

การศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นซีเอ็มดีจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง  
โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับ  
ระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

**A STUDY OF DRYING PROCESS PARTICLEBOARDS FROM  
DURIAN PEELS BY USING A COMBINED UNSYMMETRICAL  
MULTI - FEED MICROWAVE AND HOT AIR CONTINUOUS  
BELT SYSTEM**

อนุชิต จิวหยี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง  
โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับ  
ระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง



อนุชิต จิวหยี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน  
หมอนทองโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่  
สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

A Study of Drying Process Particleboards from Durian Peels by Using  
a Combined Unsymmetrical Multi-Feed Microwave and Hot Air  
Continuous Belt System

ชื่อ - นามสกุล

นายอนุชิต จิวหทัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สโรชา เจริญวัย, Ph.D.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ศาสตราจารย์ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, Ph.D.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)



..... กรรมการ

(อาจารย์สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, Ph.D.)




..... กรรมการ

(อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)



..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, Ph.D.)



..... กรรมการ

(อาจารย์สโรชา เจริญวัย, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง
ชื่อ - นามสกุล	นายอนุชิต จิวหิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สโรชา เจริญวัย, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอผลการศึกษากระบวนการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้เครื่องไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง โดยวัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ แผ่นชิ้นไม้อัด (ขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร) จากเปลือกทุเรียนหมอนทอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง, ผงเปลือกทุเรียนหมอนทอง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 12 สูตร คือ 1:1:1 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส 1:1:5 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส 2:1:1.5 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส 2:1:2 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โครงสร้างของระบบไมโครเวฟประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 จิกะเฮิรตซ์

การศึกษาการทดลองทั้ง 12 กรณีนั้น ใช้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าคงที่เท่ากับ 4800 วัตต์ (6 ตัว  $\times$  800 วัตต์) อบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง ซึ่งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้อบนั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 - 40 % (Dry Basis) และมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนให้มีความชื้นสุดท้ายที่ 10 - 15 % (Dry Basis)

การศึกษพบว่ากระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองสามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแผ่นชิ้นไม้อัด รวมทั้งทำให้คุณสมบัติทางกล และทางกายภาพของแผ่นชิ้นไม้อัดมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Oven)

**คำสำคัญ :** การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน

<b>Thesis Title</b>	A Study of Drying Process Particleboards from Durian Peels by Using a Combined Unsymmetrical Multi-Feed Microwave and Hot Air Continuous Belt System
<b>Name - Surname</b>	Mr. Anuchit Jewyee
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Ms. Sarocha Charoenvai, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Professor Phadungsak Rattanadecho, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

This thesis presents a study of the drying process that affect drying kinetics and mechanical properties and physical properties of the (durian peels) particleboards by using a combined unsymmetrical multi-feed microwave and hot air-continuous belt system. In this study, the (durian peels) particleboards are the experimental materials which are a mixture of durian fiber, durian powder and water. Mixture formula can be divided into 12 cases (as the following); 1:1:1, at 80, 90 and 100 Degrees Celsius, 1:1:1.5 at 80, 90 and 100 Degrees Celsius, 2:1:1.5 at 80, 90 and 100 Degrees Celsius, and 2:1:2 at 80, 90 and 100 Degrees Celsius. All square particleboard have a dimension of 20 centimeters width by length of 20 centimeters and by thickness of 1 centimeter. The internal structure of the drying machine includes 12 magnetrons, which are generating sources of 2.45 Gigahertz frequencies.

In all 12 cases of experiment use a constant microwave power of 4800 Watts. The drying process of particleboards made from durian peels uses a combined unsymmetrical multi-feed microwave and hot air-continuous belt system. An initial moisture content of the dried particleboards made from durian peels is about 30 - 40% (Dry Basis) at a temperature of 25 Degrees Celsius, the drying process carries out until the final moisture content decreases to 10 - 15% (Dry Basis).

The results showed that the process helps reducing amount of drying time of (durian peels) particleboard as well as waste reduction process. In additions, the mechanical and physical properties of particleboard are more effective comparing to the hot-air drying process.

**Keywords:** drying process using microwave energy, continuous belt system, particleboards from durian peel

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และอาจารย์ ดร.สโรชา เจริญวัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ อาจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ และอาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย กรรมการสอบที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ข้อเสนอแนะรวมถึงแนวทางการแก้ปัญหาและจัดหาอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำวิจัย ทำให้ผู้เขียนทำงานคล่องไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือต่าง ๆ ดังนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนในการวิจัย หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME.) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ เครื่องอบระบบไมโครเวฟชนิดปั่นคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อน และสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องและเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ผศ.ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ และ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดกรรมป่าไม้ กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องทดสอบความแข็งแรงของแผ่นวัสดุ และอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนการอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำงานวิจัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนช่วยอื่น ๆ ที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ก้าวหน้ามา โดยตลอดจนประสบความสำเร็จทุกท่าน และกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนของผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนและให้คำแนะนำต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา หากมีท่านใด สถานที่ใดหรือองค์กรใดที่ผู้วิจัยมิได้กล่าวถึง ผู้วิจัยต้องขออภัยและขอขอบคุณในความช่วยเหลือต่าง ๆ เหล่านั้นไว้ ณ ที่ด้วย

อนุชิต จิวหทัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	7
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอรุน .....	12
2.3 ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ .....	20
2.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก .....	21
2.5 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	23
2.6 สมการพื้นฐาน (Basic Equation) .....	30
2.7 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ .....	31
2.8 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept) ...	32
2.9 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect Transmit and Absorb) .....	33
2.10 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ .....	35
2.11 ความชื้นในวัสดุ .....	36
2.12 การถ่ายเทความร้อน โดยการนำ (Conduction) .....	39
2.13 การถ่ายเทความร้อน โดยการพา (Convection) .....	40

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.14 พลังงานความร้อน .....	41
2.15 พลังงานความร้อนที่ใช้ต่ำสุดและสูงสุด .....	42
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	43
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	50
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	50
3.2 อุปกรณ์ในการทดลอง .....	51
3.3 วิธีการทดลอง .....	56
4 ผลการทดลอง .....	66
4.1 ผลการทดลองการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดย ใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบ ลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง .....	66
5 สรุปผลการทดลอง .....	82
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	84
รายการอ้างอิง .....	85
ภาคผนวก .....	88
ภาคผนวก ก ASTM C518 มาตรฐานการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) .....	89
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	105
ประวัติผู้เขียน .....	149



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าความชื้น ค่าความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเปลือก ผลไม้แต่ละชนิด .....	2
2.1 การประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวกับไมโครเวฟ .....	11
3.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย .....	50
4.1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองก่อนอบ และหลังอบ .....	66
4.2 ภาพถ่ายทางความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ผ่านกระบวนการ อบแห้ง (10 min และ 70 min) .....	73
4.3 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ผิวด้านนอกแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง กำลังขยาย 1,500 เท่า .....	79
4.3 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ด้านในแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองกำลังขยาย 1,500 เท่า .....	80

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ปริมาณผลผลิตทุเรียนในประเทศไทยใน 5 ปีซ้อนหลัง .....	1
2.1 สเปคตรัมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ .....	7
2.2 การแพร่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุต่าง ๆ .....	9
2.3 การเกิดความร้อนภายในวัสดุ .....	10
2.4 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป .....	13
2.5 โครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (Cellular Capillary) .....	14
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพูนและ ค่าการอึมตัวของน้ำที่อนุภาคของแข็งต่างกัน .....	15
2.7 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูนแบบคาพิลลารีต่างกัน .....	15
2.8 ไดอะแกรมกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน .....	16
2.9 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกควบคุมการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูน ..	17
2.10 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period) .....	19
2.11 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period) .....	20
2.12 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งสิ้นสุดท้าย (End Stage of Drying) .....	20
2.13 อันตรกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (Electric Field) .....	22
2.14 องค์ประกอบพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ .....	23
2.15 ภาพตัดขวางของแมกนีตรอน .....	25
2.16 โครงสร้างเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) .....	26
2.17 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสะท้อนกลับ .....	27
2.18 โครงสร้างอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (3-Stub Tuner) .....	27
2.19 ตัวอย่างของระบบทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสายพายลำนํ้าเลี้ยง .....	29
2.20 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก .....	33
2.21 ลักษณะของพาราหลังการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสายพานลำนํ้าเลี้ยงแบบต่อเนื่อง .	43
2.22 โครงสร้างภายในของยางพาราที่วัดจาก SME ที่กำลังขยายต่างกัน .....	44
3.1 อุปกรณ์การทดลอง .....	52
3.2 เตาอบลมร้อน (Hot Air Oven) .....	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

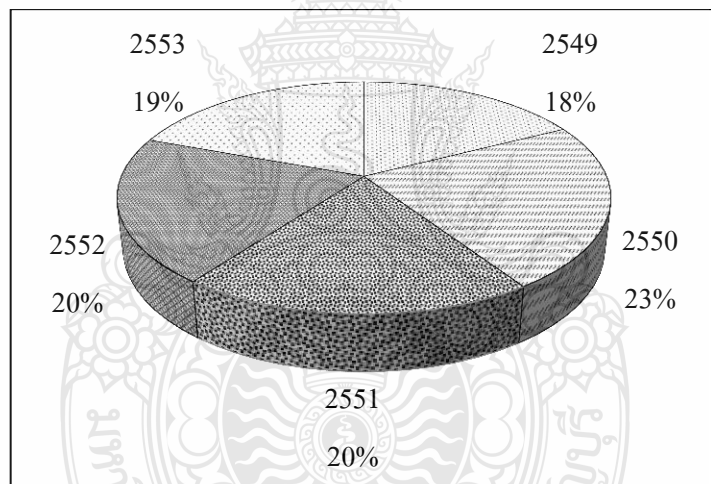
ภาพที่	หน้า
3.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) .....	53
3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของแผ่นวัสดุ .....	53
3.5 เครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) .....	55
3.6 กล้องถ่ายภาพทางความร้อน .....	55
3.7 แผนผังกระบวนการเตรียมวัตถุดิบผงเปลือกทุเรียนหมอนทองและ เส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	56
3.8 กระบวนการเตรียมผงเปลือกทุเรียนหมอนทองและเส้นใยเปลือกทุเรียน .....	57
3.9 แผนผังกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดย ใช้ผงเปลือกทุเรียนเป็นตัวเชื่อมประสาน (กาว) แทนกาวสังเคราะห์ .....	58
3.10 กระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองและ ผงเปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	59
3.11 แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	60
3.12 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ .....	61
3.13 วิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ .....	61
3.14 วิธีการตรวจสอบ โครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) .....	64
3.15 การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน .....	64
3.16 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) .....	65
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลาในกรณี 1 - 4 .....	67
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลาในกรณี 5 - 8 .....	69
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลาในกรณี 9 - 12 .....	71
4.4 การบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	75
4.5 ค่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	76
4.6 ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดของแผ่นขึ้นไม้อัดจาก เปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	77
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นขึ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหมอนทอง .....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณภาพอยู่ในระดับต้น ๆ ของโลกเช่น ข้าว ข้าวโพด ผัก ผลไม้ สมุนไพร และเครื่องเทศ ฯลฯ เมื่อถึงฤดูกาลจะมีผลผลิตออกมาเป็นจำนวนมากจึงทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรจำนวนมากจึงได้มีแนวคิดในการนำวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรจำพวกเปลือกผลไม้มาผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัด เช่น เปลือกทุเรียน [1] เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตทุเรียนรายใหญ่ของโลก (ปี 2549 - 2553) เฉลี่ยปีละ 6,804,139 ตัน ดังแสดงรายละเอียดแต่ละปีในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ปริมาณผลผลิตทุเรียนในประเทศไทยใน 5 ปีย้อนหลัง (หน่วย: %)

พื้นที่ปลูกทุเรียนกระจายอยู่ใน 26 จังหวัด ซึ่งอยู่ในภาคตะวันออกและภาคใต้ของประเทศไทย ตัวอย่าง เช่น 3 จังหวัดทางภาคตะวันออกคือ จังหวัดจันทบุรี จังหวัดระยองและจังหวัดตราดมีผลผลิตประมาณ 381,667 ตัน (ร้อยละ 5.25 ของผลผลิตรวม) ช่วงเก็บผลผลิตในเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม และทางภาคใต้ เช่น จังหวัดชุมพร จังหวัดสุราษฎร์ธานีและจังหวัดนครศรีธรรมราชซึ่งมีผลผลิตประมาณ 215,401 ตัน (ร้อยละ 29.63 ของผลผลิตรวม)ช่วงเก็บผลผลิตในเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม การบริโภคทุเรียนใช้บริโภคภายในประเทศ ประมาณร้อยละ 25 (545,00 ตัน) ส่งออก

ร้อยละ 25 (182,00 ตัน) การส่งออกทุเรียนส่งออกเป็นทุเรียนแช่แข็ง ทุเรียนกวนและทุเรียนอบแห้งมีมูลค่าการส่งออกในปี 2549 รวมทั้งสิ้น 3,292.52 ล้านบาท สำหรับปี 2550 มูลค่าการส่งออกเดือนมกราคมถึงเดือนสิงหาคมรวมเท่ากับ 2,850 ล้านบาท จากข้อมูลดังกล่าวส่งผลให้มีวัสดุเหลือใช้จำพวกเปลือกทุเรียนมีแนวโน้มสูงขึ้นจำนวนมากถ้าไม่สามารถกำจัดขยะเหล่านี้จะส่งผลทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งอดีตได้มีนักวิจัยได้ทำการวิจัยโดยนำเส้นใยจากเปลือกทุเรียน มาผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดที่มีค่าการนำความร้อนต่ำเพื่อใช้เป็นวัสดุในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน [2] เนื่องจากเส้นใยทุเรียนมีค่าการนำความร้อนต่ำ เท่ากับ 0.0921 (W/m.K) เมื่อเทียบกับเปลือกผลไม้ชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน

**ตารางที่ 1.1** ค่าความชื้น ค่าความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเปลือกผลไม้แต่ละชนิด [2]

ชนิดของเปลือกผลไม้	ค่าความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าความชื้น (%wb)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)
เปลือกสับปะรด	660	79.759	0.1149
เปลือกเงาะ	636	76.996	0.1031
เปลือกทุเรียน	472	80.683	0.0921
เปลือกมะพร้าว	330	88.051	0.0779
เปลือกส้มโอ	670	78.925	0.1240
เปลือกมะม่วง	580	61.240	0.1119

ซึ่งในกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการอบแห้งไม่ว่าจะด้วยวิธีธรรมชาติหรือนำพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ ในบางครั้งผลิตไม้ทันตามความต้องการหรือหากทันตามความต้องการจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและได้ประสิทธิภาพไม่คุ้มเท่าที่ควรส่งผลให้ต้องหากรรมวิธีการผลิตที่ช่วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพดี สะอาด ใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นที่สุดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาที่รวดเร็วเพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต กรรมวิธีการอบแห้งนั้นโดยวัตถุประสงค์ในการทำนั้นเพื่อรักษาผลิตภัณฑ์ให้มีอายุยืนยาวขึ้น เพื่อไล่ความชื้นออก เช่นในการอบดินก่อนนำไปเผา หรือในยางทำการไล่ความชื้นโดยกรรมวิธีทางธรรมชาติ เช่น การตากแดดทำให้เกิด

ปัญหาต่าง ๆ ต่อผลิตภัณฑ์รวมไปถึงความไม่สม่ำเสมอของพลังงานทางธรรมชาติทำให้การอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่แน่นอน ส่วนการอบแห้งโดยใช้พลังงานลมร้อนซึ่งมีการใช้กันอย่างกว้างขวางนั้นมักจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป เพราะใช้อุณหภูมิที่สูงมาก รวมทั้งระยะเวลาที่ยาวนานเกินไปรวมถึงการใช้พลังงานที่ไม่คุ้มค่าเต็มประสิทธิภาพเนื่องจากการสูญเสียในเรื่องพลังงานความร้อนให้กับธรรมชาติมาก การอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่บริเวณผิวนอกของผลิตภัณฑ์กับผิวชั้นในของผลิตภัณฑ์ ด้วยการให้ความร้อนจากผิวนอกถ่ายเทเข้าผิวชั้นในซึ่งหลักการนี้มักจะทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ผลิตภัณฑ์อาจเกิดรอยร้าวเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันแก๊สภายในวัสดุหรือการขยายตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้างอันเนื่องมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอและผลิตภัณฑ์อาจเกิดรอยไหม้เนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งผลิตภัณฑ์ส่งผลให้อุณหภูมิบางส่วนสูงมากจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นผลเสียที่เกิดจากการอบแห้งโดยทั่ว ๆ ไป จึงได้มีการพัฒนาการอบแห้งขึ้นมาใหม่โดยที่ผลิตภัณฑ์สามารถรักษาคุณภาพได้ดีเหมือนเดิมและในขณะเดียวกันก็ได้ความชื้นออกมาได้มากและเร็วกว่าวิธีเดิม คือการใช้คลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้งในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางความร้อนเพื่อใช้ในการแปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม เช่น [3] ในปี 2548 มีนักวิจัยได้ทำการอบแห้งไม้โดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องและการอบแห้งไม้โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด  $TE_{10}$ ) โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ กำลังที่ป้อนเข้าไปและระยะเวลาที่ใช้ในการอบที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของไม้ เช่น ความชื้นสุดท้ายสีของเนื้อไม้รวมถึงคุณภาพเชิงกล จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของไม้ที่อบโดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องกับการอบแห้งโดยใช้เตาอบแบบการพาความร้อน พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นจะช่วยประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาใช้ในกระบวนการอบแห้งได้ถึง 25 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาอบแบบพาความร้อน ซึ่งงานนี้ได้รับความร้อนทั่วทั้งปริมาตรอย่างสม่ำเสมอและยังเป็นการใช้พลังงานที่เต็มประสิทธิภาพ รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลของไม้ดีขึ้น ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยคุณสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ศัพท์ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เราเรียกว่าวัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุไดอิเล็กตริกหมายถึงวัสดุที่ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง (Dipoles) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อน

ภายในขึ้น (Internal Heat Generation) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะกระจายความร้อนจากภายในสู่ผิวภายนอก ดังนั้น [4] ในปี 2547 จึงได้มีการศึกษากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่วัสดุไดอิเล็กตริก โดยเน้นการศึกษาไปที่จลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของขึ้นทดสอบคือ ยางพารา เซรามิกส์และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถช่วยประหยัดพลังงาน ลดระยะเวลาในการอบแห้งชิ้นงานและชิ้นงานได้รับความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตร สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ ทำให้ควบคุมคุณภาพของวัสดุได้ง่ายและการกระจายความชื้นภายในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอซึ่งจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบธรรมดา และ [5] ต่อมาได้มีนักวิจัยทำการศึกษารอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพาดำเฉียงอย่างต่อเนื่อง โดยวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้คือ วัสดุขึ้นน้อย (Nonhygroscopic Material) ได้แก่ แพคเบดวัสดุพรุน (Porous Packed Bed) และวัสดุขึ้นมาก (Hygroscopic Material) ได้แก่ ชิ้นกล้วยหั่นบาง (Banana Sliced) โดยศึกษาชนิดของกระบวนการอบแห้ง ทิศทางการป้อนคลื่นและอุณหภูมิพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง พบว่าจากการอบวัสดุพรุน (แพคเบด) การป้อนคลื่นไมโครเวฟด้านบนควาดีและใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นทำการอบแห้งวัสดุขึ้นมาก โดยใช้ชิ้นกล้วยหั่นบาง พบว่าลักษณะการอบแห้งแบบไฮบริคโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมบรรยากาศที่ 30°C เป็นกรณีศึกษาที่ดีที่สุดและจากการพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพบว่าพลังงานที่ใช้ภายในระบบและคุณภาพของกล้วย (สีและโครงสร้าง) สามารถนำผลการทดลองไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

จากกระบวนการอบแห้งโดยใช้เตาไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพาดำเฉียงอย่างต่อเนื่อง นั้นทำให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพ ช่วยลดระยะเวลาในการอบ ประหยัดพลังงานและสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ทั้งทางกายภาพและทางกล ดังนั้นการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งไม้อัดสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งสำหรับในงานอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการเสนอการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิจัยกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้คลื่นไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้คลื่นไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.2.3 เพื่อศึกษาระดับโครงสร้างระดับอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

1.2.4 เพื่อศึกษาลักษณะของภาพถ่ายทางความร้อนหลังอบด้วยคลื่นไมโครเวฟของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริก สมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิความชื้นคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นชิ้นไม้อัดตรวจสอบความแข็งแรงและโครงสร้างภายในของชิ้นไม้อัดหลังจากการอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่มีความชื้นอยู่ที่ 30 - 40% Dry Basis ให้มีความชื้นสุดท้ายที่ 10 - 15% Dry Basis

1.3.3 แหล่งพลังงานที่ใช้คือพลังงานความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยมีอุโมงค์เป็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้าตัด  $0.45 \text{ m} \times 0.90 \text{ m}$  มีความยาวอุโมงค์ 3 m ภายในติดตั้งแมกนีตรอนกำลังต่ำ ความถี่ที่ใช้คือ 2.45 GHz

1.3.4 ใช้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบคงที่เท่ากับ 4800 W



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเข้าใจถึงอัตรการยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองและนำเอาความรู้ไปออกแบบระบบไมโครเวฟในการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.4.2 สามารถนำงานวิจัยนี้ไปเป็นแนวทางเพื่อทำการพัฒนาการอบแห้งขึ้นไม้อัดในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.4.3 ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีต่างประเทศ

1.4.4 ลดมลภาวะขยะจากเปลือกทุเรียน



## บทที่ 2

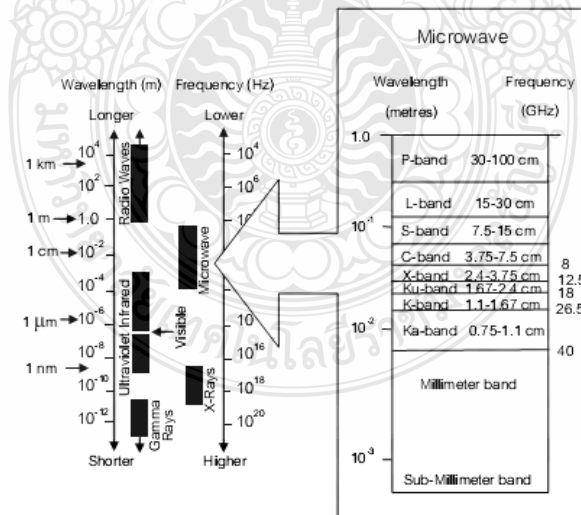
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ [6]

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟเป็นหัวใจหลักของงานวิจัย โดยองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีดังนี้

##### 2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นของไมโครเวฟ (0.3 - 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm - 0.3 mm) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม การให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและต่างจากวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ เมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกพลังงานของไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยวัสดุไดอิเล็กตริก การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า (ใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ) ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายใน



ภาพที่ 2.1 สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ [7]

ตามภาพที่ 2.1 ช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะอยู่ติดกับช่วงความถี่คลื่นของวิทยุที่ใช้ในการกระจายเสียง แต่ช่วงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมักจะนำไปใช้สำหรับการโทรคมนาคม เช่น โทรศัพท์มือถือ และสัญญาณเรดาร์ เพื่อป้องกันปัญหาการขัดแย้ง จึงได้มีการจำกัดช่วงความถี่เฉพาะสำหรับการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์และการแพทย์ เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งความถี่ของรังสีบางอย่างยอมให้นำไปใช้งานในด้านอื่นได้ เช่น อุปกรณ์สื่อสารความถี่ไมโครเวฟในช่วงความถี่ ISM คือที่ตำแหน่ง 433 MHz 915 MHz และ 2,450 MHz ความถี่แรกไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป ความถี่ที่สองไม่อนุญาตให้ใช้โดยทั่วไปในทวีปยุโรป นอกจากได้รับอนุญาตโดยต้องจำกัดการรบกวน เนื่องจากความถี่ 915 MHz มีข้อได้เปรียบบางอย่างในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม สำหรับเตาอบไมโครเวฟบ้านจะใช้กับความถี่ 2,450 MHz เท่านั้น โดยมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 in (12.192 cm) ปัญหาของการทำความร้อนด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟนั้นเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นรวมทั้งสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงต้องรู้สมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก รวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิความชื้น และสมบัติไดอิเล็กตริกด้วย

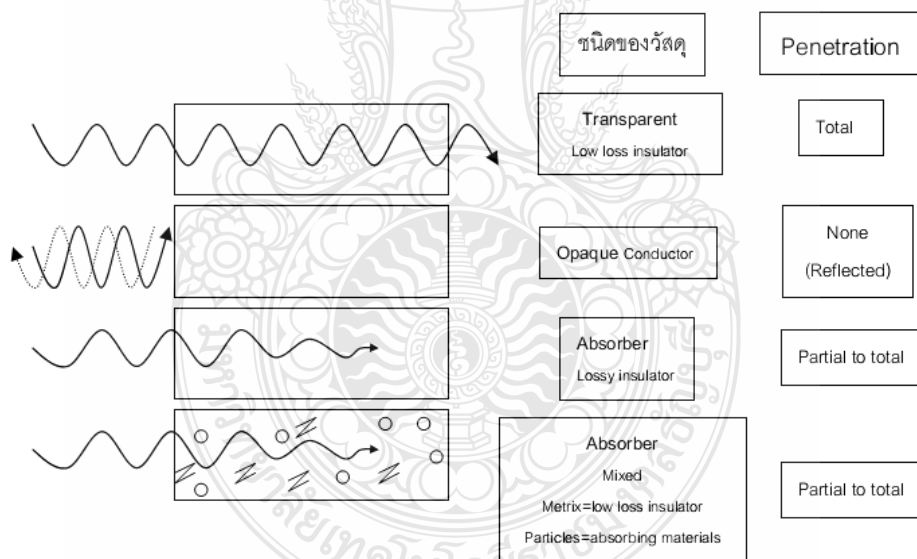
ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟแพร่ผ่านอากาศ พลังงานซึ่งพิจารณาให้มีสมบัติเหมือนอนุภาคที่ไม่มีมวลเรียกว่า โฟตอน (Photon) นั้นจะแพร่ผ่านพื้นที่ว่างด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s) อนุภาคจะเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันเสมอและอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นสำหรับในอากาศ คลื่นไมโครเวฟจะแพร่กระจายด้วยความเร็วแสงซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่พลังงานสามารถเดินทางได้ แต่สำหรับวัสดุเมื่อไมโครเวฟผ่านเข้าไปภายในเนื้อวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ถูกดูดซับไว้ไปเป็นความร้อนนั้น ขนาดของความยาวคลื่นจะลดลงเรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากการส่งถ่ายของพลังงานนั่นเอง โดยความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ากำลังจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) เมื่อเทียบกับระยะจากผิววัสดุความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่น (Penetration Depth) คือระยะจากผิววัสดุเข้าไปยังภายในเนื้อวัสดุซึ่งทำให้สนามไฟฟ้ากำลังลดลงไปเป็น 0.38 เท่าจากผิววัสดุ โดยที่คลื่นนี้ยังคงแทรกสอดเข้าไปได้เมื่อเลขตำแหน่งนี้ไปการแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นจะมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของแสงผ่านวัสดุชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 2.2 และสามารถอธิบายได้ ดังนี้

1. วัสดุโปร่งแสง (Transparent Material) เมื่อคลื่นไมโครเวฟเจอวัสดุที่โปร่งแสงคลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านไป เช่น กระจก แก้ว พลาสติกบางประเภท (โพลีโพรพิลีน อะคริลิก) เป็นต้น

2. วัสดุทึบแสงที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Opaque Material) เมื่อคลื่นไมโครเวฟเจอวัสดุทึบซึ่งมีความเป็นตัวนำสูง เช่น โลหะ เหล็ก เป็นต้น คลื่นจะถูกสะท้อนกลับโดยที่ สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบวัสดุส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระในวัสดุเกิดการเคลื่อนที่

3. Absorber Material ส่วนมากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวน เช่น ยาง วัสดุโพลีเมอร์ เป็นต้น วัสดุประเภทนี้ เมื่อคลื่นไมโครเวฟส่งผ่านจะมีความสามารถในการดูดซับคลื่นบางส่วนและเกิดการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความลึกที่คลื่นสามารถส่งเข้าไปภายในเนื้อวัสดุเพื่อทำให้เกิดความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของวัสดุ

4. กรณีผสมอนุภาคของสารบางอย่างในวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ (Absorber Mixed) อนุภาคชนิดนี้มีคุณสมบัติ คือ เมื่อสนามไฟฟ้าตกกระทบอนุภาคจะเกิดความร้อนขึ้นและมีคุณสมบัติเป็นเหมือนแหล่งความร้อนตัวหนึ่ง (Source) ดังนั้นจึงมีการใช้อนุภาคเหล่านี้ผสมในวัสดุพวกฉนวนในกรณีที่ต้องการให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุสูง อนุภาคของสารที่ใช้ผสมในปัจจุบัน เช่น คาร์บอน แกรไฟต์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 การแพร่ของคลื่นไมโครเวฟผ่านวัสดุต่าง ๆ [7]

### 2.1.2 ข้อดีของการทำความร้อนไมโครเวฟ (The Advantages of Microwave Heating)

1. ใช้เวลาน้อย (High Speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุ ที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary Part)

2. การทะลุทลวงของพลังงาน (Energy Penetration) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุการให้ความร้อนแบบนี้จะให้ความร้อนจากผิวนอกวัสดุจากก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังใช้เวลามากเพราะข้อจำกัดทางการนำความร้อน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า



ภาพที่ 2.3 การเกิดความร้อนภายในวัสดุ [6]

3. ความสามารถในการเลือกวัสดุรับความร้อน (Selective Energy Absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อโดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น

4. การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Instantaneous Electronic Control) นั้น อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่า เช่น เตาอบ ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาอย่างมาก ภายในเสี้ยววินาที

5. มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อให้ปริมาณความร้อนเท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10% - 30% ในขณะที่คลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ (60% - 70%)

6. ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Microwave Processing is Clean) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิง ในการเผาไหม้

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม (เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก งานทางการแพทย์

**ตารางที่ 2.1** การประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟ [6]

วัสดุ (Materials)	กระบวนการ (Process)
Chemistry	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Continuous Drying of fine Chemicals</li> <li>2. Continuous Heating of Corrosive and Abrasive Product</li> <li>3. Heating and Drying of Metal Oxide</li> <li>4. Reaction Accelerator in Chemicals Processing</li> <li>5. Heating/Liquefying of High Viscous Chemical Raw- Materials</li> <li>6. Drying of Peroxide/Explosive Materials</li> <li>7. Continuous High Process Thermo Chemicals Conversion of Organic Product</li> </ol>
Pharmaceutical	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vacuum Drying of Tables and Active Ingredients Removing Solvents Under Explosive Protection and CGMP</li> <li>2. Pasteurization/Improvement of Shelf Life of Pharmaceutical Product</li> <li>3. Heating/Liquefying of High Viscous Pharmaceutical and Cosmetically Raw- Materials</li> <li>4. Continuous High-end Vacuum Drying</li> <li>5. Ultra-Fast Heating/Sterilization of Sera and Protein Product</li> </ol>
Ceramics	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Heating and Drying of Ceramics Goods</li> <li>2. Drying of Ceramics Catalyses</li> <li>3. Drying of Fiber Ceramics</li> <li>4. Continuous Sintering of Ceramics Pellets</li> <li>5. Sintering of Oxide Ceramics</li> </ol>
Plastics	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Heating of Laminated Sheet and Board</li> <li>2. Polymerization of Fiber Glass Reinforced profiles</li> <li>3. Preheating of Plastic Profiles</li> <li>4. Heating of Epoxy Pipes/Tube</li> <li>5. Drying of plastic Raw- Materials and Granulate</li> <li>6. Heating of Plastic Web and Sheet</li> </ol>
Medical	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Heating/Melting of Polyamide Tubing Used for Infusion System, Catheter etc.</li> <li>2. Drying of Dialyses and Membrane Products</li> </ol>
Paper/Sheet material	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Drying/Preheating of Paper Webs in the Printing Industry</li> <li>2. Drying of Adhesive Coatings On Paper Webs</li> </ol>

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์น [6]

กลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพอร์นซึ่งความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟต่อไป

### 2.2.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์น

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ในเชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพอร์นในระหว่างกระบวนการอบแห้งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญก่อนที่จะไปออกแบบระบบที่ใช้งานในทางปฏิบัติกระบวนการอบแห้งวัสดุจะคาบเกี่ยวกับกระบวนการเบื้องต้นที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองกระบวนการนั้นก็คือ

1. กระบวนการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ ความร้อนที่ถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำ เป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุเพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหยความชื้นที่มีอยู่

2. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือ มวลสารที่ถ่ายเทอาจอยู่ในรูปของเหลวภายในเนื้อวัสดุและที่ผิวของวัสดุ

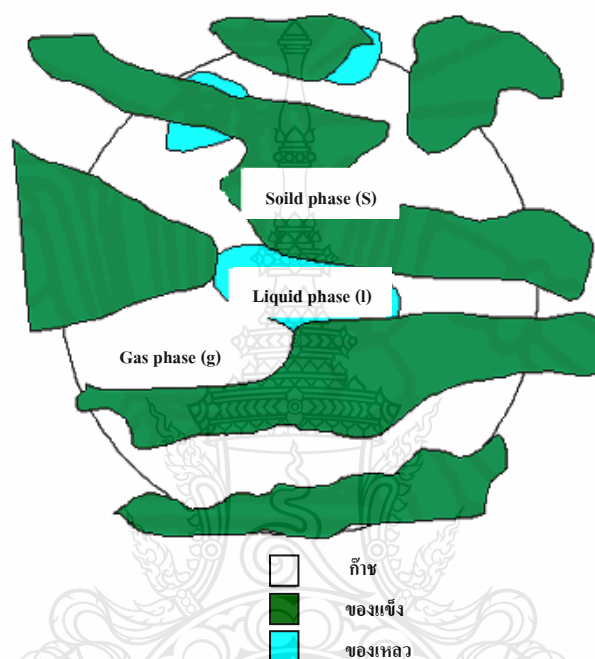
ปัจจัยสำคัญที่ครอบคลุมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเพื่อหาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการ เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุเป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

การอบแห้งวัสดุพอร์นที่ไม่อิมพอร์ตจะต้องเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนตัวของความชื้น (ประกอบไปด้วยของเหลวไอน้ำและอากาศ) ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันในวัสดุพอร์นอย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของกระบวนการอบแห้งจะมีความซับซ้อนเป็นอันมากเนื่องมาจากการคาบเกี่ยวกันของสมการหลายชุดที่เป็นลักษณะไม่เชิงเส้น รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อนกว่ากรณีทั่ว ๆ ไปอย่างไรก็ตามปัจจุบันการคำนวณของคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมากสามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารก็มีการพัฒนาเป็นอย่างมากเมื่อมีคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมาช่วยในการคำนวณ

### 2.2.2 รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพอร์น

วัสดุส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพอร์น กล่าวคือ ตัววัสดุประกอบด้วยสสารที่มี 3 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (Solid Phase หรือ Solid Matrix) ของเหลว (Liquid phase) และก๊าซ (Gas Phase) ที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพอร์น (Void) ในภาพที่ 2.4

ตัวอย่างวัสดุพอร์นที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรมปฐพี Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะ ในงานวิศวกรรมเคมีจนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกลและเคมี เนื้อเยื่อต่างๆ ผิวหรือ Membrane ในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์รวมถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมเกษตร

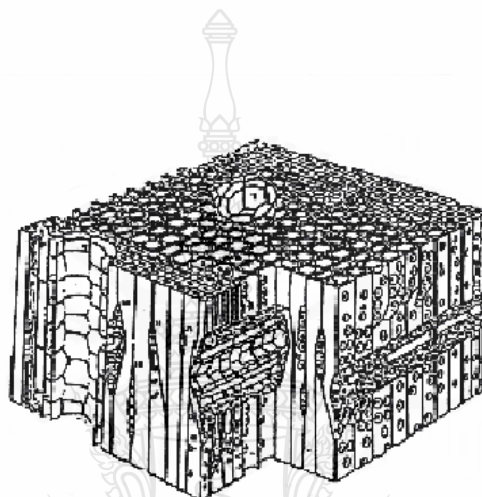


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของวัสดุพอร์นทั่วไป [8]

เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างของวัสดุพอร์น เราสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบใหญ่ ๆ ชนิดแรก ของเหลวหรือความชื้นจะเคลื่อนตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็ง (Solid Matrices) ไปตามช่องว่าง (Pores) ที่เกิดขึ้นนั้น จากส่วนประกอบของผิวอนุภาคของแข็งโดยที่ความชื้นดังกล่าวนี้ไม่สามารถส่งผ่านหรือเคลื่อนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็งได้ เราเรียกวัดพอร์นชนิดนี้ว่าวัสดุพอร์นแบบไม่ชื้นมาก (Nonhygroscopic Porous Media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพอร์นชนิดนี้พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพอร์นมีขนาดใหญ่พอ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอกภายในช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย โครงสร้างของวัสดุพอร์นชนิดที่สองความชื้นจะยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งจะเป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้างเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพอร์นชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่าง



อนุภาคของแข็งมีขนาดรัศมีเล็กมากประมาณ 0 ถึง 1 nm เราจะเรียกวัดสุพูนชนิดนี้ว่าวัดสุพูนแบบชื้นมาก (Hygroscopic Porous Media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัดสุพูนบางชนิด เช่นวัดสุพูนชีวภาพที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจน ตัวอย่างเช่น เนื้อไม้ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งจะมีโครงสร้างเนื้อวัดสุที่ซับซ้อนที่เรียกว่าโครงสร้างวัดสุพูนแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (Cellular Capillary) ซึ่งในกรณีนี้ การเคลื่อนที่ของความชื้นจะไม่เสถียรภาพและการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจะทวีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก

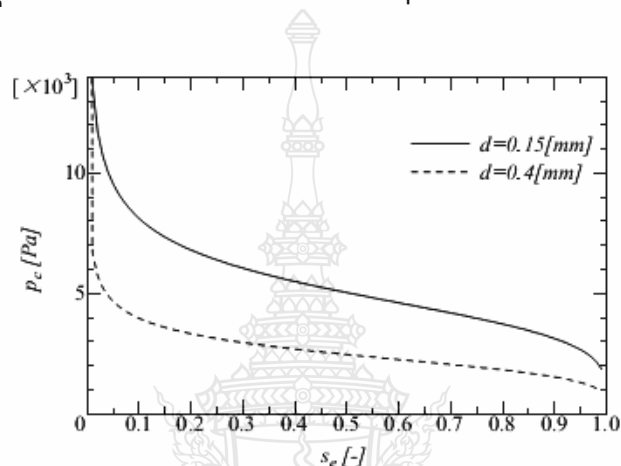


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างวัดสุพูนแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (Cellular Capillary) [8]

สำหรับวัดสุพูนในกรณีแรก (Nonhygroscopic Porous Media) ส่วนใหญ่จะเรียกว่าวัดสุพูนแบบคาพิลลารี (Capillary Porous Media) เนื่องจากของเหลวหรือความชื้นภายในวัดสุจะเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพรุน เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) โดยที่ความดันคาพิลลารีนี้เป็นขั้นของแรงดึงผิวมุมสัมผัสและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัดสุพูน ความดันคาพิลลารีสามารถนิยามได้ดังนี้คือ เมื่อของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกัน (Immiscible Fluids) (เช่นน้ำและอากาศ) เกิดการสัมผัสกันในช่องว่างของวัดสุพูน การไม่ผสมกันของของไหลสองชนิดทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันตลอดช่วงผิวรอยต่อเรียกว่าความดันคาพิลลารี ( $P_c$ ) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

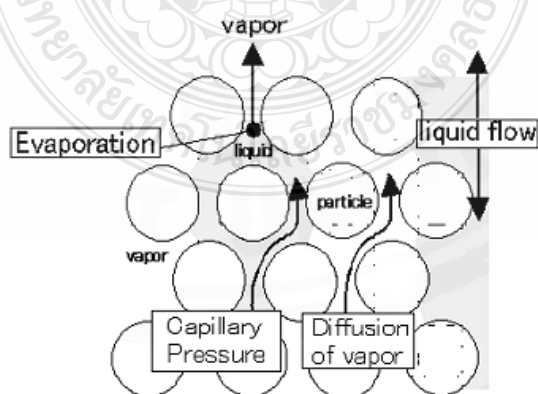
$$P_c = P - P_l \quad (2.1)$$

เมื่อ  $P$  คือความดันในของไหลที่มีสถานะแห้ง (Non-Wetting Phase) เช่น อากาศ ส่วน  $P_1$  คือ ความดันในของไหลที่มีสถานะเปียก (Wetting Phase) ความดันคาพิลลารีมีคุณสมบัติที่สมดุลและสัมพันธ์โดยตรงกับแรงตึงผิวระหว่างของไหลทั้งสองชนิด จากการศึกษาพบว่าค่าความดันคาพิลลารีเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอิมิตัวของของไหลสถานะแห้งเพิ่มขึ้น แต่ก็ขึ้นกับคุณสมบัติของความอิมิตัวของวัสดุ นั้นๆ ด้วย ภาพที่ 2.6 แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพอร์และคุณสมบัติของของไหลที่สภาวะต่าง ๆ



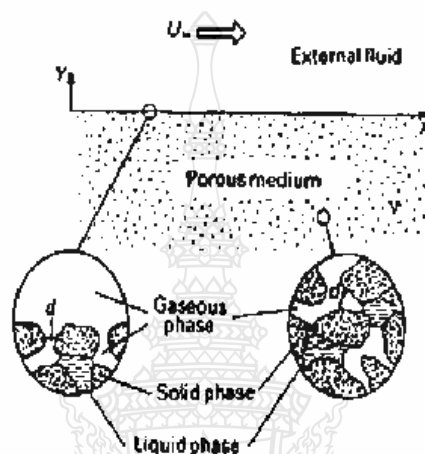
ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพอร์และค่าการอิมิตัวของน้ำที่อนุภาคของแข็งต่างกัน [6]

กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอน้ำในช่องว่างที่เป็นรูพอร์คือผลของการแพร่กระจายไอน้ำ (Vapor Diffusion Force) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's Law) ภาพที่ 2.7 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์แบบคาพิลลารี



ภาพที่ 2.7 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์แบบคาพิลลารีต่างกัน [6]

2.2.3 ลักษณะกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งของวัสดุพอรุน  
กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอรุนแบบคาพิลลารี  
อยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารีถือว่าเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวล  
ความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพอรุน แต่ในวัสดุพอรุนทั่วไปในทางปฏิบัติวัสดุพอรุนมีโครงสร้าง  
ซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



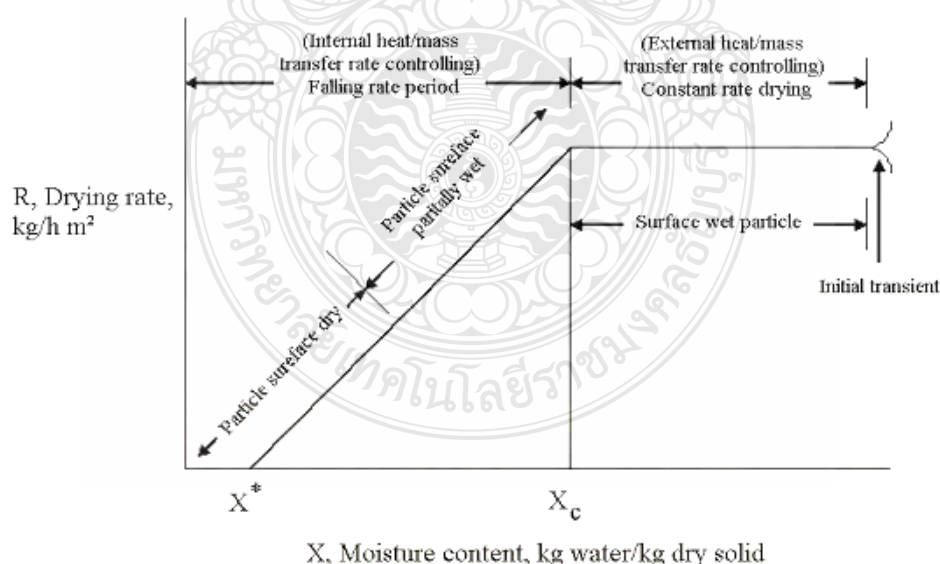
ภาพที่ 2.8 โดอะแกรมกระบวนการอบแห้งวัสดุพอรุน [6]

ภาพที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของวัสดุพอรุนที่เปียกชื้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะ  
ภายนอกคงที่ กล่าวคืออุณหภูมิความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ  
การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่างๆจะปรากฏขึ้น ภาพที่ 2.9  
โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้นสามารถสรุปได้ดังนี้

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

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจน เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้งทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุ รวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์หลักกลไกหลักด้วย

กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือคาบเวลาที่ อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพูนที่ เดิมเต็มที่ ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลา นี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content,  $x_c$ ) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุ เมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) โดยปกติคาบเวลานี้ใช้ระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่ อัตราการอบแห้งคงที่เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าสู่ใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้งค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) แสดงดังภาพที่ 2.9

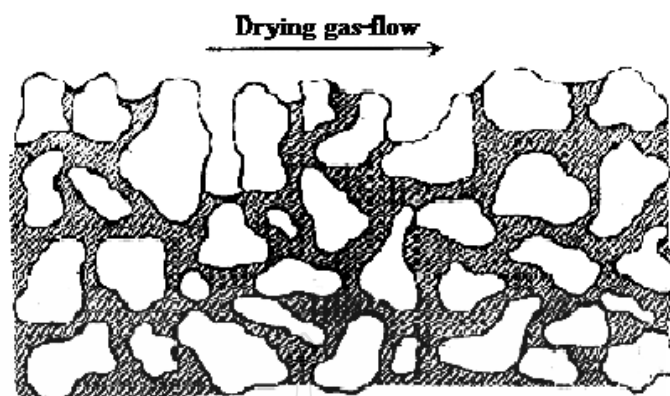


ภาพที่ 2.9 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกควบคุมการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูน [6]

2.2.4 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) โดยปกติเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมาก ๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย้อนของไอ หากอิทธิพลภายนอกถูกควบคุมให้คงที่อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหนังจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุพอรุนที่มาเติมเต็มที่ผิวหนังทำให้มีฟิล์มของเหลวปกคลุมที่ผิวหนังวัสดุตลอดเวลา ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้ คือพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารออกจากผิววัสดุ การถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface Diffusion) เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน อุณหภูมิผิวหนังของวัสดุสามารถประมาณได้ด้วยอุณหภูมิกระเปาะเปียก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่ายโดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Force Convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์

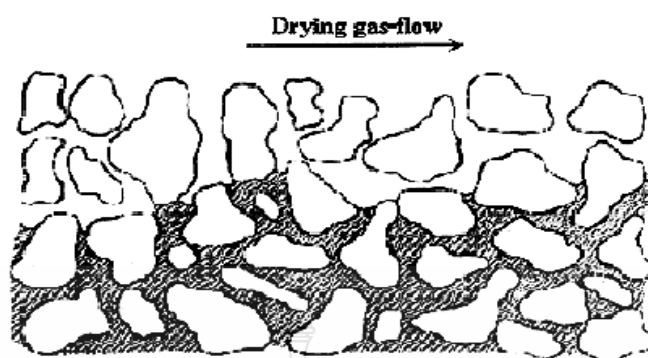
2.2.5 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายใน โครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหนังภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหนังวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดชั้นความแห้งในบางจุด ดังแสดงในภาพที่ 2.10

2.2.6 คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ เมื่อความชื้นมีค่าเข้าสู่ความชื้นวิกฤติซึ่งค่าของความชื้นวิกฤตินี้จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเคลื่อนตัวของความชื้นภายใน โครงสร้างที่แตกต่างกันของวัสดุเป็นสำคัญ น้ำที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหนังภายใต้อิทธิพลของความดันคาพิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะไปเติมเต็มแทนที่น้ำที่เพิ่งระเหยออกไปทำให้ฟิล์มของเหลวบาง ๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวหนังเกิดการแยกตัวในบางจุดแสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ปรัชการณที่อัตรการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period) [6]

คาบเวลาที่อัตรการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณในช่วงต้นของในคาบเวลาอัตรการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลงบางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาอัตรการอบแห้งลดลงระยะแรก (First Falling Rate Period) เมื่อให้กระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนชั้นของความแห้งก่อตัวขึ้นอย่างสมบูรณที่ผิวของวัสดุและเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 3.8 ช่วงนี้ เรียกว่าคาบเวลาอัตรการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period) การระเหยความชื้นในช่วงนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแห้ง (ความชื้นในวัสดุบริเวณนี้ระเหยออกหมด) กับชั้นวัสดุเปียก (เนื้อวัสดุบริเวณที่ยังมีความชื้นอยู่) ซึ่งเรียกว่าผิวการระเหย (Evaporation Front) หรือผิวการอบแห้ง (Drying Front) หรือขอบเขตของการเคลื่อนที่ (Moving Boundary) โดยที่ผิวการระเหยจะเคลื่อนที่ตลอดคาบเวลาของการอบแห้ง การระเหยตัวของความชื้นที่ผิวของการระเหย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกฎของเคลวิน (Kelvin's Law) ในคาบเวลาอัตรการเคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการ คาบเวลาอัตรการอบแห้งลดลงนี้อาจสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตรการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรัชการณ



ภาพที่ 2.11 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (Second Falling Rate Period) [6]

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่าความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังภาพที่ 2.12 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งในกรณีนี้ความชื้นที่เหลืออยู่ เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)



ภาพที่ 2.12 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย (End Stage of Drying) [6]

### 2.3 ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ [6]

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Magnetron) ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (Wave Guide) และบริเวณทำความร้อน (ที่วัสดุทำความร้อน (Applicator) การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดผ่านมายังท่อนำคลื่นและเข้าสู่บริเวณทำความร้อนตามลำดับ

คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อชนกับวัสดุทำความร้อนอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ ดังนั้น โดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟจะติดตั้งตัวคั่นคลื่น (Isolator) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อนเพื่อให้ระบบไมโครเวฟเกิดประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

บริเวณทำความร้อนเป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นเดี่ยว (Single - Mode) หรือเป็นคลื่นผสม (Multi - Mode) สำหรับบริเวณทำความร้อนที่ออกแบบมาเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเป็นคลื่นเดียวนั้นจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณทำความร้อน วัสดุทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังในการเลือกขนาดและชนิดวัสดุ เครื่องไมโครเวฟชนิดคลื่นเดี่ยว (Single-Mode) เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กหรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นน้อย (Low - Lossy Materials) แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ สำหรับเครื่องไมโครเวฟที่มีลักษณะเป็นคลื่นผสม (Multi-mode) สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า โดยทำให้บริเวณทำความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุและมีการเพิ่มความถี่จากแหล่งกำเนิดคลื่นทำให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การทำความร้อนภายในวัสดุมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นเครื่องไมโครเวฟลักษณะคลื่นผสมจึงเหมาะสำหรับการทำความร้อนวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นสูง (High - Lossy Materials) หรือเมื่อต้องการให้วัสดุที่ทำความร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

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

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบและตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดี่ยวเป็นหลัก

## 2.4 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก [6]

หลักการพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก เมื่อถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโมเลกุลของสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้ง โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า



โมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีสภาพเชิงขั้ว (Dipole) ที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่น การสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของสภาพเชิงขั้วทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

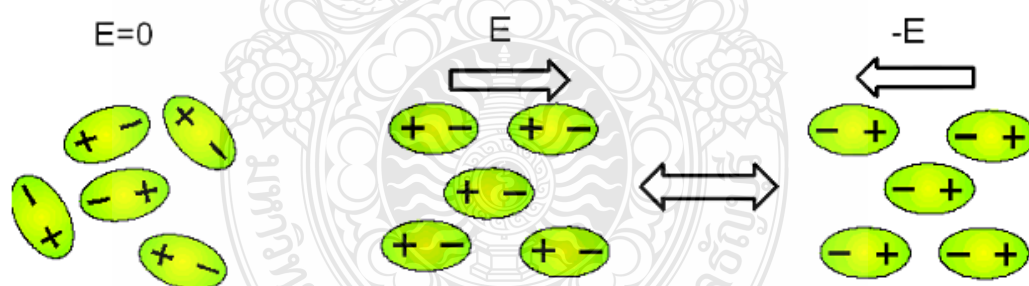
โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (Megahertz, MHz) ซึ่งข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (Radio Frequency) และคลื่นความถี่สำหรับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave Application)

กำหนดความถี่วิทยุไว้ดังนี้

- 1)  $13.56 \text{ MHz} \pm 0.05\%$  ( $\pm 0.00678 \text{ MHz}$ )
- 2)  $27.12 \text{ MHz} \pm 0.6\%$  ( $\pm 0.16272 \text{ MHz}$ )
- 3)  $40.68 \text{ MHz} \pm 0.05\%$  ( $\pm 0.02034 \text{ MHz}$ )

กำหนดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟดังนี้

- 4) 900 MHz (Depend on country)
- 5)  $2450 \text{ MHz} \pm 50 \text{ MHz}$



ภาพที่ 2.13 อันตรกิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (Electric Field) [6]

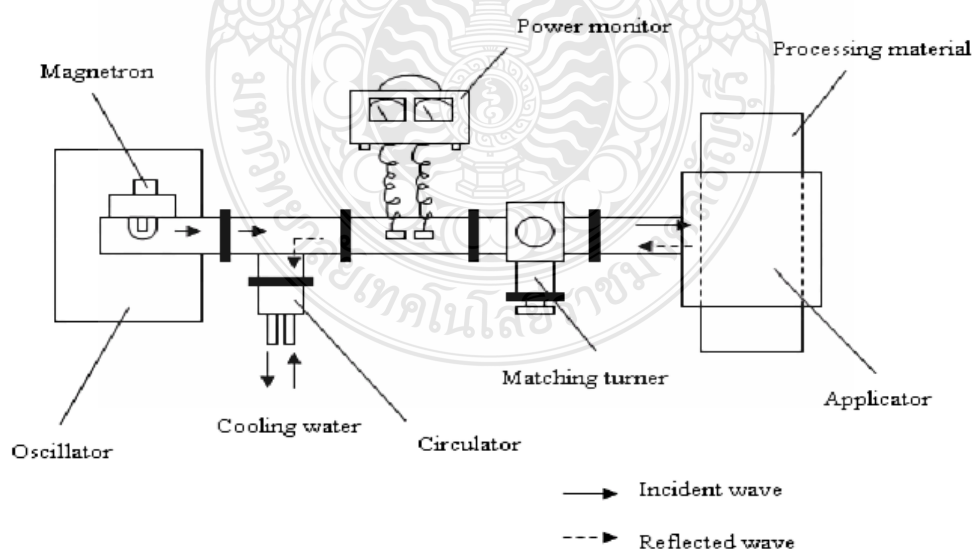
ในปัจจุบันเตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ที่ 2450 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 in (12.192 cm) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz มีความยาวคลื่นในอากาศจะเท่ากับ 13 in (33.02 cm) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 kW สามารถทำให้น้ำจำนวน 2.5 lb (1.134 kg) ระเหยได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ปัญหาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับโดยตรง

กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของอุณหภูมิการกระจายของความชื้นรวมทั้งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ ดังนั้นการรู้คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกรวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจึงมีความจำเป็น ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเองด้วย

## 2.5 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ [6]

ระบบไมโครเวฟทั่วไปประกอบด้วยส่วนหลัก 3 อย่าง คือ ตัวกำเนิดคลื่นท่อนำคลื่น และเตาอบ (Cavity) อุปกรณ์ง่าย ๆ พวกนี้จะมีความสำคัญตามหน้าที่ของมันเมื่อเข้าใจว่าเตาอบทำงานอย่างไร การทำงานภายในของคลื่นไมโครเวฟจะทำให้การระร้อนได้นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบส่วนประกอบและนำส่วนประกอบเหล่านี้มารวมกันเป็นระบบเดียวกันเมื่อเข้าใจถึงอิทธิพลต่าง ๆ ของเงื่อนไขไมโครเวฟ ก็จะสามารณำความเข้าใจที่มีอยู่ไปออกแบบไมโครเวฟขึ้นได้ ฉะนั้นอย่างน้อยต้องเข้าใจทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ในหัวข้อนี้จะสรุปการนำไปใช้งานได้

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริกมีกลไกเช่นเดียวกันแต่มีวิธีการในการที่ทำให้บรรลุเป้าหมายแตกต่างกันโดยระบบพื้นฐานของระบบเหล่านี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์และใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) ไปยังชิ้นงาน (Load) ที่อยู่ภายในแอปพลิเคชัน (Applicator)



ภาพที่ 2.14 องค์ประกอบพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ [9]

แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่น (Waveguide) ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในควิตี้ (Cavity) หรือ แอปพลิเคชัน (Applicator) เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุจะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) ไปซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของวัสดุและคุณลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟขณะชนกับวัสดุ อาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบไมโครเวฟจะติดตั้งตัวตัดคลื่น หรือที่เรียกทั่วไปว่า เซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นเพื่อที่จะลดพลังงานสะท้อนกลับนี้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner) มาติดตั้งระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ปรับให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับในตัววัสดุได้ดีขึ้น โดยที่การสะท้อนของคลื่นที่ผิววัสดุลดลง ส่งผลทำให้ระบบไมโครเวฟทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

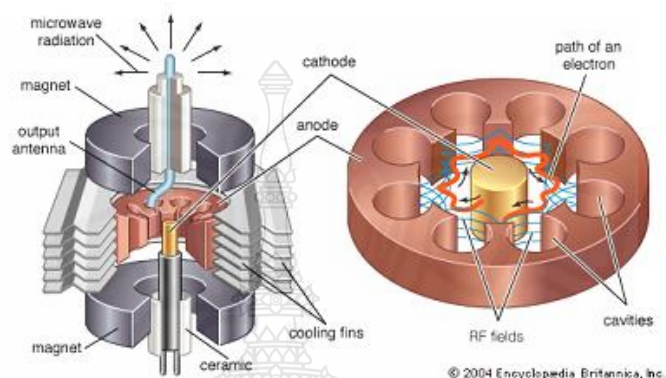
รายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละตัวภายในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ พร้อมหลักการการทำงานเบื้องต้น

### 2.5.1. แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator)

โดยแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator) จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟกระแสตรงและตัวแมกนีตรอน (Magnetron) หรือไคลสตรอน (Klystron) โดยตัวแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดอันหนึ่งในระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แมกนีตรอนเป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟ โดยอาศัยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (DC Energy) ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูง มาเป็นพลังงานไมโครเวฟ โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 70% - 90%

ภายในแมกนีตรอน ประกอบไปด้วยไส้หลอด (Filament) โดยแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วโคเดอหนึ่งขั้วของไส้หลอด (ทำจากขดลวดทั้งสแตน) และถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบ ๆ จะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดยแอนเทนนา (Antenna) ในการทำงานของแมกนีตรอนนั้น แมกนีตรอนจะถูกส่งจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3 - 4 V กระแส 10 A ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วโคเดอหนึ่งขั้วของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดเทียบกับขั้วแอโนด จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

และสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในช่องสุญญากาศระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมที่ทำให้แมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ออกมา



ภาพที่ 2.15 ภาพตัดขวางของแมกนีตรอน [9]

โดยทั่วไปแมกนีตรอนแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดแรกเป็นแมกนีตรอนที่ทำงานเป็นจิงหวะหรือพัลส์ (Pulsed Magnetron) ซึ่งประยุกต์ใช้ในงานเรดาร์ชนิดที่สองเป็นแมกนีตรอนที่ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous - Wave (CW) Magnetron) ซึ่งมักใช้ประยุกต์กับกระบวนการทางความร้อน เช่นที่ใช้ในเตาไมโครเวฟตามบ้านและกระบวนการทางอุตสาหกรรม

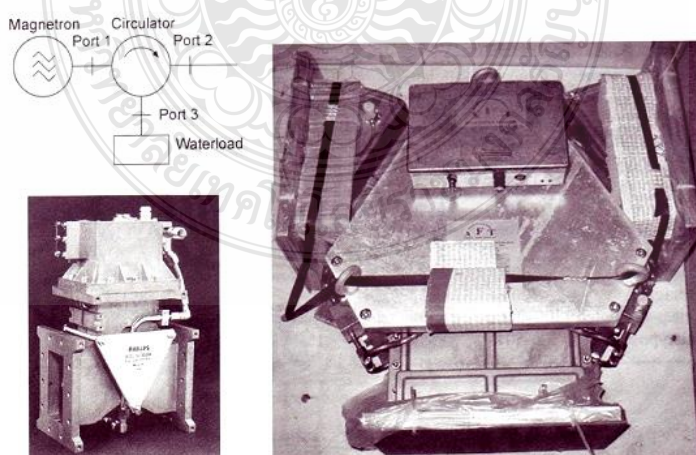
ขนาดกำลังของแมกนีตรอนที่ใช้ในอุตสาหกรรมคือ 100 W ถึง 30 kW ความถี่ 2450 MHz และ 5 kW ถึง 100 kW ความถี่ 915 MHz โดยทั่วไปจะใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (Water Cooling) ตัวแมกนีตรอนที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกำลังเท่ากับ 3 kW และหล่อเย็นด้วยน้ำ หากพิจารณาถึงอายุการใช้งานของแมกนีตรอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอายุการใช้งานของแมกนีตรอนขึ้นอยู่กับปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ นอกจากนั้นยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ อีกด้วยได้แก่

- 1) การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ส่งไป
- 2) อุณหภูมิ ปริมาณ และคุณภาพของน้ำหล่อเย็น
- 3) อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศหล่อเย็น
- 4) สภาพของการติดตั้ง เช่น การสั้น อุณหภูมิบรรยากาศ ฯลฯ
- 5) ขั้นตอนการติดตั้งแมกนีตรอน
- 6) ขั้นตอนการใช้งาน

จากการประมาณอายุการใช้งานของแมกนีตรอน โดยบริษัท Micro Denshi ประเทศญี่ปุ่น ทำการวัดจากแมกนีตรอน จำนวน 523 ตัว พบว่าอายุการใช้งานที่น้อยที่สุดที่พบคือ 1,000 ชั่วโมง หรือประมาณ 1 ปี ส่วนอายุเฉลี่ยของการใช้งานอยู่ที่ 6,400 ชั่วโมง และอายุการใช้งานที่พบคือ 10,000 ชั่วโมง ทั้งนี้อายุการใช้งานของแมกนีตรอนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเหตุผลดังที่ได้กล่าวในข้างต้น

### 2.5.2. อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Devices)

อุปกรณ์ป้องกันหลาย ๆ อย่างได้ถูกนำมาใช้กับระบบไมโครเวฟเพื่อป้องกันการสะท้อนของพลังงานไมโครเวฟในระดับสูงที่อาจทำลายแมกนีตรอนหรือโครสตอน โดยมีวิธีอย่างง่าย คือ มีสวิตช์ความร้อนซึ่งเป็นหลอดที่มีความไวต่อการทำความร้อนที่สูงจนเกินไปและตัดพลังงานได้ แต่อย่างไรก็ตามด้วยหลอดที่ใช้เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการป้องกันจึงได้มีวิธีอื่นเพิ่มเติมคือ การใช้ตัวตรวจวัดพลังงานที่สามารถกำหนดทิศทางได้ซึ่งช่วยลดพลังงานในส่วนที่กำลังเคลื่อนที่ไปข้างหน้ากับที่สะท้อนกลับและสามารถปิดระบบได้เมื่อพลังงานการสะท้อนมีค่ามากจนเกินไป โดยระบบที่มีความซับซ้อนจะมีเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) เป็นอุปกรณ์ที่เป็นแม่เหล็กถาวร ตั้งอยู่บนท่อนำคลื่น ติดตั้งอยู่ระหว่าง เจนเนอเรเตอร์ และ แอปพลิเคชันเตอร์ ตัวมันทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นที่สะท้อนกลับจาก แอปพลิเคชันเตอร์เข้าไปในโหลดหลอก (Dummy Load) เช่น โหลดจำพวกน้ำ หรือวัสดุอื่น ๆ การติดตั้งระบบน้ำเข้าร่วมกับระบบเซอร์คูเลเตอร์ที่สมบูรณ์แล้วบางทีเราจะเรียกระบบนี้ว่า ไอโซเลเตอร์ (Isolator) หรือ ไอโซ - เซอร์คูเลเตอร์ (Iso - Circulator) ซึ่งเป็นการช่วยปกป้องแมกนีตรอนจากคลื่นที่สะท้อนกลับ ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของ แมกนีตรอนออกไป จึงนับได้ว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะมีการแนะนำให้ประยุกต์ใช้กับระบบที่มีกำลังระดับสูง



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) [9]

### 2.5.3. อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ (Reflection Monitor)

เป็นเครื่องที่ใช้ตรวจวัดปริมาณคลื่นสะท้อนกลับมาจากแอฟพลิเคชัน เนื่องจากวัสดุไม่ได้ดูดซับเอาไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.17

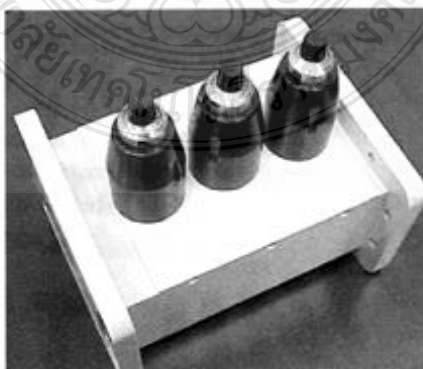


ภาพที่ 2.17 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสะท้อนกลับ [9]

### 2.5.4. อุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (Matching Tuner)

อุปกรณ์นี้อาศัยการปรับค่าตัวต้านทาน เพื่อปรับค่าคลื่น ไมโครเวฟจากเจนเนอเรเตอร์ให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะให้ความร้อน ซึ่งต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดกำลังคลื่น (Power Monitor) เป็นตัวช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพและช่วยเรื่องการปกป้องและความปลอดภัยของตัวเจนเนอเรเตอร์

เมื่อใช้การปรับค่าจากอุปกรณ์นี้ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการดูดซับคลื่นและปริมาณโหลดน้ำ ผลจากการปรับค่าทำให้อายุการใช้งานของแมกนีตรอนยาวนานขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยลดการสะท้อนกลับของคลื่นตามที่กล่าวมาข้างต้น



ภาพที่ 2.18 โครงสร้างอุปกรณ์ปรับค่าคลื่น (3-Step Tuner) [9]

### 2.5.5. แอปพลิเคชัน (Applicator)

แอปพลิเคชัน (Applicator) หรือ คavity (Cavity) เป็นส่วนที่มีไว้สำหรับการทำความร้อนของกระบวนการโดยได้รับพลังงานไมโครเวฟมาจากเจนเนอเรเตอร์หรือแมกนีตรอนโดยปกติการจ่ายพลังงานไมโครเวฟไปยังโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการมีความแตกต่างกันตามชนิดของกระบวนการและตามชนิดของวัสดุ โดยพลังงานไมโครเวฟจะส่งผ่านผ่านที่ว่างและมีจุดรวมที่โหลด

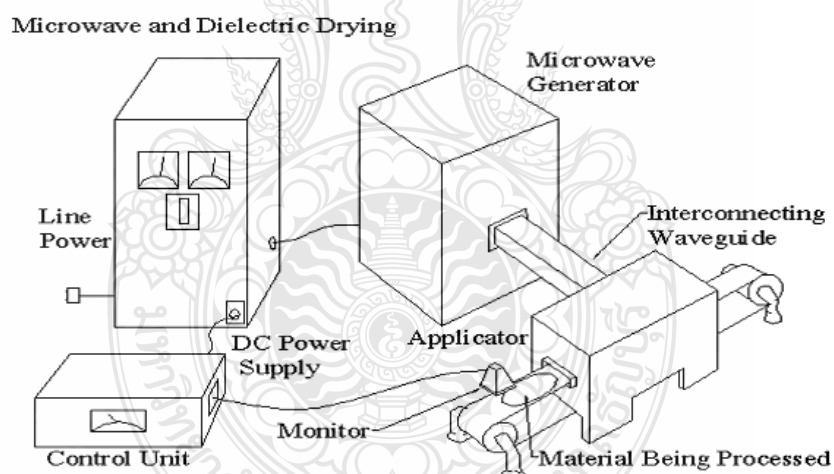
หลังจากการสร้างคลื่นในย่านความถี่ไมโครเวฟแล้ว คลื่นจะถูกส่งไปยังแอปพลิเคชันด้วยท่อนำคลื่น (Waveguides) แม้ว่าในบางครั้งสามารถใช้สายโคแอกเซียลได้แต่ก็เหมาะกับการส่งคลื่นในช่วงกำลังต่ำเท่านั้นโดยปกติท่อนำคลื่นจะเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง ซึ่งอาจทำจากทองเหลืองหรืออะลูมิเนียมโดยที่ขนาดภายในนี้จะต้องใช้ความระมัดระวังในการออกแบบและเลือกใช้เพื่อที่จะสามารถควบคุมคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟตามที่ต้องการไปยังแอปพลิเคชันได้ สำหรับตัวแอปพลิเคชันแล้ว จะมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดและสร้างจากวัสดุประเภทโลหะเสมอ โดยทั่ว ๆ ไปแอปพลิเคชันถูกแบ่งประเภทตามชนิดคavityและท่อนำคลื่นดังนี้

- 1) ชนิดคavity (Cavity Applicators)
  - (1) คavity ชนิดทำงานเป็นกะ
  - (2) คavity ชนิดทำงานแบบต่อเนื่อง
- 2) ชนิดท่อนำคลื่น (Waveguide Applicators)
  - (1) ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
  - (2) ท่อนำคลื่นแบบวงกลม
  - (3) ท่อนำคลื่นแบบอูโมงค์
  - (4) ท่อนำคลื่นแบบหักโค้ง
6. แอปพลิเคชันชนิดคavity (Cavity Applicators)

ซึ่งจัดได้ว่าเป็นแอปพลิเคชันขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเตาไมโครเวฟของโฮโร (Horo) ระบบนี้จะประกอบด้วยคavityโลหะซึ่งอาจต่อเชื่อมกันเป็นอูโมงค์ ภายในอูโมงค์นี้จะมีระบบสายพานลำเลียงเพื่อเคลื่อนย้ายปริมาตรของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ โดยพลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปในแอปพลิเคชันนี้โดยวิธีการใช้ท่อนำคลื่นหรือสายโคแอกเซียลผ่านจุดต่อ ต่อเดียวหรือหลายจุดต่อในระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจมีแมกนีตรอนมากกว่า 100 ตัว ติดตั้งแยกกันภายในคavity นอกจากนี้แอปพลิเคชันชนิดนี้จะพบว่าโหลดหรือวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะมีสัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของแอปพลิเคชัน (จึงเรียกภาพแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุในลักษณะนี้ว่าคลื่นมัลติโมด (Multi Model)) และจะถูกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่ง

สะท้อนกลับไปกลับมาจากด้าน ไปอีกด้านหนึ่งของแอฟพลีเคเตอร์ ผ่านเข้าไปในโหลดจากทุก ๆ ด้าน สิ่งนี้จึงถูกเรียกว่าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตรสามมิติที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งหลักการของระบบนี้ มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

สำหรับปัญหาหนึ่งของแอฟพลีเคเตอร์ชนิดคาวิตี้ คือความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหลดซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของความร้อนภายในโหลด ดังนั้น เพื่อให้การทำความร้อนมีความสม่ำเสมอจึงได้มีขั้นตอนที่เป็นหลักประกันในปัญหาดังกล่าวซึ่งโดยปกติจะใช้วิธีการผสมผสานได้แก่ ออกแบบให้มีการเคลื่อนที่หรือการหมุนของโหลดในแอฟพลีเคเตอร์ ซึ่งอาจใช้ระบบสายพานลำเลียงหรือถาดหมุน และมีโหมดของการกวนสนามพลังงาน (Mode Stirrer) โดยอาจจะเป็น ใบกวนที่การหมุนรอบต่ำ การเพิ่มจำนวนโหมดภายในภาวิตี้ก็เป็นผลให้เกิดการกระจายและสะท้อนของพลังงานได้ดีเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้มีช่องทางการป้อนพลังงานไมโครเวฟที่มีลักษณะหลายช่อง (Multi Feed System) หรือทำการออกแบบให้มีการใช้แหล่งพลังงานไมโครเวฟที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อยภายในแอฟพลีเคเตอร์ยูนิตเดียวกัน เพื่อทำให้เกิดรูปแบบการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแอฟพลีเคเตอร์ที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างของระบบทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสายพายลำเลียง [9]

แอฟพลีเคเตอร์ชนิดคาวิตี้ โดยมีระบบการป้อนกลับ (Feedback System) จากวัสดุที่ถูกทำให้ร้อนเพื่อปรับค่ากำลังของแมกนีตรอนที่ออกมาโดยอัตโนมัติซึ่งสามารถควบคุมระดับความชื้นสุดท้ายของวัสดุได้



## 2.6 สมการพื้นฐาน (Basic Equation) [10]

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือสมการแมกเวลล์ (Maxwell Curl Relation) ภาพอนุพันธ์ของสมการแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) สามารถอธิบายในภาพของความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity,  $E$ ) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity,  $H$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $E$  และ  $H$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ  $J$  คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density)  $D$  คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) และ  $B$  คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง  $J$ ,  $D$  และ  $B$  กับ  $E$  และ  $H$  คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.8)$$

โดย  $\sigma$  คือคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity)  $\mu$  คือคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) และ  $\epsilon$  คือค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Permittivity หรือ Dielectric Constant) แทนสมการ 2.6 ถึง 2.8 ลงในสมการ 2.2 ถึง 2.5 จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.12)$$

สมการ 2.9 และ 2.10 (The Curl Relation) อ้างอิงมาจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ตามลำดับ สมการ 2.11 และ 2.12 (Divergence Equation) เป็นผลมาจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law or Curl Relation) ในสมการของแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) ใช้วัดการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมการที่ 2.9 อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการที่ 2.11 แสดงถึงความแปรผัน (Divergence) ของสนามแม่ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสภาพความหนาแน่นของประจุ (Position Charge Density) และสมการที่ 2.12 แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (Source) หรือแหล่งรับ (Sink) ของสนามแม่เหล็ก คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในภาพความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.13)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.14)$$

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \tan \delta \quad (2.15)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ  $\tan \delta$  คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานดูดซับเป็นพลังงานความร้อน หรือประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient)  $\varepsilon_r$  และ  $\mu_r$  คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) และคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Magnetic Permeability) ตามลำดับ

โดยทั่วไปคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุถูกสมมุติให้แปรผันตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ในกรณีของการทำความร้อน (Heating) และการหลอมเหลว (Melting) ด้วยไมโครเวฟและแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (Drying) ด้วยไมโครเวฟ

## 2.7 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ [6]

ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟให้เหมาะสม คลื่นไมโครเวฟเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่าง อากาศ และวัตถุได้ คลื่นไมโครเวฟประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการควบคุมกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ ควรทราบถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งโดยปกติพฤติกรรมของสมบัติไดอิเล็กตริกที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ใดๆ จะเขียนอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนหรือเรียกว่า คอมเพล็กซ์เพอร์มิติวิตี (Complex Permittivity,  $\epsilon$ )

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon_r' + j\epsilon_r'') = \epsilon_0\left(\epsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\epsilon$  คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Complex Dielectric Permittivity) (โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย  $\epsilon_0$  คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (Free Space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $8.86 \times 10^{-12}$  F/m  $\epsilon_r'$  เป็นจำนวนจริงของ คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) จะใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ  $\epsilon_r''$  เป็นจำนวนจินตภาพของ คุณสมบัติไดอิเล็กตริก (โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์) (Dielectric Loss Factor) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ  $\sigma$  และ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric Loss Factor กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient(  $\tan \delta$  ))

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.18)$$

สัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ ( $\tan \delta$ ) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

## 2.8 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept) [6]

ค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ ความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left( \sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ

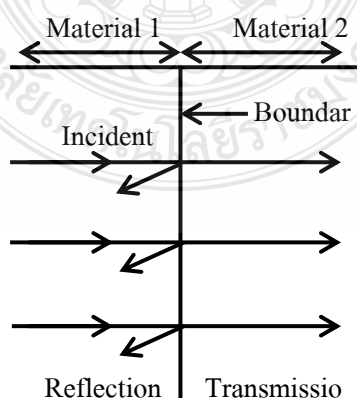
จากสมการ 2.19 จะเห็นว่าความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะลดลงหากวัสดุมีค่าไดอิเล็กตริกกลอสแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor) และค่าที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านไปได้ (Penetration Depth,  $D_p$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi\pi}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi\pi}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left( \sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (2.20)$$

เมื่อค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนต์เปลี่ยนไป ค่าความลึกในการทะลุทะลวงภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

## 2.9 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect, Transmit And Absorb) [6]

คลื่นไมโครเวฟมีความคล้ายคลึงกับแสงหลายประการกล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับพลังงานโดยวัสดุใด ๆ ได้ ซึ่งความสามารถทั้งสามนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย



ภาพที่ 2.20 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก [6]

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่มาปะทะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด เช่น (รอยต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับอากาศ) คลื่นส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ของวัสดุทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{\text{reflect}} \cong \left( \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (2.21)$$

สมการนี้ใช้ได้กับข้อสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัสดุเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุทดสอบ

สำหรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{\text{transmit}} = 1 - P_{\text{reflect}} \quad (2.22)$$

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกบางชนิด (เช่น แก้วและพลาสติก) คลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านโดยไม่มีการดูดซับและสะท้อนกลับของพลังงาน

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุจะถูกดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations)  $Q$  ซึ่งปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (2.23)$$

เมื่อ  $E$  คือสนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง  $H$  คือสนามแม่เหล็กเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก ไม่มีสภาพเชิงขั้วทางแม่เหล็ก จึงไม่มีการดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.23 ใหม่ได้เป็น

$$Q = \sigma |E|^2 + \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (2.24)$$

ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square Value) ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations) สามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (2.25)$$

จากสมการ 2.25 ค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริกทอสแฟกเตอร์ และสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนั้นยังแปรผันตรงกับค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และค่าสัมประสิทธิ์ทอสแฟกเตอร์แทนเจนต์ของวัสดุด้วย อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังมีผลจากปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และขนาดของวัสดุทดสอบ เป็นต้น

สมการ 2.25 มีความสำคัญมากในการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

## 2.10 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ [11]

### 2.10.1 ความหนาแน่น

หาค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} = \frac{m}{V} \times 10^6 \quad (2.26)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของชิ้นทดสอบ เป็น  $g$

$V$  คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ เป็น  $m^3$

### 2.10.2 ปริมาณความชื้น

หาค่าปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.27)$$

เมื่อ  $m_1$  คือ มวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ เป็น  $g$

$m_2$  คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบแห้ง เป็น  $g$

### 2.10.3 การพองตัวตามความหนา

หาค่าการพองตัวตามความหนา จากสูตร

$$\text{การพองตัวตามความหนา ร้อยละ} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2.28)$$

เมื่อ

$t_1$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ เป็น mm

$t_2$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ เป็น mm

### 2.10.4 ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

หาค่าแรงต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าจากสูตร

$$\text{ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เมกะพาสคัล} = \frac{F}{W \times L} \quad (2.29)$$

เมื่อ

F คือ แรงดึงสูงสุด เป็น N

W คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ เป็น mm

L คือ ความยาวของชิ้นทดสอบ เป็น mm

## 2.11 ความชื้นในวัสดุ [12]

ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือแห้ง ความชื้นในเนื้อวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ ดังสมการที่ 2.30 และสมการที่ 2.31

### 2.11.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left( \frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad (2.30)$$

เมื่อ

$M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันโดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์, 100 %  $M_w$

## 2.11.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left( \frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad (2.31)$$

เมื่อ

$M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

$w$  คือ มวลของวัสดุ, kg

$d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้งที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งที่มีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

## 2.11.3 อัตราส่วนความชื้น, MR [12]

ได้เสนอรูปแบบความชื้นสัมพันธ์พื้นฐานของการอบแห้งวัสดุใด ๆ ไว้ในสมการ

$$MR = \frac{M_c - M_{eq}}{M_w - M_{eq}} \quad (2.32)$$

เมื่อ

MR คือ อัตราส่วนความชื้น

$M_w$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% Wb)

$M_c$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (% Wb)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (% Wb)

## 2.11.4 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, R) [12]

ในการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอบแห้งนั้น นิยมแสดงอยู่ในรูปแบบอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, R)

อัตราการอบแห้ง = (ปริมาณน้ำที่ระเหย)/(ระยะเวลา)

$$R = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad (2.33)$$



เมื่อ

R คือ อัตราการอบแห้ง, (g/hr)

$W_1$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 1, (kg)

$W_2$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 2, (kg)

$t_1$  คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 1, (minute)

$t_2$  คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 2, (minute)

#### 2.11.5 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) [12]

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) คือปริมาณของความชื้นในอากาศที่เป็นจริงที่เปรียบเทียบกับความชื้นทั้งหมดหรือความชื้นสูงสุดของอากาศที่มีในขณะนั้น ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นค่าที่แสดงในลักษณะเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างมวลของความชื้นในอากาศหนึ่งมวลที่อุณหภูมิหนึ่งๆ กับมวลของความชื้นที่มากที่สุด ในอากาศหนึ่งหน่วยมวลที่อุณหภูมินั้นๆ หรือกล่าวอีกในหนึ่งได้ว่าเป็นมวลของความชื้นในอากาศอิ่มตัว (Saturated) หนึ่งหน่วยมวลนั่นเอง

$$RH = \frac{\text{Weight of water in 1 kg of air}}{\text{Weight of water in 1 kg of saturated air}} \times 100 \quad (2.34)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ของอากาศ, %

#### 2.11.6 ความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content, $W_c$ ) [12]

ความชื้นที่ตรงสุดท้ายของช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ นั้นเรียกว่าความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content) ค่าความชื้นนี้จะขึ้นอยู่กับ ลักษณะการจัดวางวัสดุอบแห้ง เช่น การวางแบบกระจายกับการวางเป็นกองๆ ในกรณีแรกค่าความชื้นวิกฤติจะน้อยกว่ากรณีหลังมาก ค่าความชื้นวิกฤติมีความสำคัญในการอบแห้งมาก เพราะถ้าค่านี้ยังต่ำการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นต่ำๆ ก็เสียพลังงานและค่าใช้จ่ายน้อย เพราะการระเหยของความชื้นที่เหลืออยู่ต่ำกว่านั้นจะเสียค่าใช้จ่ายหรือพลังงานและเวลาสำหรับการอบแห้งมาก เนื่องจากการอบแห้งจากค่าความชื้นวิกฤติเป็นช่วงอัตราการอบแห้งมีค่าลดลง

#### 2.11.7 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, $W_e$ ) [12]

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะ

ลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

## 2.12 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction) [12]

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสงเมื่อมีความหนาแน่นของอุณหภูมิเกิดขึ้นในก้อนวัตถุนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ( $q_k$ ) จะเป็นสัดส่วนกับ  $dT/dx$  ซึ่งเป็นค่าความลาดชันของอุณหภูมิ กับพื้นที่  $A$  ที่ความร้อนไหลผ่าน ถ้าหากเขียนเป็นรูปสมการแล้วจะได้รูปสมการเป็น

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.35)$$

เมื่อ

$q_k$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำ หรือ การนำความร้อน

$A$  คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน

$T$  คือ อุณหภูมิ

$x$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.36)$$

สมการนี้มีชื่อเรียกว่ากฎฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลเนื่องมาจาก กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิในรูปนั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะทาง ( $x$ ) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวก เมื่อไหลไปยังทิศทางที่เป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเครื่องหมายลบไว้ทางด้านขวาของสมการ

สมการ 2.36 เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน  $k$  สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบเอสไอ (SI) พื้นที่  $A$  จะมีหน่วยเป็น  $m^2$  อัตราการถ่ายเทความร้อน  $q_c$  มีหน่วยเป็น Watt ส่วนค่าการนำความร้อน  $k$  จะมีหน่วยเป็น  $W/m \cdot K$

### 2.13 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) [12]

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิววัสดุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน ระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการ พื้น ๆ แต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) โดยการพาความร้อนแบบอิสระนี้ แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวนั้นเกิดจากความแตกต่าง ของอุณหภูมิภายในก้อนของไหล เนื่องจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของก้อนวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างการพาความร้อนแบบอิสระ ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด เป็นต้น

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุ ที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมีขนาดเท่าๆกันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า แต่ไม่จำเป็นว่าการพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างมีสมการสำหรับหาอัตราส่วนการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ซึ่งมีสมการเป็น

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2.37)$$

เมื่อ

$\bar{h}_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุหรือหนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน,  $W/m \cdot K$

$A$  คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล

$T_s$  คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ,  $K$

$T_{f,\infty}$  คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมาก ๆ,  $K$

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนืดและความเร็วของของไหลรวมทั้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) และค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) ในการพาความร้อนแบบบังคับนั้น ความเร็วของของไหลในระบบจะถูกกำหนดด้วยปั๊มหรือพัดลม แต่สำหรับความเร็วของของไหลที่ใช้พาความร้อนแบบอิสระนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับของของไหล สัมประสิทธิ์การขยายตัวของของไหลและสนามของแรง เช่น แรงดึงดูดของโลกเมื่อระบบอยู่บนพื้นโลก เป็นต้น

## 2.14 พลังงานความร้อน [12]

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง จะสามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m} C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.38)$$

โดยที่

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า, kg/s

$C_a$  คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg °C

$T_i$  คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าหอบแห้ง, °C

$T_{amb}$  คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกก่อนทำความร้อน, °C

จาก

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (2.39)$$

ได้

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho v A \quad (2.40)$$

ดังนั้น

$$\dot{Q} = \rho_g v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.41)$$

โดยที่

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m<sup>3</sup>

$\dot{V}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า, m<sup>3</sup>/s

$v$  คือ ความเร็วของลมร้อนตลอดพื้นที่หน้าตัดของเบด, m/s

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด,  $m^2$

## 2.15 พลังงานความร้อนที่ใช้ต่ำสุดและสูงสุด ( $\dot{Q}_{\min, \max}$ )

จากสมการ 2.41 จะได้

$$\dot{Q}_{\min} = \rho_g U_{mf} v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.42)$$

และ













$$\dot{Q}_{\max} = \rho_g U_t v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.43)$$



## 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

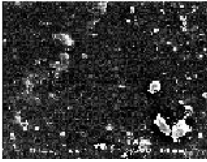





สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุประเภทต่าง ๆ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟได้แก่

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์กระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาความเร็วของสายพานลำเลียง เวลาที่ใช้ในการรับคลื่นไมโครเวฟ ขนาดของวัสดุทดสอบ กำลังของแมกนีตรอน (800 W) และทิศทางของการจ่ายคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่มีต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทดสอบ

ความหนา	จำนวนแมกนีตรอน			
	3 ตัว	4 ตัว	7 ตัว	14 ตัว
3 ซม.				
6 ซม.				
9 ซม.				

ภาพที่ 2.21 ลักษณะยางพาราหลังการอบแห้งด้วยไมโครเวฟระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง [4]

ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการศึกษาคือ ยางพารา เซรามิกส์ และผลผลิตทางการเกษตร จากการศึกษาพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานนั้นสามารถช่วยประหยัดเวลา และลดระยะเวลาในการอบขึ้นงาน ขึ้นงาน ได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันทั้งปริมาตร และการกระจายตัวของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอสังเกตจากภาพที่ 2.21 และได้ยางพาราที่มีคุณภาพดี คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมดาโดยสังเกตจากการเรียงตัวของโครงสร้างภายในของยางพาราในภาพที่ 2.22

กำลังขยาย	ยางอบด้วยไมโครเวฟ	ยางแผ่นรมควัน
500 เท่า		
5000 เท่า		
20000 เท่า		

ภาพที่ 2.22 โครงสร้างภายในของยางพาราที่วัดจาก SME ที่กำลังขยายต่างกัน [4]

Vongpradubchai S. [5] งานวิจัยนี้ทำการศึกษารอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพายลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้แบ่งเป็นสองจำพวกคือ วัสดุชื้นน้อย (Nonhygroscopic Material) ได้แก่ แพคเบดวัสดุพอรุน (Porous Packed Bed) และวัสดุชื้นมาก (Hygroscopic Material) ได้แก่ ชิ้นกล้วยหั่นบาง (Banana Sliced) โดยทำการศึกษา ชนิดของกระบวนการอบแห้ง ทิศทางการป้อนคลื่นและอุณหภูมิพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพบว่าจากการอบแพคเบดวัสดุพอรุน การป้อนคลื่นไมโครเวฟด้านบนควาดีและใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นทำการอบแห้งวัสดุชื้นมาก โดยใช้ชิ้นกล้วยหั่นบาง พบว่าลักษณะการอบแห้งแบบไฮบริดโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมบรรยากาศที่ 30°C เป็นกรณีศึกษาที่ดีที่สุด และจากการพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพบว่า พลังงานที่ใช้ภายในระบบและคุณภาพของกล้วย (สีและโครงสร้าง) สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

Vongpradubchai et al. [10] ได้ทำการอบแห้งไม้โดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องและการอบแห้งไม้โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE<sub>10</sub>) ซึ่งทำการศึกษาระบบวิธีการเชิงตัวเลขและการทดลอง โดยตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ กำลังที่ป้อนเข้าไปและระยะเวลาที่ใช้ในการอบที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของไม้ เช่น ความชื้นสุดท้าย สีของเนื้อไม้ รวมถึงคุณภาพเชิงกล จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของไม้ที่อบโดยใช้ระบบเตาไมโครเวฟ

ชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องกับการอบแห้งโดยใช้เตาอบแบบการพาความร้อน พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นจะช่วยประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาใช้ในระบบการได้ถึง 25 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาอบแบบพาความร้อน ซึ่งงานได้รับความร้อนทั่วทั้งปริมาตร เป็นการใช้พลังงานที่เต็มประสิทธิภาพ รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลของไม้ดีขึ้น

วิฑูรย์ อบรม และคณะ [13] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุชีวภาพด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ ซึ่งวัสดุชีวภาพที่ใช้ในการทดลองนี้คือ แครอท ใบกระเพรา โดยที่ระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยห้องอบแห้งสุญญากาศรูปทรงกระบอก ภายใต้ความดัน -95 kPa ทำแห้งโดยแมกนีตรอนขนาด 800 W ความถี่ 2.5 GHz จากผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของวัสดุจะนำไปทำการสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศในเชิงพาณิชย์ต่อไป

F. Liu et al. [14] งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงการทำขึ้นไม้ให้แห้งก่อนไปสู่กระบวนการทางอุตสาหกรรมการอบแห้งจะช่วยในการป้องกันการเสียหายของขึ้นไม้และช่วยลดปริมาณความชื้นลงป้องกันการเกิดเชื้อรา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะมีความซับซ้อนในระบบการอบแห้งวิเคราะห์ถึงปรากฏการณ์การเกิดความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร ของวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Nonhomogeneous) วัสดุแบบชื้นมาก (Hygroscopic) ซึ่งมีลักษณะเป็น 2 มิติ โดยใช้หลักของ Control Volume และหลักการการพาความร้อน ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบเทคนิคการคำนวณที่แตกต่าง 2 วิธี โดยวิธีแรกพิจารณาถึงระบบการเกิดของความร้อนในแต่ละเทคนิค โดยไม่มีความสัมพันธ์กัน ส่วนอีกวิธีเป็นการทำเอาเทคนิคทั้งสองวิธีมาประยุกต์เข้าด้วยกัน ซึ่งการประยุกต์เทคนิคเข้าด้วยกันสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการเกิดความชื้นภายในและค่าความชื้นได้ดี ทั้งกรณีของระบบการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำ (50°C) อุณหภูมิปานกลาง (80°C) และอุณหภูมิสูง (120°C)

I.W. Turner et al. [15] งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบของการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับพาความร้อน โดยวัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุพอรุนแบบชื้นมาก (Hygroscopic) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นการพัฒนาแบบจำลองมาจากการอบแห้ง 1 มิติ (Wood 1 D) จะศึกษาถึงความร้อนที่เกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่สัมพันธ์กับความชื้นคงเหลือของขึ้นไม้ อุณหภูมิ ความดันและการกระจายตัวของพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นผลที่ช่วยในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของระบบการอบแห้งได้ดี จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนตัวพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับงานวิจัยภายใต้การให้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับการพาความร้อน



ร้อน ซึ่งโปรแกรมจะสามารถออกแบบการอบแห้งให้ถึงจุดสูงสุดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ และในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการทดลอง และนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความร้อนร่วมระหว่างพลังไมโครเวฟและการพาความร้อนมาเปรียบเทียบ โดยคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราในการอบแห้ง และประสิทธิภาพของการอบแห้งซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น อุณหภูมิ ความดัน กำลังงาน ผลที่คาดว่าจะได้ คืองานวิจัยฉบับนี้จะช่วยพัฒนากระบวนการอบแห้งที่ใช้ความร้อนระหว่างพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนให้มีประสิทธิภาพดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคธุรกิจต่อไป

H. Zhao et al. [16] งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 3 ทิศทางการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในชิ้นไม้ที่มีความชื้นต่ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้หลักการของ Finite Volume (FVTD) สำหรับในการแก้ปัญหาในสมการแมกเวลล์ ซึ่งสามารถใช้อธิบายในการกระจายตัวของความร้อนในชิ้นไม้ กระบวนการให้ความร้อนที่ซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนภายในชิ้นไม้ การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ งานวิจัยฉบับนี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ การกระจายตัวของกำลังงานที่ใช้ในชิ้นงานภายใต้พลังงานไมโครเวฟและการเกิดความร้อนในกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการควบคุมคุณสมบัติของชิ้นไม้จะมีผลต่อการกระจายตัวของกำลังงานที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนภายในชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ส่วนการกระจายตัวของอุณหภูมิจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับทดลองต่อไป

A. Oloyede et al. [17] งานวิจัยนี้ศึกษาถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของชิ้นไม้ ในภาคอุตสาหกรรมมีวิธีการอบแห้งมากมาย ซึ่งวิธีใหม่ ๆ นี้จะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลงเรื่อย ๆ เช่น การอบแห้งโดยใช้หลักการด้วยการพาความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงภายในเตาอบ วิธีการอบแห้งด้วยคลื่นวิทยุหรือการอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟ ซึ่งจะมีความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบของการอบแห้งแต่ละวิธีต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นไม้ โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เกิดความร้อนจากภายในออกสู่ภายนอก ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นการกำหนดค่าความชื้นคงเหลือภายในชิ้นไม้ที่ขนาดเท่ากันทำการอบแห้งหลากหลายวิธี นำชิ้นไม้ที่อบแห้งแล้วไปทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธี (Tensile Load) เพื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นไม้แห้ง ชิ้นงานถูกทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ในการอบแห้งโดยใช้เตาอบในการพาความร้อนจะให้ความแตกต่างของ 2 อุณหภูมิและการอบแห้งโดยพลังงานไมโครเวฟจะใช้กำลังงานที่แตกต่างกัน 2 ค่า ผลในการทดสอบ

คุณสมบัติเชิงกลจากการอบแห้งหลากหลายวิธี พบว่าการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟจะทำให้ชิ้นไม้มีความแข็งแรงลดลง 60%

Jindarat et al. [18] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุแพคเกจขึ้นน้อยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้สายพานลำเลียงต่อเนื่อง เพื่อหารูปแบบในการให้ความร้อนและวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงาน พบว่าการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุพูน อุณหภูมิของลมร้อนและตำแหน่งการเปิดของแมกนีตรอน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนช่วยให้วัสดุได้รับความร้อนทั่วทั้งปริมาตร ลดระยะเวลาในการอบแห้งและประหยัดพลังงาน

Ratanadecho et al. [19] ศึกษากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่วัสดุทดสอบที่เป็นของเหลว มีการคิดอิทธิพลของแรงตึงผิว (Surface Tension) ต่อกระบวนการพาความร้อนในชั้นของเหลว ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

H.W. Lee [20] งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผลที่ได้จากการพาความร้อนด้วยอุณหภูมิของอากาศในระบบการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยมีพื้นที่หน้าตัดขนาด 25 mm x 50 mm วิเคราะห์ถึงค่าที่เหมาะสมระหว่างการพาความร้อนและการใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการอบแห้ง ผลงานวิจัยนี้อธิบายอากาศร้อนที่เกิดความร้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นไม้และการเกิดความร้อนภายในของพลังงานไมโครเวฟ การเกิดความร้อนภายในดังกล่าวส่งผลให้มีการระเหยตัวของน้ำภายในชิ้นไม้ รวมไปถึงการพิจารณาถึงอัตราการอบแห้งที่แตกต่างระหว่างค่าความชื้นคงเหลือสูงกว่า 30% และค่าความชื้นคงเหลือของชิ้นไม้ต่ำกว่า 30% ซึ่งจะเป็ประเด็นสำคัญในการหาจุดอิมพัลในระบบของการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟและระบบของการอบแห้งด้วยการพาความร้อน

P. Perre et al. [21] งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาถึงการอบแห้งโดยใช้ระบบสุญญากาศ ด้วยการแผ่กระจายความร้อนในโมเลกุล เก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิและค่าความดันโดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อแนวโน้มของกระบวนการอบแห้งทั้งระบบ ตัวอย่างเช่น ค่าของอุณหภูมิท้ายของกระบวนการอบแห้งยังมีค่าต่ำ (150 °C) และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งด้วยการพาความร้อนโดยใช้ไอน้ำ รายละเอียดสำคัญขึ้นอยู่กับคุณสมบัติภายในของชิ้นงานในการส่งผ่านความร้อน ที่เกิดขึ้นในการอบแห้ง ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ชนิดไม้ที่แตกต่างกัน คือ ไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป จุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ถึงกระบวนการอบแห้งในระบบสุญญากาศของ 2 ระบบที่มีความแตกต่างกัน

Rattanadecho et al. [22] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง เพื่อทำการตรวจสอบผลของการฉายรังสี โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ขนาด

กำลังไมโครเวฟ ตำแหน่งของแมกนีตรอนและจลนศาสตร์โดยรวม ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง มีข้อได้เปรียบกว่าการอบแห้งโดยทั่วไป คือ ใช้เวลาในการอบสั้นลง ปริมาณการกระจายของพลังงานไมโครเวฟทั่วตลอดทั้งผลิตภัณฑ์และมีประสิทธิภาพ

M. Lehne et al. [23] งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟช่วยในการอบไม้ภายในประเทศออสเตรเลีย โดยทำการศึกษาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นไม้ภายใต้กระบวนการให้ความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็น 1 มิติ ช่วยอธิบายถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของชิ้นไม้ โดยอาศัยสมการแมกเวลล์เป็นสมการพื้นฐาน แล้วนำมาปรับปรุง จำกัดขอบเขตก็จะได้ผลที่มีความแม่นยำขึ้น ซึ่งรวมไปถึงการพัฒนาค่าไดอิเล็กตริกในแนวเชิงเส้น การสะสมของอุณหภูมิและค่าความชื้นที่สอดคล้องกับค่าไดอิเล็กตริก รวมไปถึงการกระจายตัวของความร้อนในระบบภายใต้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยการทำนายถึงค่าของความชื้นและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นไม้ ลำดับต่อไปใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Different) เริ่มจากการใช้สมการแมกเวลล์ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสุดท้ายแสดงถึงปรากฏการณ์การสั่นพ้อง (Resonant) ที่สูงสุดในรูปแบบของค่าอุณหภูมิ แต่การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีค่าอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดการนำความร้อนขึ้นภายในชิ้นไม้

Vongpradubchai et al. [24] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุพรุณหลายชั้นโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมร่วมกับการพาความร้อน (โหมด  $TE_{10}$  ที่ความถี่ 2.45 GHz.) สำหรับวัสดุพรุณหลายชั้นที่ใช้ในการศึกษาคือ เม็ดแก้วผสมกับน้ำและอากาศ โดยมีการศึกษาอิทธิพลของขนาดเม็ดแก้วและความหนาแต่ละชั้นภายในวัสดุพรุณที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในวัสดุพรุณแบบไม่อึดตัว พบว่าขนาดของอนุภาคภายในวัสดุพรุณ มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

Prommas et al. [25] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุณหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิมร้อนทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพรุณ F - C และ C - F และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ของกระบวนการอบแห้ง ผลจากการวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จีช่วงแรกของการอบแห้งนั้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีมีค่าต่ำเนื่องจากการสูญเสียน้อย และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นประสิทธิภาพของเอ็ก

เซอร์จีจะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีเอ็กเซอร์จีสูญเสียมาก โดยที่ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพพลังงาน

ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของมวลสารในกระบวนการอบแห้งภายใต้ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz โดยทำการให้ความร้อนโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตร และสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วยแมกนีตรอนจำนวน 6 แมกนีตรอน ซึ่งกำลังงานสูงสุดคือ  $6 \times 800$  W ด้วยระบบนี้จะทำให้ชิ้นงานได้รับคลื่นอย่างสม่ำเสมอตลอดชิ้นงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องภายในอุโมงค์ จึงทำให้ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ภายในเตาอบเหมือนกับระบบไมโครเวฟแบบปกติ



# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน (พฤษภาคม 2555 – เมษายน 2556)																							
	ปีการศึกษา 2555												ปีการศึกษา 2556											
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล	←-----→																							
2. เตรียมขึ้นทดสอบ	←-----→																							
3. ออกแบบและวางแผนการทดลอง	←-----→																							
4. ทดลอง เก็บข้อมูล	←-----→																							
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง และแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้น	←-----→																							
6. สรุปผลทดลองและจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์	←-----→																							
7. ตรวจสอบคุณภาพผลงาน	←-----→																							
8. นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ	←-----→																							

หมายเหตุ    —————    แผน  
                   -----    ทำจริง

### 3.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 เตาไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (A Combined Unsymmetrical Multi-Feed Microwave and Hot Air-Continuous Belt System) [6]

การอบแห้งในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้ชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 3.1) เตาอบนี้มีความถี่ที่ใช้งานเท่ากับ 2.45 GHz เท่ากับเตาอบไมโครเวฟโดยทั่วไป แต่มีแมกนีตรอนที่ใช้กำเนิดคลื่นทั้งหมดจำนวน 12 ตัว ถูกติดตั้งไว้รอบ ๆ อุโมงค์รูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดหน้าตัด  $0.45 \text{ m} \times 0.90 \text{ m}$  มีความยาวอุโมงค์ 3 m ภายในระบบมีสายพานลำเลียงซึ่งเป็นชั้นทดสอบที่ไม่ดูดกลืนคลื่นที่ใช้เคลื่อนย้ายวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการให้ได้รับคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง ซึ่งชั้นทดสอบจะได้รับคลื่นอย่างทั่วถึงและมีระยะเวลาในการรับคลื่นมากหรือน้อยได้ตามความต้องการ โดยปรับความเร็วของสายพาน รวมทั้งสามารถควบคุมทิศทางการจ่ายคลื่นลงบนชั้นทดสอบได้โดยการควบคุมตำแหน่งการเปิด-ปิดของแมกนีตรอนทั้ง 12 ตัว เมื่อวัสดุทดสอบผ่านเข้ามาในเตาอบบนสายพานลำเลียงความชื้นที่ระเหยออกจากชิ้นงานจะถูกดูดออกจากระบบโดยระบบลมร้อนและวัสดุจะถูกส่งออกไปอีกด้านหนึ่งของเตาอบเพื่อทำการชั่งน้ำหนัก และวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด



(ก) เตาไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง



### 3.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เป็นเครื่องที่ใช้ในการส่องดูลักษณะโครงสร้างภายในของชิ้นไม้อัด ซึ่งมีความละเอียดสูง ภาพโครงสร้างที่ได้จึงง่ายต่อการวิเคราะห์ (ภาควิชาวัสดุและโลหะการ วิศวกรรมศาสตร์, มทร.ธัญบุรี)



ภาพที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 6510, Japan)

### 3.2.4 เครื่องทดสอบคุณภาพเชิงกล

ใช้ทดสอบความแข็งแรงของเนื้อไม้ ซึ่งอาศัยหลักการของ Static Bending สามารถตรวจวัดค่าแรงดึงในแนวตั้งฉาก (Internal Bond, IB) ของชิ้นไม้อัดได้ (กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้, กรมป่าไม้)



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของแผ่นวัสดุ (ยี่ห้อ TESTOMETRIC รุ่น M500-50 KN, England)



### 3.2.5 เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์ (Network Analyzer)

เครื่องมือชุดวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์ สามารถใช้วัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้หลากหลายประเภท หลากหลายสถานะ อาทิเช่น วัสดุแข็ง วัสดุกึ่งแข็ง วัสดุที่เป็นผง รวมไปถึงวัสดุเหลว ตัวเครื่องมือประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบเช่น การรักษาสัญญาณไมโครเวฟ การคำนวณสัญญาณ การเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าวมาแสดงเป็นกราฟ การควบคุมระบบการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายในวัสดุที่ถูกทดสอบ จากนั้นจะตรวจจับความถี่การสั่นพ้องของคลื่นภายในหัววัด (Cavity) รวมไปถึงปัจจัยคุณภาพ (Quality factor) และนำข้อมูลที่ได้แปรกลับเป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ ท้ายสุดผลการวัดจะถูกแสดงในรูปแบบกราฟหลายลักษณะและสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้

หัววัดที่ใช้วัดค่าถูกออกแบบมาอย่างเหมาะสม สามารถใช้วิเคราะห์วัสดุไดอิเล็กตริกได้หลายชนิด การวัดทำได้ง่ายเพียงนำหัววัดไปทาบกับวัสดุที่ต้องการทราบค่า ซึ่งหัววัดดังกล่าวมีข้อได้เปรียบที่ความยืดหยุ่นของการใช้งาน ความรวดเร็วในการวัด และความแม่นยำของข้อมูล

#### 1. รายละเอียดชุดอุปกรณ์ แสดงดังภาพที่ 3.5

รายละเอียดชุดอุปกรณ์ประกอบไปด้วยดังนี้

- 1) หัววัด (Coaxial Cavity)
- 2) เครื่องตรวจจับสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave Reflecto Meter)
- 3) สายส่งข้อมูลจากหัววัดไปยังเครื่องตรวจจับสัญญาณ (3.5 mm Coaxial Cable)
- 4) อุปกรณ์ตั้งค่ามาตรฐาน (3.5 mm Female Calibration Standards Short Open Matched Load)
- 5) ซอฟต์แวร์ใช้งาน (Software)

#### 2. คุณสมบัติของหัววัด (Coaxial Cavity Characteristics)

- 1) ช่วงความถี่ในการใช้วัด 1.5 – 2.6 GHz
- 2) ความแม่นยำในการวัด (ไม่รวมผลจากหน้าสัมผัสวัสดุทดสอบและการสูญเสียจากสายส่งข้อมูล) ประมาณ 2% ในส่วนของจำนวนจริง (Dielectric Constant) และ 5% ในส่วนของจำนวนจินตภาพ (Dielectric Loss Factor)

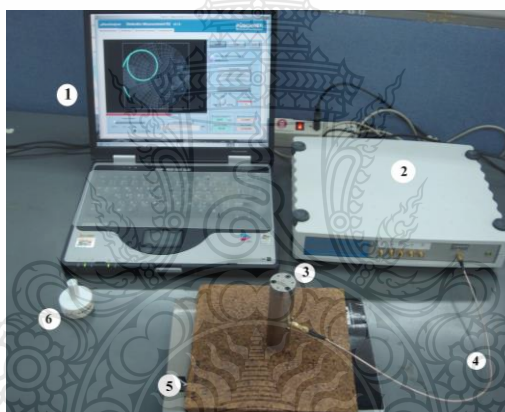
#### 3. สมมติฐานขนาดวัสดุทดสอบ

- 1) มีขนาดเป็นอนันต์ (Infinite)
- 2) ไม่มีสภาพแม่เหล็ก (Non-Magnetic)

- 3) มีคุณสมบัติสม่ำเสมอทั่ววัสดุ (Isotropic)
- 4) วัสดุต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ถ้าไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลการวิเคราะห์จะถูกเฉลี่ยโดยความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุด ณ บริเวณศูนย์กลางภายในหัววัด
- 5) หัววัดต้องทาบสนิทกับวัสดุที่ถูกทดสอบ

#### 4. ขนาดวัสดุทดสอบ

- 1) เส้นผ่านศูนย์กลางต้องมากกว่า 6.5 cm
- 2) ความหนาต้องมากกว่า 1 cm
- 3) ในกรณีวัสดุผง (Granule Size) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคผงต้องมีค่าไม่เกิน 2 mm
- 4) ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r'$ ) มากสุดที่วัดได้คือ 100



1. Software
2. Microwave Reflect meter
3. Coaxial Cavity
4. Coaxial Cable
5. Sample
6. Female Calibration Standards

ภาพที่ 3.5 เครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ยี่ห้อ Puschner รุ่น GMBH+CO KG, Germany (ศูนย์วิจัย RCME, ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต)

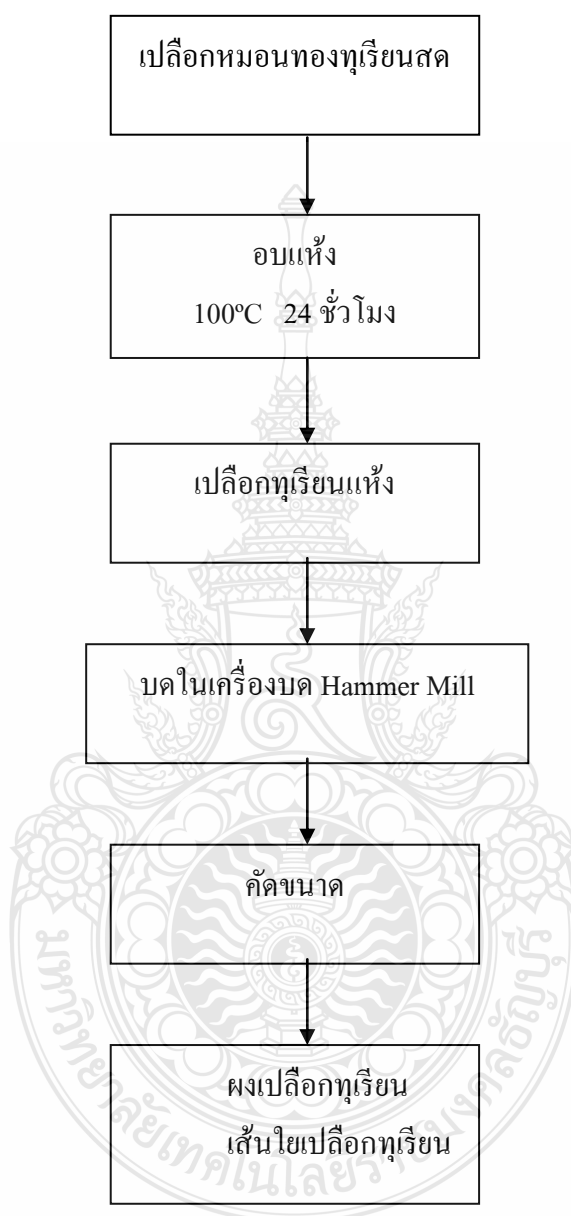
#### 3.2.6 กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Infrared Camera)



ภาพที่ 3.6 กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (ยี่ห้อ FLY Systems AB ,SE-18211, Sweden)

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบผงเปลือกทุเรียนหมอนทองและเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง



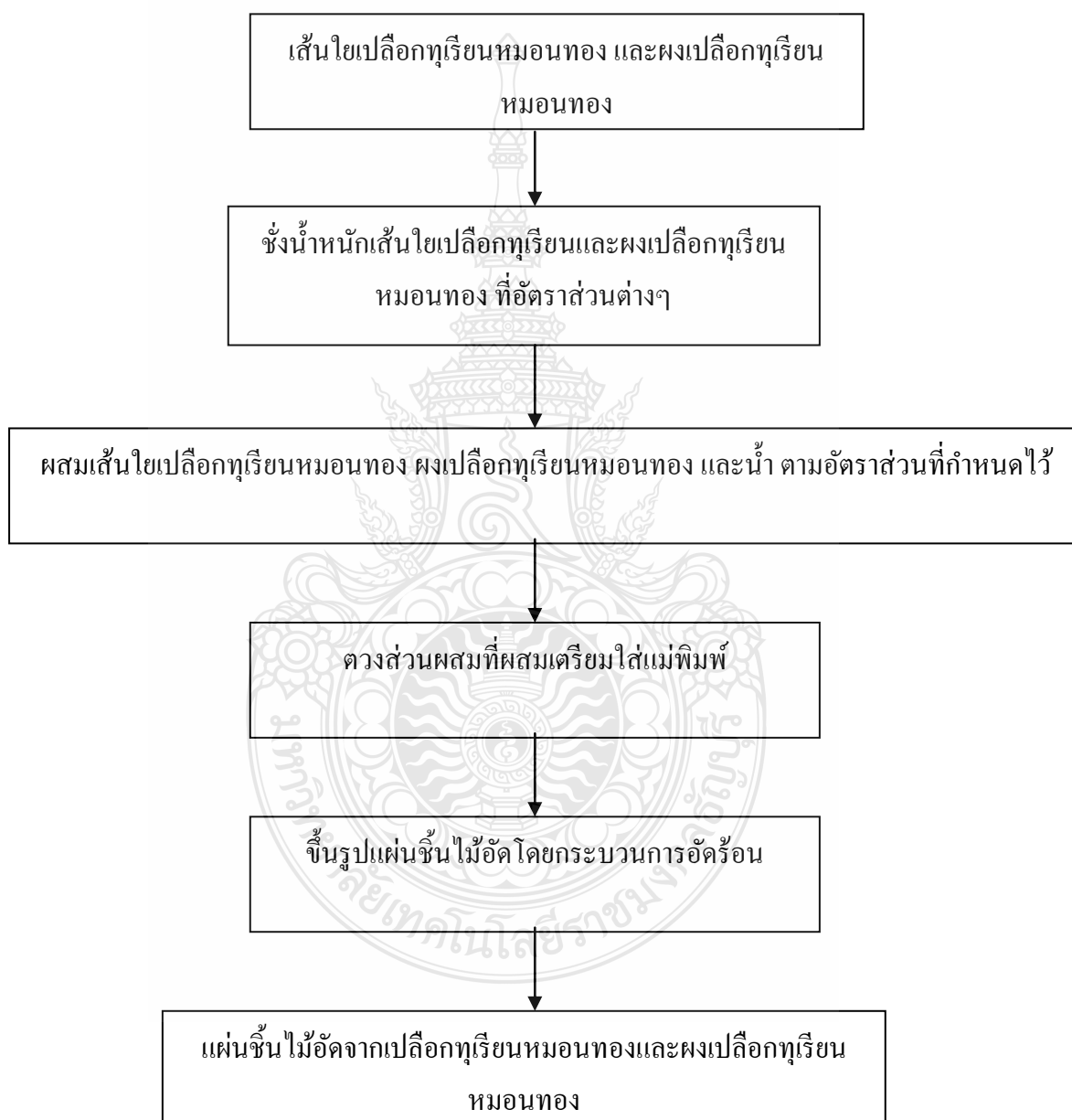
ภาพที่ 3.7 แผนผังกระบวนการเตรียมวัตถุดิบผงเปลือกทุเรียนหมอนทองและเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง [26]



ภาพที่ 3.8 กระบวนการเตรียมผงเปลือกทุเรียนหมอนทองและเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง [26]

### 3.3.2 คำนิยามการขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดที่ใช้เปลือกทุเรียนหมอนทองเป็นตัวเชื่อมประสาน แทนกาวสังเคราะห์

ทำการการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองและผงเปลือกทุเรียนหมอนทองที่อัตราส่วนเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทองและผงเปลือกทุเรียนหมอนที่อัตราส่วน (เส้นใยเปลือกทุเรียน: ผงเปลือกทุเรียน: น้ำ) ที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 3.9 แผนผังกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ผงเปลือกทุเรียนเป็นตัวเชื่อมประสาน (กาว) แทนกาวสังเคราะห์ [26]



ภาพที่ 3.10 กระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้้อจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง [26]



ภาพที่ 3.11 แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง [26]

3.3.3 นำแผ่นชิ้นไม้อัดทำการอบแห้งด้วยเตาเตาไมโครเวฟชนิดปั่นคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สม่ำเสมอและสายพายลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

นำแผ่นชิ้นไม้อัด ขนาด  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  มาทำการวัดความชื้นเริ่มต้น วัดค่าไดอิเล็กตริกและชั่งน้ำหนักก่อนการทดลองจากนั้นทำการทดลองตามตามเงื่อนไข โดยทำการเปิดแมกนีตรอน 6 ตัวอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  โดยทุก ๆ เงื่อนไขจะมีการวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นไม้ ความชื้นคงเหลือซึ่งแผ่นชิ้นไม้อัดที่ใช้อบมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-20 % Dry Basic และมีอุณหภูมิเริ่มต้น  $25^{\circ}\text{C}$

3.3.4 นำไม้ที่ทำการทดลองเสร็จแล้วไปตรวจวัดค่าไดอิเล็กตริก

3.3.5 ตรวจสอบหาค่าความหนาแน่น

1. เครื่องมือ

1) เครื่องชั่ง ที่ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 g

2) โครมิเตอร์หรือเครื่องมือวัดความหนาที่เทียบเท่า ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm ซึ่งมีส่วนของเป็นวัดเรียบและขนานกัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ถึง 20 mm

3) แคลิเปอร์แบบเลื่อน (Sliding Caliper) หรือเครื่องมือวัดอื่นที่เทียบเท่าอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 mm

2. วิธีทดสอบ

1) ชั่งชิ้นทดสอบให้ได้มวลที่แน่นอนถึง 0.01 g

2) ใช้เครื่องมือวัดความหนาตรงจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบตามรูปที่ 3.13

3) ใช้เครื่องมือวัดความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบตามรูปที่ 3.12 โดยวางเครื่องมือให้ทำมุมกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ ประมาณ  $45^{\circ}\text{C}$  ตามรูปที่ 3.13





## 3) เคชิตเตอร์

## 2. วิธีทดสอบ

1) ชั่งชิ้นทดสอบซึ่งผ่านการทดสอบตามข้อ 9.4 แล้วให้ได้มวลที่แน่นอน ถึง 0.01 g เป็นมวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ

2) อบชิ้นทดสอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$  จนได้มวลคงที่ คือมวลของชิ้นทดสอบเมื่อชั่งครั้งที่เวลาห่างกัน 6 h ต้องไม่แตกต่างกันเกิน 0.1% ของมวลชิ้นทดสอบ

3) นำมาใส่ในเคชิตเตอร์ปล่อยให้เย็น

4) ชั่งชิ้นทดสอบ เป็นมวลของชิ้นทดสอบหลังอบแห้ง

## 3. วิธีการคำนวณ

หาค่าปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $m_1$  คือ มวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ เป็น g

$m_2$  คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบแห้ง เป็น g

## 3.3.7 ตรวจสอบหาค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำ

## 1. เครื่องมือ

1) ไมโครมิเตอร์หรือเครื่องมือวัดความหนาที่เทียบเท่า ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm ซึ่งมีส่วนของแป้น

2) วัดเรียบและขนานกัน และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ถึง 20 mm

## 2. วิธีทดสอบ

1) ทำเครื่องหมายตำแหน่งที่วัดความหนาตามรูปที่ 3 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ เป็นความหนาก่อนแช่น้ำ

2) แช่ชิ้นทดสอบในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  โดยตั้งชิ้นทดสอบให้ได้ฉากกับระดับผิวน้ำ

3) ให้ขอบบนอยู่ใต้ผิวน้ำประมาณ 25 mm แต่ชิ้นต้องห่างจากกัน และต้องห่างจากผนัง

4) เมื่อแช่ชิ้นทดสอบครบ 1 h แล้ว รีบนำชิ้นทดสอบขึ้นมาซับน้ำที่ผิวออกให้หมดด้วยผ้า

หมาด

5) แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยวางให้ขอบใดด้านหนึ่งอยู่บนแผ่นวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ เช่น พลาสติก กระดาษ

6) ปล่อยชิ้นทดสอบไว้อีก 1 h แล้วนำชิ้นทดสอบขึ้นมาวัดความหนาตามตำแหน่งเดิม เป็นความหนาหลังแช่น้ำ

### 3. วิธีการคำนวณ

หาค่าการพองตัวตามความหนา จากสูตร

$$\text{การพองตัวตามความหนา ร้อยละ} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $t_1$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ เป็น mm

$t_2$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ เป็น mm

### 3.3.8 ตรวจสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

#### 1. เครื่องมือ

1) เครื่องดึง ซึ่งสามารถใช้แรงดึงเพื่อแยกชิ้นทดสอบออกในเวลาไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s

2) แผ่นดึงซึ่งทำด้วยไม้หรือโลหะที่เหมาะสม ขนาดไม่น้อยกว่า 50 mm × 50 mm ความหนาตามความเหมาะสม

#### 2. วิธีทดสอบ

1) ดัดผิวหน้าทั้งสองของชิ้นทดสอบกับแผ่นดึง โดยใช้กาวสังเคราะห์ที่ให้แรงยึดระหว่างชิ้นทดสอบกับแผ่นดึงได้มากกว่าแรงยึดตัวในชิ้นทดสอบ

2) นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้แล้วนี้ไปเข้าเครื่องดึง ดึงชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน ซึ่งปกติจะแยกในชั้นได้ อัตราการเพิ่มแรงดึงต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เวลาตั้งแต่เริ่มใช้ดึงจนกระทั่งชิ้นทดสอบ

3) แยกออกจากกันต้องไม่น้อยกว่า 30 นาที แต่ไม่มากกว่า 90 นาที (ความเร็วในการดึงประมาณ 2 mm/min)

#### 3. วิธีการคำนวณ

หาค่าแรงต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าจากสูตร

$$\text{ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เมกะพาสคัล} = \frac{F}{W \times L} \quad (3.4)$$

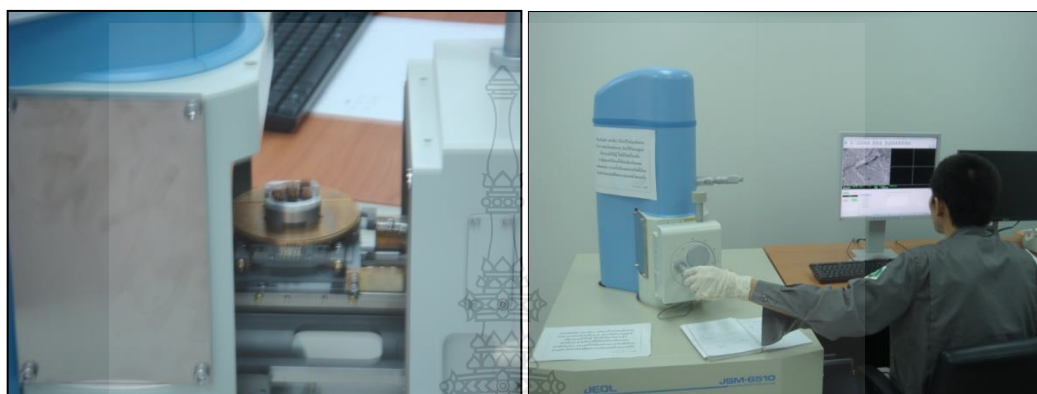
เมื่อ F คือ แรงดึงสูงสุด เป็น N

W คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ เป็น mm

L คือ ความยาวของชิ้นทดสอบ เป็น mm

### 3.3.9 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ขั้นตอน

1. การทำการตรวจสอบต้องทำตัดแผ่นชิ้นไม้อัดขนาด  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$
2. ทำการเคลือบด้วยโลหะเพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจสอบ



ภาพที่ 3.14 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

### 3.3.10 ตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน



ภาพที่ 3.15 การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน

### 3.3.11 ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

นำแผ่นซีเมนต์อัดหลังจากการอบแห้งโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแผ่นซีเมนต์อัดจะมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 10 - 15% Dry Basis มาตรฐานวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแต่ละแผ่นด้วยมาตรฐาน ASTM C518



ภาพที่ 3.16 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) (ยี่ห้อ NETZSCH HFM 436, Germany)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

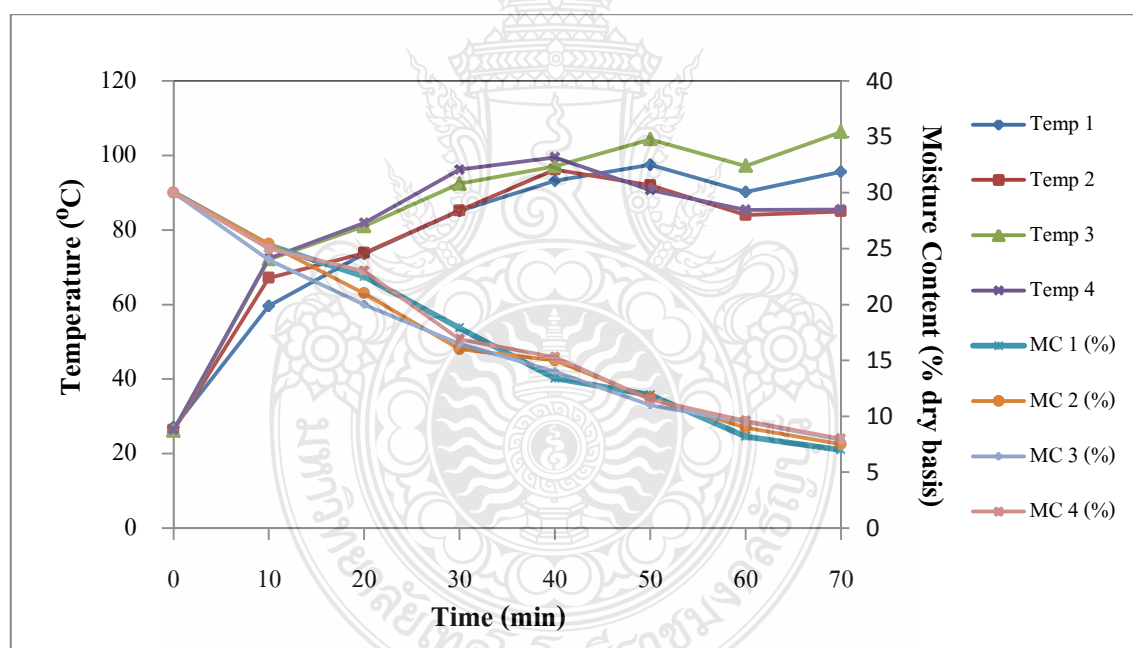
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง ที่มีผลต่อวัสดุอบแห้ง ดังนั้นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งคือ คุณสมบัติของวัสดุอบแห้ง ความชื้น อุณหภูมิ และเวลา

#### 4.1 ผลการทดลองการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้คลื่นไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองก่อนอบและหลังอบ

แผ่น ขึ้นไม้อัด	สูตรอัตราส่วน และเงื่อนไขใน การผลิตแผ่น ขึ้นไม้อัด	Dielectric Properties					
		ก่อนอบ			หลังอบ		
		$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$
1	1:1:1 อบที่ 80 °C	2.00414	0.32080	0.16002	1.56381	0.15584	0.09965
2	1:1:1.5 อบที่ 80 °C	2.24942	0.43614	0.19381	1.50295	0.15264	0.10124
3	2:1:1.5 อบที่ 80 °C	2.30507	0.43607	0.18913	1.59335	0.15681	0.09842
4	2:1:2 อบที่ 80 °C	1.92133	0.27284	0.14196	1.56453	0.15818	0.10101
5	1:1:1 อบที่ 90 °C	2.15174	0.35068	0.16273	1.48290	0.15323	0.10337
6	1:1:1.5 อบที่ 90 °C	2.23106	0.43155	0.19308	1.49839	0.15277	0.10206
7	2:1:1.5 อบที่ 90 °C	2.45477	0.46598	0.18940	1.61062	0.15884	0.09862
8	2:1:2 อบที่ 90 °C	2.19938	0.35185	0.15997	1.63252	0.16073	0.09849
9	1:1:1 อบที่ 100 °C	2.37915	0.66835	0.15415	1.73384	0.16597	0.09573
10	1:1:1.5 อบที่ 100 °C	2.18615	0.38247	0.17497	1.61743	0.16232	0.10044
11	2:1:1.5 อบที่ 100 °C	2.08130	0.37225	0.17893	1.50943	0.15477	0.10254
12	2:1:2 อบที่ 100 °C	2.37564	0.48451	0.20394	1.53193	0.15501	0.10120

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยทำการอบที่กำลังคลื่นไมโครเวฟ 4800 W โดยแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนจะมีสูตรในการผลิต อัตราส่วนคือ (เส้นใยเปลือกทุเรียน : พวงเปลือกทุเรียน : น้ำ) จะเห็นได้ว่าก่อนอบแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนแต่ละแผ่นจะมีน้ำหนักมากและมีความชื้นสูง อยู่ที่ประมาณ 30 - 40% Dry Basis ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) มีค่าสูงและเมื่อทำการอบด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant ( $\epsilon'$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )) มีค่าลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความชื้นลดลงและน้ำหนักลดลงซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.15 เพราะในกระบวนการอบแห้งนั้น ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) จะแปรเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิและความชื้นในคราวเดียวกัน จึงเป็นผลให้สูตร อัตราส่วน และเงื่อนไขในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน



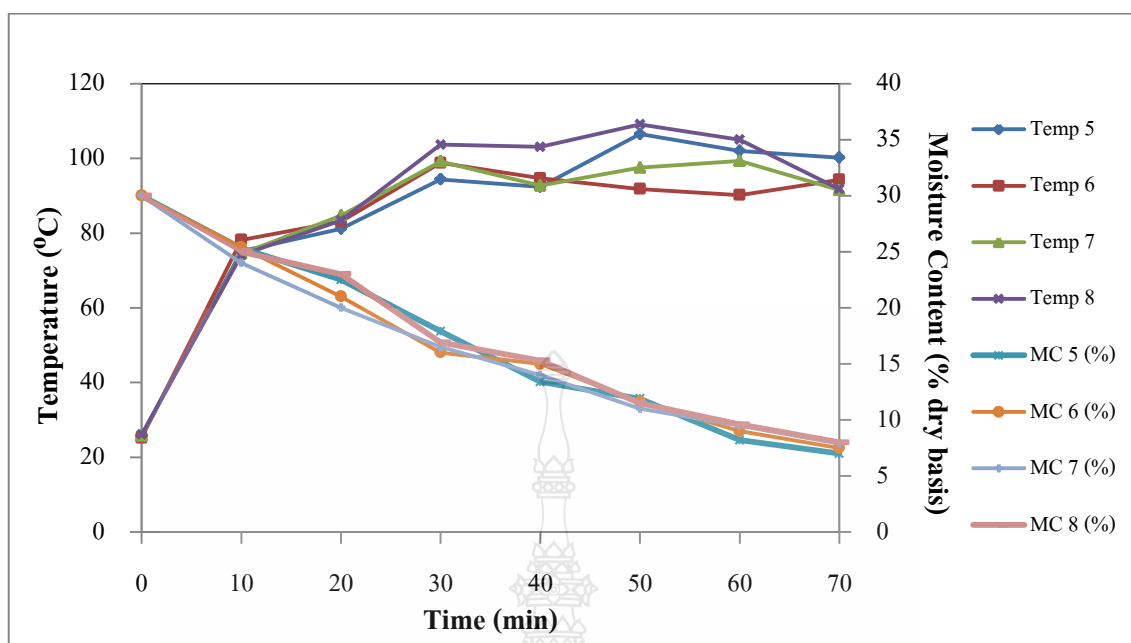
(กรณี ที่ 1 = 1:1:1 อบที่อุณหภูมิ 80 °C, กรณี ที่ 2 = 1:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 80 °C)

(กรณี ที่ 3 = 2:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 80 °C, กรณี ที่ 4 = 2:1:2 อบที่อุณหภูมิ 80 °C)

ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลาในกรณี ที่ 1 - 4

ภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 4800 W ความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 30 - 40% Dry Basis พบว่ากรณี ที่ 1 ในช่วงแรกของ

กระบวนการอบแห้ง (0 - 50 min) แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีความชื้นสูง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant ( $\epsilon'$ )) และค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนต์ (Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )) มีค่าสูง ส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากตาม อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ต่อมาการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอก เพราะในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัดมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลงและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้าซึ่งเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก และกำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนจะมีค่ามากในช่วงแรกและจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ โดยพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นโดยในช่วงท้ายการทดลอง ซึ่งเหมือนกับกรณีที่ 2 กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 แต่เนื่องจากอัตราส่วนในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดต่างกันจึงทำให้ในระยะเวลาช่วงแรกและช่วงการลดลงที่แตกต่างกัน เพราะพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านจะมีค่าสูง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีความชื้นลดลง การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าลดลง แต่ความร้อนสะสมในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนยังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงอยู่ และเมื่อวิเคราะห์ถึงค่า Dielectric Properties ในตารางที่ 4.1 พบว่าเวลาที่ในการอบมาก จะมีการทำให้ค่าความชื้นมีค่าเข้าใกล้จุดสมดุลมากขึ้นตามไปด้วย



(กรณี ที่ 5 = 1:1:1 อบที่อุณหภูมิ 90 °C, กรณีที่ 6 = 1:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 90 °C)

(กรณี ที่ 7 = 2:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 90 °C, กรณีที่ 8 = 2:1:2 อบที่อุณหภูมิ 90 °C)

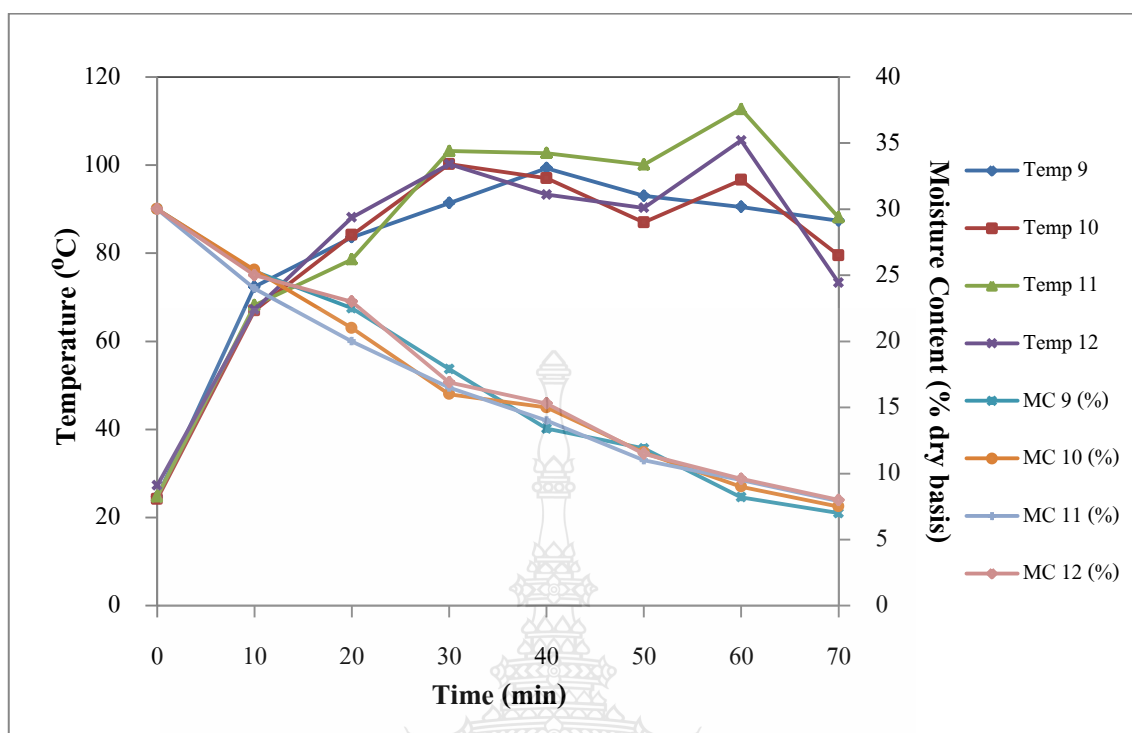
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลาในกรณีที่ 5 - 8

ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 4800 W ความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 30 - 40% Dry Basis พบว่ากรณีที่ 5 ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งมีการกระจายตัวของอุณหภูมิ (10 - 50 min) ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดคลื่นนิ่งหรือการสะท้อนของคลื่นที่เกิดจากคลื่นเดินทางและคลื่นที่ถอยหลังที่อยู่ภายในแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนกึ่งตัวขึ้นทำให้อุณหภูมิที่เวลา 30 min มีค่าสูงขึ้นและลดลงที่เวลา 40 min ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงขึ้นที่เวลา 50 min และหลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มคงที่เพราะความชื้นภายในแผ่นชิ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอก พลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นชิ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลง ที่เวลา 60 min เพิ่มขึ้นที่เวลา 70 min เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารีและความดันย่อย (Capillary Vapor Pressure) จึงส่งผลต่อการแพร่กระจายของไอ (Vapor Diffusion) ที่ผิวของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน และในกรณีที่ 6 ก็เช่นกันช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง (0 - 30 min) แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีความชื้นต่ำกว่ากรณีที่สองและกรณีที่ 5 เพราะมีการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำในสูตรและอุณหภูมิในการผลิตตามลำดับ ทำให้การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมาก อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น และค่าการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นชิ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลงและคงที่อย่างรวดเร็ว ที่เวลา 40 - 70 min เนื่องจากความชื้นภายในแผ่น



ขึ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอกได้เร็วกว่า และคลื่นไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีค่ามากและจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่มีผลทำให้มีค่าความชื้นเข้าสู่จุดสมดุลซึ่งจะเหมือนกับกรณีที่ 7 แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีความชื้นต่ำ เพราะมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของเส้นใย น้ำและ อุณหภูมิในการผลิต ส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นสูง อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น และค่าการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลง ที่ เวลา 40 - 70 min ซึ่งช่วงเวลานี้จะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากอาจเกิดจาก การเกิดคลื่นนิ่ง หรือการสะท้อนของคลื่นที่เกิดจากคลื่นเดินทางและคลื่นที่ถอยหลังที่อยู่ภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจาก เปลือกทุเรียนก่อตัวขึ้นทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ 8 นั้น กระบวนการอบแห้ง (0 - 50 min) แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีความชื้นสูง ส่งผลให้ความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้เคลื่อน ตัวออกสู่ผิวภายนอก เพราะในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัดมีเฟสของ ของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อน ของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลงและมีอุณหภูมิ สูงขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้าซึ่งเป็นอิทธิพลของการ แพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก การดูดซับพลังงานคลื่น ไมโครเวฟมีค่าลดลง แต่ความร้อนสะสมในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนยังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิจาก เปลือกทุเรียนมีค่าสูงอยู่





(กรณี ที่ 9 = 1:1:1 อบที่อุณหภูมิ 100 °C, กรณีที่ 10 = 1:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 100 °C)

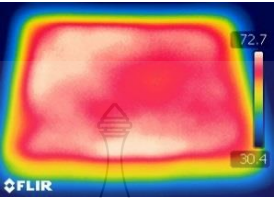
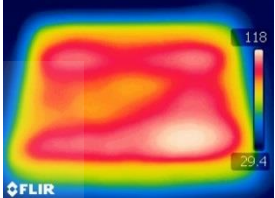
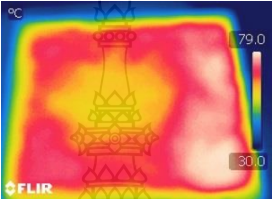
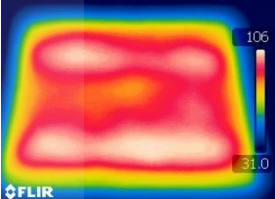
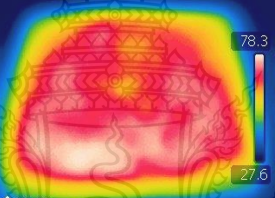
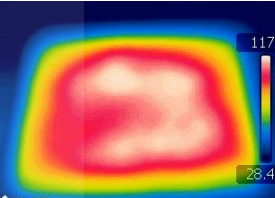

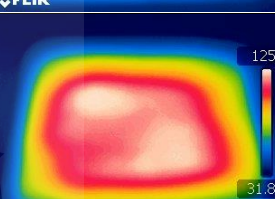

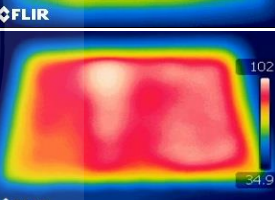
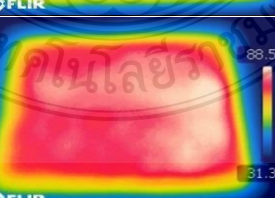
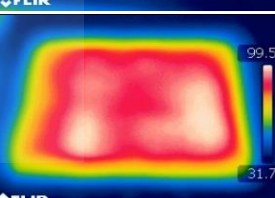
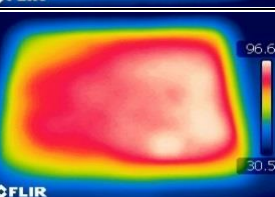
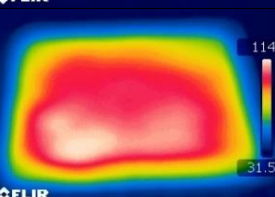
(กรณี ที่ 11 = 2:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 100 °C, กรณีที่ 12 = 2:1:2 อบที่อุณหภูมิ 100 °C)

ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลาในกรณีที่ 9 - 12

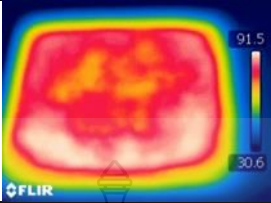
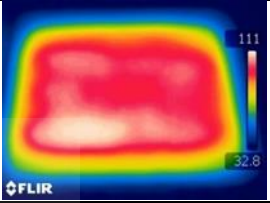
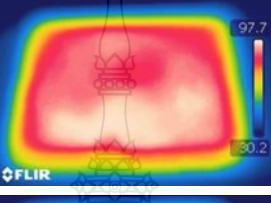
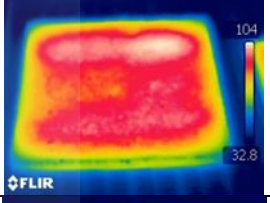
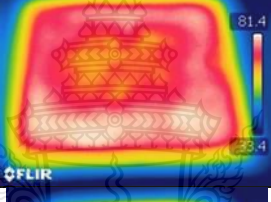
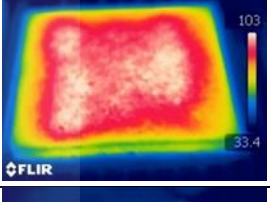

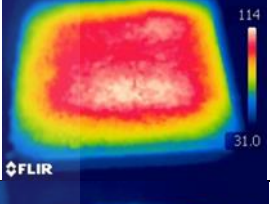

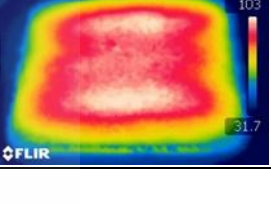
ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟ 4800 W ความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 30 - 40% Dry Basis พบว่ากรณีที่ 9 ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง (0 - 40 min) แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีการเพิ่มอุณหภูมิในการผลิต ทำให้การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมาก อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น และค่าการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นชิ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลงและคงที่อย่างรวดเร็ว ที่เวลา 50 - 70 min เนื่องจากความชื้นภายในแผ่นชิ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอกได้เร็วกว่า และคลื่นไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวแผ่นชิ้นไม้อัดจะมีค่ามากและจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่มีผลทำให้มีค่าความชื้นเข้าสู่จุดสมดุล และในกรณีที่ 10 พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง (0 - 30 min) แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำและอุณหภูมิในสูตรการผลิต ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant ( $\epsilon'$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ทังเจนต์ (Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )) มีค่าต่ำ ส่งผลให้การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟไว้ได้และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นต่ำตามไปด้วย อุณหภูมิมีค่าต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ระยะเวลาในการอบสั้นลง ทำให้ค่าการดูดซับ

พลังงานคลื่น ไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลง ที่เวลา 40 - 70 min เนื่องจากความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอกได้เร็วกว่า ส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นสูงขึ้นแม้อุณหภูมิที่เกิดจากกำลังไมโครเวฟมีค่าต่ำ มีผลทำให้มีค่าความชื้นเข้าสู่จุดสมดุล ส่วนในกรณีที่ 11 พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งมีการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดคลื่นนิ่งหรือการสั่นพ้องของคลื่นที่เกิดจากคลื่นเดินทางและคลื่นที่ถอยหลังที่อยู่ภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนก่อดำขึ้นทำให้การสั่นพ้องของคลื่นมีอิทธิพลมากกว่าค่าความชื้นที่เวลา ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มลดลง เพราะความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอก พลังงานคลื่น ไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่า เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารีและความดันย่อย (Capillary Vapor Pressure) ส่งผลต่อการแพร่กระจายของไอ (Vapor Diffusion) ที่ผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนและในกรณีที่ 12 พบว่าเมื่อในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง (0 - 30 min) แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำและอุณหภูมิในสูตรการผลิต ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant ( $\epsilon'$ )) และค่าสัมประสิทธิ์ทังเจนต์ (Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )) มีค่าต่ำ ส่งผลให้สามารถดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟไว้ได้และปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำตามไปด้วย และค่าการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลง ที่เวลา 40 min มีการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่เวลา 60 min ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดคลื่นนิ่งหรือการสั่นพ้องของคลื่นที่เกิดจากคลื่นเดินทางและคลื่นที่ถอยหลังที่อยู่ภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนก่อดำขึ้นทำให้การสั่นพ้องของคลื่นมีอิทธิพลมากกว่าค่าความชื้นที่เวลา ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มลดลง เพราะความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอก พลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่า เนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารีและความดันย่อย (Capillary Vapor Pressure) ส่งผลต่อการแพร่กระจายของไอ (Vapor Diffusion) ที่ผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายทางความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง (10 min และ 70 min)

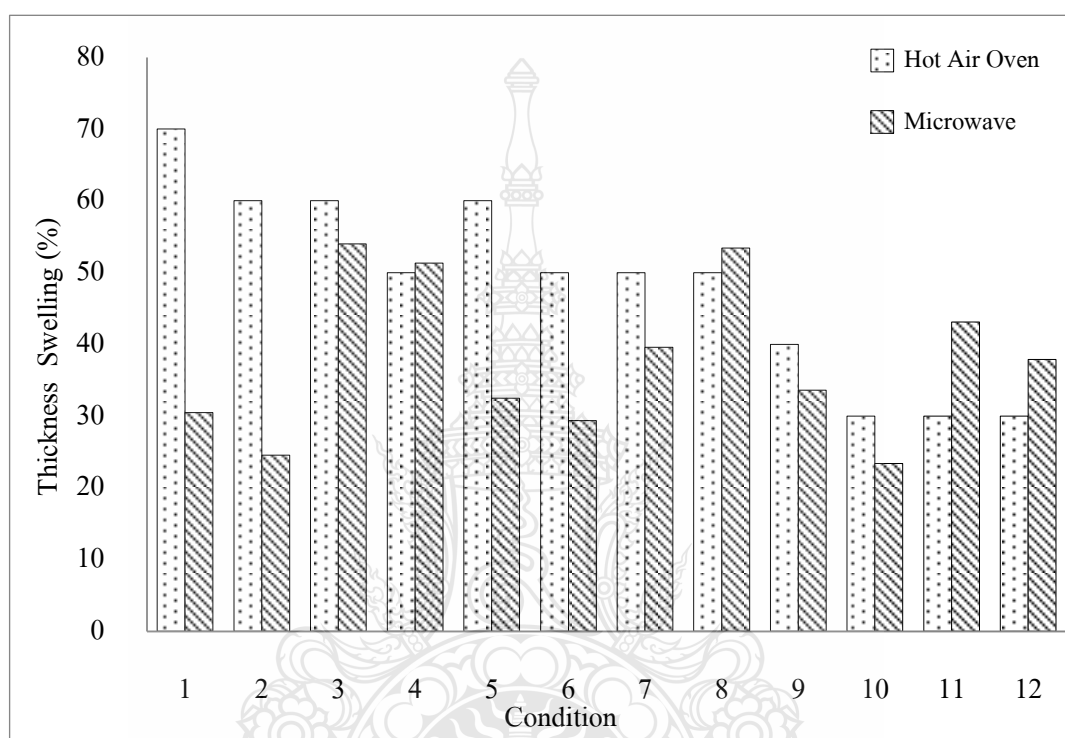
Case	Condition	Single Microwave (10 min)	Single Microwave (70 min)
1	1:1:1 อบที่ 80 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 72.7 °C and a minimum of 30.4 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 118 °C and a minimum of 29.4 °C. The image is labeled 'FLIR'.
2	1:1:1.5 อบที่ 80 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 79.0 °C and a minimum of 30.0 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 106 °C and a minimum of 31.0 °C. The image is labeled 'FLIR'.
3	2:1:1.5 อบที่ 80 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 78.3 °C and a minimum of 27.6 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 117 °C and a minimum of 28.4 °C. The image is labeled 'FLIR'.
4	2:1:2 อบที่ 80 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 86.9 °C and a minimum of 33.3 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 125 °C and a minimum of 31.8 °C. The image is labeled 'FLIR'.
5	1:1:1 อบที่ 90 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 83.7 °C and a minimum of 32.8 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 102 °C and a minimum of 34.9 °C. The image is labeled 'FLIR'.
6	1:1:1.5 อบที่ 90 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 88.5 °C and a minimum of 31.3 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 99.5 °C and a minimum of 31.7 °C. The image is labeled 'FLIR'.
7	2:1:1.5 อบที่ 90 °C	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 96.6 °C and a minimum of 30.5 °C. The image is labeled 'FLIR'.	 Thermal image showing a rectangular piece with a maximum temperature of 114 °C and a minimum of 31.5 °C. The image is labeled 'FLIR'.

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายทางความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง (10 min และ 70 min) (ต่อ)

Case	Condition	Single Microwave (10 min)	Single Microwave (70 min)
8	2:1:2 อบที่ 90 °C	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 30.6 to 91.5. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 32.8 to 111. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.
9	1:1:1 อบที่ 100 °C	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 30.2 to 97.7. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 32.8 to 104. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.
10	1:1:1.5 อบที่ 100 °C	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 33.4 to 81.4. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 33.4 to 103. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.
11	2:1:1.5 อบที่ 100 °C	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 32.3 to 96.6. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 31.0 to 114. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.
12	2:1:2 อบที่ 100 °C	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 32.1 to 97.2. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.	 Thermal image showing a rectangular piece of wood with a color scale from 31.7 to 103. The image is labeled 'FLIR' at the bottom.

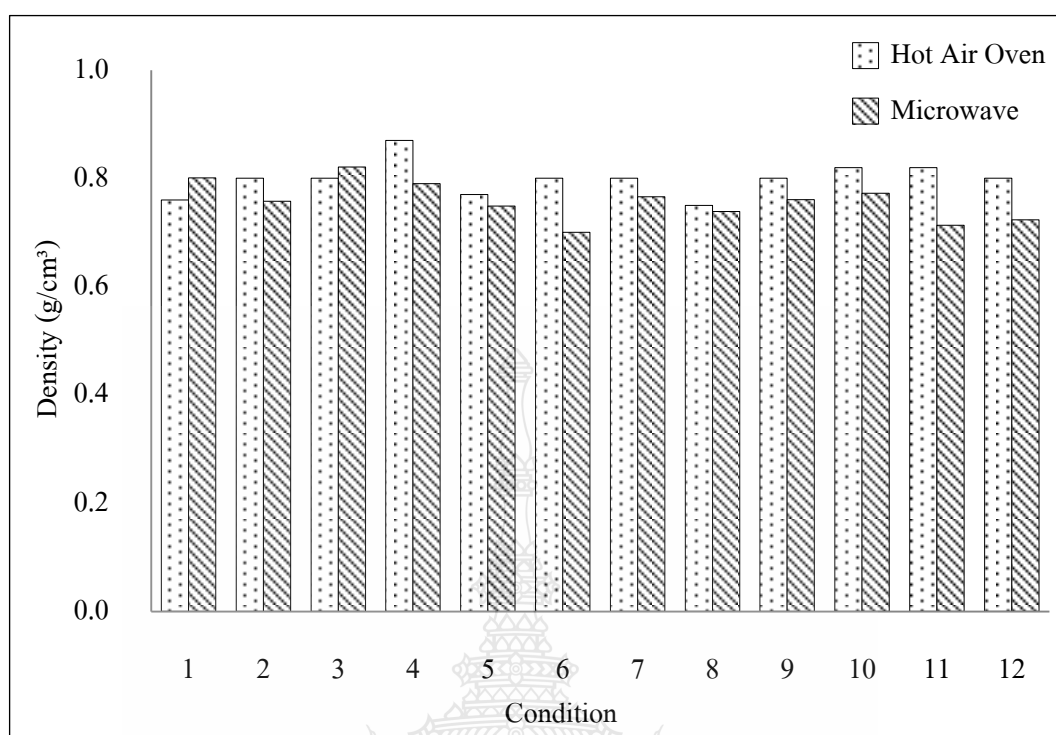
ตารางที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองเมื่อทำการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 70 min พบว่าการกระจายตัวของความร้อนเกิดขึ้นบริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน โดยความร้อนจะกระจายตัวจากบริเวณแกนกลางสู่บริเวณขอบผิวแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน เนื่องจากบริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นและค่าสัมประสิทธิ์สูญเสียแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )) มีค่าสูง ทำให้แผ่นชิ้นไม้อัดดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นชิ้นไม้อัดสูงตามไปด้วย โดยสังเกตเมื่อผ่านการอบที่เวลา 10 min การเปลี่ยนแปลงของสีจากบริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดจะมีสีแดงและกระจายตัว

ออกสู่บริเวณขอบของแผ่นชิ้นไม้อัด ซึ่งบริเวณขอบจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า และเมื่อผ่านการอบไปเป็นเวลา 70 min สีแดงบริเวณตรงกลางของแผ่นเริ่มมีการกระจายตัวลดลงเพราะความชื้นเริ่มระเหยออกจากแผ่นชิ้นไม้อัดทำให้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ลดลงเป็นเหตุให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย



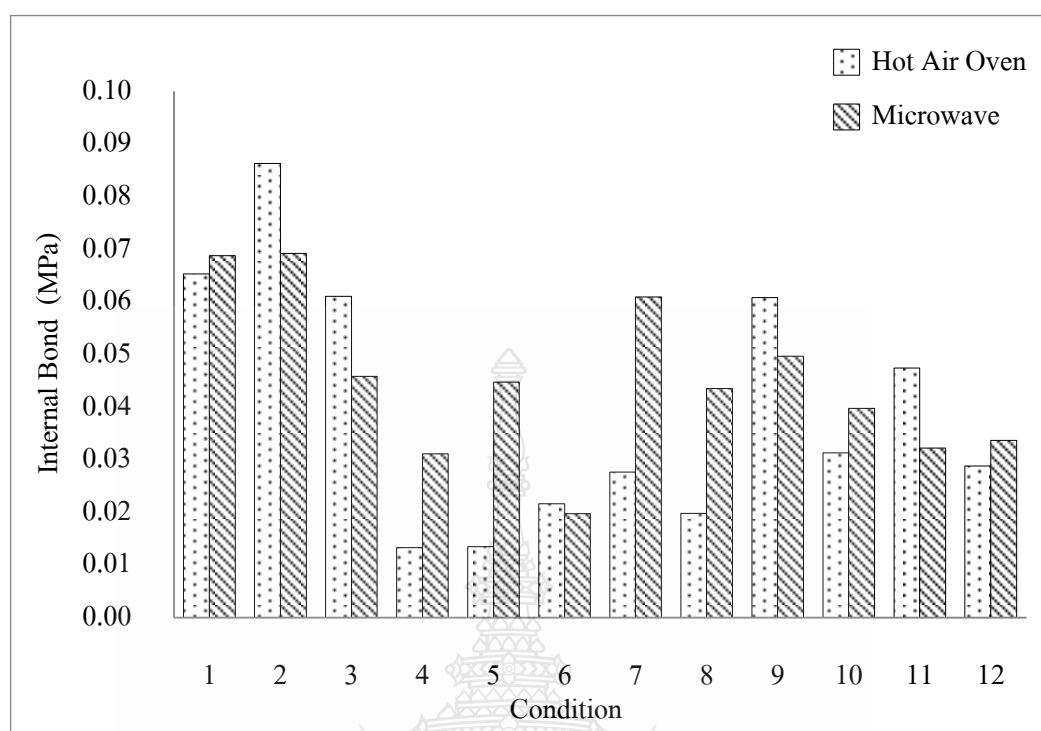
ภาพที่ 4.4 การบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ภาพที่ 4.4 แสดงค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังจากผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ 4800 W พบว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ภายในของแผ่นชิ้นไม้อัดมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ การกระจายความร้อน และการลดความชื้นสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นชิ้นไม้อัดที่ดี และเมื่อทำการทดสอบค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำจึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการบวมพองหลังการแช่น้ำของการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) (ค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 37.77% ส่วนจากเตาอบลมร้อน (Hot air oven) ได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 48.33%)



ภาพที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

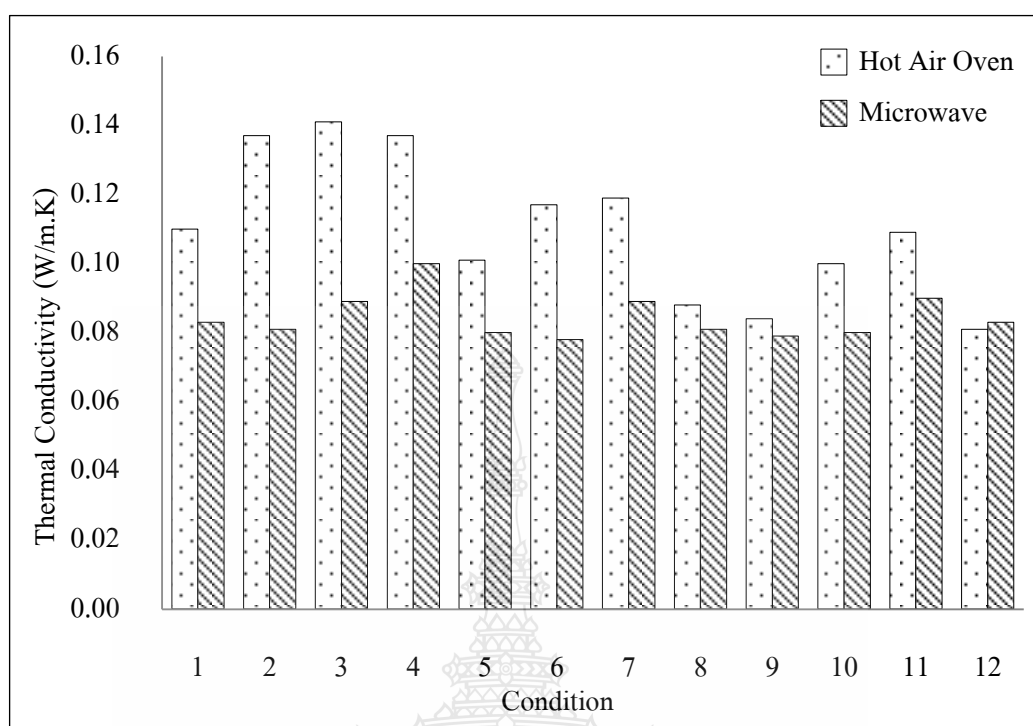
ภาพที่ 4.5 แสดงค่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังจากผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ 4800 W พบว่าเมื่อพิจารณาโดยมวลต่อปริมาตรของการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดหลังจากทำการทดลองโดยการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ในอัตราเร็วที่ดีกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) โดยจะเกิดจากความแตกต่างของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้นเพราะการเกิดไออย่างรวดเร็วของวัสดุจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวภายในและภายนอกของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงส่งผลให้มวลวัสดุแห้งสุดท้ายของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง เมื่อนำไปทดสอบหาความหนาแน่นพบว่ามีความหนาแน่นโดยเฉลี่ยต่ำกว่าแผ่นขึ้นไม้อัดที่อบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot air oven) แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.6 ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ภาพที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond) ของแผ่นชิ้นไม้จากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังจากผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ 4800 W พบว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ภายในของแผ่นชิ้นไม้อัดมีความแข็งแรงมากกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) เมื่อนำไปทดสอบจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูงกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) จากผลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการให้ความร้อนที่สูงและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิของการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟทำให้ความชื้นภายในเนื้อไม้ลดลงเร็วกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) โดยของเหลวจะเคลื่อนตัวออกสู่ผิวหน้าโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้เกิดการแห้งตัวอย่างรวดเร็วและเกิดกระบวนการเชื่อมประสานด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างวัตถุผิวของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง นอกจากนี้พบว่าชิ้นไม้อัดแผ่นที่ 2 ที่ทำการผลิตที่อัตราส่วนผสม เส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อ ผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วน 1:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 80°C มีค่าแรงต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond) มีค่าสูงเช่นเดียวกับค่าความหนาแน่น เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียนและมีปริมาณน้ำที่ใช้เหมาะสม จึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในการเชื่อมประสานของพันธะไฮโดรเจนได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ



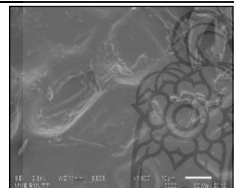
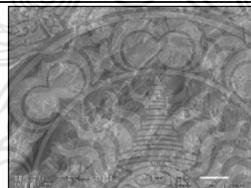
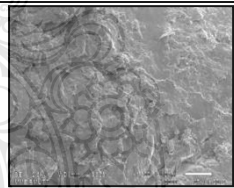
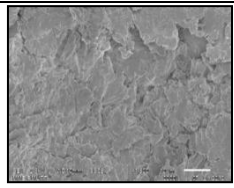
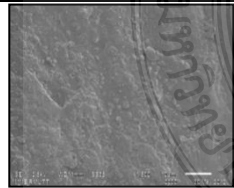
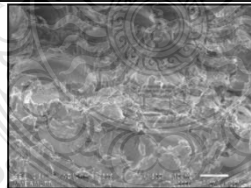
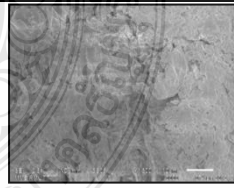
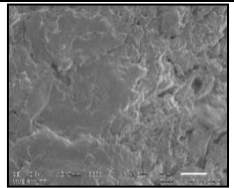
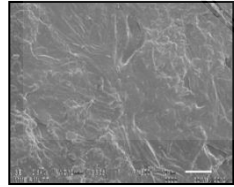
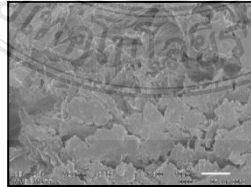
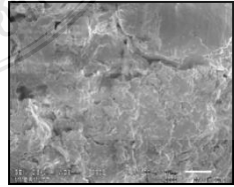
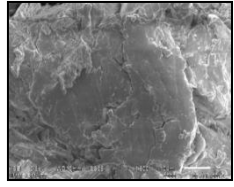
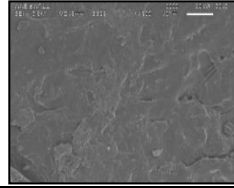
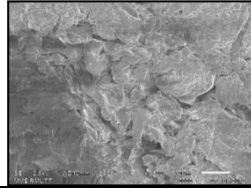
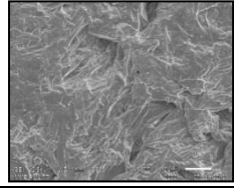
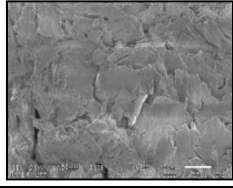


ภาพที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ภาพที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังจากผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ 4800 W พบว่าค่าสภาพการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีค่าต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot Air Oven) เนื่องจากการอบแห้งด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ได้มีการถ่ายเทมวลและความชื้น ซึ่งเกิดจากความแตกต่างกันของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะการเกิดไออย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นซึ่งจะถูกทำให้เป็นไวก่อนที่จะออกจากวัสดุ ซึ่งหากวัสดุมีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลทำให้ความดันภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อไให้ของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้ กรณีที่วัสดุมีความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้น ซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปรกติ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์การบีบของเหลว (Pumping Effect) และปรากฏการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศขึ้นมากในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าต่ำตามไปด้วย และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การอบด้วยเตาอบ

แบบลมร้อน (Hot air oven) พบว่าการอบแห้งด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot air oven) มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ประมาณ  $0.1312 \text{ W/m.K}$  และการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ประมาณ  $0.0822 \text{ W/m.K}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยเตาอบแบบลมร้อน (Hot air oven) นอกจากนี้พบว่าชิ้นไม้อัดแผ่นที่ 4 ที่ทำการผลิตที่อัตราส่วนผสม เส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อ ผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วน 2:1:2 อบที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียนที่สูงและมีปริมาณน้ำที่ใช้เหมาะสม จึงก่อให้เกิดการเชื่อมประสานของพันธะไฮโดรเจนได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ มีโครงสร้างความเป็นผลึกสูง โดยอนุภาคมีการจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งส่งผลต่อการนำความร้อนได้ดี ประกอบการในกระบวนการผลิตแผ่นชิ้นไม้อัดเป็นกระบวนการอัดร้อนจึงส่งผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้เป็นระเบียบมากขึ้น จึงส่งผลให้แผ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง

**ตารางที่ 4.3** ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ผิวด้านนอกแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง กำลังขยาย 1,500 เท่า [27]

Condition	Single Microwave	Microwave and Hot Air $40^\circ\text{C}$	Microwave and Hot Air $50^\circ\text{C}$	Microwave and Hot Air $60^\circ\text{C}$
1:1:1				
1:1:1.5				
2:1:1.5				
2:1:2				

ตารางที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) บริเวณผิวด้านนอกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ กำลังขยาย 1,500 เท่า โดยโครงสร้างทางกายภาพครอบคลุมในส่วนของความยาว ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง และรูปร่างของผิว พบว่าการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟแผ่นขึ้นไม้อัดจะได้รับความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตร ทำให้การกระจายความชื้นภายในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพถ่ายจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวด้านนอก พบว่าในการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 4800 W ลักษณะโครงสร้างและผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีความราบเรียบสม่ำเสมอมากกว่าการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2400 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C และ 60 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ด้านในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง กำลังขยาย 1,500 เท่า [27]

Condition	Single Microwave	Microwave and Hot Air 40 °C	Microwave and Hot Air 50 °C	Microwave and Hot Air 60 °C
1:1:1				
1:1:1.5				
2:1:1.5				
2:1:2				

จากตารางที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) บริเวณผิวด้านในของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน หมอนทองที่กำลังขยาย 1,500 เท่า จะพบโพรงอากาศหรือช่องว่างในแผ่นขึ้นไม้อัดน้อยเพราะกลไกการเกิดความร้อนจากภายในของระบบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ มีการถ่ายเทมวลและความชื้นในช่วงแรก จะเกิดจากความแตกต่างกันของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะการเกิดไอน้ำอย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นซึ่งจะถูกทำให้เป็นไอก่อนที่จะออกจากวัสดุ ซึ่งหากวัสดุมีความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลทำให้ความดันภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อไอของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้กรณีที่วัสดุมีความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้น ซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปรกติ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกปรากฏการณ์ว่า ปรากฏการณ์การปั๊มของเหลว (Pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปรกติจะเป็นแรงดันไอกระทำทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการให้ความร้อนเข้าไปอีกและบางครั้งเป็นเหตุให้เกิดการแข็งตัวของผิวหรือผิวมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการอัดร้อน จะส่งผลให้ช่องว่างของอากาศในแผ่นขึ้นไม้อัดลดลง ดังนั้นเมื่อขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดโดยใช้ปริมาณเส้นใยในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จะเกิดการอัดตัวของเส้นใยมากขึ้น เมื่อสังเกตจากภาพถ่ายระดับอิเล็กตรอนจะพบ โพรงหรือช่องว่างในแผ่นขึ้นไม้อัดน้อยกว่าแผ่นขึ้นไม้อัดที่ใช้เส้นใยในอัตราส่วนที่ต่ำกว่า ดังนั้นที่อัตราส่วน 1:1:1 จะสังเกตว่าภาพถ่ายระดับอิเล็กตรอนของแผ่นขึ้นไม้อัด จึงมีลักษณะของโพรงและช่องว่างของอากาศมากกว่าที่อัตราส่วน 2:1:1.5 และเนื่องจากเส้นใยเปลือกทุเรียนมีสภาพพื้นที่ผิวมาก จึงก่อให้เกิดการเชื่อมประสานเป็นอย่างดีของเส้นใย และเมื่อทำการพิจารณาถึงลักษณะพื้นผิวจะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อมีการใช้น้ำในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จะส่งผลให้พื้นผิวของแผ่นเรียบกว่าที่แผ่นขึ้นไม้อัดที่ใช้อัตราส่วนน้ำน้อย อันเนื่องมาจากเกิดการเชื่อมประสานพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยทุเรียน ผงเปลือกทุเรียน และน้ำที่มีประสิทธิภาพในการจัดเรียงโครงสร้างที่เป็นระเบียบ รวมทั้งกระบวนการขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดนั้นเป็นกระบวนการอัดร้อนภายใต้อุณหภูมิและความดัน จึงส่งผลทำให้เกิดการเชื่อมประสานของขั้วพันธะเคมีได้ดี จึงสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าแผ่นขึ้นไม้อัดที่ใช้น้ำในอัตราส่วนที่สูงกว่าจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่เรียบและสม่ำเสมออย่างชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 4.3

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิด ป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่องนั้น งานวิจัย นี้ได้ทำการทดลองศึกษาพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ อุณหภูมิ ค่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นขึ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ส่วนพลังงานจากไมโครเวฟ ใช้กำลังไมโครเวฟ 4800 W โดยที่ใช้วัสดุ ทดลองคือแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่ง ส่วนผสมออกเป็น 12 สูตร คือ 1:1:1 80 90 และ 100 °C 1:1:1.5 80 90 และ 100 °C 2:1:1.5 80 90 และ 100 °C 2:1:2 80 90 และ 100 °C ขนาด 20 cm x 20 cm x 1 cm จากการศึกษา พบว่าก่อนอบแผ่นขึ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนแต่ละแผ่นจะมีน้ำหนักมากและมีความชื้นมาก อยู่ที่ประมาณ 30 - 40% Dry Basis ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็น ฉนวนไฟฟ้า มีค่าสูงและเมื่อทำการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟพบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant ( $\epsilon'$ )) และค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ )) มีค่า ลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นลดลงและน้ำหนักลดลง เพราะในกระบวนการอบแห้งค่าสมบัติ ไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) จะแปรเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิและความชื้นในคราวเดียวกัน จึง ส่งผลให้การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟไว้ได้และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากตาม อุณหภูมิมีค่า สูงขึ้น ต่อมาการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากความชื้น ภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออกสู่ผิวภายนอก เพราะในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายใน แผ่นขึ้นไม้อัดมีเฟสของของเหลวอย่างต่อเนื่องทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้น ลดลงและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้าซึ่ง เป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก และ กำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนจะมีค่ามากในช่วงแรกและจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ โดยพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่มีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยในช่วงท้ายการทดลองพลังงาน คลื่นไมโครเวฟที่ทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมี ความชื้นลดลง การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าลดลง แต่ความร้อนสะสมในแผ่นขึ้นไม้อัดจาก

เปลือกทุเรียนยังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงอยู่ และเมื่อวิเคราะห์ถึงค่า Dielectric Properties ในตารางที่ 4.1 พบว่าเวลาที่ใช้ในการอบมากจึงทำให้ค่าความชื้นมีค่าเข้าใกล้จุดสมดุลมากขึ้นตามไปด้วย และการใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชั้นไม้อัดค่อนข้างสม่ำเสมอและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์การปั๊มของเหลว (Pumping Effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปรกติจะเป็นแรงดันไอกระทำ ให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าโดยตรง โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ และปรากฏการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การแห้งตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการให้ความร้อนเข้าไปอีกและบางครั้งเป็นเหตุให้เกิดการแข็งตัวของผิวหรือผิวมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุเพราะเป็นคลื่นที่มีย่านความถี่สูงซึ่งความยาวคลื่นสั้น คลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ดังนั้นเมื่อใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันนั้นเกิดได้ดีขึ้น ในส่วนของอิทธิพลของความดันรวมนั้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำ และยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง รวมถึงค่าสมบัติทางกล ทางกายภาพ ของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน โดยกรณีที่ 2 (1:1:1.5 อบที่อุณหภูมิ 80 °C) มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดโดยมีค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำอยู่ที่ 24.6% ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond) เท่ากับ 0.069 MPa ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 0.76 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เท่ากับ 0.081 W/m.K ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายระดับอิเล็กทรอนิกส์ จึงเหมาะสมที่จะนำไปเป็นส่วนประกอบภายในอาคารหรือเป็นวัสดุทดแทนไม้ได้

ดังนั้นการประยุกต์ใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ เพราะมีข้อได้เปรียบหลายประการ คือ มีประสิทธิภาพทางความร้อน เพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสีย จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองเพื่อเพิ่มคุณภาพแก่แผ่นขึ้นไม้อัด เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะดีกว่าการให้ความร้อนแบบการนำความร้อนและการพาความร้อน แบบตู้อบแห้งลมร้อนปกติ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบไมโครเวฟที่ทำการศึกษากลับมาเป็นระบบแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องมีข้อจำกัด คือใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หรือวัสดุ ของแข็งหรือกึ่งของแข็งเท่านั้น ดังนั้นหากต้องการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหรือกึ่งของเหลว ควรเลือกใช้ระบบไมโครเวฟแบบถาด



## รายการอ้างอิง

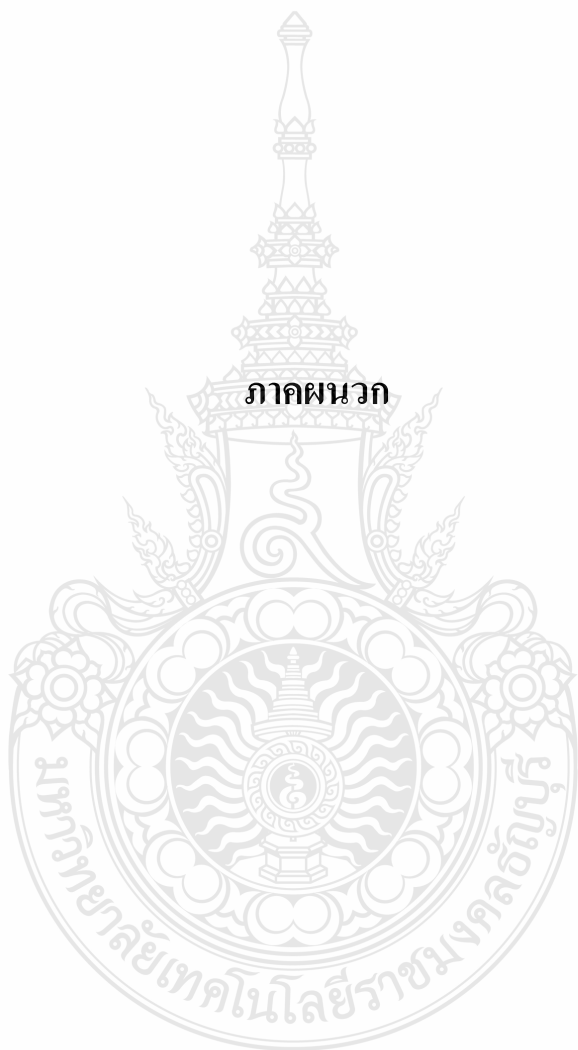
- [1] กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ (Online), 2553. Available:www.dft.go.th/Portals/0/.../ทุเรียน53@25541128-1452107020.doc (25 พฤษภาคม 2555).
- [2] Khedari, J., Charoenvai, S., and Hirunlabh, J., "New Insulating Particleboards from Durian Peel and Coconut Coir", **Building and Environment**, Vol 38, 2003. pp. 435-441.
- [3] สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, การสำรวจเชิงทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขของกระบวนการอบแห้งร่วมระหว่างไมโครเวฟและการพาความร้อนสำหรับวัสดุพูนแบบขึ้นมาก (กรณีศึกษา: ไม้), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548
- [4] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ดวงเดือน อางองค์ ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย สุขนัม ปิยโชติ, “การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง,” การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 18, วันที่ 18-20 ตุลาคม 2547. จังหวัดขอนแก่น.
- [5] Vongpradubchai, S., “A Study of Drying Process of Dielectric Material By Using Multi Feed Microwave Continuous Belt drier, Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, 2010.
- [6] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [7] นพวรรณ คุณาม, การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE10), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.
- [8] โสภิตา สังข์สุนทร, การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัว (ในระนาบ 1 มิติ) ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.



- [9] วราภรณ์ ชะอุ่ม, การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและทดลองของกระบวนการทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้ไมโครเวฟติดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE<sub>10</sub>), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [10] Vongpradubchai, S., Rattanadecho, P., “The Microwave Processing of wood using a continuous microwave belt drier”, **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Vol 48, No 5, 2009. pp. 997-1003.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ มอก.-876-2547” (Online), 2547.  
Available:<http://itc.excise.go.th/tisi/fulltext/TIS876-2547.pdf> (23 กันยายน 2555).
- [12] สมชาติ โสภณรณฤทธิ, การอบแห้งอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. ม.ป.ท. 2532.
- [13] วิฑูรย์ อบรม กัสตุรี เจ๊ะนิ เสถียร ธัญญศรีรัตน์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช., “จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุชีวมวลด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบสุญญากาศ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- [14] Liu, F., Turner, I.W., Siores, E., and Groombridge, P., “Numerical and Experimental Investigation of Microwave Heating of Polymer Materials inside a ridge waveguide”, **Microwave Power and Electromagnetic Energy**, Vol. 32, 1996. pp. 71-82.
- [15] Turner, I.W., Puiggli, J.R. and Joma, W., “A Numerical Investigation of Combined Microwave and Convective Drying of a Hygroscopic Porous Material: A study Based on Pine Wood”, **Trans IChemE**, Vol 76, 1998. pp. 221-223.
- [16] Zhao, H., Turner, I.W., “The use of a coupled computational model for studying the microwave heating of wood”. **Applied Mathematical modeling**, 2000. pp.183-197.
- [17] Oloyede, A., Groombridge, P., “Influence of microwave heating on the mechanical properties of wood”, **Materials Processing Technology**, Vol 100, No 1, 2000. pp. 67-73.
- [18] Jindarat, W., Rattanadecho, P., Vongpradubchai, S. and Pianroj, Y., “Analysis of Energy Consumption in Drying Process of Non-Hygroscopic Porous Packed Bed Using a Combined Multi-Feed Microwave - Convective Air and Continuous Belt System (CMCB)”, **Drying Technology An International J.**, Vol.29, 2011. pp. 926 – 938.

- [19] Rattanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., “Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials.” **ASME J. Heat Transfer**, Vol. 124, No 1, 2002. pp. 151-161.
- [20] Lee, H.W., “Combined microwave and convective drying of Korean wood species Proceedings of the **8th International IUFRO Wood Drying Conference**, 2003. pp. 146-149.
- [21] Perre, P., Turner, I.W., “The use of numerical simulation as a cognitive tool for studying the microwave drying of softwood in an over-sized waveguide”, **Wood Science and Technology**, Vol 33, No 6, 1999. pp. 445-464.
- [22] Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Watanasungsuit, A. and Duangduen, A., “Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace.”, **ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering**, Vol. 129 , No 1, 2007. pp. 157-163.
- [23] Lehne. M., Barton. G.W. and Langrish. T.A.G. “Comparison of experimental and modeling studies for the microwave drying of ironbank timber”, **Drying technology**, 1999. pp. 2219-2235.
- [24] Vongpradubchai, S., Jindarat, W., and Rattanadecho, P., “The drying of multi-layer porous material using microwave and convective with a rectangular waveguide”, **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification** : Impact factor 1.518
- [25] Prommas, R., Rattanadecho, P. and Cholaseuk, D., “Energy and Exergy Analyses in Drying Process of Porous Media Using Hot Air” **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Vol 37, 2010, pp. 372-378.
- [26] สโรชา เจริญวัย สรพงษ์ ภาสุปรีย์ อนินท์ มีมนต์ ชนากานต์ อาษาสุจจริต และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “โครงการการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเชื่อมประสานที่ย่อยสลายได้จากเปลือกทุเรียนหมอนทองในการผลิตแผ่นชั้นไม้อัด”, รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2556.
- [27] Charoenvai, S., Yingyuen, W., Jewyee, A., Rattanadecho, P., and Vongpradubchai, S., “Comparative Evaluation on Product Properties and Energy Consumption of Single Microwave Dryer and Combination of Microwave and Hot Air Dryer for Durian Peel Particleboards,” **10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium**, December 5-8. 2012. Ubon ratchathani, Thailand.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ASTM C518

มาตรฐานการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)





Designation: C 518 – 04

## Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 518; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope

1.1 This test method covers the measurement of steady state thermal transmission through flat slab specimens using a heat flow meter apparatus.

1.2 The heat flow meter apparatus is used widely because it is relatively simple in concept, rapid, and applicable to a wide range of test specimens. The precision and bias of the heat flow meter apparatus can be excellent provided calibration is carried out within the range of heat flows expected. This means calibration shall be carried out with similar types of materials, of similar thermal conductances, at similar thicknesses, mean temperatures, and temperature gradients, as expected for the test specimens.

1.3 This a comparative, or secondary, method of measurement since specimens of known thermal transmission properties shall be used to calibrate the apparatus. Properties of the calibration specimens must be traceable to an absolute measurement method. The calibration specimens should be obtained from a recognized national standards laboratory.

1.4 The heat flow meter apparatus establishes steady state one-dimensional heat flux through a test specimen between two parallel plates at constant but different temperatures. By appropriate calibration of the heat flux transducer(s) with calibration standards and by measurement of the plate temperatures and plate separation. Fourier's law of heat conduction is used to calculate thermal conductivity, and thermal resistivity or thermal resistance and thermal conductance.

1.5 This test method shall be used in conjunction with Practice C 1045. Many advances have been made in thermal technology, both in measurement techniques and in improved understanding of the principles of heat flow through materials. These advances have prompted revisions in the conceptual

approaches to the measurement of the thermal transmission properties (1-4).<sup>2</sup> All users of this test method should be aware of these concepts.

1.6 This test method is applicable to the measurement of thermal transmission through a wide range of specimen properties and environmental conditions. The method has been used at ambient conditions of 10 to 40°C with thicknesses up to approximately 250 mm, and with plate temperatures from -195°C to 540°C at 25-mm thickness (5, 6).

1.7 This test method may be used to characterize material properties, which may or may not be representative of actual conditions of use. Other test methods, such as Test Methods C 236 or C 976 should be used if needed.

1.8 To meet the requirements of this test method the thermal resistance of the test specimen shall be greater than 0.10 m<sup>2</sup>·K/W in the direction of the heat flow and edge heat losses shall be controlled, using edge insulation, or a guard heater, or both.

1.9 It is not practical in a test method of this type to try to establish details of construction and procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without pertinent technical knowledge. Thus users of this test method shall have sufficient knowledge to satisfactorily fulfill their needs. For example, knowledge of heat transfer principles, low level electrical measurements, and general test procedures is required.

1.10 The user of this method must be familiar with and understand the Annex. The Annex is critically important in addressing equipment design and error analysis.

1.11 Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development of improved or new methods or procedures by research workers.

1.12 Since the design of a heat flow meter apparatus is not a simple matter, a procedure for proving the performance of an apparatus is given in Appendix X3.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved May 1, 2004. Published June 2004. Originally approved in 1963. Last previous edition approved in 2002 as C 518 – 02<sup>1</sup>.

<sup>2</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.



1.13 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:<sup>3</sup>

- C 167 Test Methods for Thickness and Density of Blanket or Batt Thermal Insulations
  - C 168 Terminology Relating to Thermal Insulation
  - C 177 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus
  - C 236 Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box
  - C 687 Practice for Determination of the Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation
  - C 976 Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box
  - C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions
  - C 1046 Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components
  - C 1058 Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation
  - C 1114 Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Thin-Heater Apparatus
  - C 1363 Test Method for the Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus
  - E 230 Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples
  - E 178 Practice for Dealing with Outlying Observations
  - E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
- ### 2.2 ISO Standard:
- ISO 8301:1991 Thermal Insulation—Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties—Heat Flow Meter Apparatus<sup>4</sup>

## 3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Terminology C 168 and to the following subsections.

### 3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *calibration, n*—the process of establishing the calibration factor for a particular apparatus using calibration specimens having known thermal transmission properties.

3.2.2 *calibration transfer specimen, n*—(CTS) a thermal calibration specimen that has been measured by a national standards laboratory (26).

3.2.3 *cold surface assembly, n*—the plate that provides an isothermal boundary at the cold surface of the test specimen(s).

3.2.4 *controlled environment, n*—an environment sometimes employed in the apparatus to limit lateral heat flows.

3.2.5 *edge insulation, n*—auxiliary insulation used to limit lateral heat flows, these are sometimes permanently mounted in the apparatus.

3.2.6 *guard, n*—promotes one-dimensional heat flow. Primary guards are planar, additional coplanar guards can be used and secondary or edge guards are axial.

3.2.7 *heat flow meter apparatus, n*—the complete assemblage of the instrument, including hot and cold isothermal surfaces, the heat flux transducer(s), and the controlled environment if used, and instrumentation to indicate hot and cold surface temperatures, specimen thickness, and heat flux.

3.2.8 *hot surface assembly, n*—the plate that provides an isothermal boundary at the hot surface of the test specimen(s).

3.2.9 *heat flux transducer, n*—a device containing a thermopile, or an equivalent, that produces an output which is a function of the heat flux passing through it. The metering area usually consists of a number of differently connected temperature sensors placed on each face of a core and surface sheets to protect the assembly. A properly designed transducer will have a sensitivity that is essentially independent of the thermal properties of the specimen.

3.2.10 *metering area, n*—the area of the specimen(s) in contact with the sensor area of the heat flux transducer.

3.2.11 *secondary transfer standard, n*—a specimen, which has been measured in a heat flow meter apparatus, which has been calibrated with primary standards, used to calibrate additional apparatuses.

3.2.12 *sensitivity, n*—the ratio of the heat flux passing through the transducer to the electrical output of the heat flux transducer.

3.2.13 *standard reference material (SRM), n*—a lot of material that has been characterized by a national standards laboratory (26).

3.2.14 *thermal transmission properties, n*—those properties of a material or system that define the ability of the material or system to transfer heat. Properties, such as thermal resistance, thermal conductance, thermal conductivity, and thermal resistivity would be included, as defined in Terminology C 168.

3.3 *Symbols and Units*—The symbols used in this test method have the following significance:

3.3.1  $\lambda$ —thermal conductivity,  $W/(m \cdot K)$ .

3.3.2  $C$ —thermal conductance,  $W/(m^2 \cdot K)$ .

3.3.3  $R$ —thermal resistance,  $(m^2 \cdot K)/W$ .

3.3.4  $q$ —heat flux (heat flow rate,  $Q$ , through area  $A$ ),  $W/m^2$ .

3.3.5  $Q$ —heat flow rate in the metered area,  $W$ .

3.3.6  $A$ —metering area,  $m^2$ .

3.3.7  $L$ —separation between the hot and cold plate assemblies during testing,  $m$ .

3.3.8  $T_m$ —mean temperature,  $(T_h + T_c)/2$ ,  $K$ .

3.3.9  $\Delta T$ —temperature difference across the specimen,  $K$ .

3.3.10  $\rho$ —(bulk) density of the material tested,  $kg/m^3$ .

3.3.11  $S$ —calibration factor of the heat flux transducer,  $(W/m^2)/V$ .

3.3.12  $E$ —heat flux transducer output,  $V$ .

<sup>3</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>4</sup> Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

- 3.3.13  $T_h$ —temperature of the hot plate surface, K.  
 3.3.14  $T_c$ —temperature of the cold plate surface, K.

3.4 Subscripts:

- 3.4.1  $h$ —hot.  
 3.4.2  $c$ —cold  
 3.4.3  $a, b$ —first and second specimen.  
 3.4.4  $m$ —mean.  
 3.4.5  $\alpha$ —statistical term used to define significance level.

#### 4. Significance and Use

4.1 This test method provides a rapid means of determining the steady-state thermal transmission properties of thermal insulations and other materials with a high level of accuracy when the apparatus has been calibrated appropriately.

4.2 Proper calibration of the heat flow meter apparatus requires that it be calibrated using specimen(s) having thermal transmission properties determined previously by Test Methods C 177, or C 1114.

NOTE 1—Calibration of the apparatus typically requires specimens that are similar to the types of materials, thermal conductances, thicknesses, mean temperatures, and temperature gradients as expected for the test specimens.

4.3 The thermal transmission properties of specimens of a given material or product may vary due to variability of the composition of the material; be affected by moisture or other conditions; change with time; change with mean temperature and temperature difference; and depend upon the prior thermal history. It must be recognized, therefore, that the selection of typical values of thermal transmission properties representative of a material in a particular application should be based on a consideration of these factors and will not apply necessarily without modification to all service conditions.

4.3.1 As an example, this test method provides that the thermal properties shall be obtained on specimens that do not contain any free moisture although in service such conditions may not be realized. Even more basic is the dependence of the thermal properties on variables, such as mean temperature and temperature difference. These dependencies should be measured or the test made at conditions typical of use.

4.4 Special care shall be taken in the measurement procedure for specimens exhibiting appreciable inhomogeneities, anisotropies, rigidity, or especially high or low resistance to heat flow (see Practice C 1045). The use of a heat flow meter apparatus when there are thermal bridges present in the specimen may yield very unreliable results. If the thermal bridge is present and parallel to the heat flow the results obtained may well have no meaning. Special considerations also are necessary when the measurements are conducted at either high or low temperatures, in ambient pressures above or below atmospheric pressure, or in special ambient gases that are inert or hazardous.

4.5 The determination of the accuracy of the method for any given test is a function of the apparatus design, of the related instrumentation, and of the type of specimens under test (see Section 10), but this test method is capable of determining thermal transmission properties within  $\pm 2\%$  of those determined by Test Method C 177 when the ambient temperature is near the mean temperature of the test ( $T(\text{ambient}) = T(\text{mean})$

$\pm 1^\circ\text{C}$ ), and in the range of 10 to  $40^\circ\text{C}$ . In all cases the accuracy of the heat flow meter apparatus can never be better than the accuracy of the primary standards used to calibrate the apparatus.

4.5.1 When this test method is to be used for certification testing of products, the apparatus shall have the capabilities required in A1.7 and one of the following procedures shall be followed:

4.5.1.1 The apparatus shall have its calibration checked within 24 h before or after a certification test using either secondary transfer standards traceable to, or calibration standards whose values have been established by, a recognized national standards laboratory not more than five years prior to the certification date. The average of two calibrations shall be used as the calibration factor and the specimen(s) certified with this average value. When the change in calibration factor is greater than 1%, the standard specimen shall be retested and a new average calculated. If the change in calibration factor is still greater than 1% the apparatus shall be calibrated using the procedure in Section 6.

4.5.1.2 Where both the short and long term stability of the apparatus have been proven to be better than 1% of the reading (see Section 10), the apparatus may be calibrated at less frequent intervals, not exceeding 30 days. The specimens so tested cannot be certified until after the calibration test following the test and then only if the change in calibration factor from the previous calibration test is less than 1%. When the change in calibration is greater than 1%, test results from this interval shall be considered void and the tests repeated in accordance with 4.5.1.1.

4.5.2 The precision (repeatability) of measurements made by the heat flow meter apparatus calibrated as in Section 6.6 normally are much better than  $\pm 1\%$  of the mean value. This precision is required to identify changes in calibration and is desirable in quality control applications.

#### 5. Apparatus

5.1 The construction guidelines given in this section should be understood by the user of this test method. While it is mandatory that these details be followed carefully when constructing an apparatus, it behooves the user to verify that the equipment is built as specified. Serious errors of measurement may result from this oversight.

##### 5.2 General:

5.2.1 The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are described in Section 6 and shown in Figs. 1-3. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this test

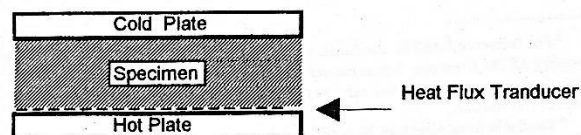


FIG. 1 Apparatus with One Heat Flux Transducer and One Specimen

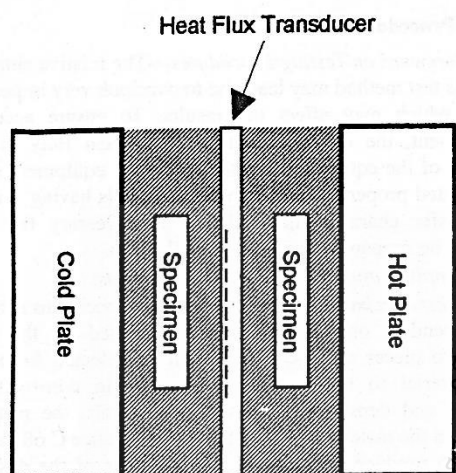


FIG. 2 Apparatus with One Heat Flux Transducer and Two Specimens

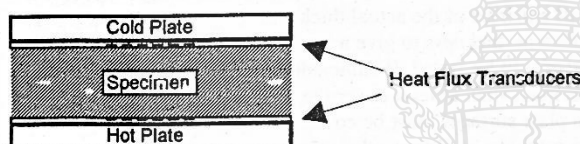


FIG. 3 Apparatus with Two Heat Flux Transducers and One Specimen

method. There are distinct advantages for each configuration in practice and these are discussed in Appendix X2.

NOTE 2—Further information can be found in ISO 8301:1991, which is the equivalent ISO standard for the Heat Flow Meter Apparatus.

5.2.2 Further design considerations such as plate surface treatment, flatness and parallelism, temperature requirements and measuring system requirements can be found in Annex A1.

## 6. Calibration

6.1 The calibration of a heat flow meter apparatus is a very critical operation. Since lateral heat losses or gains of heat are not controlled or eliminated automatically, but only lessened by increasing the size of the guard area and edge insulation, there is no guarantee that the heat losses or gains are negligible under all testing conditions. To ensure that the equipment is performing properly with specimens of different thermal resistances, the apparatus shall be calibrated with materials having similar thermal characteristics and thicknesses as the materials to be evaluated. The apparatus shall be calibrated with the specimen in the same orientation and the heat flux in the same direction under which the primary, CTS or SRM, or secondary transfer standards were characterized, if known. The material selected for the calibration standard shall have properties that are not affected by convection over the range of calibration parameters (temperature difference, thickness, density, and so forth) of interest. The apparatus shall be calibrated as a unit, with the heat flux transducer(s) installed in the apparatus.

6.2 This procedure applies to the calibration of a heat flow meter apparatus over a wide range of heat flow rates and

temperatures, which permits the testing of a wide variety of insulation materials over an extended temperature range.

6.3 The following calibration procedure is used to compute the calibration factor,  $S$  for a heat flow meter apparatus, and must be used by anyone who desires to produce meaningful heat flux measurements from a heat flow apparatus.

### 6.4 Calibration Standards:

6.4.1 Calibration standards may be good for many years if handled carefully but shall be checked periodically to confirm lack of change.

6.4.2 It is recommended that the primary standards obtained from a national standards laboratory should not be used on a daily basis, but secondary or working standards should be produced. Create a record on the secondary standards with the following information.

6.4.2.1 Name of national laboratory to which it is traceable.

6.4.2.2 Date the secondary standard is produced.

6.4.2.3 Date the secondary standard is last tested.

6.4.2.4 Direction of heat flux during calibration.

6.4.2.5 Thermal value of the secondary standard.

6.4.2.6 Range of parameters for which it is valid.

6.4.2.7 Estimate of bias of the primary and secondary standards.

### 6.5 Calibration Procedure:

6.5.1 Calibrate the heat flow meter apparatus under the same conditions of plate temperatures, temperature gradient, specimen thickness, heat flow direction, and apparatus orientation as those for which data are available for the standard.

6.5.2 *Single Temperature Point*—If the calibration standard is tested at a single mean temperature, conduct the calibration and subsequent tests near the same mean temperature. Use engineering judgment or an error analysis to determine how closely the mean temperature must be maintained. As assessment of the sensitivity of the calibration standard to test conditions should be determined by the user of the transfer standard to determine its limitations of use.

6.5.3 *Multiple Temperature Points*—If the calibration standard is tested at three or more mean temperatures, calibrate the heat flow meter apparatus at the same temperatures using the same temperature gradients (11). A smooth curve can be fitted to the points such that a calibration factor can be interpolated for any given mean temperature. It is not permissible to extrapolate above or below the mean temperature range of the calibration standard measurements. Changing the plate temperature of a heat flow meter apparatus has the potential of changing apparatus calibration. When changing plate temperatures, take steps to determine if the heat flux transducer calibration factor has changed.

6.5.4 *Single Thickness Point*—If the original calibration standard is tested at only one thickness, the heat flow meter apparatus can be calibrated for that thickness without an exhaustive thickness study. If tests are to be conducted at thicknesses other than the calibrated thickness, make a thorough study of the error of the heat flow meter apparatus at other thicknesses. Several references on this subject are listed at the end of this test method (4, 11-15, 17, 26, 27).

6.5.5 *Multiple Thickness Points*—If the original standard is tested at three or more thicknesses, the heat flow meter



 C 518 - 04

apparatus can be calibrated over the same thickness range. A smooth curve can be fitted to the points such that a calibration factor can be interpolated for any given thickness. If tests are to be conducted at thicknesses above or below the calibrated thicknesses, make a thorough study of the error of the heat flow meter apparatus at these thicknesses.

#### 6.6 Calibration of Various Designs:

6.6.1 There are several configurations of heat flow meter apparatuses that use one or two heat flux transducers and one or two specimens in the apparatus. While it is not practical to list all of the possible combinations of apparatus and specimen configurations, this section contains the equations for calculating the calibration factor of three common apparatuses. The calibration and testing configuration should be identical. The calibration factor of a heat flow meter apparatus is determined by running the same standard specimens a number of times, not consecutively, but over a period of time with the standard removed each time.

6.6.2 *One Calibration Standard*—Apparatus with one heat flux transducer and one standard (see Fig. 1).

$$S = C \cdot (T_h - T_c) / E \quad (1)$$

6.6.3 *Two Calibration Standards*—Apparatus with one heat flux transducer and one specimen configuration (same as that for 6.6.2).

6.6.3.1 The two calibration standards need to be the same thickness and of similar material but need not be identical. With the following equation, it is not necessary to know the thermal conductance of each calibration standard, but it is necessary to know the average thermal conductance of the two standards:

$$S = \frac{C_a + C_b}{\left( \frac{E_a}{(T_{ha} - T_{ca})} + \frac{E_b}{(T_{hb} - T_{cb})} \right)} \quad (2)$$

6.6.3.2 *Two Calibration Standards*—Apparatus with one heat flux transducer and two specimens (see Fig. 2).

6.6.3.3 Again, the standards need to be the same thickness and of similar material but not necessarily identical.

$$S = \frac{C_a + C_b}{E \left( \frac{1}{(T_{ha} - T_{ca})} + \frac{1}{(T_{hb} - T_{cb})} \right)} \quad (3)$$

6.6.4 *One Calibration Standard*—Apparatus with two heat flux transducers and one specimen (see Fig. 3).

6.6.4.1 Assuming the two transducers physically are identical and have similar outputs, one can sum the outputs of the two transducers and then calibrate as a single transducer apparatus. In this case, it is very important to keep the mean temperature and the plate temperatures equal to those used in testing the standard. It is essential that each of the transducers be at steady state.

$$S = \frac{C \cdot (T_h - T_c)}{(E_1 + E_2)} \quad (4)$$

6.6.4.2 In the case where multiple transducers are used, a similar calculation can be utilized to calculate the calibration factor.

6.6.4.3 As an alternative, each heat flux transducer can be calibrated as an independent apparatus as in 6.6.1.

## 7. Test Procedures

7.1 *Foreword on Testing Procedures*—The relative simplicity of this test method may lead one to overlook very important factors, which may affect the results. To ensure accurate measurement, the operator shall be instructed fully in the operation of the equipment. Furthermore, the equipment shall be calibrated properly with reference materials having similar heat transfer characteristics. Also it is necessary that the specimen be prepared properly for evaluation.

### 7.2 Sampling and Preparation of Specimens:

7.2.1 *Test Specimens*—One- or two-piece specimens may be used, depending on the configuration selected for the test. Where two pieces are used, they shall be selected from the same material to be essentially identical in construction, thickness, and density. For loose fill materials, the method specified in the material specification or in Practice C 687 shall be used to produce a specimen or specimens of the desired density.

7.2.2 *Selection of Specimens*—The specimen or specimens shall be of such size as to cover the plate assembly surfaces and shall either be of the actual thickness to be applied in use or of sufficient thickness to give a true average representation of the material to be tested. If sufficient material is not available, the specimen shall at least cover the metering area, and the rest of the plate surfaces must be covered with a mask with a thermal conductivity as close to that of the specimen as possible.

7.3 *Specimen Conditioning*—Details of the specimen selection and conditioning preferably are given in the material specification. Where such specifications are not given, the specimen preparation shall be conducted in accordance with the requirement that materials shall not be exposed to temperatures that will change the specimens in an irreversible manner. Typically, the material specifications call for specimen conditioning at 22°C (72°F) and 50 % R.H. for a period of time until less than a 1 % mass change is observed over a 24-h period. For some materials, such as cellulose, considerably longer times may be required for both conditioning and testing.

### 7.4 Specimen Preparation:

7.4.1 Use the following guidelines when the material specification is unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to ensure that they are parallel with and have uniform thermal contact with the hot and cold plates.

7.4.2 *Compressible Specimens*—The surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively uneven so long as surface undulations are removed under test compression. It may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, compressible or otherwise, the measured heat flux will be greater than the heat flux that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers may be required for the measurement of compressible specimens.

7.4.3 *Rigid and High Conductance Specimens*—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens

 C 518 - 04

requires careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the heat-flow-meter. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate.

#### 7.5 Measurements on Specimens:

**7.5.1 Blanket and Batt-Type Materials**—When specified, the test thickness of blankets and batt-type materials shall be determined before testing in accordance with Test Methods C 167, provided that good contact is maintained between the specimen and the isothermal plates. Also, it is recommended highly that the thickness during the actual test be measured. At the conclusion of the test, the density in the metering area should be determined.

**7.5.2 Loose-fill Materials**—These materials generally are tested in open test frames as spelled out in Practice C 687. The requirement to measure the density in the metering area is again critical.

#### 7.6 Limitations on Specimen Thickness:

**7.6.1 General**—The combined thickness of the specimen or specimens, the heat flux transducer and any damping material, which in total equals the distance between the cold and hot plates, must be restricted in order to limit the effect of edge losses on the measurements. In addition edge losses are affected by the edge insulation and the ambient temperature, so the requirements on both of these parameters must be met.

**7.6.2 Maximum Spacing Between Hot and Cold Plates**—The maximum allowable distance between the hot and cold plates during a test, is related to the dimensions of the heat flux transducer, the metering area, the size of the plate assembly, the construction of the heat meter apparatus, and the properties of the specimen. No suitable theoretical analysis is available to predict the maximum allowable thickness of specimens. It is possible to use the results of an analysis for a similarly sized guarded hot plate as a guide (10, 16-18).

#### 7.7 Procedure of Measurement:

**7.7.1 Temperature Difference**—For any test, make the temperature difference across the specimen not less than 10 K. For specimens that are expected to have a large thermal resistance, a larger temperature difference in the specimen is recommended (see Practice C 1058 for the selection of the plate temperatures). The actual temperature difference or gradient is best specified in the material specifications or by agreement of the parties concerned.

**7.7.2 Edge Insulation**—Enclose the edges of the specimens with thermal insulation to reduce edge heat losses to an acceptable level if this edge insulation is not built into the apparatus (see A1.6).

**7.7.3 Settling Time and Measurement Interval**—Verify the existence of thermal equilibrium by observing and recording, the emf output of the heat flux transducer, the mean temperature of the specimens, the temperature drop across the specimen, and a calculated  $\lambda$  value. Make observations at time intervals of at least 10 min until five successive observations yield values of thermal conductivity, which fall within ½ % of the mean value for these five readings. If the five readings show a monotonically increasing or decreasing trend, equilib-

rium has not been attained. In this case, additional sets of readings shall be taken. If experience has shown that a shorter time interval may be used, follow the same criteria for stability. For high density specimens ( $\rho > 40 \text{ kg/m}^3$ ) or for low conductance specimens ( $C < 0.05 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ ) the time between readings may have to be increased to 30 min or longer (19).

## 8. Calculation

**8.1 Density and Change in Mass**—When required, calculate the density of the dry specimen as tested,  $\rho$ , the mass change due to conditioning of the material, and the mass change of the specimen during test.

**8.1.1 Density of Batt and Blanket Specimens**—It has been found that it is important to measure the mass of the specimens in contact with the metering area. The area of the specimen directly measured shall be cut out and its mass determined after testing, unless the specimen must be retained for further testing.

**8.2 Thermal Properties for One Specimen**—When only one specimen is used, calculate the thermal conductance of the specimen as follows:

$$C = S \cdot E / \Delta T \quad (5)$$

and where applicable, calculate the thermal conductivity, as follows:

$$\lambda = S \cdot E \cdot (L / \Delta T) \quad (6)$$

**8.3 Thermal Properties for Two Specimens**—When two specimens are used, calculate the total thermal conductance,  $C$ , as follows:

$$C = S \cdot E / (\Delta T_a + \Delta T_b) \quad (7)$$

The  $\lambda$  factor, that is, the average thermal conductivity of the specimen is calculated as follows:

$$\lambda_{ave} = (S \cdot E / 2) \cdot (L_a + L_b) / (\Delta T_a + \Delta T_b) \quad (8)$$

where the subscripts refer to the two specimens.

**8.4 Other derived thermal properties** may be calculated but only under the provisions given in Practice C 1045.

**8.5 Thermal Properties for Two Transducers**—All pertinent equations of 8.2 and 8.3 apply to this configuration, provided  $S \cdot E$  will be replaced by  $(S' \cdot E' + S'' \cdot E'') / 2$ , where the superscripts ' and '' refer to the first and second heat flux transducer, respectively.

## 9. Report

**9.1** The report of the results of each test shall include the following information with all data to be reported in both SI and inch-pound units unless specified otherwise.

**9.1.1** The report shall be identified with a unique numbering system to allow traceability back to the individual measurements taken during the test performed.


**9.1.2** Name and any other pertinent identification of the material including a physical description.

**9.1.3** Description of the specimen and its relationship to the sample, including a brief history of the specimen, if known.

**9.1.4** Thickness of the specimen as received and as tested.

**9.1.5** Method and environment used for conditioning, if used.

**9.1.6** Density of the conditioned specimen as tested,  $\text{kg/m}^3$ .


**C 518 – 04**

9.1.7 Mass loss of the specimen during conditioning and testing, in percentage of conditioned mass, if measured.

9.1.8 Mass regain of the specimen during test, in percentage of conditioned mass, if measured.

9.1.9 Average temperature gradient in the specimen during test as computed from the temperatures of the hot and cold surfaces,  $K/m$ .

9.1.10 Mean temperature of the test,  $K$  or  $^{\circ}C$ .

9.1.11 Heat flux amount and direction through the specimen,  $W/m^2$ .

9.1.12 Thermal conductance,  $W/m^2 \cdot K$ .

9.1.13 Duration of the measurement portion of the test, min or h.

9.1.14 For loose-fill materials, report the specimen preparation followed.

9.1.15 Date of test, the date of the last heat meter calibration, and the type or types of materials used.

9.1.16 Estimated or calculated uncertainty in reported values. It is optional as to which of the error analysis methods given in Annex A2 is used by the laboratory.

9.1.17 Orientation and position of the heat meter apparatus during test (vertical, horizontal, etc.), and whether the meter was against the hot or cold surface of the specimen and whether the edges of the specimen(s) were sealed or open to the ambient.

9.1.18 For direct reading apparatus, the results of the calibration of electronic circuitry and equipment or a statement of compliance including date, and a statement of compliance on linearity requirements.

9.2 In many cases a laboratory is requested to provide only the thermal conductivity at a specified mean temperature and a few pertinent physical properties, such as density, and test thickness. An abridged test report shall state "Abridged ASTM C 518 Test Report" and shall include the thermal transmission property of interest, mean temperature, test thickness, and bulk density. It is mandated that an uncertainty statement shall be transmitted with the thermal transmission property. Compliance to Test Method C 518 requires that the other test parameters specified in 9.1.i-9.4 to be recorded in the laboratory records.

9.3 For certification testing only, the specimens used in calibration shall be identified as to the type, thermal resistance, date of specimen certification, source of certification, expiration date of calibration, and the certification test number. Where applicable include a statement of the laboratory accreditation of the test facility, including the date of the latest inspection.

9.4 Statement of compliance, or where circumstances or requirements preclude complete compliance with the procedures of the test, agreed exceptions. A suggested wording is "This test conformed with all requirements of ASTM C 518— with the exception of (a complete list of exceptions follows)."

## 10. Precision and Bias

10.1 This section on precision and bias for the guarded hot plate apparatus includes a discussion of; general statistical terms; statistical control; factors affecting test results; ruggedness tests; interlaboratory comparisons conducted by ASTM

Committee C-16; proficiency testing conducted under the auspices of the National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP); and error propagation formulae.

10.2 The accuracy of a test result refers to the closeness of agreement between the observed value and an accepted reference value. When applied to a set of observed values, the accuracy includes a random component (imprecision) and a systematic component (bias). The variability associated with the set of observed values is an indication of the uncertainty of the test result. Additional information on statistical terminology is available in Terminology E 456.

10.3 The user of the heat-flow-meter apparatus shall demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time (29, 35). The use of control charts (see Manual 7 (34)) to monitor the operation of the heat-flow-meter is one recommended way to monitor the control stability of the apparatus. When possible, it is recommended that a reference material traceable to a national standards laboratory be used as the control specimen. Ideally, the long-term variation should be no greater than the short-term variability.

10.4 A series of three round robins was conducted between 1976 and 1983, as reported by Hust and Pelanne (21), and employed low density fiberglass specimens from 2.54 to 10.2 cm. thick with densities ranging from 10 to 33  $kg/m^2$ . A total of twelve laboratories were involved in these studies. The interlaboratory imprecision, at the two standard deviation level when analyzed using Practice E 691, was found to vary from 1.92 to 3.54 % between 2.54 and 10.2 cm.

10.5 A round robin conducted in 1987, as reported by Adams and Hust, included eleven participating laboratories testing a fiberglass blanket and several types of loose-fill insulations (24). The blanket insulation had an interlaboratory imprecision of 3.7 % at the two standard deviation level. The loose-fill interlaboratory imprecision was found to be > 10 % for different materials at the two standard deviation level. It has been suggested that the principal cause for the significant differences observed is the various specimen preparation techniques used by the various laboratories.

10.6 A round robin conducted in 1990, as reported by McCaa and Smith, et. al., included ten participating laboratories testing a fiberglass blanket and several type of loose-fill insulation (25). The blanket insulation had an interlaboratory imprecision of 2.8 % at the two standard deviation level. The loose-fill interlaboratory imprecision was found to be 5.0 % for perlite, 5.8 % for cellulose, 9.4 % for unbonded fiberglass, and 10.5 % for mineral wool at the two standard deviation level. This represented a significant improvement over the 1987 results and is attributed to a more concise specimen preparation procedure in Practice C 687.

10.7 An Interlaboratory "Pilot Run" of Small Heat-Flow-Meter Apparatus for ASTM C 518 was reported in 1999 (32). A precision statement was prepared in accordance with Practice E 691. The precision statement is provisional because an insufficient number of materials were involved. Within 5 years additional data will be obtained and processed that meet the requirements of Practice E 691. A bias statement was prepared following Test Method C 177. Bias as compared to results from



C 518 - 04

the Test Method C 177 apparatus was found to be statistically insignificant at the  $\alpha = 5\%$  level (95 % confidence interval) for the materials studied.

10.8 *Proficiency Tests*—Interlaboratory testing carried out between nine laboratories under the National Voluntary Laboratory Accreditation Program currently is showing an interlaboratory imprecision of 2.12 % at the two standard deviation level based on testing of similar but not identical specimens (22, 23).

## 11. Keywords

11.1 calibration; error analysis; heat flow meter apparatus, thermal resistance; heat flux; instrument verification; thermal conductivity; thermal testing

## ANNEXES

### (Mandatory Information)

#### A1. EQUIPMENT DESIGN

A1.1 The exposed surfaces of the plates and the heat flux transducer, that is, the surfaces making contact with the specimens, shall be painted or otherwise treated to have a total hemispherical emittance of greater than 0.8 at their operating temperatures (see Note A1.1).

NOTE A1.1—Hard anodizing of aluminum produces a surface with a total hemispherical emittance of approximately 0.85. Several paints are available, which when applied as directed, produce a total hemispherical emittance of approximately 0.86.

A1.2 *Plate Assemblies, Hot and Cold*—The two plate assemblies should provide isothermal surfaces in contact with either side of the test specimen. The assemblies consist of heat source or sink, a high conductivity surface, means to measure surface temperature, and means of support. A heat flux transducer may be attached to one, both, or neither plate assembly, depending upon the design, (see Section 6). In all cases, the area defined by the sensor of the heat flux transducer is called the metering area and the remainder of the plate is the guard area.

A1.2.1 A means shall be provided to maintain the temperature of the plate assemblies at the desired level. Examples are fluid baths, electrical heaters, or thermoelectric coolers, or a combination thereof (7-9).

A1.2.2 If a heat flux transducer is located at the midplane of the specimens (see Fig. 2), then means shall be provided to determine the average temperature of the transducer in order to apply temperature corrections to the calibration, except when the test temperatures are equal to those used in calibration, in which case no correction is required. If a matched pair of specimens is tested, the temperature of the transducer can be computed from the temperatures of the plate assemblies.

A1.2.3 The plate assemblies shall be sufficiently rigid to maintain flatness and parallelism. For an apparatus designed to be used over wide ranges of conductivity and thickness (thermal resistances) the flatness and parallelism of the plates should be 0.02 % of the maximum linear dimensions of the plates (see Note A1.2). One way to check this is to use standard gauge blocks to generate a map over the metering area (10).

NOTE A1.2—The planeness of the surface can be checked with a straightedge, of a length greater than the width or diameter of the unit, held against the surface and viewed with a light behind the straightedge. Departures as small as 25 mm are readily visible, and larger departures can be measured using shimstock or thin paper.

A1.2.3.1 It is important to maintain the parallelism of the plates for several reasons. In most cases it is the plate separation, which is measured in order to determine specimen thickness. Furthermore, the plate parallelism is important in maintaining consistent surface contact with specimens in repeat testing, such as calibration, and is required to maintain a uniform temperature difference across the specimen(s). If the plate temperatures are cycled continuously during testing, the flatness needs to be checked periodically.

A1.2.4 Plate flatness may become critical when measuring specimens with less thermal resistance than the calibration standards, irrespective of the thickness or rigidity of the calibration standard. For rigid thin specimens the criteria given in A1.2.3 may not be sufficient.

A1.2.5 The rigidity, flatness, and parallelism of the plates may impede the testing of rigid specimens where it is not possible to obtain good surface contact. In such cases, the use of a thin sheet of suitable homogeneous material may be interposed between the specimen and the plates surfaces. This thin sheet should have a low thermal resistance relative to the specimen. The resistance of the thin sheet should be determined using a Test Method C 177 apparatus. The resistance of the composite sandwich (sheet-rigid specimen-sheet) then is determined and the value of the sheet resistance subtracted from the total resistance. Caution should be exercised when using such a practice as it is prone to adding more uncertainty to this method.

#### A1.3 *Temperature Measuring and Control Systems:*

A1.3.1 The surfaces of the plate assemblies in contact with the specimen(s) shall be instrumented with precision temperature sensors such as thermocouples, platinum resistance thermometers (RTD), and thermistors. Temperature sensors shall be mounted in grooves so as to be flush with the surface in contact with the specimen(s).

 C 518 - 04

A1.3.2 No strict specification is given as the number of temperature sensors that shall be used for each surface; however, the user shall report the uncertainty of the temperature measurement, including the component due to temperature nonuniformity across the surface. In some cases where temperature mapping of the plate surfaces has indicated high uniformity under all conditions of use, one thermal sensor per surface has been used satisfactorily.

A1.3.2.1 Special precautions should be taken to ensure that the temperature sensors are anchored thermally to the surface to be measured and that the temperature gradients along the wires leading to the sensors are minimized. If thermocouples on opposing surfaces are connected differentially, they shall be electrically insulated from the plates with a resistance of 1 megaohm or greater (5, 6).

A1.3.2.2 Thermocouples mounted in the surfaces of the plates or set into the surfaces of specimens should be made of wire no longer than 0.25 mm in diameter (No. 30 B and S gage). For highest accuracy only "special limit" thermocouples should be used. In addition, even these "special limit" thermocouples should be checked for nonhomogeneities in the wire. For information concerning voltage output and accuracy of thermocouples in the cryogenic temperature range, and installation, see Refs (7, 8).

A1.3.2.3 Temperature sensors should be calibrated to an accuracy equivalent to that for thermocouples conforming to Tables E 230. The precision of the temperature measuring system may need to be better than this to detect the effect of drift on the results discussed in Appendix X3. The accuracy required by a heat flow meter apparatus can best be determined by carrying out an error analysis (see Annex A2), and then calibrating the temperature sensors to the degree required.

A1.3.2.4 In the special case where the heat flow meter apparatus is used only for repetitive tests on one material and the same plate temperatures are used for calibration, (and where the standards are tested at the same temperatures) the accuracy of the calibration of the temperature sensors will not be as critical since any errors will remain constant and be included in the calibration.

#### A1.4 Heat Flux Transducer:

A1.4.1 *Types of Heat Flux Transducer*—The types of heat flux transducers are described in Practice C 1046. The gradient type, often used in the heat flow meter apparatus, consists of a slab of material, the "core," across which the temperature gradient is measured, normally with a thermopile. The main transducer surfaces are assumed to be isothermal, so the heat flow will be normal to them. Precautions shall be taken to limit the effect of heat flow through the leads on the output of the thermopile. Often the heat flux transducer also is instrumented to measure one of the surface temperatures of the specimen(s).

A1.4.2 *Surface Sheets*—Both surfaces of the transducer should be covered with a layer of material as thin as is compatible with protection from thermal shunting of the thermopile. The exposed surfaces of the heat flux transducer shall be finished smoothly to conform to the desired geometric shape to within the limits of A1.2.4.

A1.5 *Plate Separation, Specimen Thickness*—A means shall

be provided to determine the average separation between the heating and cooling plate surfaces during operation. Rigid specimens generally act as the spacers themselves, and plate separation is determined by their thickness at operating temperature. In this case, a small constant force generally is applied to hold the plates against the specimen. It is unlikely that a pressure greater than 2.5 kPa will be required. For easily compressible specimens, small stops interposed between the corners of the hot and cold plates, or some other positive means shall be used to limit the compression of the specimens (see Note A1.3). Provision shall be made for checking the linearity of any thickness measuring system.

NOTE A1.3—Because of the changes of specimen thickness possible as a result of temperature or compression by the plates, it is recommended that specimen thickness be measured in the apparatus, at the existing test temperature and compression conditions whenever possible.

A1.6 *Edge Insulation*—Heat loss from the outer edges of the heat flow meter apparatus and specimens shall be restricted by edge insulation or by governing the surrounding air temperature or by both methods. The three different configurations differ in their susceptibility to edge heat losses as is discussed in Appendix X2 (2, 4, 9, 10).

A1.6.1 For all three configurations, the susceptibility to edge heat losses is related strongly to the sensitivity of the transducer to temperature differences along its main surfaces, and therefore, only experimental checks while changing environmental conditions can confirm, for each operating condition, the magnitude of the effect of edge heat losses on measured heat flux. This error should be smaller than 0.5 %.

A1.7 *Measuring System Requirements*—The apparatus measuring system shall have the following capabilities:

A1.7.1 The uncertainty of the measurement of the temperature difference across the specimens shall be within  $\pm 0.5$  % of the actual temperature difference.

A1.7.2 A voltage accuracy of better than 0.2 % of the minimum output (from the transducer) to be measured.

A1.7.3 Sufficient linearity so that the system contributes less than 0.2 % error at all outputs.

A1.7.4 Sufficient input impedance so that the system contributes less than 0.1 % error for all readings.

A1.7.5 Sufficient stability so that the system contributes less than 0.2 % error during the period between calibrations, or 30 days, whichever is greater.

A1.7.6 Adequate noise immunity so that less than 0.2 % rms noise occurs in the readings.

A1.8 *Proven Performance*—The test results obtained by this test method only can be assured if the limitations of the apparatus are known. See Appendix X3 for further details. To establish these limitations, one must prove the performance by comparing the results with materials of similar thermal properties previously tested on a guarded hot plate apparatus as those to be evaluated.

A1.8.1 A single point of reference may lead to serious errors. Select a range of transfer standards having known thermal transmission properties, which cover the range of values to be tested, in both resistance and thickness. If a range

 C 518 - 04

of standards is not available running tests on a single standard at different  $\Delta T$ 's will provide verification of linearity. On equipment with fixed plate temperatures provision shall be made for calibration of electronic circuitry independent of the remainder of the apparatus.

A1.8.2 If the apparatus is to be used at thicknesses greater than that of the available reference materials, a series of calibration measurements shall be performed to insure that the equipment does not introduce additional errors, which may be due to lateral heat losses or gains brought about by insufficient guarding (4, 10). One means of checking for these errors is to use multiple thicknesses of the calibration standards. If these are stacked with a radiation blocking septum between each of the standards, the first approximation is that the total thermal resistance is the sum of the individual thermal resistances.

## A2. EQUIPMENT ERROR ANALYSIS

A2.1 A complete error analysis is complex; however, some form of error analysis is mandated for compliance with this test method. Such an error analysis is useful for estimating which parameters may contribute to the overall uncertainty in the measurements. It is the option of the manufacturer or user of the apparatus to follow the guidelines given in A2.9 or A2.10 to determine the uncertainties. It is mandated, however, that any result shall be accompanied with its uncertainty.

A2.2 For any one given apparatus, a careful error analysis as outlined here, in most cases, will show up any major difficulties, which may need correcting in order to improve the measurement accuracy of the heat flow meter apparatus. The performance of this analysis involves consideration of the following points.

A2.3 Estimates of errors in each individual measurement procedure and propagation of these errors to the final result.

A2.4 Measurements to determine apparatus variability to intentional deviations from normal operations.

A2.5 Measurements on reference materials and participation in round-robin programs.

A2.6 For a more complete discussion of error analysis the reader is directed to the ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" (20).

### A2.7 Calibration Errors:

A2.7.1 Heat flux transducer calibration is temperature dependent and must be considered if the transducer temperature is changed.

A2.7.2 Specimen temperature gradient may affect the calibration factor.

A2.7.3 Heat flow meter apparatus calibration may be dependent on heat flux.

A2.7.4 Temperature sensor inaccuracy may result in the standard being tested at inappropriate temperature conditions.

A2.7.5 Hot and cold plate surface emittance shall be similar to the primary apparatus on which the standard was measured.

A1.9 *Environmental Control*—In many applications, it is desirable to control the environment surrounding the test specimen to reduce edge heat losses, and it is especially important when the mean test temperature is below the ambient temperature, in order to avoid condensation on the cold plate. A cabinet or enclosure surrounding the isothermal plates and the specimens to maintain the ambient temperature at the mean temperature of the specimen also may be used as a means to maintain the dew point temperature at least 5 K lower than the temperature on the cold plates, in order to prevent condensation and moisture pickup by the specimen. Any environmental control system employed in conjunction with a heat flow meter apparatus shall be capable of maintaining its set point condition within  $\pm 1^\circ\text{C}$  in temperature.

A2.7.6 Heat loss from specimen edges may be significant under some conditions. Factors to be considered when evaluating edge losses are thickness of specimen, conductivity of specimen, width of guard, amount of external insulation, and edge ambient temperature.

A2.7.7 Plate separation and parallelism inaccuracies can produce errors.

A2.7.8 Check the voltage output of the heat flux transducer to be sure that when the heat flux is zero there is no voltage output by the heat flux transducer. If there is a voltage output with no temperature gradient, analyze the problem and make corrections before proceeding with testing. The state of zero heat flux is usually accomplished by leaving the apparatus completely turned off in a constant temperature room for a sufficient length of time such that the entire apparatus is at the same temperature.

A2.7.9 Some heat flux transducers may be pressure sensitive.

A2.7.10 Decisions on outlying calibration points should have statistical basis, including input from documents such as Practice E 178.

A2.7.11 Lackey et al (30) studied the impact of material, thickness, mean temperature and temperature difference and on calibration. The study involved 91 individual measurements and 6 transfer standards. Testing was carried out over a period of six months. Specimen thickness varied between 26 to 158 mm, mean temperatures between 0 to 40°C, temperature differences between 10 and 40°K and two types of insulating material. Results showed that all these factors did not significantly influence the calibration procedure adopted for the apparatus used. The calibration method was also successfully applied to two other heat flow meter apparatus.

### A2.8 Error and Uncertainty Estimates:

A2.8.1 The uncertainties in measurements on the heat flow meter apparatus can be divided into the three general categories of (1) uncertainty of the precision of the calibrating specimen, (2) uncertainty in the precision of the apparatus, and (3)



uncertainty due to the fact that the calibrating specimen and test specimen are not identical.

A2.8.2 National standards laboratories generally express the expanded uncertainty of a measurement artifact (that is, calibration specimen) as defined by current international guidelines (20, 33). The user must evaluate their measurement uncertainty by proper inclusion of the uncertainty of the calibration specimen reported by the national standards laboratory.

A2.8.3 The repeatability of a heat flow meter apparatus can be determined by making independent replicate measurements on the same specimen by the same operator in the shortest practical time. Independent measurements require the removal, re-conditioning, and subsequent installation of the specimen.

NOTE A2.1—With the application of proper laboratory procedures, the user could realize a repeatability coefficient of variation (CV %) of 0.5 % or less. By conducting replicate measurements at regular time intervals, the user can demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time. The use of control charts is recommended to monitor the control stability of the heat flow meter apparatus.

A2.8.4 The third category of uncertainties is much more difficult to evaluate. This involves the uncertainties due to errors associated with the calibration standard and unknown test specimen not having identical heat transfer properties. A list of potential uncertainties is given in 8.1. An example of this is a laboratory having standards at 25.4 mm, 76.2 mm, and 152.4 mm and running a test at 127 mm. While it is possible to reduce the uncertainty by following good laboratory procedures, there is always a small but real uncertainty.

A2.9 Interlaboratory comparison results can be found in Refs (21, 22, 23, 24, 28, 36, 37). In addition there was a workshop on measurement errors and methods of calibration of the Heat Flow Meter Apparatus held by ASTM C-16 at Williamsburg, VA, on April 10, 1994 (12, 13, 29, 30, 31).

A2.10 To illustrate a procedure of error analysis estimation, consider the operational definition of thermal conductivity:

$$\lambda = S \cdot E \cdot L / \Delta T \quad (\text{A2.1})$$

The uncertainties in  $S$ ,  $E$ ,  $L$ , and  $\Delta T$  ( $\delta S$ ,  $\delta E$ ,  $\delta L$ , and  $\delta \Delta T$ ) can be used to form the uncertainty  $\delta \lambda$  by the usual error propagation formula where the total uncertainty is calculated

from the square root of the sums of the squares of the individual standard deviations.

$$(\delta \lambda / \lambda)^2 = (\delta S / S)^2 + (\delta E / E)^2 + (\delta L / L)^2 + (\delta \Delta T / \Delta T)^2 \quad (\text{A2.2})$$

This equation assumes that the errors in  $S$ ,  $E$ , etc., are random and independent of each other since the covariance terms are omitted. This is valid here if different instrumentation is used for measurements on each of the variables (20). In order to use Eq A2.2, the operator must estimate the maximum uncertainty for each variable and examine the sources of error to determine which can occur randomly and which can occur simultaneously.

A2.10.1 Care shall be taken to evaluate properly all of the uncertainties in the variables  $S$ ,  $E$ ,  $L$ , etc. For example, obvious sources of error in  $E$  are those caused by extraneous transverse heat flow along leads and deviations from one dimensional heat flow; however, an often neglected but important heat leak is that caused by a temperature drift of the transducer itself. This can be estimated readily from the heat capacity of the transducer assembly and the drift detection limit of the measurement system. The error in  $\Delta T$ ,  $\delta T$ , can be caused by calibration errors and measurement errors, but also by incorrect placement, incorrect thermal anchoring, and disturbances introduced by the thermocouple itself.

A2.11 Experiments should be performed to determine the variability of the test results to deviations from normal operating conditions. This variability combined with the estimated control stability under normal operating conditions can be used to estimate the error from this source. As one example, the effect of an imperfect guard balance control can be determined by purposely offsetting the guard, if this is possible, by a sufficient  $\Delta T$  in both directions and measuring the differences in the measured output.

A2.11.1 Care should be taken to not use such large offsets that nonlinear effects occur in the specimens. These results combined with the probable value of the offset during normal operation yield the error due to imperfect guard balance.

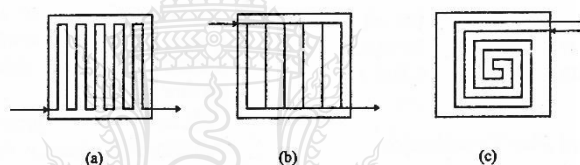
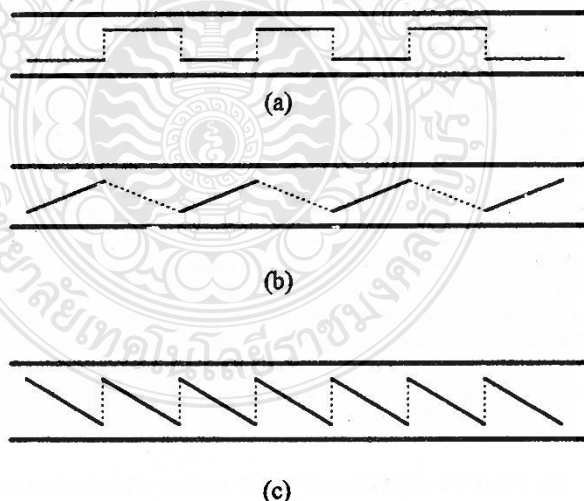
A2.12 The total estimated imprecision can be listed in a table of errors, such as shown in Table A2.1. This table is shown as an example only and does not represent any one particular heat flow meter apparatus since the errors will be specific to each apparatus.

**C 518 – 04**
**TABLE A2.1 Estimation of Random and Systematic Errors at Room Temperature**

Variable	Absolute Variations		Percent Variations	
	Random	Systematic	Random	Systematic
$\Delta T$	0.01 K	0.02 K	0.04	0.40
L	0	0.1 mm	0	0.40
E	0	0.01 V	0	0.01
S	0	2 mW	0	0.2
Temperature drift	0.05 K	0.05K	0.01	0.01
calibration	0	0.1 K	0	0.4
Heat flow drift	1 mW/m <sup>2</sup>	1 mW/m <sup>2</sup>	0.2	0.2
lateral	1 mW/m <sup>2</sup>	2 mW/m <sup>2</sup>	0.2	0.2
$\lambda$	0.2 mW/m <sup>2</sup> -K	0.3 mW/m <sup>2</sup> -K	0.8	1.2

**APPENDIXES**

(Nonmandatory Information)

**X1. (SEE FIGURES)**

**FIG. X1.1 Some Layouts of the Liquid Paths in Heating or Cooling Plates**

**FIG. X1.2 Schematic Designs of Transducers**





## X2. RESPONSE OF HEAT FLUX TRANSDUCERS

**X2.1 Configurations**—The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are shown in Section 6. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers, equipment to measure and control temperatures, thickness, and measure the output of the heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this test method (24). For a particular heat flux transducer, the test configuration that has the fastest response, that is the shortest settling time, is best determined by experiment. Four specimens of different materials, such as an urethane foam, ceramic fiber board, a rubber, and a high conductivity, low-thermal capacity material, should be tested in each configuration. A study of these results will allow either the selections of the proper configuration for each type of material or the selection of a reasonable configuration for all types.

**X2.1.1** In order to predict settling times for all types of specimens, each of the above specimens shall be retested after being conditioned to temperatures both below and above the mean temperature of the test.

### *X2.2 Time Response of Heat Flux Transducers:*

**X2.2.1 High Thermal Resistance Transducer**—A transducer with a high thermal resistance generally is used when the transducer is attached to one or both of the isothermal plates. When the specimens are preconditioned to the mean temperature of the test and when the plates are capable of both heating and cooling the specimens, the time response of a high resistance transducer will be more rapid than a comparable guarded hot plate apparatus. If the heat flux transducer has appreciable mass, the response will not be rapid.

**X2.2.1.1** When two transducers are used and attached to the isothermal plates, these can be used to obtain a very rapid response times if both plates are capable of heating and cooling and if the outputs of both transducers are summed (25).

**X2.2.2 Low Thermal Resistance Transducers**—The low-thermal resistance, gradient-type heat flux transducer is better suited to the configuration where the transducer is not attached to either plate. The temperature drop across the low-resistance transducer is small enough that the two specimens can be considered as halves of a single specimen. When the specimens are first conditioned to the mean temperature of the test and

when the specimens are identical, the response is sufficiently rapid to be used for quality control work.

**X2.2.2.1** Where half thicknesses of the normal specimen can be used, it can be more rapid than the single transducer configuration, especially when each of the specimens is first conditioned to the mean temperature at which it will be tested.

### *X2.3 Sensitivity of Configurations to Edge Losses:*

**X2.3.1** Heat loss from specimen edges may be significant under some conditions. Factors to be considered when evaluating edge losses are thickness of specimen, conductivity of specimens, width of the guard, amount of external insulation, and edge ambient temperature.

**X2.3.2** The configuration with the transducer mounted on one isothermal plate is similar to the guarded hot plate apparatus regarding edge heat losses through the specimen. The edge heat losses in the transducer may be much more significant than those in the guarded hot plate apparatus because they may produce errors due to the temperature nonuniformity on the side of the transducer in contact with the specimen.

**X2.3.3** The configuration with two transducers mounted on the isothermal plates is the most insensitive to edge conditions if the average of the readings of the two meters is assumed to be the measured heat flux per unit area through the specimen. If the plates are perfectly uniform in temperature, if the two transducers are exactly equal in the layout of the thermopile junctions, and if the specimen has thermal conductivity independent of temperature, this configuration is nearly insensitive to edge conditions. Even under these ideal conditions, however, the use of this configuration does not eliminate edge losses, but only reduces the apparatus susceptibility to variations in the boundary temperatures.

**X2.3.4** The configuration with the transducer between the two specimens is very sensitive to edge heat losses on the heat flux transducer since the power that flows through the edges is supplied, not by a heavy isothermal metal plates, but by the specimens, so that their surface temperatures may not be uniform. If the transducer is sensitive to temperature differences along its main surfaces, edge heat losses may now create serious errors. Edge heat losses within the specimens are similar to those in the guarded hot plate when the surrounding temperature is that of the hot or cold plate.

## X3. PROVEN PERFORMANCE OF A HEAT FLOW APPARATUS

**X3.1 Proven Performance**—Any heat flow meter apparatus that is new or has been modified shall be tested for the following characteristics and corrections shall be made where a change of greater than one percent occurs in the transducer

output due to the effects of X3.1.1-X3.2 over the range of operation and are recommended for changes of 0.3 % over the range of operation.

 C 518 - 04

X3.1.1 *Zero Offset*—This condition can be achieved by assuring that both plate assemblies are at the same temperature. If there is any output from the transducer for zero heat flux, this may be due to any or all of the following:

X3.1.1.1 Electrical contact resistance on a transducer with low output. This may be corrected if one can improve the connections to eliminate the problem. This type of output may be temperature dependent.

X3.1.1.2 Also, check grounding circuits because such a signal may be due to AC pickup in the leads from the transducer.

X3.1.1.3 If after checking X3.1.1.1 and X3.1.1.2 there is still a zero off-set, it may be possible to correct for this by assuring that the calibration curve of output versus heat flux is linear over the range of operating conditions.

X3.1.1.4 Susceptibility to warm or cold plate temperature nonuniformity. Check for temperature nonuniformity under all operating conditions and over a range of specimen thermal resistances.

X3.1.1.5 Drift in the transducer due to material aging or delamination. If such a change is noted, this should be used to determine the required calibration frequency.

X3.1.1.6 Temperature coefficient of the transducer sensitivity. This depends on the type of temperature detectors used in the transducer (thermocouple materials used in the thermopile) and the type of material used for the transducer core. If it is

found that the sensitivity is temperature dependent, a curve of sensitivity versus temperature shall be developed and used to correct measurement data.

X3.1.1.7 Heat flow down the transducer leads. One possible way to check for this is to move one's hand across the surface of the transducer between the metering area and the point where the leads exit the plate assembly, while observing the transducer output. In a well designed plate or transducer assembly there should be no observable output from the transducer except in the metering area.

X3.1.1.8 Effect of the thermal conductivity of the specimen on the sensitivity of the transducer. A "thermal shorting" effect between elements caused by low thermal resistance between the sensors of the thermopile or a funneling of heat through the sensors can change the sensitivity of the transducer. This can best be tested by running specimens with widely different thermal resistances.

X3.1.1.9 Effect of loading pressure on the transducer sensitivity. This should only be a problem if the transducer core is flexible.

X3.2 Finally, measurements shall be performed on transfer standards or accepted reference materials, to prove the performance of the apparatus. Care should be taken to ensure that the reference materials have characteristics similar to the specimens to be tested, and that the uncertainties of the standards themselves are known.

## References

- (1) Tye, R.P., Ed., *Thermal Conductivity Vols I and II*, Academic Press, London and New York, 1969.
- (2) Degenne, M., Klarsfeld, S., Barthe, P., "Measurement of the Thermal Resistance of Thick Low-Density Mineral Fiber Insulation," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, ASTM, 1978, p. 130.
- (3) Pelanne, C.M., "Does the Insulation Have a Thermal Conductivity? The Revised ASTM Test Standards Require an Answer," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, ASTM, 1978, pp. 69-70.
- (4) Pelanne, C.M., "Discussion on Experiments to Separate the Effect of Thickness from the Systematic Equipment Errors in Thermal Transmission Measurements," DOE/ASTM C 16.00 Thermal Insulation Conference October 22-25, 1978, Tampa, FL, *ASTM STP 718*, ASTM, 1980, pp. 322-334.
- (5) Zabawsky, Z., "Construction and Calibration of a Heat Flow Meter for Thermal Conductivity Measurements," *Paper No. 68-520, ISA*, 1968, pp. 1-6.
- (6) Hollingsworth, M., Jr., "An Apparatus for Thermal Conductivity at Cryogenic Temperatures Using a Heat Flow Meter," *Symposium of Thermal Conductivity Measurements of Insulating Materials at Cryogenic Temperatures, ASTM STP 411*, 1967, p. 43.
- (7) Pelanne, C. M., and Bradley, C. B., "A Rapid Heat Flow Meter Thermal-Conductivity Apparatus," *Materials Research and Standards*, Vol 2, No 7, July, 1962, p. 549.
- (8) DePonte, F., and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P., Tye, Ed., 1974, p. 97.
- (9) DePonte, F., and Di Filippo, P., "Some Remarks on the Design of Isothermal Plates," *Quaderno No. 37, Istituto di Fisica Tecnica, Universita di Padova*, 1972.
- (10) Rennex, B., "Error Analysis for the National Bureau of Standards 1016 mm Guarded Hot Plate," *NBSIR 83-2674*, Washington, DC, 1983.
- (11) Tye, R.P., Coumou, K.G., Desjarlais, A.O. and Haines, D.M., "Historical Development of Large Heat Flow Meter Apparatus for Measurement of Thermal Resistance of Insulations," *ASTM STP 922*, ASTM, 1987, pp. 651-664.
- (12) Bomberg, M., "A Workshop on Measurement Errors and Methods of Calibration of a Heat Flow Meter Apparatus," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 18, October, 1994, pp. 100-114.
- (13) Scott, J. A., and Bell, R. W., "Discussion of Heat Flow Meter Apparatus Calibration and Traceability Issues for Thermal Conductivity Measurements," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 18, October, 1994, pp. 146-162.
- (14) Albers, M.A., and Pelanne, C.M., "Experimental and Mathematical Study of the Effect of Thickness in Low-Density Glass-Fiber Insulation," *Thermal Conductivity 17*, Plenum Press, New York and London, J.G. Hust, Ed., 1983, pp. 471-482.
- (15) Bomberg, M., Pelanne, C.M., and Newton, W.S., "Analysis of Uncertainties in Calibration of a Heat-Flow Meter Apparatus," *Thermal Conductivity 18*, Plenum Press, New York and London, T. Ashworth and D.R. Smith, Eds., 1985, pp. 254-272.
- (16) De Ponte, F. and Maccato, W., "The Calibration of Heat Flow Meters," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, ASTM, 1980, pp. 237-254.
- (17) Hollingsworth, M., "Experimental Determination of the Thickness Effect in Glass Fiber Building Insulation," *ASTM STP 718*, ASTM, 1980, pp. 255-271.
- (18) Bode, K-H., "Thermal Conductivity Measurements with the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurement," *ASTM STP 879*, ASTM, 1985, pp. 29-48.

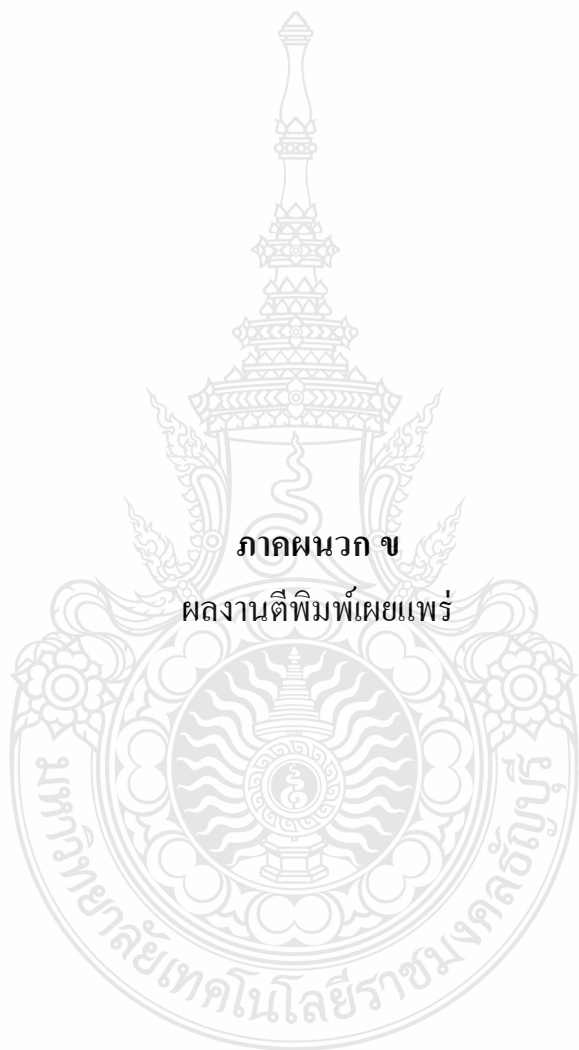
 C 518 - 04

- (19) Shirliffe, C.J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurement in Thermal Insulations*, ASTM STP 544, ASTM, 1974, p. 13.
- (20) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements", ISBN 92-67-10188-9, 1st Ed. ISO, Geneva, Switzerland, 1993.
- (21) Hust, J.G. and Pelanne, C.M., "Round Robins on the Apparent Thermal Conductivity of Low-Density Glass Fiber Insulations Using Guarded Hot Plate and Heat-Flow-Meter Apparatus," *NBSIR 85-3026*, May 1985.
- (22) Horlick, J. and Berger, H.W., "NVLAP and the Thermal Insulation Proficiency Testing Program," *Journal of Thermal Insulations*, Vol 8, April 1985, pp. 278-297.
- (23) Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials, Laboratory Accreditation Program Round 9—August 1983," National Institute of Standards and Technology Publication NBSIR 84-2890, May 1980.
- (24) Adams, R.D. and Hust, J.G., "A Round Robin on Apparent Thermal Conductivity of Several Loose-Fill Insulations," *Insulation Materials, Testing and Applications*, ASTM STP 1030, McElroy and Kimpfen, Eds., ASTM, June 1990, p. 263.
- (25) McCaa, D.J., Smith, D.R., et al, "Interlaboratory Comparison of the Apparent Thermal Conductivity of a Fibrous Batt and Four Loose-Fill Insulations," *Insulation Materials: Testing and Applications, 2nd Volume*, ASTM STP 1116, ASTM 1991, pp. 534-557.
- (26) Hust, J. G., "Status of Thermal Conductivity Standard Reference Materials at the National Bureau of Standards," *Thermal Conductivity 18*, Plenum Press, New York and London, Edited by T. Ashworth and David R. Smith, 1985, pp. 317-326.
- (27) Pelanne, C. M., "Discussion on Experiments to Separate the 'Effect of Thickness' from Systematic Equipment Errors in Thermal Transmission Measurements," *ASTM STP 718*, D. L. McElroy, R. P. Tye, Eds., ASTM, 1978, pp. 322-334.
- (28) Tye, R. P., and Baker, C. F., "Development of Experimental Data on Cellular Plastic Insulations Under Simulated Winter Conditions," *Thermal Insulation: Materials and Systems*, ASTM STP 922, F. J. Powell, S. M. Matthews, Eds., 1987, pp. 518-537.
- (29) Zarr, R. R., "Control Stability of a Heat-Flow-Meter-Apparatus," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Vol 18, October 1994, pp. 116-127.
- (30) Lackey, J., Normandin, N., Marchand, R., and Kumaran, K., "Calibration of a Heat Flow Meter Apparatus," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Vol 18, October 1994, pp. 128-144.
- (31) Albers, M. A., "Calibration of Heat Flow Meters in Vacuum, Cryogenic, and High Temperature Conditions," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Vol 18, April 1995, pp. 399-410.
- (32) Zarr, R. R., Lagergren, E. S., "Interlaboratory 'Pilot Run' Study of Small Heat-Flow-Meter Apparatus for ASTM C 518," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol 27, No.6, November 1999, pp. 357-367.
- (33) American National Standard for Expressing Uncertainty, U.S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ANSI/NCSL Z540-2-1997.
- (34) ASTM, Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis, Manual 7, 6th Edition, 1991, Available from ASTM Headquarters, Request PCN:28-0070899-34.
- (35) Eisenhart, C., "Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 67C, No. 2, April-June 1963, pp. 161-187.
- (36) Smith S. A., Lynch J. J., Moore M. L., and Galbraith C. J., "A Round Robin Testing Program to Estimate the Precision of ASTM C518 for Measuring the k-Factor of Rigid Foam Product," *Journal of Thermal Insulation*, 14, January 1991, pp. 184-194.
- (37) Graves R. S., McElroy D. L., Miller R. G., Yarborough D. W., and Zarr R. R., "Technical Note: A Comparison of Heat-Flow-Meter Tests for Four Laboratories," *Journal of Thermal Insulation*, 15, April 1992, pp. 354-358.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.


This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

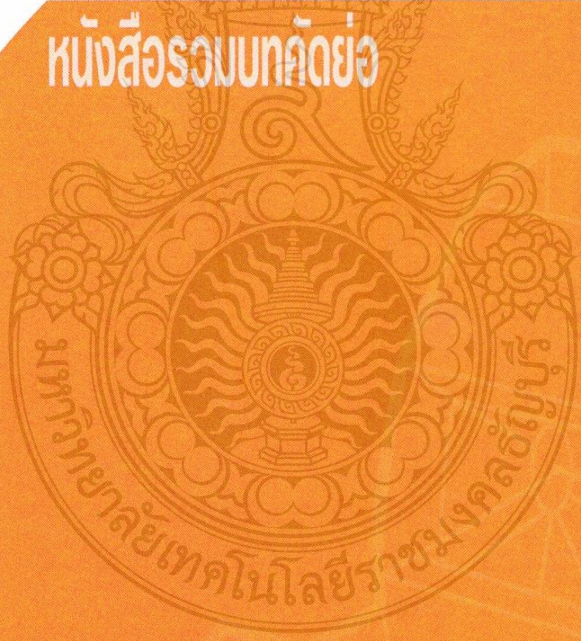


สืบสานพระราชปณิธาน  
 งานวิจัยเพื่อสังคมที่ยั่งยืน

**ME-NETT26**  
 The 26<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26

**หนังสือรวมบทความ**



โดย  
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 และสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
24-27 ตุลาคม 2555 ดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย

โดย :



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
และสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย

ISBN 978-974-456-734-5

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
และสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย

## รายชื่อคณะกรรมการจัดการประชุม

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26

### คณะกรรมการที่ปรึกษา

รศ.ดร.ไพฑูริย์ หังสพฤกษ์	ที่ปรึกษา
ศ.ดร.ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์	ที่ปรึกษา
อ.ดร.กฤษณพงศ์ กีรติกร	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ศักรินทร์ ภูมิรัตน	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สุวิทย์ เตีย	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.บัณฑิต ฟูงธรรมสาร	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล	ที่ปรึกษา
รศ.บันเทิง สุวรรณตระกูล	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.เสนีย์ ศรีไชย	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.วนิดา พวกุล	ที่ปรึกษา
อ.สุชาติ เจริศพรัง	ที่ปรึกษา

### คณะกรรมการอำนวยการ

รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์	ประธานกรรมการ
อ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล	รองประธานกรรมการ
ผศ.ดร.สนธิ์พีร์ เอम्मณี	รองประธานกรรมการ
ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	กรรมการ
ผศ.ดร.สุรัชย์ สนิทใจ	กรรมการ
ผศ.ดร.ชวิน จันทระเสนาวงศ์	กรรมการ
ศ.ดร.สำเริง จักรใจ	กรรมการ
รศ.ดร.สมชาย จันทร์ชานนา	กรรมการ
อ.ดร.อาภิรักษ์ หกพันนา	กรรมการ

ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	กรรมการและเลขานุการ
คุณเบญจวรรณ ทองขาว	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณวันเพ็ญ ไพศาลสุทธิเดช	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณนุกูล บุญแสน	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณศิริรัตน์ คำพรหมพะเนาวิ	ผู้ช่วยเลขานุการ

#### คณะกรรมการฝ่ายจัดเตรียมสถานที่

อ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล	ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.สาทิสต์ ทรงชน	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.ชวิน จันทรเสนาวงศ์	อนุกรรมการ
อ.ดร.อิทธิกร วงศชนวริศ	อนุกรรมการ
รศ.สุชัย ศศิวิมลพันธุ์	อนุกรรมการ
รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชูติมา	อนุกรรมการ
คุณเบญจวรรณ ทองขาว	เลขานุการ
คุณสิทธิเดช มโนรัตน์	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณสมชาย อินทร์ใหญ่	ผู้ช่วยเลขานุการ

#### คณะอนุกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์และสารสนเทศ

ผศ.ดร.ชวิน จันทรเสนาวงศ์	ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.ทศนพ กำเนิดทอง	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.อรรรณพ เรืองวิเศษ	อนุกรรมการ
อ.ดร.อาภิรัชย์ หกพันนา	อนุกรรมการ
คุณศิริรัตน์ คำรงพรหมพะเนาวิ	เลขานุการ
คุณนพพร พูลแพ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณนุกูล บุญแสน	ผู้ช่วยเลขานุการ



### คณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการ

ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	ประธานอนุกรรมการ
ศ.ดร.สำเริง จักรใจ	อนุกรรมการ
รศ.ดร.สมชาย จันทน์ชานา	อนุกรรมการ AEC
ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข	อนุกรรมการ AMM
ผศ.ดร.ธีรนุช จันทโสภีพันธ์	อนุกรรมการ BME
อ.ดร.อาทิตย์ หกพินนา	อนุกรรมการ CST
ผศ.ดร.สโรช ไทรเมฆ	อนุกรรมการ DRC
รศ.ดร.วันชัย อัสวภูษิตกุล	อนุกรรมการ ETM
อ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล	อนุกรรมการ TSF
ผศ.ดร.อรธณพ เรืองวิเศษ	อนุกรรมการ AME และ เลขานุการ
คุณศิริรัตน์ คำรงพรพะเนาวิ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณสราวุฒิ หมั่นนพคำ	ผู้ช่วยเลขานุการ

### คณะอนุกรรมการฝ่ายพิธีการ

ผศ.ดร.สนธิ์พีร์ เอมมณี	ประธานอนุกรรมการ
ผศ.สมยศ จันเกษม	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.ธีรนุช จันทโสภีพันธ์	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.อนรรฆ ชันชะวนะ	อนุกรรมการ
คุณเบญจวรรณ ทองขาว	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณวันเพ็ญ ไพศาลสุทธิเดช	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณนุกูล บุญแสน	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณสมบูรณ์ มาลัยเป็ย	ผู้ช่วยเลขานุการ

### คณะอนุกรรมการฝ่ายหาทุนจากผู้สนับสนุน

ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ	ประธานอนุกรรมการ
รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชุติมา	อนุกรรมการ
รศ.สุชัย ศศิวิมลพันธ์	อนุกรรมการ
รศ.วีระชัย แก่นทรัพย์	อนุกรรมการ
อ.พัฒนา เนตรสุวรรณ	อนุกรรมการ
รศ.สุรชัย บวรเศรษฐนันท์	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	อนุกรรมการ
คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ	เลขานุการ
คุณนุกุล บุญแสน	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณนิสันต์ ดามาพงษ์	ผู้ช่วยเลขานุการ

### คณะอนุกรรมการฝ่ายลงทะเบียน และจัดทำเอกสารประกอบการประชุม

ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	ประธานอนุกรรมการ
ผศ.สุเทพ แก้วนัย	อนุกรรมการ
อ.ธรรมรัตน์ กิตติพงษ์พัฒนา	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.วิสุนฤกษ์ เวชสถล	อนุกรรมการ
อ.ดร.อชิกร วงศชนวิริศ	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข	อนุกรรมการ
อ.ดร.อาบทิพย์ ธีรวงศ์กิจ	อนุกรรมการ
อ.ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ	อนุกรรมการ
คุณเบญจวรรณ ทองขาว	เลขานุการ
คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณสมคิด พิลาวงศ์	ผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะอนุกรรมการฝ่ายจัดเลี้ยง**

ศ.ดร.สำเริง จักรใจ	ประธานอนุกรรมการ
รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชูติมา	อนุกรรมการ
อ.ดร.อาภิรักษ์ หกพันนา	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.อนรรฆม์ ชันชะชวณะ	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.ธีรนุช จันทโสภิตพันธ์	อนุกรรมการ
คุณวันเพ็ญ ไพศาลสุทธิเดช	เลขานุการ
คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ	ผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะอนุกรรมการฝ่ายจัดกิจกรรมพิเศษ**

อ.ดร.อาภิรักษ์ หกพันนา	ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.ชวิน จันทรเสนาวงศ์	อนุกรรมการ
รศ.สุชัย ศศิวิมลพันธ์	อนุกรรมการ
คุณนุกุล บุญแสน	เลขานุการ
คุณสุภาพ หงส์สุดตา	ผู้ช่วยเลขานุการ



## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

### AEC Alternative Energy and Combustion

ศ.ดร.สำเร็จ จักรใจ	ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง
รศ.ดร.คณิต วัฒนวิเชียร	ผศ.ดร.แคทลียา ปัทมพรหม
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
รศ.ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์	ผศ.ดร.ชเนศ อรุณศรี โสภณ
รศ.ดร.บัณฑิต ฟูงธรรมสาร	ผศ.ดร.วิชัย ศิวะ โกศิษฐ
รศ.ดร.บัณฑิต ลีมีโชคชัย	ผศ.พิชัย ติละพัฒนะ
รศ.ดร.ศรัทธา อภรณ์รัตน์	ดร.เจตวิทย์ ภัครษพันธุ์
รศ.ดร.สมชาย จันทร์ชานนา	ดร.ณัฐ มากุล
รศ.ดร.สืบศักดิ์ นันทวานิช	ดร.ยศพงษ์ ลออนวล
ผศ.ดร..วสันต์ จอมภักดี	ดร.อิศเรศ ฐชกัลยา

### AME Aerospace and Marine Engineering

รศ.น.อ.สมชาย หาญกล้า	ผศ.ดร.บุญชัย วัจจะตรากุล
รศ.ดร.สัมพันธ์ ไชยเทพ	ผศ.ดร.อรรณพ เรืองวิเศษ
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	ผศ.ดร.ชวิน จันทรเสนาวงศ์

### AMM Applied Mechanics, Materials and Manufacturing

ศ.กิตติคุณ ดร.วิรัช อังภากรณ์	ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข
ศ.ดร.ธนัญชัย ลีภักดีปรีดา	ผศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์
รศ.ดร.ซัชพล ชังชู	ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
รศ.ดร.ชาวสวน กาญจโนมัย	ผศ.ดร.อภิวัฒน์ พลชัย
รศ.ดร.คุณไชติ ชลศึกษ์	ผศ.ดร.อริสรา ชัยกิตติรัตน
รศ.ดร.ธงชัย ฟองสมุทร	ผศ.สุจินต์ บุรีรัตน์

รศ.ดร.ชัยฤๅะ เกียรติวัฒน์	ดร.กรรรมมันต์ ชูประเสริฐ
รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์	ดร.กิตติพงษ์ บุญไฉ่
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ดร.เก่งกมล วิรัตน์เกษม
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	ดร.คุณยุต เอี่ยมสอาด
รศ.ดร.วราวุธ วิสุทธิเมธางกูร	ดร.จิระชัย มิ่งบรร์เจ็ดสุข
รศ.ดร.วารุณี เปรมานนท์	ดร.ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์
รศ.ดร.ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์	ดร.ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์
รศ.ดร.สมหมาย ปรีเปรม	ดร.ชัยยากร จันทร์สุวรรณ
รศ.ดร.สุรพล ราษฎร์นุ้ย	ดร.ณัฐ มากุล
รศ.ดร.อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงษ์	ดร.ธัญญารัตน์ สิงหนาท
รศ.ไพโรจน์ ศิริรัตน์	ดร.บำรุง พวงเกิด
ผศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย	ดร.ประพนธ์ ขุนทอง
ผศ.ดร.ชาญยุทธ โกธิตะวงษ์	ดร.เพชร เจียรนัยศิลาวงศ์
ผศ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี	ดร.ไพบุลย์ ศรีอรุโณทัย
ผศ.ดร.เดช คำรงค์ศักดิ์	ดร.มนต์ชัย พฤกษ์วิไลเลิศ
ผศ.ดร.บรรยงก์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	ดร.รุ่ง กิตติพิชัย
ผศ.ดร.ภัทราพร กมลเพชร	ดร.วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์
ผศ.ดร.วิริยะ ทองเรือง	ดร.เวชยันต์ รางศรี
ผศ.ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ	ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์
ผศ.ดร.เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล	ดร.สิริวิษณุ เตชะเจษฎารังษี
ผศ.ดร.สนธิพีร์ เอम्मณี	ดร.สุวณิช จิตศิริพานิช
ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ	ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ
ผศ.ดร.อนรรฆ ขันระชวานะ	ดร.อัญชนา วงษ์โต

**BME Biomechanics**

ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ผศ.ดร.ธีรบุษ จันทโสภีพันธ์
รศ.ดร.วรวิฑูร์ วิสุทธีเมฆางกูร	ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์
รศ.ดร.ศิริกุล วิสุทธีเมฆางกูร	ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์

**CST Computation and Simulation Techniques**

ศ.ดร.จงจิตร หิรัญลาภ	ผศ.ดร.เจริญยุทธ เดชวาญกุล
ศ.ดร.ปราโมทย์ เคชชะอำไพ	ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ผศ.ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล
ศ.ดร.สมชาติ ฉันทศิริวรรณ	ผศ.ดร.นภคณัย อาชวาคม
ศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธีศักดิ์	ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์
รศ.ดร.กฤษณี ภูมิรัตน์	ผศ.ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร
รศ.ดร.ฐิติมา จินตนาวัน	ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา
รศ.ดร.ณัฐ กาศยปนนันท์	ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์
รศ.ดร.ชัชชัย อ่อนจันทร์	ผศ.ดร.สนธิพีร์ เอम्मณี
รศ.ดร.ชญัญญา เกียรติวัฒน์	ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์
รศ.ดร.ปรณัฐ วิสุวรรณ	ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย
รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาพิพย์	ผศ.ดร.อนุศาล เพิ่มสุวรรณ
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	ผศ.ดร.ทศนพ กำเนิดทอง
รศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล	ผศ.ดร.อริสรา ชัยกิตติรัตน์นา
รศ.ดร.วรวิฑูร์ วิสุทธีเมฆางกูร	ผศ.ดร.อังคีร์ (ไพบูลย์) ศรีภาคกร
รศ.ดร.วรารักษ์รัตน์ จันทสาโร	ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชร
รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	ดร.เพชร เกียรนัยศิลาวงศ์
รศ.ดร.วิโรจน์ ลิ่มตระกูล	ดร.ภาสกร เวสสะโกศล

รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชูติมา	ดร.สุจินต์ สุวรรณะ
รศ.ดร.เอกชัย จันทสาโร	ดร.สุวณิช จิตศิริพานิช
รศ.น.อ.สมชาย หาญกล้า	ดร.อรรถพร วิเศษสินธุ์
รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์	ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ
ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	ดร.อาภิรัชก์ หกพันนา
ผศ.ดร.จิตติน แดงเที่ยง	

### DRC Dynamic System, Robotics and Control

ศ.ดร.ธนัญชัย ลีภักดิ์ปรีดา	ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล
รศ.ดร.ชิต เหล่าวัฒนา	ผศ.ดร.นภคณีย์ อาชวาคม
รศ.ดร.ธนุ นุชฉาย	ผศ.ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ
รศ.ดร.ภูดิศ ลักขณะเจริญ	ผศ.ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี
รศ.ดร.มนูกิจ พานิชกุล	ผศ.ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์
รศ.ดร.ระดม พงษ์วุฒิธรรม	ผศ.ดร.วิจิต ฉัตรรัตนกุลชัย
รศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ	ผศ.ดร.ศุภาวุฒิ จันทรานูวัฒน์
รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	ผศ.ดร.สาทิสต์ ทรงชน
รศ.ดร.สุธีระ ประเสริฐสรรพ	ผศ.ดร.สโรช ไทรเมฆ
รศ.ดร.สุวัฒน์ กุลชนปรีดา	ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์
รศ.ปัญญาธิกร งามศรีตระกูล	ดร.นัยสันต์ อภิวัฒน์ลังการ
รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์	ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ดร.ภิญโญ พวงมะลิ
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เคาไปวา	ดร.มานะ แซ่ด่าน
ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพัฒน์	ดร.สวัสดี เหลืองเรืองฤทธิ์
ผศ.ดร.ธีระ เกียรติพงษ์กุล	ดร.สัปปินันท์ เอกอำพน

### ETM Energy Technology and Management

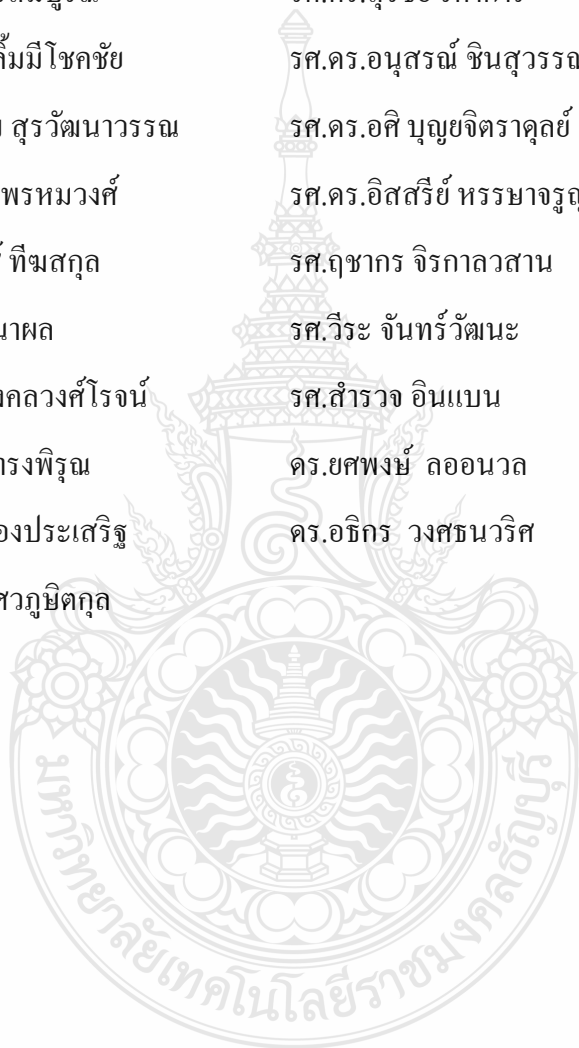
ศ.ดร.ทงนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	รศ.ดร.สุธีระ ประเสริฐสรรพ
ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล	รศ.ดร.อศิ บุญยจิตราคุลย์
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ผศ.ดร.เกรียงไกร อัสวมาศบันลือ
ศ.ดร.สมชาติ นันทศิริวรรณ	ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์
รศ.ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์	ผศ.ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ
รศ.ดร.ชนากม สุนทรชัยนาคแสง	ผศ.ดร.ชาญณรงค์ อัสวเทศานุภาพ
รศ.ดร.ธวัชชัย อ่อนจันทร์	ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	ผศ.ดร.นุภาพ แยมไตรพัฒน์
รศ.ดร.พีระพงษ์ ทิมสกุล	ผศ.ดร.มาลี สันติคุณากรณ์
รศ.ดร.วิทยา ขงเจริญ	ผศ.ดร.วาทิต ภัคดี
รศ.ดร.วันชัย อัสวภูษิตกุล	ผศ.ดร.วิศนุรักษ์ เวชสถล
รศ.ดร.ศรัทธา อภรณ์รัตน์	ผศ.ดร.สมชาย มณีวรรณ
รศ.ดร.ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนา	ผศ.ดร.อุดมเกียรติ นนทแก้ว
รศ.ดร.สมโรตม์ โกมลวนิช	ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์
รศ.ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด	ดร.ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์
รศ.ดร.ศักดิ์มน เทพหัสติน ณ อยู่ชยา	ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ
รศ.ดร.สืบศักดิ์ นันทวานิช	

### TSF Thermal Systems and Fluid Mechanics

ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	รศ.ดร.ศรัทธา อภรณ์รัตน์
ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	รศ.ดร.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ
ศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์	รศ.ดร.สมนึก ชีระกุลพิสุทธ์
รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว	รศ.ดร.สมบัติ ทิมทรัพย์
รศ.ดร.จำลอง ลีมตระกูล	รศ.ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ



รศ.ดร.ชวลิต กิตติชัยการ	รศ.ดร.สั๊กกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา
รศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ	รศ.ดร.สันติ ลักขิตานนท์
รศ.ดร.ชัยศิลป์ ชินพรเจริญพงศ์	รศ.ดร.สินชัย ชินวรรรัตน์
รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์	รศ.ดร.สืบศักดิ์ นันทวานิช
รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบุญ	รศ.ดร.สุรชัย รดาการ
รศ.ดร.บัณฑิต ล้อมมีโชคชัย	รศ.ดร.อนุสรณ์ ชินสุวรรณ
รศ.ดร.ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ	รศ.ดร.อศิ บุญยจิตราดุลย์
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	รศ.ดร.อิสริย์ หารรษาจรูญโรจน์
รศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล	รศ.ฤชากร จิรกาลวสาน
รศ.ดร.ไพศาล นาผล	รศ.วีระ จันทรวัฒนะ
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	รศ.สำรวจ อินแบน
รศ.ดร.มนตรี ชำรงพิรุณ	ดร.ยศพงษ์ ลออนวล
รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ	ดร.อชิกร วงศธนวิศ
รศ.ดร.วันชัย อัสวภูษิตกุล	



**TSF: Thermal Systems and Fluid Mechanics**

- TSF2001 การศึกษาลักษณะของสแตกที่มีผลต่อการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก
- TSF2002 การคำนวณและการวิเคราะห์หอบายความร้อนแบบผสมสำหรับการใช้งานในประเทศไทย
- TSF2003 คุณลักษณะทางสมรรถนะของแผ่นทำความเย็นแบบระเหยต้นแบบไข่มะพร้าว
- TSF2005 การศึกษาเชิงทดลองการทำให้แข็งของวัสดุพอรุนแบบอิมตัวโดยใช้เม็ดเหล็กเป็นวัสดุพอรุน
- TSF2006 การเพิ่มสมรรถนะการระบายน้ำผ่านท่อโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์
- TSF2007 การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนขนาดเล็กที่ใช้สารทำความเย็นR134aเป็นสารทำงาน
- TSF2008 สมการความร้อนที่เหมาะสมในการทำนายความร้อนจากการใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดทองแดง
- TSF2009 การศึกษาเชิงทดลองกระบวนการทำให้แข็งของวัสดุพอรุนแบบอิมตัว 2 เลเซอร์
- TSF2010 การคำนวณสัมประสิทธิ์ของอัตราการใช้ไหลในช่องเปิดที่ซับซ้อน(การใช้ไหลแบบราบเรียบ)
- TSF2011 การหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอนนิวโทเนียนเมื่อไหลผ่านท่อและอุปกรณ์ประกอบท่อ
- TSF2012 ลมหมุนวนตั้งฉากโดยสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพอรุนที่อยู่ภายใต้การใช้ไหลของลมร้อน
- TSF2017 การศึกษาสมรรถนะของเจ็ทปั๊มสำหรับผสมของเหลวต่างชนิด
- TSF2019 การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้จากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง
- TSF2020 การศึกษาผลกระทบการถ่ายเทความร้อนต่ออุณหภูมิน้ำที่ออกจากหอทำความเย็นระบบปิด
- TSF2021 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ลาเจ็ทพุ่งชน:กรณีติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนวนที่ปากทางออกเจ็ท
- TSF2022 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัด
- TSF2023 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศด้วยแสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นกั้นบาง

TSF 2019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

**การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัด**  
**จากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง**  
**Analysis of Drying Process Particleboards**  
**from durian peel Using Microwave Energy with continuous Belt system**

อนุชิต จิวหยี่<sup>1</sup>, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย<sup>2</sup>, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>2\*</sup> และ สโรชา เจริญวัย<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

\* ติดต่อ (Corresponding Author) E-mail: sarochakuk@hotmail.com, โทร 0-2549-3430-9, โทรสาร 0-2549-3432

<sup>2</sup> หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 99 ม.18 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะทางจลนพลศาสตร์ ของกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองขนาด 20 × 20 โดยใช้ไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ขนาด 800 W จำนวน 6 ตัว ติดตั้งกระจายภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 0.45 เมตร × 0.90 เมตร และในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความชื้นกับเวลา และอัตราการอบแห้ง รวมทั้งวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองก่อนอบและหลังอบ

**คำหลัก:** การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ, ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง, แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน

#### Abstract

This research studies on the kinetics of drying process of particleboards from durian peel of size 20 × 20 centimeter using microwave energy with continuous Belt system. Its internal structure included 6 magnetrons, microwave generating sources at the frequency level of 2.45 Gigahertz (GHz) and power of 800 watts, built at the cavity wall inside the system. The microwave cavity was rectangular shape with dimension of 0.45 m. × 0.90 m. The tested properties are the relations between temperature and moisture profile with respect to elapsed time and drying rat, the measurement of dielectric properties of particleboards from durian peel before drying and after drying.

**Keywords:** Drying process using microwave energy, Continuous Belt system, Particleboards from durian peel.

#### 1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณภาพอยู่ในระดับต้น ๆ ของโลก เช่น พืช ผัก ผลไม้จึงทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรจำนวนมากจึงได้มีแนวคิดในการนำวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรจำพวก

เปลือกผลไม้มาผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัด เช่น เปลือกทุเรียน เนื่องจากไทยเป็นผู้ผลิตทุเรียนรายใหญ่ของโลก (ปี 2547-2552) เฉลี่ยปีละ 683,4109 ตัน ประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกทุเรียนกว่า 700,000 ไร่ มีจำนวนครัวเรือนเกษตรกรที่ปลูกทุเรียนประมาณ 170,000 ครัวเรือน

## TSF 2019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



ตารางที่ 1 ปริมาณผลผลิตทุเรียนในประเทศไทยใน 5 ปี  
ย้อนหลัง (หน่วย: ตัน)

ปี	ปริมาณ (ตัน)
2549	569,057
2550	752,965
2551	637,790
2552	661,665
2553*	632,459

และนอกจากนี้เปลือกทุเรียนยังมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำอยู่ที่ 0.0921 W/m.K เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งในกระบวนการผลิตจะเกี่ยวข้องกับการอบแห้งไม้อัดด้วยวิธีธรรมชาติหรือนำพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ซึ่งในบางครั้งยังผลิตไม่ทันตามความต้องการหรือหากทันตามความต้องการจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและได้ประสิทธิภาพไม่คุ้มเท่าที่ควร ส่งผลให้ต้องหากรรมวิธีการผลิตที่ช่วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพดี สะอาด ใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นที่สุดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาที่สุดเร็ว เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตจึงได้นำการใช้คลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางความร้อนเพื่อใช้ในการแปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นในวัสดุที่อยู่ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเอง โดยรังสีจากคลื่นไมโครเวฟที่มีความยาวคลื่นในการทะลุทะลวง 2 CM จะผ่านเข้าไปในน้ำของวัสดุ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในน้ำ โดยความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตความร้อนให้แก่วัสดุ การกระจายความร้อนภายในวัสดุจากพลังงานไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น โครงสร้างและรูปร่างของวัสดุกำลังและการกระจายตัวของสนามคลื่นไมโครเวฟ รวมถึงค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ จากการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ใช้เวลาในการผลิตวัสดุสั้นกว่ากระบวนการผลิตโดยให้ความร้อนวิธีอื่นจึงทำให้ประหยัดเวลา พลังงานและช่วย

ลดต้นทุน ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพการผลิตจึงได้นำการใช้คลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง

งานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ที่ใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟ เช่น [1] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นไม้ภายในพลังงานไมโครเวฟ (TE10 Mode) [2] ได้ทำการศึกษาระบบการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องโดยทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบธรรมดา [3] ได้ทำการศึกษากการใช้พลังงานในการอบวัสดุในภาวะที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุนโดยการพาความร้อนด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง [4] ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานโดยสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งวัสดุพูนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (TE10 Mode) โดยให้ เม็ดแก้ว น้ำ และโพรงอากาศ เป็นวัสดุพูนและตัวอย่างวัสดุเป็นแพคเกจขึ้นเดียวสองชนิด [5] ได้ทำการศึกษาระบบการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนกำลังคลื่นที่กำลังไมโครเวฟ 50, 100W ระดับอุณหภูมิของลมร้อน 40, 60°C และความหนาของชิ้นไม้ 50, 80mm ภายใน โดยชิ้นไม้มีความชื้นเริ่มต้น 89 - 95 % dry bulb [6] ได้ทำการนำพลังงานไมโครเวฟมาให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณของกำมะถันต่างกันทั้งหมด 4 สูตร โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (TE10 Mode) เพื่อศึกษากำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาชิ้นงาน ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงาน [7] ได้ทำการศึกษากลศาสตร์กระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาความเร็วของสายพาน เวลา ขนาดของวัสดุ กำลังและทิศทางของแมกนีตอนการ วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการศึกษาคือ ยางพารา และเซรามิกส์

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษา ลักษณะจลนพลศาสตร์และวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง ที่พัฒนาขึ้น โดยมีอุโมงค์เป็นหน้าต่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าต่าง 0.45 เมตร×0.90 เมตร มีความยาวอุโมงค์ 3 เมตร ภายในติดตั้งแมกนีตรอนกำลังค่า ความถี่ที่ใช้คือ 2.45 GHz กำลังสูงสุดที่ทำได้ 6×800 วัตต์ โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 100°C



## 2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งคือ การกระบวนการลดความชื้นหรือน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ในอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ การอบแห้งแบบธรรมดาจะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวภายในและภายนอกของผลิตภัณฑ์ แต่การอบแห้งโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์และค่าสมบัติทางไดอิเล็กตริกของผลิตภัณฑ์นั้นๆ วัสดุที่เป็นฉนวนที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้ดี เช่น แก้ว อากาศ อลูมิเนียม เซรามิกส์ เป็นต้น ส่วนวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น งานโลหะ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งคลื่นไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกหรือวัสดุกึ่งฉนวนที่มีขั้วทางไฟฟ้า(Dipole) เช่น น้ำ กระจกดาช เรซินและไม้จะสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังความร้อน ลักษณะการเกิดความร้อนจะเกิดจากแรงเสียดสีระหว่างการจัดเรียงตัวใหม่ ของโมเลกุลน้ำ เมื่อดูดกลืนคลื่นส่งให้เกิดเป็นความร้อนภายในทั่วทั้งเนื้อวัสดุ(Volumetric Heating) ความร้อนและความชื้นจะถูกถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอกของวัสดุ การให้ความร้อนคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุอย่างสม่ำเสมอสามารถลดการแตกร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งสำหรับวัสดุในงานอุตสาหกรรมต่อไป

### 2.2.สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าค่ากำลังการดูดซับคลื่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุ

ไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $E$  คือ สนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง  $f$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ  $\epsilon_r'$  คือ relative dielectric constant ซึ่งบอกถึงสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย  $\epsilon_0$  คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ  $\tan \delta$  คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงานความร้อน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า  $\tan \delta$  และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า  $\tan \delta$  ของแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากไปด้วย แต่ถ้าค่า  $\tan \delta$  มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านแผ่นชิ้นไม้อัดโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ(Specific Heat) ค่าความชื้น(Moisture content) ลักษณะของแผ่นชิ้นไม้อัดและขนาดของแผ่นชิ้นไม้อัดด้วย

ค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

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

เมื่อ  $v$  คือ ค่าความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s),  $f$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ( $\epsilon_r'$ ) คือ Relative dielectric constant ( $\tan \delta$ ) คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient

จะเห็นว่าค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนค่าความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนแปลงตามด้วย



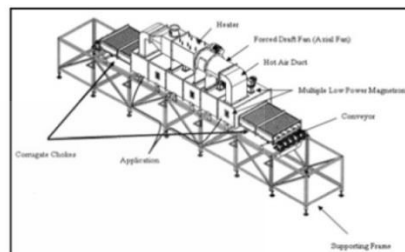
3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 เครื่องอบไมโครเวฟชนิดสายพายลำเลียงแบบต่อเนื่อง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ชนิดสายพายลำเลียงแบบต่อเนื่อง ที่ทางหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพายผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular cavity) ซึ่งภายในระบบจะติดตั้งแมกนีตรอน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ไว้จำนวน 12 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) และเครื่องกำเนิดลมร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณ 240 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) วัสดุอุณหภูมิร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ชนิดสายพายลำเลียงแบบต่อเนื่อง คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งอยู่รอบๆ บริเวณทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพายที่บริเวณปากทางเข้าระบบ (สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วสายพายได้ตามต้องการ) จากนั้นสายพายจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อนการปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออกกระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถ วัดได้ที่ตำแหน่งปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) เครื่องไมโครเวฟแบบระบบสายพายลำเลียงต่อเนื่อง

(ข) ไดอะแกรมรายละเอียดเครื่องทดลอง [1]

3.2. ขั้นตอนการทดลอง

นำแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ขนาด 20x20 เซนติเมตร ทั้ง 12 แผ่น มาทำการวัดความชื้นและค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative dielectric constant, Relative dielectric loss and Loss tangent) เริ่มต้นก่อนการทดลอง



1. Software
2. Microwave Reflect meter
3. Coaxial Cavity
4. Coaxial Cable
5. Sample
6. Female Calibration Standards

รูปที่ 2 เครื่องเน็ตเวิร์คนาไลเซอร์ [1]

จากนั้นทำการทดลองโดยการอบด้วยเครื่องอบไมโครเวฟชนิดสายพายลำเลียงแบบต่อเนื่องตามตามเงื่อนไข โดยทำการเปิดแมกนีตรอน 6 ตัว อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยทุกๆเงื่อนไขจะมีการวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นไม้ ความชื้นคงเหลือ เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความชื้นกับเวลา ซึ่งแผ่นชิ้นไม้อัดที่ใช้อบมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-20 % dry basic และมีอุณหภูมิเริ่มต้น 25°C และทำการถ่ายภาพทางความร้อนและวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ผ่านการอบด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟ

## 4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

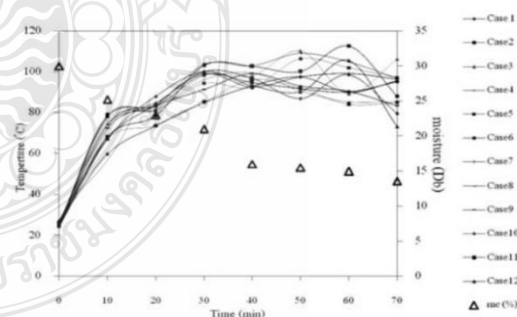
## 4.1 ค่าคุณสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ตารางที่ 2 สมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองก่อนการอบและหลังอบ ความชื้น และอัตราการอบแห้ง

แผ่น ขึ้นไม้อัด	สูตรอัตราส่วน และเงื่อนไขใน การผลิตแผ่นขึ้น ไม้อัด	Dielectric Properties						น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	Drying rate (g/min)
		ก่อนอบ			หลังอบ					
		$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$			
1	1:1:1 (80)	2.00	0.32	0.16	1.56	0.15	0.100	361	318	0.24
2	1:1:1.5 (80)	2.25	0.43	0.19	1.50	0.15	0.101	365	320	0.27
3	2:1:1.5 (80)	2.31	0.43	0.19	1.59	0.15	0.098	364	319	0.27
4	2:1:2 (80)	1.92	0.27	0.14	1.56	0.15	0.101	357	318	0.23
5	1:1:1 (90)	2.15	0.35	0.16	1.48	0.15	0.103	358	314	0.25
6	1:1:1.5 (90)	2.23	0.43	0.19	1.50	0.15	0.102	363	319	0.25
7	2:1:1.5 (90)	2.45	0.46	0.19	1.61	0.15	0.099	354	311	0.25
8	2:1:2 (90)	2.20	0.35	0.16	1.63	0.16	0.098	355	312	0.27
9	1:1:1 (100)	2.38	0.66	0.15	1.73	0.16	0.096	357	315	0.19
10	1:1:1.5 (100)	2.19	0.38	0.17	1.62	0.16	0.100	362	319	0.25
11	2:1:1.5 (100)	2.08	0.37	0.18	1.51	0.15	0.103	353	310	0.26
12	2:1:2 (100)	2.38	0.48	0.20	1.53	0.15	0.101	365	319	0.19

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองจากการใช้กำลังไมโครเวฟ 6x800 วัตต์ อุณหภูมิ 100 °C ทำการอบแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีอัตราสูตรในการผลิต อัตราส่วนคือ (เส้นใยเปลือกทุเรียน : ผงเปลือกทุเรียน : น้ำ) จะเห็นได้ว่าค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) มีของแผ่นขึ้นไม้อัดก่อนอบแต่ละแผ่นมีค่าสูง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดแต่ละแผ่นนั้นมีน้ำหนักมากและมีความชื้นมาก และเมื่อทำการอบด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟพบว่าค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ของแผ่นขึ้นไม้อัดแต่ละแผ่นมีค่าลดลง น้ำหนักลดลงและความชื้นก็ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากสูตรอัตราส่วนและเงื่อนไขในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดมีผลต่อการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยแผ่นที่ 9 1:1:1 100 °C มีอัตราการอบแห้งในการผลิตที่น้อยและในกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดอบที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้มีน้ำหนักน้อยความชื้นต่ำทำให้มีค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ต่ำ การสะท้อนของพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าต่ำ ทำให้คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งกำลังทะลุทะลวงผ่านผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดได้มาก ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งรวดเร็วขึ้น จึงเห็นว่าอัตราส่วนและเงื่อนไข

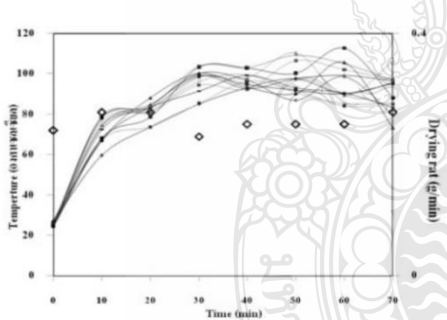
การผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดที่เหมาะสมคืออัตราส่วน 1:1:1 อบที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา

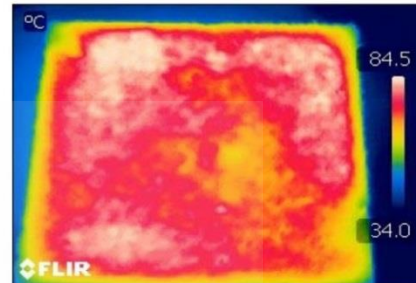
จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับเวลา พบว่าเมื่อในช่วงแรก (0-50) แผ่นขึ้นไม้อัดจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้มาก เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นสูงต่อมากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของแผ่นขึ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลงเนื่องจากความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดได้

เคลื่อนตัวออกไป ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง ภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่า แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้าซึ่งเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก ส่วนกำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวแผ่นชิ้นไม้อัดจะมีค่ามาก ในช่วงแรกและจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ กำลังคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นโดยในช่วงท้าย การทดลองพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านจะมีค่าสูง เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นลดลง การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าลดลงตามไปด้วย และเมื่อวิเคราะห์ถึงกับค่า Dielectric Properties ใน (ตารางที่ 2) พบว่าเวลาที่ในการอบมากขึ้นทำให้ค่าความชื้นมีค่าเข้าใกล้จุดสมดุล

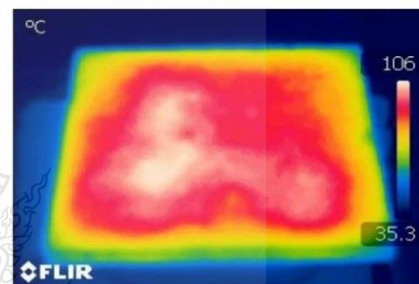


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการอบแห้งกับเวลา

จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับเวลา พบว่าในช่วงแรก (0-20) อัตราการอบแห้งมีค่าสูงชัน เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นสูงจึงมีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้อัตราในการอบแห้งลดลงแผ่นชิ้นไม้อัดมีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟลดลงอุณหภูมิสูงขึ้นแต่พลังงานความร้อนสะสมภายในแผ่นชิ้นไม้อัดยังมีอยู่จึงทำให้อุณหภูมิยังคงสูงจึงทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ค่าสมดุล



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อทำการอบ 10 นาที  
(ข) ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อทำการอบ 70 นาที

จากรูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายทางความร้อนจากการใช้กำลังไมโครเวฟ 6x800 วัตต์ อุณหภูมิ 100°C ทำการอบแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองพบว่าในกระบวนการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถบ่งบอกถึงการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี โดยสังเกตจากสีของภาพถ่ายทางความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจะเห็นว่าเมื่อเริ่มทำการอบ (10 นาที) แผ่นชิ้นไม้อัดจะมีความร้อน (สีแดง) กระจายสม่ำเสมอทั้งแผ่น เพราะแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นสูง มีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมากที่บริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดส่งผลให้เกิดความร้อนภายในทั้งแผ่นชิ้นไม้อัดทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป (70 นาที) ความชื้นและความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจะถูกถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอกของแผ่นชิ้นไม้อัดทำให้การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟลดลงส่งผลให้บริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดยังมีความชื้นสะสมอยู่ ทำให้ร้อน (สีแดง) กระจายอยู่บริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัด จากการให้ความร้อนคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ผิวของแผ่นชิ้นไม้อัดไม่ต่างไปจากเดิม





มากนักเพราะการระเหยของความชื้นภายในแผ่นชิ้นไม้  
อัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน  
หมอนทองพบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้ง  
แผ่นชิ้นไม้สามารถดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ดี  
เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดยังมีความชื้นสูง ทำให้เกิดความ  
ร้อนขึ้นภายในแผ่นชิ้นไม้อัดสูงตามไปด้วย และเมื่อ  
ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น การดูดซับพลังงานคลื่น  
ไมโครเวฟจะมี ค่าลดลง เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้น  
ลดลง จึงทำให้คุณสมบัติภายในของแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่า  
ลดลงและลักษณะการเคลื่อนตัวของความชื้นช่วงแรกของการ  
กระบวนการอบแห้งภายในแผ่นชิ้นไม้อัด จะมีเฟสของ  
ของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้ อิทธิพลของความดัน  
คาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลว  
ไปยังผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไป  
ปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น  
(ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่)ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการ  
แพร่ของไอ(vapor diffusion)และความดันก๊าซ(Gas  
Pressure) เป็นหลัก จากงานวิจัยนี้สามารถนำพลังงาน  
คลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์แผ่น  
ชิ้นไม้อัด เนื่องมาจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุ  
ผ่านเข้าไปในแผ่นชิ้นไม้อัดที่นำมาทำการอบแห้งได้  
เพราะความร้อนที่เกิดจาก คลื่นไมโครเวฟภายในแผ่นชิ้น  
ไม้อัดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจึงทำให้ความแห้งที่  
เกิดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอไปทุกตำแหน่งของตัวแผ่นจึง  
เป็นเหตุให้การควบคุมคุณภาพในการผลิตทำได้ง่าย  
ระยะเวลาในการอบก็สั้นว่าการอบแบบปกติ และยังเป็น  
เทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เหมาะกับการนำไปใช้เพื่อแปรรูป  
ผลิตภัณฑ์ภาคการเกษตรที่เน้นการควบคุมคุณภาพ

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณงบประมาณแผ่นดิน จาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงาน  
คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยและ  
หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงาน  
วิศวกรรม (R.C.M.E.) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Rattanadecho , P., 2006, “The simulation of  
microwave heating of wood using a rectangular

wave guide: Influence of frequency and sample  
size“ Chemical Engineering Science, pp.4798-  
4811

[2] Vongpradubchai, S.,and., Rattanadecho,  
P.,2009, “The microwave processing of wood  
using a continuous microwave belt drier”  
Chemical Engineering and Processing, pp. 997 -  
1003, 2011

[3] Jindarat,W.,Rattanadecho, P., Vongpradubchai,  
S. and Pianroj, Y., 2011, Analysis of Energy  
Consumption in Drying Process of Non-  
Hygroscopic Porous Packed Bed Using a  
Combined Multi-Feed Microwave - Convective  
Air and Continuous Belt System (CMCB), Drying  
Technology An International J., Vol.29(08), pp.  
926 - 938.

[4] วิโรจน์ จินดารัตน์, เกียรติขจร สุเวทเวทิน และ  
ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551). การวิเคราะห์การใช้พลังงาน  
ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟ  
ร่วมกับการพาความร้อนภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม  
.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง  
ประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์  
รังสิต

[5] สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, วิโรจน์ จินดารัตน์ และ  
ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2550).การอบแห้งไม้ด้วยคลื่น  
ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม  
, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง  
ประเทศไทยครั้งที่ 21, โรงเรียนนายเรืออากาศ

[6] นพวรรณ ดุงาม, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ วารุณี กลิ่น  
ไกล (2549).การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟโดย  
ใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม  
(MODE: TE10), การประชุมวิชาการเครือข่าย  
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[7] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ,สมศักดิ์  
วงษ์ประดับไชย,สุชนม์ ปิยโชติ,และ ดวงเดือน อัจจงค์  
(2547). การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุ  
ไดอิเล็กทริกโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียง  
แบบต่อเนื่อง, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการเครือข่าย  
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18,  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ร่วมกับ  
สมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

นายอนุชิต จิวหทัย

ได้ส่งบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ระหว่างวันที่ 24-26 ตุลาคม 2555

ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงใหม่

รศ. ดร. พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ  
นายกสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย



## หนังสือรวมบทความ

การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1  
 1<sup>st</sup> Conference on Graduate Student Network of Thailand  
 GS-NETT 2012

“บัณฑิตศึกษาไทย ใฝ่วิจัยสหวิทยาการ”



โดย

สำนักงานบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1  
1<sup>st</sup> Conference on Graduate Student Network of Thailand  
(GS-NETT 2012)

“บัณฑิตศึกษาไทย ใฝ่วิจัยสหวิทยาการ”

18 ธันวาคม 2555

ณ ศูนย์ประชุมธรรมศาสตร์ รังสิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต



สำนักงานบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

### คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์ลำปาง  
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์รังสิต  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

### คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์ลำปาง		ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการและวิจัย		รองประธานกรรมการ
ศ.ดร.อัญญา ชันชวิทย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศ.ดร.พิณทิพย์ ทวยเจริญ	ข้าราชการบำนาญ	กรรมการ
ศ.ดร.ธีรณ พงศ์มพัฒน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
ศ.ดร.ชเนศ อภรณ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศ.ดร.ศิริลักษณ์ โรจนกิจอำนวย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศ.ดร.ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์	ที่ปรึกษานักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย	กรรมการ
ศ.ดร.สำเริง จักรใจ	ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
ศ.ดร.สมนึก ตั้งเดิมศิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตน	กรรมการ
ศ.นพ.สุรศักดิ์ ฐานิพานิชสกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
ศ.ทพ.ดร. สิทธิชัย ขุนทองแก้ว	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศ.(พิเศษ) ดร.กาญจนา เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
ศ.ดร.เกศรา ณ บางช้าง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
รศ.ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
รศ.ดร.สมชาย นำประเสริฐชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
รศ.ดร.ศากุน บุญอิต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ผศ.ดร.ทิพวรรณ ปิ่นวนิชย์กุล	ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
ผศ.ดร.ปรารถนา ปุณณกิติเกษม	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพัสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
ผศ.ดร.รัญชนา สิ้นธวาลัย	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ

อ.ดร.จักรวาล คุณะดิลก	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
อ.ดร.ธันยวัต สมใจทวีพร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
ผู้อำนวยการสำนักงานบริหารการวิจัย		กรรมการ/เลขานุการ
นางบุญถม วัชรธาดา		ผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวเฟื่องกาญจน์ สารัมภานนท์		ผู้ช่วยเลขานุการ

### คณะทำงานดำเนินงานจัดประชุม

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์ลำปาง		ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการและวิจัย		ประธานคณะทำงาน
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะรัฐศาสตร์		คณะทำงาน
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะสาธารณสุขศาสตร์		คณะทำงาน
รองคณบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี		คณะทำงาน
รองคณบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษา คณะทันตแพทยศาสตร์		คณะทำงาน
รองคณบดีฝ่ายวางแผนและวิจัย วิทยาลัยนวัตกรรมการ		คณะทำงาน
ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษาและวิจัย คณะศิลปศาสตร์		คณะทำงาน
ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี		คณะทำงาน
ผู้อำนวยการโครงการปริญญาโท คณะวารสารศาสตร์และ		คณะทำงาน
สื่อสารมวลชนผู้อำนวยการโครงการบัณฑิตศึกษา		
สาขาเทคนิคการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ผู้ช่วยผู้อำนวยการ		คณะทำงาน
โครงการบัณฑิตศึกษา สาขาชีวเวชศาสตร์ คณะสหเวชศาสตร์		
ผู้อำนวยการกองกิจการนักศึกษา		คณะทำงาน
หัวหน้างานประชาสัมพันธ์		คณะทำงาน
ผู้อำนวยการสำนักงานบริหารการวิจัย		เลขานุการ
หัวหน้างานส่งเสริมและเผยแพร่งานวิจัย		ผู้ช่วยเลขานุการ
นายทศพร สมใจ		ผู้ช่วยเลขานุการ

### คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ

นางสาวอัจฉรา จินดารัตน์	ประธานกรรมการ
นางสาวทัศนีย์ คาวเรือง	กรรมการ
นางสาวเบญจวรรณ ประจบลาภ	กรรมการ
นางวิลาวัลย์ กางการ	กรรมการ
นายอุทัย ชันธมาลย์	กรรมการ
นางสาวจินตนา เทียงตรง	กรรมการ
นางสาวเฟื่องกาญจน์ สารัมภานนท์	กรรมการ
นางสาวศิตกมล วงษ์สมบูรณ์	กรรมการ
นางสาวสุปราณี ปราชญ์รัตนะกวี	กรรมการ
นางสาวปิยนาด พุทธรัตน์	กรรมการ
นางสาวศิริรัตน์ จำปาสด	กรรมการ
นายรติ สมันตรัฐ	กรรมการ
นายวัฒนา แก้วพวงงศ์	กรรมการ
นายวิระศักดิ์ คงแก้ว	กรรมการและที่ปรึกษาด้านไอที
นางบุญถม วชิราธาดา	กรรมการและเลขานุการ
นายเถกิงศักดิ์ ไชยา	ผู้ช่วยเลขานุการ
นายทศพร สมใจ	ผู้ช่วยเลขานุการ

### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศ.ดร.สมชาติ ฉันทศิริวรรณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
ศ.ทพ.ดร. สิทธิชัย ขุนทองแก้ว	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.กิตติคุณ ดร.วิริทธิ์ อึ้งภากรณ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.พิเศษ ดร.กาญจนา เวงรัมย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ศ.ดร. ธนัญชัย ลีภักดีปรีดา	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
รศ.ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. คุณไชติ ชลศึกษ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.ศักดิ์มน เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. บุญบา พุกษาพันธ์รัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. ธวัชชัย อ่อนจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
รศ.ดร.แคทลียา ปัทมพรหม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. มรรยาท รุจิวิษณีย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ทพญ.ดร.ศิริวรรณ สีนุกการณ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ไพศาล นาผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ชินนะพงษ์ บำรุงทรัพย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.อรุณพร อัฐรัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ภก.ดร.บุญชู ศรีตุลาภิรักษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.พัชรีวัลย์ ปั่นหน่งเพชร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. ศากุน บุญอิต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.พญ. อรพรรณ โปชนุกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ. ดร. บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ กิจกาญจน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร. อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วาทีต ภัคดี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร. จิระพล กลิ่นบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.บัณฑิต กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.สารดา จารุพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย
ผศ.ดร.นพพร ลีปรีชานนท์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วารุณี กลิ่นไกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. พิศิษฐ์ แสง-ชูโต	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ. ประสิทธิ์ สันติกาญจน์	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ผศ.ดร.ประภาส ปิ่นตบแต่ง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ยุบลวรรณ ตันเชิยรัตน์	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ



ผศ.มณฑล ใจกุศล  
 ผศ.ญาณวุฒิ สุพิชญางกูร  
 ผศ.ดร.พระระพีพัฒน์ ภาสบุตร  
 ผศ.ดร. พรพรรณ วีระปรียากร  
 ผศ. กนกพันธ์ โลกุตรวงศ์  
 ดร.นฤมล ทับจุมพล  
 ดร.วราภรณ์ กลิ่นบุญ  
 ดร.ณัฐ มากุล  
 ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาศ  
 ทพญ.ดร.กมลพรรณ ภัคดี  
 ดร.ชั้นยวัต สมใจทวีพร  
 ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์  
 ดร.ธีรเวทย์ ประมวลรัฐการ  
 ดร.ภาสกร อินทุมาร  
 ดร.ชาติรี ใต้ฟ้าพล  
 ดร.สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย  
 ดร.วีรัชย์ ไรยนรินทร์  
 ดร. กริช เจียมจิโรจน์  
 ดร. สัปปินันท์ เอกอำพน  
 ดร.นพรัตน์ พฤษักทวิศักดิ์  
 ดร.สโรชา เจริญวัย  
 ดร. อรรถพร วิเศษสินธุ์  
 ดร.วรรณิ เอกศิลป์  
 ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ  
 ดร. สมชาย ศรียาบ  
 อาจารย์เสกสรรค์ สุทธิสงค์  
 อาจารย์วัชร ละอสมุท  
 อาจารย์จตุพร สดากุลเจริญ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 มหาวิทยาลัยรังสิต  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์  
 มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
 ผู้ประเมินภายนอก  
 มหาวิทยาลัยศิลปากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยรังสิต  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
 มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
 มหาวิทยาลัยรังสิต  
 มหาวิทยาลัยรังสิต



### Sci-Tech : วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี

- Sci-Tech 025 การใช้พืชที่ล่อจิกกับเครื่องปรับอากาศชนิดอินเวอร์เตอร์ โดยอยู่บนพื้นฐานของการ ประหยัดพลังงาน และความพึงพอใจของมนุษย์ สำหรับพื้นที่ในเขตร้อนชื้น  
ชุตติมา ปลอดโปร่ง, วรรัตน์ ปัตตประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร
- Sci-Tech 026 ศึกษาการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งมวลขนในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต  
วิศรา เปลี่ยนกลิ่น, วรรัตน์ ปัตตประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร
- Sci-Tech 027 การจำลองสถานีชาร์จรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าและศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าใน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต  
นพรัตน์ โสภารุณ, วรรัตน์ ปัตตประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร
- Sci-Tech 028 การ วิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจาก เปลือกทุเรียน หมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วม กับระบบลมร้อนและ สายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง  
วันชนะ ยิ่งยืน สโรชา เจริญวัย สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
- Sci-Tech 029 การ ศึกษาเชิงทดลองในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อน และสายพาน ลำเลียงอย่างต่อเนื่อง  
อนุชิต จิวหทัย สโรชา เจริญวัย สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
- Sci-Tech 030 การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและทดลองสำหรับปัญหาการซึมผ่านของน้ำในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัวใน 1 มิติ  
ฐิติพันธ์ สมถวิล สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
- Sci-Tech 031 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มโดยเอทานอล  
นัชญา พัฒน์ชนะ และ ผศ. ดร.มาลี สันติคุณาภรณ์
- Sci-Tech 032 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ในเศษอาหารต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ  
นางสาววรางคณา रिเมปีกุล และ ผศ.ดร.มาลี สันติคุณาภรณ์
- Sci-Tech 033 การใช้ประโยชน์ตัวพารามิเตอร์ Q และ R ของตัวกรองกาลมานสำหรับลดสัญญาณรบกวนแบบไวท์ เกาส์เซียนในการบีบอัดสัญญาณเสียง  
เจษฎ์ รัศมียุงทอง และ จักริ ศรีนนท์ฉัตร



Sci-Tech 029

การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1  
18 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การศึกษาเชิงทดลองในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียน) โดยใช้ระบบไมโครเวฟ  
ชนิดบ่อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

The Experimental Studies of Drying Process Particleboards (form durian peels) By Using a  
Combined Unsymmetrical Multi-Feed Microwave and  
Hot Air-Continuous Belt System.

อนุชิต จิวหทัย<sup>1</sup> สโรชา เจริญวัย<sup>1\*</sup> สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย<sup>2</sup> และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: sarochakuk@hotmail.com , ratphadu@engr.tu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง เพื่อทำการศึกษาลักษณะทางจลนพลศาสตร์ ของกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหอมทอง) ขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.2 เมตรหนา 0.01 เมตร โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดบ่อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 12 ตัว ติดตั้งกระจายภายในอิมโวงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัดสูง 0.45 เมตรกว้าง 0.90 เมตร ยาว 3.0 เมตร และเครื่องกำเนิดลมร้อนที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงสุด 240 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความชื้นกับเวลา และอัตราการอบแห้ง รวมทั้งคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำ ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหอมทองก่อนอบและหลังอบ

#### Abstract

The objectives of this research were to experimental studies on the kinetics of drying process of particleboards (transform durian peels) of size width 0.2 m. length 0.2 m. thickness 0.01 m. by sing a combined unsymmetrical multi-feed microwave and hot air-continuous belt system. It is internal structure included 12 magnetrons, microwave generating sources at the frequency level of 2.45 Gigahertz (GHz) and power of 800 watts, built at the cavity wall inside the system. The microwave cavity was rectangular shape with dimension of high 0.45 m. wide 0.90 m. long 3.0 m. and Hot air was generated using electric heaters with the maximum working temperature of 240 °C. The tested properties are the relations between temperature and moisture profile with respect to elapsed time and drying rat, the test of dielectric properties, Internal bonding strength and Thickness swelling of particleboards from durian peel before drying and after drying.

**Keywords:** Drying kinetics, Continuous Belt system, Particleboards, Microwave

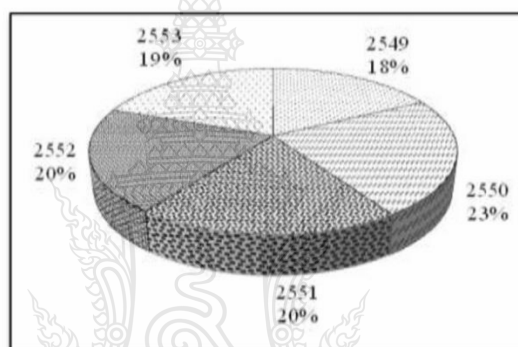


## Sci-Tech 029

การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1  
18 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## 1. บทนำ

การใช้วัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติเป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยลดปัญหาที่ทรัพยากรป่าไม้มีจำนวนลดลง ในขณะที่ความต้องการใช้ไม้ยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและในปัจจุบันนี้ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณภาพอยู่ในระดับต้น ๆ ของโลก เช่น ข้าว ข้าวโพด ผัก ผลไม้ สมุนไพร และเครื่องเทศ ฯลฯ เมื่อถึงฤดูกาลจะมีผลผลิตออกมาเป็นจำนวนมากจึงทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรจำนวนมากจึงได้มีแนวคิดในการนำวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรจำพวกเปลือกผลไม้มาผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัด เช่น เปลือกทุเรียน เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตทุเรียนรายใหญ่ของโลก (ปี 2549-2553) เฉลี่ยปีละ 6, 834,109 ตัน [1] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1. ปริมาณผลผลิตทุเรียนในประเทศไทยใน 5 ปีย้อนหลัง (หน่วย: %) [1]

จากข้อมูลดังกล่าวส่งผลให้มีวัสดุเหลือใช้จากเปลือกทุเรียนมีแนวโน้มสูงขึ้นจำนวนมากขึ้นเป็นเงาตามตัว ถ้าไม่สามารถกำจัดขยะเหล่านี้จะส่งผลทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอดีตได้มีนักวิจัยได้ทำการวิจัยโดยนำเส้นใยจากเปลือกทุเรียน มาผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดที่มีค่าการนำความร้อนต่ำเพื่อใช้เป็นวัสดุในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน เนื่องจากเส้นใยทุเรียนมีค่าการนำความร้อนต่ำ เท่ากับ  $0.0921 \text{ W/m.K}$  เมื่อเทียบกับเปลือกผลไม้ชนิดอื่นๆ [2] เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ซึ่งในกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการอบแห้งไม่ว่าจะด้วยวิธีธรรมชาติหรือนำพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ ในบางครั้งผลิตไม่ทันตามความต้องการหรือหากทันตามความต้องการจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและได้ประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร ส่งผลให้ต้องหากรรมวิธีการผลิตที่ช่วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพดี สะอาด ใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นที่สุดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาที่รวดเร็ว เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตจึงได้นำการใช้คลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟระหว่าง 0.3 ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 mm. ถึง 1 m. มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อแปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมงานวิจัยในระดับชาติและระดับนานาชาติที่ผ่านมาเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ที่ใช้คลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ ผงคอกัด และคณณะ [3] ได้ทำการศึกษากลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้คลื่นไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาความเร็วของสายพาน เวลา ขนาดของวัสดุ กำลัง และทิศทางของแมกนีตรอน วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการศึกษา คือ ยางพารา และเซรามิกส์ พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นช่วยประหยัดพลังงาน ลดระยะเวลาในการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้



ความร้อนแบบธรรมดา Vongpradubchai และ Rattanadecho [4] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม พารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ คลื่นที่ไมโครเวฟ 50, 100W ระดับอุณหภูมิของลมร้อน 40, 60 °C และความหนาของชิ้นไม้ 50, 80 mm โดยชิ้นไม้มีความชื้นเริ่มต้น 89 - 95 % dry basic พบว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังคลื่นไมโครเวฟและอุณหภูมิของลมร้อนและความหนาของชิ้นไม้มีผลต่อจนวนผลศาสตร์ของการอบแห้งชิ้นไม้ นริศ และคณะ [5] ได้วิจัยในห้องปฏิบัติการทำการศึกษาอิทธิพลของกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยที่มีความชื้นเริ่มต้น 450-580 % dry basic จนเหลือความชื้น 18 % dry basic พบว่าอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของเนื้อลำไยเพิ่มขึ้นตามกำลังอินฟราเรดหรืออุณหภูมิลมร้อนทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง Vongpradubchai และ Rattanadecho [6] ได้ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องโดยทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งแบบธรรมดา โดยทำการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอบแห้งภายใต้คลื่นไมโครเวฟการกระจายของคลื่นและพลังงานไมโครเวฟที่มีผลต่อจนวนผลศาสตร์การอบแห้งและคุณสมบัติทางกล ผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อย ทำให้ประหยัดพลังงานและชิ้นไม้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแบบธรรมดา นพวรรณ และคณะ [7] ได้ทำการนำพลังงานไมโครเวฟมาให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณของกำมะถันต่างกันทั้งหมด 4 สูตร โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (TE<sub>10</sub> Mode) เพื่อศึกษากำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาชิ้นงาน ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงาน ผลที่ได้พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปใช้ประยุกต์สำหรับกระบวนการคงรูปของยางธรรมชาติได้ดี

สำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาลักษณะจนวนผลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง รวมถึงลักษณะของภาพถ่ายทางความร้อน ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal bonding strength) และค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำ (Thickness Swelling) ของแผ่นชิ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดบ่อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยมีอุโมงค์เป็นหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าต่างตัด 0.45 เมตร 0.90 เมตร มีอุโมงค์ยาว 3 เมตร ในติดตั้งแมกนีตรอนกำลังต่ำ ความถี่ที่ใช้คือ 2.45 GHz กำลังสูงสุดที่ทำคือ 6×800 วัตต์

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การอบแห้งคือ กระบวนการลดความชื้นหรือน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ในอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ การอบแห้งแบบธรรมดาคือใช้หลักการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวภายในและภายนอกของผลิตภัณฑ์แต่การอบแห้งโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์และค่าสมบัติทางไดอิเล็กตริกของผลิตภัณฑ์นั้นๆ วัสดุที่เป็นฉนวนที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้ดี เช่น แก้ว อากาศ อลูมิเนียม เซรามิกส์ เป็นต้น ส่วนวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น งานโลหะ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านไปได้ สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกหรือวัสดุกึ่งฉนวนที่มีขั้วทางไฟฟ้า (Dipole) เช่น น้ำ กระจกเรซินและไม้จะสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ลักษณะการเกิดความร้อนจะเกิดจากแรงเสียดสีระหว่างการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลน้ำ เมื่อดูดกลืนคลื่นส่งให้เกิดเป็นความร้อนภายในทั่วทั้งเนื้อวัสดุ (Volumetric Heating) ความร้อนและความชื้นจะถูกถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอกของวัสดุ การให้ความร้อนคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุอย่างสม่ำเสมอสามารถลดการแตกร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งสำหรับวัสดุในงานอุตสาหกรรมต่อไป



## 2.2 สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าค่ากำลังการดูดซับคลื่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed,  $Q$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังสมการ (1)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $E$  คือ สนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง  $f$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ  $\epsilon_r'$  คือ relative dielectric constant ซึ่งบอกถึงสมบัติของวัตถุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย  $\epsilon_0$  คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ  $\tan \delta$  คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงานความร้อน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า  $\tan \delta$  และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า  $\tan \delta$  ของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากไปด้วย แต่ถ้าค่า  $\tan \delta$  มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่าความชื้น (Moisture content) ลักษณะของแผ่นขึ้นไม้อัดและขนาดของแผ่นขึ้นไม้อัดด้วย

ค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ สามารถหาได้จากสมการ (2)

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

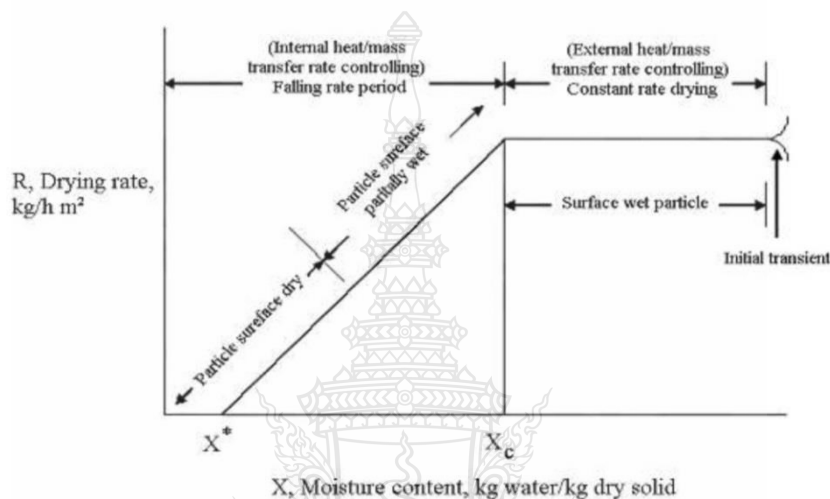
เมื่อ  $v$  คือ ค่าความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s),  $f$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ( $\epsilon_r'$ ) คือ Relative dielectric constant ( $\tan \delta$ ) คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient จะเห็นว่าค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนค่าความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนแปลงตามด้วยเห็นว่าค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนค่าความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

## 2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งในวัสดุ

กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ๆคือคาบเวลาที่ อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุที่ เติบโตเต็มที่ ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content,  $x_c$ ) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุเมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) โดยปกติคาบเวลานี้ใช้ระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่ อัตราการอบแห้งคงที่เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้า



ใกล้ศูนย์มีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้งค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. คาบเวลาของกระบวนการอบแห้ง

คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) เมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมากๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไอน้ำ หากอิทธิพลภายนอกถูกควบคุมให้คงที่อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุ ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้ คือพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (Surface diffusion) เป็นหลัก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่ายโดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Forced convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์ ส่วนคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤตความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปทำให้บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นความแห้ง

#### 2.4 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือแห้ง ความชื้นในเนื้อวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 3 แบบ คือ

##### 1) ความชื้น (Moisture content, MC)

$$MC = \left( \frac{w_t - w_d}{w_d} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

$w_t$  คือ น้ำหนักที่เวลาใด ๆ (กรัม)

$w_d$  คือ น้ำหนักแห้ง (กรัม)



## 2) อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR)

$$MR = \frac{M_c - M_{eq}}{M_w - M_{eq}} \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

$M_w$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)

$M_c$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)

## 3) อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

$$DR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, (กรัม/ชั่วโมง)

$W_1$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 1, (กรัม)

$W_2$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 2, (กรัม)

$T_1$  คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 1, (นาที)

$t_2$  คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 2, (นาที)

### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

แผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)ที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ (เส้นใยเปลือกทุเรียน : ฟงเปลือกทุเรียน : น้ำ) แบ่งสูตรผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.2 เมตร หนา 0.01 เมตร

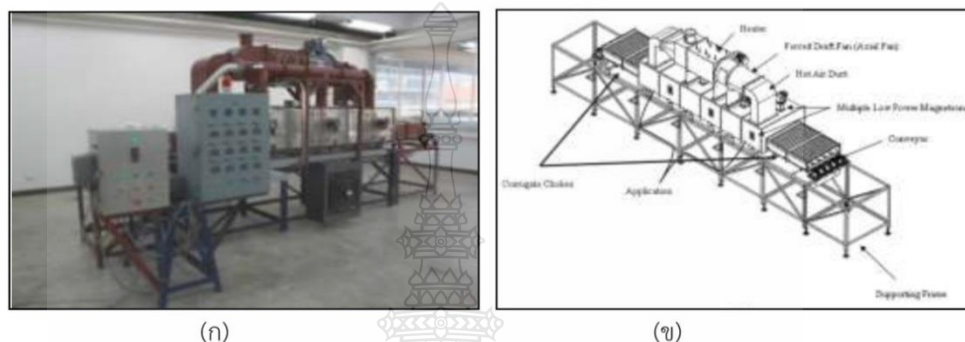
3.1 เครื่องอบไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ที่ทางหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME). พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular cavity) ซึ่งภายในระบบจะติดตั้งแมกนีตรอน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ไว้จำนวน 12 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) และเครื่องกำเนิดลมร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณ 240 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัสดุ) และวัดอุณหภูมิลมร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง การที่เครื่องตัวนี้เป็นแบบสายพานต่อเนื่อง เพราะตัวเครื่องเน้นรูปแบบการทำงานที่ต้องการความต่อเนื่องของกระบวนการ ใช้ในการผลิตชิ้นงานในปริมาณมาก ทำให้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของการไม่ต้องเสียเวลาในการปิดและเปิดเครื่อง คลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งอยู่รอบๆบริเวณอุโมงค์ การทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณทางเข้าระบบ (สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วสายพานได้ตามต้องการ) จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งต้องการ บริเวณทางเข้าและออกระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร





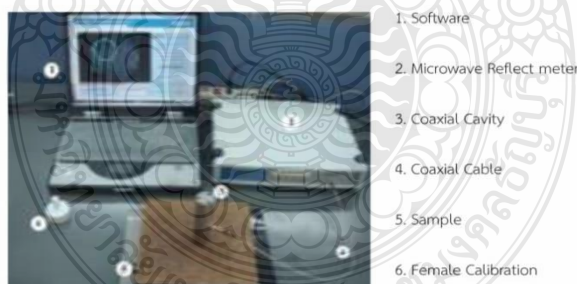
สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถ วัดได้ที่ตำแหน่งทางเข้าและออกของเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง  $\pm 0.5$  °C)



รูปที่ 3. (ก) เครื่องไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (ข) ไดอะแกรมรายละเอียดเครื่องทดลอง [4]

### 3.2. ขั้นตอนการทดลอง

นำแผ่นขึ้นไม้อัด(แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) ที่มีส่วนประกอบคือ (เส้นใยเปลือกทุเรียน : ผงเปลือกทุเรียน : น้ำ) ขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.2 เมตรหนา 0.01 เมตร ทั้ง 12 แผ่น (12 สูตร) มาทำการวัดความชื้น วัสดุอุณหภูมิ ชั่งน้ำหนักและวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative dielectric constant, Relative dielectric loss and Loss tangent) เริ่มต้นก่อนการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.



รูปที่ 4. เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์ (Network Analyzer) [6]

จากนั้นทำการทดลองโดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ตามเงื่อนไขโดยทำการเปิดแมกนีตรอนจำนวน 6 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 4800 W ซึ่งแผ่นขึ้นไม้อัดที่ใช้อบมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-20 % dry basic อบจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-15 % dry basic โดยทุก ๆ เงื่อนไขจะมี การชั่งน้ำหนัก วัสดุอุณหภูมิอบแห้งของขึ้นไม้อัดและความชื้นคงเหลือ ทุก ๆ 10 นาที เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความชื้นกับเวลาและทำการถ่ายภาพทางความร้อนและวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดที่ผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ และนำไปทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal bonding strength) และค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำ (Thickness Swelling)



## 3.3 การวิเคราะห์ผล

$$\text{ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เมกะพาสคัล} = \frac{F}{W \times L} \quad (6)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงสูงสุด เป็น นิวตัน

W คือ ความกว้างของชั้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

L คือ ความยาวของชั้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

$$\text{การบวมพองหลังการแช่น้ำ ร้อยละ} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ  $t_1$  คือ ความหนาของชั้นทดสอบก่อนแช่น้ำ เป็น มิลลิเมตร

$t_2$  คือ ความหนาของชั้นทดสอบหลังแช่น้ำ เป็น มิลลิเมตร

## 4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) ก่อนการอบและหลังอบ

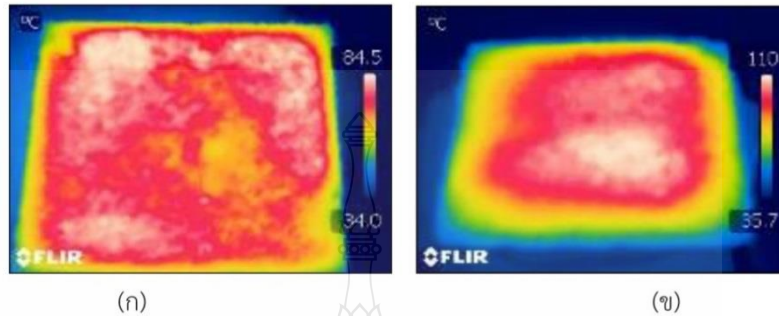
แผ่นขึ้นไม้อัด	สูตรอัตราส่วนและเงื่อนไขในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด	Dielectric Properties						น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	Drying rate (g/min)
		ก่อนอบ			หลังอบ					
		$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan \delta$			
1	1:1:1 (80)	2.00	0.32	0.16	1.56	0.15	0.100	361	318	0.24
2	1:1:1.5 (80)	2.25	0.43	0.19	1.50	0.15	0.101	365	320	0.27
3	2:1:1.5 (80)	2.31	0.43	0.19	1.59	0.15	0.098	364	319	0.27
4	2:1:2 (80)	1.92	0.27	0.14	1.56	0.15	0.101	357	318	0.23
5	1:1:1 (90)	2.15	0.35	0.16	1.48	0.15	0.103	358	314	0.25
6	1:1:1.5 (90)	2.23	0.43	0.19	1.50	0.15	0.102	363	319	0.25
7	2:1:1.5 (90)	2.45	0.46	0.19	1.61	0.15	0.099	354	311	0.25
8	2:1:2 (90)	2.20	0.35	0.16	1.63	0.16	0.098	355	312	0.27
9	1:1:1 (100)	2.38	0.66	0.15	1.73	0.16	0.096	357	315	0.19
10	1:1:1.5 (100)	2.19	0.38	0.17	1.62	0.16	0.100	362	319	0.25
11	2:1:1.5 (100)	2.08	0.37	0.18	1.51	0.15	0.103	353	310	0.26
12	2:1:2 (100)	2.38	0.48	0.20	1.53	0.15	0.101	365	319	0.19

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองจากการใช้กำลังไมโครเวฟ 4800 วัตต์ ทำการอบแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) โดยแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีอัตราสูตรในการผลิต อัตราส่วนคือ (เส้นใยเปลือกทุเรียน : ผงเปลือกทุเรียน : น้ำ) จะเห็นได้ว่าค่า Loss Tangent Coefficient  $\tan \delta$  ของแผ่นขึ้นไม้อัดก่อนอบในแต่ละแผ่นมีค่าสูง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดแผ่นนั้นมีน้ำหนักมากและมีความชื้นมาก และเมื่อทำการอบด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ พบว่าค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ของแผ่นขึ้นไม้อัดแต่ละแผ่นมีค่าลดลง น้ำหนักลดลงและความชื้นก็ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากสูตรอัตราส่วนและเงื่อนไขในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดมีผลต่อการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยแผ่นที่ 9 1:1:1 100 °C มีอัตราการส่วนในการผลิตที่น้อยและในกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดอบที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้มีน้ำหนักน้อยความชื้นต่ำทำให้มีค่า Loss Tangent Coefficient ( $\tan \delta$ ) ต่ำ การสะท้อนของพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าต่ำ ทำให้คลื่นไมโครเวฟสามารถส่งกำลังทะลุทะลวงผ่านผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดได้มาก ส่งผลให้เมื่อทำการอบแห้งรวดเร็วขึ้นจึงเห็นได้ว่า อัตราส่วนและเงื่อนไขในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดที่เหมาะสมคืออัตราส่วน 1:1:1 อบที่อุณหภูมิ 100 °C



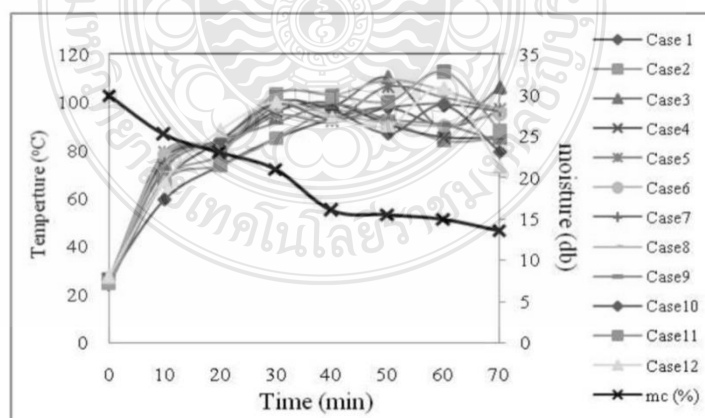
## Sci-Tech 029

การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1  
18 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ 5. (ก) ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อทำการอบ 10 นาที (ข) ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อทำการอบ 70 นาที

รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายทางความร้อนจากการใช้กำลังไมโครเวฟ 6×800 วัตต์ อุณหภูมิ 100 °C ทำการอบแผ่นชิ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) พบว่าในกระบวนการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถบ่งบอกถึงการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี โดยสังเกตจากสีของภาพถ่ายทางความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจะเห็นว่าเมื่อเริ่มทำการอบ (10 นาที) แผ่นชิ้นไม้อัดจะมีความร้อน (สีแดง) กระจายสม่ำเสมอทั้งแผ่น เพราะแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นสูง มีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมากที่บริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดส่งผลให้เกิดความร้อนภายในทั่วแผ่นชิ้นไม้อัดทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป (70 นาที) ความชื้นและความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจะถูกถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอกของแผ่นชิ้นไม้อัดทำให้การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟลดลงส่งผลให้บริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดยังมีความชื้นสะสมอยู่ ทำให้ความร้อน (สีแดง) กระจายอยู่บริเวณตรงกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้ผิวของแผ่นชิ้นไม้อัดไม่ต่างไปจากเดิมมากนักเพราะ เคลื่อนที่ของอุณหภูมิและความชื้นภายในแผ่นชิ้นไม้อัดเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งสามารถลดการแตกร้าวและรอยไหม้ของแผ่นชิ้นไม้อัดได้



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา

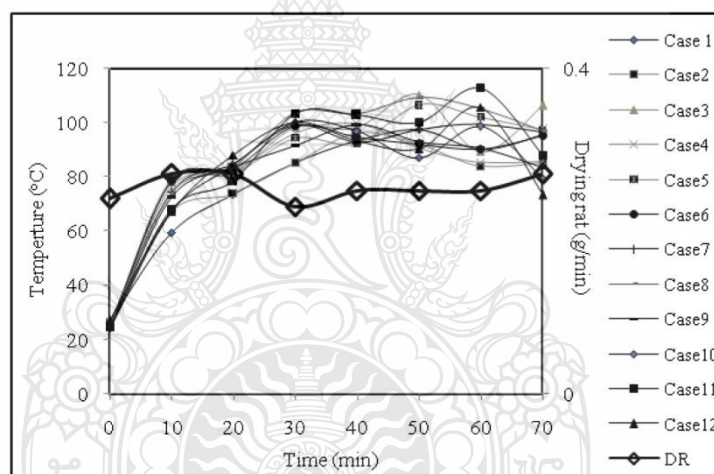
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้น ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับเวลา พบว่าเมื่อในช่วงแรก (0-50 min) แผ่นชิ้นไม้อัดจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้มาก เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นสูง ต่อมาการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของแผ่นชิ้นไม้อัดจะเริ่มมีค่าลดลงเนื่องจากความชื้นภายในแผ่นชิ้นไม้อัดได้เคลื่อนตัวออก



## Sci-Tech 029

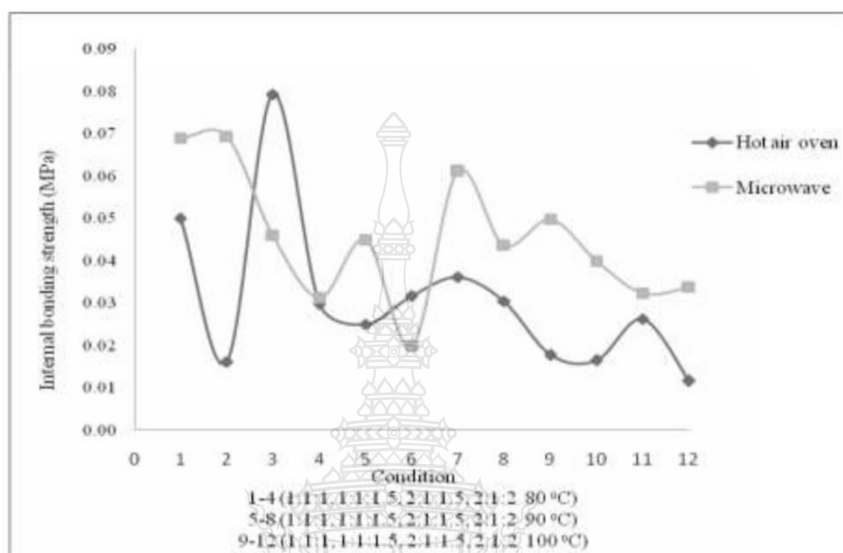
การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1  
18 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สู่ผิวภายนอก ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัดมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้าซึ่งเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก และกำลังไมโครเวฟสะท้อนที่ผิวแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีค่ามากในช่วงแรกและจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ โดยกำลังคลื่นไมโครเวฟที่ทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นโดยในช่วงท้ายการทดลองพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านจะมีค่าสูง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นลดลง การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีค่าลดลงตามไปด้วย และเมื่อวิเคราะห์ถึงกับค่า Dielectric Properties ใน (ตารางที่ 1) พบว่าเวลาที่ในการอบมากขึ้นทำให้ค่าความชื้นมีค่าเข้าใกล้จุดสมดุลมากขึ้นตามไปด้วย



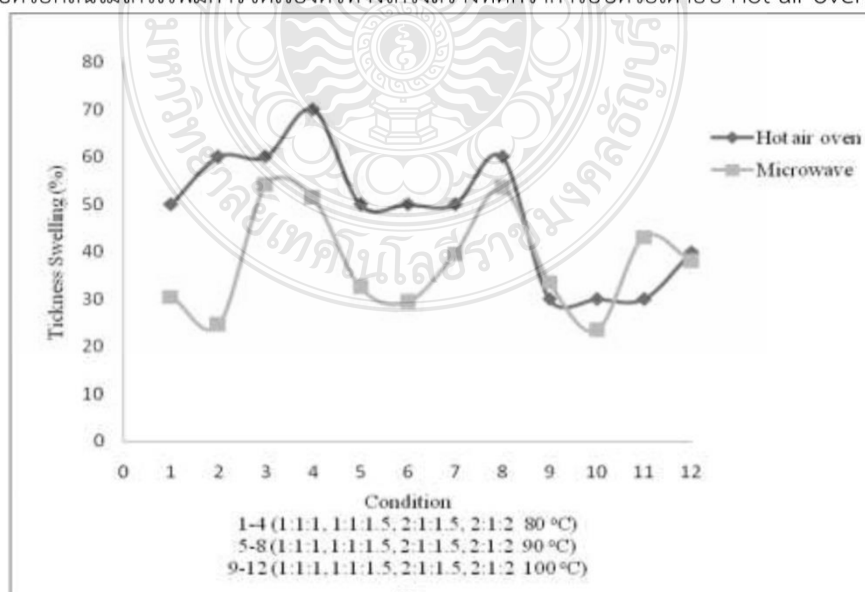
รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการอบแห้งกับเวลา

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการอบแห้งที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับเวลา พบว่าในช่วงแรก (0-20 min) อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดยังมีความชื้นสูงจึงทำให้มีการมีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้อัตราในการอบแห้งลดลงแผ่นขึ้นไม้อัดมีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟลดลงอุณหภูมิสูงขึ้นแต่พลังงานความร้อนสะสมภายในแผ่นขึ้นไม้อัดยังมีอยู่จึงทำให้อุณหภูมิยังคงสูงจึงทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ค่าสมดุล



รูปที่ 8. ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)

รูปที่ 8 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) พบว่าหลังจากได้รับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โครงสร้างภายในของแผ่นขึ้นไม้อัดมีความแข็งแรงมากกว่าการอบด้วยเตาอบ Hot air oven เมื่อนำไปทดสอบจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูงกว่าการอบด้วยเตาอบ Hot air oven จากผลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ว่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นในแผ่นขึ้นไม้อัดที่อบด้วยคลื่นไมโครเวฟมีการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างที่ดีกว่าการอบด้วยเตาอบ Hot air oven



รูปที่ 9. การบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)



รูปที่ 9 แสดงค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง) หลังจากผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าการอบด้วยไมโครเวฟจะทำให้แผ่นขึ้นไม้ มีโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบดี เนื่องจากมีการดูดซับพลังงาน การกระจายความร้อน และการกระจายความชื้นสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างอยู่ในระดับน้อยกว่าการอบด้วยเตาอบ Hot air oven ส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยการบวมพองหลังการแช่น้ำต่ำกว่าการอบด้วยเตาอบ Hot air oven (ค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำจากไมโครเวฟได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 37.77 % ส่วนจากเตาอบ Hot air oven ได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 48.33 % )

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัด(แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)พบว่า ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง แผ่นขึ้นไม้สามารถดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟได้ดีเนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดยังมีความชื้นสูง ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัดสูงตามไปด้วยรวมถึงการให้กำลังคลื่นไมโครเวฟต่อเนื่องจะส่งผลให้ความสามารถในการสร้างความร้อนในแผ่นขึ้นไม้อัดสูง ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลต่อการกลายเป็นไอ ซึ่งไอที่สะสมภายในทำให้เกิดความดันไอบนผิวแผ่นขึ้นไม้อัดและดันความชื้นออกมาสู่ผิวและระเหยออกสู่บรรยากาศภายนอกได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น การดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟจะมี ค่าลดลง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นลดลง จึงทำให้อุณหภูมิภายในของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่า ลดลงและลักษณะการเคลื่อนตัวของความชื้นช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัด จะมีเฟสของของเหลวอย่างต่อเนื่องทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่)ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) และความดันก๊าซ(Gas Pressure) เป็นหลัก จากงานวิจัยนี้สามารถนำพลังงานคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์แผ่นขึ้นไม้อัด เนื่องจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปในแผ่นขึ้นไม้อัดที่นำมาทำการอบแห้งได้ เพราะความร้อนที่เกิดจาก คลื่นไมโครเวฟภายในแผ่นขึ้นไม้อัดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจึงทำให้ความแห้งที่เกิดขึ้นไปอย่างสม่ำเสมอไปทุกตำแหน่งของตัวแผ่นจึงเป็นเหตุให้การควบคุมคุณภาพในการผลิตทำได้ง่าย ระยะเวลาในการอบแห้งก็สั้นว่าการอบแบบปกติ และยังเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสมัยใหม่ที่เหมาะกับการนำไปใช้เพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์ภาคการเกษตรภายในประเทศที่เน้นการควบคุมคุณภาพเพื่อการส่งออก

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณเงินงบประมาณแผ่นดิน จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME.) และกลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ กรมป่าไม้ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

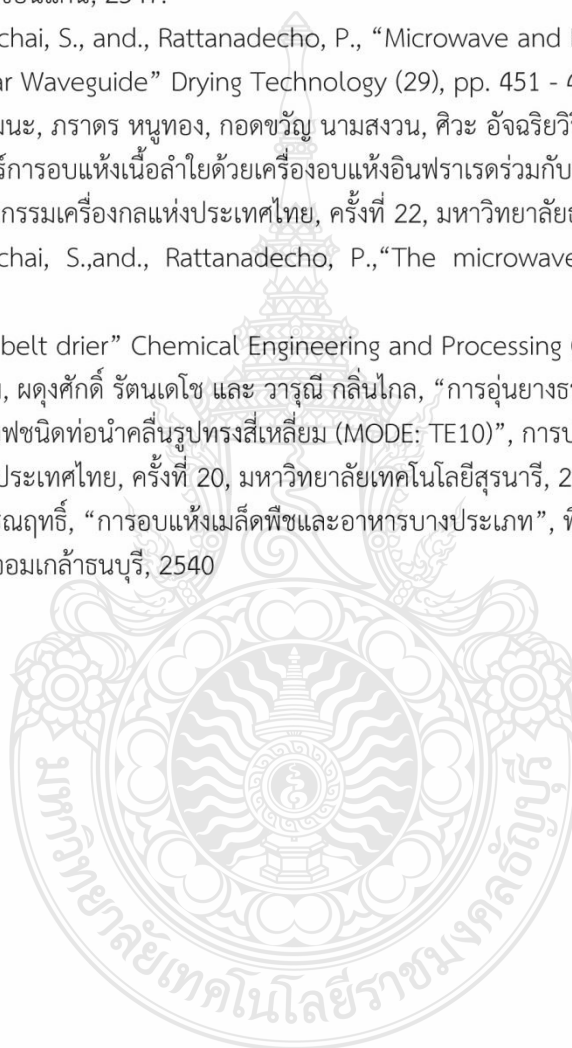
### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, "ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร 2553 [ออนไลน์]", 2553, ได้จาก: [http:// www.dft.moc.go.th](http://www.dft.moc.go.th).
- [2] Khedari, J., Charoenvai, S., and Hirunlabh, J., "New Insulating Particleboards from Durian Peel and Coconut Coir", Building and Environment (38), 2003, pp. 435-441.
- [3] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, อนุรักษ์ สุวรรณภูมิ, สมศักดิ์ วงษ์ประดับชัย, สุชนม์ ปิยโชติ และ ดวงเดือน อัจจงค์, "การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียง



แบบต่อเนื่อง”, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 18, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.

- [4] Vongpradubchai, S., and., Rattanadecho, P., “Microwave and Hot Air Drying of wood using a Rectangular Waveguide” *Drying Technology* (29), pp. 451 - 460, 2011.
- [5] นริศ พัวพันวัฒน์, ภาวทร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ, “จรรยาบรรณการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน”. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 2549.
- [6] Vongpradubchai, S.,and., Rattanadecho, P.,“The microwave processing of wood using a continuous Microwave belt drier” *Chemical Engineering and Processing* (48), pp. 997 - 1003, 2009
- [7] นพวรรณ ดุงาม, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ วารุณี กลิ่นไกล, “การอนุรักษ์ธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดที่นำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE<sub>10</sub>)”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 20, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.
- [8] สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, “การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท”, พิมพ์ครั้งที่ 20, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายอนุชิต จิวหิ
วัน เดือน ปีเกิด	9 มกราคม 2529
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 145 หมู่ที่ 5 ตำบลชำมรงค์ อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62160
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัย สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

