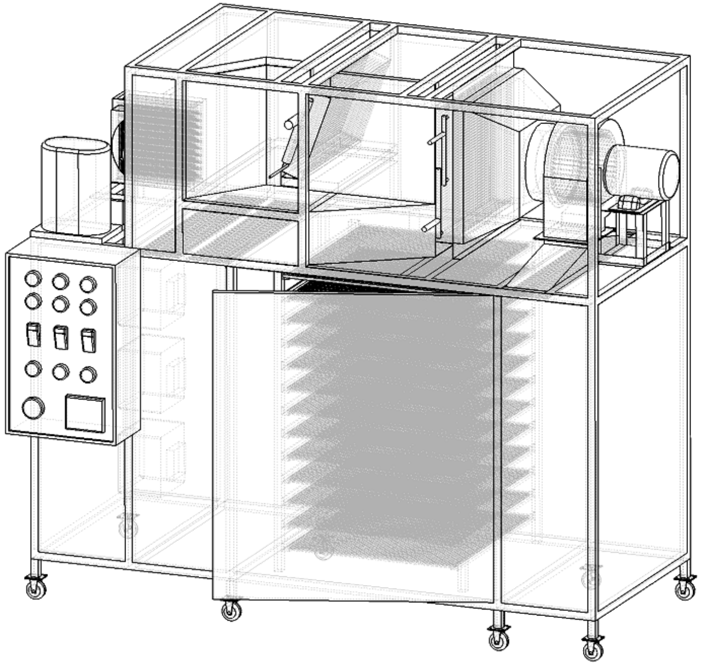




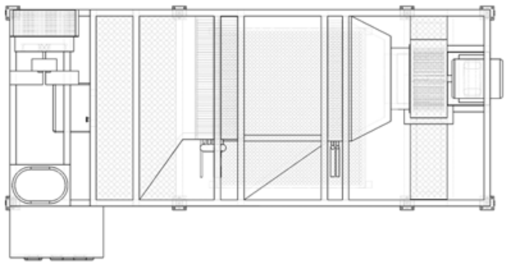


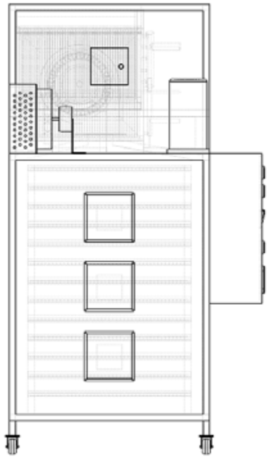


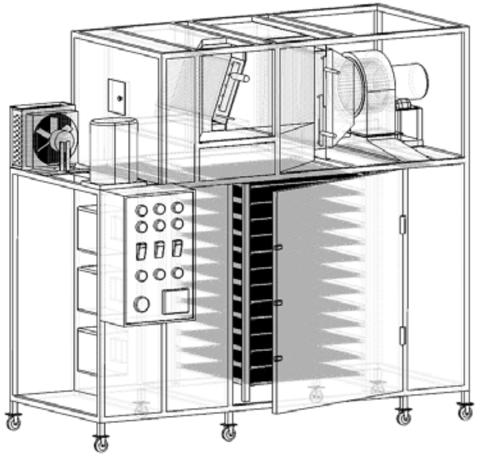
Title	เครื่องอบแห้ง			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	เทวรัตน์ ทิพยวิมล			
Approved	รศ.ดร.สมยศ เชิญอักษร			
DWG No.	2	UNIT	-	

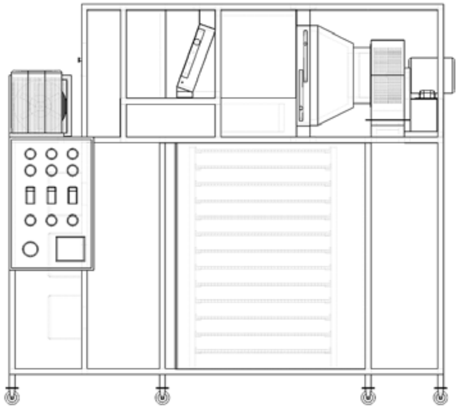


Title	เครื่องอบแห้ง			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	เทวรัตน์ ทิพยวิมล			
Approved	รศ.ดร.สมยศ เชิญอักษร			
DWG No.	3	UNIT	-	









Title	เครื่องอบแห้ง			ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
Drawn	เทวรัตน์ ทิพยวิมล			
Approved	รศ.ดร.สมยศ เชิญอักษร			
DWG No.	4	UNIT	-	

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวเทวรัตน์ ทิพยวิมล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	3 กันยายน 2519
สถานที่เกิด	นครปฐม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร) ม.เกษตรศาสตร์ วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร) ม.เกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาอาจารย์วิทยาเขตสารสนเทศสาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี