

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของลำดับการให้พลังงานความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและ
ลมร้อนต่ออัตราแห้งของไม้ยางพารา

Effect of Heating Sequence of Microwave and Hot-air Techniques on
Rubberwood Drying

คณะนักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2555 รหัสโครงการ ENG550113S

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลกระทบของลำดับการให้พลังงานความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและ
ลมร้อนต่ออัตราแห้งของไม้ยางพารา

Effect of Heating Sequence of Microwave and Hot-air Techniques on
Rubberwood Drying

คณะนักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2555 รหัสโครงการ ENG550113S

บทคัดย่อ

เทคนิคการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนถูกนำมาใช้ทดลองอบแห้งไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของโรงงานเฟอร์นิเจอร์ในภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันใช้ระยะเวลาอบอบไม้ด้วยไอน้ำมากถึง 168 ชั่วโมง ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาและคงคุณภาพที่ดีของไม้หลังอบ จึงทำการสร้างเครื่องอบไม้ยางพาราขนาด $51 \times 20 \times 152$ ซม.³ และแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ตัวแปรของกำลังคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว (350 W และ 1400 W) อุณหภูมิลมร้อนเพียงอย่างเดียว (80 °C และ 100 °C) และการผสมผสานตัวแปรกำลังสูงสุดของคลื่นไมโครเวฟที่ 1400 W และอุณหภูมิของลมร้อนที่ 100 °C ของความหนาไม้ต่างกัน (2.54 และ 5.08 ซม.) นำผลการทดลองมาใช้นำมาฉายจนผลศาสตร์ของการอบแห้งและหาสภาวะที่เหมาะสมของคุณภาพของไม้หลังอบแห้งของแต่ละเงื่อนไขด้วยกระบวนการลำดับขั้น สำหรับการอบไม้หนา 2.54 ซม. ด้วยการผสมผสานคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด 5 ชั่วโมง ระยะเวลาอบที่ลดลงคิดเป็น 37 และ 58 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการอบด้วยไมโครเวฟ (8 ชั่วโมง) หรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว (12 ชั่วโมง) ตามลำดับ ในขณะที่การอบไม้ที่ความหนาเพิ่มขึ้น (5.08 ซม.) ด้วยการผสมผสานแหล่งความร้อนทั้งสองยังคงใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด 10 ชั่วโมง คิดเป็น 38 และ 86 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการอบด้วยไมโครเวฟ (17 ชั่วโมง) หรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว (70 ชั่วโมง) อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ของการผสมผสานแหล่งความร้อนอยู่ระหว่าง 27.7-95 °C และ 28-104 °C ของความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยแบบจำลอง Diffusion Approximation สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งไม้ยางพาราที่ความหนาไม้ต่างกันด้วยลมร้อนหรือคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวได้ดี ในขณะที่การอบแห้งไม้ด้วยการผสมผสานคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน สามารถทำนายการลดลงของความชื้นของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ด้วยแบบจำลอง Logarithmic และ Diffusion Approximation ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า Pearson product correlation coefficients แสดงให้เห็นว่าการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อน สามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลงเมื่อเทียบการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว สำหรับค่าเฉลี่ยพลังงานกระตุ้นก่อนและหลังจุดหมาดไม้ของระบบไอน้ำที่ใช้ออบไม้ในโรงงานทั่วไปหรือลมร้อน แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในเนื้อไม้ต่ำกว่าไม้ที่อบด้วยไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามก็ตามเงื่อนไขที่ใช้ระยะเวลาสั้นสุดในการอบไม้ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.25 และ 2.96 MJ/kg. ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น สำหรับการพัฒนาเทคนิคใหม่นี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดระยะเวลาอบแห้งและคงสมบัติที่ดีของไม้หลังอบแห้งได้ แต่ไม่

สามารถสรุปการประหยัดพลังงานอย่างชัดเจน เพราะยังอยู่ในขั้นทดลอง ดังนั้นการปรับขนาดของเครื่องอบแห้งเป็นสิ่งจำเป็นในการทดลองถัดไป เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานกับเตาอบในระดับอุตสาหกรรมที่ใช้ในการอบไม้ปริมาณมากในแต่ละครั้ง จึงจะยอมรับระยะเวลาอบแห้งที่ใช้ในทางปฏิบัติจริงได้

Abstract

A microwave heating technique to combine with a hot air oven was introduced for drying rubber-wood which is currently the main resource supplied for furniture industries especially in the Southern of Thailand. Because the current air-steaming drying employed in wood company takes as long as 168 hours per each production, so that the new techniques are attempted to reduce a drying-time and to also improve the quality. A microwave-hot air dryer as lab scales was constructed with dimensions of 51 (W) x 20(D) x 152(H) cm.³. The experimental works are divided into three main parts included microwave heating (350, 700 and 1400 W), hot air (80, 90 and 100 °C) and sequence heating of microwave (1400 W) and hot air (100°C) techniques. Otherwise, two different thickness (2.54 and 5.48 cm.) of the rubber wood were chosen and the results will then be used to produce approximation models for prediction as a curve fitting. To find the best condition of heating sequence, the use of analytic hierarchy process (AHP) were discussed and compared among the experimental cases. The drying time of sequence heating was the shortest time condition at 5 hours on 2.54 thickness. This reduced about 37 and 58 percent when compared microwaves 1400 W (8 hours) or hot-air 100 °C (12 hours) only. For the case of thicker woods, the shortest drying time was 10 hours. This reduced about 38 and 86 percent if compared with microwaves 1400 W (17 hours) or hot-air 100 °C (70 hours) only. Temperature of rubberwood insided in sequence heating were between 27.7-95 °C and 28-104 °C for thinner and thicker woods. As diffusion approximation model was the best fit in both thickness cases using microwave or hot-air only. In case of sequence heating, the logarithmic was to be the best fit curve in thinner woods, however for thicker ones the diffusion approximation model was found to be the most suitable in prediction. When comparing among Pearson product correlation coefficients, the sequence heating can reduces the relative humidity better than microwave oven only. Moreover, the average activation energy were calculated before and after the fiber saturation point, this indicated that the moisture inside wood with using hot air or steam only can changes easier than microwave heating. Among the shortest drying time cases of the specific energy consumption

required was at 3.25 and 2.96 MJ/kg in thinner and thicker, respectively. In summary, this new developing technique is successfully for producing qualitative rubberwood because the drying time used can be reduced and also the quality can be improved. However the current work can not draw a conclusion about the saving energy because this is only a pilot scale. Therefore it is suggested that a scaling up of this dryer is necessary for the future work. Then the energy consumption, based on the same capacity, can be compared with the industrial dryer and the practical drying time used can be acknowledged.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยเรื่อง “ผลกระทบของลำดับการให้พลังงานความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนต่ออัตราแห้งของไม้ยางพารา” สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความร่วมมือของหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ (รหัส ENG550113S) รวมทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำชี้แนะและแนวทางการแก้ปัญหา ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและที่มวิจัยไม้ยางพารา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้เพื่อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรของภาควิชา ที่ได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำการใช้เครื่องมือที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	iii
Abstract	v
กิตติกรรมประกาศ	vii
สารบัญ	viii
รายการตาราง	x
รายการภาพ	xi
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	xiv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ข้อมูลทั่วไปของไม้ยางพารา	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	33
3.1 การดำเนินงานวิจัยโดยภาพรวม	33
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	36
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	42
บทที่ 4 ผลการเปรียบเทียบเทคนิคคลื่นไมโครเวฟและระบบลมร้อน	49
4.1 บทนำ	49
4.2 วิธีดำเนินการทดลอง	49
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	50
4.4 สรุปผลการทดลอง	75
บทที่ 5 ผลของการผสมผสานคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน	77
5.1 บทนำ	77
5.2 วิธีดำเนินการทดลอง	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	81
5.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น	106
5.5 การวิเคราะห์ต้นทุน	111
5.6 สรุปผลการทดลอง	113
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	115
6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	115
6.2 ข้อเสนอแนะ	117
บรรณานุกรม	118
ภาคผนวก ก แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง	123
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น	139

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 สมบัติเชิงกลและทางกายภาพของไม้ยางพาราและไม้สัก	11
2-2 ตัวอย่างแบบจำลองการอบแห้งเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ	19
4-1 อัตราการระเหยน้ำและความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของไม้หนา 2.54 ซม.	55
4-2 ค่าคำนวณของ Q และ k' สำหรับอบแห้งไม้ที่ความหนา 2.54 ซม.	58
4-3 อัตราการระเหยน้ำและความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของไม้หนา 5.08 ซม.	61
4-4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบ อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์และน้ำหนักไม้หนา 2.54 ซม. ด้วยลมร้อน 100 °C	66
4-5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบ อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์และน้ำหนักไม้หนา 2.54 ซม. ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 1400 วัตต์	67
4-6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบ อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้หนา 5.08 ซม. ด้วยลมร้อน 100 °C	68
4-7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบ อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้หนา 5.08 ซม. ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 1400 วัตต์	69
5-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 2.54 ซม.	85
5-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 5.08 ซม.	89
5-3 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงด้วยเงื่อนไข H1:M4:H	97
5-4 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงด้วยเงื่อนไข H2:M6:H	98
5-5 ค่าระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ	108
5-6 น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ในการอบแห้งไม้	108
5-7 ดรรชนีค่าสุ่มของความไม่สมเหตุสมผล	109
5-8 ค่าที่วัดได้ของปัจจัยต่างๆ ในการอบไม้หนา 2.54 ซม. แต่ละเงื่อนไข	110
5-9 ค่าที่วัดได้ของปัจจัยต่างๆ ในการอบไม้หนา 5.08 ซม. แต่ละเงื่อนไข	110
5-10 ผลการคำนวณ AHP ในการอบไม้หนา 5.08 ซม.	110
5-11 ผลการคำนวณ AHP ในการอบไม้หนา 2.54 ซม.	111

รายการภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ลักษณะต้นไม้ยางพาราทั่วไป	6
2-2 ภาพตัดขวางของเซลล์ไม้ที่มีหลายๆชั้นในผนังเซลล์	7
2-3 ภาพตัดขวางของเซลล์ไม้เนื้อแข็ง	8
2-4 น้ำที่อยู่ในเซลล์เนื้อไม้	12
2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในเนื้อไม้และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	13
2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างการอบแห้งและความชื้น	17
2-7 ลักษณะของการออกแบบเตาอบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์	21
2-8 การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านตัวกลาง	22
2-9 การกลับขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	23
2-10 การเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ' และค่า ϵ'' ที่ความถี่ต่างๆ ของคลื่นไมโครเวฟ	24
2-11 การหมุนตัวของสารประกอบมีประจุเนื่องจากไมโครเวฟ	25
2-12 ไม้ที่มีความหนาไม่เกิน 1.5 นิ้ว หรือ 40 มม. ที่ใช้ในการทดสอบที่เสื่อม	26
2-13 ลักษณะการบิดโค้งงอของไม้	27
2-14 ตำหนิในเนื้อไม้	27
3-1 ขั้นตอนการศึกษา	33
3-2 ตัวอย่างไม้ยางพาราขนาด 7.62 (กว้าง) x 2.54 (หนา) x 117 (ยาว) ซม. ³	36
3-3 การออกแบบเครื่องอบไม้พาราด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน	37
3-4 เครื่องอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน	38
3-5 ลักษณะโครงสร้างของหัวแมกนีตรอน	39
3-6 ตู้ควบคุมกำลังความต่างศักย์สูง	40
3-7 ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่น	40
3-8 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ	41
3-9 เครื่องวัดความชื้นภายในเนื้อไม้	41
3-10 เครื่องวัดความเร็วลม	41

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-11 ตำแหน่งในการจัดเรียงปีกเกอร์แต่ละชั้นภายในตู้อบเมื่อเปิดฝาตู้	43
3-12 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิเนื้อไม้	44
3-13 ค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$	46
3-14 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการทดสอบความเค้นเฉือนขนานเสี้ยน	46
3-15 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการทดสอบความเค้นอัดขนานเสี้ยน	47
3-16 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการทดสอบความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยน	47
3-17 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการทดสอบความแข็ง	48
3-18 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและการทดสอบแรงดัด	48
4-1 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 40 กรัม ที่เพิ่มขึ้นหลังดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	51
4-2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	52
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นและเวลาของไม้ที่ความหนา 2.54 ซม.	53
4-4 อัตราการแห้งจากการอบไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ด้วยไมโครเวฟและลมร้อน	54
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ เทียบกับ $1/T$ ที่ความหนาไม้ 2.54 ซม.	57
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นและเวลาของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม.	59
4-7 อัตราการแห้งของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม. ด้วยไมโครเวฟและลมร้อน	60
4-8 อุณหภูมิภายในเนื้อไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน	63
4-9 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเตาอบของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม.	65
4-10 แบบจำลองสมการโครงสร้างตั้งต้น	71
4-11 ลักษณะไม้หลังอบแห้งตามความยาวไม้	72
4-12 ลักษณะไม้หลังอบแห้งตามความหนาหรือสันของไม้	72
4-13 การเปลี่ยนแปลงของไม้หลังการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน	72
4-14 การทดสอบซีลลุ่มหลังการอบของไม้ยางพารา	73
4-15 การเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หนา 2.54 ซม.	74
4-16 การเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางไม้หนา 5.08 ซม.	74
4-17 ตัวอย่างไม้ยางพาราหลังอบแห้งหลังส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	75

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-1 ระดับความชื้นที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลา	79
5-2 การให้ความร้อนแบบผสมผสานคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน	80
5-3 ระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 2.54 ซม. ของลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ แบบ Preheating drying (M6:H6) และ แบบ Finish drying (H6:M6)	83
5-4 อัตราการแห้งของไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข	84
5-5 ระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 2.54 ซม. ของลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วง	85
5-6 อัตราการระเหยน้ำและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแต่ละแหล่งความร้อน	86
5-7 กราฟแสดงระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 5.08 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข	87
5-8 การเปรียบเทียบอัตราการแห้งของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข	87
5-9 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละ แหล่งความร้อนของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม.	90
5-10 อุณหภูมิภายในเตาอบของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้ง	93
5-11 อุณหภูมิภายในเตาอบของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 2.54 ซม.	94
5-12 ความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 2.54 ซม.	94
5-13 ความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 5.08 ซม.	95
5-14 อุณหภูมิภายในเตาอบของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 5.08 ซม.	96
5-15 แบบจำลองสมการโครงสร้างตั้งต้น	99
5-16 ลักษณะไม้หลังอบแห้งตามความหนาหรือสันของไม้	100
5-17 การบิดงอของไม้ยาวพาราแปรรูป	101
5-18 ลักษณะสีของไม้หลังอบแห้งแต่ละเงื่อนไข	102
5-19 ค่าสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หนา 2.54 ซม.	102
5-20 ค่าสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หนา 5.08 ซม.	103
5-21 การทดสอบซีลุ่มหลังการอบของไม้ยาวพาราหนา 2.54 ซม.	104
5-22 การเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ของแต่ละเงื่อนไข	106
5-23 โครงสร้างของกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้น	107
5-24 ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานของไอน้ำและลมร้อนสลับไมโครเวฟ	113

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

MOR	=	Modulus of rupture
MOE	=	Modulus of elasticity
FSP	=	Fiber saturation point
E_a	=	Activation energy for diffusion
M	=	Microwave
H	=	Hot-air
M_d	=	Dry basis
M_w	=	Wet basis
DR	=	Drying Rate
SMER	=	Specific Moisture Extraction Rate
SEC	=	Specific Energy Consumption
L^*	=	Lightness
a^*	=	Redness
b^*	=	Yellowness
R	=	Correlation coefficient
χ^2	=	Chi-Square
RMSE	=	Root Mean Square Error
SEM	=	Structural Equation Model
MR	=	Moisture ratio
MLE	=	Maximum likelihood estimation

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาของปัญหา

เนื่องจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศอินโดนีเซีย ไทยและมาเลเซีย เป็นแหล่งผลิตยางพาราที่สำคัญของโลก จากข้อมูลวิชาการยางพาราของสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ในปี พ.ศ. 2551 ระบุว่า มีพื้นที่ปลูกยางพาราทั่วโลก ประมาณ 69.91 ล้านไร่ โดยประเทศอินโดนีเซียมีพื้นที่ปลูกยางพารามากที่สุดคือ 21.47 ล้านไร่ แต่ให้ผลผลิตต่อไร่ต่ำสุด รองลงมาคือประเทศไทย 16.69 ล้านไร่ และมีปริมาณผลผลิตน้ำยางต่อไร่สูงสุด จึงเป็นประเทศผู้ผลิตน้ำยางเป็นอันดับที่ 1 ของโลก ส่วนใหญ่ปลูกในพื้นที่ภาคใต้มากที่สุดและมีแนวโน้มการขยายพื้นที่เพาะปลูกมากขึ้น ตามนโยบายสนับสนุนการขยายพื้นที่ปลูกของรัฐบาล ดังนั้นไม้ยางพาราจึงเป็นวัตถุดิบของภาคอุตสาหกรรมเครื่องเรือนและเฟอร์นิเจอร์ เพื่อทดแทนไม้ธรรมชาติอื่น ๆ ที่มีราคาสูง และมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอในงานเชิงอุตสาหกรรม สำหรับปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ไม้ยางพาราของภาคอุตสาหกรรมในปี พ.ศ. 2551 มีประมาณ 4 แสนไร่ เป็นไม้ท่อนประมาณ 12.2 ล้านตัน คิดเป็นไม้แปรรูปประมาณ 170.4 ล้านลูกบาศก์ฟุต (4.8 ล้านลูกบาศก์เมตร) ปีกไม้ 4.9 ล้านตัน และขี้เลื่อย 0.97 ล้านตัน [1] โดยจำนวนโรงงานแปรรูปไม้มีประมาณ 7,350 โรง ตามผลสำรวจข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมของปี 2553 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปเริ่มจากการตัดโค่นต้นยางพาราอายุ 25-30 ปี และให้ผลผลิตน้ำยางไม้ค้ำค่าต่อการลงทุน นำไปแปรรูปในโรงเลื่อยเพื่อทำการชอยไม้ยางพาราตามการสั่งซื้อ ก่อนนำไปอัดน้ำยาและอบแห้ง เพื่อไล่ความชื้นภายในเนื้อไม้จนกระทั่งอยู่ในระดับสมดุลกับสภาวะอากาศ ไม่เกิดปัญหาการยืดหรือหดตัวของไม้ จนก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์และลดโอกาสการเจริญเติบโตของเชื้อรา ระดับความชื้นของไม้หลังอบแห้งอยู่ที่ประมาณร้อยละ 8 ถึง 16 ก่อนจะนำมาจัดวางเรียงบนพาเลทเพื่อส่งมอบให้กับลูกค้า ดังนั้นการอบแห้งไม้เป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดในการใช้พลังงาน 40-80% ของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากไม้ทั้งหมด [2] เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนในการปรับความร้อนให้เหมาะสมกับชนิดของไม้และขนาดของไม้ เพื่อลดระยะเวลาอบให้น้อยลง ปัจจุบันเตาอบไม้ประกอบด้วย

หม้อต้มไอน้ำที่ใช้ฟืนและเศษไม้เป็นเชื้อเพลิง มีระบบท่อจ่ายน้ำร้อนจากหม้อต้มไอน้ำไปยังห้องอบและใช้ระบบพัดลมหมุนเวียน สำหรับกระจายลมร้อนในห้องอบไม้ในแต่ละห้อง แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของการอบไม้ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับเทคนิคการอบไม้และคุณภาพของเตาอบไม้ ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 50–70 °C แต่ไม่เกิน 80 °C โดยความหนาของท่อนไม้ประมาณ 2.54 ซม. ใช้เวลาอบประมาณ 5-6 วัน และเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของไม้เพิ่มขึ้น [3] ขณะอบจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อน 4.4-7.0 เมกะจูลต่อหนึ่งกิโลกรัมของไอน้ำ [4] เพื่อให้หน้าเคลื่อนตัวออกจากไม้ โดยอาศัยอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอัตราความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าไม้ วิธีอบแห้งที่นำมาใช้อบไม้และส่งผลดีต่อคุณภาพของไม้มีหลากหลายวิธีที่มีประสิทธิภาพ เช่น การใช้คุณสมบัติเฉพาะของคลื่นไมโครเวฟที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง ทำให้ไม้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว (Dielectric heating) โมเลกุลของน้ำจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดี เนื่องจากที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ของการหมุนของโมเลกุลของน้ำซึ่งมีความเป็นเชิงขั้วสูง (Dipole) เกิดการกำทอน (Resonance) กัน [5] เมื่อความชื้นที่กระจายตัวตามพอร์หรือรูภายในเนื้อไม้ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ จะเกิดการเคลื่อนที่และเสียดสีกัน จนเกิดความร้อนทั่วเนื้อไม้อย่างรวดเร็ว เกิดการแพร่ความร้อนและลดความชื้นภายในออกสู่ผิวภายนอกไม้ ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเร็วขึ้น ส่งผลต่อเวลาอบแห้งสั้นลง ซึ่งแตกต่างไปจากการอบแห้งทั่วไปที่จะถ่ายเทความร้อนจากผิวหน้าเข้าไปสู่ภายในเนื้อวัสดุและส่งผลต่อการปฏิกิริยาเนื้อไม้ ทำให้อัตราการอบแห้งต่ำและต้องใช้เวลานานขึ้น แต่อย่างไรก็ดีการอบแห้งที่มีการถ่ายเทมวลที่เร็วเกินไปจะเกิดรอยไหม้ภายในเนื้อไม้ ดังเช่นการใช้คลื่นไมโครเวฟอบไม้สนแคเรียแบบไม่ต่อเนื่อง [6] เพื่อลดความชื้นภายในเนื้อไม้ภายในระยะเวลาเพียง 10-20 นาที แต่คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้สนแคเรียภายหลังการอบมีค่าน้อยกว่าวิธีการอบแห้งแบบทั่วไป เพราะลดความแข็งแรงของไม้มากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เพราะการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างภายในเนื้อไม้เกิดการแตกแยกและไหม้เกรียมในบริเวณเนื้อไม้ [6,7]

ดังนั้นแนวทางในการใช้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอื่นๆร่วมกับไมโครเวฟ ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อลดปัญหาดังกล่าว เช่น การใช้เจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวไม้ยางพาราที่มีอุณหภูมิ 70 °C ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบไม้ในโรงงานปัจจุบัน [8] พบว่า ไม้ยางพาราหลังการอบมีสมบัติทางกายภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และค่าของสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าค่าอ้างอิง นอกจากนี้การทดลองอบไม้ยางพาราเบื้องต้นด้วยระบบไมโครเวฟและการพุ่งชนของลมร้อนร่วมกัน [9] พบว่า การพุ่งชนของลมร้อนสามารถระเหยความชื้นและกระจายความร้อนสม่ำเสมอทั่วเตาอบดีกว่าไมโครเวฟ เนื่องจากขณะอบด้วยไมโครเวฟจะเกิดอุณหภูมิภายในเนื้อไม้สูงขึ้น แต่ความชื้นบริเวณผิวหน้าของ

ขึ้นไม่เป็นการพาความร้อนด้วยอุณหภูมิบรรยากาศ ทำให้การกระจายความร้อนภายในห้องอบอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก จึงเกิดความชื้นสะสมภายในห้องอบ ดังนั้นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้ร่วมกับการพาความร้อนแบบอื่นๆ เช่น ลมร้อน เพื่อถ่ายเทความร้อนสูงจากผิวเข้าไปสู่ภายในเนื้อไม้ แต่อย่างไรก็ตามต้องควบคุมไม่ให้ผิวหนังไม้แห้งเร็วเกินไปจนกระทั่งรูไม้ปิดในขณะที่ภายในเนื้อไม้ยังมีความชื้นสูง เพราะจะส่งผลให้เกิดความเค้นอาการแข็งนอก (Case hardening) แตกแบบรังผึ้ง (honeycombing) และการโก่งงอในเนื้อไม้ได้

ปัจจุบันการลดพลังงานเพื่อความคุ้มค่าและเพิ่มผลกำไรเป็นสิ่งสำคัญที่สุด การอบไม้ที่ประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาอบ จำเป็นต้องอบไม้ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นควบคู่กับการเคลื่อนตัวของน้ำออกจากไม้ โดยเฉพาะอุณหภูมิที่ใช้ออบต้องไม่สูงจนกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีในเนื้อไม้ทำให้ไม้เปลี่ยนสีหรือสูญเสียความแข็งแรง แต่อุณหภูมิที่ใช้ออบต้องสูงพอที่จะทำให้น้ำในเนื้อไม้แพร่กลับมายังผิวหนังและระเหยกลายเป็นไอออกจากผิวไม้ได้อย่างสม่ำเสมอ ลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบและไม่เกิดความเค้นตกค้างอยู่ภายในเนื้อไม้ยาวพาราหลังอบแห้งมากเกินไป เพื่อลดการบิดงอของไม้ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้สร้างเทคนิคการอบไม้ที่มีประสิทธิภาพสูงภายใต้สภาวะที่เหมาะสมด้วยการผสมผสานการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน ซึ่งอาศัยข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เพื่อเร่งอัตราการแห้งของไม้พาราเร็วขึ้น แต่ยังคงรักษาคุณภาพสูงสุดของไม้หลังการอบไว้ หลังจากนั้นเปรียบเทียบอัตราการแห้งของลำต้นการให้ความร้อนของทั้งสองระบบร่วมกัน ตามระยะเวลาที่ใช้ออบ สมบัติทางกายภาพและเชิงกลในแต่ละเงื่อนไข ลดความสิ้นเปลืองทางด้านพลังงานและเวลาในการใช้สองระบบร่วมกันให้น้อยที่สุด นำไปใช้ในการออกแบบและควบคุมเตาอบไม้ระบบอัตโนมัติที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้งไม้พาราจากการให้ความร้อนแบบผสมผสานด้วยเทคนิคไมโครเวฟและลมร้อน
- 1.2.2 เพื่อหาค่าสมบัติเชิงกลของไม้พาราหลังการอบแห้งแบบผสมผสานด้วยเทคนิคไมโครเวฟและลมร้อน

1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 อบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ด้วยกำลัง 350 700 และ 1400 วัตต์ ที่ 2.45GHz ภายใต้ตู้อบที่มีขนาด 51 x 20 x 152 ซม.³ (กว้าง x ลึก x สูง)
- 1.3.2 อบไม้ด้วยลมร้อน ในช่วงอุณหภูมิที่ 80-100 °C

- 1.3.3 การวัดอัตราการแห้งโดยใช้วิธีการชั่งน้ำหนัก
- 1.3.4 สมบัติเชิงกลของไม้หลังจากการอบ ที่ใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานดังนี้
- แรงเฉือนตั้งฉากกับเส้น (Shear stress parallel to grain) ตามมาตรฐาน BS 373
 - แรงกดขนานเส้น (Compression stress parallel to grain) ตามมาตรฐาน ISO 3787
 - แรงกดตั้งฉากเส้น (Compression stress perpendicular to grain) ตามมาตรฐาน ASTM Standard D143
 - หน่วยแรงดัด (Strength and Stiffness in Static Bending) ตามมาตรฐาน BS 373
 - ความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM Standard D143
- 1.3.5 สมบัติกายภาพ โดยกำหนดมาตรฐานไม้ยางพาราที่ไม่ได้คุณภาพ ดังนี้
- มีตำหนิความโค้งงอส่วนของความกว้างของไม้ยางพารา สูงกว่าระดับพื้นมากกว่า 24 มม.
 - มีตำหนิความโค้งงอส่วนของความหนาของไม้ยางพารา สูงกว่าระดับพื้นมากกว่า 8 มม.
 - ไม้บิด (Twist) เป็นการบิดของไม้ยางพาราตามความยาว
 - ไม้ห่อ (Cup) เป็นการโค้งของไม้ยางพาราทางด้านความกว้าง
 - ลักษณะของเนื้อไม้ยางพาราที่ไหม้เกรียมเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ
 - การทดสอบการแข็งนอกและความเค้นในเนื้อไม้ด้วยวิธีซีล้อม ตามมาตรฐาน มอก.๔๙๗-๒๕๒๖
- 1.3.6 ระดับความชื้นของไม้ยางพารา 8-15 เปอร์เซ็นต์หลังการอบ
- 1.3.7 ไม้ยางพาราแปรรูปมาจากส่วนของลำต้น เลื่อยแบบ Plain Sawn เป็นไม้ยางพาราเกรด A-B ผ่านกระบวนการอัดน้ำยาของโรงงานไม้แปรรูป ขนาดไม้ยางพาราที่ใช้อบ หน้ากว้าง 7.62 ซม. (3 นิ้ว) ยาว 117 ซม. (47 นิ้ว) และหนา 2 ระดับ คือ 2.54 ซม. (1 นิ้ว) และ 5.08 ซม. (2 นิ้ว) เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถพัฒนาการอบไ้ม้ยางพาราตามลำดับการให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟและลมร้อน
- 1.4.2 สามารถหาอัตราการแห้งและพลังงานที่ใช้อบของลำดับการให้ความร้อน
- 1.4.3 สามารถเปรียบเทียบคุณภาพของการอบไ้ม้ยางพาราตามลำดับการให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนกับการอบแห้งทั่วไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของไม้ยางพารา

2.1.1 ลักษณะทั่วไป

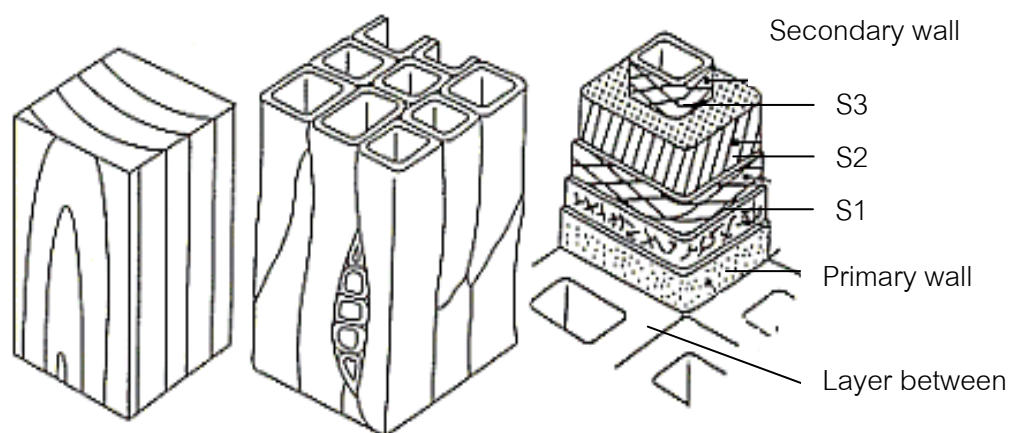
ยางพารา (Pararubber tree) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. อยู่ในวงศ์ (Family) Euphorbiaceae เป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ มีอายุยาวนานและเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ที่มีลักษณะลำต้นกลม สูงปานกลาง เปลือกนอกมีสีเทาดำ หนาประมาณ 6.5-15.0 มม. ต้นอ่อนมีเปลือกบางกว่าต้นแก่ ชั้นในสุดของลำต้นเป็นเนื้อไม้ค่อนข้างอ่อน เรียกว่า ใจ (Pith) ถัดออกมาเป็นชั้นเนื้อไม้ (Wood or xylem) ชั้นเยื่อเจริญ (Cambium) เปลือกอ่อน (Soft bark) ซึ่งมีท่อลำเลียงอาหารเปลือกแข็ง (Hard bark) เยื่อเปลือก (Cork cambium) และเปลือกแห้ง (Cork) ตามลำดับ ระหว่างเปลือกอ่อนและเปลือกแข็งมีท่อน้ำยาง (Latex Vessel) กระจุกและแกนไม่มีสีครีมถึงสีครีมอมชมพู เนื้อไม้ยางพารามีน้ำหนักเบาถึงหนักปานกลางซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับไม้สัก ลักษณะทั่วไปของเนื้อไม้ยางพาราดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ลักษณะต้นไม้ยางพาราทั่วไป [10]

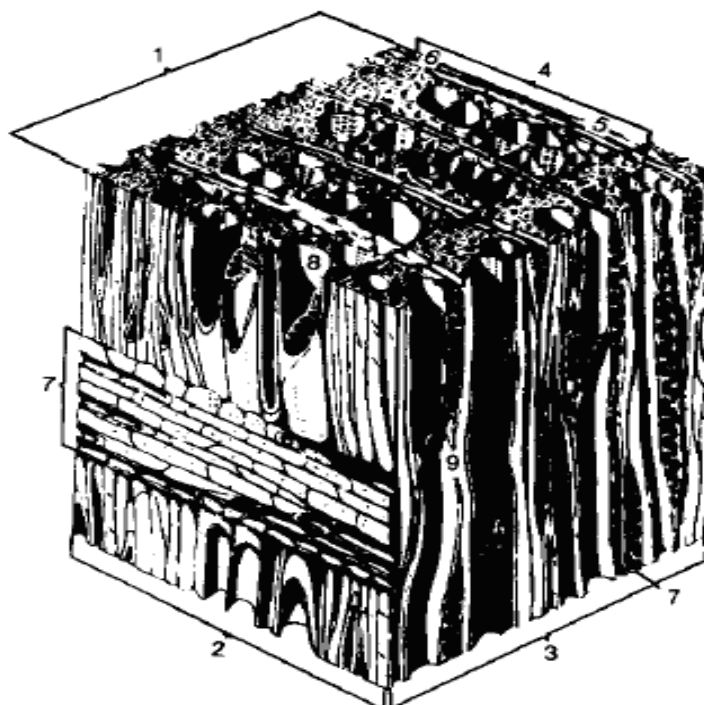
2.1.2 ลักษณะโครงสร้างเนื้อไม้

เนื้อไม้ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ที่เป็นผนังเส้นใย และลิกนินที่ทำหน้าที่ประสานเส้นใยเข้าไว้ด้วยกัน ความยาวของเส้นใยเนื้อแข็งยาวประมาณ 1 มม. สมบัติเชิงกลต่างๆ ของไม้ขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของผนังเส้นใยมากกว่าความยาวของเส้นใย (ดังแสดงในรูปที่ 2-2) เซลล์ในไม้จะเรียงตัวเป็นแนวตั้ง ดังนั้นหน้าตัดด้านปลายของแผ่นไม้จะประกอบด้วยหน้าตัดด้านปลายของเซลล์เนื้อไม้ เป็นหน้าตัดของท่อกลวงมารวมกัน ทำให้ไม้สามารถดูดน้ำเข้าไปทางด้านปลายของแผ่นไม้ได้มากและเร็ว โดยผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) มีความหนาประมาณ 0.1 ไมครอน ประกอบด้วย เซลลูโลสประมาณ ร้อยละ 5-10 นอกจากนั้นเป็น น้ำลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และ Pectic materials เส้นใยในชั้นนี้มีการเรียงตัวสลับกันเป็นร่างแหที่มีทิศทางไม่แน่นอน และผนังเซลล์ในชั้นนี้ทำหน้าที่ป้องกันการกระแทกกันระหว่างเซลล์ สำหรับผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) เป็นเซลล์ที่อยู่ถัดเข้าไปที่มีความหนามาก และเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่เซลล์เนื้อไม้ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้น S1, S2 และ S3 แต่ละผนังเซลล์มีสารประกอบทางเคมีของแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การเรียงตัวของไมโครไฟบริลกับแกนของเซลล์ชั้น S2 จะมีความหนาแน่นมากที่สุด เมื่อมีการดูดซึมน้ำของชั้น S2 จะทำให้เกิดการขยายตัวของเนื้อไม้ทางด้านข้าง ส่วนการขยายตัวทางด้านความยาวนั้นจะเกิดจากการดูดซึมน้ำของชั้น S1 และชั้น S3 สารประกอบหลักในชั้นผนังเซลล์ของไม้เหล่านี้ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยเซลลูโลสมีปริมาณ 40-50% ของจำนวนมวลผนังเซลล์ทั้งหมด ส่วนสารประกอบเฮมิเซลลูโลสมีประมาณ 25-40% และมีลิกนินไม่เกิน 33% ของมวลผนังเซลล์รวมทั้งหมด อย่างไรก็ตามส่วนประกอบเซลลูโลสและลิกนินแตกต่างกันตามชนิดของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน



รูปที่ 2-2 ภาพตัดขวางของเซลล์ไม้ที่มีหลายๆชั้นในผนังเซลล์ [11]

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเรื่องโครงสร้างภายในของเนื้อไม้เกี่ยวกับส่วนประกอบของเซลล์ที่รวมตัวกันเป็นเนื้อไม้ แต่ถ้าดูภายนอกของไม้แล้วจะเห็นภาพรวมของเซลล์ทั้งหมดที่ประกอบเป็นเนื้อไม้ (ดังรูปที่ 2-3) เนื้อไม้ในต้นฤดู (Early wood) มีผนังเซลล์บางกว่าเนื้อไม้ปลายฤดู (Latewood) ที่มีผนังเซลล์หนา เมื่อความชื้นในเนื้อไม้เปลี่ยนแปลงเซลล์ผนังหนาในส่วนเนื้อไม้ปลายฤดูจะมีขนาดเปลี่ยนแปลง (หดหรือขยายตัว) ได้มากกว่าเซลล์ผนังบางในส่วนเนื้อไม้ต้นฤดู ทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดด้านรัศมี (Radial) และด้านสัมผัส (Tangential) ของไม้ไม่เท่ากัน ลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อไม้มีรายละเอียดดังนี้



1. Cross-sectional face, 2. Radial face, 3. Tangential face, 4. Growth ring,
5. Early wood, 6. Latewood, 7. Wood ray, 8. Vessel, 9. Sieve plate.

รูปที่ 2-3 ภาพตัดขวางของเซลล์ไม้เนื้อแข็ง [12]

1. วงปี (Growth ring) ที่มีสีจางแสดงความเจริญในช่วงฤดูผสมพันธุ์และสีเข้มแสดงถึงความเจริญในช่วงแห้งแล้งในรอบปี ความกว้างของวงปีที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ความถ่วงจำเพาะและความแข็งแรงของไม้เปลี่ยนแปลง เมื่อมีอัตราการเจริญเพิ่มขึ้น (วงปีกว้างขึ้น) ส่วน

เนื้อในปลายฤดูก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งเซลล์ในส่วนนี้จะเป็นเซลล์ที่มีผนังหนา และมีจำนวนมากก็จะทำให้ค่าถ่วงจำเพาะและความแข็งแรงของไม้เพิ่มขึ้น

2. ท่อน้ำ (Vessel or Pore) การกระจายตัวของพอร์หรือรูของเนื้อไม้อยู่ในรูปแบบการจัดกระจายเป็นกลุ่มไม่แน่นอน แบ่งได้หลายขนาด คือ ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ขนาดส่วนมากที่พบจะเป็นขนาดใหญ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 180 ไมครอน ทั้งพอร์แบบเดี่ยวและพอร์แบบแฝด (2-3 เซลล์) อยู่ปะปนกันแต่ส่วนใหญ่เป็นแบบพอร์แฝด มีลักษณะเป็นวงชิดติดกับเรย์มีจำนวน 5-8 เวสเซลต่อตารางมิลลิเมตร มีลักษณะคล้ายทรงกระบอก หัวท้ายเปิดต่อกันเป็นท่อยาวในแนวความยาวของลำต้น

3. พาเรนคิมา (Parenchyma) เซลล์เรียงตัวไม่ติดกับพอร์ กระจายเป็นวงล้อมรอบพอร์ในลักษณะเป็นแถวเซลล์เดี่ยวหรือสองเซลล์ติดต่อกัน สามารถเห็นได้ชัดเจนทางด้านสัมผัสเป็นรูปหัวแหวนหรือหมวกครอบ จะเกิดขึ้นในด้านใดด้านหนึ่งของเวสเซลและเซลล์เรียงตัวติดกันเป็นแถวตามยาวจำนวนมากกว่า 8 เซลล์ ส่วนพาเรนคิมาแบบเรียงตัวติดกับพอร์พบแต่น้อยอยู่ที่บริเวณขอบเวสเซล ภายในเซลล์บางเซลล์มีทาลโลซิสมรวมตัวกันเป็นก้อนมีสีเข้มอยู่ภายในเซลล์ พาเรนคิมา

4. เซลล์รัศมี (Radial cell) เป็นเซลล์แถวเดี่ยวสูงน้อยกว่า 1 มม. เซลล์ที่เป็นองค์ประกอบจะเป็นเซลล์ตั้งทั้งหมด (Upright cells)

5. ไฟเบอร์ (Fiber) เป็นเซลล์ที่มีความสำคัญต่อความแข็งแรงของเนื้อไม้เรียงตัวเป็นแถวยาวในแนวรัศมีที่ผนังด้านภายในเซลล์และทางด้านสัมผัสมีผนังของไฟเบอร์บางมาก ขนาดช่องว่างมากกว่าความหนาผนังเซลล์ถึง 3 เท่าของความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 1700 ไมครอน กว้าง 30 ไมครอน ไฟเบอร์เป็นรูปหลายเหลี่ยมชนิดลิบริฟอร์มการเรียงตัวของไฟเบอร์มีลักษณะเป็นแถวตามในแนวรัศมี หลุมผนังเซลล์เป็นแบบ Simple pits พบบนผนังด้านสัมผัสมากกว่าด้านรัศมีโดยไฟเบอร์มีความยาวมาก

6. รัศมีหรือเรย์ของเนื้อไม้ (Wood rays) เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างได้และเปลือก ประกอบด้วยเรย์แถวเดี่ยวที่ความสูงน้อยกว่า 1 มม. ความกว้างของเรย์ 1-3 เซลล์ โดยวัดทางด้านสัมผัสในส่วนที่กว้างที่สุดของเซลล์ ส่วนของเซลล์พาเรนคิมาหรือเวสเซลวางตัวในแนวขนานเซลล์หรือเรียงตัวตามขวางมีลักษณะคล้ายกับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางตัวซ้อนกันคล้ายกำแพงต่อขึ้นเป็นชั้นๆ

7. ใ้ไม้ (Pith) อยู่บริเวณกลางลำต้น เป็นส่วนที่เกิดขึ้นมาพร้อมๆกับการเจริญของลำต้นในทางความสูง แต่ขนาดจะไม่ใหญ่ขึ้น เป็นเนื้อเยื่ออ่อนๆ ที่แตกเป็นกิ่งก้านของไม้

8. เนื้อไม้ตอนต้นและปลายฤดู (Early wood and Latewood) ในต้นฤดูเซลล์มีขนาดเซลล์ที่โตและมีผนังบางมีช่องว่างภายในเซลล์กว้าง เนื้อไม้ต้นฤดูการเจริญเติบโตจะแห้งได้เร็วกว่าไม้ปลายฤดูและหดตัวน้อยกว่า เนื่องจากลักษณะเซลล์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าและผนังเซลล์จะบางกว่าเนื้อไม้ปลายฤดู จึงเหมาะต่อการลำเลียงน้ำ ส่วนเนื้อไม้ที่เจริญเติบโตในปลายฤดูจะมีขนาดเซลล์เล็ก แต่ผนังเซลล์หนาและช่องว่างภายในเซลล์แคบ โดยเนื้อไม้ปลายฤดูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าและผนังเซลล์หนากว่านั้นจึงมีประโยชน์ในการค้ำจุนลำต้นให้แข็งแรง

2.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของไม้ยางพารา

1. ความหนาแน่น (Density) คือ มวลสาร (Mass) หรือน้ำหนัก (Weight) ของวัตถุต่อปริมาตร และควรสังเกตว่ามวลสารต่อหน่วยปริมาตร (Mass/Volume) เป็นค่าที่แน่นอนกว่าเพราะไม่ขึ้นกับตำแหน่งที่อยู่ของวัตถุนั้นแต่น้ำหนักจะขึ้นกับแรงโน้มถ่วงโลก (Gravity) โดยไม้ยางพาราจะมีความหนาแน่นขณะสด (60-80%ความชื้น) 870-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นที่สภาวะแห้งแห้ง (12% ความชื้น) 560-700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

2. ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของวัตถุต่อความหนาแน่นของสารมาตรฐาน (Standard substance) ที่อุณหภูมิจำเพาะ คือ น้ำมีความหนาแน่นสูงสุดที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นสารมาตรฐานที่ใช้เป็นสากลในการหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุทุกชนิดรวมทั้งไม้ด้วยที่อุณหภูมินี้ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความหนาแน่นของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่อัตราการเปลี่ยนแปลงจะน้อยลงมาก โดยความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราจะมีค่าเท่ากับ 500 – 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3. การหดตัวและพองตัว (Shrinkage and Swelling) คือ การลดลงของขนาดเนื้อไม้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ที่ต่ำกว่าจุดสมดุล ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นของเนื้อไม้ที่มีค่าระหว่าง 25-30% ขณะที่ปริมาณความชื้นไม่มีที่อยู่ในช่องว่างภายในเซลล์แต่มีปริมาณความชื้นอย่างอิมตัวในผนังเซลล์ เนื้อไม้จะมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อไม่มีความชื้นเหลืออยู่เลย และจะมีขนาดสูงสุดเมื่อมีน้ำอยู่อย่างอิมตัวในผนังเซลล์ การหดตัวและการพองตัวของเนื้อไม้จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไม้ในช่วงที่ต่ำกว่าจุดสมดุล และเมื่อไม้มีความชื้นเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดสมดุลก็ไม่มีผลที่ขนาดเพิ่มขึ้นอีก อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของเนื้อไม้แตกต่างทั้งสามด้าน จึงทำให้เปลี่ยนแปลงขนาดเนื้อไม้ต่างๆไม่เท่ากัน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดในด้านความยาว (Longitudinal) จะมีน้อยที่สุด การเปลี่ยนแปลงขนาดในด้านรัศมี (Radial) มีมากกว่าและการเปลี่ยนแปลงทางด้านการสัมผัส (Tangential) มีมากที่สุด

2.1.4 สมบัติเชิงกลศาสตร์ของไม้

ไม้ที่ผ่านการอบจะถูกนำทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ยางพาราตามมาตรฐานต่างๆ เพื่อออกแบบโครงสร้างไม้ให้มั่นคงแข็งแรงเพียงพอต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้างนั้นๆ โดยคุณสมบัติในด้านความเค้นอัดขนานและตั้งฉากเสี้ยน มอดุลัสแตกร้าวมอดุลัสยืดหยุ่น และความแข็งของไม้ยางพารามีค่าต่ำกว่าไม้สัก ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สมบัติเชิงกลและทางกายภาพของไม้ยางพาราและไม้สัก [13]

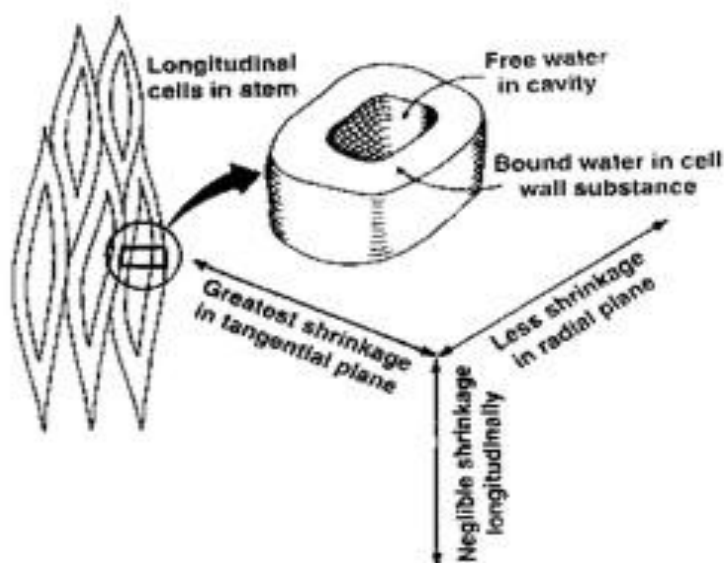
สมบัติเชิงกลและทางกายภาพ	ไม้ยางพารา (MC 15%)	ไม้สัก (MC 12%)
Density	460-650 kg/m ³	480-850 kg/m ³
Modulus of rupture (MOR)	66 N/mm ²	86-170 N/mm ²
Modulus of elasticity (MOE)	9240 N/mm ²	10500-15600 N/mm ²
Compression		
- Parallel to grain	32 N/mm ²	55 N/mm ²
- Perpendicular to grain	5 N/mm ²	6.5 N/mm ²
Shear Strength	11 N/mm ²	11 N/mm ²
Hardness	4350 N	4500 N

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ความชื้นในเนื้อไม้

ไม้ทุกชนิดประกอบด้วยปริมาณของน้ำซึ่งอยู่ในเนื้อไม้ ประกอบด้วยสารละลายหลายอย่าง เช่น แป้ง น้ำตาลและสารประกอบเคมีอื่นๆ ได้แก่ เซลลูโลส 50.63% เพนโตซาน 17.17% ลิกนิน 18.06% สารแทรก 13.28% และซีเถ้า 0.86% เป็นต้น สำหรับปริมาณน้ำในไม้ประกอบด้วย 2 ส่วน (ดังรูปที่ 2-4) ส่วนแรกเป็นน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ (Cell wall) ซึ่งเรียกว่า น้ำซึบ (Bound water) กับส่วนสองน้ำที่อยู่นอกผนังเซลล์หรือตามช่องว่างของเซลล์ (Cell cavity) ซึ่งเรียกว่าน้ำอิสระ (Free water) เป็นจุดหรือสภาพของไม้ที่มีน้ำอยู่เต็มเซลล์ โดยที่น้ำซึ่งอยู่นอกผนังเซลล์ไม่มีเหลืออยู่เลย จะเรียกว่า จุดหมาด (Fiber saturation point; FSP) เป็นจุดที่ความชื้นในไม้มีค่าระหว่าง 25% ถึง 30% สำหรับน้ำนอกผนังเซลล์ทั้งหมดเคลื่อนที่ออกจากเนื้อไม้แตกต่างกันตามชนิดของไม้ ความสำคัญของจุดหมาดจะส่งผลต่อคุณสมบัติการหดตัวของไม้ (Shrinkage) โดยไม้จะหดตัวเมื่อมีความชื้นลดลงจนต่ำกว่าความชื้นที่จุดเสี้ยนไม้อมตัว และอัตราหดตัวของไม้

จะเป็นปฏิกิริยากับอัตราการลดของความชื้นในไม้ การหดตัวของไม้จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดไม้และแตกต่างออกไปในทิศทางต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ ด้านสัมผัส (Tangential) ด้านรัศมี (Radial) ด้านยาว (Longitudinal) ไม้จะหดตัวมากทางด้านที่สัมผัสเส้นวงปี (Tangential) และลดลงเหลือครึ่งหนึ่งถึง 2 ใน 3 ทางด้านตั้งฉากกับวงปี (Radial) และหดตัวน้อยมากทางด้านยาวที่ขนานเส้นเพียง 0.1 – 0.3% เท่านั้น

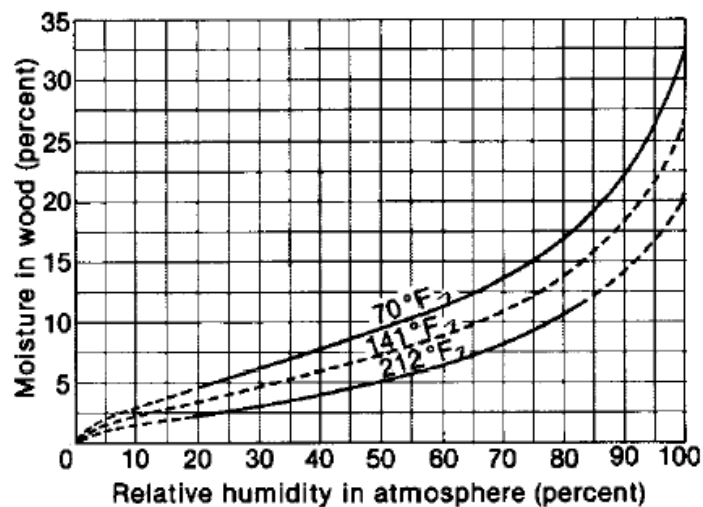


รูปที่ 2-4 น้ำที่อยู่ในเซลล์เนื้อไม้ [14]

ก่อนที่จะนำไปใช้งานไม้ที่มีปริมาณของน้ำจะถูกเอาออกไปจากเนื้อไม้ ซึ่งโดยปกติแล้วไม้จะมีการสูญเสียน้ำในธรรมชาติอยู่แล้ว เพื่อปรับให้สมดุลกับบรรยากาศรอบข้างขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและอุณหภูมิของอากาศ สำหรับกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อให้ได้ความชื้นออกโดยการระเหย จนกระทั่งมีค่าระดับความชื้นที่ได้สมดุลกับสิ่งแวดล้อม และข้อสำคัญที่สุดของการอบแห้ง คือการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด และปริมาณความร้อนจะถ่ายเทมาน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและไอน้ำในอากาศ เพราะฉะนั้นถ้าปริมาณไอน้ำในอากาศมีน้อยจะมีการถ่ายเทน้ำออกจากวัสดุอบแห้งได้ดี ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำในวัสดุโดยเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง คำนวณได้ดังสมการที่ 2-1

$$\text{ปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไม้สด} - \text{น้ำหนักไม้อบแห้ง}}{\text{น้ำหนักไม้อบแห้ง}} \times 100 \quad (2-1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยปริมาณความชื้นในเนื้อไม้จะลดลงตามปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในเนื้อไม้และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ [12]

นอกจากนี้สภาวะของความชื้นในการแห้งของเนื้อไม้มีความสัมพันธ์กับความชื้นของอากาศ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, R.H.) และความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, E.M.C.) รวมถึงความชื้นของเนื้อไม้ด้วย ความชื้นสัมพัทธ์เป็นส่วนหนึ่งของปริมาณไอน้ำ หรือความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงต่อปริมาณที่จะมีได้ในสภาพอิ่มตัว ณ. ที่อุณหภูมิใด อุณหภูมิหนึ่ง ในขณะที่ความชื้นสมดุลเป็นปริมาณความชื้นของเนื้อไม้ที่สมดุลกับความชื้นของบรรยากาศที่อยู่ล้อมรอบ เนื้อไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอยู่ตลอดเวลาตามสภาพความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งมีทั้งการคายความชื้นออกจากเนื้อไม้ (Desorption) และการดูดซับความชื้นจากบรรยากาศเข้าไปในเนื้อไม้ (Adsorption) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลง ไม้จะสูญเสียน้ำในส่วนผนังเซลล์ (Bound water) และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ไม้จะได้รับความชื้นในส่วนผนังเซลล์อีก การรักษาระดับความชื้นสัมพัทธ์ให้สมดุล จะทำให้เนื้อไม้ไม่มีการคายหรือมีการดูดซับความชื้นในส่วนผนังเซลล์อีก เมื่อขณะที่มีความชื้นในบรรยากาศสมดุลปริมาณความชื้นในส่วนผนัง

เซลล์ ที่อยู่เนื้อไม้สภาวะนี้ เรียกว่า Equilibrium moisture content ของไม้ สำหรับความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง จะมีปริมาณความชื้นสมดุลสูงด้วย และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเป็นศูนย์ เนื้อไม้จะมีค่าความชื้นสมดุลร้อยละศูนย์เหมือนกัน

2.2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ การใช้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำที่อยู่ในวัสดุ โดยการระเหยน้ำหรือการระเหิดจากของแข็ง อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งจะเกิดตรงจุดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุด หรืออาศัยหลักการอบแห้ง ดังนี้

2.2.2.1 การลดความชื้นในระบบการถ่ายเทความร้อน มี 3 แบบ ดังนี้ คือ

1. การพาความร้อน จะเกิดกับวัตถุที่เป็นของเหลว โดยกระแสความร้อนจะถูกพาผ่านช่องว่างที่เป็นอากาศหรือแก๊สจากของเหลวชนิดหนึ่งไปยังของเหลวอีกชนิดหนึ่ง นิยมใช้ในเตาอบ เช่น การอาศัยกระแสลมร้อนผ่านกองไม้

2. การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งจะเกิดกับวัตถุที่มีลักษณะเป็นของแข็ง

3. การแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุซึ่งจะเกิดขึ้น ในกรณีอบในสุญญากาศ และการอบแห้งแบบเยือกแข็ง เป็นต้น ไม้ต้องอยู่ใกล้แหล่งความร้อน ไม่เหมาะแก่กองไม้ที่มีจำนวนมากๆ

ในทางปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนขณะอบแห้งอาจเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 หรือ 3 แบบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุที่นำไปอบแห้ง

2.2.2.2 ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการอบไม้ในเตาอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบ มีทั้งปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายใน โดยปัจจัยภายใน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของไม้และความชื้นภายในเนื้อไม้อย่างพารา ส่วนปัจจัยภายนอกได้แก่ อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ

ปัจจัยภายใน ประกอบด้วย

1. ไม้ที่มีความชื้นสูง ใช้ระยะเวลาอบแห้งนานกว่าไม้ที่มีความชื้นน้อย ภายใต้สภาวะเดียวกัน
2. หลุมผนังเซลล์ใหญ่ (Pit) และมีจำนวนมากจะระบายความชื้นได้ดีกว่าหลุมผนังเซลล์เล็กและมีจำนวนน้อย
3. ความหนาแน่นในเนื้อไม้มาก ส่งผลต่อการแห้งช้ากว่าไม้ที่มีความหนาแน่นต่ำ
4. รูปแบบการเลื่อยไม้ ไม้ที่เลื่อยตัดเส้นรัศมีมีอัตราแห้งสูงกว่าไม้เลื่อยตามรัศมีภายในสภาวะเดียวกัน โดยเส้นรัศมีเป็นทางนำความชื้นผ่านแนวเสี้ยนไม้ออกจากผิวไม้เป็นจำนวนมาก

ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการอบไม้

1. การใช้อุณหภูมิสูงอบไม้ส่งผลต่ออัตราแห้งของไม้เร็วกว่าการอบไม้ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ เนื่องจากไอน้ำในอากาศมีความจุความชื้นมากขึ้นส่งผลต่อน้ำภายในเนื้อไม้เคลื่อนที่ออกมา โดยอัตราระเหยขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำของอากาศที่ผิวไม้กับความดันไอน้ำของอากาศภายในเตา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความดันไอน้ำอิ่มตัวในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราระเหยของน้ำจากหน้าไม้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงทำให้ระยะเวลาอบน้อยลงแต่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพไม้ที่อาจเกิดการแตกตัวของไม้หลังการอบด้วย

2. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศน้อยมีอัตราการแห้งเร็วกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง

3. เนื่องจากความร้อนทำให้น้ำในเนื้อไม้ออกมา โดยน้ำที่ออกมานี้จะถูกเคลื่อนย้ายโดยลมที่ผ่านหน้าไม้ ดังนั้นความเร็วลมที่ผ่านหน้าไม้เป็นปัจจัยสำคัญที่ความชื้นในเนื้อไม้ถูกเคลื่อนย้ายอย่างรวดเร็ว

2.2.2.3 การเคลื่อนที่ของความชื้นในไม้

การเคลื่อนที่ของความชื้นในไม้ในขณะที่ทำให้ไม้แห้งนั้น มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ประการ [15] คือ

1. ช่องว่างต่างๆที่มีอยู่ในไม้ ความชื้นหรือน้ำจะเคลื่อนผ่านเนื้อไม้ในสภาพของของเหลวหรือไอในช่องว่างของเนื้อไม้ อย่างเช่น การเคลื่อนที่ผ่านท่อลำน้ำเลี้ยงสำหรับไม้ใบกว้าง (Hardwood) โดยเคลื่อนที่ผ่านช่องเซลล์ของเวสเซล (Vessel) สำหรับความชื้นหรือน้ำของไม้ตระกูลสนจะเคลื่อนผ่านเวสเซลที่ทะลุต่อกันในแบบต่างๆ ซึ่งส่วนที่ต่อกันเรียกว่า (Perforation plate) เป็นต้น วิธีการเคลื่อนที่และอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำในเนื้อไม้นั้น มีความสำคัญต่อการแห้งของไม้มาก ความชื้นในไม้สามารถจะออกมาได้ 3 ทางด้วยกันคือ ตามแนวเส้นไม้ (Longitudinal) ตามแนวด้านรัศมี (Radial) และทางด้านสัมผัส (Tangential) ทางด้านในแนวตามเส้นไม้ อัตราการระเหยของความชื้นจะมีมากที่สุดและทางด้านสัมผัสจะมีอัตราการระเหยน้อยที่สุด

2. แรงที่ทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ มีแรงอยู่หลายชนิดที่ทำหน้าที่ให้ความชื้นเคลื่อนที่ออกจากไม้ในขณะที่ทำให้ไม้แห้ง แบ่งเป็น 2 ระยะ

2.1 เมื่อไม้มีความชื้นสูงกว่าจุดหมาด การเคลื่อนที่ของความชื้นจะเป็นไปในรูปของ Capillary action แรงนี้ทำให้น้ำนอกผนังเซลล์เคลื่อนที่ผ่านหลุมผนังเซลล์และช่องเซลล์ ในขณะที่เดียวกันนี้ก็ยังมีแรง adhesion ที่เป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้ำและของสาร และ cohesion ที่เป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้ำต่อกันด้วย

2.2 เมื่อไม้มีความชื้นต่ำกว่าจุดเหมาะสม ความชื้นจะเคลื่อนที่ในรูปของการแพร่กระจาย (diffusion) อันเกิดขึ้นเนื่องจาก

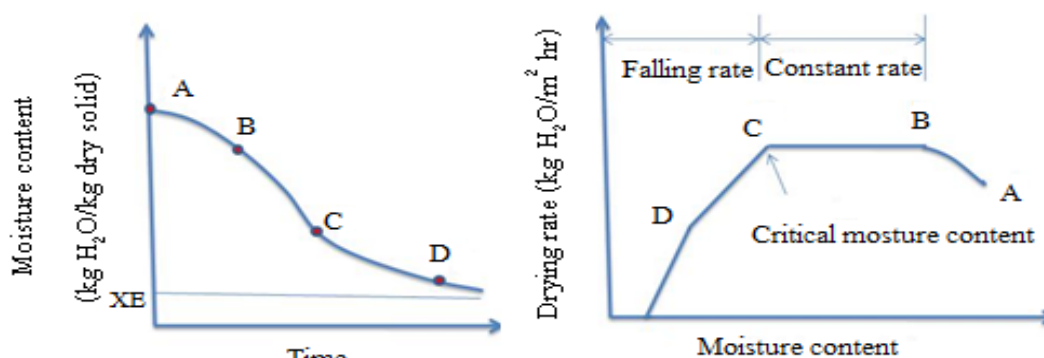
- ความแตกต่างของความดันไอ เมื่อ Capillary action ลึกลงลง ภายในช่องเซลล์ก็จะมีแต่อากาศและไอน้ำ ความแตกต่างระหว่างความดันไอก็จะทำให้ความชื้นอยู่ในรูปของไอ น้ำเคลื่อนที่ผ่านช่องเซลล์ Pit chamber, Pit membrane opening และช่องว่างระหว่างเซลล์ ปฏิกริยาอันนี้จะมีผลดียิ่งขึ้นถ้าหากมีอุณหภูมิสูงขึ้น หรือเมื่อมีความชื้นน้อยลง

- ความแตกต่างของปริมาณความชื้น ปัจจัยที่สำคัญในการทำให้ไม้แห้งที่อุณหภูมิต่ำๆคือ ความแตกต่างของปริมาณความชื้นตลอดจนความหนาของแผ่นไม้ ซึ่งจะทำให้น้ำในผนังเซลล์เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของเซลล์ จากที่ที่มีความชื้นสูงไปยังส่วนที่มีความชื้นน้อยกว่า

สำหรับน้ำนอกผนังเซลล์จะเคลื่อนที่โดย Capillary action และน้ำในผนังเซลล์จะเคลื่อนที่โดย diffusion เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณความชื้นและความแตกต่างของความดันไอ โดยปกติแล้วการแพร่กระจายของความชื้นภายในชั้นไม้จะเป็นการควบคุมอัตราการแห้งของไม้ มีอยู่ 2 ทางด้วยกันคือ ตามความยาวหรือตามแนวเส้นไม้หรือตามขวางเส้น ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเนื้อที่หน้าตัดของไม้ ลักษณะของเซลล์และสภาพของความชื้นในไม้อีกด้วย การแพร่กระจายตามแนวเส้นไม้ ไม้ที่มีผนังเซลล์หนาจะทำให้การแพร่กระจายของความชื้นมีน้อยกว่าที่ผนังเซลล์บาง แต่ถึงอย่างไรก็ตามการแพร่กระจายด้านปลายเส้นไม้จะเร็วกว่าทางด้านตามขวางประมาณ 12-15 เท่า

2.2.2.4 การอบแห้ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้น แก้วสด (Initial period) ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant rate period) และช่วงอัตราการแห้งลดลง (Falling rate period) โดยเฉพาะช่วงอัตราการแห้งคงที่และช่วงอัตราการแห้งลดลงจะแบ่งโดยจุดวิกฤติ ความชื้นที่จุดวิกฤตินี้เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบอบแห้ง เนื่องจากที่จุดนี้กลไกการแห้งจะเปลี่ยนจากกลไกภายนอกเป็นกลไกภายใน คือ การเคลื่อนย้ายไอน้ำจากผิวไม้อย่างพาราเป็นกลไกภายในคือการเคลื่อนย้ายน้ำจากเนื้อไม้อย่างพารา ดังแสดงในรูปที่ 2-6 ในช่วงแรกของการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ไม้อย่างพารา (Initial period - AB) ที่มีปริมาณความชื้นอยู่มาก ผิวของไม้อย่างพาราจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก อุณหภูมิของไม้อย่างพาราจะถูกให้ความร้อนจนสูงถึงอุณหภูมิสมดุล ดังนั้นช่วงเวลานี้ความชื้นที่ใช้ในการอบแห้งจึงไปเพิ่มอุณหภูมิให้กับไม้อย่างพารา ทำให้ไม้อย่างพารามีอุณหภูมิสูงขึ้นและช่วงที่สองเป็นช่วงการอบแห้งที่อัตราอบแห้งคงที่ (Constant rate period - BC) อุณหภูมิของไม้อย่างพาราจะมีค่าคงที่ ความชื้นหรือน้ำจากภายในไม้อย่างพาราจะซึมไหลออกมาที่ผิวไม้อย่างพาราเพียงพอที่จะรักษาภาวะอิมิตัวที่บริเวณผิว

พลังงานความร้อนที่ไม้ยางพาราได้รับจะใช้ในการระเหยความชื้นของไม้ยางพาราเท่านั้น ทำให้อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของไม้ยางพาราลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง ดังนั้นช่วงนี้อัตราการระเหยจะคงที่ (Constant drying rate) หลังจากนั้นเป็นช่วงการอบแห้งที่อัตราอบแห้งลดลง (Falling rate period - CD และ DE) ช่วงนี้ความชื้นที่ผิวของไม้ยางพาราค่อย ๆ หมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นจากด้านในของไม้ยางพาราเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของความชื้นที่ผิวของไม้ยางพารา ดังนั้นที่ผิวของไม้ยางพาราจะค่อย ๆ แห้งลงและอุณหภูมิของไม้ยางพาราจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งของช่วงนี้จะค่อย ๆ ลดลงนั่นเอง การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของไม้ยางพาราลดลงถึงค่าความชื้นสมดุล ซึ่งความชื้นของไม้ยางพาราจะไม่ลดลงอีก ถึงแม้จะใช้เวลาในการอบแห้งนานเท่าใดก็ตาม ในช่วงนี้อัตราการแห้งจะถูกจำกัดโดยการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในมาสู่ผิว ขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในไม้ยางพาราซึ่งมีผลต่อความต้านทานของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในเนื้อไม้ยางพารา อัตราการแห้งจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อความชื้นในไม้ยางพาราเข้าใกล้ความชื้นสมดุลที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันไอ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ดังนั้นการอบแห้งในช่วงหลังต้องใช้เวลามากกว่าช่วงอื่นมาก



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างการอบแห้งและความชื้น [14]

2.2.2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพอรุน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งในวัสดุพอรุนที่ใช้ในการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งซึ่งมีข้อกำหนดสำคัญคือ เป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-layer drying) ซึ่งความหนาของวัสดุจะต้องไม่เกิน 3 ชั้น และการอบแห้งเกิดในคาบเวลาการทำแห้งแบบลดลง (Falling rate drying period) ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวภายนอกของวัสดุเท่านั้น แบ่งเป็น 3 กลุ่ม [16] คือ สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี และ

สมการเอมพิริคัล สำหรับสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) นั้นเป็นสมการที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถพัฒนาได้จากการทดลอง พารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความกลมกลืนของแบบจำลอง ได้แก่ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ การลดลงของค่า Chi-Square และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยตัวแปรสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คือ อัตราส่วนความชื้นซึ่งหมายถึงปริมาณของน้ำที่เหลืออยู่ในวัสดุที่กำลังอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ในวัสดุซึ่งสามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่ง ๆ นอกจากนี้แบบจำลองเอมพิริคัลของการอบแห้งเป็นสมการที่ได้จากการสอดคล้องกันของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเข้ากับสมการต้นแบบ ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยสมการที่รู้จักกันดีในการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารคือแบบจำลองของ Page (Page's model) เป็นแบบจำลองเริ่มแรกที่ใช้สำหรับเมล็ดข้าวโพด และพัฒนามาจาก Lewis Model แสดงในสมการที่ 2-2 ดังนี้

$$MR = [(M_t - M_{eq}) / (M_0 - M_{eq})] = \exp(-kt^n) \quad (2-2)$$

เมื่อ MR = ความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใด (%d.b, ร้อยละมาตรฐานแห้ง), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (%d.b), M_{eq} = ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b), M_0 = ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%d.b), n = ลำดับที่ของฟังก์ชัน (1, 2, 3, ...), t = เวลาอบแห้ง(min), k = ค่าคงที่การอบแห้ง(ตามค่าหน่วยของ t)

โดยถือว่า ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} \ll M_0$) และ ความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} \ll M_t$) จึงละค่าความชื้นสมดุลในสมการ (2-2) ข้างต้นได้ และเมื่อใส่ลอการิทึมธรรมชาติ (\ln) ในสมการ (2-3) ทั้งสองข้าง 2 ครั้ง สามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง (Drying constant, k) ได้ จากเส้นกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(-\ln MR)$ กับ $\ln t$ ในสมการ (2-4) เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นบวก (ถ้าสมมุติฐานถูกต้อง) ค่าคงที่ของแบบจำลองของเพจ (Page's model constant หรือค่า N) หาได้จากความลาดชันของเส้นตรง ค่า k คือ จุดที่เส้นกราฟตัดแกนเมื่อ t มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นก็คือ ที่ $\log 1$ นั่นเองในการพล็อตกราฟแบบ log-log และจะมีหน่วยเป็น เวลา⁻¹ ตามค่าหน่วยของค่า t ค่าคงที่การอบแห้งนี้จะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้ง หากค่า k มีค่ามากแสดงว่าการอบแห้งใช้เวลาสั้น ส่วนค่าคงที่ N นั้นไม่มีหน่วย แบบจำลองเอมพิริคัลการอบแห้งที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 2-2 สมมติฐานของสมการนี้ อาทิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิคงที่ ความเร็วของอากาศคงที่ เป็นต้น

$$\ln(-\ln MR) = \ln k + N \ln t \quad (2-3)$$

ในทำนองเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เมื่อทราบค่า k และค่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation energy for diffusion, E_a) โดยการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังรูปสมการที่ 2-4

$$K = k' \exp(-Q/RT) \quad (2-4)$$

โดยที่ K คือ อัตราการอบแห้ง, k' เป็นค่าคงที่, Q คือ พลังงานที่จำเป็นสำหรับการอบแห้ง (J/mol), R คือ แก๊สคงที่ = 8.314 J/mol.K และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ เทียบกับ $1/T$ สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาและ k' จากความชันและจุดตัดแกนตั้งของกราฟตามลำดับ

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างแบบจำลองการอบแห้งเอมพิริคัลแบบต่าง ๆ [17-20]

ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
Lewis	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})] = \exp(-k.t)$
Page	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})] = \exp(-k.t^n)$
Henderson and Pabis	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})] = a \exp(-k.t)$
Logarithmic	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})] = a \exp(-k.t) + c$
Two term exponential	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})] = a \exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.a.t)$
Diffusion Approximation	$MR = [(M - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})] = a \exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t)$

อย่างไรก็ตามการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับวัสดุที่ทดลอง จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องทั้งในด้านวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ ผลกระทบต่อคุณภาพในทดลอง ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง เป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่างๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ตลอดจนการหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ ได้ดี ปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการ

จำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่างๆในกระบวนการอบแห้ง ตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งซึ่งมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้ง

2.2.3 เตาอบไม้ (Temperature operation) แบ่งตามช่วงอุณหภูมิการอบไม้ [12] ได้ดังนี้

2.2.3.1 เตาอบอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature kiln) อุณหภูมิภายในเตาอบอยู่ในช่วง 21-49 °C แต่ส่วนใหญ่จะอบไม้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 43 °C เตาอบแบบนี้จะเป็นจะรวมไปถึงเตาอบที่มีพัดลม เตาอบพลังงานแสงอาทิตย์ เตาอบสุญญากาศ เตาอบแบบดูดความชื้น เป็นต้น

2.2.3.2 เตาอบธรรมดา (Conventional-temperature kiln) อุณหภูมิของเตาอบอยู่ในช่วง 43-82 °C ใช้อบไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้ออ่อนที่มีความหนามากกว่าปกติ

2.2.3.3 เตาอบอุณหภูมิสูงขึ้น (Elevated-temperature kiln) อุณหภูมิของเตาอบอยู่ที่ 43-99 °C อุณหภูมิกระเปาะเปียกสุดท้ายในตารางอบจะถูกนำมาใช้ในเตาอบประเภทนี้อยู่ในช่วง 88-93 °C แต่ปกติใช้สูงสุดที่ 99 °C

2.2.3.4 เตาอบอุณหภูมิสูงสุด (High-temperature kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในเตาอบสูงกว่า 100 °C โดยปกติอุณหภูมิอยู่ในช่วง 110-138 °C จะถูกนำมาใช้อบไม้เกรดโครงสร้างที่มีผิวและการแตกของปลายไม้หลังการอบอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้

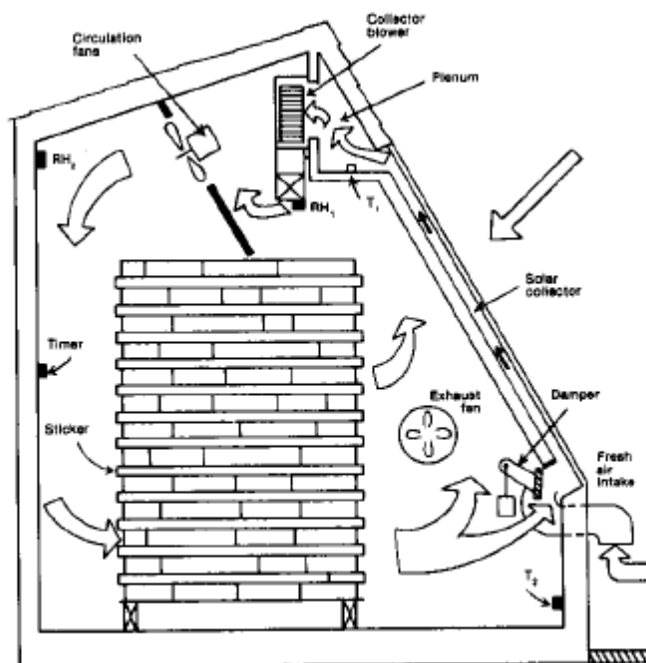
2.2.4 แหล่งพลังงานที่ใช้ในเตาอบไม้

2.2.4.1 ระบบไอน้ำ ประกอบด้วย หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบต้มโดยใช้ฟืน และเศษไม้ที่เป็นของเหลือจากการตัดซอยไม้และห้องอบไม้ โดยจะมีระบบท่อจ่ายน้ำร้อนจาก Boiler ไปยังห้องอบแต่ละห้องและมีระบบพัดลมหมุนเวียนสำหรับกระจายลมร้อนในแต่ละห้องอบ

2.2.4.2 พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่ได้มาโดยไม่ต้องเสีย ค่าใช้จ่าย ส่วนใหญ่เป็นเตาอบขนาดเล็กแบบคริวเรือนและไม่สามารถกำหนดอุณหภูมิที่แน่นอนได้ ดังแสดงในรูป 2-7

2.2.4.3 ลมร้อน ผนังตู้อบควรกระจายความร้อนภายในได้ดี และป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายในสู่ภายนอก วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโลหะที่ไม่เป็นสนิม ไม่เปลี่ยยนรูปร่าง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กพ่นสีกันสนิม ผนังตู้อบจะมี 2-3 ชั้น และมีฉนวนหนา 2.54-6.3 ซม. อยู่ระหว่างกลางฉนวนกันความร้อนควรมีความคงทนต่อความร้อน ไม่ดูดความชื้น และนำความร้อนไม่ดี สำหรับส่วนประกอบมี 3 ส่วนหลัก คือ Blower, ส่วนควบคุมอุณหภูมิและตัวกำเนิดลมร้อน (Heater) โดยอาศัย Blower ดูดอากาศภายในห้อง แล้วส่งลมเข้าสู่ส่วนควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งภายใน

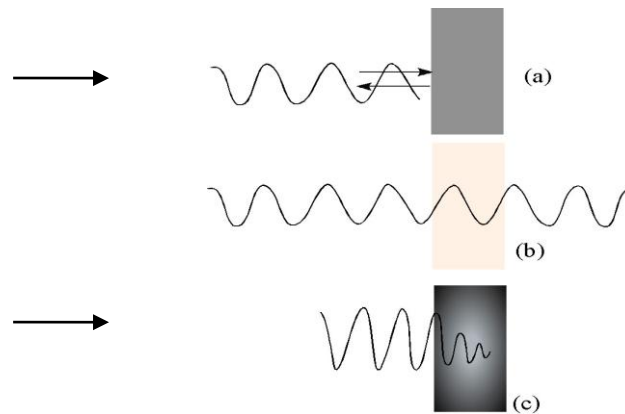
บรรจุ Heater ที่ต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นลมร้อนจะไหลผ่านท่อและวาล์ว แล้วจึงเข้าสู่เตาอบ



รูปที่ 2-7 ลักษณะของการออกแบบเตาอบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ [12]

2.2.4.4 คลื่นไมโครเวฟ คือ พลังงานที่เกิดจากการแผ่ของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ไมโครเวฟมีความยาวคลื่นระหว่าง 1 มม. ถึง 1 ม. มีความถี่ของช่วงคลื่นระหว่าง 300 เมกกะเฮิร์ต ถึง 300 กิกะเฮิร์ต โดยช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟที่นำมาใช้ในงานทางอุตสาหกรรมและการวิจัยนั้นอยู่ในช่วง 915 ถึง 2450 เมกกะเฮิร์ต [21] คลื่นไมโครเวฟนั้นจะมีลักษณะเหมือนลำแสงเส้นตรงที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนกลับ (Reflection) เมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่าน (Transmission) ภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระดาษ ไม้ และพลาสติก ส่วนสารประกอบที่มีขั้ว เช่น น้ำ สามารถดูดซับ (Absorption) คลื่นไมโครเวฟ [22] ดังแสดงในรูปที่ 2-8

การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านตัวกลางต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ (Maxwell) ดังแสดงในรูปสมการ 2-5 ถึง 2-8 ดังนี้



รูปที่ 2-8 การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านตัวกลางที่ (a) สะท้อนคลื่นไมโครเวฟ (b) ยอมให้คลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านโดยไม่ดูดกลืน และ (c) ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้ว กลายเป็นความร้อนในตัวกลาง [23]

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-5)$$

$$\nabla \times \frac{B}{\mu} = J + \frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial t} \quad (2-6)$$

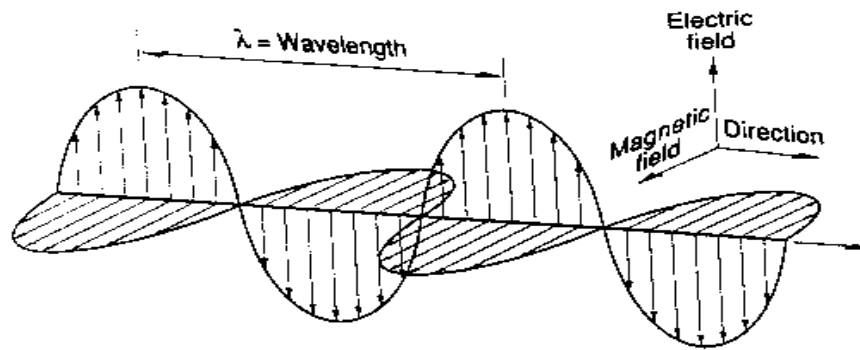
$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = \rho_f \quad (2-7)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2-8)$$

เมื่อ E = สนามไฟฟ้า, B = สนามแม่เหล็ก, ε = ค่าคงที่ในการส่งผ่านสนามไฟฟ้าของตัวกลางในการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟ (Permittivity of medium), μ = ค่าคงที่ในการส่งผ่านสนามแม่เหล็ก (Permeability), J = กระแสไฟฟ้า, ρ_f = ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าอิสระ

ลักษณะของการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของคลื่นไมโครเวฟนั้น เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (ประมาณสามแสนกิโลเมตรต่อวินาที) คลื่นที่กระเพื่อมขึ้นและลงในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ เรียกว่า คลื่นตามขวาง โดยมีโมเลกุลของน้ำเป็นตัวกลางของคลื่น แต่ในการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟไปในอากาศนั้น ตัวกลางของคลื่นก็คือ โมเลกุลของอากาศ นอกจากนี้ยังสามารถเคลื่อนที่ไปในสุญญากาศได้เนื่องจากมันมีพลังงานอยู่ภายในตัวเอง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟมีความถี่ 2450 ล้านรอบต่อวินาที ในแต่ละครั้งรอบจะมีการกลับหัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เมื่อผ่านเข้าไปในไม้อ่างจะไม่เหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำในไม้อ่างมีการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมาด้วยความถี่สูงตามจังหวะการกลับหัวของสนามไฟฟ้าของคลื่น

ไมโครเวฟ ก่อให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำและเกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในเนื้อไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2-9



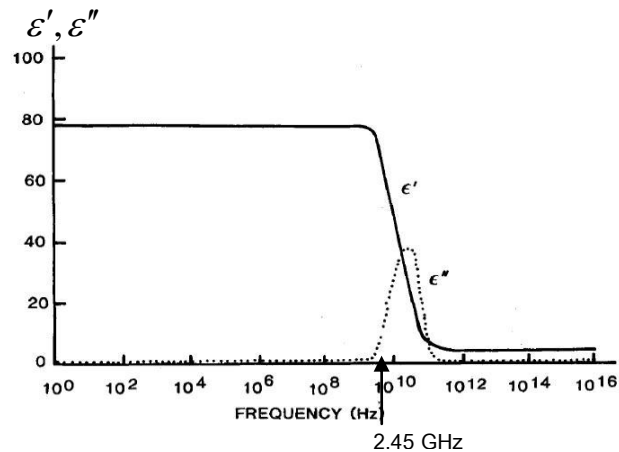
รูปที่ 2-9 การกลับขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อโมเลกุลอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า (Electric field) ซึ่งถ้าหากโมเลกุลมีประจุบวกและลบ อยู่ q และ แยกออกจากกันเป็นระยะ d ดังนั้นโมเลกุลจะมีไดโพลโมเมนต์เท่ากับ qd ถ้าในตัวกลางมี N โมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ตัวกลางจะมีไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร P เท่ากับ Nqd โดยที่ P และ E มีความสัมพันธ์กันดังสมการ 2-9 และ 2-10

$$P = \epsilon_0 \epsilon E \quad (2-9)$$

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (2-10)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ, ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุตัวกลาง, ϵ' และ ϵ'' คือ ส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ โดยค่า ϵ' จะแสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานสนามไฟฟ้าในวัสดุโดยไม่มีการสูญเสีย ส่วนค่า ϵ'' จะแสดงถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ สำหรับในอากาศจะไม่มีการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากอากาศมีค่า ϵ'' เท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปแล้ว ϵ' และ ϵ'' จะเป็นฟังก์ชันของความถี่ f ของคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 2-10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ' และ ϵ'' ของน้ำที่อุณหภูมิ 25°C ที่ความถี่ต่างๆของคลื่นไมโครเวฟ จะเห็นว่าน้ำจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟอย่างรุนแรงที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งมีค่าประมาณ 20 GHz ซึ่ง ϵ'' มีค่าสูงสุด



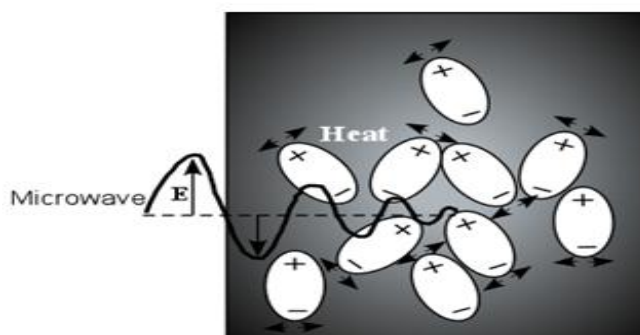
รูปที่ 2-10 การเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ' และค่า ϵ'' ที่ความถี่ต่างๆ ของคลื่นไมโครเวฟ [22]

โดยทั่วไปแล้วเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz จะสามารถทำให้วัสดุซึ่งมีความหนาไม่เกิน 5 ซม. เกิดความร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้น โดยกลไกการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นของวัสดุไดอิเล็กตริก สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2-11 เมื่อโมเลกุลไดโพลได้แรงกระทำจากสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้โมเลกุลแต่ละโมเลกุลมีการเคลื่อนที่แบบหมุน แต่เนื่องจากแต่ละโมเลกุลมีการหมุนไม่สอดคล้องกันหรือไม่อยู่ในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้เกิดการชนกันขึ้นระหว่างโมเลกุล การชนดังกล่าวทำให้เกิดแรงเสียดทานของการหมุนและเกิดเป็นความร้อนขึ้น โดยประสิทธิภาพในการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับความถี่ธรรมชาติในการหมุนของโมเลกุลและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ โดยน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C จะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีที่สุดที่ความถี่ประมาณ 20 GHz ดังได้อธิบายไว้ข้างต้น [23] ถ้าให้ $P_{abs.}$ คือ กำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกดูดกลืนแล้วกลายเป็นความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ดังสมการที่ 2-11 เมื่อ E คือ แอมพลิจูดของคลื่นไมโครเวฟ คือ

$$P_{abs.} = 2\pi f \epsilon' \epsilon'' E^2 \quad (2-11)$$

จากสมการที่ 2-11 จะเห็นว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ จะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าหรือความเข้มของคลื่นไมโครเวฟเมื่อความถี่ของคลื่นคงที่ จะต้องสามารถควบคุมปริมาณความร้อนภายในวัสดุให้มีปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งในการควบคุมปริมาณความร้อนให้มีปริมาณที่พอดีนี้ จะต้องควบคุมความเข้มของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งไปยังไม้ที่อบ การเกิดความร้อนในไม้ด้วยไมโครเวฟนั้นเกิดจากความขึ้นในไม้ดูดซับคลื่นไมโครเวฟ แล้วเปลี่ยนไปเป็น

พลังงานความร้อน โดยไมโครเวฟทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิออนในสารละลายและการเสียดสีกันของอิออนที่เคลื่อนที่ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สารประกอบที่มีขั้ว เช่น น้ำ เกิดการเรียงตัวของประจุบวกและลบอย่างเป็นระเบียบ พร้อมกับเกิดการหมุนตัวกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ คือ 915 ถึง 2450 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลน้ำ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น [22]



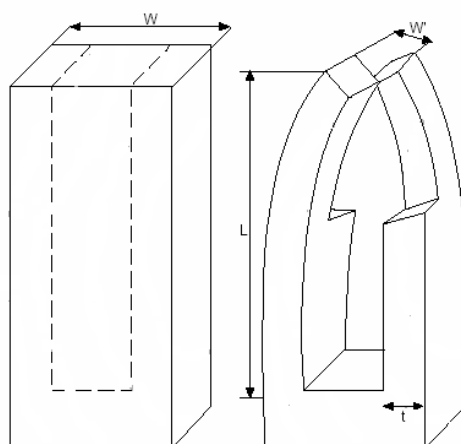
รูปที่ 2-11 การหมุนตัวของสารประกอบมีประจุเนื่องจากไมโครเวฟ [23]

เพื่อให้มีการใช้เตาอบไมโครเวฟอย่างปลอดภัย ได้มีการกำหนดค่าขีดจำกัดระดับความเข้มของกำลังงานคือ ไมควรมากเกิน 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และต้องไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยวัดที่ระยะห่าง 5 ซม. จากผิวนอกของเตาอบไมโครเวฟ โดยอาศัยแนวคิดที่ว่าอันตรายที่เกิดขึ้นจากการได้รับรังสีไมโครเวฟความเข้มสูงนั้นมีแต่ผลเนื่องมาจากความร้อนเท่านั้น

2.2.5 การตรวจสอบไม้หลังการอบ จะมีการวัดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

2.2.5.1 การทดสอบซี่ส้อม เป็นการทดสอบเพื่อดูว่ามีความเค้นเกิดขึ้นในซี่ไม้ที่กำลังอบอยู่ในเตาอบหรือไม่ ถ้ามีความเค้นเกิดขึ้นจะทำให้ไม้ที่ผ่านการอบมีการบิดเบี้ยว ซึ่งทำให้เกิดเป็นของเสียขณะอบ ดังนั้นการทดสอบซี่ส้อม (Prong test) นั้นมีความสำคัญมาก เพราะถ้าขณะอบนั้นมีความเค้นเกิดขึ้นมาก ก็ต้องทำการกำจัดความเค้นก่อนเพื่อที่จะลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบไม้ ดังนี้

1. ไม้มีความหนาไม่เกิน 3.81 ซม. หรือ 40 มม. จะตัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน ตามความหนา แล้วใช้สิ่วเคาะเอาซี่ตรงกลางออก ดังรูปที่ 2-12
2. ไม้มีความหนาเกิน 3.81 ซม. หรือ 40 มม. ขึ้นไป จะตัดแบ่งออกเป็น 6 ส่วนเท่าๆกัน ตามความหนาแล้วเคาะเอาซี่ที่ 2 และ 5 ออก



รูปที่ 2-12 ไม้ที่มีความหนาไม่เกิน 3.81 ซม. หรือ 40 มม. ที่ใช้ในการทดสอบชีส์ล่อม [12]

หากชีส์ล่อมโค้งออกหลังจากได้เลื่อยตัดออกใหม่ๆ แสดงว่า มีแรงดึงอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านนอกและแรงอัดอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านใน แต่ถ้าชีส์ล่อมโค้งเข้าหากันแสดงว่ามีแรงดึงอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านในและแรงอัดอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านนอก และชีส์ล่อมอยู่ในสภาพตรง แสดงว่าไม่มีความเค้นอยู่ในเนื้อไม้ การคำนวณค่าองศาเบี่ยงเบนของไม้ตามสมการ 2-15

$$\theta = \tan^{-1}(w - w'/2L) \quad (2-15)$$

โดยที่ θ = องศาเบี่ยงเบน ($^{\circ}$ C)

w = ระยะก่อนการตัดเป็นชีส์ล่อม

w' = ระยะหลังตัดเป็นชีส์ล่อม

L = ความยาวของชีส์ล่อม

ถ้าลักษณะของชีส์ล่อมอยู่ในสภาพตรงหรือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5° แสดงว่าไม้ที่ผ่านการอบสามารถคลายความเค้นตกค้างหรือไม่มีการแข็งนอกภายในเนื้อไม้ [24] ในขณะที่ชีส์ล่อมที่โค้งออกแสดงถึงการเกิดการอยู่ตัวเนื่องจากแรงดึง อยู่ในเนื้อไม้ทางด้านในและเกิดการอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัดอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านนอก เป็นลักษณะของการแข็งนอกกลับทาง นอกจากนี้ชีส์ล่อมที่เข้าหากันแสดงว่าเกิดการอยู่ตัวเนื่องจากแรงดึงอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านนอก และเกิดการอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัดอยู่ในเนื้อไม้ทางด้านใน เกิดการแข็งนอก

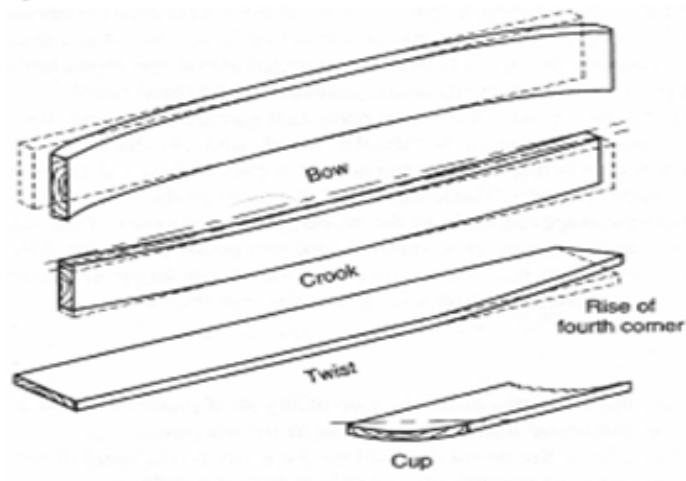
2.2.5.2 ตำหนิของไม้ (Defects of wood)

การบิดโค้งของไม้ ดังแสดงในรูป 2-13

- ไม้โก่ง (Crook) เป็นการบิดของไม้ยาวพาราตามความยาวของหน้าไม้

- ไม้โค้ง (Bow) เป็นการบิดของไม้ยาวพาราตามความยาวของสันไม้
- ไม้บิด (Twist) เป็นการบิดของปลายไม้ยาวพารา
- ไม้ห่อ (Cup) เป็นการโค้งตามความยาวของไม้ยาวพารา ซึ่งปลายไม้อาจจะสูงกว่าหรือต่ำกว่าจุดกึ่งกลางไม้

นอกจากนี้ไม้จะมีคุณภาพด้อยอันเนื่องมาจากตำหนิในไม้ได้หลายประการ เช่น ตาไม้ (Knots) เป็นส่วนที่กิ่งไม้ยื่นออกจากลำต้น ตาไม้ที่มีในเสาไม้ไม่มีผลเสียแต่ถ้ามีในตำแหน่งขอบบนและล่างของไม้ที่เป็นคาน (Beam) จะทอนกำลังแรงดัด นอกจากการแตกของไม้ทางยาวที่ขวางกับเส้นวงปี เรียกว่า Checks หรือการแตกของไม้ทางยาวที่เกิดระหว่างเส้นวงปี เรียกว่า Shakes จะทอนกำลังของแรงเฉือน แต่ไม่มีผลต่อกำลังในการรับแรงอัด ดังแสดงในรูป 2-14



รูปที่ 2-13 ลักษณะการบิดโค้งงอของไม้ [12]



รูปที่ 2-14 ตำหนิในเนื้อไม้

2.2.5.3 การเปลี่ยนแปลงสีของไม้ (Discoloration)

การเปลี่ยนแปลงของสีไม้จะทำให้ไม้ยางพาราหลังการอบขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของไม้ โดยการอบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ไม้มีสีเข้มขึ้นและการเก็บรักษาไม้ยางพาราในน้ำจะทำให้ผิวไม้มีสีเข้มขึ้นเช่นกัน แต่สีเนื้อไม้จะเปลี่ยนจากขาวอมเหลืองเป็นสีน้ำตาลอ่อน

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการอบแห้งของไม้ยางพาราและอาหารด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน มีดังนี้

การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟอบแห้งส่วนใหญ่เป็นเตาไมโครเวฟที่ใช้กันในครัวเรือน ซึ่งผลวิจัยในการอบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น มีข้อดีคือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นน้อยกว่าการอบไม้ด้วยเตาอบแบบทั่วไปค่อนข้างมาก ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบคุณสมบัติของไม้สน แคริบเบียนด้วยเตาไมโครเวฟ ระบบลมร้อนและการอบแบบทั่วไป พบว่า ลมร้อนและเตาอบที่ใช้กันทั่วไปเกิดการแห้งจากผิวเข้าด้านในเนื้อไม้จึงใช้ระยะเวลาอบนานกว่า แตกต่างกับคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้ไม้แห้งจากภายในเนื้อไม้ เกิดการแห้งเร็วกว่าและมีต้นทุนถูกกว่าในระยะยาว หลังลงทุนในระยะแรก ในขณะที่ข้อเสียของเตาอบไมโครเวฟคือ การลดความแข็งของไม้ลง 60 % [6] แต่อย่างไรก็ตามผลงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของคลื่นไมโครเวฟต่อความแข็งแรงในกระบวนการอบไม้ยางพารา เพื่อลดปริมาณความชื้นเหลือ 12% เมื่อทำการอบด้วยกำลังไฟฟ้า 600 และ 1000 วัตต์ อบไม้ขนาด $2.54 \times 3.81 \times 30.48$ ซม.³ พบว่า ค่าสมบัติเชิงกลของไม้ยางพาราที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าเอกสารอ้างอิง โดยเวลาที่ใช้ในการอบน้อยลงประมาณ 3 ชั่วโมง จึงช่วยลดต้นทุนในการอบไม้ อีกทั้งไม้ที่ผ่านการอบไม่มีรอยดำหรือมีรูปร่างบิดเบี้ยวอีกด้วย [7] นอกจากนี้การทดลองเปรียบเทียบเพื่อหาความแตกต่างการอบแบบทั่วไปและการอบด้วยเตาไมโครเวฟที่ส่งผลต่อความแข็งของไม้ชื่อ Norway spruce ในประเทศนอร์เวย์ ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 60 ถึง 110 °C พบว่าการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและการอบแห้งแบบทั่วไป จะส่งผลต่อทิศทางของเส้นใย ความหนาแน่นและอุณหภูมิภายในไม้ สำหรับปัจจัยทางด้านความชื้น จำนวนวงแหวนตามอายุไม้และมวลต่อปริมาตรในด้านน้ำหนัก ความกว้างและความหนา ไม่ส่งผลต่อความแข็งของเนื้อไม้อย่างมีนัยสำคัญ หลังผ่านการอบในแต่ละแหล่งความร้อน [25] นอกเหนือจากการทดลองอบไม้ชายฝั่งในกระบวนการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใต้ระดับความชื้นและกำลังของคลื่นไมโครเวฟแตกต่างกัน โดยใช้ไม้ขนาด $11.1 \times 3.5 \times 0.1$ ซม.³ และค่าเฉลี่ยระดับความชื้นของไม้อยู่ที่ 80 %d.b. (dry basis) เตาไมโครเวฟที่ใช้ยี่ห้อ

Panasonic NN-S761 ที่อุณหภูมิ 103 °C พบว่ากระบวนการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ ประกอบด้วย 3 ระยะ คือ ระยะการให้ความร้อน ระยะของการกลายเป็นไอและระยะที่ความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงความชื้นและประสิทธิภาพในการอบแห้งของไม้ชายเลน แตกต่างกันไป คลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มอัตราการแห้งของไม้และประหยัดพลังงานตามสมมุติฐาน ได้มากถึง 50% อีกทั้งลดโอโรเซเหยได้เมื่อเปรียบเทียบกับเตาอบทั่วๆไป [26] ในขณะที่การอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนของชิ้นไม้ซึ่งเป็นวัสดุพูนแบบชื้นมาก (Hygroscopic porous media) พบว่า อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดขึ้นอยู่กับกำลังของไมโครเวฟและระยะเวลาในการอบ ค่าไดอิเล็กตริกของไม้ในช่วงแรกจะมีค่าสูง สามารถดูดซับพลังงานไว้เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับกระบวนการอบแห้งภายในชิ้นไม้ในช่วงเริ่มต้นจะมีเฟสของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary pressure) ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของชิ้นไม้มีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้ จึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้สูง และเมื่อกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูง สามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่า ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ [27]

ในการพัฒนากรรมวิธีการอบแห้งเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบลมร้อนและไมโครเวฟ ในงานวิจัยอบเนื้อไก่และแครอทด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนตามด้วยการให้คลื่นไมโครเวฟ พบว่า เซลล์แครอทส่วนตรงกลางชิ้นยุบตัวไม่มีรูพูนแต่ขอบชิ้นมีลักษณะเป็นรูพูนมากกว่า การอบแห้งแบบลมร้อนใช้ระยะเวลาในการอบแห้งในช่วงสุดท้ายนานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีการหดตัวสูง [28] สอดคล้องกับงานวิจัยเปรียบเทียบประสิทธิภาพลมร้อนและไมโครเวฟ ทำการทดลองอบแห้งมันฝรั่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 ซม. ยาว 5.2 ซม. ด้วยการอบแห้งแบบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 1.5 เมตร/วินาที และการอบแห้งแบบไมโครเวฟที่กำลังไฟ 10.5 วัตต์ และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 1.5 เมตร/วินาที กำลังไฟ 10.5 วัตต์ พบว่าการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 200 นาที ส่วนการอบแห้งแบบลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด 350 นาที [29] นอกจากนี้การอบแห้งรากโสมด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 38 °C ความเร็วลม 60 ลิตร/นาที และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 38 °C ความเร็วลม 60 ลิตร/นาที ที่กำลังไฟ 60 วัตต์ พบว่าการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าลมร้อน

เพียงอย่างเดียว โดยการอบแห้งรากโสมจนเหลือระดับความชื้นร้อยละ 10 ด้วยลมร้อนจะใช้เวลา 136.4 ชั่วโมง ในขณะที่การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟจะใช้เวลาเพียง 61.1 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ลดลง คิดเป็นร้อยละ 55.2 อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบลมร้อนนั้นจะใช้เวลาในการอบแห้งที่นานกว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟ การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ และการอบแห้งแบบลมร้อนตามด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถแทรกผ่านเข้าไปยังชั้นในของอาหารได้อย่างรวดเร็ว และน้ำในอาหารสามารถดูดซับคลื่นไว้ ทำให้น้ำเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วทั้งอาหาร ส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างต่อเนื่อง จึงใช้เวลาการอบแห้งสั้น แต่การอบแห้งแบบลมร้อนนั้นอาหารได้รับความร้อนจากลมที่พาความร้อน (Convection) มาที่ผิวอาหาร ก่อนส่งผ่านชั้นของอาหารเข้าไปในชั้นอาหาร จนเกิดความร้อนและระเหยออกจากผิวน้ำอาหาร ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำและใช้เวลาในการอบนาน [30]

ปัจจัยที่ใช้ควบคุมเตาอบในการอบไม้ยางพารา ได้แก่ ระบบความร้อน ระบบความชื้นและระบบหมุนเวียนอากาศ จากการศึกษาแผนการอบเดิมที่ส่งผลต่อระดับความชื้นในไม้และเวลาที่ใช้ในการอบไม้เพื่อให้ความชื้นในไม้ลดลงระหว่าง 8-12 % ในการทดลองอบไม้ยางพาราที่มีความหนา 3 ระดับ ได้แก่ 2.45 3.81 และ 5.08 ซม. พบว่า การให้ความร้อนในระยะเริ่มต้นใช้ระยะเวลาอบนาน จึงปรับปรุงอุปกรณ์การวัดความชื้นให้สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง ปรับเปลี่ยนแผนการอบและทดลองอบไม้ 3 ระดับ คือ ปรับอุณหภูมิระยะเริ่มต้นของการอบให้สูงกว่าวิธีเดิม และลดระยะเวลาอบในระยะเริ่มต้นลง อุณหภูมิที่ใช้อบอยู่ในช่วง 65-80 °C และปรับการหมุนเวียนอากาศในช่วงเวลาการเปิดและปิดช่องระบายอากาศ เพื่อระบายความชื้นขณะอบแห้ง สามารถลดระยะเวลาในการอบเหลือ 7.5-12.5 วัน [31] ซึ่งเทคนิคที่ดีในการอบไม้ยางพาราแปรรูปควรศึกษาวิธีการอบ การวางไม้ การออกแบบห้องอบ และการตรวจวัดบรรยากาศในห้องอบ ได้แก่ อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก ความเร็วลม และความชื้นของไม้ขณะอบ โดยการอบแยกตามขนาดของหน้าไม้ ได้แก่ หน้าไม้หนาน้อยกว่า 3.81 ซม. ควรอบแห้ง 8-10 วัน ส่วนหน้าไม้หนาเกิน 3.81 ซม. ควรอบแห้ง 10-12 วัน [2] อย่างไรก็ตามการพัฒนาเตาอบไม้ยางพาราอัตโนมัติสำหรับโรงอบไม้ยางพาราด้วยระบบควบคุมเตาอบไม้ยางพาราอัตโนมัติ ที่เน้นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมเตาอบที่ทดสอบกับโรงอบไม้จริง สามารถควบคุมเตาอบไม้ด้วยตัวแปรทางด้านเวลา อุณหภูมิของห้องอบ และความชื้นของห้องอบ ในทางปฏิบัติต้องตั้งค่าตัวแปรเวลาไว้และปรับค่าของอุณหภูมิของห้องอบและความชื้นของห้องอบ [3] สำหรับรายละเอียดของคู่มือเตาอบไม้ได้เสนอแนะแนวทางศึกษาโครงสร้างของไม้ คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้ ความชื้นภายในไม้ การอบไม้ ชนิดและส่วนประกอบของเตาอบ การจัดวางไม้และพลังงานที่ใช้ในการอบไม้

การตรวจสอบและบำรุงรักษาเตาอบ แสดงการปรับตั้งค่าของเตาอบไม้ พร้อมจัดวางพัสดุมภายในเตาอบที่รูปแบบต่างๆกัน เพื่อให้ลมไหลเวียนทั่วเตาอบ [12]

นอกจากนี้งานวิจัยที่ช่วยพัฒนากระบวนการอบไม้ยางพาราประสิทธิภาพสูงในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเตาอบที่มีใช้อยู่แล้ว โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการตัดแปลงเตาอบและอุปกรณ์ประกอบ สำหรับอบไม้ยางพาราความหนา 2.54 และ 5.08 ซม. ด้วยการเร่งการเคลื่อนของน้ำออกจากไม้ให้เร็วขึ้นและรักษาคุณภาพของไม้หลังการอบไว้ พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 90°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียก 65°C มีระยะเวลาการอบเท่ากับ 60 ชั่วโมง ที่ความเร็วลมผ่านหน้าไม้เท่ากับ 4 เมตร/วินาที สามารถลดระยะเวลาอบลงเมื่อเทียบกับการอบที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 60°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียก 45°C ประมาณ 50% แต่ใช้พลังงานในการอบเพิ่มขึ้น 20% การวางน้ำหนักกดทับประมาณ 300 kg/m^2 สามารถลดการบิดตัวแบบ Twist ลงได้เล็กน้อย การสเปรย์ไอน้ำในช่วงเริ่มต้นของการอบสามารถลดการแตกที่ปลายของไม้ลงได้ สีที่ผิวนอกและแกนกลางของไม้ยางพาราที่ผ่านการอบของทั้งสองอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ความเค้นตกค้างในไม้หลังการอบที่อุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่การอบไม้ยางพาราความหนา 5.08 ซม. อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 90°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียก 50°C พบว่าสามารถลดระยะเวลาและลดการใช้พลังงานในการอบลงได้ 47% และ 20% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับการอบที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 70°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียก 50°C ที่ความเร็วลมผ่านหน้าไม้เท่ากับ 4 เมตร/วินาที โดยคุณภาพของไม้หลังการอบไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการอบไม้ที่อุณหภูมิสูง 90°C จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการอบไม้ยางพารา [24] นอกจากนี้การศึกษาการอบไม้ยางพาราแบบผสมผสานระหว่างไอน้ำร้อนยิ่งยวดกับอากาศร้อน สามารถลดเวลาที่ใช้อบแห้งเหลือเพียง 64 ชั่วโมง จาก 168 ชั่วโมง (7 วัน) และมีไม้เสียหาย 3-4 % ของไม้ทั้งหมดหลังอบแห้ง โดยไม้ยางพาราอบแห้งต้องผ่านการทดสอบแบบซี่ล้อม (Prong test) จึงจะเป็นที่ยอมรับได้ สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางพาราหลังอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ที่ผ่านการอบแบบทั่วไปของโรงงานอุตสาหกรรม อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ยกเว้นค่าความเค้นเฉือนขนานเสี้ยน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าไม้ที่อบแห้งแบบทั่วไปและค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งนั้น คิดเป็น 12.2 เมกกะจูล ต่อหน้า 1 กิโลกรัม [32] สอดคล้องกับผลการทดลองอบไม้ยางพาราด้วยไอน้ำยิ่งยวดสลับกับอากาศร้อนในสัดส่วนที่ต่างกัน นำมาใช้อบไม้ยางพาราที่มีความยาว 100 เมตร กว้าง 7.62 ซม. และหนา 2.54 ซม. สามารถลดระยะเวลาอบได้ โดยสภาวะที่ดีที่สุดในด้านคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้ยางพารา ได้แก่ การอบไอน้ำที่ 100°C ภายในเวลา 4 ชั่วโมงตามด้วยไอน้ำยิ่งยวดที่ 105°C และ 110°C นอกจากนี้การสับเปลี่ยนกับลมร้อน 1 ชั่วโมง

ถึง 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80-90 °C สามารถลดเวลาในการอบไม้จาก 7-8 วันเหลือ 2 วัน และค่าแรงเหวี่ยงในแนวขนานกับเส้นไม้และแรงกดในแนวขนานกับเส้นไม้ มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากเอกสารอ้างอิง [33]

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ระบบพาคความร้อนด้วยการพุงชนลมร้อนและพลังงานไมโครเวฟภายในเตาอบ จะประกอบด้วยห้องอบและกล่องพัสดมตั้งไว้ด้านหน้าไปยังด้านหลัง พัดลมทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศร้อนผ่านทางช่องเปิดด้านบนและด้านล่างของเตาอบ และผ่านตรงกลางของแผ่นไม้ในเตาอบ แผ่นลมร้อนควรติดตั้งได้อย่างง่ายดาย สามารถถอดออกจากห้องเตาอบเพื่อให้ทิศทางการพุงชนอากาศขึ้นหรือลงได้ อย่างน้อยการพุงชนอากาศหนึ่งแผ่นสามารถติดตั้งและถอดออกด้วยการเลื่อน นอกจากนี้คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านทางผนังด้านข้างของห้องเตาอบ พอร์ตสำหรับการใส่อากาศเย็นจะอยู่ในมุมระหว่างผนังด้านข้างและผนังด้านล่างของเตาอบที่ติดกับโครงสร้างอื่น ๆ เช่น ผนังประกอบที่เชื่อมต่อกัน [34] สำหรับอุปกรณ์ในการวัดจะประกอบด้วยเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ ตัวรับคลื่นไมโครเวฟ และอุปกรณ์ควบคุม โดยอุปกรณ์ควบคุมจะควบคุมการส่งสัญญาณไมโครเวฟและเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟ [35] นอกจากนี้เตาอบไมโครเวฟประกอบด้วย ตู้อบและแมกนีตรอนเพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟ จากการสันนิษฐานโมเลกุลน้ำในอาหารภายในตู้อบและมีที่นำคลื่นจำนวนมากเพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในตู้อบ ความยาวคลื่นมีมากหรือน้อยกว่าแลมด้าส่วนสี่ [36]

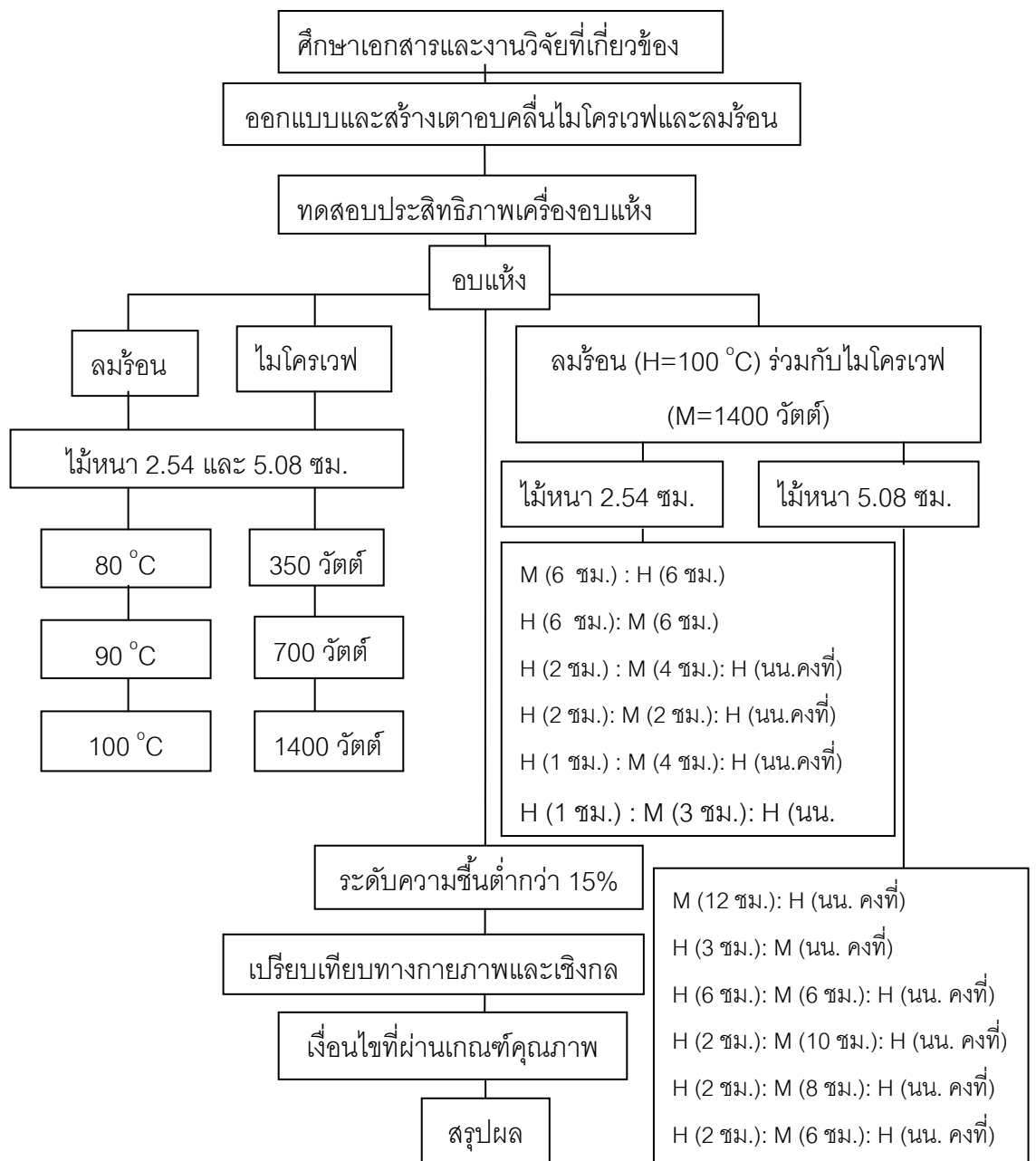
จากการสำรวจเอกสารแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยสำคัญที่ใช้ศึกษาการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟและรูปแบบความถี่ในการให้ความร้อน เพื่อป้องกันสาเหตุของการแตกร้าวและไหม้เกรียมภายในไม้ ส่วนการอบแห้งแบบลมร้อนจะต้องควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของลมร้อน เพื่อการไหลเวียนของอากาศภายในเตาอบอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง อีกทั้งคำนึงถึงการสูญเสียสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการอบ พลังงานและเวลาให้น้อยที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การดำเนินงานวิจัยโดยภาพรวม

งานวิจัยเริ่มจากการศึกษาเอกสาร ตำรา วารสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ดังรูปที่ 3-1)



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการศึกษา

หลังจากนั้นจะทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไม้อย่างพารา แล้วแบ่งการทดลองอบแห้งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งด้วยระบบคลื่นไมโครเวฟหรือระบบลมร้อนเพียงอย่างเดียว และส่วนสองเป็นการทดลองอบแห้งด้วยการใช้ไมโครเวฟผสมผสานกับลมร้อน สำหรับไม้อย่างพาราที่ใช้ในการทดลองแต่ละส่วนจะมีขนาด หนา 2.54 และ 5.08 ซม. กว้าง 7.62 ซม. และยาว 117 ซม. โดยทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้อบ กำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ (350 700 และ 1400 วัตต์) อุณหภูมิของลมร้อน (80 90 และ 100 °C) อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ขณะอบ ค่าความชื้นสัมพัทธ์และลักษณะการบิดงอของไม้หลังการอบแห้ง สำหรับการทดลองส่วนแรกจะทำการเลือกกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟและอุณหภูมิของลมร้อน ภายใต้ระยะเวลาอบน้อยที่สุดและลักษณะทางกายของไม้ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หลังจากนั้นจะถูกนำมาหาอัตราแห้งสูงสุดด้วยวิธี linear regression ที่มีค่า R^2 สูงสุด ในแต่ละช่วงเวลา เปรียบเทียบอัตราแห้งสูงสุดทั้งสองระบบในแต่ละช่วงเวลา แล้วนำมาใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการผสมผสานแหล่งความร้อนทั้งสองระบบร่วมกันตามอัตราแห้งสูงสุดของแต่ละระบบในแต่ละช่วงเวลา เพื่อระดับความชื้นที่ลดลงต่ำกว่า 15 (%d.b, dry basis) ซึ่งการแบ่งช่วงการอบแห้งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [39] มี 3 แบบด้วยกัน คือ Preheating drying, Finish drying และ Pulse drying

จุดหมาดไม้ที่ส่งผลต่อการหดตัวไม้หรือเปลี่ยนแปลงสมบัติกายภาพไม้ เป็นตัวกำหนดชั่วโมงของการแบ่งช่วงอบของระบบ Preheating drying และ Finish drying แล้วเปรียบเทียบระยะเวลาและการบิดงอของไม้ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ อย่างเช่นการอบไม้หนา 2.54 ซม. แบบ Preheating drying เป็นการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและตามด้วยลมร้อน ภายใต้เงื่อนไข M(6 ซม.):H(6 ซม.) ที่ให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใน 6 ชั่วโมงแรกก่อนจุดหมาดของไม้ แล้วตามด้วยระบบลมร้อน 6 ชั่วโมงถัดมาในช่วงหลังจุดหมาดไม้ หรือการอบไม้ที่ความหนา 5.08 ซม. ด้วยเงื่อนไข M(12 ซม.):H(นน.คงที่) เป็นการให้ความร้อนแก่ไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟภายใน 12 ชั่วโมงแรก และหลังจุดหมาดของไม้จะใช้ลมร้อนอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ ในขณะที่เงื่อนไข Finish drying ของไม้หนา 2.54 ซม. จะปรับเปลี่ยนระบบโดยให้ความร้อนด้วยลมร้อนก่อน แล้วตามด้วยคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้ระยะเวลาเดียวกันกับ Preheating drying อย่างเช่นเงื่อนไข H(6 ซม.):M(6 ซม.) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาไม้เพิ่มขึ้น (5.08 ซม.) ในช่วงก่อนจุดหมาดไม้จะลดระยะเวลาการให้ลมร้อนลง เพราะผลจากการอบไม้หนา 2.54 ซม. พบว่า ระยะเวลาที่ใช้อบไม้ด้วยลมร้อนในช่วงก่อนจุดหมาดไม้มากกว่าคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้นย่อมส่งผลต่อระยะเวลาอบมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบอัตราแห้ง

ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น พบว่า ลมร้อนมีอัตราแห้งสูงสุดภายใน 3 ชั่วโมงแรกเท่านั้น จึงกำหนดเงื่อนไข H(3 ชม.):M(นน. คงที่) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนด้วยลมร้อนภายใน 3 ชั่วโมงแรกก่อนจุดหมาดของไม้ แล้วตามด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ เพื่อความเป็นไปได้ในการลดระยะเวลาอบและศึกษาลักษณะการบิดงอของไม้ที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้เงื่อนไขแบบ Pulse drying ของไม้หนา 2.54 ซม.สามารถกำหนดกรอบได้ 4 เงื่อนไข คือ H(2 ชม.):M(4 ชม.):H(นน.คงที่), H(2 ชม.):M(2 ชม.):H(นน.คงที่), H(1 ชม.):M(4 ชม.):H(นน.คงที่), H(1 ชม.):M(3 ชม.):H(นน.คงที่) ภายใต้การเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และอัตราแห้งแบบ Preheating drying และ Finish drying พบว่า พลังงานไฟฟ้าของไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนเกือบ 5 เท่า ดังนั้นการเลือกใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟน้อยที่สุดย่อมส่งผลต่อการประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามอัตราแห้งของไม้ขณะอบด้วยคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนในการลดระยะเวลาอบลง โดยเฉพาะการให้ความร้อนแบบ สามารถลดระยะเวลามากกว่าการให้โดยอัตราแห้งช่วงแรกของลมร้อนสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟภายใน 1-2 ชั่วโมงแรกเท่านั้นในการอบไม้หนา 2.54 ซม. หลังจากนั้นแนวโน้มอัตราแห้งของไม้ลดลงและอัตราแห้งของคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนใน 2 ชั่วโมงถัดมา แสดงให้เห็นว่าระบบลมร้อนเหมาะสมกับการลดระดับความชื้นบริเวณผิวไม้ ภายใน 1-2 ชั่วโมงแรกเท่านั้น หลังจากนั้นควรปรับเปลี่ยนเป็นระบบไมโครเวฟที่มีอัตราแห้งสูงกว่าลมร้อนในช่วง 2-4 ชั่วโมงและเมื่อค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้เริ่มคงที่หรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านขึ้นไม้และเกิดความร้อนสม่ำเสมอทั่วเนื้อไม้ หลังจากนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนเป็นลมร้อน เพื่อระบายความร้อนและความชื้นภายในเนื้อไม้ อีกทั้งลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาอบ ส่งผลต่อความเป็นไปได้ที่น้ำหนักไม้จะลดลงและคงที่อย่างรวดเร็ว (เช่นเดียวกับผลการอบแบบ Preheating drying ที่ให้ความร้อนด้วยลมร้อนหลังจุดหมาดไม้ในชั่วโมงที่ 6 ถัดไป) ซึ่งตัวอย่างเงื่อนไข H(1 ชม.):M(4 ชม.):H(นน.คงที่) เป็นการให้ความร้อนด้วยลมร้อน 1 ชั่วโมง และตามด้วยไมโครเวฟ 4 ชั่วโมง แล้วจึงเปลี่ยนเป็นลมร้อนจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ เป็นต้น

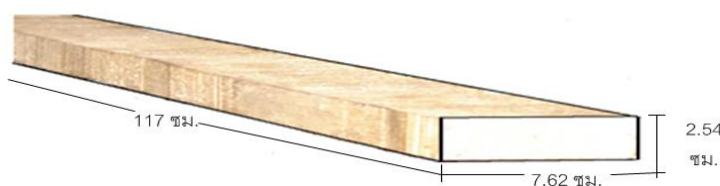
สำหรับการอบไม้หนา 5.08 ซม. สามารถกำหนดเงื่อนไข H (2 ชม.):M(10 ชม.):H(นน.คงที่), H(2 ชม.):M(8 ชม.):H(นน.คงที่) และ H(2 ชม.):M(6 ชม.):H(นน.คงที่) คือ อัตราแห้งของไม้ขณะอบด้วยลมร้อนสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟภายใน 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นแนวโน้มอัตราแห้งของไม้ลดลง หลังจากนั้นจึงควรเลือกใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอัตราแห้ง นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบแบบ Preheating drying ด้วยเงื่อนไข (M(12 ชม.):H(นน.คงที่)) กับ Pulse drying ภายใต้เงื่อนไข H(6 ชม.):M (6 ชม.):H (นน.คงที่) สามารถกำหนดระยะเวลาอบในการให้คลื่น

ไมโครเวฟน้อยสุด 6 ชั่วโมง เพื่อลดระดับความชื้นภายในเนื้อไม้ยางพาราได้ต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ จึงเลือกใช้ระบบไมโครเวฟแทนการใช้ลมร้อน ภายในระยะเวลา 6, 8 และ 10 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 12 ชั่วโมง (เพราะการใช้ไมโครเวฟเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ผ่านการทดลองภายใต้เงื่อนไข Preheating drying) แล้วตามด้วยลมร้อนจนน้ำหนักไม้คงที่ หลังจากนั้นไม้หลังอบแห้งแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำมาเปรียบเทียบในด้านระยะเวลาอบ พลังงานที่ใช้ สมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการประยุกต์ผลการทดลองในลำดับต่อไป

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

3.2.1 ไม้ยางพารา

ตัวอย่างไม้ยางพาราที่ใช้ในการทดลองมีขนาด กว้าง 7.62 ซม. หนา 2.54 และ 5.08 ซม. และยาว 117 ซม. (ดังรูปที่ 3-2) จากบริษัทในเขต อ.สะเดา จ.สงขลา ก่อนทำการอบได้ทำการอัดน้ำยา และวัดค่าความชื้นเริ่มต้นของไม้ยางพาราด้วยวิธีการอบแห้ง หลังจากนั้นคำนวณหาค่าความชื้นภายในเนื้อไม้

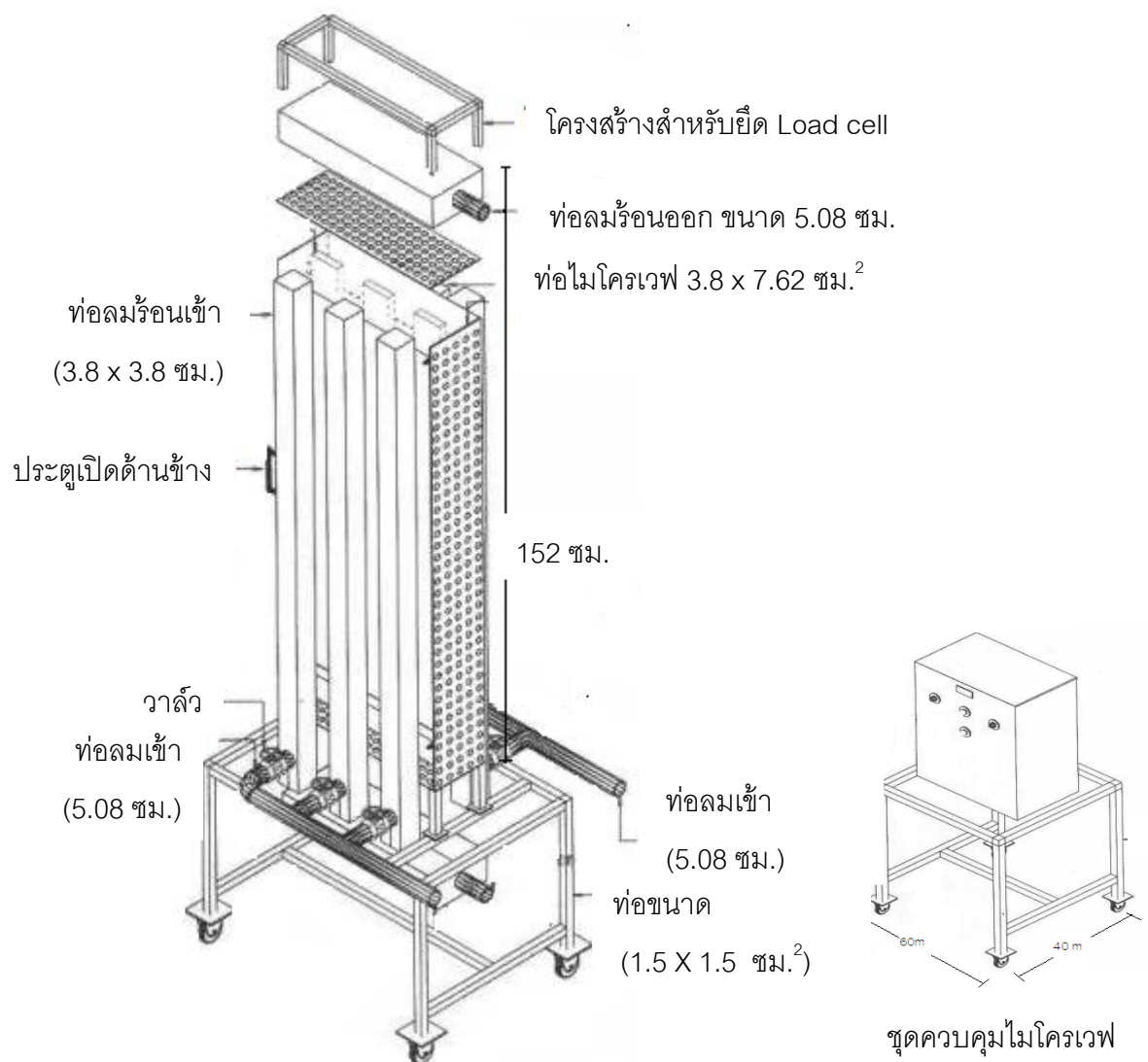


รูปที่ 3-2 ตัวอย่างไม้ยางพาราขนาด 7.62 (กว้าง) x 2.54 (หนา) x 117 (ยาว) ซม.³

3.2.2 เครื่องอบแห้งไม้ด้วยระบบคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

3.2.2.1 โครงสร้างเครื่องอบไม้ยางพารา ขนาด 51 x 20 x 152 ซม.³ (กว้าง x ลึก x สูง) ซึ่งโครงสร้างออกแบบเพื่ออบไม้ยางพาราแปรรูปที่ใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม มีขนาดความยาว 117 ซม. ความหนา 2.54 และ 5.08 ซม. หน้าตัดกว้าง 7.62 ซม. จำนวน 3 ท่อน ในการทดลองอบแห้งแต่ละครั้ง และเผื่อระยะห่างระหว่างไม้แต่ละท่อนประมาณ 5 ซม. สำหรับโครงสร้างของตัวเครื่องเป็นสแตนเลสทั้งหมดเพราะทนความร้อนสูงและทนการผุกร่อน ยกเว้นฐานรองเครื่องจะทำด้วยเหล็กด้านบนและด้านล่างรวมถึงด้านตรงข้ามกับประตูภายในตัวเครื่องจะเป็นรูตะแกรงที่ป้องกันคลื่นไมโครเวฟรั่ว พร้อมฝาครอบที่มีท่อนขนาด 5.08 ซม. เพื่อให้อากาศภายในไหลออกด้านข้างของตัวเครื่องติดแผ่นพลาสติกใสที่สามารถมองเห็นภายในได้ ด้านหน้าและด้านหลังของ

เครื่องเป็นแผ่นทึบและยึดเข้ากับท่อลมร้อน จำนวน 6 ท่อ ขนาดท่อ 3.8×3.8 ซม.² ที่เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.02 ซม. ระยะห่างของแต่ละรู 4.06 ซม. และมีท่อส่งกำลังไมโครเวฟแบบสล๊อตเพื่อให้คลื่นมีความสม่ำเสมอ จำนวน 2 ท่อ ขนาด 3.8×7.62 ซม.² รวมถึงประตูจะติดตั้งระบบป้องกันคลื่น ดังนั้นระบบไมโครเวฟจะหยุดทำงานเมื่อเปิดประตู(ดังรูปที่ 3-3) แหล่งกำเนิดความร้อนประกอบด้วยระบบส่งกำลังคลื่นไมโครเวฟและระบบลมร้อน โดยเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักไม้ทุกๆ 5 นาที ด้วยโหลดเซลล์ (Load cell) และสายสปริงที่แขวนติดกันสามารถรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 5 กิโลกรัม รวมถึงติดตั้งมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขณะอบแห้ง



รูปที่ 3-3 การออกแบบเครื่องอบไม้พาราด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

3.2.2.2 การสร้างเครื่องอบไม้ยางพาราด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน ประกอบ ด้วย 2 ส่วนหลัก (ดังรูปที่ 3-4) ส่วนแรกเป็นการสร้างคลื่นไมโครเวฟที่ใช้หัวแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นตัวกำเนิดคลื่น โดยมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงสำหรับจ่ายและควบคุม กำลังของคลื่น แล้วส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟไปในเตาอบด้วยท่อนำคลื่น (Slot antenna) โดยมีตัว Power supply ควบคุมการส่งกำลังของคลื่นไมโครเวฟ อีกส่วนหนึ่งเป็นระบบการฟุ้งชนของลม ร้อนจะประกอบด้วย โบรเวอร์สำหรับจ่ายลม ฮีตเตอร์พร้อมกับระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับ ควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนที่วัดค่าอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และใช้มาโน มิเตอร์การวัดความดันของอากาศร้อนให้เท่ากันก่อนที่อากาศจะเข้าตู้อบ สำหรับการวัดน้ำหนัก ของไม้ที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการอบด้วย Load cell เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง ภายใต้งี๊วของกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ และอุณหภูมิของลมร้อนที่มีผลต่ออัตราการแห้ง ของไม้ยางพารา โดยมีรายละเอียดของแต่ละระบบดังนี้



รูปที่ 3-4 เครื่องอบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน:(ก) โครงสร้างเครื่องอบด้านหน้าและด้านข้างที่ติดตั้งระบบลมร้อน ภายในตู้อบแสดงขนาดรูของสล๊อตและลมร้อน (ข) ตู้ควบคุมกำลังความต่างศักย์สูง (ค) มาโนมิเตอร์วัดความดันของอากาศ (ง) สัญญาณ Load cell ส่งมายังคอมพิวเตอร์

ระบบกำเนิดลมร้อน ประกอบด้วย โบรเวอร์ ระบบควบคุมอุณหภูมิและตัวกำเนิดลมร้อน (Heater) สำหรับโบรเวอร์ที่ใช้ทดลองเป็นแบบเหวี่ยง ใบพัดโค้งหลังติดกับมอเตอร์ขนาดกำลัง 2 แรงม้า ความเร็วรอบ 3000 rpm กระแสสลับ 220 โวลต์ จำนวน 2 เครื่อง และติดตั้งฮีตเตอร์ 2 ตัว ขนาด 3000 วัตต์ ที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Digital temperature controller หลังจากนั้นลมร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลแล้วจะผ่านเข้าไปยังตู้อบ อากาศจะไหลออกจากห้องอบ ผ่านตะแกรงด้านบนไปยังท่อลมออกขนาด 5.08 ซม. x 5.08 ซม. ที่เจาะไว้ทางด้านข้างของเครื่อง การทำงานของโบรเวอร์จะดูดอากาศโดยรอบ แล้วส่งลมออกเข้าสู่ส่วนควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งภายในบรรจุ Heater ที่ต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นลมร้อนไหลผ่านท่อเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.08 ซม. และผ่านวาล์วเพื่อส่งไปยังตู้อบไม้ยางพารา

สำหรับระบบไมโครเวฟ เป็นระบบทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ กำลังที่ส่งของหัวแมกนีตรอน มีขนาด 700 วัตต์ จำนวน 2 หัว สามารถจ่ายกำลังได้ ตั้งแต่ 0-100 % สามารถเพิ่มหรือลดได้ครั้งละ 10 % ของกำลังที่ส่งทั้งหมด โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้

1. หัวแมกนีตรอน มีทำหน้าที่หลักในการปล่อยคลื่นไมโครเวฟ เมื่อแมกนีตรอนถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ได้หลอด ซึ่งจะช่วยให้ได้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของได้หลอดภายในแมกนีตรอน เมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมา มีลักษณะเป็นหลอดสูญญากาศที่มีโครงภายนอกเป็นโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยมีแผ่นลักษณะเป็นปีกเพื่อใช้ระบายความร้อน สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงๆมาเป็นพลังงานไมโครเวฟ [23] (ดังรูปที่ 3-5)



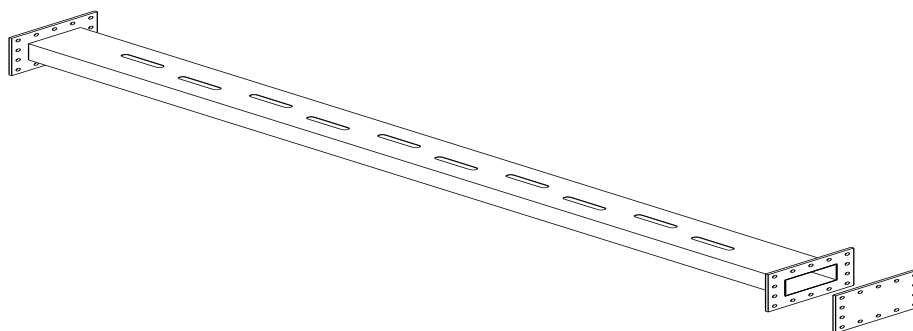
รูปที่ 3-5 ลักษณะโครงสร้างของหัวแมกนีตรอน

2. ส่วนการจ่ายและควบคุมกำลังความต่างศักย์สูง ทำหน้าที่จ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับไป ยังได้หลอด ประกอบหม้อแปลงจำนวนสองตัวมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกันเพื่อให้วงจรจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าแรงสูงสามารถจ่ายแรงดันให้กับแมกนีตรอนได้อย่างต่อเนื่องที่ 6,000 โวลต์ แล้วต่อเข้ากับ Bridge rectifier พร้อมกับ Capacitor filter และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วทั้งสองมีค่า สูงขึ้น ก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังสูงขึ้น (ดังรูปที่ 3-6)



รูปที่ 3-6 ตู้ควบคุมกำลังความต่างศักย์สูง

3. ส่วนท่อนำคลื่น (Waveguide) ส่งคลื่นไมโครเวฟออกมาจากรูหรือสลิต (Slot) ที่ปลาย ของหัวแมกนีตรอนเข้าภายในตู้อบ (ดังรูปที่ 3-7)



รูปที่ 3-7 ลักษณะโครงสร้างของท่อนำคลื่น

4. ส่วนเตาอบ (Cavity) ภายในผนังตู้อบติดตั้งตาข่ายสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูไม่เกิน 2 มม. เพื่อป้องกันคลื่นไมโครเวฟรั่วไหล เนื่องจากขนาดของรูดังกล่าวเล็กกว่า ความยาวคลื่นมากพอ จึงไม่สามารถส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟออกมาภายนอกตู้อบได้

3.2.3 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเตาอบ ยี่ห้อ SILA รุ่น AP-105 ความถี่ 11.0592 MHz วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง (ดังรูปที่



รูปที่ 3-8 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

3.2.4 เครื่องวัดความชื้น ยี่ห้อ Timbermasters รุ่น Protimeter ใช้วัดค่าความชื้นของไม้ (ดังรูปที่ 3-9)



รูปที่ 3-9 เครื่องวัดความชื้นภายในเนื้อไม้

3.2.5 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON DA-45 หน่วย km/h, m/s, ft/min และ Knots ใช้วัดความเร็วลมภายในเครื่องอบไม้ ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 เครื่องวัดความเร็วลม

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การประเมินอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของน้ำภายในเครื่องอบแห้งที่กำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ 700 และ 1400 วัตต์ (หัวแมกนีตรอน 2 หัวๆละ 700 วัตต์) เพื่อทดสอบหาค่าพลังงานจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟในการนำไปใช้อบแห้ง โดยวัดค่าพลังงานที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานไมโครเวฟที่น้ำดูดกลืนไว้สามารถหาได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำต่อหน่วยเวลาดังนี้

$$MW_{abs} = \frac{mC_p\Delta T}{\Delta t} \quad (3-1)$$

เมื่อ MW_{abs} คือ พลังงานที่ดูดกลืนโดยน้ำ (W)
 m คือ มวลของวัสดุ (kg)
 C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (J/kg °C)
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)
 Δt คือ เวลาที่ให้พลังงานไมโครเวฟ (s)

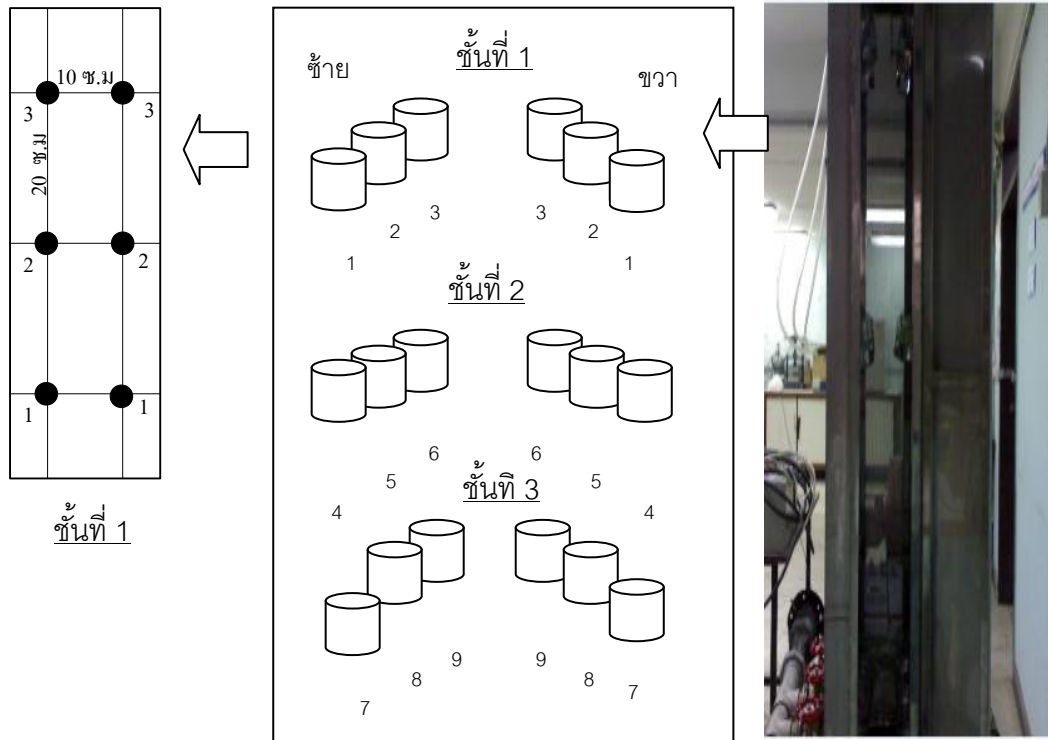
สำหรับการทดสอบการกระจายอุณหภูมิ สำหรับการทดสอบเพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งของพลังงานไมโครเวฟ มีวิธีการดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งภายในห้องอบ โดยตำแหน่งในการวางบีกเกอร์ 2 ด้านๆละ 3 แถวๆ ละ 3 บีกเกอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 3-11) เพื่อวางบีกเกอร์สำหรับใส่น้ำปริมาณ 40 cc. ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นและบันทึกค่าไว้

2. นำบีกเกอร์เข้าตู้อบในแต่ละตำแหน่งที่กำหนดไว้และเปิดพลังงานไมโครเวฟกำลังวัตต์ 700 วัตต์และ 1400 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของน้ำทั้ง 18 ตำแหน่ง แล้วบันทึกค่าไว้

3. ทำตามขั้นตอน 1-2 โดยเปลี่ยนเวลาในการอบเป็น 60 นาที เปรียบเทียบความต่างของอุณหภูมิและน้ำหนักของน้ำเริ่มต้นและสุดท้าย แล้วนำมาพล็อตกราฟและทดสอบข้อมูลทางสถิติ

3.3.2 การหาค่าความชื้นของไม้ยางพาราหลังการอบ นำตัวอย่างไม้หลังอบแห้งหาปริมาณความชื้นโดย Oven method เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นตลอดระยะเวลาอบแห้งของแต่ละสภาวะ ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, M_w) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, M_d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3-2 และสมการที่ 3-3 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 3-11 ตำแหน่งในการจัดเรียงปีกเกอร์แต่ละชั้นภายในตู้อบเมื่อเปิดฝาตู้

3.3.2 การหาค่าความชื้นของไม้ยางพาราหลังการอบ นำตัวอย่างไม้หลังอบแห้งหาปริมาณความชื้นโดย Oven method เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นตลอดระยะเวลาอบแห้งของแต่ละสภาวะ ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, M_w) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, M_d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3-2 และสมการที่ 3-3 ตามลำดับ ดังนี้

$$M_w(\%) = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad (3-2)$$

$$M_d(\%) = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (3-3)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b., wet basis)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b., dry basis)

W คือ มวลเปียกของวัสดุ (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

3.3.3 การหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) มีหน่วยเป็น kg/hr ดังสมการที่ 3-4

$$DR = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากไม้}}{\text{ระยะเวลาในการอบแห้ง}} \quad (3-4)$$

3.3.4 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ตลอดการอบแห้ง มีหน่วยเป็น kg/kW-hr. ดังสมการที่ 3-5

$$SMER = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากไม้}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้}} \quad (3-5)$$

3.3.5 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ มีหน่วยเป็น MJ/kg ดังสมการที่ 3-6

$$SEC = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากไม้อบแห้ง}} \quad (3-6)$$

3.3.6 การศึกษาอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ยางพารา โดยเจาะรูและใส่สายเทอร์โมคัปเปิลติดกับหัว Prob ภายในเนื้อไม้ 3 ตำแหน่ง ระยะห่างแต่ละรู เริ่มจากจุดกึ่งกลางไม้ 1 ตำแหน่ง แล้ววัดจากจุดกึ่งไม้และปลายไม้เพื่อแบ่งระยะห่างที่เท่ากันจากจุดกึ่งไม้และด้านซ้ายขวา ด้านละ 1 ตำแหน่ง เพื่อวัดอุณหภูมิขณะทดลองในทุกๆ 1 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิเนื้อไม้

3.3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

3.3.7.1 ลักษณะทั่วไปของไม้หลังอบที่นำไปใช้งานได้

1. ไม้เกรด AB แยกออกเป็นลักษณะของไม้ที่มีตำหนิอยู่บนปลายด้านใดด้านหนึ่งหรือสองด้านแต่ต้องคงเหลือเนื้อไม้ดีที่จะใช้งานได้หนึ่งช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 80 ซม.ขึ้นไป
2. ไม้มีตำหนิอยู่ส่วนปลายด้านใดด้านหนึ่งหรือสองด้านแต่ต้องคงเหลือเนื้อไม้ที่จะใช้งานได้หนึ่งช่วงมากกว่าหรือเท่ากับ 65 ซม. หรือไม้มีตำหนิอยู่ส่วนปลายและส่วนกลางของท่อน เหลือเนื้อไม้ดีที่จะใช้งานได้สองถึงสามช่วงรวมกันมากกว่าหรือเท่ากับ 75 ซม.ขึ้นไป โดยความยาวท่อนสั้นสุดไมต่ำกว่า 20 ซม.
3. ไม้มีตำหนิอยู่ส่วนปลายด้านใดด้านหนึ่งหรือสองเท่าและมีตำหนิอยู่ส่วนกลางสองท่อนหรือเนื้อไม้ดีที่จะใช้งานได้สองหรือสามช่วงรวมกัน ได้ 55 ซม. ขึ้นไป โดยความยาวสั้นสุดไมต่ำกว่า 20 ซม.

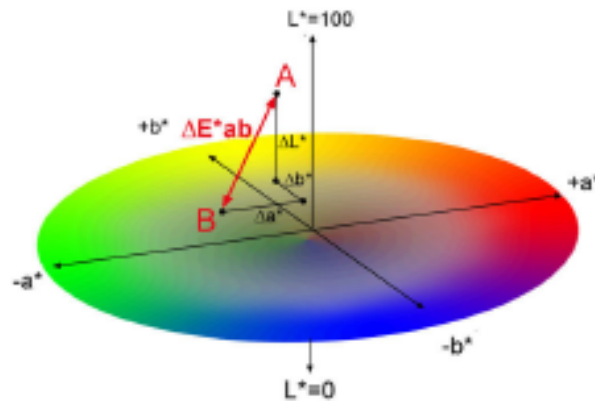
4. มีตำหนิความโค้งงอส่วนของความกว้างไม้ แต่ต้องสูงจากระดับพื้นไมเกิน 22 มม.

5. มีตำหนิความโค้งงอส่วนของความหนาของไม้ แต่ต้องสูงจากระดับพื้นไมไมเกิน 8 มม.

3.3.7.2 การวัดสีของไม้ เป็นการค่าสีในระบบ L^* , a^* , b^* โดยวัดสีตัวอย่างละ 5 ซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไข โดยใช้เครื่อง HunterLab รุ่น ColorFlex แสดงในเทอมของตัวแปร L^* a^* และ b^* โดยที่ค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ค่าความเป็นสีแดง (Redness, a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness, b^*) โดยค่าบวกหมายถึง ความสว่าง มีสีแดงและมีความเป็นสีเหลือง ตามลำดับ ขณะที่ค่า L^* a^* และ b^* มีค่าลบ หมายถึง ค่าความมืด มีความเป็นสีเขียว และมีความเป็นสีน้ำเงิน และหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีแต่ละเงื่อนไข ดังสมการที่ 3-7 และรูปที่ 3-13

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3-7)$$

3.3.7.3 การทดสอบแบบซีล้อม ตามมาตรฐาน มอก. ๔๙๗-๒๕๒๖ สำหรับไม้หนา 2.54 ซม. ต้องตัดไม้ขนาดความกว้างประมาณ 2.54 ซม. จากตำแหน่งตรงกลาง และระยะประมาณ 10 ซม. จากปลายไม้ แล้วแบ่งไม้ออกเป็น 3 ส่วนตามความหนาของไม้ สำหรับไม้ความหนา 5.08 ซม. จะตัดแบ่งออกเป็น 6 ส่วนเท่าๆกันตามความหนาแล้วเคาะเอาซีที่ 2 และ 5 ออก จากนั้นเลื่อยไม้ตามแนวที่แบ่งไว้ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วทำการวัดขนาดของซีล้อมด้วยเวอร์เนียเพื่อคำนวณค่าองศาเบี่ยงเบนของไม้



รูปที่ 3-13 ค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ [38]

3.3.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล

ไม้หลังอบแห้งจะถูกนำทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้บางพาราตามมาตรฐานต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ในแต่ละมาตรฐานของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆไปในโรงงาน ดังนี้

1. แรงเฉือนตั้งฉากกับเส้น (Shear strength parallel to grain) ตามมาตรฐาน BS 373 ตัดขนาดไม้ให้มีลักษณะคล้ายลูกบาศก์ขนาด $20 \times 20 \times 20$ มม.³ วางไม้ให้ตั้งฉากกับอุปกรณ์ทดสอบและจัดให้มีการเฉือนประมาณตรงกึ่งกลางของตัวอย่างไม้ ทำการทดสอบโดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดทำให้ตัวอย่างแตกหักภายใน 1.5-2 นาที โดยส่วนที่เกิดการฉีกไถลคือส่วนที่อ่อนตัวที่สุดของตัวอย่างไม้ ดังแสดงในรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 ลักษณะไม้ที่ใช้ทดสอบ (ซ้าย) และการทดสอบความเค้นเฉือนขนานเส้น (ขวา)

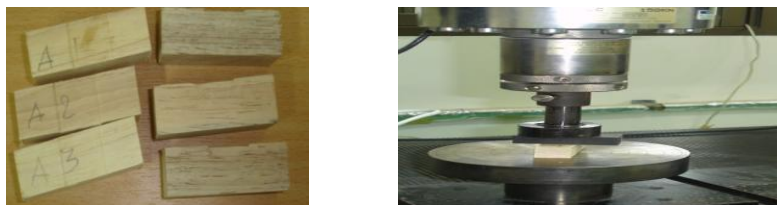
2. แรงกดขนานเส้น (Compressive strength parallel to grain) ตามมาตรฐาน ISO 3787 ขนาดตัวอย่างไม้ $20 \times 20 \times 60$ มม.³ นำตัวอย่างไม้ไปวางในช่องสำหรับทดสอบแรงอัดของเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine) โดยหัวกดต้องแนบสนิทกับหน้าตัดตัวอย่างไม้

การเคลื่อนที่ของหัวกดต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เพื่อให้ตัวอย่างไม้แตก แล้วจดบันทึกค่าแรงสูงสุดที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-15



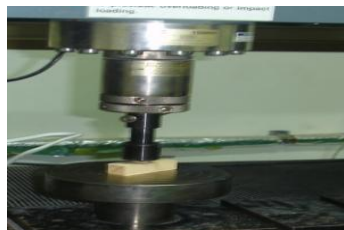
รูปที่ 3-15 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (ซ้าย) และการทดสอบความเค้นอัดขนานเส้น (ขวา)

3. แรงกดตั้งฉากเส้น (Compressive strength perpendicular to grain) ตามมาตรฐาน ASTM 143 ตัดไม้ขนาด $20 \times 20 \times 60$ มม.³ แล้วนำมาวางบนแท่นสำหรับทดสอบแรงอัดโดยวางตามแนวนอน นำแผ่นเหล็กกว้าง 20 มม. วางทับบนผิวหน้าด้านบนของตัวอย่างไม้ วางให้อยู่ตรงกึ่งกลางและตั้งฉากกับความยาวของตัวอย่างไม้ อัดหัวกดลงบนแผ่นเหล็กด้วยความเร็วคงที่โดยการเลือกความเร็วที่ทำให้ได้พิกัดอัตราส่วนโดยตรงภายในเวลา 1.5 ± 0.5 นาที ทดสอบจนผิวหน้าของตัวอย่างไม้ถูกแผ่นเหล็กกดยุบลงไป 2.5 มม. แล้วหยุดเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (ซ้าย) และการทดสอบความเค้นอัดตั้งฉากเส้น (ขวา)

4. ความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ISO 3350 ตัดขนาดไม้ 50×50 มม.² และความยาวตามเส้นไม้น้อยกว่า 50 มม. นำไม้ไปวางบนแท่นรอง (สำหรับทดสอบแรงอัด) แล้วใช้หัวกดสำหรับทดสอบความแข็งกดลงไม้ด้วยความเร็วคงที่ 3-6 มม./นาที แล้วบันทึกแรงสูงสุดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ซ้าย) และการทดสอบความแข็ง (ขวา)

5. แรงดัด (Strength and stiffness in static bending) ตามมาตรฐาน BS 373 ตัดไม้ตัวอย่างขนาด 20 x 20 x 300 มม.³ แล้วตอกตะปูขนาดยาว 25 มม. ลงบนจุดศูนย์กลางถ่วงของตัวอย่าง นำตัวอย่างไม้วางบนแท่นรอง (Supports) ซึ่งวางห่างกัน 280 มม. แล้วกดน้ำหนักไม้ลงบนกึ่งกลางของตัวอย่างไม้ด้วยหัวกดที่มีรัศมีของความโค้ง 25 มม. กดหัวกดลงจนไม้แตกหักภายในเวลา 1.5 ± 0.5 นาที จดค่าแรงและปริมาณการโก่งเนื่องจากแรงไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 ลักษณะไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ซ้าย) และการทดสอบแรงดัด (ขวา)

บทที่ 4

การอบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

4.1 บทนำ

การประยุกต์ใช้พลังงานทางเลือกด้วยไมโครเวฟและลมร้อน ภายใต้ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้งไม้ยางพาราเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมตามลักษณะโครงสร้างและขนาดของไม้ยางพารา สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและระบบลมร้อนในการอบแห้งไม้ยางพารา เพื่อลดระยะเวลาอบแห้งและลดปริมาณความชื้นภายในเนื้อไม้ยางพาราให้น้อยกว่าร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง รวมถึงเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังของคลื่นไมโครเวฟ (350 700 และ 1400 W) อุณหภูมิของลมร้อน (80 90 และ 100 °C) อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ขณะอบ ค่าความชื้นสัมพัทธ์และลักษณะการบิดงอของไม้หลังการอบแห้ง ก่อนนำไปใช้งาน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการผสมผสานแหล่งพลังงานทั้งสองระบบต่อไป

4.2 วิธีดำเนินการทดลอง

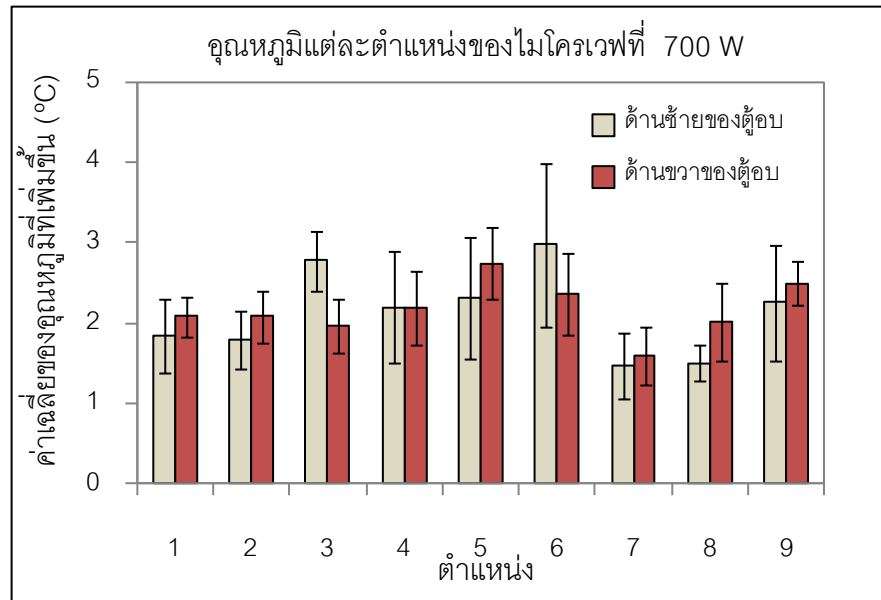
ก่อนการทดลองอบแห้งไม้ยางพาราจะทำการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยศึกษาค่าพลังงานและการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนี้จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไม้ยางพาราขณะอบแห้งทุกๆ 5 นาที ด้วยการแขวนไม้ที่จะอบด้วยสายสลิงและ Load cell ในแนวดิ่ง สัญญาณจาก Load cell จะถูกส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักไม้ สำหรับการทดลองอบแห้งที่ความหนาของไม้ยางพารา 2.54 ซม. กว้าง 7.62 ซม. และยาว 117 ซม. ด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ 350 700 และ 1400 W และอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ในช่วง 80 90 และ 100 °C ที่ความเร็วของอากาศคงที่เท่ากับ 1.75 เมตรต่อวินาที และเมื่อเพิ่มความหนาไม้เป็น 5.08 ซม. จะใช้กำลังสูงสุดของคลื่นไมโครเวฟที่ 1400 W และอุณหภูมิสูงสุดของลมร้อน 100 °C เนื่องจากเงื่อนไขดังกล่าวมีความเป็นไปได้ในการลดระยะเวลาอบแห้ง และลดความชื้นเปลือกในการใช้พลังงานอบแห้งมากกว่าเงื่อนไขอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามถ้าลักษณะไม้หลังการอบด้วยเงื่อนไขดังกล่าวมีสมบัติทางกายภาพไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จะทำการลดอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยเงื่อนไขอื่นๆ ในลำดับถัดไป สำหรับการหาน้ำหนักแห้งของเนื้อไม้ในแต่ละการทดลองเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์

ความชื้นของไม้ จะทำการตัดตัวอย่างไม้ ขนาดหน้าตัด 5×10 ซม.² จำนวน 3 ตัวอย่าง นำเข้าในตู้อบโดยให้ความร้อนผ่านได้ทั่วถึงทุกท่อน ที่อุณหภูมิ 103 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วตรวจสอบจนกว่าไม้ตัวอย่างจะแห้งสนิทหรือน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำไม้ตัวอย่างมาชั่งทันที โดยยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกินร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนักที่ชั่งได้นี้จะเป็นมวลของไม้ตัวอย่างหลังอบแห้ง (Oven-dry mass) [40] หลังจากนั้นจะนำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักไม้ก่อนการทดลองและหลังอบแห้ง มาคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้น อย่างไรก็ตามค่าความชื้นเริ่มต้นของไม้จะแตกต่างกันบ้าง ดังนั้นในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นหลังการอบด้วยไมโครเวฟและลมร้อน เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง จะใช้รูปเทอมไร้มิติ (Dimensionless analysis) ในรูปอัตราส่วนความชื้นดังสมการที่ 2-2 แล้วคำนวณหาค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของตัวแปรที่อยู่ในสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล (Empirical model) สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง เพื่อความถูกต้องและเที่ยงตรงของแบบจำลอง จะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง (Predicted value) กับค่าที่ได้จากการทดลองจริง (Measured value) เพื่อพิจารณาโดยค่าบ่งชี้ต่างๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ค่า Chi-Square (χ^2) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (RMSE, root mean square error) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) และการหาค่าความแตกต่าง (Different test) [41] นอกจากนี้จะทำการวัดค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ขณะอบแห้ง สำหรับไม้หลังอบจะถูกนำมาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพว่า เกิดปัญหาไม้โก่ง ไม้โค้ง ไม้บิด และไม้ห่อหรือไม้ การวัดสีของไม้หลังอบแห้ง การทดสอบที่เสื่อม และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

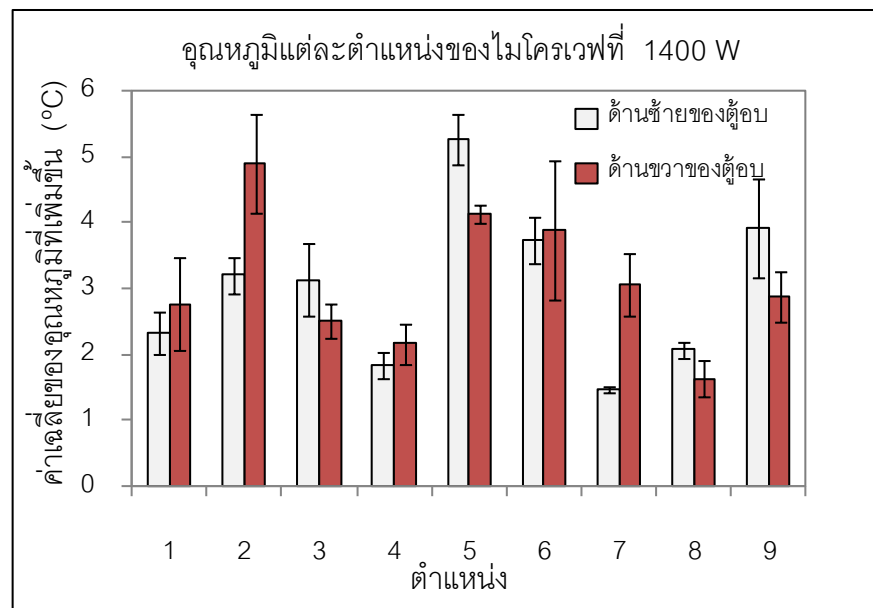
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.3.1 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

สำหรับผลการศึกษาค่าพลังงานและค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่ละตำแหน่งภายในตู้อบจากอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง พบว่า ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟของแมกนีตรอน 2 หัวๆละ 700 W คิดเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยที่วัดได้เท่ากับ 107.86 W และ 162 W ของกำลังคลื่นไมโครเวฟ 700 และ 1400 W ตามลำดับ ซึ่งเกิดค่า loss ต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ประมาณ 85.59% และ 88.43% จากป้ายแสดงข้อมูลการค้า สำหรับการกระจายคลื่นไมโครเวฟภายในตู้อบไมโครเวฟ ในการวัดค่าพลังงานที่ทำให้มีอุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบปริมาณค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่แตกต่างกัน (ดังรูปที่ 4-1)



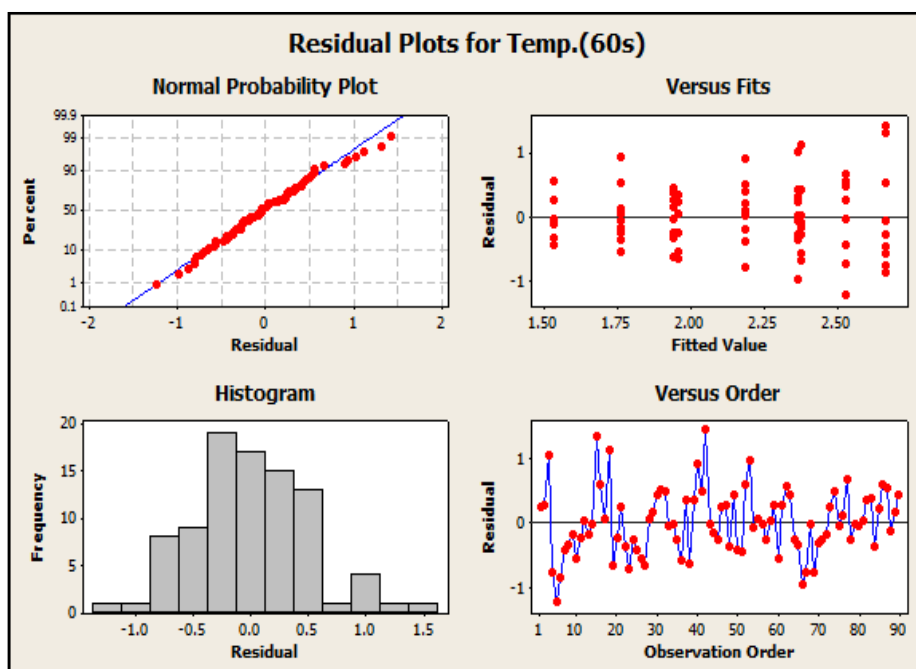
(ก)



(ข)

รูปที่ 4-1 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 40 กรัม ที่เพิ่มขึ้นหลังดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ก) กำลัง 700 W และ ข) กำลัง 1400 W

เมื่อนำมาวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า การกระจายของอุณหภูมิภายในตู้อบมีการกระจายแบบปกติ และค่าความผันแปรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดังรูปที่ 4-2) โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 40 กรัม ที่เพิ่มขึ้นหลังดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ 700 และ 1400 W ทั้งสองด้านของตู้อบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบทางสถิติของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่ละตำแหน่ง พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากโหมดถาดหมุนจะทำให้การกระจายของอุณหภูมิที่ดีกว่าโหมดถาดอยู่นิ่ง [37] แต่จากข้อจำกัดของผนังตู้อบต้องการออกแบบให้มีการสะท้อนคลื่น รวมทั้งต้องแขวนไม้ยางพาราติดกับโพลีเอทิลีนเพื่อวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงขนานกับท่อนำคลื่น จึงไม่สามารถติดตั้งถาดหมุนขณะทดลองได้



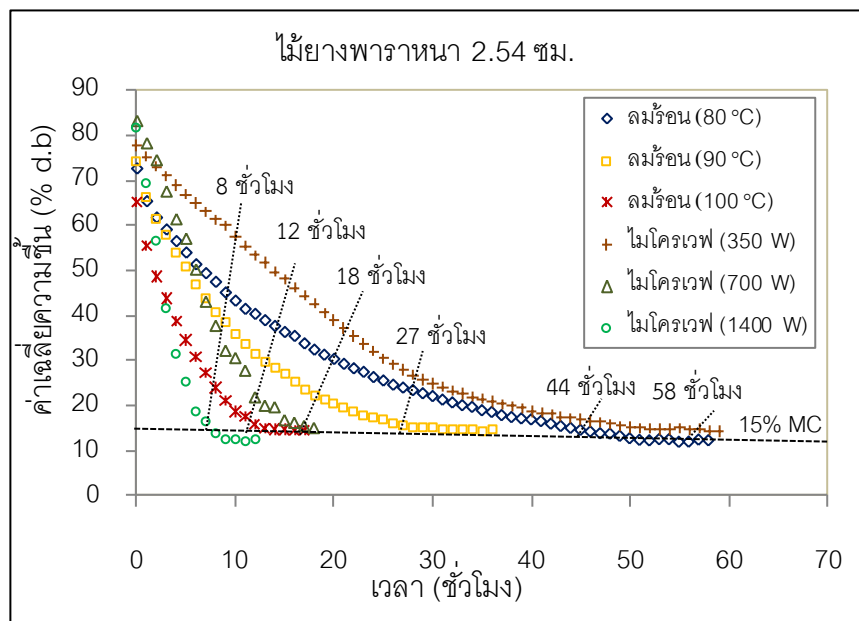
รูปที่ 4-2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

4.3.2 ระยะเวลาของการอบ อุณหภูมิ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

4.3.2.1 การเปรียบเทียบผลการอบ ไม้ยางพาราที่ความหนา 2.54 ซม. ด้วยอุณหภูมิของลมร้อน 80 90 และ 100 °C และคลื่นไมโครเวฟ 350 700 และ 1400 W

ผลของการทดลองอบไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. เพื่อลดความชื้น 80 (%d.b., dry basis) จนถึงระดับความชื้นต่ำกว่า 15 %d.b. ของอุณหภูมิของลมร้อน 80, 90 และ 100 °C ใช้ระยะเวลา

อบแห้ง 44, 27 และ 12 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 4-3) สำหรับระบบคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 350 700 และ 1400 W ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 58, 18 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยระยะเวลาอบลดลงตามอุณหภูมิของลมร้อนที่สูงขึ้น คิดเป็น 3.67 เท่า สอดคล้องการอบแห้งด้วยระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงกว่า สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลงเช่นกัน คิดเป็น 7.25 เท่า นอกจากนี้การเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่ออบแห้งไม้อย่างพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟ (1400 W) ใช้ระยะเวลาอบน้อยกว่าระบบลมร้อน (100 °C) คิดเป็น 33 เปอร์เซ็นต์ ของระยะเวลาอบแห้งที่น้อยสุดของทั้งสองระบบ

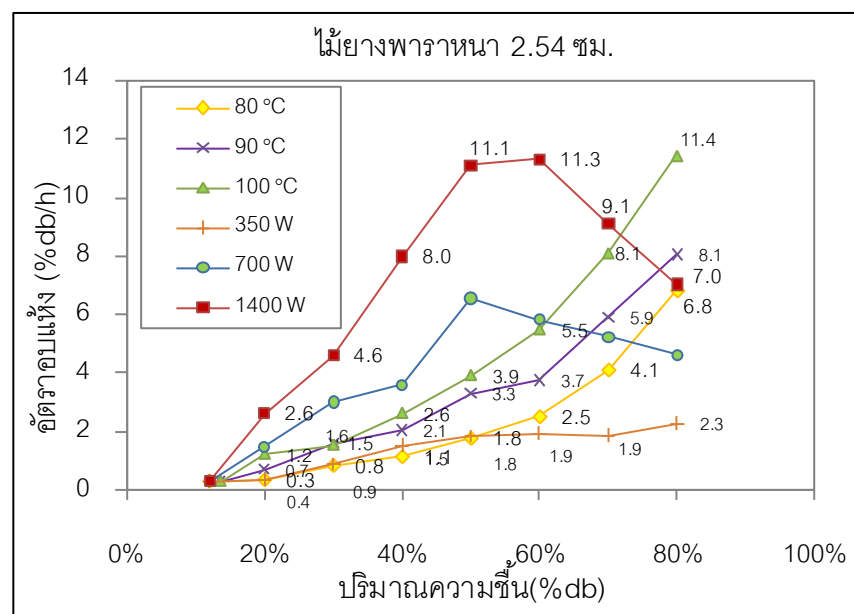


รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นและเวลาของไม้อย่างพาราที่ความหนา 2.54 ซม.

อัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดการทดลองของอุณหภูมิลมร้อน 80 90 และ 100 °C มีค่า 2.2, 3.17 และ 4.29 %d.b./h ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4-4) แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ประมาณ 2 เท่า ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ดังนั้นการอบแห้งด้วยลมร้อนจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งค่อนข้างสูง เพื่อเพิ่มแรงในการขับไล่ความชื้นให้ระเหยออกจากเนื้อไม้ ทำให้อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในตาราง 4-1 โดยเฉพาะไม้ที่มีความชื้นสูงในช่วงแรกของการทดลองจะมีอัตราการอบแห้งสูง เพราะความชื้นอิสระที่อยู่ใกล้บริเวณผิวจะถูกขับเคลื่อนออกสู่อากาศได้ง่าย แต่เมื่อความชื้นส่วนนี้หมดไป ชั้นของความชื้นที่อยู่

ภายในไม้จะเคลื่อนตัวออกสู่ผิวได้ช้าลง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากความชื้นที่ผิวไม้ ยางพาราจะได้รับความร้อนและระเหยออกมาก่อนทำให้ผิวเกิดการหดตัว ในขณะที่ความชื้น ภายในเนื้อไม้ยังมีความชื้นปริมาณมาก เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะระเหยออกมาผ่านชั้นผิวไม้ที่หด ตัว ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกสู่ผิววนอกใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น

สำหรับอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของกำลังของคลื่นไมโครเวฟ 350 700 และ 1400 W มีค่า 1.33 3.78 และ 6.71 %db/h ตามลำดับ ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำจำเพาะเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตาม กำลังวัตต์ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกับลมร้อน (ดังตารางที่ 4-1) อัตราการระเหยน้ำจำเพาะเฉลี่ยที่กำลังของ คลื่นไมโครเวฟ 1400 W มีค่าสูงกว่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟ 700 และ 350 W ประมาณ 2.24 และ 6.23 เท่า เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำ ออกจากไม้มากขึ้น ก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อวัสดุและมีความดันไอบางขึ้น อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเฉพาะกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่ำจะมีความชื้นสัมพัทธ์ ในอากาศสูงกว่าการอบแห้งที่กำลังวัตต์สูงกว่า เนื่องจากขณะอบแห้งไม่เกิดหยดน้ำปริมาณมาก ภายในตู้อบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากตัววัสดุสู่อากาศได้น้อยกว่า และใช้ระยะเวลาอบแห้ง ที่นานกว่าเพื่อให้ได้น้ำหนักของไม้คงที่ ส่งผลต่อพลังงานที่สิ้นเปลืองของคลื่นไมโครเวฟ 700 และ 350 W เพิ่มขึ้น ประมาณ 2.24 และ 6.83 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ 1400 W



รูปที่ 4-4 อัตราการแห้งจากการอบไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ด้วยไมโครเวฟและลมร้อน

จากการเปรียบเทียบอัตราแห้งของไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ของแหล่งพลังงานของทั้งสองระบบ ในความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น 82 -79 %d.b. จนกระทั่งเหลือความชื้นเฉลี่ยสุดท้ายในช่วง 14-11 %d.b. แสดงให้เห็นว่า อัตราแห้งเฉลี่ยของลมร้อนที่ 100 °C ต่ำกว่าไมโครเวฟที่ 1400 W ประมาณ 1.56 เท่า และอยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลงเท่านั้น แตกต่างจากระบบไมโครเวฟที่สามารถแบ่งการอบแห้งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงของการอบแห้งเพิ่มขึ้นที่ระดับความชื้น 80-50 %d.b. และช่วงของการอบแห้งลดลงเมื่อระดับความชื้นน้อยกว่า 50 %d.b. สำหรับช่วงแรกของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเกิดจากความชื้นเริ่มต้นที่กระจายตัวตามพอร์หรือรูของเนื้อไม้มีค่าสูงดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำที่มีขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวตามทิศทางของคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านเข้ามา เกิดเป็นพลังงานความร้อนจากการเสียดสีของโมเลกุลน้ำ อุณหภูมิจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณความชื้นและกำลังของคลื่นไมโครเวฟ ความร้อนจึงเกิดการกระจายเข้าสู่แกนกลางไม้ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเนื้อไม้สูงกว่าบริเวณผิวไม้ จึงค่อยๆ เกิดการกระจายความร้อนออกสู่ผิวไม้ ดังนั้นอัตราอบแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความร้อนสะสมภายในเนื้อไม้ที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรก อย่างไรก็ตามในช่วงที่สองอัตราการอบแห้งจะลดลงตามระดับปริมาณความชื้นที่ลดลง ลักษณะเส้นกราฟมีความชันมาก (ดังรูปที่ 4-4) เนื่องจากความร้อนสะสมภายในเนื้อไม้ที่สูงกว่าที่ผิวไม้มาก เกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายในเนื้อไม้ออกสู่ผิวไม้สูงขึ้น การระเหยของความชื้นที่อยู่ผิวหน้าของไม้ จะถูกอากาศโดยรอบพัดพาจากผิวหน้าไปเรื่อยๆ ส่งผลต่อระดับความชื้นในเนื้อไม้ลดลงอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4-1 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำจำเพาะและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละแหล่งความร้อนของไม้ที่ความหนา 2.54 ซม.

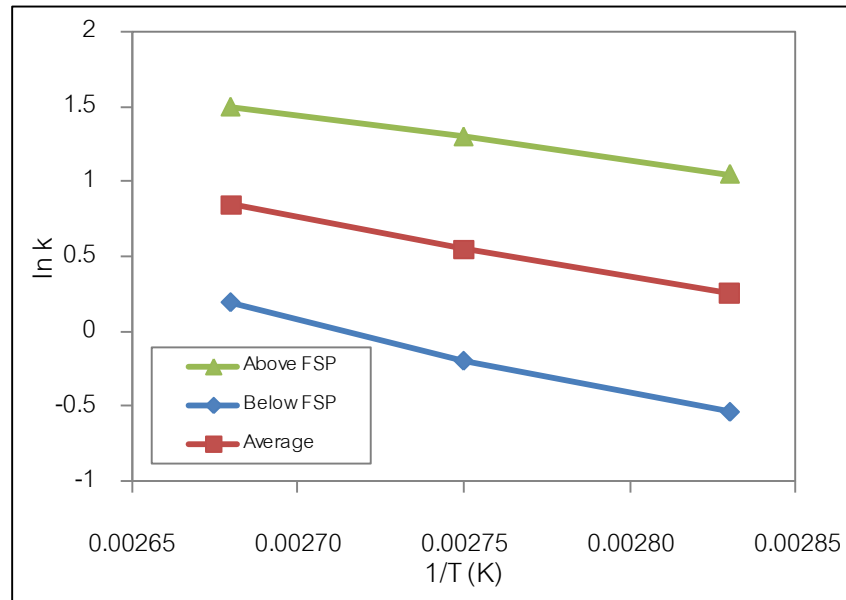
อุณหภูมิ/ กำลังวัตต์	ความชื้นเริ่มต้น (สุดท้าย, %d.b.)	อัตราแห้ง เฉลี่ย (%d.b./ซม.)	พลังงานที่ ใช้ (kWh)	อัตราการระเหย น้ำจำเพาะ (kg/kWh)	ความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
80 °C	79.9(11.02)	2.20	2.20	0.495	7.391
90 °C	79.46(14.12)	3.17	1.35	0.779	4.663
100 °C	81.51(12.91)	4.29	0.60	1.671	2.104
350 W	79.25(14.31)	1.33	14.50	0.107	36.968
700 W	80.06(13.31)	3.78	4.50	0.298	12.1
1400 W	80.77(12.06)	6.71	2.0	0.667	5.413

อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานความร้อนทั้งสองระบบ คือ กำลังของคลื่นไมโครเวฟ 1400 W และอุณหภูมิของลมร้อนที่ 100 °C ที่มีอัตราอบแห้งสูงและคง สมบัติทางกายภาพที่ดีของไม้หลังการอบไว้ได้ รวมถึงการใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุดในแต่ละ แหล่งความร้อน จะถูกเลือกนำมาใช้ในการอบแห้งไม้ยางพาราที่ความหนา 5.08 ซม. ในขั้นตอน ถัดไป

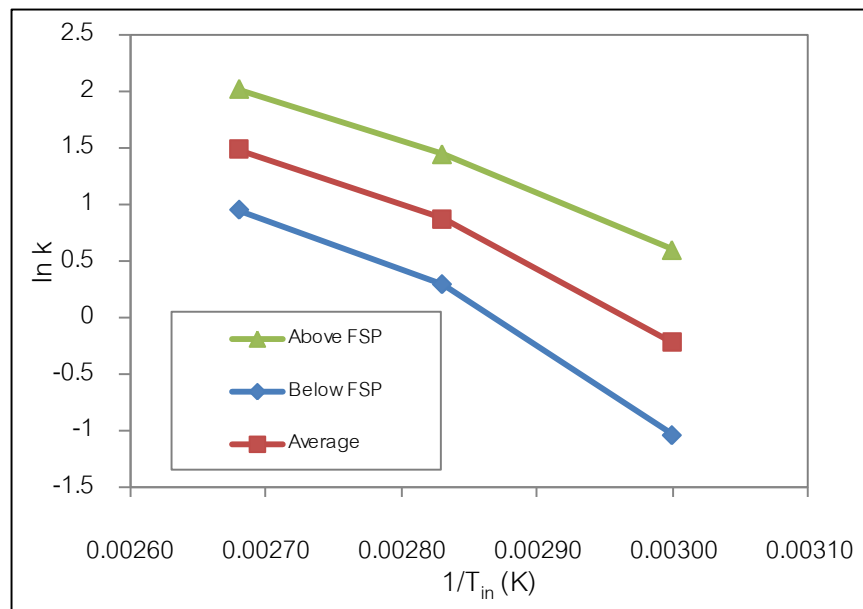
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ในแต่ละ แหล่งความร้อนต่ออัตราแห้งก่อนและหลังจุดหมาดไม้ สามารถอธิบายโดยสมการของอาร์เรเนียส (ดังสมการที่ 2-4) จากรูปที่ 4-4 พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 90 และ 100 °C ของไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. เหนือจุดอิมมัตวหรือจุดหมาดไม้ (FSP) อยู่ที่ 2.86, 3.74 และ 4.49 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่ผลการอบไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ด้วยไมโครเวฟ 350 700 และ 1400 W (อุณหภูมิภายในเนื้อไม้วัดได้ประมาณ 60 80 และ 100 °C ตามลำดับ) เหนือจุด อิมมัตวหรือจุดหมาดไม้ (FSP) มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 1.72 4.3 และ 7.68 เปอร์เซ็นต์ต่อ ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากจุดหมาดไม้จะเกิดการแพร่ที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยของลมร้อน ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 °C คิดเป็น 0.58, 0.79 และ 1.22 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมงตามลำดับ ในขณะที่กำลังไมโครเวฟ 350 700 และ 1400 W มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยคิดเป็น 0.35 1.47 และ 2.62 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าก่อนจุดหมาดไม้ สามารถเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิที่วัดได้ภายในเนื้อไม้ (ดังรูปที่ 4-5)

ค่าพลังงานกระตุ้นของแต่ละแหล่งความร้อนของกระบวนการอบแห้งก่อนจุดหมาดไม้ต่ำกว่าหลังจุดหมาดไม้ (ดังตารางที่ 4-2) เนื่องจากในช่วงก่อนจุดหมาดไม้โมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ช่องว่างของเซลล์ และเคลื่อนตัวด้วยกระบวนการ Capillary flow ไอน้ำบริเวณผิวระเหยออกด้วย อุณหภูมิอากาศที่ผ่านหน้าไม้ หลังจากนั้นความชื้นหลังจุดหมาดที่มีเหลืออยู่เฉพาะน้ำภายในผนัง เซลล์ จะเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการแพร่เท่านั้น เป็นผลให้ค่าของพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้ก่อน จุดหมาดไม้ต่ำกว่าหลังจุดหมาดไม้ สำหรับค่าเฉลี่ยพลังงานกระตุ้น (E_a) ก่อนและหลังจุดหมาดไม้ ที่คำนวณได้ของไมโครเวฟมากกว่าลมร้อนและไอน้ำ คิดเป็น 1.22 และ 1.42 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าไม้ที่ผ่านการอบด้วยระบบไอน้ำที่ใช้อบไม้ในโรงงานทั่วไปหรือลมร้อนมีการเปลี่ยนแปลง ความชื้นภายในเนื้อไม้ง่ายกว่าไม้ที่อบด้วยไมโครเวฟ แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานกระตุ้นของ ไมโครเวฟหลังจุดหมาดไม้ไม่แตกต่างมากนักเมื่อเทียบกับลมร้อนหรือไอน้ำเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราแห้งเฉลี่ยของค่าคงที่ k (จุดที่เส้นกราฟตัด แกนเมื่อ t มีค่าเท่ากับศูนย์) ของคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนหรือไอน้ำเพียงอย่างเดียว แสดงให้

เห็นว่าเกิดการระเหยของน้ำภายในเนื้อไม้เร็วกว่าลมร้อนหรือไอน้ำที่อาศัยตัวกลางที่เป็นอากาศพาความร้อนเพียงอย่างเดียว จึงใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นกว่า โดยเฉพาะการใช้ไมโครเวฟอบแห้งไม้ในช่วงหลังจุดหมาดไม้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ เทียบกับ $1/T$ ที่ความหนาไม้ 2.54 ซม. ของ (ก) ลมร้อนที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 °C (ข) ระบบไมโครเวฟที่ 350 700 และ 1400 W (T_{in} = อุณหภูมิภายในเนื้อไม้วัดได้ 60 80 และ 100 °C ตามลำดับ)

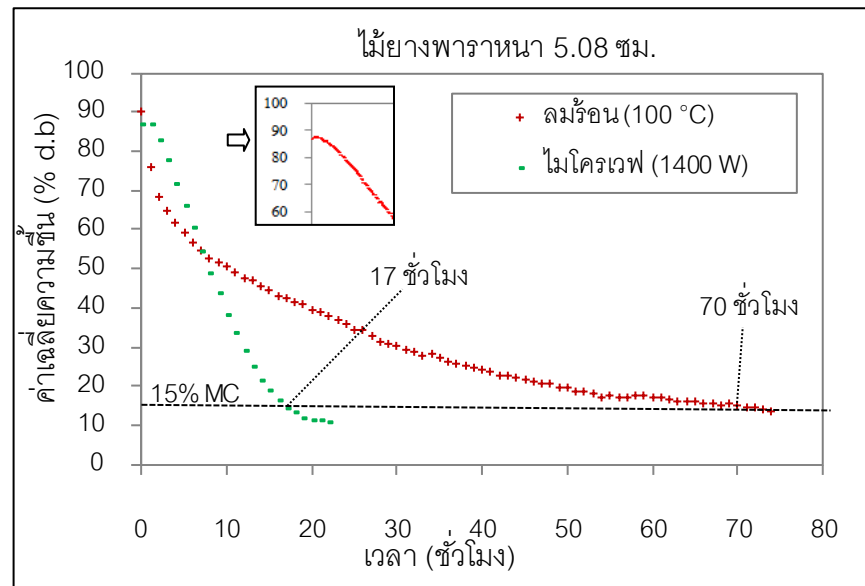
ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟสามารถลดปัญหาการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานานในช่วงท้ายของการอบแห้งได้ดีกว่าลมร้อนหรือไอน้ำเพียงอย่างเดียวได้ในหลายผลิตภัณฑ์ [28-30] แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานกระตุ้นของลมร้อนและไมโครเวฟที่คำนวณได้มากกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งไม้อย่างพาราที่ผ่านการอบด้วยไอน้ำ ซึ่งควรจะมีค่า 22 kJ/mol [42] สำหรับการอบไม้ไผ่คั่วแดง พบว่า มีค่าพลังงานกระตุ้น 26 kJ/mol [43] นอกจากนี้ผลการศึกษา พลังงานกระตุ้นของการอบแห้งไม้ไผ่จะมีค่าอยู่ในช่วง 36.00 - 40.00 kJ/mol [44]

ตารางที่ 4-2 ค่าคำนวณของ Q และ k' สำหรับอบแห้งไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ช่วงก่อนและหลังจุดหมาดไม้ (a = ก่อนจุดหมาดไม้, b = หลังจุดหมาดไม้ และ av = ค่าเฉลี่ยอบแห้งทั้งหมด) [*24]

Heat sources	Q_a (kJ/mol)	Q_b (kJ/mol)	Q_{av} (kJ/mol)	k'_a (%/hour)	k'_b (%/hour)	k'_{av} (%/hour)
Hot-air	23.3	38.5	30.3	1.03×10^4	4.2×10^5	5.5×10^4
Microwave	31.73	42.45	36.98	1.6×10^5	1.6×10^6	5.9×10^5
Stream*	14*	40*	26*	$2.9 \times 10^{2*}$	$5.0 \times 10^{5*}$	$1.1 \times 10^{4*}$

4.3.2.2 การเปรียบเทียบผลการอบไม้อย่างพาราที่ความหนา 5.08 ซม. ด้วยอุณหภูมิของลมร้อน 100 °C และคลื่นไมโครเวฟ 1400 W

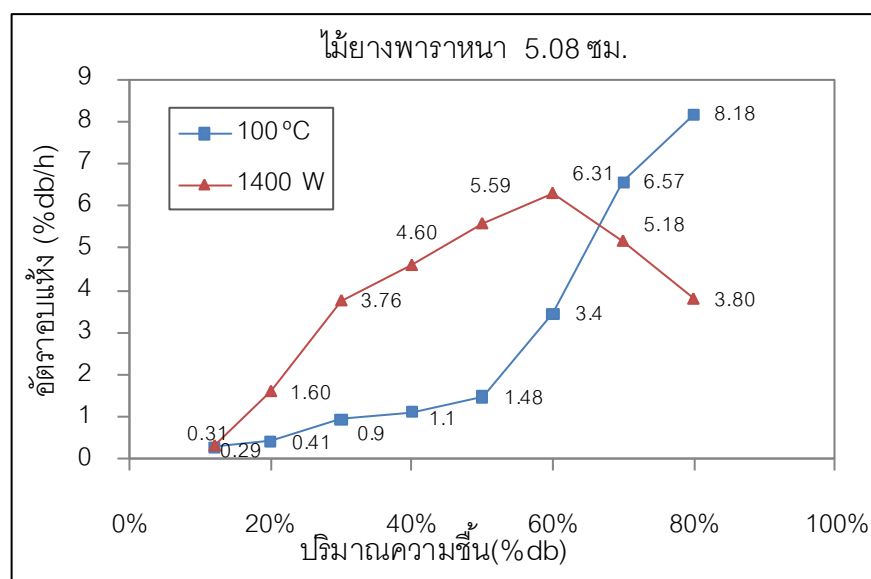
อุณหภูมิสูงสุดของลมร้อน (100 °C) และกำลังวัตต์สูงสุดของคลื่นไมโครเวฟ (1400 W) ที่มีอัตราการอบแห้งสูงสุดในการอบไม้หนา 2.54 ซม. และคงสมบัติทางกายภาพที่ดีของไม้หลังอบแห้ง จะถูกนำมาใช้ในการลดระยะเวลาอบแห้งที่ความหนาของไม้ 5.08 ซม. ในการทดลองซ้ำ 3 ครั้งของแต่ละแหล่งความร้อน จนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ พบว่า การอบไม้อย่างพาราด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 1400 W ใช้ระยะเวลาอบ 17 ชั่วโมง น้อยกว่าอุณหภูมิลมร้อนที่ 100 °C ที่ใช้ระยะเวลาอบแห้งเป็นเวลา 70 ชั่วโมง คิดเป็นระยะเวลาอบแห้งที่ลดลง 76 เปอร์เซ็นต์ จากระดับความชื้นเริ่มต้นประมาณ 90 %d.b. จนกระทั่งระดับความชื้นภายในเนื้อไม้อยู่ที่ 9-15 %d.b. (ดังรูปที่ 4-6) สำหรับการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความหนา 5.08 ซม. สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วงการอบแห้งแตกต่างจากการลมร้อนที่มีช่วงของการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียว คือ ช่วงแรกของการอบแห้งภายในชั่วโมงแรก พบว่า ปริมาณความชื้นและน้ำอิสระในไม้ที่สูงจะดูดซับคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนบริเวณผิวของไม้ โดยความร้อนที่ใช้เพื่อการทำ initial warm up จะมี



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นและเวลาของไม้ยางพาราที่ความหนา 5.08 ซม.

ปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนที่ใช้เพื่อการระเหย จึงเข้าสู่สภาวะการอบแบบอัตราอบคงที่ จากนั้นในช่วงที่สองจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวหน้าของเนื้อไม้เข้าสู่ภายในของเนื้อไม้ อุณหภูมิจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น เกิดการขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของชิ้นไม้สูงและช่วยเพิ่มแรงในการขับไล่ความชื้นให้ระเหยออกจากเนื้อไม้ แต่เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้เป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ เกิดการสะสมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบสูงกว่า ทำให้การถ่ายเทความชื้นจากเนื้อไม้สู่อากาศได้น้อยกว่า แต่เมื่อเวลาผ่านไปความร้อนสะสมภายในเนื้อไม้สูงกว่าที่ผิวมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายในออกสู่ผิวเนื้อไม้ ในขณะที่การระเหยของความชื้นที่อยู่ผิวหน้าของเนื้อไม้ จะถูกอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยรอบพัดพาจากผิวไม้เรื่อยๆ ระดับความชื้นในเนื้อไม้จึงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ลักษณะเส้นกราฟในช่วงนี้จึงมีความชันมาก ขณะที่ช่วงสุดท้ายคือตั้งแต่วันที่ 20 ไปจนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง เส้นกราฟช่วงนี้มีความชันน้อย นั่นหมายความว่าปริมาณความชื้นและน้ำอิสระที่ลดลงส่งผลให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟน้อยลง แรงแต้นไอลดลงเนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในไม้มายังผิวหน้าไม้มีค่าต่ำ อัตราการระเหยของน้ำไปยังอากาศโดยรอบ เกิดลักษณะสมดุลของความชื้นภายในตู้อบกับความชื้นในเนื้อไม้ ทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทความชื้น เส้นกราฟจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามการใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ 1400 W อย่างต่อเนื่องก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อไม้ ระดับความชื้นในเนื้อไม้จึงลดลงเร็วกว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ส่งผ่าน

ความร้อนเฉพาะผิวหน้าของเนื้อไม้ โดยเฉพาะช่วงสุดท้ายของการอบแห้งใช้ระยะเวลาสั้นลงมาก เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับอัตราการอบแห้งเฉลี่ยหลังระดับความชื้นอยู่ที่ 60 %d.b. ของกำลังคลื่นไมโครเวฟ 1400 W มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิลมร้อน 100 °C (ดังรูปที่ 4-7) ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถลดปัญหาการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานานในช่วงท้ายของการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4-7 อัตราการแห้งของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม. ด้วยไมโครเวฟและลมร้อน

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะเฉลี่ยของอุณหภูมิลมร้อน 100 °C มีค่าสูงกว่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟ 1400 W ประมาณ 1.29 เท่า และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะน้อยกว่า ประมาณ 1.26 เท่า (ดังตารางที่ 4-3) เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงของคลื่นไมโครเวฟมากกว่าลมร้อนเกือบ 5 เท่า ส่งผลต่อค่าคำนวณของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะลดลง และค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของไมโครเวฟมากกว่าลมร้อน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบแต่ละแหล่งความร้อนในการเพิ่มความหนาของเนื้อไม้ยางพารา พบว่า เมื่อไม้ผ่านการอบด้วยลมร้อน (100 °C) จะมีแนวโน้มอัตราการระเหยน้ำจำเพาะเฉลี่ยลดลงเป็นสองเท่าตัว ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า แตกต่างกับอัตราการระเหยน้ำจำเพาะเฉลี่ยและค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของคลื่นไมโครเวฟ (1400 W) ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในการเพิ่มความหนาไม้

ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำจำเพาะและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละแหล่งความร้อนของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม.

ความ หนาไม้ (ซม.)	อุณหภูมิ/ กำลังวัตต์	ความชื้นเริ่มต้น (สุดท้าย, %d.b.)	อัตราแห้ง เฉลี่ย (%d.b./ซม)	พลังงาน ที่ใช้ (kWh)	อัตราการระเหย น้ำจำเพาะ (kg/kWh)	ความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
5.08	100 °C	90.31(12.15)	1.76	3.5	0.773	4.796
	1400 W	87.95(8.56)	2.31	4.25	0.595	6.077

4.3.2.3 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

เทคนิควิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) จะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าคงตัวของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งไม้ยางพาราที่ความหนาไม้ 2.54 ซม. ด้วยลมร้อนหรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ซึ่งแบบจำลองเอมพิริคัลในตารางที่ 2-2 สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในการหาค่าคงตัวสมการ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่า Chi-Square (χ^2) และค่า RMSE (Root Mean Square Error) วิเคราะห์และเปรียบเทียบ เพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างอบแห้งด้วยลมร้อนหรือคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว สำหรับค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยค่ายิ่งเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรมีค่า R^2 มากแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE น้อย

สำหรับผลการทดลองในการอบไม้ยางพาราด้วยอุณหภูมิลมร้อน คือ 80 90 และ 100 °C และกำลังของคลื่นไมโครเวฟ 350 700 และ 1,400 W เมื่อนำมาทำนายและเปรียบเทียบกับข้อมูลทดลองด้วยแบบจำลองเอมพิริคัลทั้ง 5 แบบจำลอง พบว่า แบบจำลองของ Diffusion Approximation ตามสมการที่ (4-1) สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งไม้ด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกันได้ดี โดยมีค่า R^2 มากที่สุดเท่ากับ 0.9993 และความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่า χ^2 เท่ากับ 0.00294 และ RMSE เท่ากับ 0.05418 (ภาคผนวก ก-1)

$$\text{Diffusion Approximation Model : } MR = a \exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t) \quad (4-1)$$

โดย MR คือ อัตราส่วนความชื้นเป็น % มาตรฐานแห้ง (d.b.)

t คือ เวลาในการอบแห้ง เป็นนาที (min)

a , b และ k คือค่าคงที่ในสมการของ Diffusion Approximation

จากการนำค่าคงที่ a , b และ k มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรกำลังของคลื่นไมโครเวฟ โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น จึงได้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ความสัมพันธ์ของค่า a , b และ k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T) ขณะอบด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 350 700 และ 1400 W ตามสมการข้างล่าง

$$a = 1E-06T^2 - 0.0025T + 0.6558 \quad (4-2) \quad R^2=0.99$$

$$b = -7E-07T^2 + 0.0014T - 0.3238 \quad (4-3) \quad R^2=0.99$$

$$k = 9E-07T^2 - 0.001T + 0.6678 \quad (4-4) \quad R^2=0.99$$

นอกจากนี้แบบจำลองของ Diffusion Approximation มีความเหมาะสมมากที่สุดในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนเช่นกัน โดยมีค่า R^2 มากที่สุดเท่ากับ 0.9998 และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่า χ^2 เท่ากับ 0.000 และ RMSE เท่ากับ 0.005206 (ภาคผนวก ก-2) เมื่อนำค่าคงตัวสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) ของลมร้อนที่ 80 90 และ 100 °C กับค่าคงที่ จะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$a = -0.0051T^2 + 0.9154T - 40.286 \quad (4-5) \quad R^2=0.99$$

$$k = 0.0049T^2 - 0.8552T + 37.144 \quad (4-6) \quad R^2=0.99$$

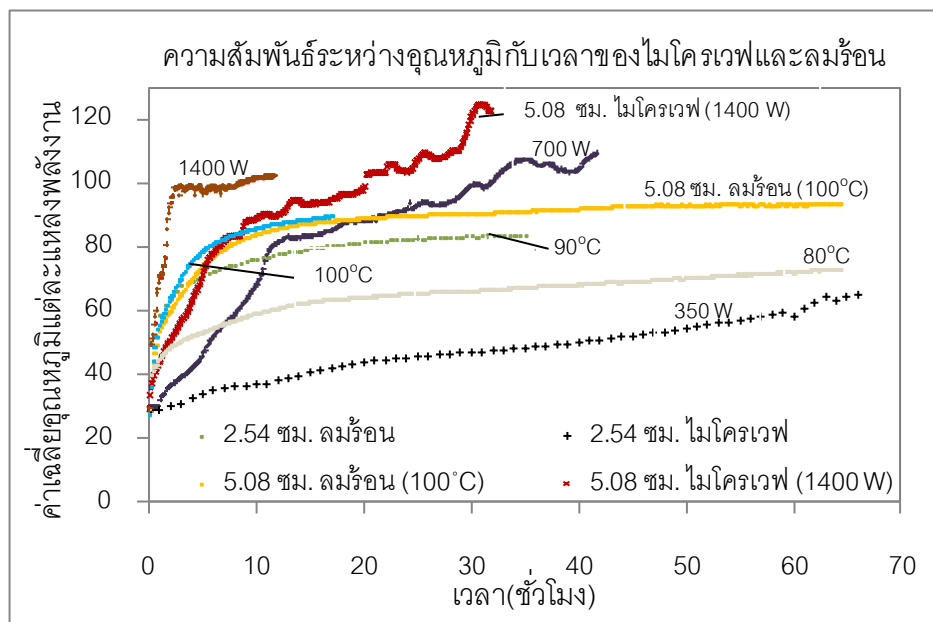
$$b = -0.0007T^2 + 0.1261T - 5.5019 \quad (4-7) \quad R^2=0.99$$

สำหรับความสัมพันธ์ของค่าคงที่ a , b และ k ต่าง ๆ ที่ปรากฏในรูปแบบฟังก์ชันของอุณหภูมิ ลมร้อนและกำลังของคลื่นไมโครเวฟตามสมการที่ (4-2) ถึง (4-7) ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนและกำลังของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่า a , b และ k ที่แทนในสมการการ

อบแห้งตามแบบจำลองของ Diffusion Approximation มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง ในขณะที่อัตราการอบแห้งของไม้ยางพาราสูงขึ้น

4.3.2.4 อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ยางพารา

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ขณะอบแห้งด้วยลมร้อน (80 90 และ 100 °C) พบว่า อุณหภูมิของเนื้อไม้ค่อยๆ เพิ่มขึ้น แล้วเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่างความชื้นอากาศแวดล้อมและความชื้นไม้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่เกิน 8 ชั่วโมง ที่ความหนาไม้ต่างกัน (อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ต่ำกว่าประมาณ 10 °C กับค่าที่ตั้งไว้ที่ผ่านการวัดด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลก่อนเข้าตู้อบ) แตกต่างจากการใช้คลื่นไมโครเวฟอบแห้งที่ความหนาของไม้เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ค่าลดลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิภายในเนื้อไม้จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ และมากกว่า 100 °C เมื่อใช้เวลาอบแห้งมากกว่า 9 และ 18 ชั่วโมง ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น 2.54 และ 5.08 ซม. ตามลำดับ โดยเฉพาะอุณหภูมิภายในเนื้อไม้หนา 2.54 ซม. เมื่ออบด้วยคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้นเร็วกว่าลมร้อน (ดังรูปที่ 4-8)



รูปที่ 4-8 อุณหภูมิภายในเนื้อไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ขณะอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

สำหรับอุณหภูมิของไม้หนา 5.08 ซม. พบว่า อุณหภูมิช่วงแรกของไมโครเวฟต่ำกว่าลมร้อน และมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อนภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นไม้มีแนวโน้มของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แตกต่างกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนระหว่างการอบแห้งไม้ ซึ่งจะพบว่า

อุณหภูมิของไม้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากอุณหภูมิเริ่มต้นไปสู่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ลักษณะของอุณหภูมิของคลื่นไมโครเวฟภายในเนื้อไม้สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง สอดคล้องกับงานวิจัยกับการอบไม้ด้วยเตาอบไมโครเวฟบ้าน [26] โดยช่วงแรกเป็นการให้ความร้อนเบื้องต้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ระดับความชื้นบริเวณผิวไม้ค่อยๆ ลดลง ในช่วงที่สองความชื้นจะระเหยกลายเป็นไอและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้คงที่ ส่วนช่วงที่สามอุณหภูมิภายในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจาก ระดับความชื้นที่ลดลง เกิดการระเหยไอน้ำข้างลง อุณหภูมิของพื้นผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละเงื่อนไขมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

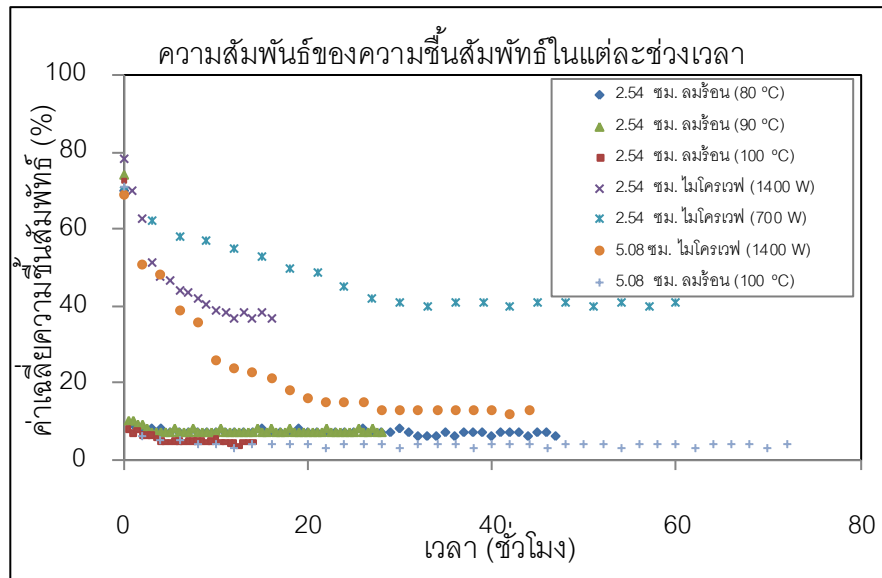
4.3.2.5 อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนที่ใช้อบไม้ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น พบว่า กำลังที่เพิ่มขึ้นของคลื่นไมโครเวฟส่งผลกระทบต่อการค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิภายในเตาอบมากขึ้น มีค่าระหว่าง 30-55 °C ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่อยๆ ลดน้อยลงจาก 80% เหลือความชื้นน้อยสุดที่ 10% แตกต่างกับลมร้อนที่อุณหภูมิภายในเตาอบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ที่มีค่าระหว่าง 70-100 °C และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของใกล้เคียงกันที่ 4%-8% ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ (ดังรูปที่ 4-9) โดยความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาอบของลมร้อนน้อยกว่าไมโครเวฟตลอดการทดลองในแต่ละช่วงเวลาเดียวกัน เนื่องจากปริมาณไอน้ำที่สะสมในอากาศภายในเตาอบน้อยกว่า อีกทั้งอุณหภูมิภายในเตาอบของลมร้อนมีค่าสูงและสม่ำเสมอ จึงเกิดถ่ายเทความร้อนสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟที่มีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เนื้อไม้ยาวพาราสูง ทำให้ความชื้นที่ออกจากไม้ยาวพาราถูกอากาศพัดพาออกจากผิวไม้ยาวพารา และเกิดกลไกการดึงน้ำออกจากไม้ยาวพาราดีขึ้น จึงควบคุมการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ได้เนื่องจากค่าที่วัดได้ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเตาอบคงที่ตลอดการทดลอง

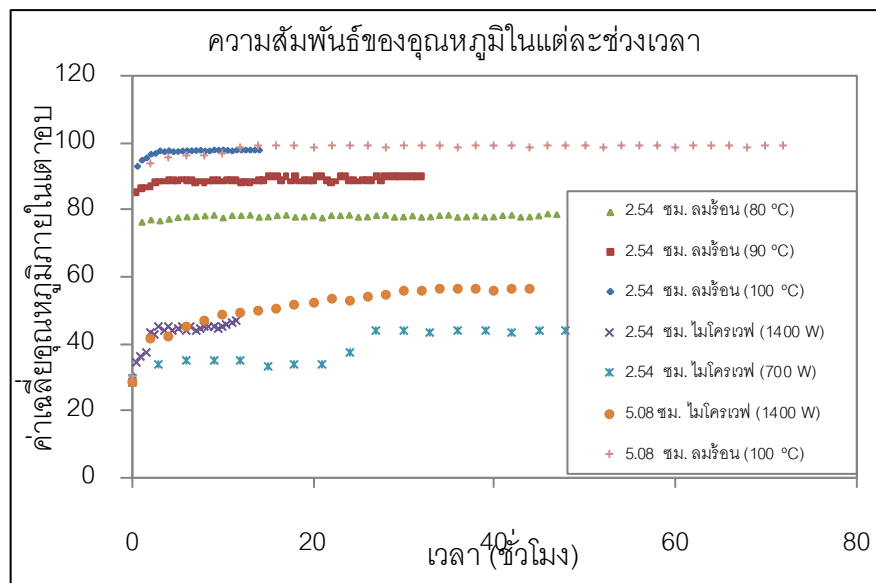
4.3.2.6 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอบ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการควบคุมการอบแห้งไม้ ได้แก่ ความชื้นของไม้ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการลดระดับความชื้นภายในเนื้อไม้และคุณภาพไม้ หลังอบแห้งก่อนจะนำไปใช้งาน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ส่งผลต่อการลดความชื้นภายในเนื้อไม้ขณะอบ เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องศึกษา เพื่อ

เป็นทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้ลมร้อนและไมโครเวฟอย่างเหมาะสม ภายใต้กลไกการให้ความร้อนกับไม้ที่แตกต่างกันในกระบวนการอบแห้งไม้ (แสดงในตารางที่ 4-4 และ 4-7) ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-9 (ก) ความชื้นสัมพัทธ์และ (ข) อุณหภูมิภายในเตาอบของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม.

ตารางที่ 4-4 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบ อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง (หนา 2.54 ซม.) ด้วยลมร้อน 100 °C

		น้ำหนักไม้ที่ เปลี่ยนแปลง	ค่าความชื้น สัมพัทธ์	อุณหภูมิ ภายในเตาอบ	อุณหภูมิ ภายในเนื้อไม้
น้ำหนักไม้ที่ เปลี่ยนแปลง	Pearson Correlation	1.00	0.611**	-0.617**	-0.937**
	Sig. (2-tailed)	.	0.002	0.002	0.000
	N	15	15	15	15
ค่าความชื้น สัมพัทธ์	Pearson Correlation	0.611	1.00	-0.999**	-0.810**
	Sig. (2-tailed)	0.002	.	0.000	0.000
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิ ภายในเตาอบ	Pearson Correlation	-0.617**	-0.999**	1.00	0.826**
	Sig. (2-tailed)	0.002	0.000	.	0.000
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิ ภายในเนื้อไม้	Pearson Correlation	-0.937**	-0.810**	0.826**	1.00
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	.
	N	15	15	15	15

หมายเหตุ N คือ จำนวนที่เก็บข้อมูล

** แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

จากตารางที่ 4-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson Product Correlation Coefficient พบว่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิภายในเตาอบ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป (หนา 2.54 ซม.) ขณะอบแห้งด้วยลมร้อน มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญอยู่ที่ระดับ 0.05 โดยจากการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ Pearson correlation (r) พบว่าน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับปานกลางกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ($r = 0.611$) และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับปานกลางกับอุณหภูมิภายในเตาอบไม้ และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงมากกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.617$ และ -0.937 ตามลำดับ) ในขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงมากและระดับสูงกับค่าอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.999$ และ -0.818

ตามลำดับ) รวมถึงอุณหภูมิภายในเตาอบมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับสูงกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = 0.826$)

ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง (หนา 2.54 ซม.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 1400 W

		น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	ค่าความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิในเตาอบ	อุณหภูมิในเนื้อไม้
น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	Pearson Correlation	1.00	0.972**	-0.633**	-0.755**
	Sig. (2-tailed)	.	0.000	0.011	0.001
	N	15	15	15	15
ค่าความชื้นสัมพัทธ์	Pearson Correlation	0.972**	1.00	-0.759**	-0.832**
	Sig. (2-tailed)	0.000	.	0.001	0.000
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิภายในเตาอบ	Pearson Correlation	-0.633**	-0.759**	1.00	0.923**
	Sig. (2-tailed)	0.011	0.001	.	0.000
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิภายในเนื้อไม้	Pearson Correlation	-0.755**	-0.832**	0.923**	1.00
	Sig. (2-tailed)	0.001	0.000	0.000	.
	N	15	15	15	15

หมายเหตุ N คือ จำนวนที่เก็บข้อมูล

** แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

จากตารางที่ 4-5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson Product Correlation Coefficient พบว่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิภายในเตาอบไม้ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง (หนา 2.54 ซม.) ขณะอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ 0.05 เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ Pearson correlation (r) พบว่า น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันสูงมากกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ($r = 0.972$) และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับปานกลางกับอุณหภูมิในเตาอบและมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงกับอุณหภูมิในเนื้อไม้ ($r = -0.633$ และ -0.755 ตาม ลำดับ)

ในขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงระดับสูงกับอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.759$ และ -0.832 ตามลำดับ) รวมถึงอุณหภูมิภายในเตาอบมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับสูงมากกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = 0.923$)

ตารางที่ 4-6 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้หนา 5.08 ซม. ด้วยลมร้อน ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

		น้ำหนักไม้ที่ เปลี่ยนแปลง	ค่าความชื้น สัมพัทธ์	อุณหภูมิ ในเตาอบ	อุณหภูมิ ในเนื้อไม้
น้ำหนักไม้ที่ เปลี่ยนแปลง	Pearson Correlation	1.00	0.589**	-0.623**	-0.804**
	Sig. (2-tailed)	.	0.000	0.000	0.000
	N	23	23	23	23
ค่าความชื้น สัมพัทธ์	Pearson Correlation	0.589**	1.00	-0.998**	-0.926**
	Sig. (2-tailed)	0.000	.	0.000	0.000
	N	23	23	23	23
อุณหภูมิ ภายในเตาอบ	Pearson Correlation	-0.623**	-0.998**	1.00	0.944**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	.	0.000
	N	23	23	23	23
อุณหภูมิ ภายในเนื้อไม้	Pearson Correlation	-0.804**	-0.926**	0.944**	1.00
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	.
	N	23	23	23	23

หมายเหตุ N คือ จำนวนที่เก็บข้อมูล

** แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

จากตารางที่ 4-6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson Product Correlation Coefficient พบว่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิภายในเตาอบไม่ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป (หนา 5.08 ซม.) ขณะอบแห้งด้วยลมร้อน มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ 0.05 โดยน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับปานกลางกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ($r = 0.589$) และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับปานกลางกับอุณหภูมิภายในเตาอบไม่ และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.623$ และ -0.804 ตามลำดับ) ในขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์ใน

ทิศทางตรงกันข้ามสูงมากกับค่าอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.998$ และ -0.926 ตามลำดับ) รวมถึงอุณหภูมิภายในเตาอบมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับสูงมากกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้เช่นเดียวกัน ($r = 0.944$)

ตารางที่ 4-7 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง (หนา 5.08 ซม.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 1400 W

		น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	ค่าความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิในเตาอบ	อุณหภูมิในเนื้อไม้
น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	Pearson Correlation	1.00	0.80**	-0.477**	-0.892**
	Sig. (2-tailed)	.	0.000	0.021	0.000
	N	23	23	23	23
ค่าความชื้นสัมพัทธ์	Pearson Correlation	0.80**	1.00	-0.851**	-0.919**
	Sig. (2-tailed)	0.000	.	0.000	0.000
	N	23	23	23	23
อุณหภูมิภายในเตาอบ	Pearson Correlation	-0.477**	-0.851**	1.00	0.742**
	Sig. (2-tailed)	0.021	0.000	.	0.000
	N	23	23	23	23
อุณหภูมิภายในเนื้อไม้	Pearson Correlation	-0.892**	-0.919**	0.742**	1.00
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	.
	N	23	23	23	23

หมายเหตุ N คือ จำนวนที่เก็บข้อมูล

** แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

จากตารางที่ 4-7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson Product Correlation Coefficient พบว่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิภายในเตาอบไม่ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป (หนา 5.08 ซม.) ขณะอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ 0.05 เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ Pearson correlation (r) พบว่า น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับสูงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ($r = 0.80$) และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับต่ำกับอุณหภูมิภายในเตาอบไม่ และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับสูงกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.477$ และ

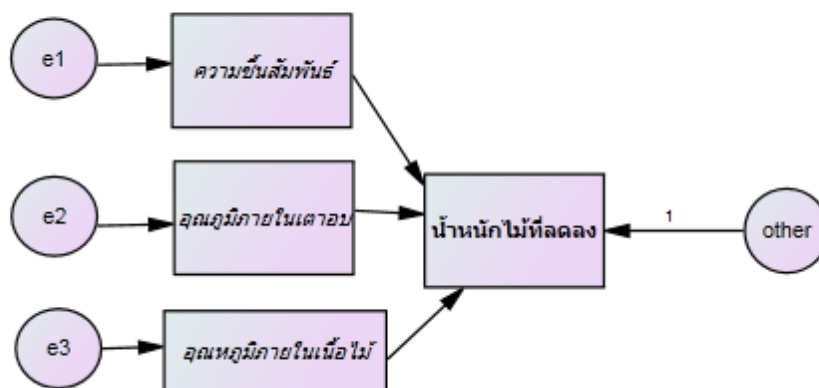
-0.892 ตามลำดับ) ในขณะที่ค่าความสัมพันธ์มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับสูงและสูงมากกับอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.851$ และ -0.919 ตามลำดับ) รวมถึงอุณหภูมิภายในเตาอบมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับสูงกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = 0.742$)

สำหรับการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม้ที่ความหนาเพิ่มขึ้น พบว่า น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในระดับสูงมากและสูงเมื่อความหนาไม้เพิ่มขึ้น แต่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับสูงกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ รวมถึงมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับปานกลางและต่ำกับอุณหภูมิภายในเตาอบไม้ เนื่องจากอุณหภูมิภายในเตาอบไม้แปรผันตามอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะความชื้นภายในเนื้อไม้ที่เป็นโมเลกุลมีขั้ว และไม่เกิดปริมาณความร้อนที่ทำให้ผิวหน้าไม้ร้อนเกินไปกว่าบรรยากาศรอบนอกผิวไม้ จึงเกิดหยดน้ำเกาะบริเวณผนังตู้อบขณะอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออบแห้งไม้ด้วยลมร้อน พบว่า น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ในระดับสูงมากและสูงเมื่อความหนาไม้เพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับปานกลางกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งน่าจะเกิดจากปัจจัยของการกระจายของลมร้อนในตู้อบได้ดีกว่าใช้คลื่นไมโครเวฟอย่างเดียว ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ข้อดีและข้อเสียของทั้งสองระบบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟและเร่งการระเหยความชื้นบริเวณผิวไม้และลดอากาศชื้นภายในเตาอบด้วยลมร้อน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งของทั้งสองระบบร่วมกัน สามารถลดระยะเวลาอบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ [28-30]

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องของขนาดทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ตามเทคนิคแบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองความสัมพันธ์ (Default Model) สามารถอธิบายค่าความผันแปรร่วม (Covariance) ได้ดีเมื่อทุกๆปัจจัยมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกันหมด (Saturated Model) ซึ่งการคำนวณหาค่าของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกันผ่านแบบจำลองสมการโครงสร้างตั้งต้นตามหลักทฤษฎี (ดังรูปที่ 4-10)

ผลวิเคราะห์โครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปร แสดงให้เห็นสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยของความชื้นสัมพัทธ์ (X_1) อุณหภูมิภายในเตาอบ (X_2) และอุณหภูมิ

ภายในเนื้อไม้ (X_3) ส่งผลต่อน้ำหนักไม้ลดลง (Y) สามารถเขียนค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของลมร้อน (ดังสมการ 4-8 และ 4-9) หรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว (ดังสมการ 4-10 และ 4-11)



รูปที่ 4-10 แบบจำลองสมการโครงสร้างตั้งต้น

ที่ความหนาไม้ 2.54 ซม. ด้วยลมร้อน 100 °C

$$Y = 0.624 X_1 + 0.699 X_2 - 1.398 X_3 \quad (4-8) \quad R^2 = 0.944$$

ที่ความหนาไม้ 5.04 ซม. ด้วยลมร้อน 100 °C

$$Y = 7.745 X_1 + 6.41 X_2 - 7.997 X_3 \quad (4-9) \quad R^2 = 0.990$$

ที่ความหนาไม้ 2.54 ซม. ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 1400 W

$$Y = -1.528 X_1 + 1.341 X_2 - 3.249 X_3 \quad (4-10) \quad R^2 = 0.820$$

ที่ความหนาไม้ 5.04 ซม. ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 1400 W

$$Y = -3.552 X_1 + 5.137 X_2 - 3.863 X_3 \quad (4-11) \quad R^2 = 0.907$$

4.3.3 คุณภาพของไม้หลังการอบ

4.3.3.1 การบิดตัวและการแตกของไม้

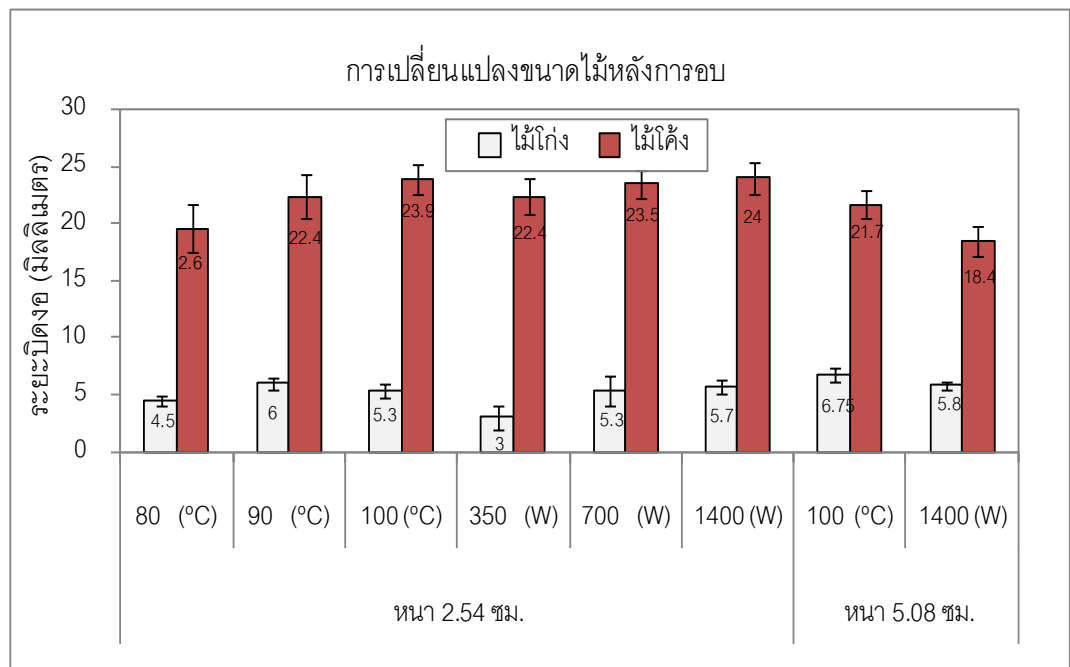
ไม้ยางพาราภายหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟ จนกระทั่งมีความชื้น 8.56 - 14.31 % เมื่อนำมาวัดการโค้ง (bow) การโก่ง (spring) และการบิด (twist) ผลการทดลองพบว่า ไม้ยางพาราในการทดลองนี้มีลักษณะโค้งและโก่ง แต่ไม่พบการบิดงอและการแตกของไม้ยางพารา (ดังแสดงในรูปที่ 4-11 และ 4-12) ค่าความโค้งอยู่ระหว่าง 2.4-8.1 มิลลิเมตร ต่อความยาวไม้ 1.1 เมตร และมีการโก่งระหว่าง 1.3-7.0 มิลลิเมตรต่อความยาวไม้ 1.1 เมตร โดยไม้ยางพาราที่อบแห้งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟผ่านเกณฑ์คุณภาพของไม้แปรรูปของโรงงานเฟอร์นิเจอร์ ที่กำหนดความโค้งสูงจากระดับพื้นไม้เกิน 22 มิลลิเมตร และความโก่งสูงจากระดับพื้นไม้ไม่เกิน 8 มิลลิเมตร จึงจะสามารถนำไปใช้งานได้ (ดังแสดงในรูปที่ 4-13)



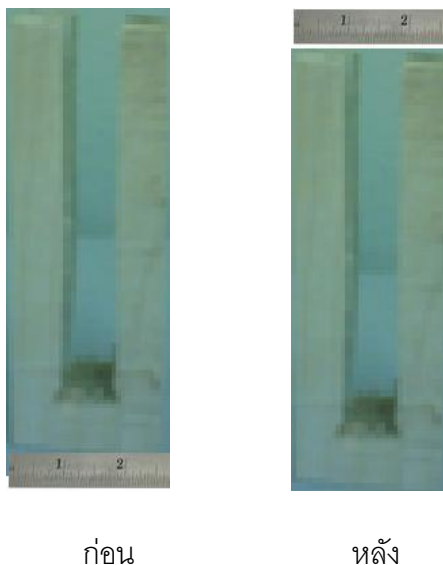
รูปที่ 4-11 ลักษณะไม้หลังอบแห้งตามความยาวไม้



รูปที่ 4-12 ลักษณะไม้หลังอบแห้งตามความหนาหรือสันของไม้



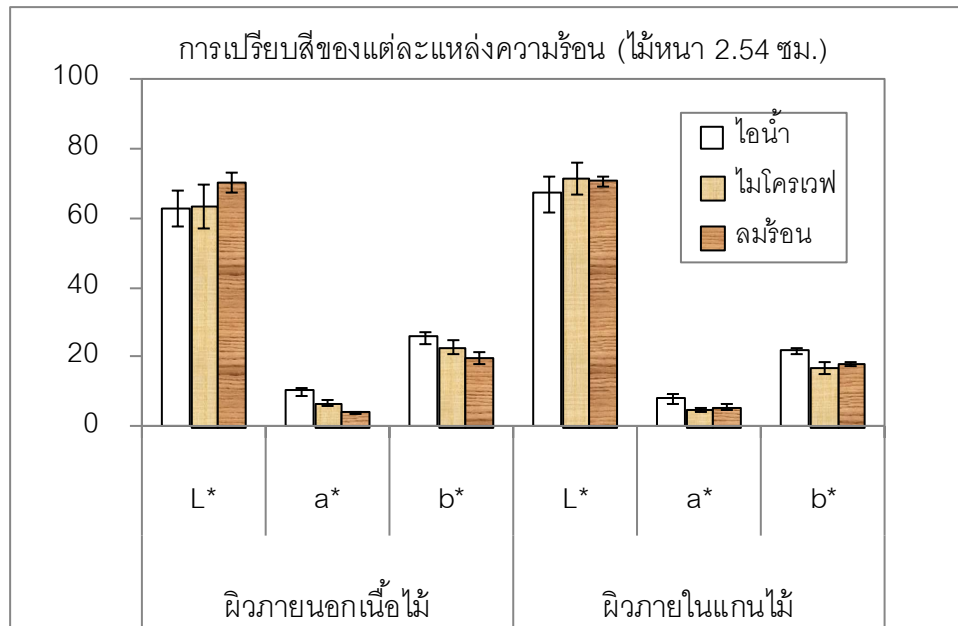
รูปที่ 4-13 การเปลี่ยนแปลงของไม้หลังการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน



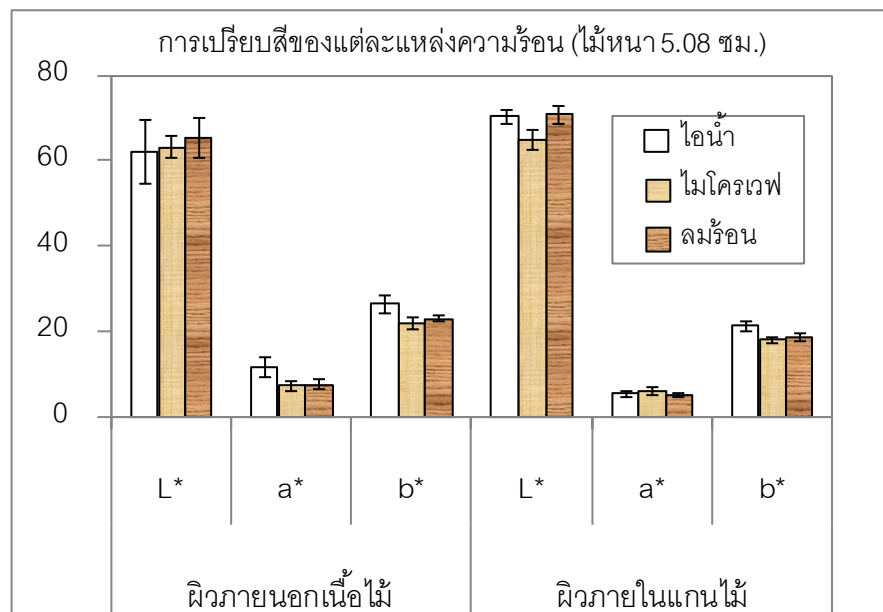
รูปที่ 4-14 การทดสอบสีที่ล้อมหลังการอบของไม้ยาวพาราหนา 2.54 ซม.

4.3.3.3 สีของไม้หลังการอบแห้ง

สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้ยาวพาราหลังอบแห้งด้วยไอน้ำ แบบเกรด A เทียบกับไม้ยาวพาราที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟและลมร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 4-15 และ 4-16) พบว่า ในระบบ CIE L^* , a^* , and b^* ที่อุณหภูมิอบแห้ง 100°C ของลมร้อนส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่พื้นผิวและแกนกลาง (ΔE) ของไม้ยาวพาราหนา 2.54 ซม. มีค่าน้อยที่สุด แตกต่างกับไม้ยาวพาราหนา 5.08 ซม. ในระบบ CIE L^* , a^* , and b^* ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ 1400 W มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่พื้นผิวและแกนกลาง (ΔE) น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หลังการอบด้วยไมโครเวฟและลมร้อนมีค่าน้อยกว่าไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ เมื่อเปรียบเทียบแต่ละแหล่งความร้อนที่เป็นค่าตัวกลางการอบแห้งไม้ยาวพาราทั้งสามระบบในการอบไม้ที่ความหนาแตกต่างกัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความสว่าง (L^* -value) ในบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้ยาวพาราหนา 2.54 และ 5.08 ซม. ($p > 0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (positive b^* -value) และค่าความเป็นสีแดง (positive a^* -value) ที่พื้นผิวและแกนกลางของไม้ยาวพาราหนา 2.54 และ 5.08 ซม. ($p < 0.05$) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าความเป็นสีเหลืองและค่าความเป็นสีแดงของไมโครเวฟและลมร้อนน้อยกว่าไอน้ำ ยกเว้นค่าความเป็นสีแดงภายในเนื้อไม้ยาวพาราหนา 5.08 ซม. ที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากค่าที่ได้จากการวัดของทั้งสามระบบไม่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่าสีของไม้หลังผ่านการอบด้วยไมโครเวฟและลมร้อนมีมูลค่าผลิตภัณฑ์เทียบเท่ากับเกรด A ของไม้หลังอบด้วยวิธีการอบแห้งด้วยไอน้ำในปัจจุบัน



รูปที่ 4-15 การเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หลังอบแห้ง (ไม้หนา 2.54 ซม.)

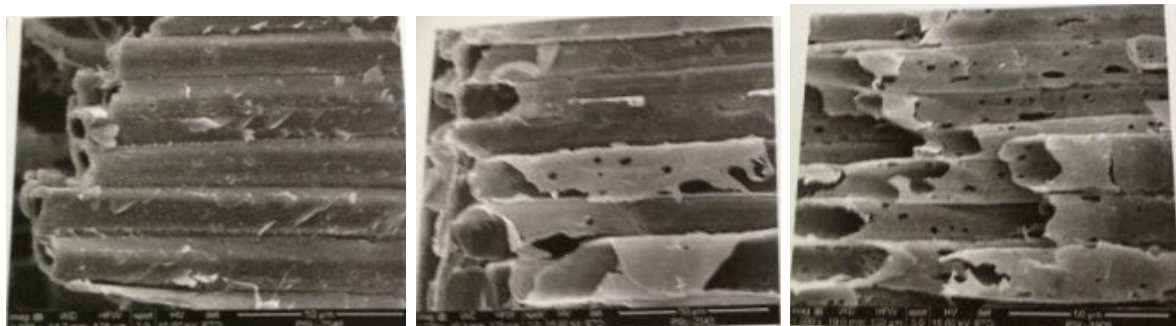


รูปที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางไม้หลังอบแห้ง (ไม้หนา 5.08 ซม.)

4.3.3.4 ลักษณะของไม้หลังการอบ

เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างไม้ยางพาราหลังอบแห้งของพลังงานที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว และการอบไม้ในปัจจุบันที่

ใช้ไอน้ำ จะถูกนำไปส่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูโครงสร้างของเซลล์ไม้ ยางพาราหลังอบแห้งที่กำลังขยายเดียวกัน



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4-17 ไม้ยางพาราหลังอบแห้งส่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย $\times 1000$ ขนาด 50 ไมครอน : (ก) การอบไม้โดยใช้ไอน้ำ (ข) การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และ (ค) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียว

จากรูปที่ 4-17 พบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 1400 W มีการทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ (cell wall) เนื่องจากการใช้คลื่นไมโครเวฟอบไม้ที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงที่มีความชื้น จะเกิดความร้อนกระจายทั่วถึงในเนื้อไม้ ความแตกต่างของความดันภายในและภายนอกผิวไม้สูงขึ้น เกิดแรงดันไอน้ำและเคลื่อนที่ออกอย่างรวดเร็ว จึงเกิดเป็นลักษณะรูพรุนมากกว่าวิธีอื่นๆ ส่วนการใช้ลมร้อนมีการทำลายโครงสร้างเซลล์ที่มีลักษณะรูพรุนบางตำแหน่งและผนังเซลล์มีลักษณะอัดแน่นมากกว่า เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนความชื้นที่ผิวด้านนอกของไม้จะค่อยๆ ระเหยออกก่อนเมื่อสูญเสียความชื้นที่ผิวทำให้เกิดการหดตัวขึ้น สำหรับตัวอย่างไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำอย่างเดียว แสดงลักษณะโครงสร้างที่อัดแน่น ไม่พบลักษณะรูพรุนและมีลักษณะเป็นท่อกลมยาวที่เรียงชิดติดกันแน่นระหว่างผนังเซลล์ เป็นผลมาจากความชื้นในเนื้อไม้ออกมาอย่างช้าๆตามคุณสมบัติของไอน้ำ จึงเกิดแรงดันไอน้ำน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟ

4.4 สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนและกำลังวัตต์ช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในเนื้อไม้มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและลดระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง สำหรับการอบแห้งไม้ยางพาราที่มีความหนา 2.54 และ 5.08 ซม. ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (1400 W) ใช้ระยะเวลาอบน้อยกว่าระบบลมร้อน (100 °C) คิดเป็น 33 และ 84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อ

พิจารณาแหล่งพลังงานที่ใช้ พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งด้วย อุณหภูมิลมร้อน 100 °C เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าตามความหนาของไม้ที่เพิ่มขึ้น (2.104 และ 4.796 MJ/kg ของไม้ยางพาราที่มีความหนา 2.54 และ 5.08 ซม. ตามลำดับ) ในขณะที่ความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะของไมโครเวฟ (1400W) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (5.413 และ 6.077 MJ/kg ของไม้ยางพาราที่มีความหนา 2.54 และ 5.08 ซม. ตามลำดับ) นอกจากนี้ผลการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งไม้ยางพาราด้วยลมร้อนหรือคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว สามารถใช้แบบจำลองของ Diffusion Approximation อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งไม้ยางพาราได้ดี สามารถทำนายการ ลดลงของความชื้นได้ใกล้เคียงมากที่สุด ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักไม้ ที่เปลี่ยนแปลงไปขณะอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญในทิศทางเดียวกัน กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในระดับสูง แสดงถึงความชื้นสะสมภายในตู้อบมีปริมาณมาก ในขณะที่อบ ด้วยลมร้อนน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับปานกลางกับค่า ความชื้นสัมพัทธ์ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้การกระจายของลมร้อนในเตาอบร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ มีแนวโน้มในการเพิ่มอัตราอบแห้งมากขึ้น สำหรับไม้ที่ผ่านการอบแห้งทั้งสองระบบด้วยไมโครเวฟ และลมร้อน มีสมบัติทางกายภาพที่ดีในการนำไปใช้งาน เนื่องจากผ่านเกณฑ์การทดสอบที่เสื่อมใน ทุกเงื่อนไข และสีของไม้มีมูลค่าเทียบเท่ากับไม้หลังอบด้วยวิธีอบไอน้ำในปัจจุบัน ถึงแม้ว่า โครงสร้างไม้หลังอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีลักษณะรูพรุนที่ผิวมากกว่าวิธีอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การผสมผสานข้อดีของทั้งสองระบบมีแนวโน้มในการลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบขณะอบด้วย ลมร้อนได้ และสามารถลดพลังงานสิ้นเปลืองลงด้วยการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟเมื่อความหนาไม้ มากขึ้นเช่นกัน หรือการสลับทั้งสองระบบเป็นช่วงๆในการทดลองครั้งต่อไป เพื่อเป็นทางเลือกใน การประยุกต์ใช้พลังงานของทั้งสองระบบร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 5

สภาวะที่เหมาะสมต่อการอบไม้ยางพาราโดยวิธีผสมผสานคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

5.1 บทนำ

การอบไม้ยางพาราด้วยลมร้อนหรือการอบด้วยไอน้ำ เป็นการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อไม้ แต่แตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เกิดจากความชื้นภายในเนื้อไม้ซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้ว เรียงตัวภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้า เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำที่สั่นสะเทือนกับโมเลกุลอื่นๆ ภายในเนื้อไม้ ทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อไม้ แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับไม้ที่ได้รับจากคลื่นไมโครเวฟนั้น ยังมีลักษณะตรงกับกรให้ความร้อนไม้ด้วยวิธีอื่นๆ คือ ความร้อนภายในชิ้นไม้จะต้องสูงกว่าที่ผิว เพื่อความร้อนจะถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอกไม้ ในขณะที่ไม้ที่ไม่ได้รับความร้อนด้วยวิธีใดๆไป จะมีอุณหภูมิที่ผิวภายนอกสูงกว่าที่ผิวภายในเนื้อไม้ จึงจะถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในเนื้อไม้ได้ สำหรับลักษณะการแห้งของเนื้อไม้จะแห้งจากพื้นผิวของไม้สู่เนื้อไม้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้นคือ การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในสู่ผิวภายนอกของเนื้อไม้ และการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปจากผิวภายนอกของเนื้อไม้ ความชื้นที่เคลื่อนออกไปจากผิวไม้อย่างช้าๆ โดยเฉพาะแก่นไม้จะมีการเคลื่อนที่ของความชื้นช้ากว่าในส่วนกระพี้ไม้ ดังนั้นอากาศที่มีการหมุนเวียนเร็วเพียงพอ จะสามารถระเหยน้ำจากผิวเนื้อไม้ได้เร็วเท่ากับน้ำที่เคลื่อนที่เข้ามาอยู่บริเวณผิวของเนื้อไม้ ซึ่งจะทำให้ไม้แห้งเร็วขึ้น แต่ถ้ามีการหมุนเวียนอากาศเร็วมากก็จะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานจนเกินไป ในขณะที่การหมุนเวียนของอากาศช้ามาก ต้องใช้เวลายาวนานขึ้นในการให้ผิวหรือกระพี้มีความชื้นที่สมดุลกับอากาศรอบชิ้นไม้ [13] ดังนั้นผลการทดลองใช้คลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวอบแห้งไม้ในบทที่ 4 จะเกิดความชื้นสัมพัทธ์สะสมภายในตู้อบได้ง่าย เนื่องจากไม่มีระบบหมุนเวียนอากาศ จึงส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยน้ำลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีอบแห้งแบบการผสมผสานระบบคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน โดยไม่ใช้ทั้งสองพร้อมกันแต่จะมีการสลับกันไปตามลำดับ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดระยะเวลาและลดความสิ้นเปลืองพลังงานขณะอบแห้ง รวมถึงเพิ่มกระจายอุณหภูมิในเนื้อไม้ยางพาราอย่างสม่ำเสมอ ลดปริมาณหยดน้ำสะสมภายในตู้อบ และคงสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดีของไม้พาราหลังการอบแห้งไว้ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบอัตราแห้งสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา ด้วยสมการถดถอยแบบเชิง

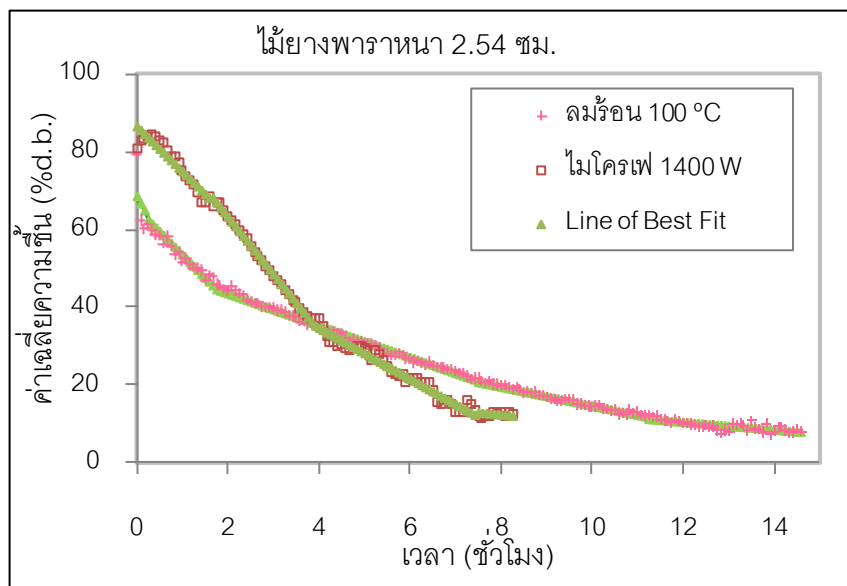
เส้นในบทที่ 4 ของระบบลมร้อนหรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ในการอบไม้ยางพาราที่ความหนาต่างกัน วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อลดระยะเวลาในการอบลงและความชื้นภายในไม้ยางพาราเหลือระดับความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 15 มาตรฐานแห่ง สร้างทางเลือกในการเพิ่มอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ด้วยระบบคลื่นไมโครเวฟ และเร่งการระบายความชื้นบริเวณผิวไม้และลดอากาศชื้นภายในเตาอบขณะอบแห้งด้วยลมร้อน โดยจะศึกษาปัจจัยด้านอัตราแห้ง อุณหภูมิภายในเนื้อไม้และภายในเตาอบ ความชื้นสัมพัทธ์ การวัดสีที่ผิวภายนอกและภายในเนื้อไม้ยางพารา รวมถึงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในด้านสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้หลังการอบด้วยการผสมผสานทั้งสองระบบ ร่วมกันกับการอบแบบทั่วไปในปัจจุบัน

5.2 วิธีดำเนินการทดลอง

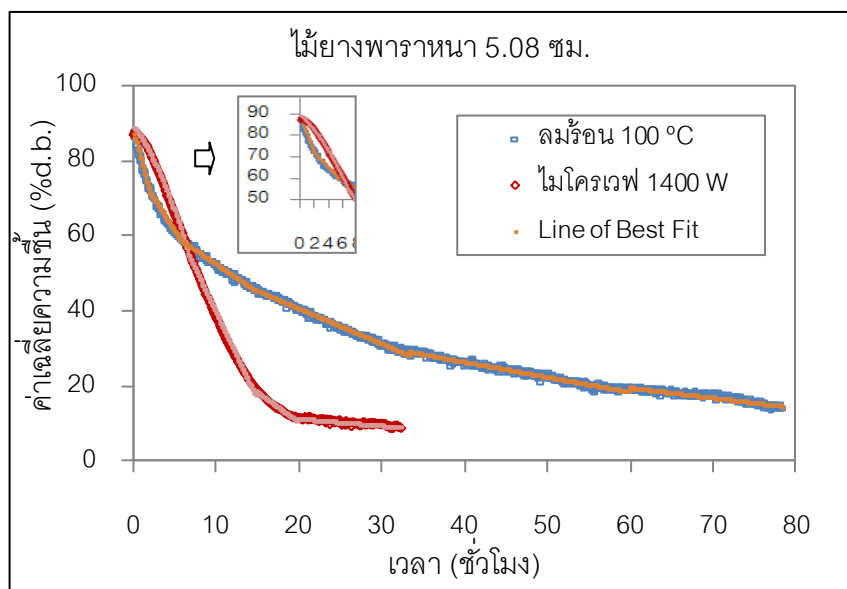
ไม้ยางพาราที่ใช้ทดลองมีขนาด กว้าง 7.62 ซม. หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ยาว 117 ซม. จะถูกนำมาให้ความร้อนแบบผสมผสานด้วยไมโครเวฟ (1400 วัตต์) และลมร้อน (100 °C) ตามสถานะอัตราแห้งสูงสุดจากสมการถดถอยแบบเชิงเส้นที่มีค่า R^2 มากที่สุด ของแต่ละระบบในแต่ละช่วงเวลา (ดังรูปที่ 5-1) กรณีลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศคงที่เท่ากับ 1.75 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้การนำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยทั่วไปมี 3 แบบ [39] คือ (1) Preheating เป็นการให้พลังงานไมโครเวฟตั้งแต่เริ่มการทดลอง ภายในเนื้อวัสดุจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการระเหย จึงทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนความชื้นสู่ผิวด้านนอก จนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ (2) Pulse drying จะทำการเสริมพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่เครื่องอบแห้ง เมื่ออัตราการอบแห้งถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากบริเวณผิวไม้แห้งแต่ความชื้นภายในเนื้อไม้ยังสูง เมื่อใส่พลังงานไมโครเวฟความชื้นภายในจะทำให้เกิดแรงดันไอขับเคลื่อนความชื้นออกสู่ผิววัสดุ (3) Finish drying เป็นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในช่วงท้ายการทดลอง เพื่อลดปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุและหลีกเลี่ยงการอบแห้งที่นานเกินไป ดังนั้นอัตราแห้งสูงสุดในแต่ละช่วงเวลาที่ได้จากสมการถดถอยแบบเชิงเส้น จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับงานวิจัยข้างต้น สามารถกำหนดสถานะทดลองของการอบแห้งไม้ได้ 6 เงื่อนไข ในแต่ละความหนาไม้ (ดังรูปที่ 5-2) และทดลองซ้ำๆ ละ 3 ครั้ง ในแต่ละเงื่อนไข ดังนี้

สถานะที่ 1 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟแบบ Preheating drying จะใช้จุดหมาดไม้ที่มีความชื้นในไม้ที่มีค่าระหว่าง 25% ถึง 30% เป็นตัวกำหนดระยะเวลาอบ เนื่องจากจุดดังกล่าวมีความสำคัญต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไม้ ดังนั้นการให้ความร้อน

แก้มั้หนา 2.54 ซม. ภายใต้เงื่อนไข M6:H6 เป็นการให้คลื่นไมโครเวฟภายใน 6 ชั่วโมงแรก ตามช่วงจุดหมาดของไม้ แล้วตามด้วยลมร้อนใน 6 ชั่วโมงถัดมา เช่นเดียวกับเงื่อนไข M12:H ของไม้หนา 5.08 ซม. เป็นการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องภายใน 12 ชั่วโมงแรก ตามช่วงจุดหมาดของไม้เช่นกัน เพื่อก่อให้เกิดความร้อนจนถึงใจกลางของไม้มากที่สุด หลังจากนั้นจะใช้ลมร้อนระบายความร้อนภายในเนื้อไม้และลดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

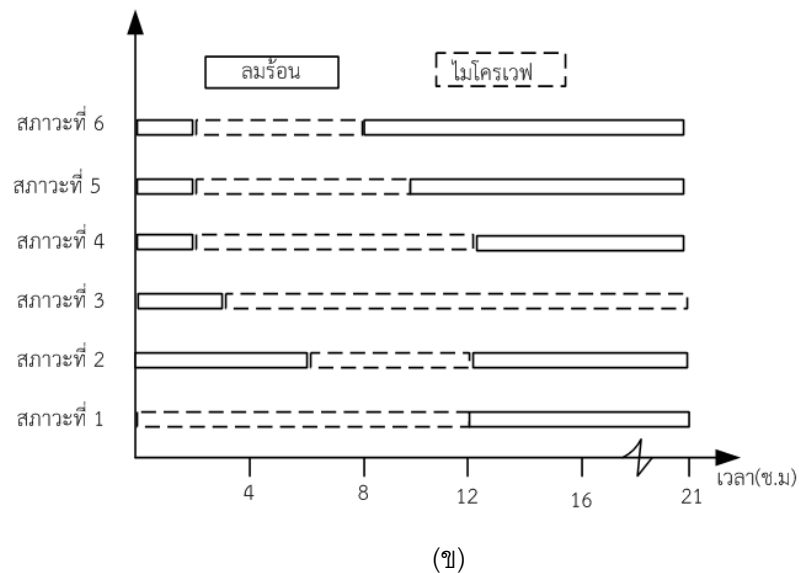
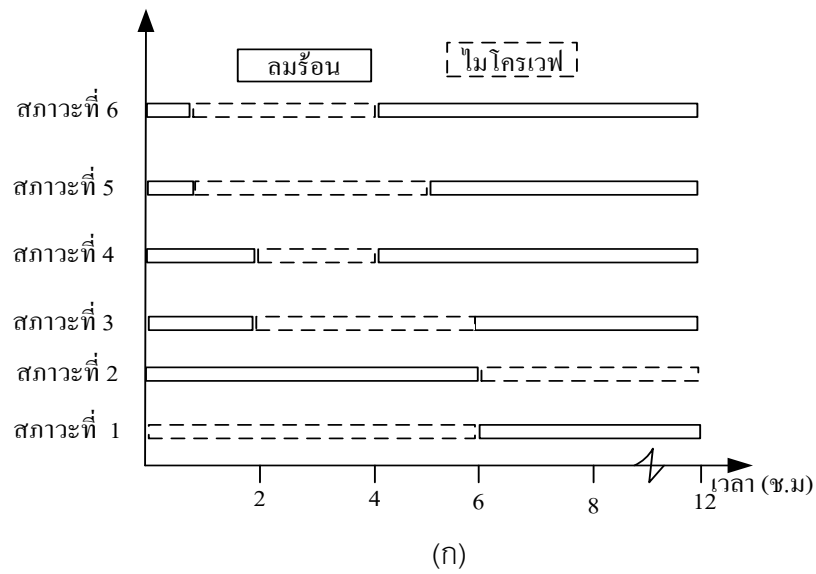


(ก)



(ข)

รูปที่ 5-1 ระดับความชื้นที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลา (ก) ไม้หนา 2.54 และ (ข) ไม้หนา 5.08 ซม.



รูปที่ 5-2 การให้ความร้อนแบบผสมผสานคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน (ก) ไม้ยางพาราหนา 2.54 ซม. และ (ข) ไม้ยางพาราหนา 5.08 ซม.

สถานะที่ 2 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Finish drying ใช้จุดหมาดตัวกำหนดระยะเวลาอบเช่นเดียวกับการอบแบบ Preheating drying ด้วยเงื่อนไข H6:M6 ของไม้หนา 2.54 ซม. ในขณะที่ไม้หนา 5.08 ซม. จะใช้ลมร้อนตามสถานะอัตราแห้งที่สูงกว่าไมโครเวฟ 3 ชั่วโมงแรกเท่านั้น หลังจากนั้นไมโครเวฟจะนำมาใช้อบแห้งในช่วงหลัง ตามเงื่อนไข H3:M12 เพื่อช่วยลดปัญหาการอบแห้งที่ใช้เวลานานในช่วงท้ายของการอบแห้งด้วยลมร้อน

สภาวะที่ 3, 4, 5 และ 6 การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Pulse drying เป็นการกำหนดช่วงให้พลังงานไมโครเวฟสลับกับลมร้อนตามสภาวะอัตราแห้งสูงสุดของแต่ละแหล่ง ความร้อนในแต่ละช่วงเวลา และคำนึงถึงการประหยัดพลังงานมากที่สุด เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แต่ละชั่วโมงของไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนเกือบ 5 เท่า ดังนั้นการเลือกใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟ น้อยที่สุดย่อมส่งผลต่อการลดพลังงานมากที่สุด ผลการเปรียบเทียบสองระบบ พบว่า อัตราแห้งของไม้ขณะอบด้วยลมร้อนสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟภายใน 1-2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นแนวโน้มอัตราแห้งของคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนใน 2 ชั่วโมงถัดมา ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ในช่วง 2-4 ชั่วโมง เพื่อระดับความชื้นที่ลดลงต่ำกว่า 20 (%d.b, dry basis) และเมื่อค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ขณะอบเริ่มคงที่หรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าไมโครเวฟทะลุผ่านขึ้นไม้และเกิดความร้อนสม่ำเสมอทั่วเนื้อไม้ หลังจากนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนเป็นลมร้อน เพื่อนำหนักไม้ลดลงและคงที่อย่างรวดเร็ว สามารถกำหนดกรอบของไม้หนา 2.54 ซม. ได้ 4 เงื่อนไข คือ H1:M3:H, H1:M4:H, H2:M4:H และ H2:M2:H สำหรับอัตราแห้งของการอบไม้หนา 5.08 ซม. พบว่า ลมร้อนสูงกว่าคลื่นไมโครเวฟภายใน 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นแนวโน้มอัตราแห้งของคลื่นไมโครเวฟสูงกว่าลมร้อนใน 2 ชั่วโมงถัดมา และเมื่อเปรียบเทียบแบบ Preheating drying (M12:H) กับ Pulse drying (H6: M6:H) สามารถกำหนดระยะเวลาอบในการให้คลื่นไมโครเวฟน้อยสุด 6 ชั่วโมง ในการลดระดับความชื้นต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ได้ จึงเลือกใช้ระบบไมโครเวฟแทนการใช้ลมร้อน ภายในระยะเวลา 6, 8 และ 10 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 12 ชั่วโมง (เนื่องจากเงื่อนไข Preheating drying เป็นการให้ไมโครเวฟอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และไม่ควรเพิ่มจำนวนชั่วโมงการให้คลื่นไมโครเวฟเพราะส่งผลต่อพลังงานที่เพิ่มขึ้น) แล้วตามด้วยลมร้อนจนน้ำหนักไม้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สามารถกำหนดเงื่อนไข H2:M6:H, H2:M8:H, H6:M6:H และ H2:M10:H โดยลมร้อนจะถูกนำมาใช้ในการระบายความชื้นบริเวณผิวไม้และลดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเป็นหลัก หลังจากนั้นคลื่นไมโครเวฟจะถูกนำมาใช้ เพื่อสะสมของความร้อนภายในเนื้อไม้จนถึงใจกลางของไม้ แล้วเพิ่มอัตราการระเหยน้ำออกจากไม้และลดความชื้นสัมพัทธ์สะสมภายในตู้อบด้วยลมร้อนในลำดับถัดมาจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่

5.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การให้ความร้อนแบบผสมผสานด้วยไมโครเวฟและลมร้อนของไม้ยางพารา สามารถเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลใน 3 ประเด็นหลักของแต่ละเงื่อนไข คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบ พลังงานที่ใช้ในการอบ และคุณภาพของไม้หลังการอบ ดังนี้

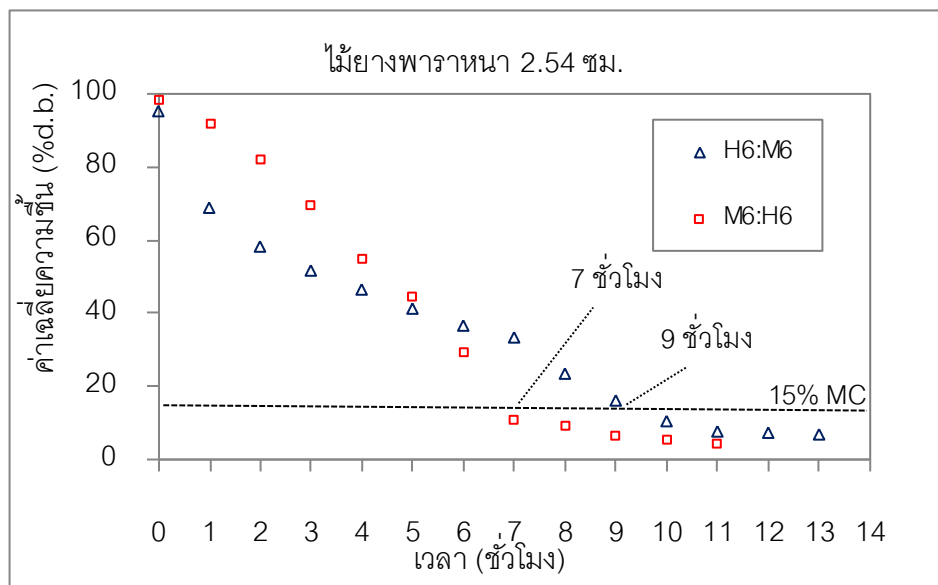
5.3.1 ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม.

5.3.1.1 ระยะเวลาที่ใช้และพลังงานที่ใช้ในการอบของไม้หนา 2.54 ซม.

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ แบบ Preheating drying ภายใต้เงื่อนไข M6:H6 สามารถลดระดับความชื้นเริ่มต้นประมาณ 98.34 %d.b. จนกระทั่งเหลือระดับความชื้นภายในเนื้อไม้ประมาณ 4 %d.b. ระยะเวลาในการอบแห้ง 7 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 5-3) ซึ่งใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยกว่าลมร้อน 100 °C (12 ชั่วโมง) หรือไมโครเวฟ 1400 วัตต์ (8 ชั่วโมง) เพียงอย่างเดียว คิดเป็น 14 และ 71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยการให้พลังงานไมโครเวฟกับไม้ที่มีความชื้นสูงยังคงสมบัติทางกายภาพที่ดีและไม่เกิดไหม้เกรียมภายในเนื้อไม้หลังอบแห้ง สำหรับการให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องในช่วงแรก พลังงานไมโครเวฟจะเป็นตัวทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วภายในเนื้อไม้ที่มีความชื้นสูง เกิดความดันไอของความชื้นเคลื่อนที่ออกมาจากแกนไม้สู่อากาศภายนอก ความชื้นของไม้ค่อยๆ ลดลง โดยความชื้นที่เคลื่อนออกมาสู่อากาศภายนอกจะถูกอุณหภูมิบรรยากาศพัดพา ทำให้การระเหยความชื้นออกจากห้องอบแห้งค่อนข้างต่ำและมีปริมาณหยดน้ำเล็กๆ กระจายภายในตู้ค่อนข้างมาก แต่เกิดการสะสมความร้อนภายในเนื้อไม้มากขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งค่อยๆ สูงขึ้น (ดังรูปที่ 5-4) ดังนั้นหลังจากปรับเปลี่ยนระบบเป็นลมร้อน สามารถถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิผิวสูงกว่าภายในเนื้อไม้ ความชื้นที่ผิวไม้บางพาราจะได้รับความร้อนเกิดความแตกต่างของความดันไอกว้างภายในและภายนอกเซลล์เนื้อไม้ และระเหยออกมาตามความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้

ในขณะที่การอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ แบบ Finish drying ภายใต้เงื่อนไข H6:M6 พบว่า ช่วงแรกปริมาณความชื้นและน้ำอิสระในเนื้อไม้สูง ทำให้ช่วงแรกของอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิผิวที่เพิ่มขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 5-4) อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและลดระดับลงมา เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในสู่อากาศภายนอกเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการระเหยความชื้นที่ผิว ปริมาณความชื้นและน้ำอิสระที่ลดลงตามระยะเวลาในการอบแห้ง การใช้คลื่นไมโครเวฟอบแห้งในลำดับต่อมาเกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นเกิดความดันไอของความชื้นจากภายในเนื้อไม้ไปยังอุณหภูมิอากาศโดยรอบและเพิ่มอัตราการอบแห้งมากขึ้น สามารถลดระดับความชื้นเริ่มต้นประมาณ 95 %d.b. จนกระทั่งเหลือระดับความชื้นภายในเนื้อไม้ประมาณ 7 %d.b. ระยะเวลาในการอบแห้งประมาณ 9 ชั่วโมง (ดังแสดงในรูปที่ 5-3) การอบแบบ Finish drying จะต้องใช้ระยะเวลาอบมากกว่าแบบ Preheating drying ประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศช่วงแรกต่ำกว่าแบบ Preheating และมีค่าอัตราการระเหยของน้ำออกจากไม้มากกว่าก็ตาม เมื่อ

เปรียบเทียบกับกรอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (100 °C) หรือไมโครเวฟ (1400 วัตต์) เพียงอย่างเดียว ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น คิดเป็น 33 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

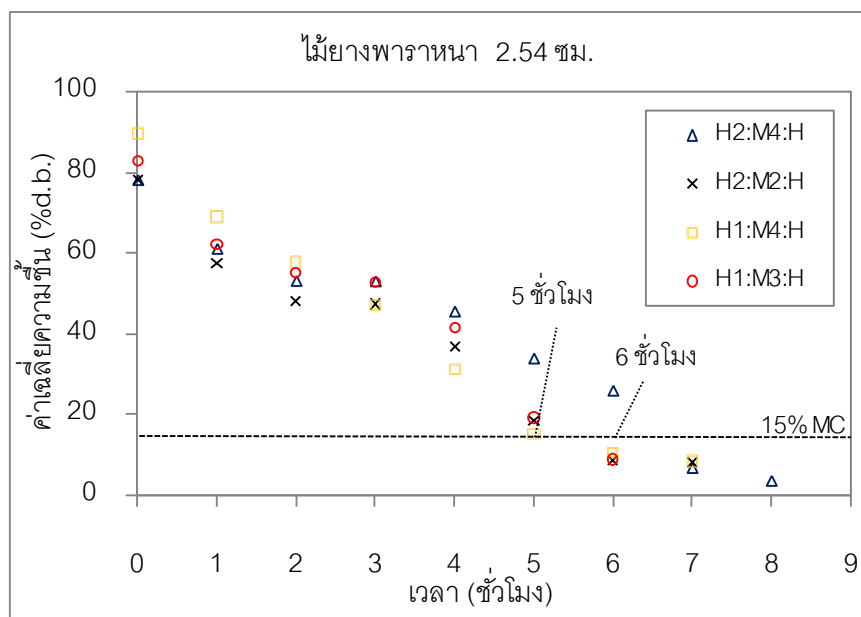


รูปที่ 5-3 ค่าเฉลี่ยระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 2.54 ซม. ของลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Preheating drying (M6:H6) และ แบบ Finish drying (H6:M6)

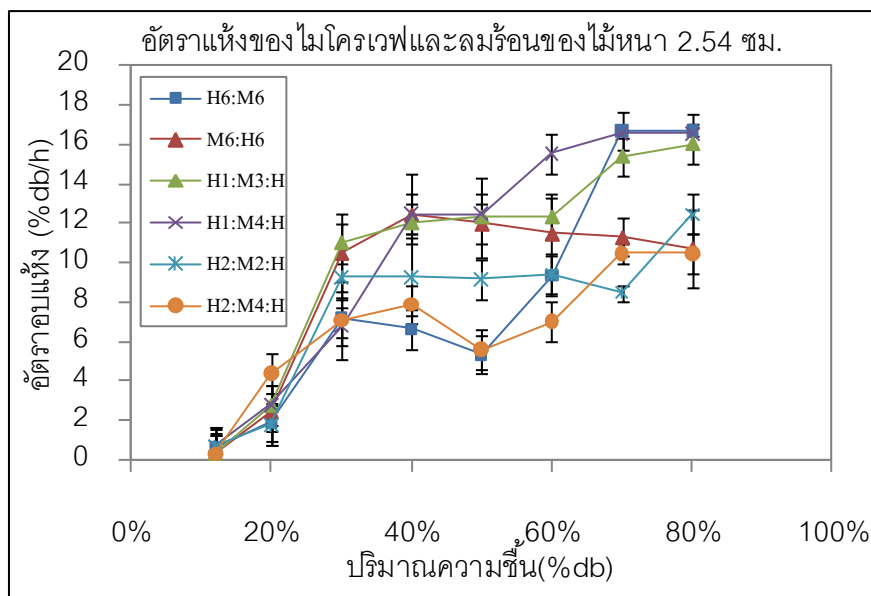
ผลจากการทดลองด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Pulse drying ของไม้หนา 2.54 ซม. พบว่า ระยะเวลาอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขไม่แตกต่างกัน โดยเงื่อนไข H1:M4:H ใช้ระยะเวลาในการอบ 5 ชั่วโมง ในขณะที่เงื่อนไขอบแห้งแบบ H1:M3:H, H2:M4:H และ H2:M2:H ใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากัน 6 ชั่วโมง ในระดับความชื้นเริ่มต้นประมาณ 78-90 %d.b. จนเหลือระดับความชื้นภายในเนื้อไม้ประมาณ 6-8 %d.b. (ดังแสดงในรูปที่ 5-4) การอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนในช่วงเริ่มต้นมีอัตราการอบแห้งสูงสุดตามปริมาณความชื้นที่ผิวด้านนอกของไม้ระเหยออกก่อน หลังจากนั้นค่อยๆ ลดลงตามการหดตัว เมื่อสูญเสียความชื้นที่ผิวและเกิดความต้านทานในการระเหยความชื้นออกจากไม้ ส่งผลให้การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขึ้นตอนถัดมา อุณหภูมิในช่วงแรกภายในเนื้อไม้จึงไม่สูงมากนัก มีการถ่ายเทความร้อนออกจากเนื้อไม้แบบอัตราการอบแห้งคงที่ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากด้านในสู่ผิวด้านนอกเกิดขึ้นช้ากว่าอัตราการระเหยความชื้นที่ผิว แต่เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง เกิดความร้อนสะสมภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิค่อยๆ สูงขึ้นตามปริมาณน้ำที่อยู่ภายในเซลล์ของเนื้อไม้ หลังจากนั้นเกิดความแตกต่างของความดันไอภายในและภายนอกเซลล์ จึงมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำจากภายในไม้ไปยังอุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ ก่อให้เกิดการระเหยของความชื้นออกจากเนื้อไม้อย่างต่อเนื่องส่งผลให้อัตราการอบแห้ง

ลดลง และเมื่อความร้อนถึงกลางแกนไม้ การใช้ลมร้อนระบายความร้อนภายในไม้ จะทำให้ระดับความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ (ดังแสดงในรูปที่ 5-5) สำหรับระดับความชื้นที่ลดลงแต่ละเงื่อนไขของการอบแห้งไมโครเวฟอย่างเดียวหรือลมร้อนอย่างเดียว แบบ Preheating (M6:H6) แบบ Finish drying (H6:M6) และแบบ Pulse drying มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดังตารางที่ 5-1)

สำหรับอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วง (Pulse drying) ของเงื่อนไข H1:M4:H, H1:M3:H, H2:M2:H และ H2:M4:H มีค่า 11.89, 11.6, 8.54 และ 7.56 %db/h ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งแบบ Preheating (M6:H6) และแบบ Finish drying (H6:M6) มีค่า 10.13 และ 9.12 ตามลำดับ โดยการอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วงของเงื่อนไข H1:M3:H และ H1:M4:H มีค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยใกล้เคียงกันและสูงกว่าเงื่อนไขอื่นๆ อย่างไรก็ตามอัตราการอบแห้งเฉลี่ยแต่ละเงื่อนไขสูงกว่าการอบด้วยลมร้อน 100 °C หรือไมโครเวฟ 1400 วัตต์ เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5-4 การเปรียบเทียบระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 2.54 ซม. ของลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วง (Pulse drying: H1:M3:H, H1:M4:H, H2:M4:H และ H2:M2:H)



รูปที่ 5-5 อัตราการแห้งของไม้ที่ความหนา 2.54 ซม. ในแต่ละเงื่อนไขทุกๆ 3 ชั่วโมง

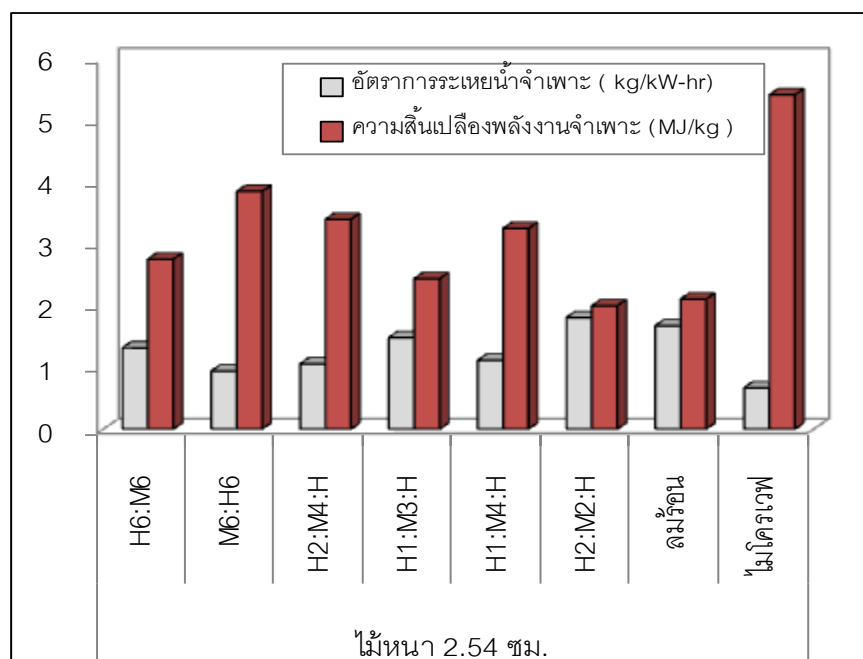
ตารางที่ 5-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระดับความชื้นที่ลดลงแต่ละเงื่อนไขของการผสมผสานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน คลื่นไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียวของไม้หนา 2.54 ซม.

ความแปรปรวน	df	Sum of Squares	Mean Square	F	P- value
ระหว่างเงื่อนไข	7	24500	3500	6.92*	0.000
ภายในเงื่อนไข	1400	708388	506		
รวม	1400	708388			

* แสดงค่าความสัมพัทธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากรูปที่ 5-6 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 2.54 ซม. มีค่าแตกต่างกัน โดยการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Finish drying (H6:M6) และแบบ Pulse drying (H1:M3:H, H1:M4:H, H2:M4:H และ H2:M2:H) จะมีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงกว่าแบบ Preheating (M6:H6) และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (1400 วัตต์) เพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงภายใต้เงื่อนไข H2:M2:H มีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงสุดและใช้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด รองลงมา คือ เงื่อนไข H1:M3:H และ H1:M4:H ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงของคลื่นไมโครเวฟมากกว่าลมร้อนเกือบ 2

เท่า ดังนั้นจำนวนชั่วโมงที่เพิ่มขึ้นในการอบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟแต่ละเงื่อนไข จะส่งผลต่อค่าคำนวณของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่ลดลงและใช้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าลมร้อน

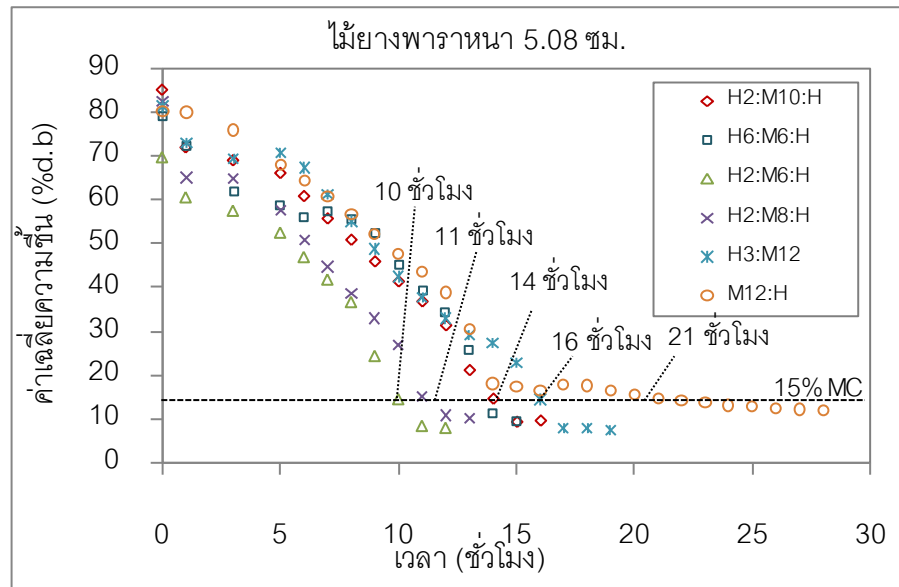


รูปที่ 5-6 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแต่ละแหล่งความร้อน

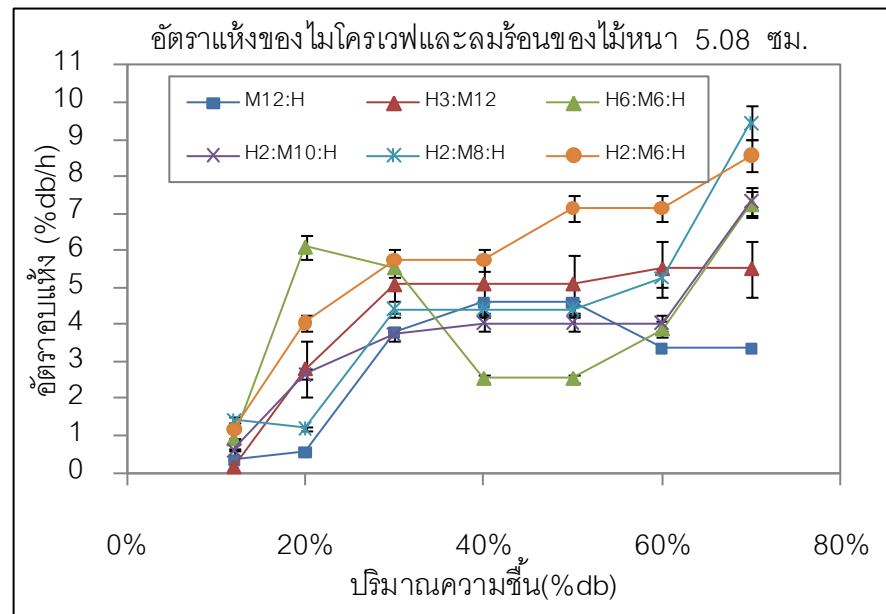
5.3.1.2 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้อบไม้ยางพาราหนา 5.08 ซม.

การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟของไม้หนา 5.08 ซม. ภายใต้เงื่อนไข Preheating (M12:H) เงื่อนไข Finish drying (H3:M12) และเงื่อนไข Pulse drying (H2:M8:H, H6:M6:H, H2:M10:H) พบว่า ผลจากการทดลองอบไม้ยางพาราแบบช่วง (Pulse drying) ใช้ระยะเวลาในการอบน้อยที่สุด เพื่อลดระดับความชื้นระหว่าง 86-70 %d.b. จนเหลือระดับความชื้น 5-10 %d.b. (ดังแสดงในรูปที่ 5-7)

การอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Preheating drying (M12:H) สามารถลดระดับความชื้นระหว่าง 80 %d.b. จนเหลือระดับความชื้น 10 %d.b. ภายในระยะเวลาอบแห้ง 21 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง คิดเป็น 3.3 เท่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว แต่จะเพิ่มขึ้น 0.82 เท่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว โดยการให้พลังงานไมโครเวฟในช่วงแรกก่อให้เกิดอุณหภูมิของไม้ไม่สูงมาก ทำให้อัตราการอบแห้งต่ำกว่าลมร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 5-8) แต่เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณความร้อนสะสมขึ้นภายในเนื้อไม้ เกิดความดันไอน้ำจากภายในไม้ขับความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอก



รูปที่ 5-7 กราฟแสดงระดับความชื้นที่ลดลงของไม้หนา 5.08 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 5-8 การเปรียบเทียบอัตราการแห้งของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข

ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การระบายความชื้นด้วยอุณหภูมิบรรยากาศ ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่สูงขึ้น ทำให้การถ่ายเทความชื้นจากเนื้อไม้สู่อากาศได้น้อย และเมื่อทำการอบแห้งต่อด้วยลมร้อนจะต้องใช้ระยะเวลาอบแห้งมากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามเงื่อนไขนี้สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และไม่พบการไหม้เกรียมภายในเนื้อไม้หลังอบแห้งไม้ที่มีความชื้นสูง ด้วยพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ

สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบ Finish drying (H3:M12) และ Pulse drying (H2:M8:H, H6:M6:H, H2:M10:H) พบว่า เงื่อนไข H2:M6:H ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยที่สุด 10 ชั่วโมง คิดเป็น 7 และ 1.7 เท่า ในการลดระยะเวลาอบแห้งลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ในขณะที่เงื่อนไข H2:M8:H, H6:M6:H, H2:M10:H และ H3:M12 ใช้ระยะเวลาในการอบ 11, 14, 14 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ สามารถลดระดับความชื้นระหว่าง 85-70 %d.b. จนเหลือระดับความชื้น 5-10 %d.b. (ดังแสดงในรูปที่ 5-7) การอบไม้ที่มีความชื้นสูงในช่วงแรกด้วยอุณหภูมิลมร้อนจะมีอัตราการอบแห้งสูงตามความร้อนที่ถ่ายเทไปที่ผิวไม้ ปริมาณความชื้นและความร้อนที่คงอยู่บริเวณผิวไม้หลังอบแห้งด้วยลมร้อน เกิดการนำความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ภายในเนื้อไม้มากขึ้น เมื่อทำการอบแห้งต่อด้วยไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิสะสมเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแกนกลางเนื้อไม้ อุณหภูมิของแกนไม้ที่สูงกว่าผิวไม้ส่งผลให้ความร้อนค่อยๆกระจายสู่ผิวไม้ เกิดการเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำออกจากไม้ หลังจากนั้นการใช้ อุณหภูมิของลมร้อนสามารถช่วยเพิ่มแรงในการขับไล่ความชื้นให้ระเหยออกจากเนื้อไม้มากขึ้น อัตราการอบแห้งลดลงตามระดับความชื้นไม้ที่ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ สำหรับระดับความชื้นที่ลดลงแบบ Preheating drying แบบ Finish drying และแบบ Pulse drying พบว่า แต่ละเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับอบด้วยไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว (ดังตารางที่ 5-2)

การใช้ลมร้อนอบแห้งส่งผลต่อการระเหยของน้ำออกจากเนื้อไม้ย่างพาราไปยังผิวหน้าไม้ได้ง่ายในระยะเวลาสั้นๆ แต่การใช้ลมร้อนอบแห้งนานเกินไปส่งผลต่ออัตราอบแห้งลดลง เพราะชั้นผิวที่หดตัวเนื่องจากความชื้นที่ผิวไม้ย่างพาราจะได้รับความร้อนและระเหยออกมาก่อน ดังนั้นการให้คลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องกับไม้ที่มีความชื้นสูงส่งผลต่ออุณหภูมิภายในเนื้อไม้ที่สูงขึ้นจนกระทั่งเกิดความร้อนถึงแกนกลางไม้ หลังจากนั้นการใช้ลมร้อนระบายความร้อนในเนื้อไม้และความชื้นภายในตู้อบ จะส่งผลดีต่อระดับความชื้นในเนื้อไม้ลดลงเร็วกว่าการใช้ไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ต่ำกว่า ดังผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ย

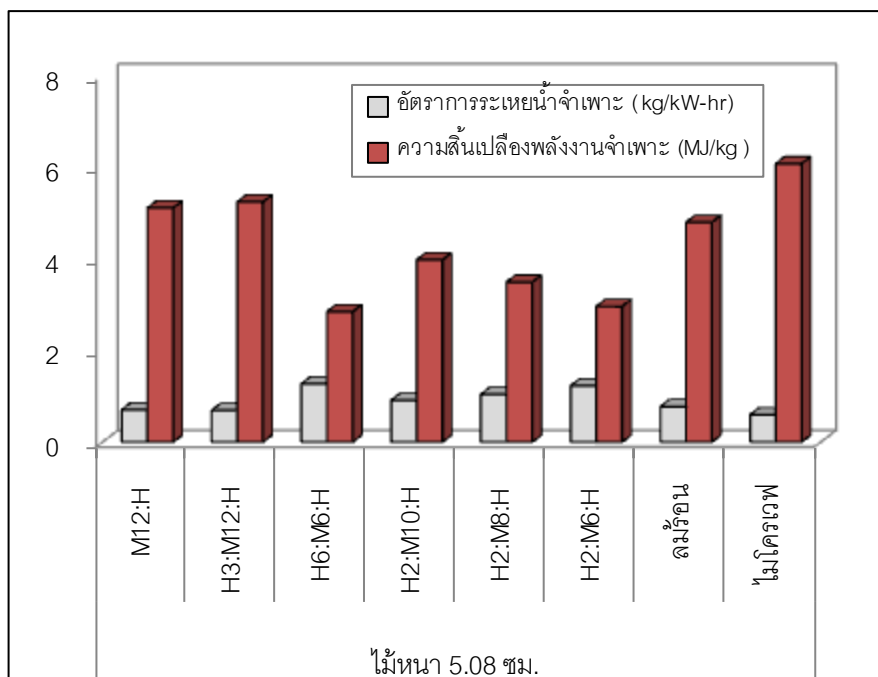
ตารางที่ 5-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระดับความชื้นที่ลดลงแต่ละเงื่อนไข ของการผสมผสาน ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน คลื่นไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว ของไม้หนา 5.08 ซม.

ความแปรปรวน	df	Sum of Squares	Mean Square	F	P- value
ระหว่างเงื่อนไข	7	198162	28309	96.92*	0.000
ภายในเงื่อนไข	7504	2206990	294		
รวม	7511	2405152			

* แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

ของลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วง (Pulse drying) ของเงื่อนไข H2:M6:H มีอัตราอบแห้งสูงสุดที่ 5.91 %db/h รองลงมา คือ เงื่อนไข H2:M8:H, H6:M6:H, H3:M12, H2:M10:H และ M12:H มีค่า 4.89, 4.64, 4.4, 4.12 และ 3.37 %db/h ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 5-8) ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนหรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว และการใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (Preheating drying) และช่วงท้าย (Finish drying)

เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (ดังแสดงในรูป 5-9) จะเห็นว่า ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (Preheating drying) และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวต่ำกว่าการอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (Pulse drying) และการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง (Pulse drying) ภายใต้เงื่อนไข H2:M6:H ใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด และมีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงสุด คิดเป็น 1.6 1.7 และ 2.1 เท่า ของการอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (Preheating drying) และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ ทำให้ประหยัดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากที่สุด ซึ่งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเพราะสัดส่วนปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงของไมโครเวฟลดลง



รูปที่ 5-9 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำจำเพาะและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละแหล่งความร้อนของไม้ที่ความหนา 5.08 ซม.

5.3.1.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ผลการทดลองอบแห้งไม้หนา 2.54 ซม. โดยใช้คลื่นไมโครเวฟและลมร้อนสลับกันตามลำดับในช่วงเวลาต่างกัน ส่งผลต่อการลดอัตราแห้งของแต่ละเงื่อนไขต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าเงื่อนไขอื่นๆ เมื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างอบแห้งด้วยแบบจำลองเอมพิริคัลทั้ง 5 แบบจำลองพบว่า สมการอบแห้งตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic ตามสมการที่ (5-1) สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่าแบบจำลองอื่นๆ อยู่ในช่วง 0.80-0.99 (ดังสมการที่ 5-2 ถึง 5-4) และมีความผิดพลาดในการทำนายค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์น้อยที่สุด โดยมีค่า χ^2 อยู่ในช่วง 0.000372-0.00271 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.01818-0.054347 (ภาคผนวก ก-3)

$$\text{Logarithmic Model: } MR = a \exp(-k.t) + c \quad (5-1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นเป็น % มาตรฐานแห้ง (d.b.)
 t คือ เวลาในการอบแห้ง เป็นนาที (min)
 a, c และ k คือ ค่าคงที่ในสมการของ Logarithmic ซึ่งเป็นฟังก์ชันของลมร้อนและไมโครเวฟภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H

จะได้ $1 \geq MR \leq 0.8$:

$$MR = 0.906640 \exp(-0.324457t) + 0.107704 \quad (5-2) \quad R^2 = 0.94071$$

$0.79 \geq MR \leq 0.15$:

$$MR = 3.744762 \exp(-0.057415t) + 2.69607 \quad (5-3) \quad R^2 = 0.99306$$

$0.14 \geq MR \leq 0.9$:

$$MR = 1.075565 \exp(-0.439188t) + 0.021180 \quad (5-4) \quad R^2 = 0.80110$$

นอกจากนี้ผลการทดลองอบแห้งไม้หนา 5.08 ซม. ที่ใช้ระยะเวลาอบน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไข H2:M6:H จะถูกนำมาทำนายอัตราส่วนความชื้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในการหาค่าคงตัวสมการพบว่า แบบจำลองของ Diffusion Approximation ตามสมการที่ (5-5) สอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งไม้ด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนสลับกันตามลำดับเป็นอย่างดี โดยมีค่า R^2 มากที่สุด อยู่ในช่วง 0.97- 0.99 (ดังสมการที่ 5-6 ถึง 5-8) และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่า χ^2 อยู่ในช่วง 0.000117-0.02121 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.00968-0.13942 (ภาคผนวก ก-4)

$$\text{Diffusion Approximation Model : } MR = a \exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t) \quad (5-5)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นเป็น % มาตรฐานแห้ง (d.b.)
 t คือ เวลาในการอบแห้ง เป็นนาที (min)
 a, b และ k คือค่าคงที่ในสมการของ Diffusion Approximation ซึ่งเป็นฟังก์ชันของลมร้อนและไมโครเวฟภายใต้เงื่อนไข H2:M6:H

จะได้ $1 \geq MR \leq 0.8$:

$$MR = 0.999975 \exp(-0.158150t) + (1-0.999975) \exp(-0.158150 \times 23.9664t) \quad (5-6) \quad R^2 = 0.99353$$

$0.79 \geq MR \leq 0.4$:

$$MR = -1.80618 \exp(-0.275733t) + (1+1.80618) \exp(-0.275733 \times 0.676483t) \quad (5-7) \quad R^2 = 0.98715$$

$$0.39 \geq MR \leq 0.11 :$$

$$MR = -23.4589 \exp(-1.902302t) + (1+23.4589)$$

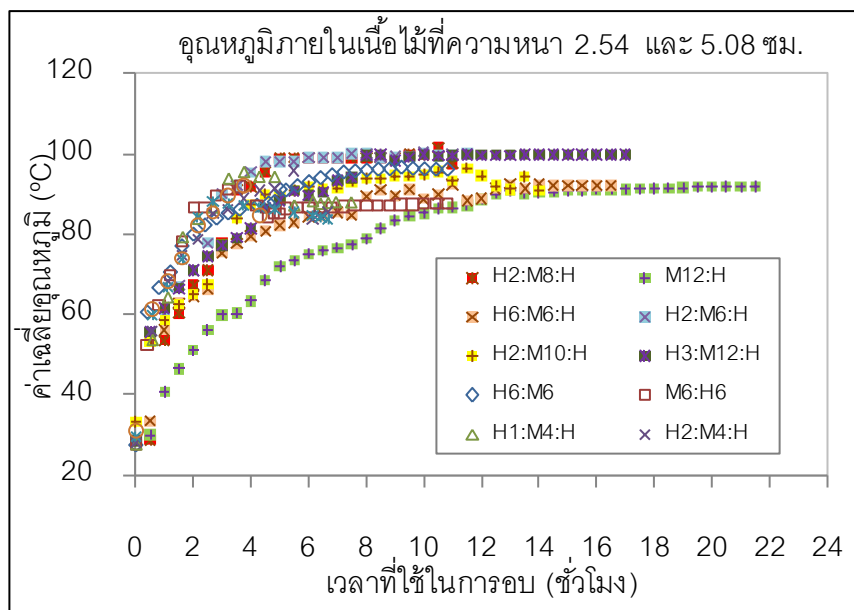
$$\exp(-1.902302 \times 0.262698t) \quad (5-8) \quad R^2 = 0.96937$$

จากการทดลองอบไม้ด้วยอุณหภูมิร้อน 100 °C สลับกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ 1400 วัตต์ ภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H และ H2:M6:H ที่ความหนาไม้ 2.54 และ 5.08 ซม. ตามลำดับ สามารถนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ และเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการการทดลองจริง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ได้แก่ Page, Henderson&Pabis, Logarithmic, Two term exponential และ Diffusion Approximation สำหรับรูปแบบของสมการที่สามารถทำนายการลดลงของความชื้นได้ดีที่สุดของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. คือ Logarithmic และ Diffusion Approximation ตามลำดับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

5.3.1.5 อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ยางพารา

สำหรับการเปรียบเทียบอุณหภูมิอบแห้งในทุกๆเงื่อนไขอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 27-104 °C ภายใต้สภาวะการทดลองที่ความหนาไม้ต่างกัน พบว่า ในช่วงแรกการอบแห้งด้วยลมร้อนส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอุณหภูมิภายในเนื้อของไม้หนา 2.54 ซม. เกิดขึ้นเร็วกว่าไม้ที่ความหนา 5.08 ซม. หลังจากนั้นการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในแต่ละเงื่อนไขจนถึงแกนกลางไม้ที่ความหนาต่างกัน เกิดอุณหภูมิภายในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ 5.08 ซม. สูงกว่าไม้หนา 2.54 ซม. ไม่เกิน 10 °C ที่ระยะเวลาเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 5-10) อย่างไรก็ตามระดับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ในแต่ละเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกเงื่อนไข ($P < 0.05$) ยกเว้นการอบแห้งไม้ด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วงภายใต้ในเงื่อนไข H2:M2:H กับ H2:M4:H ของไม้หนา 2.54 ซม. และเงื่อนไข H3:M12 กับทุกเงื่อนไขทดลอง ของไม้หนา 5.08 ซม. ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ยางพารา

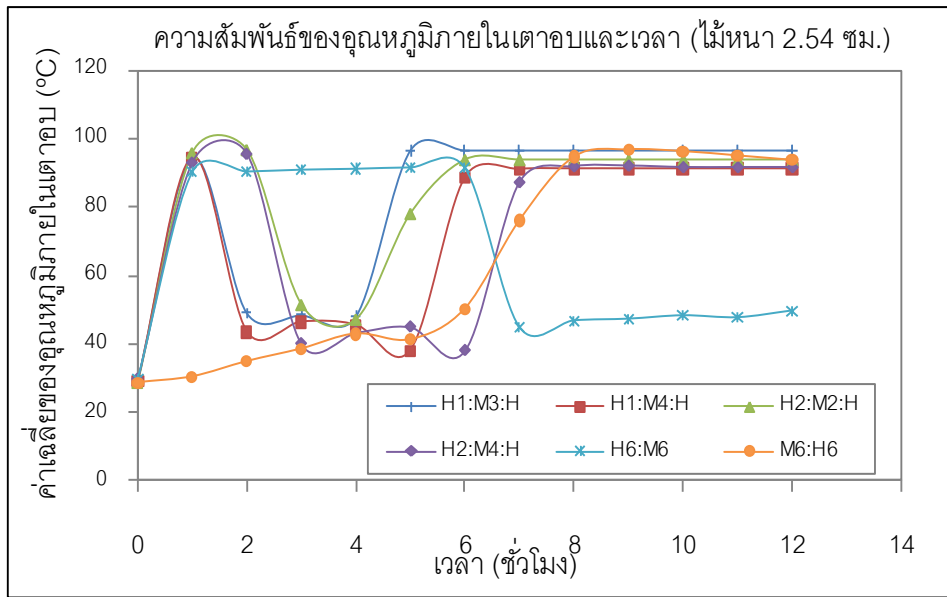
เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยเฉพาะอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิที่สูงขึ้นขณะอบแห้งส่งผลต่อค่าปริมาณการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่ำทุกแหล่งพลังงานความร้อน



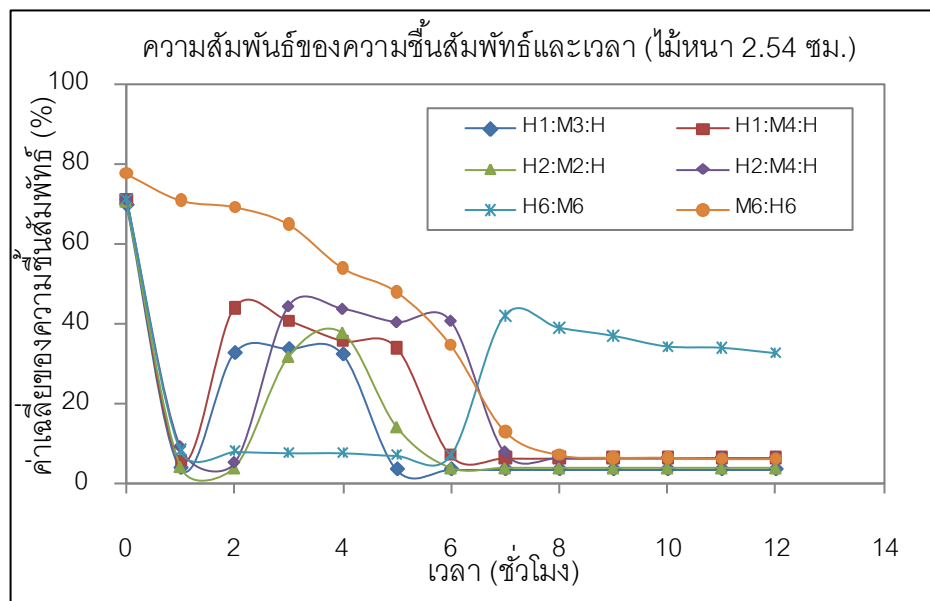
รูปที่ 5-10 อุณหภูมิภายในเนื้อไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้ง

5.3.1.6 อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์

ผลการทดลองของการอบแห้งไม้ด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน พบว่า อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ขณะอบไม้หนา 2.54 ซม. ด้วยไมโครเวฟตามระยะเวลาอบที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วงระหว่าง 29-52 °C และ 31-43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าของอุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 90-97 °C และ 3-9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 5-11 และ 5-12) โดยกลไกในการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนที่ต่างกัน ส่งผลให้การอบไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟในช่วงที่มีความชื้นภายในเนื้อไม้สูง พบว่า อุณหภูมิภายในเตาอบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์สูงโดยรอบในช่วงแรกค่อยๆ ลดลง เกิดการระเหยของความชื้นภายในเนื้อไม้อย่างช้าๆ แตกต่างกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิภายในเตาอบสูงตั้งแต่เริ่มต้น เกิดการหมุนเวียนอากาศภายในเตาอบ ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำ ทำให้การระเหยของความชื้นที่ผิวไม้ในช่วงแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเตาอบทุกเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ยกเว้นเงื่อนไข M6:H6 ที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเงื่อนไข H1:M3:H และ H2:M2:H ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ภายในอากาศแต่ละเงื่อนไขไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ระหว่างเงื่อนไข H1:M3:H, H1:M4:H, H2:M4:H กับ เงื่อนไข H2:M2:H รวมถึงเงื่อนไข H1:M4:H กับ H1:M3:H อย่างไรก็ตาม



รูปที่ 5-11 อุณหภูมิภายในเตาอบของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 2.54 ซม.



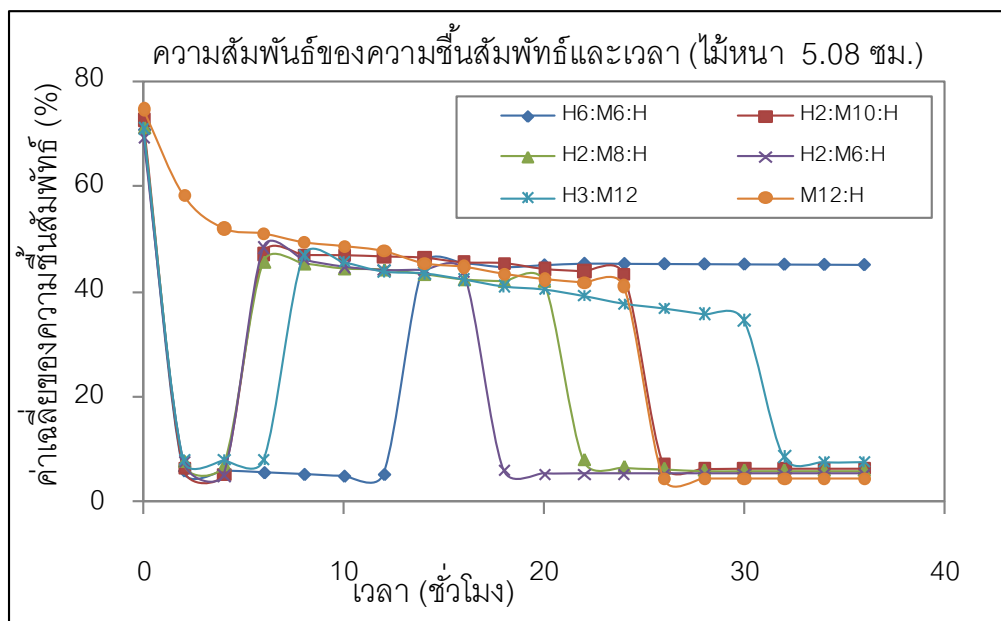
รูปที่ 5-12 ความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา หนา 2.54 ซม.

อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์แต่ละเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับการอบไม้ด้วยลมร้อน ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) หรือไมโครเวฟ (1400 วัตต์) เพียงอย่างเดียว

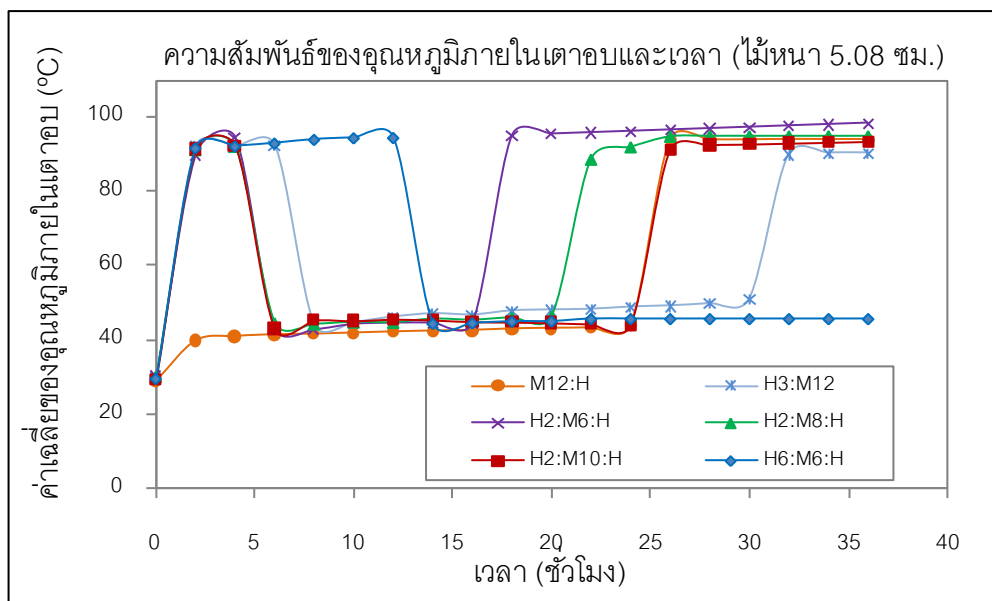
ผลจากการทดลองในการอบแห้งไม้แต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 5.08 ซม. พบว่า อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศของไมโครเวฟอยู่ในช่วงระหว่าง $40\text{-}51\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 37-

73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าของอุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน อยู่ในช่วงระหว่าง 93-99 °C และ 5-9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 5-13 และ 5-14) พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเตาอบทุกเงื่อนไขไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นเงื่อนไข H2:M6:H ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเงื่อนไข M12:H, H3:M12:H, H2:M10:H และ H2:M8:H รวมถึงเงื่อนไข H2:M8:H กับเงื่อนไข M12:H นอกจากนี้ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาในแต่เงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับการอบไม้ด้วยลมร้อน (100 °C) หรือไมโครเวฟ (1400 วัตต์) เพียงอย่างเดียว ยกเว้นเงื่อนไข M12:H และ H6:M6:H กับไมโครเวฟ (1400 วัตต์) ที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอุณหภูมิภายในเตาอบ และเงื่อนไข H3:M12:H, H2:M10:H, H2:M8:H และ H2:M6:H กับไมโครเวฟ (1400 วัตต์) ที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความชื้นสัมพัทธ์ภายในเตาอบ

ดังนั้นการให้ความร้อนเบื้องต้นด้วยอุณหภูมิลมร้อนแก๊สที่มีความชื้นสูง เพื่อการเพิ่มความร้อนแก่ผิวไม้และลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในอากาศภายในระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง กับการให้ปริมาณความร้อนที่อบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้น ส่งผลต่อการระเหยน้ำออกจากไม้ไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าช่วงการให้ความร้อนขณะเริ่มอบแห้งอัตราการระเหยน้ำออกไม้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในเตาอบหรือความชื้นสัมพัทธ์ภายในอากาศเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่สูงขึ้นภายในเนื้อไม้ในการลดความชื้นภายในเนื้อไม้ด้วย



รูปที่ 5-13 ความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 5.08 ซม.



รูปที่ 5-14 อุณหภูมิภายในเตาอบของแต่ละเงื่อนไขขณะอบแห้งของไม้หนา 5.08 ซม.

5.3.1.7 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอบ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้

ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการลดระดับความชื้นภายในเนื้อไม้ ได้แก่ ความชื้นของไม้ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งความสัมพันธ์ภายใต้ปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อกลไกการให้ความร้อนขณะอบแห้งไม้ต่างกัน ในการวัดความสัมพันธ์ว่าปัจจัยคู่ใดมีความสัมพันธ์กันจริงหรือไม่ มากน้อยเพียงใด โดยเฉพาะการอบแห้งไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ของเงื่อนไข H1:M4:H และ H2:M6:H ตามลำดับ (แสดงในตารางที่ 5-3 และ 5-4) ใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) ดังนี้

จากตารางที่ 5-3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson Product Correlation Coefficient พบว่า อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิภายในเตาอบไม้ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป (หนา 2.54 ซม.) ขณะอบแห้งด้วยการผสมผสานลมร้อนและไมโครเวฟ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ 0.05 โดยค่าความสัมพันธ์ Pearson correlation (r) พบว่า น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับสูงกับความชื้นสัมพัทธ์ ($r = 0.720$) และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับสูงกับอุณหภูมิในเตาอบ และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงมากกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.700$ และ -0.905 ตามลำดับ) ในขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามสูงมากและระดับสูง

กับอุณหภูมิในเตาอบและอุณหภูมิในเนื้อไม้ ($r = -0.943$ และ -0.700 ตามลำดับ) รวมถึงอุณหภูมิในเตาอบมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับปานกลางกับอุณหภูมิในเนื้อไม้ ($r = 0.658$)

ตารางที่ 5-3 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง (หน้า 2.54 ซม.) ด้วยเงื่อนไข H1:M4:H

		น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	ค่าความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิในเตาอบ	อุณหภูมิในเนื้อไม้
น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	Pearson Correlation	1.00	0.720*	-0.693*	-0.905*
	Sig. (2-tailed)	.	0.013	0.018	0.000
	N	15	15	15	15
ค่าความชื้นสัมพัทธ์	Pearson Correlation	0.720*	1.00	-0.943*	-0.700*
	Sig. (2-tailed)	0.013	.	0.018	0.018
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิภายในเตาอบ	Pearson Correlation	-0.693*	-0.905*	1.00	0.658*
	Sig. (2-tailed)	0.018	0.000	.	0.028
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิภายในเนื้อไม้	Pearson Correlation	-0.905*	-0.694*	0.658**	1.00
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.018	0.028	.
	N	15	15	15	15

หมายเหตุ N คือ จำนวนที่เก็บข้อมูล

* แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

จากตารางที่ 5-4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson Product Correlation Coefficient พบว่า อุณหภูมิภายในเนื้อไม้และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป (หน้า 5.08 ซม.) ขณะอบแห้งด้วยการผสมผสานลมร้อนและไม่โครเวฟ มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ 0.05 ในขณะที่อุณหภูมิภายในเตาอบไม้ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป (หน้า 2.54 ซม.) ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับ 0.05 โดยการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ Pearson correlation (r) พบว่า น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไป มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันระดับต่ำกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ ($r = 0.422$) และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกัน

ข้ามระดับต่ำกับอุณหภูมิภายในเตาอบไม้ และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับสูงมากกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (-0.379 และ $r = -0.946$ ตามลำดับ) ในขณะที่ค่าความสัมพันธ์มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามระดับสูงมากและต่ำกับอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = -0.987$ และ -0.404 ตามลำดับ) รวมถึงอุณหภูมิภายในเตาอบมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันในระดับต่ำกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ($r = 0.322$)

ตารางที่ 5-4 การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง (หนา 5.08 ซม.) ด้วยเงื่อนไข H2:M6:H

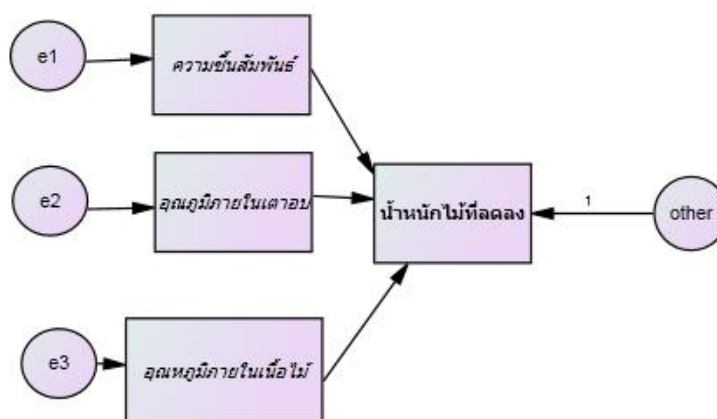
		น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	ค่าความชื้นสัมพัทธ์	อุณหภูมิในเตาอบ	อุณหภูมิในเนื้อไม้
น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลง	Pearson Correlation	1.00	0.422	-0.379	-0.946*
	Sig. (2-tailed)	.	0.172	0.244	0.000
	N	15	15	15	15
ค่าความชื้นสัมพัทธ์	Pearson Correlation	0.422	1.00	-0.987*	-0.404
	Sig. (2-tailed)	0.172	.	0.000	0.193
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิภายในเตาอบ	Pearson Correlation	-0.379	-0.987*	1.00	0.322
	Sig. (2-tailed)	0.244	0.000	.	0.308
	N	15	15	15	15
อุณหภูมิภายในเนื้อไม้	Pearson Correlation	-0.946*	-0.404	0.322	1.00
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.193	0.308	.
	N	15	15	15	15

หมายเหตุ N คือ จำนวนที่เก็บข้อมูล

* แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

จากการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาอบและอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ความชื้นสัมพัทธ์ และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม้ที่ความหนาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในเนื้อไม้เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการลดน้ำหนักไม้ โดยเฉพาะค่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าความหนาของไม้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การผสมผสานของลมร้อนและไม่โครเวฟร่วมกันสามารถหมุนเวียนอากาศภายในเตาอบได้ดีขึ้น ช่วยลดความชื้น

สัมพัทธ์ของอากาศลงเมื่อเทียบการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ทำให้ไม่สามารถดูความชื้นกลับเข้าไปอีก ภายใต้ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ระยะเวลาอบในแต่ละเงื่อนไขลดเมื่อเทียบกับการอบไม่ด้วยคลื่นไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5-15 แบบจำลองสมการโครงสร้างตั้งต้น

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เชื่อมโยงกันขณะอบด้วยการผสมผสานลมร้อน 100 °C และคลื่นไมโครเวฟ 1400 W สามารถประมาณความเหมาะสมตามเทคนิคแบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) (ดังสมการ 5-15) ของแบบจำลองด้วยวิธี Maximum likelihood estimation (MLE) ซึ่งสามารถเขียนค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของลมร้อน (ดังสมการ 5-9) หรือไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว (ดังสมการ 5-10) ดังนี้

ที่ความหนาไม้ 2.54 ซม. ภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H

$$Y = 20.627 X_1 + 9.083 X_2 + 19.588 X_3 \quad (5-9) \quad R^2 = 0.958$$

ที่ความหนาไม้ 5.04 ซม. ภายใต้เงื่อนไข H2:M6:H

$$Y = -1.785 X_1 - 1.518 X_2 - 1.071 X_3 \quad (5-10) \quad R^2 = 0.995$$

สมการดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องของตัวแปรระหว่าง 4 ตัวแปร ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (X_1) อุณหภูมิภายในเตาอบ (X_2) และอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (X_3) ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม้ (Y) ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น

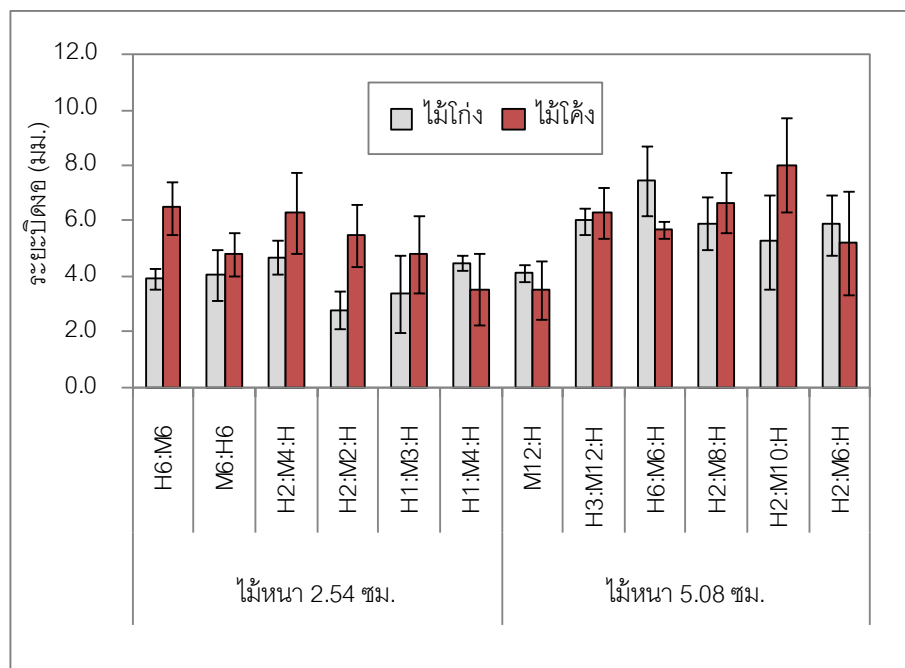
5.3.2 คุณภาพไม้หลังการอบ

5.3.2.1 การบิดตัวของไม้

ไม้ยางพาราภายหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนและไมโครเวฟในแต่ละเงื่อนไขการบิดตัวของไม้มากขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองพบว่า ไม้ยางพารามีลักษณะโค้ง (bow) และโค้ง (spring) แต่ไม่พบการบิดงอ (twist) และการแตกภายในเนื้อไม้ เมื่อนำมาวัดค่าความโค้งอยู่ระหว่าง 3.5-8.0 มิลลิเมตร ต่อความยาวไม้ 1.1 เมตร และมีการโก่งระหว่าง 2.8-7.4 มิลลิเมตรต่อความยาวไม้ 1.1 เมตร (ดังแสดงในรูปที่ 5-16 และ 5-17) ซึ่งค่าที่วัดได้ดังกล่าวผ่านเกณฑ์คุณภาพของไม้แปรรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับลักษณะไม้ที่มีตำหนิต้องโก่งสูงจากพื้นเกิน 9 มิลลิเมตรและโค้งงอสูงกว่าระดับพื้นเกิน 22 มิลลิเมตร สำหรับไม้หนา 2.54 ซม. พบว่า เงื่อนไข H2:M2:H เกิดการโก่งน้อยที่สุด และเงื่อนไข H1:M4:H เกิดการโค้งของไม้ น้อยกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ ในขณะที่ไม้หนา 5.08 ซม. พบว่า เงื่อนไข M12:H เกิดการโก่งและโค้งน้อยกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ อย่างไรก็ตามระยะบิดงอของไม้โก่งและโค้งหลังอบแห้งทุกเงื่อนไขไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นระยะการโค้งของไม้หนา 5.08 ซม. ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ในแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 5-16 ลักษณะไม้หลังอบแห้งตามความหนาหรือสันของไม้



รูปที่ 5-17 การบิดงอของไม้ยางพาราแปรรูป (หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อความยาวไม้ 1.1 เมตร)

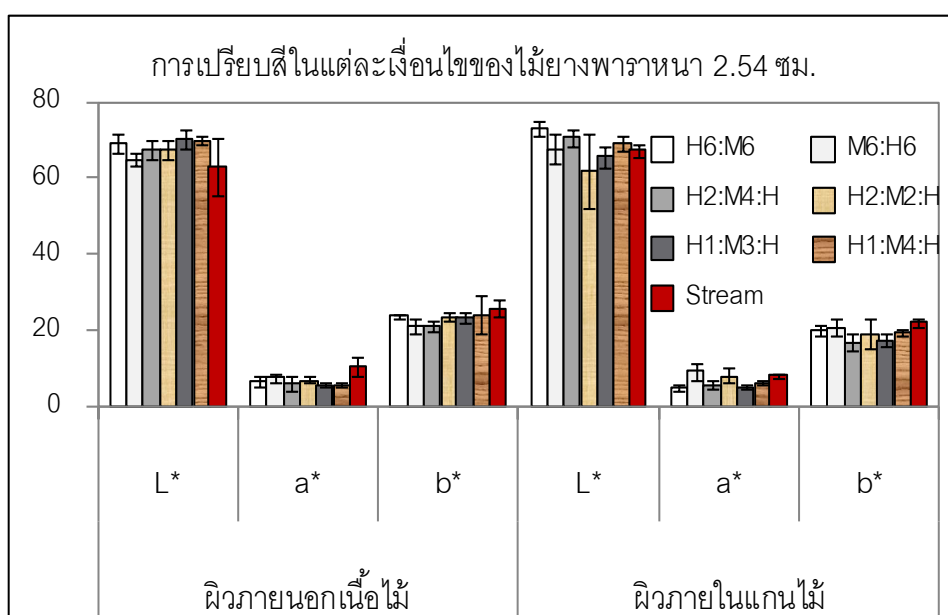
5.3.2.2 สีของไม้

การเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้ยางพาราหลังอบแห้งด้วยไอน้ำแบบเกรด A จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับไม้ยางพาราที่ผ่านการอบในแต่ละเงื่อนไข (ดังแสดงในรูปที่ 5-18) โดยการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หนา 2.54 ซม. หลังการอบด้วยไอน้ำ M6:H6 ($\Delta E = 3.24$) มีค่าน้อยกว่าไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ($\Delta E = 3.56$) และเงื่อนไขอื่น ๆ ($\Delta E = 4.77-7.61$) สำหรับค่าความสว่าง (L^* -value) ของแต่ละเงื่อนไข ไม้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ยกเว้นเงื่อนไข H6:M6 H1:M4:H และ H1:M3:H ซึ่งให้ค่าความสว่างบริเวณผิวไม้เพิ่มขึ้น และเงื่อนไข H2:M2:H ที่ให้ค่าความสว่างลดลงบริเวณแกนกลางไม้ ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (positive a^* -value) ของแต่ละเงื่อนไขกับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้ ($p < 0.05$) ซึ่งให้ค่าความเป็นสีแดงลดลง ยกเว้นเงื่อนไข M6:H6 และ M2:H2:H ที่มีค่าความเป็นสีแดงบริเวณแกนกลางของไม้ใกล้เคียงกับการอบไม้ด้วยไอน้ำ สำหรับค่าความเป็นสีเหลือง (positive b^* -value) ในแต่ละเงื่อนไข มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของพื้นผิวและแกนกลางของไม้กับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ซึ่งมีค่าสีเหลืองต่ำกว่าไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ยกเว้นเงื่อนไข H1:M4:H ที่มีค่าสีเหลืองในพื้นที่ผิวของไม้ใกล้เคียงกันกับ

ไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ สำหรับเงื่อนไข M6:H6 และ M2:H2:H ที่มีค่าสีเหลืองในแกนกลางของไม้ต่ำกว่า ไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำเล็กน้อย (ดังแสดงในรูปที่ 5-19)



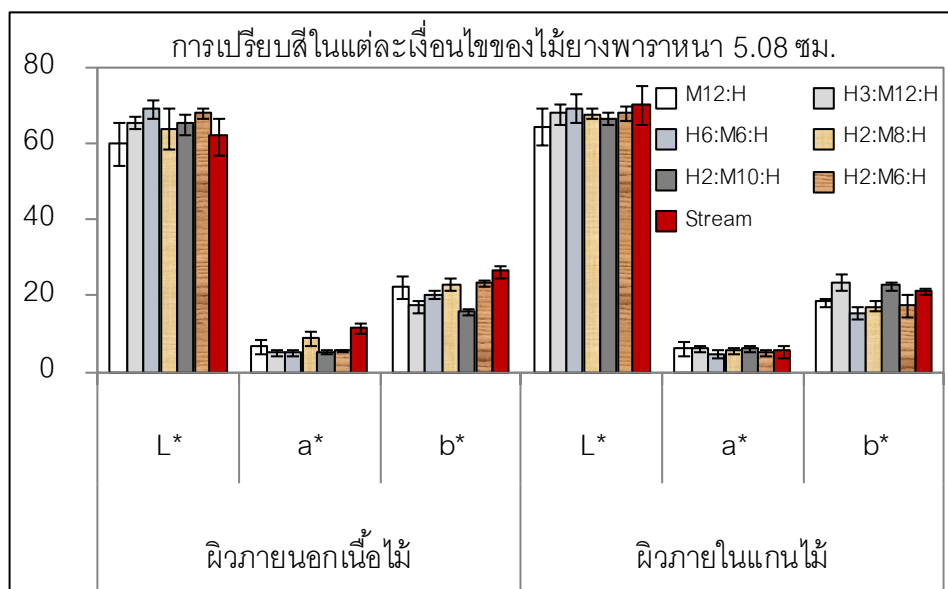
รูปที่ 5-18 ลักษณะสีของไม้หลังอบแห้งแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 5-19 ค่าสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หลังอบแห้ง (หนา 2.54 ซม.) ในแต่ละเงื่อนไข

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หนา 5.08 ซม. (ดังแสดงในรูปที่ 5-20) หลังการอบด้วยเงื่อนไข H6:M6:H ($\Delta E = 4.842$) มีค่าน้อยกว่าไม้ที่อบแห้งด้วย

ไอน้ำ ($\Delta E = 11.715$) และเงื่อนไขอื่นๆ ($\Delta E = 6.09-7.15$) เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L^* -value) ในแต่ละเงื่อนไข ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ของพื้นผิวและแกนกลางของไม้กับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ยกเว้นเงื่อนไข H2:M10:H และ H2:M6:H ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความสว่างที่เพิ่มขึ้นในบริเวณแกนกลางของไม้ยางพารา ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (positive a^* -value) ของแต่ละเงื่อนไข ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้กับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ยกเว้นเงื่อนไข H6:M6, H2:M10:H, M12:H, H2:M6:H และ H3:M12:H ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเป็นสีแดง บริเวณผิวของไม้ยางพารา ซึ่งให้ค่าสีแดงลดลงเกือบ 2 เท่า เมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ สำหรับค่าความเป็นสีเหลือง (positive b^* -value) ในแต่ละเงื่อนไข ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ของพื้นผิวไม้กับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ ยกเว้นเงื่อนไข H6:M6, H2:M10:H และ H3:M12:H ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลืองของแกนกลางของไม้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในทุกเงื่อนไข ซึ่งมีค่าสีเหลืองต่ำกว่าไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำ

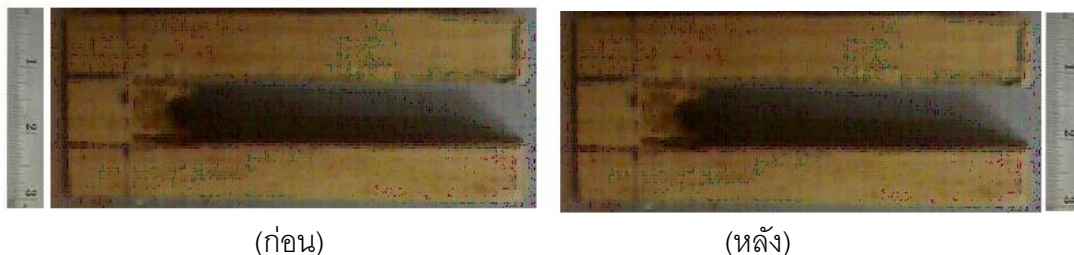


รูปที่ 5-20 สีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้หลังอบแห้ง (หนา 5.08 ซม.) ในแต่ละเงื่อนไข

5.3.2.3 ความเค้นในไม้

จากผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขของการอบไม้หน้ากว้าง 2.54 และ 5.08 ซม. พบว่า ไม้หลังอบแห้งไม่ต้องผ่านกรรมวิธีขจัดความเค้นก่อน เนื่องจากลักษณะไม้หลังการอบที่ผ่านการทดสอบที่ล้อมมีลักษณะค่อนข้างตรง แสดงว่าในเนื้อไม้มีความเค้นน้อยมาก ไม่มีลักษณะของการแข็ง

นอก ดังรูปที่ 5-21 แสดงตัวอย่างไม้ที่มีความหนาไม่เกิน 3.81 ซม. ตัดออกเป็น 3 ซี เท่าๆกัน แล้วเคาะเอาซีตรงกลางออก



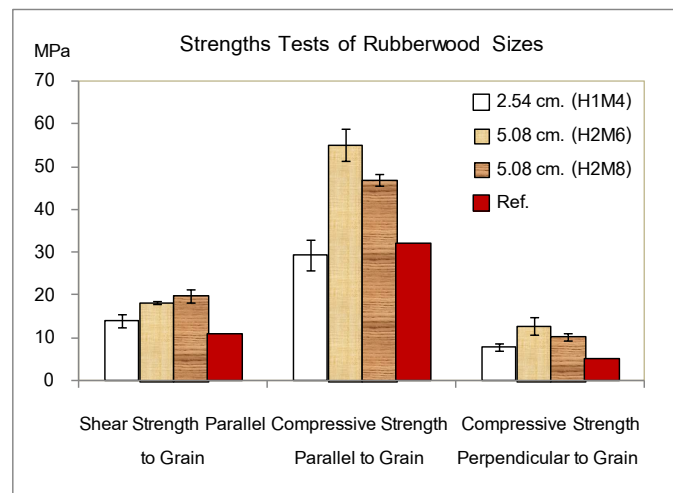
รูปที่ 5-21 การทดสอบซีล้อมหลังการอบของไม้ยางพาราหนา 2.54 ซม.

5.3.2.4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของไม้ยางพาราหลังการอบแห้ง

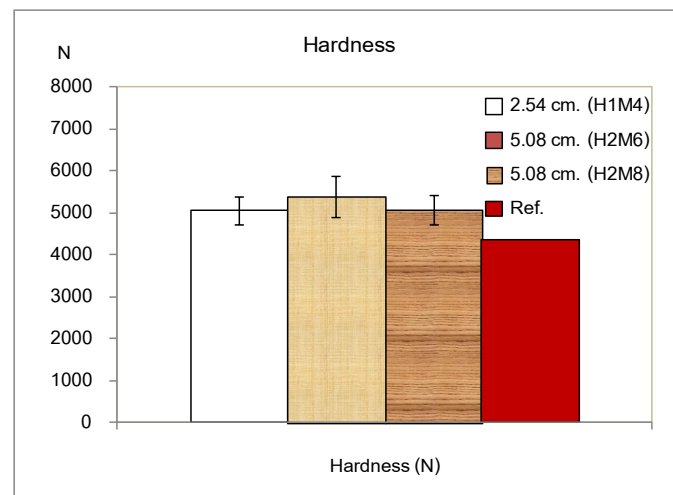
สมบัติเชิงกลจะบ่งบอกถึงความสามารถของไม้ยางพาราที่จะรับหรือทนทานต่อแรงกระทำในรูปแบบต่างๆ กัน การทดสอบแรงดัดเป็นการหาค่าแรงดัดของทดสอบในการรับแรงของชิ้นไม้จนกระทั่งชิ้นไม้ที่ทดสอบแตกหัก โดยความสามารถในการต้านทานการโก่งสูงแสดงถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (Modulus of elasticity หรือ MOE) สำหรับค่าโมดูลัสแตกหัก (Modulus of rupture หรือ MOR) ของไม้ตัวอย่างหลังการอบแห้ง แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการแตกหักหรือความแข็งแรง (Strength) เป็นต้น สำหรับไม้ที่มีความหนา 2.54 ซม. ผ่านการอบแห้งของเงื่อนไข H1:M4:H และไม้ที่มีความหนา 5.08 ซม. ผ่านการอบแห้งของเงื่อนไข H2:M6:H และ H2:M8:H ที่มีอัตราแห้งสูงและใช้ระยะเวลาในการอบน้อยกว่าเงื่อนไขอื่นๆ จะถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อเปรียบเทียบกับไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำของโรงงานเฟอร์นิเจอร์ในปัจจุบัน จากผลทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MOE) ในรูปที่ 5-22 พบว่า ไม้หลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไข H2:M6:H มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสแตกหัก (MOR) มากที่สุด รองลงมา คือ เงื่อนไข H2:M8:H และ H1:M4:H ตามลำดับ โดยทั้งสามเงื่อนไขมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าโมดูลัสแตกหักสูงกว่าค่าอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าไม้หลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวมีความยืดหยุ่นที่ดีและสามารถต้านทานการแตกหักได้

ในขณะที่ผลจากการทดสอบค่าความเค้นเฉือนขนานเส้น (Shear Strength Parallel to Grain) ของเงื่อนไข H2:M8:H มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ เงื่อนไข H2:M6:H และ H1:M4:H ตามลำดับ โดยทั้งสามเงื่อนไขมีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง จึงมีความต้านทานต่อแรงที่ทำให้เกิดการแยกออกจากกันของไม้ได้ สำหรับผลการทดสอบค่าความเค้นอัดขนานเส้น (Compressive Strength Parallel to Grain) ค่าความเค้นอัดในแนวตั้งฉากเส้น (Compressive Strength Perpendicular

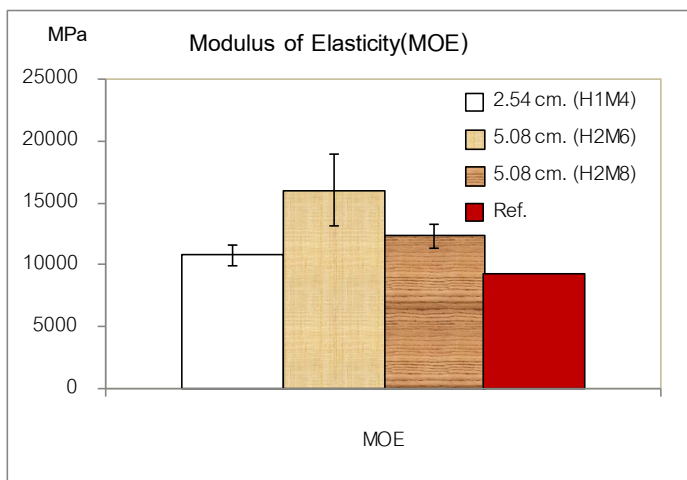
to Grain) และค่าความแข็งแรง (Hardness) พบว่า ไม้เนื้อแข็ง H2:M6:H มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ ไม้เนื้อแข็ง H2:M8:H และ H1:M4:H ตามลำดับ โดยทั้งสามไม้เนื้อแข็งมีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง ดังนั้นไม้ยางพาราหลังการอบแห้งด้วยไม้เนื้อแข็งดังกล่าวสามารถต้านแรงกดในทิศทางขนานและตั้งฉากเส้นรอบวงถึงสามารถต้านทานการเจาะหรือการเสียดสีภายในไม้ได้ อย่างไรก็ตามผลการทดลองสมบัติเชิงกลความหนาแตกต่างกัน สรุปได้ว่า สมบัติเชิงกลต่างๆของไม้ยางพาราหนา 5.08 ซม. สามารถรองรับน้ำหนักภายใต้การสภาวะของแรงในรูปแบบต่างๆ ได้ดีกว่าไม้ยางพาราหนา 2.54 ซม.



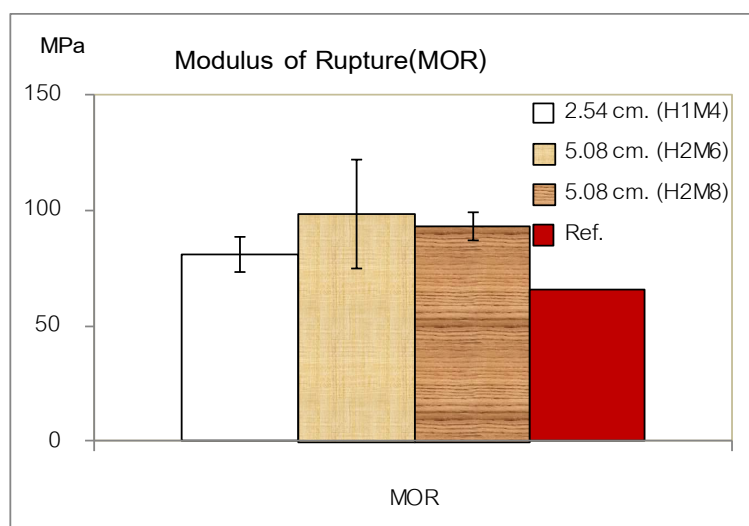
(1)



(2)



(3)



(4)

รูปที่ 5-22 การเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ : (1) ค่าแรงเฉือนตั้งฉากกับเส้น ค่าแรงกดตั้งฉากและขนานเส้น (2) ความแข็ง (3) โมดูลัสยืดหยุ่น และ (4) โมดูลัสแตกหัก ภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H ของไม้หนา 2.54 ซม. และเงื่อนไข H2:M6:H และ H2:M8:H ของไม้หนา 5.08 ซม.

5.4 การหาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process, AHP)

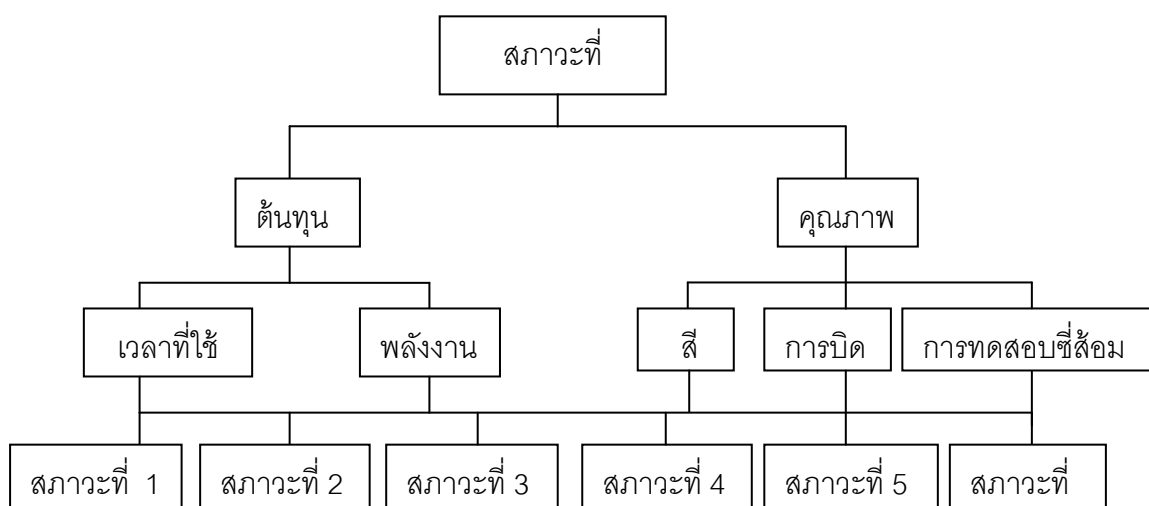
เมื่อพิจารณาทฤษฎีภายใต้ปัจจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญในโครงสร้างของกระบวนการวิเคราะห์กระบวนการแปรรูปไม้ส่วนใหญ่ จะเป็นเกณฑ์ของการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน คุณภาพ และบริการ เป็นปัจจัยหลักในการดำเนินงาน แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญของงาน

ทดลองและแนวทางเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลโดยตรงต่อไม้หลังอบแห้งสำหรับการใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้เงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง จะประกอบด้วยปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ

- ต้นทุน (cost) ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยในด้านอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นเริ่มต้น และความเร็วลม ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราแห้งของไม้ขณะอบ และพลังงานที่วัดได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าขณะทดลอง

- คุณภาพหลังอบแห้ง (quality) เป็นลักษณะในการจำแนกของไม้หลังอบ โดยทั่วไปวัดค่าองศาเบี่ยงเบนของไม้ของขนาดของซี่ส้อม สีที่เปลี่ยนแปลงภายในเนื้อไม้ และระยะบิดงอของไม้

ดังนั้นการพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละเงื่อนไขที่ความหนาของไม้ต่างกัน ในการพิจารณาปัจจัยหลักและปัจจัยรองจากผลการทดลองทั้งหมดมี 5 ปัจจัย ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง พลังงาน ขนาดของซี่ส้อม สีที่เปลี่ยนแปลงและระยะบิดงอ (ดังแสดงในรูปที่ 5-23)



รูปที่ 5-23 โครงสร้างของกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process, AHP)

5.4.1 การให้น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบหาลำดับความสำคัญจะใช้เกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 ปัจจัย (ดังตารางที่ 5-5) กับสภาวะอบแห้งทั้ง 6 เงื่อนไขในแต่ละความหนาไม้ แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบเกณฑ์ในการคัดเลือกทางเลือกที่ละคู่ เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจเลือกความสำคัญเกณฑ์ จากการให้คะแนนตามค่าที่วัดได้จากผลทดลอง ถ้าคะแนนความสำคัญหรือความชอบนั้นสมเหตุสมผล (Consistency) จะสามารถจัดลำดับทางเลือกเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดได้ (ดังตารางที่ 5-6)

ตารางที่ 5-5 ค่าระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ

ระดับความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 ปัจจัยส่งผลต่อวัตถุประสงค์เท่าๆกัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	ปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	ความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่ง
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	ปัจจัยหนึ่งได้รับความพึงพอใจมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด
9	สำคัญกว่าสูงสุด	ปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้
2, 4, 6, 8	ความสำคัญที่อยู่ระหว่างแต่ละระดับ	ความสำคัญที่ก้ำกึ่งระหว่างความสำคัญแต่ละระดับตามลำดับตัวเลข

ตารางที่ 5-6 นำหนักความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ในการอบแห้งไม้

	เวลา	สี	บิดงอ	ซีสีอม	พลังงาน	ผลรวม	เกณฑ์ประเมิน
เวลา	1.00	0.14	1.00	0.33	0.14	2.62	5.07%
สี	7.00	1.00	5.00	4.00	4.00	21	46.8%
บิดงอ	1.00	0.20	1.00	0.33	0.20	2.73	5.9%
ซีสีอม	3.00	0.25	3.00	1.00	0.20	7.45	12.47%
พลังงาน	7.00	0.25	5.00	5.00	1.00	18.25	29.73%
ผลรวม	19.00	1.84	15.00	10.67	5.54	52.05	100.00%

สำหรับการคำนวณหาความสอดคล้องกันของเหตุผล เพื่อเป็นการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของข้อมูล สามารถเกิดขึ้นได้ตามปกติในการวิเคราะห์เปรียบเทียบของเป็นคู่ (Pairwise) ดังการคำนวณหา λ_{\max} และดัชนีความสมเหตุสมผลของข้อมูล (Consistency Index, CI) (ดังสมการที่ 5-1 และ 5-2) ซึ่งในกรณีของปัจจัยที่มีเกินกว่า 5 ปัจจัย ค่าความสอดคล้องกัน ไม่ควรเกิน 10% (<0.1) จึงจะยอมรับได้

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \quad (5-1)$$

λ_{\max} = จำนวนหลักเกณฑ์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ (n)

n = จำนวนหลักเกณฑ์

$$CI = CR / RI \quad (5-2)$$

CI = ดรรชนีความสมเหตุสมผล

CR = สัดส่วนความสมเหตุสมผล

RI = ดรรชนีค่าสุ่มของความไม่สมเหตุสมผล ดูได้จากตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-7 ดรรชนีค่าสุ่มของความไม่สมเหตุสมผล [45]

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

สามารถคำนวณหาความสอดคล้องกันของเหตุผล ในการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ทีละคู่ของหลักเกณฑ์ทั้งหมด โดยนำผลรวมของค่าวิจจัยของแต่ละหลักเกณฑ์ในแถวตั้งแต่แถวมาคูณด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยในแถวบนแต่ละแถว แล้วนำเอาผลคูณที่ได้มารวมกัน ผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนหลักเกณฑ์ทั้งหมดที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลรวมนี้เรียกว่า Eigen Values สูงสุด (λ_{\max}) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1 & 1/3 & 1/7 \\ 7 & 1 & 5 & 4 & 4 \\ 1 & 1/5 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1/4 & 3 & 1 & 1/5 \\ 7 & 1/4 & 5 & 5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.051 \\ 0.468 \\ 0.059 \\ 0.125 \\ 0.297 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.261 \\ 2.807 \\ 0.304 \\ 0.631 \\ 1.688 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0.261 \\ 2.807 \\ 0.304 \\ 0.631 \\ 1.688 \end{bmatrix} = \lambda_{\max} \begin{bmatrix} 0.051 \\ 0.468 \\ 0.059 \\ 0.125 \\ 0.297 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = 5.401$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) = (5.401-5)/(5-1) = 0.1012$$

$$CR = CI/RI = 0.1012/1.12 = 0.09$$

จากการคำนวณพบว่า CR มีค่าเท่ากับ 0.09 ซึ่งน้อยกว่า 0.1 แสดงว่ามีความสอดคล้องกันของข้อมูล สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในลำดับขั้นต่อไปได้ สำหรับค่าที่วัดได้จากผลการทดลองของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ดังรายละเอียดตารางที่ 5-8 และ 5-9 ตามลำดับ แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบเกณฑ์ในการคัดเลือกทางเลือกทีละคู่ เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจว่าเกณฑ์

ไหนสำคัญกว่ากัน โดยการให้คะแนนตามค่าที่วัดได้จากผลการทดลอง ถ้าการให้คะแนนความสำคัญหรือความชอบนั้นสมเหตุสมผล (Consistency) (ดังภาคผนวก ข) จะสามารถจัดลำดับทางเลือกเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดได้ ดังรายละเอียดตารางที่ 5-10 และ 5-11 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-8 ค่าที่วัดได้ของปัจจัยต่างๆ ของการอบไม้หนา 2.54 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข

ไม้หนา 2.54 ซม.	H6M6	M6H6	H2M4	H1M4	H1M3	H2M2
เวลา (ชั่วโมง)	9	7	6	5	6	6
พลังงาน (MJ/kg)	2.751	3.848	3.397	3.247	2.436	1.996
สี	4.748	9.195	5.41	6.062	4.98	8.053
ระยะบิดงอ (มิลลิเมตร)	3.9	4.1	4.7	4.5	3.4	2.8
องศาซีลุ่ม	0.031	0.046	0.033	0.0163	0.0447	0.0463

ตารางที่ 5-9 ค่าที่วัดได้ของปัจจัยต่างๆ ของการอบไม้หนา 5.08 ซม. ในแต่ละเงื่อนไข

ไม้หนา 5.08 ซม.	M12H	H3M12	H6M6H	H2M10	H2M8	H2M6
เวลา (ชั่วโมง)	21	16	14	14	11	10
พลังงาน (MJ/kg)	5.109	5.24	2.844	3.977	3.49	2.957
สี	4.726	6.155	6.10	6.18	5.69	5.225
ระยะบิดงอ (มิลลิเมตร)	4.1	6.0	7.4	5.3	5.9	5.9
องศาซีลุ่ม	0.244	0.241	0.233	0.25	0.23	0.225

ตารางที่ 5-10 ผลการคำนวณ AHP ในการอบไม้หนา 5.08 ซม.

เงื่อนไข	เวลา	พลังงาน	สี	บิดงอ	ซีลุ่ม	ความสำคัญ	ผลรวม	ลำดับ
						ของปัจจัย	ความสำคัญ	
M12H	0.026	0.065	0.252	0.427	0.105	0.051	0.177	3
H3M12	0.073	0.065	0.089	0.108	0.105	0.297	0.084	6
H6M6H	0.117	0.278	0.089	0.038	0.181	0.468	0.155	4
H2M10	0.117	0.117	0.089	0.171	0.060	0.059	0.100	5
H2M8	0.319	0.180	0.163	0.122	0.201	0.125	0.178	2
H2M6	0.348	0.296	0.317	0.135	0.347		0.305	1

ตารางที่ 5-11 ผลการคำนวณ AHP ในการอบไม้หนา 2.54 ซม.

เงื่อนไข	เวลา	พลังงาน	สี	บิดงอ	ซีลัอม	ความสำคัญ	ผลรวม	ลำดับ
						ของปัจจัย	ความสำคัญ	
H6M6	0.031	0.162	0.247	0.146	0.241	0.051	0.204	3
M6H6	0.095	0.0351	0.056	0.150	0.083	0.297	0.061	6
H2M4	0.179	0.065	0.189	0.082	0.166	0.468	0.142	5
H1M4	0.337	0.157	0.1756	0.332	0.342	0.059	0.208	1
H1M3	0.179	0.180	0.248	0.208	0.110	0.125	0.205	2
H2M2	0.179	0.401	0.084	0.081	0.059		0.180	4

จากผลการคำนวณด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขแบบ Pulse drying ด้วย H1:M4:H และ H2:M6:H ของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ตามลำดับ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ปัจจัยด้านระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง พลังงาน ขนาดของซีลัอม สีที่เปลี่ยนแปลงและระยะบิดงอ ในการอบแห้งไม้ยางพาราแต่ละเงื่อนไขแบบผสมผสานด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนร่วมกัน

5.5 การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุนของเครื่องอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน จะทำการวิเคราะห์เฉพาะต้นทุนผันแปร (Variable cost) เนื่องจากปริมาณไม้ที่อบยังอยู่ในขั้นตอน Lab-scale ซึ่งทำการอบไม้จำนวน 1 แผ่น/ครั้ง โดยความหนาไม้ 2.54 ซม. (เงื่อนไข H1:M4:H) คิดเป็นปริมาตรไม้ 0.07524 ลูกบาศก์ฟุต/ครั้ง ใช้ระยะเวลาอบครั้งละ 5 ชั่วโมง คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการทำงาน 1.05 kW-hr และที่ความหนาไม้ 5.08 ซม. (เงื่อนไข H2:M6:H) คิดเป็นปริมาตรไม้ 0.15048 ลูกบาศก์ฟุต/ครั้ง ใช้ระยะเวลาอบครั้งละ 10 ชั่วโมง ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในการทำงาน 1.7 kW-hr ซึ่งสามารถคิดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้ดังนี้

- ค่าไม้ยางพาราแปรรูปอัดน้ำยา ขนาด 2.54 ซม. X 7.62 ซม. X 1.1 เมตร จำนวน 1 แผ่น คิดเป็น 0.07524 ลูกบาศก์ฟุต ราคาลูกบาศก์ฟุตละ 398.671 บาท (ณ วันที่ 25 มกราคม 2556) คิดเป็นเงิน 30 บาท ในขณะที่ไม้ยางพาราแปรรูปอัดน้ำยา ขนาด 5.08 ซม. X 7.62 ซม. X 1.1 เมตร จำนวน 1 แผ่น คิดเป็น 0.15048 ลูกบาศก์ฟุต ราคาลูกบาศก์ฟุตละ 398.7192 บาท (ณ วันที่ 25 มกราคม 2556) คิดเป็นเงิน 60 บาท

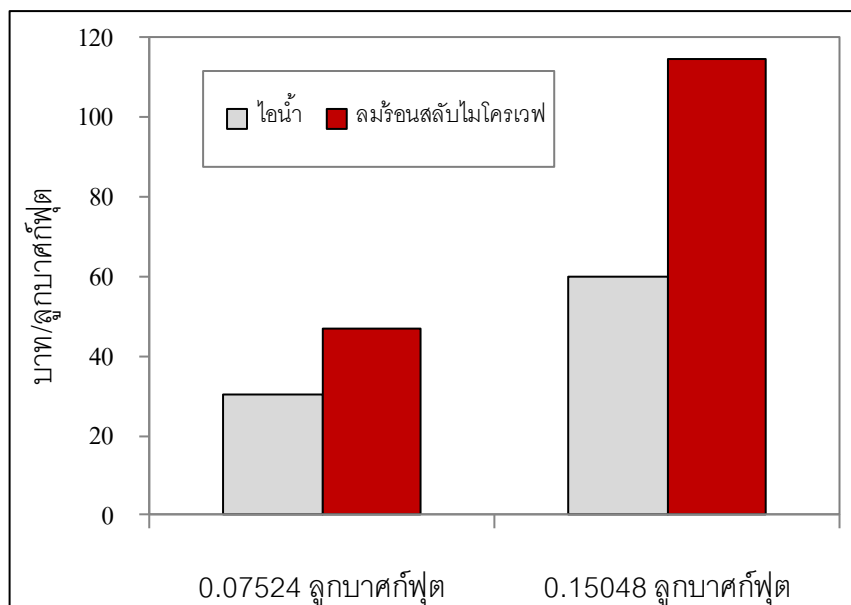
- ค่าไฟฟ้า (Power cost)

จากการทดลองที่ความหนาไม้ 2.54 ซม. จะใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 1.05 หน่วย/ชั่วโมง ราคาหน่วยละ 3 บาท ใช้ระยะเวลาอบ 5 ชั่วโมง/ครั้ง จะต้องจ่ายค่าไฟฟ้า = $1.05 \times 3 \times 5 = 15.75$ บาท บวกภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% รวมเป็นเงิน 16.66 บาท/ครั้ง/0.07524 ลูกบาศก์ฟุต ในขณะที่ความหนาไม้ 5.08 ซม. ต้องเสียค่าจ่ายใช้รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม คิดเป็น = $1.7 \times 3 \times 10 = 54.57$ บาท/ครั้ง/0.15048 ลูกบาศก์ฟุต

- ค่าแรง (แรงงานในการปฏิบัติงาน 1 คน)

พระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2551 คณะรัฐมนตรีมีมติเห็นชอบประกาศคณะกรรมการค่าจ้าง เรื่อง อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ (ฉบับที่ 7) เมื่อวันที่ 17 ตุลาคม 2554 โดยมีผลใช้บังคับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2556 เป็นต้นไป กำหนดอัตราค่าจ้างขั้นต่ำ เป็นเงินวันละ 300 บาท ทำงาน 8 ชั่วโมง คิดเป็นชั่วโมงละ 38 บาท ดังนั้นค่าแรงงานในการอบไม้ คิดเป็น $38 \times 5 = 190$ บาท/ครั้ง/0.07524 ลูกบาศก์ฟุต หรือ คิดเป็น $38 \times 10 = 380$ บาท/ครั้ง/0.15048 ลูกบาศก์ฟุต

จากข้อมูลทั่วไปพบว่าค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนไม้แปรรูปอัดน้ำยา ราคาลูกบาศก์ฟุตละ 398.671 บาท (ณ วันที่ 25 มกราคม 2556) ค่าเชื้อเพลิง 0.8 บาท/ลูกบาศก์ฟุต และค่าแรงงานและการจัดการ คิดอัตราขั้นต่ำ 60 บาท/ลูกบาศก์ฟุต คิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 459.472 บาท/ลูกบาศก์ฟุต อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบปริมาณไม้กับการอบไม้ด้วยลมร้อนและไม่โครเวฟ คิดเป็นค่าใช้จ่าย 35 บาท/0.07524 ลูกบาศก์ฟุต และ 70 บาท/0.15048 ลูกบาศก์ฟุต ในขณะที่ต้นทุนในการอบไม้ด้วยไมโครเวฟสลับลมร้อน (ถ้าไม่รวมค่าแรงงาน เนื่องจากปริมาณไม้ที่ยังอยู่ในขั้นตอน Lab-scale ไม่เหมือนการอบไม้ด้วยไอน้ำปริมาณมากตามรูปแบบการผลิตของบริษัท คิดเป็นค่าใช้จ่าย 30.05 บาท/0.07524 ลูกบาศก์ฟุต และ 60.11 บาท/0.15048 ลูกบาศก์ฟุต) คิดค่าใช้จ่ายทั้งหมดของไม้หนา 2.54 ซม. = $30+16.66 = 46.66$ บาท/0.07524 ลูกบาศก์ฟุต และไม้หนา 5.08 ซม. คิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด = $60+54.57 = 114.57$ บาท/0.15048 ลูกบาศก์ฟุต ซึ่งสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการอบไม้ด้วยไอน้ำ คิดเป็น 36 เปอร์เซ็นต์ และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 5-24) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อรวมค่าแรงงาน คิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น = $30+16.66+190 = 226.66$ บาท/0.07524 ลูกบาศก์ฟุต และ $60+54.57+380 = 494.57$ บาท/0.15048 ลูกบาศก์ฟุต ซึ่งสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการอบไม้ด้วยไอน้ำ คิดเป็น 85 เปอร์เซ็นต์ และ 93 เปอร์เซ็นต์ ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5-24 ค่าใช้จ่ายวัตถุดิบและพลังงานของไอน้ำและลมร้อนสลับไมโครเวฟที่ความหนาต่างกัน

5.6 สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟทั้ง 3 แบบ คือ แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (Preheating) แบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงท้าย (Finish drying) และแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วง (Pulse drying) พบว่า การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบช่วง สามารถลดระยะเวลาในการอบและการใช้พลังงานระหว่างการอบมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากการปรับเปลี่ยนลมร้อนเป็นไมโครเวฟสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในเนื้อไม้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่ออัตราแห้งที่สูงขึ้น โดยเฉพาะการใช้ลมร้อนลดความชื้นบริเวณผิวไม้ในช่วงแรก หลังจากนั้นการให้คลื่นไมโครเวฟอย่างเหมาะสมและเพียงพอในขณะที่ไม่มีความชื้นสูง จะช่วยสะสมความร้อนภายในเนื้อไม้จนถึงแกนกลางไม้ เมื่อไม้ร้อนทั่วทั้งชิ้นไม้การใช้ลมร้อนจะช่วยระบายความร้อนภายในเนื้อไม้ สามารถเร่งการระเหยความชื้นเพิ่มขึ้นได้และระดับความชื้นลดลงจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่อย่างรวดเร็ว โดยผลการคำนวณกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) ในการอบแบบช่วงของไม้หนา 2.54 ซม. ภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H (การใช้ลมร้อนประมาณหนึ่งชั่วโมงแรก ตามด้วยคลื่นไมโครเวฟอย่างน้อย 4 ชั่วโมง และการใช้ลมร้อนอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักไม้ไม่เปลี่ยนแปลง) เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยสุด 5 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ลดลง คิดเป็น 37, 58, 28 และ 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการอบด้วยไมโครเวฟ 1400 วัตต์ (8 ชั่วโมง) ลมร้อน 100 °C (12 ชั่วโมง) ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (7 ชั่วโมง) และลมร้อน

ร่วมกับไมโครเวฟในช่วงทำย (9 ชั่วโมง) ตามลำดับ ในระดับความชื้นเริ่มต้น 89.71 %d.b. และเหลือระดับความชื้นภายในเนื้อไม้ประมาณ 8.23 %d.b. อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 11.89 %db/h อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ 1.112 กิโลกรัม/กิโลวัตต์-ชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.25 เมกะจูล/กิโลกรัม สำหรับอุณหภูมิภายในไม้ภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H ที่วัดได้อยู่ระหว่าง 27.7-95 °C นอกจากนี้ระดับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้และอุณหภูมิภายในเตาอบภายใต้เงื่อนไข H1:M4:H แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับทุกเงื่อนไข ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ภายในอากาศไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเงื่อนไข H2:M2:H และ H1:M3:H

ในการอบแห้งไม้หนา 5.04 ซม. แบบช่วงของเงื่อนไข H2:M6:H ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยที่สุด 10 ชั่วโมงคิดเป็น 38 และ 86 เปอร์เซ็นต์ในการลดระยะเวลาอบแห้งลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว สามารถลดระดับความชื้น 70 %d.b. จนกระทั่งเหลือระดับความชื้น 7 %d.b อัตราการอบแห้งสูงสุด 5.91 %db/h มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงสุดและประหยัดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากที่สุด อุณหภูมิอบแห้งอยู่ในช่วง 28-104 °C ระดับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ของเงื่อนไข H2:M6:H แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับทุกเงื่อนไข นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเตาอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกเงื่อนไขยกเว้นเงื่อนไข H6:M6:H สำหรับรูปแบบของสมการที่สามารถทำนายการลดลงของความชื้นได้ดีที่สุดของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. คือ Logarithmic และ Diffusion Approximation ตามลำดับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว สอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งไม้ด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนสลับกันตามลำดับเป็นอย่างดี สำหรับไม้ยางพาราที่ผ่านการอบของเงื่อนไข H1:M4:H และ H2:M6:H ที่ความหนาต่างกันยังคงลักษณะไม้ยางพาราที่ดีทั้งทางด้านคุณภาพทางกายและเชิงกล ในขณะที่ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานของไอน้ำของลมร้อนสลับไมโครเวฟสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการอบไม้ด้วยไอน้ำ คิดเป็น 36 เปอร์เซ็นต์ และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไม้ยางพาราแปรรูปหลังอบแห้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานจริงได้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การอบแห้งไม้อย่างพาราด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนของคลื่นไมโครเวฟที่ 1400 W และลมร้อนที่ 100 °C พบว่า การอบแห้งไม้อย่างพาราแบบผสมผสานด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนมีประสิทธิภาพสูงกว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับลมร้อนแบบช่วง (Pulse drying) เพิ่มอัตราการอบแห้งดีกว่าแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงต้น (Preheating) และแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในช่วงปลาย (Finish drying) ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงและคงสมบัติที่ดีของไม้หลังอบแห้งได้ ดังนี้

การอบแห้งไม้อย่างพาราที่ความหนาต่างกันด้วยคลื่นไมโครเวฟ (1400 W) ใช้ระยะเวลาอบน้อยกว่าระบบลมร้อน (100 °C) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ต่างกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อความหนาไม่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานกระตุ้นที่ใช้ของลมร้อนน้อยกว่าคลื่นไมโครเวฟส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นง่ายกว่า ในขณะที่ความหนาไม่เพิ่มขึ้น การอบไม้อด้วยคลื่นไมโครเวฟมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ในระดับสูง แต่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับอุณหภูมิภายในเตาอบไม้ ระดับปานกลางและต่ำตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะเนื้อไม้ที่มีความชื้นเท่านั้น ในขณะที่น้ำหนักไม้ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยลมร้อนมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ในระดับสูง แต่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในเตาอบในระดับปานกลางเท่านั้น สำหรับผลการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งไม้อย่างพาราด้วยลมร้อนและคลื่นไมโครเวฟ สามารถใช้แบบจำลองของ Diffusion Approximation อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งไม้ได้ดี ซึ่งทำนายการลดลงของความชื้นได้ดีที่สุด นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ส้อมแสดงให้เห็นว่าไม้ที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการคลายความเค้นภายในเนื้อไม้ ส่งผลต่อการบิดงอของไม้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟเกิดลักษณะรูพรุนมากกว่าการอบแห้งลมร้อน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้อย่างพารามีคุณภาพเกรด A เมื่อเปรียบเทียบกับด้วยวิธีอบแห้งทั่วไป

สำหรับการประยุกต์ใช้ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบช่วงของการอบไม้หนา 2.54 ซม. ด้วยลมร้อน 1 ชั่วโมงแรก และคลื่นไมโครเวฟ 4 ชั่วโมง ซึ่งจะมีการใช้ลมร้อนระบายความชื้นบริเวณผิวไม้ในช่วงแรก หลังจากนั้นจะสะสมความร้อนจากการดูดกลืนภายในไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟ แล้วตามด้วยลมร้อนเพื่อระบายความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและความร้อนภายในเนื้อไม้ ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 5 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิในเนื้อไม้ 27.7-95 °C ลดระดับความชื้นต่ำกว่า 15 %d.b. ตามเกณฑ์มาตรฐานไม้แปรรูป อุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศของไมโครเวฟที่วัดได้อยู่ในช่วงระหว่าง 29-52 °C และ 31-43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าของอุณหภูมิภายในเตาอบและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่วัดได้อยู่ในช่วงระหว่าง 90-97 °C และ 3-9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาไม้หลังอบแห้งในเชิงคุณภาพ พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้นบริเวณพื้นผิวไม้ ค่าความเป็นสีแดง (a^*) บริเวณพื้นผิวและแกนกลางลดลง ค่าสีเหลือง (b^*) บริเวณพื้นผิวและแกนกลางของไม้ใกล้เคียงกับไม้ที่อบแห้งด้วยวิธีทั่วไป การบิดงอของไม้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และไม่ต้องผ่านกรรมวิธีขจัดความเค้นก่อนอบเพื่อลดความเสียไม้ขณะอบ รวมถึงสมบัติเชิงกลของไม้หลังอบแห้งสามารถนำไปใช้งานจริงได้ ในขณะที่การอบไม้หนา 5.08 ซม. ด้วยลมร้อน 2 ชั่วโมงแรก และคลื่นไมโครเวฟภายใน 6 ชั่วโมง แล้วตามด้วยลมร้อน ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 10 ชั่วโมง ในการลดระดับความชื้นต่ำกว่า 15 %d.b. อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ 28-104 °C โดยค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้นบริเวณแกนกลางของไม้ ยางพารา ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลงเกือบ 2 เท่าบริเวณผิวของไม้ยางพารา สำหรับค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่พบความแตกต่างบริเวณพื้นผิวและแกนกลางไม้เมื่อเทียบกับไม้ที่อบแห้งด้วยวิธีทั่วไป ลักษณะการบิดตัวของไม้มากขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นและไม่มีความเค้นตกค้างในเนื้อไม้ สำหรับรูปแบบของสมการที่สามารถทำนายการลดลงของความชื้นได้ดีที่สุดของไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. คือ Logarithmic และ Diffusion Approximation ตามลำดับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ในขณะที่ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานของไอน้ำและลมร้อนสลับไมโครเวฟสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการอบไม้ด้วยไอน้ำ คิดเป็น 36 เปอร์เซ็นต์ และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามความหนาไม้ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไม้ยางพาราหลังอบแห้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถรับหรือทนทานต่อแรงกระทำในรูปแบบต่างๆ ได้เหมือนกับไม้หลังอบแห้งด้วยวิธีทั่วไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่น่าผลวิจัยไปใช้

1. ความชื้นภายในเนื้อไม้ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความหนาของไม้ รวมถึงการหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบ เป็นปัจจัยสำคัญในการลดระยะเวลาอบแห้งและพลังงาน โดยเฉพาะการใช้ไมโครเวฟในช่วงความชื้นภายในเนื้อไม้สูง ควรมีการระบายอากาศภายในตู้อบที่เหมาะสม

2. การนำเอาไมโครเวฟมาใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบเป็นช่วงหรือ hot air-microwave pulse drying มีความเหมาะสมกว่าการใช้ลมร้อนหรือคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว เนื่องจากช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งมากขึ้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงและคงสมบัติกายภาพและเชิงกลของไม้ไว้ในเกณฑ์มาตรฐานไม้แปรรูปทั่วไป

6.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไป

การพิจารณากำลังคลื่นไมโครเวฟที่นำมาใช้ขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องอบแห้งเป็นสำคัญ โดยเฉพาะขนาดของเครื่องอบแห้งเพื่อใช้ในการอบไม้ปริมาณมากในระดับอุตสาหกรรม การติดตั้งท่อนำคลื่นไมโครเวฟต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้การกระจายคลื่นไปยังเนื้อไม้อย่างสม่ำเสมอ และควรใช้ลมร้อนระบายความชื้นภายในไม้และศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบร่วมด้วย อย่างไรก็ตามการอบไม้ครั้งละหนึ่งท่อน ควรพิจารณาห้องอบที่เป็นลักษณะสานพานลำเลียงเพื่อความต่อเนื่องในการลำเลียงไม้เข้าเตาอบและควรจะใช้อุณหภูมิภายในเนื้อไม้ไม่ต่ำกว่า 95 และ 104 °C กับการอบไม้หนา 2.54 และ 5.08 ซม. ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขแบบช่วง (Pulse drying) เพื่อลดระยะเวลาอบลง และมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้

บรรณานุกรม

- [1] อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา (ออนไลน์). สืบค้นจาก:
<http://www.108wood.com/index.php?lay=show&ac=article&id=125454&Ntype=6>
 [13 มิถุนายน 2011]
- [2] ฐานันดรศักดิ์ เทพญา. ข้อเทคนิคที่ดีในการอบไม้ยางแปรรูป. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา. 2541.
- [3] สัตยา บุญรัตน์ชู. 2547. ระบบควบคุมเตาอบไม้ยางพาราอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] Theppaya T. and Prasertsan S. 2002. Parameters influencing drying behavior of rubber wood (*hevea brazilliensis*) as determined from desorption experiment. *International Journal of drying technology*, 20(2), 507–525.
- [5] Ratanadecho, P., Aoki, K., Akahori, M. 2001. A numerical and experimental study of microwave drying using a rectangular waveguide. *Drying Technology International Journal* 19, 2209–2234.
- [6] Oloyede, A. and Groombridge, P. 2000. The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood, *J. Mater. Process. Technol.* 100 : 67-73.
- [7] ธเนศ รัตนวิไล และ ดุสิต จันทร์รงค์. ผลกระทบของคลื่นไมโครเวฟต่อความแข็งแรงของไม้ยางพาราในกระบวนการอบ (The Influence of Microwave Heating on Rubberwood Strength in the Drying Process) การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภูเก็ต, 24 - 26 ตุลาคม 2550, 1330-1334.
- [8] นุชธิดา พรหมทอง, ธเนศ รัตนวิไล, ชยุต นันทดุสิต. การอบไม้ยางพาราโดยใช้การพุ่งชนของเจ็ทอากาศร้อน การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ขอนแก่น, 21 - 22 ตุลาคม 2552, 1218-1223.
- [9] Promtong N. Ratanawilai T. and Nuntadusit C. Effect of combined microwave heating and impinging hot-air on rubberwood drying. *Advanced Materials Research Vols. 538-541 (2012) pp 2413-2416.*

- [10] ลักษณะของไม้ยางพารา (ออนไลน์). สืบค้นจาก:
<http://www.peace.mahidol.ac.th/nreport.php> และ
<http://www.slideshare.net/emersondejesus1/chapter-7-timber> [13 มิถุนายน 2011]
- [11] โครงสร้างของไม้ยางพารา (ออนไลน์). สืบค้นจาก: [http://www.tai-workshop.com/english/tech-2\(b\)-e.html](http://www.tai-workshop.com/english/tech-2(b)-e.html) [13 มิถุนายน 2011]
- [12] Simpson.W.T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual Agric. Handbook No.188, U.S. Dept. of Agriculture. 274 pp.
- [13] Killmann, W. and Hong, L. T. 2000. Rubberwood - the success of an agricultural by product, Unasylya 51: 66-72.
- [14] ความชื้นภายในไม้ยางพาราและความสัมพันธ์ระหว่างการอบแห้งและความชื้น (ออนไลน์). สืบค้นจาก:
<http://www.gov.ns.ca/natr/education/woodlot/modules/module8/Less2.asp> และ
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate-%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%97%E0%B8%B3%E0%B9%81%E0%B8%AB%E0%B9%89%E0%B8%87> [13 มิถุนายน 2011]
- [15] มานพ ธรสินธุ์. 2548. การอบไม้สักแปรรูปโดยใช้พลังงานเหลือทิ้งจากการผลิตถ่าน วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต(วนศาสตร์) สาขาวนผลิตภัณฑ์ ภาควิชาวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [16] สุเนตร สืบคำ และ กุทธิชัย อัครวราชนันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง สำหรับวัสดุพอรุส(Mathematical Drying Models for Porous Materials) วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 17 (ฉบับที่ 1 มกราคม – ธันวาคม).
- [17] Jain, D. and Pathare P. B. 2004. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convection drying of onion slices. Biosystems Eng. 89(3): 289-296.
- [18] Ertekin, C. and Yaldiz O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. J. of Food Eng. 63: 349-359.
- [19] Sharma, G.P., Verma R.C .and Pathare P. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. J. of. Food Eng. 71: 282-286.

- [20] Waewsak, J., Chindaruksa S. and Punlek C. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural product. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.* 11(1):14-20.
- [21] Pappas, C., Tsami, E. and Marinos-Kouris, D. 1999. The effect of process condition on the drying kinetics and rehydration characteristics of some microwave vacuum dehydrate fruits, *J. Drying Tech.* 17 : 157-174.
- [22] Decareau, R.V. 1985. *Microwaves in the Food Processing Industry*, Academic Press, Inc. Orlando, Florida. 234 p.
- [23] ยุทธพงศ์ เพ็ชรโรจน์, พันธุ์ศักดิ์ เกิดทองมี และหมุดตอเล็บ หนิสอ. 2548. การพัฒนาระบบการให้ความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1. โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน, จังหวัดชลบุรี. 11-13 พฤษภาคม 2548.
- [24] Srivaro, S., Wongprot, T., Matan, N. and Kyokong, B. 2008. Accelerated conventional temperature drying of 30mm thick rubberwood lumber. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30(4): 475-483.
- [25] Hansson, L. and Antti, A. L. 2003. The effect of microwave drying on Norway spruce woods strength: comparison with conventional drying, *J. Mater. Process. Technol.* 141 (2003) : 41-50.
- [26] Guanben Du, Siqun Wang and Zhiyong Cai. 2005. Microwave Drying of Wood Strands, *J. Drying Technology*, 23: 1–16.
- [27] Ratanadecho, P., Aoki, K., Akahori, M. 2001. A numerical and experimental study of microwave drying using a rectangular waveguide. *Drying Technology International Journal* 19, 2209–2234.
- [28] อัครวิน ชินธรรมมิตร. 2546. การพัฒนากรรวมวิธีการอบแห้งแครอทและเนื้อไก่ โดยการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [29] Khraisheh, M.A.M., McMin, W.A.M. and Magee, T.R.A. 2000. A Multiple regression approach to combined microwave and air drying process. *J. Food Eng.* 43: 243-250.

- [30] Ren, G. and Chen, F. 1998. Drying of american ginseng (*Panax quinquefolium*) roots by microwave-hot air combination. J. Food Eng. 35: 433-443.
- [31] กุลยฤทธิ์ บุญแข็ง, สมชาย ชูโฉม, ธเนศ รัตนวิไล, และ สมเกียรติ นาคกุล. การปรับปรุงกระบวนการอบไม้ยางพารา. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 4 (PEC-4), หาดใหญ่ สงขลา, 8-9 ธันวาคม 2548.
- [32] สุรพิชญ์ ทับเที่ยง. 2549. การอบไม้ยางแบบผสมผสานระหว่างไอน้ำร้อนยิ่งยวดกับอากาศร้อน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [33] Yamsaengsung, R. and Buaphud, K. 2006. Effects of superheated steam on the drying of rubberwood. Songklanakarin J. Sci. Technol., 28(4): 803-816.
- [34] United States Patent US 2,007,278,218 – Impingement/convection/microwave oven and method, 2007.
- [35] United States Patent US 2,011,166,445 – Measuring Device and a Method for microwave-based Investigation, 2009.
- [36] United States Patent US 2,011,147,378 – Microwave Oven, 2009.
- [37] เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2551. การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟเพื่ออบแห้งสมุนไพร วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร.
- [38] Sehlstedt-Persson, M. 2002. Färgförändring vid värmebehandling av sav och extraktivämen från furu och gran. Teknisk Rapport 2002:10, Luleå tekniska universitet.
- [39] Schiffmann, R. F. 1987. Microwave and Dielectric Drying, P327-356. In *Handbook of Industrial Drying*, ed. A.S. Mujumdar. Maecel Dekker, New York.
- [40] American Society of Testing Materials ASTM D 143: Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials
- [41] นันทวัน เทอดไทย. 2548. เอกสารประกอบการสอน รหัสวิชา 054575 การสร้างตัวแบบจำลองเพื่อ การพัฒนาผลิตภัณฑ์. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- [42] Theppaya, T. and Prasertsan, P. 2002. Parameters Influencing Drying Behavior Of Rubberwood (*Hevea Brazillensis*) as determined from desorption experiment. *Drying Technology*, 20(2): 507-525.
- [43] Kang, HY. and Hart, CA. 1997. Temperature Effect on Diffusion Coefficient in Drying Wood. *Wood and Fiber Science*, 29: 325-332.
- [44] Peralta, N and Lee, WC. 1995. Unsteady-State Diffusion of Moisture in Giant Timber Bamboo (*Phyllostachys Bambusoides* Sieb. & Zucc.). *Wood and Fiber Science*. 27: 421-427.
- [45] Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operations research*. 48, 9–26

ภาคผนวก ก
แบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความถี่การอบแห้งของไมโครเวฟในแบบจำลองต่างๆ

ขนาดไม้	กำลัง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
หนา 2.54 ซม.	350 วัตต์	Page (k=0.023971, n=1.092624)	0.9954	0.00073	0.0271
		Henderson (a=1.05937, k=0.035119)	0.9964	0.00078	0.0796
		Logarithmic (a=1.028315, k=0.039638, c= 0.050688)	0.9970	0.00073	0.02446
		Two term exponential (a=0.001784, k=18.35058)	0.9935	0.00069	0.02626
		Diffusion Approximation (a=-0.079131, k=0.432932, b=0.082714)	0.997	0.00070	0.0265
	700 วัตต์	Page (k=0.000798, n=0.957222)	0.9954	0.00781	0.08831
		Henderson (a=1.12209, k=0.10250)	0.9878	0.15087	0.38024
		Logarithmic (a=1.28632, k= 0.073172, c= -0.19905)	0.9916	0.00607	0.07785
		Two term exponential (a=2.01189, k=0.14773)	0.9972	0.00389	0.06239
		Diffusion Approximation (a=-0.540714, k=0.416344, b=0.317092)	0.9979	0.00448	0.06688
	1400 วัตต์	Page (k=0.019973, n=2.080225)	0.9903	0.20999	0.43473
		Henderson (a=1.13202, k=0.199854)	0.9752	0.08134	0.27920
		Logarithmic (a=1.775706, k=0.090474, c= -0.68867)	0.9863	0.00674	0.08203
		Two term exponential (a=0.5749, k=0.0016)	0.9595	0.00189	0.04339
		Diffusion Approximation (a=-0.643701, k=1.038085, b=0.269356)	0.9993	0.00294	0.05418

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความถี่การอบแห้งของไมโครเวฟในแบบจำลอง
ต่างๆ

ขนาดไม้	กำลัง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
หนา 5.04 ซม.	1400	Page ($k=0.008049$, $n=1.813360$)	0.9965	0.08284	0.28744
	วัตต์	Henderson ($a=1.267857$, $k=0.087198$)	0.9815	0.09193	0.30281
		Logarithmic ($a=1.621811$, $k=0.04746$, $c=-0.440790$)	0.9909	0.06795	0.26033
		Two term exponential ($a=0.633929$, $k=0.087198$)	0.9815	0.00484	0.06947
		Diffusion Approximation ($a=-0.993543$, $k=0.304561$, $b=0.388693$)	0.9979	0.00316	0.05617

ตารางที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งของลมร้อนในแบบจำลองต่างๆ

ขนาดไม้	อุณหภูมิ	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R ²	χ ²	RMSE
หนา 2.54 ซม.	80 (°C)	Page (k=0.111556, n=0.713162)	0.9980	0.000181	0.013316
		Henderson (a=0.865825, k=0.037501)	0.9902	0.000859	0.029044
		Logarithmic (a=0.792835, k= 0.057147, c= 0.129142)	0.9972	0.00025	0.015655
		Two term exponential (a=1.000015, k=0.044728)	0.9679	0.002783	0.052274
		Diffusion Approximation (a=0.262816, k=0.275817, b=0.113488)	0.9993	0.000678	0.00804
	90 (°C)	Page (k=0.108113, n=0.821660)	0.9985	0.000168	0.012785
		Henderson (a=0.936607, k=0.060814)	0.9934	0.000747	0.026956
		Logarithmic (a=0.871860, k= 0.087490, c= 0.117920)	0.9997	0.000003	0.00549
		Two term exponential (a=1.004128, k=0.065718)	0.9894	0.001191	0.034036
		Diffusion Approximation (a=0.735579, k=0.103595, b=0.186357)	0.9998	0.000000	0.005206
	100 (°C)	Page (k=0.214799, n=0.785816)	0.9994	0.002202	0.048462
		Henderson (a=0.926283, k=0.126734)	0.9935	0.002066	0.046944
		Logarithmic (a=0.85133, k= 0.175821, c= 0.113019)	0.9979	0.003164	0.058097
		Two term exponential (a=0.177243, k=0.637261)	0.9985	0.001701	0.042596
		Diffusion Approximation (a=0.187054, k=0.917218, b=0.119435)	0.9994	0.001874	0.044713

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งของลมร้อนในแบบจำลองต่างๆ

ขนาดไม้	อุณหภูมิ	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
หนา 5.04 ซม.	100 (°C)	Page ($k=0.152456$, $n=0.582373$)	0.9968	0.128952	0.358908
		Henderson ($a=0.745455$, $k=0.024742$)	0.9866	0.13166	0.362657
		Logarithmic ($a=0.681317$, $k=0.040038$, $c=0.124444$)	0.9957	0.069041	0.262617
		Two term exponential ($a=0.192325$, $k=0.002503$)	0.9456	0.003363	0.057957
		Diffusion Approximation ($a=0.318272$, $k=0.008328$, $b=0.04460$)	0.9964	0.00022	0.014816

ตารางที่ ก-3 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไม่โครเวฟ ด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 2.54 เซนติเมตร

อุณหภูมิ	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H6:M6	1-.30	Page (k=0.359721, n=0.658080)	0.97979	0.003560	0.058464
		Henderson (a=0.898119, k=0.200615)	0.95166	0.00427	0.064027
		Logarithmic (a=0.67903, k= 0.607471, c= 0.338814)	0.98532	0.002342	0.047417
		Two term exponential (a=0.165203, k=1.132525)	0.9672	0.002903	0.052792
		Diffusion Approximation (a=0.405252, k=0.971899, b=0.101380)	0.9878	0.002836	0.052175
	.29-.08	Page (k=0.455835, n=0.639526)	0.95252	0.000246	0.015542
		Henderson (a=0.495675, k=0.126644)	0.94016	0.000309	0.017392
		Logarithmic (a=1.422832, k= 0.323169, c= 0.068458)	0.97997	0.000105	0.010164
		Two term exponential (a=0.363825, k=0.433243)	0.90914	0.020845	0.142897
		Diffusion Approximation (a=-0.493522, k=0.201926, b=0.999998)	0.82440	0.000852	0.02889
M6:H6	1-0.4	Page (k=0.119897, n=1.156335)	0.99691	0.042409	0.201776
		Henderson (a=1.016411, k=0.152901)	0.99369	0.001149	0.033213
		Logarithmic (a=4.190415, k= 0.026608, c=-3.20684)	0.99888	0.000708	0.02607
		Two term exponential (a=1.705159, k=0.218792)	0.99757	0.000721	0.026307
		Diffusion Approximation (a=0.508205, k=0.152901, b=0.508205)	0.99369	0.237831	0.477826

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์หัตถศาสตร์ส่วนความถี่ของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 2.54 เซนติเมตร

อุณหภูมิ	ระดับความถี่	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
M6:H6 (ต่อ)	0.39- 0.09	Page (k=0.034730, n=1.963753)	0.80375	0.000938	0.030319
		Henderson (a=10.64930, k=0.564412)	0.83832	0.00095	0.030507
		Logarithmic (a=100960.5, k= 2.033211, c=0.91324)	0.96159	0.238496	0.483351
		Two term exponential (a=0.999980, k=0.244915)	0.71133	0.000964	0.030724
		Diffusion Approximation (a=-38.0754, k=0.097904, b=1.022908)	0.75902	0.00092	0.030016
H2:M4:H	1-0.75	Page (k=0.163971, n=0.825826)	0.99325	0.001224	0.03299
		Henderson (a=0.989319, k=0.145847)	0.98795	0.001061	0.030707
		Logarithmic (a=0.360507, k= 0.597121, c=0.645406)	0.99590	0.00117	0.032254
		Two term exponential (a=0.078487, k=1.368212)	0.99460	0.001175	0.032314
		Diffusion Approximation (a=0.892189, k=0.258857, b=-1.41307)	0.99567	0.001176	0.03233
	0.74- 0.05	Page (k=0.069184, n=1.758943)	0.95736	0.004860	0.068115
		Henderson (a=1.567006, k=0.319294)	0.94169	0.008063	0.08773
		Logarithmic (a=119.1179, k= 0.001286, c=-118.041)	0.97319	0.002621	0.050017
		Two term exponential (a=2.180150, k=0.374057)	0.94820	0.006983	0.081641
		Diffusion Approximation (a=-148.794, k=0.512624, b=0.992060)	0.95058	0.012323	0.108455
H2:M2:H	1-0.65	Page (k=0.325100, n=0.361957)	0.99858	0.004569	0.063733

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 2.54 เซนติเมตร

คุณหภูมิ	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H2:M2:H (ต่อ)	1-0.65	Henderson (a=0.903630, k=0.188899)	0.90196	0.003018	0.051792
		Logarithmic (a=0.311497, k= 2.216655, c=0.673073)	0.97983	0.003651	0.056966
		Two term exponential (a=0.076171, k=2.831085)	0.87214	0.002328	0.04549
		Diffusion Approximation (a=0.180002, k=9.494059, b=0.012281)	0.99954	0.002888	0.050663
	0.64- 0.45	Page (k=0.197364, n=0.964003)	0.97752	0.000149	0.011447
		Henderson (a=0.972263, k=0.180312)	0.97812	0.000152	0.01154
		Logarithmic (a=44.33723, k= 0.002310, c=-43.4620)	0.97709	0.000112	0.009895
		Two term exponential (a=0.566740, k=0.238345)	0.97709	0.000146	0.011318
		Diffusion Approximation (a=0.027732, k=4.171482, b=0.043225)	0.97812	0.000152	0.011539
	0.44-0.1	Page (k=0.063626, n=1.861212)	0.93898	0.001364	0.035601
		Henderson (a=4.341580, k=0.550729)	0.95740	0.001058	0.031351
		Logarithmic (a=37.29516, k= 1.088854, c=0.09243)	0.98398	0.000398	0.019221
		Two term exponential (a=4.357270, k=0.551418)	0.95738	0.00106	0.031367
		Diffusion Approximation (a=-16.4045, k=0.087863, b=1.076527)	0.90236	0.010484	0.098667
H1:M4:H	1-0.8	Page (k=0.277665, n=1.169247)	0.94011	0.003252	0.052057
		Henderson (a=1.013778, k=0.284889)	0.94069	0.003506	0.054055

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 2.54 เซนติเมตร

คุณหภูมิ	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R ²	χ ²	RMSE
H1:M4:H (ต่อ)	1-0.8 (ต่อ)	Logarithmic (a=0.906640, k= 0.324457, c=0.107704)	0.94071	0.003544	0.054347
		Two term exponential (a=1.749171, k=0.481124)	0.93900	0.003304	0.052475
		Diffusion Approximation (a=0.137708, k=0.265751, b=0.999986)	0.93722	0.003824	0.056449
	0.79- 0.15	Page (k=0.141226, n=1.605412)	0.99049	0.001661	0.039018
		Henderson (a=1.369697, k=0.392779)	0.97706	0.002529	0.048145
		Logarithmic (a=3.744762, k= 0.057415, c=-2.69607)	0.99306	0.00271	0.049842
		Two term exponential (a=2.057331, k=0.482650)	0.98537	0.001951	0.042292
		Diffusion Approximation (a=-1.10900, k=1.005000, b=0.490333)	0.98304	0.001797	0.040586
	0.14-0.9	Page (k=0.431537, n=0.939111)	0.79457	0.000368	0.018097
		Henderson (a=0.911863, k=-0.371812)	0.79364	0.000389	0.01859
		Logarithmic (a=1.075565, k= 0.439188, c=0.021180)	0.80110	0.000372	0.01818
		Two term exponential (a=0.597671, k=0.496579)	0.79573	0.000365	0.018004
		Diffusion Approximation (a=0.024191, k=0.036150, b=11.59537)	0.79829	0.092016	0.285993
H1:M3:H	1-0.75	Page (k=0.280867, n=0.401995)	0.99921	0.022253	0.129189
		Henderson (a=0.958477, k=0.276659)	0.92830	0.014291	0.10353

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 2.54 เซนติเมตร

คุณหภูมิ	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H1:M3:H (ต่อ)	1-0.75 (ต่อ)	Page (k=0.280867, n=0.401995)	0.99921	0.022253	0.129189
		Henderson (a=0.958477, k=0.276659)	0.92830	0.014291	0.10353
		Logarithmic (a=0.244361, k= 3.404552, c=0.754699)	0.99845	0.02268	0.130422
		Two term exponential (a=0.058537, k=4.502389)	0.94535	0.01696	0.112782
		Diffusion Approximation (a=0.165752, k=5.684734, b=0.017121)	0.99980	0.022493	0.129884
	0.75-0.5	Page (k=0.179271, n=0.951978)	0.99058	0.001295	0.03445
		Henderson (a=0.979382, k=0.162807)	0.99078	0.001279	0.034235
		Logarithmic (a=1.057103, k= 0.143826, c=-0.085191)	0.99081	0.001262	0.03401
		Two term exponential (a=0.405299, k=0.278321)	0.99048	0.001304	0.034574
		Diffusion Approximation (a=0.020610, k=6.672918, b=0.024399)	0.99078	0.001279	0.034236
	0.49 - 0.12	Page (k=0.007159, n=3.205713)	0.96698	0.001240	0.033577
		Henderson (a=19.70706, k=0.858307)	0.98335	0.000631	0.023943
		Logarithmic (a=62.46093, k= 1.152049, c=0.060594)	0.98744	0.000477	0.020813
		Two term exponential (a=19.70705, k=0.858307)	0.98335	0.000631	0.023943
		Diffusion Approximation (a=-18.7025, k=5.913947, b=0.145124)	0.98335	0.073618	0.258699

ตารางที่ ก-4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไม่โครเวฟ ด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 5.08 เซนติเมตร

เงื่อนไข	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H2:M10: H	1-0.8	Page (k=0.172115, n=0.680239)	0.98347	0.000246	0.002549
		Henderson (a=0.983235, k=0.139076)	0.96554	0.000508	0.003665
		Logarithmic (a=0.286782, k=0.900850, c=0.718272)	0.99914	0.000129	0.001846
		Two term exponential (a=0.067457, k=1.637526)	0.98012	0.000295	0.002794
		Diffusion Approximation (a=0.998110, k=0.198959, b=-10.1053)	0.99749	3.75E-05	0.000997
	0.79-0.3	Page (k=0.031607, n=1.396229)	0.98727	0.000698	0.026413
		Henderson (a=1.124009, k=0.088173)	0.97636	0.001288	0.035892
		Logarithmic (a=49.34085, k=0.001136, c=-48.3247)	0.99051	0.000521	0.022823
		Two term exponential (a=0.999991, k=0.072206)	0.95768	0.002284	0.04779
		Diffusion Approximation (a=-102.990, k=0.164668, b=0.992045)	0.98722	0.0007	0.026456
	0.29-0.11	Page (k=0.003570, n=2.379953)	0.91007	0.002626	0.047445
		Henderson (a=18.18996, k=0.345391)	0.92516	0.002515	0.046427
		Logarithmic (a=100700.2, k=1.067478, c=0.099593)	0.96519	0.000256	0.014803
		Two term exponential (a=0.008419, k=15.77754)	0.73411	0.113002	0.311222
		Diffusion Approximation (a=-17.1908, k=1.228649, b=0.281114)	0.92516	0.002515	0.046428

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 5.08 เซนติเมตร

เงื่อนไข	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H6:M6	1-0.7	Page (k=0.118801, n=0.690955)	0.99150	0.000187	0.013152
		Henderson (a=0.963874, k=0.067068)	0.97300	0.000481	0.021068
		Logarithmic (a=0.373588, k=0.347573, c=0.633234)	0.99617	8.07E-05	0.008629
		Two term exponential (a=0.077065, k=0.762141)	0.98654	0.000296	0.016528
		Diffusion Approximation (a=0.249413, k=0.452029, b=0.048127)	0.99610	8.61E-05	0.008914
	0.7-0.4	Page (k=0.004781, n=2.114478)	0.98872	0.000353	0.017997
		Henderson (a=1.663128, k=0.114162)	0.97730	0.000707	0.025462
		Logarithmic (a=23.60466, k=0.002993, c=-22.3709)	0.98715	0.000402	0.019202
		Two term exponential (a=0.999878, k=0.058633)	0.85045	0.00436	0.063222
		Diffusion Approximation (a=-131.603, k=0.196310, b=0.989364)	0.98384	0.000505	0.021517
	0.39-0.06	Page (k=0.644359, n=2.197951)	-	0.038734	0.179662
		Henderson (a=36071.39, k=0.925359)	0.98136	0.000419	0.018693
		Logarithmic (a=6363.293, k=0.78000, c=-0.031580)	0.98234	0.000398	0.018201
		Two term exponential (a=0.0066000, k=19.92156)	0.51059	0.117746	0.313243
		Diffusion Approximation (a=-1434.80, k=53.05806, b=0.012728)	0.95285	0.001046	0.029518

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 5.08 เซนติเมตร

เงื่อนไข	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
M12:H	1-0.4	Page (k=0.011700, n=1.686186)	0.99895	0.00075	0.026829
		Henderson (a=1.085653, k=0.061213)	0.98066	0.001863	0.042287
		Logarithmic (a=83.02832, k=0.000586, c=-81.9675)	0.99420	0.000931	0.029904
		Two term exponential (a=0.999870, k=0.050002)	0.95562	0.003132	0.054838
		Diffusion Approximation (a=-347.498, k=0.211160, b=0.996011)	0.98483	0.031779	0.174665
	0.4-0.15	Page (k=0.317745, n=0.558215)	0.82624	0.000921	0.029839
		Henderson (a=0.493788, k=0.048862)	0.81536	0.000888	0.029291
		Logarithmic (a=1715310, k=1.274093, c=0.177864)	0.87205	0.002319	0.047346
		Two term exponential (a=0.308581, k=0.224151)	0.72283	0.002254	0.046679
		Diffusion Approximation (a=0.958906, k=0.117455, b=-0.311067)	0.84627	0.001135	0.033123
H2:M8:H	1-0.75	Page (k=0.230642, n=0.477798)	0.98636	0.000329	0.016213
		Henderson (a=0.962029, k=0.160595)	0.93165	0.001602	0.035795
		Logarithmic (a=0.283590, k=1.480037, c=0.718996)	0.99573	0.000103	0.009093
		Two term exponential (a=0.070745, k=2.036765)	0.95258	0.001123	0.029974
		Diffusion Approximation (a=0.481014, k=0.160595, b=0.481014)	0.99973	0.007985	0.079927

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความถี่ของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 5.08 เซนติเมตร

เงื่อนไข	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H2:M8:H (ต่อ)	0.74-.3 (ต่อ)	Page (k=0.040629, n=1.458919)	0.98830	0.000711	0.025822
		Henderson (a=1.185591, k=0.125013)	0.97696	0.001393	0.036134
		Logarithmic (a=50.34812, k=0.001459, c=-49.3269)	0.99113	0.00054	0.022506
		Two term exponential (a=0.999962, k=0.097269)	0.94970	0.002998	0.053018
		Diffusion Approximation (a=-120.704, k=0.224398, b=0.992737)	0.98743	0.000764	0.026764
	.15-.12	Page (k=0.286089, n=0.801907)	0.97441	8.33E-06	0.0025
		Henderson (a=0.676580, k=0.142360)	0.97391	8.49E-06	0.002523
		Logarithmic (a=48.79880, k=0.663197, c=0.106794)	0.98153	6.03E-06	0.002127
		Two term exponential (a=0.350813, k=0.402641)	0.97334	8.67E-06	0.002551
		Diffusion Approximation (a=0.120873, k=0.177335, b=0.999974)	0.94440	1.78259E-05	0.003656
H2:M6:H	1-0.8	Page (k=0.149563, n=0.844801)	0.98452	0.000372	0.016697
		Henderson (a=0.994789, k=0.136457)	0.98045	0.000351	0.016768
		Logarithmic (a=0.350487, k=0.564060, c=0.656379)	0.98914	0.000196	0.012527
		Two term exponential (a=0.093888, k=0.993054)	0.98649	0.000244	0.013958
		Diffusion Approximation (a=0.999975, k=0.158150, b=-23.9664)	0.99353	0.000117	0.00968

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 5.08 เซนติเมตร

เงื่อนไข	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H2:M6:H (ต่อ)	.79-.4	Page (k=0.026717, n=1.585149)	0.96999	0.002769	0.050381
		Henderson (a=1.151097, k=0.100860)	0.95132	0.003601	0.057457
		Logarithmic (a=1.181768, k=0.096734, c=-0.033204)	0.95223	0.003517	0.056778
		Two term exponential (a=0.999973, k=0.074788)	0.95132	0.006125	0.074932
		Diffusion Approximation (a=-1.80618, k=0.275733, b=0.676483)	0.98715	0.021206	0.139423
	0.39-0.11	Page (k=0.02564, n=2.833670)	0.96937	0.023671	0.143917
		Henderson (a=24.45938, k=0.499733)	0.96937	0.005533	0.059825
		Logarithmic (a=4.782269, k=0.279364, c=-0.115626)	0.95065	0.004004	0.059189
		Two term exponential (a=0.005958, k=27.87607)	0.73006	0.011843	0.101799
		Diffusion Approximation (a=-23.4589, k=1.902302, b=0.262698)	0.96937	0.005533	0.06958
H3:M18	1-.8	Page (k=0.118498, n=0.732148)	0.99743	0.002687	0.047992
		Henderson (a=0.982759, k=0.087542)	0.98585	0.003214	0.052485
		Logarithmic (a=0.298783, k=0.481166, c=0.702611)	0.99979	0.002551	0.046756
		Two term exponential (a=0.057218, k=1.251438)	0.99601	0.003095	0.051506
		Diffusion Approximation (a=0.738272, k=0.232957, b=-0.634926)	0.99993	0.026724	0.151349

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้นของการผสมผสานอบด้วยลมร้อนและไมโครเวฟด้วยแบบจำลองต่างๆ ของไม้หนา 5.08 เซนติเมตร

เงื่อนไข	ระดับความชื้น	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R^2	χ^2	RMSE
H3:M18 (ต่อ)	0.8-0.09	Page (k=0.005609, n=2.087397)	0.99194	0.002069	0.045006
		Henderson (a=1.561497, k=0.121822)	0.97024	0.007893	0.087911
		Logarithmic (a=7.447089, k=0.009306, c=-6.27183)	0.99311	0.031859	0.176623
		Two term exponential (a=0.999971, k=0.075663)	0.88840	0.024343	0.154388
		Diffusion Approximation (a=-347.498, k=0.211160, b=0.996011)	0.98483	0.004462	0.066097

ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

ตารางที่ ข-1 น้ำหนักความสำคัญ ด้านระยะเวลาที่ใช้อบแห้งแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 2.54 ซม. (CI=0.00689, RI=1.24, CR=0.00555)

ระยะเวลาที่ใช้	H6M6	M6H6	H2M4	H1M4	H1M3	H2M2	ความสำคัญ
H6M6	1	1/4	1/6	1/8	1/6	1/6	0.031
M6H6	4	1	1/2	1/4	1/2	1/2	0.094
H2M4	6	2	1	1/2	1	1	0.179
H1M4	8	4	2	1	2	2	0.336
H1M3	6	2	1	1/2	1	1	0.179
H2M2	6	2	1	1/2	1	1	0.179

ตารางที่ ข-2 น้ำหนักความสำคัญด้านพลังงานที่ใช้อบแห้งในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 2.54 ซม. (CI=0.03571, RI=1.24, CR=0.0288)

พลังงาน	H6M6	M6H6	H2M4	H1M4	H1M3	H2M2	ความสำคัญ
H6M6	1	6	4	1/2	2	1/4	0.154
M6H6	1/6	1	1/2	1/8	1/4	1/9	0.030
H2M4	1/4	2	1	1/3	1/2	1/8	0.054
H1M4	2	8	3	1	4	1/2	0.240
H1M3	1/2	4	2	1/4	1	1/6	0.086
H2M2	4	9	8	2	6	1	0.436

ตารางที่ ข-3 น้ำหนักความสำคัญด้านสีในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 2.54 ซม.

(CI=0.08727, RI=1.24, CR=0.07038)

สี	H6M6	M6H6	H2M4	H1M4	H1M3	H2M2	ความสำคัญ
H6M6	1	7	2	5	1	3	0.321984
M6H6	1/7	1	1/4	1/2	1/5	1	0.054455
H2M4	1/2	4	1	1	1/2	1/2	0.126753
H1M4	1/5	2	1	1	1/2	1/2	0.094344
H1M3	1	5	2	2	1	4	0.278506
H2M2	1/3	1	2	2	1/4	1	0.123958

ตารางที่ ข-4 น้ำหนักความสำคัญด้านระยะบิดงอในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 2.54 ซม.

(CI=0.03017, RI=1.24, CR=0.02433)

บิดงอ	H6M6	M6H6	H2M4	H1M4	H1M3	H2M2	ความสำคัญ
H6M6	1	1	2	1/2	1/2	2	0.14588
M6H6	1	1	3	1/3	1/2	2	0.150245
H2M4	1/2	1/3	1	1/3	1/2	1	0.082489
H1M4	2	3	3	1	2	4	0.332481
H1M3	2	2	2	1/2	1	2	0.207633
H2M2	1/2	1/2	1	1/4	1/2	1	0.081273

ตารางที่ ข-5 น้ำหนักความสำคัญด้านองศาที่ล้อมในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 2.54 ซม.

(CI=0.02334, RI=1.24, CR=0.01882)

ที่ล้อม	H6M6	M6H6	H2M4	H1M4	H1M3	H2M2	ความสำคัญ
H6M6	1	3	2	3	1/2	4	0.249523
M6H6	1/3	1	1/2	1/2	1/4	2	0.081981
H2M4	1/2	2	1	2	1/2	3	0.164536
H1M4	1/3	2	1/2	1	1/3	2	0.108638
H1M3	2	4	2	3	1	5	0.340336
H2M2	1/4	1/2	1/3	1/2	1/5	1	0.054986

ตารางที่ ข-6 น้ำหนักความสำคัญด้านระยะเวลาที่ใช้อบแห้งในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 5.08 ซม.

(CI=0.02013, RI=1.24, CR=0.01623)

เวลา	M12H	H3M12	H6M6H	H2M10	H2M8	H2M6	ความสำคัญ
M12H	1	1/6	1/4	1/6	1/8	1/9	0.026649
H3M12	6	1	2	1	1/2	1/4	0.126426
H6M6H	4	1/2	1	1/2	1/4	1/4	0.076938
H2M10	6	1	2	1	1/2	1/4	0.126426
H2M8	8	2	4	2	1	1/2	0.233244
H2M6	9	4	6	4	2	1	0.410316

ตารางที่ ข-7 น้ำหนักความสำคัญด้านพลังงานที่ใช้อบแห้งในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 5.08 ซม.

(CI=0.07618, RI=1.24, CR=0.06144)

พลังงาน	M12H	H3M12	H6M6H	H2M10	H2M8	H2M6	ความสำคัญ
M12H	1	2	1/4	1/2	1/2	1/3	0.08245
H3M12	1/2	1	1/5	1/2	1/3	1/4	0.055569
H6M6H	4	5	1	3	2	2	0.343148
H2M10	2	2	1/3	1	1/2	1/2	0.116093
H2M8	2	3	1/2	2	1	1/2	0.167553
H2M6	3	4	1/2	2	2	1	0.235188

ตารางที่ ข-8 น้ำหนักความสำคัญด้านสีในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 5.08 ซม. (CI=0.0109, RI=1.24, CR=0.00879)

สี	M12H	H3M12	H6M6H	H2M10	H2M8	H2M6	ความสำคัญ
M12H	1	1	1/3	1/2	2	1/2	0.109117
H3M12	1	1	1/3	1/2	2	1/2	0.109117
H6M6H	3	3	1	2	3	2	0.315171
H2M10	2	2	1/2	1	2	2	0.206838
H2M8	1	1	1/3	1/2	1	1/2	0.095228
H2M6	2	2	1/2	1/2	2	1	0.16453

ตารางที่ ข-9 น้ำหนักความสำคัญด้านระยะบิดงอในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 5.08 ซม. (CI=0.0109, RI=1.24, CR=0.00879)

ระยะบิดงอ	M12H	H3M12	H6M6H	H2M10	H2M8	H2M6	ความสำคัญ
M12H	1	2	4	3	2	2	0.318351
H3M12	1/2	1	2	1	1/2	1	0.13213
H6M6H	1/4	1/2	1	1/2	1/3	1/2	0.068939
H2M10	1/3	1	2	1	1/2	1	0.123121
H2M8	1/2	2	3	2	1	2	0.225329
H2M6	1/2	1	2	1	1/2	1	0.13213

ตารางที่ ข-10 น้ำหนักความสำคัญด้านองศาซีส์ลอมในแต่ละเงื่อนไขของไม้หนา 5.08 ซม. (CI=0.03653, RI=1.24, CR=0.02946)

ซีส์ลอม	M12H	H3M12	H6M6H	H2M10	H2M8	H2M6	ความสำคัญ
M12H	1	1/2	1/3	2	1/3	1/4	0.075334
H3M12	2	1	1/2	3	1/3	1/4	0.108508
H6M6H	3	2	1	3	1/2	1/3	0.159638
H2M10	1/2	1/3	1/3	1	1/4	1/5	0.050904
H2M8	3	3	2	4	1	1/2	0.23737
H2M6	4	4	3	5	2	1	0.368246