



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

ดร.คำนึ่ง วาทยิชา

กันยายน พ.ศ. 2554

สัญญาเลขที่ RDG 5150063

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ”

โดย ดร.คำนึ่ง วาทโยธา

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชุดโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่มีระดับกำลังสูง สำหรับใช้ศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมดาและร่วมกับลมร้อน ซึ่งมีปัจจัยการศึกษา คือ ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 และ 110 องศาเซลเซียส และเวลาการให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที ผลลัพธ์สุดท้ายถูกนำไปทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

เตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้น มีความจุ 76 ลิตร ใช้แม่กนีตรอนที่มีความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ ขนาดกำลังสูงสุด 1,700 วัตต์ การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมดา พบว่า การเปิด-ปิดให้กำลังไมโครเวฟสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในยางทุกความสูงชั้นยางมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ความสูงชั้นยางที่เพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า ความสูงชั้นยางที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในยางมีค่าลดลง เวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนและการเพิ่มเวลาให้ไมโครเวฟ ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในยางสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นลดลงได้เร็ว ใช้เวลาการอบแห้งลดลง ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลงอีกด้วย และยางที่ผ่านการอบแห้งแล้วทุกการทดลองถูกนำไปทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 พบว่า คุณสมบัติสำคัญมีคุณภาพผ่านเกณฑ์

เงื่อนไขที่เหมาะสมโดยสรุปของการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟคือการใช้ร่วมกับลมร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส และเวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที ซึ่งให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ 10.30 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

ABSTRACT

The purpose of this study was to design and construct a high power laboratory-scale microwave oven for drying rubber blocks using ordinary air and hot air. The parameters studied were bed height: 10, 15 and 20 cm, hot air temperature: 100 and 110 °C and heating time: 1 and 2 minutes. The final products were tested according to the standard for STR 20 rubber block, with the following results:

The constructed microwave oven had a capacity of 76 liters, equipped with a 2.45 GHz magnetron tube giving a maximum power of 1,700 W. The test results for microwave drying of rubber blocks with ordinary air indicated that the temperature within each block could be controlled uniformly for varied bed heights, but the moisture content and specific energy consumption decreased while heating time increased with increasing bed height. With hot air, it was found that increasing the bed height resulted in a decrease in the temperature gradient and an increase in the heating time, whereas increasing both the hot air temperature and heating time resulted in an increase in the temperature gradient, which caused the moisture content, heating time and specific energy consumption to decrease. The dried rubber blocks were tested for their quality according to the standard for STR 20 rubber block and passed the major criteria.

In conclusion, the optimum condition for drying rubber blocks with microwave was to use with hot air for a bed height of 10 cm, temperature of 100 °C and heating time of 1 minute, resulting in a specific energy consumption of 10.30 MJ per kilogram of evaporated water.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ชุดโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา จึงสามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อนุญาตให้ใช้สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอบคุณ นางสาวเฉลิมขวัญ อริยะวงษ์ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ร่วมทำวิจัยอย่างตั้งใจ พากเพียรและขยันขันแข็งในการทำวิจัย ทำให้ประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดียิ่ง

นอกจากนี้ ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คำนึง วาทยิธา

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ฅ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์การศึกษา	3
3. ขอบเขตการศึกษา	3
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
1. ยางพารา	4
2. ยางแท่ง	8
3. การอบแห้ง	27
4. คลื่นไมโครเวฟ	33
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษา	51
1. การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ	51
2. การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ	60
3. การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	65
4. ประเมินผลคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20	69
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	71
1. ผลของการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ	71
2. ผลการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ	73
3. ผลการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	76
4. ผลการประเมินคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20	84
5. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	89
1. สรุปผลการศึกษา	89
2. ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาต่อไป	90
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก การออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ	94
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย การกระจายคลื่นและกำลังของไมโครเวฟ	101
ภาคผนวก ค ผลการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	105
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20	121
บทความวิจัยที่เผยแพร่	125

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ส่วนประกอบของยางธรรมชาติ	7
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ	7
ตารางที่ 2.3	มาตรฐานของยางแท่งชั้นต่าง ๆ	17
ตารางที่ 2.4	น้ำหนักขึ้นทดสอบสมบัติยาง	19
ตารางที่ 2.5	ความยาวคลื่นกับค่าความถี่ในการทะลุทะลวงของคลื่นที่ระดับความถี่ต่าง ๆ	40
ตารางที่ 3.1	ค่า attenuation และ Power loss ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz	53
ตารางที่ 3.2	โหมดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในห้องอบ	55
ตารางที่ 4.1	รายละเอียดของหมายเลขต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ	72
ตารางที่ 4.2	การเปรียบเทียบผลการประเมินคุณภาพยางที่ได้จากการทดสอบกับค่ามาตรฐานยางแท่ง(ค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำการทดสอบ)	85
ตารางที่ 4.3	สรุปผลค่าที่เหมาะสมในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	88
ตารางที่ ข.1	ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย (การรั่วของคลื่น)	102
ตารางที่ ข.2	ผลการทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบเมื่อแทนค่าตามสมการที่(2) (ค่าเฉลี่ย3ซ้ำ)	103
ตารางที่ ข.3	ผลการวัดกำลังของไมโครเวฟ(ค่าเฉลี่ย3ซ้ำ)เมื่อแทนค่าตามสมการที่(20)	104

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	แสดงโครงสร้างของยางธรรมชาติ	6
ภาพที่ 2.2	กระบวนการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง	10
ภาพที่ 2.3	กระบวนการผลิตยางแท่งด้วยยางก้อนจับตัว	11
ภาพที่ 2.4	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่ง เช่น ยางแผ่นดิบ(ข) เศษยางและยางก้อนถ้วย(ก)	11
ภาพที่ 2.5	เครื่องแกรนูลเตอร	12
ภาพที่ 2.6	ลักษณะของยางที่ได้ทำการบดย่อยเรียบร้อยแล้ว	12
ภาพที่ 2.7	การลำเลียงยางลงกระบะก่อนนำเข้าห้องอบแห้ง	13
ภาพที่ 2.8	ลักษณะยางหลังการอบแห้ง	13
ภาพที่ 2.9	ยางที่ถูกอัดแท่งแล้วจะนำไปตรวจโลหะที่อยู่ภายในเนื้อยาง	13
ภาพที่ 2.10	การเก็บตัวอย่างยางเพื่อทดสอบคุณภาพ(ก)และยางห่อด้วยพลาสติกรอการจำหน่าย(ข)	14
ภาพที่ 2.11	เครื่องรีดยาง(Creper)	14
ภาพที่ 2.12	เครื่องบดอัด(Shredder)	15
ภาพที่ 2.13	เครื่องตัดย่อยยาง(Slab Cutter)	15
ภาพที่ 2.14	พรีเบรกเกอร์(Pre Breaker)	16
ภาพที่ 2.15	โรตารีคัตเตอร์(Rotary Cutter)	16
ภาพที่ 2.16	เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (สำหรับห้องปฏิบัติการ)	18
ภาพที่ 2.17	การละลายน้ำมันสนด้วยความร้อน	20
ภาพที่ 2.18	เตาเผาสำหรับย่อยยาง(ก)และชุดเครื่องกลั่นด้วยไอน้ำ(ข)	21
ภาพที่ 2.19	เครื่องตัดชิ้นทดสอบ และชิ้นทดสอบสำหรับหาค่าพลาสติกซีดี	25
ภาพที่ 2.20	เครื่องทดสอบความหนืด(Mooney viscometer)	26
ภาพที่ 2.21	ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่	28
ภาพที่ 2.22	เตาอบแห้งยางแท่ง	31
ภาพที่ 2.23	ลักษณะการระบายความร้อนภายในเตาอบแห้งยางแท่ง	32
ภาพที่ 2.24	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	33
ภาพที่ 2.25	การหมุนตัวเนื่องจากสารประกอบเนื่องจากไมโครเวฟ	36
ภาพที่ 2.26	ค่าความแปรปรวนของค่าไดอิเล็กตริกของพลาสติกกับค่าความชื้น	38
ภาพที่ 2.27	การกระจายการเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่างๆ	42
ภาพที่ 2.28	ตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ของระบบอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก	45
ภาพที่ 2.29	องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไป	46
ภาพที่ 2.30	ลักษณะของหลอดแมกนีตรอนความถี่ 2,450 และ 915 เมกะเฮิรตซ์	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.31 การต่อท่อนำคลื่นเข้ากับไมโครเวฟในโรงงานอุตสาหกรรม	48
ภาพที่ 3.1 แมกนีตรอนขนาดกำลัง 2,000 วัตต์	52
ภาพที่ 3.2 ชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟที่สามารถปรับค่าได้	52
ภาพที่ 3.3 การกระจายตัวเป็นคลื่นนิ่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กผ่านส่งผ่านไปตาม ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในโหมด TE ₁₀	53
ภาพที่ 3.4 ลักษณะของห้องอบและการเชื่อมต่อต่าง ๆ	55
ภาพที่ 3.5 โพรงกับดักคลื่นของบานประตู	56
ภาพที่ 3.6 กลไกสวิตช์เพื่อความปลอดภัย (Safety Switch)	56
ภาพที่ 3.7 เครื่องมือวัดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ	57
ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งที่ทดสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ	58
ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์ทดสอบการกระจายของคลื่นในห้องอบ(ก)และตำแหน่งวางบีกเกอร์(ข)	59
ภาพที่ 3.10 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟและชุดควบคุมกำลัง	61
ภาพที่ 3.11 ขงแท่งที่ใช้ในการทดสอบตัดแต่งให้มีความสูงชันอย่างที่ต้องการ	62
ภาพที่ 3.12 แผนผังการอบแห้งขงแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมดา	64
ภาพที่ 3.13 แผนผังการอบแห้งขงแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	68
ภาพที่ 4.1 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ	72
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตามเวลาการอบแห้งของขงแท่งความสูงชันขง 10 เซนติเมตร	74
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตามเวลาการอบแห้งของขงแท่งความสูงชันขง 15 เซนติเมตร	74
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตามเวลาการอบแห้งของขงแท่งความสูงชันขง 20 เซนติเมตร	74
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตามเวลาการอบแห้งของขงแท่งความ หนาเบดต่างๆ	75
ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขงแท่งที่ความสูงชัน ขงต่างๆ	75
ภาพที่ 4.7 ปริมาณจุดขาวของขงแท่งที่ความสูงชันขง 15 และ 20 เซนติเมตรเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง	76
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขงแท่งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชันขงต่างๆ สำหรับเวลาการให้ลมร้อน 2 นาติและไมโครเวฟ 1 นาติ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	77
ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขงแท่งแต่ละอุณหภูมิลมร้อน สำหรับความสูงชันขง 20 เซนติเมตร เวลาลมร้อน 2 นาติ และไมโครเวฟ 1 นาติ	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการทำให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูง ชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส	78
ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้ง สำหรับยางที่ความสูงชั้นยางต่างๆ อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส และเวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที	79
ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิลมร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที	80
ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูง ชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส	80
ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตามเวลาการอบแห้งยางที่ความสูงชั้นยาง ต่างๆ สำหรับอุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที	81
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิลมร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที	82
ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส	82
ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งยางแท่งที่ความสูง ชั้นยาง และอุณหภูมิลมร้อนต่างๆ เมื่อให้ไมโครเวฟ 2 นาที	83
ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของการอบแห้งยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง และเวลาให้ไมโครเวฟต่าง ๆ เมื่ออบยางในอุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส	84
ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบผลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_0) ที่ ความสูงชั้นยางต่างๆ	86
ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_0) ที่ความสูง ชั้นยางต่างๆ	86
ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบผลของความสูงชั้นยางต่างๆ ที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_0)	87
ภาพที่ ก.1 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ภาพรวม)	95
ภาพที่ ก.2 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ห้องอบ 3)	96
ภาพที่ ก.3 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของห้องอบ 3)	97
ภาพที่ ก.4 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของประตู A)	98
ภาพที่ ก.5 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของประตู 1)	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ ก.6	เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของประตู A 3 โพรงกับดักคลื่น)	100
ภาพที่ ข.1	ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย (การรั่วของคลื่น)	102
ภาพที่ ค.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชันยางต่างๆ ให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที่ อุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส	106
ภาพที่ ค.1.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งแต่ละอุณหภูมิความร้อน สำหรับความสูงชันยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที่	107
ภาพที่ ค.1.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งแต่ละอุณหภูมิความร้อน สำหรับความสูงชันยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที่	108
ภาพที่ ค.1.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูงชันยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ อุณหภูมิความร้อน 100 องศาเซลเซียส	109
ภาพที่ ค.1.4	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูงชันยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ อุณหภูมิความร้อน 110 องศาเซลเซียส	110
ภาพที่ ค.2	การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในยางแท่งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชันยางต่างๆ ให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที่ ณ อุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส	111
ภาพที่ ค.2.1	การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิความร้อน ที่ความสูงชันยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที่	112
ภาพที่ ค.2.2	การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิความร้อน ที่ความสูงชันยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที่	113
ภาพที่ ค.2.3	การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชันยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิความร้อน 100 องศาเซลเซียส	114
ภาพที่ ค.2.4	การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชันยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิความร้อน 110 องศาเซลเซียส	115
ภาพที่ ค.3	การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตามเวลาการอบแห้งยางที่ความสูงชันยางต่างๆ สำหรับอุณหภูมิความร้อน 100 และ 110 องศาเซลเซียส เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที่	116
ภาพที่ ค.3.1	การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ที่แต่ละอุณหภูมิความร้อน ที่ความสูงชันยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที่ เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที่	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ค.3.2 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิความร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที	118
ภาพที่ ค.3.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิความร้อน 100 องศาเซลเซียส	119
ภาพที่ ค.3.4 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิความร้อน 110 องศาเซลเซียส	120

บทที่ 1

บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย มีพื้นที่การเพาะปลูก 15.3 ล้านไร่ ผลผลิต 3.09 ล้านตัน สามารถส่งออกทำรายได้ให้ประเทศ 223,628 ล้านบาท โดยประเภทยางที่ส่งออก ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน 973,243 ตัน ยางแท่ง 1,282,036 ตัน น้ำยางข้น 587,047 ตัน ยางผสม 154,485 ตัน และอื่น ๆ 92,910 ตัน (สถาบันวิจัยยาง, 2553) ปัจจุบันความต้องการบริโภคยางแท่งในตลาดโลกมีมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะการใช้ยางแท่งเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมผลิตล้อรถยนต์ซึ่งมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องทุกปี ยางแท่งจึงเป็นยางธรรมชาติที่มีความสำคัญมากต่อเศรษฐกิจของไทยและโลก ดังนั้นประเทศไทยซึ่งเป็นผู้ผลิตและส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลก จำเป็นต้องพัฒนากระบวนการผลิตยางแท่งให้ก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำและยังรักษาคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่งไว้ได้ โดยเฉพาะขั้นตอนการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานในการผลิตสูงและกระทบต่อคุณภาพของยางอย่างยิ่ง การนำพลังงานไมโครเวฟเข้ามาใช้ในการอบแห้งเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถทำได้ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติชนิดระบุคุณภาพมาตรฐาน ซึ่งเป้าหมายสำคัญของการพัฒนายางชนิดนี้คือเพื่อแข่งขันกับยางสังเคราะห์ โดยมีจุดเริ่มต้นในปี พ.ศ. 2508 ที่ประเทศมาเลเซียซึ่งเป็นผู้จัดทำมาตรฐาน SMR (Standard Malaysian Rubber) ขึ้น และนับตั้งแต่นั้นมาอุตสาหกรรมผลิตยางแท่ง เอส เอ็ม อาร์ ได้เจริญรุดหน้าจากการตอบรับของตลาดมาเป็นลำดับ ทำให้ผู้ผลิตยางธรรมชาติประเทศอื่นๆ สนใจและต่างกำหนดมาตรฐานยางแท่งของตนขึ้น (วรภรณ์, 2549) การพัฒนายางแท่งของไทยเริ่มต้นเมื่อปี พ.ศ. 2511 ภายใต้ชื่อ TTR (Thai Tested Rubber) ต่อมาในต้นปี พ.ศ. 2539 จึงได้เปลี่ยนเป็น STR (Standard Thai Rubber) นับตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันปี พ.ศ. 2550 การพัฒนายางแท่งของไทยมีมาแล้วถึง 40 ปี ช่วง 20 ปีแรก อุตสาหกรรมยางแท่งของไทยพัฒนาช้ามาก และช่วง 10 ปีถัดมาแม้อุตสาหกรรมยางแท่งของไทยมีการพัฒนาแต่ก็เป็นที่น่าเสียดาย โดยไทยมีการส่งออกยางแท่งในปี พ.ศ. 2537 เพียง 0.28 ล้านตัน ขณะที่อินโดนีเซียมีการส่งออกสูงถึง 1.13 ล้านตัน ทั้งนี้เพราะยางแท่งของไทยอยู่ในสถานะที่แข่งขันกับยางแท่งของอินโดนีเซียและมาเลเซียได้ยากเนื่องจากสาเหตุหลายประการ (ไววุฒิ, 2539) ดังนี้ 1) อุตสาหกรรมยางแท่งของไทยไม่มีวัตถุดิบเป็นของตัวเอง จะใช้ส่วนที่เหลือจากการผลิตยางแผ่นรมควัน กับเศษยางเท่านั้น 2) การลงทุนโรงงานผลิตยางแท่งต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่ายางแผ่นรมควันมาก ทำให้มีการลงทุนสร้างโรงงานผลิตยางแท่งน้อย และ 3) ต้นทุนในกระบวนการผลิตยางแท่งของไทยสูงกว่าอินโดนีเซียและมาเลเซีย เพราะในการผลิตยางแท่งที่ใช้ยางแผ่นเป็นวัตถุดิบจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรหลายชนิดในกระบวนการผลิต ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายทั้งค่าเครื่องจักรและค่าดูแลก่อนข้างสูง รวมทั้งค่าเชื้อเพลิงและค่ากระแสไฟฟ้าที่มีราคาสูง ส่วนการพัฒนาของยางแท่งของไทยในช่วง 10 ปีสุดท้ายนับตั้งแต่ได้ประกาศใช้มาตรฐานยางแท่ง STR ในปี พ.ศ. 2539 มีการพัฒนาอย่างมาก โดยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 อุตสาหกรรมยางแท่งของไทยมีการ

เติบโตทัดเทียมกับมาเลเซียและอินโดนีเซีย ทั้งนี้เพราะอุตสาหกรรมยางแท่งของไทยมีขาก้อนจับตัว (ยางกันถ้วย ยางตามรอยกรีด ยางตกตามพื้น และยางติดเปลือก) เป็นวัตถุดิบหลักของตัวเอง กอปรกับสามารถปรับเปลี่ยนเครื่องจักรในกระบวนการผลิต ให้เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่าเครื่องจักรและค่าการดูแลรักษาต่ำลง จึงมีการขยายจำนวนโรงงานผลิตยางแท่งเพิ่มขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมยางแท่งของไทยยังคงเสียเปรียบในด้านต้นทุนค่าเชื้อเพลิงการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับคู่แข่งอย่างอินโดนีเซียและมาเลเซีย ซึ่งมีแหล่งเชื้อเพลิงเป็นของตนเองและมีราคาถูกกว่า

การอบแห้งในอุตสาหกรรมผลิตยางแท่งของไทยนิยมใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบอุโมงค์ ที่มีชุดพัดลมทำหน้าที่เป่าและดูดอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาให้หมุนเวียนผ่านชั้นของยางแท่งซึ่งบรรจุอยู่ในกระบะของรถเข็น (Trolley) ที่มีความสูงหรือความหนาของชั้นยาง 30 เซนติเมตร จัดการการอบแห้งเป็นแบบสองขั้นตอนคือ ขั้นแรกใช้อุณหภูมิ 120-130 องศาเซลเซียส ขั้นที่สองใช้อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส รวมใช้เวลาอบนานประมาณ 4 ชั่วโมง (วิชัย กิตติพล, 2549) การศึกษาวิจัยการอบแห้งยางแท่งของผู้ประกอบการและนักวิจัยไทยที่ผ่านมาทำให้ทราบผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อคุณลักษณะการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อนเป็นอย่างดี (สุภวรรณ ภูริระวิชชกุล และคณะ, 2548) จนสามารถพัฒนาแบบจำลองทำนายการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้แม่นยำ โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเป็น 22.88 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย (ปิยพงศ์ ม่วงมณี และ วิรุทธิ์ ลิ่มสกุล, 2549) แต่ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการอบแห้งยังนับว่ามีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสิ้นเปลืองในการระเหยน้ำทางทฤษฎีซึ่งมีค่าเพียง 2.26 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ทั้งนี้เพราะการอบแห้งด้วยลมร้อนการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกก่อนแล้วจึงนำสู่ภายใน ทำให้การแพร่ความร้อนจากภายในชั้นยางเกิดขึ้นได้ช้า และผิวนอกของชั้นยางที่แห้งแล้วมีสมบัติเป็นฉนวนมากขึ้น ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นถูกจำกัดลงไปอีก คำนิ่งและเฉลิมขวัญ (2550) จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อนและไม่โครเวฟ พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้ความชื้นลดลงได้รวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เพราะไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากภายในชั้นยางจึงเร่งการแพร่กระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวนอกได้ดีกว่า และสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งได้มาก จาริณีและคำนิ่ง (2551) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยการควบคุมอุณหภูมิภายในโดยการเปิดให้กำลังไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในของยางแท่งให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกเพื่อลดอุณหภูมิยาง พบว่าการเปิดให้กำลังไมโครเวฟที่ระดับกำลัง 800 วัตต์ สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในของยางแท่งให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมได้ และมีคุณลักษณะการอบแห้ง คือ เมื่อน้ำหนักยางมากขึ้นเวลาในการอบแห้งจะนานขึ้น แต่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงมาก และยางที่อบได้มีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานยางแท่ง STR 20

จากผลงานวิจัยการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับครัวเรือนดังกล่าวข้างต้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลงได้มากเมื่อน้ำหนักยางหรือความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความสูงชั้นยางให้ใกล้เคียงกับระดับอุตสาหกรรม พบว่ากำลังของไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ ไม่เพียงพอในการให้พลังงานความร้อน ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการออกแบบการพัฒนาเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการระดับกำลังไมโครเวฟสูงขึ้น เพื่ออบแห้งยางแท่งที่ระดับความสูงชั้นยางที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งยางแท่งได้อีกมาก

2. วัตถุประสงค์การศึกษา

การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ ครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 2.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ
- 2.2 ศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ
- 2.3 ศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน
- 2.4 ประเมินผลคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20

3. ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษา ได้แก่วัสดุที่นำมาทดสอบ คือ ยางกันถ้วยและยางแผ่นดิบ ที่ได้ทำการบดย่อยเรียบร้อยแล้ว จากโรงงานที่ผลิตยางแท่ง STR 20 โดยเฉพาะ และทดลองการอบแห้งโดยใช้เตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่ออกแบบและสร้างขึ้นจากข้อ 2.1 ซึ่งติดตั้งภายในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หลังจากทำการศึกษาเสร็จสิ้นคาดว่าจะได้ต้นแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ และวิธีการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟแบบใหม่ ซึ่งสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตยางแท่ง STR 20 ลงได้ และได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาปรับปรุงการอบแห้งยางแท่งชนิดอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันยางพาราได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง ซึ่งยางพาราได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นระยะเวลานานหลายศตวรรษ มนุษย์มีการใช้ประโยชน์จากยางพาราอย่างเต็มที่และหลากหลายโดยจะพบในรูปแบบของยางรถยนต์ ยางรองพื้นรองเท้า ยางรัดของ ถุงมือยาง เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดยางพารา ยางแท่งและกระบวนการผลิตยางแท่ง พื้นฐานการอบแห้ง คลื่นไมโครเวฟ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ยางพารา

1.1 ประวัติยางพารา

ในอดีตก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 ประมาณ พ.ศ. 2457 วัตถุดิบยางที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางมีเพียงยางที่ได้มาจากธรรมชาติคือจากต้นพืช ซึ่งเรียกว่า “ยางธรรมชาติ” (Natural Rubber; NR) และสืบเนื่องจากจุดเริ่มต้นของต้นพืชในสกุล *Hevea Brasiliensis* มีศูนย์กลางการเพาะปลูก และซื้อขายอยู่ที่เมืองท่าบนฝั่งแม่น้ำอะเมซอน เมืองพารา ประเทศบราซิล โดยที่ในการซื้อขาย “ยาง” จากต้นไม้นี้ใช้ชื่อเรียกว่า “ยางพารา” ซึ่งเป็นชื่อที่คุ้นเคยกันโดยทั่วไปสำหรับประเทศไทย และใช้ชื่อนี้เรียกต้นพืชที่ให้น้ำยางว่า “ต้นยางพารา” (วราภรณ์ จรรย์ไชยกุล, 2549)

การปลูกยางในประเทศไทย ไม่มีการบันทึกเป็นหลักฐานแน่นอน แต่เป็นที่เข้าใจว่าอยู่ในช่วงประมาณ ปี พ.ศ. 2442-2444 ซึ่งในขณะนั้น พระยารัษฎานุประดิษฐ์ มหิศรภักดี ผู้ซึ่งดำรงตำแหน่งเป็นเจ้าเมืองตรัง ได้นำเมล็ดยางพารามาปลูกเป็นครั้งแรกที่อำเภอกันตัง ชาวบ้านเรียกต้นยางชุดแรกนี้ว่า “ต้นยางเทศา” เวลาต่อมาได้มีการขยายพันธุ์ปลูกยางพารากันอย่างกว้างขวางทั่วทั้ง 14 จังหวัดภาคใต้และ 3 จังหวัดทางภาคตะวันออก หลังจากนั้นมีการพยายามขยายพันธุ์ยางมาปลูกในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ จนกระทั่งปัจจุบันยางพารากลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยมีการผลิตเป็นอันดับหนึ่งของโลก ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 เป็นต้นมา (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2546)

1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ยางพาราเป็นไม้ยืนต้น ที่มีลำต้นสูงใหญ่ เป็นพืชที่มีอายุยืน มีใบเลี้ยงคู่ สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นาน และถ้าอยู่ในพื้นที่ที่เหมาะสม มีการดูแลรักษาอย่างดี สามารถทำให้ต้นยางพารามีอายุยืนและให้ผลผลิตนานหลายสิบปี (คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548) โดยมีรายละเอียดลักษณะและส่วนประกอบของยางพาราดังนี้

1.2.1 ราก (Roots)

ยางพารามีระบบของรากแก้ว (Top root system) ที่ประกอบด้วยรากแก้ว (top root) ที่มีความยาวโดยเฉลี่ยตามความลึกของดินประมาณ 2.5 เมตร ในยางที่มีอายุ 3 ปี ทำหน้าที่ยึดเกาะพวงลำต้นไม่ให้โค่นล้มเมื่อลมแรงและมีน้ำท่วม รากแขนง (lateral root) แตกแขนงออกมาจากชั้น pericycle ของรากแก้ว มีความยาวเฉลี่ย

7 - 10 เมตร เจริญอยู่ในระดับผิวดินบริเวณทรงพุ่ม ทำหน้าที่ดูดซึมน้ำและธาตุอาหารส่งไปยังใบเพื่อขบวนการสังเคราะห์แสง

1.2.2 ลำต้น (Stem)

ลำต้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามชนิดของวัสดุที่ปลูกคือ ลำต้นรูปกรวย (cone) เป็นลำต้นที่เกิดจากการปลูกด้วยเมล็ด (seeding tree) จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า ส่วนฐานของลำต้นจะโตแล้วค่อยเล็กลงตามความสูง ลำต้นอีกชนิดหนึ่งคือ ลำต้นรูปทรงกระบอก (cylinder) เป็นลำต้นที่เกิดจากการปลูกด้วยต้นติดตา (budded stump) ลักษณะของลำต้นส่วนล่างสุดมีขนาดใหญ่กว่าเรียกว่า “เท้าช้าง” เลยจากจุดนี้ขึ้นไปจะเป็นลำต้นที่มีขนาดเท่ากันทั้งส่วนโคนต้นและส่วนปลายความสูงของลำต้นเปลี่ยนแปลงต่างกันออกไปโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 2 - 2.5 เมตร ส่วนประกอบของลำต้นที่เราจะนำมาใช้ประโยชน์ในการสกัดน้ำยาง ได้แก่ เปลือก ซึ่งประกอบด้วย

1.2.2.1 เปลือกแห้ง (corky bark) เปลือกที่อยู่ส่วนนอกสุดของลำต้นมีสีน้ำตาลถึงดำ ไม่มีท่อน้ำยางอยู่ภายในเลย เกิดจากการสร้าง outer soft cell ของชั้น cortex ที่ยังมีชีวิตอยู่ที่เรียกว่า bark cambium ต่อมาเมื่อสารพอลิกลินิน ซูเบอร์ลิน มาสะสมทำให้เห็นเป็นสีน้ำตาล โดยทั่วไปเปลือกชั้นนี้มีความหนาประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของเปลือกทั้งหมด

1.2.2.2 เปลือกแข็ง (hard bark) อยู่ถัดจากเปลือกแห้งเข้ามา มีสีส้ม หรือสีน้ำตาลอ่อน เกิดจากการแบ่งเซลล์ของ bark cambium แล้วเจริญเข้าทางด้านใน มีการสะสมสารพอลิกลินิน และซูเบอร์ลินน้อยกว่าเปลือกแห้ง แต่มี stone cell อยู่เป็นจำนวนมาก กระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นนี้ ทำให้ท่อน้ำยางมีลักษณะขาดตอน (interrupted latex vessel) และมีจำนวนน้อย ชั้นนี้อาจเรียกว่า outer cortex

1.2.2.3 เปลือกอ่อน (soft bark) เป็นเปลือกชั้นในสุดถัดจากเปลือกแข็งเข้าไปเกือบใกล้เนื้อไม้ เป็นส่วนของ inner cortex ประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่ม มีชีวิต และหนาของเนื้อเยื่อลำเลียงอาหาร (sieve tube) ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ภายในเป็นแหล่งสะสมอาหารจำนวนมาก เนื้อเยื่อดังกล่าวติดต่อกันตลอดทั้งในลำต้น กิ่งก้าน และใบ อาหารที่สะสมก็คือน้ำยางนั่นเอง ซึ่งเรียกว่า latex น้ำยางที่ถูกสร้างขึ้นเป็นโพลิเมอร์ของ cis-1, 4-polyisoprene ส่วนของเนื้อเยื่อลำเลียงอาหารก็คือ ท่อน้ำยาง (lacifer) ที่มีลักษณะเชื่อมติดต่อกันตลอดไม่ขาดตอน (continuous latex vessel) มีการจัดเรียงตัวในแนวเอียง ทำมุม 2 - 5 องศากับแนวตั้ง วนจากขวามายังซ้ายล่าง ในชั้นนี้ยังพบเนื้อเยื่ออีกชนิดหนึ่งรอบๆ เนื้อเยื่อลำเลียงอาหารคือ medulla rays มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำ เป็นตัวที่คอยควบคุมความเข้มข้นของน้ำยางในท่อน้ำยาง และช่วยรักษาความตึงสภาพสมดุลของท่อน้ำยางด้วย ชั้นเปลือกอ่อนมีความหนาแน่นของท่อน้ำยางสูง จึงทำให้ขนาดของท่อน้ำยางเล็กกว่าในชั้นเปลือกแข็ง

1.2.3 ใบยางพารา (Leaf)

ใบยางพาราจัดเป็นใบประกอบ (Compound leaf) แบบ palmate ใบประกอบชุดหนึ่งของยางพารามี 3 ใบย่อย ใบยางจะแตกออกมาเป็นชั้นๆ หรือเรียกกันว่า “ฉัตร” การเรียงตัวของใบในฉัตรเป็นแบบเกลียว (spiral) ใบที่แก่ที่สุดของกลุ่มใบย่อยคือ ใบที่ใหญ่ที่สุดและมี petiole ยาวกว่า ใบจะมีหน้าที่หายใจคายน้ำ อีกทั้งยังเป็นส่วนที่ปรุงอาหารเพื่อนำไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของต้นยางให้มีความเจริญเติบโต และยังช่วยในการผลิตน้ำยางให้มีคุณภาพด้วย

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ค่าเฉลี่ย (%)	ช่วง (%)
ความชื้น (Moisture)	0.5	0.3 – 1.0
สารที่สกัดได้ด้วยอะซิโตน (Acetone Extract)	2.5	1.5 – 4.5
โปรตีน (Protein)	2.5	2.0 – 3.0
เถ้า (Ash)	0.3	0.2 – 0.5
ไฮโดรคาร์บอน (Rubber Hydrocarbon)	94.2	
Total	100.0	

ที่มา: คัดแปลงจาก Maurice, 1973

เนื่องจากแต่ละหน่วยไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) และหมู่แอลฟาเมทิลีน ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยกำมะถัน นั่นคือ พันธะคู่ของยางเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกำมะถัน อย่างไรก็ตามพันธะคู่ดังกล่าวก็ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิด hydrogenated rubber กับคลอรีนเกิด chlorinated rubber กับไฮโดรคลอไรด์เกิด hydrochlorinated rubber และสามารถทำให้เกิดยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวง (cyclised rubber) โดยปฏิกิริยา cyclisation

1.3.2 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

คุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปมีผลต่อการเป็นผลิตภัณฑ์หรือการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและสามารถแตกได้ เมื่อเก็บยางไว้ที่ 10 องศาเซลเซียส การเกิดผลึกทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงจาก 0.92 – 0.95 (Blow and Hepburn, 1985) สมบัติทางกายภาพมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

Density	0.92
Refractive index (20 °C)	1.52
Coefficient of cubical expansion	0.00062/°C
Cohesive energy density	63.7 cal./c.c.
Heat of combustion	10,700 cal./g
Thermal conductivity	0.00032 cal./sec/cm ² /°C
Dielectric constant	2.37
Power factor (1,000 cycle)	0.15 – 0.2
Volume resistivity	10 ¹⁵ ohms/c.c.
Dielectric strength	1,000 volts/mil

ที่มา: คัดแปลงจาก Maurice, 1973

1.4 วัตถุดิบยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการแปรรูปขั้นต้นของน้ำยางสดจากต้นยางพาราซึ่งอาจจำแนกได้ 2 ประเภทหลัก คือ ประเภทยางแห้ง (solid form or dry rubber) และประเภทของเหลว คือ น้ำยางข้น (concentrated latex) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.4.1 ยางแห้ง ยางธรรมชาติในรูปของยางแห้งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของกรรมวิธีการผลิต คือ

1.4.1.1 ยางแบบธรรมดา ผลิตโดย concentrated process ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง และยางเครพ

1.4.1.2 ยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ผลิตโดยมีเงื่อนไขการระบุคุณภาพมาตรฐานตามสากล (technically specified process) ได้แก่ ยางแท่งมาตรฐาน (standard block rubber)

1.4.1.3 ยางแบบอื่นๆ ที่มีวิธีการผลิตเฉพาะตัว เพื่อให้ได้ผลผลิตเหมาะสมกับงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ หรือเพื่อวัตถุประสงค์จะปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ ตัวอย่างยางกลุ่มนี้ได้แก่ ยางที่มีความหนืดคงที่ (viscosity stabilized tubbet; CV) ยางที่มีสมบัติความพิเศษในกระบวนการผลิต (superior processing rubber; SP) ยางผสมน้ำมัน (oil extended natural rubber; OENR) ยางเทอร์โมพลาสติก ยางอีพอกซีไดซ์ ยางผง และยางเหลว เป็นต้น

โดยมีวัตถุดิบจากต้นยางพาราที่จะนำไปผลิตเป็นยางแห้งชนิดต่างๆ มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแรกคือ น้ำยางจากสวน (fresh or field latex) นำไปผลิตเป็น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพคุณภาพดี และยางแท่งคุณภาพดี ชนิดที่สองคือ ยางแห้งที่จับตัวแล้ว (dried rubber, naturally coagulated) ได้แก่ พอกเศษยางก้อนที่ติดกันถ้วยรับน้ำยาง (cup lump) เศษยางตามรอยกรีด (tree lace) ยางแห้งตามเปลือกไม้ ยางแห้งตามพื้นดิน (bark scrap, earth scrap) เป็นต้น เศษยางเหล่านี้หรือที่ชาวสวนเรียกว่า “จียาง” ซึ่งในอดีตจะถูกนำไปผลิตเป็นยางเครพคุณภาพต่ำ แต่ปัจจุบันเนื่องจากการได้มีการพัฒนาการผลิตยางแท่ง จียางดังกล่าวจึงเป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับการผลิตยางแท่งคุณภาพกลาง

1.4.2 น้ำยางข้น น้ำยางข้นที่ผลิตจำหน่ายทั่วไป อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำยางข้นธรรมดาที่ไม่ผ่านการทรีต (treated) กับสารเคมีหรือวิธีการใดๆ เพื่อให้โมเลกุลยางเปลี่ยนไป ส่วนอีกประเภทหนึ่งเป็นน้ำยางข้นที่ได้ผ่านกระบวนการทรีตด้วยสารเคมี หรือด้วยการฉายรังสีให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลงไป ประเภทหลังนี้เรียกว่า “น้ำยางคงรูป” หรือ “น้ำยางพรีวัลคาไนซ์” (prevulcanised or vulcanized latex) หรือบางครั้งอาจเรียกน้ำยางผสมเสร็จ

2. ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางพาราสามารถเป็นวัตถุดิบในการผลิตสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ ได้มากมาย แล้วแต่ประเภทตามลักษณะการผลิตต่างๆ ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์นั้นๆ แต่ในการวิจัยนี้จะเน้นในเรื่องของยางแห้งแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ซึ่งก็คือ “ยางแท่ง” เท่านั้น โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตยางแท่งมีดังต่อไปนี้

2.1 จุดประสงค์ในการผลิตยางแท่ง

ยางแท่ง (Block Rubber) เป็นยางธรรมชาติที่ผลิตโดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐานมีการระบุคุณภาพของของยางดิบที่ผลิตได้แน่นอน ซึ่งก่อนปี พ.ศ. 2508 ยางธรรมชาติส่วนใหญ่มีการผลิตในรูปของยางแผ่นรมควัน ยางเครพ หรือน้ำยางข้น ไม่มีการระบุมาตรฐานการจัดชั้นยางที่ชัดเจนจะพิจารณาโดยใช้สายตาในการตัดสินชั้นยาง ต่อมาในปี พ.ศ. 2508 สถาบันวิจัยยางมาเลเซีย ได้มีการผลิตยางแท่งขึ้นเป็นครั้งแรก เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติให้มีมาตรฐาน มีขนาดเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน โดยมีจุดประสงค์ของการผลิต ดังนี้

2.1.1 เพื่อปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตยางดิบแบบเก่าที่ไม่มีมาตรฐานการจัดชั้นยางมาก่อน

2.1.2 เพื่อการแก้ไขวิธีการ การจัดชั้นยางซึ่งใช้สายตา ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้นโดยการทดสอบคุณภาพยางแท่งในห้องปฏิบัติการ

2.1.3 เพื่อแข่งขันกับยางสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นมาใช้แทนยางธรรมชาติ โดยยางสังเคราะห์มีการระบุคุณภาพยาง สามารถนำมาใช้งานได้ดี และมีสมบัติบางอย่างดีกว่ายางธรรมชาติ เช่น สมบัติทางด้านทนต่อน้ำมัน และการทนต่อความร้อน เป็นต้น ดังนั้นยางสังเคราะห์จึงเป็นคู่แข่งที่สำคัญของยางธรรมชาติทำให้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงและควบคุมคุณภาพการผลิตของยางธรรมชาติ เพื่อให้สามารถแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้

2.1.4 ขนาดของยางแท่งมีความสะดวกในการเก็บและขนส่ง

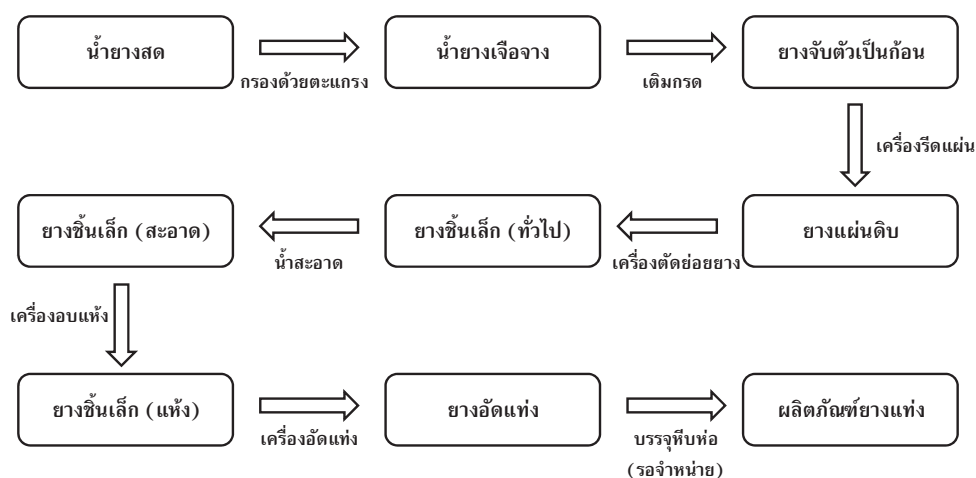
2.2 กระบวนการผลิตยางแท่ง

หลักสำคัญในกระบวนการผลิตยางแท่ง คือ การทำให้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยมีการใช้เครื่องตัดรีดและย่อยยางก้อนให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาอบให้แห้งอัดเป็นแท่ง การผลิตยางแท่ง สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่สะอาด หรือน้ำยางสด (Fresh or field latex) และวัตถุดิบยางแห้ง คือยางที่จับตัวแล้ว (field coagula material) ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการผลิตโดยใช้ยางทั้ง 2 ประเภทมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง

เริ่มจากรวบรวมน้ำยางสดจากสวนยางลงในถังรวมน้ำยาง น้ำยางที่ใส่ลงไปจะต้องผ่านการกรองด้วยตะแกรงขนาด 40 หรือ 60 เมช ก่อน เพื่อให้สิ่งสกปรกแยกตัวออกไป แล้วนำน้ำยางมาเจือจางด้วยน้ำ 1:1 จะทำให้น้ำยางมีความเจือจางประมาณ 15-20 เปอร์เซนต์ แล้วทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดฟอสฟอริกหรือกรดอะซิติก ปริมาณกรดที่จำเป็นต้องใช้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของยางธรรมชาติ เมื่อได้ยางที่จับตัวแล้ว สภาพของยางก้อนขาวที่จับตัวอาจสังเกตได้ 2 ลักษณะคือ ยางก้อนจับตัวกันแน่น จำเป็นต้องนำยางมาตัดและเข้าเครื่องรีดเป็นแผ่นก่อนด้วยเครื่องรีดเชอร์ มาชีเรเตอร์ และเครื่องเครพ แต่หากเป็นยางที่มีลักษณะเป็นรูปพูนมีโพรงอากาศ สามารถนำมารีดแผ่นโดยป้อนเข้าเครื่องเครพหรืออาจนำเข้าเครื่องตัดชนิดที่เรียกว่าแกรนูลเลเตอร์ (granulator) ได้เลย ในขณะที่รีดยางเป็นแผ่น ยางจะถูกฉีดด้วยน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรก หลังจากนั้นทำการย่อยยาง โดยป้อนยางผ่านเข้าสู่เครื่องเครพ 3-4 ครั้งด้วยสายพาน หลังจากนั้นจะป้อนยางเข้าสู่เครื่องย่อย เพื่อย่อยยางให้เป็นเม็ดเล็กๆ (crumb) ให้มีพื้นที่ผิวมาก สามารถระบายความชื้นออกได้เร็วขณะการอบแห้ง โดยใช้เครื่องจักรในการย่อย ได้แก่ เครื่องเครพเปอร์-แฮมเมอร์มิล เครื่องเชิร์คเคอร์ หรือเครื่องเพเลไทเซอร์ เมื่อได้ยางอยู่ในลักษณะเป็นชิ้นหรือเม็ดเล็ก ๆ แล้ว รวบรวมยางเหล่านี้ลงกระบะอบ เข้าเครื่องอบแบบใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 -110 องศา

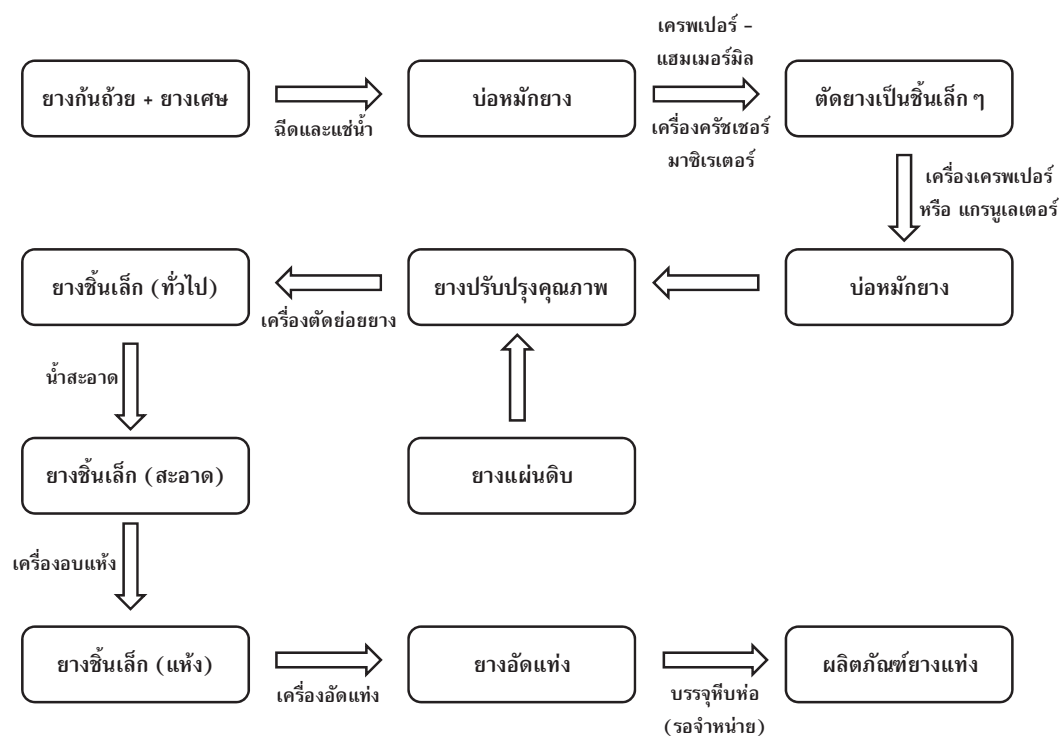
เซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วจึงใช้ลมเป่ายางที่แห้งแล้วให้เย็นลง อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ยางบางส่วนในกะบะอบยางไม่แห้ง อาจใช้วิธีเพิ่มเวลาในการอบแห้งยางชุดนั้นให้นานต่อไปอีกเล็กน้อย และในการอบแห้งควรอบครั้งเดียวให้ยางแห้งเลย มิฉะนั้นจะต้องนำมาอบใหม่อีกครั้ง หากจำเป็นต้องอบใหม่ควรทำให้ยางชุ่มด้วยน้ำใหม่อีกครั้งหนึ่ง เพื่อป้องกันยางเฝิม ยางที่อบแห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และอัดเป็นแท่งๆ ละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 670 x 330 x 170 มิลลิเมตร และห่อด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีน (polyethylene) แล้วบรรจุลงถัง สามารถเขียนรายละเอียดข้างต้นเป็นแผนผังดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตยางแท่งจากน้ำยาง (ดัดแปลงจาก เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2540)

2.2.2 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง

จากการผลิตยางแท่งภายในโรงงานทั่วไป มีขั้นตอนการผลิตที่ประกอบด้วยเครื่องจักรต่างๆ มากมาย จึงทำให้สายการผลิตมีช่วงยาว ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น จึงอธิบายอย่างคร่าว ๆ ในแผนผังดังภาพที่ 2.3 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

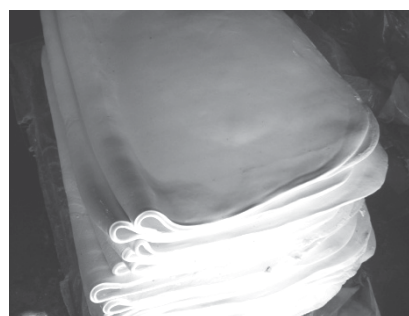


ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตยางแท่งด้วยยางก้อนจับตัว (ดัดแปลงจาก เสาวนีย์ ก่ออุทัยกุลรังสี, 2540)

2.2.2.1 ยางแท่งที่ผลิตโดยใช้วัตถุดิบประเภทยางแห้ง เช่น ยางกันถ้วย ยางแผ่นดิบ และเศษยางต่างๆ ดังภาพที่ 2.4 นำยางต่างๆ มาหมักโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 5 - 6 วัน เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ในยางให้เกิดการพองตัวและหลุดออกง่าย นอกจากนี้เป็นการทำให้ยางนิ่มและคละยางให้เข้ากัน



(ก) ยางกันถ้วย

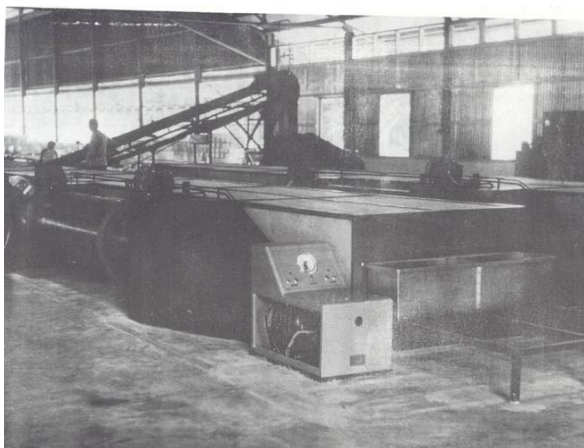


(ข) ยางแผ่นดิบ

ภาพที่ 2.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางแท่ง เช่น ยางแผ่นดิบ (ข) เศษยางและยางกันถ้วย (ก)

2.2.2.2 ขางก้อนจับตัวที่มีขนาดใหญ่จะนำมาบด หรือตัดทำให้เป็นชิ้นเล็กลงด้วยเครื่องครีซเซอร์ เครื่องมาซิเรเตอร์ หรือเครื่องแฮมเมอร์มิล

2.2.2.3 หลังจากนั้นขางที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ จะแช่ในน้ำ และถูกลำเลียงผ่านเครื่องเกรพหลายๆ ครั้ง และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ อีกด้วยเครื่องแกรนูลเลเตอร์ ดังภาพที่ 2.5 แล้วปล่อยลงบ่อพักขนาดใหญ่ มีน้ำไหลอย่างแรงทำให้ขางหมุนไปรอบๆ ขางจะถูกล้างและทำให้สะอาดขึ้น



ภาพที่ 2.5 เครื่องแกรนูลเลเตอร์ (Verhaar, 1973)

2.2.2.4 นำมารีดด้วยเครื่องเกรพอีกครั้ง จึงป้อนขางเข้าสู่เครื่องย่อยขาง เช่น เครื่องเชรีดเดอร์ หรือเครื่องแกรนูลเลเตอร์ เพื่อย่อยขางครั้งสุดท้ายจะได้ลักษณะขางดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของขางที่ได้ทำการบดย่อยเรียบร้อยแล้ว

2.2.2.5 แล้วลำเลียงขางลงกระบะเข้าสู่ห้องอบขางเพื่ออบให้ขางแห้ง ดังภาพที่ 2.7 ที่อุณหภูมิ 100 - 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 ชั่วโมง โดยใช้ความร้อนจากน้ำมันเตา และภายในห้องอบขาง มีพัดลมเป่าเพื่อถ่ายเทความร้อนหลังอบแห้งเรียบร้อยแล้วจะได้ขางดังภาพที่ 2.8



(ก) ขางที่บดย่อยแล้วบรรจุอยู่ในกระบะอบ

(ข) ห้องอบแห้งขางแห้ง

ภาพที่ 2.7 การลำเลียงขางลงกระบะก่อนนำเข้าห้องอบแห้ง



ภาพที่ 2.8 ลักษณะขางหลังจากอบแห้ง

2.2.2.6 นำไปอัดแท่งด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก แล้วลำเลียงขางแห้งดังกล่าวด้วยสายพาน เพื่อนำมาตรวจโลหะ สิ่งเจือปน และปริมาณจุลชีวภาพในเนื้อขาง ก่อนที่จะนำไปห่อด้วยแผ่นพลาสติกใส ดังภาพที่ 2.9



(ก) ขางที่ถูกอัดแท่งแล้ว

(ข) ขางแห้งที่ถูกพบโลหะ

ภาพที่ 2.9 ขางที่ถูกอัดแท่งแล้วจะนำไปตรวจโลหะที่อยู่ภายในเนื้อขาง

2.2.2.7 เมื่อยางแท่งผ่านการตรวจโลหะแล้ว เก็บตัวอย่างยางแท่งเพื่อนำไปทดสอบคุณภาพ และออกใบรับรองคุณภาพของยางก่อนส่งจำหน่าย และส่วนยางแท่งที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างแล้วก็นำมาห่อด้วย แผ่นพลาสติกใส ติดสัญลักษณ์แสดงชนิดของยางแท่งที่ผลิต แล้วจึงนำไปบรรจุหีบห่อเพื่อรอจำหน่าย ดังภาพ ที่ 2.10



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.10 การเก็บตัวอย่างยางเพื่อทดสอบคุณภาพ (ก) และยางห่อด้วยพลาสติกรอการจำหน่าย (ข)

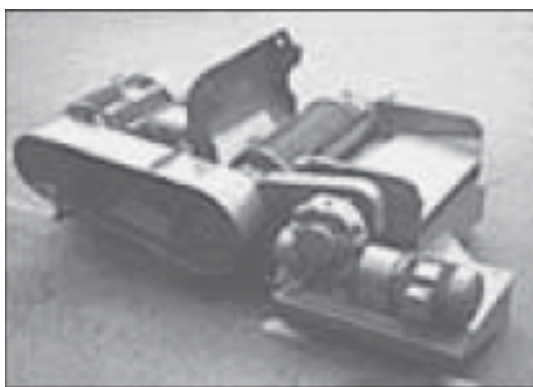
2.2.3 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแท่งมาตรฐาน STR 20 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.1 เครื่องรีด (Creper) ดังภาพที่ 2.11 เครื่องนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งทำด้วยเหล็กกล้า 2 ลูกกลิ้ง หมุนได้ในทิศตรงกันข้าม ผิวหน้าของลูกกลิ้งจะเป็นร่องเพื่อช่วยให้ชั้นยางเกาะลูกกลิ้งและเพื่อให้เกิดแรงอัด ขณะใช้เครื่องจักรยางที่ป้อนเข้าเครื่องจะถูกรีดอัดให้กระจายเต็มผิวหน้าของลูกกลิ้งแล้วชั้นยางก็จะถูกรีดออกจากเครื่องซึ่งความหนาบางของแผ่นยางจะสม่ำเสมอและโดยที่มีท่อน้ำตามแนวยาวของลูกกลิ้ง และติดอยู่เหนือลูกกลิ้ง ขณะรีดยางจะมีการฉีดน้ำลงบนเนื้อยางเพื่อประโยชน์ในการทำความสะอาดและเป็นตัวแลกเปลี่ยน ประจุระหว่างเนื้อยางและลูกกลิ้งเพื่อไม่ให้เกิดอาการลื่น (zero friction)



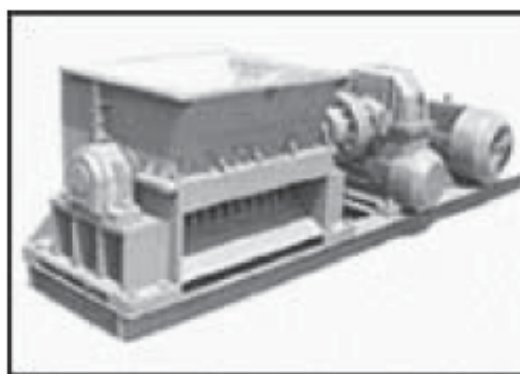
ภาพที่ 2.11 เครื่องรีดยาง (Creper) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.2 เครื่องบด/อัด (Shredder) ดังภาพที่ 2.12 เครื่องบด/อัด มีลักษณะการทำงานคล้ายเครื่องรีด ความแตกต่างอยู่ที่ความเสียดทานที่สูงกว่า เนื่องจากเครื่องบด/อัดจะมีชิ้นส่วนเพิ่มเติม เช่น ลูกกลิ้งสำหรับตัดยางซึ่งลูกกลิ้งดังกล่าวจะตัดยางที่ผ่านลูกรีดแล้ว วิธีการดังกล่าวจะช่วยทำให้ยางถูกบดย่อยเป็นชิ้นเล็กและทำให้แห้งเนื่องจากกระบวนการการตัดยางทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากใช้ความเร็วรอบในการตัดสูง เครื่องบด/อัด นิยมใช้เพื่อย่อยยางที่จับตัวแข็งแล้วเพื่อบดและอัดให้เป็นก้อนยางและง่ายต่อการทำความสะอาดหรือแปรรูปผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่อไป



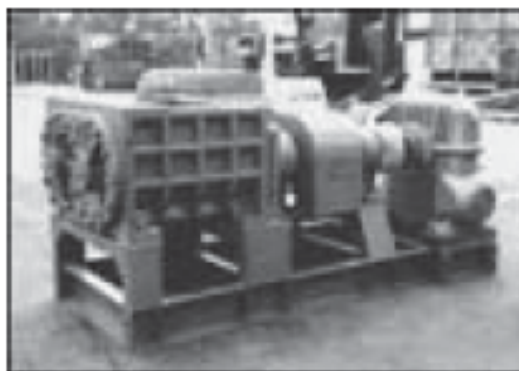
ภาพที่ 2.12 เครื่องบดอัด (Shredder) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.3 เครื่องตัดย่อยยาง (Slab Cutter) ดังภาพที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่องเป็นการใช้เชืวที่มีลักษณะคล้ายตะขอทำการเกี่ยวและตัดยาง ให้เป็นชิ้นเล็กซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อการย่อยยางชิ้นใหญ่ หรือขนาดที่คละให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอมากขึ้น ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดขั้นต่อไปยางที่ผ่านเครื่องตัดย่อยยางจะง่ายต่อการทำความสะอาดและการหลุดออกของสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนเนื้อยาง โรงงานผลิตยางแท่งมาตรฐาน STR 20 นิยมใช้เครื่องตัดย่อยยาง (Slab Cutter) เป็นเครื่องจักรชิ้นแรกเพื่อทำการตัดย่อยยางก่อนเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดส่วนอื่นต่อไป โดยเครื่องตัดย่อยยางนี้แทบไม่มีผลต่อการเนียนเนื้อยาง หรือการคัดออกของสิ่งสกปรกจากเนื้อยาง



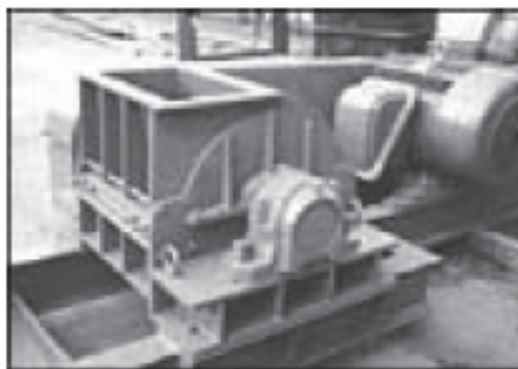
ภาพที่ 2.13 เครื่องตัดย่อยยาง (Slab cutter) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.4 ฟรี เบรกเกอร์ (Pre Breaker) ดังภาพที่ 2.14 หลักการทำงานของเครื่องนี้มีลักษณะ คล้ายกับเครื่องบดขยี้เนื้อ เนื่องจากลักษณะงานส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ให้เกิดบนเนื้อยาง เพื่อช่วยในการตัดตัวของสิ่งสกปรกบนเนื้อยางให้ออกมา รวมทั้งมีประโยชน์ในการทำเนื้อยางให้มีการคลายตัว และช่วยให้ยางสามารถซึมผ่านเข้าเนื้อยางได้ง่ายขึ้นในกระบวนการทำความสะอาดชั้นต้น เนื้อยางหลังจากผ่าน เครื่องฟรี เบรกเกอร์จะมีลักษณะขรุขระและเป็นริ้ว ซึ่งเกิดจากการทำงานของใบพัดที่เป็นส่วนประกอบหลักของ เครื่องฟรี เบรกเกอร์ หนึ่ง เครื่องฟรี เบรกเกอร์นิยมมีการจ่ายน้ำเพื่อหล่อเลี้ยงเนื้อยางระหว่างถูกการเฉือนใน ตัวเครื่องและประโยชน์ในการถ่ายเทความร้อน



ภาพที่ 2.14 ฟรี เบรกเกอร์ (Pre Breaker) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.3.5 โรตารี คัตเตอร์ (Rotary Cutter) ดังภาพที่ 2.15 ประกอบด้วยโรเตอร์ที่มีใบมีด 3 – 5 ใบติดอยู่ หลักการทำงานของเครื่อง ขางจะถูกป้อนเข้าในช่องระหว่างใบมีดจะตัดขยี้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ ชิ้นยางถูก ตัดที่มีขนาดเล็กพอจะลอดผ่านรูตะแกรงที่อยู่ใต้ที่ตัดข้างและผ่านออกไป ส่วนชิ้นยางที่มีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรง ก็จะถูกหมุนกลับไปถูกตัดใหม่จะเป็นเช่นนั้นจนกว่ายางที่ป้อนเข้าเครื่องทั้งหมดถูกตัดจนมีขนาดผ่านรูตะแกรง ออกมาได้หมด



ภาพที่ 2.15 โรตารี คัตเตอร์ (Rotary Cutter) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.3 มาตรฐานและการทดสอบคุณภาพยางแท่ง

2.3.1 สำหรับประเทศไทย เริ่มผลิตยางแท่งขึ้นครั้งแรกประมาณปี พ.ศ. 2511 ตามโครงการพัฒนา ยาง ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากสหประชาชาติ และให้เอกชนสามารถจดทะเบียนเป็นผู้ผลิตยางแท่งได้ โดยใช้ชื่อว่า ยางแท่งทีทีอาร์ (TTR : Thai Tested Rubber) มีสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบ ในปี พ.ศ. 2537 สถาบันวิจัยยางมีนโยบายให้บททวนมาตรฐานยางแท่งไทย โดยศึกษาคุณภาพยางแท่งไทยใน สภาวะขณะนั้น และวิธีปฏิบัติที่ปรับเปลี่ยนไปตามพัฒนาการการบริโภคยางของผู้ใช้ยางแท่ง การทบทวน มาตรฐานยางแท่งไทยครั้งนี้ ได้พิจารณาในส่วนของการเรียกชื่อยางแท่งไทยจาก TTR เป็น STR (Standard Thai Rubber) เพื่อให้เป็นสากลตามผู้ผลิตประเทศอื่นๆ ขึ้นยาง และขีดจำกัดคุณภาพ ให้สอดคล้องกับความสามารถ ของผู้ผลิต โดยกำหนดให้ยางแท่ง STR ประกอบด้วยชั้นยาง 8 ชั้น ซึ่งเป็นชั้นยางเหมือนเดิม 4 ชั้น ได้แก่ STR 5L, STR 5, STR 10 และ STR 20 เพิ่มชั้นยางใหม่ 4 ชั้น ได้แก่ STR XL, STR 5CV, STR 10CV และ STR 20CV และ ทบทวนวิธีปฏิบัติของการบรรจุหีบห่อ การควบคุมคุณภาพ ตลอดจนการส่งออกยาง ซึ่งให้มีผลบังคับใช้มาตรการ ดังกล่าวตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2539

ยางแท่งที่ผลิตในประเทศไทย ภายใต้ความดูแลรับผิดชอบของสถาบันยาง กรมวิชาการ เกษตรและสหกรณ์ ได้กำหนดขีดจำกัดสมบัติต่าง ๆ ของยางแท่งเอสทีอาร์ ซึ่งระบุในเอกสารวิชาการยางแท่ง เอสทีอาร์ 3/2538 “คู่มือมาตรฐานยางแท่งเอสทีอาร์” ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานยางแท่งชั้นต่าง ๆ

Parameter	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10 CV	STR 20	STR 20 CV
	Latex		Latex / Sheets			Lump / Sheets		
Dirt retained on 44 ILL aperture (max, % wt.)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
Ash (max, % wt.)	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.8
Nitrogen* (max, %, wt.)	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Volatile matter* (max, % wt.)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Initial plasticity (Po), (min)	35	35	30	—	30	—	30	—
Plasticity Retention Index (PRI), (min)	60	60	60	60	50	50	40	40
Colour Lovibond Scale (individual value, max.)	4	6	—	—	—	—	—	—
Mooney Viscosity, ML (I' + 4')100C	—	—	—	**	—	**	—	**
Colour Coding Marker	blue	light green	light green	white on green background	brown	white on brown background	red	white on red background

ที่มา: ดัดแปลงจาก เสาวนีย์ ก่ออุทัยกุลรังสี, 2540

* Producer limit is not more than 0.50%

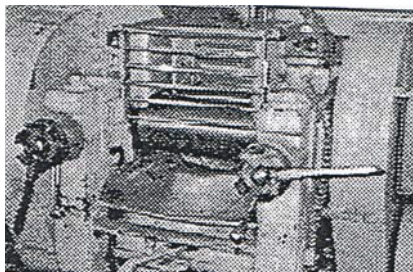
** Producer limit of 70(+7,-5), 60(+7,-5) and 50(+7,-5) for STR 5 CV
60(+7,-5) for STR 10 CV and 65(+7,-5) for STR 20 CV

2.4 การทดสอบคุณภาพยางแท่ง (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2540)

ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นมาโดยมีการระบุคุณภาพมาตรฐานของยางที่แน่นอนเช่นเดียวกับยางสังเคราะห์ ดังนั้นยางแท่งทุกชุด (Lot) ที่ทำการผลิตจะต้องมีการตรวจสอบสมบัติของยางให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด สมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การหาค่าปริมาณสิ่งสกปรก ปริมาณจีเถ้า ปริมาณไนโตรเจน ความชื้น ความอ่อนตัวเริ่มต้น ดัชนีความอ่อนตัว ความเข้มของสียาง และความหนืดของยาง เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ (SMR Bulletin, 1970)

ตัวอย่างยางดิบที่เก็บมาจากยางแท่งที่ผลิตแต่ละครั้ง ก่อนทำการทดสอบต้องผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenisation) โดยนำมาบดด้วยเครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว ลูกกลิ้งตัวหลังหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ 31 รอบต่อวินาที และอัตราส่วนความเร็วของลูกกลิ้งหลังต่อลูกกลิ้งหน้าเท่ากับ 1.46 : 1



ภาพที่ 2.16 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (สำหรับห้องปฏิบัติการ)

อุณหภูมิของลูกกลิ้งหลังเย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง (มีน้ำหล่อเลี้ยงตลอดเวลา) ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip) ต้องปรับให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทดสอบด้วย คือ

0.065 นิ้ว (1.65 มิลลิเมตร) สำหรับผสมยางให้เป็นเนื้อเดียวกัน

0.020 นิ้ว (0.51 มิลลิเมตร) สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบปริมาณสิ่งระเหย

0.013 นิ้ว (0.33 มิลลิเมตร) สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบปริมาณสิ่งสกปรก

เครื่องบดยางก่อนใช้ต้องสะอาดเสมอ นำยางมาบดผ่านลูกกลิ้ง 6 ครั้ง แต่ครั้งที่ยางผ่านลูกกลิ้งออกมา ให้ม้วนเป็นรูปทรงกระบอก ใส่ปลายข้างหนึ่งเข้าเครื่องเพื่อบดครั้งต่อไป สำหรับครั้งที่ 6 ให้รีดยางออกมาเป็นแผ่น (ไม่ต้องม้วน) ในระหว่างบดยางครั้งที่ 1-5 ถ้ามีเศษยางตกลงมาบนภาชนะรองรับลูกกลิ้ง ให้นำมารวมกับยางที่จะบดในครั้งต่อไปให้หมด ตัวอย่างยางที่บดเรียบร้อยแล้วเป็นส่วนๆ โดยมีน้ำหนักดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.4 น้ำหนักชิ้นทดสอบสมบัติยาง

สมบัติที่ทดสอบ	น้ำหนักชิ้นทดสอบ (กรัม)
- ปริมาณสิ่งสกปรก	15
- ปริมาณเถ้า	10
- ปริมาณไนโตรเจน	10
- ปริมาณสิ่งระเหย	15
- ดัชนีความอ่อนตัว	25
- ความหนืด	25

2.4.2 สิ่งสกปรก (Dirt content) (ASTM D1278-91a)

สิ่งสกปรก หมายถึง ปริมาณสารที่ได้จากการกรองด้วยตะแกรงขนาด 325 เมช หรือ 44 ไมครอน สารที่กรองได้ประกอบด้วยเศษดิน เปลือกไม้ และใบไม้ เป็นต้น โดยปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกที่มีในยาง มีความสำคัญต่อการแปรรูปและคุณภาพของยางเป็นอย่างมาก

2.4.2.1 เครื่องมือและสารเคมี

เครื่องมือ

- 1) ขวดรูปชมพู่
- 2) เทอร์โมมิเตอร์ ขนาด 200 °C
- 3) ถ้วยกรองทำด้วยสแตนเลส รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 2-3 มิลลิเมตร สูง 13 มิลลิเมตร มีตะแกรงขนาดรู 325 เมช หรือ 44 ไมครอน น้ำหนักของถ้วยกรองรวมแผ่นตะแกรงประมาณ 15 กรัม

- 4) เต้าไฟฟ้า ขนาด 1500 วัตต์
- 5) เครื่องชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม
- 6) เตาอบ
- 7) เครื่องทำความสะอาดถ้วยกรอง (Ultrasonic cleaning kit)
- 8) กระดาษกรองเบอร์ 1 และกรวยพลาสติก

สารเคมี

- 1) น้ำมันสน (Turpentine)
- 2) Peptising Agent : RPA 3 (Xylyl Mercaptan)



ภาพที่ 2.17 การละลายน้ำมันสนด้วยความร้อน

2.4.2.2 วิธีทดสอบ

1) นำตัวอย่างยางที่บดผสมไว้แล้ว ประมาณ 15 กรัม มาผ่านลูกกลิ้งหนา 0.013 นิ้ว จำนวน 2 ครั้ง แบ่งยางมา 10 กรัม (ซึ่งละเอียดถึงทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร มีน้ำมันสน 250 มิลลิลิตร และสารเร่งการละลายอยู่ 1 มิลลิลิตร

2) ละลายยางโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 140 °C (ให้ยกขวดละลายยาง แกว่งบ่อยๆ เพื่อให้สารละลายภายในหมุนเวียนและละลายเร็วขึ้น) ใช้เวลาละลายยางประมาณ ½ - 1 ชั่วโมง

3) กรองสารละลายยางขณะร้อน โดยเทสารละลายผ่านที่กรองที่สะอาด ทราบน้ำหนักแน่นอน ขณะเทให้ผงในขวดละลายยางหมด ให้ใช้น้ำมันสนที่ร้อน 30-50 มิลลิลิตร ล้างขวดละลายยาง 2 ครั้ง แล้วตะแกรงขวด นิดด้วยน้ำมันเย็นเพื่อล้างผงออกให้หมด แล้วจึงใช้น้ำมันร้อนล้างรอบๆ ของภายในที่กรองอีกครั้ง

4) อบผงให้แห้ง ที่ 90 – 100 °C ทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์ประมาณ 30 นาที แล้วนำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียดความถูกต้อง 0.1 มิลลิกรัม

2.4.2.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (1)

$$\% \text{ สิ่งสกปรก} = \frac{\text{น้ำหนักสิ่งสกปรก}}{\text{น้ำหนักชิ้นทดสอบ}} \times 100 \quad (1)$$

2.4.3 ปริมาณเถ้า (Ash content) (ASTM D1278-91a)

เถ้า เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในยาง เป็นสารพวกเกลืออนินทรีย์ (inorganic salt) พวกฟอสเฟตของโปแตสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียมและธาตุอื่น ๆ นอกจากนี้อาจเป็นสารพวกซิลิกา หรือ ซิลิเกตในยาง รวมทั้งเป็นสารที่เกิดจากการปะปนจากภายนอก

2.4.3.1 เครื่องมือ

- 1) ครูชีเบิลขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) เตาอบความร้อนสูง
- 3) กระจกกรองชนิดไม่มีเถ้า

4) เครื่องชั่งละเอียด

5) เดสซิเคเตอร์

2.4.3.2 วิธีทดสอบ

1) ตัดยางที่บดผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว 5-10 กรัม (ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

2) ห่อชิ้นยางด้วยกระดาษกรอง ใส่ในครุชเบิลที่รู้น้ำหนักแก้ว (ก่อนใช้ต้องเผาในเตาให้ร้อนแดง ทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์แล้วชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)

3) นำด้วยครุชเบิลที่ใส่ยางไปเผาในเตา ที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง $530 \pm 20^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นนำด้วยครุชเบิลทำให้เย็นในเดสซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) นำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม

2.4.3.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (2)

$$\% \text{ASH} = \frac{A - B - C}{D} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักแก้ว + ด้วยครุชเบิล

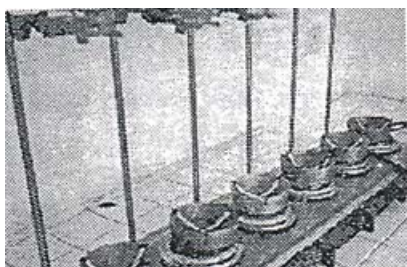
เมื่อ B คือ น้ำหนักด้วยครุชเบิล

เมื่อ C คือ น้ำหนักแก้วของกระดาษกรอง

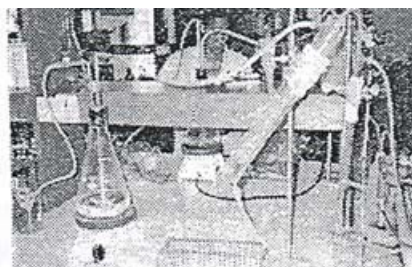
เมื่อ D คือ น้ำหนักยางก่อนทดสอบ

2.4.4 ไนโตรเจน (Nitrogen content) (ASTM D3533-90)

ไนโตรเจนในยางดิบจะอยู่ในรูปของโปรตีน ดังนั้นปริมาณของไนโตรเจน จึงเป็นตัว บ่งชี้ปริมาณของโปรตีนในยาง ปริมาณไนโตรเจนสูงจะมีผลกระทบต่อลักษณะการคงรูปของยาง ทำให้ต้องเข้มงวดในการควบคุมระบบสารที่จะใช้ทำให้ยางคงรูป ในทางเทคนิคสารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนเป็นตัวช่วยเร่งในการทำให้ยางคงรูป หากสามารถควบคุมปริมาณให้สม่ำเสมอและแน่นอนได้ก็จะให้ผลในเชิงบวกต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เพราะอาจลดปริมาณการใช้สารตัวเร่งในสูตรทำผลิตภัณฑ์ยางได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.18 เตาเผาสำหรับย่อยยาง (ก) และชุดเครื่องกลั่นด้วยไอน้ำ (ข)

2.4.4.1 เครื่องมือและสารเคมี

เครื่องมือ

- 1) Micro-Kjeldahl and distillation
- 2) บิวเรตและปิเปต
- 3) เครื่องชั่งละเอียด
- 4) เตาไฟฟ้า ขนาด 1500 วัตต์

สารเคมี

- 1) กรดกำมะถันเข้มข้น
- 2) สารละลายมาตรฐานกรดกำมะถันเข้มข้น 0.01 นอร์มัล
- 3) สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.01 นอร์มัล
- 4) สารละลายกรดบอริก 2% น้ำหนักต่อปริมาตร
- 5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 67% W/V
- 6) สารเร่งปฏิกิริยา (ประกอบด้วย $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2 ส่วน K_2SO_4 15 ส่วน Se 1

ส่วน)

7) สารละลายเมทิลเรด 0.15% น้ำหนักต่อปริมาตร (ประกอบด้วย Methyl Red = 0.1 g + Methyl Blue = 0.05 g + Ethanol = 100 ml)

- 8) สารละลายเมทิลออเรนจ์ 0.1% W/V

2.4.4.2 วิธีทดสอบ

- 1) ชั่งยาง 0.1 กรัม ใส่ใน Micro-Kjeldahl flash เติมส่วนผสมสารเร่งปฏิกิริยา 0.65 กรัม กรดกำมะถัน 2.5 มิลลิลิตร
- 2) ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายสีเขียว (หรือไม่มีสี) ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องไม่มีสีเหลืองอ่อนๆ ปนหรือเหลืออยู่
- 3) ตั้งทิ้งให้เย็น แล้วทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
- 4) เทสารละลายไว้ในเครื่องกลั่นซึ่งเตรียมผ่านไอน้ำร้อนไว้แล้ว 30 นาที ล้างภาชนะด้วยน้ำกลั่น 2-3 มิลลิลิตร ประมาณ 2-3 ครั้ง
- 5) นำขวดแก้วรูปชมพู่ บรรจุบอริก 10 มิลลิลิตร และสารละลายเมทิลเรด 2-3 หยด มารับสารที่กลั่นได้ (ให้ปลายหลอดแก้วจุ่มลงในสารละลาย)
- 6) เติมสารละลาย NaOH 67% W/V 10 มิลลิลิตร ลงในเครื่องกลั่น แล้วล้างด้วยน้ำไม่เกิน 5 มิลลิลิตร
- 7) ปลอ่ยให้น้ำเข้าเครื่องกลั่นสารเป็นเวลา 5 นาที
- 8) เลื่อนขวดแก้วรูปชมพู่ที่รองรับสารที่กลั่น ให้ปลายหลอดอยู่เหนือสารละลาย กลั่นต่อไป 1 นาที แล้วใช้น้ำกลั่นฉีดล้างปลายหลอดแก้ว
- 9) นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรดกับสารละลายกรดกำมะถันเข้มข้น 0.01 N จนได้ยุติสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียว – ม่วง

10) ทำ BLANK ตามวิธีทดสอบเดิมทุกอย่าง แต่ไม่ใส่ตัวอย่างยาง

2.4.4.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (3)

$$\text{ปริมาณโปรตีน} = 6.25 \times 100 \quad (3)$$

2.4.5 ปริมาณสิ่งระเหย (Volatile matter content : VM) (ASTM D1278-91a)

สิ่งระเหยได้ในยาง หมายถึง ความชื้นที่มีอยู่ในยาง ถ้าปริมาณความชื้นในยางสูงยางจะขึ้นราได้ง่าย มีกลิ่นเหม็น และเกิดปัญหาระหว่างกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะว่าจะต้องใช้เวลาและอุณหภูมิบดยางเพื่อให้ความชื้นออกเสียก่อน มิฉะนั้นแล้วสารต่าง ๆ ที่จะเติมผสมกับยางจะคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกันกับยางได้ยาก จึงต้องมีการกำหนดขีดจำกัดของสิ่งระเหย เพื่อต้องการให้ผู้ผลิตยางแท่งอบยางให้แห้ง

2.4.5.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งละเอียด 0.001 กรัม
- 2) ถังโพลีทีน (กว้าง 4 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว หนา 0.06 มิลลิเมตร)
- 3) ถาดอลูมิเนียม (กว้าง 6.5 นิ้ว ยาว 14 นิ้ว สูง 1.5 นิ้ว) บุด้วยตะแกรงขนาด 7 เมช
- 4) ที่หนีบถุง
- 5) เดสซิเคเตอร์ (โถแก้วดูดความชื้น)
- 6) เตาอบ

2.4.5.2 วิธีทดสอบ

- 1) ชั่งยางที่เตรียมไว้ น้ำหนักแน่นอน 10 กรัม $\pm$ 0.001 มิลลิกรัม
- 2) ชั่งยางที่เตรียมไว้ น้ำหนักแน่นอน 10 กรัม $\pm$ 0.001 มิลลิกรัม
- 3) วางตัวอย่างยางขึ้นทดสอบบนถาดอลูมิเนียม (วางซ้อนกันได้ไม่เกิน 7 ถาด)
- 4) อบยางที่อุณหภูมิ 100 ± 3 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 5) เอายางออกจากเตาที่ละลาย พร้อมกับปิดประตูเตาอบทุกครั้งที่ยกถาดออก นำยางใส่ถังโพลีทีน พับปากถุง 3 ครั้ง พับกลางอีกครั้ง แล้วหนีบแขวนไว้บนราว (การใส่ยางในถุงควรใช้เวลาทั้งหมดไม่เกิน 1½ นาที ในถาดหนึ่งๆ)
- 6) ปล่อยางในถุงให้เย็นโดยวางในเดสซิเคเตอร์ประมาณ 30 นาที
- 7) นำยางไปชั่งละเอียด 0.001 กรัม

2.4.5.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (4)

$$\% \text{ASH} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักตัวอย่างยางก่อนอบ (กรัม)

เมื่อ B คือ น้ำหนักตัวอย่างยางหลังอบ (กรัม)

2.4.6 ความอ่อนตัวเริ่มแรกและดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Original Wallace Plasticity and Plasticity Retention Index : Po และ PRI) (ASTM D3194-84, ISO2007-1981)

ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) เป็นค่าที่ใช้ประมาณขนาดของโมเลกุลของยาง ยางที่มีค่า Po สูงแสดงว่ามีขนาดโมเลกุลของยางสูง อย่างที่ถูกออกซิไดซ์มากจะนิ่ม มีค่า Po ต่ำ ส่วนค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง เป็นค่าที่แสดงว่ายางที่ทดสอบนั้นมีความต้านทานต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (กรณียางที่ทนต่อการถูกออกซิเดชันสูง โมเลกุลของยางจะทนต่อการถูกออกซิไดซ์) หรือเป็นการแสดงความต้านทานของยางดิบ ต่อการแตกหักของโมเลกุลยางที่อุณหภูมิสูง

2.4.6.1 เครื่องมือ

- 1) Wallace rapid plastimeter
- 2) Wallace stream generator
- 3) Wallace punch
- 4) เตาอบ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ $140 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ตลอดเวลา เมื่อปิดฝาตู้แล้ว

อุณหภูมิต้องกลับไปอยู่ที่เดิมภายใน 6 นาที

2.4.6.2 วิธีทดสอบ (การเตรียมชิ้นทดสอบ การอบและการวัดค่า)

การเตรียมชิ้นทดสอบ

- 1) ตัดตัวอย่างยางที่บดเป็นเนื้อเดียวกันมา 20 ± 5 กรัม
- 2) รีดยางผ่านเครื่องบด 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิห้อง โดยปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งเท่ากับ 1.65 มิลลิเมตร
- 3) พับแผ่นยางเป็น 2 ทบ โดยกดเบาๆ ให้ได้ความหนา 3.2-3.6 มิลลิเมตร
- 4) ตัดชิ้นทดสอบยาง 6 ชิ้นด้วยเครื่องตัดโดยเฉพาะ
- 5) เก็บชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น เพื่อทดสอบหาค่าพลาสติกซิตี (Po) และชิ้นทดสอบที่เหลือ

อีก 3 ชิ้นเพื่อนำมาทดสอบค่า P30

การอบ

- 1) นำยางชิ้นทดสอบมาอบที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 30 นาที (อุณหภูมิต้องคงที่ก่อนใส่ยางใน เตาอบอย่างน้อย 5 นาที และเริ่มจับเวลาหลังจากที่ใส่ยางแล้ว 6 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของยางและเตาอบคงที่ด้วย)

- 2) เมื่อครบ 30 นาทีแล้ว ทิ้งยางให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที จึงทำการทดสอบ

- 3) พับแผ่นยางเป็น 2 ทบ โดยกดเบาๆ ให้ได้ความหนา 3.2-3.6 มิลลิเมตร

การวัดค่า

- 1) นำชิ้นยางปิดด้วยกระดาษมวนบุหรี่ใส่เครื่องทดสอบ

- 2) ยกแขนปิดเครื่อง 15 วินาทีแรก แท่งโลหะกลม บน-ล่าง จะกดยางให้หนา 1 มิลลิเมตร และอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100°C 15 วินาทีหลัง เครื่องจะกดยางด้วยแรง 10 ± 0.1 กิโลกรัม โดยอัตโนมัติ

- 3) ความหนาของยางที่วัดได้มีความถูกต้อง อ่านได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร เป็นค่าพลาสติกซิตี ของยางที่การทดสอบ

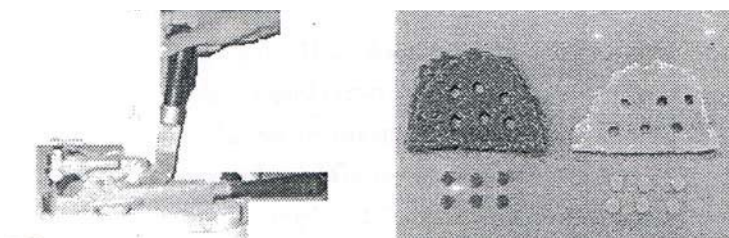
2.4.6.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (5)

$$\% \text{ PRI} = \frac{\text{Aged median plasticity value}}{\text{Unaged median plasticity value}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ P_0 คือ เป็นค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดเริ่มแรก

เมื่อ P_{30} คือ เป็นค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดที่หลังอบ



ภาพที่ 2.19 เครื่องตัดชิ้นทดสอบ และ ชิ้นทดสอบสำหรับหาค่าพลาสติกซีดี

2.4.7 สียาง (ASTM D3517-84)

ยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางมีการจัดชั้นซึ่งระบุในการจัดมาตรฐานชั้นยาง โดยการเปรียบเทียบความเข้มของสียางด้วยสีของโลวบอนด์ (Lovibond) มาตรฐาน เช่น ความเข้มของสียางต่ำกว่าสีของโลวบอนด์ เบอร์ 6 แสดงว่า เป็นยางแท่ง ชั้น STR 5L หากความเข้มของสียางมีค่ามากกว่าสีมาตรฐานโลวบอนด์ เบอร์ 6 แสดงว่ายางที่ผลิตได้จัดเป็นยางแท่ง ชั้น STR 5 เป็นต้น ยางแท่งที่ผลิตจากยางก้อนจับตัวไม่จำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพสีของยาง

2.4.8 ความหนืด

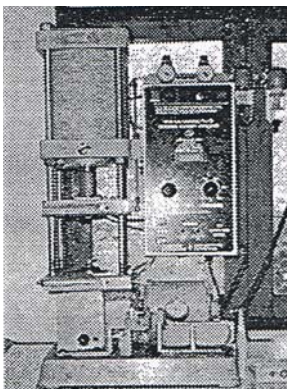
ความหนืดเป็นสมบัติทางกายภาพของยาง โดยความหนืดของยางจะสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลของยาง ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีค่าความหนืดสูงด้วย ปกติจะวัดโดยเครื่อง Mooney Viscometer เป็นค่าบ่งชี้หรือมีความหมายทำนองเดียวกับค่า P_0 เพียงแต่การใช้เครื่องมือทดสอบที่มีระบบการทำงานของเครื่องต่างกัน

2.4.8.1 เครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบความหนืดของยางแท่งมีชื่อเรียกว่า มูนี วิสโคมิเตอร์ (mooney viscometer) เป็นเครื่องมือมาตรฐานสากล (ASTM D1646-94 และ ISO R 289-1963) ใช้วัดค่าความหนืดของยางดิบทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

ชั้นยางที่ทดสอบจะใส่อยู่ระหว่างจานโลหะในห้องใส่ยาง อัดยางด้วยแรงกดเท่ากับ 11500 ± 500 นิวตัน จานโลหะจะหมุนเพื่อเหนี่ยวนำซึ่งอยู่ในห้องใส่ยาง ด้วยความเร็วครั้งที่ 2 รอบต่อนาที แรงบิด (Torque) ที่เหนี่ยวนำกับจานโลหะจะแสดงค่าความหนืดของยาง

ตามมาตรฐานเครื่องทดสอบ กำหนดให้แรงบิดที่ใช้ขนาด 8.3 ± 0.2 นิวตันเมตร มีค่าความหนืดเทียบเท่ากับ 100 หน่วยมูนี (MV scale)



ภาพที่ 2.20 เครื่องมือทดสอบความหนืด (Mooney viscometer)

2.4.8.2 วิธีทดสอบ

- 1) ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบให้คงที่เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส พร้อมกับอุ่นจานหมุนโลหะที่จะให้สำหรับทดสอบ
- 2) เตรียมยางขึ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตรหนา 6 มิลลิเมตร
- 3) ใส่ยางขึ้นทดสอบระหว่างจานหมุนโลหะ แล้ววางตรงตำแหน่งของห้องทดสอบ
- 4) ใช้ความดันลมอัดยางขึ้นทดสอบ อุ่นยางเป็นเวลา 1 นาที
- 5) อ่านค่าความหนืดของยางที่เวลาเดินเครื่อง 4 นาที

2.4.8.3 การคำนวณ

คำนวณจากสมการที่ (6)

$$\text{ความหนืด} = 50M L (1'+4') 100^\circ\text{C} \quad (6)$$

เมื่อ 50 M = ค่าความหนืด (Mooney viscosity) ของยางที่อ่านได้

เมื่อ L = จานหมุนโลหะตัวใหญ่

เมื่อ 1' = เวลาเป็นนาที ที่ใช้อุ่นยาง

เมื่อ 4' = เวลาเป็นนาที ที่ใช้ทดสอบและอ่านค่าความหนืด

เมื่อ 100 °C = อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

หมายเหตุ

การวัดค่าความหนืดของยาง จำเป็นต้องมีการตรวจทานมาตรวัด (Calibration) ให้ถูกต้องก่อนเสมอ

3. การอบแห้ง

3.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อขับไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (เรียวโซ โทเอ, 2529) วัตถุประสงค์ของการขับไล่ความชื้นหรือการกำจัดน้ำคือ การยืดอายุการเก็บรักษาวัตถุดิบให้มีระยะเวลายาวนานขึ้นและเพื่อความสะดวกในการจัดเก็บผลิตภัณฑ์

3.1.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้น (Moisture Content) หรือปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุนั้น มักกำหนดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักของวัสดุทั้งหมด เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis Moisture Content) หรืออัตราส่วนร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักแห้งของวัสดุ เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis Moisture Content) (ปฏิภาณ และ อารักษ์, 2544) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

3.1.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{(w - d)}{w} \times 100 \% \quad (7)$$

เมื่อ	M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก, เปอร์เซ็นต์
	w	คือ	มวลของวัสดุ, kg
	d	คือ	มวลของวัสดุแห้ง(ไม่มีน้ำ), kg

การคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานเปียกนี้ เป็นที่นิยมใช้ในการค้า เพราะเข้าใจง่าย โดยทั่วไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ (% M_w)

3.1.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \times 100 \% \quad (8)$$

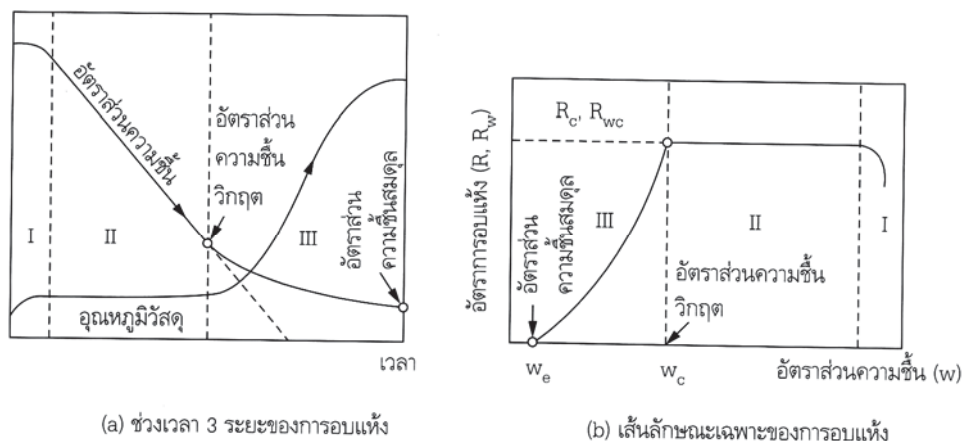
เมื่อ	M_d	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เปอร์เซ็นต์
	w	คือ	มวลของวัสดุ, kg
	d	คือ	มวลของวัสดุแห้ง(ไม่มีน้ำ), kg

การคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานแห้งนิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยในการคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

3.1.2 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

ถ้าเอาวัสดุรูปทรงที่เปียกชื้นถึงผิวออกมาแขวนในลมร้อนที่มีความชื้น H และอุณหภูมิ t แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุเมื่อเทียบกับเวลาจะเป็นดังภาพที่ 2.21 (a)

ส่วนภาพที่ 2.21 (b) คือรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยในวัสดุ โดยอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยได้จากการหาอนุพันธ์กับเวลาของเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในภาพที่ 2.21 (a) สำหรับเส้นโค้งในภาพที่ 2.21 (b) นี้เป็นตัวแทนโดยตรงของลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (เงื่อนไขภายนอกอย่างเช่น อุณหภูมิลมร้อน ความชื้นลมร้อน ความเร็วลม มีค่าคงที่) เพราะฉะนั้นเงื่อนไขเหล่านี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการออกแบบอุปกรณ์อบแห้ง



ภาพที่ 2.21 ลักษณะเฉพาะของการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (Hajime et.al, 2548)

ขณะนี้ถ้าวัสดุมีอุณหภูมิภายในเท่ากันหมด และถ้าคิดว่าความร้อนที่ถ่ายเทจากลมร้อนไปยังวัสดุ ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำภายในวัสดุ และในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุแล้ว สมการดุลความร้อนจะเป็น

$$\left(\frac{W}{A}\right)(C_s + wC_w) \frac{dt_m}{dt} = h(t - t_m) - \frac{W}{A} \left(-\frac{dw}{dt}\right)r_m \quad (9)$$

- เมื่อ
- W คือ มวลวัสดุปราศจากน้ำ, kg
 - A คือ พื้นที่ผิวการอบแห้ง, m²
 - C_s คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุปราศจากน้ำ, kJ.kg⁻¹.K⁻¹
 - C_w คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ.kg⁻¹.K⁻¹
 - h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุ, kJ.h⁻¹.m⁻².K⁻¹
 - t_m คือ อุณหภูมิของวัสดุ, K
 - r_m คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ t_m, kJ.kg⁻¹

พจน์ทางด้านซ้ายของสมการเป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของวัสดุ และพจน์ที่ 1 ของฝั่งขวาเป็นอัตราที่ความร้อนถ่ายเทไปยังวัสดุ พจน์ที่ 2 คือ อัตราที่ความร้อนถูกใช้ระเหยความชื้นออกจากวัสดุ ในขณะที่มีน้ำอิสระอยู่บนผิววัสดุ และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{W}{A} \left(-\frac{dw}{d\theta} \right) = k(H_m - H) \quad (10)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, $\text{kg}\cdot\text{น้ำ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\Delta H^{-1}$

H_m คือ ความชื้นอิ่มตัวของอากาศ ณ อุณหภูมิ t_m

ถ้าเอาสมการที่ (4) แทนในสมการที่ (3) จะได้

$$\left(\frac{W}{A} \right) (C_s + wC_w) \frac{dt_m}{d\theta} = h(t - t_m) - k(H_m - H)r_m \quad (11)$$

ในช่วงแรกเริ่มของการอบแห้ง t_m มีค่าน้อยจึงทำให้ H_m มีค่าน้อยด้วย และ $\frac{dt_m}{d\theta}$ มากกว่า 0 ดังนั้น t_m จะมีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับเวลา ซึ่งนี่ก็คือ “ช่วงเวลาการอุ่นวัสดุ” ดังแสดงในภาพที่ 2.21 (a) เนื่องจาก $t - t_m$ จะลดลงไปตามการเพิ่มของ t_m ดังนั้นในท้ายที่สุด พจน์ด้านขวาของสมการ (11) จะมีค่าเท่ากับ 0 และหลังจากนี้ t_m ก็จะกลายเป็นค่าคงที่คือ t_w เพราะฉะนั้นช่วงเวลาการอุ่นวัสดุนั้นหมายถึงช่วงเวลา que เริ่มจากอุณหภูมิเริ่มแรก จนถึงอุณหภูมิสมดุล ซึ่งถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการอบแห้ง (กรณี que เป็นการพาความร้อนอย่างเดียว = t_w กรณีที่มีการนำและการแผ่รังสี $\neq t_w$)

ในช่วง II ของภาพที่ 2.21 (a) นั้น พจน์ที่อยู่ฝั่งขวาของสมการที่ (11) จะมีค่าเป็น 0 ดังนั้น อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ และปริมาณความร้อนที่ได้รับทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ นั่นคืออัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่หนึ่งดังแสดงในภาพที่ 2.21 (b) เราจึงเรียกช่วงเวลา II นี้ว่า “ช่วงเวลาการอบแห้งที่มีอัตราคงที่” ช่วงเวลานี้จะดำเนินต่อไปตราบใดที่มื่อน้ำอิสระเหลืออยู่ที่ผิววัสดุ และยังเกิดการระเหยอยู่

ถ้าอัตราส่วนความชื้นบริเวณผิวของวัสดุลดลงและน้ำอิสระจากภายในวัสดุไม่สามารถเคลื่อนมาชดเชยได้ทันกับอัตราการระเหย น้ำอิสระที่ผิววัสดุจะหมดไป และพื้นผิวที่เกิดการระเหยของน้ำจะร่นเข้าจากผิวนอกของวัสดุเข้าสู่ภายในตัววัสดุ ทำให้เข้าไปสู่ช่วง III คือ “ช่วงเวลาการอบแห้งที่อัตราลดลง” ในช่วงเวลานี้ อัตราที่ความร้อนไหลเข้ากับอัตราการระเหยจะไม่สมดุลกัน ส่งผลให้ฝั่งขวาของสมการ (11) มีค่ามากกว่า 0 อีกครั้ง ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุจะค่อยๆ เริ่มเพิ่มขึ้นจากบริเวณผิวนอกของวัสดุตามลำดับ และอัตราที่วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนจะค่อยๆ ลดลง อัตราการอบแห้งจึงลดลงพร้อมกับเวลาที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.21 (b) ซึ่งความร้อนที่ได้รับนั้นส่วนหนึ่งจะใช้ไปในการระเหยน้ำ และที่เหลือจะถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

ค่าของอัตราส่วนความชื้นตรงเส้นแบ่งเขตระหว่างช่วง I กับ II คือ อัตราส่วนความชื้นวิกฤต w_c และอัตราส่วนความชื้นหลังจากเวลาผ่านไปเป็นอนันต์ ก็คือ อัตราส่วนความชื้นสมดุล w_e การคาดคะเนค่าของอัตราส่วนความชื้นวิกฤตทำได้ยาก แต่ในแง่ของแนวโน้มทั่วไปแล้ว ในวิธีการอบแห้งแบบเดียวกันถ้ายิ่งเงื่อนไขของการอบแห้งรุนแรงขึ้น w_c ก็จะมีค่ามากขึ้นประมาณ 2 - 3 เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ถ้าวิธีการอบแห้งเปลี่ยนไป w_c ก็อาจเปลี่ยนค่าไปอย่างเด่นชัด ยกตัวอย่างเช่นวัสดุเม็ดและผงในสภาพถูกก่อกองอยู่เสมอ ซึ่งมื่ออัตราส่วนความชื้นวิกฤต 15-20 เปอร์เซ็นต์ นั้น ค่าของ w_c จะลดลงรวดเร็วเหลือประมาณ 1.0 - 0.5 เปอร์เซ็นต์

ถ้าหากถูกรอบแห้งในสภาพที่มืดและผงกระจัดกระจายอยู่ในลมร้อน หรือกำลังถูกกวนผสม ด้วยเหตุนี้เพื่อทำให้ช่วงเวลาการอบแห้งสั้นลงจึงควรเลือกวิธีอบแห้งที่ทำให้อัตราส่วนความชื้นวิกฤตเหลือค่าน้อยๆ (Hajime, 2548)

3.1.3 อัตราการอบแห้งคงที่

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะที่ผิวหน้าวัสดุจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง เป็นผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุและของอากาศที่ไหลอย่างมีอิสระมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลเพิ่มขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานฟิล์มอากาศมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความต้านทานในตัวผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากขึ้น (ดวงทิพย์ เจนถาวร, 2548)

3.1.4 อัตราการอบแห้งลดลง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าปริมาณความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น และการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นและอุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ และมีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งมีลักษณะพูนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (Luikov, 1966 อ้างถึงใน สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

3.1.4.1 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจาก Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงผิว (Surface force)

3.1.4.2 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid diffusion)

3.1.4.3 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวเนื่องจากการแพร่ความชื้นบนผิวของรูพูนเล็กๆ (Surface diffusion)

3.1.4.4 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion)

3.1.4.5 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอ ในลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิไอน้ำ (Thermal different)

3.1.4.6 การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไหลและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic flow)

แต่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น

3.2 เตาอบยางและการอบแห้งยางด้วยลมร้อน

3.2.1 เตาอบยาง

การอบแห้งยางแท่งที่มีกระยะเป็นภาชนะรองรับเม็ดยางที่ทำการบดย่อยเรียบร้อยแล้ว ชั้นของเม็ดยางมีความหนาพอสมควร อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจึงต้องมีอุณหภูมิสูงและมีการกระจายอย่างทั่วถึง จึงสามารถทำให้ยางที่อบนั้นสุกได้ ดังนั้นการออกแบบสำหรับเตาอบยางที่เป็นเม็ดเล็กๆ (crumb rubber) จะออกแบบให้มีอุณหภูมิสูงกว่าการอบยางแบบธรรมดา นั่นคือ

อบแห้งด้วยอุณหภูมิประมาณ

(องศาเซลเซียส)

ยางที่ตัดบดเป็นเม็ดเล็กๆ (เตาอบ)	100 – 120
ยางแผ่นรมควัน (โรงรม)	50 – 60
ยางแผ่นผึ่งแห้ง (โรงอบแห้ง)	50 – 60
ยางเครพ (โรงผึ่งเครพ)	45

โดยปกติเม็ดยางเปียกที่ผ่านกรรมวิธีผลิตยางแท่งมาแล้วจะถูกบรรจุอย่างหลวมๆ ลงในกระเบ นำเข้าเตาอบเพื่อเป่าลมร้อนไปที่กระเบยางดังภาพที่ 2.22 ลมร้อนจะถูกทำให้หมุนเวียนในเตาอบอย่างทั่วถึง โดยอาศัยระบบของพัดลม ส่วนความชื้นจากยางจะแยกออกโดยระบบการระบายตามแรงโน้มถ่วง (gravitational drainage) ระบบซินเนอริซิส (syneresis) การระเหย ตลอดจนการกระจายออก

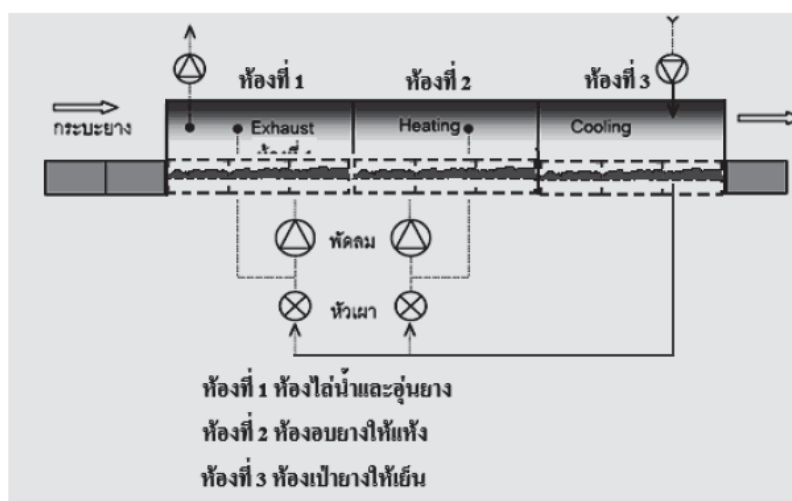
เตาที่ใช้เพื่อการอบให้ยางแท่งแห้งนั้นมีด้วยกันหลายแบบ แต่อย่างไรก็ตามเตาแบบต่างๆ เหล่านี้มีหลักการเหมือนกัน นั่นคือ การใช้กระเบอบยางรูปทรงลึก ใช้ความร้อนหมุนเวียนประมาณ 100 - 120 องศาเซลเซียส ความแตกต่างของเตาอยู่ที่การออกแบบสร้างที่เหมาะสมกับสายการผลิต การป้อนยางเข้าเตา ชนิด และจำนวนของอุปกรณ์ที่จะให้ความร้อนพัดลมหมุนเวียนในเตา และอื่นๆ จุดประสงค์สำคัญของการใช้เตาอบยางคือ การอบให้ยางแห้งภายในเวลาอันสั้น และจะต้องมีราคาประหยัดโดยปราศจากการทำให้เกิดผลกระทบ ต่อสมบัติของยางแท่ง (Verhaar, 1973)



ภาพที่ 2.22 เตาอบแห้งยางแท่ง (Verhaar, 1973)

3.2.2 การอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อน

โดยทั่วไปเป็นเครื่องอบแห้งยางแท่งจะเป็นการอบแห้งต่อเนื่องแบบอุโมงค์ ประกอบด้วย ตัวเครื่องอบด้านนอกกรุด้วยเหล็กแผ่นชุบสังกะสี ด้านในกรุด้วยสแตนเลส ระหว่างกลางกรุด้วยไมโครไฟเบอร์หรือวัสดุกันความร้อนโดยรอบตัวเครื่อง ถาดวางวัตถุดิบเป็นสแตนเลสเชื่อมติดกับตะแกรง ด้านล่างของตะแกรงจะเป็นห้องลมร้อน มีพัดลมสำหรับกระจายความร้อนถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าภายในเครื่องอบแห้ง วัสดุยางที่ถูกย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ จะถูกอบให้แห้งโดยการเป่าลมร้อน เพื่อการอบและไล่ความชื้น ซึ่งสามารถแยกประเภทของเครื่องอบแห้งได้เป็นสองประเภทหลักๆ ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม ได้แก่ เครื่องอบแห้งโดยใช้น้ำมันดีเซล (Diesel burner) และเครื่องอบแห้งชนิดใช้เทคโนโลยีน้ำมันร้อน (Hot oil burner) (ในโรงงานขนาดใหญ่จะนิยมการใช้ เครื่องอบแห้งชนิดใช้น้ำมันดีเซล) เครื่องอบแห้งส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 3 ห้องดังภาพที่ 2.23 และมีการทำงานที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.23 ลักษณะการระบายความร้อนภายในเตาอบแห้งยางแท่ง

ส่วนที่ 1 ส่วนที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิของตัวเนื้อยาง เพื่อให้ความชื้นในตัวเนื้อยางแพร่ออกมาที่ผิวของเนื้อยาง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะลดโอกาสการไหม้ของผิวเนื้อยาง

ส่วนที่ 2 ส่วนการอบยาง อุณหภูมิภายในเตาอบจะสูงที่สุดในส่วนนี้ เพื่อให้ยางได้รับความร้อนและแห้งอย่างทั่วถึงทั้งผิวหน้าและภายในเม็ดหรือชิ้นยาง

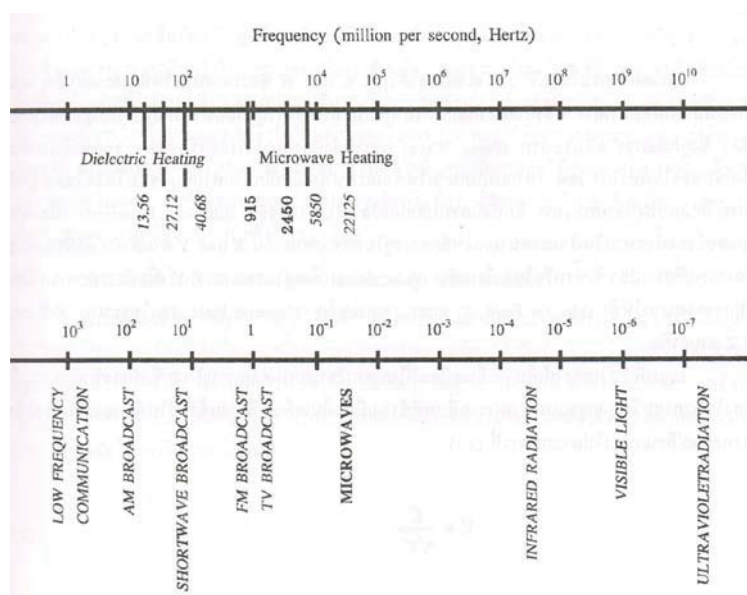
ส่วนที่ 3 ส่วนปรับลดอุณหภูมิ ส่วนนี้มีเพื่อให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนให้ทั่วถึงเนื้อยางทุกส่วนจะได้รับความร้อนที่เพียงพอแต่ไม่มีการไหม้เยิ้มที่ผิวหน้า การทำยางให้สุกในขั้นตอนนี้

ส่วนที่ 4 ส่วนดูดกลืนและไล่ความชื้นในกระบวนการสุดท้ายก่อนมีการบรรจุหีบห่อ

4. คลื่นไมโครเวฟ

4.1 หลักการพื้นฐานของไมโครเวฟ (Microwave Fundamentals)

คลื่นไมโครเวฟเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.24 ซึ่งมีความถี่อยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz โดยคลื่นไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในกิจการหลายอย่าง เช่น ส่งสัญญาณโทรทัศน์ สัญญาณเรดาร์ และเตาไมโครเวฟ เป็นต้น สำหรับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave heating) เป็นการทำความร้อนในวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ต่าง ๆ โดยความถี่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือคลื่นความถี่ 2.45 GHz และ 915 MHz โดยมักใช้ในการประกอบอาหารเป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 2.24 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นจะมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของแสงผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ (รัชดา โสภากะยัง, 2548) สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1.1 วัสดุโปร่งแสง (Transparent material) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีการส่งถ่ายในลักษณะเดียวกับแสง ดังนั้น เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบวัสดุที่โปร่งแสง คลื่นไมโครเวฟจึงสามารถทะลุผ่านไปได้ เช่น กระเจก แก้ว เป็นต้น

4.1.2 วัสดุทึบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Opaque material) เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบวัสดุทึบซึ่งมีความเป็นตัวนำสูง เช่น โลหะ เหล็ก เป็นต้น คลื่นจะถูกสะท้อนกลับโดยที่สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัสดุจะส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระในวัสดุเกิดการเคลื่อนที่

4.1.3 วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (Absorber material) ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน เช่น ยาง วัสดุโพลิเมอร์ เป็นต้น เมื่อคลื่นไมโครเวฟส่งผ่านวัสดุประเภทนี้จะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นบางส่วนและเกิดการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความถี่คลื่นสามารถส่งเข้าไปภายในเนื้อวัสดุเพื่อทำให้เกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของวัสดุ

4.1.4 กรณีผสมอนุภาคของสารบางอย่างในวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (Absorber Mixed) อนุภาคนี้นี้มีคุณสมบัติคือเมื่อมีสนามไฟฟ้าตกกระทบบนอนุภาคจะเกิดความร้อนขึ้น และมีคุณสมบัติเป็นเหมือนแหล่งความร้อนตัวหนึ่ง (Source) ดังนั้นจึงมีการใช้อนุภาคเหล่านี้ผสมในวัสดุพวกฉนวนในกรณีที่ต้องการให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุสูง อนุภาคของสารที่ผสมในปัจจุบัน เช่น คาร์บอน แกรไฟต์ เป็นต้น

4.2 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก

วัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่ถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้า จะสามารถอธิบายสมบัติทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric properties) ของวัสดุโดยพิจารณาจากปฏิกิริยาของวัสดุที่มีต่อการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งวัสดุฉนวนโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมซึ่งมีกลุ่มอิเล็กตรอนอยู่โดยรอบและเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว และเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าก็จะมีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของประจุ เพื่อให้สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ดังนั้นพลังงานจากสนามไฟฟ้าบางส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนจะสูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทานของอะตอมต่าง ๆ ซึ่งการจัดเรียงกลับไปมาของกลุ่มอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้านี้จะเป็นการเพิ่มการสูญเสียให้มากขึ้นจึงเรียกว่าเป็นการสูญเสียของสนามไฟฟ้า และนำไปสู่การเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นวัสดุฉนวนที่ถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือส่วนที่แสดงถึงความสามารถในการทำให้พลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนซึ่งแสดงถึงค่าความสามารถในการดูดซับ (Permittivity) ของวัสดุ (Metaxas and Meredith, 1988) ดังแสดงในสมการ (12)

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' j \quad (12)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุในรูปจำนวนเชิงซ้อน (Complex permittivity)

ϵ' คือ ค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้า (Dielectric constant)

ϵ'' คือ ค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน หรือเรียกว่าค่าการสูญเสียทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric loss) ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอและมีขนาดเล็กกว่า ϵ'

j คือ ส่วนประกอบที่สมมุติขึ้น

สำหรับในการใช้งานทั่วไปจะแสดงเทอมเหล่านี้อยู่ในรูปเทอมไร้มิติซึ่งสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการดูดซับในสุญญากาศ (Absolute permittivity)

$$\epsilon'_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad (13)$$

และ

$$\epsilon''_r = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad (14)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าความสามารถในการดูดซับในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสัมพัทธ์ของวัสดุ (Relative permittivity)

วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้คือนั้น เรียกว่า วัสดุที่มีความสามารถในการสูญเสีย (Lossy materials) ซึ่งพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับวัสดุและเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนสามารถแสดงได้ในรูปของค่าการสูญเสียทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric loss) ของวัสดุ ดังสมการ (14)

$$P_{ave} = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 V \quad (14)$$

เมื่อ P_{ave} คือ กำลังเฉลี่ยที่ถูกแผ่อยู่ในวัสดุ (W)
 V คือ ปริมาตรของวัสดุ (m^3)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม
 E คือ พลังสนามไฟฟ้า (V/m)

จากสมการที่ (14) แทนค่าความถี่เชิงมุมด้วย $2\pi f$ และหารด้วยปริมาตรจะสามารถแสดงสมการของ อัตราความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยได้คือ

$$q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (15)$$

เมื่อ q คือ อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ (W/m^3)
 f คือ ความถี่ (Hz)

ดังนั้นเมื่อคลื่นไมโครเวฟตกกระทบวัสดุฉนวนแล้วจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ โดย อัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดกำลังของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ และค่าการสูญเสียทางฉนวนไฟฟ้า (Dielectric loss) รวมถึงความถี่ของคลื่นที่ใช้ด้วยนั่นเอง (รัชดา โสภาคะยัง, 2548)

4.3 การเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกดูดซับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) โดยพลังงานที่ให้เข้าไปจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในวัสดุเพิ่มขึ้น การให้พลังงานไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กทริกจะมีกลไกการเกิดความร้อน 2 แบบร่วมกันคือ (ดวงทิพย์ เจนถาวร, 2548)

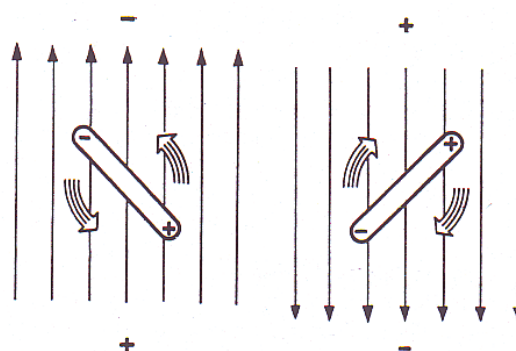
4.3.1 Ionic polarization

เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าจะถูกกระตุ้นและเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ ไอออนแต่ละตัวก็เกิดการเสียดสีกันและเกิดพลังงานจลน์ขึ้นแล้วจึงเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ก็จะเพิ่มขึ้น การทำให้น้ำระเหยก็มากขึ้น เช่นที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ โมเลกุลจะกลับตัวในช่วงคลื่นไมโครเวฟบวกเข้ามา 2450 ล้านครั้งต่อวินาที ซึ่งก็คือ การสั่นสะเทือนอย่างรวดเร็วของโมเลกุลของน้ำ 2450 ล้านครั้งต่อ

วินาที ส่งผลให้อุณหภูมิภายในวัสดุเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำมีความดันสูงขึ้นกว่าภายนอกเป็นเหตุให้เกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็ว

4.3.2 Dipole rotation

เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบมีขั้ว (polar) ก็คือ น้ำที่อยู่ภายในวัสดุนั้นเอง ภายใต้สภาวะปกติ โมเลกุลของสารประกอบมีขั้วจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Randomly oriented) แต่เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็ก สารประกอบที่มีขั้วจะมีการเคลื่อน โดยประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนเปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างมีระเบียบ ตามทิศของสนามไฟฟ้านั้นๆ ดังภาพที่ 2.20 ความร้อนเกิดขึ้นจากผลการหมุนกลับไปกลับมาของโมเลกุลอย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 2.25 การหมุนตัวของสารประกอบเนื่องจากไมโครเวฟ (Decareau and Peterson, 1986)

ความร้อนที่เกิดจากไมโครเวฟขึ้นอยู่กับสถานะทางกายภาพของวัสดุ คือความสามารถในการดูดกลืนไมโครเวฟ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในสนามไมโครเวฟที่ถูกจำกัด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในวัสดุ และการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและการกลับสู่สภาวะการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบของสารประกอบอย่างรวดเร็ว (Decareau and Peterson, 1986)

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Factors Having Effects on Microwave Heating) (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.4.1 ค่าความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้นอิสระในสสารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 78 เหตุนี้เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุย่อมทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งโดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชนิดมาผสมกันเกิดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนและยากต่อการอธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตามได้มีกฎหลัก (Rules of Thumb) สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1.1 ความชื้นสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น

4.4.1.2 โดยปกติค่าไดอิเล็กตริกสูญเสีย (Dielectric loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็เป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นไปมากกว่านี้ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ)

4.4.1.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุผสมจะอยู่ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ

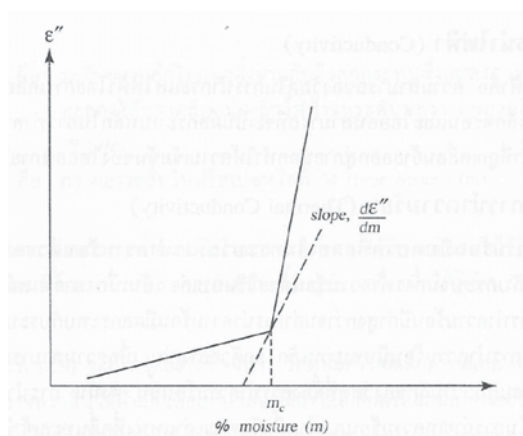
สำหรับวัสดุหลาย ๆ ประเภทซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน ดังเช่นในตารางที่ 2.4

ด้วยเหตุที่การอบแห้งเกี่ยวข้องกับการไล่น้ำหรือสารละลายออกจากวัสดุ สิ่งที่เราทราบกันดีว่าถ้าความชื้นถูกขับออกมาก็จะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์มีค่าลดลง โดยในหลาย ๆ กรณีที่น้ำถูกไล่ออกทำให้การทำความร้อนของตัววัสดุเองมีขีดจำกัดและกลายเป็นวัสดุที่สามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านของตัววัสดุไปได้ที่ระดับความชื้นต่ำ โดยภาพที่ 2.25 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์กับค่าความชื้น ซึ่งน้ำที่อยู่ในวัสดุในหลายสถานะ ยกตัวอย่างเช่น น้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างวัสดุ (Bound Water) และน้ำอิสระ (Free Water) ซึ่งอยู่ในรูพรุน (Pore) จากรูปที่ 2.25 นี้เราจะสนใจตรงค่าความชัน ($d\varepsilon''/dm$) ของเส้นโค้ง โดยที่ค่าความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content; m_c) จะพิจารณาว่าน้ำดังกล่าวเป็นน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้าง (มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์) และจุดที่ค่าความชื้นสูงกว่าค่าความชื้นวิกฤตก็จะพิจารณาน้ำให้เป็นน้ำอิสระ (ข้อสังเกตคือ ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์ของน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างจะมีค่าต่ำเพราะน้ำประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่โดยอิสระเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ยกตัวอย่างในกรณีของน้ำแข็งสามารถวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริกสูญเสียแฟกเตอร์ประมาณ 0.003 ในขณะที่น้ำธรรมดา มีค่าประมาณ 12)

ตารางที่ 2.4 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน

วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ดี	วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ต่ำ
น้ำ (Water)	ไฮโดรคาร์บอน
กรดแอนไฮไดรด์ (Acid Anhydrides)	ฮาโลเจน ไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbons)
แอลกอฮอล์ (Alcohols)	อัลคาไลเฮไลด์ เช่น เกลือ (Alkali Halides, e.g., Salt)
แอลดีไฮด์ (Aldehydes)	ออกไซด์อนินทรีย์ เช่น อะลูมิเนียม (Inorganic Oxides, e.g., Sulfur)
คีโตน (Ketones)	ธาตุบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ (Some Elements, e.g., Sulfur)
เอไมด์ (Amides)	โบรอนไนไตรด์ (Boron Nitride)
เอมีน (Amines)	ไมกา (Mica)
ไซยาไนด์ (Cyanides)	
โปรตีน (Proteins)	
เฟอร์ไรต์ (Ferrites)	
เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectrics)	
สารละลายไอออนิก (Ionic Solutions)	

ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551



ภาพที่ 2.26 ค่าความแปรเปลี่ยนของค่าไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอ (Dielectric Loss Factor, ϵ'') กับค่าความชื้น (m) (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.4.2 ความหนาแน่น (Density)

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลงซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย

4.4.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในลักษณะที่ซับซ้อน โดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิแต่อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งก็จะแสดงว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอร์จะมีค่าต่ำ และในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งจะไม่สามารถชี้ชัดได้ถึงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิมีความสำคัญต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกและกระบวนการ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอันตรกิริยาของคลื่นและวัสดุไดอิเล็กตริกอย่างทอแมห์ ยกตัวอย่างเช่น ไม้ที่มีค่าความชื้นระดับต่ำระดับหนึ่ง พบว่าค่าไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจึงมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไม้เกิดการไหม้ได้หากถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

4.4.4 ความถี่ (Frequency)

ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามด้วยเหตุที่กระบวนการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมถูกจำกัดด้วยความถี่ที่คงที่อยู่แล้วตามมาตรฐาน ISM ทำให้วิศวกรถูกจำกัดการใช้งานในเรื่องของความถี่นี้

4.4.5 การนำไฟฟ้า (Conductivity)

ค่าการนำไฟฟ้าคือ ความสามารถของวัสดุในการนำกระแสไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนสามารถที่จะเป็นผลกระทบหลักในการทำความร้อนและการอบแห้งเนื่องจากผลของน้ำที่ถูกเคลื่อนย้ายออกสู่ภายนอกทำให้ความเข้มข้นของไอออนภายในที่สูงขึ้น

4.4.6 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่าการนำความร้อนมีบทบาทที่ลดลงในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีแบบเก่า อันเนื่องมาจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลทำให้ความเร็วในการทำความร้อนมีค่าสูงกว่าจนค่าการนำความร้อนมีผลกระทบกับระบบไม่มากนักอย่างไรก็ตาม มีบางกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีบทบาทหลัก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความลึกของวัสดุที่ต้องการทำความร้อนขึ้น ดังนั้น การนำความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่คลื่นทะลุเข้าไปไม่ถึง

4.4.7 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

โดยปกตินักวิจัยและวิศวกรหรือผู้ออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะตัดตัวแปรนี้ทิ้งไป และมุ่งพิจารณาที่ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามโดยความเป็นจริง ค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการพิจารณาทั้งค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะจึงนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง

4.4.8 ค่าความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration depth)

ปกติตัวแปรนี้มีการเรียกกันในหลายชื่อ เช่น ความลึกในการทะลุทะลวง (penetration depth) หรือ ความลึกเชิงกำลัง (power penetration depth) เป็นต้น แต่ไม่ว่าจะเรียกชื่อใดก็ตามก็มีความหมายทางกายภาพเดียวกัน แม้ว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวงจะไม่ได้เป็นคุณสมบัติของวัสดุแต่ก็ส่งผลต่อคุณสมบัติหลาย ๆ อย่างของวัสดุและค่านี้ยังมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งหากคลื่นไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุไปได้ การทำความร้อนจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่ที่ผิวของวัสดุเท่านั้น สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความลึกของการทะลุทะลวงของสนามคือ ความยาวคลื่น (wavelength, λ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ϵ') และค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ (Dielectric loss factor) ดังแสดงสัมพันธ์ตามสมการที่ 16

$$D_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (16)$$

เมื่อ

D_p คือ ระดับความลึกในแนวดิ่งจากกับผิวตกกระทบซึ่งแสดงความสามารถในการทะลุทะลวงได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจนระดับพลังงานของคลื่นลดลงเหลือร้อยละ 37 (1/e)

λ_0 คือ ความยาวคลื่นในฟรีสเปซหรือที่ว่าง (Free Space) (m)

จากสมการที่ (16) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์สูงจะมีค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นได้ต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ต่ำกว่า และยังพบว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือความถี่มีผลต่อความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความยาวคลื่นกับค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นที่ระดับความถี่ต่าง ๆ

ความถี่ของคลื่น (MHz)	ความยาวคลื่น (ในหน่วย)		ความลึกในการทะลุทะลวง (ในหน่วย)	
	เมตร (meter)	ฟุต (feet)	เมตร (meter)	ฟุต (feet)
5.0	60.00	196.83	23.90	78.41
13.56	22.10	72.51	8.80	28.87
27.12	11.10	36.42	4.40	14.44
40.0	7.50	24.61	3.00	9.84
915	0.328	1.076	0.130	0.426
2450	0.122	0.400	0.049	0.161

ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551

4.5 ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (advantages of microwave and dielectric systems)

4.5.1 ข้อได้เปรียบของระบบการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (Advantages of microwave and dielectric heating)

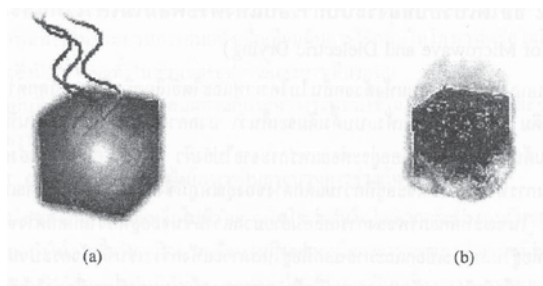
ทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากระบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ โดยระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายในซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่า ในขณะที่การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะมีผลในเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (bulk heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุ โดยในทางทฤษฎีการทำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและรวดเร็วแม้ว่าในทางปฏิบัติอาจจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเหมือนทางทฤษฎีก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของการทำความร้อนเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรือนาทีในบางกระบวนการผลิต ในขณะที่วิธีการดั้งเดิมใช้เวลาเป็นนาฬิกา ชั่วโมงหรืออุตสาหกรรมที่มีความเร็วสูงที่สุดซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่คือ การให้ความร้อนพลาสติกบางชนิดที่สามารถทำได้ในอัตรา $30,000^{\circ}\text{C/s}$ ในทางตรงกันข้าม หากต้องการทำความร้อนที่ระดับต่ำมาก สามารถทำได้ที่อัตรา 1°C ต่อ 100

สำหรับตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อนได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ สมบัติไดอิเล็กตริก ลักษณะรูปร่าง ประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิงของคลื่นภายในภาชนะ (coupling efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุและกำลังไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกที่ป้อนเข้าไปรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากันพบว่า ความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อกำลังที่ป้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า

กล่าวโดยสรุป ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกคือ

4.5.1.1 ใช้เวลาน้อย (high speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (stationary part)

4.5.1.2 การทะลุทะลวงของพลังงาน (energy penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำหนดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนวัสดุดังรูปที่ 2.26 ในขณะที่การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนที่ผิววัสดุซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังใช้เวลามากเพราะมีข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า



(a) พลังงานไมโครเวฟ (b) พลังงานแบบดั้งเดิม (ให้ความร้อนที่ผิว)

ภาพที่ 2.27 การกระจายเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่างๆ (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.5.1.3 ความสามารถในการเลือกที่จะจับพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุ (Selective Energy Absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อได้โดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น

4.5.1.4 การควบคุมระบบสามารถกระทำได้ดีและรวดเร็วกว่า โดยธรรมชาติของการปิดเปิดสามารถเปลี่ยนแปลงระดับการทำความร้อนอย่างทันทีทันใด เพียงแค่ทำการควบคุมพลังงานในช่วงขาออกของแหล่งกำเนิดทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนในการควบคุมการทำความร้อน อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่าเช่น เตาอบลมร้อนหรือไฟฟ้า ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาไม่นาน (ภายในเสี้ยววินาที)

4.5.1.5 ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากที่ระดับความร้อนที่สูงจะไม่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ เหมือนที่เกิดขึ้นกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม

4.5.1.6 สามารถทำให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและเคมีเท่าที่ต้องการได้ โดยปกติปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพไป (protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลาติไนเซชัน (starch gelatinization) หรือปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่คล้ายกัน

4.5.1.7 มีประสิทธิภาพสูง (high efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์) โดยในการทำความร้อนด้วยวิธีนี้ พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้วัสดุเกิดความร้อนขึ้น โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศ พนังของเตาสาขพานล้าเลียงหรือส่วนอื่น ๆ ของระบบ อันจะนำสู่การประหยัดพลังงาน

4.5.1.8 ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (clean processing) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วย

4.5.2 ข้อได้เปรียบของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก (advantages of microwave and dielectric drying)

สำหรับกลไกของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม โดยวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมจะเห็นว่า มวลความชื้นสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและน้ำที่คงเหลืออยู่จะค่อยแพร่กระจายไปยังผิว ถึงแม้ว่าศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการทำความร้อนจะอยู่ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งเป็นผลให้มีการถ่ายเทพลังงานไปยังภายในเนื้อวัสดุ ในขณะที่ศักยภาพของการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นจะอยู่ที่ความแตกต่างของความเข้มข้นของมวลภายในที่อยู่ในสภาวะเปียกและภายนอกที่อยู่ในสภาวะแห้งกว่า เช่นนี้แล้วกระบวนการไล่ความชื้นก็จะช้าอันเนื่องมาจากข้อจำกัดของอัตราการแพร่จึงต้องการอุณหภูมิภายนอกที่สูงเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ

ด้วยกลไกการเกิดความร้อนจากภายในของระบบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกพบว่าการถ่ายเทมวลความชื้นในช่วงต้นจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะการเกิดไอน้ำอย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นซึ่งถูกทำให้เป็นไอก่อนที่จะออกจากวัสดุ ซึ่งหากวัสดุมีความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อเนื่องให้ของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้ กรณีที่วัสดุมีความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้นซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปกติ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชนิดของปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงดันไอก่อทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการให้ความร้อนเข้าไปอีก ซึ่งกรณีนี้อาจเป็นเหตุให้เกิดการแข็งตัวของผิวหรือผิวมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป

ประเด็นความสนใจที่มีอยู่มากทุกวันนี้คือ ศักยภาพของระบบทำให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจพิจารณาความเร็วของการอบแห้ง การขับปลิงของพลังงานภายในตัวดีเป็นต้น โดยระบบอาจมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้เมื่อมีการผสมผสานร่วมกันระหว่างกระบวนการที่ใช้คลื่นไมโครเวฟกับอื่น ๆ (hybrid system)

สำหรับข้อควรระวังซึ่งควรอธิบายให้ชัดเจนคือ ระบบเหล่านี้สามารถทำความร้อนและอบแห้งอย่างรวดเร็วแต่อัตราที่รวดเร็วดังกล่าวจะต้องไม่เป็นการทำลายคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งต้องระมัดระวังไม่ทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วจนวัสดุไหม้เกรียมหรือมีความเสียหายอื่น ๆ อันเนื่องมาจากไอน้ำหรือไอไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาได้รวดเร็วเพียงพอจนทำให้เกิดแรงดันสะสมขึ้นภายในแล้วเกิดการแตกร้าวของชิ้นงานหรือการระเบิดขึ้นได้

โดยปกติการอบแห้งหรือทำความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กตริกจะผสมผสานร่วมกับระบบอากาศร้อน (hot air system) โดยเฉพาะกับระบบที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานด้วยเหตุผลทั้งในเชิงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยอากาศร้อนมีประสิทธิภาพในการไล่น้ำอิสระ (free water) บริเวณผิวหรือใกล้กับผิวออกได้ดี ในขณะที่ปรากฏการณ์ปั๊มของเหลวเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้สามารถขับน้ำอิสระที่มีอยู่ภายในออกสู่ภายนอกได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกันกับน้ำที่ถูกยึดตรึงกับโครงสร้างและด้วยผลของการเสริมกันทั้งสองกลไกนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดข้อได้เปรียบและลดต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเมื่อเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกเพียงอย่างเดียวหนึ่งซึ่งมีราคาแพงทั้งในส่วนของอุปกรณ์และการเดินระบบ

ในปัจจุบันมี 3 วิธี ที่มีการผสมผสานกันระหว่างระบบที่ใช้ไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกกับระบบดั้งเดิมดังแสดงดังภาพที่ 2.27

4.5.2.1 การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในกระบวนการช่วงต้น (Preheating)

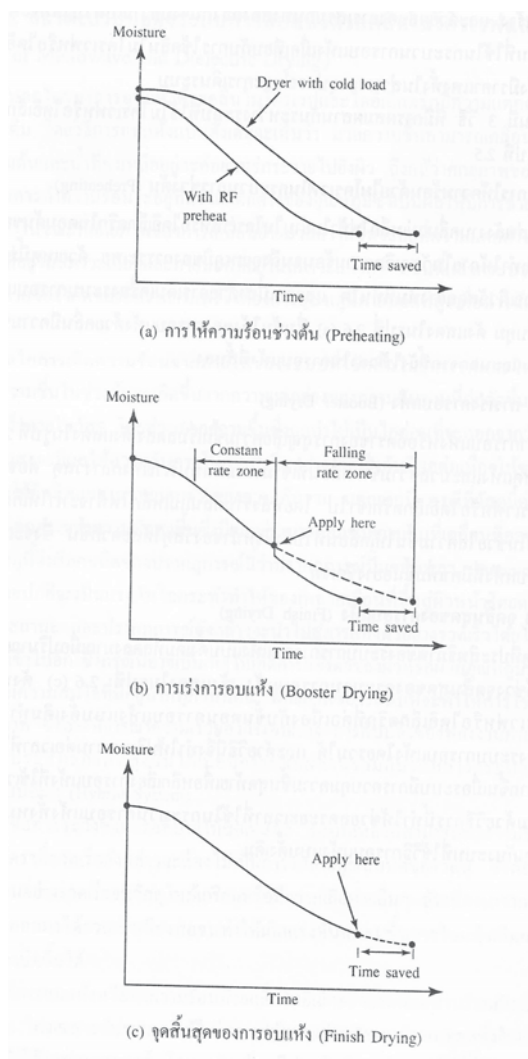
โดยการใส่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกในตอนต้นของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลทำให้ภายในวัสดุเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิของการระเหย ด้วยเหตุนี้มวลความชื้นจึงเคลื่อนที่มายังบริเวณผิววัสดุอย่างทันทีทันใด และต่อเนื่องด้วยการเดินเครื่องระบบการอบแห้งแบบดั้งเดิมภายใต้สภาวะที่ควบคุม ดังแสดงรูปในที่ 2.27 (a) ซึ่งเส้นโค้งของการอบแห้งด้วยคลื่นมีความชันมากกว่าการอบแห้งแบบดั้งเดิมและนอกจากนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง

4.5.2.2 การเร่งการอบแห้ง (Booster Drying)

เมื่ออัตราการอบแห้งหรืออัตราของการสูญเสียความชื้นเริ่มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (b) ผลที่เกิดขึ้นคือ ผิวของวัสดุแห้งและมวลความชื้นเคลื่อนที่เข้ามารวมกันที่บริเวณกึ่งกลางวัสดุ ต่อจากนั้นจึงทำการใส่พลังงานไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกเข้าไป โดยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนและแรงดันไอขึ้นภายในช่วยไล่ความชื้นให้เคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของวัสดุได้สะดวกขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากความชันในกราฟการอบแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

4.5.2.3 จุดสิ้นสุดของการอบแห้ง (Finish drying)

ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ลดลงมากเมื่อปริมาณความชื้นในวัสดุลดลงที่เวลาใกล้ช่วงจุดสิ้นสุดของกระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (c) ดังนั้นหากมีการใส่พลังงานไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกที่ต่อเนื่องกับขั้นตอนการอบแห้งแบบดั้งเดิมทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งโดยรวมได้ และด้วยวิธีนี้จึงทำให้ปริมาณงานต่อเวลาที่ได้เพิ่มขึ้นและยังมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อระบบมีการควบคุมความชื้นสุดท้ายเพื่อหลีกเลี่ยงการอบแห้งที่ใช้เวลามากจนเกินไป กล่าวในภาพรวมด้วยวิธีการนี้ทำให้ช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งทั้งหมดและลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 2.28 ตัวอย่างเส้นโค้งความสัมพันธ์ของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ และไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

4.6 หลักการทำงานและส่วนประกอบของเตาไมโครเวฟ

หลักการทำงานของเตาไมโครเวฟมีขั้นตอนดังนี้คือ เริ่มจากชุดจ่ายกำลังไฟฟ้าส่งกำลังให้แก่หลอดแมกนีตรอนเพื่อให้หลอดแมกนีตรอนผลิตคลื่นไมโครเวฟออกมาตามกำลังที่ชุดกำลังควบคุมไว้ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนี้จะถูกส่งไปตามท่อนำคลื่นเพื่อไปยังห้องอุ่น จากนั้นคลื่นไมโครเวฟจะถูกใบพัดกวานคลื่นกว (ในกรณีที่ปิดใบพัดกวคลื่น) ให้คลื่นกระจายตัวไปอย่างสม่ำเสมอและตกกระทบสู่ชิ้นงานซึ่งวางอยู่บนจานหมุนต่อไป สำหรับการควบคุมอุณหภูมิในห้องอุ่นให้อยู่ในภาวะที่พอดีนั้นจะใช้โลหะคู่ขวางวางไว้ภายในเตาอบไมโครเวฟซึ่งโลหะนี้จะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อขยายตัวไปถึงจุด ๆ หนึ่งที่เพียงพอแล้วก็มีสวิทช์อัตโนมัติตัดไม่ให้ไฟเข้าเตาอบไมโครเวฟได้เลยทันที องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไปแสดงดังภาพที่ 2.28 องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไปซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

โดยทั่วไปแล้วสามารถสรุปข้อสังเกตเกี่ยวกับหลอดแมกนีตรอนได้ดังนี้คือ

4.6.1.1 หลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 GHz จะมีประสิทธิภาพประมาณ 50 - 72 % ในขณะที่หลอดที่ความถี่ 915 MHz จะมีประสิทธิภาพประมาณ 80 - 87 %

4.6.1.2 หลอดที่มีความถี่ต่ำจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นได้ดีกว่า

4.6.1.3 การที่จะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอขึ้นนั้นมักจะใช้หลอดแมกนีตรอนหลาย ๆ หลอดร่วมกัน

4.6.1.4 หลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 GHz จะมีช่วงกำลังอยู่ระหว่าง 1 kW ถึง 30 kW และที่ความถี่ 915 MHz จะมีช่วงกำลังอยู่ระหว่าง 5 kW ถึง 100 kW โดยจะไม่มีขนาดกำลังต่ำกว่า 5 kW

4.6.1.5 การใช้หลอดแมกนีตรอนที่ความถี่ต่างกันจะทำให้กลไกการส่งถ่ายพลังงานซึ่งทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุนั้นแตกต่างกัน อาจส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาทางความร้อนหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

4.6.1.6 การออกแบบให้ลักษณะและขนาดของห้องอุ่นมีความซับซ้อนมากขึ้นจะส่งผลดีกว่าการใช้หลอดแมกนีตรอนหลาย ๆ หลอด

4.6.1.7 ขนาดของห้องอุ่นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้เกิดการสูญเสียทางความร้อน และจะทำให้ประสิทธิภาพของไมโครเวฟลดลง แต่ก็ยังจำเป็นต้องใช้ห้องอุ่นขนาดใหญ่ เมื่อมีการใช้หลอดแมกนีตรอนหลาย ๆ หลอดร่วมกัน

4.6.1.8 การติดตั้งหลอดแมกนีตรอนหลายหลอดจะลดอายุการใช้งานของหลอดแมกนีตรอนให้สั้นลงเนื่องจากอาจเกิดการคัปปลิง (Coupling) ของหลอดที่อยู่ตรงข้ามกัน

4.6.2 ชุดจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power supply)

โดยรวมหมายถึงชุดหม้อแปลงในการปรับเปลี่ยนแรงดันทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้ขนาดกำลังทางไฟฟ้าตามที่ต้องการ โดยชุดกำลังไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดขนาดของกำลังที่ให้แก่หลอดแมกนีตรอนเพื่อให้หลอดแมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟให้ได้กำลังตามที่ต้องการ สำหรับชุดกำเนิดกำลังไมโครเวฟ (Microwave power generators) ที่ได้สร้างขึ้นสำหรับให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน โดยทั่วไปจะมีขนาดกำลังจาก 300 W ถึง 100 kW โดยจะมีระบบควบคุมการทำงานของหลอดแมกนีตรอนอยู่ด้วย ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้กรณีที่ต้องการแยกเฉพาะหลอดแมกนีตรอนออกไป

4.6.3 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

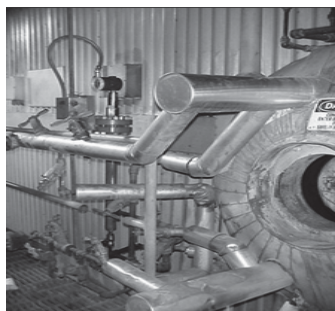
เป็นส่วนที่ลำเลียงคลื่นไมโครเวฟที่ส่งออกจากหลอดแมกนีตรอนไปยังห้องอบ (Cavity Oven) โดยท่อนำคลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปจะเป็นแบบหน้าตัดเป็นมุมฉากหรือแบบหน้าตัดกลม ดังภาพที่ 2.30 แสดงการต่อท่อนำคลื่นเข้ากับไมโครเวฟในโรงงานอุตสาหกรรม

4.6.4 ชุดจานหมุนชิ้นงาน (Turntable and baseplate)

เป็นส่วนในการหมุนชิ้นงานขณะรับคลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ชิ้นงานมีการรับคลื่นอย่างสม่ำเสมอและหลีกเลี่ยงการเกิดจุดร้อน (Hot Spot) ขึ้นภายในชิ้นงาน โดยชุดจานหมุนประกอบด้วยชุดมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบของการหมุน

4.6.5 ใบพัดกวนคลิ่น (Stirrer blade)

ใช้สำหรับกระจายคลิ่นที่มาจากท่อนำคลิ่นเพื่อให้คลิ่นกระจายตัวเข้ากระทบกับผิวของวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.31 การตัดท่อนำคลิ่นเข้ากับไมโครเวฟในโรงงานอุตสาหกรรม

4.6.6 อุปกรณ์เสริมทั่วไปที่ใช้ร่วมกับเตาไมโครเวฟ เช่น มิเตอร์วัดขนาดกำลังไฟฟ้า เครื่องตรวจวัดการรั่วของคลิ่น ในการสร้างอุปกรณ์ไมโครเวฟจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอันดับแรก โดยระดับที่สามารถใช้งานได้คือคลิ่นที่แผ่ออกมาจากเตาไมโครเวฟมีค่าไม่เกิน 10 mW/cm^2 ที่ระยะ 50 mm จากเตาไมโครเวฟ

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งยางแท่ง

Cousin et al. (1993) ทำการอบแห้งยางธรรมชาติ โดยทำการวิเคราะห์หลักไคการอบแห้งยางแท่งแบบชั้นหนาด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.2 เมตรต่อวินาที ในการทดลองได้เก็บข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิและความชื้นของยางเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป ผลการทดลองพบว่า มีช่วงการอบแห้ง 3 ช่วง คือ ช่วงแรกชั้นยางอึดตัวด้วยน้ำ อุณหภูมิของอากาศและเม็ดยางจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ช่วงที่ 2 เป็นการอบแห้งแบบอัตราคงที่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และปริมาณน้ำในยางลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 3 จะเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และแบบจำลองที่สร้างขึ้นอธิบายผลการทดลองได้ดีพอสมควร

Naon et al. (1995) ศึกษาการอบแห้งในระดับขยายส่วน โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาด 3 X 1 X 2 เมตร ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิลมร้อน 120 – 150 องศาเซลเซียส เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งยางแท่ง ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลาการอบแห้ง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุและอุณหภูมิของอากาศ และเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการอบแห้งแบบชั้นบางจึงนำค่าที่ได้ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม พบว่าให้ผลใกล้เคียงกันทั้งด้านความชื้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

สุภวรรณ ภูริวัฒนชัยกุล และคณะ (2548) ทำการทดลองอบแห้งยางแท่ง 2 รูปแบบได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งเป็นการอบแห้งต่อเนื่องโดยใช้อุณหภูมิ 108 - 130 องศาเซลเซียส และรูปแบบที่สองเป็นการให้อุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ช่วงแรกอุณหภูมิสูงที่ 130 องศาเซลเซียส และช่วงสองอุณหภูมิต่ำที่ 105 - 110 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า รูปแบบที่หนึ่งไม่เหมาะสมต่อการอบแห้ง เนื่องจากผลผลิตที่ได้ไม่ผ่านคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง ส่วนรูปแบบที่สอง ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงที่สอง และผลผลิตผ่านคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง STR 20

ปิยะพงศ์ ม่วงมณี และ วิรุทธ ลิ้มสกุล (2549) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทำนายการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองและพบว่า การอบแห้งแบบ 2 ช่วงอุณหภูมิมีความเหมาะสมมากกว่าการอบแห้งแบบใช้อุณหภูมิคงที่ ทั้งในด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง โดยในการทดลอง มีความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนน้อยที่สุดคือ 22.88 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำระเหย

คำนิง วาทยิชา และ เฉลิมขวัญ อริยะวงศ์ (2550) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อนและไม่โครเวฟ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าการลดลงของความชื้นในช่วง 30 นาทีแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นความชื้นลดลงอย่างช้าๆ ส่วนการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลัง 800 วัตต์ โดยการเปิด - ปิดให้พลังงานเป็นระยะๆ พบว่าความชื้นลดลงเร็วมากในช่วง 20 นาที ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าลมร้อน จึงทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งลดลงมาก

คำนิง วาทยิชา และ จาริณี จงปลื้มปิติ (2550) ทำการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นยางธรรมชาติที่มีความชื้น 26.8 - 37.6 เปอร์เซ็นต์มาตรเปียก วัดโดยวิธีโพรมแบบแกนร่วมปลายเปิด ณ ความถี่ 2 ค่าพบว่า ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าระหว่าง 6.39 - 14.32 และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียมีค่าระหว่าง 0.10 - 2.23 ส่วนที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าระหว่าง 7.29 - 14.17 และค่าแฟกเตอร์การสูญเสียมีค่าระหว่าง 0.48 - 2.32 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นกับความชื้น โดยที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าทั้งสองมากกว่าที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียทั้งสองความถี่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความชื้น

จาริณี จงปลื้มปิติ และ คำนิง วาทยิชา (2551) ทำการศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยการควบคุมอุณหภูมิภายในโดยการเปิดให้กำลังไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างสลับกับการเป่าลมเพื่อลดอุณหภูมิข้าง พบว่าการเปิดให้กำลังไมโครเวฟที่ระดับกำลัง 800 วัตต์ สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในยางแท่งให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 100 องศาเซลเซียสได้ มีผลต่อคุณลักษณะต่อการอบแห้ง คือ เมื่อน้ำหนักมากขึ้น เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ขณะเดียวกันน้ำหนักมากขึ้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง ยางที่อบแห้งด้วยวิธีนี้ผ่านคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง STR 20

5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ

ศัญชัย พลดี (2546) ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งมะม่วงแช่แข็งด้วยเทคนิคสเปาเต็คเบดร่วมกับไมโครเวฟ อุณหภูมิลมร้อนประมาณ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ทางเข้าด้านล่างห้องอบ 6.1 เมตรต่อวินาที

อัตราการผลิตหมุนเวียนอากาศ 80 เปอร์เซ็นต์ และให้พลังงานที่ระดับ 300 450 และ 600 วัตต์ พบว่าเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้นทำให้ลดเวลาการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลง และค่าที่เหมาะสมของการให้พลังงานคือ 600 วัตต์ 5 นาที โดยใช้เวลาอบแห้ง 4 ชั่วโมง ความสามารถในการอบแห้ง 0.42 กิโลกรัมมะม่วงแห้งต่อชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 10.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

โสภา แคนสี (2546) ศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของกล้วยด้วยไมโครเวฟดัดแปลง โดยการอบแห้งเป็นช่วง ๆ พบว่าผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการอบแบบ 9 ชั่วโมง – พัก 15 ชั่วโมง มีสีผิวและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับการอบกล้วยด้วยลมร้อน และการอบนี้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 4.61 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ใช้เวลาอบนาน 3 วัน (28 ชั่วโมง) ซึ่งสามารถลดเวลา พลังงานจำเพาะและต้นทุนพลังงานในการอบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบกล้วยด้วยลมร้อนจากแก๊ส

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ ได้ทำการศึกษาโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1) ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ 2) การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมดา 3) การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และ 4) การศึกษาคุณภาพของยางแท่งที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

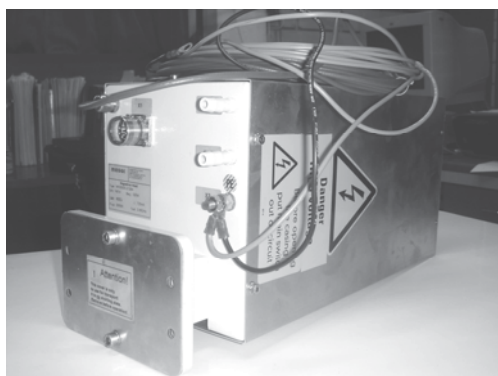
1. การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่มีกำลังวัตต์สูง สามารถอบแห้งยางแท่งที่มีความหนาใกล้เคียงกับยางแท่งในระดับอุตสาหกรรม และนำไปใช้ในการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟต่อไป ขั้นตอนในการออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการมีดังนี้

1. การเลือกใช้ส่วนกำเนิดคลื่นและการควบคุมกำลัง
2. การเลือกแบบท่อนำคลื่นและตำแหน่งป้อน
3. การออกแบบห้องอบ
4. การออกแบบประตู
5. การทดสอบด้านความปลอดภัย
6. การทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบ
7. การวัดกำลังของไมโครเวฟ

1.1 การเลือกใช้ส่วนกำเนิดคลื่นและการควบคุมกำลัง

แมกนีตรอน (Magnetron) เป็นส่วนที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นพลังงานหลักในการอบแห้ง โดยทั่วไปแมกนีตรอนจะกำเนิดคลื่นที่ 2 ความถี่ คือ 915 และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ จึงจำเป็นต้องพิจารณาในการเลือกออกแบบทั้งความถี่การทำงานและกำลังสูงสุด จากการศึกษาของ คำนิง และ จาริณี (2550) ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นยางธรรมชาติ (จับตัวตามธรรมชาติ และรีดให้เป็นยางแผ่นบางก่อนดีดขยี้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตยางแท่ง) โดยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด ซึ่งให้เห็นว่าควรใช้แมกนีตรอนที่ทำงาน ณ ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ในการอบแห้งยางแท่ง เพราะยางจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้มากกว่าที่ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ แต่อย่างไรก็ตามแมกนีตรอนที่ทำงาน ณ ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งนิยมใช้ในเตาไมโครเวฟแบบครัวเรือน มีกำลังไม่เพียงพอที่จะให้ความร้อนเมื่อยางแท่งมีความหนาเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องเลือกใช้แมกนีตรอนที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถทำงานได้ต่อเนื่องและเปะระดับกำลังได้สูงถึง 2,000 วัตต์ และในงานวิจัยนี้จะใช้แมกนีตรอนดังภาพที่ 3.1 ซึ่งมีการระบายความร้อนด้วยการไหลเวียนของน้ำและชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟ (Power Supply) ดังภาพที่ 3.2 ของบริษัท Cober Muegge ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 3.1 แมกนีตรอนขนาดกำลัง 2,000 วัตต์



ภาพที่ 3.2 ชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟที่สามารถปรับค่าได้

1.2 การเลือกแบบท่อนำคลื่นและตำแหน่งป้อน

ส่วนใหญ่ท่อนำคลื่นและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมประเภทอาหารและยา จะเป็นสเตนเลส เพราะมีข้อดีคือทนความร้อนสูง และทนต่อการผุกร่อน(Corrosion) (Meredith, 1998) แต่ข้อเสียคือค่า attenuation มีค่าสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่า attenuation เป็นตัวบ่งชี้ถึงการสูญเสียที่ผิวของโลหะ สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ 17 α_c คือค่า attenuation (dβ /m) (Meredith, 1998)

$$\alpha_c = \frac{1}{\eta b} \left[\frac{\pi f \mu}{\sigma \left[1 - \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right] \quad (17)$$

เมื่อ η คือ ค่า intrinsic impedance ของวัสดุไดอิเล็กตริก, a และ b คือค่าความกว้าง และความสูงของ ท่อนำคลื่น, σ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า, f_c คือ ความถี่คัทออฟ (cut-off frequency)

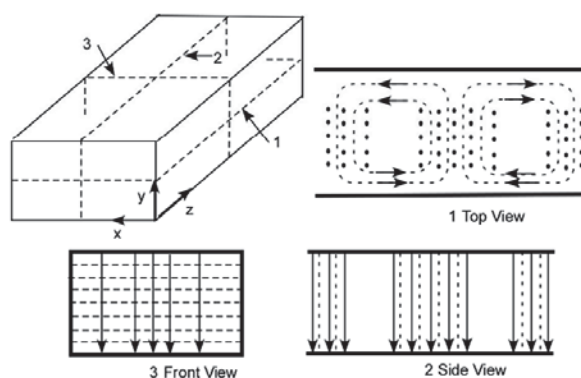
ตารางที่ 3.1 ค่า attenuation และ Power loss ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz

Parameter	W G size (m m)	C u	A l	Stainless Steel
σ (mho / m)	n / a	5.5×10^7	3.0×10^7	1.4×10^8
α_c	86 x 43	2.28E - 02	3.09E - 02	1.43E - 01
Power loss	86 x 43	132	178	837
Watt / meter at 25 kW				

ที่มา: ดัดแปลงจาก Meredith, 1998

จากเหตุผลข้างต้นประกอบกับในท้องตลาดมีท่อสแตนเลสขนาดหน้าตัด 8 X 4 เซนติเมตร ซึ่งเป็น ขนาดมาตรฐานจำหน่ายอยู่แล้ว จึงสามารถนำมาใช้เป็นท่อนำคลื่นได้ จากเหตุผลทั้งหมดดังที่กล่าวมาทำให้ เลือกใช้สแตนเลสเป็นวัสดุหลักของ ท่อนำคลื่น และเตาอบ

เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular waveguide) โดยเลือกโหมดของ การส่งให้เป็น TE_{10} จะได้คลื่นภายในท่อมัลักษณะดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 การกระจายตัวเป็นคลื่นนิ่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำ

คลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในโหมด TE_{10} (Meredith, 1998)

ซึ่งความถี่ต่ำสุดของคลื่นไมโครเวฟ (Cutoff frequency, f_c) ที่สามารถส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่น รูปทรงสี่เหลี่ยมได้นั้น สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 18

$$f_{c_{mn}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (18)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง m และ n คือเลขจำนวนเต็ม a และ b คือขนาดของท่อนำคลื่น

เมื่อเลือกให้ $a = 8$ เซนติเมตร และ $b = 4$ เซนติเมตร เนื่องจาก $m = 1$ และ $n = 0$ สำหรับโหมด TE_{10} และไมโครเวฟที่ใช้มีความถี่ที่ใช้งานเป็น 2.45 GHz แทนค่าตามสมการที่ 2 พบว่า $f_c = 1.87$ GHz มีค่าน้อยกว่าความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม นั่นคือค่าความถี่คัทออฟต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ใช้งาน จึงจะสามารถแพร่ผ่านท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดหน้าตัด 8×4 เซนติเมตร ได้

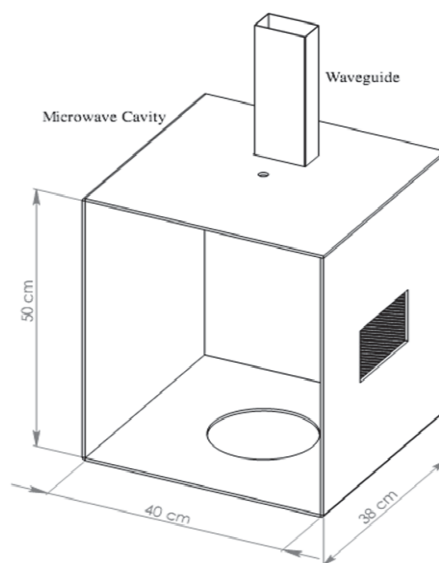
และกำหนดตำแหน่งป้อนคลื่นที่ด้านบนของห้องอบ (Overhead feeds) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับอุตสาหกรรม เพื่อให้มีการกระจายคลื่นที่ดีจึงออกแบบให้มีตัวกวนคลื่น (Stirrer) ณ ตำแหน่งปลายของท่อนำคลื่น

1.3 การออกแบบห้องอบ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกส่งออกจากแมกนีตรอนผ่านระบบท่อนำคลื่นแล้วจึงเดินทางไปยังห้องอบที่ได้ออกแบบไว้โดยมีขนาดดังภาพที่ 3.4 โดยด้านล่างของห้องอบได้เชื่อมต่อกับเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน และใช้สแตนเลสความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นผนังของห้องอบ เพื่อให้เกิดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟอยู่ภายในห้องอบและเกิดการรวมกัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดคลื่นนิ่ง และการเกิดคลื่นภายในห้องอบได้ถูกออกแบบให้เกิดคลื่นนิ่งได้หลายโหมด (multi mode) และเมื่อกำหนดให้ $a = 38$ cm, $b = 50$ cm, $d = 40$ cm แล้วคำนวณหาความถี่คัทออฟ (cut-off frequency, $f_{c_{mnp}}$) ตามสมการ (19)

$$f_{c_{mnp}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (19)$$

โดยที่ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, $p = 1, 2, 3, \dots$ และ $c \approx 3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 3.4 ลักษณะของห้องอบและตำแหน่งเชื่อมต่อต่างๆ

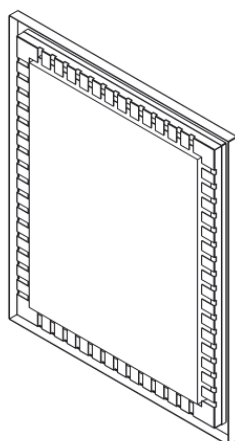
ผลคำนวณโดยใช้โปรแกรม Matlab หาโหมดที่เกิดคลื่นนิ่งภายในห้องอบ เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 โหมดต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในห้องอบ

m	n	p	f(GHz)
5	1	5	2.4334
0	5	4	2.479
1	2	6	2.4033
7	1	3	2.4148
3	1	6	2.4553
2	2	6	2.4588
4	5	2	2.4286
8	0	1	2.4291
5	4	3	2.4513
6	3	3	2.4306
7	3	1	2.4399
0	6	2	2.4843
6	4	1	2.4236
8	1	1	2.461
1	4	5	2.4696
5	3	4	2.4295

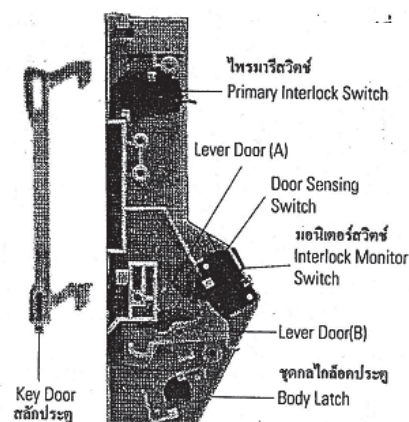
1.4 การออกแบบประตู

ระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจะต้องมีระบบประตูเปิด-ปิดอยู่เสมอซึ่งในการออกแบบส่วนนี้ต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติการ โดยระบบประตูต้องออกแบบให้เป็นเหมือนกับดัก (Trap) โดยจะดักคลื่นไว้ไม่ให้คลื่นรั่วไหลออกไปนอกห้องอบ ดังภาพที่ 3.5 หลักการออกแบบคือ ออกแบบไว้เป็นโพรงด้านใน ซึ่งมีความสูงเป็น $\frac{1}{4}$ เท่าของความยาวคลื่น ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วที่ $\frac{1}{4}$ เท่าของความยาวคลื่นเป็นจุดที่คลื่นมีสนามไฟฟ้าสูงสุดและจะรับคลื่นเข้าไปข้างในได้ดีที่สุดด้วย



ภาพที่ 3.5 โพรงกับดักคลื่นของบานประตู

ส่วนของสวิตช์กลอนประตูได้ทำการติดสวิตช์เพื่อความปลอดภัย(safety switch) จะทำให้ เมื่อเปิดประตูห้องอบ การสร้างคลื่นต้องหยุดและไม่มีไฟเข้าระบบ การทำงานทุกอย่างในเครื่องจะต้องหยุดทั้งหมด ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 กลไกสวิตช์เพื่อความปลอดภัย (safety switch) (สุรพล สุธีระเวช, 2541)

1.5 การทดสอบด้านความปลอดภัย (สุรพล สุธีระเวช, 2541)

เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟ ในงานวิจัยหลังจากสร้างเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการแล้วเสร็จ จำเป็นต้องทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นจากภายในตู้ภายนอกเตาให้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยมีรายละเอียดและวิธีดำเนินการดังนี้

1.5.1 อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย

1.5.1.1 เครื่องมือไมโครเวฟ เซอร์เวย์ มิเตอร์ (Microwave Oven Survey Meter) พร้อมหัววัด (Prob)

1.5.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.3 องศาเซลเซียส

1.5.1.3 นาฬิกาจับเวลา มีความละเอียด 0.01 วินาที

1.5.1.4 บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 600 ซีซี จำนวน 1 ใบ

1.5.1.5 ชุดป้องกันคลื่นไมโครเวฟ (Protective suit)

1.5.2 วิธีดำเนินการทดสอบ

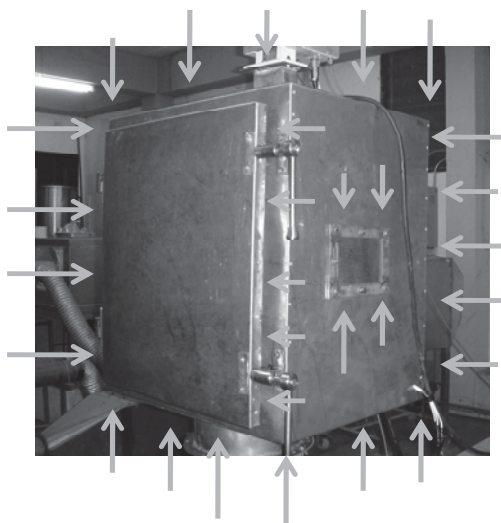
เริ่มต้นจากผู้ทดสอบสวมชุดป้องกันคลื่นไมโครเวฟ (Protective suit) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ 600 ซีซี ไปวางตรงกลางของเตาอบไมโครเวฟ เปิดไมโครเวฟตั้งระดับกำลังสูงสุด จากนั้นจึงใช้เครื่องมือ (Microwave Oven Survey Meter) ดังภาพที่ 3.7 วัดการแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น บริเวณขอบประตูเปิด-ปิดเตา จุตรอยต่อของท่อนำคลื่นดังภาพที่ 3.8 โดยให้หัววัดตั้งฉากและมีระยะห่างประมาณ 5 เซนติเมตร กับผิวที่ต้องการวัด

1.5.3 ค่าชี้ผลของการทดสอบ

ค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน DHHS (Department of Health and Human Services) (Meredith, 1998) และหากคลื่นแพร่กระจายเกินค่ามาตรฐาน ต้องทำการปรับปรุงให้ได้ตามมาตรฐาน ก่อนที่จะทำการทดสอบการกระจายคลื่นภายในห้องอบ



ภาพที่ 3.7 เครื่องมือวัดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ



ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งที่ทดสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ

1.6 การทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบ

การกระจายคลื่นภายในห้องอบที่สม่ำเสมอเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การทดสอบการกระจายคลื่นภายในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในถ้วยแก้ว โดยมีรายละเอียดและวิธีดำเนินการดังนี้

1.6.1 อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย

1.6.1.1 บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 ซีซี จำนวน 5 ใบ

1.6.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.3 องศาเซลเซียส

1.6.1.3 นาฬิกาจับเวลา มีความละเอียด 0.01 วินาที

1.6.2 วิธีดำเนินการทดสอบ

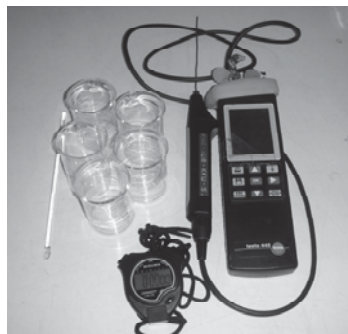
นำบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ 100 ซีซี จำนวน 5 ใบ ไปทำการวัดอุณหภูมิทุกใบแล้วให้เป็นค่า T_1 จากนั้นนำบีกเกอร์ไปวางในห้องอบให้มีระยะห่างเท่ากัน ดังภาพที่ 3.9 ให้ไมโครเวฟทำงานที่กำลังสูงสุดเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นวัดอุณหภูมิทุกใบให้เป็นค่า T_2 จากนั้นนำค่าแทนค่าตามสมการที่ 20

$$Q = \frac{\Delta T_{\min}}{\Delta T_{\max}} \times 100\% \quad (20)$$

เมื่อ Q คือค่าการกระจายความร้อน $T_{\min}$ คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำสุด และ $T_{\max}$ คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด

1.6.3 ค่าชี้ผลการทดสอบ

ค่าการกระจายความร้อน (Q) ตามสมการที่ 4 ควรมีค่ามากกว่า 65% จึงถือว่าปกติ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์ทดสอบการกระจายของคลื่นในห้องอบ (ก) และตำแหน่งการวางบีกเกอร์ (ข)

1.7 การวัดกำลังของไมโครเวฟ

ในมาตรฐานสากลได้มีการวัดกำลังออกของแมกนีตรอนตามมาตรฐาน ICE60705 (International Electro technical Commission) ซึ่งต้องกระทำภายในห้องทดลองที่สามารถควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยมีรายละเอียดและวิธีดำเนินการดังนี้

1.7.1 อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย

1.7.1.1 โหลแก้วทนความร้อนขนาด 2 ลิตร จำนวน 1 ใบ

1.7.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส มีความคลาดเคลื่อน ± 0.3 องศาเซลเซียส

1.7.1.3 นาฬิกาจับเวลา มีความละเอียด 0.01 วินาที

1.7.1.4 แท่งแก้วคนสาร

1.7.2 วิธีการทดสอบ

นำโหลแก้วทนความร้อนใส่น้ำ 1 ลิตร ใช้แท่งแก้วคนน้ำในโหลประมาณ 1 นาที วัดอุณหภูมิของน้ำ กำหนดค่าอุณหภูมิให้เป็นค่า T1 นำโหลแก้วไปไว้ตรงกลางเตาไมโครเวฟ ตั้งระดับกำลังงานสูงสุด ตั้งเวลาให้เครื่องทำงาน 60 วินาที นำซามออกจากห้องอบ ใช้แท่งแก้วคนน้ำในซามประมาณ 1 นาที วัดอุณหภูมิของน้ำ กำหนดค่าอุณหภูมิให้เป็นค่า T2 จากนั้นหาค่ากำลังของไมโครเวฟตามสมการที่ 21

$$P = \frac{4.718 \times V \times \Delta T}{t} \quad (21)$$

เมื่อ P = กำลังที่ออกมา มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) $4.187 =$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำ $V =$ เป็นปริมาตรของน้ำ มีหน่วยเป็นลิตร (Liter) $\Delta T =$ ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) และ $t =$ เวลาที่ให้ความร้อน มีหน่วยเป็นนาที (minute)

1.7.3 ค่าชี้ผลการทดสอบ

ค่ากำลังไมโครเวฟที่วัดได้จากการทดสอบ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ของกำลังวัตต์แมกนีตรอนที่ใช้

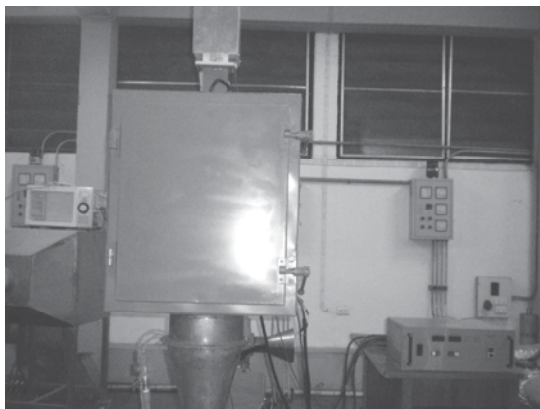
2. การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ

จากการศึกษาของ คำนึ่งและเฉลิมขวัญ (2550) ได้ศึกษาเบื้องต้นอบแห้งยางแท่งที่ความสูงชันยาง 2.5 เซนติเมตร ด้วยเตาไมโครเวฟแบบใช้ในครัวเรือน เมื่อให้กำลังไมโครเวฟที่ระดับ 800 วัตต์ โดยเปิด-ปิดเป็นระยะพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในของยางแท่งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ในช่วง 95-110 องศาเซลเซียส และจาริณี จงปลื้มปิติ (2551) ได้ศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟโดยการควบคุมอุณหภูมิภายในโดยเปิดให้กำลังไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างสลับกับการเป่าลมเพื่อลดอุณหภูมิยาง พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิยางให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย 100 องศาเซลเซียส และผลของน้ำหนักที่มีต่อคุณลักษณะการอบแห้งคือ เมื่อน้ำหนักมากขึ้นส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้วิธีการอบแห้งยางแท่งคล้ายกันนี้เป็นแนวทางในการศึกษา

วิธีดำเนินการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการร่วมกับลมธรรมชาติ (ออกแบบและสร้างขึ้นตามวิธีการศึกษาจากข้อที่ 1) เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของความสูงชันยางที่มีต่อ อุณหภูมิภายในของยาง ความชื้น เวลาและพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง มีวิธีการศึกษาดังนี้

2.1 ชุดเครื่องมือการศึกษา

การศึกษาใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นตามข้อ 1 มีขนาด ความจุ 76 ลิตร ควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟโดยชุดควบคุมกำลัง ซึ่งด้านล่างของห้องอบได้ดัดแปลงให้เชื่อมต่อกับเครื่องอบลมร้อน สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส ซึ่งติดตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟและชุดควบคุมกำลัง

2.2 วัสดุและอุปกรณ์การศึกษา

วัสดุและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

2.2.1 ขางคียบที่บดขยี้แล้ว

2.2.2 นาฬิกาจับ มีความละเอียด 0.01 วินาที

2.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถชั่งน้ำหนักได้มากที่สุด 4,000 กรัม มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.1 กรัม

2.2.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.3 องศาเซลเซียส

2.2.5 เครื่องวัดความเร็วลม มีความละเอียด 0.01 เมตรต่อวินาที

2.2.6 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ ความจุ 76 ลิตร ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น และติดตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2.2.7 ชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟสามารถปรับกำลังได้ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์

2.3 ปัจจัยการศึกษา

2.3.1 ปัจจัยที่ใช้ศึกษา

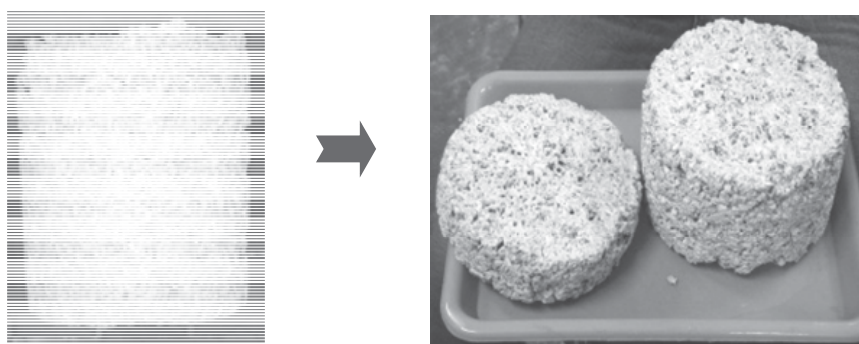
ความสูงชั้นยางของยางแท่ง มี 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 เซนติเมตร (มีขนาดน้ำหนัก 1,500 2,500 และ 3,300 กรัม)

2.3.2 ปัจจัยควบคุม

2.3.2.1 อุณหภูมิลม ใช้อุณหภูมิมาตรฐาน 32 องศาเซลเซียส และความเร็วลมที่ 0.5 เมตรต่อวินาที

2.3.2.2 ระดับกำลังไมโครเวฟภายในเตาอบ 1,700 วัตต์ (ผลจากการทดสอบกำลังไมโครเวฟจากข้อ 1)

2.3.2.3 เวลาเริ่มต้นการให้พลังงานไมโครเวฟ คือ 40 50.5 และ 34.5 ตามลำดับความสูงชั้นยาง (จากการทดสอบเบื้องต้น)



ภาพที่ 3.11 ยางแท่งที่ใช้ในการทดสอบตัดแต่งให้ได้ความสูงชั้นยางที่ต้องการ

2.4 วิธีดำเนินการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ โดยอบยางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที และตั้งอุณหภูมิลมเป็นมาตรฐาน เปิด-ปิด ให้ไมโครเวฟ โดยใช้เตาอบไมโครเวฟที่สร้างขึ้นตามข้อ 1 มีวิธีดำเนินการดังนี้ (ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการอบแห้งได้ดังภาพที่ 3.12)

2.4.1 นำยางดิบที่บดย่อยจากโรงงานซึ่งบรรจุในถังพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มาตัดแบ่งให้ได้ความสูงชั้นยาง 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 เซนติเมตร (มีขนาดน้ำหนัก คือ 1,500 2,500 และ 3,300 กรัม)

2.4.2 ตั้งระดับกำลังที่หาควคุมกำลังของเตาอบไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ และตั้งอุณหภูมิลมเป็น 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิมาตรฐาน)

2.4.3 ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยางก่อนอบ (ซึ่งในการวัดอุณหภูมิทุกครั้ง จะทำการวัด 3 ตำแหน่งคือ บริเวณที่ห่างจากขอบชั้นยาง 3 เซนติเมตร ทำมุม 120 องศาในแนวราบกับจุดศูนย์กลางของชั้นยาง วัดลึกลงไปครึ่งหนึ่งของความสูงชั้นยาง)

2.4.4 นำยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 1,500 กรัม ไปอบด้วยเตาไมโครเวฟ เปิดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 40 นาที โดยชั่งน้ำหนักและวัดอุณหภูมิยางทุกๆ 8 นาที จนกว่าอุณหภูมิยางใกล้ถึง 105 องศาเซลเซียส ระหว่างที่ให้กำลังไมโครเวฟเปิดให้ลมไหลผ่านตลอด

2.4.5 เมื่ออบยางครบนาทีที่ 40 หยุดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 4 นาที ให้ลมไหลผ่านเพื่อลดอุณหภูมิยางให้ใกล้เคียง 95 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

2.4.6 เปิดให้กำลังไมโครเวฟอีก 2 นาที เพื่อให้อุณหภูมิยางสูงขึ้นใกล้เคียง 105 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง แล้วจึงหยุดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 4 นาที ให้ลมไหลผ่านเพื่อลดอุณหภูมิให้ใกล้เคียง 95 องศาเซลเซียสอีกเช่นเดิม ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

2.4.7 ดำเนินการเช่นข้อ 6 ไปกว่าเสร็จสิ้นการทดลอง (ตั้งแต่วันที่ 50 เพิ่มเวลาการให้กำลังไมโครเวฟเพิ่มเป็น 4 นาที) เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง

2.4.8 ยางแท่งที่ผ่านการทดลองแล้ว ถูกนำไปอบเพื่อหามวลแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

2.4.9 ทำการทดสอบยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 2,500 กรัม โดยนำไปอบด้วยเตาไมโครเวฟ เปิดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 50.5 นาที บันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยางทุกๆ 8 นาที (ยกเว้นช่วงสุดท้ายใช้เวลา 2.5 นาที) จนอุณหภูมิยางใกล้ถึง 105 องศาเซลเซียส ระหว่างที่ให้กำลังไมโครเวฟเปิดให้ลมไหลผ่านตลอด

2.4.10 เมื่ออบยางครบนาทีที่ 50.5 หยุดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 8 นาที ให้ลมไหลผ่าน เพื่อลดอุณหภูมิยางให้ใกล้เคียง 95 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

2.4.11 เปิดให้กำลังไมโครเวฟอีก 2 นาที เพื่อให้อุณหภูมิยางสูงขึ้นใกล้เคียง 105 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง แล้วจึงพักเพื่อให้ลมไหลผ่านเป็นเวลา 4 นาที เพื่อลดอุณหภูมิให้ใกล้เคียง 95 องศาเซลเซียสอีกเช่นเดิม ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

2.4.12 ดำเนินการเช่นข้อ 11 ไป จนถึงนาทีที่ 62.5 เพิ่มเวลาการให้กำลังไมโครเวฟเพิ่มเป็น 4 นาที และตั้งแต่วันที่ 74.5 จึงเพิ่มเวลาให้ลมไหลผ่านเป็นเวลา 8 นาที เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียกจึงเสร็จสิ้นการทดลอง ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง

2.4.13 ยางแท่งที่ผ่านการทดลองแล้ว ถูกนำไปอบเพื่อหามวลแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

2.4.14 ทำการทดสอบยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 20 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 3,300 กรัม โดยนำไปอบด้วยเตาไมโครเวฟ เปิดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 34.5 นาที บันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยางทุกๆ 8 นาที (ยกเว้นช่วงสุดท้ายใช้เวลา 2.5 นาที) จนอุณหภูมิยางใกล้ถึง 105 องศาเซลเซียส ระหว่างที่ให้กำลังไมโครเวฟเปิดให้ลม

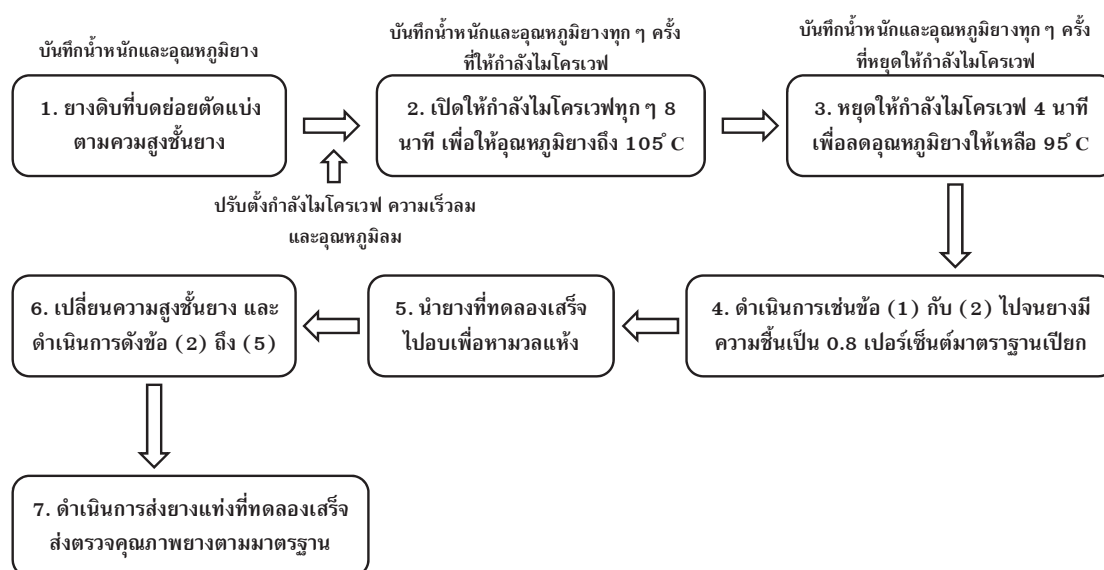
ไหลผ่านตลอด เมื่ออบยางครบนาทิตี่ 34.5 หยุดให้ไมโครเวฟเป็นเวลา 2 นาที ให้ลมไหลผ่าน เพื่อลดอุณหภูมิยางให้ใกล้เคียง 95 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

2.4.15 เปิดให้กำลังไมโครเวฟ 2 นาที ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง แล้วจึงพักเพื่อให้ลมไหลผ่าน 2 นาที ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

2.4.16 ดำเนินการเช่นข้อ 15 จนถึงนาทิตี่ 37 จึงเพิ่มเวลาการให้กำลังไมโครเวฟเป็นอีก 2.5 นาที และตั้งแต่นาทิตี่ 42 พักเพื่อให้ลมไหลผ่านเป็นเวลา 4 นาที

2.4.17 นาทิตี่ 71 ให้เวลาการให้กำลังไมโครเวฟเพิ่มเป็น 4 นาที เพื่อให้อุณหภูมิยางสูงขึ้นใกล้เคียง 105 องศาเซลเซียส แล้วจึงพักเพื่อให้ลมไหลผ่านเป็นเวลา 8 นาที เพื่อลดอุณหภูมิให้ใกล้เคียง 95 องศาเซลเซียส ดำเนินการเช่นนี้จนกว่ายางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก จึงเสร็จสิ้นการทดลอง ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง

2.4.18 ยางแท่งที่ผ่านการทดลองแล้ว ถูกนำไปอบเพื่อหามวลแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.12 แผนผังการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ

2.5 ค่าชี้ผลของการศึกษา

สำหรับการศึกษการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ กำหนดให้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ

2.5.1 อุณหภูมิภายในของยาง

2.5.2 ความชื้นที่เปลี่ยนไปของยางแท่ง

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือแท่ง สำหรับความชื้นที่ใช้ในการบอกค่ามาตรฐานของยางแท่งคือ ความชื้นมาตรฐานเปียกซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (22)

$$M_w = \left(\frac{w - d}{w} \right) \quad (22)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis), %

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ, g

เมื่อ d คือ มวลวัสดุแห้ง, g

2.5.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

2.5.4 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ณ ตำแหน่งเวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (23)

$$E_m = \frac{3.6 (P_m) t}{m_{\text{evap}}} \quad (23)$$

เมื่อ E_m คือ พลังงานจำเพาะของไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ/kg_{H₂O})

เมื่อ P_m คือ กำลังไมโครเวฟ (kW)

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

m_{evap} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg water evaporated)

3. การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

จากการทดลองการอบแห้งยางแท่งตามข้อที่ 2 พบว่า เมื่ออบยางจนถึงความชื้น 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก พบว่า ยางที่มีความสูงชิ้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร ไม่สุก (เกิดจุดขาว) โดยเฉพาะที่ความสูงชิ้นยาง 20 เซนติเมตร เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่ใช้ในการเร่งการแพร่กระจายของความชื้นจึงมีพลังงานไมโครเวฟส่วนน้อยที่ใช้ในการทำให้อย่างสุก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหา จึงนำลมร้อนเข้ามาช่วยในการอบแห้งยางแท่งเป็นตัวเร่งการสุกของยาง

วิธีดำเนินการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของความสูงชิ้นยาง อุณหภูมิลมร้อนและเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อ อุณหภูมิภายในของยาง ความชื้น เวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.1 ชุดเครื่องมือศึกษา

การศึกษาใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นตามข้อ 1 มีขนาด ความจุ 76 ลิตร ควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟโดยชุดควบคุมกำลัง ซึ่งด้านล่างของห้องอบได้ดัดแปลงให้เชื่อมต่อกับเครื่องอบลมร้อน สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส ซึ่งติดตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ดังภาพที่ 3.10

3.2 วัสดุและอุปกรณ์การศึกษา

วัสดุและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

3.2.1 ขางคียบที่บดย่อยแล้ว

3.2.2 นาฬิกาจับเวลา มีความละเอียด 0.01 วินาที

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถชั่งน้ำหนักได้มากที่สุด 4,000 กรัม มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.1 กรัม

3.2.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.3 องศาเซลเซียส

3.2.5 เครื่องวัดความเร็วลม มีความละเอียด 0.01 เมตรต่อวินาที

3.2.6 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)

3.2.7 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ ความจุ 76 ลิตร ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น และติดตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

3.2.8 ชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟสามารถปรับกำลังได้ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์

3.3 ปัจจัยการศึกษา

3.3.1 ปัจจัยที่ใช้ศึกษา

3.3.1.1 ความสูงชั้นยาง มี 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 เซนติเมตร

3.3.1.2 อุณหภูมิลมร้อน มี 2 ระดับ คือ 100 และ 110 องศาเซลเซียส

3.3.1.3 เวลาการให้ไมโครเวฟ มี 2 ระดับ คือ 1 และ 2 นาที

3.3.2 ปัจจัยควบคุม

3.3.2.1 ความเร็วลม 0.5 เมตร ต่อ วินาที

3.3.2.2 ระดับกำลังไมโครเวฟภายในเตาอบ 1,700 วัตต์ (กำลังไมโครเวฟจากข้อ

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่มีผลต่อการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีวิธีการศึกษาดังนี้ (ซึ่งสามารถแสดงแผนผังได้ดังภาพที่ 3.13)

3.4.1 นำยางดิบที่บดย่อยจากโรงงานซึ่งบรรจุในถังพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มาตัดแบ่งให้ได้ความสูงชั้นยาง 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 เซนติเมตร (มีขนาดน้ำหนัก คือ 1,500 2,500 และ 3,300 กรัม)

3.4.2 ตั้งระดับกำลังที่ชุดควบคุมกำลังของเตาอบไมโครเวฟ 100 เปอร์เซ็นต์ (1,700 วัตต์) ตั้งอุณหภูมิลมเป็น 100 องศาเซลเซียส ตั้งความเร็วลมเป็น 0.5 เมตรต่อวินาที และวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

3.4.3 ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยางก่อนอบ (ซึ่งในการวัดอุณหภูมิทุกครั้ง จะทำการวัด 3 ตำแหน่งคือ บริเวณที่ห่างจากขอบชั้นยาง 3 เซนติเมตร ทำมุม 120 องศาในแนวราบกับจุดศูนย์กลางของชั้นยาง วัดลึกลงไปครึ่งหนึ่งของความสูงชั้นยาง)

3.4.4 นำยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 1,500 กรัม ไปอบโดยมีวิธีการคือ ให้ลมร้อนเป็นเวลา 2 นาที พอคอบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟ 1 นาที จากนั้นให้ลมร้อนอีก 2 นาที พอคอบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟอีก 1 นาที ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

3.4.5 ดำเนินการ เช่นข้อ 4 ไปจนเสร็จสิ้นการทดลอง เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง

3.4.6 ทำการทดสอบยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 2,500 และ 3,300 กรัม ดำเนินการเช่นข้อ 4 ไปจนเสร็จสิ้นการทดลอง เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง

3.4.7 ยางแท่งที่ผ่านการทดลองแล้ว ถูกนำไปอบเพื่อหามวลแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

3.4.8 นำยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 1,500 กรัม ไปดำเนินการ เช่นข้อ 3 จากนั้นนำยางไปอบ โดยมีวิธีการคือ ให้ลมร้อนเป็นเวลา 2 นาที พอคอบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟ 2 นาที จากนั้นให้ลมร้อนอีก 2 นาที พอคอบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟอีก 2 นาที ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

3.4.9 ทำการทดสอบยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 2,500 และ 3,300 กรัม ดำเนินการเช่นข้อ 8 ไปจนเสร็จสิ้นการทดลอง เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง จากนั้นดำเนินการเช่นข้อ 7

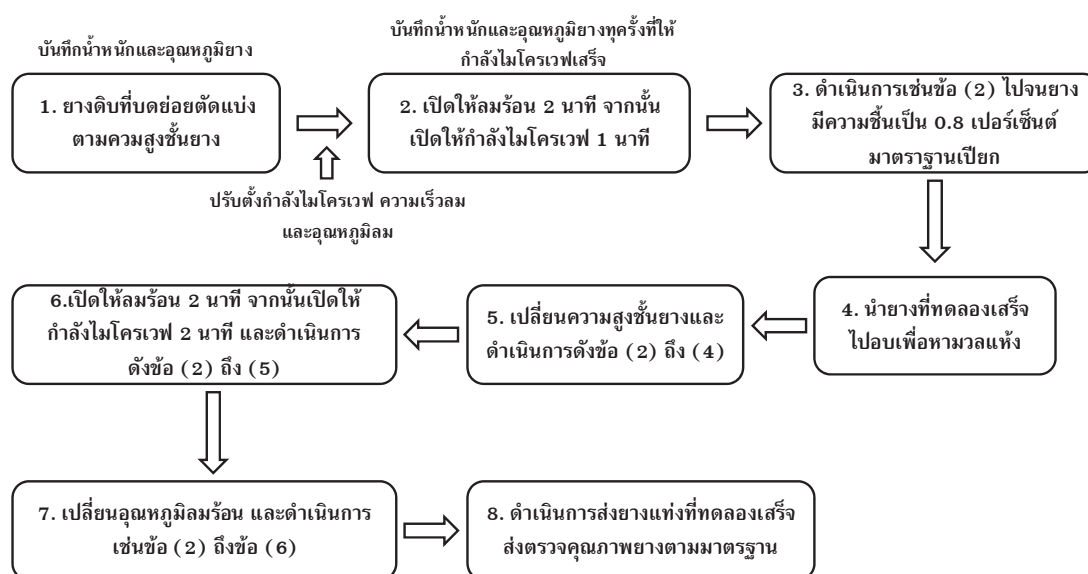
3.4.10 ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิลมร้อนเป็น 110 องศาเซลเซียส ตั้งความเร็วลมเป็น 0.5 เมตรต่อวินาที และวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

3.4.11 นำยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 1,500 กรัม ไปดำเนินการเช่นข้อ 3 จากนั้นนำยางไปอบ โดยมีวิธีการคือ ให้ลมร้อนเป็นเวลา 2 นาที พอคอบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟ 1 นาที จากนั้นให้ลมร้อนอีก 2 นาที พอคอบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟอีก 1 นาที ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

3.4.12 ทำการทดสอบยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 2,500 แล 3,300 กรัม ดำเนินการเช่นข้อ 11 ไปจนเสร็จสิ้นการทดลอง เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง จากนั้นดำเนินการเช่นข้อ 7

3.4.13 นำยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 1,500 กรัม ไปดำเนินการเช่นข้อ 3 อบ จากนั้นนำยางไปอบ โดยมีวิธีการคือ ให้ลมร้อนเป็นเวลา 2 นาที พอครบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟ 2 นาที จากนั้นให้ลมร้อนอีก 2 นาที พอครบ 2 นาที เปิดให้ไมโครเวฟอีก 2 นาที ทำการบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิยาง

3.4.14 ทำการทดสอบยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร ขนาดน้ำหนัก 2,500 และ 3,300 กรัม ดำเนินการเช่นข้อ 13 ไปจนเสร็จสิ้นการทดลอง เมื่อยางมีความชื้นลดลงใกล้เคียง 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำต่อความสูงชั้นยาง จากนั้นดำเนินการ เช่นข้อ 7



ภาพที่ 3.13 แผนผังการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

3.5 ค่าชี้ผลของการศึกษา

สำหรับการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน กำหนดให้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ

3.5.1 อุณหภูมิภายในของยาง

3.5.2 ความชื้นที่เปลี่ยนไปของยางแท่ง

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือแห้ง สำหรับความชื้นที่ใช้ในการบอกค่ามาตรฐานของยางแท่งคือ ความชื้นมาตรฐานเปียกซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24)

$$M_w = \left(\frac{w - d}{w} \right) \quad (24)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis), %

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ, g

เมื่อ d คือ มวลวัสดุแห้ง, g

3.5.3 เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

3.5.4 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ณ ตำแหน่งเวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25)

$$E = E_m + E_h \quad (25)$$

เมื่อ E คือ พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ/kg_{H₂O})

เมื่อ E_m คือ พลังงานจำเพาะของไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ/kg_{H₂O}) ดังรายละเอียดของสมการที่ (23)

เมื่อ E_h คือ พลังงานจำเพาะของความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ (MJ/kg_{H₂O})

$$E_h = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)t}{1000 m_{\text{evap}}} \quad (26)$$

h_1 คือ เอนทัลปีของอากาศก่อนเข้าห้องอุ่นอากาศ (kJ/kg dry air)

h_2 คือ เอนทัลปีของอากาศหลังผ่านห้องอุ่นอากาศ (kJ/kg dry air)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg dry air/hr)

m_{evap} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg water evaporated)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

4. ประเมินผลคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือ ต้องการตรวจสอบคุณภาพของยางที่ได้จากการศึกษาที่ 2 และ 3 ในหน้าที่ 53 และ 57 ว่ามีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่

4.1 วิธีดำเนินการทดสอบ

การประเมินผลคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ไม่สามารถที่จะทำการประเมินเองได้ เนื่องจากว่าไม่มีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพยางแท่ง ดังนั้นจึงต้องดำเนินการส่งให้สถาบันวิจัยยาง ส่วนอุตสาหกรรมยาง ซึ่งเป็นหน่วยงานวิจัยและให้บริการสำหรับบุคคลหรือหน่วยงานภายนอกที่ต้องการทดสอบคุณภาพยางแท่ง โดยนำชิ้นยางแท่งจากการศึกษาที่ 2 และ 3 ดังกล่าว รวมจำนวน 45 ตัวอย่างให้ทำการทดสอบคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ต่อไป

4.2 ค่าชี้ผลของการศึกษา

การประเมินผลคุณภาพของยางแท่งที่ได้จากการทดสอบ ตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ซึ่งมีค่ากำหนดที่ชัดเจนไว้แล้ว ดังนั้นค่าชี้ผลของการศึกษานี้ จึงยึดตามค่ากำหนดของมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดและวิธีการทดสอบอยู่ในบทที่ 2 หน้า 15)

- (1) ปริมาณสิ่งสกปรก
- (2) ปริมาณสิ่งระเหย
- (3) ปริมาณเถ้า
- (4) ปริมาณไนโตรเจน
- (5) ความอ่อนตัวเริ่มแรก
- (6) ดัชนีความอ่อนตัว
- (7) ความหนืด

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ มีวิธีการทดสอบตามที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 การรายงานผลการทดสอบจึงแบ่งได้เป็น 5 หัวข้อ คือ ผลของการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ ผลการศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ผลการประเมินผลคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

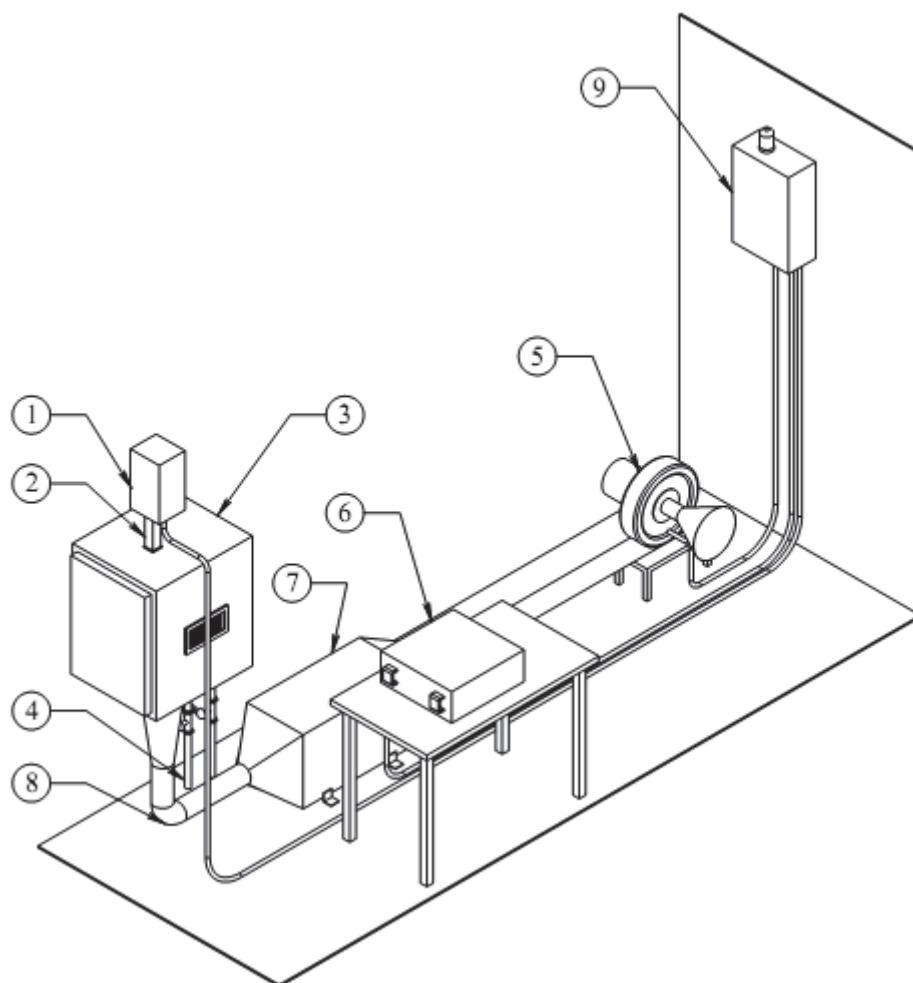
1. ผลของการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

ผลของการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการ ทำให้ได้เครื่องอบไมโครเวฟที่มีขนาดกำลังวัตต์สูง สามารถอบแห้งยางแท่งที่มีความหนาใกล้เคียงกับยางแท่งในระดับอุตสาหกรรมได้ เครื่องอบแห้งที่ได้มีการควบคุมการให้กำลังคลื่นไมโครเวฟผ่านชุดควบคุมกำลัง เตาอบไมโครเวฟมีขนาดความจุ 76 ลิตร ดัดแปลงต่อกับท่อลมร้อนด้านล่างของห้องอบ สามารถควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของลมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 หลังจากดำเนินการสร้างเครื่องตามทีออกแบบแล้วเสร็จ มีการทดสอบด้านความปลอดภัย (ทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นจากภายในตู้ภายนอกเตา) การทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบและการวัดกำลังของไมโครเวฟ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบด้านความปลอดภัย พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นจากภายในตู้ภายนอกเตามีค่าที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเป็น 2.10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ ค่าที่วัดได้ต้องไม่เกิน 10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลโดยละเอียดแสดงในตารางที่ ข. 1 (ภาคผนวก ข)

2. การทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบ พบว่าค่าที่วัดได้แล้วนำไปแทนตามสมการที่ (5) ได้ค่าเป็น 70.92 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าปกติ เพราะมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้เป็น 65% ของค่ามาตรฐาน ได้ผลโดยละเอียดแสดงในตารางที่ ข. 2 (ภาคผนวก ข)

3. การวัดกำลังของไมโครเวฟ ค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จะต้องมีความมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ของกำลังวัตต์ที่ระบุ เตาซึ่งอบที่ทำการออกแบบมีขนาดกำลัง 2000 วัตต์ ผลจากการทดสอบได้ค่ากำลังเป็น 1702.63 วัตต์ จึงถือว่าปกติเป็นไปตามมาตรฐาน ได้ผลโดยละเอียดแสดงในตารางที่ ข. 3 (ภาคผนวก ข)



ภาพที่ 4.1 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของหมายเลขต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

รายการ	รายละเอียดต่าง ๆ
1. ส่วนกำเนิดคลื่น	แมกนีตรอน ขนาดกำลัง 2,000 วัตต์ความถี่ 2.45 จิกะเฮิรต
2. ท่อนำคลื่น	รูปทรงสี่เหลี่ยม
3. ห้องอบ	ขนาด 40x38x50 เซนติเมตร ด้านบนต่อกับแมกนีตรอน ด้านล่างต่อกับท่อลมร้อน
4. ท่อน้ำเข้า-ออก	ต่อน้ำเข้า-ออก เพื่อระบายความร้อนของแมกนีตรอน
5. ชุดเป่าลมร้อน	พัดลมแบบหอยโข่ง ขนาด 21 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ความเร็วรอบ 2950 รอบต่อนาที มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1.5 กิโลวัตต์
6. ส่วนควบคุมกำลัง	ควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟ
7. ฮีทเตอร์	ประกอบด้วยแท่งทำความร้อนขนาด 9 กิโลวัตต์
8. ท่อลมร้อน	ส่งลมร้อนเข้าสู่ห้องอบ
9. ชุดควบคุมอุณหภูมิ	ปรับตั้งอุณหภูมิได้สูงสุด 140 องศาเซลเซียส ความละเอียด ± 0.1

2. ผลการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ

ผลการศึกษาทำให้ทราบผลของความสูงชั้นยางที่มีต่อ อุณหภูมิภายใน ความชื้น เวลาการอบแห้ง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

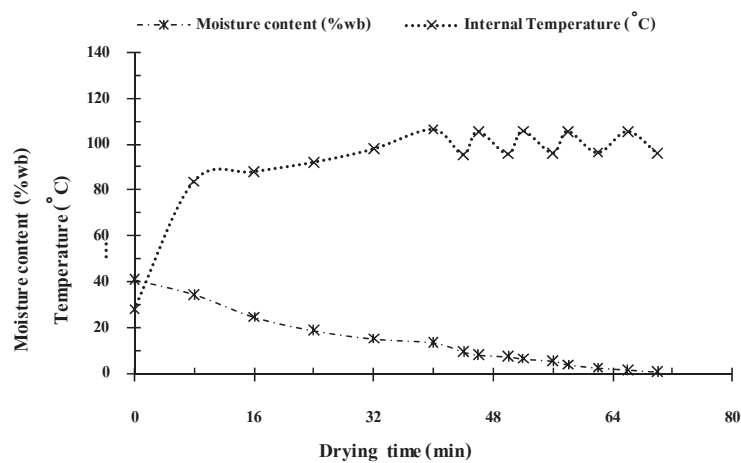
2.1 ผลของความสูงชั้นยางของยางแท่งที่มีต่ออุณหภูมิภายใน ความชื้น และเวลาในการอบแห้ง

ผลการศึกษาการอบแห้งยางแท่งที่ความสูงชั้นยางต่างๆ เมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิภายใน โดยการ เปิด-ปิดให้กำลังไมโครเวฟสามารถแสดงผลของอุณหภูมิ ความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละความสูงชั้นยางให้อยู่ในกราฟเดียวกันได้ดังภาพที่ 4.2 ถึงภาพที่ 4.4

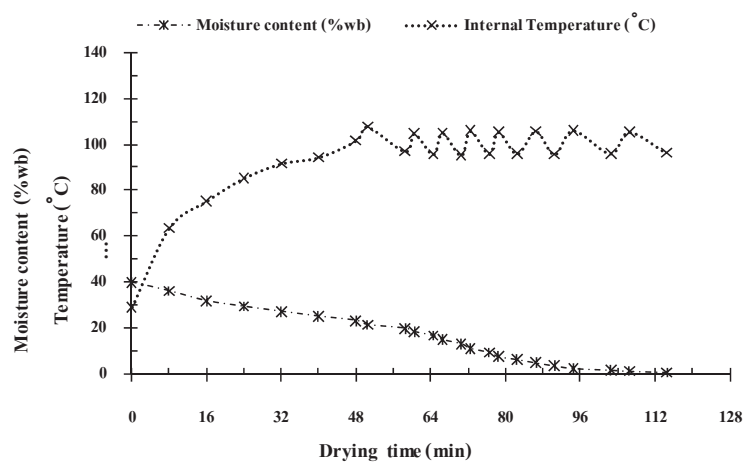
การอบแห้งยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.2 อุณหภูมิของยางในช่วง 8 นาทีแรก เพิ่มขึ้นรวดเร็วเป็น 83.7 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเป็น 106.3 องศาเซลเซียส ที่นาทีที่ 40 และหลังจากเปิด-ปิดให้กำลังไมโครเวฟจะมีค่าขึ้นลงในช่วงอุณหภูมิ 95–105 องศาเซลเซียส และอุณหภูมินับตั้งแต่เวลา 40 นาที นาที ถึงสิ้นสุดการทดลองเฉลี่ยเป็น 100.8 องศาเซลเซียส ส่วนความชื้นในช่วง 24 นาทีแรกลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะหลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำ จากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ จนถึงความชื้นประมาณ 0.67 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก เพราะการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟลดลง และเวลาอบแห้งรวม 70 นาที คิดเป็นเวลาให้ไมโครเวฟ 50 นาที และเวลาลดอุณหภูมิ 20 นาที

การอบแห้งยางแท่งความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.3 อุณหภูมิของยางในช่วง 16 นาทีแรก เพิ่มขึ้นรวดเร็ว เป็น 75.3 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องใกล้เคียง 105 องศาเซลเซียส ที่นาทีที่ 50.5 และหลังจากนั้นมีค่าขึ้นลงในช่วงอุณหภูมิ 95–105 องศาเซลเซียส และอุณหภูมินับตั้งแต่เวลา 40 นาที นาที ถึงสิ้นสุดการทดลองเฉลี่ยเป็น 100.8 องศาเซลเซียส ส่วนความชื้นในช่วง 50.5 นาทีแรกลดลงค่อนข้างคงที่ในอัตราที่ต่ำกว่าการลดลงของความชื้นที่เบด 10 เซนติเมตร เพราะพลังงานส่วนใหญ่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในของยาง แต่หลังจากนั้นความชื้นลดลงรวดเร็วขึ้นจนถึงนาทีที่ 72.5 เพราะพลังงานไมโครเวฟถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำมากขึ้น แต่หลังจากนั้นความชื้นลดลงอย่างช้าๆ จนถึงความชื้นประมาณ 0.48 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก รวมใช้เวลาอบแห้ง 114.5 นาที คิดเป็นเวลาให้ไมโครเวฟ 70.5 นาที และเวลาลดอุณหภูมิ 44 นาที

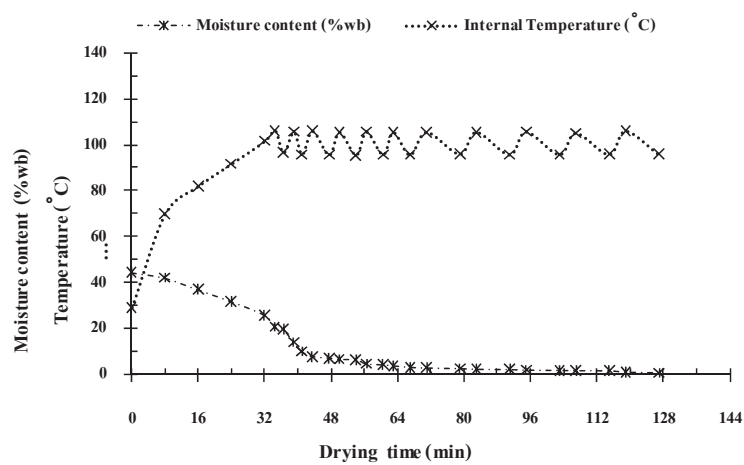
การอบแห้งยางแท่งความสูงชั้นยาง 20 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.4 อุณหภูมิของยางในช่วง 16 นาทีแรก เพิ่มขึ้นรวดเร็ว เป็น 81.9 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มขึ้นรวดเร็วและต่อเนื่องจนเป็น 106.3 องศาเซลเซียส ที่นาทีที่ 34.5 และหลังจากนั้นมีค่าขึ้นลงในช่วงอุณหภูมิ 95–105 องศาเซลเซียส และอุณหภูมินับตั้งแต่เวลา 34.5 นาที นาที ถึงสิ้นสุดการทดลองเฉลี่ยเป็น 100.7 องศาเซลเซียส ส่วนความชื้นในช่วง 32 นาทีแรกลดลงอย่างลดลงค่อนข้างคงที่ แต่หลังจากนั้นความชื้นลดลงรวดเร็วขึ้นจนถึงนาทีที่ 39 เพราะพลังงานไมโครเวฟถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำมากขึ้น แต่หลังจากนั้นความชื้นลดลงอย่างช้าๆ จนถึงความชื้นประมาณ 0.46 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก รวมใช้เวลาอบแห้ง 127 นาที คิดเป็นเวลาให้ไมโครเวฟ 67 นาที และเวลาลดอุณหภูมิ 60 นาที



ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตามเวลาการอบแห้งของยางแท่งความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร



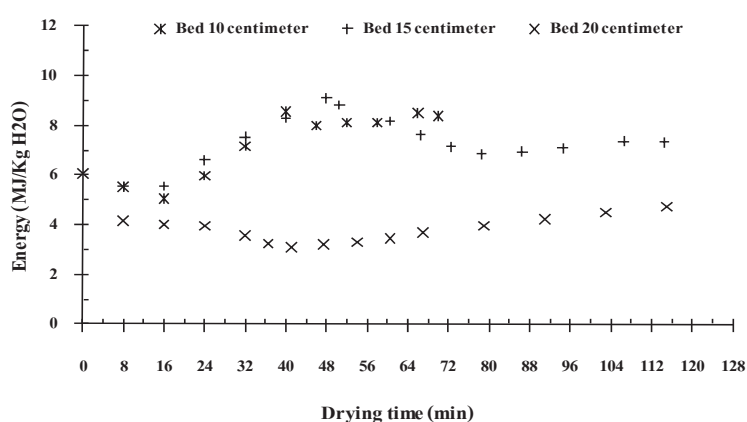
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตามเวลาการอบแห้งของยางแท่งความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตามเวลาการอบแห้งของยางแท่งความสูงชั้นยาง 20 เซนติเมตร

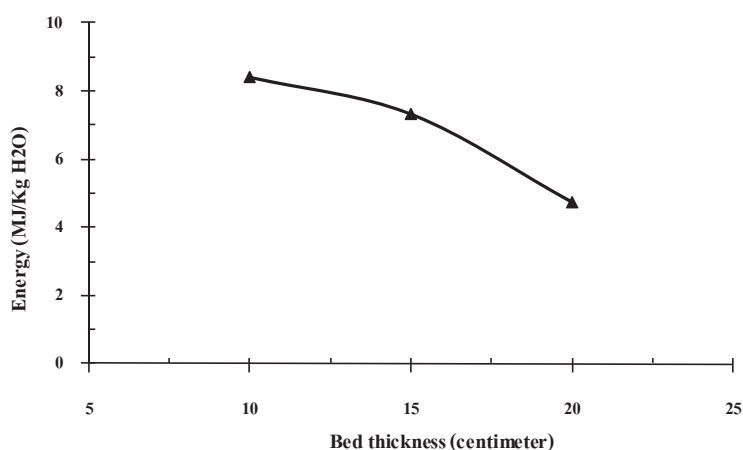
2.2 ผลของความสูงชั้นยางของยางแท่งที่มีต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ภาพที่ 4.5 แสดงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่งที่มีความสูงชั้นยางต่างๆ เห็นได้ว่า ที่ความสูงชั้นยางของยางน้อย พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ณ เวลาใด ๆ มีค่าสูงกว่า เนื่องจากว่าน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในเนื้อยางจะลดลงเร็วมาในช่วงแรก ทำให้ในช่วงหลังเกิดการสูญเสียเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมากเพราะน้ำอยู่ภายในเหลือน้อยมีการดูดกลืนคลื่นน้อยมาก แต่เมื่อความสูงชั้นยางของยางเพิ่มขึ้น น้ำภายในของชั้นยางจะเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้มากขึ้น ขณะนี้ยังคงระเหยผ่านความหนาของเนื้อยางออกมาได้ แม้เวลาการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น แต่พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งก็ลดลงได้



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งตามเวลาการอบแห้งของยางแท่ง ความสูงชั้นยางต่าง ๆ

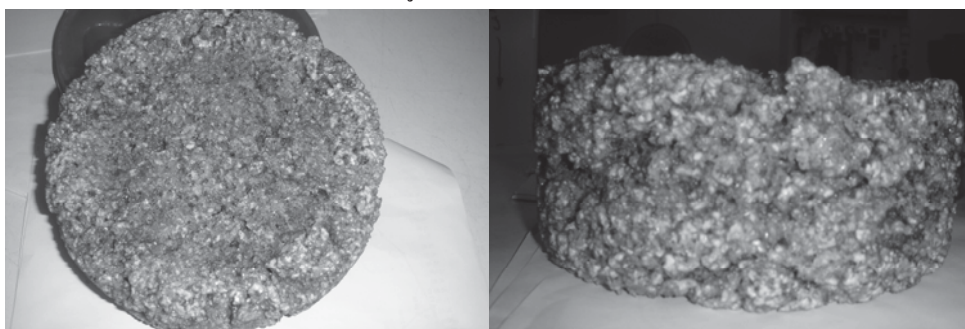
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ณ เวลาอบแห้ง ที่ผลิตที่มีความชื้นประมาณ 0.80 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งยางแท่งที่มีความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 8.39 7.31 และ 4.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหยตามลำดับ ดังภาพที่ 4.6 เห็นได้ชัดว่าความสิ้นเปลืองลดลงตามความสูงชั้นยาง



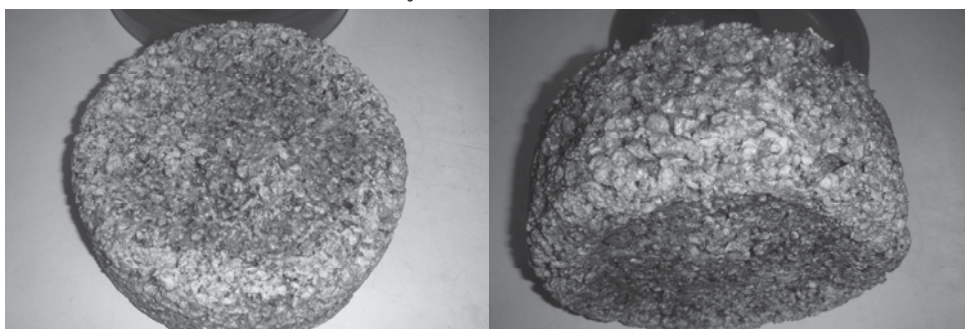
ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งยางแท่งความสูงชั้นยางต่าง ๆ

จากผลการทดลองข้างต้น เห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ ร่วมกับการใช้ลมธรรมชาติเพื่อลดอุณหภูมิของ สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในยางให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ เพราะสามารถลดความชื้นยางให้เหลือ 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกได้ และพลังงานที่ใช้ก็ลดลง (ตามความสูง ชั้นยาง) เป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามที่ความสูงชั้นยางมากขึ้นจะพบว่ามีปัญหาจุดขาว (ยางไม่สุก) ดังภาพ ที่ 4.7

ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร



ความสูงชั้นยาง 20 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.7 ปริมาณจุดขาวของของยางที่ความสูงชั้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง

ภาพที่ 4.7 แสดงภาพจุดขาวบริเวณผิวด้านบนและด้านข้างยางแท่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองของยางที่ ความสูงชั้นยาง 15 และ 20 เซนติเมตร เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟไม่ทำให้ยางสุกได้ทั้งหมด เพราะพลังงาน ไมโครเวฟส่วนใหญ่ใช้ในการเร่งการแพร่กระจายของความชื้นจึงมีพลังงานไมโครเวฟส่วนน้อยที่ใช้ในการทำให้ ยางสุก ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหา จึงนำลมร้อนเข้ามาช่วยในการอบแห้งยางแท่ง เป็นตัวเร่งการสุกของยาง

3. ผลการศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

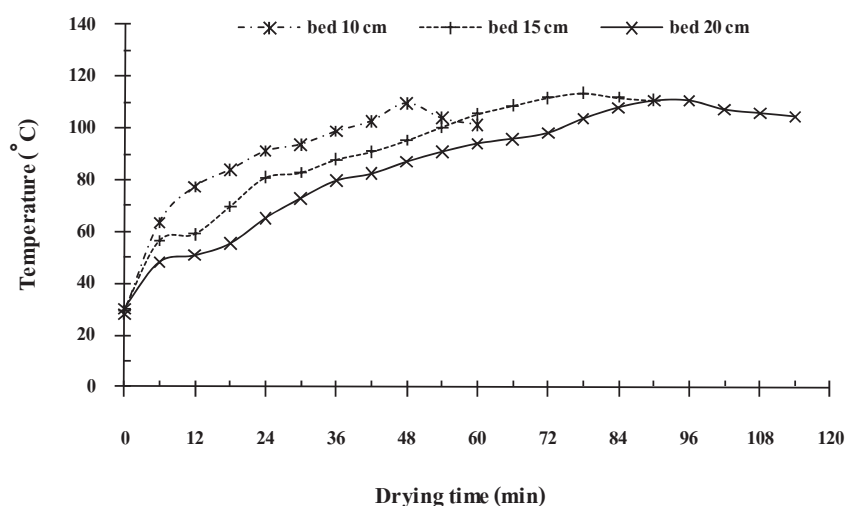
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ 3 ปัจจัย คือ ความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลา การให้ไมโครเวฟ ต่อ อุณหภูมิภายในของยาง ความชื้น เวลา และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่ง ให้มี ความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง 0.8 % เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สำหรับรายละเอียดของผลศึกษามีดังนี้

3.1 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของยาง

ผลการศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิภายในยางแท่ง แสดงให้เห็นว่าทั้งความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของยาง สำหรับรายละเอียดทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของยางดูได้ที่ ภาคผนวก ค

3.1.1 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง

ผลของความสูงชั้นยางที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งผลการศึกษาได้ถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 1 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.8 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของยางที่ผ่านการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ความสูงชั้นยางทั้ง 3 มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุด รองลงมาคือ 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุดเพราะเมื่อให้กำลังวัตต์ไมโครเวฟคงที่แต่ความสูงชั้นยางของยางเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนความเข้มของกำลังวัตต์ต่อน้ำหนักยางลดลงส่งผลให้อุณหภูมิภายในยางเพิ่มขึ้นช้าและช่วงท้ายของการอบแห้งที่ทุกความสูงชั้นยางอุณหภูมิภายในยางค่อยๆ ลดต่ำลง เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในยางเริ่มเหือดน้อยทำให้การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้น้อยลง



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชั้นยางต่างๆ สำหรับเวลาการให้ลมร้อน 2 นาทีและไมโครเวฟ 1 นาที ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

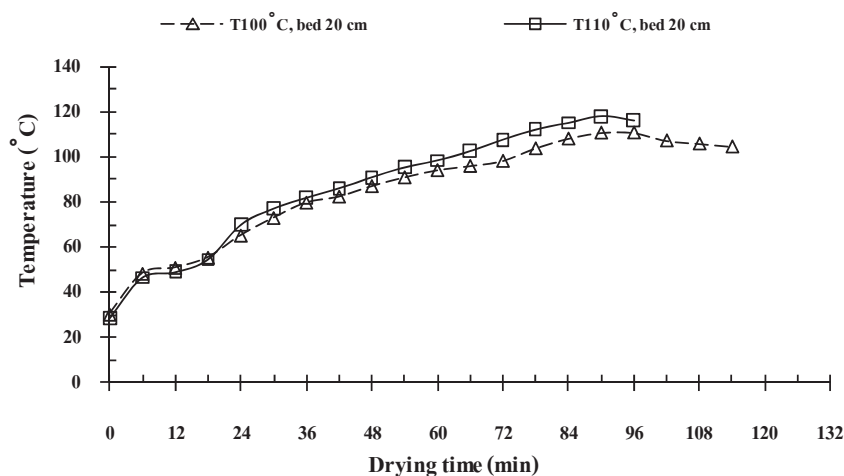
3.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน

ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งได้ผลการศึกษาทั้งหมดในภาพที่ ค. 1.1 และ ค. 1.2 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.9 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของยางที่ผ่านการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดการทดลอง พบว่าอุณหภูมิลมร้อนที่แต่ละอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิภายใน

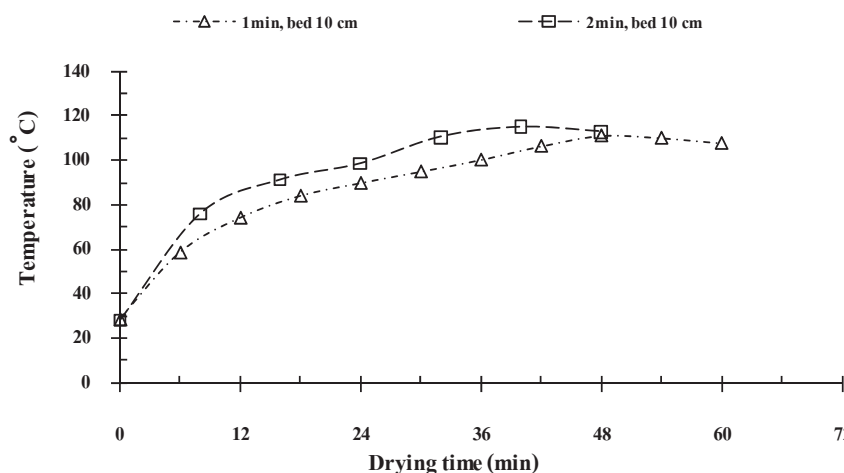
ยางทุกลความสูงชันยางเปลี่ยนแปลงโดยมีการเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน โดยเฉพาะที่ความสูงชันยาง 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส ทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในยางเพิ่มขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส อย่างเห็นได้ชัดเพราะการถ่ายโอนความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกิดได้มากและเร็วกว่า

3.1.3 อิทธิพลของเวลาการให้ไมโครเวฟ

ผลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแห้งได้ผลการศึกษาถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 1.3 และ ค. 1.4 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.10 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของยางที่ผ่านการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเวลาการให้ไมโครเวฟแตกต่างกันทำให้ อุณหภูมิภายในยางเปลี่ยนแปลงโดยมีการเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางสูงกว่าเวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที ทุกความสูงชันยาง



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแห้งแต่ละอุณหภูมิลมร้อน สำหรับความสูงชันยาง 20 เซนติเมตร เวลาให้ลมร้อน 2 นาที และไมโครเวฟ 1 นาที



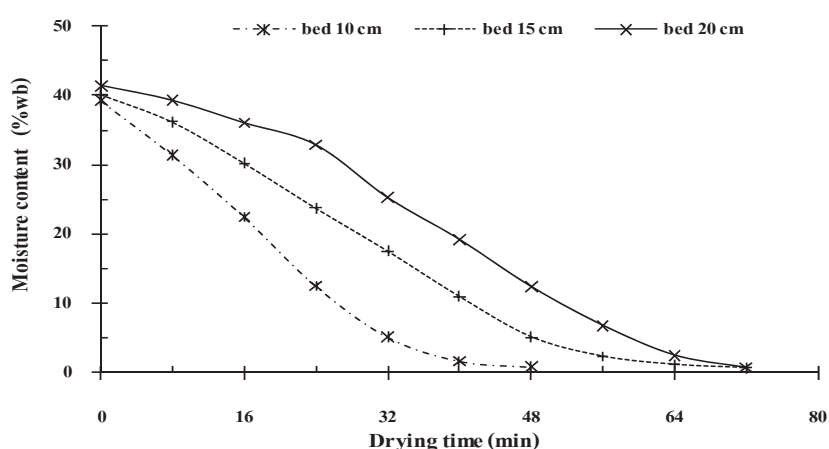
ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูงชันยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส

3.2 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่มีผลต่อความชื้นและเวลาการอบแห้ง

จากการศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแท่ง เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความชื้นสุดท้าย 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก แสดงให้เห็นว่าความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้น การลดลงของความชื้นเกิดได้ช้าลง จึงต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น สำหรับรายละเอียดทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งดูได้ที่ ภาคผนวก ก

3.2.1 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง

ผลการศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นยางที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแท่งกับเวลาในการอบแห้ง ได้ถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 2 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.11 แสดงถึงค่าความชื้นของยางแท่งที่ผ่านการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดการทดลองที่ความชื้นสุดท้าย 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่าการลดลงของความชื้นที่ความสูงชั้นยางทั้ง 3 ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุด รองลงมาคือ 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้นการลดลงของความชื้นช้าลง เนื่องจากน้ำหนักของยางที่อบแห้งโดยรวมเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่ต้องระเหยมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้ง สำหรับยางที่ความสูงชั้นยางต่าง ๆ

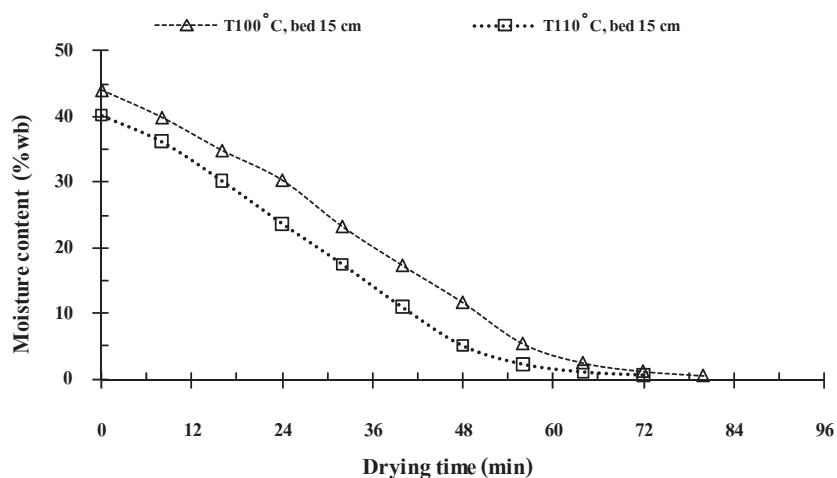
อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส และเวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที

3.2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน

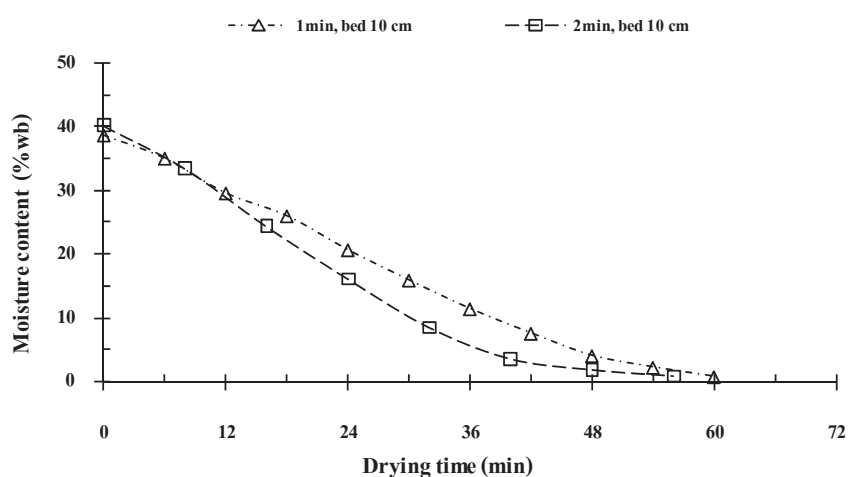
ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแท่งกับเวลาในการอบแห้ง ได้ถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 2.1 และ ค. 2.2 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.12 แสดงถึงค่าความชื้นของยางแท่งที่ผ่านการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดการทดลองที่ความชื้นสุดท้าย 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่า อุณหภูมิลมร้อนที่ 110 องศาเซลเซียส ทำให้การลดลงของความชื้นเร็วกว่าอุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียสอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร ใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุด รองลงมาคือ 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.2.3 อิทธิพลของเวลาการให้ไมโครเวฟ

ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแท่งกับเวลาในการอบแห้ง ได้ถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 2.3 และ ค. 2.4 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.13 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแท่งที่ผ่านการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงสิ้นสุดการทดลองที่ความชื้นสุดท้าย 0.8 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่าเวลาการให้ไมโครเวฟแตกต่างกันทำให้ความชื้นของยางเปลี่ยนแปลงโดยมีการลดลงแตกต่างกัน โดยที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที การลดลงของความชื้นเร็วสุด ใช้เวลาการอบแห้งน้อยกว่าเวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที ทุกความสูงชั้นยาง



ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิลมร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที



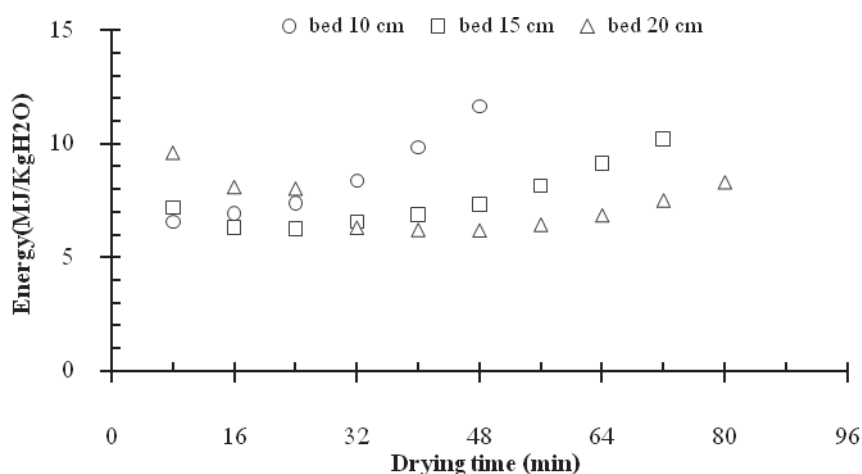
ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส

3.3 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

ผลการศึกษาความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่ง เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความชื้นสุดท้าย 0.8 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก แสดงให้เห็นว่าความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ มีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้น พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง สำหรับรายละเอียดทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งดูได้ที่ ภาคผนวก

3.3.1 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง

ผลการศึกษาอิทธิพลของความสูงชั้นยางที่มีต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยาง ได้ถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 3 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.14 แสดงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่งที่มีความสูงชั้นยางต่างๆ เห็นได้ว่า พลังงานที่ใช้ในมีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้นจาก 10 เซนติเมตร เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความสูงชั้นยาง 20 เซนติเมตร พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางน้อยที่สุด แม้ว่าเวลาการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น



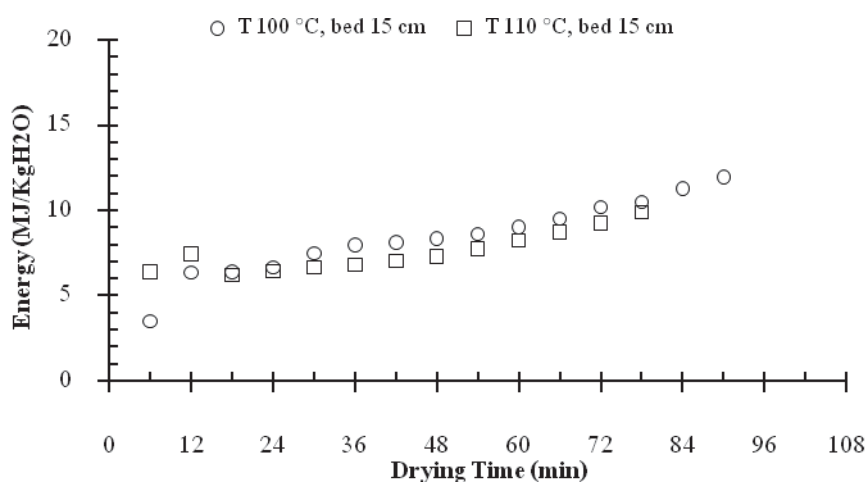
ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตามเวลาการอบแห้งยางที่มีความสูงชั้นยางต่างๆ สำหรับอุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที

3.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน

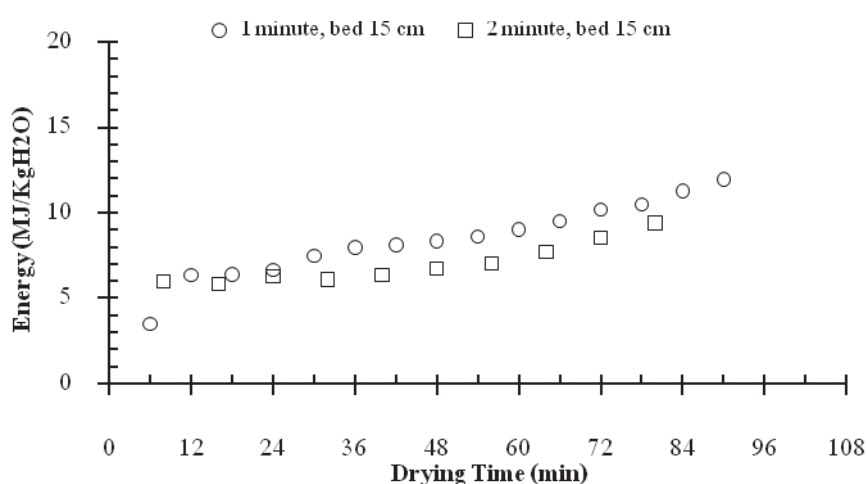
ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยาง ได้ถูกแสดงทั้งหมดในภาพที่ ค. 3.1 และ 3.2 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.15 แสดงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่งที่อุณหภูมิลมร้อนต่างกันที่ความหนา 15 เซนติเมตร เห็นได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 100 เป็น 110 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเพราะการระเหยน้ำที่ผิวบนอกเกิดได้มากขึ้นตามพลังงานความร้อนที่มากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจึงทำให้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานลดลง

3.3.3 อิทธิพลของเวลาการให้ไมโครเวฟ

ผลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยาง ได้ผลการศึกษาทั้งหมดในภาพที่ ค. 3.3 และ ค. 3.4 (ภาคผนวก ค) สำหรับภาพที่ 4.16 แสดงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่งที่อุณหภูมิร้อน 100 องศาเซลเซียส ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร เห็นได้ว่า ที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางน้อยกว่าที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที เพราะการแพร่ของน้ำจากภายในยางสู่ภายนอกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการให้ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที



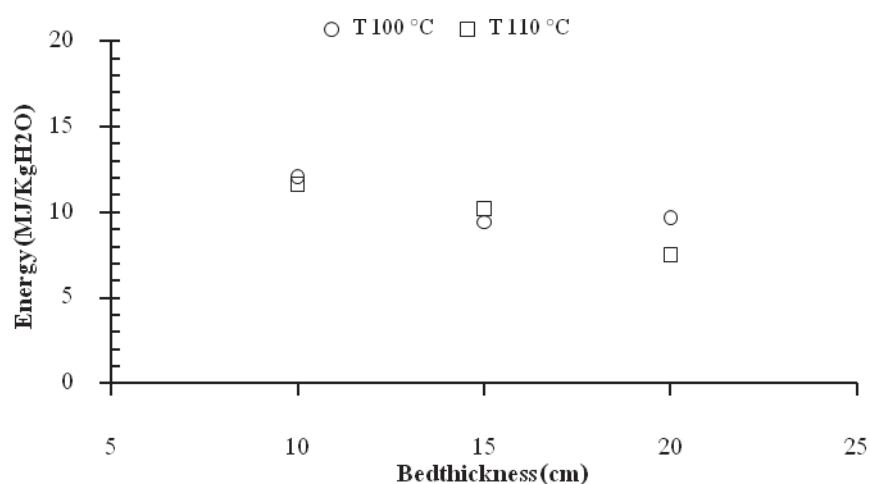
ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตร อุณหภูมิร้อน 100 องศาเซลเซียส

3.4 อิทธิพลของความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ณ เวลาอบแห้ง ที่ผลผลิตมีความชื้นประมาณ 0.80 เปอร์เซนต์มาตรฐานเปียก จากผลการทดลองมีแนวโน้มว่าความสิ้นเปลืองลดลงตามความสูงชั้นยางสำหรับรายละเอียดทั้งหมดดูได้ที่ภาคผนวก ก

3.4.1 อิทธิพลของความสูงชั้นยางและอุณหภูมิลมร้อน

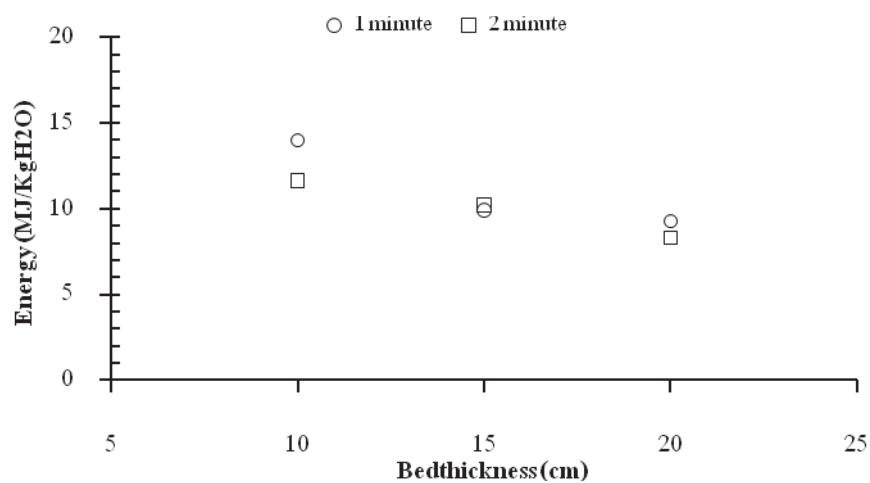
ผลของความสูงชั้นยางและอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งยางแท่งที่ความสูงชั้นยางต่าง ๆ เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ 2 นาที่ และอุณหภูมิลมร้อน 100 และ 110 องศาเซลเซียส ถูกแสดงในภาพที่ 4.17 พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งยาง มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงชั้นยางเพิ่มขึ้นจาก 10 เซนติเมตร เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร อย่างเห็นได้ชัด และที่ความสูงชั้นยาง 20 เซนติเมตร ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งยางน้อยที่สุด และผลของการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 100 เป็น 110 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงด้วย



ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งยางแท่งที่ความสูงชั้นยางและอุณหภูมิลมร้อนต่าง ๆ เมื่อให้ไมโครเวฟ 2 นาที่

3.4.2 อิทธิพลของเวลาการให้ไมโครเวฟ

ผลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่งที่อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส ได้ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.18 เห็นได้ว่า ที่ทุกความสูงชั้นยางที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที่ มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าเวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที่ ยกเว้นที่ความสูงชั้นยาง 15 เซนติเมตรมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง และเวลาให้ไมโครเวฟต่าง ๆ เมื่ออบยางในอุณหภูมิความร้อน 110 องศาเซลเซียส

4. ผลการประเมินคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20

การศึกษาการประเมินผลคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 เพื่อต้องการทราบว่ายางที่ได้จากการทดลองมีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่ โดยส่งชั้นยางในแต่ละขนาดความสูงชั้นยาง อุณหภูมิความร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟ หลังจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมดา และไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่ได้จากการทดลองที่ 2 และ 3 ให้กับสถาบันวิจัยยาง ส่วนอุตสาหกรรมยาง ทำการทดสอบคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ซึ่งสมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ปริมาณสิ่งสกปรก ปริมาณสิ่งระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณไนโตรเจน ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก ดัชนีความอ่อนตัว และความหนืด ผลการทดสอบสมบัติ โดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ง และเมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานยางแท่ง STR 20 ได้ผลดังแสดงในตารางที่

4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการประเมินคุณภาพยางที่ได้จากการทดสอบกับค่ามาตรฐานยางแท่ง
(ค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำการทดสอบ)

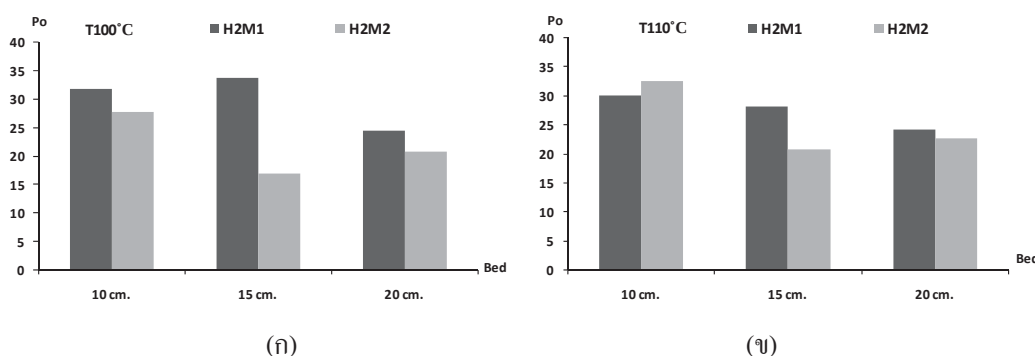
ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ						
	ปริมาณสิ่งสกปรก	ปริมาณสิ่งระเหย	ปริมาณเถ้า	ปริมาณไนโตรเจน	ความอ่อนตัว เริ่มแรก	ดัชนี ความอ่อนตัว	ความหนืด
	(% โดยน้ำหนัก)	(% โดยน้ำหนัก)	(% โดยน้ำหนัก)	(% โดยน้ำหนัก)	(Po)	(PRI)	ML(1'+4'')100 °C
ค่ามาตรฐาน	0.16	0.8	0.8	0.6	30	40	–
1.Hot air 2 min Microwave 1 min 100 °C							
เบด 10 cm	0.025	0.37	0.27	0.27	31.7	56.3	72.7
เบด 15 cm	0.066	0.41	0.27	0.26	33.7	61.4	75.5
เบด 20 cm	0.023	0.34	0.31	0.28	24.5	66.5	59.8
2.Hot air 2 min Microwave 2 min 100 °C							
เบด 10 cm	0.021	0.34	0.29	0.27	27.7	61.0	68.1
เบด 15 cm	0.064	0.35	0.32	0.27	17.0	63.6	60.5
เบด 20 cm	0.031	0.31	0.27	0.28	20.8	64.1	56.8
3.Hot air 2 min Microwave 1 min 110 °C							
เบด 10 cm	0.022	0.34	0.27	0.27	30.0	53.8	70.2
เบด 15 cm	0.013	0.35	0.29	0.25	28.2	59.2	67.9
เบด 20 cm	0.021	0.34	0.29	0.27	24.2	64.8	58.3
4.Hot air 2 min Microwave 2 min 110 °C							
เบด 10 cm	0.019	0.37	0.28	0.27	32.5	51.3	71.2
เบด 15 cm	0.054	0.32	0.28	0.27	20.8	59.3	49.5
เบด 20 cm	0.036	0.33	0.27	0.27	22.7	62.8	55.3
5.Microwave							
เบด 10 cm	0.026	0.35	0.26	0.28	29.3	58.8	67.7
เบด 15 cm	0.021	0.32	0.27	0.25	25.0	58.9	58.2
เบด 20 cm	0.016	0.34	0.27	0.27	32.2	59.3	69.9

ซึ่งผลการประเมินคุณภาพยาง พบว่า ยางแท่งทุกขนาดการทดลองมีปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน 0.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณสิ่งระเหยไม่เกิน 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าไม่เกิน 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนไม่เกิน 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และดัชนีความอ่อนตัวมากกว่า 40 นับได้ว่ามีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกรายการ (ส่วนค่าความหนืดมาตรฐานไม่ได้กำหนด) แต่อย่างไรก็ตามยางแท่งบางส่วนเท่านั้นที่มีค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน กล่าวคือ ยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 10 และ 15 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที ร่วมกับให้ไมโครเวฟ 1 นาที และยางแท่งที่ความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที ร่วมกับการให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที โดยจะกล่าวรายละเอียดของปัจจัยของการศึกษาที่มีต่อความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ต่อไปดังนี้

4.1 ผลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po)

ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) เป็นค่าที่ใช้ประมาณขนาดของโมเลกุลของยาง ยางที่มีค่า Po สูง แสดงว่ามีขนาดโมเลกุลของยางสูง ยางที่ถูกออกซิไดซ์มากจะนุ่ม มีค่า Po ต่ำ (กรณียางที่ทนต่อการถูกออกซิเดชันสูง โมเลกุลของยางจะทนต่อการถูกออกซิไดซ์) หรือเป็นการแสดงความต้านทานของยางดิบ ต่อการแตกหักของโมเลกุลยางที่อุณหภูมิสูง

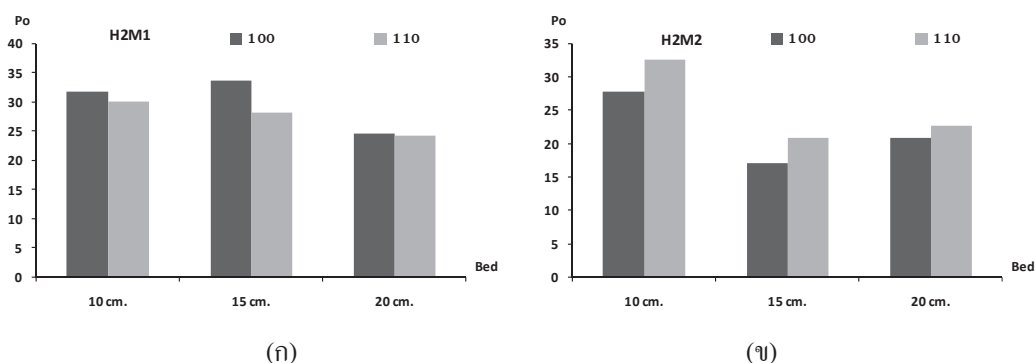
ผลของเวลาการให้ไมโครเวฟ 2 ระดับ คือ 1 และ 2 นาที ที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) แสดงในภาพที่ 4.19 พบว่าที่อุณหภูมิร้อน 100 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.19 ก) และอุณหภูมิร้อน 110 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.19 ข) ทุกความสูงชั้นยางเมื่อเพิ่มเวลาการให้ไมโครเวฟจาก 1 เป็น 2 นาที ทำให้ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ลดลงอย่างชัดเจน (ยกเว้นที่ความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร และอุณหภูมิร้อน 110 องศาเซลเซียส) เพราะพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลทำให้เกิดการออกซิเดชันของโมเลกุลยางมากขึ้น หรือโมเลกุลของยางแตกหักมากขึ้น



ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบผลของเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ที่ความสูงชั้นยางต่าง ๆ

4.2 ผลของอุณหภูมิร้อนที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po)

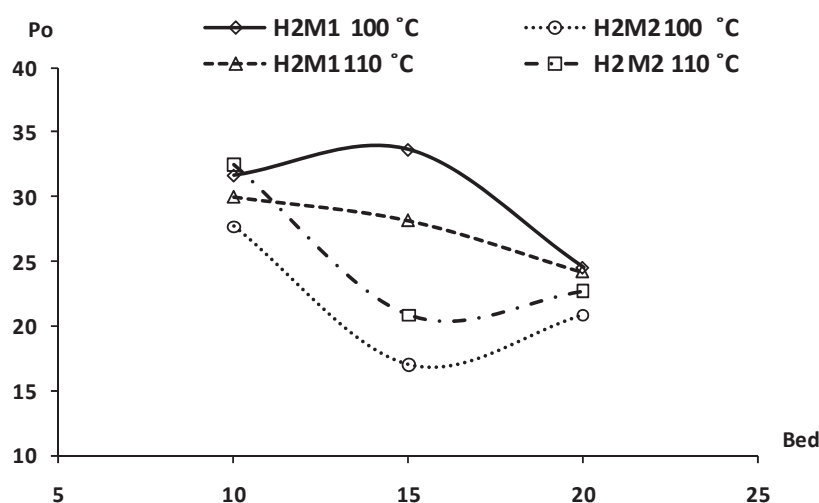
ผลของอุณหภูมิร้อน 2 ระดับ คือ 100 และ 110 องศาเซลเซียส ที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) แสดงในภาพที่ 4.20 พบว่าทุกความสูงชั้นยางที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที (ภาพที่ 4.20 ก) การเพิ่มอุณหภูมิร้อนจาก 100 เป็น 110 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ลดลง เพราะการอบยางที่อุณหภูมิสูง อาจเกิดการออกซิเดชันในโมเลกุลของยางหรือมีการแตกหักของโมเลกุลยาง ทำให้ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ต่ำ แต่การเพิ่มอุณหภูมิร้อนที่มีผลต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ในทิศทางตรงกันข้ามที่เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที (ภาพที่ 4.20 ข) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ อิทธิพลของเวลาการให้ไมโครเวฟมีผลสูงกว่า อิทธิพลของอุณหภูมิร้อน



ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิร้อนที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ที่ความสูงชั้นยางต่าง ๆ

4.3 ผลของความสูงชั้นยางที่มีต่อความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po)

ผลของความสูงชั้นยาง 3 ระดับ คือ 10 15 และ 20 เซนติเมตร ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) แสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าทุกการทดลองค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกของยาง (Po) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความสูงชั้นยางจาก 10 เซนติเมตร เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร เพราะเมื่อยางมีความหนาเพิ่มขึ้นการดูดกลืนพลังงานความร้อนเก็บไว้ในยางมากและเป็นเวลานานเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องใช้เวลานานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ยางเกิดการออกซิเดชันได้มากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบผลของความสูงชั้นยางต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po)

5. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่ปัจจัยการศึกษา 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ความสูงชั้นยาง มี 3 ระดับ ได้แก่ 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน มี 2 ระดับ ได้แก่ 100 และ 110 องศาเซลเซียส และเวลาการให้ไมโครเวฟ มี 2 ระดับ ได้แก่ 1 และ 2 นาที สามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (ตารางที่ 4.3) โดยพิจารณาถึง ความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะในการอบแห้งและคุณภาพยางที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ได้คือ ความสูงชั้นยางยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที โดยมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำพวบน้อยที่สุดคือ 10.30 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย เป็นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไมโครเวฟ 3.56 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย กับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลมร้อน 6.74 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อนที่มีผู้ศึกษามาแล้ว ที่มีผลความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเป็น 22.88 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

ตารางที่ 4.3 สรุปผลค่าที่เหมาะสมในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

ตัวอย่าง	เบด	ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก	ความสิ้นเปลือง พลังงานไมโครเวฟ	ความสิ้นเปลือง พลังงานลมร้อน	ความสิ้นเปลือง พลังงานรวม
		30 (Po)	(MJ/Kg H ₂ O)	(MJ/Kg H ₂ O)	(MJ/Kg H ₂ O)
1.Hot air 2 min Microwave 1 min 100 °C	10 cm	31.7	3.56	6.74	10.30
	15 cm	33.7	3.74	7.72	11.45
2.Hot air 2 min Microwave 1 min 110 °C	10 cm	30.0	3.84	10.21	14.05
3.Hot air 2 min Microwave 2 min 110 °C	10 cm	32.5	4.21	7.46	11.67

อนึ่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตามเงื่อนไขเหมาะสมดังกล่าว เห็นได้ว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไมโครเวฟนี้มีค่าต่ำกว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไมโครเวฟในการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติค่อนข้างมาก จึงนับได้ว่าการนำลมร้อนเข้ามาร่วมกับไมโครเวฟมีส่วนช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานไมโครเวฟได้มาก และยังแก้ปัญหาคาการเกิดจุดขาวของยางได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยเตาไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการประเมินผลคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ดังได้กล่าวผลการศึกษาโดยละเอียดแล้วในบทที่ 4 สามารถสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาต่อไปได้ดังนี้

1. สรุปผลการศึกษา

1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่ออกแบบและสร้างขึ้นใช้สแตนเลสเป็นผนังห้องอบ ซึ่งมีขนาดภายใน กว้าง X ลึก X สูง เป็น 40 X 38 X 50 เซนติเมตร ขนาดความจุ 76 ลิตร ให้กำลังไมโครเวฟสูงสุดเป็น 1,700 วัตต์ ที่ความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ ควบคุมการให้กำลังไมโครเวฟโดยใช้ชุดควบคุมกำลังซึ่งสามารถควบคุมกำลังจาก 0 – 100 เปอร์เซ็นต์ได้ต่อเนื่อง ติดตัวกำเนิดคลื่น (แมกนีตรอน) และใบกววนคลื่นด้านบนของห้องอบ และด้านล่างเชื่อมต่อกับเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมได้ การทดสอบด้านความปลอดภัยพบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย

1.2 การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ

การศึกษารอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมธรรมชาติ เพื่อศึกษาผลของความสัมพันธ์ของที่มีต่อ อุณหภูมิภายใน ความชื้น เวลาการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ที่ความสัมพันธ์ 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิภายในของยางเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียง 105 องศาเซลเซียส การเปิด-ปิดให้กำลังไมโครเวฟสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ คืออุณหภูมิภายในยางที่แต่ละความสัมพันธ์ของมีค่าเฉลี่ยเป็น 100.8 องศาเซลเซียส ส่วนการลดลงของความชื้นที่ความสัมพันธ์ของ 10 เซนติเมตร พบว่า ช่วงแรกลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งต่างจากที่ความสัมพันธ์ของ 15 และ 20 เซนติเมตรคือ ความชื้นในช่วงแรกค่อยๆ ลดลงอย่างคงที่ เพราะพลังงานส่วนใหญ่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในของยาง จากนั้นลดลงค่อนข้างเร็วในระยะเวลาหนึ่ง และหลังจากนั้นจึงลดลงอย่างช้าๆ จนสิ้นสุดการอบแห้ง ทำให้เวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ของที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ การนำไมโครเวฟเข้ามาช่วยอบแห้งยางแท่งมีค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามยางที่ความสัมพันธ์ของ 15 และ 20 เซนติเมตร มีปัญหาเกิดจุดขาวมาก (ยางไม่สุก)

1.3 การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

การศึกษาการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เพื่อศึกษาอิทธิพลของ 3 ปัจจัย คือ ความสูงชั้นยาง อุณหภูมิลมร้อน และเวลาการให้ไมโครเวฟที่มีต่อ อุณหภูมิภายในของยาง ความชื้น เวลา และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยางแท่ง ให้มีความชื้นสุดท้ายของการอบแห้ง 0.8 % เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ความสูงชั้นยางที่เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในของยางมีค่าลดลงและทำให้เวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิลมร้อนมีอัตราการเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 110 องศาเซลเซียส และเวลาการให้ไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 นาที ทำให้อุณหภูมิภายในยางเพิ่มขึ้นได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ลดความชื้นได้เร็วและใช้เวลาการอบแห้งลดลง

ความสูงชั้นยางที่เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 100 เป็น 110 องศาเซลเซียส ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจำเพาะลดลงด้วย และการเพิ่มเวลาให้ไมโครเวฟจาก 1 เป็น 2 นาที ก็ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจำเพาะลดลงอีกด้วย

1.4 การประเมินคุณภาพยางตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20

ยางแท่งที่ได้จากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกการทดลอง นับได้ว่ามีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกรายการ ยกเว้นค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_o) เท่านั้น ที่มีเพียงยางแท่งบางส่วนที่ผ่านมาตรฐาน คือ ยางแท่งที่มีความสูงชั้นยาง 10 และ 15 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลาไมโครเวฟ 1 นาที และยางแท่งที่มีความสูงชั้นยาง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส เวลาให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความสูงชั้นยางจาก 10 เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อนจาก 100 เป็น 110 องศาเซลเซียส เวลาการให้ไมโครเวฟจาก 1 เป็น 2 นาที มีผลต่อการลดลงของค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_o) อย่างเห็นได้ชัด

2. ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาต่อไป

ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาต่อไปสำหรับการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งานต่อไป ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

2.1 ควรมีการศึกษาแบบจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในแท่งยางทดสอบ

2.2 ควรมีการศึกษาแบบจำลองการเกิดความร้อนภายในแท่งยางทดสอบ

2.3 ควรมีการศึกษาแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในแท่งยางทดสอบ

2.4 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยางแท่งมีโอกาสเป็นไปได้ แต่ต้องทำการศึกษาและออกแบบการติดตั้งหัวแม็กนิตรอนไว้ด้านบนของห้องอบแบบอุโมงค์ลมร้อนที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย หรืออาจศึกษาการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียงสำหรับอบแห้งยางแท่งโดยเฉพาะก็ได้

เอกสารอ้างอิง

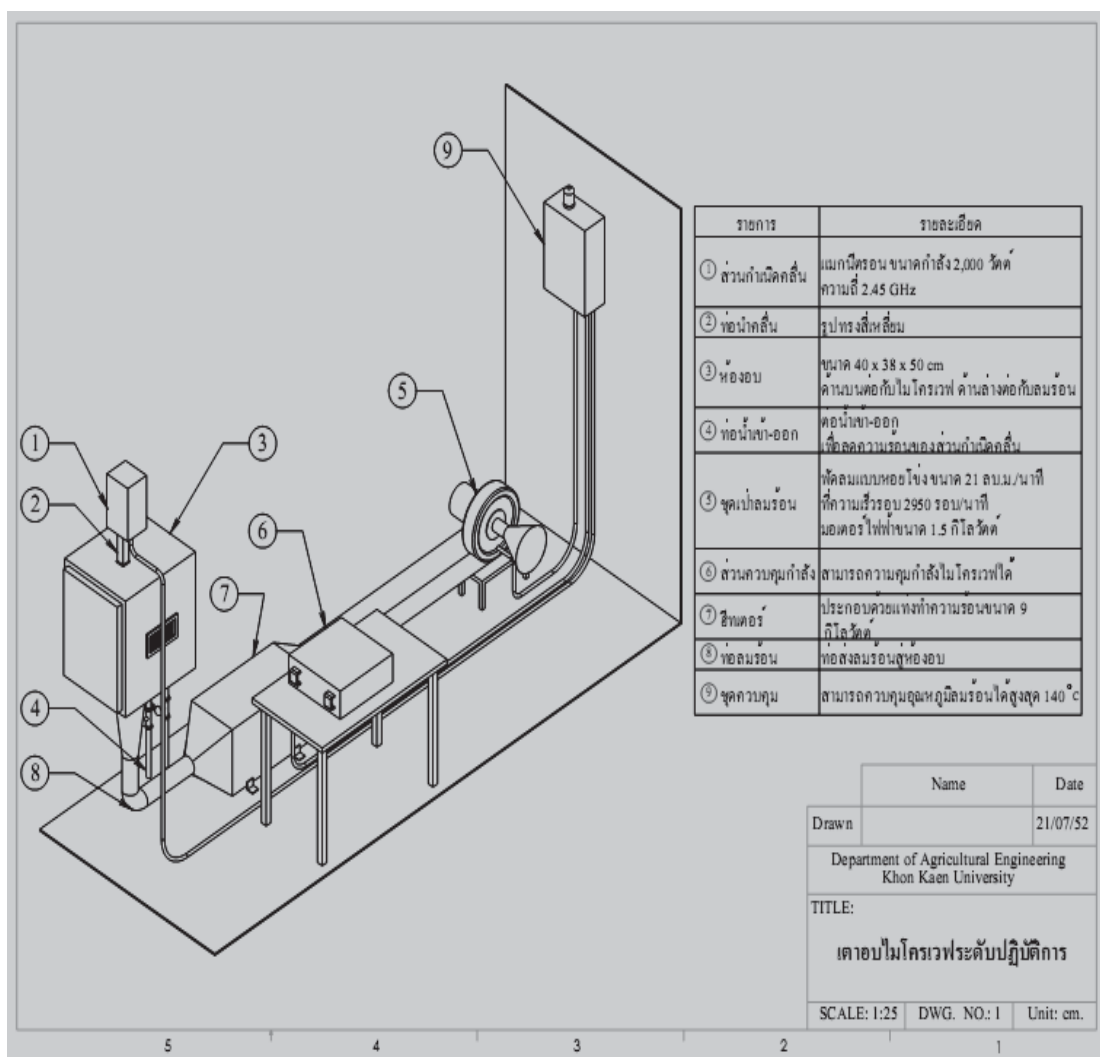
- คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2548). **บทปฏิบัติการเรื่องยางพารา**. ค้นเมื่อ 17 มกราคม 2553, จาก <http://www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/510-210/lab/rubberlab/doc>.
- คำนึ่ง วาทยุทธ, & จาริณี จงปัดมิตติ. (2550). คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นยางธรรมชาติที่ความถี่ 915 และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 38(5), 275-278.
- คำนึ่ง วาทยุทธ, & เฉลิมขวัญ อธิชะวงศ์. (2550). การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการอบแห้งยางแท่งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟ. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 38(5), 259-262.
- จาริณี จงปัดมิตติ, & คำนึ่ง วาทยุทธ. (2551). ผลของน้ำหนักที่มีต่อคุณลักษณะการอบแห้งยางแท่งด้วยไมโครเวฟ. **ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น**.
- ดวงทิพย์ เชนถาวร. (2548). **การทำแห้งแครอทโดยใช้ลมร้อน ไมโครเวฟ และไมโครเวฟภายใต้สุญญากาศ**.
ขอนแก่น: ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ธีระชัย ฤกษ์มงคลวิทย์. (2548). **การพยากรณ์ปริมาณน้ำยางพาราโดยใช้แบบจำลองถดถอยด้วยตัวเองกับข้อมูลป้อนเข้าภายนอกไม่เชิงเส้น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปฎิภาณ ชื่นตรง, & อารักษ์ ลิ้มสิทธิกุล. (2544). **การศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟต่ออัตราการอบแห้งมะม่วงแช่แข็ง**. **ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น**.
- ปิยะพงศ์ ม่วงมณี, & วีรยุทธ ลิ้มสกุล. (2549). **แนวทางการอบแห้งยางแท่ง เอส ที อาร์ 20**. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. (2551). **พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- รัชดา ไสภะยะยัง, ณัฏฐาธร พวงเงินมาก, & เวช วิเวก. (2548). **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอุ่นอย่างดันด้วยคลื่นไมโครเวฟ**. กรุงเทพฯ: สำนักสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.).
- เรียวโซ โตเอ. (2529). **อุปกรณ์การอบแห้งในอุตสาหกรรม**. แปลโดย วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- วรภรณ์ ขจรไชยกุล. (2549). **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). กรุงเทพฯ: ซีโน ดีไซน์.
- วิชัย กิตติพล. (6 ธันวาคม 2549). **สัมภาษณ์**. ผู้จัดการสาขา บมจ.ไทยฮั้วยางพารา อ.แกลง จ.ระยอง.
- สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. (2553). **สถิติยางไทย**. ค้นเมื่อ 30 มกราคม 2553, จาก <http://www.rubberthai.com/>.

- สูญชัย พลดี. (2546). การศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งมะม่วงเชื่อมด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบรร่วมกับไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุวรรณ ภูริวัณษ์กุล, ปิ่นพงศ์ คงชนะ, ชุทธนา ภูริวัณษ์กุล, & สมบูรณ์ วรวิฑูริชัย. (2548). การศึกษาความเป็นไปได้เทคนิคในการอบแห้งยางดิบเพื่อผลิตยางแท่ง เอส ที อาร์ 20. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุรพล สุธีระเวช. (2537). คู่มือเข้าใจและซ่อมเตาไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ: อาร์ต เอจ กราฟฟิค.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. (2546). การผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber Product). พิมพ์ครั้งที่ 3. ปัตตานี: สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต.
- โสภา แคนสี. (2546). การศึกษาคุณลักษณะการอบกล้วยน้ำว้าด้วยไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อุตสาหกรรมยางพารา กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2544). หลักการปฏิบัติเพื่อป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด). กรุงเทพฯ: [ม.ป.พ.].
- องค์ประกอบหลักของเตาไมโครเวฟโดยทั่วไป. (2553). ค้นเมื่อ 30 มกราคม 2553, จาก <http://www.rmutphysics.com/>.
- Arun S. Mujumdar. (1987). **Handbook of Industrial drying**. New York: Marcel Dekker.
- Blow C.M. and Hepburn C. (1985). **Rubber Technology and Manufacture**. 2nd ed. England: Butterworth.
- Cousin B, Benet J.C, Auria R. (1993). Experimental Study of the Drying of a Thick Layer of Natural Crumb Rubber. **Drying Technology**, 11(6), 1401-1413.
- Decareau R.V., & Peterson R.A. (1986). **Microwave Processing and Engineering**. Chichester: Ellis Horwood.
- Guided Wave Radar Level Transmitter**. [n.d.]. Retrieved February 20, 2008 from http://www.globalspec.com/NpaPics/46/90942_080520047043_ExhibitPic.jpg.
- Hajime T, Shuji A.Y., & วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล. (2548). เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- Maurice M. (1973). **Rubber Technology**. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Meredith R. (1998). **Engineering Handbook of Industrial Microwave Heating**. London: The Institution of Electrical Engineerings.
- Metaxas A.C., & Meredith R.J. (1988). **Industrial Microwave heating**. London: Peter Peregrinus.
- Verhaar G. (1973). **Processing of natural rubber**. Royal Tropical Institute. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations.

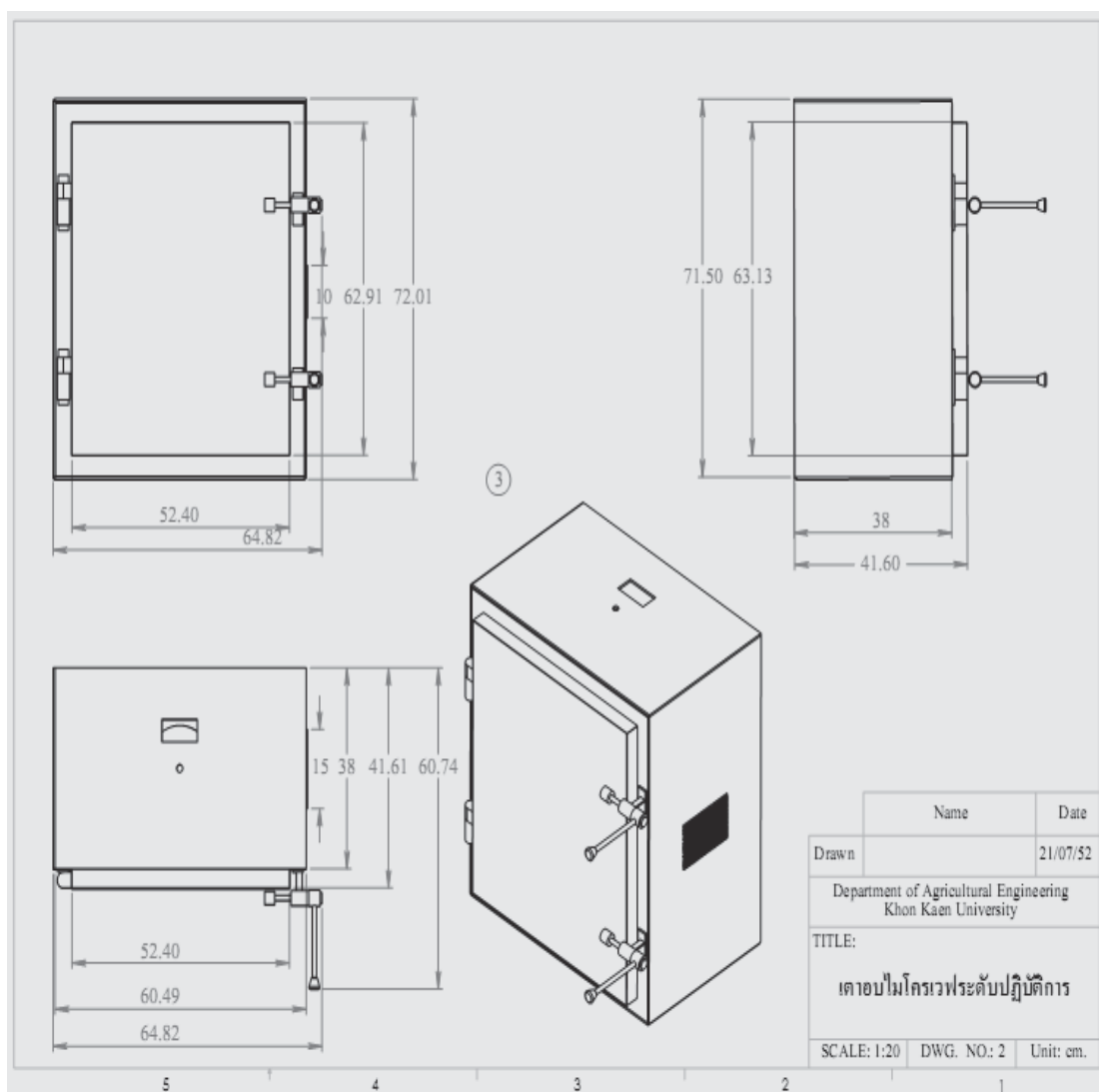
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

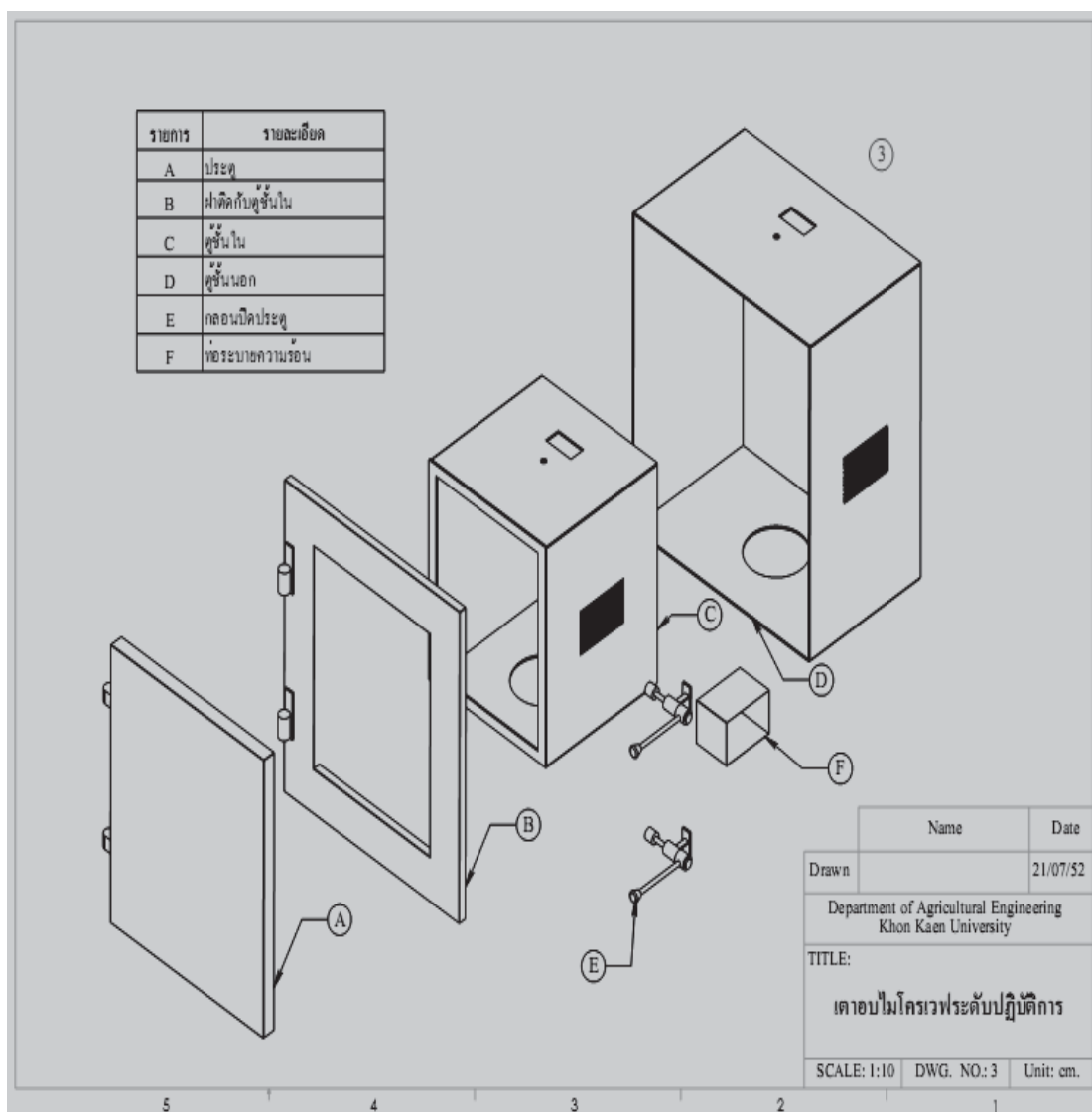
การออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ



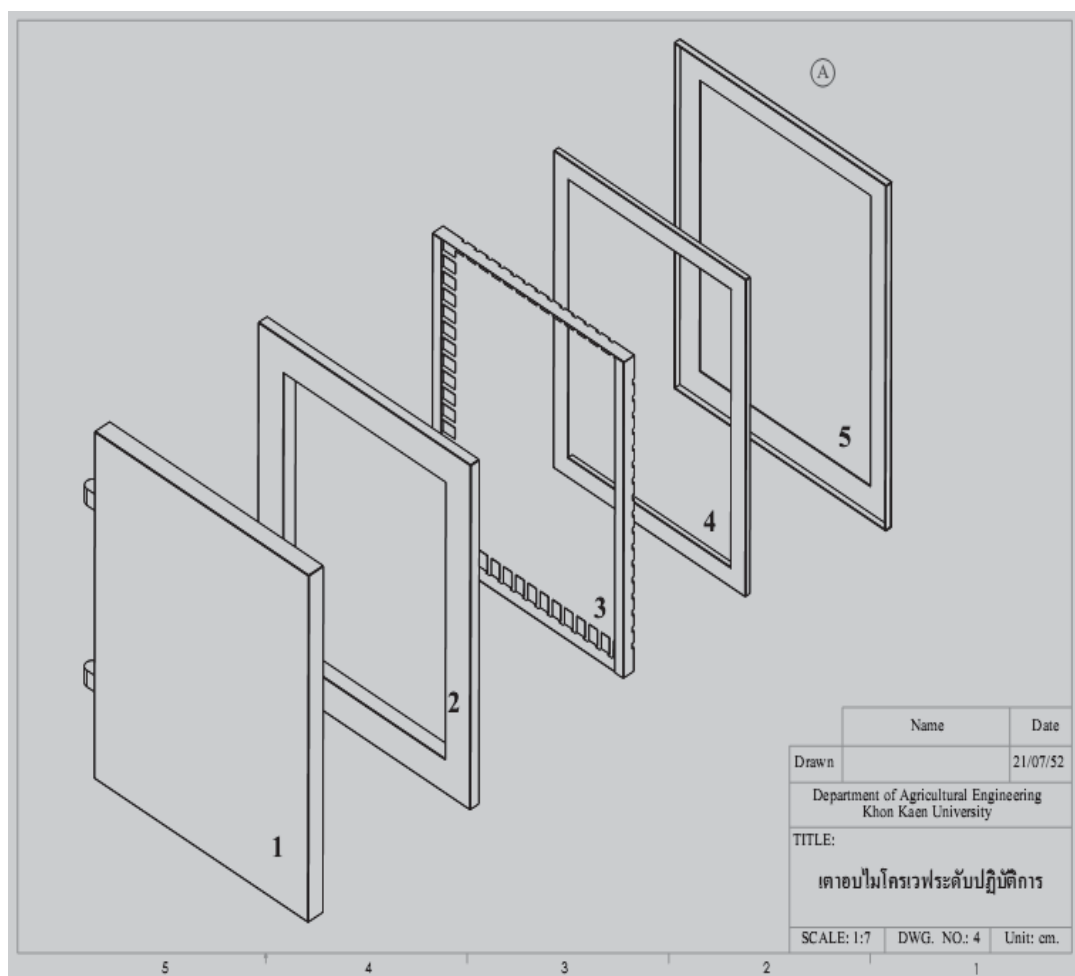
ภาพที่ ก.1 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ภาพรวม)



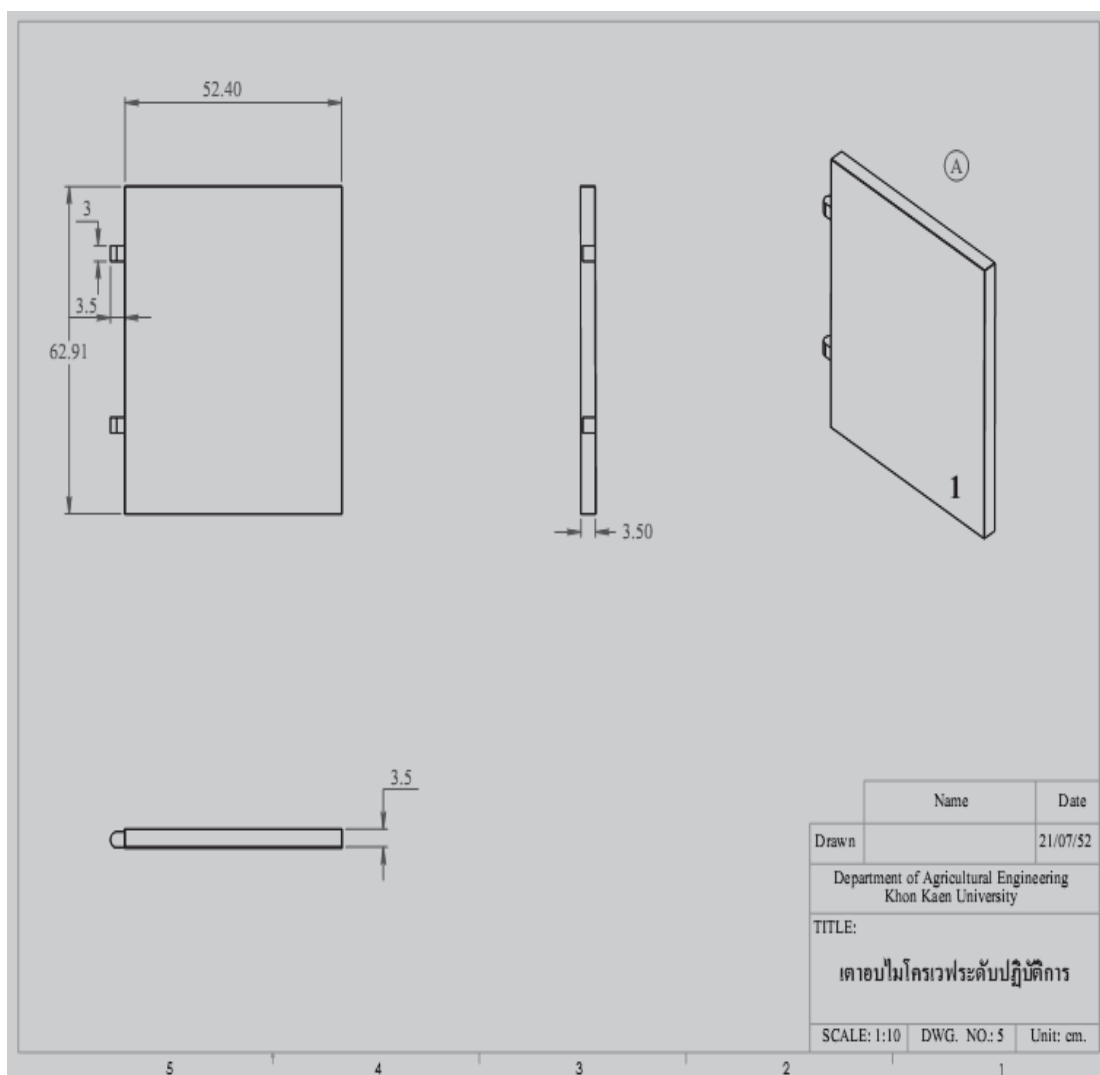
ภาพที่ ก.2 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ห้องอบ 3)



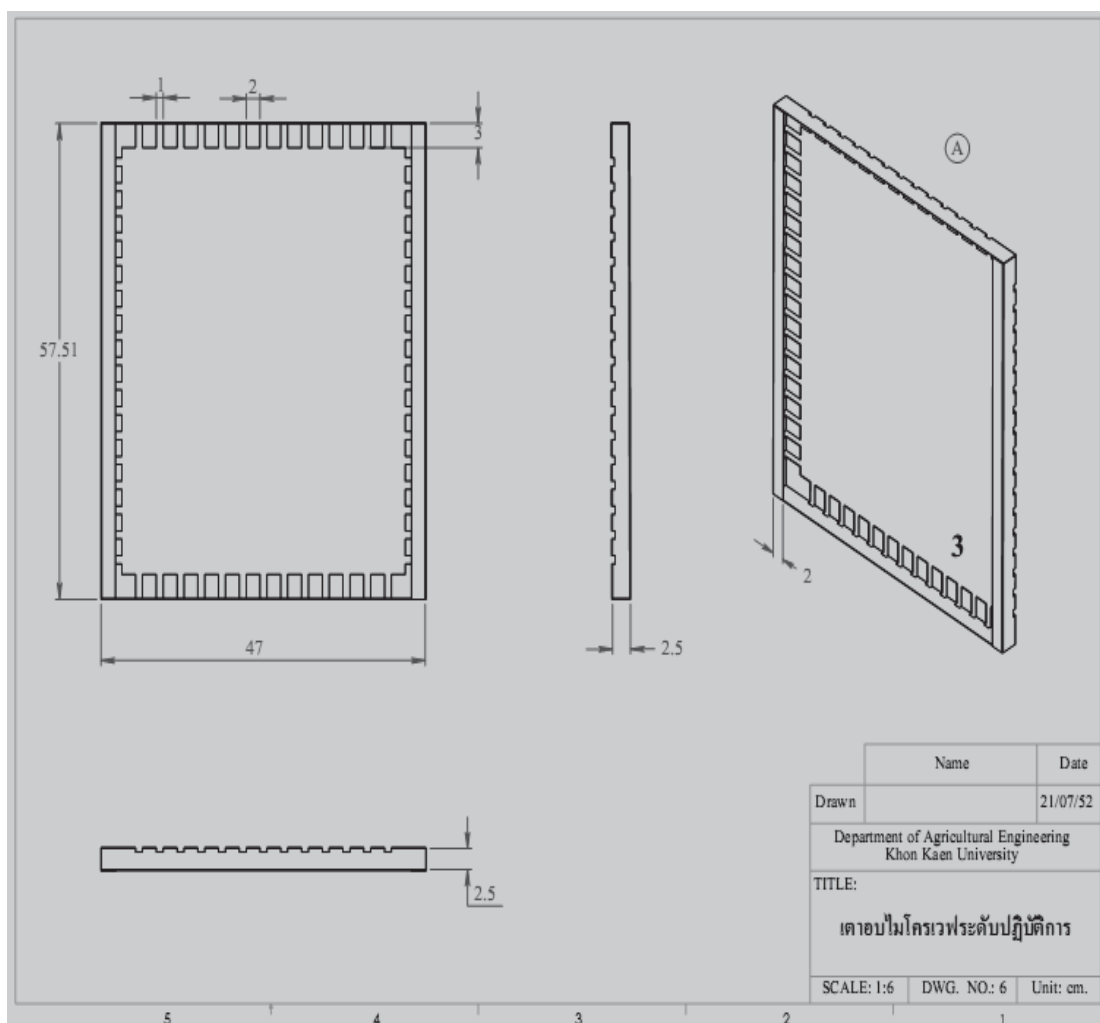
ภาพที่ ก.3 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของห้องอบ 3)



ภาพที่ ก.4 เดาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของประตู่ A)



ภาพที่ ก.5 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของประตู 1)



ภาพที่ ก.6 เตาอบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการ (ส่วนประกอบของประตู A 3 โพรงกับดักคลื่น)

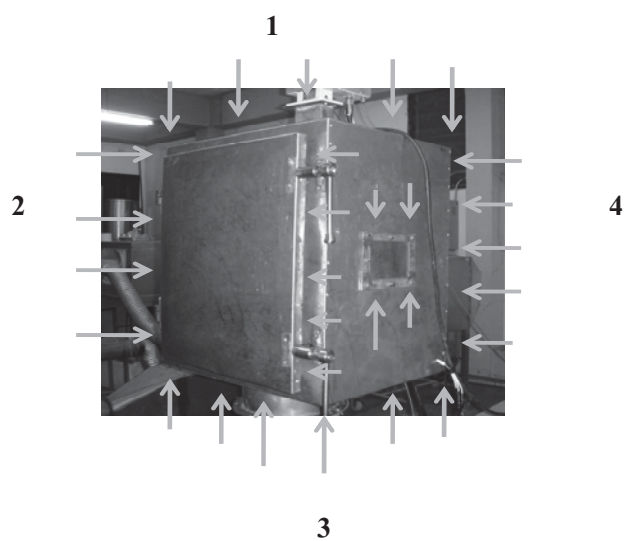
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย การกระจายคลื่นและกำลังของไมโครเวฟ

ภาคผนวก ข 1 ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย

ภาคผนวก ข 2 ผลการทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบ

ภาคผนวก ข 3 ผลการวัดกำลังของไมโครเวฟ



ภาพที่ ข.1 ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย (การรั่วของคลื่น)

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบด้านความปลอดภัย (การรั่วของคลื่น)

การตรวจสอบการรั่วของคลื่น							
จุดที่ 1	ค่าที่วัดได้ (mW/cm ²)	จุดที่ 2	ค่าที่วัดได้ (mW/cm ²)	จุดที่ 3	ค่าที่วัดได้ (mW/cm ²)	จุดที่ 4	ค่าที่วัดได้ (mW/cm ²)
1	3.50	1	3.25	1	2.75	1	3.25
2	2.25	2	2.05	2	2.50	2	2.30
3	1.50	3	1.25	3	2.25	3	2.10
4	1.20	4	1.10	4	1.20	4	1.20
เฉลี่ย	2.11		1.91		2.18		2.21
รวมเฉลี่ย	2.10						

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบ เมื่อแทนค่าตามสมการที่ (21) (ค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ)

การตรวจสอบการกระจายคลื่น

Microwave Power 50%

แก้วที่	T1	T2	ΔT	การกระจายคลื่น
1	28.9	48.9	20	62.45
2	28.9	46.2	17.3	
3	28.9	56.6	27.7	
4	28.9	54	25.1	
5	28.9	51.4	22.5	

Microwave Power 60%

แก้วที่	T1	T2	ΔT	การกระจายคลื่น
1	28.8	51.6	22.8	61.99
2	28.8	50	21.2	
3	28.8	63	34.2	
4	28.8	58.2	29.4	
5	28.8	56.1	27.3	

Microwave Power 70%

แก้วที่	T1	T2	ΔT	การกระจายคลื่น
1	29.5	55.5	26	72.46
2	29.5	54.5	25	
3	29.5	64	34.5	
4	29.5	61.5	32	
5	29.5	58.3	28.8	

Microwave Power 80%

แก้วที่	T1	T2	ΔT	การกระจายคลื่น
1	29.4	57.8	28.4	65.59
2	29.4	67.2	37.8	
3	29.4	63.6	34.2	
4	29.4	59.7	30.3	
5	29.4	72.7	43.3	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบการกระจายคลื่นในห้องอบ เมื่อแทนค่าตามสมการที่ (21) (ค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ) (ต่อ)

การตรวจสอบการกระจายคลื่น

Microwave Power 90%

แก้วที่	T1	T2	ΔT	การกระจายคลื่น
1	29.2	62.3	33.1	68.39
2	29.2	77.6	48.4	
3	29.2	70.7	41.5	
4	29.2	67.3	38.1	
5	29.2	64.1	34.9	

Microwave Power 100%

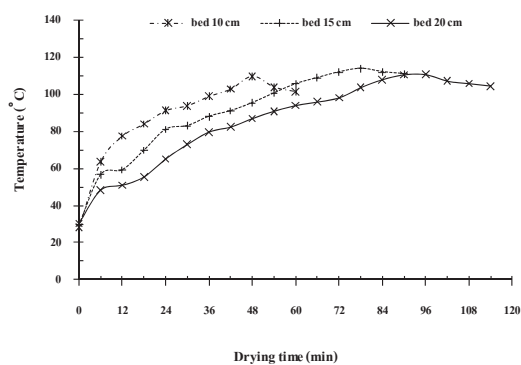
แก้วที่	T1	T2	ΔT	การกระจายคลื่น
1	29.2	63.1	33.9	65.32
2	29.2	71.1	41.9	
3	29.2	66.4	37.2	
4	29.2	72.6	43.4	
5	29.2	81.1	51.9	

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดกำลังของไมโครเวฟ (ค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ) เมื่อแทนค่าตามสมการที่ (20)

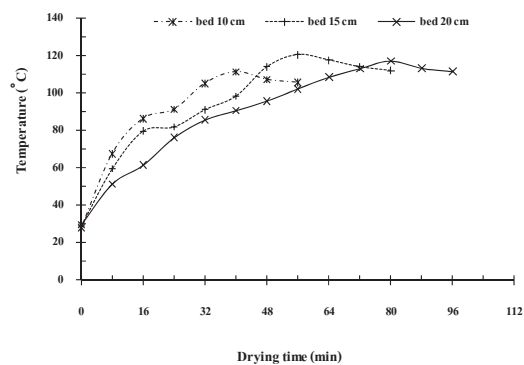
Microwave Power	T1	T2	ΔT	Power (Watt)
50%	29.2	42.4	13.2	921.10
Microwave Power	T1	T2	ΔT	Power (Watt)
60%	29.9	45.8	15.9	1109.50
Microwave Power	T1	T2	ΔT	Power (Watt)
70%	30	49.8	19.8	1381.64
Microwave Power	T1	T2	ΔT	Power (Watt)
80%	29.6	50.3	20.7	1444.45
Microwave Power	T1	T2	ΔT	Power (Watt)
90%	30.2	52.6	22.4	1563.07
Microwave Power	T1	T2	ΔT	Power (Watt)
100%	29.9	54.3	24.4	1702.63

ภาคผนวก ค

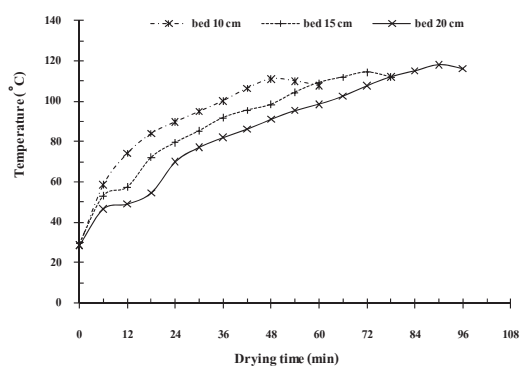
ผลการศึกษารอบแห่งยางแท่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



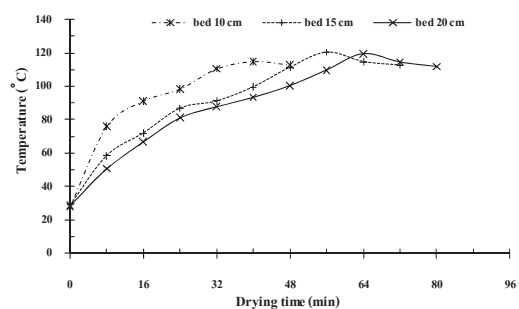
ไมโครเวฟ 1 นาที่ 100 องศาเซลเซียส



ไมโครเวฟ 2 นาที่ 100 องศาเซลเซียส

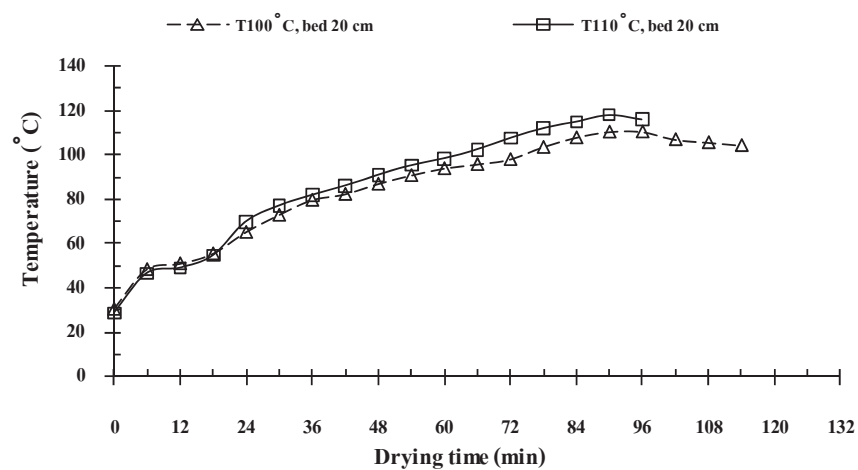
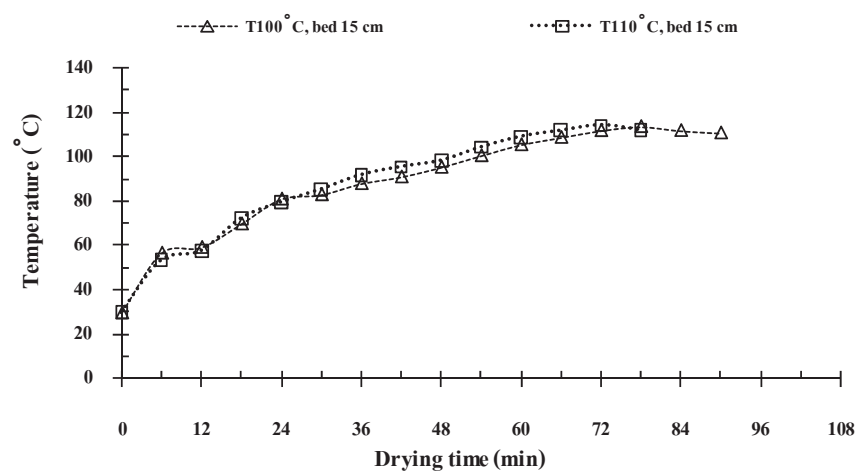
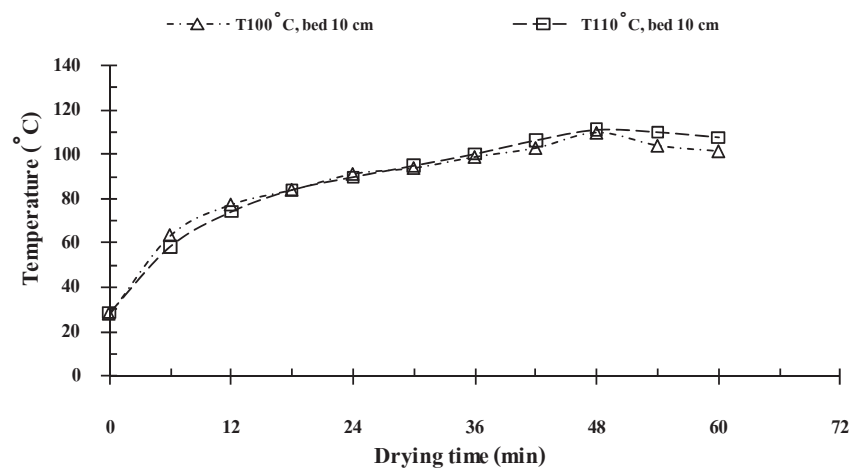


ไมโครเวฟ 1 นาที่ 110 องศาเซลเซียส

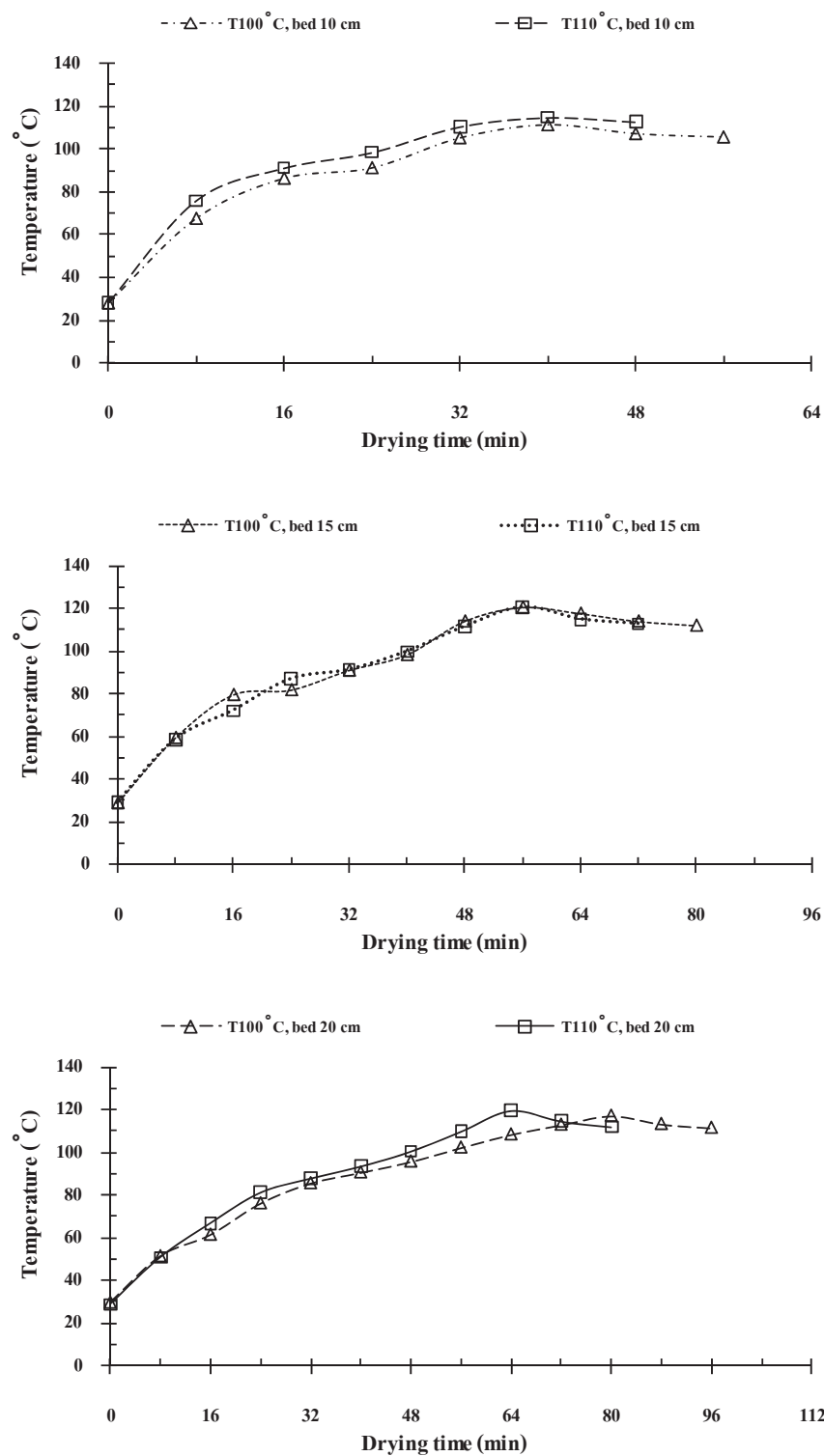


ไมโครเวฟ 2 นาที่ 110 องศาเซลเซียส

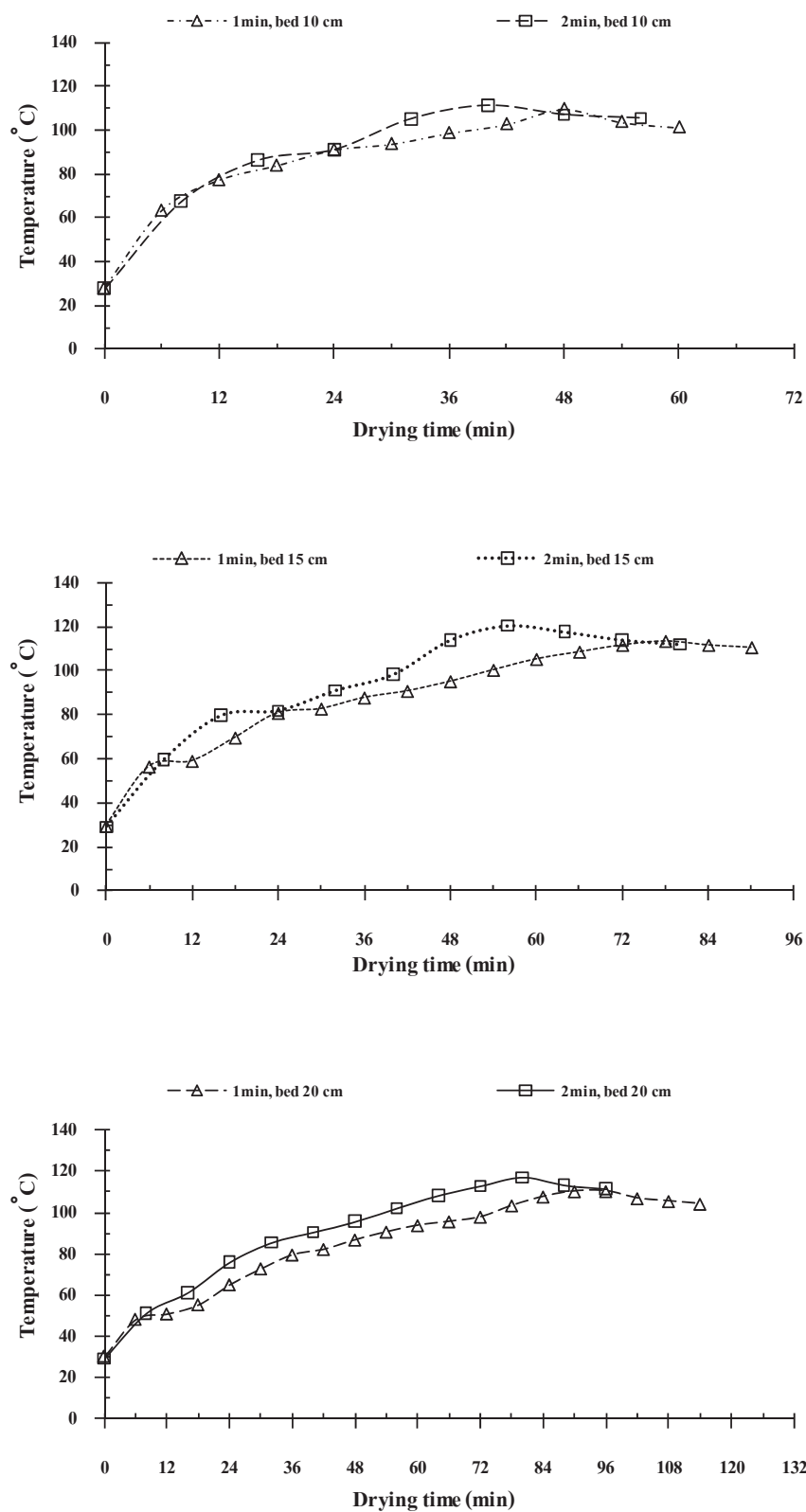
ภาพที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชั้นต่างๆ
ให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที่ อุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส



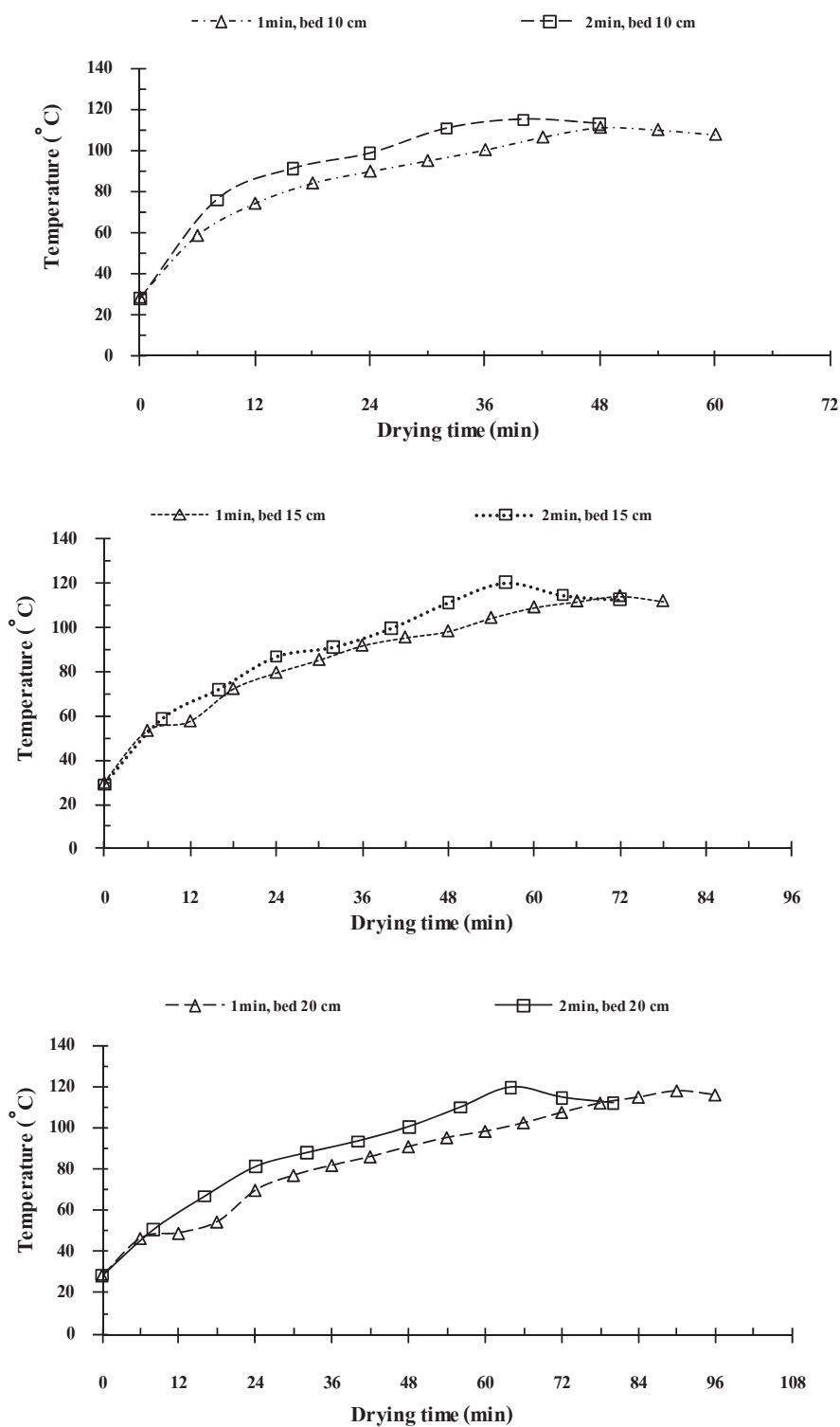
ภาพที่ ค.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งแต่ละอุณหภูมิลมร้อน สำหรับความสูงชั้นยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที



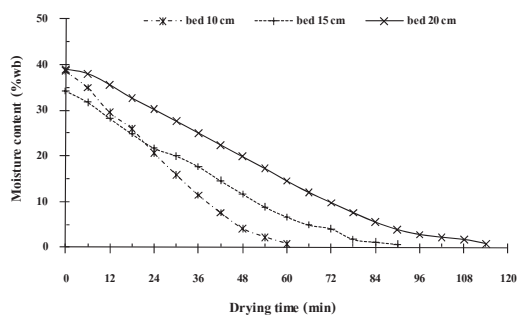
ภาพที่ ค.1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งแต่ละอุณหภูมิลมร้อน สำหรับความสูงชั้นยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที



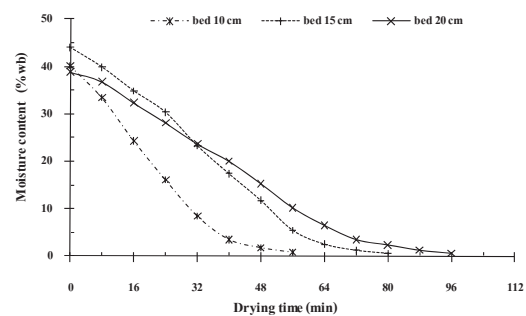
ภาพที่ ค.1.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในยางแท่งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูงชั้นยาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส



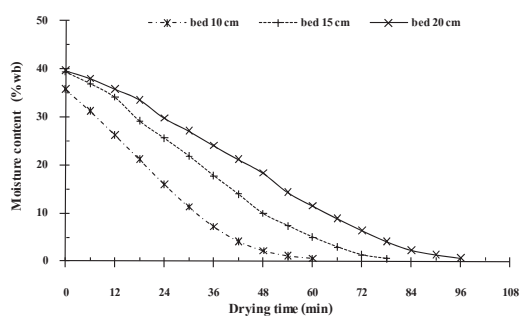
ภาพที่ ค.1.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขางแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ สำหรับความสูงชั้นขาง 15 10 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส



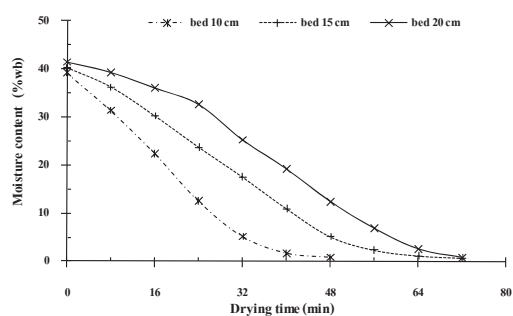
ไมโครเวฟ 1 นาที่ 100 องศาเซลเซียส



ไมโครเวฟ 2 นาที่ 100 องศาเซลเซียส

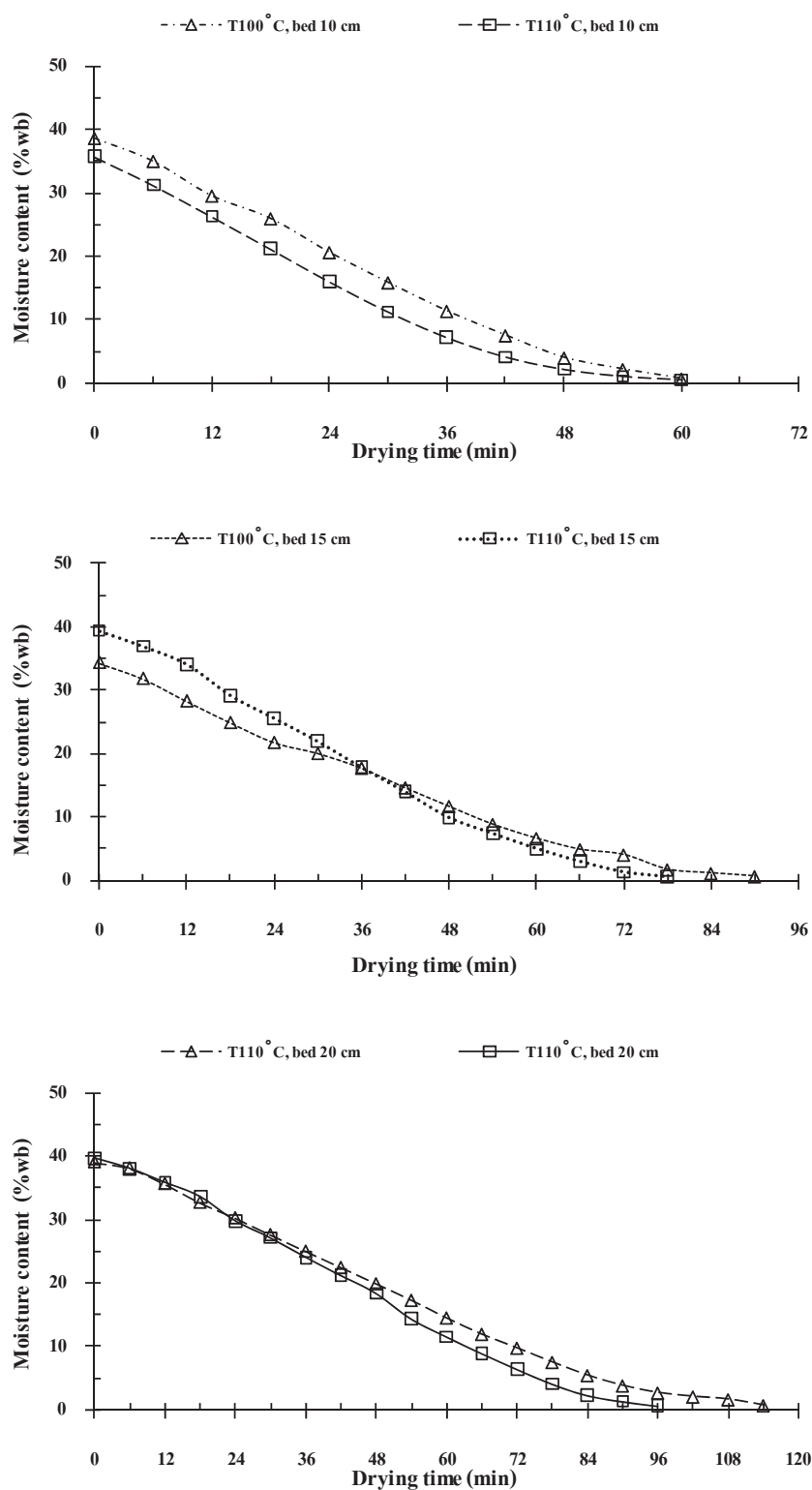


ไมโครเวฟ 1 นาที่ 100 องศาเซลเซียส

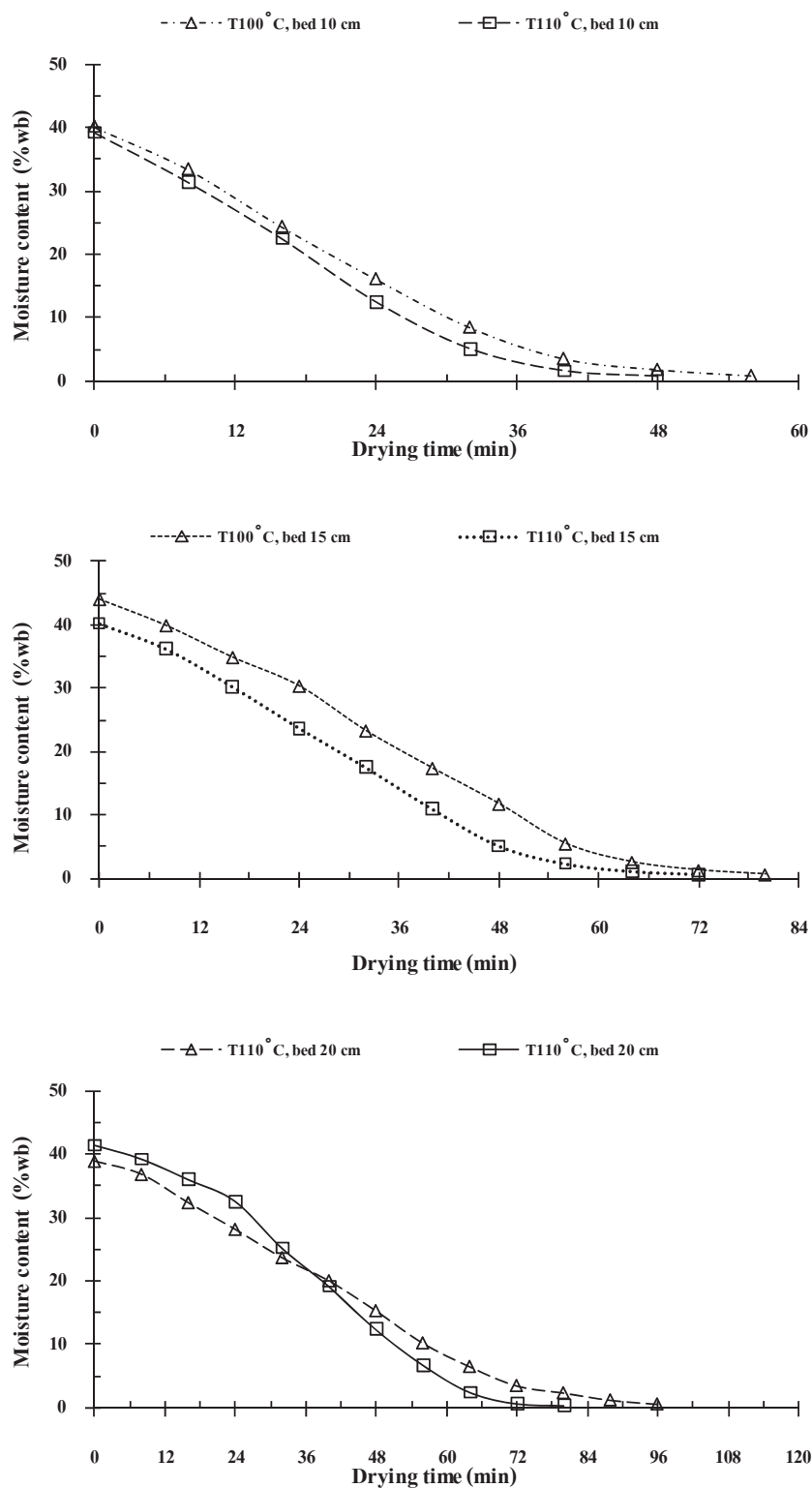


ไมโครเวฟ 2 นาที่ 100 องศาเซลเซียส

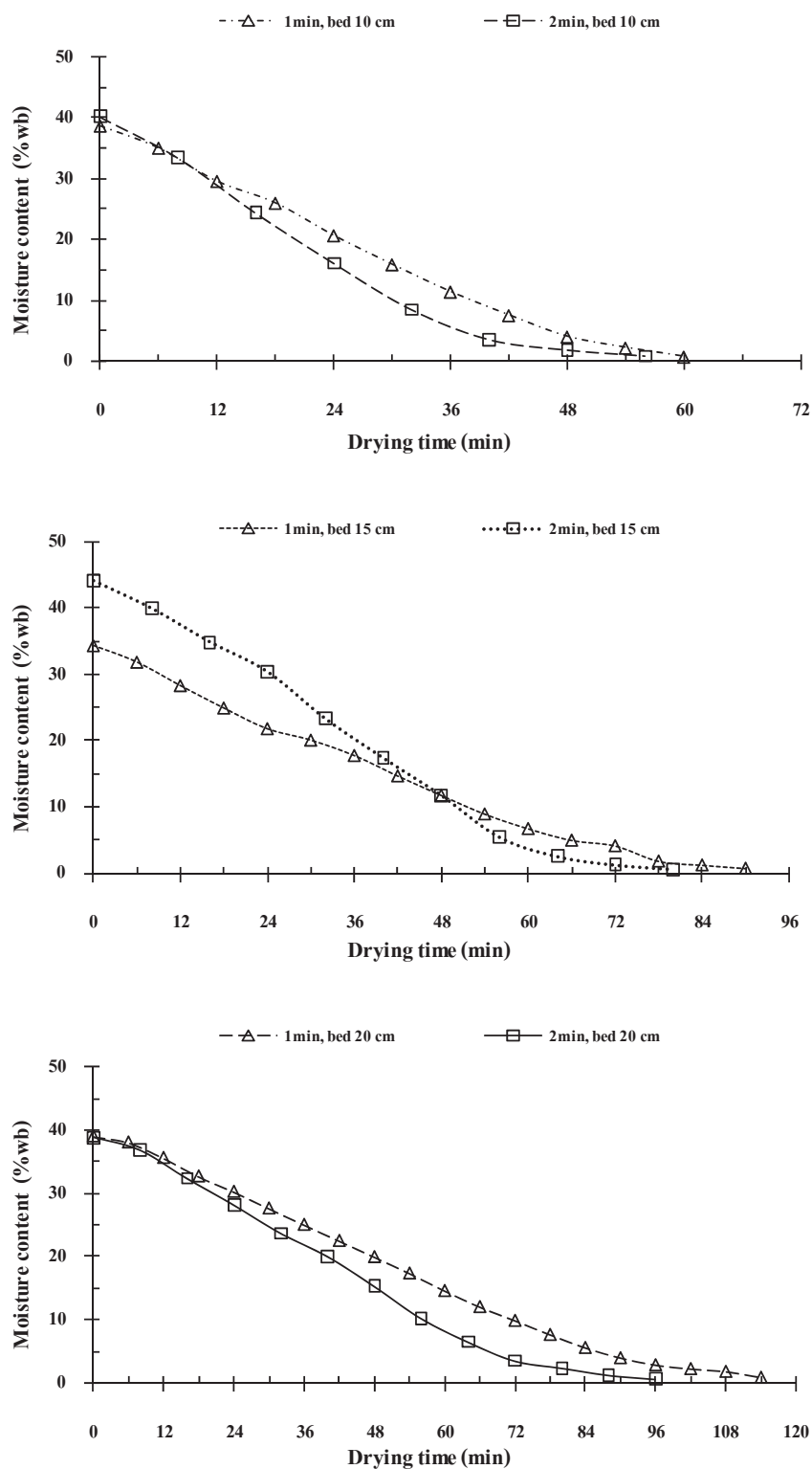
ภาพที่ ค.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในยางแท่งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชั้นยางต่าง ๆ
ให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที่ ณ อุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส



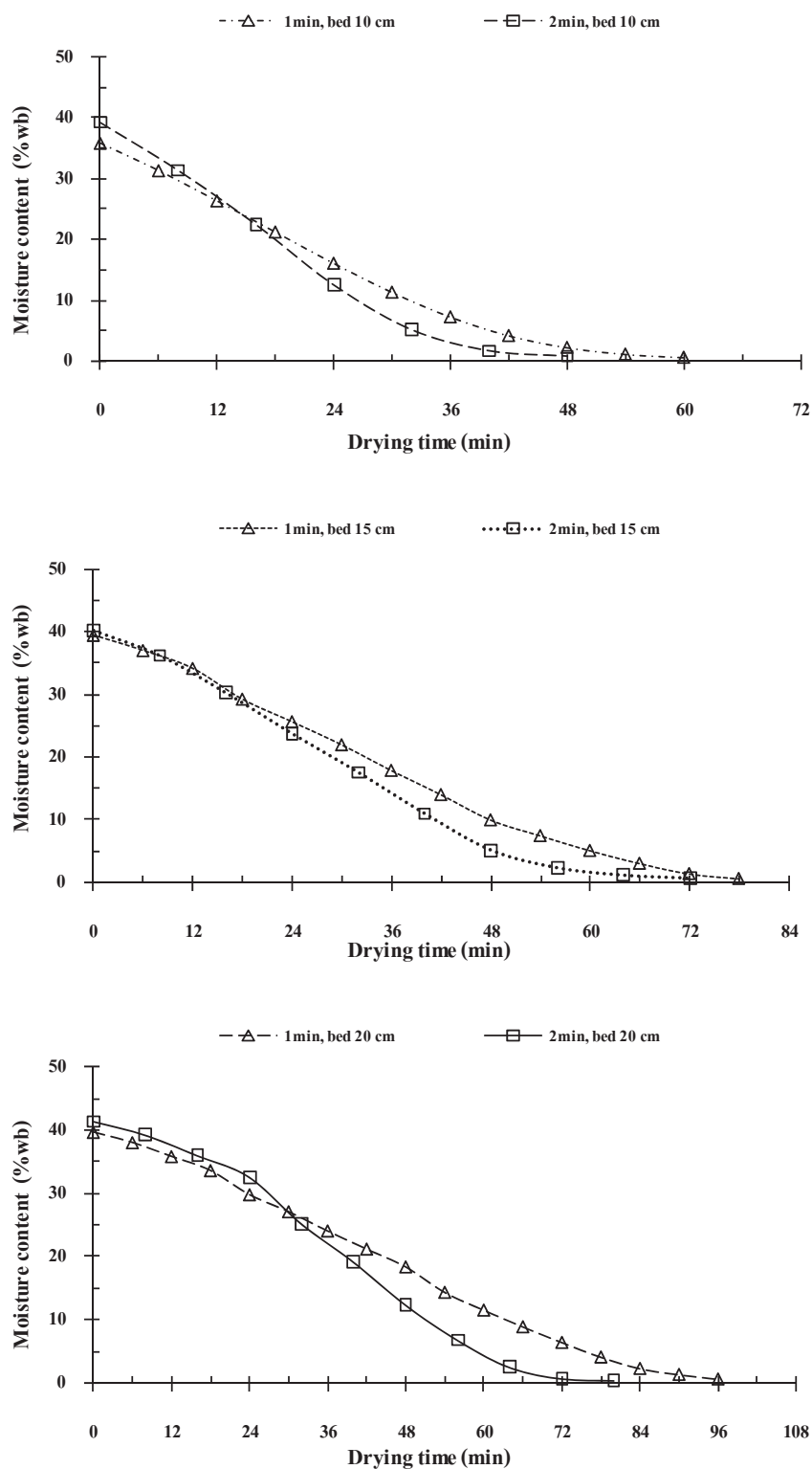
ภาพที่ ค.2.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิความร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที



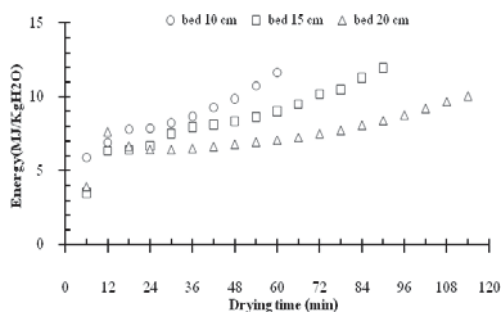
ภาพที่ ค.2.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที



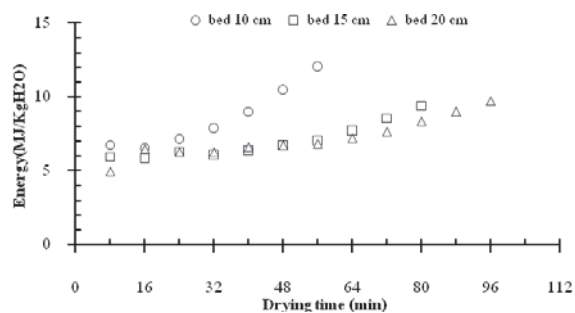
ภาพที่ ค.2.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิร้อน 100 องศาเซลเซียส



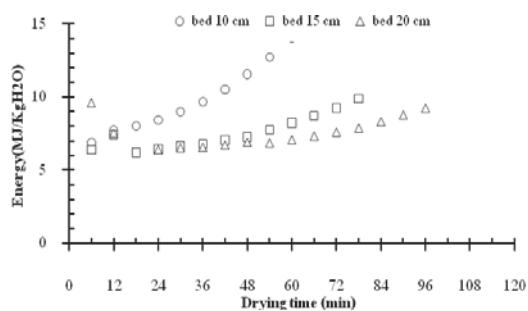
ภาพที่ ค.2.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาการอบแห้งตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส



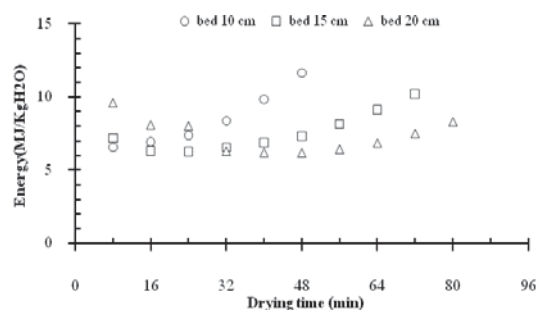
ไมโครเวฟ 1 นาที 100 องศาเซลเซียส



ไมโครเวฟ 2 นาที 100 องศาเซลเซียส

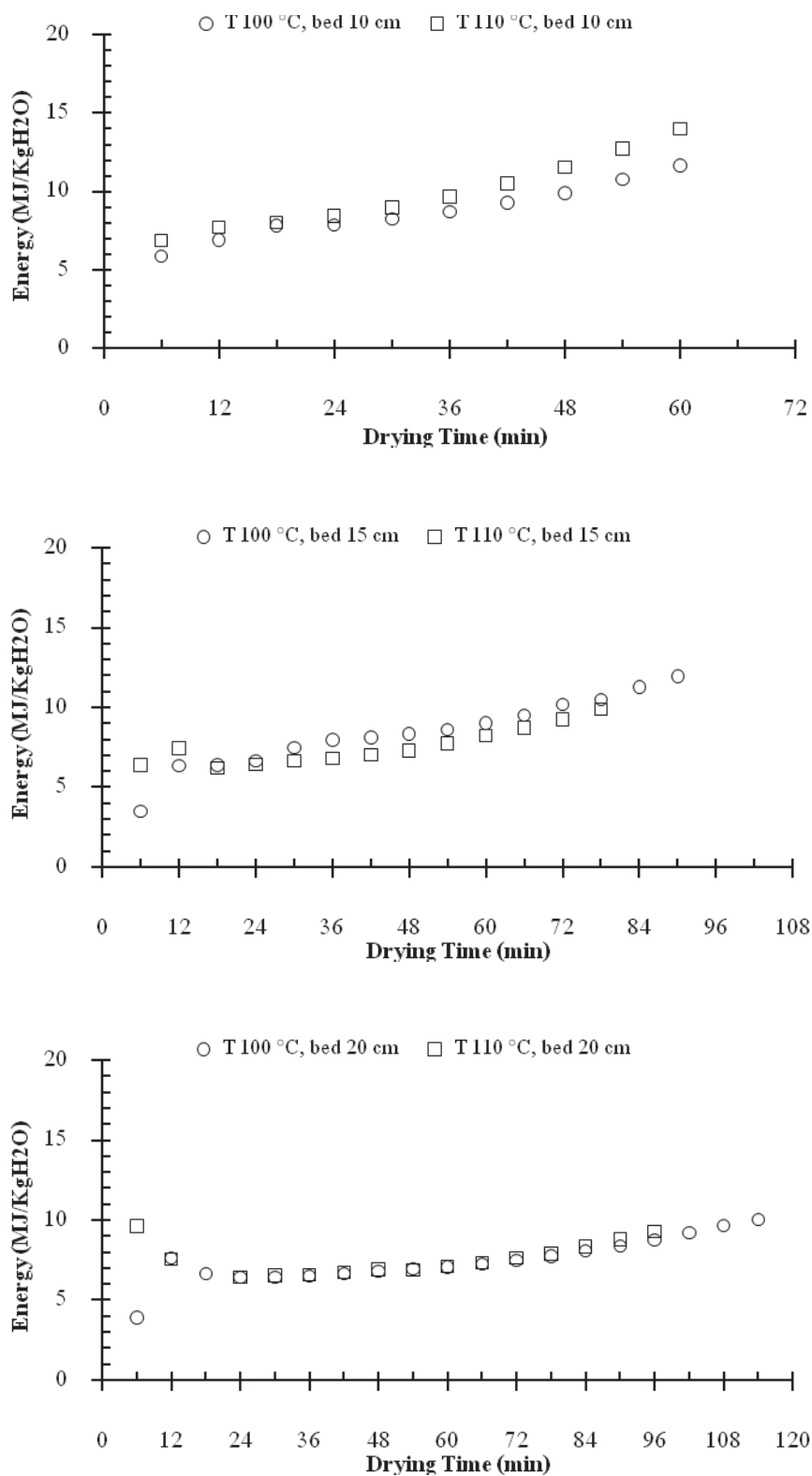


ไมโครเวฟ 1 นาที 110 องศาเซลเซียส

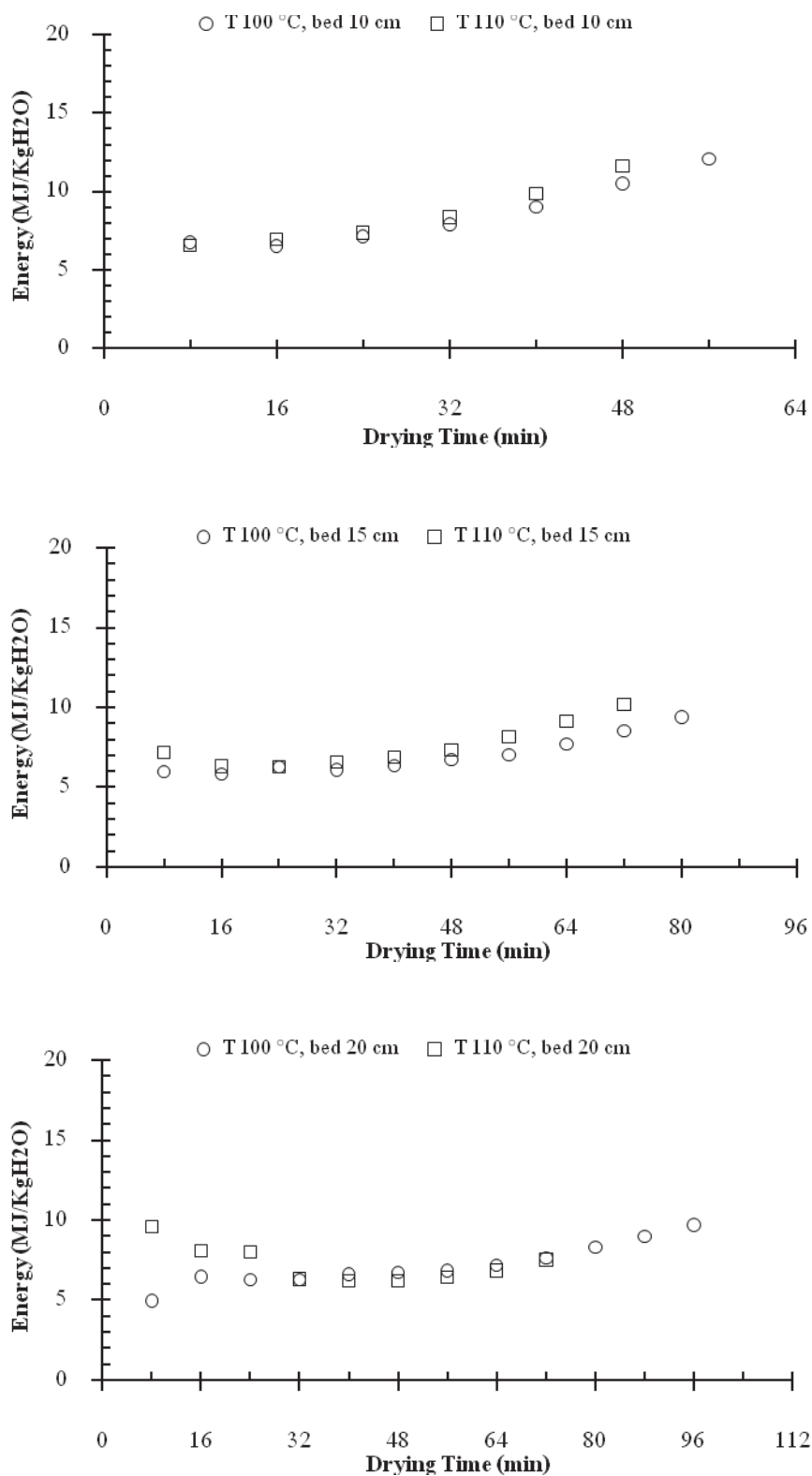


ไมโครเวฟ 2 นาที 110 องศาเซลเซียส

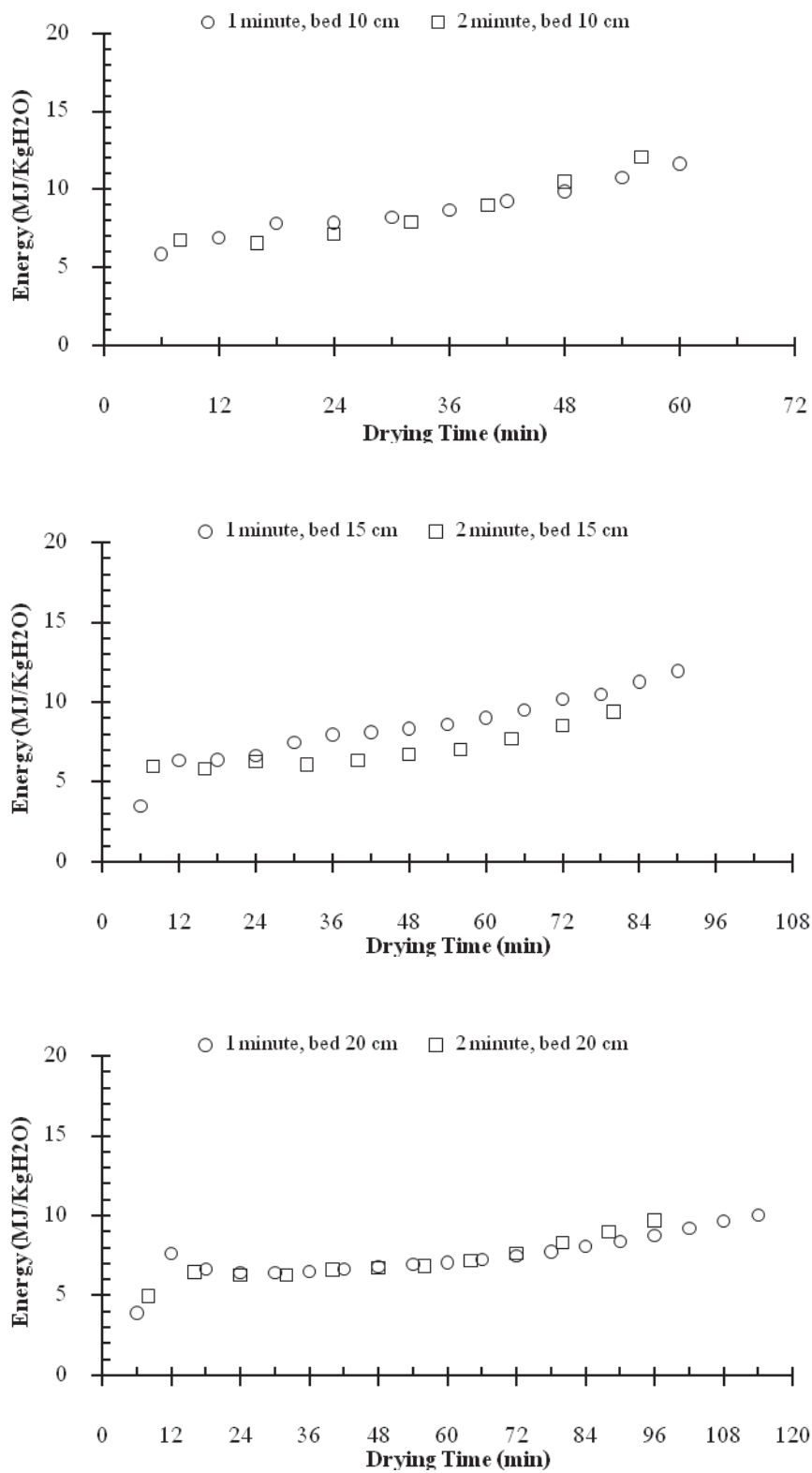
ภาพที่ ค.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตามเวลาการอบแห้งที่ความสูงชั้นต่างๆ สำหรับอุณหภูมิร้อน 100 และ 110 องศาเซลเซียส เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 และ 2 นาที



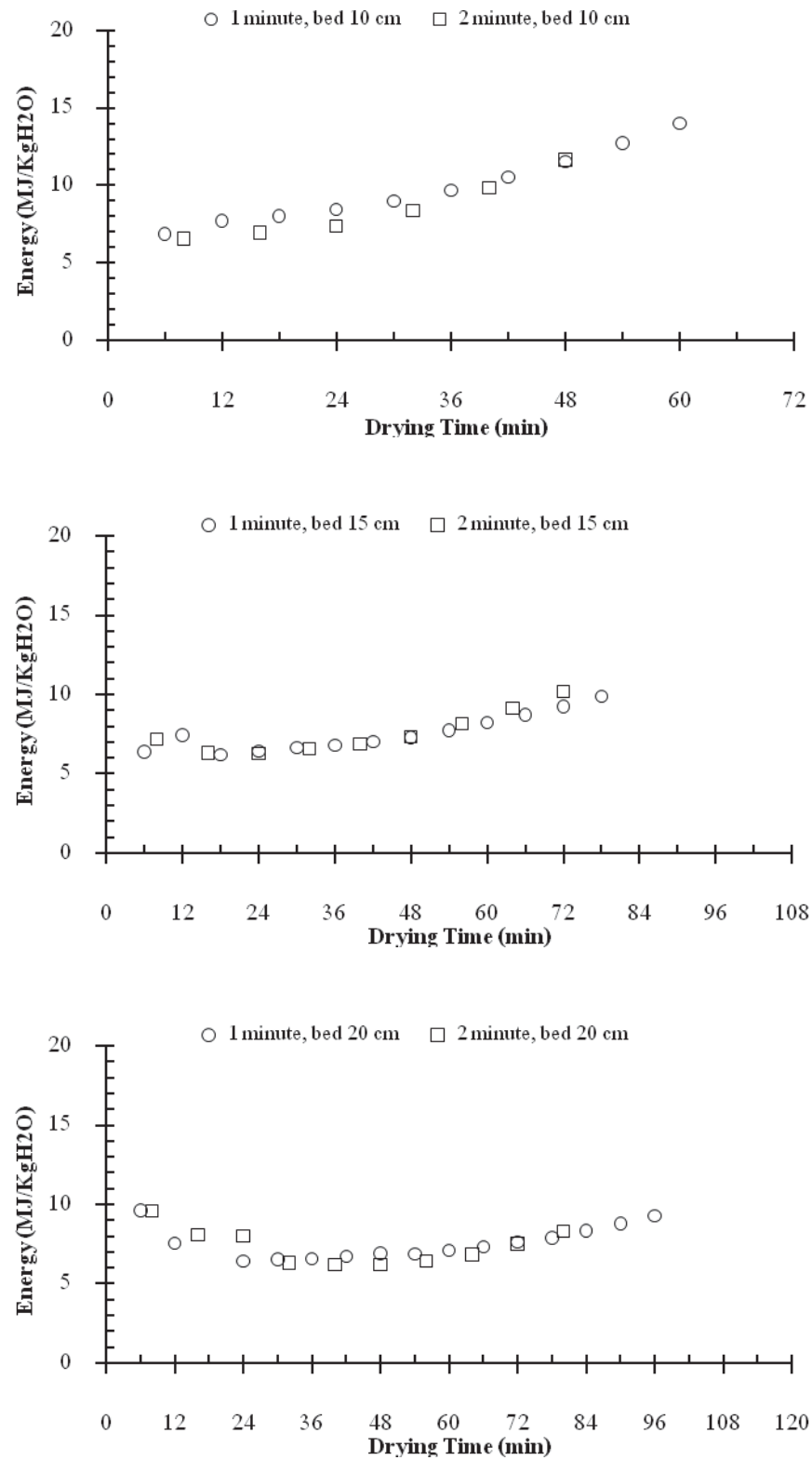
ภาพที่ ค.3.1 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 1 นาที



ภาพที่ ค.3.2 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในแต่ละอุณหภูมิร้อน ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร เวลาการให้ลมร้อน 2 นาที เวลาการให้ไมโครเวฟ 2 นาที



ภาพที่ ค.3.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ค.3.4 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ตามเวลาการให้ไมโครเวฟ ที่ความสูงชั้นยาง 10 15 และ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิลมร้อน 110 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานยางแท่ง STR 20



ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ 0-2940-5712, 0-2940-6595 โทรสาร 0-2940-5711
Rubber Technology Division, Rubber Research Institute of Thailand,
Department of Agriculture
Pahon-yothin Rd. Lardyao, Chatuchak, Bangkok 10900
Tel. (66) 2940-5712, (66) 2940-6595 Fax. (66) 2940-5711



1/3

รายงานผลการทดสอบ

ใบรายงานผลที่ 19/2553

๒๑ มกราคม 2553

ตัวอย่างยาง STR 20 จาก นางสาวเฉลิมขวัญ อริยวงค์
ส่วนอุตสาหกรรมยาง ได้ทดสอบตัวอย่างยาง STR 20 ที่ นางสาวเฉลิมขวัญ อริยวงค์
ได้ส่งไปเมื่อวันที่ 25 มกราคม 2553 ผลการทดสอบเป็นดังนี้ :-

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ						
	ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)	ความอ่อนตัว เริ่มแรก (P ₀)	ดัชนี ความอ่อนตัว (PRI)	ความหนืด ML (1+4) 100°C
1. Hot air 2 min Microwave 1 min 100°C							
เบด 10 cm. set 1	0.039	0.35	0.28	0.27	32.0	56.3	70.1
เบด 10 cm. set 2	0.020	0.37	0.25	0.27	34.0	54.4	73.4
เบด 10 cm. set 3	0.016	0.38	0.27	0.28	33.5	58.2	74.6
เบด 15 cm. set 1	0.033	0.35	0.28	0.27	29.0	58.6	72.6
เบด 15 cm. set 2	0.050	0.38	0.28	0.24	33.5	56.7	75.1
เบด 15 cm. set 3	0.115	0.49	0.26	0.27	38.5	68.8	78.9
เบด 20 cm. set 1	0.013	0.34	0.29	0.27	21.5	65.1	55.0
เบด 20 cm. set 2	0.004	0.35	0.30	0.28	25.0	64.0	65.2
เบด 20 cm. set 3	0.053	0.32	0.35	0.30	27.0	70.4	59.1
2. Hot air 2 min Microwave 1 min 110°C							
เบด 10 cm. set 1	0.043	0.34	0.30	0.26	24.0	62.5	61.5
เบด 10 cm. set 2	0.007	0.35	0.29	0.28	28.0	60.7	68.8
เบด 10 cm. set 3	0.012	0.34	0.27	0.28	31.0	59.7	73.9
เบด 15 cm. set 1	0.064	0.35	0.35	0.26	27.0	63.0	57.7
เบด 15 cm. set 2	0.056	0.35	0.34	0.27	23.5	63.8	64.3
เบด 15 cm. set 3	0.072	0.35	0.28	0.28	25.0	64.0	59.5
เบด 20 cm. set 1	0.059	0.31	0.29	0.28	19.0	65.8	49.6
เบด 20 cm. set 2	0.010	0.31	0.26	0.28	21.0	64.3	62.8
เบด 20 cm. set 3	0.024	0.32	0.26	0.29	22.5	62.2	58.0
ค่าความไม่แน่นอน (U _c)	-	-	-	-	-	-	-
วิธีการทดสอบมาตรฐาน SMR: Bulletin No.7-1992	Part B.4	Part B.5	Part B.6	Part B.7	Part B.8	Part B.8	Part B.9

pmf



ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ 0-2940-5712, 0-2940-6595 โทรสาร 0-2940-5711
Rubber Technology Division, Rubber Research Institute of Thailand,
Department of Agriculture
Pahon-yothin Rd. Lardyao. Chatuchak, Bangkok 10900
Tel. (66) 2940-5712, (66) 2940-6595 Fax. (66) 2940-5711



2/3

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ						
	ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)	ความอ่อนตัว เริ่มแรก (P ₀)	ดัชนี ความอ่อนตัว (PRI)	ความหนืด ML (1'+4') 100°C
3. Hot air 2 min Microwave 2 min 100°C							
เบด 10 cm. set 1	0.024	0.35	0.27	0.26	32.0	53.1	73.8
เบด 10 cm. set 2	0.022	0.34	0.27	0.28	31.5	55.6	72.6
เบด 10 cm. set 3	0.021	0.34	0.26	0.28	26.5	52.8	64.2
เบด 15 cm. set 1	0.013	0.34	0.28	0.26	29.0	58.6	73.2
เบด 15 cm. set 2	0.013	0.35	0.29	0.25	29.5	57.6	67.5
เบด 15 cm. set 3	0.012	0.37	0.29	0.24	26.0	61.5	63.0
เบด 20 cm. set 1	0.009	0.35	0.26	0.26	26.0	65.4	61.9
เบด 20 cm. set 2	0.028	0.34	0.30	0.28	24.0	66.7	58.9
เบด 20 cm. set 3	0.026	0.34	0.31	0.27	22.5	62.2	54.2
4. Hot air 2 min Microwave 2 min 110°C							
เบด 10 cm. set 1	0.033	0.37	0.28	0.28	31.0	51.6	68.4
เบด 10 cm. set 2	0.017	0.36	0.28	0.27	29.5	50.8	68.8
เบด 10 cm. set 3	0.008	0.38	0.27	0.27	37.0	51.4	76.4
เบด 15 cm. set 1	0.048	0.32	0.29	0.28	20.5	53.7	41.8
เบด 15 cm. set 2	0.045	0.33	0.29	0.28	19.0	63.2	53.9
เบด 15 cm. set 3	0.070	0.32	0.27	0.26	23.0	60.9	52.8
เบด 20 cm. set 1	0.069	0.34	0.28	0.27	25.0	68.0	58.9
เบด 20 cm. set 2	0.017	0.32	0.26	0.27	19.0	57.9	51.7
เบด 20 cm. set 3	0.021	0.33	0.27	0.27	24.0	62.5	55.2
ค่าความไม่แน่นอน (U _c)	-	-	-	-	-	-	-
วิธีการทดสอบมาตรฐาน SMR: Bulletin No.7-1992	Part B.4	Part B.5	Part B.6	Part B.7	Part B.8	Part B.8	Part B.9



ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ 0-2940-5712, 0-2940-6595 โทรสาร 0-2940-5711
Rubber Technology Division, Rubber Research Institute of Thailand,
Department of Agriculture
Pahon-yothin Rd. Lardyao. Chatuchak, Bangkok 10900
Tel. (66) 2940-5712, (66) 2940-6595 Fax. (66) 2940-5711



3/3

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ						
	ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)	ความอ่อนตัว เริ่มแรก (P ₀)	ดัชนี ความอ่อนตัว (PRI)	ความหนืด ML (1'+4') 100°C
5. Microwave							
เบด 10 cm. set 1	0.009	0.34	0.23	0.28	26.0	61.5	61.8
เบด 10 cm. set 2	0.027	0.36	0.28	0.28	36.5	56.2	77.8
เบด 10 cm. set 3	0.042	0.34	0.28	0.27	25.5	58.8	63.6
เบด 15 cm. set 1	0.020	0.32	0.29	0.24	24.5	65.3	47.4
เบด 15 cm. set 2	0.017	0.32	0.26	0.27	22.0	50.0	56.9
เบด 15 cm. set 3	0.026	0.33	0.25	0.24	28.5	61.4	70.2
เบด 20 cm. set 1	0.014	0.34	0.28	0.27	28.0	62.5	68.5
เบด 20 cm. set 2	0.024	0.35	0.257	0.27	37.0	56.8	76.1
เบด 20 cm. set 3	0.011	0.34	0.28	0.26	31.5	58.7	65.7
ค่าความไม่แน่นอน (U _c)	-	-	-	-	-	-	-
วิธีการทดสอบมาตรฐาน SMR: Bulletin No.7-1992	Part B.4	Part B.5	Part B.6	Part B.7	Part B.8	Part B.8	Part B.9

- หมายเหตุ : 1. สภาพตัวอย่างที่รับ : เป็นชิ้นทดสอบ น้ำหนักประมาณ 400 กรัม
2. วันที่รับตัวอย่าง : 25 มกราคม 2553
3. วันที่ทดสอบ : 26 - 27 มกราคม 2553
4. รายงานผลการทดสอบนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ส่งไปเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้รับรองคุณภาพยางชุดใดได้
5. ห้ามคัดถ่ายรายงานผลทั้งหมดหรือเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากส่วนอุตสาหกรรมยางเป็นลายลักษณ์อักษร



ส.ย./ยางแท่ง/ 019