

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือก
ทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง
ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION IN DRYING PROCESS
OF PARTICLEBOARDS FROM MONTONG DURIAN PEEL USING
A COMBINED MULTI-FEED MICROWAVE-CONVECTIVE AIR
AND CONTINUOUS BELT SYSTEM (CMCB)

วันชนะ ยิ่งยืน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจาก
เปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง
ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

วันชนะ ยิ่งยี่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหอมทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง Analysis of Energy Consumption in Drying Process of Paticleboards from Montong Durian Peel Using a Combined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB)
ชื่อ - นามสกุล	นายวันชนะ ยั่งยืน
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	การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง
ชื่อ - นามสกุล	นายวันชนะ ยิ่งยืน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สโรชา เจริญวัย, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยโครงสร้างระบบ ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 12 ตัว และเครื่องกำเนิดลมร้อน วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร โดยมีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1 1:1:1.5 2:1:1.5 และ 2:1:2 โดยมวล ตามลำดับ พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือความชื้นแผ่นขึ้นไม้อัด อุณหภูมิแผ่นขึ้นไม้อัด สมบัติไดอิเล็กตริกแผ่นขึ้นไม้อัด เวลาในการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption) และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

การศึกษากการทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยใช้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 2400 วัตต์ อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อน

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงตาม ประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งสูง และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย เมื่อพิจารณาจาก การใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 วัตต์ อุณหภูมิลมร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 0.1129 0.0968 และ 0.0926 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

คำสำคัญ: พลังงาน ประสิทธิภาพ การอบแห้ง ไมโครเวฟ แผ่นขึ้นไม้อัด

Thesis Title	Analysis of Energy Consumption in Drying Process of Particleboards from Montong Durian Peel Using a Combined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB)
Name - Surname	Mr. Wanchana Yingyuen
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Ms. Sarocha Charoenvai, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Professor Phadungsak Rattanadecho, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This research presents the energy consumption analysis in drying process of particleboards from Montong-durian peel using a Combined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB). The construction of this system consists of twelve magnetrons of 800 Watt and 2.45 Gigahertz wavelength combined with hot-air generator. Main research materials are particleboards, made from Montong peel and contained fiber, powder and water. Four different mixture proportions, formulated for 20 centimeters × 20 centimeters × 1 centimeter particleboards were 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 and 2:1:2, respectively. All the tested parameters are moisture content, temperature, dielectric properties, time, specific energy consumption and efficiency in drying process.

By using a constant microwave power 2400 Watts, the study analyzed for 3 cases: different temperatures of hot-air 40, 50 and 60 Degrees Celsius, respectively. Particleboards were then brought to verify the quality with a scanning electron microscope and examined their physical properties, mechanical properties and thermal properties.

The results show that with a higher hot-air temperature, a drying time was shortened, and the specific energy consumption and higher efficiency in the drying process was decreased. By considering all cases with the microwave power fixed at 2400 Watts, which cover using hot-air temperature of 40, 50 and 60 Degrees Celsius, the specific energy consumption of equal to 0.1129, 0.0968 and 0.0926 Megajoules per kilogram, respectively. Conclusively, using hot-air temperature of 60 Degree Celsius yields the lowest specific energy consumption.

Keywords: energy, efficiency, drying, microwave, particleboards

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ดร.สโรชา เจริญวัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ข้อเสนอแนะรวมถึงแนวทางการแก้ปัญหาและจัดหาอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำวิจัย ทำให้ผู้เขียนทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ และผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ดร.สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำเพิ่มเติมพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สรพงษ์ ภวสุปรีย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุและโลหการ และ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ หัวหน้าภาควิชาวัสดุและโลหการ ที่ได้เอื้อเฟื้อสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย และงบประมาณแผ่นดินจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ ที่ได้เอื้อเฟื้อสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และบุคลากรทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนการอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำงานวิจัยได้อย่างราบรื่น

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วันชนะ ยี่สิบ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การอบแห้ง	6
2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	12
2.3 ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง (Energy Effectiveness)	15
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ	16
2.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ	27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	44
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	44
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	45
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	45
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	51

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลอง	61
4.1 ผลการทดลองการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยใช้ ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อน และสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง	62
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับ ลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อน	72
5 สรุปผลการทดลอง	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก ASTM C-518 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus ...	83
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	100
ประวัติผู้เขียน	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าความชื้น ค่าความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเปลือก ผลไม้แต่ละชนิด	2
4.1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง	62
4.2 ภาพถ่ายทางความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัดที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง (10 min)	69
4.3 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (บริเวณผิวแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)	70
4.4 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (บริเวณด้านในแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)	71



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ	1
2.1 ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้ง	7
2.2 ปฏิกริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า	20
2.3 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก	25
2.4 ตำแหน่งและการตัดชิ้นทดสอบ	32
2.5 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนา	33
2.6 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ	34
2.7 แสดงวิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ	35
3.1 เตาอบระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับ ระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง	46
3.2 เตาอบแบบใช้ลมร้อน (Hot Air Oven)	47
3.3 เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer)	48
3.4 กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Infrared Camera)	49
3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	49
3.6 เครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	50
3.7 แผนผังกระบวนการเตรียมวัสดุคิบผงเปลือกทุเรียนหมอนทอง และเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง	51
3.8 กระบวนการเตรียมผงเปลือกทุเรียนและเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง	52
3.9 แผนผังกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง	53
3.10 กระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง	54
3.11 การถ่ายภาพทางความร้อน	56
3.12 กระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง	57
3.13 การเตรียมแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองสำหรับส่องกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	59
3.14 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

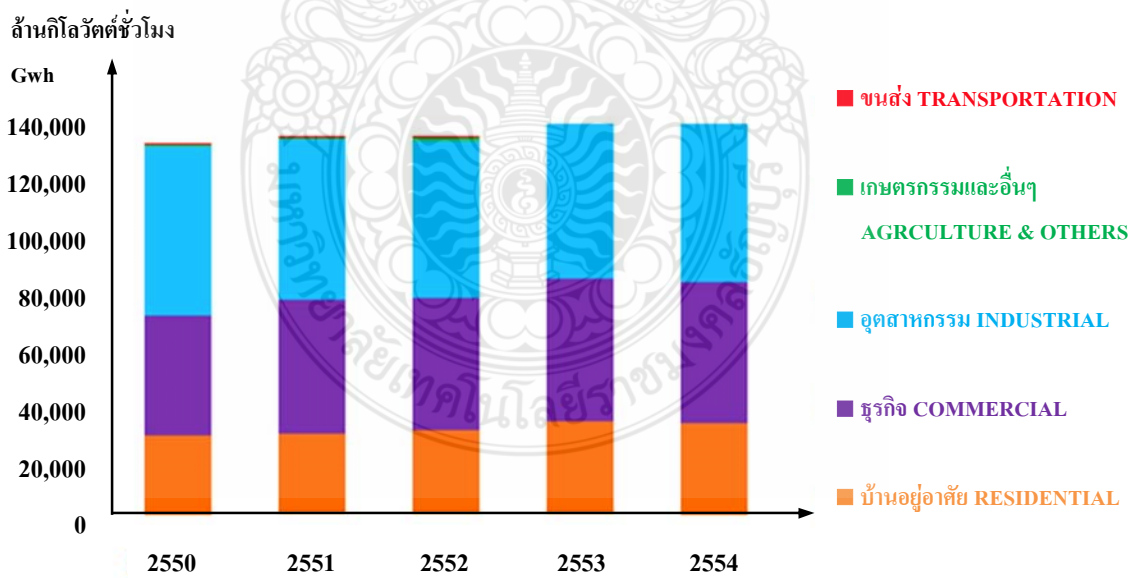
ภาพที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 40°C	63
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 50°C	64
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 60°C	65
4.4 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้ง	66
4.5 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)	67
4.6 ประสิทธิภาพในของกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด โดยใช้ไมโครเวฟ ชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อน และสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง	68
4.7 การบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง	72
4.8 ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหมอนทอง	73
4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในวิถีการดำเนินชีวิตของประชาชนชาวไทย โดยเฉพาะในด้านที่อยู่อาศัย การใช้วัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติ เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยลดปัญหาจากสภาพปัญหาปัจจุบันที่ทรัพยากรป่าไม้มีจำนวนลดลง ในขณะที่ความต้องการใช้ไม้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผลไม้ มีแนวโน้มสูงขึ้นในแต่ละปี ส่งผลทำให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มีจำนวนมากขึ้น ดังนั้นถ้าไม่สามารถกำจัดขยะเหล่านี้ จะส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงเกิดแนวคิดการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้จำพวกเปลือกผลไม้ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ เช่น เปลือกทุเรียน เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำเท่ากับ 0.0921 W/m·K [1] แสดงในตารางที่ 1.1 เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนในการผลิตแผ่นฉนวนไม้อัดเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ลดความร้อน



ภาพที่ 1.1 การใช้พลังงานไฟฟ้าจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ [2]

เข้าสู่อาคาร เนื่องจากพลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากทั้งภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และภาคธุรกิจ โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในประเทศ (ปี 2550 - 2554) [2] เฉลี่ยปีละ 140,396 ล้านกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (GWh) ดังแสดงในภาพที่ 1.1 ซึ่งมีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นทุกปี ดังนั้นการอนุรักษ์และประหยัดพลังงานจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการใช้พลังงาน โดยการใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เช่น ความสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าเนื่องจากเครื่องปรับอากาศ เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น การถ่ายเทความร้อนภายนอกอาคารเข้าสู่อาคารได้โดยง่าย ดังนั้นแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้นี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นอกจากนี้แผ่นฉนวนกันความร้อนยังสามารถกำหนดขนาดได้

ตารางที่ 1.1 ค่าความชื้น ค่าความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเปลือกผลไม้แต่ละชนิด [1]

ชนิดของเปลือกผลไม้	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	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

สำหรับกระบวนการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนมีการใช้กระบวนการอบแห้งในการอบแผ่นเพื่อลดความชื้น โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมนั้นมีหลายกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง กรรมวิธีในการอบแห้งนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา (Conventional Hot-Air Drying) ได้มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งหลากหลายรูปแบบ เพื่อเป็นทางเลือกในการอบแห้ง ที่สำคัญได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อนในสุญญากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อนฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized Bed) การอบแห้งด้วยอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เทคนิคการอบแห้งที่กล่าวมามีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน [5] ซึ่งวิธีการที่ใช้อยู่กันทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการ

อบแห้งด้วยลมร้อนธรรมชาติ ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงานบางครั้งอาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ เนื่องจากชิ้นงานจะได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือสม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพเปลี่ยนไป จึงเป็นที่มาของการออกแบบวิธีใหม่ในการขจัดปัญหาที่เกิดขึ้น การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและยังเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟสามารถกำเนิดความร้อนภายในวัสดุได้อย่างรวดเร็ว การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นจะสามารถช่วยประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาในการอบแห้งวัตถุดิบจะได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันตลอดทั้งชิ้น เป็นผลทำให้การกระจายของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เมื่อรวมเอาเทคนิคไมโครเวฟเข้าร่วมกับลมร้อน จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจะให้ความร้อนได้ดีที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากที่ผิวสามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในผลิตภัณฑ์จึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟระหว่าง 0.3 ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm ถึง 0.3 mm มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรม [5] โดยลักษณะเฉพาะของการให้ความร้อนต่อวัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ และ ไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านวัตถุ ในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัตถุพลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟดีกว่าการให้ความร้อนแบบการนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภทวัสดุไดอิเล็กตริก หมายถึงวัสดุที่ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างขั้ว (Dipoles) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในชิ้น (Internal Heat Generation) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะกระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวนอก ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากวิธีดังกล่าวระบบนี้จะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว

และมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ประหยัดเวลา พลังงานและช่วยลดต้นทุน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงาน ในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40, 50 และ 60°C) เพื่อหาสถานะในการอบแห้งที่เหมาะสม เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ให้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) ที่อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่อุณหภูมิต่างกัน (40, 50 และ 60°C)

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างระดับอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.2.4 เพื่อศึกษาลักษณะภาพถ่ายทางความร้อน (Infrared Thermography) ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ให้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40, 50 และ 60°C)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่มีความชื้นอยู่ที่ 30 - 40% (Dry Basis) ให้มีความชื้นสุดท้ายที่ 6 - 7% (Dry Basis)

1.3.2 กระบวนการอบแห้งที่ใช้คือกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ให้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40, 50 และ 60°C)

1.3.3 พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือความชื้น สมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัด อุณหภูมิแผ่นชิ้นไม้อัด เวลาในการอบแห้ง และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption, SEC)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1.4.2 เข้าใจถึงอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง สามารถนำเอาองค์ความรู้ไปใช้ในการประยุกต์ระบบไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานได้การอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.3 เป็นแนวทางการใช้งานหรือการพัฒนาการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดที่เหมาะสมและประหยัดพลังงาน

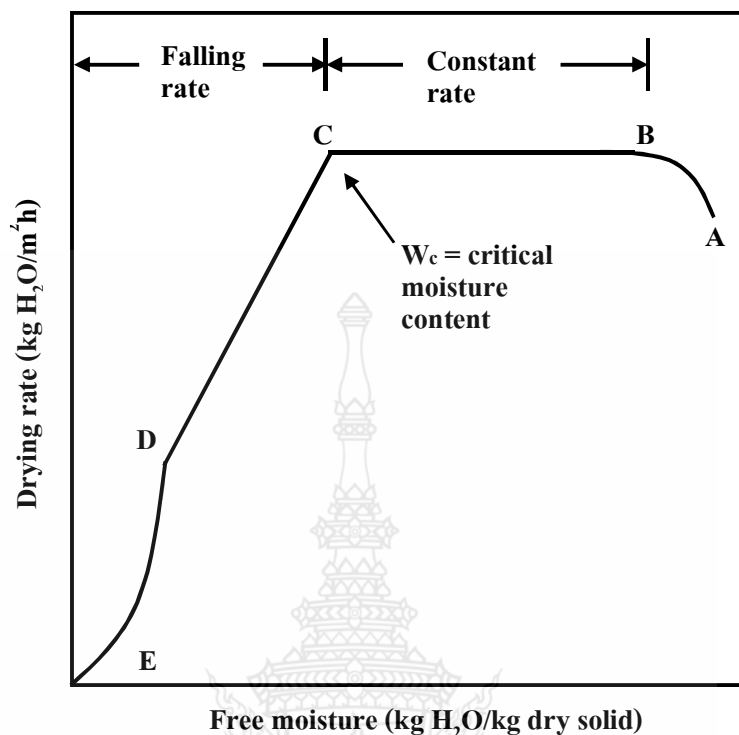
บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้ง

2.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง [3]

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นวัสดุ ด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อมๆกัน การอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกไปจากวัสดุ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งจึง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราการไหลของอากาศ สำหรับปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นในการอบแห้งด้วยลมร้อน คือการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหล โดยมีแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือ ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยไปกับอากาศในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้าวัสดุไปยังอากาศ ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากวัสดุมี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลลารี (Capillary) ซึ่งจะเกิดกับวัสดุที่มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์ โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการอบแห้ง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์จะเกิดกับวัสดุที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือเกิดกับวัสดุที่ผ่านการอบแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์เกิดการหดตัวทำให้แรงคาพิลลารีหมดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ถ้าวัสดุมีเนื้อโปร่งการเคลื่อนที่ด้วยการไหลแบบคาพิลลารีน้ำจะเคลื่อนที่มาได้เร็วกว่าการระเหยกลายเป็นไอทำให้ผิววัสดุเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ น้ำระเหยได้อย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) ต่อมาเมื่อการไหลแบบคาพิลลารีหมดไป น้ำต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ซึ่งช้าลงมากจนมาสู่ผิวหน้าไม่ทัน จึงทำให้ผิวของวัสดุแห้ง การระเหยน้ำเกิดขึ้นได้ช้าลงมีอัตราการอบแห้งลดลงจึงเรียกการอบแห้งช่วงนี้ว่า การอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) สำหรับวัสดุที่มีเนื้อแน่น น้ำในวัสดุนั้นจะเคลื่อนที่มาสู่ผิวหน้าได้ช้า ซึ่งจะทำให้มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และเมื่อความดันไอของความชื้นในห้องอบแห้งสมดุลกับความดันไอของ ความชื้นในวัสดุ การอบแห้ง จะสิ้นสุดลงและเรียกความชื้นของวัสดุขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) และจุดเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไปยังอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้ง [3]

จากภาพที่ 2.1 เส้นกราฟแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

ช่วง A → B เป็นช่วงของการทำให้ร้อนขึ้น (Warm Up) ของอุณหภูมิในวัสดุ

B → C เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุและอากาศ จะมีลักษณะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายมวลที่เกิดขึ้นที่บริเวณกระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ คือการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่บริเวณผิวของวัสดุจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนี้มีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิววัสดุและกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลดีขึ้นค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแห้งลดลง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีค่ามากขึ้น เกิดการถ่ายเทมวลดี

ขึ้น ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงนี้คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม

จุด C เรียกจุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) เกิดเนื่องจากในตอนแรกวัสดุมีความชื้นสูง เมื่ออบแห้งไปเรื่อยๆปริมาณความชื้นที่ผิวลดลงจนกระทั่งน้ำที่บริเวณผิวระเหยไปหมดและความชื้นในวัสดุต่ำลงทำให้อัตราการอบแห้งเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถพบการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน

ช่วง C → D และ D → E เรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้ความชื้นของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต (ความชื้นวัสดุขณะเปลี่ยนจากอัตราการอบแห้งคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง) การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นที่เฉพาะบริเวณผิวรอบนอกเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อของวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุมายังผิวนั้น ช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งจะถูกลบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะของอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น โดยที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมียิ่งมากขึ้น มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ลงอากาศอบแห้งจะเป็นผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลม จะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนี้จะมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลง เนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง 2 ช่วง เนื่องจากช่วง C → D ยังคงมีความชื้นอยู่ที่ผิวหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อย แต่ที่จุด D ความชื้นที่ผิวระเหยไปหมดทำให้ผิวน้ำแห้งสนิท อัตราการระเหยจึงช้าลงไปอีก

2.1.2 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-Bulb Temperature) [3]

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง คือ อุณหภูมิอากาศที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดาทั่วไป ซึ่งในความหมายของอุณหภูมินี้เป็นตัวชี้ถึงความเข้มข้นของปริมาณความร้อนสัมผัสในวัตถุ

2.1.3 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Dry-Bulb Temperature) [3]

อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิของอากาศที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีการพันกระเปาะด้วยผ้าหรือสำลีชุบน้ำ แล้วแกว่งไปในอากาศเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ

2.1.4 ความชื้นในวัสดุ [3]

ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในเนื้อวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

w คือ มวลของวัสดุ, (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), (kg)

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในวงการค้าโดยทั่วไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์, 100%

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left(\frac{w - d}{d} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

w คือ มวลของวัสดุ, (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), (kg)

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้งที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งที่มีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

2.1.5 อัตราส่วนความชื้น, MR [3]

(สมชาติ โสภณธนฤทธิ) ได้เสนอรูปแบบความชื้นสัมพัทธ์พื้นฐานของการอบแห้งวัสดุใดๆ ไว้ในสมการ

$$MR = \frac{M_c - M_{eq}}{M_w - M_{eq}} \quad (2.3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_w คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, (%Wb)

M_c คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่เวลาใดๆ, (%Wb)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, (%Wb)

2.1.6 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, R)[3]

ในการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอบแห้งนั้น นิยมแสดงอยู่ในรูปแบบอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, R)

อัตราการอบแห้ง = (ปริมาณน้ำที่ระเหย)/(ระยะเวลา)

$$R = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad (2.4)$$

เมื่อ R คือ อัตราการอบแห้ง, (g/hr)

W_1 คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 1, (kg)

W_2 คือ น้ำหนักของวัสดุที่ตำแหน่งที่ 2, (kg)

t_1 คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 1, (min)

t_2 คือ เวลาที่ตำแหน่งที่ 2, (min)

2.1.7 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) [3]

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) คือปริมาณของความชื้นในอากาศที่เป็นจริงที่เปรียบเทียบกับความชื้นทั้งหมดหรือความชื้นสูงสุดของอากาศที่มีในขณะนั้นค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นค่าที่แสดงในลักษณะเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างมวลของความชื้นในอากาศหนึ่งมวลที่อุณหภูมิหนึ่งๆกับมวลของความชื้นที่มากที่สุด ในอากาศหนึ่งหน่วยมวลที่อุณหภูมินั้นๆ หรือกล่าวอีกในหนึ่งได้ว่าเป็นมวลของความชื้นในอากาศอิ่มตัว (Saturated) หนึ่งหน่วยมวลนั่นเอง

$$RH = \frac{\text{Weight of water in 1 kg of air}}{\text{Weight of water in 1 kg of saturated air}} \times 100 \quad (2.5)$$

โดยที่ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ของอากาศ %

2.1.8 ความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content, W_c) [3]

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

2.1.9 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, W_e) [3]

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิจึงเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆด้วย เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [5]

2.2.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุ (Heat and Mass Transfer)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์ในเชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนในระหว่างกระบวนการอบแห้งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญก่อนที่จะไปออกแบบระบบที่ใช้งานในทางปฏิบัติ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะคาบเกี่ยวกับกระบวนการเบื้องต้นที่เกิดขึ้นพร้อมกันสองกระบวนการ นั่นก็คือ

1. กระบวนการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ ความร้อนที่ถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหยความชื้นที่มีอยู่

2. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือ มวลสารที่ถ่ายเทอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือไอน้ำภายในเนื้อวัสดุและที่ผิวของวัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่ครอบคลุมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเพื่อหาปรากฏการณ์ต่างๆ ในกระบวนการ เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุซึ่งจะพิจารณาให้เป็นฟังก์ชันของเวลา

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction) [5]

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

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_k คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำ หรือ การนำความร้อน

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน

T คือ อุณหภูมิ

X คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (k) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

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

สมการ 2.7 เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน k สำหรับตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในระบบเอสไอ (SI) พื้นที่ A จะมีหน่วยเป็น m^2 อัตราการถ่ายเทความร้อน q_k มีหน่วยเป็น Watt ส่วนค่าการนำความร้อน k จะมีหน่วยเป็น $W/m \cdot K$

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) [5]

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิววัตถุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน ระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน กระบวนการพาความร้อนดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการ พื้นๆ แต่กลไกของการถ่ายเทความร้อนนั้นซับซ้อนมาก การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อนนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) โดยการพาความร้อนแบบอิสระนี้ แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวนั้นเกิดจากความแตกต่าง ของอุณหภูมิภายในก้อนของไหล เนื่องจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของก้อนวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างการพาความร้อนแบบอิสระได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด เป็นต้น

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

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2.8)$$

เมื่อ \bar{h}_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับ
วัตถุหรือหนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน, (W/m²·K)

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล

T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ, (K)

$T_{f,\infty}$ คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมากๆ, (K)

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนืดและความเร็วของของไหลรวมทั้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เช่น ค่าการนำความร้อน (K) และค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) ในการพาความร้อนแบบบังคับนั้น ความเร็วของของไหลในระบบจะถูกกำหนดด้วยปั๊มหรือพัดลม แต่สำหรับความเร็วของของไหลที่ใช้พาความร้อนแบบอิสระนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับของของไหล สัมประสิทธิ์การขยายตัวของของไหลและสนามของแรง เช่น แรงดึงดูดของโลกเมื่อระบบอยู่บนพื้นโลก เป็นต้น

2.2.4 พลังงานความร้อน [5]

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง จะสามารถหาได้จากสมการ

$$Q^\circ = m^\circ C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.9)$$

เมื่อ m° คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า, (kg/s)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, (kJ/kg °C)

T_i คือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าหอบแห้ง, (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกก่อนทำความร้อน, (°C)

จาก

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m^\circ}{V^\circ} \quad (2.10)$$

ได้

$$m^\circ = \rho V^\circ = \rho v A \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$Q^\circ = \rho_g v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.12)$$

โดยที่ ρ_g คือ ความหนาแน่นของของไหล, (kg/m³)

V° คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า, (m³/s)

v คือ ความเร็วของลมร้อนตลอดพื้นที่หน้าตัดของเบด, (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด, (m²)

2.2.5 พลังงานความร้อนที่ใช้ต่ำสุดและสูงสุด ($Q^\circ_{\min, \max}$)[5]

จากสมการ 2.12 จะได้

$$Q^\circ_{\min} = \rho_g U_{mf} v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.13)$$

และ

$$Q^\circ_{\max} = \rho_g U_i v A C_a (T_i - T_{amb}) \quad (2.14)$$

2.3 ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง (Energy Effectiveness) [5]

ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง สามารถแสดงได้ด้วยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16

$$SEC = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}}, \text{ MJ/kg water evap.} \quad (2.15)$$

และ

$$SMER = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}, \text{ kg water evap./kWh} \quad (2.16)$$

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

2.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ [5]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นของไมโครเวฟ (0.3-300 GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm ถึง 0.3 mm มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัตถุต่างๆในทางอุตสาหกรรมให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและต่างจากวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุเมื่อรังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกพลังงานของไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยวัสดุไดอิเล็กตริก การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า (ใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ) ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ศัพท์ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราเรียกว่าวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) วัสดุไดอิเล็กตริกหมายถึงวัสดุทั้งหมดที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคที่มีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) เช่น โมเลกุลของน้ำ เป็นต้น ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการสลับเฟสไปมาหลายครั้งในหนึ่งวินาที ส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในขึ้น (Internal Heat Generation) ในวัสดุไดอิเล็กตริก หรือยกตัวอย่างที่ชัดเจนทางปฏิบัติ เช่น กรณีการดูดกลืนพลังงานจากไมโครเวฟโดยโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในอาหาร โมเลกุลของน้ำเหล่านี้จะมีการสั่นและเคลื่อนไหวสลับไปมาหลายล้านครั้ง (ตามความถี่ไมโครเวฟที่ใช้) ทำให้เกิดการขัดสีกันจนก่อให้เกิดความร้อนขึ้นมาในอาหารที่นำมาผ่านกระบวนการ

ข้อดีของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (The Advantages of Microwave Heating)

1. ใช้เวลาน้อย (High Speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์การทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary Part)

2. การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy Penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนจากผิวนอกวัสดุอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการนอกจากนั้นยังใช้เวลามากเพราะข้อจำกัดทางการนำความร้อน ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า

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

4. การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ทันทีทันใด (Instantaneous Electronic Control) อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่า เช่น เตาอบ ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาอย่างมาก

5. มีประสิทธิภาพสูง (High Efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อให้ปริมาณความร้อนเท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10% - 30% ในขณะที่ไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60% - 70%)

6. ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Microwave Processing is Clean) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม (เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งสิ่งทอ อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก การทำสเตอร์ไรไลซ์ ฯลฯ) งานทางการแพทย์ (เช่น การคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือดและกำจัดเนื้องอก) นอกจากนี้ไมโครเวฟยังสามารถใช้ในงานแยกสารระเหยออกจากวัสดุ (เช่น การแยกกำมะถันออกจากถ่านหินและการแยกสารสกัดออกจากดิน)

2.4.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ [5]

1. การสะท้อนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟเมื่อตกกระทบโลหะจะเกิดการสะท้อนออกและคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านโลหะไปได้

2. การทะลุผ่านของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุบางชนิดได้ คล้ายช่องกระจกหน้าต่างที่ยอมให้แสงธรรมชาติส่องผ่านตัวมันได้ วัสดุที่คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้คือ แก้วโดยทั่วไป (ยกเว้นแก้วเจียรไนที่มีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งเป็นโลหะ) แก้วทนความร้อน เครื่องถ้วยชามเคลือบกระดาษ และพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ตัวภาชนะจะไม่ร้อน จะร้อนเฉพาะอาหาร

3. การดูดกลืนของคลื่น

คลื่นไมโครเวฟสามารถดูดกลืนได้โดยน้ำในอาหาร หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ทำให้กำลังของคลื่นลดลงไป ซึ่งกำลังที่ถูกกลืนไว้จะเปลี่ยนสภาพทำให้วัสดุร้อนขึ้น วัสดุที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนอกจากจะเป็นอาหาร น้ำ หรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของน้ำอยู่ ยังประกอบไปด้วยเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบทั้งหมด เนื่องจากเครื่องปั้นดินเผาที่ไม่ได้เคลือบจะมีรูพรุนมากมาย ทำให้มีความชื้นหรือละอองน้ำแทรกอยู่รูพรุนนั้น เมื่อนำมาใช้ในเตาไมโครเวฟ ละอองน้ำจะร้อนส่งผลให้ตัววัสดุร้อนไปด้วย วัสดุที่เป็นพลาสติกบางประเภทมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) เป็นฉนวนสูง เมื่อนำมาเข้าในเตาไมโครเวฟจะถูกทำให้ร้อนขึ้น ตัวพลาสติกจะหลอมละลาย

2.4.3 เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ [5]

ความสามารถของไมโครเวฟ จะขึ้นอยู่กับการแพร่กระจายของเครื่องกำเนิด อุปกรณ์ไมโครเวฟที่เป็นโลหะ คลื่นจะไม่ทะลุเข้าไปได้ และส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดปัจจุบันใช้ท่อสุญญากาศ โดยทั่วไปจะถูกจัดประเภทโดยการแพร่กระจายของแกนนีออน มีทั้งเส้นตรง (Type O) และช่องว่าง (Type M) โดยที่ท่อตรงนั้นจะประกอบด้วยหลอดสุญญากาศที่ใช้กำเนิดไฟฟ้า (Klyton) และท่อที่กำหนดทิศทางของคลื่น ซึ่งจะมีราคาแพงกว่าและแรงปะทะน้อยกว่าการกระจายแบบช่องว่าง ที่มีต้นกำเนิดคลื่นคือ แมกนีตรอน

แมกนีตรอนเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ทางเดียว ซึ่งจะรวมถึงโวลต์ในการแพร่กระจายของไมโครเวฟ โดยเกิดจากแนวคิดของ (Albert Wallace Hull) และยังคงเป็นพื้นฐานของการออกแบบมาจนถึงทุกวันนี้ เพราะว่าจะที่รัดและราคาไม่แพง แมกนีตรอนถูกใช้เป็นตัวกำเนิดไมโครเวฟอย่างกว้างขวางสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุ

การทำงานของแมกนีตรอนจะถูกควบคุมโดยการไหลของอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วบวกไปสู่ขั้วลบ เมื่อเริ่มกระบวนการขั้วบวกจะเป็นตัวกลางทำให้เกิดความร้อน โดยใช้โวลต์ต่ำๆ ในการป้อนเข้าและอนุญาตให้ป้อนเป็นช่วงๆได้ เมื่อสังเกตการทำงานของอุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวในขั้วบวกและเมื่อใช้โวลต์มีค่าสูง จะมีประสิทธิภาพดีกว่า ในขั้นแรกถ้าใช้ประมาณ 2 - 3 kV สำหรับคลื่นที่มีความยาวคลื่น 2 - 3 mm ถูกทำให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ หมายถึงการส่งผ่านที่อุณหภูมิสูงๆ การรวมตัวความร้อนในขั้วลบและการใช้ศักยภาพในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยเกิดจากการขนานของแกนของขั้วลบและตั้งฉากกับส่วนของอิเล็กตรอน แรงที่ใช้ในการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนรอบๆขั้วบวก รวมถึงความเร็วที่ใช้ของอิเล็กตรอน จะถูกกำหนดโดยสนามไฟฟ้าที่แข็งแรงและโครงสร้างทางเรขาคณิต ขั้วลบและโพรงจาก โครงสร้างที่มีผลต่อการเลือกใช้ความเร่งหรือความหน่วงของ

อิเล็กทรอนิกส์ การหมุนเวียนของกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์จะหมุนอย่างมีรูปแบบคล้ายๆกับล้อรถ กลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์จะถูกตั้งโดยโพร่งขั้วลบและไบพัด ทำให้เกิดประจุขึ้น การเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องของกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ จะส่งผลในการเพิ่มประจุในแต่ละโพร่ง เมื่อเกิดการหมุนรอบแกน โดยการเลือกเก็บประจุและคายประจุบริเวณขั้วลบจะกลายเป็นตัวเก็บประจุความร้อนที่ต่อขนานกัน โดยความถี่จะขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของโพร่ง ส่วนมากแมกนีตรอนจะถูกออกแบบให้มีความถี่ประมาณ 2.45 GHz และท่อใหญ่สำหรับ 915 MHz ใช้ในการเผาไหม้ทางอุตสาหกรรม

2.4.4 ประวัติและการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟ [5]

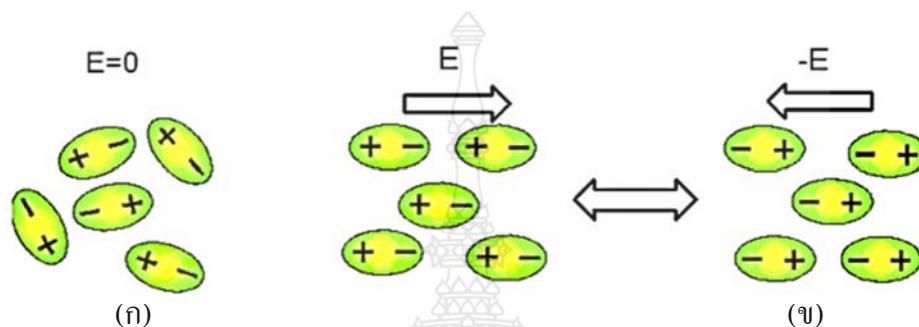
การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟสำหรับการทำความร้อนในวัสดุถูกนำมาใช้ครั้งแรกกับวัสดุประเภทอาหารโดย Spenser P. แห่งห้องปฏิบัติการบริษัทเรย์ตัน (The Raytheon Manufacturing Laboratories in Waltham, Massachusetts) ในปี ค.ศ. 1945 และพัฒนาต่อเป็นเตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์เครื่องแรกภายใต้ชื่อบริษัทเรย์ตันในปี ค.ศ. 1947 ตัวเครื่องมีความสูง 5 ฟุตครึ่ง น้ำหนักรวม 175 ปอนด์ ราคาประมาณ 5000 ดอลลาร์ ส่วนประกอบของเครื่องประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ตัว ตั้งขนานกับวัสดุประเภทอาหารเพื่อปล่อยพลังงานไมโครเวฟทำความร้อน จากนั้นทำการจดทะเบียนสิทธิบัตรอเมริกันหมายเลข 2495 - 429 ในปี 1951 ในปี ค.ศ. 1946 Steiffel K.J. ได้พัฒนาท่อควบคุมทิศทางคลื่นไมโครเวฟขึ้นและจดสิทธิบัตรอเมริกันหมายเลข 2560 - 903 ต่อมาในปี ค.ศ. 1947 Morse P.W. และ Rivercomb H.E. จากบริษัทเจเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric Company) ตีพิมพ์บทความ เกี่ยวกับกรรมวิธีการทำอาหารด้วยเตาไมโครเวฟ จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวทำให้เตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์ถูกใช้อย่างแพร่หลายไปทั่วสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา จากนั้นในช่วงปี ค.ศ. 1960 - 1970 บริษัทต่างๆ พยายามพัฒนาเครื่องมือที่เกี่ยวกับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเข้ามาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมทางด้านอาหาร และอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิกและโพลิเมอร์

ในปัจจุบันอุปกรณ์ทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในครัวเรือน (เตาอบไมโครเวฟ) แต่สำหรับงานในเชิงอุตสาหกรรมถือว่ายังมีน้อยมาก ในสหรัฐอเมริกาอุปกรณ์การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกว่าร้อยละ 90 เป็นการใช้งานสำหรับครัวเรือน มีเพียงไม่ถึงร้อยละ 10 ที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

2.4.5 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก [6]

สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก เมื่อถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้งโดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ภาพที่ 2.2 โมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีสภาพ

เชิงขั้ว (Dipole) ที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริก ประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่น การสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของสภาพเชิงขั้วทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในภาพของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก



การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 2.2 ปฏิกริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (Electric Field) [6]

โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (Megahertz, MHz) ซึ่งข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (Radio Frequency) และคลื่นความถี่สำหรับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave Application) (Jones *et al.*, 1996) กำหนดความถี่วิทยุไว้ดังนี้

- 1) 13.56 MHz \pm 0.05% (\pm 0.00678 MHz)
- 2) 27.12 MHz \pm 0.06% (\pm 0.16272 MHz)
- 3) 40.68 MHz \pm 0.05% (\pm 0.02034 MHz)

และได้กำหนดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟไว้ดังนี้

- 4) 900 MHz (Depend on Country)
- 5) 2450 MHz \pm 50 MHz

ในปัจจุบันเตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ที่ 2450 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 in (12.192 cm) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz มีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 13 in (33.02 cm) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 kW สามารถทำให้น้ำจำนวน

2.5 lb (1.134 kg) ระเบิดได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ปัญหาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของอุณหภูมิ การกระจายของความชื้น รวมทั้งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ ดังนั้นการรู้คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก รวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจึงมีความจำเป็น ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นและคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเองด้วย

2.4.6 สมการพื้นฐาน (Basic Equation) [6]

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

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.19)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.20)$$

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

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.21)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.22)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.23)$$

โดย σ คือคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) μ คือคุณสมบัติการซึมผ่านของ

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) และ ϵ คือค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Permittivity หรือ Dielectric Constant) แทนสมการ 2.21 ถึง 2.23 ลงในสมการ 2.18 ถึง 2.20 จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.24)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.25)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} \quad (2.26)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.27)$$

สมการ 2.24 และ 2.25 (The Curl Relation) อ้างอิงมาจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ตามลำดับ สมการ 2.26 และ 2.27 (Divergence Equation) เป็นผลมาจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law or Curl Relation) ในสมการของแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) ใช้วัดการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมการ 2.24 อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการ 2.26 แสดงถึงความแปรผัน (Divergence) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสภาพความหนาแน่นของประจุ (Position Charge Density) และสมการ 2.27 แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (Source) หรือแหล่งรับ (Sink) ของสนามแม่เหล็ก คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในภาพความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.28)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.29)$$

$$\sigma = 2\pi f \epsilon \tan \delta \quad (2.30)$$

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

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

คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่แปรผันตามอุณหภูมิสามารถหาได้จาก (Von Hippel) ส่วนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ ที่แปรผันตามอุณหภูมิและความชื้น สามารถหาได้จาก (Wang and Schmutz)

2.4.7 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก [5]

ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟให้เหมาะสม คลื่นไมโครเวฟเป็นภาพแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่างอากาศและวัตถุได้ คลื่นไมโครเวฟประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการควบคุมกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟควรทราบถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon_r' + j\epsilon_r'') = \epsilon_0\left(\epsilon_r' + j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right) \quad (2.31)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$ ϵ คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Complex Dielectric Permittivity) โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ (Dielectric Constant) ซึ่งเป็น สมบัติที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ϵ_0 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (Free Space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ϵ_r' เป็นจำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity หรือ Relative Dielectric Constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ϵ_r'' จินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกโลสแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง (Dielectric Loss Factor) กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.32)$$

เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่าประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$))

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.33)$$

ประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ ($\tan\delta$) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

Von Hippel รวบรวมคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุต่างๆ (เช่น คริสตัลเซรามิก แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200$ °C

2.4.8 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and Penetration Dept) [6]

ค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ ความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\varepsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\varepsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (2.34)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ

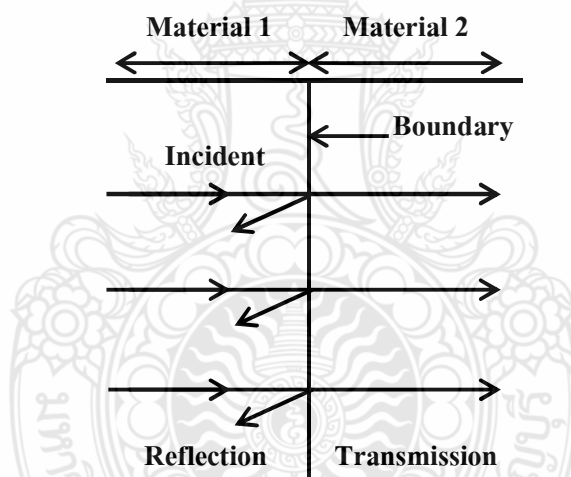
จากสมการ 2.34 จะเห็นว่าความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะลดลงหากวัสดุมีค่า ไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor) และค่าความถี่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้ (Penetration Depth, D_p) สามารถคำนวณได้จาก

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (2.35)$$

เมื่อค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และลอสแทนเจนต์เปลี่ยนไป ค่าความถี่ในการทะลุทะลวงภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

2.4.9 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect, Transmit and Absorb) [6]

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการกล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับพลังงานโดยวัสดุใดๆ ได้ ซึ่งความสามารถทั้งสามนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย



ภาพที่ 2.3 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก [5]

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่มาปะทะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด เช่น (รอยต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับอากาศ) คลื่นส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ของวัสดุทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{reflect} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (2.36)$$

สมการนี้ใช้ได้กลับข้อสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัสดุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุทดสอบ

สำหรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (2.37)$$

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกบางชนิด (เช่น แก้วและพลาสติก) คลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านโดยไม่มีการดูดซับและสะท้อนกลับของพลังงาน

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุจะถูกดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations) Q ซึ่งปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (2.38)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง H คือสนามแม่เหล็กเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีสภาพเชิงขั้วทางแม่เหล็ก จึงไม่มีการดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.38 ใหม่ได้เป็น

$$Q = \sigma |E|^2 + \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (2.39)$$

ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square Value) ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่า การผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (Local Volumetric Heat Generations) สามารถแสดงได้ในภาพสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (2.40)$$

จากสมการ 2.40 ค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริกของสเปกเตอร์ และสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนั้นยังแปรผันตรงกับค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และค่าประสิทธิภาพของวัสดุด้วยอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังมีผลจากปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และขนาดของวัสดุทดสอบ เป็นต้น

สมการ 2.40 มีความสำคัญมากในการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

2.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ [7]

2.5.1 ขอบข่าย

1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับ แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 400 kg/m^3 ถึง 900 kg/m^3 สำหรับใช้งานทั่วไปในสภาวะแห้ง (Dry Condition)

2. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ไม่ควรครอบคลุมถึง แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบซึ่งมีไม้บางหรือวัสดุอื่นปิดทับหน้า

2.5.2 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

1. แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ (Flat Pressed (FP) Particleboards) ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “ แผ่นขึ้นไม้อัด ” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่น ทำจากชิ้นไม้ หรือวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Material) อัดในเครื่องอัดร้อนให้ยึดติดกันด้วยกาว ให้ทิศทางของแรงอัดตั้งฉากกับระนาบของแผ่น การทำอาจทำเป็นแผ่นๆหรือทำต่อเนื่อง ชิ้นไม้ส่วนใหญ่ขนานกับระนาบของแผ่น แผ่นขึ้นไม้อัดอาจทำให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นเดียว สามชั้น หลายชั้น หรือโครงสร้างที่มีชิ้นไม้ขนาดลดหลั่นกันก็ได้ มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 400 kg/m^3 ถึง 900 kg/m^3

2. แผ่นขึ้นไม้อัดชั้นเดียว หมายถึง แผ่นขึ้นไม้อัดที่ทำจากชิ้นไม้ที่มีลักษณะและขนาดเหมือนกัน มีส่วนผสมของกาวและสารเติมแต่ง (Additive) อย่างเดียวกัน ตลอดความหนาของแผ่นขึ้นไม้อัด

3. แผ่นขึ้นไม้อัดสามชั้น หมายถึง แผ่นขึ้นไม้อัดที่แบ่งตามลักษณะของชิ้น ไม้ออกเป็นสามชั้นตลอดความหนาของแผ่นขึ้นไม้อัด ในแต่ละชั้นประกอบด้วยชิ้นไม้ที่มีลักษณะและขนาด ตลอดจน

ส่วนผสมของกาวเหมือนกัน ปกติใช้ชิ้นไม้ขนาดเล็กและบางเป็นชั้นผิวหน้าและหลัง ส่วนชั้นไส้ใช้ชิ้นไม้หยาบและใหญ่กว่า ไม้ที่ใช้ทำชั้นไส้ อาจเป็นชนิดที่ต่างกันกับที่ใช้ทำชั้นผิวหน้าและหลังก็ได้ ปริมาณกาวที่ใช้ผสมในชั้นผิวทั้ง 2 หน้า มักมีมากกว่าในชั้นไส้ เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่สมดุลกัน มีผิวแข็งและแน่นขึ้น

4. แผ่นชิ้นไม้อัดหลายชั้น หมายถึงแผ่นชิ้นไม้อัดที่มีลักษณะตามข้อ 3 แต่มีจำนวนชั้นมากกว่า 3 ชั้น

1) แผ่นชิ้นไม้อัดขนาดลดหลั่น (Graduated Particleboard) หมายถึง แผ่นชิ้นไม้อัดที่ทำจากชิ้นไม้ที่มีขนาดและลักษณะต่างกัน โดยโครงสร้างของแผ่นประกอบด้วยชิ้นไม้ขนาดใหญ่และหยาบกว่าอยู่ตรงแนวกลางแผ่นตลอดความหนา จากแนวกลางแผ่น ชิ้นไม้จะมีขนาดลดหลั่นเล็กลงไปหาผิวทั้งสองด้าน โดยไม่มีการแบ่งชั้นแน่นอน

2) ชิ้นไม้ หมายถึง ชิ้นหรือส่วนของเนื้อไม้ หรือวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่ถูกย่อยด้วยเครื่องจักร ชิ้นไม้ อาจมีลักษณะต่างๆ ใดๆ อย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

3) เก็ด็ด (Flake) หมายถึง ชิ้นไม้บางๆ มีทิศทางของเส้นใยไม้ขนานกับผิว ได้จากการใช้ใบมีดตัดขนานกับแนวของเส้นใยไม้ แต่ทำมุมกับแนวแกนของเส้นใย

4) เก็ด็ดใหญ่ (Wafer) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับเก็ด็ด แต่มีความกว้างและความหนามากกว่า

5) แถบ (Strand) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับเก็ด็ด แต่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้างและมีความหนาสม่ำเสมอตลอดความยาวของแถบ

6) ชีบ (Planer Shaving) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นขนาดเล็ก มีความหนาไม่เท่ากัน คือหนาที่ปลายด้านหนึ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะบางและมีลักษณะเป็นแฉกขนนก และมักจะโค้งงอด้วย ซึ่งได้จากการไสไม้ด้วยเครื่องไสไม้ชนิดหัวตัดหมุน (Rotary Cutter Head)

7) แท่ง (Splinter or Sliver) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมเมื่อมองทางหน้าตัด และมีความยาวตามแนวเส้นใย ไม่น้อยกว่า 4 เท่าของความหนา

8) เม็ด (Granule) หมายถึง ชิ้นไม้ที่มีลักษณะคล้ายขี้เลื่อย ซึ่งมีความกว้าง ความยาว และความหนาเกือบเท่ากัน

9) ลักษณะอื่นๆ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ทำแผ่นชิ้นไม้อัด

5. ไม้บาง (Veneer) หมายถึง แผ่นเนื้อไม้บางๆ ที่ได้จากการลอกหรือฝาน

6. วัสดุลิกโนเซลลูโลส หมายถึง วัสดุที่มีเซลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้และพืชต่างๆ ได้แก่ ชานอ้อย ป่าน ปอ เป็นต้น

7. กาว หมายถึง สารอินทรีย์ที่ใช้ติดชิ้นไม้ในแผ่นชิ้นไม้อัด โดยปกติเป็นกาวเรซินสังเคราะห์

8. สารแต่งเติม หมายถึง สารที่ใช้เติมในการทำแผ่นชิ้นไม้อัด เพื่อให้มีสมบัติพิเศษขึ้น ซึ่งรวมทั้งสารรักษาเนื้อไม้ด้วย

2.5.3 แบบชั้นคุณภาพ

1. แผ่นชิ้นไม้อัด แบ่งตาม โครงสร้าง ออกเป็น 4 แบบ คือ

- 1) แผ่นชิ้นไม้อัดชั้นเดียว
- 2) แผ่นชิ้นไม้อัดสามชั้น
- 3) แผ่นชิ้นไม้อัดหลายชั้น
- 4) แผ่นชิ้นไม้อัดขนาดลดหลั่น

2. แผ่นชิ้นไม้อัด แต่ละแบบ แบ่งตามปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ ออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

- 1) ชั้นคุณภาพ 1 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ ไม่มากกว่า 8 mg/100 g
- 2) ชั้นคุณภาพ 1 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ มากกว่า 8 mg/100 g ถึง 30 mg/100 g

2.5.4 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

1. ความกว้างและความยาว ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5 mm

2. ความหนา ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก แต่ต้องไม่น้อยกว่า 3 mm และไม่เกิน 50 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 3 mm

3. ความแตกต่างของเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้น จะมีได้ไม่เกิน 0.25% ของเส้นสั้น

4. ความตรงของขอบแต่ละด้านจะคลาดเคลื่อนไปจากแนวตรงได้ไม่เกิน 3.0 mm

2.5.5 ส่วนประกอบและการทำ

1. ส่วนประกอบ

- 1) ชิ้นไม้ หรือวัสดุคลิกโนเซลลูโลสสำหรับทำแผ่นชิ้นไม้อัด
- 2) กาว

2. การทำ

1) ย่อยวัสดุที่จะทำเป็นแผ่นชิ้นไม้ตามลักษณะต้องการ แล้วอบจนได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยเครื่องอบ แยกชิ้นไม้ออกเป็นขนาดต่างๆ ตามต้องการ แล้วนำไปคลุกกับกาวตามอัตราส่วนที่เหมาะสมด้วยเครื่องจักร โดยผสมสารเติมแต่งลงไปด้วยก็ได้ และต้องควบคุมให้ปริมาณความชื้นของชิ้นไม้ หลังจากผสมกาวและสารเติมแต่งแล้ว อยู่ในระดับที่เหมาะสม นำชิ้นไม้ไปทำ

แผ่นขึ้น ไม้ (Particle Mat) ด้วยเครื่องทำแผ่น แล้วนำแผ่นขึ้น ไม้อัดด้วยเครื่องอัดร้อนในแนวราบทั้งนี้ ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิแรงอัดและระยะเวลาอัดร้อน

2) ในกรณีที่เป็นแผ่นขึ้น ไม้อัดสามชั้น ต้องทำให้เกิดโครงสร้างที่สมดุล หากเป็นแผ่นขึ้น ไม้อัดชั้นเดียวต้องโรยชั้น ไม้ที่มีขนาดแตกต่างกันให้ละกันอย่างสม่ำเสมอ

2.5.6 คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ลักษณะทั่วไป

แผ่นขึ้น ไม้อัดต้องมีความเรียบสม่ำเสมอกันตลอดทั้งแผ่น ขอบต้องตั้งได้ฉากกับระนาบผิวการทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

2. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 400 kg/m^3 ถึง 900 kg/m^3 และความหนาแน่นของแผ่นขึ้น ไม้อัดแต่ละแผ่นจะคลาดเคลื่อนจากค่าความหนาแน่นเฉลี่ยได้ไม่เกิน 10%

3. ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ปริมาณความชื้นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 4% ถึง 13%

4. ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

1) แผ่นขึ้น ไม้อัดชั้นคุณภาพ 1

ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ ไม่มากกว่า 8 mg/100 g

2) แผ่นขึ้น ไม้อัดชั้นคุณภาพ 2

ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ มากกว่า 8 mg/100 g ถึง 30 mg/100 g

2.5.7 เครื่องหมายและฉลาก

1. ที่แผ่นขึ้น ไม้อัดทุกแผ่น อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ ให้เห็นได้ง่ายชัดเจน

1) ชื่อผลิตภัณฑ์ตามชื่อมาตรฐาน

2) แบบ และ ชั้นคุณภาพ

3) ขนาด (ความกว้าง × ความยาว × ความหนา) เป็น mm

4) ชื่อความหรือรหัสแสดงเดือน ปีที่ทำ หรือรุ่นที่ทำ

5) ชื่อผู้ทำหรือ โรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2.5.8 การทดสอบ

1. การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างแต่ละแผ่น เป็นชิ้นทดสอบตามภาพที่ 2.4 ดังนี้

- 1) ชิ้นทดสอบ D_1 ถึง D_6 ขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ จำนวน 6 ชิ้น สำหรับทดสอบความหนาแน่นและความชื้น
- 2) ชิ้นทดสอบ Q_1 ถึง Q_8 ขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ จำนวน 8 ชิ้น สำหรับทดสอบการพองตัวตามความหนา
- 3) ชิ้นทดสอบ B_1 ถึง B_{12} ขนาด $50 \text{ mm} \times L \text{ mm}$ จำนวน 12 ชิ้น สำหรับทดสอบความต้านแรงค้ำ และมอดูลัสยืดหยุ่น
 $L = 15$ เท่าของความหนาระบุของชิ้นทดสอบ (ไม่น้อยกว่า $150 \text{ mm} + 50 \text{ mm}$)
- 4) ชิ้นทดสอบ I_1 ถึง I_8 ขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ จำนวน 8 ชิ้น สำหรับทดสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า
- 5) ชิ้นทดสอบ S_1 ถึง S_8 ขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ จำนวน 8 ชิ้น สำหรับทดสอบความยืดหยุ่นของผิวหน้า
- 6) ชิ้นทดสอบ W_1 ถึง W_8 ขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ จำนวน 8 ชิ้น สำหรับทดสอบความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว

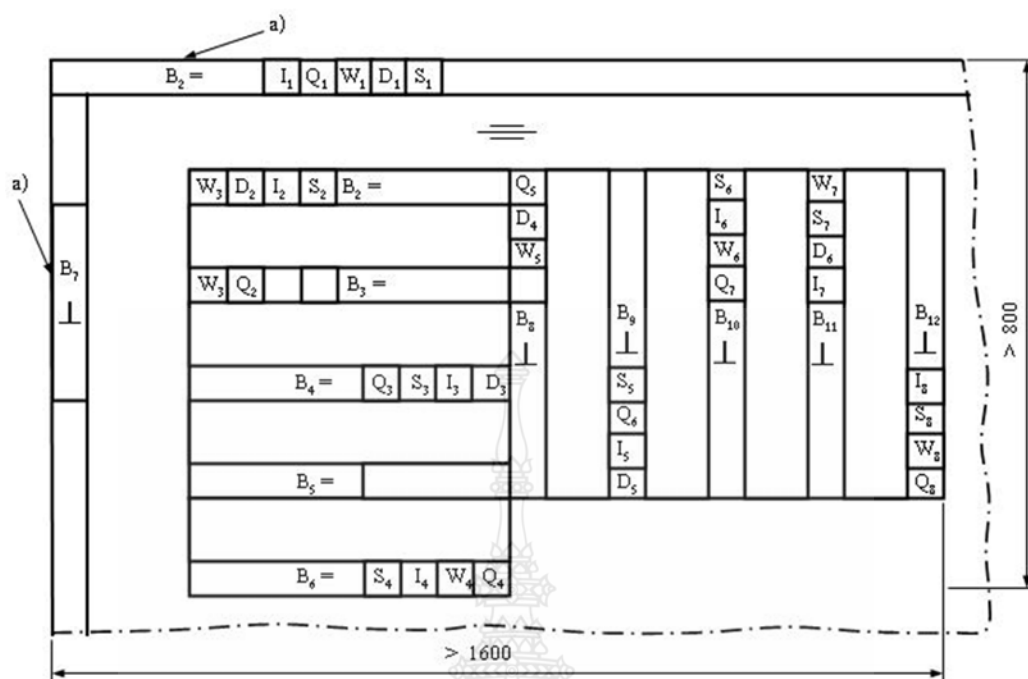
2. การปรับภาวะชิ้นทดสอบ

ให้นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบการพองตัวตามความหนา ความต้านแรงค้ำ มอดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความยืดหยุ่นของผิวหน้า ละความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว ไปปรับภาวะที่อุณหภูมิ $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $(65 \pm 5) \%$ จนมีมวลคงที่ คือ มวลของชิ้นทดสอบที่ชั่ง 2 ครั้ง ห่างกัน 24 h ต่างกันไม่เกิน 0.1% แล้วทดสอบทันทีที่พ้นจากการปรับภาวะ ส่วนชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบความหนาแน่น และปริมาณความชื้นไม่ต้องปรับภาวะ

3. ขนาด

1) ความกว้างและความยาว

ใช้สายวัดโลหะที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm วัดที่จุดลึกเข้าไปจากขอบของแผ่นชิ้นไม้อัดประมาณ 100 mm ดังภาพที่ 2.5



≡ หมายถึง ทิศทางของแนวแกนด้านยาวของชิ้นทดสอบขนานกับทิศทางของเครื่อง

⊥ หมายถึง ทิศทางแนวแกนด้านยาวของชิ้นทดสอบตั้งฉากกับทิศทางของเครื่อง

a) หมายถึง ขอบด้านนอก

ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งและการตัดชิ้นทดสอบ [7]

2) ความหนา

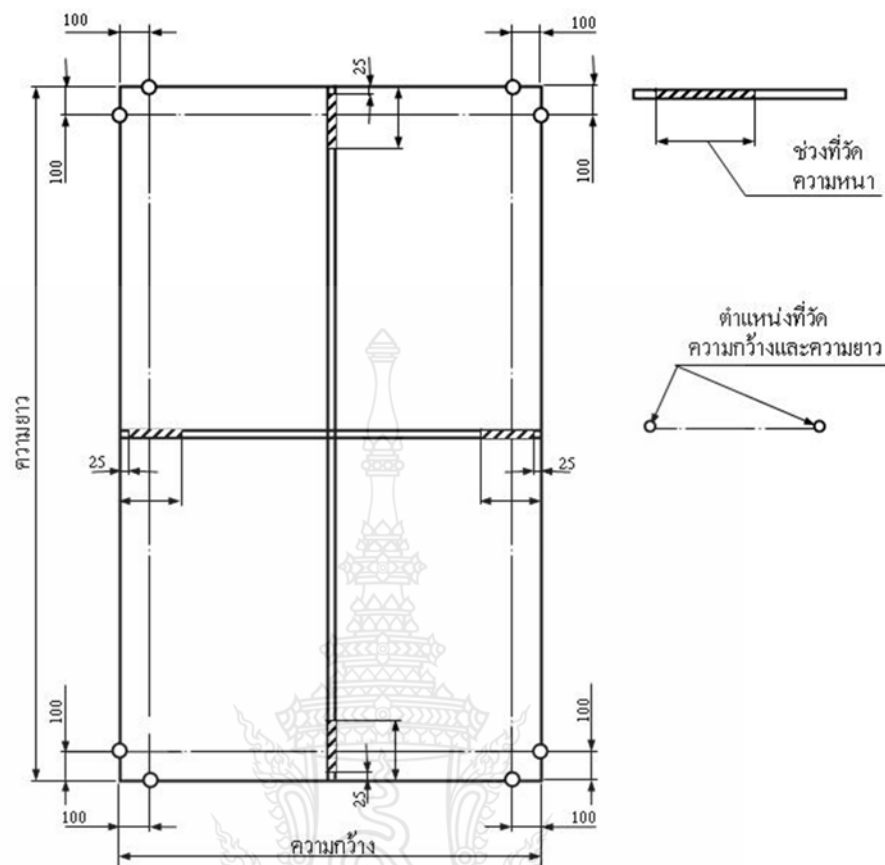
ใช้ไมโครมิเตอร์หรือเครื่องมือวัดความหนาที่เทียบเท่า ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm ซึ่งมีส่วนของเป็นวัดเรียบและขนานกัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ถึง 20 mm ให้วัดที่บริเวณกึ่งกลางของขอบของแผ่นชิ้นไม้อัดทั้ง 4 ด้าน และลึกเข้าไปจากขอบประมาณ 25 mm ถึง 200 mm ดังภาพที่ 2.5

3) ความแตกต่างของเส้นทแยงมุม

ใช้สายวัดตามข้อ 2.5.8 วัดหาความแตกต่างของเส้นทแยงมุม

4) ความตรงของขอบ

วัดเส้นด้ายให้ตึงระหว่างมุมที่ขอบเดียวกันของแผ่นชิ้นไม้อัด แล้ววัดระยะที่คลาดเคลื่อนจากแนวเส้นด้ายมากที่สุดของขอบทั้ง 4 ด้าน



ภาพที่ 2.5 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนา [7]

4. ความหนาแน่น

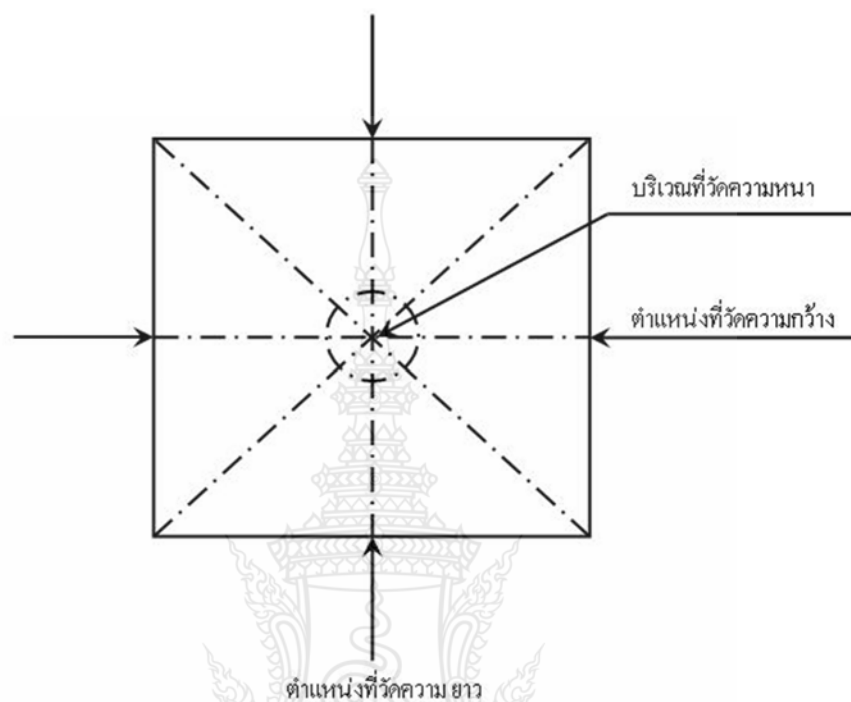
1) เครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่ง ที่ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 g
- (2) ไมโครมิเตอร์หรือเครื่องมือวัดความหนาที่เทียบเท่า ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm ซึ่งมี ส่วนของเป็นวัดเรียบและขนานกัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ถึง 20 mm
- (3) แคลิเปอร์แบบเลื่อน (Sliding Caliper) หรือเครื่องมือวัดอื่นที่เทียบเท่า อ่านได้ละเอียด ถึง 0.1 mm

2) วิธีทดสอบ

- (1) ชั่งชิ้นทดสอบให้ได้มวลที่แน่นอนถึง 0.01 g
- (2) ใช้เครื่องมือตามข้อ 2.5.8 วัดความหนาตรงจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ตามภาพที่ 2.6

(3) ใช้เครื่องมือตามข้อ 2.5.8 วัดความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบ ตามภาพที่ 2.6 โดยวางเครื่องมือให้ทำมุมกับแนวระนาบของชิ้นทดสอบ ประมาณ 45° ตามภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.6 ตำแหน่งที่วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ [7]

3) วิธีการคำนวณ

หาค่าความหนาแน่นจากสูตร

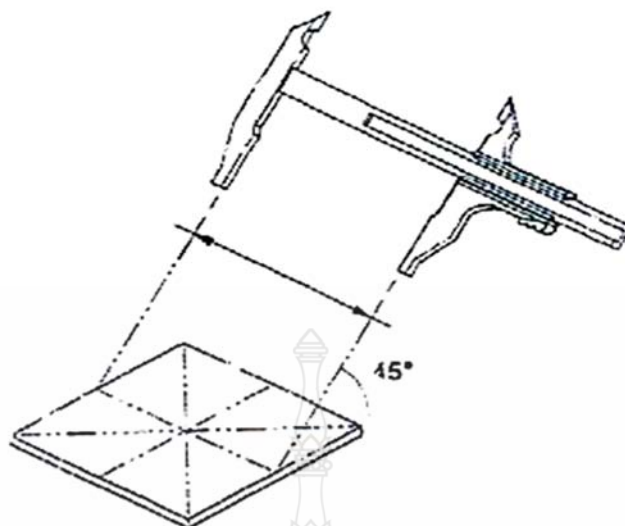
$$\text{ความหนาแน่น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} = \frac{m}{V} \times 10^6 \quad (2.41)$$

เมื่อ m คือ มวลของชิ้นทดสอบ เป็น g

V คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ เป็น mm^3

4) การรายงานผล

รายงานผลค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นเฉลี่ย



ภาพที่ 2.7 วิธีวัดความกว้าง ความยาวของชิ้นทดสอบ [7]

5. ปริมาณความชื้น

1) เครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่ง ที่ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 g
- (2) ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$
- (3) เชชเคเตอร์

2) วิธีทดสอบ

(1) ชั่งชิ้นทดสอบซึ่งผ่านการทดสอบตามข้อ 2.5.9 แล้วให้ได้มวลที่แน่นอนถึง 0.01 g เป็นมวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ

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

(3) นำมาใส่ในเชชเคเตอร์ปล่อยให้ไว้ให้เย็น

(4) ชั่งชิ้นทดสอบ เป็นมวลของชิ้นทดสอบหลังอบแห้ง

3) วิธีการคำนวณ

หาค่าปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.42)$$

เมื่อ m_1 คือ มวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ เป็น g
 m_2 คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบแห้ง เป็น g

4) การรายงานผล

รายงานค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้น

6. ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

1) การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตัดตัวอย่างเป็นชิ้นทดสอบกว้าง 25 mm ยาว 25 mm ให้ได้มวลประมาณ 500 g

2) วิธีทดสอบ

ให้ปฏิบัติตาม BS EN 120

7. การพองตัวตามความหนา

1) เครื่องมือ

ไมโครมิเตอร์หรือเครื่องมือวัดความหนาที่เทียบเท่า ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm ซึ่งมีส่วนของแป้นวัดเรียบและขนานกัน และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm ถึง 20 mm

2) วิธีทดสอบ

(1) ทำเครื่องหมายตำแหน่งที่วัดความหนาตามภาพที่ 2.6 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ เป็นความหนาก่อนแช่น้ำ

(2) แช่ชิ้นทดสอบในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ โดยตั้งชิ้นทดสอบให้ได้ฉากกับระดับผิวน้ำ ให้ขอบบนอยู่ใต้ผิวน้ำประมาณ 25 mm แต่ชิ้นต้องห่างจากกัน และต้องห่างจากผนังและก้นภาชนะที่ใส่อย่างน้อย 10 mm

(3) เมื่อแช่ชิ้นทดสอบครบ 1 h แล้ว ระบายชิ้นทดสอบขึ้นมาซับน้ำที่ผิวออกให้หมดด้วยผ้าหมาด แล้วปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้อง โดยวางให้ขอบใดด้านหนึ่งอยู่บนแผ่นวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ เช่น พลาสติก กระดาษ

(4) ปล่อยให้ชิ้นทดสอบไว้อีก 1 h แล้วนำชิ้นทดสอบขึ้นมาวัดความหนาตามตำแหน่งเดิม เป็นความหนาหลังแช่น้ำ

3) วิธีคำนวณ

หาค่าการพองตัวตามความหนา

$$\text{จากสูตรการพองตัวตามความหนา ร้อยละ} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2.43)$$

เมื่อ t_1 คือ ความหนาของชั้นทดสอบก่อนแช่น้ำ เป็น mm
 t_2 คือ ความหนาของชั้นทดสอบหลังแช่น้ำ เป็น mm

4) การรายงานผล

รายงานค่าเฉลี่ยของการพองตัวตามความหนา เป็น ร้อยละ

8. ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

1) เครื่องมือ

(1) เครื่องดึง ซึ่งสามารถใช้แรงดึงเพื่อแยกชั้นทดสอบออกในเวลาไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s

(2) แผ่นดึงซึ่งทำด้วยไม้หรือโลหะที่เหมาะสม ขนาดไม่น้อยกว่า 50 mm × 50 mm ความหนาตามความเหมาะสม

2) วิธีทดสอบ

(1) ติดผิวหน้าทั้งสองของชั้นทดสอบกับแผ่นดึง โดยใช้กาวสังเคราะห์ที่ให้แรงยึดระหว่างชั้นทดสอบกับแผ่นดึงได้มากกว่าแรงยึดตัวในชั้นทดสอบ

(2) นำชั้นทดสอบที่เตรียมไว้แล้วนี้ไปเข้าเครื่องดึง ดึงชั้นทดสอบแยกออกจากกัน ซึ่งปกติจะแยกในชั้นไส้ อัตราการเพิ่มแรงดึงต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เวลาตั้งแต่เริ่มใช้ดึง จนกระทั่งชั้นทดสอบแยกออกจากกันต้องไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s (ความเร็วในการดึงประมาณ 2 mm/min)

3) วิธีการคำนวณ

หาค่าแรงต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าจากสูตร

$$\text{ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเมกะพาสคัล} = \frac{F}{W \times L} \quad (2.46)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงสูงสุด เป็น N

W คือ ความกว้างของชั้นทดสอบ เป็น mm

L คือ ความยาวของชั้นทดสอบ เป็น mm

4) การรายงานผล

รายงานค่าเฉลี่ยของค่าต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

9. ความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว

1) เครื่องมือ

(1) เครื่องดึง ซึ่งสามารถใช้แรงดึงเพื่อถอนตะปูเกลียวออกจากชิ้นทดสอบในเวลาไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s

(2) ตะปูเกลียว ชนิดหัวจมแบบผ่าที่เป็นไปตาม มอก. 499 ขนาดระบุ ความยาว 40 mm หรือที่มีขนาดใกล้เคียง

2) วิธีทดสอบ

(1) ชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นให้ทดสอบ 3 แห่ง คือ ที่กึ่งกลางผิวหน้า 1 แห่ง และที่กึ่งกลางของขอบ 2 ขอบที่ประชิดกัน

(2) ขันตะปูเกลียวลงในชิ้นทดสอบ ซึ่งได้เจาะรูนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ลึก 6 mm ไว้ แล้วขันตะปูเกลียวจนกระทั่งส่วนเกลียวที่สมบูรณ์จมลึกลงไปถึง 13 mm ไม่นับความยาวส่วนปลายเรียวของตะปูเกลียว

(3) นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ไปเข้าเครื่องดึง ดึงให้ตะปูเกลียวถอนออกจากชิ้นทดสอบ แรงที่ใช้ดึงจะต้องอยู่ในแนวเดียวกับตะปูเกลียว และตั้งฉากกับผิวหน้าหรือผิวขอบของชิ้นทดสอบ อัตราการเพิ่มแรงดึงต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มดึงจนกระทั่งตะปูเกลียวถอนออกจากชิ้นทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s (ความเร็วในการดึงประมาณ 2 mm/min)

3) การรายงานผล

รายงานค่าเฉลี่ยของความยืดหยุ่นของตะปูเกลียว

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prommas et al. [8] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุแพคเกจขึ้นน้อย ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้สายพานลำเลียงต่อเนื่อง จากการทดลองพบว่า พลังงานความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์ในการระเหยความชื้นภายในแพคเกจวัสดุพูนจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่ามากพลังงานความร้อนที่ใช้จึงมีค่ามาก ส่วนและเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียที่ไหลเข้าและทางออกก็จะแปรเปลี่ยนไปกับชนิดของแพคเกจที่ใช้ในการอบแห้งเช่นกัน

Jindarat et al. [9] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุแพคเกจขึ้นน้อยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้สายพานลำเลียงต่อเนื่อง เพื่อหารูปแบบในการให้ความร้อนและวิเคราะห์ถึงการสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุพูน อุณหภูมิของลมร้อน และตำแหน่งการเปิดของแมกนีตรอน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนช่วยให้วัสดุได้รับความร้อนทั่วทั้งปริมาตร ลดระยะเวลาในการอบแห้ง และประหยัดพลังงาน

Prommas et al. [10] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้น โดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ลมร้อน ทางเข้าก่อนการอบแห้ง และทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ในการอบแห้งแพคเกจวัสดุพูน F-C และ C-F และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี ของกระบวนการอบแห้ง ผลจากการวิเคราะห์พลังงาน และเอ็กเซอร์จี ช่วงแรกของการอบแห้งนั้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีมีค่าต่ำเนื่องจากการสูญเสีย และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้นประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีเอ็กเซอร์จีสูญเสียมาก โดยที่ประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์จีจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพพลังงาน

Jindarat et al. [11] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้น โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}) และไมโครเวฟใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz สำหรับวัสดุพูนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดเป็นองค์ประกอบของเม็ดแก้ว น้ำและโพรงอากาศ ซึ่งตัวอย่างวัสดุทดสอบที่ใช้มี 2 ลักษณะ คือ แพคเกจขึ้นเดียวที่ใช้เม็ดแก้วขนาดเดียวกันหมด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm แพคเกจมีความลึก 50 mm (F Bed) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 mm แพคเกจมีความลึก 50 mm

(C Bed) แพคเกจสองชั้นที่ใช้เม็ดแก้ว 2 ขนาดไว้ด้วยกันแต่อยู่คนละชั้น โดยแพคเกจ F-C Bed อนุภาคขนาดเล็กอยู่ด้านบนของอนุภาคขนาดใหญ่ และแพคเกจ C-F Bed อนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านบนของอนุภาคขนาดเล็ก ผลจากการทดลองพบว่า ขนาดของอนุภาคของวัสดุพูนที่ต่างกัน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับการทะลุทะลวงผ่านและการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟในวัสดุพูน และพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันฟิลลารีสูงทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่

Vongpradubchai et al. [12] งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้นโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมร่วมกับการพาความร้อน (โหมด TE_{10} ความถี่ 2.45 GHz) สำหรับวัสดุพูนหลายชั้นที่ใช้ในการศึกษาคือ เม็ดแก้วผสมกับน้ำและอากาศ โดยมีการศึกษาอิทธิพลของขนาดเม็ดแก้วและความหนาแต่ละชั้นภายในวัสดุพูนที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในวัสดุพูนแบบไม่อิมมิดิว พบว่าขนาดของอนุภาคภายในวัสดุพูน มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

Suwannapum et al. [13] งานวิจัยนี้นำเสนอวัตกรรมการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง (โครงสร้างภายในระบบ ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ขนาด 800W จำนวน 8 ตัว ติดตั้งกระจายภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 0.45×0.90 m และมีความยาวอุโมงค์ 3 m สำหรับระบบสายพานลำเลียงซึ่งงานจากบริเวณที่ใส่ชิ้นงานเข้าสู่อุโมงค์ด้วยความเร็ว 0 - 0.4 m/s โดยมีระบบป้องกันการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟไม่ให้เกินค่ามาตรฐานของ DHHS ที่ 5 mW/cm^2) โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ และการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ผลจากการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

Vongpradubchai et al. [14] ศึกษาเชิงการทดลองการอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ภายใต้ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz (โหมด TE_{10}) พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ กำลังคลื่นไมโครเวฟ (50, 100 W) อุณหภูมิของลมร้อน (40, 60°C) และความหนาของชิ้นไม้ (50, 80 mm) ที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในชิ้นไม้ ความชื้นของชิ้นไม้และการดูดซับกำลังไมโครเวฟของชิ้นไม้ ผลจากการทดลองในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งชิ้นไม้สามารถดูดซับกำลังไมโครเวฟได้ดีเนื่องจากชิ้นไม้ยังมีความชื้นสูง ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในชิ้นไม้สูงตามไปด้วย และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น การดูดซับ

กำลังไมโครเวฟจะมีค่าลดลง เนื่องจากชิ้นไม้มีความชื้นลดลง จึงทำให้อุณหภูมิภายในของชิ้นไม้มีค่าลดลง

Ekasilp et al. [15] ศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยใช้กระบวนการสเปาเต็ดเบคร่วมกับไมโครเวฟ (Microwave Spouted Bed) ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นและได้คุณภาพดีขึ้น และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยี (Exergy) ของกระบวนการอบแห้งโดยใช้สเปาเต็ดเบคร่วมกับไมโครเวฟ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ให้ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุชีวภาพอัตราการไหลของอากาศและพลังงานจากไมโครเวฟมีค่าคงที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพพลังงาน

Doongam et al. [16] งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณของกำมะถันต่างกันทั้งหมด 4 สูตร โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}) ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 GHz สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 – 1500 W โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ กำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาของชิ้นงาน ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงาน ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและการเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติภายในชิ้นงานทดสอบที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกัน (สูตรต่างกัน) รวมถึงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ที่มีความหนามากๆ และการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถเพิ่มการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าวิธีทั่วไป

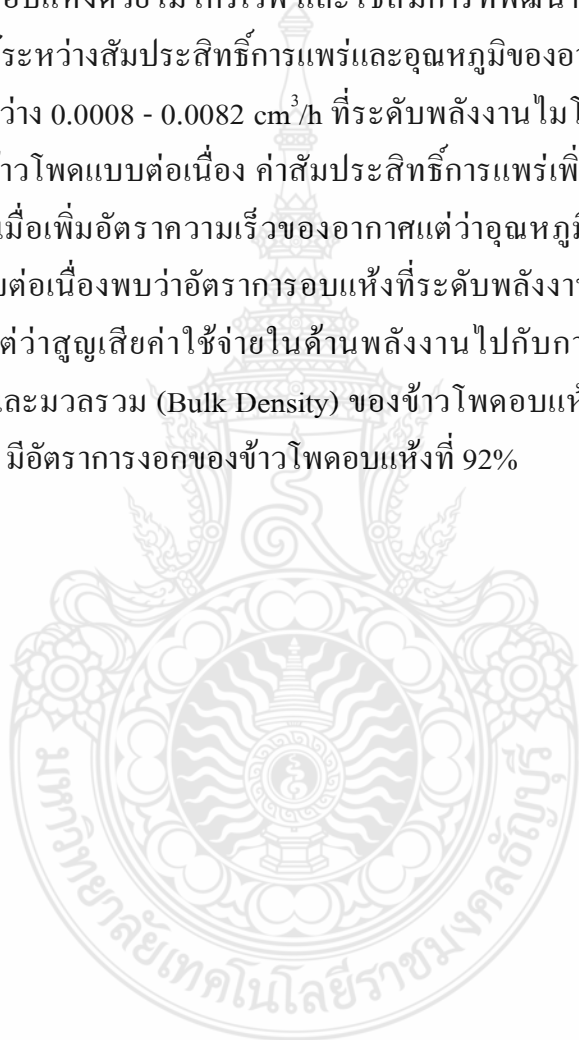
Ratanadecho et al. [17] ศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริกหรือชิ้นงานทดสอบชนิดต่างๆ โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษาก็คือผลของความเร็วของสายพานลำเลียง เวลาที่ใช้ในการรับคลื่นไมโครเวฟ ขนาดของวัสดุทดสอบ กำลังของแมกนีตรอน (800 W/1 แมกนีตรอน) และทิศทางการจ่ายคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนที่มีต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ ยางพารา เซรามิกส์และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ผลจากการศึกษาพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้นสามารถช่วยประหยัดพลังงาน ลดระยะเวลาในการอบชิ้นงาน ชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันทั้งปริมาตร และการกระจายของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

Adu Benjamin et al. [18] ทำการศึกษาโดยใช้ไมโครเวฟอบแห้งถั่วเหลืองเพื่อศึกษาผลของความร้อน และการถ่ายเทมวล เพื่อแสดงถึงพื้นฐานความแตกต่างระหว่างไมโครเวฟและระบบการพาความร้อน ได้สร้างสมการที่อธิบายถึงลักษณะปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลที่เกิดจากผลของการเพิ่ม หรือลดของสนามไฟฟ้าที่มีต้นกำเนิดมาจากไมโครเวฟ การถ่ายเทมวลและความร้อนของการอบแห้งที่อยู่ในช่วง 0.28 - 0.44 W/g ซึ่งพบว่าให้ค่าคงที่ของอุณหภูมิและค่าคงที่การดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งตามลำดับ ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำถูกต้อง การให้พลังงานไมโครเวฟ เพื่อกระตุ้นการคายความชื้นพบว่าเพิ่มสูงขึ้นกว่า 30% ถ้าต่ำกว่านั้นเหมือนกับใช้วิธีการพาความร้อน สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาและปรับปรุงสมการ การแปรเพื่อทำนายคุณสมบัติการแปรและการถ่ายเทมวลของของแข็งที่มีรูปทรงกลมและแสดงถึงการคายความร้อนที่เกิดจากการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ และจะได้แบบจำลองการให้ความร้อน โดยไมโครเวฟที่ให้ผลการทำนายคุณลักษณะทางความร้อนของถั่วได้อย่างดี

T.N. Tulasidas et al. [19] ศึกษาการอบแห้งองุ่นโดยการ ใช้ความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้เตาอบไมโครเวฟชนิด 2,450 MHz อบแห้งองุ่นเพื่อทำลูกเกด พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เตาไมโครเวฟในระบบการอบแห้งแบบใหม่ ซึ่งใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดแบบพิเศษ และส่วนประกอบที่สามารถควบคุมระดับพลังงานได้ทุกระดับ และพบว่าเมื่อมีการจุ่มองุ่นตามวิธีการผลิตลูกเกดในอุตสาหกรรม การอบแห้งด้วยไมโครเวฟไม่เพียงแต่รวดเร็วเท่านั้นยังต้องการพลังงานต่ำอีกด้วย ลูกเกดที่ได้มีคุณภาพที่ดีสีไม่เข้มเนื่องจากไม่มีการรมควันของสารซัลไฟด์ดังนั้น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีความเป็นไปได้ในการลดปริมาณสารเคมีและพลังงานที่ใช้ในการคงสภาพผลิตภัณฑ์อาหาร การหดตัวและความหนาแน่นขององุ่นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้น

H.Feng et al. [20] ทำการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับการอบแห้งแอปเปิ้ลจำนวน 3 พันธุ์ (Red Delicious, Golden และ Granny Smith) โดยใช้เทคนิควิธีการที่รวมเอาไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบคเข้ามาช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอของการเกิดความร้อน ทำการทดสอบอบแห้งแอปเปิ้ลแบบลูกเต๋าจากความชื้นเริ่มต้นที่ 24% (มาตรฐานเปียก) จนกระทั่งความสุกท้ายที่ 5% (มาตรฐานเปียก) โดยใช้อุณหภูมิความร้อนที่ 70°C และระดับพลังงานไมโครเวฟที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0 – 6.1 W/g พบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีการพัฒนาคุณภาพสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงด้านสีค่าและอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนปกติหรือแบบสเปาเต็ดเบคธรรมดาสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 80% เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบคแบบไม่ใช้ไมโครเวฟร่วมด้วย

Shivhare Uma Shanker et al. [21] ศึกษาการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งข้าวโพดเพื่อวิเคราะห์ระดับความชื้นเริ่มต้น การดูดซับพลัง อุณหภูมิ และความเร็วเบื้องต้นของอากาศ โดยการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมในช่วงที่เส้นโค้งของการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพด แบบจำลองการแพร่ของความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพด เพื่อใช้อธิบายกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ และใช้สมการที่พัฒนาโดย Arrhenius เพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิของอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง $0.0008 - 0.0082 \text{ cm}^2/\text{h}$ ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟคงที่ เมื่อนำไปใช้สำหรับการอบแห้งข้าวโพดแบบต่อเนื่อง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นไปด้วยกับระดับพลังงาน และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วของอากาศแต่ว่าอุณหภูมิขาเข้าคงที่ เมื่อนำมาใช้อบแห้งข้าวโพดแบบต่อเนื่องพบว่าอัตราการอบแห้งที่ระดับพลังงานสูงทำให้ลดเวลาในการอบแห้งอย่างมาก แต่ว่าสูญเสียค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไปกับการผ่านของอากาศ ทำให้เปอร์เซ็นต์การงอก และมวลรวม (Bulk Density) ของข้าวโพดอบแห้งลดลงการใช้พลังงานที่ 0.25 W/g ได้ผลดีคือ มีอัตราการงอกของข้าวโพดอบแห้งที่ 92%



3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

3.2.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและกรณีศึกษา

3.2.3 ทำการทดลองเก็บข้อมูล และทำการปรับปรุงแก้ไข

1. ผลิตแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

2. อบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่

สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ให้กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40, 50 และ 60°C)

1) วัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

2) ถ่ายภาพทางความร้อน

3) ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัด

4. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

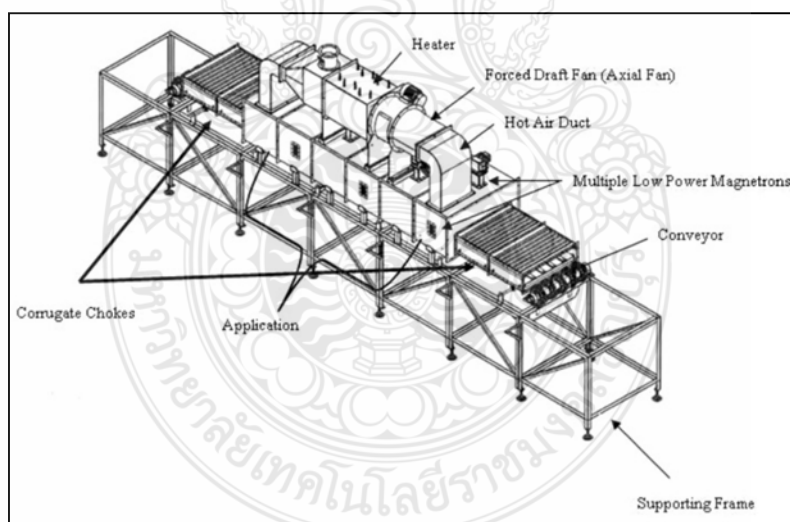
3.3.1 เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

การอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้เตาอบระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ที่ทางหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Cavity) ซึ่งภายในระบบจะติดตั้งแมกนีตรอน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ไว้จำนวน 12 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) และเครื่องกำเนิดลมร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณ 240°C (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) วัดอุณหภูมิลมร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งอยู่รอบๆบริเวณทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ (สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วสายพานได้ตามต้องการ) จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อนการปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออก ระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อ

ผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 mW/cm^2 สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถ วัดได้ที่ตำแหน่งปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง $\pm 0.5^\circ\text{C}$)



(ก) เครื่องไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง



(ข) ไดอะแกรมรายละเอียดของเตาอบระบบไมโครเวฟ

ภาพที่ 3.1 เตาอบระบบไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง [22]

3.3.2 เตาอบแบบใช้ลมร้อน (Hot Air Oven)

เตาอบแบบใช้ลมร้อน (Hot Air Oven) เป็นเตาอบโดยอาศัยหลักการพาความร้อนซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้ได้ตั้งแต่ 25 - 250°C (ภาควิชาวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)



ภาพที่ 3.2 เตาอบแบบใช้ลมร้อน (Hot Air Oven)

3.3.3 เครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์, Network Analyzer)

เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์ (Network Analyzer) (PüSCHNER, GMBH+CO KG, GERMANY) ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ ค่าการส่งผ่านของวัสดุที่มีความซับซ้อน วัดได้ทั้งวัสดุที่สถานะของแข็ง กึ่งของแข็ง และของเหลว โดยอาศัยหลักการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะแสดงค่าได้หลายฟังก์ชัน เช่น การดูดซับพลังงานไมโครเวฟ Loss Factor เป็นต้น การทำงานจะอาศัยซอฟต์แวร์ควบคุมการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ สัมประสิทธิ์การสะท้อนคลื่นที่ซับซ้อนภายในวัสดุทดสอบ เมื่อเก็บข้อมูลจากสัญญาณของความถี่และเปลี่ยนแปลงเป็นค่าการส่งผ่านและค่าไดอิเล็กตริกผลที่ได้จากการวัดแสดงได้ทั้งกราฟและข้อมูลเชิงตัวเลข (ศูนย์วิจัย R.C.M.E. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต)

ขั้นตอนในการวัดถูกออกแบบให้ใช้ได้สะดวก และวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุได้หลากหลาย การวัดเพียงกดปุ่มให้เครื่องทำงาน การวัดก็จะเริ่มขึ้น โดยอาศัยหลักการสะท้อนของ

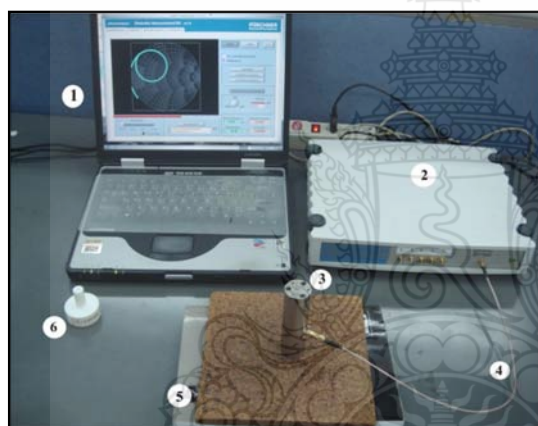
คลื่น ซึ่งจะมีความยืดหยุ่น ความรวดเร็วและความถูกต้อง การวัดค่าไดอิเล็กตริกนี้จะถูกควบคุมโดยซอฟต์แวร์ที่ถูกสอบเทียบความแม่นยำ ซึ่งสามารถวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุได้หลากหลายชนิด

1. วัสดุที่ใช้วัด

- 1) ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก
- 2) วัสดุสมมาตรตลอดทั้งชิ้น
- 3) วัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน

2. ขนาดของชิ้นงาน

- 1) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 6.5 cm
- 2) มีความหนามากกว่า 1 cm



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

ภาพที่ 3.3 เครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์ (Network Analyzer)

3.3.4 กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Infrared Camera)

กล้องถ่ายภาพความร้อนหรือกล้องอินฟราเรด (Infrared Camera) (FLIR SYSTEMS AB, SE-18211, SWEDEN) ใช้สำหรับถ่ายภาพความร้อน ซึ่งกล้องถ่ายภาพความร้อน สามารถใช้ในการตรวจจับความร้อนภายในชิ้นงานหรือวัสดุทดสอบ เพื่อนำมาวิเคราะห์การเกิดความร้อนภายในวัสดุ (ศูนย์วิจัย R.C.M.E. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต)



ภาพที่ 3.4 กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Infrared Camera)

3.3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (JEOL, JSM-6510, Ser.No. MP13110020, JAPAN) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจโครงสร้างกายภาพของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ซึ่งมีความละเอียดสูง ภาพโครงสร้างที่ได้จึงง่ายต่อการวิเคราะห์ (ภาควิสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)



ภาพที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.3.5 เครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

เครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (TESTOMETRIC, MICO-500, ENGLAND) เป็นเครื่องทดสอบความแข็งแรงของแผ่นชิ้นไม้อัด ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าแรงดึงในแนวตั้งฉาก (Internal Bond) (กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้)

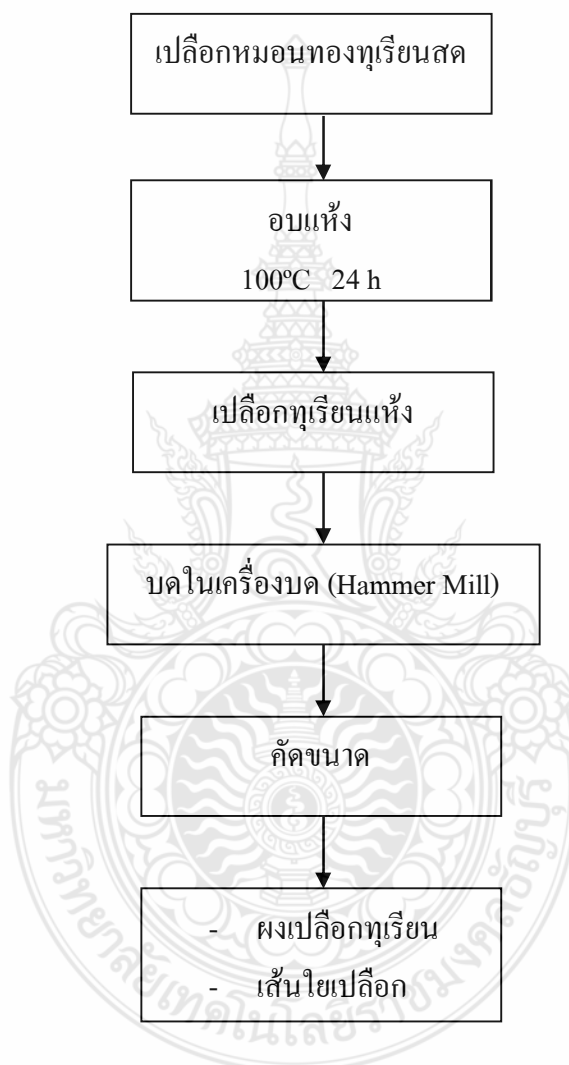


ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ผลิตแผ่นซีเมนต์อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

1. กระบวนการเตรียมวัตถุดิบผงเปลือกทุเรียนหมอนทองและเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง

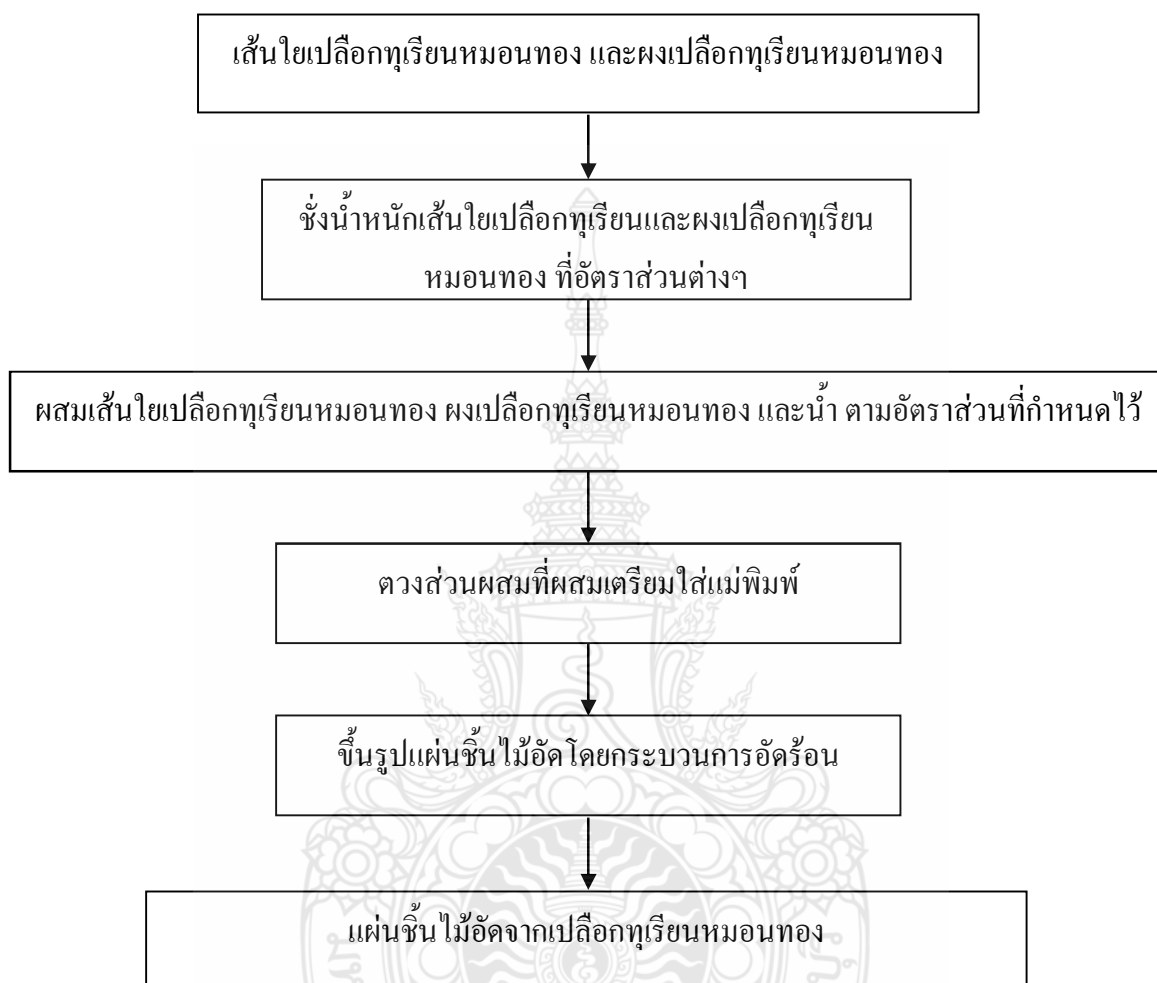


ภาพที่ 3.7 แผนผังกระบวนการเตรียมวัตถุดิบผงเปลือกทุเรียนหมอนทอง และเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง [23]



ภาพที่ 3.8 กระบวนการเตรียมผงเปลือกทุเรียนและเส้นใยเปลือกทุเรียนหมอนทอง [23]

2. การขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดที่ใช้เปลือกทุเรียนหมอนทอง



ภาพที่ 3.9 แผนผังกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง [23]



ภาพที่ 3.10 กระบวนการผลิตแผ่นซีเมนต์อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง [23]

3.4.2 ออบแห้งแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

การอบแห้งแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ทำการวัดความชื้นเริ่มต้นและทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกก่อนการทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ โดยมีการวัดอุณหภูมิที่ผิวภายนอก ชั่งน้ำหนัก และวัดความชื้นสุดท้ายคงเหลือของแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง จากนั้นนำแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ทดลองเสร็จแล้ว ไปทำการตรวจสอบคุณภาพ ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อน ซึ่งแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้อบนั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 - 40% (Dry Basis) และมีอุณหภูมิ 25°C

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณี 1 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 40°C แผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมโดยมวลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด (20 cm × 20 cm × 1 cm)

กรณี 2 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 50°C แผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมโดยมวลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด (20 cm × 20 cm × 1 cm)

กรณี 3 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 60°C แผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมโดยมวลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด (20 cm × 20 cm × 1 cm)

3.4.3 ศึกษาลักษณะภาพถ่ายทางความร้อน (Infrared Thermography) ของแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

การถ่ายภาพทางความร้อนของแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองเพื่อทำการวิเคราะห์การเกิดความร้อนภายในแผ่นชี้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง เมื่อทำการทดลองอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและ

สายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ในรอบแรกของการอบแห้ง (เวลาประมาณ 10 min) นำแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน และถ่ายภาพทางความร้อนในรอบสุดท้ายของการอบแห้ง (ความชื้นแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองเหลือประมาณ 6 - 7%) จัดเก็บบันทึกภาพ นำภาพถ่ายมาวิเคราะห์ผล



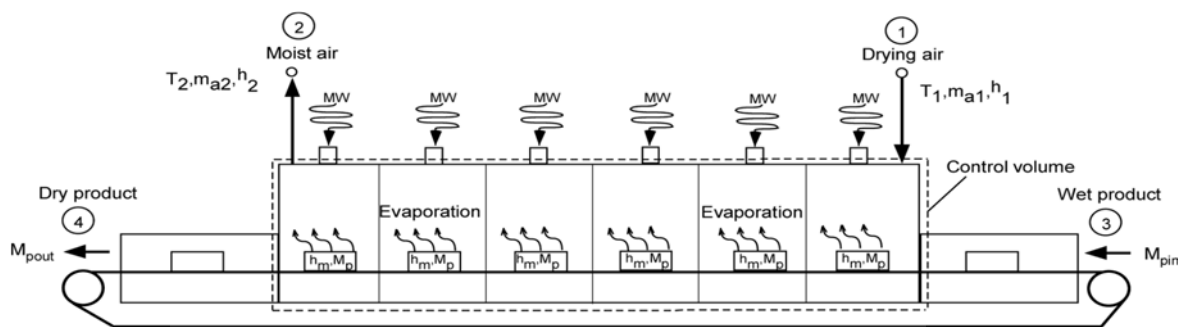
ภาพที่ 3.11 การถ่ายภาพทางความร้อน

3.4.4 การสมดุล มวล พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

จากกฎการอนุรักษ์มวลของปริมาณควบคุมตามภาพที่ 3.12 ทำการสมดุลมวลเมื่อ \dot{m}_{g1} ที่จุด 1 และ \dot{m}_{g2} ที่จุด 2 เป็นอัตราการไหลเข้าและออก \dot{m}_s เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด X_1 และ X_2 เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกจะได้สมการสมดุลมวลของกระบวนการอบแห้งดังนี้

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = m_{g1} - m_{g2} \quad (3.1)$$

$$W_d \frac{dM_p}{dt} = m_a(X_1 - X_2) \quad (3.2)$$



ภาพที่ 3.12 กระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตร ร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง [11]

$$m_w = m_a (X_1 - X_2) \tag{3.3}$$

- เมื่อ W_d คือ มวลของวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด, (kg)
- \dot{m}_a คือ อัตราการไหลของอากาศแห้ง, (kg/s)
- $X_{1,2}$ คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ, (kg water/kg dry air)
- \dot{m}_w คือ อัตราการไหลของน้ำออกจากวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด, (kg water/s)

สำหรับการวิเคราะห์การสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบควบคุม เกิดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากมีการพาความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด ทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดและความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม สมการสมดุลพลังงานเขียนได้ดังนี้

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} + E_{st} = \Delta E_{system} \tag{3.4}$$

ในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดเมื่อมีการพาความร้อนและพลังงานไมโครเวฟจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยความสัมพันธ์สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\frac{W_d (h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_a (h_1 - h_2) + \dot{Q}_{MW} - \dot{Q}_{loss} \tag{3.5}$$

เมื่อ	W_d	คือ มวลของวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด, (kg)
	h_m	คือ เอนทาลปีของวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด, (kJ/kg)
	t	คือ เวลา, (s)
	\dot{Q}_{evap}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการระเหยของน้ำ, (kJ/s)
	\dot{m}_a	คือ อัตราการไหลของอากาศแห้ง, (kg/s)
	h	คือ เอนทาลปีของอากาศแห้ง, (kJ/kg)
	\dot{Q}_{MW}	คือ พลังงานไมโครเวฟ, (kW)
	\dot{Q}_{loss}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม, (kJ/s)

3.4.5 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process) [24]

การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นการประเมินจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง พิจารณาจากการป้อนพลังงาน ในการอบแห้งที่อุณหภูมิลมป้อน 40, 50 และ 60°C ความเร็วลม 0.5 m/s กำลังไมโครเวฟ 2400 W การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) หาได้จากสมการดังนี้

$$SEC = \frac{\text{Total electrical power supplied in drying}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kW - hr}{kg} \right] \quad (3.6)$$

$$SEC = \frac{P_{total}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.7)$$

เมื่อ P_{total} คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

$$P_{total} = P_{mg} + P_{heater} + P_{exfan} + P_{blfan} + P_{cofan} + P_{con} \quad [kW \times 3600s] \quad (3.8)$$

เมื่อ P_{mg} คือ พลังงานไฟฟ้าจำหน่ายในแมกนีตรอน

P_{heater} คือ พลังงานไฟฟ้าเครื่องทำความร้อน

P_{exfan} คือ พลังงานไฟฟ้าพัดลมดูดอากาศ

P_{blfan} คือ พลังงานไฟฟ้าพัดลมเป่าลม

P_{cofan} คือ พลังงานไฟฟ้าพัดลมระบายความร้อน

P_{con} คือ พลังงานไฟฟ้าระบบสายพานลำเลียง

การหาประสิทธิภาพพลังงาน ของกระบวนการอบแห้งสามารถหาได้จากสมการ 3.9

$$\eta_e = \frac{W_d [h_{fg} (M_{p1} - M_{p2}) + c_m (T_{m2} - T_{m1})]}{m_{da} (h_1 - h_0) \Delta t + \Delta t \dot{Q}_{MW}} \quad (3.9)$$

เมื่อ c_m คือ ค่าความร้อนจำเพาะของแผ่นชิ้นไม้อัด, (kJ/kg K)

M_p คือ ปริมาณความชื้นของแผ่นชิ้นไม้อัด, (kg water/kg solid)

3.4.6 ศึกษาโครงสร้างระดับอิเล็กทรอนิกส์ (Scanning Electron Microscopy, SEM) ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองแห้งอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1. การเตรียมตัวอย่างสำหรับส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

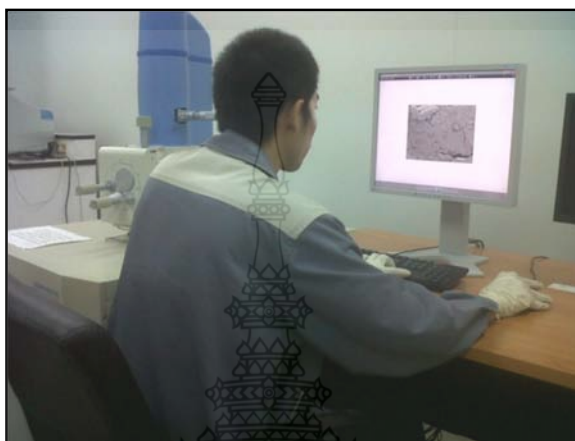
ตัดแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองให้มีขนาด (10 mm × 10 mm) เท่า Stub ติดแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยกาวหรือเทปสองหน้าตามความเหมาะสม ทำความสะอาดฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วยลูกโป่งยาง แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยเครื่อง Sputter coater



ภาพที่ 3.13 การเตรียมแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองสำหรับส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2. การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

นำ Stub ที่ติดแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่เคลือบผิวด้วยทอง เข้าเครื่องส่อง SEM ปรับกำลังขยาย 30, 100, 500, 1000 และ 1500 เท่า ตามลำดับ บันทึกภาพที่แสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ จัดเก็บบันทึกภาพ นำภาพมาวิเคราะห์ผล



ภาพที่ 3.14 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4.7 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

1) ความหนาแน่น (Density)

การทดสอบปฏิบัติตามข้อ 4 ในบทที่ 2 หน้า 33

2) ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

การทดสอบปฏิบัติตามข้อ 5 ในบทที่ 2 หน้า 35

3) การพองตัวตามความหนา (Thickness Swelling)

การทดสอบปฏิบัติตามข้อ 7 ในบทที่ 2 หน้า 36

2. ศึกษาสมบัติทางกล

การทดสอบแรงดึงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (Internal Bond Strength Test, IB)

การทดสอบปฏิบัติตามข้อ 9 ในบทที่ 2 หน้า 40

3. ศึกษาสมบัติทางความร้อน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity, K)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานของการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ที่มีผลต่อวัสดุอบแห้ง ดังนั้นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งคือ คุณสมบัติของวัสดุอบแห้ง ความชื้น อุณหภูมิ และเวลา

การอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ทำการวัดความชื้นเริ่มต้นและทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกก่อนการทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ โดยมีการวัดอุณหภูมิที่ผิวภายนอก ชั่งน้ำหนัก และวัดความชื้นสุดท้ายของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง จากนั้นนำแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ทดลองเสร็จแล้วไปทำการตรวจสอบคุณภาพ ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อน ซึ่งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้อบนั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 - 40% (Dry Basis) และมีอุณหภูมิ 25°C (ความชื้นสุดท้ายประมาณ 6 - 7% Dry Basis)

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณี 1 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 40°C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมโดยมวลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด (20 cm × 20 cm × 1 cm)

กรณี 2 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 50°C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมโดยมวลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด (20 cm × 20 cm × 1 cm)

กรณี 3 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 W/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 60°C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมโดยมวลออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด (20 cm × 20 cm × 1 cm)

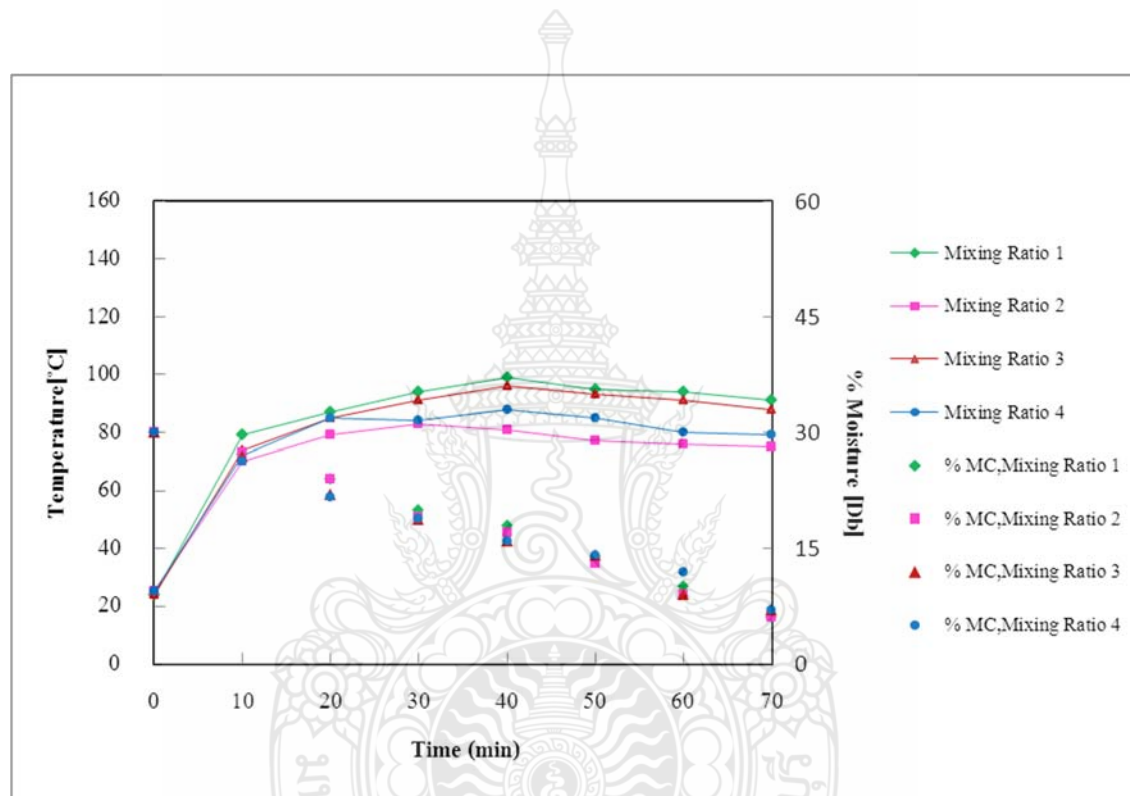
4.1 ผลการทดลองการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ชุดที่	แผ่นขึ้นไม้อัด	ก่อนอบแห้ง			หลังอบแห้ง		
		ค่า Dielectric constant (ϵ_r')	ค่า Dielectric loss factor (ϵ_r'')	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan\delta$)	ค่า Dielectric constant (ϵ_r')	ค่า Dielectric loss factor (ϵ_r'')	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan\delta$)
1	1:1:1	2.18862	0.345547	0.157533942	1.90439	0.177017	0.091730295
	1:1:1.5	2.14632	0.379913	0.176934528	1.39721	0.149143	0.106762260
	2:1:1.5	2.25451	0.446069	0.197688973	1.50868	0.153686	0.101922313
	2:1:2	2.31650	0.443787	0.191471577	1.56934	0.158107	0.100776590
2	1:1:1	2.37493	0.525012	0.220931119	1.47808	0.149881	0.101408071
	1:1:1.5	2.39608	0.539043	0.224797550	1.46129	0.144333	0.098767882
	2:1:1.5	2.23818	0.455578	0.203464611	1.45320	0.148527	0.102228164
	2:1:2	2.48531	0.306049	0.162227395	1.45208	0.146113	0.100649968
3	1:1:1	2.59829	0.610489	0.234860799	1.46776	0.145119	0.098867097
	1:1:1.5	2.18999	0.419730	0.191616784	1.41330	0.140657	0.099526315
	2:1:1.5	2.72758	0.677368	0.255083833	1.62878	0.154793	0.095073949
	2:1:2	2.53574	0.422795	0.189115917	1.46175	0.144434	0.098820191

ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่า ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดก่อนอบมีค่าสูง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดแผ่นนั้นมีความชื้นและมีความชื้นมาก และเมื่อทำการอบด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟพบว่า ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าลดลง น้ำหนักลดลงและความชื้นก็ลดลงตามไปด้วย โดยแผ่นขึ้นไม้อัดที่ผลิตด้วยสูตร 4 อัตราส่วนผสมของเส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อ ผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำที่อัตราส่วน 2:1:2 ของแต่ละชุดจะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่สูง เนื่องมาจากมีส่วนผสมของน้ำสูงสุด

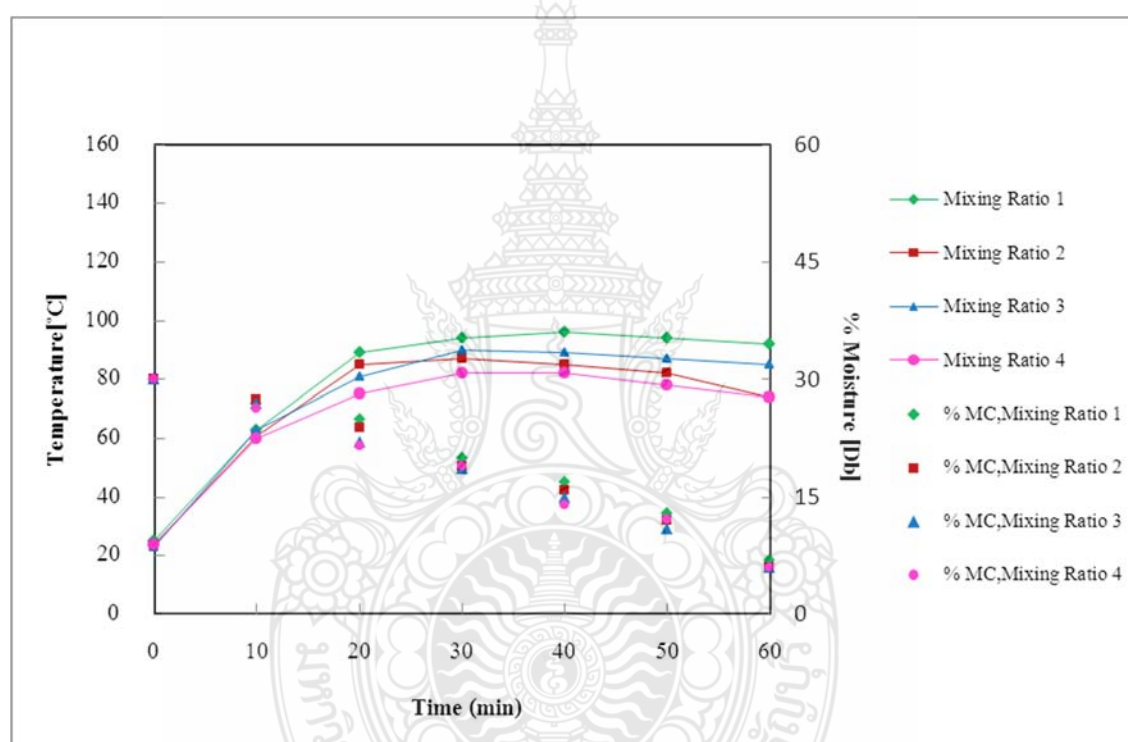
ผลจากการวิเคราะห์ค่าความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิต่างกันมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยความชื้นจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การอบแห้งแต่ละครั้งใช้แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง 4 สูตร ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 - 40% (Dry Basis) จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 6 - 7% (Dry Basis) ในช่วงแรกประมาณ 0 -15 นาทีแรก นั้นความชื้นในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความชื้นภายในมีมากเมื่อพิจารณา



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40°C

จากภาพที่ 4.1 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40°C พบว่าช่วงแรกอุณหภูมิแผ่นขึ้นไม้อัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นและค่า (Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$)) สูง ทำให้แผ่นขึ้นไม้อัดดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นขึ้นไม้อัด (Q) สูงตามไปด้วย (ดังในสมการที่ 2.40) ในช่วงเวลาต่อมา อุณหภูมิของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าค่อยๆ ลดต่ำลงเพราะความชื้นภายในวัสดุได้เคลื่อนตัวออกไป เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี

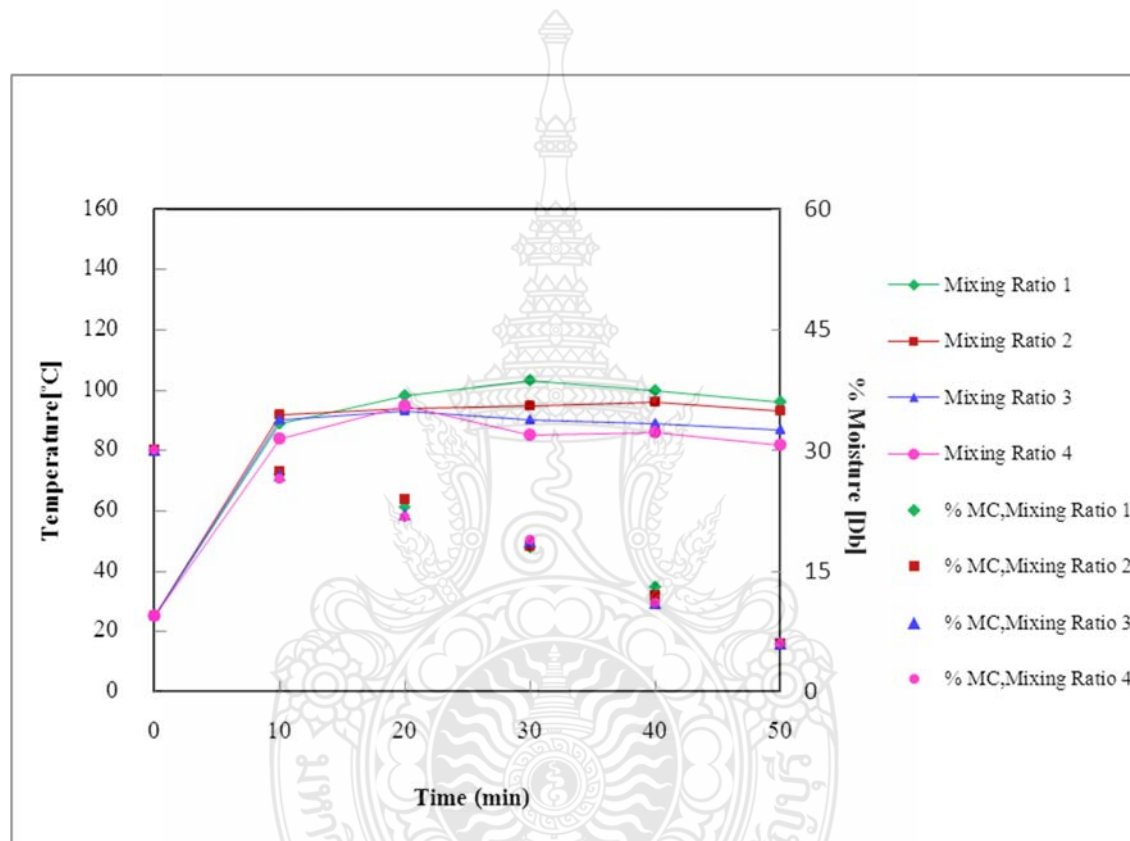
(Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าสูงแต่เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็น อิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่ บริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดสูง [25] และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด พบว่า ภายในบริเวณกึ่งกลางจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านนอกอันเนื่องมาจากอิทธิพลการกระจายของความชื้น ภายในแผ่นขึ้นไม้อัด



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิ ลมร้อน 50°C

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา แสดงในภาพที่ 4.2 การอบแห้งโดยมี กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50°C แสดง พบว่าในช่วงเริ่มต้น แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือก ทุเรียนหมอนทองมีการดูดซับกำลังไมโครเวฟที่ดีหลังจากนั้นการดูดซับลดลงอันเนื่องมาจากใน ช่วงแรกแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นมาก จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูงความร้อนจึงสูง ตามไปด้วย และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นของแผ่นขึ้นไม้อัดลดลงทำให้การดูดซับพลังงานลดลง ค่า

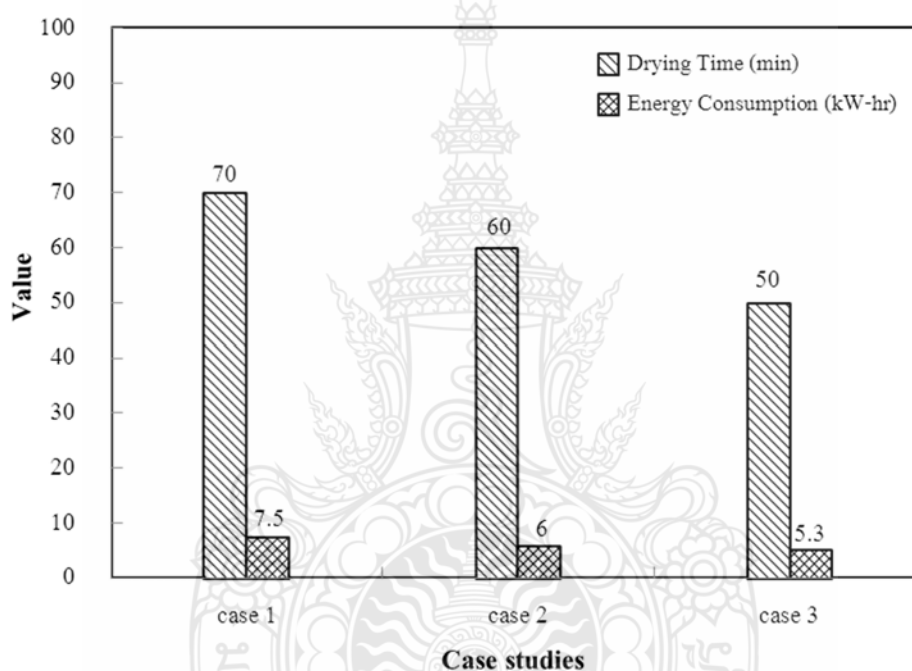
อุณหภูมิจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 40°C พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากแผ่นชิ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น โดยแผ่นชิ้นไม้อัดที่ผลิตด้วยสูตร 1 อัตราส่วนผสมของเส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วน 1:1:1 มีอุณหภูมิสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นที่ผลิตจากสูตรอื่นเนื่องจากแผ่นที่ผลิตจากสูตร 1 มีความหนาแน่นต่ำที่สุดและมีปริมาณเส้นใยที่ต่ำที่สุด ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 60°C

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา แสดงในภาพที่ 4.3 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 60°C แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของแผ่นชิ้นไม้อัดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น แผ่นชิ้นไม้อัดมีการดูดซับกำลังไมโครเวฟลดลง แต่ความร้อนสะสมในแผ่นชิ้นไม้อัดยังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าสูงอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี

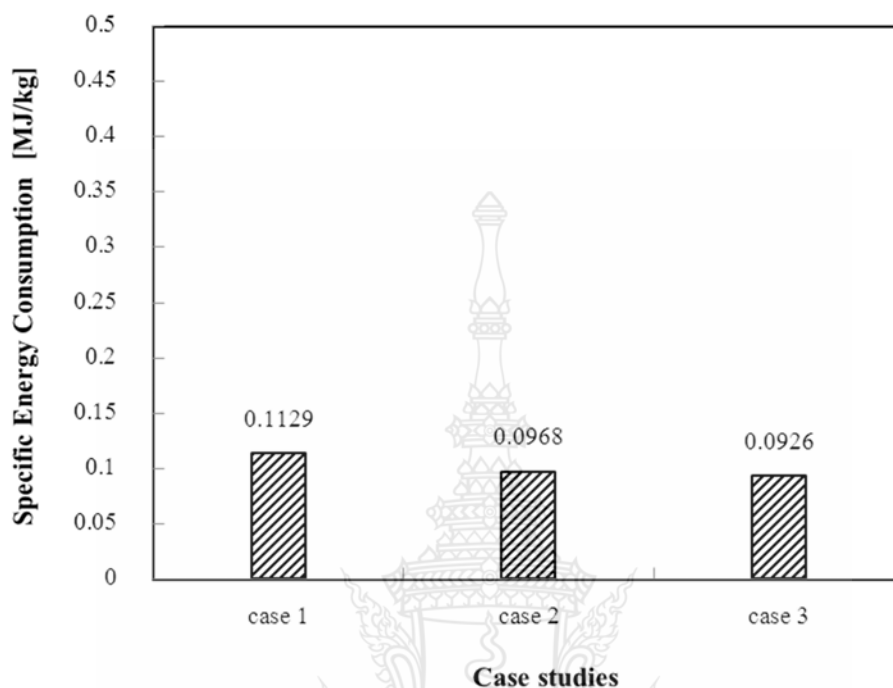
ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40°C และ 50°C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากแผ่นชิ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของแผ่นชิ้นไม้อัด พบว่าแผ่นชิ้นไม้อัดที่ผลิตด้วยสูตร 1 อัตราส่วนผสมของเส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อ ผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วน 1:1:1 มีอุณหภูมิสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นที่ผลิตจากสูตรอื่นเนื่องจากแผ่นที่ผลิตจากสูตร 1 มีปริมาณเส้นใยที่ต่ำที่สุด ดังนั้นวัสดุพอร์นแบบคาพิลลารี (Capillary Porous Media) ความชื้นภายในจะเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพรุนได้ดี และเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี



ภาพที่ 4.4 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้ง

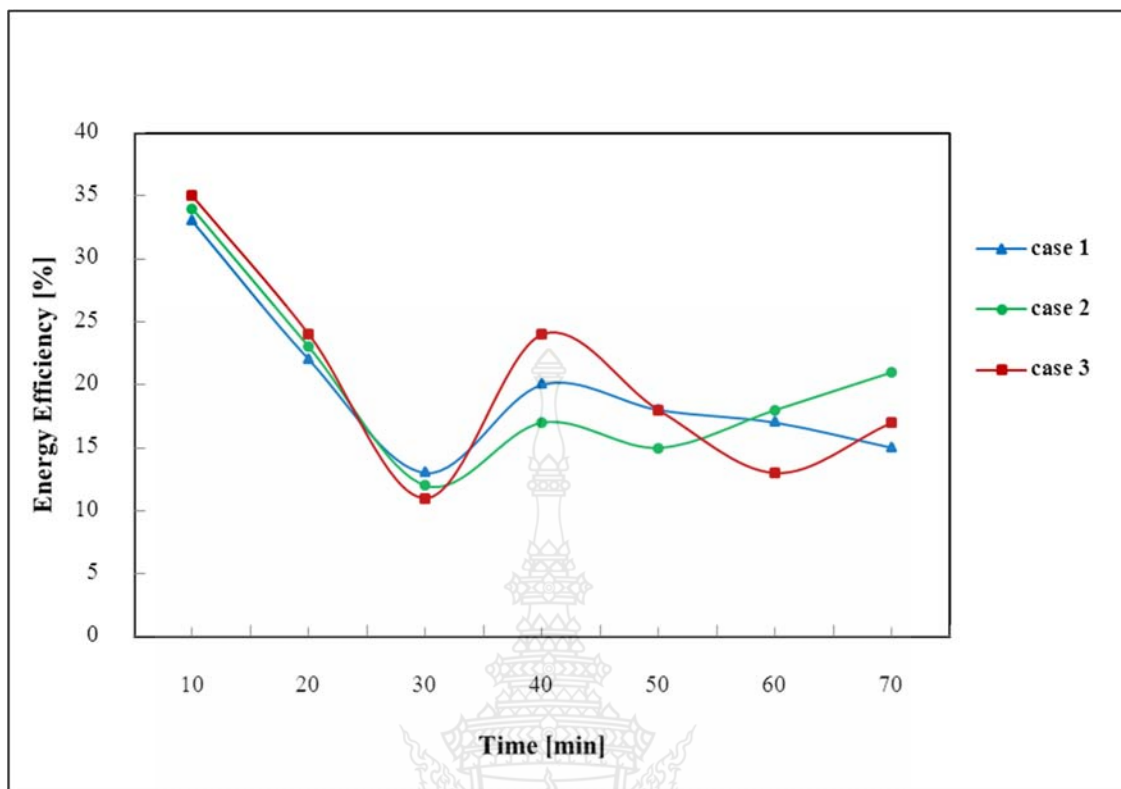
ภาพที่ 4.4 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง กรณี 1 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 7.5 kW/h กรณี 2 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 6 kW/h กรณี 3 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 5.3 kW/h โดยในกรณี 3 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60°C การใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่ากรณี 1 และกรณี 2 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 และ 50°C ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนช่วยเพิ่ม

ความสามารถในการระเหยของน้ำในแผ่นชิ้นไม้อัดให้มากขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลงตามด้วย



ภาพที่ 4.5 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

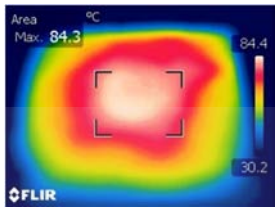
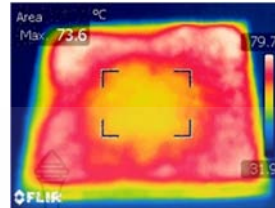
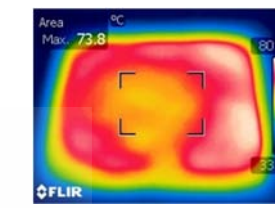
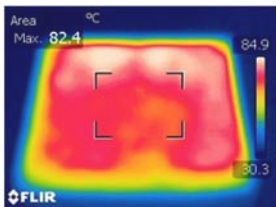
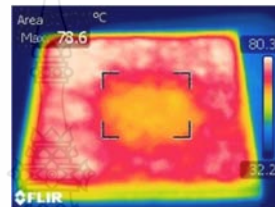
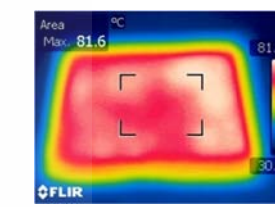
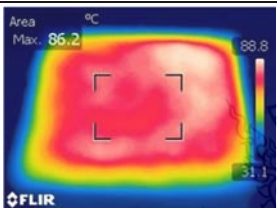
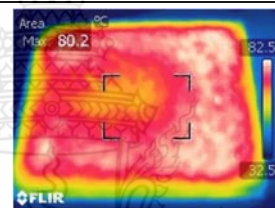
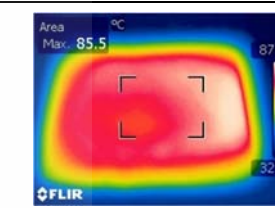
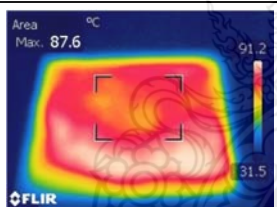
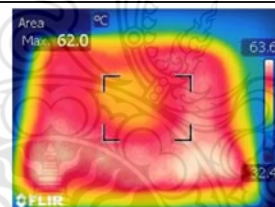
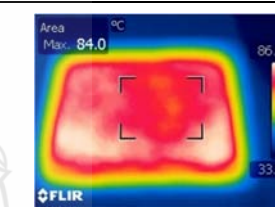
ภาพที่ 4.5 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการทดลองการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง กรณี 1 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40°C กรณี 2 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50°C กรณี 3 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60°C ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 0.1129, 0.0968 และ 0.0926 MJ/kg ตามลำดับ โดยในกรณี 3 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 0.0926 MJ/kg เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็ลดลงตามไปด้วย



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด โดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

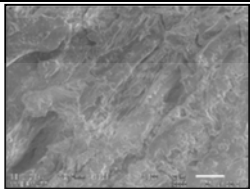
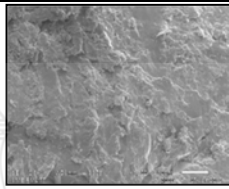
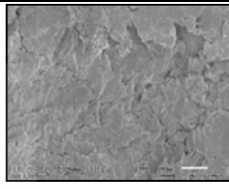
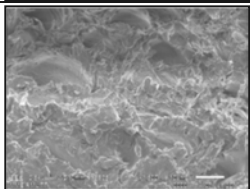
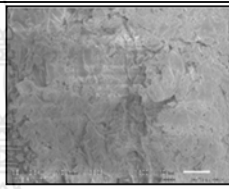
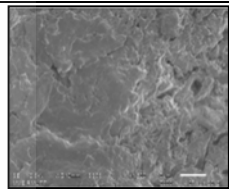
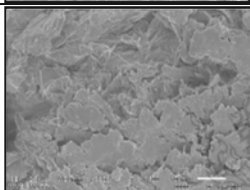
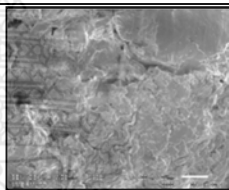
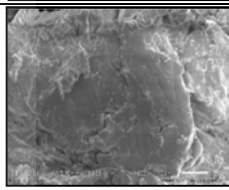
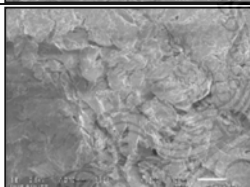
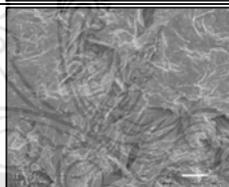
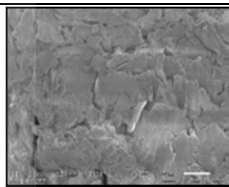
ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการในการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหอมทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง กรณี 1, 2 และ 3 พบว่าในช่วงแรก 0 - 15 นาที ประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะในช่วงแรกปริมาณความชื้นในแผ่นชิ้นไม้อัดมีอยู่มากการดูดซับคลื่นได้ในปริมาณที่สูง ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงตามไปด้วย หลังจากนั้นการจับคลื่นไ้ไปสู่ผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้ความชื้นลดลง การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ในปริมาณที่น้อยทำให้พลังงานที่นำมาใช้จึงลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดลงตามไปด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายทางความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัดที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง (10 min)

Candition	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			

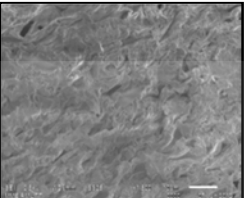
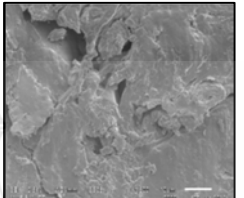
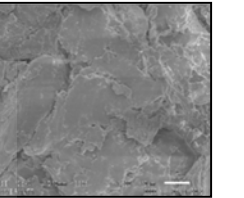
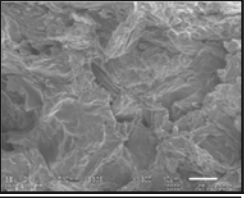
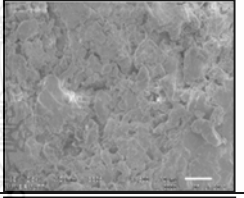
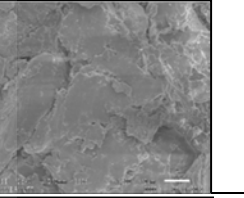
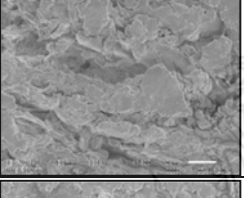
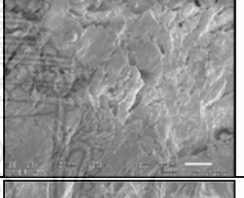
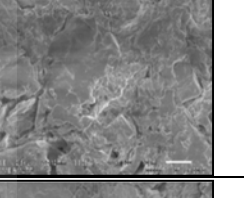
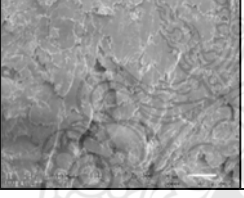
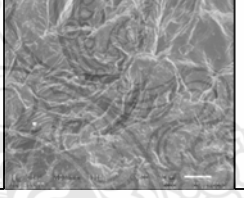
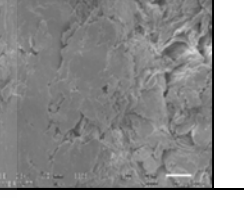
ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด พิจารณาการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแผ่นชิ้นไม้อัด พบว่าการกระจายตัวของความร้อนจะกระจายตัวจากบริเวณแกนกลางสู่บริเวณผิวแผ่นชิ้นไม้อัด ซึ่งบริเวณแกนกลางมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิบริเวณผิว เนื่องจากบริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นและค่า (Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$)) สูง ทำให้แผ่นชิ้นไม้อัดดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นชิ้นไม้อัดสูงตามไปด้วย สัมผัสได้จากการเปลี่ยนสีจากแกนกลางของแผ่นชิ้นไม้อัดที่มีสีแดง กระจายตัวออกสู่บริเวณขอบแผ่นชิ้นไม้อัด บริเวณขอบจึงมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับความชื้นและค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ต่อมาความชื้นจะเริ่มระเหยออกจากแผ่นชิ้นไม้อัดเนื่องจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี ร่วมกับอิทธิพลการกระจายตัวของไอน้ำ (Vapor Diffusion) ทำให้อุณหภูมิมียค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าไดอิเล็กตริกของแผ่นชิ้นไม้อัด

ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (บริเวณผิวแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)

Condition	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			

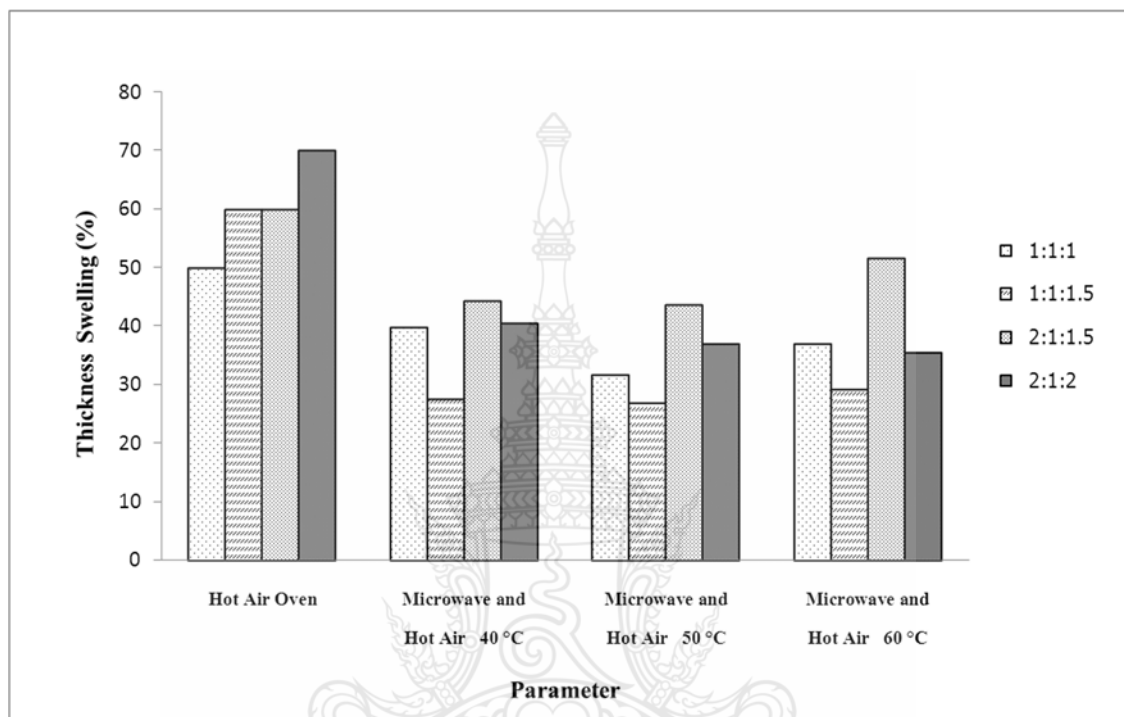
ตารางที่ 4.3 และ 4.4 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (บริเวณผิว และด้านใน) ของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ตามลำดับ โดยโครงสร้างทางกายภาพครอบคลุมในส่วนของความยาว ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปร่างผิวและความหยาบของเส้นใย พบว่าเส้นใยเปลือกทุเรียนมีความยาวประมาณ 2 - 2.5 mm มีความหยาบของเส้นใยและที่ปลายเส้นใยมีลักษณะเป็นแฉก 5 - 6 แฉก เส้นใยมีพื้นผิวขรุขระ เส้นใยทุเรียนภายในเป็นโพรงหรือช่องกลวง (Granule) ซึ่งอากาศสามารถถ่ายเทได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าในกรณี 3 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 60°C ลักษณะโครงสร้างและผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีความราบเรียบสม่ำเสมอมากกว่า กรณี 1 และ 2 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 40°C และ 50°C

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (บริเวณด้านในแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง)

Candition	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			

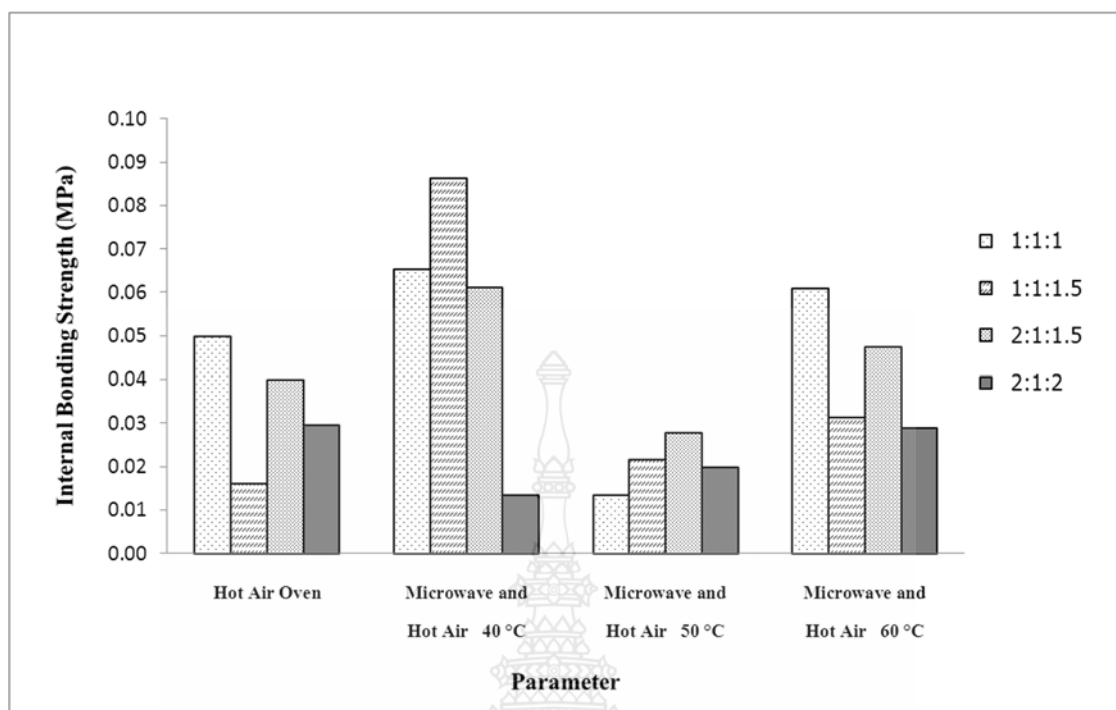
เมื่อพิจารณาความราบเรียบสม่ำเสมอของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองจากภาพถ่ายการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (บริเวณด้านใน) ในตารางที่ 4.4 พบว่ากรณี 3 ลักษณะ โครงสร้างและผิวของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบสม่ำเสมอมากกว่า กรณี 1 และ 2 เนื่องจากการให้อุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้น ($T = 60^{\circ}\text{C}$) ประกอบกับกำลังไมโครเวฟ จะส่งผ่านความร้อนโดยเริ่มจากชั้นในและกระจายความร้อนออกมาอย่างสม่ำเสมอสู่ผิวชั้นนอกอันเนื่องมาจากมีการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟมากที่บริเวณตรงกลางของแผ่นขึ้นไม้อัด ซึ่งส่งผลให้ของเหลวภายในเกิดการระเหยตัวและเกิดความดันไภายในที่สูงขึ้นทำให้เกิดการขับเคลื่อนความชื้นภายในออกมาที่ผิวแผ่นขึ้นไม้อัดอย่างรวดเร็ว [5] ทำให้การกระจายตัวของโครงสร้างในระดับจุลภาค และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในระดับที่มีความละเอียดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน



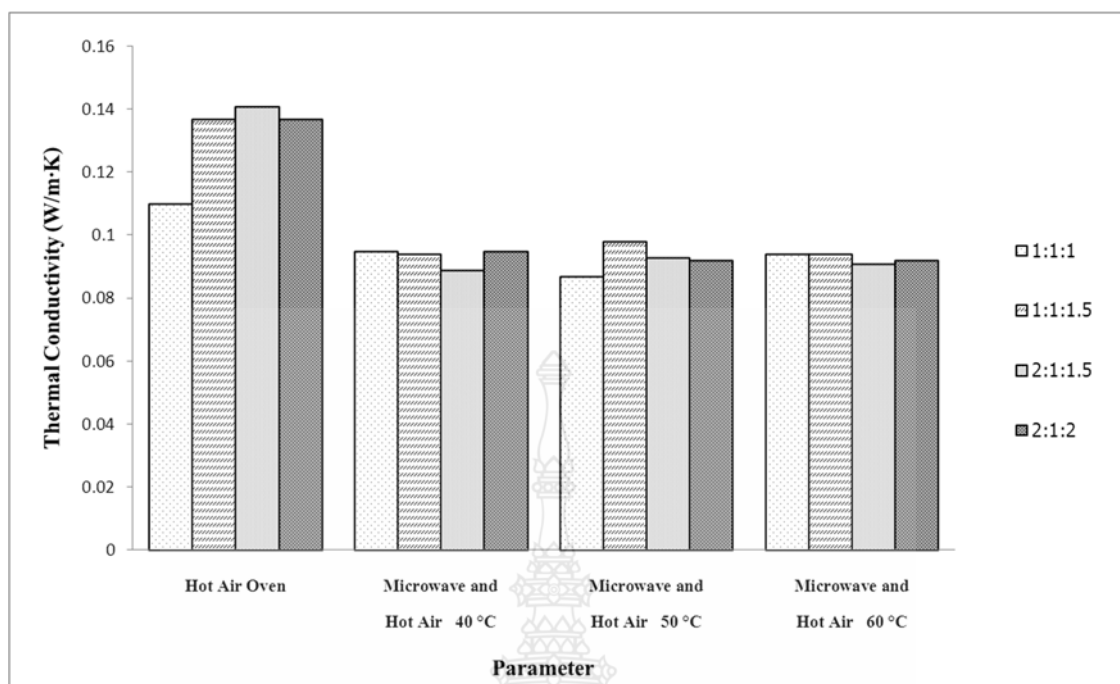
ภาพที่ 4.7 การบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง แสดงในภาพที่ 4.7 หลังจากผ่านการอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อน (Microwave and Hot Air) พบว่าการอบด้วยไมโครเวฟจะทำให้แผ่นขึ้นไม้มีโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบสม่ำเสมอ เนื่องจากการดูดซับพลังงาน การกระจายความร้อน และการกระจายความชื้นสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยการบวมพองหลังการแช่น้ำต่ำกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) (ค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำของแผ่นขึ้นไม้อัดหลังผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อน (Microwave and Hot Air) ได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 37.15% และตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ได้ค่าเฉลี่ยประมาณ 48.33%)



ภาพที่ 4.8 ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง แสดงในภาพที่ 4.8 พบว่าหลังจากได้รับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อน (Microwave and Hot Air) โครงสร้างภายในของแผ่นชิ้นไม้อัดมีความแข็งแรงมากกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) เมื่อนำไปทดสอบจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูงกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) จากผลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ว่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นในแผ่นชิ้นไม้อัดที่อบด้วยคลื่นไมโครเวฟมีการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างที่ดีกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)



ภาพที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง แสดงในภาพที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับความหนาแน่นของแผ่นขึ้นไม้อัดโดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อน (Microwave and Hot Air) ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ การกระจายความร้อน และการกระจายความชื้นสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่า และปริมาณความชื้นหรือน้ำที่คงอยู่ในแผ่นขึ้นไม้อัดน้อย จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าต่ำ (การทดลองอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave and Hot Air) ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 0.0882 W/m-K และตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 0.1312 W/m-K)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองสำหรับการวิเคราะห์พลังงานและประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว โดยพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์คือ อุณหภูมิ ค่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ในส่วนพลังงานจากไมโครเวฟและระบบลมร้อน ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40, 50 และ 60°C ตามลำดับ ใช้วัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5 และ 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20 cm × 20 cm × 1 cm ผลจากการวิเคราะห์พบว่าการใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อนมีค่าการใช้พลังงานที่น้อย เนื่องจากวิธีดังกล่าวของกระบวนการอบแห้งจะให้ความร้อนได้ดีที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลง การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ สามารถทำให้แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในแผ่นชิ้นไม้อัดจึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว และพบว่าค่าประสิทธิภาพพลังงานมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากในตอนเริ่มต้นแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีความชื้นสูง จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูงเพราะวัสดุนั้นมีลักษณะเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างฉนวนไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5] จะส่งผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุโดยวัสดุจะเริ่มร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานมีค่าลดลงตามไปด้วย นั่นแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ต่ำ จึงทำให้ค่า (Dielectric Loss Tangent Coefficient) น้อย การใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อนทำให้เวลาการอบแห้งสั้นจึงทำให้ประหยัดเวลาและพลังงาน

เมื่อทำเปรียบเทียบระบบพบว่า ถ้าคิดที่ค่าความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน กรณีใช้ไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60°C จะใช้เวลาการอบแห้งเร็วที่สุด และประสิทธิภาพรวมสูง เทียบกับกรณีใช้ไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40°C และ 50°C เมื่อพิจารณาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจากกระบวนการอบแห้งกรณี 1 เท่ากับ 0.1129 MJ/kg กรณี 2 เท่ากับ 0.0968

MJ/kg และกรณี 3 เท่ากับ 0.0926 MJ/kg พบว่าในกรณี 3 มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยสุด เนื่องมาจากการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้อิทธิพลของความเค้นพิลลารีที่ทำให้การขับเคลื่อนของความชื้นสู่ผิวหน้าได้ดี อีกประการหนึ่งเนื่องมาจากเมื่อทำการให้ความร้อนไประยะหนึ่งอนุภาคที่อยู่บริเวณผิวแห้งลงมีผลทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดียิ่งขึ้น (การสะท้อนกลับน้อยลง) ความชื้นที่อยู่ภายในจะเคลื่อนที่ออกจากแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองได้เร็วยิ่งขึ้น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งลดลง ประสิทธิภาพของระบบก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

กระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อน (Microwave and Hot Air) จะให้สมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อน ของแผ่นชิ้นไม้อัดที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) โดยแผ่นชิ้นไม้อัดที่ผลิตด้วยสูตร 2 ที่อัตราส่วนผสมของ เส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อ ผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วน 1:1:1.5 มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยเปลือกทุเรียนและมีปริมาณน้ำที่ใช้เหมาะสม จึงก่อให้เกิดการเชื่อมประสานของพันธะไฮโดรเจนได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ [23] และเมื่อนำแผ่นชิ้นไม้อัดอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ระบบดังกล่าวให้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูง เมื่อนำแผ่นชิ้นไม้อัดไปทดสอบค่าการบวมพองหลังการแช่น้ำ ประกอบกับการศึกษาในระดับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง พบว่าแผ่นชิ้นไม้อัดที่สูตร 2 โครงสร้างและผิวของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีโครงสร้างเรียงตัวเป็นระเบียบสม่ำเสมอ และมีโพรงและช่องว่างน้อยกว่าแผ่นชิ้นไม้อัดที่ทำการผลิตที่อัตราส่วนอื่นๆ ดังนั้นในการผสมกันในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำนั้น น้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ในส่วนที่เป็นโพรงของเส้นใยเปลือกทุเรียนในปริมาณที่น้อย ทำให้เกิดการขยายตัวที่ต่ำกว่าอัตราส่วนสูตรอื่นๆ การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง พบว่าสูตร 2 ที่อัตราส่วนผสมเส้นใยเปลือกทุเรียน ต่อ ผงเปลือกทุเรียน ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วน 1:1:1.5 มีค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดสูงกว่าสูตรอื่นเช่นกัน เมื่อทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ส่งผลให้เกิดระบบการเชื่อมประสานด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างวัตถุคิบ ที่มีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และน้ำ ในลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การไหลของไซคูปลาสติก (Pseudoplastic flow behavior) [23] ที่จะส่งผลต่อสมบัติทางกล และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง พบว่าที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำใกล้เคียงกัน เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดที่ทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ให้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูง ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่คงอยู่ในแผ่นชิ้นไม้อัดน้อย จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระบบไมโครเวฟที่ทำการศึกษาเป็นระบบแบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องมีข้อจำกัด คือใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หรือวัสดุ ของแข็งหรือกึ่งของแข็งเท่านั้น ดังนั้นหากต้องการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหรือกึ่งของเหลว ควรเลือกใช้ระบบไมโครเวฟแบบถาด

5.2.2 การศึกษาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง ควรมีการติดตั้งมิเตอร์วัดไฟฟ้าในตำแหน่งอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทุกตัว เพื่อที่จะสามารถหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในอุปกรณ์แยกแต่ละส่วนได้



รายการอ้างอิง

- [1] สโรชา เจริญวัย, โจเซฟ เคคาร์ และจงจิตร หิรัญลาภ, “แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนและใยมะพร้าวที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ,” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 40, วันที่ 4-7 กุมภาพันธ์ 2545. จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
- [2] Alternative Energy and Efficiency Information Center, **Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy**(Online), 2011. Available: <http://www.dede.go.th/dede>(11 March 2012)
- [3] สมชาติ โสภณธฤทธิ์, การอบแห้งอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. ม.ป.ท. 2532.
- [4] Prof. Dr. Hajime Tamon, Prof. Dr. Takeshi Furuta, Prof. Dr. Shuji Adachi, Prof. Dr. Shuichi Yoamamoto และ วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, เทคโนโลยีการอบแห้งในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2548.
- [5] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [6] สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, การสำรวจเชิงทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขของกระบวนการอบแห้งร่วมระหว่างไมโครเวฟและการพาความร้อนสำหรับวัสดุพูนแบบขึ้นมาก (กรณีศึกษา: ไม้), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548. จังหวัดปทุมธานี
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ มอก.-876-2547 (Online), 2547.
Available: <http://itc.excise.go.th/tisi/fulltext/TIS876-2547.pdf> (23 กันยายน 2555).
- [8] Prommas, R., Rattanadecho, P. and Jindarat, W., “Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB),” **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Vol.39, 2012. pp.242-250.
- [9] 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(08), 2011. pp. 926 – 938.
- [10] 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.
- [11] Jindarat, W., Rattanadecho, P. and Vongpradubchai, S., “Analysis of Energy Consumption in Microwave and Convective Drying Process of Multi-Layer Porous Material Inside a Rectangular Wave Guide,” **Experimental Thermal and Fluid Science**, Vol.35, 2011. pp. 728-737.
- [12] สมศักดิ์ วงษ์ประดับ ไชย เกียรติขจร สุเวทเวทิน ณิชวุฒิ สุวรรณภูมิ และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุ พรุณหลายชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อน โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 22, วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551. จังหวัดปทุมธานี
- [13] ณิชวุฒิ สุวรรณภูมิ , ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, วีระระ เกาะแก้ว, ณรงค์ศักดิ์ มากุล และบูรฉัตร ฉัตรวีระ, “การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 21 วันที่ 17-19 ตุลาคม 2550. จังหวัดชลบุรี.
- [14] สมศักดิ์ วงษ์ประดับ ไชย, วิโรจน์ จินดารัตน์ และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “การอบแห้งไม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 21, วันที่ 17-19 ตุลาคม 2550. จังหวัดชลบุรี.
- [15] วรณิ เอกศิลาป และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยใช้สเปาเต็ดเบดร่วมกับไมโครเวฟ,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 20, วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549. จังหวัดนครราชสีมา.
- [16] นพวรรณ ดวงม,ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และวารุณี กลิ่นไกล “การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิด ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม(MODE: TE10),” การประชุมวิชาการ เครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 20, วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549. จังหวัดนครราชสีมา.

- [17] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ดวงเดือน อางองค์ ณีรัฐวดี สุวรรณภูมิ สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และสุชนม์ ปิยโชติ, “การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง,” **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย**, ครั้งที่ 18, วันที่ 18-20 ตุลาคม 2547. จังหวัดขอนแก่น.
- [18] Benjamin Adu., Lambert Ottten., “Microwave Transfer Characteristics of White Beans,” *J. agric. Engng Res*, 1996. pp.71-78.
- [19] Tulasidas, T.N., Raghavan, G. S. V. and Mujumdar, A. S., “Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz,” **quality and energy aspects, Drying Technology**, Vol.13, 1995. pp.1973-1992.
- [20] Feng, H., Tang, J., “Microwave Finish Drying of Diced Apple Slices in a Spouted Bed,” **Journal of Food Science** 47, 1998. pp.1499-1512.
- [21] Shivhare et al., “Drying of Corn Using Variable Microwave Power With a Surface Wave Applicator,” **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy** 26 (1), 1991. Pp.38-44.
- [22] Vongpradubchai, S., Rattanadecho, P., “The Microwave Processing of wood using a continuous microwave belt drier,”. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Vol 48(5), 2009. pp.997-1003.
- [23] สโรชา เจริญวัย สรพงษ์ ภาสุปรีย์ อนินท์ มีมนต์ ชนากานต์ อาษาสุจรีต และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, “โครงการการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเชื่อมประสานที่ย่อยสลายได้จากเปลือกทุเรียนหมอนทองในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด,” **รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ**, 2556
- [24] Prommas, R., Keangin P. and Rattanadecho, P., “Energy and Exergy Analyses in Convective Drying Process of Multi-layered Porous packed bed,” **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Vol.37, 2010. pp.1106-1114.
- [25] Rattanadecho, P , Duangduen, A., Vongpradubchai, S., “Drying of a Slip Casting for Tableware Product Using Microwave-Continuous Belt Furnace,” **Drying Technology An International J.**, Vol. 26, 2006. pp. 589-594.

- [26] 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.
- [27] 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 (1), 2007. pp. 157-163.
- [28] Vongpradubchai, S., Rattanadecho, P., “Microwave and Hot Air Drying of Wood Using a Rectangular Waveguide,” **Drying Technology An International J.**, Vol. 29, 2011. pp. 451-460.
- [29] 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 (1), 2002. pp. 151-161.
- [30] วรณิ เอกศิลป์, การศึกษาพลังงานและเอ็กเซอียของกระบวนการอบแห้งวัสดุชีวภาพโดยสเปาเต็ดเบรต์ร่วมกับไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.
- [31] กาญจนา ขยัน, การอบแห้งตะไคร้ด้วยเทคนิคการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก โดยใช้เครื่องอบไมโครเวฟที่ควบคุมอุณหภูมิได้, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552.
- [32] นพวรรณ คุณาม, การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดที่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE_{10}), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.
- [33] วราภรณ์ ชะอุ่ม, การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและทดลองของกระบวนการทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้ไมโครเวฟติดที่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ASTM C-518

Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission

Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus



Designation: C 518 – 04

Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus¹

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 reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

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).² 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 m²·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.

¹ 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 – 02¹.

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


C 518 – 04

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:³

- 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 Apparatus⁴

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 as 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 λ —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 ΔT —temperature difference across the specimen, K .


3.3.10 ρ —(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 .

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

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

 C 518 - 04

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 α —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 ($T(\text{ambient}) = T(\text{mean})$), and in the range of 10 to 40°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.

$\pm 1^\circ\text{C}$), and in the range of 10 to 40°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

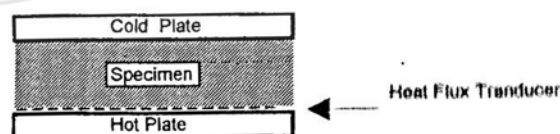


FIG. 1 Apparatus with One Heat Flux Transducer and One Specimen

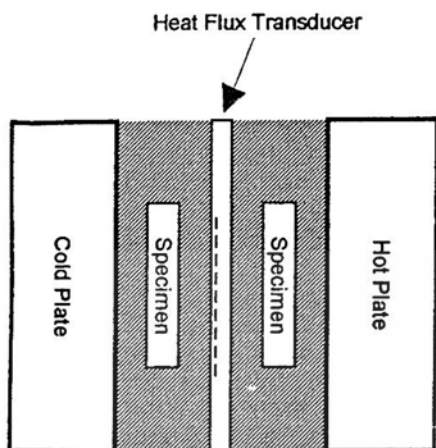


FIG. 2 Apparatus with One Heat Flux Transducer and Two Specimens

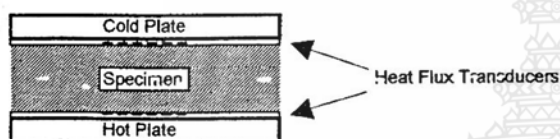


FIG. 3 Apparatus with Two Heat Flux Transducers and One Specimen

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:

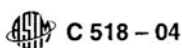
6.5.1 Calibrate the heat flow meter apparatus under the same conditions of plate temperatures, temperature gradient, specimen thickness, heat flow direction, and apparatus orientation as those for which data are available for the standard.

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



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.

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

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.

$$S = \frac{C \cdot (T_h - T_c)}{(E1 + E2)} \quad (4)$$

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 uncompressible 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

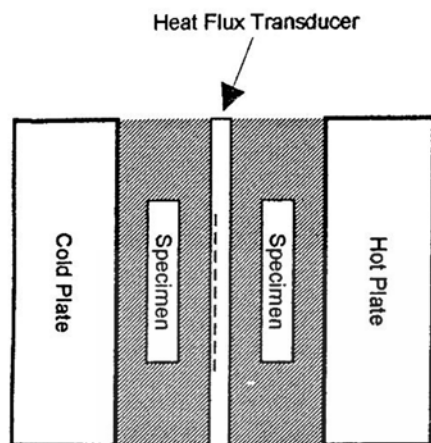


FIG. 2 Apparatus with One Heat Flux Transducer and Two Specimens

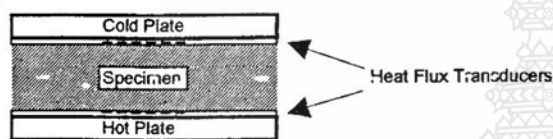


FIG. 3 Apparatus with Two Heat Flux Transducers and One Specimen

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 (II). 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

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 λ 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, ρ , 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 λ 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, 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 9.1.1-9.4 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^3 . 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 μm 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 plate 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 ± 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 ΔT '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)

 C 518 - 04

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 ΔT (δS , δE , δL , 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 ΔT , δT , 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 ΔT 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.

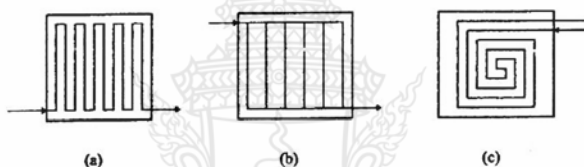
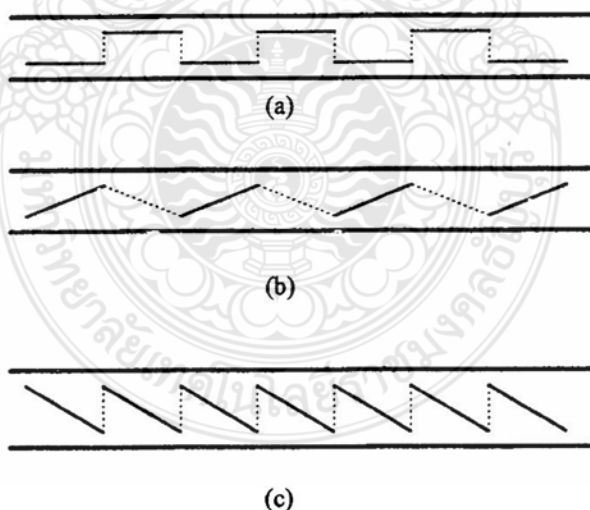
A2.12 The total estimated imprecision can be listed in a table of errors, such as shown in Table A2.1. This table is shown as an example only and does not represent any one particular heat flow meter apparatus since the errors will be specific to each apparatus.

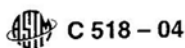
C 518 – 04
TABLE A2.1 Estimation of Random and Systematic Errors at Room Temperature

Variable	Absolute Variations		Percent Variations	
	Random	Systematic	Random	Systematic
ΔT	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 ²	1 mW/m ²	0.2	0.2
lateral	1 mW/m ²	2 mW/m ²	0.2	0.2
λ	0.2 mW/m ² ·K	0.3 mW/m ² ·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.

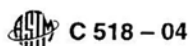
X2.3.3 The configuration with two transducers mounted on the isothermal plates is the most insensitive to edge conditions if the average of the readings of the two meters is assumed to be the measured heat flux per unit area through the specimen. If the plates are perfectly uniform in temperature, if 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.



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 of 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) Shirdiffe, 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 Kimpflen, 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.

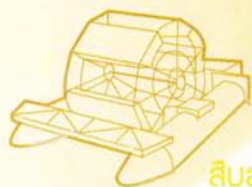
ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are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

KM
UTT

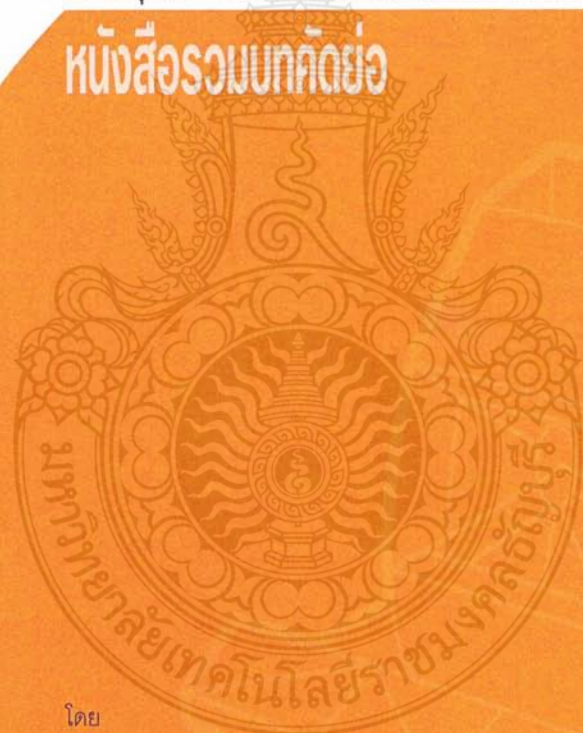


ME-NETT26

The 26th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26

หนังสือรวมบทความ



โดย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
และสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย



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

โดย :



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 ศรีเนาวกุล	ที่ปรึกษา
รศ.บันเทิง สุวรรณตระกูล	ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.เสนีย์ ศรีไชย	ที่ปรึกษา
รศ.ดร.วนิดา พวกุล	ที่ปรึกษา
อ.สุชาติ เจริศพริ่ง	ที่ปรึกษา

คณะกรรมการอำนวยการ

รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์	ประธานกรรมการ
อ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล	รองประธานกรรมการ
ผศ.ดร.สนธิพีร์ เอम्मณี	รองประธานกรรมการ
ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	กรรมการ
ผศ.ดร.สุรัชย์ สนิทใจ	กรรมการ
ผศ.ดร.ชวิน จันทระเสนาวงศ์	กรรมการ
ศ.ดร.สำเร็จ จักรใจ	กรรมการ
รศ.ดร.สมชาย จันทร์ชานนา	กรรมการ

อ.ดร.อาทิตย์ หกพันนา	กรรมการ
ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	กรรมการและเลขานุการ
คุณเบญจวรรณ ทองขาว	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณวันเพ็ญ ไพศาลสุทธิเดช	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณนุกูล บุญแสน	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณศิริรัตน์ คำพรมพะเนา	ผู้ช่วยเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายจัดเตรียมสถานที่

อ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล	ประธานอนุกรรมการ
ผศ.ดร.สาทิศส์ ทรงชน	อนุกรรมการ
ผศ.ดร.ชวิน จันทรเสนาวงศ์	อนุกรรมการ
อ.ดร.อธิกร วงศชนวิศ	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.อรธณพ เรืองวิเศษ	อนุกรรมการ
อ.ดร.อาทิตย์ หกพันนา	อนุกรรมการ
คุณศิริรัตน์ คำพรมพะเนา	เลขานุการ

คุณนพพร พูลแพ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณนุกูล บุญเสนา	ผู้ช่วยเลขานุการ
คณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการ	
ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	ประธานอนุกรรมการ
ศ.ดร.สำเร็จ จักรใจ	อนุกรรมการ
รศ.ดร.สมชาย จันทร์ชานนา	อนุกรรมการ AEC
ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข	อนุกรรมการ AMM
ผศ.ดร.ธีรนุช จันทโสภีพันธ์	อนุกรรมการ BME
อ.ดร.อาทิตย์ หกพันนา	อนุกรรมการ CST
ผศ.ดร.สโรช ไทรเมฆ	อนุกรรมการ DRC
รศ.ดร.วันชัย อัสวภูมิตกุล	อนุกรรมการ ETM
อ.ดร.ยศพงษ์ ลออนวล	อนุกรรมการ TSF
ผศ.ดร.อรธณพ เรืองวิเศษ	อนุกรรมการ AME และ เลขานุการ
คุณศิริรัตน์ คำรงพรมพะเนาวิ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คุณสราวุฒิ หมั่นนพคำ	ผู้ช่วยเลขานุการ
คณะอนุกรรมการฝ่ายพิธีการ	
ผศ.ดร.สันติพิร์ เอम्मณี	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 บุญเสนา	ผู้ช่วยเลขานุการ

คุณสมบูรณ์ มาลัยเป็ย

ผู้ช่วยเลขานุการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายหาทุนจากผู้สนับสนุน

ผศ.ดร.สุรชัย สนิทใจ ประธานอนุกรรมการ

รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชูติมา อนุกรรมการ

รศ.สุชัย ศศิวิมลพันธุ์ อนุกรรมการ

รศ.วีระชัย แก่นทรัพย์ อนุกรรมการ

อ.พัฒนา เนตรสุวรรณ อนุกรรมการ

รศ.สุรชัย บวรเศรษฐนันท์ อนุกรรมการ

ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์ อนุกรรมการ

คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ เลขานุการ

คุณนุกูล บุญเสนา ผู้ช่วยเลขานุการ

คุณนิสันต์ ดามาพงษ์ ผู้ช่วยเลขานุการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายลงทะเบียน และจัดทำเอกสารประกอบการประชุม

ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์ ประธานอนุกรรมการ

ผศ.สุเทพ แก้วนัย อนุกรรมการ

อ.ธรรมรัตน์ กิตติพงษ์พัฒนา อนุกรรมการ

ผศ.ดร.วิสุนรักษ์ เวชสถล อนุกรรมการ

อ.ดร.อธิกร วงศธนวิศ อนุกรรมการ

ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข อนุกรรมการ

อ.ดร.อาบทิพย์ ชีรวงศ์กิจ อนุกรรมการ

อ.ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ อนุกรรมการ

คุณเบญจวรรณ ทองขาว เลขานุการ

คุณรัตดาวรรณ อัมมานะ ผู้ช่วยเลขานุการ

คุณสมคิด พิลาวงศ์ ผู้ช่วยเลขานุการ

คณะอนุกรรมการฝ่ายจัดเลี้ยง

ศ.ดร.สำเริง จักรใจ	ประธานอนุกรรมการ
รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชุติมา	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 หงส์สุดดา	ผู้ช่วยเลขานุการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

AEC Alternative Energy and Combustion

ศ.ดร.สำเริง 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 อรุณศรีโสภณ
รศ.ดร.บัณฑิต ฟูงธรรมสาร	ผศ.ดร.วิชัย ทีวีะ โกศิยฐ
รศ.ดร.บัณฑิต ถิมมีโชคชัย	ผศ.พิชัย ถีละพัฒนะ
รศ.ดร.ศรัทธา อภรณ์รัตน์	ดร.เจตวิทย์ ภัครษ์พันธุ์
รศ.ดร.สมชาย จันทร์ชานา	ดร.ณัฐ มาณ
รศ.ดร.สืบศักดิ์ นันทวานิช	ดร.ยศพงษ์ ลออนวล
ผศ.ดร.วสันต์ จอมภักดี	ดร.อิศเรศ ชูชกัลยา

AME Aerospace and Marine Engineering

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

AMM Applied Mechanics, Materials and Manufacturing

ศ.กิตติคุณ ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์	ผศ.ดร.วิฑูร อุทัยแสงสุข
ศ.ดร.ธนัญชัย ถีกศักดิ์ปรีดา	ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์
รศ.ดร.ซัชพล ชังชู	ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
รศ.ดร.ชาวสวน กาญจโนมัย	ผศ.ดร.อภิวัฒน์ พลชัย
รศ.ดร.คุณไชติ ชลศึกษ์	ผศ.ดร.อริสรา ชัยกิตติรัตน์
รศ.ดร.ธงชัย ฟองสมุทร	ผศ.สุจินต์ บุรีรัตน์
รศ.ดร.ธัญญา เกียรติวัฒน์	ดร.กรรมมันต์ ชูประเสริฐ
รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์	ดร.กิตติพงศ์ บุญโล่ง
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ดร.เก่งกมล วิรัตน์เกษม
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	ดร.คุณยุต เอี่ยมสอาด
รศ.ดร.วรวิฑูร วิสุทธิเมธางกูร	ดร.จิระชัย มิ่งบรรเจิดสุข

รศ.ดร. วาภูมิ 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 ปรีชาวุฒิพงศ์	ดร.ธัญญารัตน์ สิงหนาท
รศ.ไพโรจน์ ศิริรัตน์	ดร.บำรุง พ่วงเกิด
ผศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย	ดร.ประพจน์ ขุนทอง
ผศ.ดร.ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์	ดร.เพชร เกียรติยศิลาวงศ์
ผศ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี	ดร.ไพบูลย์ ศรีอรุโณทัย
ผศ.ดร.เดช ดำรงค์ศักดิ์	ดร.มนต์ชัย พฤกษ์วิไลเลิศ
ผศ.ดร.บรรยงค์ 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 สัมภิตตะกุล	ดร.ศิริวิชญ์ เตชะเจษฎารังษี
ผศ.ดร.สนธิพีร์ เอम्मณี	ดร.สุวณิช จิตศิริพานิช
ผศ.ดร.สุรัชย์ สนิทใจ	ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ
ผศ.ดร.อนรรฆ บันระชานะ	ดร.อัญชนา วงษ์โต

BME Biomechanics

ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ผศ.ดร.ธีรบุษ จันทโสภีพันธ์
รศ.ดร.วรวิฑูร วิสุทธิเมธางกูร	ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์
รศ.ดร.ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร	ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์

CST Computation and Simulation Techniques

ศ.ดร.จงจิตร หิรัญธาก	ผศ.ดร.เจริญยุทธ เดชวาญกุล
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ผศ.ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล
ศ.ดร.สมชาติ ฉันทศิริวรรณ	ผศ.ดร.นภคณัย อาชวาคม
ศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์
รศ.ดร.กฤษณี มณีรัตน์	ผศ.ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร
รศ.ดร.ฐิติมา จินตนาวัน	ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา
รศ.ดร.ณัฐ กาศยปนนท์	ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์
รศ.ดร.ชัชชัย อ่อนจันทร์	ผศ.ดร.สันติพีร์ เอम्मณี
รศ.ดร.ธัญญา เกียรติวัฒน์	ผศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์
รศ.ดร.ปรณัฐ วิสุวรรณ	ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย
รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วดาพิพย์	ผศ.ดร.อนุศาล เพิ่มสุวรรณ
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	ผศ.ดร.ทศนพ กำเนิดทอง
รศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล	ผศ.ดร.อริสรา ชัยกิตติรัตน์
รศ.ดร.วรวิฑูร วิสุทธิเมธางกูร	ผศ.ดร.อังคิร (ไพบูลย์) ศรีภาการ
รศ.ดร.วรากรณ์รัตน์ จันทสาโร	ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ
รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	ดร.เพชร เกียรติยศิลาวงศ์
รศ.ดร.วิโรจน์ ลิ่มตระกูล	ดร.ภาสกร เวสสะโกศล
รศ.ดร.สุรเชษฐ์ ชุตินา	ดร.สุจินต์ สุวรรณะ
รศ.ดร.เอกชัย จันทสาโร	ดร.สุวณิชา จิตศิริพานิช
รศ.น.อ.สมชาย หาญกล้า	ดร.อรรถพร วิเศษสินธุ์
รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์	ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ
ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	ดร.อาทิตย์ 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.นภคณัย อาชวาคม
รศ.ดร.ธนุ ญฉาย	ผศ.ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ
รศ.ดร.ภูศิษฐ์ ลักขณะเจริญ	ผศ.ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี
รศ.ดร.มนูกิจ พานิชกุล	ผศ.ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์
รศ.ดร.ระดม พงษ์วุฒิธรรม	ผศ.ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย
รศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ	ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์
รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	ผศ.ดร.สาทิสส์ ทรงชน
รศ.ดร.สุธีระ ประเสริฐสรทรัพย์	ผศ.ดร.ศโรช ไทรเมฆ
รศ.ดร.สุวัฒน์ กุลชนปรีดา	ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์
รศ.ปัญญารักษ์ งามศรีตระกูล	ดร.นัยสันต์ อภิวัฒน์ลังการ
รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์	ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ดร.ภิญโญ พวงมะลิ
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา	ดร.มานะ แซ่ด่าน
ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพัฒน์	ดร.สวัสดิ์ เหลืองเรืองฤทธิ์
ผศ.ดร.ธีระ เกียรติพงษ์กุล	ดร.สัปปินันท์ เอกอำพน

ETM Energy Technology and Management

ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	รศ.ดร.สุธีระ ประเสริฐสรทรัพย์
ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดกุล	รศ.ดร.อติ บุญยจิตราคุณย์
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ผศ.ดร.เกรียงไกร อัสวมาศบันลือ
ศ.ดร.สมชาติ ฉันทศิริวรรณ	ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์

รศ.ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์	ผศ.ดร.ชัชวาลย์ ชัยชนะ
รศ.ดร.ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง	ผศ.ดร.ชาญณรงค์ อัสวเทศานุกาพ
รศ.ดร.ธวัชชัย อ่อนจันทร์	ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	ผศ.ดร.นุภาพ แย้มไตรพัฒน์
รศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล	ผศ.ดร.มาลี สันติคุณากรณ์
รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ	ผศ.ดร.วาทีต 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 เทพหัสดิน ณ อยุธยา	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 นรเศรษฐ์ โสภาน
ศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์	รศ.ดร.สมนึก วีระกุลพิศุทธิ์
รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว	รศ.ดร.สมบัติ ทิมทรัพย์
รศ.ดร.จำลอง ลีมิตระกุล	รศ.ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ
รศ.ดร.ชวลิต กิตติชัยการ	รศ.ดร.ศักดิ์มน เทพหัสดิน ณ อยุธยา
รศ.ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ	รศ.ดร.สันติ ลักขิตานนท์
รศ.ดร.ชัยศิลป์ ชินพรเจริญพงศ์	รศ.ดร.สินชัย ชินวรรณรัตน์
รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์	รศ.ดร.สืบศักดิ์ นันทวานิช
รศ.ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์	รศ.ดร.สุรชัย รดาการ

รศ.ดร.บัณฑิต ถีมมีโชคชัย	รศ.ดร.อนุสรณ์ ชินสุวรรณ
รศ.ดร.ประกอบ สุรวฒนาวรรณ	รศ.ดร.อศิ บุญยจิตราดุลย์
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	รศ.ดร.อิสริย์ หารรษาจรูญโรจน์
รศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล	รศ.ฤชกร จิรกาลวสาน
รศ.ดร.ไพศาล นาผล	รศ.วีระ จันทร์วัฒนะ
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	รศ.ตำรวจ อินแบน
รศ.ดร.มนตรี ชำรงพิรุณ	ดร.ยศพงษ์ ลออนวล
รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ	ดร.อชิกร วงศธนวิศ
รศ.ดร.วันชัย อัสวภูษิตกุล	



ETM2017	การทำนายเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	176
ETM2018	ระบบผลิตน้ำร้อนแบบผสมผสานระหว่างแสงอาทิตย์และความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องปรับอากาศสำหรับโรงพยาบาล	177
ETM2019	การศึกษาการประหยัดพลังงานในการนึ่งก๋วยเตี๋ยวระดับอุตสาหกรรม	178
ETM2026	การวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง	179
ETM2027	การศึกษาเปรียบเทียบระบบทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้ระบบโซลาร์เซลล์และระบบโซลาร์คอลเลคเตอร์	180
ETM2028	การศึกษาการอบแห้งซีลีเยอผ่านโซโคไลนโดยใช้ไอเสียจากหม้อไอน้ำ	181
ETM2031	การเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องผลิตน้ำแข็งหลอดโดยการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	182
ETM2034	การศึกษาอิทธิพลการระบายความร้อน อุณหภูมิ ความดันของอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศ ในกระบวนการเครื่องอบแห้งสุญญากาศรวมปั๊มความร้อน	183
ETM2036	ผลกระทบของการติดตั้งมู่ลี่เข้ากับหน้าต่างกระจกต่อความสบายเชิงความร้อน	184
ETM2038	การคำนวณค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานตามฤดูกาล : กรณีศึกษาสำหรับประเทศไทย	185
ETM2039	ต้นแบบโรงเรือนอบแห้งเส้นยาสูบพลังงานแสงอาทิตย์	186
ETM2051	การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ระบบปรับอากาศแบบดูดซึมในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี	187
ETM2052	การศึกษาเชิงทดลอง การอบแห้งเมล็ดกาแฟในเครื่องอบแห้งแบบหมุน	188
ETM2053	การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเปียกแบบหมุนโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งความร้อนในฟาร์มสุกร	189
ETM2054	การเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานของคอมเพรสเซอร์ของระบบปรับอากาศในช่วงเริ่มต้นการทำงานที่ใช้เวลาต่างกัน	190
ETM2056	การศึกษาการออกแบบส่วนอุ่นแห้งเหล็กด้วยไอเสียก่อนนำเข้าสู่เตาเผาเหล็ก	191
ETM2058	การประมาณค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย ประจำปี พ.ศ. 2548 - 2553	193
ETM2060	การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตพริกแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟ ลมร้อน และเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	194
ETM2063	การออกแบบและสร้างเตาอบรมควันย่างพาราประหยัดพลังงาน	195
ETM2066	ผลของความเร็วลมและความเบ้สถิติลมต่อธุรกิจกังหันลมในประเทศไทย	196
ETM2069	ผลของความเร็วลมและความเบ้สถิติลมต่อธุรกิจกังหันลมในประเทศไทย	197
ETM2071	อุปกรณ์กำเนิดกระแสไฟฟ้าจากการไหลของกระแสน้ำทะเล	198
ETM2072	อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากคลื่นผิวน้ำ	199
ETM2073	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในวัฏจักรชีวิตของการปลูกกุหลาบเชิงการค้าในอำเภอพบพระ จังหวัดตาก	200
ETM2075	การประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนสำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง	202
ETM2076	สมดุลพลังงานในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำ	203
ETM2077	การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยการปิดผาบำบัดน้ำเหล็กในระหว่างรอการเหน้าเหล็ก	204
TSF: Thermal Systems and Fluid Mechanics		
TSF2001	การศึกษาลักษณะของสแตกที่มีผลต่อการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติค	205
TSF2002	การคำนวณและการวิเคราะห์หอบายความร้อนแบบผสมสำหรับการใช้งานในประเทศไทย	206
TSF2003	คุณลักษณะทางสมรรถนะของแผ่นทำความเย็นแบบระเหยดับแบบโยเมะพรวัว	207



การวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วย
ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง
Analysis of Energy Consumption in Microwave and Hot-Air Drying Process of
Particleboards from Montong durian peel Using a Continuous Belt System

วันชนะ ยิ่งยีน¹, สโรชา เจริญวัย^{1*}, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย² และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

*ติดต่อ (Corresponding Author): E-mail sarochakuk@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-2549-3430-9 เบอร์โทรสาร 0-2549-3432

² หน่วยงานวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไม้โครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: E-mail ratphadu@engr.tu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-2564-3001-9 เบอร์โทรสาร 0-2564-3001-9

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยทำการทดลองในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง โดยโครงสร้างระบบประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 (GHz) ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 12 ตัว ติดตั้งในตำแหน่งสมมาตรภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 90 ซม. X 45 ซม. X 270 ซม. และเครื่องกำเนิดลมร้อน ที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงสุด 240 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ขนาด 20 X 20 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่า การให้ความร้อนในช่วงแรกควรใช้ลมร้อนก่อน เพราะวิธีดังกล่าวของกระบวนการอบแห้งจะให้ความร้อนได้ดีที่สุด หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากที่ผิวสามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว จากการสังเกตภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการอบแห้งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับใช้พลังงานไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว

คำหลัก: พลังงาน, การอบแห้ง, ไมโครเวฟ, แผ่นขึ้นไม้อัด

Abstract

The paper presents the energy analysis in drying process of particleboards from Montong durian peel using microwave energy and hot-air in a continuous belt system, consists of twelve 800 watts 2.45 GHz coupled into the cavity wall inside the system. A rectangular microwave cavity of dimensions 45 cm X 90 cm X 270 cm combined with hot-air generator having the maximum operating temperature at 240 °C was chosen. Particleboards from Montong peel with dimension of 20 cm x 20 cm were manufactured. The test results and thermal photograph show that using hot-air drying in the first stage, the surface of samples should be greatly dried out. As the result of hot-air drying, this was dedicated to moisture removal of the surface of samples. Afterward, the samples were heated by microwave drying that caused the heat was generated inside the samples, thus transporting rapidly of moisture to the surface of samples. Therefore it would seem that the combination of microwave and hot-air drying process provides more efficiency compared with a single microwave drying.

Keywords: Energy, Dying, Microwave, Particleboards



1. บทนำ

การใช้วัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติ เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยลดปัญหาที่ทรัพยากรป่าไม้มีจำนวนลดลง ในขณะที่ความต้องการใช้ไม้ยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผลไม้ มีแนวโน้มสูงขึ้นในแต่ละปี ส่งผลทำให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มีจำนวนมากขึ้นเป็นเงาตามตัว จึงเกิดแนวความคิดการนำวัสดุเหลือใช้จำพวกเปลือกผลไม้ เช่น เปลือกทุเรียนหอมทอง เนื่องจากเปลือกทุเรียนหอมทองมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำเท่ากับ 0.0921 W/m.K เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนในการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดเพื่อเป็นวัสดุภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ลดความร้อนภายในอาคารเนื่องจากพลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญดังนั้นการอนุรักษ์และประหยัดพลังงานจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมนั้นมีหลายกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง ซึ่งวิธีการที่ใช้อยู่กันทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหาที่ชิ้นงานที่มีความหนาบางๆ เนื่องจากชิ้นงานจะได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือสม่ำเสมอ นอกจากนั้นกระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพเปลี่ยนไป จึงเป็นที่มาของการแสวงหาวิธีใหม่ในการขจัดปัญหาที่เกิดขึ้น การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและยังเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแผ่นขึ้นไม้อัด เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูง เพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาสั้นพลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสีย เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟระหว่าง 0.3 ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 1 mm. ถึง 1 m. มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อแปรรูปวัสดุต่างๆ ในอุตสาหกรรม งานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่ [1-6] เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ที่ใช้พลังงานไมโครเวฟ ได้แก่ Rattanadecho et al. [1] ได้ทำการศึกษางานศาสตร์กระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้

ในการศึกษาคือ ยางพารา และเซรามิกส์ J. Varith et al. [2] ได้ทำการอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นและการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ที่ระดับอุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C กำลังไมโครเวฟ 100, 180, 300 และ 450 W Jindarat et al. [6] ได้ศึกษาการอบแห้งวัสดุพรมหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงาน (Specific Energy Consumption)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหอมทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ กำลังงานไมโครเวฟที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40 50 และ 60 °C) เพื่อหาสภาวะในการอบแห้งที่เหมาะสม เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการอบแห้งต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าค่ากำลังการดูดซับคลื่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตาม วัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการทำแรงแม่เหล็กไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ ϵ_r คือ relative



dielectric constant ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย ϵ_0 คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงาน ความร้อน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า $\tan\delta$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ ของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากไปด้วย แต่ถ้าค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่าความชื้น (Moisture content) ลักษณะของแผ่นขึ้นไม้อัดและขนาดของแผ่นขึ้นไม้อัด ค่าความลึกในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 2

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

เมื่อ v = ความเร็วแสง (3×10^8 m/s) f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ϵ_r คือ relative dielectric constant $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient

จะเห็นว่าค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนความลึกในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุ ไดอิเล็กทริกก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย

2.2 การสมดุล มวล พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

จากกฎการอนุรักษ์มวลของปริมาณควบคุมตามรูปที่ 1 ทำการสมดุลมวลเมื่อ \dot{m}_{g1} ที่จุด 1 และ \dot{m}_{g2} ที่จุด 2 เป็นอัตราการไหลเข้าและออก W_d เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด X_1 และ X_2 เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกจะได้สมการสมดุลมวลของกระบวนการอบแห้ง ดังนี้

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{g1} - \dot{m}_{g2} \quad (3)$$

$$W_d \frac{dM_p}{dt} = \dot{m}_a (X_1 - X_2) \quad (4)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (X_2 - X_1) \quad (5)$$

เมื่อ W_d เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kg) \dot{m}_a เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s) $X_{1,2}$ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg water/kg dry air) \dot{m}_w อัตราการไหลของน้ำออกจากวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kg water/s)

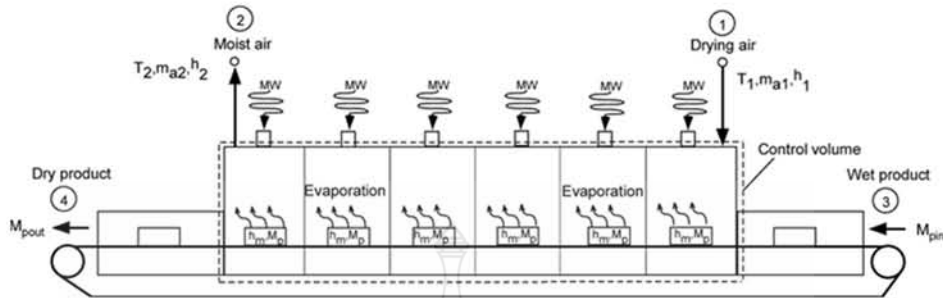
สำหรับการวิเคราะห์การสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบควบคุม เกิดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากมีการพาความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด ทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดและความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม สมการสมดุลพลังงานเขียนได้ดังนี้

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} + E_{st} = \Delta E_{system} \quad (6)$$

ในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดเมื่อมีการพาความร้อนและพลังงานไมโครเวฟจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยความสัมพันธ์สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\frac{W_d (h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_a (h_1 - h_2) + \dot{Q}_{inw} - \dot{Q}_{loss} \quad (7)$$

เมื่อ W_d เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kg) เป็นเอนทาลปีของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด (kJ/kg) เป็นเวลา (s) \dot{Q}_{evap} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการระเหยของน้ำ (kJ/s) \dot{m}_a เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s) h เป็นเอนทาลปีของอากาศแห้ง (kJ/kg) \dot{Q}_{inw} เป็นพลังงานไมโครเวฟ (kW) \dot{Q}_{loss} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม (kJ/s)



รูปที่ 1 กระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง [1]

2.3 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นการประเมินจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง พิจารณาจากการป้อนพลังงาน ในการอบแห้งที่อุณหภูมิลมป้อน 40 °C, 50 °C และ 60 °C ความเร็วลม 0.5 m/s กำลังไมโครเวฟ (เปิดแมกนีตรอน 3 ตัว) 2400 W การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) หาได้จากสมการที่ 3

$$SEC = \frac{\text{Total electrical power supplied in drying}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kW-hr}{kg} \right] \tag{8}$$

$$SEC = \frac{P_{total}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \tag{9}$$

เมื่อ P_{total} คือพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง สามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$P_{total} = P_{mg} + P_{heater} + P_{exfan} + P_{cofan} + P_{con} \cdot [kW \times 3600s] \tag{10}$$

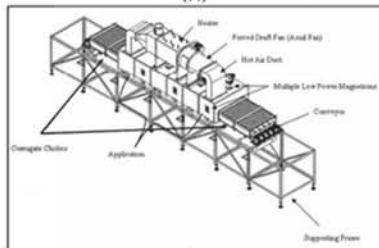
เมื่อ P_{mw} เป็นพลังงานไฟฟ้าจำหน่ายใน magnetron, P_{heater} เป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องทำความร้อน, P_{exfan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมดูดอากาศ, P_{blfan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมเป่าลม, P_{cofan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมระบายความร้อน และ P_{con} เป็นพลังงานไฟฟ้าระบบสายพานลำเลียง

3.ระเบียบวิธีการทดลอง

แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย,ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 เซนติเมตร และอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟซึ่งเป็นระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องที่ทางหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรมพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ซึ่งภายในระบบจะติดตั้งแมกนีตรอน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ไว้จำนวน 12 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) และเครื่องกำเนิดลมร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณ 240 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) วัตถุดิบอุณหภูมิร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งอยู่รอบๆ บริเวณทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออกกระบอกไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถ วัดได้ที่ตำแหน่งปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ± 0.5 องศาเซลเซียส)



(ก)



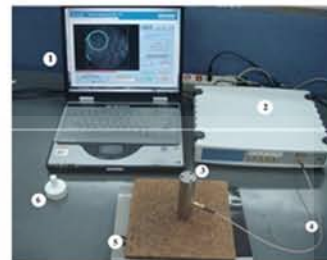
(ข)

รูปที่ 2 (ก) เครื่องไมโครเวฟแบบระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง (ข) ไดอะแกรมรายละเอียดเครื่องมือทดลอง [1]

การวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยการวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เชิงลึกเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการไมโครเวฟเพราะสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ตัวเครื่องมือมีองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบเช่น การรักษาสัญญาณไมโครเวฟ การคำนวณสัญญาณการเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าวมาแสดงเป็นกราฟ ควบคุมการทำงานด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายในวัสดุที่ถูกทดสอบ จากนั้นจะตรวจจับความถี่การสั่นพ้องของคลื่นภายในหัววัด (cavity) รวมไปถึงปัจจัยคุณภาพ (quality factor) และนำข้อมูลที่ได้แปรกลับเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

การวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก นำวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน ใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า $\tan \delta$



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

รูปที่ 3 เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ [1]

การอบแห้งนำแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองทำการวัดความชื้นเริ่มต้นก่อนการทดลอง ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณี 1 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 40 °C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผลมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 cm.

กรณี 2 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 50 °C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผลมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 cm.

กรณี 3 ใช้แมกนีตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิลมร้อนที่ 60 °C แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผลมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด 20x20 cm.

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ที่วัดโดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) แสดงดังในตารางที่ 1

จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C พบว่าช่วงแรกอุณหภูมิแผ่นขึ้นไม้อัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นและค่า Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$) สูง ทำให้แผ่นขึ้นไม้อัด

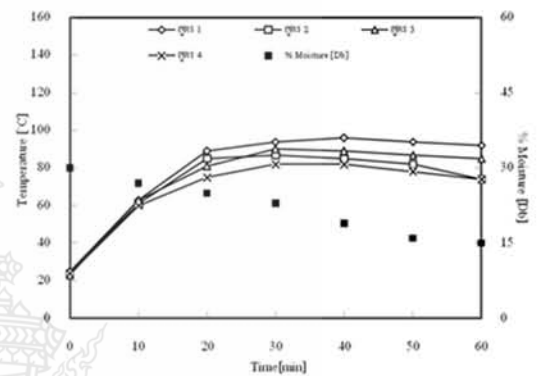


อัดดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นขึ้นไม้อัด (Q) สูงตามไปด้วย (ดังในสมการที่ 1) ในช่วงเวลาต่อมา อุณหภูมิของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าค่อยๆลดต่ำลง เพราะความชื้นภายในวัสดุได้เคลื่อนตัวออกไป เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันพิวลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่าสูงแต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของ

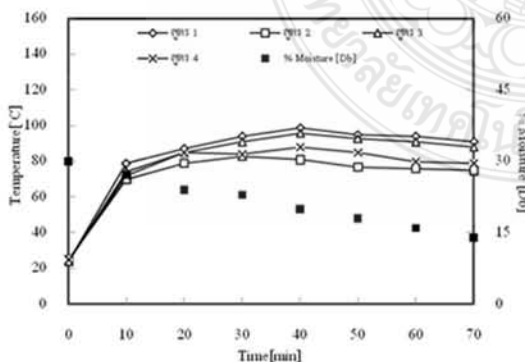
ตารางที่ 1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

ชุดที่	แผ่นขึ้นไม้อัด	ค่า Dielectric constant (ϵ_r')	ค่า Dielectric loss factor (ϵ_r'')	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan \delta$)
1	1:1:1	2.18862	0.345547	0.157533942
	1:1:1.5	2.14632	0.379913	0.176934528
	2:1:1.5	2.25451	0.446069	0.197688973
	2:1:2	2.31650	0.443787	0.191471577
2	1:1:1	2.37493	0.525012	0.220931119
	1:1:1.5	2.39608	0.539043	0.224797550
	2:1:1.5	2.23818	0.455578	0.203464611
	2:1:2	1.88531	0.306049	0.162227395
3	1:1:1	2.59829	0.610489	0.234860799
	1:1:1.5	2.18999	0.419730	0.191616784
	2:1:1.5	2.72758	0.677368	0.255083833
	2:1:2	2.23574	0.422795	0.189115917

ความดันก๊าซ (Gas Pressure) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดสูง และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด พบว่าภายในบริเวณกึ่งกลางจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านนอกอันเนื่องมาจากอิทธิพลการกระจายของความชื้นภายในแผ่นขึ้นไม้อัด

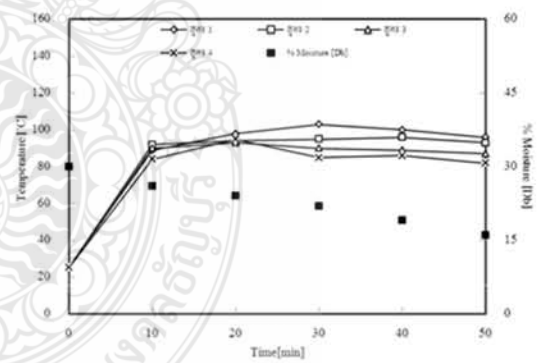


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50 °C



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C

ความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) และ

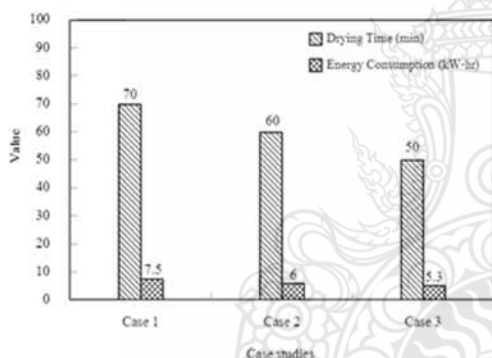


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C

จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50 °C พบว่าช่วงแรก แผ่นขึ้นไม้อัดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากแผ่นขึ้นไม้อัดมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น และเมื่อมีการดูดซับพลังงานลดลง ค่าอุณหภูมิจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C พบว่าเมื่อใช้

อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากผิวแผ่นชิ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา โดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C พบว่าช่วงแรก แผ่นชิ้นไม้อัดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้อัดมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้น เมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น แผ่นชิ้นไม้อัดมีการดูดซับกำลังไมโครเวฟลดลง แต่ความร้อนสะสมในชิ้นไม้มียังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิแผ่นชิ้นไม้อัดมีค่าสูงอยู่ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C และ 50 °C พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากผิวแผ่นชิ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย

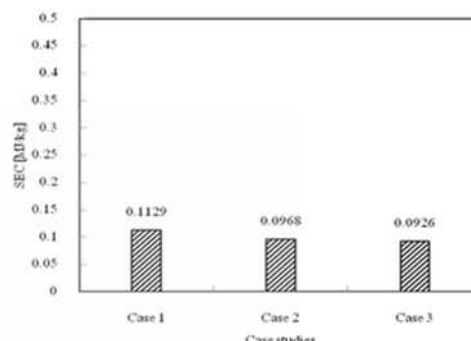


รูปที่ 7 การใช้กำลังพลังงานไฟฟ้าและเวลาในการอบแห้ง

จากรูปที่ 7 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง กรณี 1 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C ใช้พลังงานไฟฟ้า 7.5 kW-hr กรณี 2 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ใช้พลังงานไฟฟ้า 6 kW-hr กรณี 3 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C ใช้พลังงานไฟฟ้า 5.3 kW-hr โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °C และ 50 °C ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในแผ่นชิ้นไม้อัดให้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงด้วย

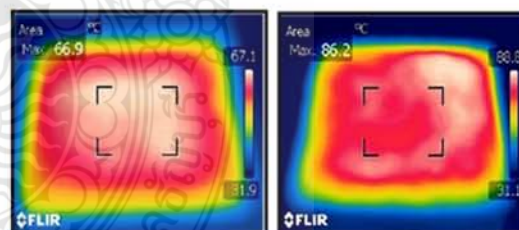
จากรูปที่ 8 แสดงค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการทดลองอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดด้วยไมโครเวฟ

ร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W ที่อุณหภูมิ 40 °C, 50 °C และ



รูปที่ 8 แสดงการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

60 °C พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.1129, 0.0968 และ 0.0926 MJ/kg ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °C ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีต่ำสุดเท่ากับ 0.0926 MJ/kg ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ความสิ้นเปลืองพลังงานก็จะลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 9 ภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด

จากรูปที่ 9 ภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด เมื่อพิจารณาภาพถ่ายความร้อนแผ่นชิ้นไม้อัด บริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิบริเวณภายนอกเนื่องจากบริเวณภายในแผ่นชิ้นไม้อัดมีความชื้นและค่า Loss Tangent Coefficient ($\tan\delta$) สูง ทำให้แผ่นชิ้นไม้อัดดูดซับพลังงานได้มาก ทำให้ความร้อนภายในแผ่นชิ้นไม้อัดสูงตามไปด้วย การให้การความร้อนในช่วงแรกด้วยลมร้อนวิธิตั้งกล่าวจะให้ความร้อนได้ดีที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลง มวลของความชื้นเคลื่อนที่เข้าไปรวมที่จุดกึ่งกลางวัสดุ จึงทำการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในช่วงนี้จะทำให้เกิดความร้อนและแรงดันไอขึ้นภายในช่วยไล่ความชื้นให้เคลื่อนตัวได้สะดวกขึ้น



จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกรณีต่างๆ จะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะช่วยให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ต้องคำนึงถึงการควบคุมอุณหภูมิภายในแผ่นขึ้นไม้อัดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันแผ่นขึ้นไม้อัดเสียหาย ตารางที่ 2 ผลการทดลองโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกรณีต่างๆ

กำลังไมโครเวฟ (W)	อุณหภูมิลมร้อน	สูตร	น้ำหนักก่อนอบแห้ง (g)	น้ำหนักหลังอบแห้ง (g)	อัตราการอบแห้ง (Drying rate)
2400	40	1:1:1	366	322	0.63
		1:1:1.5	361	311	0.71
		2:1:1.5	371	315	0.80
		2:1:2	369	313	0.80
	50	1:1:1	375	312	0.90
		1:1:1.5	375	311	0.91
		2:1:1.5	354	308	0.66
		2:1:2	357	307	0.71
	60	1:1:1	387	325	0.89
		1:1:1.5	357	304	0.76
		2:1:1.5	383	315	0.97
		2:1:2	358	302	0.80

5.สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง พบว่าการให้ความร้อนในช่วงแรกควรใช้ลมร้อนก่อนเพราะวิธีดังกล่าวของกระบวนการอบแห้งจะให้ความร้อนได้ดีที่สุด หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากที่ผิวสามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายในแผ่นขึ้นไม้อัดจึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสู่ผิวหน้าได้รวดเร็ว จากการสังเกตภาพถ่ายความร้อนของแผ่นขึ้นไม้อัด ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการอบแห้งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับใช้พลังงานไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณงบประมาณแผ่นดินจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนเงินในการ

ดำเนินการวิจัย และสมาชิกในหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Watanasungsit, A. and Duangduen, A., 2007, "Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace.", ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering, Vol. 129 (1), pp. 157-163.
- [2] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S., 2007, Combined Microwave-Hot air Drying of Peeled Longon, Journal of Food Engineering., Vol.31, pp. 459-468.
- [3] Rattanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, "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 (1), 2002, pp. 151-161.
- [4] 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.
- [5] Rattanadecho, P., Duangduen, A., Vongpradubchai, S., 2006, "Drying of a Slip Casting for Tableware Product Using Microwave-Continuous Belt Furnace.", Drying Technology An International J., Vol. 26, pp. 589-594.
- [6] Jindarat, W., Rattanadecho, P. and Vongpradubchai, S., 2011, "Analysis of Energy Consumption in Microwave and Convective Drying Process of Multi-Layer Porous Material Inside a Rectangular Wave Guide", Experimental Thermal and Fluid Science. 35, pp.728-737



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ร่วมกับ
สมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย
ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

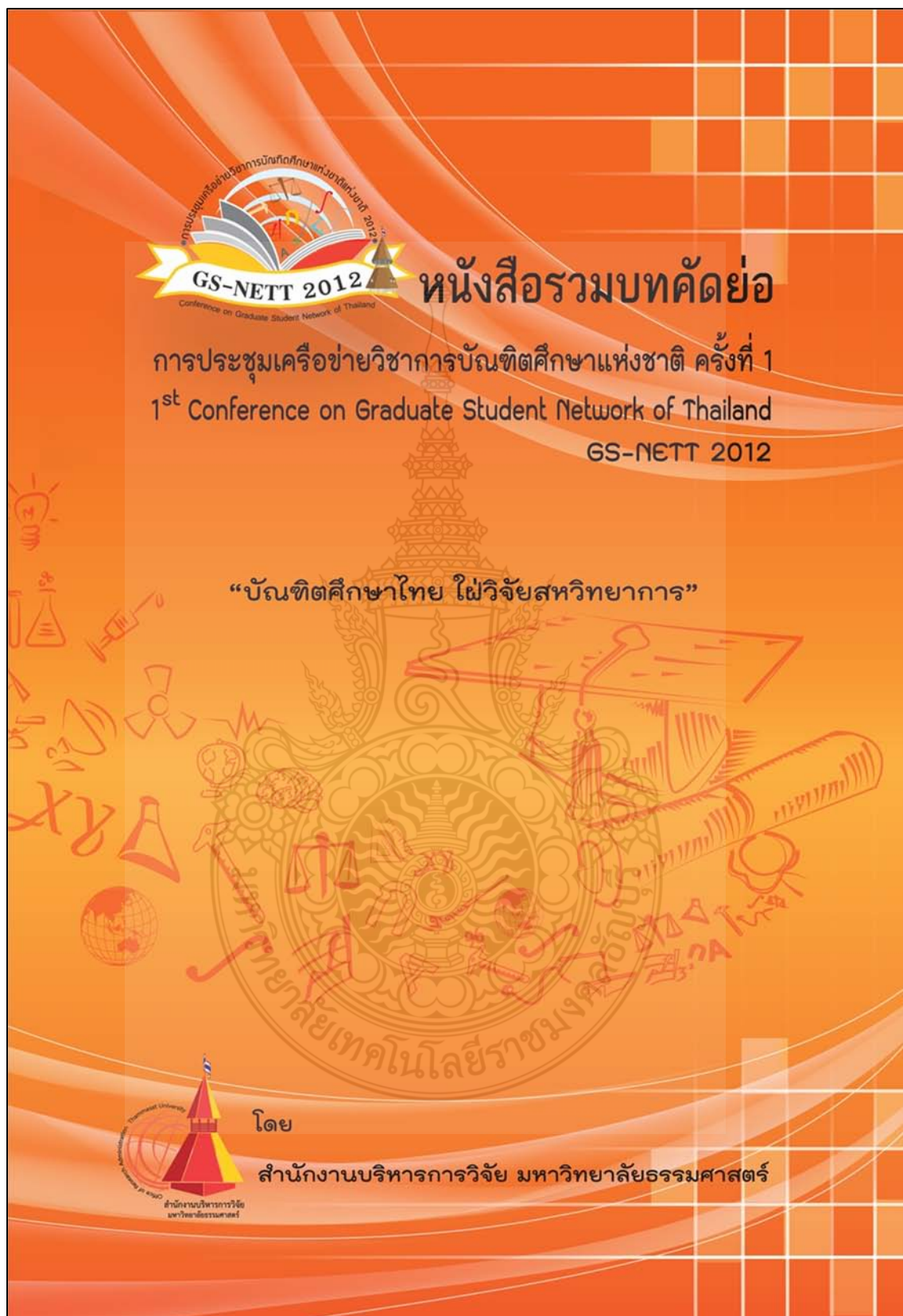
คุณ **วันชนะ ยิ่งยง, สโรภา เจริญวัย,**
สมศักดิ์ วงษ์ประดิษฐ์ และ พดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ได้ส่งบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ระหว่างวันที่ 24-26 ตุลาคม 2555

ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงใหม่

รศ. ดร. พงต์พันธ์ แก้วตาทิพย์
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ. ดร. วิทยา ยงเจริญ
นายกสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย



การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งประเทศไทย 2012

GS-NETT 2012
Conference on Graduate Student Network of Thailand

หนังสือรวมบทความ

การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st Conference on Graduate Student Network of Thailand
GS-NETT 2012

“บัณฑิตศึกษาไทย ใฝ่วิจัยสหวิทยาการ”

โดย
สำนักงานบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สำนักงานบริหารการวิจัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



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

“บัณฑิตศึกษาไทย ใฝ่วิจัยสหวิทยาการ”

18 ธันวาคม 2555

ณ ศูนย์ประชุมธรรมศาสตร์ รังสิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต



สำนักงานบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

**รายชื่อคณะกรรมการจัดการประชุม
การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1**

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์ลำปาง
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์รังสิต
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร ศูนย์ลำปาง		ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริการวิชาการและวิจัย		รองประธานกรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร.อัญญา ชันธวิทย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร.พิณทิพย์ ทวยเจริญ	ข้าราชการบำนาญ	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร.ตรีณ พงศ์มพัฒน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ อาภรณ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ โรจนกิจอำนวย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์	ที่ปรึกษาสำนักงานกองทุน สนับสนุนการวิจัย	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ	ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร	กรรมการ
ศาสตราจารย์ นพ.สุรศักดิ์ ฐานีพานิชสกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ทพ. ดร. สิทธิชัย ขุนทองแก้ว	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ศาสตราจารย์ พิเศษ ดร.กาญจนา เจารัมย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร. เกศรา ณ บางช้าง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีเทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล เกียรติเจริญผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย นำประเสริฐชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. ศากุน บุญอิต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพวรรณ ปิ่นวนิชย์กุล	ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรารธนา ปุณณกิติเกษม	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิพร พิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชชนา ลินธวาลัย	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
อาจารย์ ดร. จักรวาล คุณะดิลก	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
อาจารย์ ดร. ธันยวัต สมใจทวีพร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
ผู้อำนวยการสำนักงานบริหารการวิจัย	กรรมการและเลขานุการ	
นางบุญถม วชิราธาดา		ผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวเพ็ญกาญจน์ สารัมภานนท์		ผู้ช่วยเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุม

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

คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ

นางสาวอัจฉรา จินดารัตน์	ประธานกรรมการ
นางสาวทัศนีย์ ดาวเรือง	กรรมการ
นางสาวเบญจวรรณ ประจวบลาภ	กรรมการ
นางวิลาวัลย์ กางการ	กรรมการ
นายอุทัย ชันธมาสัย	กรรมการ
นางสาวจินตนา เทียงตรง	กรรมการ
นางสาวเพ็ญกาญจน์ สารัมภานนท์	กรรมการ
นางสาวศิตกมล วงษ์สมบุญ	กรรมการ
นางสาวสุปราณี ปราชญ์รัตนะกวี	กรรมการ
นางสาวปิยนาด พุทธิรัตน์	กรรมการ
นางสาวศิริรัตน์ จำปาสด	กรรมการ
นายรติ สมันตรัฐ	กรรมการ
นายวิวัฒนา แก้วทองงค์	กรรมการ
นายวิระศักดิ์ คงแก้ว	กรรมการและที่ปรึกษาด้านไอที
นางบุญถม วชิราธาดา	กรรมการและเลขานุการ
นายเอกศักดิ์ ไชยา	ผู้ช่วยเลขานุการ
นายทศพร สมใจ	ผู้ช่วยเลขานุการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศ.ดร.สมชาติ ฉันทศิริวรรณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
ศ.ทพ. ดร. สิทธิชัย ขุนทองแก้ว	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.กิตติคุณ ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.พิเศษ ดร.กาญจนา เจริญชัย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ศ.ดร. ธัญชัย ลีภักดิ์ปรีดา	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
รศ. ดร. ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ. ดร. ดุลยโชติ ชลศึกษา	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ. ดร. บุษบา พงษ์พานิชรัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. ธวัชชัย อ่อนจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
รศ.ดร. แคนทีเลีย ปัทมพรหม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. มรรายาท รุจิวิชัย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ทพญ.ดร.ศิริวรรณ สืบบุญการณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ไพศาล นามผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ชินนะพงษ์ บำรุงทรัพย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.อรุณพร อิชูรัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ภก.ดร.บุญชู ศรีตุลารักษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.พัชรวิทย์ ปิ่นเหนงเพ็ชร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร. ศาकुณ บุญอิต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.พญ. อรพรรณ โพชนุกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ. ดร. บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ กิจกาญจนารัตน์	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 สิปรีชานนท์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร. วารุณี กลิ่นไกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. พิเศษฐ์ แสงชูโต	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ. ประสิทธิ์ สันติกายจน์	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ผศ.ดร.ประภาส ปิ่นตบแต่ง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ยุบลวรรณ ต้นเฮียรรัตน์	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ผศ.มณฑล ใจกุศล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ.ญาณวุฒิ สุพิชฌายากร
 ผศ.ดร.พระพิพัฒน์ ภาสบุตตร
 ผศ.ดร. พรพรรณ วีระปรียากร
 ผศ. กนกพันธ์ณ์ โลกุตรวงค์
 ดร.นฤมล ทับจุมพล
 ดร.วราภรณ์ กลิ่นบุญ
 ดร.ณัฐ มากุล
 ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาศ
 ทพญ.ดร.กมลพรรณ ภัคดี
 ดร.ธันยวัต สมใจทวีพร
 ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์
 ดร.ธีรเวทย์ ประมวลรัฐการ
 ดร.ภาสกร อินทุमार
 ดร.ธาดรี ใต้ฟ้าพูล
 ดร.สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย
 ดร.วีรชัย โรยนรินทร์
 ดร. กริช เจียมจิโรจน์
 ดร. สัมปิ่นนันทน์ เอกอำพน
 ดร.นพรัตน์ พงษ์ทวีศักดิ์
 ดร.สโรชา เจริญวัย
 ดร. อรรถพร วิเศษสินธุ์
 ดร.วรรณิ์ เอกศิลป์
 ดร.ฉมรรัตน์ แก้วประดับ
 ดร. สมชาย ศรียาบ
 อาจารย์เสกสรรค์ สุธธิสงค์
 อาจารย์วีชระ ลอยสมุทร
 อาจารย์จตุพร สลากุลเจริญ

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 023	การเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของจักรยานยนต์ไฟฟ้าและจักรยานยนต์ กรณีศึกษามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต <i>โชคชัย แสนสีละ, วรรัตน์ ปัตร์ประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร</i>	23
Sci-Tech 024	การประยุกต์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ในการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของ โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากฟาร์มโคนม <i>ใจสิภา มิ่งไทยสงค์, วรรัตน์ ปัตร์ประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร</i>	24
Sci-Tech 025	การใช้ฟัซซี่ลอจิกกับเครื่องปรับอากาศชนิดอินเวอร์เตอร์โดยอยู่บนพื้นฐานของการ ประหยัดพลังงานและความพึงพอใจของมนุษย์ สำหรับพื้นที่ในเขตร้อนชื้น <i>ชุติมา ปลอดโปร่ง, วรรัตน์ ปัตร์ประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร</i>	25
Sci-Tech 026	ศึกษาการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งมวลขนใน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต <i>วริศรา เปลียนกลั่น, วรรัตน์ ปัตร์ประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร</i>	26
Sci-Tech 027	การจำลองสถานีชาร์จรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าและศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าใน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต <i>นพรัตน์ โสภารุณ, วรรัตน์ ปัตร์ประกร, พระพิพัฒน์ ภาสบุตร</i>	27
Sci-Tech 028	การวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจาก เปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับ ระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง <i>วันชนะ ยิงยีน สโรชา เจริญวัย สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช</i>	28
Sci-Tech 029	การศึกษาเชิงทดลองในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัด (แปรรูปมาจากเปลือกทุเรียน หมอนทอง) โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดบ้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบ ลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง <i>อนุชิต จิวหัย สโรชา เจริญวัย สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช</i>	29
Sci-Tech 030	การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและทดลองสำหรับปัญหาการซึมผ่านของน้ำในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัว ใน 1 มิติ <i>ฐิติพันธ์ สมถวิล สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช</i>	30
Sci-Tech 031	การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มโดยเอทานอล <i>นัชญา พัฒน์ชนะ และ ผศ. ดร.มาลี สันติคุณมากรณ์</i>	31
Sci-Tech 032	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ในเศษอาหารต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ <i>นางสาววรางคณา ริมปีกุล และ ผศ.ดร.มาลี สันติคุณมากรณ์</i>	32



Sci-Tech 028

การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1
18 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง
Energy and Efficiency Analyses in Drying Process of Particleboards from Montong durian peel Using a NCombined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB)

วันชนะ ยิ่งยี่น¹ สโรชา เจริญวัย^{1*} สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย² และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพโดยทำการทดลองกระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงต่อเนื่อง โดยโครงสร้างของระบบประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ขนาด 800 W จำนวน 12 ตัว ติดตั้งภายในตำแหน่งสมดุลงภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 90 cm. × 45cm. × 270 cm. และเครื่องกำเนิดลมร้อน ที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงสุด 240 °C วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ขนาด 20 × 20 เซนติเมตร พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ กำลังไมโครเวฟ (2400 W) อุณหภูมิลมร้อน (40, 50, และ 60 °C) จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อน มีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน ผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

คำหลัก: พลังงาน, ประสิทธิภาพ, การอบแห้ง, ไมโครเวฟ, แผ่นขึ้นไม้อัด

Abstract

The paper presents the energy and efficiency analysis in drying process of particleboards from Montong durian peel using microwave energy and hot-air in a continuous belt system, consists of twelve 800 watts 2.45 GHz coupled into the cavity wall inside the system. A rectangular microwave cavity of dimensions 45 cm × 90 cm × 270 cm combined with hot-air generator having the maximum operating temperature at 240 °C was chosen. Particleboards from Montong peel with dimension of 20cm × 20 cm were manufactured. The parameter are microwave power (2400 W), temperature of hot-air (40, 50, and 60 °C). The results show that variation of hot-air temperature affects the drying time and Specific Energy Consumption. Furthermore the result of energy analysis can develop the higher efficiency of drying process.

Keywords: Energy, Efficiency, Drying, Microwave, Particleboards

บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในวิถีการดำเนินชีวิตของประชาชนชาวไทย โดยเฉพาะในด้านที่อยู่อาศัย การใช้วัสดุ ทดแทนไม้ธรรมชาติ เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยลดปัญหาจากสภาพปัญหาปัจจุบันที่ทรัพยากรป่าไม้มีจำนวน ลดลง ในขณะที่ความต้องการใช้ไม้ยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผลไม้ มีแนวโน้มสูงขึ้นในแต่ละปี ส่งผลทำให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มีจำนวน มากขึ้นเป็นเงาตามตัว ดังนั้นถ้าไม่สามารถกำจัดขยะเหล่านี้ก็จะส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงเกิดแนวคิดการ นำวัสดุเหลือใช้จำพวกเปลือกผลไม้ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ เช่น เปลือกทุเรียน เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีค่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ เท่ากับ $0.0921 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Khedari et al., 2002) เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวน ในการผลิตแผ่นฉนวนไม้อัดเพื่อเป็น วัสดุภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน ลดความร้อนภายในอาคาร เนื่องจากพลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากทั้งภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม และภาคธุรกิจ ดังนั้นการอนุรักษ์ และประหยัดพลังงานจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการใช้พลังงาน โดยการนำวัสดุที่มีค่าการนำความ ร้อนต่ำ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เช่น ความสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า เนื่องจาก เครื่องปรับอากาศและประเทศไทยมีภูมิอากาศเขตร้อนชื้น การถ่ายเทความร้อนภายนอกอาคารเข้าสู่อาคารได้ โดยง่าย แผ่นฉนวนไม้อัดที่ผลิตได้นี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นอกจากนี้แผ่นฉนวนไม้อัด ยังสามารถกำหนดขนาดได้ (Charoenvai., 2555)

สำหรับกระบวนการผลิตแผ่นฉนวนไม้อัดมีการใช้กระบวนการอบแห้งในการอบแผ่นเพื่อลดความชื้น โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมนั้นมีหลายกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง กรรมวิธีในการอบแห้งนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง การอบแห้งโดยใช้ ลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำ โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา (conventional hot-air drying) ได้มี การพัฒนาเทคนิคการอบแห้งหลากหลายรูปแบบ เพื่อเป็นทางเลือกในการอบแห้ง ที่สำคัญได้แก่ การอบแห้งด้วย ลมร้อนในสูญญากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อนฟลูอิดิซด์ (fluidized bed) การอบแห้งด้วยอินฟราเรด และการ อบแห้งด้วยไมโครเวฟ เทคนิคการอบแห้งที่กล่าวมา มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน (Ratanadecho et al., 2010) ซึ่งวิธีการที่ใช้อยู่กันทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากชิ้นงานจะได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือสม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพเปลี่ยนไป จึง เป็นที่มาของการออกแบบวิธีใหม่ในการกำจัดปัญหาที่เกิดขึ้น การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟก็เป็นวิธีหนึ่ง ที่ มีประสิทธิภาพสูงและยังเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพลังงาน ไมโครเวฟสามารถกักเก็บความร้อนภายในวัสดุได้อย่างรวดเร็ว การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานนั้น จะ สามารถช่วยประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาในการอบแห้ง วัสดุฉนวนจะได้รับความร้อนทั่วถึงพร้อมกันตลอด ทั้งชิ้น เป็นผลทำให้การกระจายของความชื้นในโครงสร้างเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เมื่อรวมเอาเทคนิคไมโครเวฟเข้า ร่วมกับลมร้อน จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจะให้ ความร้อนได้ที่ผิว หลังจากนั้นเมื่อความชื้นที่บริเวณผิวลดลงจึงให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากที่ผิว สามารถทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดความร้อนจากภายใน

ผลิตภัณฑ์จึงสามารถขับเคลื่อนความชื้นมาสูผิวหน้าได้รวดเร็ว ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่น ไมโครเวฟระหว่าง 0.3 ถึง 300 GHz หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 cm. ถึง 0.3 mm. มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรม (ผดุงศักดิ์, 2551) งานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมา [1-8] ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง การทำความร้อนและอบแห้งวัสดุในประเภทต่างๆ ที่ใช้พลังงานไมโครเวฟ ได้แก่ Jindarat et al. [1] ได้ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบความร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง เพื่อเปรียบเทียบค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) Prommas et al. [2] ได้ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานและเอ็กเซอร์จีในระบบการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบความร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ทางเข้าก่อนการอบแห้งและทางออกหลังการอบแห้งที่มีผลต่ออุณหภูมิการอบแห้ง วิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสียและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี Rattanadecho et al. [3] ได้ทำการศึกษากลศาสตร์กระบวนการอบแห้งวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการศึกษาคือยางพารา และชรามิกซ์ Varith et al. [4] ได้ทำการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับความร้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นและการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) ที่ระดับอุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C กำลังไมโครเวฟ 100, 180, 300 และ 450 W

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากลศาสตร์การวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพโดยทำการทดลองในระบบการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้จากเปลือกทุเรียนหมอนทอง โดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบความร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง เพื่อเปรียบเทียบค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพพลังงาน โดยค้นคว้าทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (40 50 และ 60 °C) กำลังไมโครเวฟ (2400 W) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งแผ่นขึ้นไม้ถัดต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าค่ากำลังการดูดซับคลื่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ แต่วัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ดังนี้ [3]

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

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ ϵ_r' คือ relative dielectric constant ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย ϵ_0 คือ Dielectric Constant ของอากาศ และ $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient ซึ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับพลังงานความร้อน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า $\tan\delta$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าวัดค่า $\tan\delta$ ของแผ่นขึ้นไม้อัดมีค่ามาก จะส่งผลให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟและปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากไปด้วย แต่ถ้าวัดค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านแผ่นขึ้นไม้อัดโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่าความชื้น (Moisture content) ลักษณะของแผ่นขึ้นไม้อัดและขนาดของแผ่นขึ้นไม้อัด ค่าความถี่ในการทะลุทะลวงหรือระยะทางที่สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 2 [3]

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

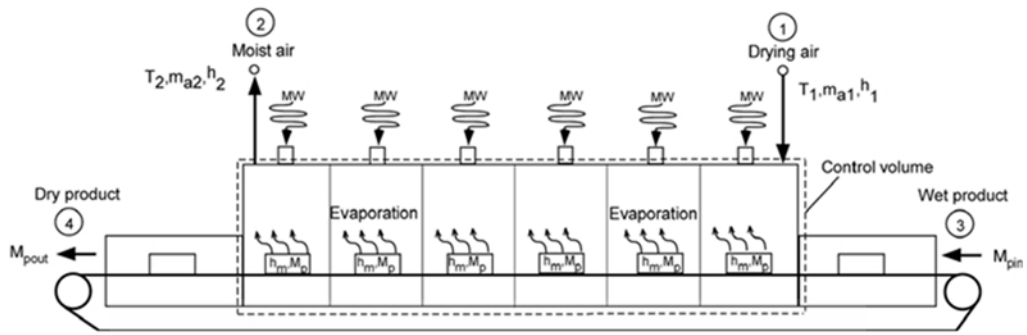
เมื่อ v = ความเร็วแสง (3×10^8 m/s) f คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ϵ_r' คือ relative dielectric constant $\tan\delta$ คือ Dielectric Loss Tangent Coefficient

จะเห็นว่าค่า Dielectric Constant และ Loss Tangent Coefficient เปลี่ยนความถี่ในการทะลุทะลวงและสนามไฟฟ้าภายในวัสดุใดก็ตามก็จะต้องเปลี่ยนแปลงด้วย

การสมดุล มวล พลังงานในกระบวนการอบแห้ง

จากกฎการอนุรักษ์มวลของปริมาณควบคู่ตามรูปที่ 1 ทำการสมดุลมวลเมื่อ \dot{m}_{g1} ที่จุด 1 และ \dot{m}_{g2} ที่จุด 2 เป็นอัตราการไหลเข้าและออก W_c เป็นมวลของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัด X_1 และ X_2 เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศเข้าและออกจะได้สมการสมดุลมวลของกระบวนการอบแห้งดังนี้ [1]

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{g1} - \dot{m}_{g2} \quad (3)$$



รูปที่ 1 กระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อน และสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง [1]

$$W_d \frac{dM_p}{dt} = \dot{m}_a (X_1 - X_2) \tag{4}$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (X_1 - X_2) \tag{5}$$

เมื่อ W_d เป็นมวลของวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด (kg) \dot{m}_a เป็นอัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s) $X_{1,2}$ อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (kg water/kg dry air) \dot{m}_w อัตราการไหลของน้ำออกจากวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด (kg water/s)

สำหรับการวิเคราะห์การสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงานของระบบควบคุม เกิดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการพาความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของน้ำภายในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด ทำให้เกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดและความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม สมการสมดุลพลังงานเขียนได้ดังนี้ [1]

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} + \dot{E}_{st} = \Delta E_{system} \tag{6}$$

ในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดเมื่อมีการพาความร้อนและพลังงานไมโครเวฟจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการระเหยของน้ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยความสัมพันธ์สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้ [2]

$$\frac{W_d (h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_a (h_1 - h_2) + \dot{Q}_{mw} - \dot{Q}_{loss} \tag{7}$$

เมื่อ W_d เป็นมวลของวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด (kg) h_m เป็นเอนทาลปีของวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัด (kJ/kg) t เป็นเวลา \dot{Q}_{evap} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการระเหยของน้ำ (kJ/s) \dot{m}_a เป็นอัตราการไหลของ

อากาศแห้ง (kg/s) h เป็นเอนทาลปีของอากาศแห้ง (kg/kg) \dot{Q}_{MW} เป็นพลังงานไมโครเวฟ (kW) \dot{Q}_{loss} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม (kJ/s)

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นการประเมินจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบความร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง พิจารณาจากการป้อนพลังงาน ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C, 50 °C และ 60 °C ความเร็วลม 0.5 m/s กำลังไมโครเวฟ (เปิดแมกนีตรอน 3 ตัว) 2400 W การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) หาได้จากสมการดังนี้ [1]

$$SEC = \frac{\text{Total electrical power supplied in drying}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kW-hr}{kg} \right] \quad (8)$$

$$SEC = \frac{P_{total}}{\text{Amount of water removed during drying}} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (9)$$

เมื่อ P_{total} คือพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง สามารถหาได้จากสมการที่ 10

$$P_{total} = P_{mg} + P_{heater} + P_{exfan} + P_{cofan} + P_{con} \quad [kW \times 3600s] \quad (10)$$

เมื่อ P_{mg} เป็นพลังงานไฟฟ้าจำหน่ายใน magnetron, P_{heater} เป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องทำความร้อน, P_{exfan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมดูดอากาศ, P_{cofan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมเป่าลม, P_{cofan} เป็นพลังงานไฟฟ้าพัดลมระบายความร้อน และ P_{con} เป็นพลังงานไฟฟ้าระบบสายพานลำเลียง

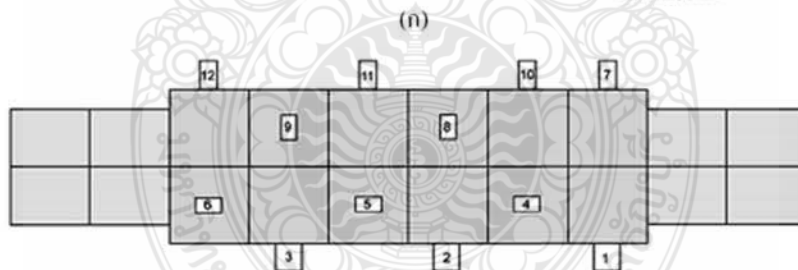
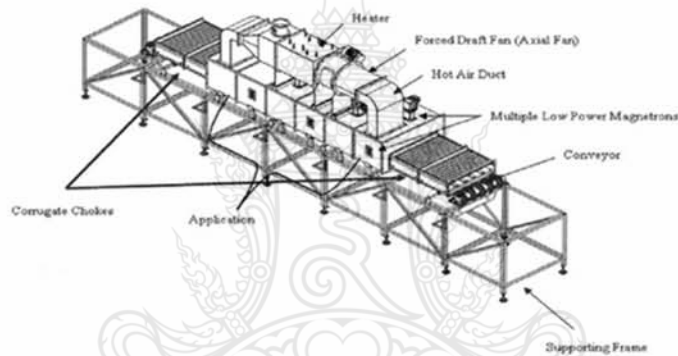
การหาประสิทธิภาพพลังงาน ของกระบวนการอบแห้งสามารถหาได้จากสมการ [1]

$$\eta_e = \frac{W_d [h_{fg} (M_{p1} - M_{p2}) + c_m (T_{m2} - T_{m1})]}{m_{da} (h_1 - h_0) \Delta t + \Delta t \dot{Q}_{MW}} \quad (11)$$

เมื่อ c_m เป็นค่าความร้อนจำเพาะของแผ่นจีนไม้อัด (kJ/kg K) M_p เป็นปริมาณความชื้นของแผ่นจีนไม้อัด (kg water/kg solid)

วิธีการทดลอง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟชนิดบ่อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง ที่ทางหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME.) พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในตู้ไมโครเวฟที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ซึ่งภายในระบบจะ



(ข)

รูปที่ 2 (ก) ระบบไมโครเวฟชนิดบ่อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (ข) ตำแหน่งแมกนีตรอน 12 ตัว (800 วัตต์/ตัว)

ติดตั้งแมกนีตรอน คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ใช้งาน 12 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) และเครื่องกำเนิดลมร้อน อุณหภูมิสูงสุดทำได้โดยประมาณ 240 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) วัสดุอุณหภูมิร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งอยู่รอบๆ บริเวณทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความ

ร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกเนตรอนตามตำแหน่งต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออกระบบไมโครเวฟมีระบบการคักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 mW/cm^2 สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถ วัดได้ที่ตำแหน่งปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) วัสดุทดสอบเป็นแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด $20 \times 20 \text{ cm}$.

การอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ทำการวัด ความชื้นเริ่มต้นและทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกก่อนการทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ โดยมีการวัดอุณหภูมิที่ผิวภายนอก ชั่งน้ำหนัก และวัดความชื้นสุดท้ายลงเหลือของแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง จากนั้นนำแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ทดลองเสร็จแล้วไปทำการตรวจสอบคุณภาพ ด้วยการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลซึ่งแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้อบนั้นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-40 % (Dry Basis) และมีอุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

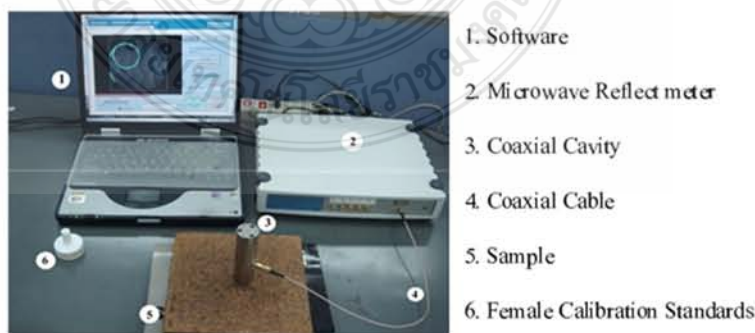
การทดลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณี 1 ใช้แมกเนตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิความร้อนที่ $40 \text{ }^\circ\text{C}$ แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด $20 \times 20 \text{ cm}$.

กรณี 2 ใช้แมกเนตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิความร้อนที่ $50 \text{ }^\circ\text{C}$ แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด $20 \times 20 \text{ cm}$.

กรณี 3 ใช้แมกเนตรอนจำนวน 3 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) 2400 W อุณหภูมิความร้อนที่ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลอง มีส่วนประกอบคือ เส้นใย, ผง และน้ำ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 4 สูตร คือ 1:1:1, 1:1:1.5, 2:1:1.5, 2:1:2 ตามลำดับ ขนาด $20 \times 20 \text{ cm}$.

การวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยการวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เชิงลึกเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการ



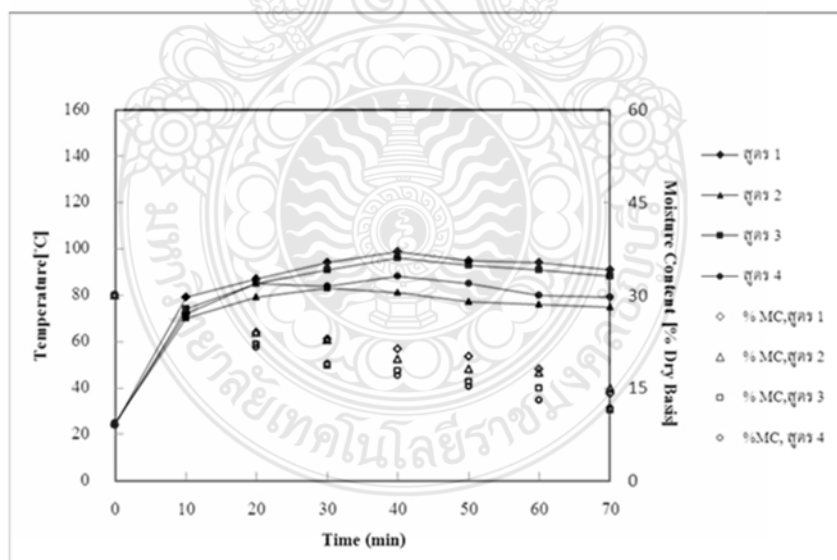
รูปที่ 3 เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ [1]

ไมโครเวฟเพราะสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ตัวเครื่องมีมือจับประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบเช่น การรักษาสัญญาณไมโครเวฟ การคำนวณสัญญาณรวม การเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าวมาแสดงเป็นกราฟ ควบคุมการทำงานด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายใน วัสดุที่ถูกทดสอบ จากนั้นจะตรวจจับความถี่การสั่นพ้องของคลื่นภายในหัววัด (cavity) รวมไปถึงปัจจัยคุณภาพ (quality factor) และนำข้อมูลที่ได้แปรกลับเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ

ขั้นตอนการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก นำวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน ใช้เครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า $\tan \delta$

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความชื้นที่เวลาอบแห้งต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิต่างกันมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยความชื้นจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การอบแห้งแต่ละครั้งใช้แผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง 4 สูตร ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 - 40 % Dry Basis จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 10 - 15 % Dry Basis ในช่วงแรกประมาณ 0 - 15 นาทีแรก นั้นความชื้นในวัสดุแผ่นชิ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความชื้นภายในมีมาก เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิหม้อร้อน 40 °C พบว่าความชื้นของแผ่นชิ้นไม้อัดจะลดลงอย่างรวดเร็วและจะลดลงตามความร้อนของ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิหม้อร้อน 40 °C

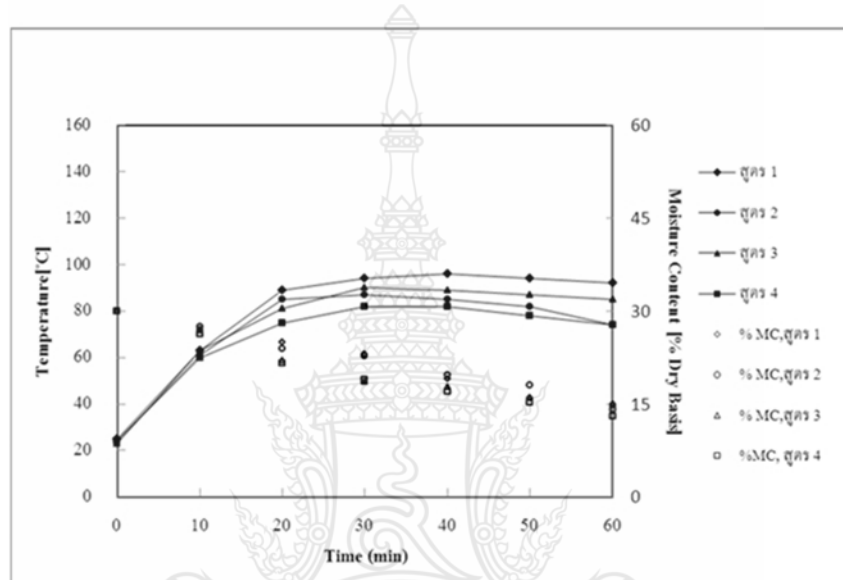
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากในตอนเริ่มต้นวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีค่าความชื้นสูง จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูงความร้อนจึงสูงตามไปด้วย ประกอบกับวัสดุนั้นมีลักษณะเป็นขี้ไฟฟ้า ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างขี้ทางไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุโดยจะเริ่มร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานมีค่าลดลง ความร้อนจึงลดลงตามด้วย

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทอง

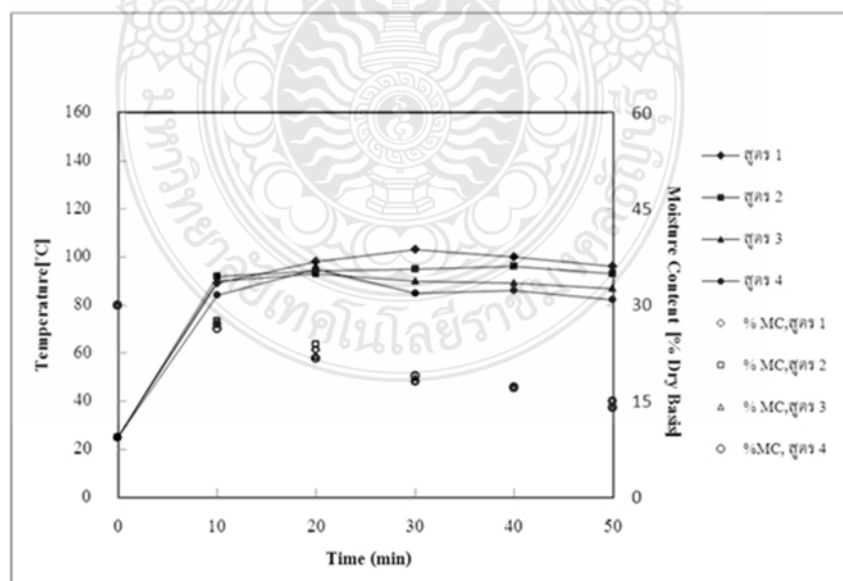
ชุด ที่	แผ่นขึ้น ไม้อัด	ก่อนอบแห้ง			หลังอบแห้ง		
		ค่า Dielectric constant (ϵ_r')	ค่า Dielectric loss factor (ϵ_r'')	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan\delta$)	ค่า Dielectric constant (ϵ_r')	ค่า Dielectric loss factor (ϵ_r'')	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan\delta$)
1	1:1:1	2.18862	0.345547	0.157533942	1.90439	0.177017	0.091730295
	1:1:1.5	2.14632	0.379913	0.176934528	1.39721	0.149143	0.106762260
	2:1:1.5	2.25451	0.446069	0.197688973	1.50868	0.153686	0.101922313
	2:1:2	2.31650	0.443787	0.191471577	1.56934	0.158107	0.100776590
2	1:1:1	2.37493	0.525012	0.220931119	1.47808	0.149881	0.101408071
	1:1:1.5	2.39608	0.539043	0.224797550	1.46129	0.144333	0.098767882
	2:1:1.5	2.23818	0.455578	0.203464611	1.45320	0.148527	0.102228164
	2:1:2	1.88531	0.306049	0.162227395	1.45208	0.146113	0.100649968
3	1:1:1	2.59829	0.610489	0.234860799	1.46776	0.145119	0.098867097
	1:1:1.5	2.18999	0.419730	0.191616784	1.41330	0.140657	0.099526315
	2:1:1.5	2.72758	0.677368	0.255083833	1.62878	0.154793	0.095073949
	2:1:2	2.23574	0.422795	0.189115917	1.46175	0.144434	0.098820191

จากรูปที่ 5 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 50 °C แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา พบว่าในช่วงเริ่มต้น แผ่นขึ้นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองมีการดูดซับกำลังไมโครเวฟที่คืบคั้งจากนั้นการดูดซับลดลงเนื่องมาจากในช่วงแรกแผ่นขึ้นไม้อัดมีความชื้นมาก จึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูงความร้อนจึงสูงตามไปด้วย และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นของแผ่นขึ้นไม้อัดลดลงทำให้การดูดซับพลังงานลดลง ค่าอุณหภูมิจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิความร้อน 40 °C พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้น จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากแผ่นขึ้นไม้อัดได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 6 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิร้อน 50 °C แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอุณหภูมิกับเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิร้อนอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของแผ่นชิ้นไม้ไผ่ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น แผ่นชิ้นไม้ไผ่มีการดูดซับกำลังไมโครเวฟลดลง แต่ความร้อนสะสมในแผ่นชิ้นไม้ไผ่ยังมีค่าสูง ทำให้อุณหภูมิแผ่นชิ้นไม้ไผ่มีค่าสูงอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิร้อน 40 °C และ 50 °C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะช่วยให้ค่าความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากแผ่นชิ้นไม้ไผ่ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดด้วย

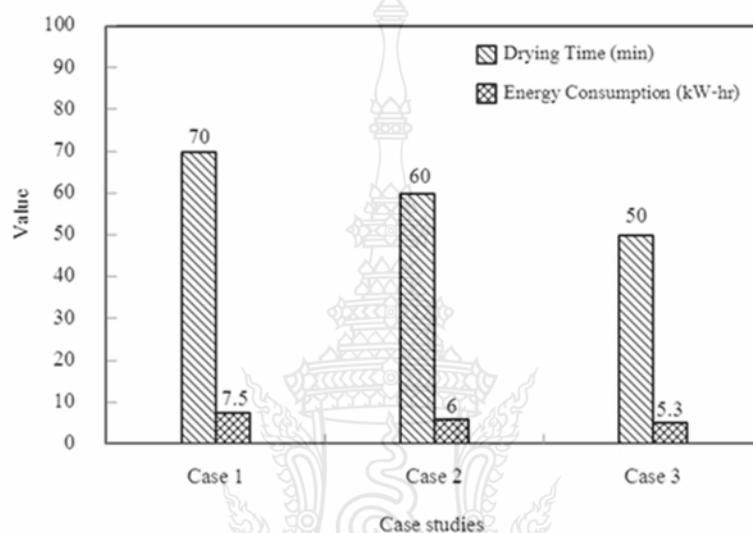


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิร้อน 50 °C



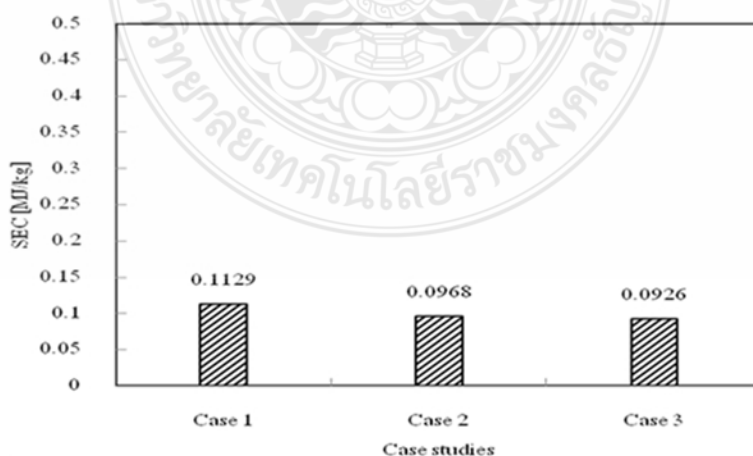
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับเวลา กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิร้อน 60 °C

จากรูปที่ 7 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้งแผ่นจีนไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง กรณี 1 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 7.5 kW/h กรณี 2 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 6 kW/h กรณี 3 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 5.3 kW/h โดยในกรณี 3 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C การใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่ากรณี 1 และกรณี 2 การอบแห้งโดยมีกำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C และ 50 °C ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในแผ่นจีนไม้อัดให้มากขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลงตามด้วย



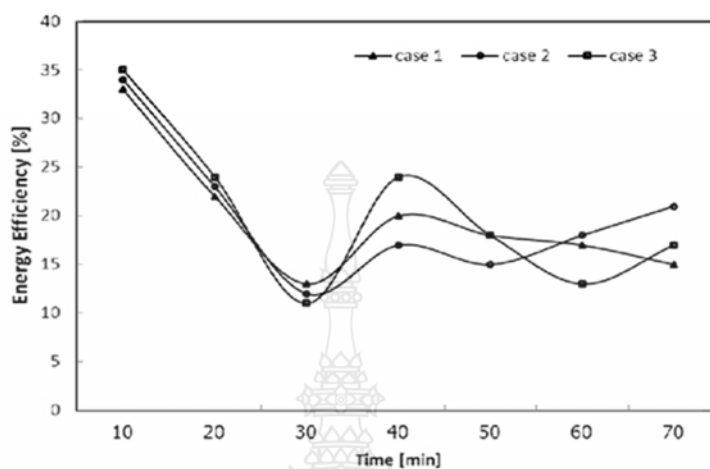
รูปที่ 7 การใช้พลังงานกำลังไฟฟ้าในกระบวนการอบแห้ง

จากรูปที่ 8 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการทดลองการอบแห้งแผ่นจีนไม้อัดจากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง กรณี 1 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 40 °C กรณี 2 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 50 °C กรณี 3 ใช้กำลังไมโครเวฟ 2400 W อุณหภูมิลมร้อน 60 °C ค่าการสิ้นเปลือง



รูปที่ 8 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะใน กระบวนการอบแห้ง (Specific Energy Consumption in Drying Process)

พลังงานจำเพาะเท่ากับ 0.1129, 0.0968 และ 0.0926 MJ/kg ตามลำดับ โดยในกรณี 3 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 0.0926 MJ/kg เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เมื่อใช้อุณหภูมิร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง

จากรูปที่ 9 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง กรณี 1, 2, และ 3 พบว่าในช่วงแรก 0 – 15 นาที ประสิทธิภาพการใช้พลังงานมีค่าใกล้เคียงกันเพราะในช่วงแรกปริมาณความชื้นในแผ่นชิ้นไม้อัดมีอยู่มากการดูดซับคลื่นได้น้ำปริมาณที่สูงทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงตามไปด้วย หลังจากนั้นการขับเคลื่อนไอน้ำสู่ผิวหน้าของแผ่นชิ้นไม้อัดเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้ความชื้นลดลง การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้น้ำปริมาณที่น้อยทำให้พลังงานที่นำมาใช้จึงลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดลงตามไปด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

สรุปผลการทดลอง

การอบแห้งแผ่นชิ้นไม้อัด จากเปลือกทุเรียนหมอนทองด้วยไมโครเวฟชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งที่ไม่สมมาตรร่วมกับระบบลมร้อนและสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง พบว่าในตอนเริ่มต้นวัสดุมีความชื้นสูง จึงให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานสูงประกอบกับวัสดุนั้นมีลักษณะเป็นขี้ทางไฟฟ้า ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างขี้ทางไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ (Rattanadecho et al., 2010) โดยวัสดุจะเริ่มร้อนขึ้นทั้งก้อน (Volumetric Heating) ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็วและเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนพลังงานมีค่าลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีค่า Dielectric Properties ค่าจึงทำให้ค่า Dielectric loss tangent coefficient น้อย นอกจากนี้การใส่พลังงานลมร้อนในกระบวนการอบแห้ง จะช่วยให้ความชื้นสามารถเคลื่อนตัวออกจากผิววัสดุได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง พลังงานที่ใช้ก็จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อนทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สามารถนำไปพัฒนาในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณงบประมาณแผ่นดินจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนเงินในการดำเนินการวิจัย และสมาชิกในหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME.) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Prommas, R., Rattanadecho, P. and Jindarat, W., 2012, "Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB)" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, pp.242-250.
- [3] Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Watanasungsuit, A. and Duangduen, A., 2007, "Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace.", *ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering*, Vol. 129 (1), pp. 157-163.
- [4] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S., 2007, Combined Microwave-Hot air Drying of Peeled Longon, *Journal of Food Engineering.*, Vol.31, pp. 459-468.
- [5] Rattanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, "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 (1), 2002, pp. 151-161.
- [6] Rattanadecho, P., Duangduen, A., Vongpradubchai, S., 2006, "Drying of a Slip Casting for Tableware Product Using Microwave-Continuous Belt Furnace.", *Drying Technology An International J.*, Vol. 26, pp. 589-594.
- [7] Jindarat, W., Rattanadecho, P. and Vongpradubchai, S., 2011, "Analysis of Energy Consumption in Microwave and Convective Drying Process of Multi-Layer Porous Material Inside a Rectangular Wave Guide", *Experimental Thermal and Fluid Science*. 35, pp. 728-737.
- [8] Prommas, R., Keangin P. and Rattanadecho, P., 2010, "Energy and Exergy Analyses in Convective Drying Process of Multi-layered Porous packed bed" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, pp.1106-1114.
- [9] Prommas, R., Rattanadecho, P. and Cholaseuk, D., 2010, "Energy and Exergy Analyses in Drying Process of Porous Media Using Hot Air" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, pp.372-378.
- [10] Vongpradubchai, S., Rattanadecho, P., 2011, " Microwave and Hot Air Drying of Wood Using a Rectangular Waveguide" *Drying Technology An International J.*, Vol. 29, pp. 451-460.
- [11] Vongpradubchai, S., Rattanadecho, P., 2009, "The Microwave Processing of wood using a continuous microwave belt drier" *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol 48(5), pp 997-1003.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายวันชนะ ยิ่งยืน
วัน เดือน ปีเกิด	24 พฤษภาคม 2530
ที่อยู่	59 หมู่ที่ 5 ตำบล ตาลโกน อำเภอ สว่างแดนดิน จังหวัด สกลนคร 47240
การศึกษา	
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษาปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

