21424

ห้องสมุดคณะเทคโนโลยีการเกษตร พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟ

(Factors Affecting Evaporation By Microwave)

จัดทำโดย

นาย คุณาพร กิจจานนท์ รหัส 46041086

นาย สุทธิพงค์ วุ่นบัว รหัส 46041116

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2549

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 96758

วัน,เดือน,ปี.....

.b. 11778817

.i.....

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร โครงการคณะอุสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบรับรองปัญหาพิเศษ

เรื่อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟ

Factors Affecting Evaporation by Microwave

จัดทำโดย

นาย คุณาพร กิจจานนท์ รหัส 46041086

นาย สุทธิพงค์ วุ่นบัว รหัส 46041116

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

..... 26 /มี.ค./ 2550

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

(ดร. กิตติชัย บรรจง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณาพร กิจจานนท์, สุทธิพงศ์ วุ่นบัว,2549 : ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟ(Factors Affecting Evaporation By Microwave)
โครงการคณะอุสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.กิตติชัย บรรจง

บทคัดย่อ

การระเหยน้ำโดยทั่วไป เป็นการทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นตัวถ่ายเทความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงให้กับอาหาร การระเหยน้ำทำให้อาหารมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก็สามารถประยุกต์ใช้ในการระเหยน้ำได้เช่นกัน การทดลองนี้ใช้น้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นตัวอย่าง โดยให้น้ำเชื่อมไหลอย่างต่อเนื่องภายในรางที่ถูกติดตั้งอยู่ในเตาไมโครเวฟ 800 วัตต์ ขนาดปริมาตร 20 ลิตร โดยทดลองปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิและความเข้มข้นสุดท้ายของน้ำเชื่อม ซึ่งได้แก่ ระดับกำลังงานของเครื่องไมโครเวฟที่ 90, 180, 360, 600 และ 800 วัตต์ อัตราการไหลที่ 0.19, 0.33, 0.50 และ 0.66 ลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเชื่อมที่ 5, 10, 20, 30 และ 40 °Brix พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังของเตาไมโครเวฟมีผลทำให้ ความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายเพิ่มมากขึ้น เมื่อลดระดับของอัตราการไหลมีผลทำให้ความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายเพิ่มมากขึ้น ด้วย โดยเมื่อใช้กำลังงานเครื่องไมโครเวฟ 800 วัตต์และอัตราการไหล 0.19 ลิตรต่อนาที ทำให้ได้ควาเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายสูงสุด และเมื่อวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณพบว่าความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิเริ่มต้น อัตราการไหล และกำลังงานของเครื่องไมโครเวฟ

คุณาพร กิจจานนท์ ..... 26/มี.ค./2550

(นายคุณาพร กิจจานนท์) (ดร.กิตติชัย บรรจง) วัน/เดือน/ปี

สุทธิพงศ์ วุ่นบัว อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

(นายสุทธิพงศ์ วุ่นบัว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาปัญหาพิเศษเรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟ ซึ่งได้ทำการนำเสนอปัญหาพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ดร.กิตติชัย บรรจง ซึ่งเป็นที่อาจารย์ที่ปรึกษาปรึกษางานปัญหาพิเศษของคณะผู้จัดทำ ที่ท่านได้สละเวลาอันมีค่า ให้คำปรึกษาและแนะนำ พร้อมทั้งให้ความรู้เพิ่มเติมในส่วนที่ยังบกพร่อง ทำให้รายงานปัญหาพิเศษฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ช่วยให้การสัมมนาครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณท่านผู้มีอุปการคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้งานสำเร็จลงได้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจและการช่วยเหลือมาโดยตลอด

นาย คุณาพร กิจจานนท์
นาย สุทธิพงศ์ วุ่นบัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาปัจจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 การระเหย	2
2.2 เครื่องทำระเหย	2
2.3 ชนิดเครื่องทำระเหย	3
2.4 การทำให้แห้งโดยการใช้อากาศหรือลมร้อน	5
2.5 กลไกการทำแห้ง	6
2.6 ลักษณะที่สำคัญของอากาศแห้งในช่วงอัตราเร็วคงที่	6
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง	7
2.8 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง	7
2.9 ชนิดของเครื่องอบแห้ง	8
2.10 ชนิดของเครื่องทำแห้งเครื่องด้วยลมร้อน	8
2.11 วิทยาศาสตร์การไหล	12
2.12 ลักษณะของของไหลในอุดมคติ	17
2.13 เครื่องมือวัดความหนืด	17
2.14 ไมโครเวฟ	17
2.15 คลื่นไมโครเวฟ	18
2.16 หลักการให้ความร้อน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	24
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	24
3.2 สถานที่ทำการทดลอง	24
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานปัญหาพิเศษ	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	28
4.1 การคำนวณหาอัตราการไหล	28
4.2 การหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้าย	28
4.3 การหาสมการความสัมพันธ์	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	52
ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก ผลการระเหยน้ำ	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ระดับความและกำลังคลื่นไมโครเวฟของเตาไมโครเวฟ 20

4.1 แสดงอัตราการไหลต่อนาทีของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง 28

4.2 แสดงสรุปค่า k และ R^2 50

ตารางผนวก

1. ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix 57

2. ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix 58

3. ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix 59

4. ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix 60

5. ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะ 3 ประการของคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ สะท้อนกลับ (Reflection) การส่งผ่าน (Transmission) การดูดซึม (Absorption)	19
2.2	เปรียบเทียบการให้ความร้อนแบบธรรมดากับการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ	19
3.1	แสดงรางระเหยสำหรับการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟที่ออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วยภาพด้านบนและด้านข้าง	25
3.2	แสดงแทงก์ปรับอัตราการไหลของตัวอย่างน้ำด้วยไมโครเวฟที่ออกแบบและสร้างขึ้น	26
3.3	โครงสร้างอุปกรณ์ศึกษาการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟ และทิศทางการไหลของของเหลวที่ผ่านการระเหย	27
4.1	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.19 l/min	30
4.2	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.33 l/min	30
4.3	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.5 l/min	30
4.4	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.66 l/min	31
4.5	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล0.19 l/min	31
4.6	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล 0.33 l/min	31
4.7	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล0.50 l/min	32
4.8	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล0.66 l/min	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.9	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix	33
4.10	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix	33
4.11	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix	34
4.12	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30°Brix	34
4.13	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix	35
4.14	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix	35
4.15	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix	36
4.16	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix	36
4.17	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix	37
4.18	แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix	37
4.19	แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix	38
4.20	แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.21 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix 39

4.22 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix 39

4.23 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix 40

4.24 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix 40

4.25 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix 41

4.26 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix 41

4.27 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix 42

4.28 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix 42

4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix 45

4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix 45

4.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix 46

4.32 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix 46

4.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix 47

4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix 47

4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix 48

4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.37 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix 49

4.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาปัจจัย

อาหารมีที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากซึ่งไม่เป็นที่ต้องการเนื่องจากเป็นสภาวะที่จะทำให้อาหารมีคุณภาพลดลง หรือเน่าเสียได้ง่ายจากจุลินทรีย์ หรือคุณภาพด้านประสาทสัมผัส ไม่เป็นที่ต้องการทำให้ต้องมีการระเหยน้ำออกโดยส่วนใหญ่เป็นการทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นตัวส่งถ่ายความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงให้กับอาหาร ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้ไอน้ำอิ่มตัวเป็นตัวกลางให้ความร้อน

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาที มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สั้นกว่า หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือตัวแม็กนิตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เพราะคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงไม่ใช้รังสี จึงไม่กระจายและสะสมในร่างกายมนุษย์คลื่นไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหารไว้อย่างครบถ้วน ไม่ว่าจะเป็นการหุง ต้ม อบ นึ่ง ปิ้ง ย่าง ทอด และคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับมากกว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีดังเดิมหลายประการ อาทิ ความสะดวกรวดเร็ว ประหยัด ปลอดภัย และไร้เขม่าหรือควันไฟ

การระเหยน้ำด้วยเตาไมโครเวฟนี้แตกต่างจากการใช้เตาอบธรรมดา คือเตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาอบแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ การพาและการแผ่รังสี แต่เตาไมโครเวฟทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟ ที่มีความถี่สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป จนเกิดเป็นพลังงานจลน์และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายสภาพเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วและเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆโดยไม่เสียพลังงานความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำ โดยการใช้ไมโครเวฟ
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การระเหย (Evaporation)

การระเหย คือ การดึงน้ำออกจากอาหารที่เป็นของเหลว ทำให้อาหารมีความเข้มข้นขึ้น เท่ากับลดค่า aw เป็นการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งอาหาร เช่น น้ำมะเขือเทศเข้มข้น เป็นการระเหยน้ำออกจากน้ำมะเขือเทศซึ่งมีของแข็งประมาณ 5-6% จนมีของแข็งเพิ่มเป็น 35-37%

การระเหยแตกต่างจากการอบแห้ง เพราะอาหารที่ผ่านการระเหยแล้วยังคงวัฏภาคเป็นของแข็ง และแตกต่างจากการกลั่น เพราะไอระเหยที่ได้จากการระเหยไม่จำเป็นต้องนำไปกลั่นลำดับส่วนต่อไปอีก

ส่วนประกอบของเครื่องระเหยโดยทั่วไป ได้แก่

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Calandria) ซึ่งเป็นตัวส่งถ่ายความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงให้กับอาหาร ในอุตสาหกรรมอาหารนิยมใช้ไอน้ำอิ่มตัวเป็นตัวกลางให้ความร้อน
2. เครื่องแยก ซึ่งใช้ในการแยกไอระเหยออกจากอาหารเข้มข้น
3. เครื่องควบแน่น ใช้ในการควบแน่นไอระเหยและแยกออกจากระบบ การระเหยภายใต้ความดันบรรยากาศไม่จำเป็นต้องมีเครื่องควบแน่น

2.2 เครื่องทำระเหย (Evaporators)

เครื่องระเหยแบบง่ายๆ ประกอบด้วยถังระเหย ภายในมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่อาหารไม่สัมผัสกับตัวกลางให้ความร้อน ภายในถังระเหยจะควบคุมให้อยู่ภายใต้สุญญากาศ ในสภาพเช่นนี้จะทำให้ของเหลวเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ นั่นคือ ทำให้อุณหภูมิต่างของไอน้ำกับอาหารเหลวมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นสีและคุณค่าทางอาหารจะถูกทำลายน้อยมาก ไอระเหยจะถูกลำเลียงไปควบแน่นภายใต้ระบบสุญญากาศ ไอน้ำที่ควบแน่นในเครื่องระเหยและไอระเหยควบแน่น จะถูกแยกทิ้งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของอาหารมีผลต่อประสิทธิภาพของการระเหย เมื่อน้ำถูกดึงออกไป อาหารจะมีความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง และจุดเดือดของอาหารสูงขึ้นเป็นผลทำให้อุณหภูมิต่าง ของไอน้ำและอาหารลดลง ซึ่งเป็นการลดการถ่ายเทความร้อน อาหารส่วนใหญ่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน ดังนั้น การระเหยที่อุณหภูมิต่ำ และลดเวลาในการให้ความร้อนลงจะช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางอาหาร นอกจากนี้การสูญเสียพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสาเหตุอันทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง การทำความสะอาดถังระเหยบ่อยๆ จะต้องมีการหยุดเครื่อง ซึ่งเป็นการสูญเสียกำลังการผลิต การเกิดฟองขึ้นมากในระหว่างการระเหยจะทำให้การสูญเสียเนื่องจากฟองจะหลุดติดไปกับไอระเหย จะทำให้ผลผลิตลดลง ดังนั้นการออกแบบเครื่องระเหยจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ เหล่านี้ ให้เหมาะสมกับอาหารที่นำมาผ่านกระบวนการระเหยด้วย

2.3 ชนิดเครื่องทำระเหย (Types of Evaporators)

1. เครื่องระเหยแบบกระทะ (Batch-Type Pan Evaporator) เป็นเครื่องระเหยแบบง่ายๆ อาหารจะถูกให้ความร้อนในกระทะแบบสองชั้นซึ่งมีรูปทรงกลม อาจมีฝาปิดแล้วต่อเข้ากับเครื่องควบแน่นเพื่อควบแน่นไอระเหยหรือไม่มีฝาปิดก็ได้ การควบคุมการระเหยภายใต้สุญญากาศจะช่วยลดจุดเดือดของอาหารลง เพื่อช่วยลดการสูญเสียคุณภาพของอาหาร

เครื่องระเหยแบบนี้มีพื้นที่ผิวในการระเหยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อย ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการระเหยนานหลายชั่วโมง และยังมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะไม่ดี ทำให้อัตราการระเหยต่ำ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องระเหยแบบนี้ อยู่ในช่วง 250-1500 $W/m^2.^\circ C$ ซึ่งขึ้นกับความหนืดของอาหารและการกวนอาหารในเครื่องระเหย

2. เครื่องระเหยแบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ (Natural Circulation Evaporator) ภายในเครื่องระเหยจะมีท่อสั้นๆ ยาวประมาณ 1-2 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50-100 มม. จัดเรียงอยู่ในถังระเหยทั้งท่อและช่องไอน้ำ (calandria) จะวางอยู่บริเวณส่วนล่างของเครื่องระเหย อาหารที่ถูกทำให้ร้อนจะไหลขึ้นมาตามท่อแบบธรรมชาติ ส่วนไอน้ำจะควบแน่นข้างนอกท่อ การระเหยจะเกิดขึ้นในท่อ ทำให้อาหารมีความเข้มข้น อาหารเข้มข้นจะไหลกลับไปยังถังพัก อาหารอาจถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าเครื่องระเหย โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ เครื่องระเหยแบบนี้นิยมใช้ในการระเหยอาหารที่ถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่าย เช่น นม ซุบ เนื้อสกัด และน้ำผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องระเหยแบบชั้นของเหลวไหลขึ้น (Rising-Film Evaporator) เครื่องระเหยแบบนี้จะมีท่อขนาดความยาว 10-15 เมตร วางในแนวดิ่งใช้ระเหยอาหารเหลวที่มีความหนืดต่ำ ไอน้ำจะถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อด้านนอก ไอระเหยที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของท่อจะลากดึงอาหารเหลวให้ไหลขึ้นเป็นชั้นบางๆ ในท่ออย่างรวดเร็ว การเกิดฟิล์มบางๆ ต้องมีอุณหภูมิต่างของอาหารกับไอน้ำประมาณ 14°C เครื่องแบบนี้จะมีสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนสูง โดยมากอาหารเหลวจะผ่านเครื่องระเหยเพียงเที่ยวเดียว แต่ถ้าต้องการความเข้มข้นสูงขึ้นก็อาจมีการหมุนเวียนจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของของแข็งตามต้องการ นิยมใช้ในการระเหยอาหารที่ถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่ายและมีความหนืดน้อย เช่น นม โดยอาหารจะถูกระเหยในเครื่องระเหยเป็นเวลาประมาณ 3-4 นาที

4. เครื่องระเหยแบบชั้นของเหลวไหลลง (Falling-Film Evaporator) เครื่องระเหยแบบนี้ของเหลวจะไหลลงเป็นชั้นบาง ตามแรงโน้มถ่วงของโลกในท่อที่วางในแนวดิ่ง การออกแบบเครื่องระเหยจะยุ่งยากเนื่องจากต้องทำให้อาหารกระจายเป็นชั้นบางๆ อย่างสม่ำเสมอในท่อ ซึ่งจะยากกว่าการทำให้อาหารเหลวไหลขึ้นเป็นชั้นบาง เครื่องระเหยแบบนี้จะต้องมีหัวฉีดอาหารให้เป็นแผ่นบาง และสามารถมีถังระเหยได้มากกว่าเครื่องระเหยแบบชั้นของเหลวไหลขึ้นถ้าใช้ไอน้ำมีอุณหภูมิสูงถึง 60°C และสามารถใช้เครื่องระเหยได้ถึง 10 ตัว หรือมากกว่า ใช้ได้ดีมากในการระเหยในเครื่องระเหยโดยใช้เวลาเพียง 20-30 วินาที ใช้กับอาหารทีมีความหนืดสูง เช่น น้ำผลไม้

5. เครื่องระเหยแบบชั้นของเหลวไหลขึ้น/ไหลลง (Rising/Falling Film Evaporator) เครื่องระเหยแบบชั้นของเหลวไหลขึ้น/ไหลลงนี้ คือใช้หลักการของทั้งสองแบบรวมกัน อาหารจะถูกหมุนเวียนในส่วนของเหลวกำลังไหลขึ้น ซึ่งถูกทำให้เข้มข้นและอาหารจะมีความหนืดสูงขึ้นบ้างแล้วจะไหลเป็นชั้นบางๆ ลงมา จนกระทั่งได้อาหารที่มีความเข้มข้นตามต้องการ

6. เครื่องระเหยแบบมีการหมุนเวียนแบบถูกบังคับ (Forced-Circulation Type Evaporator) เครื่องระเหยประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดตัวกลางให้ความร้อนไม่สัมผัสกับอาหาร โดยอาหารจะถูกหมุนเวียนด้วยอัตราความเร็วสูง ความดันอุทกสถิตเหนือท่อด้านบน จะช่วยลดการเดือดของอาหาร ในถังแยกจะควบคุมความดันสมบูรณ์ให้ต่ำกว่าความดันในท่อ ดังนั้นอาหารเหลวเมื่อไหลเข้าถังแยกจะเปลี่ยนเป็นไอระเหยทันที อุณหภูมิต่างของอาหารเหลวกับไอน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำเพียง 3-5°C เครื่องสูบจะหมุนเวียนตามธรรมชาติ ซึ่งมีความเร็วเพียง 0.3-1 m/s อาหารที่มีความหนืดต่ำจะใช้เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยงส่วนอาหารที่มีความหนืดสูงจะใช้เครื่องสูบผลักดันแทนที่ นิยมใช้กับอาหารที่มีสารแขวนลอยสูงๆ ซึ่งอาจมีการตกตะกอนได้ง่ายระหว่างการระเหย สำหรับเงินลงทุนและเงินดำเนินการจะต่ำกว่าเครื่องระเหยแบบอื่นๆ มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การกำจัดน้ำและการทำแห้ง (Dehydration and Drying) การกำจัดน้ำ หมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหารโดยการระเหยน้ำหรือการระเหิดน้ำแข็ง ซึ่งไม่รวมถึง การแยกโดยทางกล การทำให้ข้นโดยการใช้เมมเบรน การระเหย และการอบ

ประโยชน์ของการกำจัดน้ำ

- ยืดอายุการเก็บรักษาอาหารโดยการลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์
- เพื่อลดน้ำหนักและปริมาณของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาและขนส่ง
- เพิ่มความหลากหลายและความสะดวกให้แก่ผู้บริโภค

ข้อเสีย

- ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งคุณภาพการบริโภคและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ น้ำตาล กาแฟ นม มันฝรั่ง แป้ง ถั่ว ถั่วลิสง ส่วนผสมสำหรับทำขนมปัง อาหารเช้าประเภทที่ทำมาจากธัญพืช ชาและเครื่องเทศ

2.4 การทำให้แห้งโดยการใช้อากาศหรือลมร้อน

ไซโครเมตริกส์ (Psychometric) ความสามารถของอากาศที่จะกำจัดความชื้นออกจากอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ปริมาณของไอน้ำที่อยู่ในอากาศแสดงไว้ด้วยค่าความชื้นสัมบรูณ์ (absolute humidity) ซึ่งเป็นมวลของไอน้ำต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง (kg/kg) หรือที่เรียกว่า ปริมาณความชื้น หรือแสดงในรูปความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีค่าเป็น % ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันย่อย (partial pressure) ของไอน้ำในอากาศต่อความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกันและคูณด้วย 100 ไซโครเมทริกส์เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

เราเรียกอุณหภูมิของอากาศที่วัดโดยกระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature) และถ้าเอาผ้าเปียกหุ้มกระเปาะเอาไว้ ความร้อนจะถูกกำจัดออกจากผ้าโดยการระเหยของน้ำและอุณหภูมิจะลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง เรียกอุณหภูมิต่ำนี้ว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature) เราสามารถใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองนี้ในการหาความชื้นสัมพัทธ์บนกราฟไซโครเมทริกส์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กลไกการทำแห้ง

เมื่ออากาศหรือลมพัดร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ

- ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศจะถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่
- สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอารเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อย ๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้
- การเคลื่อนที่ของของเหลวโดยแรงแคปิลารี่
- การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลายในอาหารส่วนต่าง ๆ
- การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร
- การแพร่ไอน้ำในช่องอากาศของอากาศขอองอาหารซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ เมื่อนำอาหารมาใส่ในเครื่องทำแห้ง ช่วงเวลาสั้นๆ ตอนเริ่มการอบแห้งที่ใช้ในการทำให้ผิวหน้าของอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก แล้วจึงเริ่มการทำให้แห้ง โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของอาหารออกมาด้วยความเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้า ผิวหน้าจึงเปียกอยู่ เรียกช่วงนี้ว่าเป็นช่วงอัตราเร็วคงที่ (constant rate period) และช่วงต่อเนื่องไปจนถึงความชื้นวิกฤต (critical moisture content, C) แต่ในทางปฏิบัติผิวหน้าของอาหารจะค่อยๆ แห้งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน และอัตราการทำให้แห้งโดยรวมจะค่อยๆ ลดลงในช่วงของอัตราเร็วคงที่ ดังนั้นจุดความชื้นวิกฤตของอาหารแต่ละชนิดจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปริมาณของอาหารในเครื่องทำแห้งและอัตราการทำให้แห้ง

2.6 ลักษณะที่สำคัญของอากาศแห้งในช่วงอัตราเร็วคงที่

1. ต้องมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งสูง
2. มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ
3. มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

ฟิล์มอากาศที่อยู่รอบอาหารจะกีดขวางการถ่ายเทความร้อนและไอน้ำระหว่างการทำแห้ง ความเร็วของอากาศหรือลมจะเป็นตัวกำหนดความหนาของฟิล์ม ถ้าความเร็วลมต่ำเกินไป ไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเคลื่อนที่จากผิวหน้าของอาหารและยังคงอยู่รอบๆ อาหารทำให้มีความแตกต่างระหว่างความดันไอและอัตราการทำแห้งไม่สูงนัก ถ้าอุณหภูมิของอากาศแห้งต่ำหรือมีความชื้นสูงจะทำให้อัตราเร็วในการระเหยและการทำแห้งลดลง เมื่อความชื้นของอาหารลดต่ำลงกว่าความชื้นวิกฤต จุด(C) อัตราการทำแห้งก็จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ที่ความชื้นสมดุล (ความชื้นในอาหารสมดุลกับความชื้นในอากาศแห้ง) หรือที่เรียกว่าเป็นช่วงอัตราลดลง (Falling-rate period) อาหารส่วนใหญ่จะมีช่วงอัตราลดลงเพียงช่วงเดียว (CD ในรูปที่ 1 (a) และ (b)) ในช่วงอัตราลดลง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในอาหารมายังผิวหน้าจะต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำไปยังอากาศโดยรอบ ผิวหน้าจึงแห้ง ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นานที่สุดของกระบวนการทำแห้งในอาหารบางชนิด เช่น การทำแห้งเมล็ดธัญพืช ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤต ปัจจัยที่ควบคุมอัตราการทำแห้งจะเปลี่ยนไปในช่วงอัตราลดลง ปัจจัยที่สำคัญในช่วงแรกจะคล้ายคลึงกับในช่วงอัตราเร็วคงที่แต่อัตราการถ่ายเทมวลจะค่อย ๆ กลายเป็นปัจจัยควบคุมการทำแห้งที่สำคัญขึ้น

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

1. ธรรมชาติของอาหาร
2. ขนาดและรูปร่าง
3. ตำแหน่งของอาหารในเตาอบ
4. ปริมาณอาหารต่อถาด
5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน
6. อุณหภูมิของอากาศร้อน
7. ความเร็วของกระแสลม

2.8 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง

การหดตัว การเสียน้ำทำให้เซลล์อาหารหดตัวจากผิวนอก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพได้ส่วนที่อ่อนกว่าจะเว้าลงไป อาหารที่มีน้ำมากจะหดตัวบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งอย่างรวดเร็วจะหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งอย่างช้า ๆ

การเปลี่ยนสี อาหารที่ผ่านการทำแห้งมักมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากความร้อนหรือปฏิกิริยาเคมี การเกิดสีน้ำตาลอุณหภูมิและช่วงเวลาที่อาหารมีความชื้น 10-20 % มีผลต่อความเข้มของสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเปลือกแข็ง เป็นลักษณะที่ผิวอาหารแข็งเป็นเปลือกหุ้มส่วนในที่ยังไม่แห้งไว้ เนื่องจากในช่วงแรกให้น้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจากด้านในเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทัน หรือมีสารละลายของน้ำตาลโปรตีนเคลื่อนที่มาแข็งตัวที่ผิว สามารถหลีกเลี่ยงโดยใช้อุณหภูมิต่ำ

การเสียความสามารถในการคืนสภาพ อาหารแห้งบางชนิดต้องนำมาคืนสภาพ แต่การคืนสภาพโดยการเติมน้ำจะไม่ได้เหมือนเดิม เพราะเซลล์อาหารเสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ สตาร์ชและโปรตีนเสียความสามารถในการดูดน้ำอาหารที่ทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็งจะมีความสามารถในการคืนสภาพดีที่สุด เพราะไม่ได้ใช้ความร้อนที่จะทำลายผนังเซลล์

การเสียคุณค่าอาหารและสารระเหย เกิดการเสื่อมสลายของวิตามินซีและแคโรทีนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไรโบฟลาวินจากแสง ไทอะมีนจากความร้อน ยิ่งใช้เวลาทำแห้งนานการสูญเสียก็ยิ่งมาก โปรตีนมีการสูญเสียบางส่วนด้วยความร้อนเช่นเดียวกัน การสูญเสียสารระเหยเนื่องจากความร้อนทำให้กลิ่นของอาหารแห้งลดลงหรือแตกต่างไปจากเดิม

2.9 ชนิดของเครื่องอบแห้ง (Dryers)

เครื่องอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการให้ความร้อนคือ

1. Adiabatic Dryer เป็นเตาอบแห้งที่ให้ความร้อนโดยใช้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่สัมผัสกับอาหารโดยอาหารอาจอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ ได้แก่ Tray dryers, Cabinet dryers, Tunnel dryers, Kiln dryers, Spray dryers, Conveyer or Belt dryers, Fluidized bed dryers, Pneumatic dryers และ Rotary dryers เป็นต้น

2. Solid Surface Transfer Dryer เป็นเตาอบแห้งที่ให้อาหารสัมผัสกับแผ่นโลหะร้อน น้ำที่ระเหยกระจายออกไปที่บรรยากาศตามธรรมชาติหรือใช้ลมหมุนเวียนหรือใช้ระบบสุญญากาศ ได้แก่ Drum dryers, Vacuum shelf or vacuum band dryers และ Continuous vacuum dryers

2.10 ชนิดของเครื่องทำแห้งเครื่องด้วยลมร้อน (Hot air dryers)

1. เครื่องอบแห้งแบบถัง (Bin dryers หรือ Deep bed dryers)

มีรูปร่างกลมหรือทรงสี่เหลี่ยม ด้านล่างจะมีช่องตาข่ายให้อากาศร้อนพัดผ่านชั้นอาหารด้วย ความเร็วค่อนข้างต่ำ เช่น 0.5 เมตร/วินาที ต่อพื้นที่ผิวของเครื่องมีความสามารถในการทำงานสูง ใช้เงินลงทุนสูงและค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำ นิยมใช้ในการอบแห้งขั้นสุดท้ายเพื่อให้อาหารมีค่าความชื้น 3-6 % หลังการทำแห้งขั้นต้นด้วยเครื่องมืออื่นๆ มาแล้ว ช่วยเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการทำงานของเครื่องทำแห้งตอนต้นด้วยการใช้กับอาหารที่ทำแห้งอยู่ในช่วงอัตราลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้เวลานานที่สุดโดยที่อาหารจะถูกกองทับกันสูงจึงทำให้เกิดความชื้นภายในแตกต่างกันจึงต้องนำมาทำแห้งต่อเพื่อให้อาหารมีความชื้นเท่ากัน บางครั้งเครื่องยังทำหน้าที่เหมือนภาชนะเก็บอาหารระหว่างขั้นตอนการทำให้แห้ง การบรรจุอาหารในเครื่องนี้อาจสูงหลายเมตร ดังนั้นอาหารที่อยู่ด้านล่างจะต้องทนต่อแรงอัดที่เกิดขึ้นได้และต้องมีช่องเปิดด้านล่างเพื่อให้ลมร้อนผ่านเข้ามาในกองอาหารได้

2. เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryers)

ประกอบด้วยถาดเตี้ยๆ ที่มีช่องตาข่ายอยู่ด้านล่างในแต่ละถาดจะบรรจุอาหารชิ้นต่าง ๆ บางขนาด 2 –6 เซนติเมตร อากาศร้อนจะไหลหมุนเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5 – 5 เมตร/วินาที มีระบบท่อหรือแบฟเฟิล ลมร้อนจะเป่าขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาด อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มด้านบนหรือด้านข้างของถาดเพื่อเพิ่มอัตราการทำแห้ง นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดในการผลิตอาหารในปริมาณต่ำ (1–20 ตัน/วัน) หรือสำหรับใช้ในโรงงานต้นแบบ เครื่องอบชนิดนี้ใช้เงินลงทุนและค่าดูแลรักษาต่ำแต่ควบคุมดูแลยาก และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

3. เครื่องอบแห้งแบบนูเมติกส์ (Pneumatic dryer)

อาหารที่เป็นชิ้นหรือผงจะถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องในท่อโลหะแนวนอนหรือแนวตั้งในเครื่องอบแห้งแบบนูเมติกส์ และใช้ไซโคลนเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วออกมา อาหารจะลอยอยู่ในอากาศร้อนภายในท่อมีอาหารที่เบากว่าหรือเล็กกว่าจะแห้งเร็วกว่าและเคลื่อนที่ไปยังไซโคลนเร็วกว่าอาหารที่หนักกว่า อาหารที่ชื้นกว่าจะยังคงลอยอยู่จนกว่าจะมีความชื้นน้อยลง และอาหารจะวนเวียนอยู่ในท่อจนกว่าจะแห้งพอสมควร นิยมใช้เครื่องนี้หลังการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อผลิตอาหารที่มีความชื้นต่ำกว่าปกติ เช่น นมแบบพิเศษ ไข่ผงหรือมันฝรั่งเม็ด

4. เครื่องอบแห้งแบบสายสะพาน (Conveyer dryers หรือ Belt dryers)

ประกอบด้วยสายสะพานแบบต่อเนื่อง ยาวถึง 20 เมตร กว้าง 3 เมตร อาหารซึ่งกองอยู่หนาประมาณ 5 – 15 เซนติเมตร จะถูกทำให้แห้งบนสายพานที่มีรูเล็กๆ อยู่ด้านล่าง อากาศจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนผ่านกองอาหารและเคลื่อนที่กลับลงมาเพื่อป้องกันไม่ให้อาหารปลิวไปจากสายพาน อาหารจะถูกทำให้แห้งจนมีความชื้น 10–15 % และถูกย้ายไปยังเครื่องอบแห้งแบบถังเพื่อการทำแห้งขั้นสุดท้าย มีอัตราการผลิตสูงและสามารถควบคุมการทำงานได้ดี ใช้ในการทำแห้งอาหารในปริมาณสูง เช่น ใช้เวลา 2 –3.5 ชั่วโมง ในการทำแห้งผักและผลไม้ได้ถึง 5.5 ตัน/ชั่วโมง มีการควบคุมการทำแห้งในแต่ละส่วนของเครื่องอย่างอิสระรวมทั้งสามารถวางและยกอาหารลงได้อย่างอัตโนมัติ นับเป็นการช่วยลดแรงงานได้

5. เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed dryers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยถาดโลหะซึ่งมีรูพรุนอยู่ด้านล่างและใส่อาหารชิ้นเล็กๆ สูง 15 เซนติเมตร อากาศร้อนจะพัดขึ้นจากด้านล่างของเครื่องและอากาศเกิดการผสมและกวนอย่างรุนแรง (fluidized) อากาศจึงทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกลางทำแห้งและทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ด้วย วิธีนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของอาหารให้มากที่สุดทำให้การทำแห้งง่ายขึ้น เครื่องมีทั้งแบบเป็นกะและแบบต่อเนื่อง อาหารจะถูกผสมโดยการฟลูอิดไดซ์ในกระบวนการแบบกะ ทำให้ได้อาหารที่แห้งสม่ำเสมอ ในแบบต่อเนื่องมักจะมีฐานสั่นสะเทือนเพื่อช่วยให้อาหารมีการสั่นทำให้อาหารเคลื่อนที่จากถาดหนึ่งไปยังอีกถาดหนึ่งซึ่งอาจมีทั้งหมดถึง 6 ถาดด้วยแรงโน้มถ่วงโลก สำหรับการทำแห้งแบบต่อเนื่องช่วงความชื้นของผลิตภัณฑ์จะค่อนข้างกว้าง จึงต้องมีการใช้เครื่องอบแห้งแบบถังสำหรับการอบแห้งขั้นสุดท้าย ใช้ได้กับอาหารชิ้นเล็กซึ่งสามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ได้โดยไม่เกิดความเสียหายเช่นเดียวกับการแช่เยือกแข็งแบบฟลูอิดไดซ์ เช่น ถั่ว ผักหั่นเป็นแว่นหรือชิ้นเมล็ดธัญพืช Torbed dryer เป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ใหม่ที่สามารถใช้ในการอบแห้งอาหารที่ชื้นๆ การฟลูอิดไดซ์ชิ้นอาหารเหล่านี้ทำได้โดยการหมุนรอบถังโดยอากาศร้อนที่เป่าจากเครื่องเผา เครื่องทำแห้งนี้จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสูงมาก จึงช่วยลดเวลาในการทำแห้งได้มาก จะทำงานกึ่งต่อเนื่องและควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เหมาะสำหรับการทำแห้งด้วยการทำพัฟ (puff drying) การย่าง และการเคลือบผิว

6.เครื่องอบแห้งแบบเตาเผา

มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 2 ชั้น โดยมีห้องอบแห้งที่มีพื้นเป็นช่องๆ อยู่เหนือเตาเผา อากาศร้อนและสารที่ได้จากการเผาจะพัดผ่านกองอาหารที่หนาถึง 20 เซนติเมตร เครื่องนี้ใช้มาแต่ดั้งเดิมสำหรับการอบแห้งแอปเปิลแผ่นในสหรัฐอเมริกา ฮอพในยุโรป การควบคุมสภาวะการทำแห้งค่อนข้างยากและใช้เวลาในการอบแห้งนาน ใช้แรงงานสูงเพราะต้องคอยกลับอาหาร ต้องใส่และยกอาหารออกเอง แต่มีความจุสูง

7. เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้ ผลิตภัณฑ์จะวางเรียงอยู่บนถาด ซ้อนกันเป็นชั้นและถาดของผลิตภัณฑ์ที่เรียงซ้อนหลายๆอันจะนำเข้าไปยังอุโมงค์ที่มีอากาศร้อน สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากอุโมงค์ได้หลายวิธีได้แก่ การไหลสวนทางของอากาศกับการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ผ่านอุโมงค์ หรือการเคลื่อนที่ขนานกันของอากาศและผลิตภัณฑ์ ปัญหาอย่างหนึ่งของเครื่องอบแห้งแบบนี้คือการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในอุโมงค์ เพื่อให้เกิดปัญหานี้น้อยที่สุดจำเป็นต้องให้การกระจายความเร็วของอากาศผ่านอุโมงค์สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer)

กระบวนการอบแห้งที่ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง และอยู่ในสภาพเริ่มต้นเป็นของเหลวได้ดีที่สุด คือการอบแห้งแบบพ่นฝอย ใช้อบแห้งนมและไข่ ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือวงจรการอบแห้งจะเร็ว เวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในห้องอบแห้งสั้น ผลิตภัณฑ์สุดท้ายพร้อมที่จะบรรจุทันทีขณะที่ออกจากเครื่อง เวลาในตู้อบอาจเป็น 3 ถึง 10 วินาที และอนุภาคของผลิตภัณฑ์อุณหภูมิจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิในกระเปาะเปียกของอากาศที่ใช้อบแห้งเลย สามารถใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงที่สุดเข้าอบแห้งโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถแบ่งได้ 4 แบบ คือ

8.1 ชนิดกระแสสวนทางกัน (Counter-current)

ของเหลวจะถูกพ่น ใกล้กับส่วนบนของห้องอบแห้ง (Drying Chamber) จะตกลงมาขณะที่อากาศจะนำเข้าสู่เครื่องใกล้กับด้านล่างของห้องอบแห้ง และเคลื่อนสู่ด้านบน ผ่านหยดของเหลว ผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะออกจากด้านล่างของห้อง ขณะที่อากาศจะถูกกำจัดออกใกล้ส่วนบนของเครื่องอบแห้ง อากาศที่เข้าจะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง จะสัมผัสโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ซึ่งแห้งหรือเกือบแห้ง แต่มีข้อเสียคือ คุณภาพผลิตภัณฑ์จะลดลงเนื่องจากความร้อนที่มีต่อผลิตภัณฑ์

8.2 ชนิดกระแสตามกัน (Co-Current Spray Dryer)

อากาศที่เข้ากับหยดของเหลวที่เกิดขึ้นใหม่ที่เครื่องอะตอมไมเซอร์ (atomizer) หลังจากการผสมตอนต้นแล้ว ผลิตภัณฑ์และอากาศจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันขณะที่กระบวนการทำแห้งดำเนินต่อไป ผลิตภัณฑ์และอากาศส่วนใหญ่จะออกจากห้องอบแห้งที่ทางด้านล่างและเคลื่อนที่ไปยังระบบแยก (separation system) การจัดตัวเช่นนี้อาจจะดีที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหลวจะสัมผัสกับอากาศที่เข้า อุณหภูมิจะสูงและผลิตภัณฑ์แห้งจะสัมผัสกับอากาศหลังจากอุณหภูมิลดลงอย่างมาก

8.3 ชนิดไหลผสมกัน (Mixed flow pattern)

ผลิตภัณฑ์เข้าสู่เครื่องด้วยอะตอมไมเซอร์ ที่อยู่ใกล้กับศูนย์กลางของห้องอบแห้ง อากาศที่เข้าส่วนบนจะเคลื่อนลงมาด้านล่างของห้องอบแห้ง ซึ่งจะสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะเคลื่อนที่ขึ้นบนไปยังช่องอากาศออก ผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องใกล้กับส่วนที่อยู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิของห้องอากาศที่เข้าเครื่องสูง อาจจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงแต่ระบบนี้มีความสามารถในการระเหยต่อหน่วยปริมาตรสูง

8.4 ชนิดที่มีการไหลขนานกัน (Parallel flow)

การไหลของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างจะสม่ำเสมอจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของห้องอบที่แคบ ผลิตภัณฑ์และอากาศจะออกจากห้องอบแห้งด้วยกันแล้วเคลื่อนไปยังส่วนที่ใช้แยกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบลักษณะของเครื่องอบแห้งนี้จะแตกต่างจากชนิดกระแสไหลตามกัน คือ ความเร็วลมที่ใช้สูง (2-3 เมตร/วินาที) ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสูง

9. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอก (Drum Dryers)

ลูกกลิ้งทรงกระบอกร้อนจะหมุนในแนวนอนเพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารละลายหรือของเหลวหนืด ผลิตภัณฑ์จะแห้งขณะที่ติดกับลูกกลิ้งและจะถูกขูดออกโดยใช้ใบมีด เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนแบบการนำจากผิวของลูกกลิ้งไปยังผลิตภัณฑ์ วิธีนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง แต่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามคุณภาพที่ลดลงนี้ทำให้น้อยที่สุดได้โดยทำให้ฟิล์มของผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอ และฟิล์มที่แห้งนี้นำออกไปจากลูกกลิ้งได้หมด เครื่องอบแห้งทรงกระบอกที่ใช้มี 2 ชนิด คือ แบบลูกกลิ้งเดี่ยว และลูกกลิ้งคู่ ชนิดลูกกลิ้งเดี่ยวจะมีฟิล์มของผลิตภัณฑ์อยู่บนผิวลูกกลิ้งได้ โดยจุ่มลูกกลิ้งร้อนในของเหลวผลิตภัณฑ์ หรืออาจใช้ลูกกลิ้งเล็กช่วยพ่นฟิล์มของผลิตภัณฑ์บนลูกกลิ้งร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 ฟุต อัตราการหมุนตั้งแต่ 1 ถึง 10 รอบ/นาที กรณีเป็นลูกกลิ้งคู่ลูกกลิ้งทั้งสองจะวางคู่กันในลักษณะที่จะให้ผลิตภัณฑ์ป้อนเข้าระหว่างลูกกลิ้งทางด้านบน ช่องว่างระหว่างทั้งสองปรับได้เพื่อให้ได้ความหนาของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ การหมุนของลูกกลิ้งคู่ (double-drum) จะหมุนเข้าหากัน แต่ลูกกลิ้งคู่แบบทวิน (twin drum) จะหมุนในทิศทางตรงข้าม และการป้อนจะกระทำได้โดยจุ่มลงในผลิตภัณฑ์เหลว อาจทำงานภายใต้บรรยากาศธรรมดา หรือภายใต้สูญญากาศ ภายในลูกกลิ้งจะมีไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน

2.11 วิทยาศาสตร์การไหล (Rheology)

คำว่าวิทยาศาสตร์การไหล (Rheology) มาจากภาษากรีก โดย rheo หมายถึง to flow ส่วน logos หมายถึง science ซึ่ง Bingham และ Crawford ได้เสนอแนะว่าเป็นศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของเหลวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของแข็ง ความหนืด (Viscosity) จึงเป็นความต้านทานของของเหลวต่อการไหล ความหนืดที่สูงขึ้นก็จะมีความต้านทานต่อการไหลมากขึ้นด้วย ของเหลวธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ ในขณะที่สารกระจายตัวที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีคุณสมบัติการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้ การไหลสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. Newtonian systems
2. Non-Newtonian systems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Newtonian systems

1.1 Newtonian's Law of Flow

เมื่อพิจารณาถึงก่อนของเหลวสี่เหลี่ยมซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดจะถูกยึดไว้ ถ้าแผ่นด้านบนของของเหลวได้รับแรงกระทำ (F') ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างลงถัดไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของเหลวชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของความเร็ว ($d\upsilon$) ระหว่างของเหลวสองแผ่นกับระยะทางที่เปลี่ยนไป (dr) ก็คือ velocity gradient หรือ rate of shear ($d\upsilon/dr$, G) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ (F'/A) ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า shear stress (F) ถ้าของเหลวมีความหนืดที่สูงขึ้นก็ต้องใช้ shear stress ที่สูงมากขึ้นเพื่อที่ให้ได้ค่า rate of shear ที่เท่าเดิม ดังนั้น rate of shear จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ shear stress ดังสมการที่ 1

$$\frac{F'}{A} = \frac{\eta d\upsilon}{dr} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

ซึ่ง η คือ coefficient of viscosity หรือเรียกง่ายๆว่า viscosity สามารถเขียนสมการง่ายๆ คือ

$$\eta = \frac{F}{G} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

การเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ rate of shear หลายๆ จุดจะเรียกว่า rheogram หรือ flow curve ซึ่งของเหลวที่ไหลแบบ newtonian จะมีกราฟการไหลที่มีลักษณะที่เป็นเส้นตรงออกจากจุดกำหนด

หน่วยของความหนืดคือ dyne.sec.cm^{-2} หรือ gram.cm^{-1}.sec^{-1} เรียกเป็น poise

1 poise คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm^2 หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 poise = 100 centipoise) บางครั้งอาจจะใช้คำว่า Fluidity (φ) ในการแสดงความหนืดของของเหลวได้ซึ่ง fluidity เป็นส่วนกลับของความหนืด ($1/\eta$) ของเหลวที่แสดงการไหลแบบนิวโตเนียน ได้แก่ ตัวทำละลายบริสุทธิ์ทั้งหลายเช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, glycerin เป็นต้น และยังรวมไปถึงยาแขวนตะกอนในรูป defloccule ที่มีความเข้มข้นของผงยาน้อย ๆ

1.2 Kinematic viscosity

ใน U.S. Pharmacopeia จะแสดงความหนืดในรูป kinematic viscosity ซึ่งก็คือ ค่า absolute viscosity หารด้วย density ของของเหลว ที่อุณหภูมินั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Kinematic viscosity} = \frac{\rho}{\eta}$$

หน่วยเป็น stoke (s) and centistoke (s)

2 Non-Newtonian Systems

สารที่มีการไหลแบบ non-newtonian ก็คือสารที่มีการไหลไม่เป็นไปตามสมการของนิวตัน ซึ่งได้แก่ colloidal solution, emulsions, liquid suspension และ ointments การไหลแบบนี้สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ plastic, pseudoplastic และ dilatant

2.1 Plastic flow (Bingham bodies)

ของเหลวประเภทนี้จะไหลได้เมื่อให้แรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งเรียกว่า yield value และถ้ายังให้แรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่เกิน yield value ของเหลวก็จะมีการไหลแบบ newtonian Plastic flow มักพบในยาน้ำแขวนตะกอนที่มีผงยาเกาะเป็นกลุ่มในความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งผงยาที่รวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า floccule จะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ เช่น van der waal's force ซึ่งในการไหลจะต้องทำลายแรงเหล่านี้ก่อน ด้วยเหตุนี้ค่า yield value จะเป็นตัวบ่งบอกแรงในการเกิดflocculation ถ้ายาแขวนตะกอนมีการเกิด floccule มากจะทำให้ค่า yield value สูงขึ้น

นิยามของ yield value คือ แรงที่น้อยที่สุดที่ทำให ของเหลวที่แสดงการไหลแบบพลาสติกเริ่มไหล หรือเป็นค่าแสดงถึง flocculation ที่มีในยาเตรียมนั้นๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อ yield value

2.1.1 จำนวนผงยา ถ้าผงยาจับกันเป็น floccule มาก ค่า yield value จะสูงตามไปด้วย

2.1.2 Surfactant และ deflocculating agent จะทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคลดลง หรือไม่มีเลย ค่า yield value จะหมดไป

2.2 Pseudoplastic flow (shear thinning system)

เมื่อให้แรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ต่อของเหลวเหล่านี้จะเกิดการไหล แต่อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่ใช้ มักพบในสารช่วยแขวนตะกอน (suspending agent) ซึ่งเป็นสารกลุ่มพอลิเมอร์ทั้งที่ได้จากธรรมชาติ เช่น tragacanth และ acacia และพอลิเมอร์ สังเคราะห์ เช่น methylcellulose และ sodium carboxymethylcellulose พอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารที่มีโมเลกุลยาวจะพันกันคล้ายเส้นด้ายและจะกักน้ำไว้ระหว่างโมเลกุลของมัน เมื่อให้แรงน้อยๆ พอลิเมอร์เหล่านี้จะมีการเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกับแรงที่ให้เข้าไป และจะเกิดการไหล ถ้าให้แรงมากๆ การไหลจะมากขึ้น ซึ่งความหนืดจะลดลงตามไปด้วย

สาเหตุของการไหลแบบนี้

2.2.1 โมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นในทิศทางของแรงที่ให้

2.2.2 แรงยึดระหว่างโมเลกุลลดลง ความต้านทานการไหลลดลง

2.2.3 น้ำจะถูกปลดปล่อยออกมาภายนอก เพราะการเรียงตัวตามทิศทางของการไหลไม่มีช่องว่างให้น้ำอยู่ซึ่งน้ำที่ถูกปล่อยออกมาจะช่วยหล่อลื่นการไหล

จากการที่ความสัมพันธ ระหว่าง shear stress และ rate of shear ไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งความหนืดของสารจะไม่ใช่ค่าคงที่ เหมือนการไหลแบบ newtonian หรือการไหลแบบ plastic ซึ่งสามารถใช้ค่า yield value และ plastic viscosity ในการเปรียบเทียบได้ดังนั้นในการเปรียบเทียบความหนืดของสารที่มีการไหลแบบนี้จึงต้องหาค่าตัวแทนในการเปรียบเทียบซึ่งวิธีการหนึ่งคือการใช้ สมการ exponential ในสมการที่ 3

$$F^N = \eta' G \qquad \text{สมการที่ 3}$$

ค่า N มีค่าเท่ากับ 1 จะได้สมการที่เหมือนกับ newtonian systems (สมการที่ 2) เมื่อค่า exponent N เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 การไหลจะเป็น peudoplastic

ค่า η' คือ viscosity coefficient สมการที่กล่าวถึงสามารถทำเป็นสมการ logarithmic ได้ดังนี้

$$\log G = N \log F - \log \eta' \qquad \text{สมการที่ 4}$$

ถ้านำค่า log G และ log F มาเขียนกราฟจะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชัน คือ N และจุดตัดบนแกน Y คือ $-\log \eta'$

2.3 Dilatant flow (Shear thickening system)

ของเหลวบางชนิดจะมีแรงต้านทานต่อการไหลมาก เมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ระบบนี้จะมีการเพิ่มปริมาตรเมื่อให้แรง ซึ่งเรียกว่า dilatant การไหลแบบนี้จะพบในยาน้ำแขวนตะกอนที่มีความเข้มข้นของผงยาสูงมากกว่าร้อยละ 50 และเป็นระบบ defloccule เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50% potassium silicate และอนุภาคของแป้งที่กระจายในน้ำเย็น เป็นต้น ในสภาพเป็นผงยาเดี่ยวๆ ที่มีปฏิกิริยาระหว่างผงยาที่อยู่ใกล้เคียงกันน้อย ช่องว่างระหว่างผงยาที่มีน้อยจะมีส่วนที่เป็นน้ำหรือของเหลวอยู่ในช่องว่างเหล่านี้เพียงพอ เมื่อมีการออกแรงเพื่อให้ของเหลวนี้เคลื่อนที่จะทำให้ผงยาที่อยู่ติดๆ กันแยกออกจากกัน (dilate) ช่องว่างระหว่างผงยาก็จะขยายกว้างกว่าเดิม ปริมาณน้ำหรือของเหลวที่อยู่ในระหว่างช่องว่างอยู่แล้ว ก็จะมีปริมาณน้อยลง เมื่อเทียบกับปริมาตรของช่องว่างที่

ขยายออก ผงยาจะถูกหล่อลื่นให้ไหลน้อยลงจึงทำให้ความหนืดของของเหลวเพิ่มมากขึ้น สมการที่ 4 สามารถใช้ทดสอบการไหลแบบนี้ โดยค่า N จะมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งการลดลงของค่า N จะทำให้ทราบถึง dilatency ของระบบ

2.4 การไหลแบบธิโซโทรป (Thixotropy flow)

ของเหลวที่มีการไหลแบบ plastic และ pseudoplastic บางชนิด เมื่อลดแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะทำให้อัตราเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ลดลงอย่างช้าๆ โดยไม่เป็นไปตามความโค้งของกราฟเส้นขาขึ้น (up curve) แต่จะเป็นไปตามความโค้งของกราฟขาลง (down curve) ซึ่งแตกต่างจากของเหลวที่มีการไหลแบบ newtonian ที่มีกราฟขาขึ้นและขาลงทับกัน การที่เส้นกราฟไม่ทับกันของของเหลวที่มีคุณสมบัตินี้ เนื่องมาจากโครงสร้างที่ถูกทำลายจากแรงที่ให้ไม่สามารถสร้างโครงสร้างนั้นกลับคืนได้ ทันทีเมื่อมีแรงกระทำน้อยลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ธิโซโทรปของของเหลวที่มีการไหลแบบ pseudoplastic และplastic การไหลแบบนี้อธิบายได้ว่า ระบบของธิโซโทรป ประกอบด้วยอนุภาคที่มีจุดสัมผัสกันหลายจุดจนเกิดตาข่ายสามมิติมาประสานกัน (three dimensional network) อย่างหลวมๆ เมื่อไม่มีแรงมากระทำโครงสร้างจะจับกันหนาแน่นเป็นเจล เมื่อใช้แรงเขย่าจะไปทำลายจุดที่สัมผัสกันระบบจะเปลี่ยนจากเจลเป็นโซล (gel to sol) ความหนืดลดลงเมื่อหยุดเขย่าโครงสร้างจะกลับมาจับกันเป็นรูปเดิมอีก กระบวนการนี้ไม่ได้เกิดทันที ต้องใช้ เวลาพอสมควร เพื่อให้อนุภาคมาสัมผัสกัน โดยการเคลื่อนที่แบบ แรนดอม บราวเนียน (random brownian movement) เพื่อกลับสู่รูปเดิม การเปลี่ยนแปลงจากลักษณะเจลไปเป็นของเหลวไหลง่ายและเปลี่ยนกลับไปเป็นเจลเช่นเดิมอีก โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเรียกว่า Isothermal reversible gel-sol transformation

Plastic flow with thixotropy

- bentonite magma, veegum, kaolin suspension
- petrolatum

Pseudoplasticflow with thixotropy

- dispersion of synthetic suspending agent เช่น SCMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุดคณะเทคโนโลยีการเกษตร พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.12 ลักษณะของของไหลในอุดมคติ

1. ของไหลนั้นไม่มีความหนืด คือ ของไหลนั้นไม่มีแรงเสียดทานภายในระหว่างชั้นของของไหลนั้น ของไหลนั้นมีลักษณะไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible) ค่าความหนาแน่นมีค่าคงที่

2. ของไหลนั้นมีมีลักษณะสม่ำเสมอ (steady) ความเร็ว ความหนาแน่น และความดันของของไหลไม่เปลี่ยนไปกับเวลา

3.ของไหลไม่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบTurbulenceหรือไม่มีกระแสไหลวน (irrotational) เกิดขึ้น

2.13 เครื่องมือวัดความหนืด

เครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดของของเหลวสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. One–point instrument เหมาะสมสำหรับสารที่แสดงการไหลแบบนิวโตเนียน เพราะในการเขียนกราฟการไหลสามารถเขียนได้จากจุดเพียงจุดเดียวบนเส้นกราฟ เช่น

1.1 Capillary viscometer

1.2 Falling sphere viscometer

2. Multipoint instrument เหมาะสำหรับใช กับสารที่แสดงการไหลทั้ง newtonian และ non-newtonian เช่น

2.1 Cup & bob viscometer

2.2 Cone & plate viscometer

2.3 Brookfield synchrolectic viscometer

2.14 ไมโครเวฟ

ประวัติความเป็นมา ในปี ค.ศ. 1945 บริษัทเรย์เธอร์น ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำหลักการของคลื่นไมโครเวฟจากเรดาห์ในสงครามโลกครั้งที่สองมาใช้ในการปรุงอาหาร เตาไมโครเวฟจึงเริ่มเกิดขึ้น และได้มีวิวัฒนาการเทคโนโลยีใหม่ๆ เช่นเปลี่ยนระบบเตาไมโครเวฟธรรมดามาเป็นระบบจานหมุน ควบคุมการทำงานด้วยระบบ Micro Processor และนำระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

96758

Computer Program Card ระบบ Sensor มาใช้กับเตาไมโครเวฟ และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เตาไมโครเวฟเป็นเตาที่สมบูรณ์แบบอย่างแท้จริง

2.14.1 ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาทีมีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่สั้นกว่า หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือตัวแม็กนิตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เพราะคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงมิใช่รังสี จึงไม่กระจายและสะสมอยู่ในร่างกายมนุษย์

ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทุกทาง โดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหาร เมื่อคลื่นไปกระทบอาหาร ทำให้โมเลกุลของอาหารเกิดการสั่นและเสียดสีกัน ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ลักษณะเช่นเดียวกับการที่เราใช้มือถูกันไปมาเร็วๆ จะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที

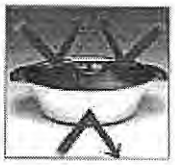
จากคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว จึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหารไว้อย่างครบถ้วน ไม่ว่าจะเป็นการหุง ต้ม อบ นึ่ง ปิ้ง ย่าง ทอด และคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับมากกว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีดังเดิมหลายประการ อาทิความสะดวกรวดเร็ว ประหยัด ปลอดภัย และไร้เขม่า ควันไฟ

2.15 คลื่นไมโครเวฟ

มีลักษณะเด่น 3 ประการ

1. สะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟจะไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นอาหารที่ใส่ในภาชนะที่เป็นโลหะก็จะไม่สุก
2. การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระดาษ ไม้ เซรามิกและพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเป็นภาชนะที่ใช้ได้ดีในเตาไมโครเวฟ
3. การดูดซึม (Absorption) ปกติอาหารโดยทั่วๆ ไป จะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำในอาหารซึ่งจะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่งเมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวทันที ไม่สะสมในอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


สะท้อนกลับ (Reflection)

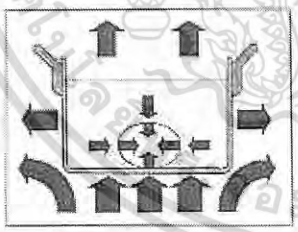
การส่งผ่าน (Transmission)

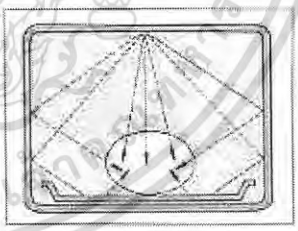
การดูดซึม (Absorption)

ภาพที่ 2.1 ลักษณะ 3 ประการของคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ สะท้อนกลับ (Reflection) การส่งผ่าน (Transmission) การดูดซึม (Absorption)

2.16 หลักการให้ความร้อน

การประกอบอาหารด้วยเตาไมโครเวฟนั้น แตกต่างจากการประกอบอาหารด้วยเตาอบธรรมดา คือเตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาอบแก๊สหรือจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ การพาและการแผ่รังสี แต่เตาไมโครเวฟทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟ ที่มีความถี่สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป จนเกิดเป็นพลังงานจลน์และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายสภาพเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วและเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆ โดยไม่เสียพลังงานความร้อน


การให้ความร้อนแบบธรรมดา


การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ

ภาพที่ 2.2 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแบบธรรมดากับการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ

2.16.1 การเลือกใช้ระดับความร้อนในการประกอบอาหาร

เตาไมโครเวฟได้วิวัฒนาการให้ความสะดวกสบายในการเลือกใช้ระดับของกำลังคลื่นไมโครเวฟในการประกอบอาหารแต่ละประเภทอย่างเหมาะสม เริ่มตั้งแต่การทำละลายอาหารแช่แข็ง อุ่นอาหาร ต้ม ตุ๋น อบ ย่าง ทอด และอีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความร้อนของเตาไมโครเวฟที่ผลิตขึ้นใช้งานส่วนมากจะมี 5 ระดับของการทำงาน คือ High, Medium High, Medium, Medium Low, Low

ตารางที่ 2.1 ระดับความและกำลังคลื่นไมโครเวฟของเตาไมโครเวฟ

ระดับความร้อน	กำลังคลื่นไมโครเวฟ
High	100%
Medium High	70%
Medium	50%
Medium Low	30%
Low	20%

2.16.1.1 High (Full Power)

หมายถึง กำลังแรงสุด ถ้าใช้ระบบนี้ในการปรุงอาหารก็จะช่วยให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว โดยทั่วๆไปใช้ในการปรุงอาหารประเภท ปลา เบคอน ผักต่างๆ อุ่นอาหารให้ร้อน เครื่องดื่มร้อน ละลายเนยและเนื้อ (ประเภทไม่เหนียว)

2.16.1.2 Medium High (Roast)

ระบบนี้เหมาะสำหรับอาหารอบ ปิ้งอาหารและอาหารที่สุกแล้ว โดยทั่วไปจะใช้ระบบนี้กับประเภทอาหารดังนี้ อุ่นอาหารที่ต้องการให้ร้อน อุ่นขนมปัง ไก่ย่างหมูย่างและปรุงอาหารประเภทที่มีส่วนผสมของเนยแข็ง

2.16.1.3 Medium (Simmer)

ระบบนี้เหมาะสำหรับทำอาหารประเภท ซุป สเต็ก ข้าว อบหมูสับ อาหารที่แช่แข็ง ทำแฮมเบอเกอร์ ละลายน้ำแข็งและต้มไข่

2.16.1.4 Medium Low (Deforst)

ระบบนี้ใช้ละลายอาหารที่แช่แข็ง เคี่ยวหรืออุ่นอาหารบางประเภทเท่านั้น อาหารสดส่วนใหญ่จะต้องเก็บรักษาไว้ในห้องเย็น เมื่อต้องการจะใช้ต้องเสียเวลาในการรอคอยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำแข็งละลายหรือคลายความเย็น แต่ระบบนี้ช่วยให้ประหยัดเวลาในการละลายอาหารแช่แข็ง โดยอาหารยังคงสภาพสดไว้เช่นเดิมและไม่เสียคุณค่าทางอาหาร

2.16.1.5 Low (Worm)

ระบบนี้ใช้สำหรับอุ่นอาหารที่ไม่ต้องการให้อาหารร้อนจัดเกินไป จะทำให้รสชาติและสีสันของอาหารสดกว่าการอุ่นจากเตาทั่วๆไป เพราะสามารถปรับระดับความร้อนที่เหมาะสมกับชนิดของอาหารได้ตามที่ต้องการ

2.16.2 การประกอบอาหารด้วยเตาไมโครเวฟ

เทคโนโลยีสมัยใหม่ได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของคนเรามากขึ้น รวมทั้งรูปแบบการปรุงอาหารอย่างทันสมัยด้วยเตาอบไมโครเวฟที่จะเพิ่มความสะดวกสบายและให้คุณประโยชน์นานัปการดังนี้

- ประหยัดเวลา เตาอบไมโครเวฟสามารถย่นเวลาในการประกอบอาหารจากนานนับชั่วโมงเหลือเพียงนาทีเท่านั้น
- ประหยัดพลังงานไฟฟ้า เตาอบไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ถึง 50-60% ส่วนประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าแบบธรรมดามีเพียง 10% เท่านั้น
- ปรุงอาหารได้หลายรูปแบบ เตาอบไมโครเวฟสามารถประกอบอาหาร ต้ม ตุ๋น ผัด นึ่ง ได้ทุกชนิดเหมือนเตาแก๊สหรือเตาทั่วไป
- คงคุณค่าของอาหารได้ครบถ้วน เพราะการประกอบอาหารด้วยเตาอบไมโครเวฟกินเวลาเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงทำให้รักษาคุณค่าของอาหารไว้ได้ทั้งรสและสีสันสวยงามน่ารับประทาน

2.16.3 ภาชนะและวัสดุที่ใช้ในการประกอบอาหาร

เนื่องจากหลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟก่อให้เกิดความร้อน ดังนั้นภาชนะที่ใช้ในการปรุงอาหารจะต้องมีลักษณะพิเศษและมีข้อจำกัดบางประการ ซึ่งจะต้องไม่กระทบต่อระบบการทำงาน ประสิทธิภาพและคลื่นไมโครเวฟ มีดังนี้

2.16.3.1 ภาชนะกระเบื้อง เช่น จาน ชาม ถ้วย หรือภาชนะก้นลึกต่างๆ ที่ใช้รับประทานอารนั้น สามารถใช้ได้ดีกับเตาอบไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.3.2 ภาชนะแก้วทนไฟ ภาชนะแก้วที่ใช้สำหรับเตาธรรมดาเป็นภาชนะที่เหมาะสำหรับเตาไมโครเวฟด้วย ภาชนะแก้วที่ทนความร้อน เช่น ไพเร็กซ์ คอร์นนิ่งแวร์ เครื่องเคลือบเซรามิก และเครื่องปั้นดินเผา

2.16.3.3 ภาชนะพลาสติก ใช้สำหรับอาหารที่ใช้ความร้อนไม่มาก เช่นการอุ่นอาหารหรืออาหารที่ใช้เวลาทำให้สุกสั้นมากและสำหรับอาหารที่ไม่มีมันมาก

2.16.3.4 ภาชนะพลาสติก ประเภทพลาสติกที่ทนร้อน สามารถใช้กับเตาไมโครเวฟได้ดี และภาชนะพลาสติกที่ออกแบบมาโดยเฉพาะกับการใช้งานและต้องระบุด้วยว่าใช้กับเตาไมโครเวฟได้

2.16.3.5 ภาชนะที่ควรหลีกเลี่ยง เช่นภาชนะโลหะ ภาชนะที่เคลือบโลหะหรือมีขอบเป็นโลหะ เงิน ทอง อะลูมิเนียมฟรอยด์และภาชนะประเภทไม้

2.16.4 ข้อควรระวังในการใช้เตาไมโครเวฟ

2.16.4.1 อย่าพยายามบังคับให้เครื่องทำงานในขณะที่ประตูเปิดอยู่ จะทำให้คลื่นไมโครเวฟรั่วไหลออกมา จนเป็นอันตรายได้

2.16.4.2 อย่าใช้เตาอบไมโครเวฟถ้าเกิดการชำรุดเสียหาย การผุกร่อนของผนังเตา ประตูปิดไม่สนิท บานพับและสลักนิรภัยแตกหัก และกระจกของประตูแตกจะให้คลื่นไมโครเวฟรั่วไหลออกมาทำอันตรายต่อผู้ใช้ได้

2.16.4.3 ห้ามเปิดเครื่องใช้งานโดยไม่มีอาหารหรือน้ำ จะทำให้เกิดประกายไฟในเตาได้

2.16.4.4 ภาชนะประเภทขวดที่มีอาหารบรรจุอยู่ เวลานำเข้าเตาไมโครเวฟจำต้องเปิดฝาออกทุกครั้ง มิฉะนั้นจะทำให้ขวดแตกได้ และไม่นำไข่ทั้งฟองเข้าเตาอบจะทำให้ไข่แตกกระจาย

2.16.4.5 ห้ามทอดอาหารหรือคั่วข้าวโพดในเตาไมโครเวฟ จะเกิดการลุกไหม้ขึ้นได้

2.16.4.6 อย่าใช้เตาอบไมโครเวฟอุ่นสารเคมี อบผ้าหรือกระดาษที่เปียกให้แห้งจะทำให้เกิดการ ลุกไหม้ ทำให้เตาอบชำรุดใช้การไม่ได้

2.16.4.7 การซ่อมหรือปรับแต่งเตาอบไมโครเวฟ ควรได้รับการบริการจากช่างผู้ชำนาญเท่านั้น

2.16.5 การบำรุงรักษาเตาอบไมโครเวฟอย่างถูกวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.5.1 ถอดปลั๊กไฟออกก่อนทำความสะอาดทุกครั้ง เพื่อความปลอดภัยจากไฟฟ้า และคลื่นไมโครเวฟ

2.16.5.2 รักษาภายในเตาอบไมโครเวฟให้สะอาดอยู่เสมอ ถ้ามีอาหารกระเด็นโดนผนังภายในให้ ใช้ผ้าชื้นนุ่มๆเช็ดออก หากสกปรกมากให้ใช้ผงซักฟอกอ่อนๆได้ ห้ามใช้ของมีคมขูด

2.16.5.3 ภายนอกของเตาอบไมโครเวฟควรใช้สบู่กับน้ำเช็ดออก แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้านุ่มๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนภายในเตาอบ และไม่ควรให้น้ำไหลซึมเข้าไปในช่องระบายอากาศได้

2.16.5.4 หากแผงควบคุมเปียกให้ใช้ผ้าแห้งนุ่มๆเช็ดทำความสะอาด ห้ามใช้ผงซักฟอกหรือของมีคมขัดถู จะทำให้แผงควบคุมเสียหายได้

2.16.5.5 หากเกิดไอน้ำเกาะประตูเตาอบทั้งด้านนอกและด้านในให้เช็ดด้วยผ้านุ่มๆ

2.16.5.6 การนำจานแก้วออกมาทำความสะอาด ให้ล้างด้วยน้ำอุ่นผสมสบู่

2.16.5.7 ขาสำหรับทำให้จานหมุนและพื้นเตาอบควรทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ

2.16.5.8 หากจานแก้วยังร้อนอยู่ ควรรอให้เย็นแล้วจึงทำความสะอาด

2.16.5.9 ควรตั้งเตาอบไมโครเวฟไว้ในที่อากาศถ่ายเทได้ดี ควรมีช่องว่างสำหรับช่วยระบายอากาศโดยรอบข้างให้เหมาะสม ไม่ควรตั้งติดผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1 ตู้ไมโครเวฟ 800 วัตต์
2 ปั้มน้ำ
3 แผ่นอคิลิคใส หนา 3 มิลลิเมตร
4 เมทิลีนคลอไรด์
5 ท่อยาง
6 น้ำตาล
7 น้ำ
8 กระติกน้ำ
9 ใบเลื่อย
10 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
11 รีเฟลกโตมิเตอร์
12 ท่อ PVC

3.2 สถานที่ทำการทดลอง

ตึกเจ้าคุณทหาร โครงการคณะอุตสาหกรรรเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

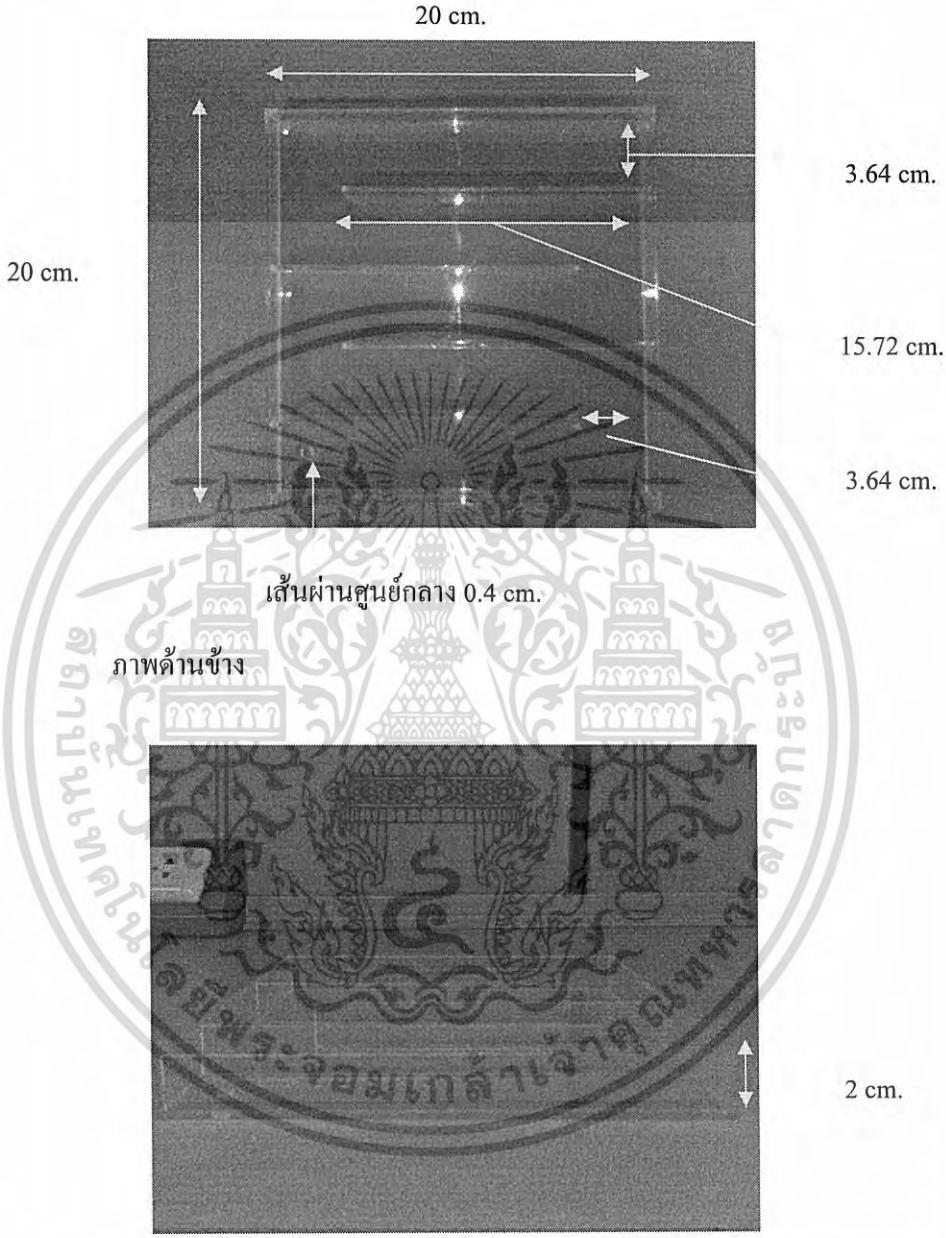
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานปัญหาพิเศษ

3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการลำเลียงน้ำเชื่อม เพื่อทำการระเหย

1. ออกแบบรางระเหยที่จากแผ่นอคริลิคหนา 0.3 cm. เพื่อใช้เป็นพื้นที่ในการระเหย ออกแบบรูปร่าง, องค์ประกอบโดยรวมของรางน้ำทั้งหมด ดังภาพที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

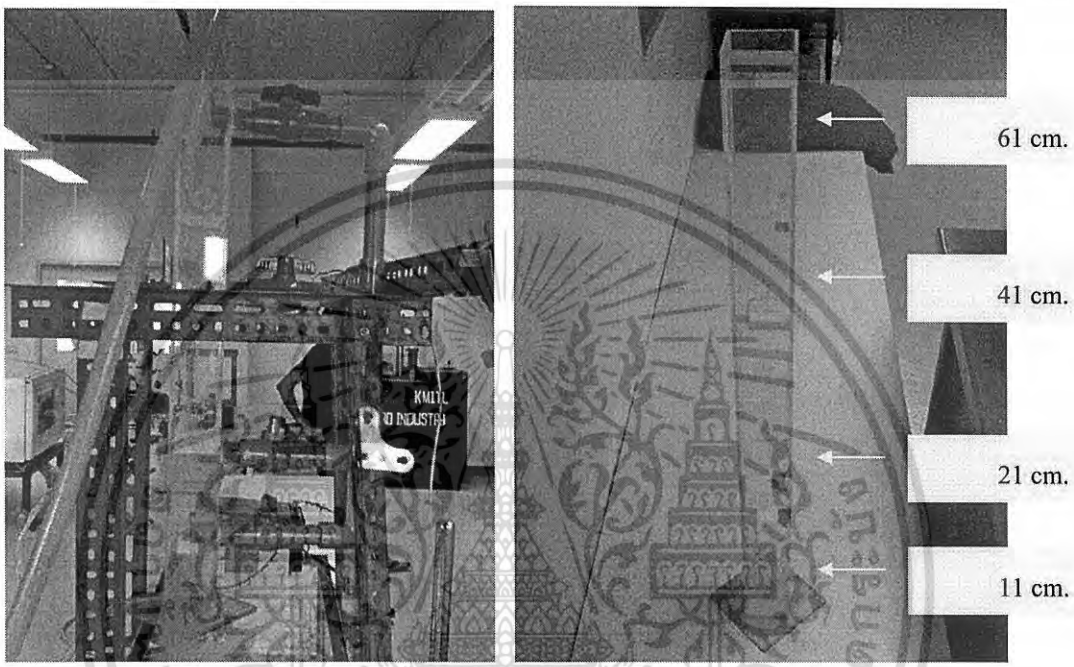
ภาพด้านบน



ภาพที่ 3.1 แสดงรางระเหยสำหรับการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟที่ออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วยภาพด้านบนและด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

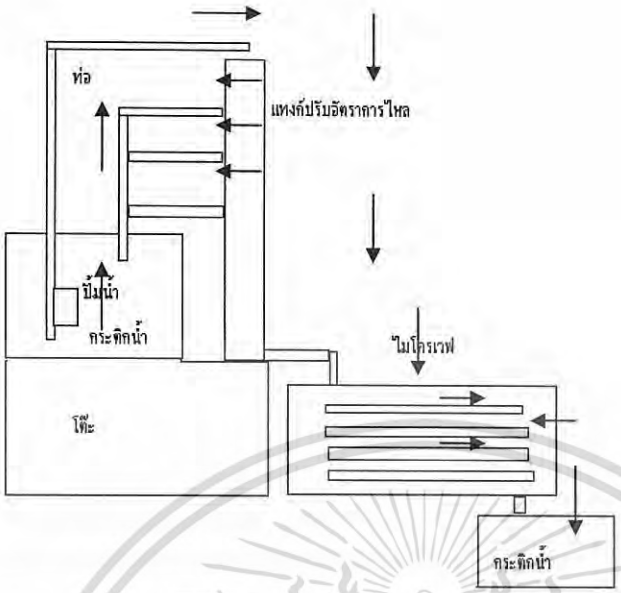
2. ออกแทงก์ปรับอัตราการไหลที่ใช้ในการปล่อยน้ำ โดยใช้แผ่นอคริลิคหนา 0.3 cm. ขนาด กว้าง 5 x 5 cm. สูง 75 cm. แล้วเจาะรูที่ระดับความสูงจากฐาน (h) ที่ระดับ 1 (11 cm.), 2 (21 cm.), 3 (41 cm.), และ 4 (61 cm.) และต่อท่อ PVC ที่ระดับต่างๆ เพื่อใช้ในการรักษาระดับน้ำที่จะทำการปล่อยลงในรางน้ำให้คงที่ ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แสดงแทงก์ปรับอัตราการไหลของตัวอย่างน้ำด้วยไมโครเวฟที่ออกแบบและสร้างขึ้น

3. ประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดตามแบบ ดังภาพที่ 3.3 ตัวอย่างจากกระติกน้ำจะถูกดูดขึ้นไปตามท่อ PVC ด้วยปั๊มน้ำ แล้วไหลเข้าไปในแทงก์ปรับอัตราการไหลจากนั้นเมื่อตัวอย่างออกจากแทงก์แล้วจะไหลเข้าไปในรางน้ำที่จัดวางอยู่ในเครื่องไมโครเวฟ เมื่อผ่านการให้ความร้อน ไหลออกจากไมโครเวฟแล้ว ตัวอย่างจะไหลเข้าไปในกระติกเพื่อวัดค่า อุณหภูมิสุดท้ายด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และความเข้มข้นสุดท้ายรีเฟลกโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ศึกษาการระเหยน้ำด้วยไมโครเวฟ และทิศทางการไหลของของเหลวที่ผ่านการระเหย

3.3.2 การทดลองหาปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยด้วยไมโครเวฟ

1. วัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเชื่อมที่ 5 °Brix
2. เปิดปั๊มน้ำให้ทำงานเพื่อดูดน้ำเข้าไปในแทงค์ปล่อยน้ำ แล้วปรับระดับอัตราการไหลที่แทงค์น้ำซึ่งมีอยู่ 4 ระดับ ได้แก่ 0.19, 0.33, 0.5 และ 0.66 ลิตรต่อนาที
3. ปรับระดับที่เตาไมโครเวฟซึ่งมีอยู่ 5 ระดับ ได้แก่ 90, 180, 360, 600 และ 800 วัตต์
4. ปล่อยน้ำที่ระดับอัตราการไหลสูงที่สุดไปหาต่ำที่สุด เมื่อทำครบแล้วจึงปรับระดับกำลังเครื่องให้มากขึ้น จนครบทุกระดับ
5. เมื่อได้น้ำเชื่อมที่ผ่านการระเหยแล้วปริมาตร 1 ลิตร ทำการวัดค่าความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย
6. ทำซ้ำที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20, 30 และ 40 °Brix
7. วิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการระเหย ด้วย F-test โดยใช้โปรแกรม SPSS และนำปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการระเหย ไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T, °C)และ ระดับความเข้มข้น (C, °Brix) ของตัวอย่างกับระยะเวลาให้ไมโครเวฟ (t, min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การคำนวณหาอัตราการไหล

คำนวณหาอัตราการไหล โดยคำนวณจากเวลาที่ได้ปริมาตรน้ำเชื่อมสุดท้ายเท่ากับ 1 ลิตร แล้วคำนวณอัตราการไหลต่อนาที จะได้ระดับอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหล ได้ 4 ระดับ ระหว่าง 0.19 – 0.66 (l/min)

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราการไหลต่อนาทีของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ระดับอัตราการไหล	ปริมาตร (ml)	เวลาที่ได้ปริมาตรสุดท้าย 1 ลิตร (min)	อัตราการไหล (l/min)
1	770	5.18	0.19
2	820	3.00	0.33
3	925	2.02	0.50
4	1105	1.30	0.66

4.2 การหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้าย

จากการทดลองโดยให้ปั๊มน้ำทำงาน ทำให้น้ำเชื่อมไหลขึ้นไปในแทงก์ปรับอัตราการไหล ซึ้งสามารถปรับอัตราการไหลได้ 4 ระดับ คือ 0.19, 0.33, 0.50และ0.66 ลิตรต่อนาที จากการปรับความสูงของระดับน้ำเชื่อมภายในแทงก์ปรับอัตราการไหล 4 ระดับความสูง คือ 11, 21, 41และ61 เซนติเมตร น้ำเชื่อมจะไหลออกจากแทงก์ปรับอัตราการไหลไปสู่ไมโครเวฟเวฟทางช่องเปิดด้านล่างของแทงก์ปรับอัตราการไหล โดยภายในไมโครเวฟจะถูกติดตั้งรางระเหยจำนวน 5 ชั้นไว้ และไมโครเวฟสามารถปรับระดับกำลังงานได้ 5 ระดับ คือ 90, 180, 360, 600 และ800 วัตต์ แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเชื่อมจะไหลออกจากช่องเปิดด้านล่างของไมโครเวฟลงสู่กระติกน้ำ วัดค่าความเข้มนข้นและอุณหภูมิสุดท้าย ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำของน้ำเชื่อม ได้แก่

1. ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเริ่มต้น
2. อัตราการไหลของน้ำเชื่อม
3. กำลังงานเครื่องไมโครเวฟ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยน้ำของน้ำเชื่อมจะศึกษาการระเหยจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเชื่อม

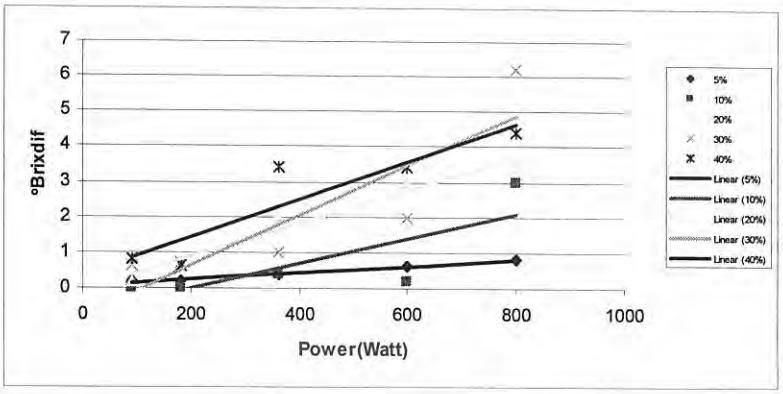
ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเริ่มต้นที่มีต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายแสดงในหัวข้อ 4.2.1 ผลของอัตราการไหลที่มีต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายในหัวข้อ 4.2.2 และผลของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟที่มีต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายแสดงในหัวข้อ4.2.3

4.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย

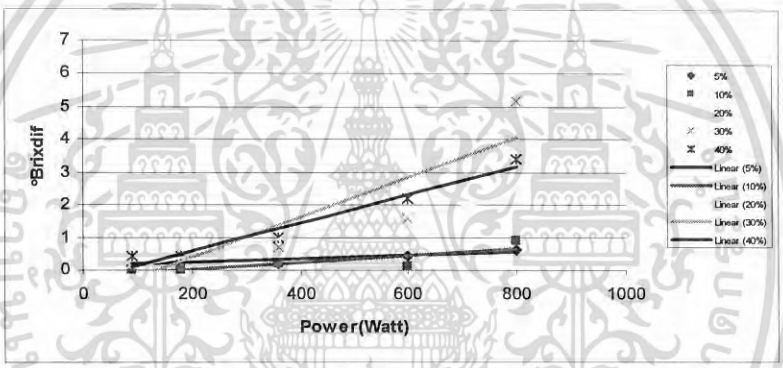
ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความเข้มข้นสุดท้าย มีอิทธิพลโดยจากกราฟเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น ค่าความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยจากความเข้มข้นเริ่มต้น ได้ค่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นดังนี้ 0.3, 0.3, 1.3, 1.3และ1.4 ตามลำดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5, 10, 20, 30และ40 จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นมีอัตรามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้น เมื่อพลอต กราฟจะเห็นความสัมพันธ์แสดงรูปกราฟที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสุดท้าย (^{o}Brixdif)ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่ออุณหภูมิสุดท้ายได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่ามากขึ้น อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยโดยอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อพลอตกราฟ จะเห็นความสัมพันธ์ แสดงรูปกราฟที่ 4.5, 4.6, 4.7และ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ(Tempdif) ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ

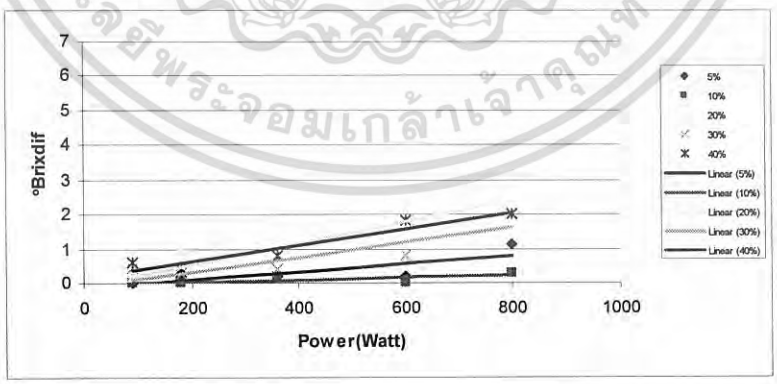
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.19 l/min

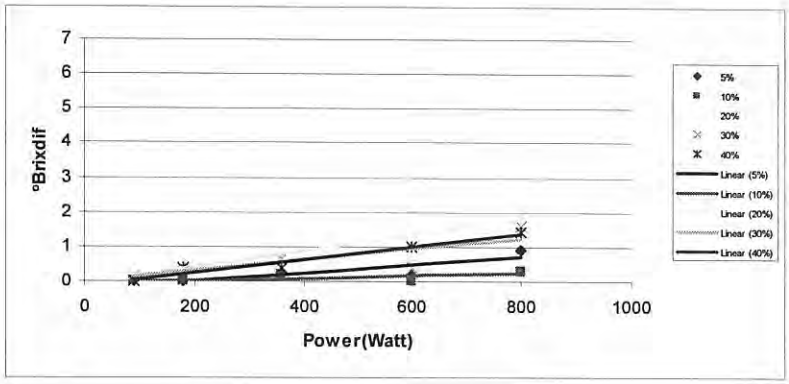


ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.33 l/min

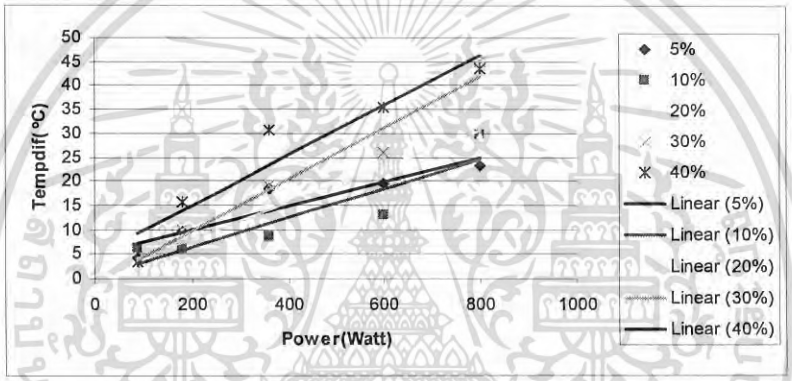


ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.5 l/min

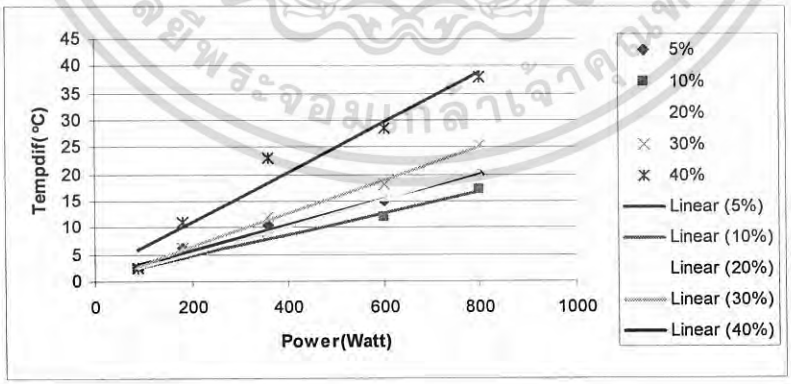
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่อัตราการไหล 0.66 l/min

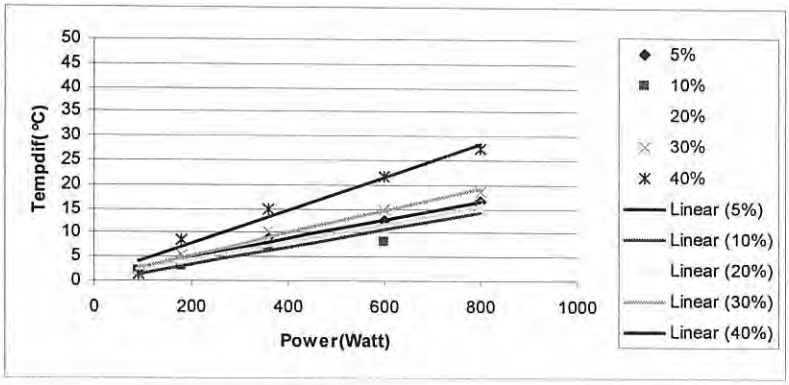


ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล0.19 l/min

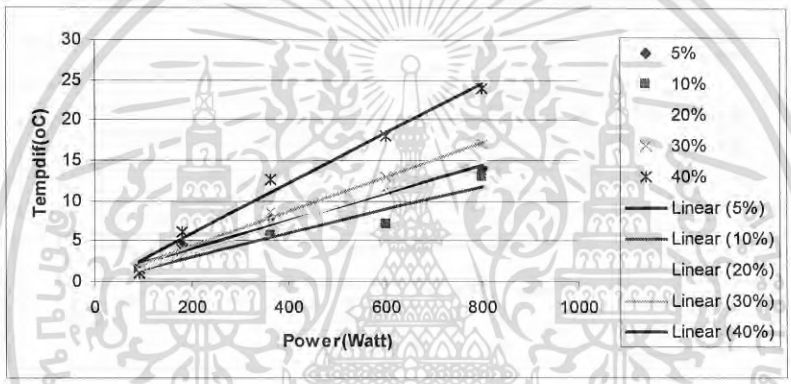


ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล 0.33 l/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล0.50 l/min



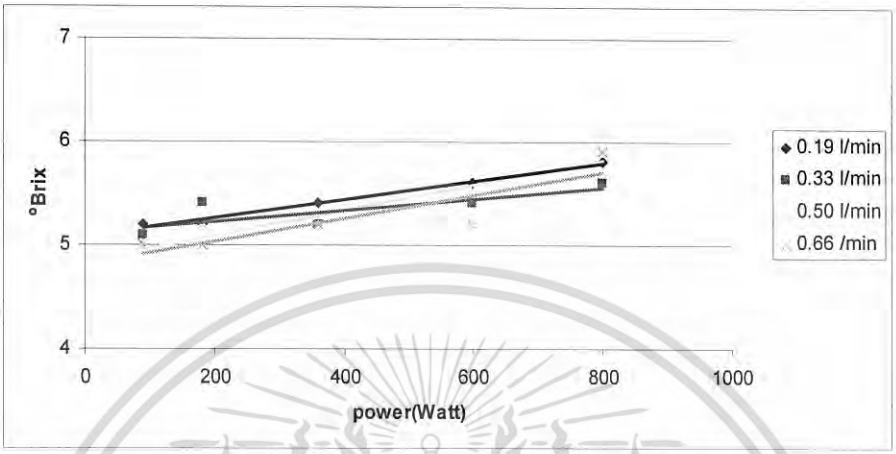
ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ระดับ ที่ อัตราการไหล0.66 l/min

4.2.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย

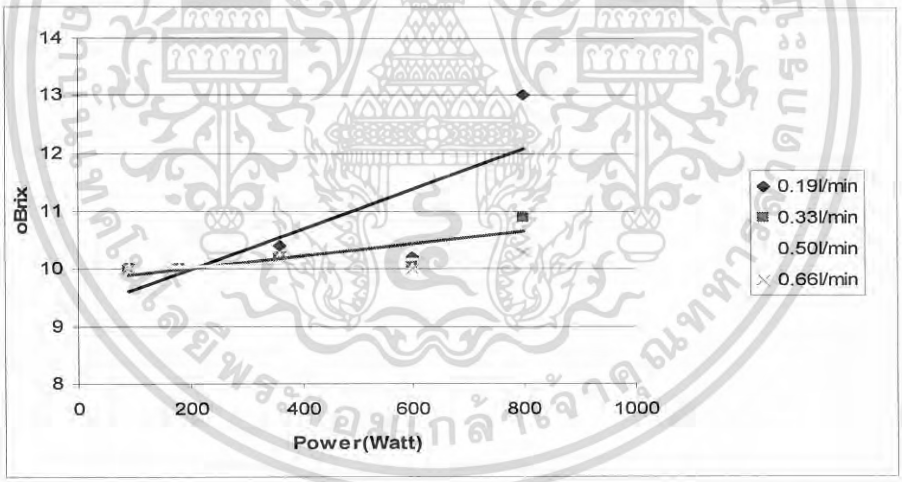
ผลของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟที่มีต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายมีความสัมพันธ์กัน จะเห็นว่าเมื่อกำลังงานเครื่องไมโครเวฟ(Power)มีค่ามากขึ้น ความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ย ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยและอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติโดยอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยของแต่ละระดับกำลังงานเครื่องไมโครเวฟมีความแตกต่างกันทางสถิติทุกระดับ เมื่อพลอตกราฟจะเห็นความสัมพันธ์แสดงดังรูปกราฟที่ 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น(^{o}Brix)ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับกำลังเครื่องไมโครเวฟ(Power) 5 ระดับ รูปกราฟที่ 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(Tempdif)ที่ระดับกำลังเครื่องไมโครเวฟ(Power) 5 ระดับ

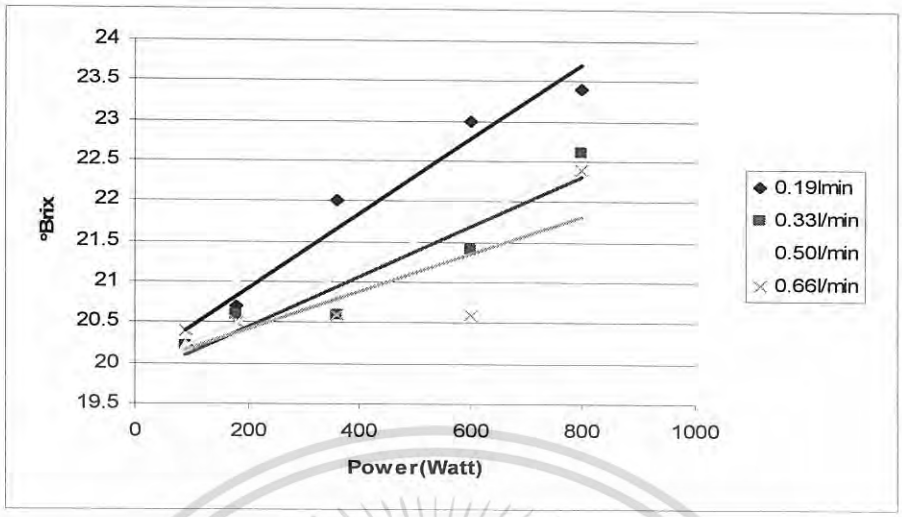


ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

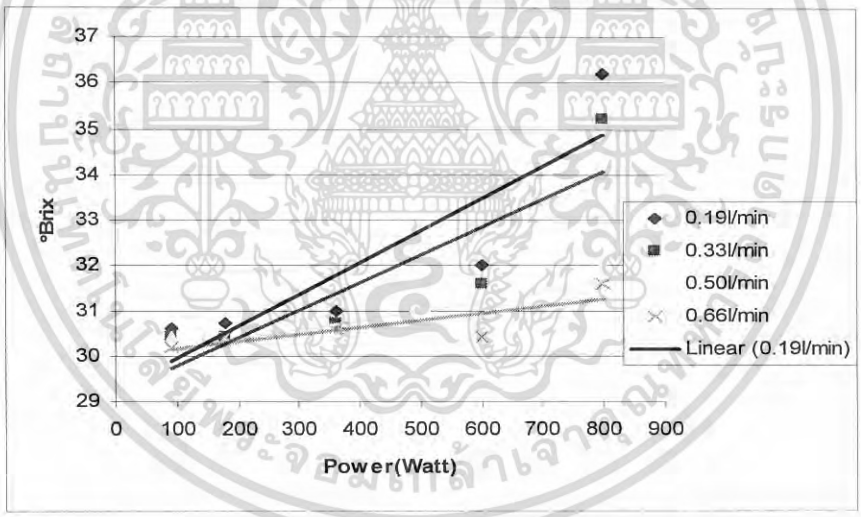


ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

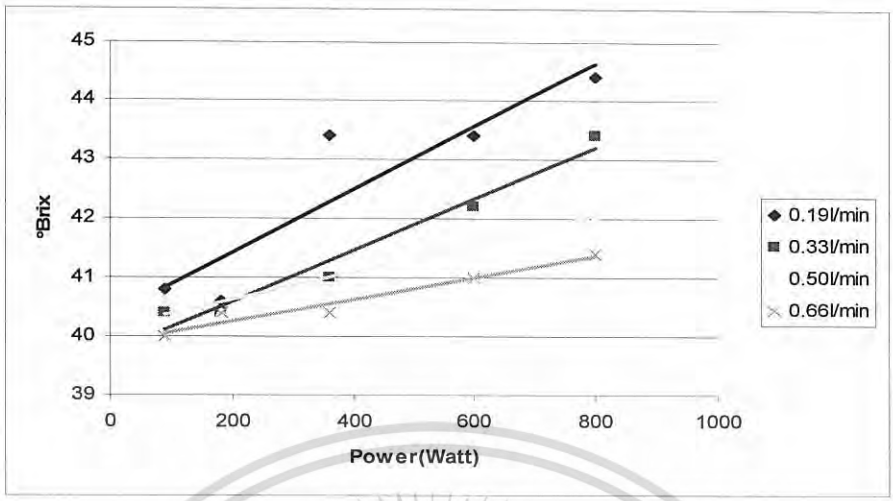


ภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

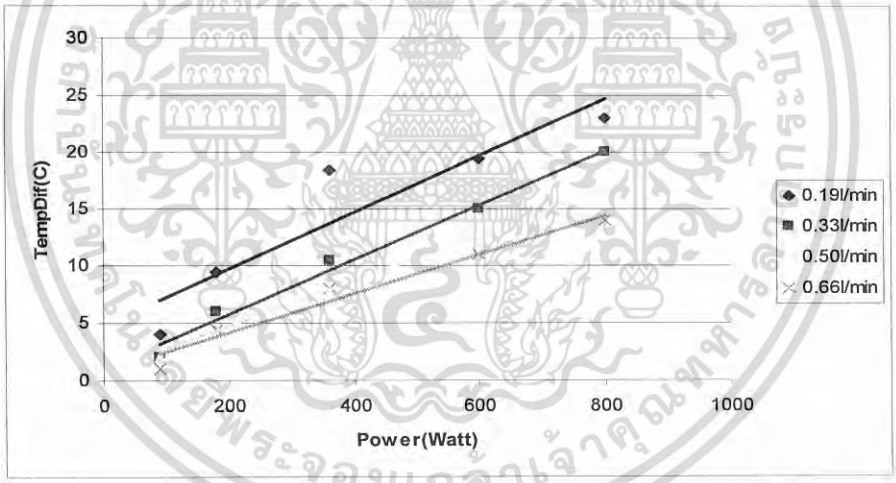


ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30°Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

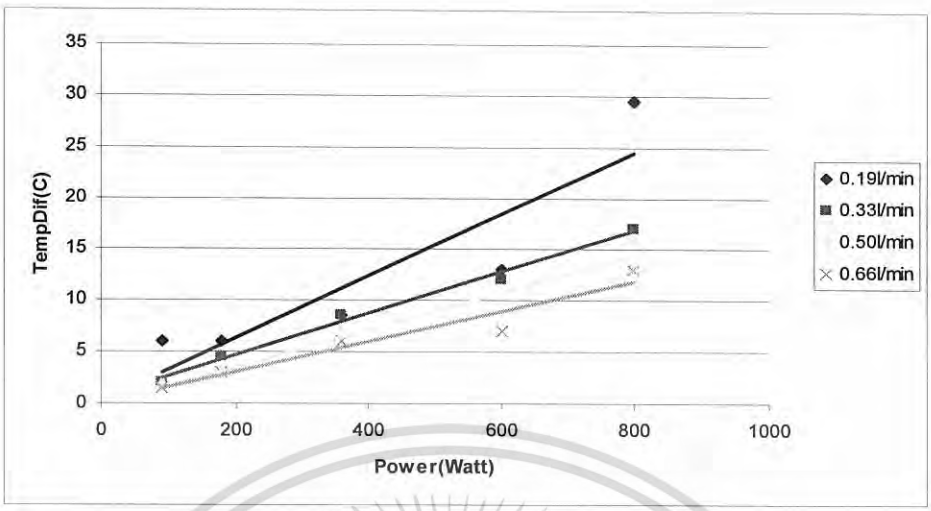


ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

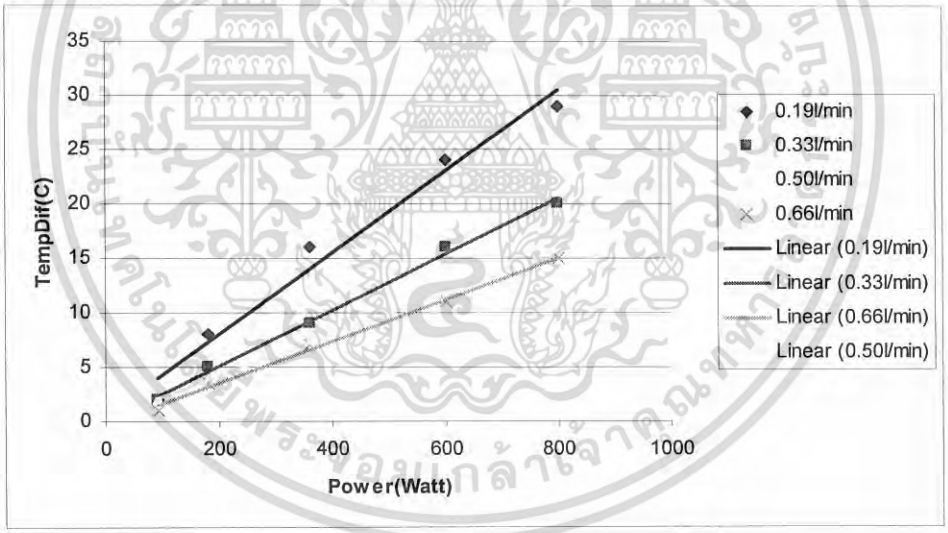


ภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

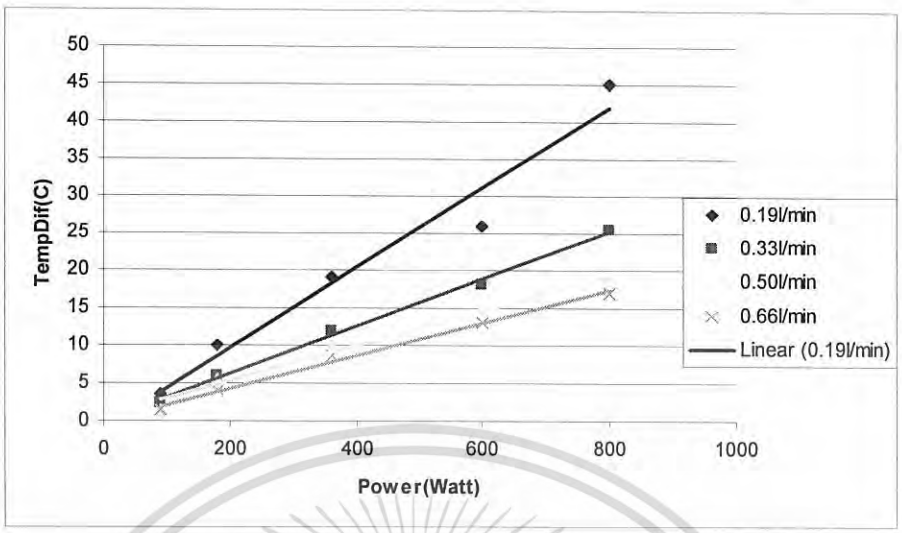


ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

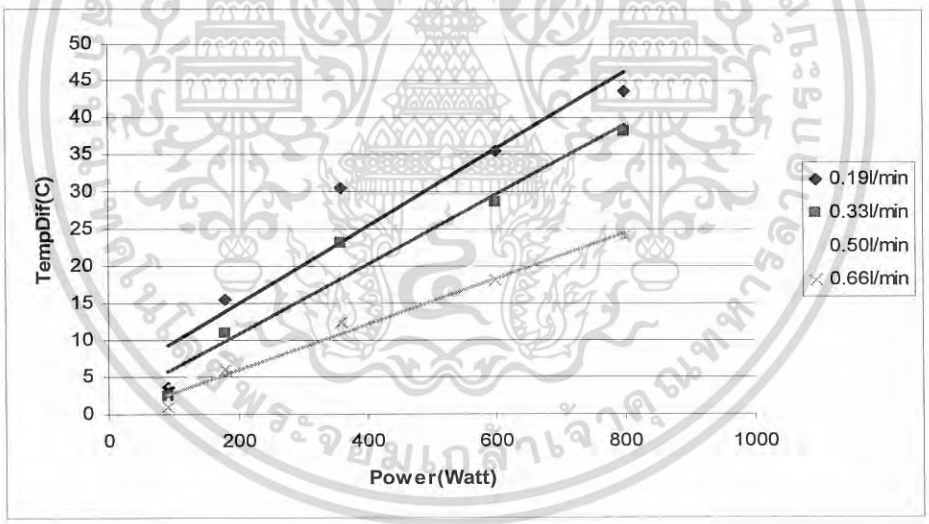


ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix

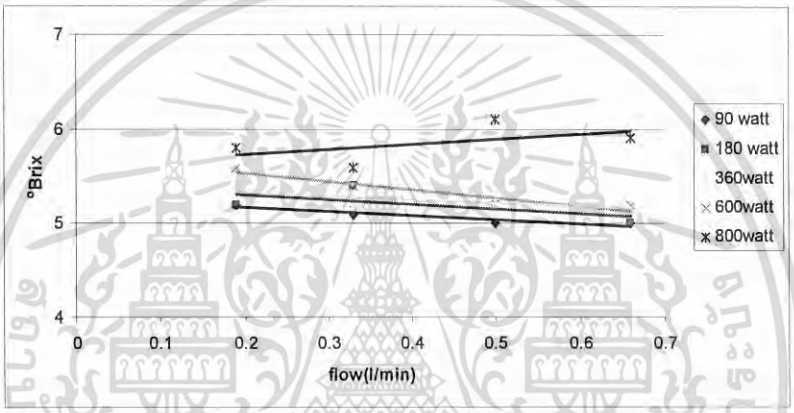


ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานเครื่องไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

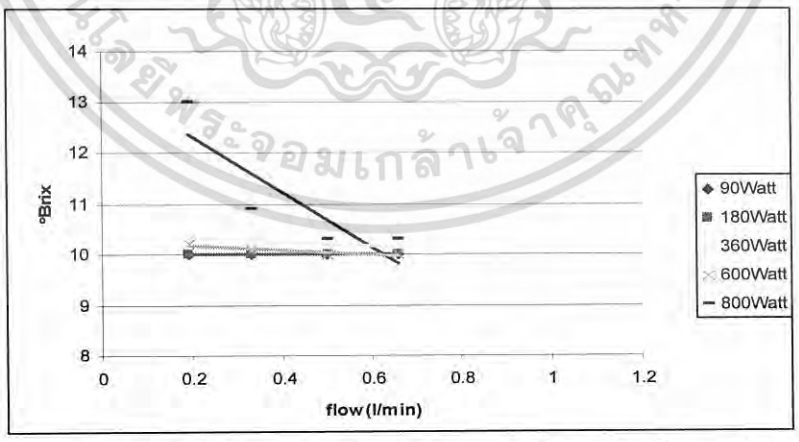
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลของอัตราการไหลที่มีต่อความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย

ผลของอัตราการไหลที่มีต่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสุดท้ายมีความสัมพันธ์กัน จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหล(Q)มีค่ามากขึ้น ความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ย จะมีค่าน้อยลง ความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยและอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยกำกับด้วยตัวอักษรต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติโดยอุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยของแต่ละอัตราการไหลมีความแตกต่างกันทางสถิติทุกระดับ เมื่อพลอตกราฟจะเห็นความสัมพันธ์แสดงดังรูปกราฟที่ 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น(°Brix)ที่ระดับอัตราการไหล 4 ระดับ รูปกราฟที่ 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 และ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(Tempdif)ที่ระดับอัตราการไหล 4 ระดับ

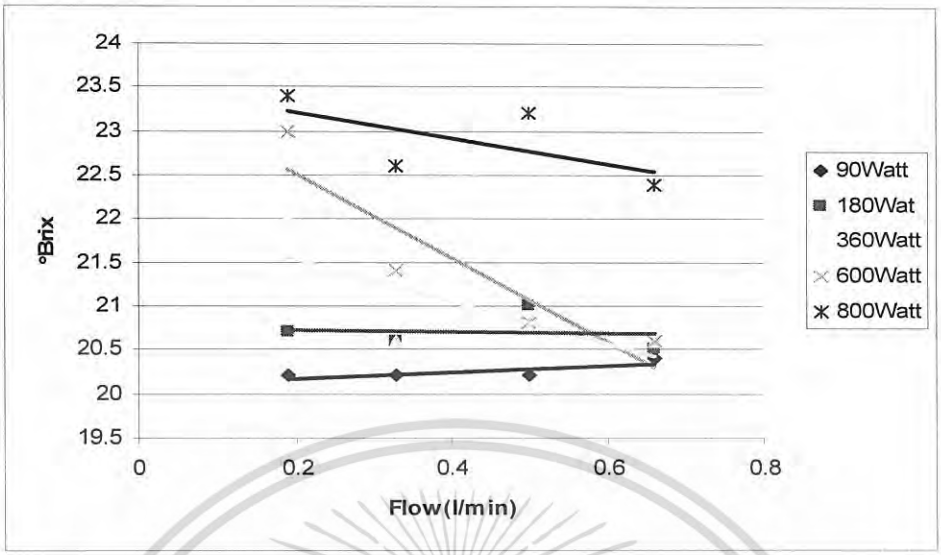


ภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

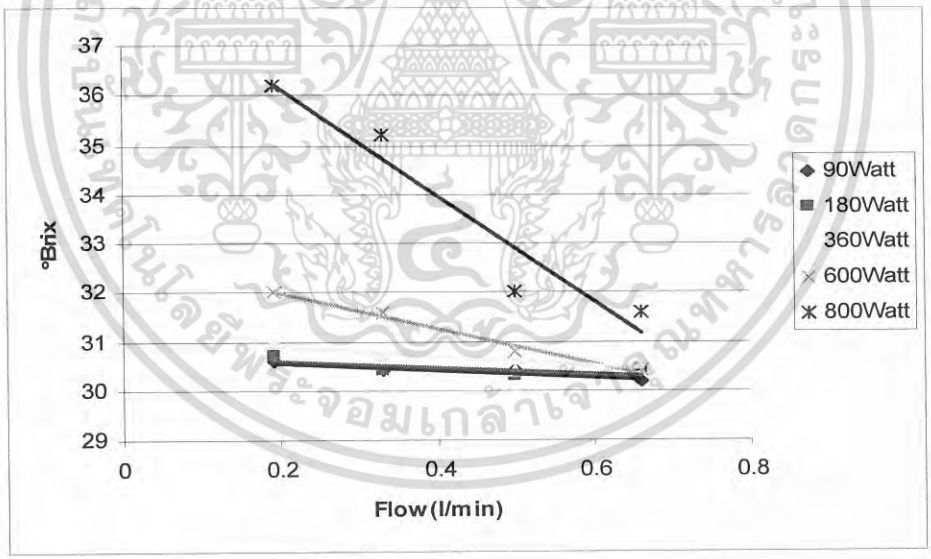


ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

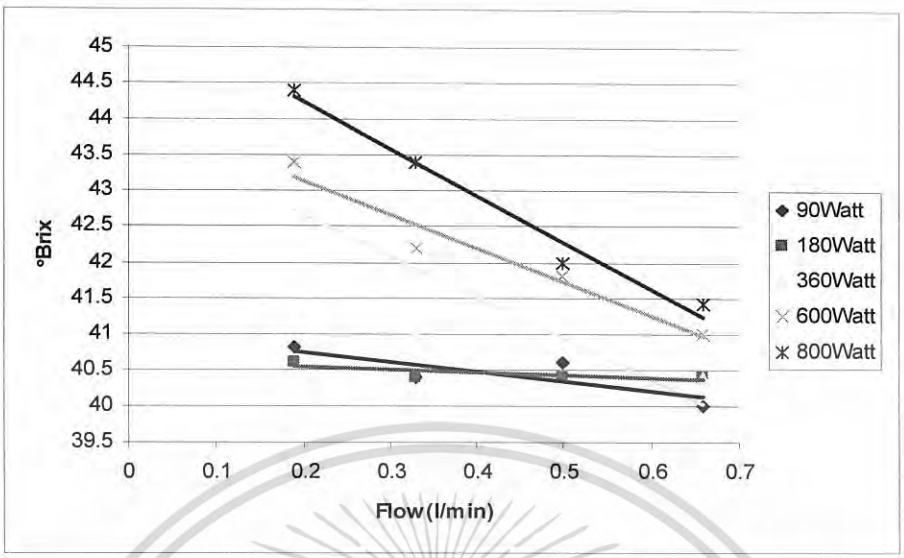


ภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

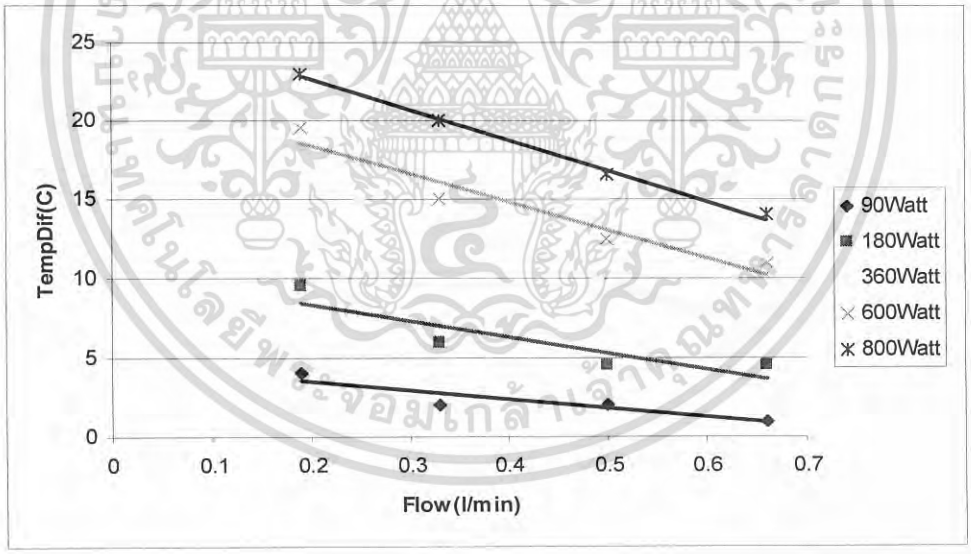


ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

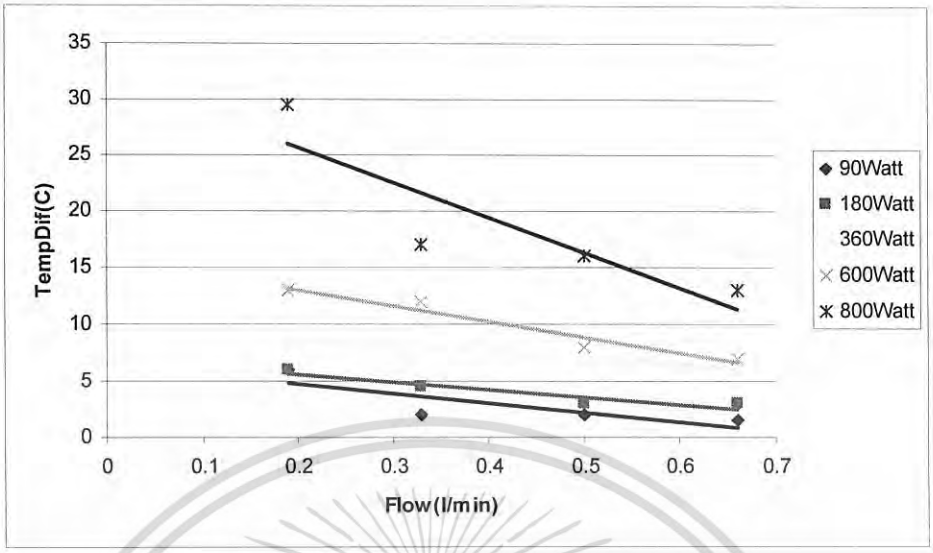


ภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

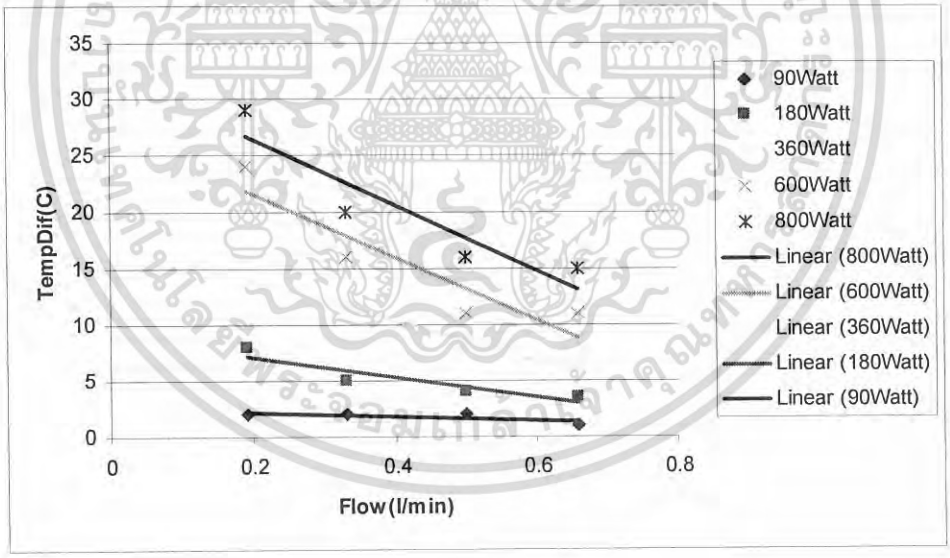


ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

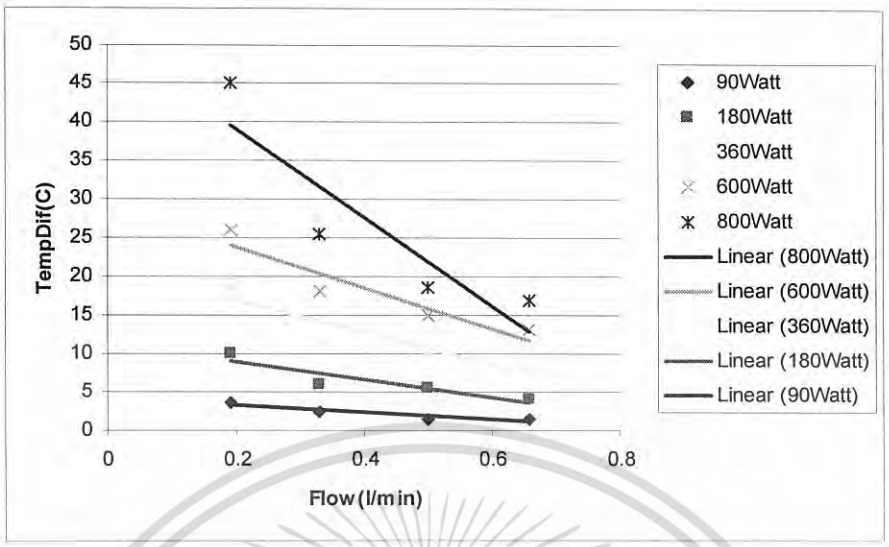


ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

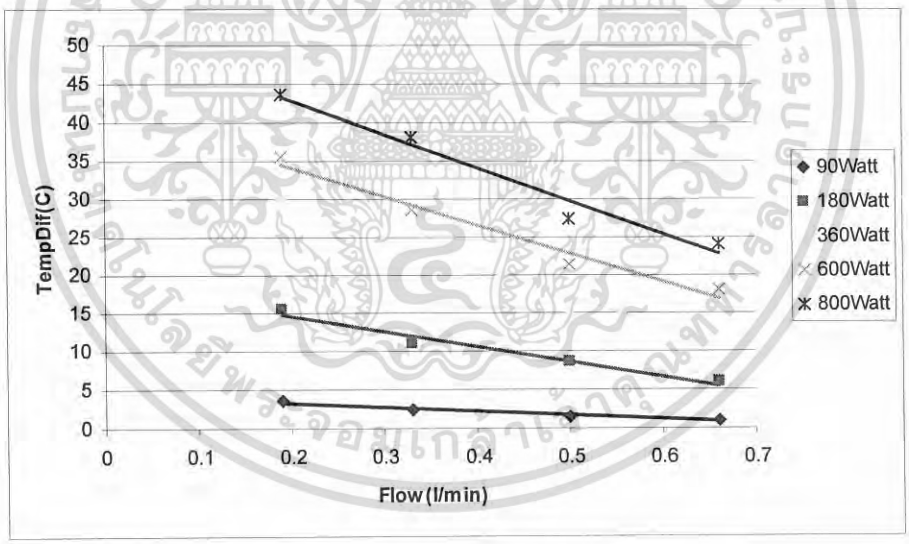


ภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix



ภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

จากผลที่กล่าวมาปัจจัยที่ทดลองทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเชื่อม กำลังงานเครื่องของไมโครเวฟและอัตราการไหลของน้ำเชื่อมมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มและอุณหภูมิสุดท้ายทั้งทางสถิติและจากการพิจารณาจากรูปกราฟโดยความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเชื่อมมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย กำลังของเตาไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย อัตราการไหลของน้ำเชื่อม มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์มาหาสมการความสัมพันธ์ในหัวข้อ 4.3

4.3 การหาสมการความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา และความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา

จากความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยดังที่ได้กล่าวมาสามารถนำความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีต่อความเข้มข้นสุดและอุณหภูมิสุดท้ายมาทำสมการความสัมพันธ์โดยให้ความเข้มข้นและอุณหภูมิเป็นส่วนที่ต้องการทราบเมื่อกำหนดปัจจัยต่าง ๆ เป็นตัวแปรต้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและอุณหภูมิเมื่อเวลาผ่านไปโดยการเปลี่ยนปัจจัยอัตราการไหลให้เป็นปัจจัยในส่วนของเวลา โดยการกลับส่วนของอัตราการไหล(ลิตรต่อนาที) เป็นเวลาต่อ 1 ลิตร(นาทีต่อลิตร)แล้วทำการพลอตกราฟความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (C) กับเวลา (t) ทุกระดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ระดับกำลังงานเครื่องทั้ง 5 ระดับดังรูปกราฟที่ 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33 และพลอตกราฟความสัมพันธ์ของเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) กับเวลา (t) ทุกระดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ระดับกำลังงานเครื่องทั้ง 5 ระดับดังรูปกราฟที่ 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38 โดยความสัมพันธ์ทั้ง 2 ความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และหาค่าคงที่ k_i ซึ่งคือความชันของแต่ละเส้นกราฟ

เมื่อวิเคราะห์ Multiple Linear Regression ได้ค่า k ของความเข้มข้นแปรตามกำลังงาน () เครื่องไมโครเวฟ (W) และอุณหภูมิเริ่มต้น (T_{in}) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$k = 0.0009725(W) - 0.0494(T_{in}) + 1.251$$

ค่า k ของอุณหภูมิมีตัวแปรต้นเป็น กำลังงานเครื่องไมโครเวฟและความเข้มข้นเริ่มต้นได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$k = 0.008728(W) + 0.07445(Brix_{in}) - 1.290$$

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นและอุณหภูมิที่เวลาที่ต้องการ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ เป็น มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเชิงบวกดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้เป็นสมการของเส้นตรงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการหาความเข้มข้นสุดท้ายที่เวลาใด ๆ หาได้จากสมการ

$$C_t = C_i + kt$$

$$k = 0.0009725(W) - 0.0494(T_{in}) + 1.251$$

เมื่อ C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลา t (°Brix)

C_i คือความเข้มข้นเริ่มต้น (°Brix)

t คือ เวลา (min)

W คือ กำลังงานเครื่องไมโครเวฟ (Watt)

T_{in} คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

เมื่อต้องการอุณหภูมิสุดท้ายที่เวลาใด ๆ หาได้จากสมการ

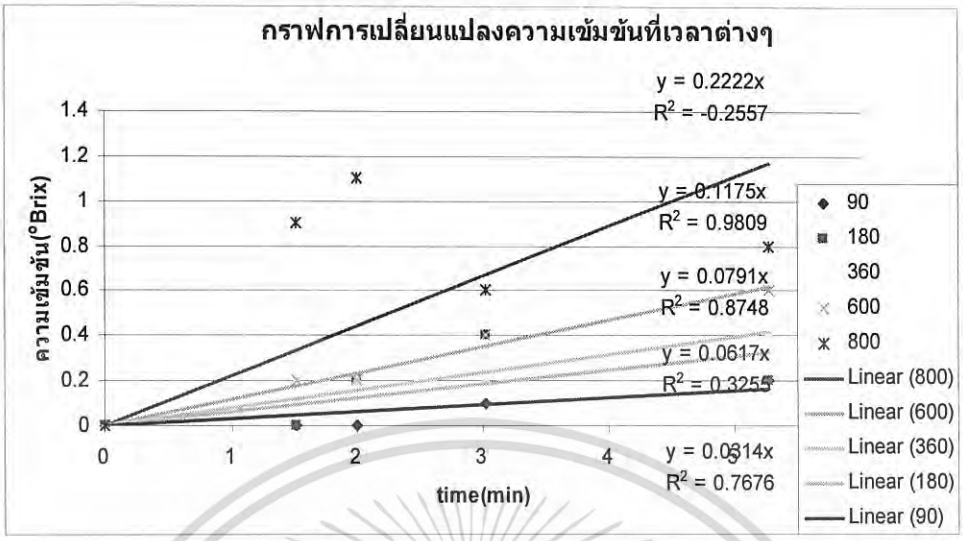
$$T_t = T_{in} + kt$$

$$k = 0.008728(W) + 0.07445(Brix_{in}) - 1.290$$

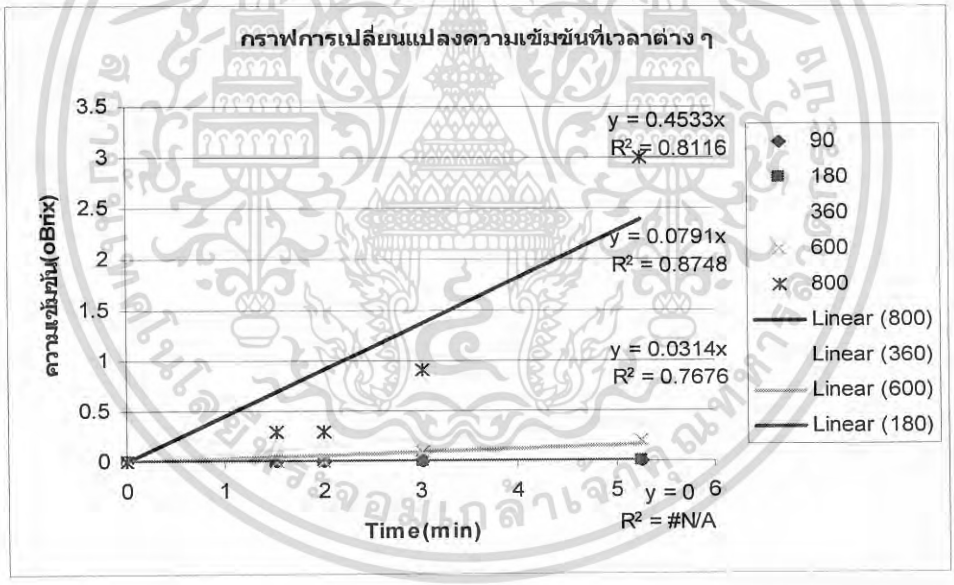
เมื่อ T_t คือ อุณหภูมิที่เวลา t (°C)

$Brix_{in}$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (°Brix)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

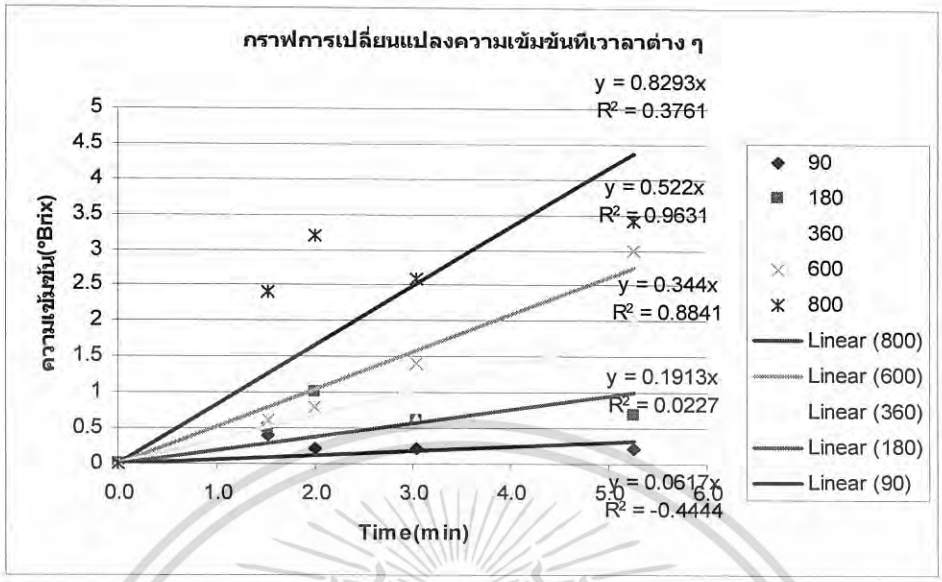


ภาพที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

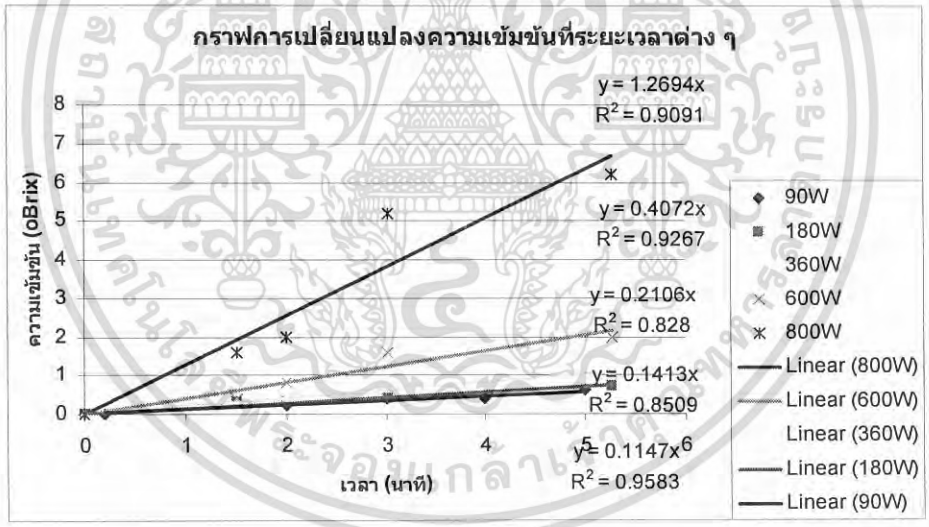


ภาพที่ 4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

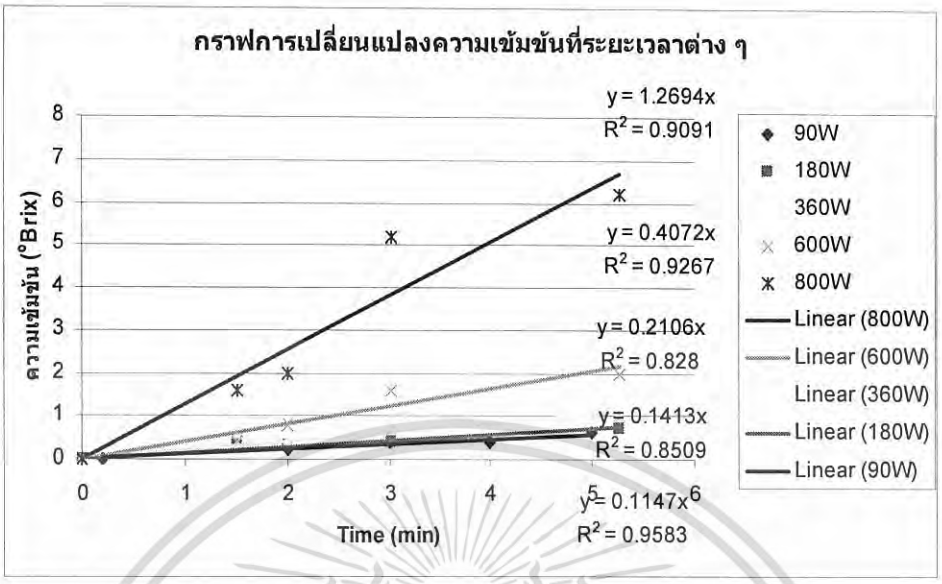


ภาพที่ 4.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

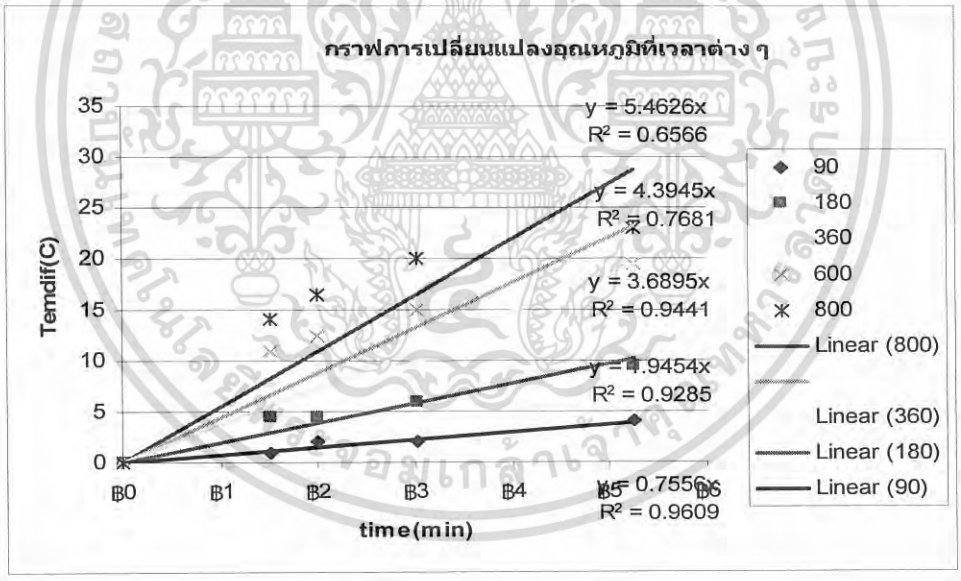


ภาพที่ 4.32 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

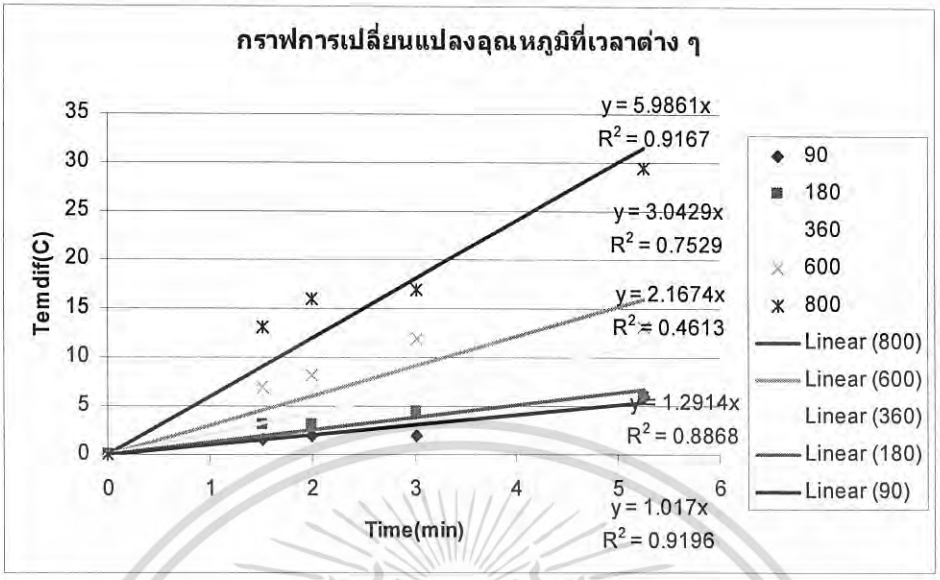


ภาพที่ 4.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

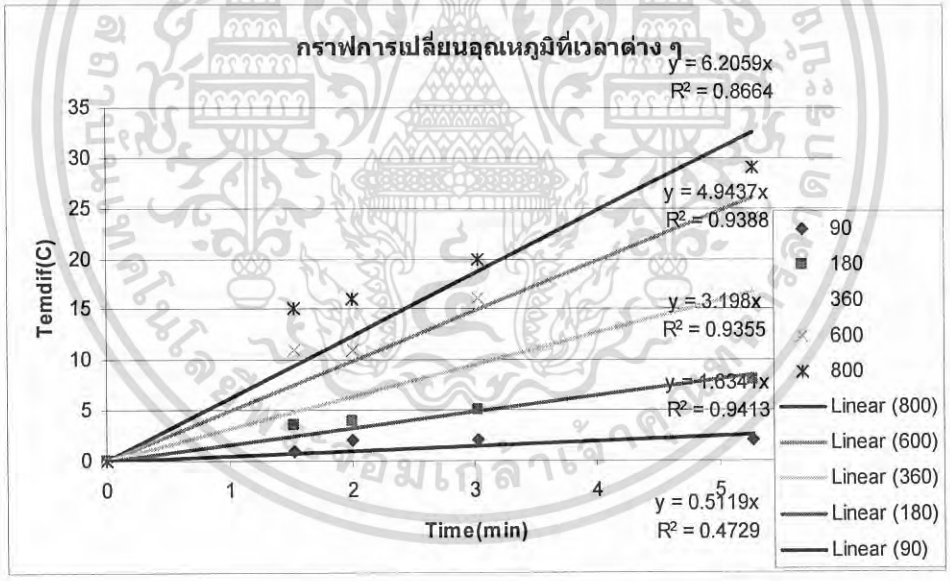


ภาพที่ 4.34 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

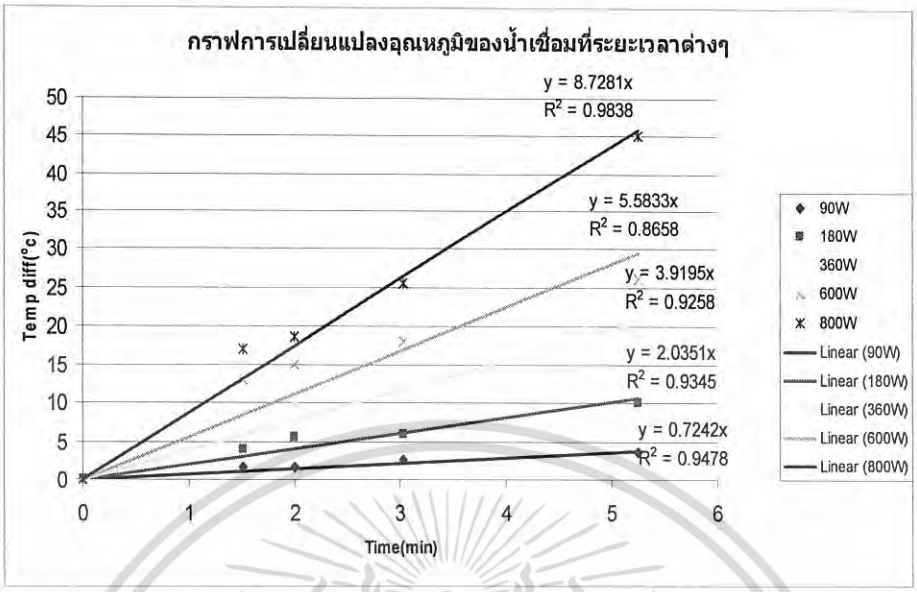


ภาพที่ 4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

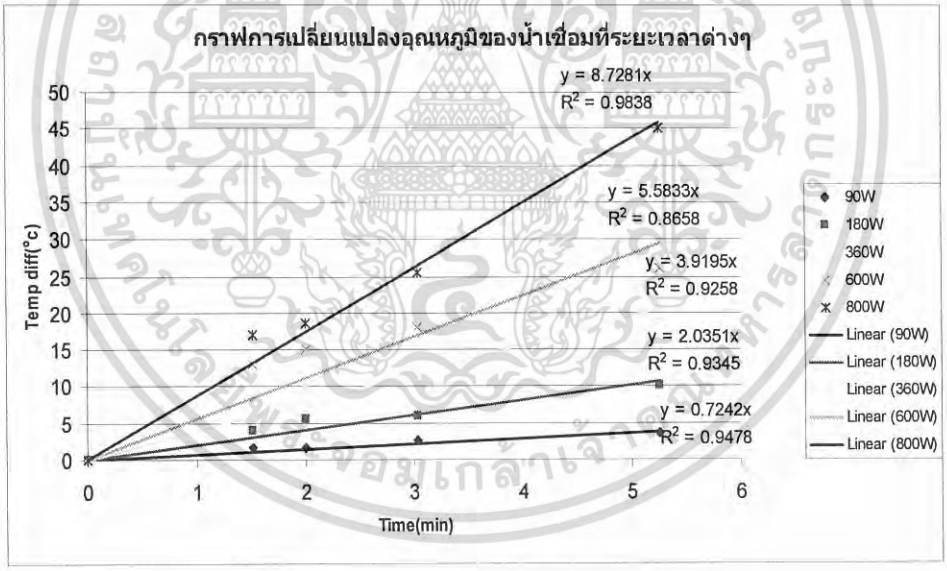


ภาพที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.37 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix



ภาพที่ 4.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงสรุปค่า k และ R^2

ความเข้มข้นเริ่มต้น	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา			การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา		
	กำลังเครื่อง (วัตต์)	k	R^2	กำลังเครื่อง (วัตต์)	k	R^2
5 °Brix	90	0.031	0.767	90	0.755	0.960
	180	0.061	0.325	180	1.945	0.928
	360	0.079	0.874	360	3.690	0.944
	600	0.117	0.980	600	4.395	0.768
	800	0.222	0.876	800	5.463	0.656
10 °Brix	90	0.000	N/A	90	1.017	0.919
	180	0.000	N/A	180	1.291	0.886
	360	0.079	0.874	360	2.167	0.461
	600	0.031	0.767	600	3.043	0.752
	800	0.453	0.811	800	5.986	0.916
20 °Brix	90	0.062	0.713	90	0.512	0.472
	180	0.191	0.022	180	1.634	0.941
	360	0.344	0.881	360	3.198	0.935
	600	0.522	0.963	600	4.944	0.938
	800	0.829	0.976	800	6.026	0.866
30 °Brix	90	0.115	0.958	90	0.724	0.947
	180	0.141	0.850	180	2.035	0.934
	360	0.211	0.828	360	3.920	0.925
	600	0.407	0.926	600	5.583	0.865
	800	1.269	0.909	800	8.728	0.983

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงสรุปค่า k และ R^2(ต่อ)

ความเข้มข้นเริ่มต้น	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา			การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา		
	กำลังเครื่อง (วัตต์)	k	R^2	กำลังเครื่อง (วัตต์)	k	R^2
40 °Brix	90	0.115	0.958	90	0.724	0.947
	180	0.141	0.850	180	2.035	0.934
	360	0.211	0.828	360	3.920	0.925
	600	0.407	0.926	600	5.583	0.865
	800	1.269	0.909	800	8.728	0.983

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. มปป. การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 16 หน้า.

สายสนม ประดิษฐดวง. 2543. การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. หน้า 173 – 195. ใน "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร". พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

Banik, S., S. Bandyyopadhya and S. Ganguly. 2003. Bioeffects of microwave – a brief review. Bioresource Technology 87 : 155 – 159.

Barbosa-Canovas, G.V., U.R. Pothakamury, E. Palou and B. G. Swanson. 1998. Nonthermal Preservation of Foods. Marcel Dekker, Inc. New York.

Buffler, C.R. 1993. Microwave Cooking and Processing : Engineering Fundamental for the Food Scientist. Van Nostrand Reinheld, New York

Canumir, J.A., J.E. Celis, J. de Bruijn and L.V. Vidal. 2002. Pasteurisation of apple juice by using Microwave. Lebensm. – Wiss. U. Technol. 35 : 389-392

Copson, D.A. 1975. Theory of microwave heating. Pp. 1-34. *In* "Microwave Heating". 2nd ed. D.A. Copson (ed.). The AVI Publishing Company, Inc. Connecticut.

Decareau R. V. and R. A. Peterson. 1986. Microwave Processing and Engineering. VCH Publishing, Florida.

Fellows, P. J. 2000. Dielectric, ohmic and infrared heating. pp. 365-384. *In* "Food Processing Technology : Principles and Practice". 2nd ed. P.J. Fellow (ed.). Woodhead Publishing Limited, Cambridge

Fung, D. Y. C. and F. E. Cunningham. 1980. Effect of microwave on microorganisms in foods. J. Food Protection 43 : 641-650.

Jones, P. L. and A. T. Rowley. 1977. Dielectric dryers. Pp. 156-178. *In* "Industrial Drying of Foods". S. Thorne (ed.). Blackie Academic and Professional, London.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mullin, J. 1995. Microwave Processing. Pp. 112 – 134. *In* "New Methods of Food Preservation". G. W. Gould (ed.). Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Palaniappan, S. and S. K. Sastry. 1990. Effects of electricity on microorganisms : a review. J. Food Proc. Pres. 14 : 393 – 414.

http://web.lru.ac.th/~foodweb/Download/t1/Evap%20and%20Drying.ppt.

http://www.mea.or.th/spot/understand.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 1ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 5 °Brix

อัตราการไหล (l/min)	ระดับความร้อน (Watt)	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สุดท้าย(°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ(°C)	°Brix สุดท้าย
0.19	90	24	28	4	5.2
0.19	180	25.5	35	9.5	5.2
0.19	360	26.5	45	18.5	5.4
0.19	600	27.5	47	19.5	5.6
0.19	800	27	50	23	5.8
0.33	90	24	26	2	5.1
0.33	180	25	31	6	5.4
0.33	360	27	37.5	10.5	5.2
0.33	600	28	43	15	5.4
0.33	800	26.5	46.5	20	5.6
0.5	90	24	26	2	5
0.5	180	24.5	29	4.5	5.2
0.5	360	26.5	35.5	9	5.2
0.5	600	27	39.5	12.5	5.2
0.5	800	27	43.5	16.5	6.1
0.66	90	24	25	1	5
0.66	180	24.5	29	4.5	5
0.66	360	26	34	8	5.2
0.66	600	27	38	11	5.2
0.66	800	27.5	41.5	14	5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 10 °Brix

อัตราการไหล (l/min)	ระดับความร้อน (Watt)	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิสุดท้าย(°C)	ผลต่างอุณหภูมิ(°C)	°Brix สุดท้าย
0.19	90	26	32	6	10
0.19	180	31	37	6	10
0.19	360	31	39.5	8.5	10.4
0.19	600	31	44	13	10.2
0.19	800	27.5	57	29.5	13
0.33	90	26	28	2	10
0.33	180	31	35.5	4.5	10
0.33	360	31	39.5	8.5	10.2
0.33	600	31	43	12	10.1
0.33	800	28	45	17	10.9
0.5	90	26	28	2	10
0.5	180	31	34	3	10
0.5	360	31	38	7	10.2
0.5	600	31	39	8	10
0.5	800	28	44	16	10.3
0.66	90	28	29.5	1.5	10
0.66	180	31	34	3	10
0.66	360	31	37	6	10.2
0.66	600	31	38	7	10
0.66	800	28	41	13	10.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 20 °Brix

อัตราการไหล (l/min)	ระดับความร้อน (Watt)	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สุดท้าย (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	°Brix สุดท้าย
0.19	90	25	27	2	20.2
0.19	180	26	34	8	20.7
0.19	360	27	43	16	22
0.19	600	27	51	24	23
0.19	800	28	57	29	23.4
0.33	90	25	27	2	20.2
0.33	180	26	31	5	20.6
0.33	360	27	36	9	20.6
0.33	600	26	42	16	21.4
0.33	800	28	48	20	22.6
0.5	90	25	27	2	20.2
0.5	180	26	30	4	21
0.5	360	27	35	8	20.8
0.5	600	28	39	11	20.8
0.5	800	27	43	16	23.2
0.66	90	25	26	1	20.4
0.66	180	25.5	29	3.5	20.5
0.66	360	25	32	7	20.6
0.66	600	27	38	11	20.6
0.66	800	27	42	15	22.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 30 °Brix

อัตราการไหล (l/min)	ระดับความร้อน (Watt)	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สุดท้าย (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	°Brix สุดท้าย
0.19	90	26.5	30	3.5	30.6
0.19	180	26.5	36.5	10	30.7
0.19	360	28	47	19	31
0.19	600	28.5	54.5	26	32
0.19	800	25.5	70.5	45	36.2
0.33	90	26.5	29	2.5	30.4
0.33	180	27	33	6	30.4
0.33	360	27.5	39.5	12	30.7
0.33	600	28.5	46.5	18	31.6
0.33	800	28.5	54	25.5	35.2
0.5	90	27	28.5	1.5	30.4
0.5	180	26	31.5	5.5	30.3
0.5	360	26.5	36.5	10	30.4
0.5	600	27.5	42.5	15	30.8
0.5	800	28.5	47	18.5	32
0.66	90	27	28.5	1.5	30.2
0.66	180	26.5	30.5	4	30.4
0.66	360	26.5	35	8.5	30.6
0.66	600	27.5	40.5	13	30.4
0.66	800	28	45	17	31.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5ก แสดงผลการระเหยน้ำโดยใช้น้ำเชื่อมความเข้มข้นเริ่มต้น 40 °Brix

อัตราการไหล (l/min)	ระดับความร้อน (Watt)	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิ สุดท้าย (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	°Brix สุดท้าย
0.19	90	27	30.5	3.5	40.8
0.19	180	26.5	42	15.5	40.6
0.19	360	27	57.5	30.5	43.4
0.19	600	26.5	62	35.5	43.4
0.19	800	26.5	70	43.5	44.4
0.33	90	27	29.5	2.5	40.4
0.33	180	26.5	37.5	11	40.4
0.33	360	27	50	23	41
0.33	600	26.5	55	28.5	42.2
0.33	800	26.5	64.5	38	43.4
0.5	90	27	28.5	1.5	40.6
0.5	180	26.5	35	8.5	40.4
0.5	360	26.5	41.5	15	40.8
0.5	600	27	48.5	21.5	41.8
0.5	800	26.5	54	27.5	42
0.66	90	27	28	1	40
0.66	180	27	33	6	40.4
0.66	360	26.5	39	12.5	40.4
0.66	600	27	45	18	41
0.66	800	26.5	50.5	24	41.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยที่ทำการทดลองและมีผลต่อการระเหยได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเริ่มต้น, อัตราการไหลของน้ำเชื่อมและกำลังงานเครื่องไมโครเวฟ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเชื่อมมีผลต่อการระเหยโดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเชื่อมจาก 5, 10, 20, 30,และ 40 องศาบริกซ์ ทำให้การเพิ่มของความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายมีอัตราเพิ่มมากขึ้น

กำลังของเตาไมโครเวฟมีผลต่อการระเหยโดยเมื่อเพิ่มกำลังงานของเครื่องไมโครเวฟที่ระดับ 90, 180, 360, 600และ800 วัตต์ ทำให้ความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายเพิ่มมากขึ้นด้วย

อัตราการไหลมีผลต่อการระเหยโดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 0.19, 0.33, 0.50, และ 0.66 ลิตรต่อนาทีทำให้การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายมีอัตราน้อยลง

การใช้กำลังงานเครื่องไมโครเวฟ 800 วัตต์ ซึ่งเป็นกำลังเครื่องที่สูงที่สุดและอัตราการไหล 0.19 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุด ทำให้ได้ความเข้มข้นและอุณภูมิสุดท้ายสูงสุด

วิเคราะห์ถดถอยพหุคูณพบว่าความเข้มข้นสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้าย มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิเริ่มต้น อัตราการไหล และกำลังงานของเครื่องไมโครเวฟ แสดงได้ด้วยสมการ

$$C_t = C_i + kt$$

$$k = 0.0009725(W) - 0.0494(T_{in}) + 1.251$$

และ

$$T_t = T_{in} + kt$$

$$k = 0.008728(W) + 0.07445(Brix_{in}) - 1.290$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

ในการทำการทดลองต้องกำหนดให้ความสูง ($\triangle$ H) ของระดับน้ำเป็นดังนี้คือ

1. ความสูงของรูที่ปล่อยน้ำออกจากแทงค์มีความสูงจากพื้นเท่ากับ 19.1 cm.
2. ความสูงของระดับน้ำระดับที่ 1 มีความสูงจากรูปล่อยน้ำเท่ากับ 11 cm.
3. ความสูงของระดับน้ำระดับที่ 2 มีความสูงจากรูปล่อยน้ำเท่ากับ 21 cm.
4. ความสูงของระดับน้ำระดับที่ 3 มีความสูงจากรูปล่อยน้ำเท่ากับ 41 cm.
5. ความสูงของระดับน้ำระดับที่ 4 มีความสูงจากรูปล่อยน้ำเท่ากับ 61 cm.

เมื่อทำการกำหนดความสูงดังกล่าว จะทำให้ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันเมื่อทำการทดลองครั้งต่อ ๆ ไป

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อการระเหยในผลการทดลองอาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการทดลองซ้ำ ๆ หลายครั้งและใช้ปัจจัยอื่นที่อาจมีผลต่อการระเหย เช่น คุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่างที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้