



การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลาย
สถานะในวัสดุพูนไม้ยางพาราภายใต้พลังงานไมโครเวฟ
เชิงทฤษฎีและประยุกต์

โดย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

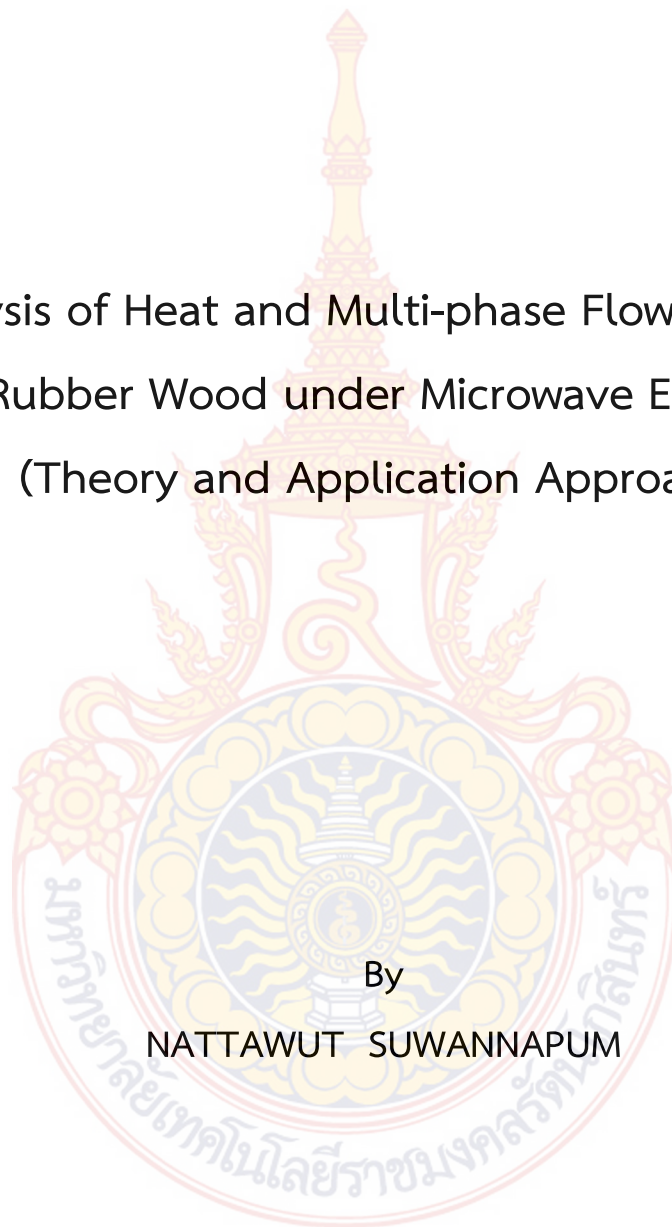
All rights reserved

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2557

Analysis of Heat and Multi-phase Flow in Porous
Rubber Wood under Microwave Energy
(Theory and Application Approach)



By
NATTAWUT SUWANNAPUM

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2014

กิตติกรรมประกาศ

จากการที่ผลงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี ผู้วิจัยใคร่กราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญาเลขที่ A14/2557 ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ที่ให้ความกรุณาอย่างสูง ในการแนะนำสิ่งที่มีประโยชน์แก่การทำวิจัยนี้ ติ๊กปฏิบัติการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือทดสอบที่จำเป็นต่องานวิจัย รวมไปถึงครอบครัวข้าพเจ้า และผู้ที่มีส่วนร่วมในโครงการวิจัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมา

ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ

สิงหาคม 2557

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : A14 / 2557
ชื่อโครงการ : การวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพอรุนไม้อย่างพารา
ภายใต้พลังงานไมโครเวฟเชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์
ชื่อนักวิจัย : ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพอรุนไม้อย่างพาราภายใต้พลังงานไมโครเวฟ และการศึกษาเชิงทดลองควบคู่กัน เพื่อให้สามารถใช้งานเชิงวิเคราะห์ผลและวิจัยกับงานวิจัยร่วมกันในอนาคตได้ การแบบจำลองเริ่มจากการศึกษาข้อมูลทางทฤษฎี และเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะพัฒนา จากนั้นทำการปรับปรุงแก้ไขแบบให้เหมาะสมกับแบบจำลองที่ได้ไปแปลงเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม แล้วจึงนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวมาประดิษฐ์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้จำลอง วิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิ การเคลื่อนตัวของของไหลสภาวะต่าง ภายในวัสดุพอรุนไม้อย่างพารา ส่วนการทดลองพัฒนาเครื่องมือทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่มีเงื่อนไขขอบเขตแบบเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมพื้นฐานและใช้เป็นฐานข้อมูลในการเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานในการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพอรุนไม้อย่างพาราได้ในภาพกว้างๆ แต่ไม่สามารถให้ผลที่สอดคล้องกันกับงานทดลองอย่างชัดเจน ในขณะที่การทดลองให้ผลหลายอย่างที่นาสนใจเพื่อเป็นประเด็นศึกษาต่อไปในอนาคต

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

คำสำคัญ : ความร้อนและการไหลหลายสถานะ วัสดุพอรุนไม้อย่างพารา พลังงานไมโครเวฟ

E-mail Address : nattawut.suw@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2556 – กันยายน พ.ศ. 2557

Abstract

Code of project : A14 / 2557

Project name : Analysis of Heat and Multi-phase Flow in Porous Rubber Wood under Microwave Energy (Theory and Application Approach)

Researcher name : Nattawut Suwannapum, Ph.D.

This research is development on heat and multi-phase flow in porous rubber wood under microwave energy. It is developed to use as a numerical research tool for experimental research in future. The study was start by theoretical model at first and then derives the mathematical model. Next step was transform mathematical model into numerical model using finite different method. Then computer program was created from numerical model, was used for analyses temperature distribution and multi-phase flow behavior inside porous rubber wood under microwave energy.

The results showed that the mathematical model could be use as tool for analysis of heat and multi-phase flow in porous rubber wood under microwave energy.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

Keywords: Heat and Multi-phase Flow Porous Rubber Wood Microwave Energy

E-mail Address : nattawut.suw@rmutr.ac.th

Period of project : OCTOBER 2013 – SEPTEMBER 2014

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์การวิจัย	3
3. คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย	4
4. กรอบแนวคิดการวิจัย	4
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	18
6. นิยามศัพท์เชิงปฏิบัติการ	18
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	20
1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	20
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	48
1. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองพฤติกรรมภายในวัสดุ	48
2. ขั้นตอนการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม	49
3. การทดลองผลเพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	51
บทที่ 4 ผลการวิจัย	62
1. กรณีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	62
2. กรณีการทดลอง	67

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5	สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	76
	1. สรุปผลการวิจัย	76
	2. อภิปรายผล	77
	3. ข้อเสนอแนะ	77
	บรรณานุกรม	78
	ภาคผนวก	80
	ประวัติผู้วิจัย	81



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับไมโครเวฟ	3
3-1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนสำหรับวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกสำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	50
3-2 สมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสภาวะการทำความร้อน	50
3-3 สมบัติไดอิเล็กตริกของไม้จากการศึกษาทดสอบจากเครื่องวัสดุสมบัติไดอิเล็กตริก และจากการสืบค้นข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม	51

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ	5
1-2 ระบบทำความร้อนโดยใช้แอฟฟลิเคเตอร์ลักษณะเรโซแนนซ์โหมดเดียว	6
1-3 การประยุกต์ใช้แอฟฟลิเคเตอร์แบบมัลติโหมด	7
1-4 แอฟฟลิเคเตอร์แบบแผ่นคู่ขนาน	7
1-5 โครงสร้างของวัสดุพอรุนทั่วไป	14
1-6 โครงสร้างของวัสดุพอรุนแบบไฮโกรสโคปิก	15
1-7 ความแตกต่างทางโครงสร้างวัสดุพอรุนแบบนอนไฮโกรสโคปิกและไฮโกรสโคปิก	15
1-8 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร	16
2-1 โครงสร้างวัสดุพอรุนทั่วไป	22
2-2 โครงสร้างวัสดุพอรุนแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary)	22
2-3 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอรุน	23
2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพอรุนและคุณสมบัติของของไหล	23
2-5 ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพอรุน	24
2-6 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร	25
2-7 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก	26
2-8 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง	27
2-9 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย	28
2-10 ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ	33
2-11 การเกิดความร้อนของวัสดุ	34
2-12 ปฏิกริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า	38
2-13 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก	43
3-1 โดเมนทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	48
3-2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	49
3-3 เครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์ใช้วัดสมบัติไดอิเล็กตริก	50
3-4 ชุดทดสอบกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟโหมดที่ 10 ในวัสดุพอรุนยางพารา	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-10	67
4-11	67
4-12	68
4-13	69
4-14	69
4-15	70
4-16	71
4-17	71
4-18	72
4-19	72
4-20	73
4-21	74
4-22	74

- 4-23 การกระจายตัวอุณหภูมิในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการทำความร้อนด้วยลมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์ ร่วมกับการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ต้นยางพาราจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่ทางภาครัฐได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการปลูกจนประเทศไทยสามารถเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลกในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นยางธรรมชาตินั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ 1 ยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลผลิตหลักในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตสินค้าเชิงอุตสาหกรรมหลายชนิด และ 2 ต้นยางพารา ซึ่งเป็นผลผลิตรองหลังจากที่ต้นยางไม่สามารถผลิตน้ำยางได้มีคุณภาพแล้ว โดยนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมปลายทางที่เกี่ยวข้องกับไม้หลายชนิด อาทิเช่น อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ วัสดุก่อสร้าง ของเล่น และของที่ระลึก เป็นต้น

สำหรับการนำต้นยางพารามาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น ขั้นตอนสำคัญอย่างหนึ่งคือ ต้องมีการนำเนื้อไม้ไปผ่านกระบวนการไล่ความชื้น หรืออบแห้งไม้เพื่อลดปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ให้สอดคล้องกับสภาวะอากาศ เนื่องจากปริมาณน้ำหรือความชื้นในไม้ยางพารามีอยู่สูงมาก หากนำไปใช้งานโดยไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหาการยืดหรือหดตัวของไม้ จนก่อให้เกิดปัญหาการรอยแตกของเนื้อไม้ (Cracking) การแตกตามหัวไม้ (Splitting) และการบิดงอ (Warping) อันส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้ได้ นอกจากนี้การลดความชื้นในเนื้อไม้ ยังช่วยลดโอกาสเกิดการเจริญเติบโตของเชื้อรา โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมที่หน่วยงานต่างๆ แนะนำอยู่ที่ประมาณร้อยละ 8 ถึง 16 โดยส่วนใหญ่โรงเลื่อยจะควบคุมความชื้นของไม้ในระดับไม่เกินร้อยละ 12

ในกระบวนการไล่ความชื้นในเนื้อไม้โดยทั่วไปนั้น จะอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนและมวลภายใต้สภาวะการพาความร้อนและมวลที่ผิวของวัสดุ (Convective Heat and Mass Transfer) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการอบแห้งหลายชนิด แต่ข้อเสียหลักของกระบวนการดังกล่าวคือ ประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ (ประมาณ 20 - 30 เปอร์เซ็นต์)

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมทางด้านความร้อน เช่น การอบแห้งยางพารา การอบแห้งอาหาร อบแห้งสิ่งทอ อบแห้งไม้ และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก การทาสเตอริไลซ์ และอื่นๆอีกมากมาย กระบวนการไมโครเวฟยังได้ถูกนำไปใช้งานทางการแพทย์ เช่น การคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือด และ กาจัดเนื้องอก และการกำจัดเชื้อโรคออกจากขยะติดเชื้อ เป็นต้น นอกจากนี้ ไมโครเวฟยังสามารถนำไปใช้ในงานแยก

ส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยจากวัสดุ เช่น การแยกกำมะถันออกจากถ่านหินโดยการ Pre-combustion treatment และการแยกสารสกปรกออกจากดิน เป็นต้น ซึ่งสาเหตุหลักที่มีการนำกระบวนการทางไมโครเวฟ เนื่องจากมีข้อดีดังต่อไปนี้

1. เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านทะลุเข้าไปในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุจะกระจายสม่ำเสมอทำให้ความแห้งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ
 2. ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการสั้น คือประมาณหนึ่งในสิบของกระบวนการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดาทั่วไป และใช้งานกับวัสดุขึ้นหนาได้เป็นอย่างดี
 3. สามารถรักษาคุณภาพดั้งเดิมของวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ อาทิเช่น รูปทรง สี กลิ่น และน้ำหนัก
 4. มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง กล่าวคือประมาณ 60 – 70 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบวิธีธรรมดามี ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แค่ประมาณ 20 - 30 เปอร์เซ็นต์
 5. เนื่องจากระบบไม่มีการปล่อยควันไอเสียออกมาในระหว่างกระบวนการ ทำให้ไม่มีปัญหากับสิ่งแวดล้อม
 6. เนื่องจากในกระบวนการมีชิ้นส่วนทางานที่มีลักษณะเคลื่อนไหวมีน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง
 7. เนื่องจากในกระบวนการมีชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
- จากที่ข้อได้เปรียบที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีผู้พัฒนาการใช้งานทางด้านไมโครเวฟกับกระบวนการทำความร้อนมากมาย แต่อย่างไรก็ตามสำหรับงานที่ศึกษาในกลไกเชิงลึกที่มุ่งเน้นพฤติกรรมภายในวัสดุนั้น ยังมีไม่มากนัก และในการพัฒนาออกแบบในหลายครั้งจะประสบปัญหาสำคัญในการออกแบบระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟคือ ลักษณะการเกิดความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในโหลด (Heating Non-uniformity in Loaded) ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอภายในภาชนะ ทำให้เกิดจุดร้อนและจุดเย็น (Hot and Cold Spots) ตัวอย่างปรากฏการณ์จุดร้อนและจุดเย็นได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมลรันอะเวย์ (Thermal Runaway) ในบางส่วนของวัสดุส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายหรือมีคุณภาพต่ำ นอกจากนั้นในกรณีที่มีการถ่ายเทมวลออกจากกระบวนการทำความร้อนด้วยแล้ว จุดร้อนและจุดเย็นในวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นภายใน ซึ่งเหตุผลดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้นักวิจัยต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทมวลและความร้อนในระบบ แต่เนื่องจากการถ่ายเทมวลในวัสดุพูนที่มีความชื้นมากเช่นไม้ยางพารา นั้น พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะไฮโกรสโคปิก กล่าวคือ ภายในวัสดุพูนจะมีโพรงที่มีการถ่ายเทมวลหรือฟลักซ์ของไหลได้ด้วยกลไกอิสระ และมีของเหลวบางส่วนที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยพันธะทางเคมีอยู่ภายในโครงสร้างของแข็งและต้องอาศัยพลังงานในทำลายพลังงานเพื่อให้เกิด

กลไกความเคลื่อนไหวมากกว่าปกติ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยส่วนน้อยเท่านั้นที่ศึกษาในงานทางด้านการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุไฮโกรสโคปิกนี้ ยิ่งไปกว่านั้นในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุไฮโกรสโคปิกที่เกิดจากอิทธิพลจากไมโครเวฟหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยแล้วแทบจะไม่ปรากฏอยู่เลย อีกทั้งในประเทศไทยไม่มีการนำนั้นถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมในประเทศจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาแบบจำลองปรากฏการณ์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการถ่ายเทมวลสารและความร้อนภายในไม้อย่างพาราโดยตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทมวลสารและความร้อนเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนแบบขึ้นมากหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิก ซึ่งมีทั้งการถ่ายเทมวลสารภายใน และการเปลี่ยนแปลงของมวลความชื้นออกนอกระบบเมื่อเวลาเปลี่ยนไปอันส่งผลให้พฤติกรรมการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งผลจากแบบจำลองดังกล่าวทำให้ได้ พฤติกรรมทางกายภาพเพื่ออธิบายพฤติกรรมการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควิต์ที่ได้รับการออกแบบอย่างเสมือนจริงมากที่สุด ผลการศึกษาที่ได้สามารถอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนอย่างพาราและนำข้อมูลพฤติกรรมมาเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ออกแบบควิต์ (พื้นที่สำหรับใส่วัสดุเพื่อทำความร้อน) และระบบโดยรวมในกระบวนการการอบแห้งหรือไล่ความชื้นในไม้อย่างพารา หรือวัสดุใกล้เคียงอื่นๆ ให้มีการกระจายตัวของความร้อน ความชื้นที่ดี และเหมาะสมภายในวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการทางไมโครเวฟ อันเป็นแนวทางให้เกิดการพัฒนากระบวนการทำความร้อนที่มีไมโครเวฟเป็นอุปกรณ์ร่วมเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในทางปฏิบัติต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางด้าน การถ่ายเทมวลสารและความร้อนในวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกในกรณีศึกษาไม้อย่างพาราภายใต้ พลังงานไมโครเวฟได้
2. สามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกขณะมีการเปลี่ยนสถานะภายใต้พลังงานไมโครเวฟในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในงานทางวิศวกรรม และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติหลายสาขา
3. เป็นประโยชน์อย่างสูงในการนำไปพัฒนาการเรียนการสอนทั้งในระดับปริญญาตรี โท และเอกต่อไปในอนาคต

4. สร้างองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาประเทศ และเพื่อขยายผลงานวิจัยของกลุ่มนักวิจัยไทยให้ครอบคลุมถึงสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประเทศและเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะขีดความสามารถในการแข่งขัน และสร้างเทคโนโลยีเป็นของตัวเองในอนาคตยกระดับงานวิจัยไทยทางด้านเทคโนโลยีไมโครเวฟ ให้เข้าสู่มาตรฐานสากล

5. เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจเบื้องต้นก่อนการผลิตเครื่องจักรทางด้านความร้อนอันเกิดจากไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรม ให้เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคต

3. คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย

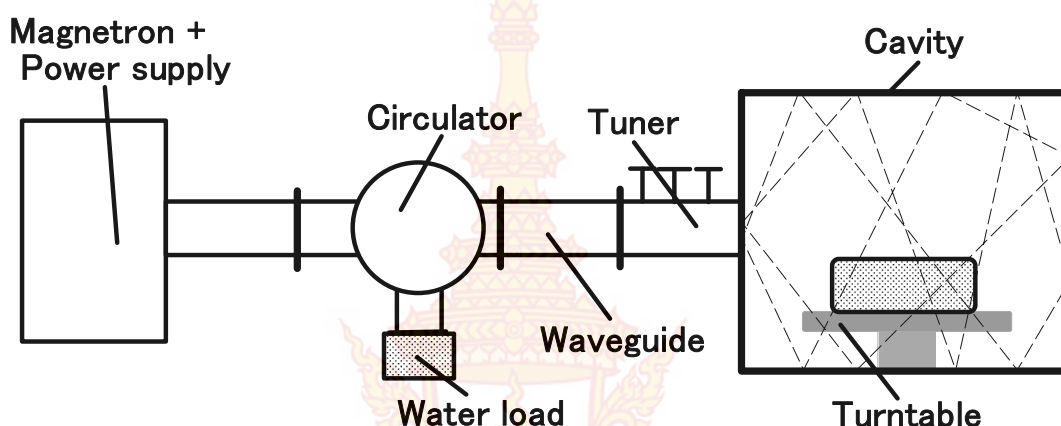
โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยที่พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและการไหลหลายสถานะภายในวัสดุพูนไม้อย่างพารา และการศึกษาเชิงทดสอบจากการทดลองโดยการสร้างเงื่อนไขขอบเขตควบคุม อันนำไปสู่องค์ความรู้พื้นฐานในการเข้าใจถึงพฤติกรรมทางความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น และนำข้อมูลไปศึกษาต่อเพื่อใช้ทำนายปรากฏการณ์รวมถึงเพื่อนำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไม้อย่างพาราในเชิงพาณิชย์ต่อไป

4. กรอบแนวคิดการวิจัย

ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนไม้อย่างพาราภายใต้อิทธิพลจากพลังงานทางไมโครเวฟนั้น จะต้องอาศัยองค์ความรู้หลักสองด้านคือ 1 องค์ความรู้ทฤษฎีทางการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ 2 องค์ความรู้ทางการถ่ายเทมวลสารและความร้อนในวัสดุพูนประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 หลักการของระบบทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

กระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานของระบบประกอบด้วย แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจเนเรเตอร์ และใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) ไปยังชิ้นงานหรือโหลด (Load) ที่อยู่ภายในแอฟพลีเคเตอร์ (Applicator) ดังแสดงในภาพที่ 1-1



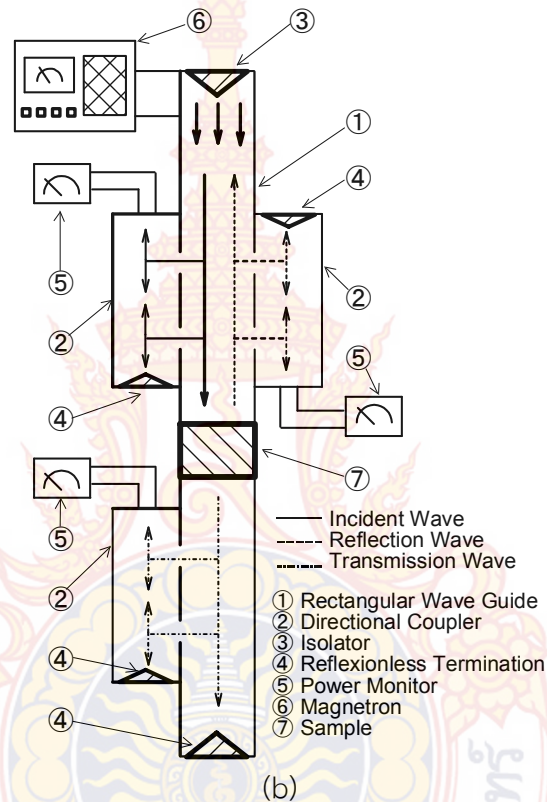
ภาพที่ 1-1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

จากภาพที่ 1-1 แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่น (Waveguide) ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟ ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในควาวิตี้ (Cavity) หรือ แอปพลิเคเตอร์ (Applicator) เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้ว ส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุ จะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected Wave) ไป ซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของวัสดุ สำหรับควาวิตี้ (Cavity) หรือแอปพลิเคเตอร์ (Applicator) นั้นเป็นส่วนที่มีไว้สำหรับการทำความร้อนของกระบวนการ โดยได้รับพลังงานไมโครเวฟมาจากเจนเนอเรเตอร์หรือแมกนีตรอน แอปพลิเคเตอร์เป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นโหมดเดียว (Single Mode) หรือคลื่นมัลติโหมด (Multimode)

4.1.1 แอปพลิเคเตอร์แบบโหมดเดียว (Single Mode Applicators)

คือการออกแบบแอปพลิเคเตอร์ ให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเรโซแนนซ์โหมดเดียว (Single Resonant Mode) หรือเรโซแนนซ์เดียว (Single Resonance) ที่ทำงานใกล้เคียงกับความถี่ทำงาน ตัวอย่างแอปพลิเคเตอร์ลักษณะนี้จะแสดงดังในภาพที่ 1-2 ซึ่งมีรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเข้มสูงบริเวณตรงส่วนกลางของแอปพลิเคเตอร์ ดังนั้นการวางหรือป้อนวัสดุทดสอบหรือโหลดจะกระทำที่ตรงส่วนกลางของแอปพลิเคเตอร์

All rights reserved

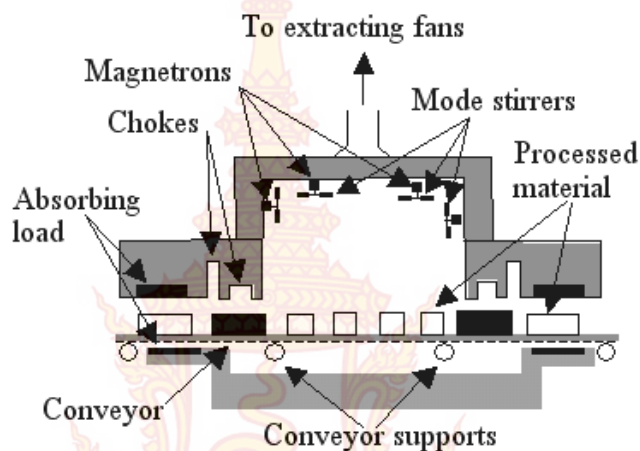


ภาพที่ 1-2 แสดงระบบทำความร้อนโดยใช้แอฟพลีเคเตอร์ลักษณะเรโซแนนซ์โหมดเดียว TE_{10}
(Ratanadecho, 2002)

4.1.2 แอพพลีเคเตอร์แบบมัลติโหมด (Multimode Applicators)

คือแอฟพลีเคเตอร์ที่มีการออกแบบให้เกิดการกระจายตัวของคลื่นในลักษณะหลายเรโซแนนซ์กลายเป็นลักษณะคลื่นแบบมัลติโหมด ส่งผลให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น โดยคลื่นนี้จะมาจากหลายระนาบและหลายทิศทางจากการตกกระทบและสะท้อนภายในควาวิตี้ ซึ่งผลรวมของคลื่นดังกล่าวก่อให้เกิดคลื่นเรโซแนนซ์ หรือมัลติโหมด ทำให้การกระจายของสนามมีความซับซ้อนมากขึ้น ยิ่งเมื่อใส่วัสดุทดสอบจำทำให้ยากแก่การทำนายพฤติกรรมเนื่องจากตัววัสดุทดสอบเองส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของคลื่นภายในควาวิตี้ด้วย

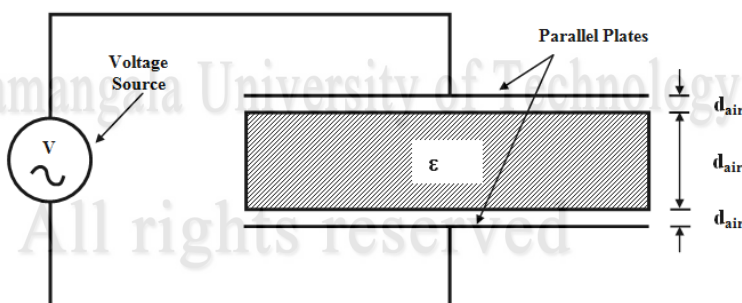
ตัวอย่างระบบแอฟพลีเคเตอร์แบบมัลติโหมด แสดงในภาพที่ 1-3 ภายในระบบจะมีการป้อนไมโครเวฟผ่านหลายช่องทาง (Multi Feed Ports) และการสะท้อนกลับไปมาหลายๆล้านครั้งของคลื่นไมโครเวฟภายในแอฟพลีเคเตอร์ก่อให้เกิดเรโซแนนซ์ของคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ขึ้นภายในแอฟพลีเคเตอร์



ภาพที่ 1-3 แสดงรูปการประยุกต์ใช้แอฟพลีเคเตอร์แบบมัลติโหมด
(Metaxas and Meridith, 1983)

4.2 หลักการพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อเราให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ที่ความเร็วเชิงมุม (ω) เท่ากับ $2\pi f$ แก่แผ่นคู่ขนาน (Parallel Plate) ดังภาพที่ 1-4 จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในระหว่างแผ่นคู่ขนาน หากทำการวางวัสดุไดอิเล็กตริกไว้ระหว่างแผ่นคู่ขนาน จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งภายในวัสดุและในช่องว่างอากาศที่ด้านข้างทั้งสองของวัสดุ ปริมาณของพลังงานสะสมในระบบก็จะเปลี่ยนไป หลักการนี้ก็เหมือนกับที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งโดยทั่วไปเราเรียกวัดูดประเภทนี้ว่า วัสดุสูญเสีย หรือ วัสดุลอสซี (Lossy Material) เพราะพลังงานไมโครเวฟที่หายไปจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุนั้นเอง (Datta et. al., 2001)



ภาพที่ 1-4 แอฟพลีเคเตอร์แบบแผ่นคู่ขนาน (Parallel Plate Applicator)

จากภาพที่ 1-4 หากเราไม่คำนึงถึงอิทธิพลของขอบที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเราสามารถประมาณค่าสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ระหว่างแผ่นคู่ขนานอธิบายสัญลักษณ์ได้ดังนี้ (Datta, et al., 2001)

$$\vec{E} = \frac{\hat{V}}{d_{mat} + 2d_{air}(\epsilon/\epsilon_0)} \quad \text{V/m} \quad (1-1)$$

สนามไฟฟ้านี้ก็จะเป็นสาเหตุของการไหลของกระแสเข้าไปยังวัสดุด้วยความหนาแน่นของกระแส (Current Density) เท่ากับ

$$\vec{J} = j\omega\epsilon''\vec{E} \quad \text{A/m}^2 \quad (1-2)$$

เมื่อความหนาแน่นเชิงกำลัง (Power Density) หรือ ค่ากำลังการดูดซับ (Power Absorbed) โดยเฉลี่ยภายในวัสดุ (Metaxas, 1996) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q = \frac{1}{2}\omega\epsilon_0\epsilon_r''|\vec{E}|^2 \quad \text{W/m}^3 \quad (1-3)$$

โดยที่

\vec{E} ค่าความเข้มสูงสุดของสนามไฟฟ้า

สำหรับคุณลักษณะพิเศษของกระบวนการทำความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ดังที่อธิบายข้างต้นนี้มีข้อพิจารณาที่สำคัญได้แก่

(ก) ความหนาแน่นเชิงกำลัง (Power Density) ที่กระจายในวัสดุไดอิเล็กตริก หรือโหลด (Load) นั้นแปรผันโดยตรงกับความถี่เมื่อค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงที่

(ข) ความหนาแน่นเชิงกำลัง แปรผันโดยตรงกับค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์

(ค) สำหรับความหนาแน่นของการกระจายเชิงกำลังที่คงที่นั้น ค่าความเค้นของสนามไฟฟ้า (Electric field Stress) จะมีค่าแปรผกผันกับค่า \sqrt{f} ซึ่งหมายความว่าถ้าค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor; ϵ'') และค่าความถี่ต่างมีค่าคงที่แล้ว โอกาสความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันเบรกดาวน์ (Voltage Breakdown) ย่อมลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ใช้งานให้สูงขึ้น

(ง) ค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ ϵ'' มักจะแปรผันตามค่าความถี่ f โดยเฉพาะในวัสดุที่การสูญเสียความเป็นขั้วมีผลมาก โดยทั่วไป (ซึ่งไม่เสมอไป) ϵ'' จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

กล่าวอีกครั้ง จากสมการที่ (1-1) และสมการที่ (1-2) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อสนามไฟฟ้าและค่ากำลังการดูดซับภายในวัสดุ ค่ากำลังการดูดซับหรือค่าปริมาณการกำเนิดความร้อนภายใน (Internal heat generation) Q นี้ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของกระบวนการขณะได้รับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ ที่จะนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในวัสดุต่อไป

โดยทั่วไปค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปค่าคอมเพล็กซ์เปอร์มิตติวิตี (Complex Permittivity; ϵ) โดยค่านี้แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon'_r + j\epsilon''_r) = \epsilon_0\epsilon_r = \epsilon_0\left(\epsilon'_r + j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right) \quad (1-4)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$ ϵ คือค่าคอมเพล็กซ์เพอร์มิตติวิตี้ (Complex permittivity) หรือโดยทั่วไปเรียกค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และเป็นสมบัติของวัสดุใดๆ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12}$ F/m คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของฟรีสเปซหรืออากาศ (Permittivity of Free Space)

ϵ'_r คือส่วนที่เป็นจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) หรือค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity) คำนี้อธิบายความสามารถในการสะท้อนกลับคลื่นไมโครเวฟจากผิวของชิ้นทดสอบหรือวัสดุไดอิเล็กตริกและบ่งบอกว่าคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกมีมากน้อยเท่าไร ϵ''_r คือส่วนจินตภาพโดยทั่วไปเรียกว่าค่าไดอิเล็กตริก LOSS FACTOR (Relative Dielectric Loss Factor) ซึ่งจะบอกถึงความสูญเสียพลังงานภายในชิ้นทดสอบหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือวัสดุสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเข้ามาแล้วสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนได้เท่าไร และ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity)

4.2.1 สมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equations)

ในระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ เช่น ในตู้ไมโครเวฟหรือ แอพพลิเคเตอร์ ที่ใช้งานจริงนั้นจะมีความซับซ้อนกว่าระบบแผ่นคู่ขนานที่อธิบายกันในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นอย่างมาก การอธิบายที่สมบูรณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมทางกายภาพอย่างถ่องแท้ โดยปกติการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะกระทำโดยการจำลองผ่านสมการแมกซ์เวล (Maxwell's Equations) ซึ่งสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามเวลา เมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตที่สมบูรณ์ไปก็จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟหรือ แอพพลิเคเตอร์ ได้อย่างสมบูรณ์

สมการแรกของสมการแมกซ์เวล คือ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E ที่เปลี่ยนไปกับเวลา กับสนามแม่เหล็ก H หรือกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าที่หมุนวนรอบๆคอนทอร์ เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทอร์ ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะไซน์ฮาร์โมนิก (Time Harmonic) ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-5)$$

สมการที่สองของสมการแมกซ์เวล คือ กฎของแอมแปร์ ที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) H กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม (Total

Current Density) J_t (ซึ่งรวมผลของกระแสดีสเพลสเมนต์และกระแสเหนี่ยวนำ) หรือกล่าวได้ว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กที่หมุนวนรอบๆคอนทัวร์ผิวปิด (Closed Contour) เท่ากับกระแสสุทธิที่ผ่าน พื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ ยกตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้าที่ล้อมรอบ (Surrounded) โดย สนามแม่เหล็กเป็นต้น ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะไซน์ฮาร์โมนิก (Time Harmonic) ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1-6)$$

เพื่อความสมบูรณ์ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า กฎของเกาส์ (Gauss's Law) ถูกนำมาใช้ กล่าวคือฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ออกจากขอบเขตเท่ากับศูนย์และฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ออกจากขอบเขตจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุ (Charge) ภายในวัสดุนั้น จะได้

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (1-7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1-8)$$

โดยที่

q คือความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (Charge Density)

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

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1-9)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1-10)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1-11)$$

โดยที่

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity)

μ คือ ค่าเปอร์มิบิลิตี (Permeability)

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) หรือค่าเปอร์มิตติวิตี

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ประจุและกระแส มีส่วนเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์ที่สมบูรณ์ (สมการแมกซ์เวล) รูปแบบสมการอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวล ถือว่าเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ในการแก้ปัญหาเพื่อจะหาคำตอบที่เงื่อนไขค่าของขอบเขตต่างๆ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า สนามไฟฟ้า (E) และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ได้คือ

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1-12)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1-13)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\varepsilon} \quad (1-14)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (1-15)$$

ต่อไปนี้จะทำการพิสูจน์ที่มาของสมการค่ากำลังการดูดซับพลังงานภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ขณะเกิดอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนี้

อ้างอิงชุดสมการแมกซ์เวลล์ สมการที่ (1-12) ถึงสมการที่ (1-15) ทำการคูณเชิงสเกลาร์ในสมการที่ (1-13) ด้วย E และสมการที่ (1-12) ด้วย H เราสามารถเขียนสมการแมกซ์เวลล์ในรูปของพลังงานได้ดังนี้

$$\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (1-16)$$

$$\vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) = -\vec{H} \cdot \left(\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (1-17)$$

ทำการหกลบสมการที่ (1-17) ด้วยสมการที่ (1-16) และใช้คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างสอง เวกเตอร์ ในที่นี้คือ เวกเตอร์ F_1 และ F_2 และเขียนในรูปความสัมพันธ์ก็จะได้

$$\nabla \cdot (\vec{F}_1 \times \vec{F}_2) = \vec{F}_2 \cdot (\nabla \times \vec{F}_1) - \vec{F}_1 \cdot (\nabla \times \vec{F}_2) \quad (1-18)$$

จากคุณสมบัติของสมการที่ (1-18) เราสามารถจัดรูปความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) + \vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1-19)$$

เมื่อทำการอินทิกรัลตลอดปริมาตรของโดเมนและประยุกต์ใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนส์ (Divergence Theorem) ซึ่งโยงความสัมพันธ์กันระหว่างการหาอินทิกรัลเชิงพื้นผิว (Surface Integral) กับอินทิกรัลเชิงปริมาตร (Volume Integral) ก็จะได้เป็น

$$\iint (E \times H) \cdot ds + \iiint \left[\vec{H} \cdot \mu \frac{\partial H}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right] dV = 0 \quad (1-20)$$

ในที่นี้เทอมผลคูณ (Cross Product) คือ $E \times H$ แสดงถึงความหนาแน่นกำลังเชิงพื้นผิว (Surface Power Density) ซึ่งมีหน่วยเป็น W/m^2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกำลัง ซึ่งเรามักจะอ้างอิงพอยน์ติงเวกเตอร์ (Pointing Vector) นั่นเอง หากทำการอินทิกรัลในเทอมที่สองซึ่งเป็นการกำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก (Magnetic Power Density) ก็จะได้

$$\vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{1}{2} \mu \frac{\partial \vec{H}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \mu \vec{H}^2 \right) \quad (1-21)$$

เช่นเดียวกับขั้นตอนการหาสมการความสัมพันธ์ในรูปกำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก จากสมการที่ (1-20) เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ในรูปกำลังความหนาแน่นของไฟฟ้า (Electric Power Density) ก็จะได้

$$\vec{E} \cdot \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{\partial \vec{E}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2 \right) \quad (1-22)$$

จากสมการข้างบนนี้ เราสามารถลดรูปให้อยู่ในเทอมของค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟ (Microwave Power Absorbed) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าปริมาณการกำเนิดความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Local Volumetric Heat Generation) คือ

$$Q = \vec{E} \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma |\vec{E}|^2 = \omega \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (1-23)$$

จากสมการที่ (1-23) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้น ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square Value) ของความเข้มของสนามไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟหรือ ค่าปริมาณการกำเนิดความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (1-24)$$

จากสมการด้านบน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์ (Dielectric Loss Factor) และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า หากค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์ของวัสดุไดอิเล็กตริกมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟ และปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์มีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกโดยเกิดความร้อนเพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย อย่างไรก็ตาม ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกและขนาดของวัสดุไดอิเล็กตริก สมการที่ (1-24) มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูง อย่างไรก็ตามอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กตริกก็ส่งผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุขึ้นอยู่กับคลื่นไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความร้อน (Heating) การอบแห้ง (Drying) หรือการหลอมละลาย (Melting) เป็นต้น

4.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูน

ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ซึ่งเป็นกลไกที่เกิดขึ้นกับวัสดุทุกชนิดที่มีความชื้นอยู่ภายในวัสดุ

4.3.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างแท้จริงในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน การวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการถือเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะเกิดกระบวนการพื้นฐานสองกระบวนการพร้อมกัน นั่นคือ

- กระบวนการถ่ายเทความร้อน เป็นกระบวนการที่ถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหย ความชื้นที่มีอยู่
- กระบวนการถ่ายเทมวลสาร เป็นกระบวนการที่ขับเคลื่อนของไหล (สถานะของเหลวและก๊าซ) ภายในเนื้อวัสดุหรือที่ผิววัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน เช่น อัตราการถ่ายเทมวล การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุ เป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านพยายามศึกษาถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน (นับตั้งแต่ นักวิจัยท่านแรก ๆ เช่น Lewis พยายามเสนอแนวคิดใหม่ ๆ ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุของแข็ง) และพัฒนาองค์ความรู้ต่อยอดกันมากมายทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติ

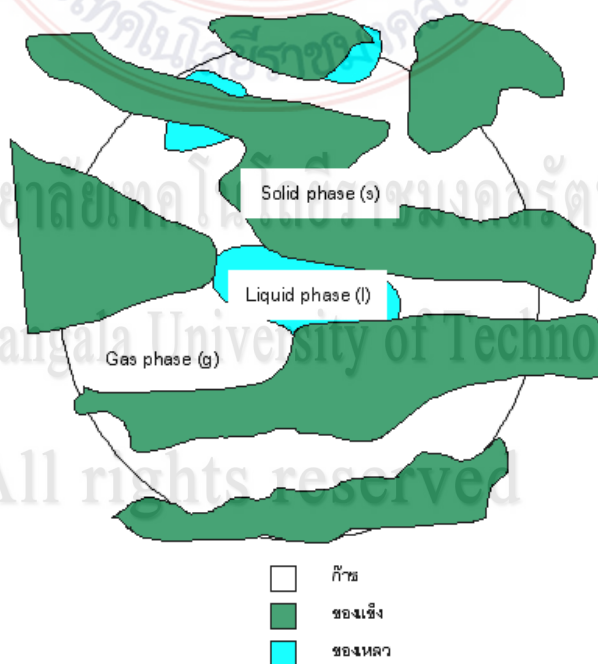
เป็นที่ทราบกันดีว่าการอบแห้งวัสดุพูนจะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นหรือมวลสาร (ประกอบไปด้วยของเหลว ไอน้ำและอากาศ) ขึ้นพร้อมกัน แต่การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเชิงทฤษฎีทำได้ยากมากเนื่องจากสมการที่ใช้วิเคราะห์หลายชุดมีลักษณะไม่เชิงเส้นและเงื่อนไขขอบเขตมีความซับซ้อนกว่าปกติ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงไม่เป็นที่นิยม แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงสามารถใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีเงื่อนไขซับซ้อนได้ ดังนั้นทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารจึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

4.3.2 โครงสร้างของวัสดุพูน

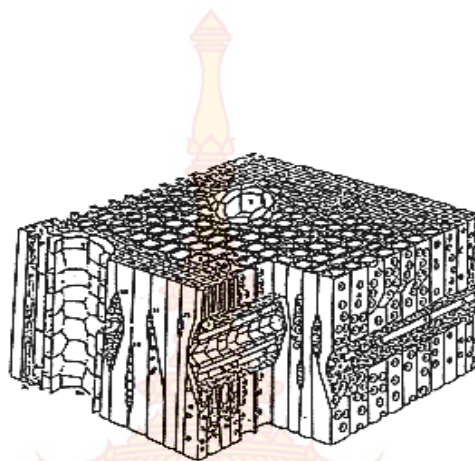
เป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพูน กล่าวคือตัววัสดุประกอบด้วยสสารที่มี 3 สถานะ คือ ของแข็ง (solid phase หรือ solid matrix) ของเหลว (liquid phase) และก๊าซ (gas phase) (ของเหลวและก๊าซอยู่ช่องว่างหรือรูพูน (void) ภายในวัสดุ) ดังภาพที่ 1-5

ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ไม้ ดิน และคอนกรีตในงานวิศวกรรมก่อสร้าง เซรามิกในงานวิศวกรรมโลหะ ตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกลและเคมี เนื้อเยื่อต่าง ๆ หรือเยื่อพิวในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมไปถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมเกษตร

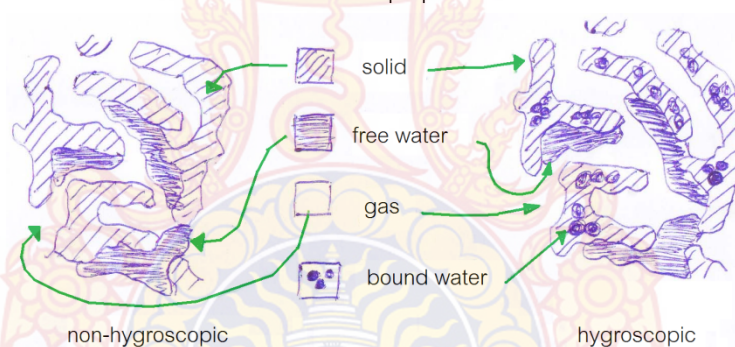
วัสดุพูนสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ ชนิดแรกของไหลหรือความชื้นจะเคลื่อนตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็ง (solid matrices) ไปตามโพรงช่องว่าง (pores) ภายในวัสดุโดยไม่มีการส่งผ่านหรือดูดกลืนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็ง เราเรียกวัดพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบไม่ชื้นมาก (nonhygroscopic porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพูนมีขนาดใหญ่ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอภายในช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย ส่วนวัสดุพูนชนิดที่สองความชื้นจะถูกยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ (เป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้าง) ทำให้การเคลื่อนตัวของความชื้นทำได้ยาก อิทธิพลของความดันไอภายในมีความสำคัญมากเนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กมาก (ประมาณ 0-1 μm) เราเรียกวัดพูนชนิดนี้ว่าวัสดุพูนแบบชื้นมาก (hygroscopic porous media) เช่น เนื้อไม้ เนื้อเยื่อ ยาง ดังแสดงในภาพที่ 1-6 ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นไม่มีเสถียรภาพทำให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก สำหรับรายละเอียดความแตกต่างระหว่างวัสดุพูนทั้งสองชนิดสามารถอธิบายให้เข้าใจเพิ่มขึ้นในภาพที่ 1-7



ภาพที่ 1-5 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป



ภาพที่ 1-6 โครงสร้างวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิก



ภาพที่ 1-7 ความแตกต่างทางโครงสร้างวัสดุพูนแบบนอนไฮโกรสโคปิกและไฮโกรสโคปิก

4.3.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้นเมื่อวัสดุพูนได้รับความร้อนในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงแดันคาพิลลารี
2. การแพร่กระจายตัว (diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว (evaporation-condensation mechanism) ภายในรูพูน

4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion)

5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม

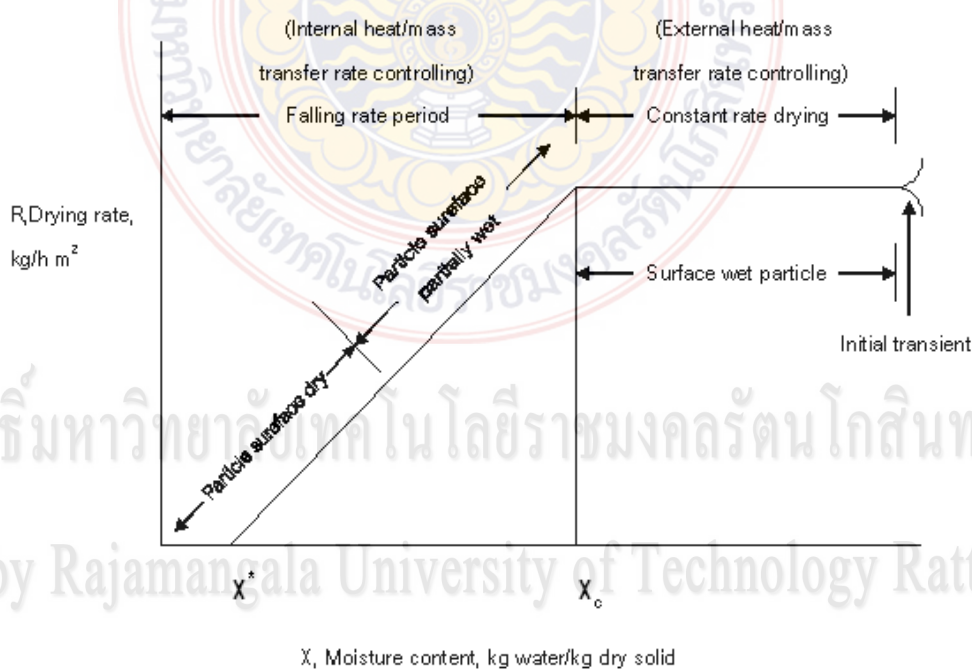
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (thermo-diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการถ่ายเทมวลสารและความร้อนวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจน เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการ ทำให้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการรอบแ่งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุพูน

ไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์หลักด้วย

ภาพที่ 1-8 กระบวนการถ่ายเทมวลสารและความร้อนสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือ คาบเวลาที่อัตราการถ่ายเทมวลสารและความร้อนคงที่ (constant rate period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพอรุนที่เติมเต็มที่ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content, x_c) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุ เมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการถ่ายเทมวลสารและความร้อนจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) โดยปกติคาบเวลานี้กินระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่อัตราการถ่ายเทมวลสารและความร้อนคงที่ เมื่ออัตราการถ่ายเทมวลสารและความร้อนมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการถ่ายเทมวลสารและความร้อน ค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)



ภาพที่ 1-8 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

4.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอรุนในวัสดุพอรุนแบบไฮโกรสโคปิก

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอรุนแบบไฮโกรสโคปิกจะอยู่บนพื้นฐานของสมการส่งถ่าย (transport equation) ซึ่งเป็นผลมาจากกฎการสมดุลเชิงอนุพันธ์ ใน

การทำนายพฤติกรรมรวมของกระบวนการ เช่น อัตราการไหล หรือฟลักซ์ความร้อน ต้องอาศัยข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมหรือเงื่อนไขขอบเขตของระบบมาช่วยประกอบในการคำนวณ

เมื่อมีของไหลไหลผ่านโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น วัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิก สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องอาศัยสมการเฉพาะตำแหน่ง (เชิงจุลภาค) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลภายในช่องว่างหรือรูพูน แต่เนื่องจากวัสดุพูนมีโครงสร้างรูพูนภายในซับซ้อนทำให้ปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพูนมีความซับซ้อนตาม ดังนั้นการหาคำตอบสำหรับวิเคราะห์ความชื้นและอุณหภูมิจึงเป็นไปได้ยาก เพื่อขจัดความยุ่งยากดังกล่าวปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพูนจึงมักอธิบายในรูปสมการเชิงมหภาค (macroscopic equations) ซึ่งเป็นจริงก็ต่อเมื่อโดเมนที่พิจารณาคือเป็นปริมาตรเฉลี่ยที่ประกอบจากรูพูนจำนวนมาก รากฐานสมการนี้หาได้จากสมการเชิงจุลภาคโดยเทคนิคปริมาตรเฉลี่ย (volume average technique) (Whitaker, 1977) โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้จริงสำหรับค่าเฉลี่ยปริมาณเชิงจุลภาคต่าง ๆ ซึ่งพบกันบ่อยในการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพูน อาทิเช่น ความพูน (porosity) ϕ และความเร็ว u ซึ่งปริมาณเหล่านี้ถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยเท่านั้น

4.3.4.1 สมการการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equations)

สมการการอนุรักษ์มวลสำหรับของเหลวทั้งในส่วนน้ำอิสระและน้ำในโครงสร้าง ใอน้ำ อากาศ และก๊าซได้ถูกอธิบายไว้ดังต่อไปนี้ (แบบจำลองพัฒนาต่อจาก Ratanadecho et al., 2002))

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \phi \rho_g s + \phi \rho_v (1-s) + (1-\phi) \rho_{bl} \} + \nabla \cdot (\rho_g u_g + \rho_{bl} u_{bl} + \rho_v u_v) = 0. \quad (1-25)$$

สมการความดันซึ่งพิจารณาเป็นก๊าซในอุดมคติ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_a (1-s) \} + \nabla \cdot (\rho_a u_a) = 0. \quad (1-26)$$

4.3.4.2 สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equations)

ในการวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงผลของพลังงานจลน์และความดัน การวิเคราะห์สมการอนุรักษ์พลังงานจะสมมติให้ทุกสถานะนั้นสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิของวัสดุทดสอบคำนวณจากสมการการส่งถ่ายความร้อนซึ่งรวมเทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation) สมการการส่งถ่ายความร้อนซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในวัสดุทดสอบโดยขึ้นกับเวลาคือ (Ratanadecho et al., 2002)

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho C_p)_T T] + \nabla \cdot [(\rho_l C_{pl} (u_g + u_{bl}) + (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) u_g) T] + H_v \dot{m} = \nabla \cdot [k \nabla T] + Q_g \quad (1-27)$$

เมื่อ $(\rho C_p)_T$ คือค่าความจุความร้อนเฉลี่ยของวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิก ซึ่งมีรายละเอียด

ดังนี้

$$(\rho C_p)_T = \rho_{fl} C_{pfl} \phi s + \rho_g C_{pg} \phi (1-s) + (\rho_p C_{pp} s_s + \rho_{bl} C_{bl} s_s) (1-\phi) \quad (1-28)$$

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการวิจัยครั้งนี้เป็นประโยชน์อย่างสูงในการช่วยพัฒนาเทคโนโลยีในการออกแบบระบบ และการประยุกต์ใช้การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟในวัสดุพูนไม้อย่างพาราที่มีการถ่ายเทความร้อนและการไหลของมวลสารภายในร่วมกันหลายสถานะได้ และผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรืองานประชุมวิชาการได้อย่างน้อย 1 ฉบับ

6. นิยามศัพท์เชิงปฏิบัติการ

วัสดุพูน หมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างของประกอบไปด้วย เฟสของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งเฟสของเหลวจะถูกกับเก็บในลักษณะเป็นความชื้นในวัสดุภายในโพรงของแข็ง ซึ่งหากภายในโพรงของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมดจะเรียกว่าวัสดุพูนแบบอิมมัตว แต่หากภายในโพรงมีของเหลวและก๊าซผสมกันอยู่จะเรียวัสดุพูนแบบไม้อิมมัตว

ไม้อย่างพารา หมายถึง ไม้อินตัน มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำแอมะซอน ในทวีปอเมริกาใต้ เริ่มมีการนำมาปลูกในประเทศไทยประมาณปี พ.ศ. 2442-2444 ที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง และต่อมาได้มีการขยายพันธุ์อย่างมาปลูกทั่วทั้ง 14 จังหวัดในภาคใต้ และ 3 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนี้ยังมีการขยายพันธุ์อย่างมาปลูกในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 เป็นต้นมา อย่างพาราก็กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และมีการผลิตเป็นอันดับต้นๆ ของโลก

การถ่ายเทความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังบริเวณรอบๆ ในรูปแบบพลังงานความร้อน ซึ่งอาจเกิดจากกลไกการนำความร้อน พาความร้อน แผลรังสีความร้อน รวมไปถึงการกำเนิดความร้อนด้วยตัววัตถุเอง

พลังงานไมโครเวฟ หมายถึง พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่ในช่วง 0.3-300 กิกะเฮิร์ตซ์(GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 เซนติเมตร - 0.3 มิลลิเมตร โดยในการศึกษาจะใช้ช่วงความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) หรือความยาวคลื่น 12.24 เซนติเมตร (เนื่องจากเป็นมาตรฐานในการผลิตเครื่องใช้ไมโครเวฟตามหลักสากลที่ใช้กันโดยทั่วไป)

การไหลหลายสถานะ หมายถึง กลไกการไหลของของไหลที่มีของไหลที่ไม่ผสมกันมากกว่าหนึ่งชนิดในโดเมนที่พิจารณา ตัวอย่างในงานวิจัยชิ้นนี้คือมีของไหลที่เป็นของเหลว ไอน้ำ และอากาศ ไหลอยู่ในโพรงของแข็งในวัสดุพูน

เชิงทฤษฎี หมายถึง การศึกษาโดยอาศัยทฤษฎีเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการจำลองศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

เชิงประยุกต์ หมายถึง การศึกษาเชิงทดสอบจากวัสดุจริงจากเครื่องมือทดลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการณ์พื้นฐานภายใต้สภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่ควบคุมตัวแปรได้



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทที่ 2

บททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนโดยใช้กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟต่อไป

1.1.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างแท้จริงในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนถือเป็นสิ่งสำคัญ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะเกิดกระบวนการพื้นฐานสองกระบวนการพร้อมกัน นั่นคือ

1. กระบวนการถ่ายเทความร้อน เป็นกระบวนการที่ถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหยความชื้นที่มีอยู่
2. กระบวนการถ่ายเทมวลสาร เป็นกระบวนการที่ขับเคลื่อนของไหล (สถานะของเหลวและก๊าซ) ภายในเนื้อวัสดุหรือที่ผิววัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน เช่น อัตราอบแห้ง การกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อวัสดุ เป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเวลา

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านพยายามศึกษาถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน (นับตั้งแต่ นักวิจัยท่านแรก ๆ เช่น Lewis พยายามเสนอแนวคิดใหม่ ๆ ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุของแข็ง) และพัฒนาองค์ความรู้ต่อยอดกันมากมายทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติ

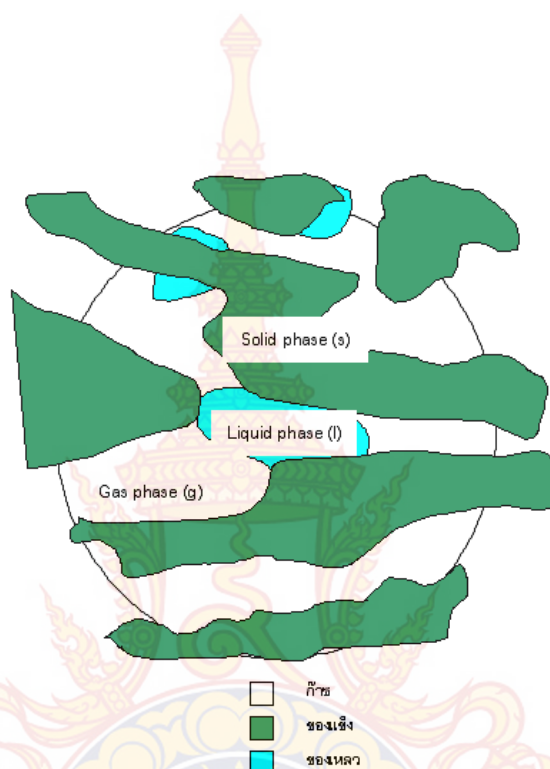
เป็นที่ทราบกันดีว่าการอบแห้งวัสดุพูนจะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและความชื้นหรือมวลสาร (ประกอบไปด้วยของเหลว ไอน้ำและอากาศ) ขึ้นพร้อมกัน แต่การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเชิงทฤษฎีทำได้ยากมากเนื่องจากสมการที่ใช้วิเคราะห์หลายชุดมีลักษณะไม่เชิงเส้นและเงื่อนไขขอบเขตมีความซับซ้อนกว่าปกติ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงไม่เป็นที่นิยม แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงสามารถใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีเงื่อนไขซับซ้อนได้ ดังนั้นทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารจึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

1.1.2 รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน

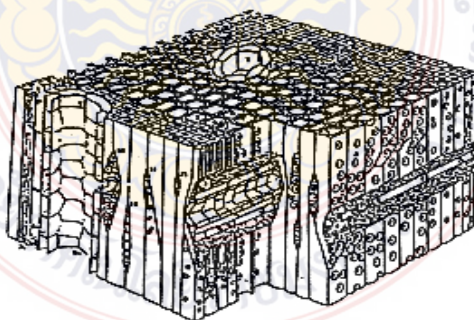
เป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุส่วนใหญ่ในทางวิศวกรรมเป็นวัสดุพูน กล่าวคือตัววัสดุประกอบด้วยสสารที่มี 3 สถานะ คือ ของแข็ง (solid phase หรือ solid matrix) ของเหลว (liquid phase) และก๊าซ (gas phase) (ของเหลวและก๊าซอยู่ช่องว่างหรือรูพูน (void) ภายในวัสดุ) ดังภาพที่ 2-1

ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรม ปฐพี เซรามิกในงานวิศวกรรมโลหะ ตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกลและเคมี เนื้อเยื่อต่าง ๆ หรือเยื่อชีวในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมไปถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมการเกษตร

วัสดุพูนสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ ชนิดแรกของไหลหรือความชื้นจะเคลื่อนตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็ง (solid matrices) ไปตามโพรงช่องว่าง (pores) ภายในวัสดุ โดยไม่มีการส่งผ่านหรือดูดกลืนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็ง เราเรียวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบไม่ขึ้นน้ำ (nonhygroscopic porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพูนมีขนาดใหญ่ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอภายในช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย วัสดุพูนชนิดที่สองความชื้นจะถูกยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ (เป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้าง) ทำให้การเคลื่อนตัวของความชื้นทำได้ยาก อิทธิพลของความดันไอภายในมีความสำคัญมากเนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กมาก (ประมาณ 0-1 μm) เราเรียวัสดุพูนชนิดนี้ว่าวัสดุพูนแบบขึ้นน้ำ (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพูนบางชนิด เช่น วัสดุชีวภาพที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจนเนื่องจากเนื้อวัสดุมีโครงสร้างซับซ้อน (เช่น เนื้อไม้ ดังแสดงในภาพที่ 2-2) ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นไม่มีเสถียรภาพทำให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของวัสดุพรุนทั่วไป



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างวัสดุพรุนแบบเซลล์ลูลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary)

วัสดุพรุนชนิดแรก (nonhygroscopic porous media) ส่วนใหญ่เรียกว่าวัสดุพรุนแบบคาพิลลารี (capillary porous media) เนื่องจากของเหลวหรือความชื้นภายในวัสดุเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพรุน (ภาพที่ 2-3) โดยอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (capillary pressure) (เป็นฟังก์ชันของแรงตึงผิว มุมสัมผัส และลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพรุน)

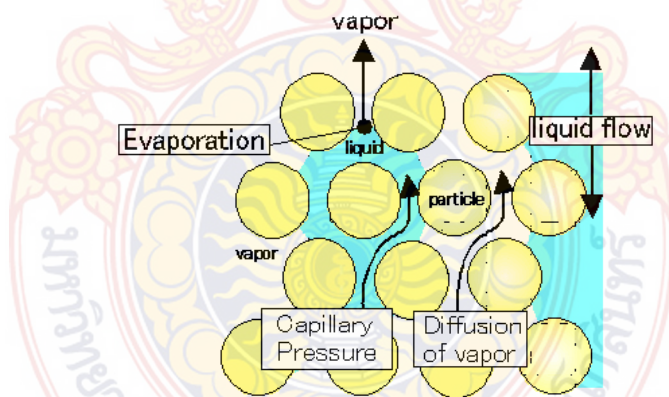
วัสดุพรุนชนิดที่สองหรือวัสดุพรุนแบบชื้นมาก (hygroscopic porous media) ซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อน การเคลื่อนที่ของความชื้นจะมีกลไกการเคลื่อนตัวทั้งในส่วนของอิทธิพลของความดันคาพิลลารี และในส่วนของของเหลวที่อยู่ในเนื้อของแข็ง (bound water) จะมีกลไกทางพันธะทางเคมีเข้ามาเพิ่มเติมเกี่ยวข้องด้วย จึงส่งผลให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก

สำหรับความดันคาพิลลารีสามารถนิยามได้ดังนี้คือ เมื่อของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกัน (immiscible fluids) (เช่น น้ำและอากาศ) เกิดการสัมผัสกันในช่องว่างของวัสดุพรุน การไม่ผสม

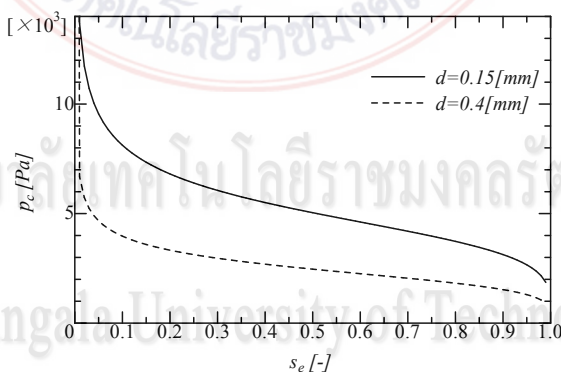
กันของของไหลสองชนิดทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันตลอดช่วงผิวรอยต่อ เรียกว่าความดันคาพิลลารี (p_c) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$p_c = p - p_l \tag{2-1}$$

เมื่อ p คือความดันในของไหลที่มีสถานะแห้ง (non-wetting phase) เช่นอากาศ ส่วน p_l คือความดันในของไหลที่มีสถานะเปียก (wetting phase) ความดันคาพิลลารีมีคุณสมบัติที่สมดุลและสัมพันธ์โดยตรงกับแรงตึงผิวระหว่างของไหลทั้งสองชนิด จากการศึกษาพบว่าค่าความดันคาพิลลารีเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอิมิตัวของของไหลสถานะแห้งเพิ่มขึ้น แต่ก็ขึ้นกับคุณสมบัติของความอิมิตัวของวัสดุนั้น ๆ ด้วย ภาพที่ 2-4 แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพอร์นและคุณสมบัติของของไหลที่สภาวะต่าง ๆ



ภาพที่ 2-3 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์น



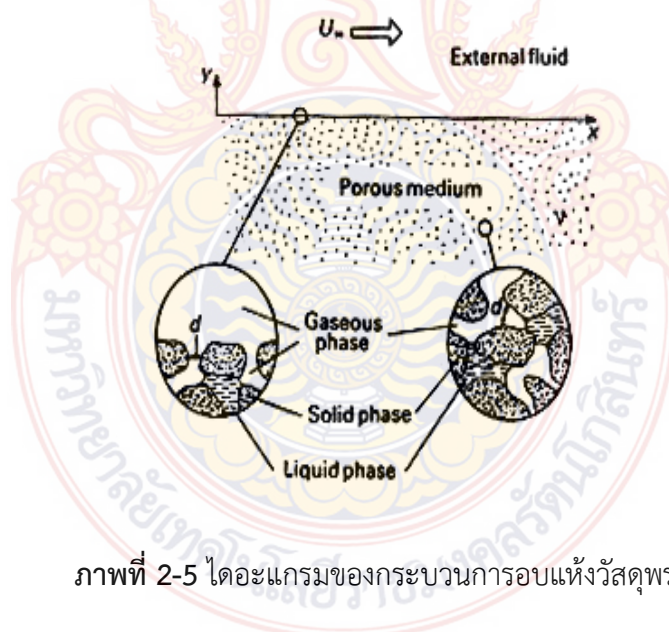
ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพอร์น และคุณสมบัติของของไหล

กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอน้ำในช่องว่างที่เป็นรูพรุน คือผลของการแพร่กระจายไอน้ำ (vapor diffusion force) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฟิกส์

(Fick's law) ภาพที่ 2-3 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอรุณแบบคาพิวลารี

1.1.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอรุณ

หัวข้อที่กล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพอรุณแบบคาพิวลารี ซึ่งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิวลารีเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพอรุณ แต่ในทางปฏิบัติวัสดุพอรุณมีโครงสร้างซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



ภาพที่ 2-5 ไดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพอรุณ

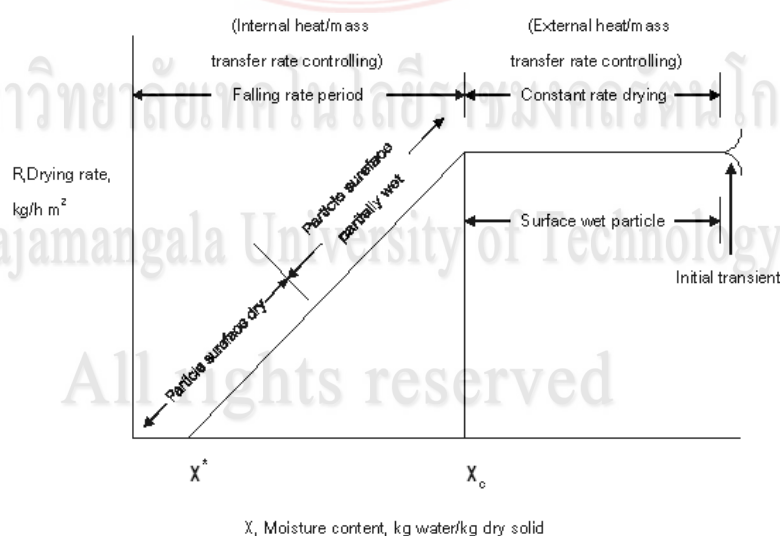
ภาพที่ 2-5 เมื่อวัสดุพอรุณเปียกชื้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคืออุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่าง ๆ จะปรากฏขึ้น (ภาพที่ 2-3) โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันคาพิวลารี
2. การแพร่กระจายตัว (diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว (evaporation-condensation mechanism) ภายในรูพอรุณ
4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม

6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (thermo-diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการอบแห้งวัสดุพอรุนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจนเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้ง ทำได้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุรวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์หลักกลไกหลักด้วย

ภาพที่ 2-6 กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพอรุนที่เติมเต็มผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content, x_c) โดยค่าความชื้นวิกฤติขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างและการเกาะตัวของความชื้นในวัสดุ เมื่อความชื้นในวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งจะเข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) โดยปกติคาบเวลานี้กินระยะเวลามากกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ เมื่ออัตราการอบแห้งมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์จะมีความชื้นคงเหลืออยู่ค่าหนึ่ง (มีค่าน้อยมาก) ภายใต้สภาวะการอบแห้ง ค่าความชื้นนี้เราเรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) อย่างไรก็ตาม จุดสำคัญในภาพที่ 2-6 สามารถอธิบายได้เป็นข้อย่อย ๆ ดังนี้

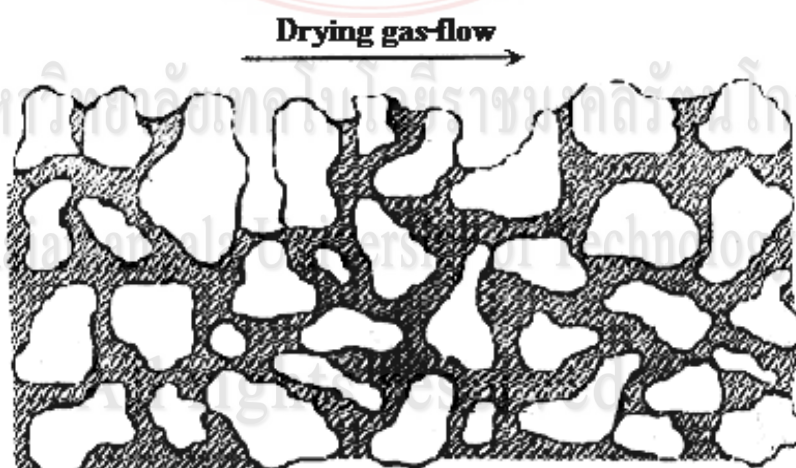


ภาพที่ 2-6 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

1. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) โดยปกติเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมาก ๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไอน้ำ หากอิทธิพลภายนอกถูกควบคุมให้คงที่ อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุ พรุณที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้าทำให้มีฟิล์มของเหลวปกคลุมที่ผิวหน้าวัสดุตลอดเวลา ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้ คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารออกจากผิววัสดุ

การถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุสามารถประมาณได้ด้วยอุณหภูมิกระเปาะเปียก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่าย โดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (force convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์

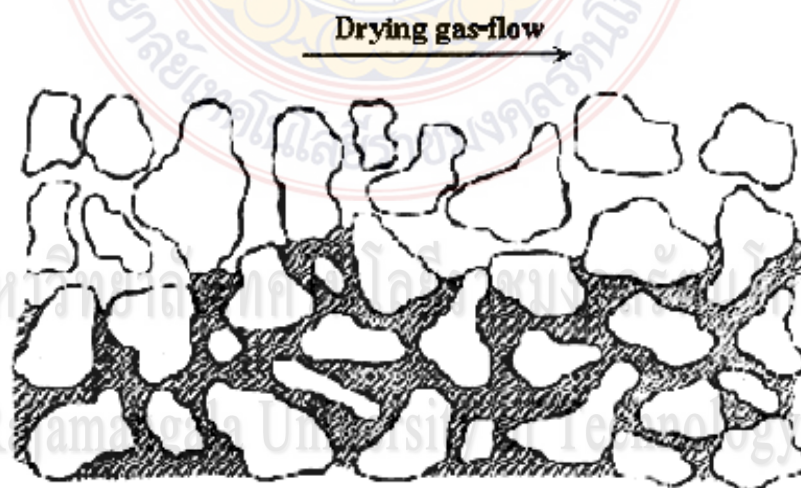
2. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป ทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดชั้นความแห้งในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก
(first falling rate period)

หลังจากกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งก็เข้าสู่คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ ในช่วงต้นของในคาบเวลานี้อัตราการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลง บางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (first falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของความแห้งก่อดำขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ผิวของวัสดุ และเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 2-8 ช่วงนี้เรียกว่าคาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (second falling rate period) การระเหยความชื้นในช่วงนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแห้ง (ความชื้นในวัสดุบริเวณนี้ระเหยออกหมด) กับชั้นวัสดุเปียก (เนื้อวัสดุบริเวณที่ยังมีความชื้นอยู่) ซึ่งเรียกว่าผิวการระเหย (evaporation front) หรือผิวการอบแห้ง (drying front) หรือขอบเขตของการเคลื่อนที่ (moving boundary) โดยที่ผิวการระเหยจะเคลื่อนที่ตลอดคาบเวลาของการอบแห้ง การระเหยตัวของความชื้นที่ผิวของการระเหย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกฎของเคลวิน (Kelvin's law)

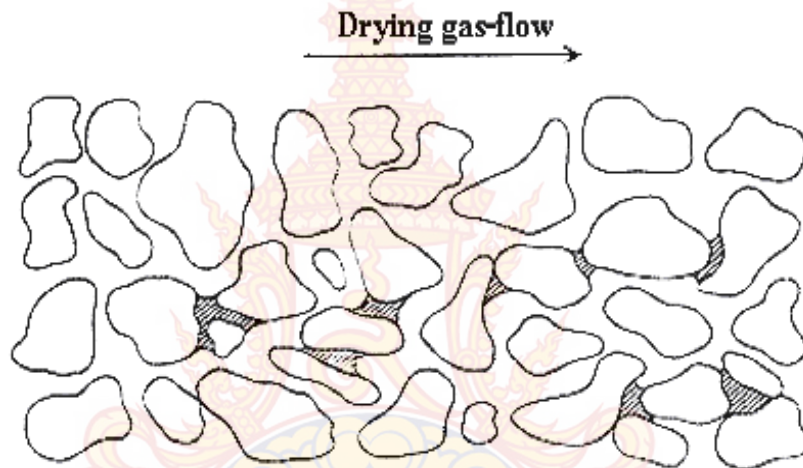
ในคาบเวลานี้อัตราการเคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้อาจสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์



ภาพที่ 2-8 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง
(second falling rate period)

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่าความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงใน

ภาพที่ 2-9 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้ อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้ความชื้นที่เหลืออยู่เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)



ภาพที่ 2-9 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย
(end stage of drying)

1.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นไฮโกรสโคปิก

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอร์นไฮโกรสโคปิกอยู่บนพื้นฐานของสมการส่งถ่าย (transport equation) ซึ่งเป็นผลมาจากกฎการสมดุลเชิงอนุพันธ์ ในการทำนายพฤติกรรมรวมของกระบวนการ เช่น อัตราการไหล หรือฟลักซ์ความร้อน ต้องอาศัยข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมหรือเงื่อนไขขอบเขตของระบบมาช่วยประกอบในการคำนวณ

เมื่อมีของไหลไหลผ่านโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น วัสดุพอร์น สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องอาศัยสมการเฉพาะตำแหน่ง (เชิงจุลภาค) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลภายในช่องว่างหรือรูพอร์น แต่เนื่องจากวัสดุพอร์นมีโครงสร้างรูพอร์นภายในซับซ้อนทำให้ปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพอร์นมีความซับซ้อนตาม ดังนั้นการหาคำตอบสำหรับวิเคราะห์ความชื้นและอุณหภูมิจึงเป็นไปได้ยาก เพื่อขจัดความยุ่งยากดังกล่าวปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพอร์นจึงมักอธิบายในรูปสมการเชิงมหภาค (macroscopic equations) ซึ่งเป็นจริงก็ต่อเมื่อโดเมนที่พิจารณาคือว่าเป็นปริมาตรเฉลี่ยที่ประกอบจากรูพอร์นจำนวนมาก รากฐานสมการนี้หาได้จากสมการเชิงจุลภาคโดยเทคนิคปริมาตรเฉลี่ย (volume average technique) โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้จริงสำหรับค่าเฉลี่ยปริมาณเชิงจุลภาคต่าง ๆ ซึ่งพบกันบ่อยในการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพอร์น อาทิเช่น ความพอร์น (porosity) ϕ และความเร็ว u ซึ่งปริมาณเหล่านี้ถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยเท่านั้น

สำหรับสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน เคยเสนอไว้โดย Phillip and De Vries ในปี ค.ศ. 1951 และในช่วงเวลาเดียวกันโดย Luikov หลังจากนั้นก็มีนักวิจัยหลายท่าน ได้พิสูจน์ที่มาของสมการสมดุลเชิงมหภาคในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งโดยอาศัยวิธีปริมาตรเฉลี่ยเช่นกัน

สมการการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equations)

สมการการอนุรักษ์มวลสำหรับของเหลว ใต้น้ำ อากาศ และก๊าซ ในกรณีวัสดุพรุนแบบไฮโกรสโคปิกได้ถูกอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

สำหรับของเหลว

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \phi s + \rho_b (1 - \phi)) \\ + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_l u_l + \rho_b u_b) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_l w_l + \rho_b w_b) = -\dot{m} \end{aligned} \quad (2-2)$$

โดยที่ตัวห้อย l คือของเหลวอิสระ b คือของเหลวที่อยู่ในโครงสร้างแข็งของวัสดุพรุนด้วยพันธะเคมี สำหรับไอ

$$\frac{\partial}{\partial t} \{\rho_v \phi (1 - s)\} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_v u_v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_v w_v) = \dot{m} \quad (2-3)$$

โดยที่ตัวห้อย v คือ ของไหลที่เกิดจากของเหลวเปลี่ยนรูปเป็นสถานะไอ สำหรับอากาศ

$$\frac{\partial}{\partial t} \{\rho_a \phi (1 - s)\} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_a u_a) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a w_a) = 0 \quad (2-4)$$

โดยที่ตัวห้อย a คือ ของไหลที่เป็นก๊าซในสภาวะบรรยากาศ หรือเรียกว่าอากาศ สำหรับก๊าซ

$$\frac{\partial}{\partial t} \{\rho_g \phi (1 - s)\} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g u_g) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g w_g) = \dot{m} \quad (2-5)$$

โดยที่ตัวห้อย g คือ ของไหลที่เป็นก๊าซในสภาวะบรรยากาศรวมอยู่กับไอ เมื่อ

t คือ เวลา

ρ_i คือ ความหนาแน่นของสารแต่ละสถานะ

u_i, w_i คือ ความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล

s คือ ปริมาณความอิมตัวของน้ำ

ในที่นี้ m คืออัตราการกลั่นตัวหรืออัตราการกลายเป็นไอระหว่างการเปลี่ยนสถานะและ ϕ คือความพรุนของวัสดุพรุน

สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equations)

ในการวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงผลของพลังงานจลน์และความดัน การวิเคราะห์สมการอนุรักษ์พลังงานจะสมมติให้ทุกสถานะนั้นสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิของวัสดุทดสอบคำนวณจากสมการการส่งถ่ายความร้อนซึ่งรวมเทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation) สมการการส่งถ่ายความร้อนซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในวัสดุทดสอบโดยขึ้นกับเวลาคือ

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho C_p)_T T] + \nabla \cdot \left[\left\{ \begin{array}{l} \rho_l C_{pl} (u_l + u_b) + \\ (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) u_g \end{array} \right\} T \right] + H_v \dot{m} = \nabla [k \nabla T] + Q_g \quad (2-6)$$

เมื่อ

T คือ อุณหภูมิ

C_{pi} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสสารแต่ละสถานะ

$[k \nabla T]$ คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ความร้อน

โดย H_v คือ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ และ Q คือความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation term)

Phenomenological Relations

ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวและก๊าซภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบายด้วยกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังนี้

$$u_l = -\frac{KK_{rl}}{\mu_l} [\nabla p_g - \nabla p_c - \rho_l g], \quad u_g = -\frac{KK_{rg}}{\mu_g} [\nabla p_g - \rho_g g] \quad (2-7)$$

สำหรับความเร็วของไอน้ำและอากาศสามารถอธิบายด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ดังนี้

$$\rho_v u_v = \rho_v u_g - \rho_g D_m \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right), \quad \rho_a u_a = \rho_a u_g - \rho_g D_m \nabla \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \quad (2-8)$$

โดยความดันคาพิลลารี, p_c สัมพันธ์กับความดันของก๊าซและของเหลวดังนี้

$$p_c = p_g - p_l \quad (2-9)$$

และ D_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงมวลของไอน้ำที่ผสมอยู่กับอากาศในวัสดุพรุน (effective molecular mass diffusion)

$$D_m = \frac{2\phi}{3-\phi}(1-s)D_0 \quad (2-10)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงมวลในระนาบวัสดุ (binary mass diffusion in plain media) และสามารถหาได้จาก

$$D = D_0 \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2.2} \quad (2-11)$$

กฎของฟูรีเออร์ (Fourier's law) ใช้ในการอธิบายฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านวัสดุพรุน

$$q = -k\nabla T \quad (2-12)$$

Equilibrium Relations

สมการอนุรักษ์การส่งถ่ายของสารในหลาย ๆ สถานะต้องการสมการประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (relative permeability) K_r , ความดันคาพิวลารี p_c , ค่าฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี (Leverett functions) J และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) k

สมการของการซึมผ่าน (permeability) สำหรับของเหลวและก๊าซมีดังนี้

$$K_{rl} = s_e^3, \quad K_{rg} = (1-s_e)^3 \quad (2-13)$$

เมื่อ s_e คือ ประสิทธิภาพความอิ่มตัวของน้ำ (effective water saturation) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความอิ่มตัวของน้ำต่ำสุดที่ยอมให้ได้ (irreducible water saturation), s_{ir} , สามารถหาได้จาก

$$s_e = \frac{s - s_{ir}}{1 - s_{ir}} \quad (2-14)$$

ความดันคาพิวลารี p_c แสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี (Leverett functions) $J(s_e)$ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิวลารี และความอิ่มตัวของน้ำจะถูกนิยามโดยใช้ฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี

$$p_c = p_g - p_l = \frac{\xi}{\sqrt{K/\phi}} J(s_e) \quad (2-15)$$

เมื่อการซึมผ่าน (permeability) ของวัสดุพรุนหาจากสมการของคาร์แมนโคเซนี (Carman-Kozeny equation)

$$K = \frac{d^2 \phi^3}{180(1-\phi)^2} \quad (2-16)$$

ξ คือ ความตึงผิวที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซและของเหลว (gas-liquid interfacial tension) กำหนดความสัมพันธ์ของข้อมูลของความดันคาพิลลารีในรูปของฟังก์ชันของความดันคาพิลลารีดังนี้

$$J(s_e) = 0.325(1/s_e - 1)^{0.217} \quad (2-17)$$

สมการสถานะ (State Equations)

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นต้องมีสารที่มีสถานะเป็นก๊าซเป็นส่วนผสมระหว่างไอน้ำและอากาศภายในรูพอร์น โดยสมมติให้ก๊าซเป็นก๊าซผสมในอุดมคติ (Ideal mixture of perfect gases) ดังนั้นความหนาแน่นของก๊าซแต่ละชนิดหาได้จากนิยามของความหนาแน่นรวมของก๊าซ ρ_g และความเร็วเฉลี่ยของมวลของก๊าซจากสมการสถานะ (state equations)

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{p_a M_a}{R_o T} & \rho_v &= \frac{p_v M_v}{R_o T} & \rho_g &= \rho_a + \rho_v \\ p_a &= \rho_a R_a T & p_v &= \rho_v R_v T & p_g &= p_a + p_v \\ \rho_g u_g &= \rho_a u_a + \rho_v u_v \end{aligned} \quad (2-18)$$

ความดันประกอบ (partial pressure) สำหรับไอน้ำสามารถแสดงในรูปสมการของเคลวิน (Kelvin's equation) ที่พิจารณาแรงคาพิลลารีดังต่อไปนี้

$$p_v = p_{vs} \exp\left(\frac{p_c}{\rho_l R_v T}\right) \quad (2-19)$$

เมื่อ p_{vs} คือ ความดันประกอบ (partial pressure) ของไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor)

การทำนายอัตราการแห้งตัวหรือการกระจายตัวของความชื้นภายในวัสดุ การคำนวณพร้อมกันของระบบสมการที่ควบคุมปรากฏการณ์การอบแห้งทั้งหมดต้องอาศัยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (numerical calculation)

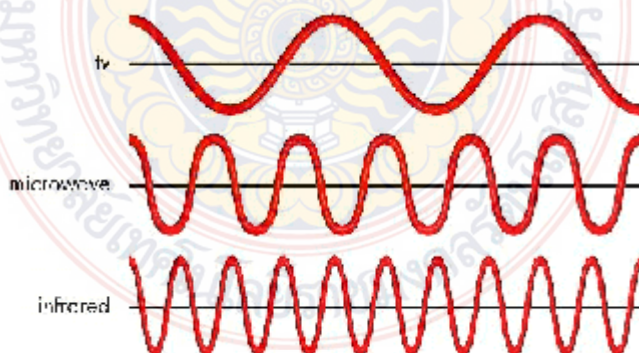
1.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทำความร้อน กระบวนการอบแห้ง กระบวนการฆ่าเชื้อ เป็นต้น เนื่องจากเป็นหัวใจหลักของงานวิจัย ถ้าทำการวิจัยโดยขาดความรู้พื้นฐาน งานวิจัยดังกล่าวจะขาดความน่าเชื่อถือและไม่มีคุณภาพ และหากงานวิจัยเน้นการศึกษาในเชิงทฤษฎี ความรู้พื้นฐานเชิงทฤษฎีทางด้านไมโครเวฟยิ่งมีความจำเป็น

เพราะหากขาดองค์ความรู้พื้นฐานดังกล่าวก็ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟได้ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีดังนี้

1.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครเวฟ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นของไมโครเวฟ (0.3-300 กิกะเฮิร์ต (GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 ซม.-0.3 มม. ดังภาพที่ 2-10) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัสดุต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม การให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและต่างจากวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ ไมโครเวฟมีความยาวคลื่นหรือความถี่ในการทะลุทะลวงเท่ากับ 2 ซม. ในช่องว่าง เมื่อไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกพลังงานของไมโครเวฟจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยวัสดุไดอิเล็กตริก การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่า (ใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ) ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายใน



ภาพที่ 2-10 ลักษณะของคลื่นไมโครเวฟ

1.2.2 ข้อดีของการทำความร้อนไมโครเวฟ (The Advantages of Microwave Heating)

1. ใช้เวลาน้อย (High Speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสีย เนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (stationary part)
2. การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy Penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ ดังภาพที่ 2-11 การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนจากผิวนอกวัสดุอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการนอกจากนั้นยังใช้เวลามากเพราะข้อจำกัดทางการนำความร้อน ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า



ภาพที่ 2-11 การเกิดความร้อนของวัสดุ

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

4. การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างทันทีทันใด (Instantaneous Electronic Control) อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่าเช่น เตาอบ ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาอันน้อยมาก (ภายในเศษเสี้ยววินาที)

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

ตารางที่ 2-1

การประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟ

Materials	Process
Chemistry	<ol style="list-style-type: none"> 1. Continuous Drying of fine Chemicals. 2. Continuous Heating of Corrosive and Abrasive Product. 3. Heating and Drying of Metal Oxide. 4. Reaction Accelerator in Chemical Processing. 5. Heating/Liquefying of High Viscous Chemical Raw-Materials. 6. Drying of Peroxide/Explosive Materials.

Materials	Process
	7. Continuous High Pressure Thermo Chemical Conversion of Organic Products.
Pharmaceutical	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vacuum Drying of Tablets and Active Ingredients Removing Solvents Under Explosive Protection and CGMP 2. Pasteurization/Improvement of Shelf Life of Pharmaceutical Products. 3. Heating/Liquefying of High Viscous Pharmaceutical and Cosmetically Raw-Materials 4. Continuous High-end Vacuum Drying 5. Ultra Fast Heating/Sterilisation of Sera and Protein Products
Ceramics	<ol style="list-style-type: none"> 1. Heating and Drying of Ceramic Goods. 2. Drying of Ceramic Catalysers. 3. Drying of Fiber Ceramics. 4. Continuous Sintering of Ceramic Pellets. 5. Sintering of Oxide Ceramics.
Plastics	<ol style="list-style-type: none"> 1. Heating of Laminated Sheets and Boards. 2. Polymerization of Fiber Glass Reinforced Profiles. 3. Preheating of Plastic Profiles 4. Heating of Epoxy Pipes/Tubes. 5. Drying of Plastic Raw-Material and Granulate. 6. Heating of Plastics Web and Sheets.
Medical	<ol style="list-style-type: none"> 1. Heating/Melting of Polyamide Tubings Used for Infusion System, Catheter etc. 2. Drying of Dialysers and Membrane Products.
Paper/Sheet material	<ol style="list-style-type: none"> 1. Drying/Preheating of Paper Webs in the Printing Industry. 2. Drying of Adhesive Coatings on Paper Webs.

6. ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Microwave Processing is Clean) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้

ในปัจจุบันกระบวนการทางไมโครเวฟถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม (เช่น การอบแห้งอาหาร อบแห้งสิ่งทอ อบแห้งไม้และกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก การทำสเตอริไลซ์ ฯลฯ) งานทางการแพทย์ (เช่น การคลายเนื้อเยื่อที่แข็งตัว การอุ่นเลือด และ กำจัดเนื้องอก) นอกจากนี้ไมโครเวฟยังสามารถใช้ในงานแยกสารระเหยออกจากวัสดุ (เช่น การแยกกำมะถันออกจากถ่านหินและการแยกสารสกปรกออกจากดิน) การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟถูกสรุปรวมไว้ในตารางที่ 2-1

1.2.3 ประวัติและการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ

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. ได้พัฒนาท่อควบคุมทิศทางการไหลของคลื่นไมโครเวฟขึ้นและจดสิทธิบัตรอเมริกันหมายเลข 2560-903 ต่อมาในปี ค.ศ. 1947 Morse P.W. และ Rivercomb H.E. จากบริษัทเจเนอรัลอิเล็กทริก (General Electric Company) ตีพิมพ์บทความเกี่ยวกับกรรมวิธีการทำอาหารด้วยเตาไมโครเวฟ จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวทำให้เตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์ถูกใช้อย่างแพร่หลายไปทั่วสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา จากนั้นในช่วงปี ค.ศ. 1960-1970 บริษัทต่าง ๆ พยายามพัฒนาเครื่องมือที่เกี่ยวกับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเข้ามาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมทางด้านอาหาร และอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิกและโพลีเมอร์ ในปัจจุบันอุปกรณ์ทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่ผลิตเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในครัวเรือน (เตาอบไมโครเวฟ) แต่สำหรับงานในเชิงอุตสาหกรรมถือว่ามีน้อยมาก ในสหรัฐอเมริกาอุปกรณ์การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกว่าร้อยละ 90 เป็นการใช้งานสำหรับครัวเรือน มีเพียงไม่ถึงร้อยละ 10 ที่ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม

1.2.4 ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (magnetron) ท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (wave guide) และบริเวณทำความร้อน (ที่ใส่วัสดุทำความร้อน (applicator)) การเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดผ่านมายังท่อนำคลื่นและเข้าสู่บริเวณทำความร้อนตามลำดับ

คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อชนกับวัสดุทำความร้อนอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ ดังนั้นโดยทั่วไปเครื่องไมโครเวฟจะติดตั้งตัวตัดคลื่น (isolator) ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าว นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์ปรับแต่งคลื่นระหว่างท่อนำคลื่นและบริเวณทำความร้อนเพื่อให้ระบบไมโครเวฟเกิดประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย

บริเวณทำความร้อนเป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบคลื่นไมโครเวฟที่กระทำต่อวัสดุว่าเป็นลักษณะคลื่นเดี่ยว (single-mode) หรือคลื่นผสม (multi-mode) สำหรับบริเวณทำความร้อนที่ออกแบบมาเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยวนั้นจะเกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในบริเวณทำความร้อน วัสดุทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นต้องมีความระมัดระวังในการเลือกขนาดและชนิดวัสดุ เครื่องไมโครเวฟชนิดคลื่นเดี่ยว (single-mode) เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กหรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นน้อย (low-lossy materials) แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ สำหรับเครื่องไมโครเวฟที่มีลักษณะเป็นคลื่นผสม (multi-mode) สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าโดยทำให้บริเวณทำความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าวัสดุและมีการเพิ่มความถี่จากแหล่งกำเนิดคลื่นทำให้คลื่นมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การทำความร้อนภายในวัสดุมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นเครื่องไมโครเวฟลักษณะคลื่นผสมจึงเหมาะสำหรับการทำความร้อนวัสดุขนาดใหญ่หรือวัสดุที่มีการดูดกลืนคลื่นสูง (high-lossy materials) หรือเมื่อต้องการให้วัสดุที่ทำความร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

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

สำหรับเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่น จะเกิดคลื่นเดี่ยวมีลักษณะเป็นระนาบและตกกระทบลงบนผิวหน้าวัสดุ ดังนั้นพฤติกรรมจึงไม่ซับซ้อนเหมือนเครื่องไมโครเวฟชนิดเตาอบ ดังนั้นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจึงอ้างอิงจากเครื่องไมโครเวฟลักษณะเดี่ยวเป็นหลัก

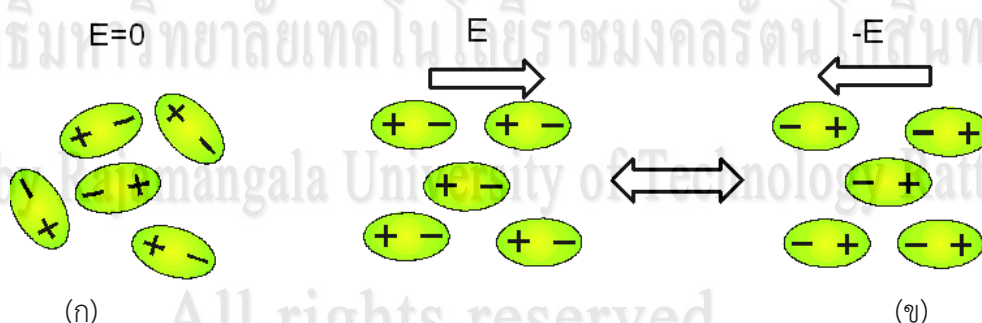
1.2.5 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก

สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้าหรือวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระจก พลาสติก เมื่อถูกนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลของสารวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้ง โดยจะเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า

ภาพที่ 2-12 โมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีสภาพเชิงขั้ว (dipole) ที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้สภาพเชิงขั้วในแต่ละโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและสลับขั้วตามการเปลี่ยนแปลงของคลื่น การสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วของสภาพเชิงขั้วทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้เกิดพลังงานออกมาในรูปของความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (megahertz, MHz) ซึ่งข้อตกลงนานาชาติว่าด้วยการกำหนดคลื่นความถี่สำหรับความถี่วิทยุ (radio frequency) และคลื่นความถี่สำหรับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (microwave application) (Jones and Rowley [3-41]): กำหนดความถี่วิทยุไว้ดังนี้

- 1) $13.56 \text{ MHz} \pm 0.05\% (\pm 0.00678 \text{ MHz})$
 - 2) $27.12 \text{ MHz} \pm 0.6\% (\pm 0.16272 \text{ MHz})$
 - 3) $40.68 \text{ MHz} \pm 0.05\% (\pm 0.02034 \text{ MHz})$
- และได้กำหนดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟไว้ดังนี้
- 4) 900 MHz (depend on country)
 - 5) $2450 \text{ MHz} \pm 50 \text{ MHz}$



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2-12 ปฏิกริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (electric field)

(ก) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า

(ข) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้า

ในปัจจุบันเตาไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปตามครัวเรือนจะใช้ความถี่ที่ 2450 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นในอากาศเท่ากับ 4.8 นิ้ว (12.192 ซม.) ในขณะที่ความถี่เท่ากับ 900 MHz มีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 13 นิ้ว (33.02 ซม.) ส่วนการวัดกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะวัดในหน่วยกิโลวัตต์ที่อุณหภูมิห้องและความดันหนึ่งบรรยากาศ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟกำลัง 1 กิโลวัตต์สามารถทำให้น้ำจำนวน 2.5 ปอนด์ (1.134 กก.) ระเหยได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง ปัญหาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องโดยตรงกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การกระจายของอุณหภูมิ การกระจายของความชื้น รวมทั้งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ ดังนั้นการรู้คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก รวมทั้งการควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ก่อให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจึงมีความจำเป็น ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเองด้วย

1.2.6 สมการพื้นฐาน (Basic Equation)

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือสมการแมกเวลล์ (Maxwell curl relation) รูปอนุพันธ์ของสมการแมกเวลล์ (Maxwell's equation) สามารถอธิบายในรูปของความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity, E) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity, H) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการแมกเวลล์ (Maxwell's equation) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-20)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-21)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2-22)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2-23)$$

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

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2-24)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2-25)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2-26)$$

โดย σ คือคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (electric conductivity), μ คือคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก (magnetic permeability) และ ϵ คือค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric permittivity หรือ dielectric constant) แทนสมการ (2-24) ถึง (2-26) ลงในสมการ (2-20) ถึง (2-23) จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2-27)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2-28)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2-29)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2-30)$$

สมการ (2-27) และ (2-28) (the curl relation) อ้างอิงมาจาก กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) และกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ตามลำดับ สมการ (2-29) และ (2-30) (divergence equations) เป็นผลมาจากกฎของเกาส์ (Gauss's law) the curl relation ในสมการของแมกเวลล์ (Maxwell's equation) ใช้วัดการหมุนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมการที่ (2-27) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาทำให้เกิดสนามไฟฟ้า สมการที่ (2-29) แสดงถึงความแปรผัน (divergence) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสภาพความหนาแน่นของประจุ (position charge density) และสมการที่ (2-30) แสดงถึงการไม่มีแหล่งกำเนิด (source) หรือแหล่งรับ (sink) ของสนามแม่เหล็ก คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2-31)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-32)$$

$$\sigma = 2\pi f \epsilon \tan \delta \quad (2-33)$$

เมื่อ f คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, $\tan \delta$ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานดูดซับเป็นพลังงานความร้อน หรือประสิทธิภาพลอสแทนเจนต์ (loss tangent coefficient) ϵ_r และ μ_r คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric permittivity หรือ relative dielectric constant) และคุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative magnetic permeability) ตามลำดับ

โดยทั่วไปคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุถูกสมมติให้แปรผันตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในกรณีของการทำความร้อน (heating) และการหลอมเหลว (melting) ด้วยไมโครเวฟ และแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้ง (drying) ด้วยไมโครเวฟ

คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่าง ๆ ที่แปรผันตามอุณหภูมิสามารถหาได้จาก Von Hippel, 1954 ส่วนคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุต่าง ๆ ที่แปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นสามารถหาได้จาก Wang and Schmugge, 1980

1.2.7 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในกระบวนการไมโครเวฟมีความจำเป็นต่อการออกแบบอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครเวฟให้เหมาะสม คลื่นไมโครเวฟเป็นรูปแบบหนึ่งของพลังงานที่สามารถทะลุผ่านที่ว่าง อากาศ และวัตถุได้ คลื่นไมโครเวฟประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) แต่จะแตกต่างจากแสงตรงที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน

ในการควบคุมกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ ควรทราบถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Osepchuk, 1984)

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r' + j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \quad (2-34)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) (โดยทั่วไปเรียก ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ (dielectric constant) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ε_r' เป็นจำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (relative permittivity หรือ relative dielectric constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ε_r'' เป็นจำนวนจินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริก ลอสแฟกเตอร์ (dielectric loss factor)) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ และ σ คือความสามารถในการนำไฟฟ้า (electric conductivity) ความสัมพันธ์ระหว่าง dielectric loss factor กับค่าการนำไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2-35)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ และสามารถยุบรวมกันเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกเรียกว่าประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$))

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r' \epsilon_0} \quad (2-36)$$

ประสิทธิภาพพลอสแทนเจนท์ ($\tan \delta$) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อถูกคลื่นพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

Von Hippel, 1954 ได้รวบรวมสมบัติไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุต่าง ๆ (เช่น คริสตัล เซรามิก แก้ว น้ำ พลาสติก ยางมะตอย ซีเมนต์ และ ไม้ เป็นต้น) ในช่วงความถี่และอุณหภูมิ $100 < f < 10^{10}$ และ $12 < T < 200$ °C

1.2.8 ความยาวคลื่นและความลึกในการทะลุทะลวง (Wavelength and penetration dept)

ค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และประสิทธิภาพพลอสแทนเจนท์สามารถใช้ประมาณความยาวคลื่นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและความลึกในการทะลุทะลวงได้ สำหรับคลื่นไมโครเวฟชนิด TE₁₀ mode ที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อผ่านเข้าไปในท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในเท่ากับ $a \times b$ ความยาวคลื่น (λ_g) ภายในท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถหาได้จาก

$$\lambda_x = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2 - \left(\frac{0 \cdot \lambda_0}{2b}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{1 \cdot \lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad (2-37)$$

เมื่อความยาวคลื่นในสุญญากาศ (λ_0) มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}}$ ดังนั้นความยาวคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริก (λ_{mg}) สามารถคำนวณได้จาก (Barringer et al., 1994)

$$\lambda_{mg} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} + 1 \right)}{2}}} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} + 1 \right)}{2}}} \quad (2-38)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ

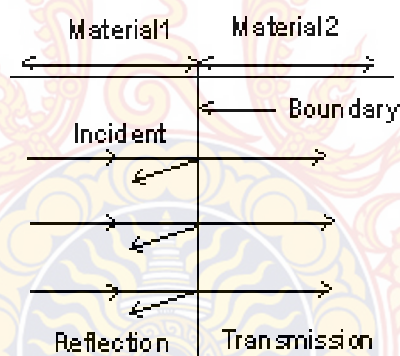
ความลึกในการทะลุทะลวง (D_p) หรือ ระยะทางที่สนามไฟฟ้าทะลุเข้าไปได้สามารถหาได้จาก

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}\right)^2} - 1 \right)}{2}}} = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}{2}}} \quad (2-39)$$

เมื่อค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และลอสแทนเจนท์เปลี่ยนไป ค่าความลึกในการทะลุทะลวงภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย

1.2.9 การสะท้อน การส่งผ่าน และการดูดซับ (Reflect, transmit and absorb)

คลื่นไมโครเวฟมีความหมายคล้ายคลึงกับแสงหลายประการกล่าวคือ คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน และถูกดูดซับพลังงานโดยวัสดุใด ๆ ได้ (ดังภาพที่ 2-13) ซึ่งความสามารถทั้งสามอย่างนั้นสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย



ภาพที่ 2-23 รังสีการตกกระทบและการดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่มาปะทะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิด (เช่น รอยต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับอากาศ) คลื่นส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกสะท้อนกลับสามารถคำนวณได้จากค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ของวัสดุทดสอบตามสมการต่อไปนี้

$$P_{reflect} \cong \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2 \quad (2-40)$$

สมการนี้ใช้ได้กับขอมสมมติฐานที่ว่าผิวหน้าของวัสดุราบเรียบและคลื่นไมโครเวฟตกกระทบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุทดสอบ สำหรับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านผิวรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก 2 ชนิดสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$P_{Transmit} = 1 - P_{reflect} \quad (2-41)$$

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกบางชนิด (เช่น แก้วและพลาสติก) คลื่นไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านโดยไม่มีการดูดซับและสะท้อนกลับของพลังงาน

เมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุจะถูกดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเรียกว่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร

(local volumetric heat generations) Q ซึ่งปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังสมการต่อไปนี้ (Metaxas, 1983)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \omega \mu_0 \mu_r'' |H|^2 \quad (2-42)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง H คือสนามแม่เหล็ก เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีสภาพเชิงขั้วทางแม่เหล็ก จึงไม่มีการดูดซับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.63) ใหม่ได้เป็น

$$Q = \sigma |E|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (2-43)$$

ในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (root mean square value) ของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร (local volumetric heat generation) สามารถแสดงได้ในรูปสมการต่อไปนี้ (Ratanadecho et al., 2002)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (2-44)$$

จากสมการ (2-44) ค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กตริกทอสแฟกเตอร์ และค่าสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนี้ยังแปรผันตรงกับค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์และค่าประสิทธิภาพทอสแทนเจนท์ของวัสดุอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังมีผลจากปัจจัยอื่น ๆ อีกเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (specific heat) และขนาดของวัสดุทดสอบ เป็นต้น

สมการ (2-44) มีความสำคัญมากในการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีต มีตัวอย่างของความสำเร็จของการประยุกต์ใช้การทำความร้อนและการอบแห้งในด้านต่างๆ มากมายซึ่งสามารถหาอ่านได้จากการทบทวนวรรณกรรมเหล่านี้คือ Raj and Emmons^[1], Turner and Ferguson^[2], Kolhapure and Venkatesh^[3], Hossain et al.^[4], Nithiarasu^[5], Bejan^[6], Cheng^[7], Perre and Turner^[8], Pakdee and Rattanadecho^[9], Zhu et al.^[10]

สำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนนั้นมี การศึกษามากมายหลายทศวรรษแล้ว โดยทฤษฎีส่วนใหญ่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของวิทเคอร์ (Whitaker's Theory) ซึ่งทฤษฎีเหล่านี้ได้นำเสนอและอธิบายพฤติกรรมทางกลของกระบวนการอบแห้งของวัสดุพูน ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการวิเคราะห์ออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

1. แบบ 1 ตัวแปร การวิเคราะห์แบบนี้จะพิจารณาสมการหลักเพียงสมการเดียว คือ สมการการแพร่ ซึ่งใช้เพื่อหาข้อมูลในลักษณะเชิงพฤติกรรมพื้นฐานเบื้องต้น

2. แบบ 2 ตัวแปร การวิเคราะห์แบบนี้จะใช้ตัวแปรอิสระสองตัวเข้ามาร่วมวิเคราะห์ ได้แก่ ความชื้น และอุณหภูมิในวัสดุ ในแบบจำลองประเภทนี้จะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของความดันอันเนื่องจากการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุ ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถอธิบายอิทธิพลที่สำคัญของกระบวนการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพในกรณีที่อุณหภูมิการอบแห้งไม่สูงเพียงพอที่จะส่งผลต่อความดันภายในวัสดุ

3. แบบ 3 ตัวแปร การวิเคราะห์แบบนี้จะใช้ตัวแปรอิสระสามตัวเข้ามาร่วมวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้ทั้งระบบ และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สภาวะการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิสูง หรือการถ่ายเทความร้อนในสภาวะสูญญากาศ ได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตามงานงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นมุ่งไปที่การตั้งสมมติฐานการวิเคราะห์แบบ 1 หรือ 2 ตัวแปรในกระบวนการทำความร้อนแบบพาความร้อน (Bories et al., 1991, Boukadida and Ben Nasrallah., 1995, Curcio., 2010) เนื่องจากง่ายต่อการศึกษา และคำนวณ เพราะการวิเคราะห์แบบ 3 ตัวแปรนั้นมีความซับซ้อนยุ่งยากกว่า แต่ก็มีนักวิจัยบางกลุ่มที่ศึกษาการวิเคราะห์แบบ 3 ตัวแปร เช่น งานของ Perre and Turner.,1997, และ Rattanadecho et al.,2008.

งานทบทวนวรรณกรรมล่าสุด (Rakesh and Datta, 2011) พยายามใช้การวิเคราะห์แบบ 3 ตัวแปรในวัสดุพูนแบบนอนไฮโกรสโคปิกเพื่อทำนายพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุ อย่างไรก็ตามในกรณีงานที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนยังมีเพียงแต่การทดลอง ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษากรณีการถ่ายเทความร้อนและมวลแบบ 3 ตัวแปรในวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกเลย

และหากกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในเชิงทฤษฎีและทดลองมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เช่น Ayappa et al, 1991 ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุไดอิเล็กตริกตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นขึ้นกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ แบบจำลองทางทฤษฎีในงานวิจัยนี้ยังสามารถทำนายปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอเวย์ (Thermal Runaway Effect) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ Ayappa et al., 1992 ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษากระบวนการทำความร้อนแก้ววัสดุด้วยไมโครเวฟในระนาบ 2 มิติ โดยกำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งเน้นย้ำถึงผลกระทบจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อกระบวนการทำความร้อนแก้ววัสดุทดสอบหลายชนิด

Fu et al., 1999 ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายตัวของกำลังการดูดซับ (Microwave Power Absorbed) ภายในควาวิที่มีคลื่นเป็นลักษณะมัลติโหมด (Multi-Mode Cavity) โดยอาศัยแบบจำลอง 3 มิติ ผลจากการคำนวณเชิงทฤษฎีและการทดลองนั้นสอดคล้องกัน

Ma et al., 1995 ศึกษาความเป็นไปได้ของการสร้างแบบจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองทางความร้อนเพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในเตาไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ศึกษาคือวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ไทม์โดเมน (Finite Different Time Domain; FDTD) ผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลองเท่าที่ควร

Torres and Jecko., 1997 ศึกษาความเป็นไปได้ของการสร้างแบบจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับแบบจำลองทางความร้อนเพื่อใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในเตาไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน โดยงานวิจัยนี้พัฒนาต่อเนื่องมาจากงานวิจัยของ Fu et al., 1994 และพบว่าความถี่ไมโครเวฟส่งผลต่อการเกิดความร้อนภายในวัสดุอย่างชัดเจน

Lui et al., 1995 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวัสดุโพลีเมอร์ที่เกิดจากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสัน (Ridge) ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสอดคล้องกันเมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส

Clemens and Saltiel., 1997 ศึกษาเชิงทฤษฎีโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในวัสดุตัวอย่าง และกำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ แต่ผลที่ได้จากการคำนวณไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง

Ratanadecho et al., 2002 ศึกษากระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุทดสอบที่มีหลายชั้น (Multi-Layer Material) โดยเน้นการศึกษาความสามารถในการส่งผ่านพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในวัสดุทดสอบ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นป้องกันการสะท้อนคลื่นและตำแหน่งของชั้นป้องกันการสะท้อน งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองจริงซึ่งสอดคล้องกันเป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ถือว่าเป็นแนวคิดที่สำคัญการประยุกต์พลังงานไมโครเวฟกับวัสดุที่หลายชั้นและเป็นผลงานชิ้นแรกในระดับนานาชาติที่วิจัยเกี่ยวกับปัญหานี้อย่างสมบูรณ์

Rattanadecho et al., 2008 ศึกษาทดลองการนำพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้กับงานบ่มคอนกรีต ซึ่งเป็นงานที่มุ่งเน้นการทดสอบเพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตเนื่องจากระบบสายพานลำเลียงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับอิทธิพลที่ศึกษาในงานนี้ศึกษาถึงกำลังไมโครเวฟ ระยะเวลาที่ผ่านกระบวนการบ่มเร่งด้วยไมโครเวฟ และชนิดวัสดุคอนกรีต จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าพลังงาน

ไมโครเวฟสามารถเร่งพัฒนาการบ่มคอนกรีตในระบบสายพานลำเลียงได้หากใช้พลังงานที่เหมาะสม และวัสดุคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมต่างกัน พฤติกรรมทางความร้อนจะแตกต่างกัน

Rattanadecho et al., 2009 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษากระบวนการทำความร้อนในวัสดุคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ (โหมด : TE10) โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของวัสดุและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าอิทธิพลทั้งสองอย่างส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุคอนกรีต

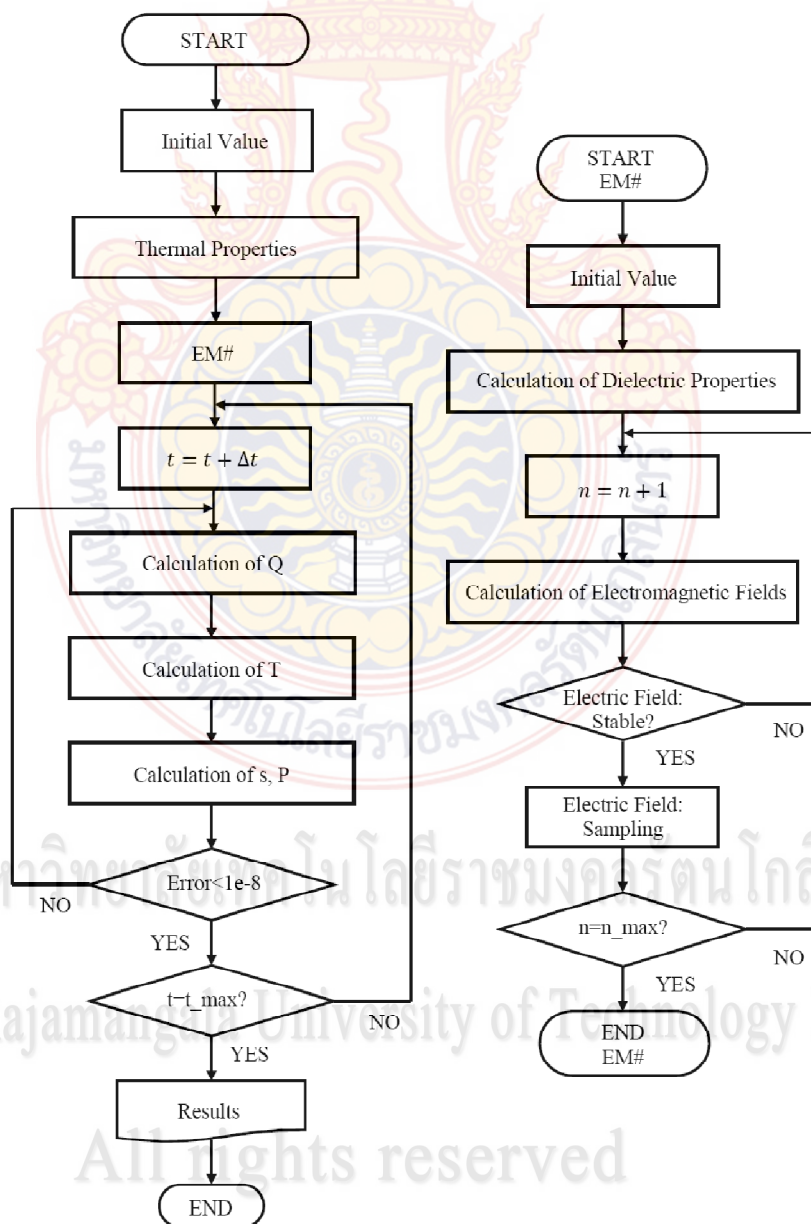
Zhao et al., 2000 พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟในวัสดุตัวอย่างคือ ไม้ที่มีความชื้นต่ำ งานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุทดสอบ คือ ไม้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่มีที่ยืนยันผลกับการทดลองจริง

Suwannapum and Rattanadecho., 2011 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษากระบวนการถ่ายเทมวลสารและความร้อนในวัสดุพูนชนิดไม้อิมตัว ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (โหมด : TE10) โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถที่จะทำนายพฤติกรรมของ อุณหภูมิ ความชื้น และความดัน ที่เปลี่ยนแปลงไปภายในวัสดุในแต่ละช่วงเวลา สำหรับอิทธิพลที่ทำการศึกษานั้นมุ่งเน้นไปที่ขนาดของอนุภาควัสดุพูน และความหนาของวัสดุ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารและความร้อนในวัสดุ จากการศึกษพบว่า ขนาดอนุภาค และความหนาของวัสดุส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารและความร้อนภายในวัสดุ ส่งผลให้แต่ละแบบจำลองใช้เวลาในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร ความชื้นออกจากระบบ และเกิดพฤติกรรมทางความร้อนและการกระจายตัวของความดันภายในวัสดุแตกต่างกัน

จากที่นำเสนอข้างต้นจะเห็นได้ว่าพลังงานไมโครเวฟที่ประยุกต์ใช้กับงานทางด้านความร้อนในวัสดุ มีการพัฒนาคู่ขนานกันไปทั้งในส่วนของการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และงานในส่วนของการทดลองทดสอบ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ ที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะของวัสดุพูนไม้ยางพาราภายใต้พลังงานไมโครเวฟทั้งเชิง

2. ขั้นตอนการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม

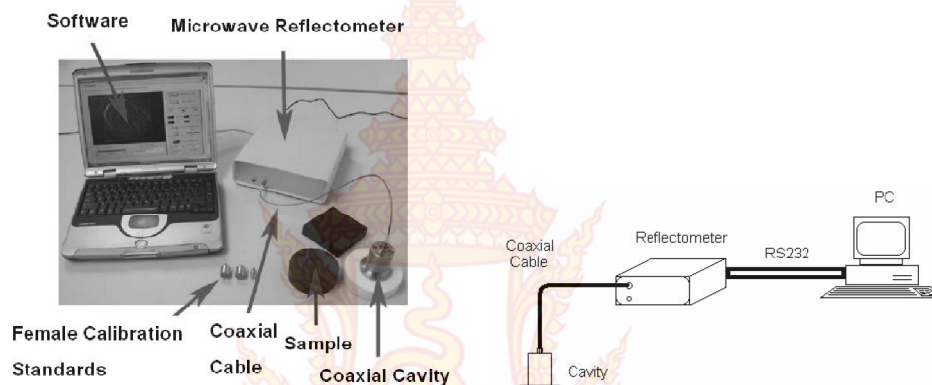
ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขซึ่งพิจารณาตามโดเมนในภาพที่ 3-1 มีขั้นตอนที่แสดงได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สำหรับข้อมูลวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จากแบบจำลอง จะได้จากการเก็บข้อมูลจากวัสดุด้วยการทดสอบและข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงต่างๆ ทั้งในส่วนของสมบัติกายภาพพื้นฐาน สมบัติทาง

ความร้อน และสมบัติไดอิเล็กตริก โดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์ดังภาพที่ 3-3 ซึ่งมีสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-3 เครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์ใช้วัดสมบัติไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 3-1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Particle size d(mm.)	Porosity ϕ (-)	Permeability K (m^2)
0.15 (F-bed)	0.385	8.41×10^{-12}
0.4 (C-bed)	0.371	3.52×10^{-11}

สำหรับข้อมูลป้อนเข้าสำหรับสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสภาวะการทำความร้อนแสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสภาวะการทำความร้อน

$\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12}$ [F/m]	$\mu_0 = 4.0\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
$\epsilon_{ra} = 1.0, \mu_{ra} = 1.0$	$= 5.1, \mu_{rp} = 1.0$
$\mu_{rl} = 1.0$	$\delta_p = 0.01, \tan \delta_a = 0.00$
$\rho_a = 1.205$ [kg / m ³]	$\rho_l = 1,000$ [kg / m ³]
$\rho_p = 2,500$ [kg / m ³]	$C_{pa} = 1.007$ [kJ / (kg · K)]
$C_{pp} = 0.80$ [kJ / (kg · K)]	$C_{pp} = 4.186$ [kJ / (kg · K)]
$\lambda_l = 0.61$ [W / (m · K)]	$\lambda_p = 1.0$ [W / (m · K)]
$\lambda_a = 0.025$ [W / (m · K)]	Initial saturation (s) = 0.6
$T_\infty = 25^\circ C$	$h_c = 20$ [W / (m ² · K)]
%RH = 55	$f = 2.45$ [GHz]
Power = 50[watt]	$T_{int} = 25^\circ C$
$U_\infty = 1$ [m/s]	$P_{int} = P_{atm}$

ตารางที่ 3-3 สมบัติไดอิเล็กตริกของไม้จากการศึกษาทดสอบจากเครื่องวัดสมบัติไดอิเล็กตริก และจากการสืบค้นข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม

	Data			
	Relative dielectric constant (ϵ_r')	Relative dielectric loss factor (ϵ_r'')	Loss tangent coefficient ($\tan \delta$)	D_p (m)
Present Study	1.591	0.033	0.021	1.470
Lehne et al.(1999)	2.419	0.036	0.015	1.669
Datta and Anantheswasan(2001)	1.5-4	0.015-0.04	0.01	1.946-3.178
Buffer (1993)	1.2-5	0.02-0.5	0.017-0.417	0.174-2.090

3. การทดลองผลเพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทดลองได้พัฒนาเครื่องมือทดลองเพื่อใช้ทดสอบการทำความร้อนและการไหลหลายสถานะที่ออกแบบให้มีเงื่อนไขสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนแบบจำลองในภาพที่ 3-1 ซึ่งเครื่องมือทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังภาพที่ 3-4 และรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

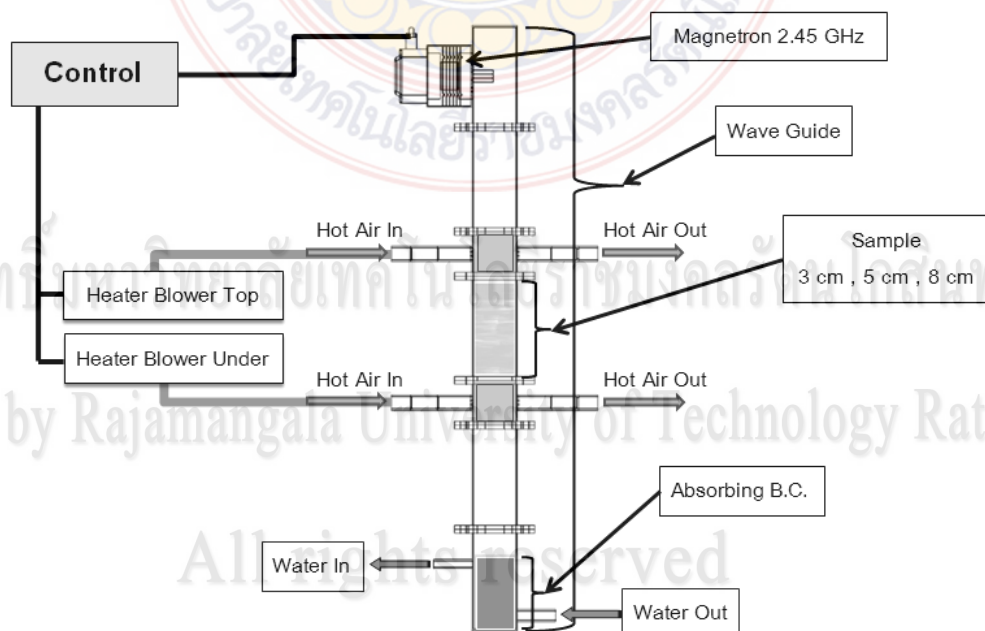


ภาพที่ 3-4 ชุดทดสอบกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟโหมด TE₁₀ ในวัสดุพอรุน

ยางพารา

3.1 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความร้อน

อุปกรณ์การทดลองสำหรับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟโหมด TE₁₀ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต(GHz)ที่เกิดคลื่นในลักษณะเดี่ยว(single mode)โดยคลื่นไมโครเวฟผลิตขึ้นโดยแมกนีตรอนจำนวน 1 ตัวซึ่งเป็นตัวกำเนิดพลังงานที่แสดงตำแหน่ง (ดังภาพที่3-5) ทำให้มีกำลังสูงสุด 800 วัตต์ และส่งไปตามแนวแกน Z ของท่อนำคลื่นชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (XY)เท่ากับ 110 x 55 มิลลิเมตรส่วนบริเวณด้านล่างของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีระบบดูดซับพลังงานไมโครเวฟ(ระบบน้ำไหลเวียน) เพื่อที่จะใช้เป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่หลงเหลือจากการทดสอบ และมีระบบลมร้อนเพื่อเป่าผ่านไปยังผิวของวัสดุทดสอบทั้งด้านบนและล่าง สามารถควบคุมการทำงานแยกทั้งบนและล่าง ส่วนวัสดุทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษาจะมีขนาดปริมาตร 3 ขนาด ได้แก่ 3.0x5.5x11.0, 5.0x5.5x11.0 และ 8.0x5.5x11.0 เซนติเมตร โดยการทดสอบวัสดุแต่ละชนิดจะมีการเตรียมภาชนะที่บรรจุแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของวัสดุทดสอบซึ่งไม่มีการดูคลื่นไมโครเวฟ จากนั้นจึงนำไปวางในตำแหน่งทดลองของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมและวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยเครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Data Locker) ด้วย สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) โดยวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของวัสดุทดสอบจะมีระยะๆห่างในแต่ละช่วงช่วงละ 1 เซนติเมตรพร้อมทั้งบันทึกการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermo scan)



ภาพที่ 3-5 ระบบโครงสร้างชุดทดสอบพลังงานไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.2.1 แมกนีตรอน(Magnetron)

แมกนีตรอน (ตัวอย่างดังภาพที่ 3-6) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไมโครเวฟที่สามารถสร้างเอาส์พุตสูงๆ ได้ในขณะเดียวกันก็จะให้ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในช่วง 40-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแมกนีตรอนถูกใช้ในส่วนประกอบหลักในเตาไมโครเวฟ



ภาพที่ 3-6 แมกนีตรอน

การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีกลไกเช่นเดียวกันแต่มีวิธีการในการที่ทำให้บรรลुวัตถุประสงค์ต่างกันโดยระบบพื้นฐานของระบบเหล่านี้จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงหรือเจนเนอเรเตอร์และใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นตัวส่งผ่านคลื่นไปยังชิ้นงาน

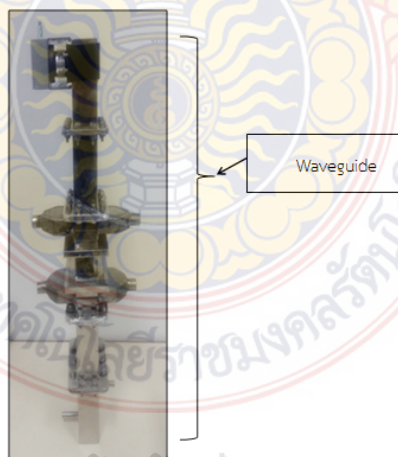
แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ติดตั้งบนท่อนำคลื่น (Waveguide) ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟหรือสร้างพลังงานไมโครเวฟไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นไปยังวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการที่อยู่ภายในควิตี้ (Cavity) เมื่อพลังงานไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุแล้วส่วนที่นอกเหนือจากการดูดซับ (Absorbed Wave) โดยตัววัสดุจะมีบางส่วนที่ทะลุผ่าน (Transmitted Wave) วัสดุและจะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (Reflected wave) ไปซึ่งอัตราพลังงานไมโครเวฟที่สะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของวัสดุและคุณลักษณะประจำตัวของวัสดุเอง คลื่นสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟขณะชนกับวัสดุอาจทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเสียหายได้ (โดยเฉพาะระบบที่ใช้ไมโครเวฟกำลังสูง) ดังนั้นโดยทั่วไประบบไมโครเวฟจะติดตั้งตัวดักคลื่นหรือที่เรียกทั่วไปว่าเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) (อุปกรณ์ทำให้คลื่นไมโครเวฟเดินได้ทางเดียว)ระหว่างตัวกำเนิดคลื่นและท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายดังกล่าวโดยทั่วไปแมกนีตรอนแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือชนิดแรกเป็นแมกนีตรอนที่ทำงานเป็นจังหวะหรือพัลส์ (Pulsed Magnetron) ซึ่งประยุกต์ใช้ในงานเรดาร์ชนิดที่สองเป็นแมกนีตรอนที่ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous – Wave (CW) Magnetron) ซึ่งมักใช้ประยุกต์กับกระบวนการทางความร้อนเช่นที่ใช้ในเตาไมโครเวฟตามบ้านและกระบวนการทางอุตสาหกรรม

3.2.2 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

ท่อนำคลื่นเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการส่งถ่ายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นสายโคแอกเซียลที่ไม่มีตัวนำตรงกลางสร้างขึ้นจากสารตัวนำและอาจมีรูปร่างลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมวงกลมหรือวงรี ท่อนำคลื่นมีข้อดีมากกว่าสายคู่นำสัญญาณและสายโคแอกเซียล เช่นมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้ลดการเกิด copper losses สายคู่นำสัญญาณจะมีการเกิด copper losses เพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยส่วนสายโคแอกเซียลจะมีพื้นที่ผิวด้านนอกมากแต่พื้นที่ผิวด้านในน้อยที่ความถี่ไมโครเวฟกระแสจะเดินทางที่ผิวด้านในของตัวนำ

ในงานทดลองนี้ เลือกใช้ท่อนำคลื่นชนิดทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเนื่องจากง่ายต่อการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของคลื่น ซึ่งเกิดคลื่นในลักษณะเดี่ยว (single mode) ที่ความถี่ 2.45GHz ชนิดของคลื่นเดี่ยวเป็นแบบโหมด TE_{10} (transverse electric wave)

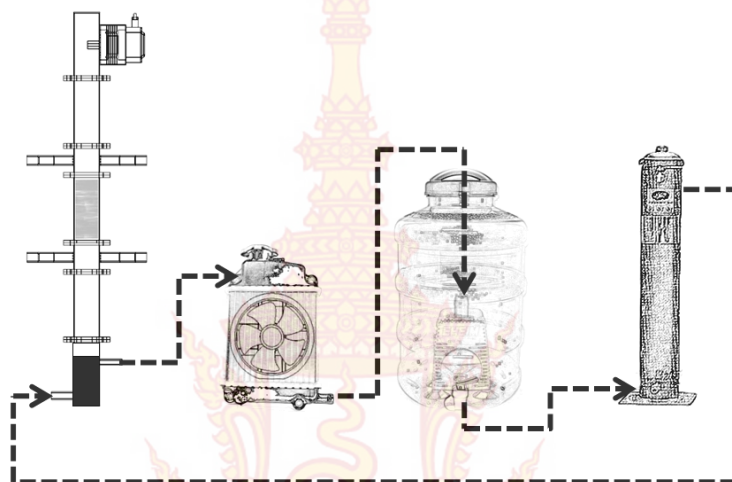
โดยท่อนำคลื่นบริเวณตำแหน่งตรงกลางจะมีช่องใส่วัสดุทดสอบ (sample) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความหนาได้ทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่ 3, 5 และ 8 เซนติเมตร (ดังภาพที่ 3-7)



ภาพที่ 3-7 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.2.3 ระบบดูดซับคลื่นด้วยน้ำ (Absorbing boundary condition)

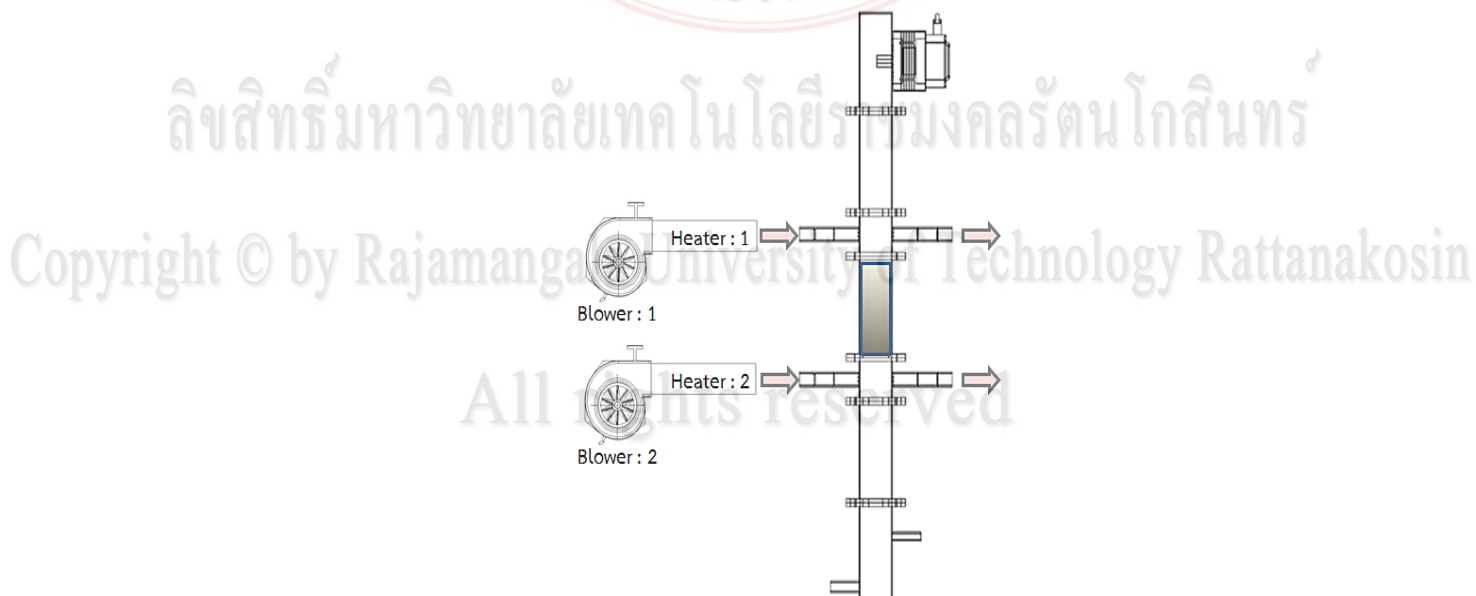
เป็นระบบที่สำคัญส่วนหนึ่งของการใช้พลังงานด้านความร้อนของคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากระบบนี้จะมีน้ำทำการช่วยรองรับหรือช่วยในการดูดซับคลื่นส่วนที่เหลือจากการทำความร้อนแก่ตัววัสดุนั้นเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไปยังตัวแมกนีตรอน จะทำให้เกิดความเสียหายได้ต่อตัวแมกนีตรอน และป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไปยังวัสดุทดสอบซึ่งอาจทำให้การทำนายพฤติกรรมของคลื่นผิดเพี้ยนไป จึงได้มีการออกแบบการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบด้วยชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อนำน้ำที่มีอุณหภูมิปกติกลับมาเข้าระบบ (ดังภาพที่ 3-8)



ภาพที่ 3-8 ระบบดูดซับคลื่นด้วยน้ำ

3.2.4 ระบบลมร้อนผ่านผิวหน้าสัมผัส

การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นที่ทราบกันดีว่าจะเกิดความร้อน ณ ตำแหน่งตรงกลางของวัสดุที่นำมาทดสอบ ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ผิวของวัสดุมีความชื้นที่หลงเหลือจากการระเหยออกมาจากภายในวัสดุ เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการทำความร้อน เราจึงสร้างชุดระบบลมร้อนผ่านผิวหน้าสัมผัสโดยการใช้ลมเป่าผ่านขดลวดทำความร้อนทั้งด้านบน และด้านล่าง ระหว่างช่องใส่วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเพื่อช่วยในการพาความร้อนและให้ความร้อนแก่ผิวด้านบน ด้านล่างแก่วัสดุทำให้เกิดความร้อนที่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวที่ดีทั่วทั้งวัสดุส่งผลให้ความชื้นถ่ายเทออกจากระบบได้ดียิ่งขึ้น (ดังภาพที่ 3-9)



ภาพที่ 3-9 แสดงตำแหน่งของลมร้อนผ่านผิวหน้าสัมผัสทั้งบนและล่าง

3.2.5 ระบบควบคุมการทำงาน(Control Panel)

การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการปล่อยลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูง จำเป็นต้องมีระบบควบคุมการทำงานเพื่อให้่ายต่อการทดลองและสามารถป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นกับตัวผู้ที่กระทำการทดลองและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ได้เพื่อป้องกันการเสียหายหรือสูญเสีย โดยระบบควบคุมสามารถแสดงตำแหน่งต่างๆ ได้ดังภาพที่ 3-10 และแบ่งการทำงานออกเป็นดังนี้

- | | | |
|-----|-------------------------|-------------------------------------|
| 1) | MAIN SWITCH | สวิตช์ควบคุมการทำงานหลัก |
| 2) | Magnetron Switch | สวิตช์เปิด ปิด แมกนีตรอน |
| 3) | Magnetron Dimmer Switch | สวิตช์ปรับค่า แมกนีตรอน |
| 4) | Blower of Magnetron | ตัวระบายความร้อน แมกนีตรอน |
| 5) | Voltmeter | แสดงค่าแรงดันที่ใช้ |
| 6) | Heater Switch (Top) | สวิตช์เปิด ปิด ตัวทำความร้อน (บน) |
| 7) | Heater Switch (Under) | สวิตช์เปิด ปิด ตัวทำความร้อน (ล่าง) |
| 8) | Heater Dimmer (Under) | ตัวปรับค่าตัวทำความร้อน (ล่าง) |
| 9) | Heater Dimmer (Top) | ตัวปรับค่าตัวทำความร้อน (บน) |
| 10) | Blower Dimmer (Under) | ตัวปรับความแรงลม (ล่าง) |
| 11) | Blower Dimmer (Top) | ตัวปรับความแรงลม (บน) |

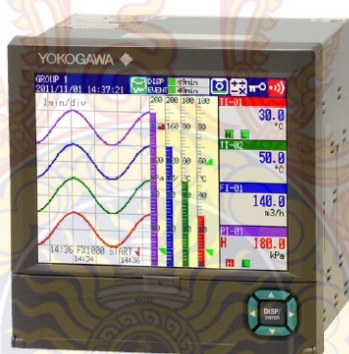


ภาพที่ 3-10 แสดงระบบควบคุมการทำงาน

3.3 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

3.3.1 อุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูล (Data Logger)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บหรือบันทึกข้อมูลที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ Yokogawa FX 1000 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บหรือบันทึกข้อมูลที่สัญญาณชนิดต่าง ๆ ที่ได้รับการตรวจจับ (Sensor) โดย Data logger จะมี Memory สำหรับเก็บค่าที่วัดได้ของสัญญาณตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ สามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการอ่านข้อมูลจาก Memory หรือ เชื่อมต่อกับ Data logger โดยตรงซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความดัน เป็นต้น ซึ่งเราสามารถนำข้อมูลที่บันทึกไว้ นำออกมาแสดงผลในรูปของกราฟ หรือตารางได้ในการทดลองนี้จะใช้วัดและบันทึกอุณหภูมิของวัสดุทดสอบในช่วงต่างๆ โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 อุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูล

3.3.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด(Infrared thermometer)

เครื่องอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ EXTECH 42515-t ใช้สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนบริเวณหน้าผิว ณ จุดตำแหน่งต่างๆ หรือบริเวณที่ตรงจุดที่เราสนใจ โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

3.3.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ(Thermocouple)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า(emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม)นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง โดยเราใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิต่อกับชุดแสดงค่าของอุณหภูมิ (Data Locker)ซึ่งจะใช้วัดอุณหภูมิ ณ จุดความลึกที่ห่างกันทุกๆ 1 เซนติเมตร ของชิ้นงานทดสอบ โดยการทดลองนี้เราใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 Thermocouple Type K

3.3.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography)

กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ FLIR T640 จะจับพลังงานรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุไปสู่สิ่งแวดล้อมและสร้างภาพแถบสีที่วัตถุที่ร้อนกว่าจะแสดงสีสว่างและวัตถุที่เย็นกว่าจะแสดงสีมืดกว่า พลังงาน IR สร้างมาจากการสั่นสะเทือนของอะตอมและโมเลกุล และมีพฤติกรรมคล้ายกับแสงสว่างที่มองเห็น ซึ่งสามารถสะท้อน, หักเห, ดูดซับ และเปล่งแสง ยิ่งโมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนไหวมากก็จะทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้นกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถเก็บภาพความร้อนได้ในหน่วยกάρตความจำ เมื่อถ่ายภาพเสร็จ สามารถมองเห็นภาพ หรือแก้ไข หรือดาวน์โหลดลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถนำภาพมาใช้ในรายงานและมีซอฟต์แวร์ในการใช้งานรวมอยู่ด้วยในการทำงานการทดลองนี้จะใช้เพียงการถ่ายภาพความร้อนของวัสดุทดสอบเพื่อให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของความร้อนได้ชัดเจนยิ่งขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermocouple โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 กล้องถ่ายภาพความร้อน

3.3.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลลม (Air flow meter)

เครื่องวัดอัตราการไหลลมที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ TPI 556C1 มีลักษณะเป็นวงกลมครึ่งซีกทำด้วยโลหะเบา 3-4 ติดอยู่ที่ปลายก้าน ซึ่งหมุนได้อิสระเมื่อลมพัดปะทะจะหมุนไปรอบแกนกลาง จำนวนรอบที่หมุนแสดงถึงความเร็วของลมและเราสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ถึง 50 องศาเซลเซียสจะแสดงเป็นตัวเลขออกมาบริเวณหน้าจอแสดงผลซึ่งเราได้นำมาวัดความเร็วลมและอัตราการไหลของระบบลมร้อนที่เป่าผ่านหน้าผิวสัมผัสของวัสดุในการทดสอบ โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลลม

3.3.6 เครื่องมือวัดการรั่วไหลของไมโครเวฟ (Microwave Leakage Detector)

เครื่องมือวัดการรั่วไหลของไมโครเวฟที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ RCME เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน DHHS (Department of Health and Human Services) ได้ระบุไว้ว่า ค่าสูงสุดที่ยอมรับให้

ไมโครเวฟรั่วไหลออกมาได้คือ 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการวัดที่ตำแหน่งระยะห่าง 5 เซนติเมตรจากตัวตู้ไมโครเวฟซึ่งเป็นเครื่องที่สามารถตรวจจับการแพร่กระจายออกมาของคลื่นไมโครเวฟโดยส่งสัญญาณ เป็นแถบความถี่มากหรือน้อยตามอัตราการรั่วของคลื่นทำให้สามารถรู้และป้องกันอันตรายได้ โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 เครื่องตรวจจับคลื่นไมโครเวฟ

3.3.7 เครื่องชั่งดิจิตอล (Digital scale)

เครื่องชั่งดิจิตอลที่ใช้จะเป็นยี่ห้อ CamryEL-01S รองรับน้ำหนักได้ 3 กิโลกรัม ความละเอียด 0.5 กรัม ใช้สำหรับชั่งอัตราส่วนผสมของวัสดุทดสอบกับน้ำและชั่งวัสดุทดสอบเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของวัสดุทดสอบทั้งก่อนและหลังการให้พลังงานความร้อน โดยเครื่องมือมีลักษณะแสดงได้ดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 เครื่องชั่งดิจิตอล

3.3 วัสดุทดสอบ

งานวิจัยโครงการนี้ เป็นงานวิจัยเพื่อมุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในไม้ม่างพารา ซึ่งเป็นวัสดุพอรุนชนิดไฮโกรสโคปิก ภายใต้สภาวะพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นจึงใช้วัสดุทดสอบเป็นไม้ม่างพาราที่ตัดให้มีขนาดพอดีกับควาตีของไมโครเวฟ โดยมีขนาดความหนา 30 มม. 50 มม. และ 80 มม. ตามลำดับ และเนื่องจากในการทดลองยังไม่มีเครื่องวัด

All rights reserved

ที่สามารถวัดพฤติกรรมภายในได้ตลอดเวลากระบวนการทดลอง ดังนั้นชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการแล้วนำออกมาวัดค่าภายนอกในเวลาที่กำหนดจะถูกทิ้งในทันที ในขณะที่เวลาถัดไปจะใช้ตัวอย่างชิ้นงานใหม่ทดสอบซ้ำตั้งแต่ต้นกระบวนการจนถึงช่วงเวลาถัดไปที่จะทำการวัด สำหรับวัสดุทดสอบแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-17 ไม้ยางพาราสดที่ควบคุมความชื้นและตัดตามขนาดเท่าพื้นที่หน้าตัดควาวิดีไมโครเวฟในกรณีความหนา 50 มม.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

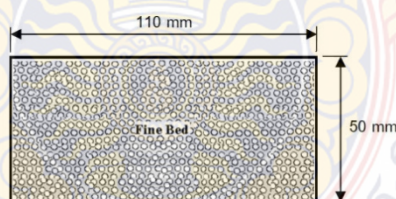
บทที่ 4

ผลการวิจัย/ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพูนไม้ยางพารา โดยมุ่งเน้นไปที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการศึกษาทดลองเชิงประยุกต์ ผลการศึกษาที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

1 กรณีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพูนไม้ยางพาราด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งตั้งสมมติฐานว่าเป็นวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกที่มีความละเอียดของโพรงสูงซึ่งมีลักษณะรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 4-1



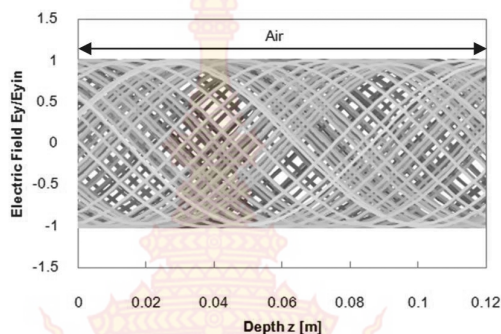
(a)

ภาพที่ 4-1 วัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิก

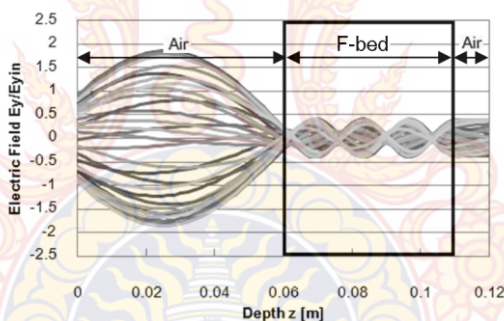
แบบจำลองของสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น

เพื่อให้เข้าใจถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปภายในท่อนำคลื่นที่บรรจุวัสดุพูนไม้ยางพารา ณ ช่วงเวลาต่างๆ ของกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงแสดงผลแบบจำลองที่ช่วงเวลาที่มีนัยสำคัญดังต่อไปนี้

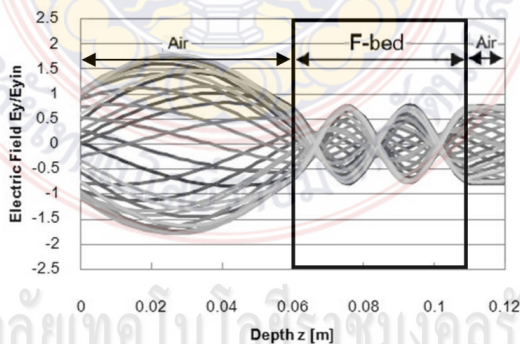
1. กรณีที่ท่อนำคลื่นเปล่าไม่มีโหลดภายในซึ่งค่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าเพียงค่าเดียว (คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศ) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 4-2
2. เมื่อบรรจุแพคเกจขึ้นเดียวลงในท่อนำคลื่นและทำการอบแห้งเป็นระยะเวลา 10 นาที (ช่วงต้นกระบวนการ) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 4-3
3. เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งของไม้ยางพารามีค่าสูงสุด (ที่เวลา 100 นาที) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 4-4
4. เมื่ออบแห้งไม้ยางพาราที่ระยะเวลา 360 นาที (ช่วงท้ายกระบวนการ) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 4-5



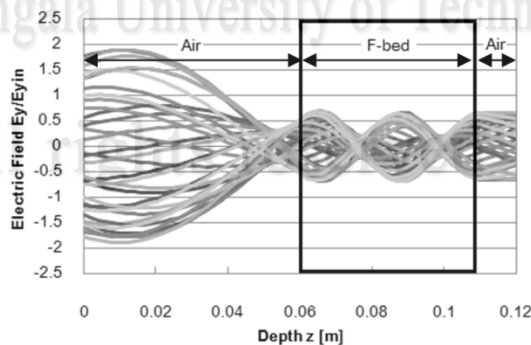
ภาพที่ 4-2 การกระจายของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นเปล่า ($x = 55$ mm)



ภาพที่ 4-3 การกระจายของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่มีการใส่ไม้อย่างพาราที่เวลา 10 นาที่ กรณี F-bed ($x = 55$ mm)



ภาพที่ 4-4 การกระจายของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่มีการใส่ไม้อย่างพาราที่เวลา 100 นาที่ กรณี F-bed ($x = 55$ mm)



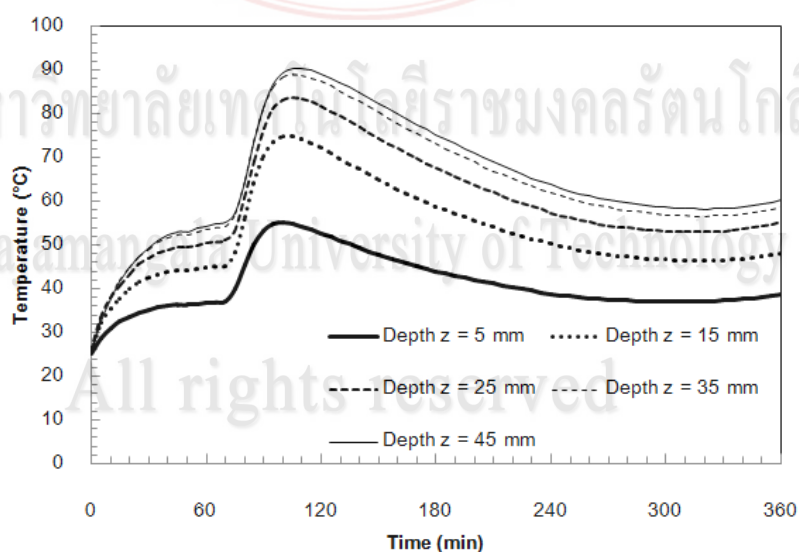
ภาพที่ 4-5 การกระจายของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่มีการใส่ไม้ยางพาราที่เวลา 360 นาที กรณี F-bed ($x = 55 \text{ mm}$)

ภาพที่ 4-2 แสดงคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นเปล่า พบว่าลักษณะการกระจายตัวของคลื่นที่แสดงให้เห็นมีแอมพลิจูดที่สม่ำเสมอตลอดท่อนำคลื่น

ภาพที่ 4-3 ถึง 4-5 แสดงคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นที่บรรจุไม้ยางพาราพบว่าความยาวคลื่นและแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านไม้ยางพารา ทั้งนี้เนื่องจากไม้ยางพารามีสมบัติไดอิเล็กทริกที่แตกต่างจากอากาศมาก นอกจากนั้นยังพบอีกว่าเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลงไปความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากในช่วงต้นกระบวนการวัสดุมีความชื้นมากส่งผลให้ไม้ยางพาราเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูง (High Lossy Material) แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปความชื้นภายในวัสดุลดลงส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงและทำให้คลื่นสามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุได้มากขึ้น ซึ่งแอมพลิจูดและความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นพฤติกรรม การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและระเบียบวิธีวิจัย

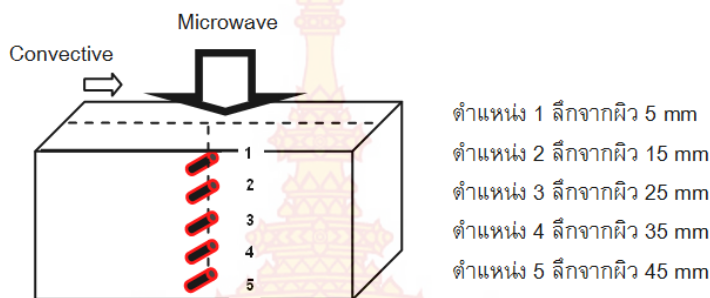
พฤติกรรมทางด้านมวลสาร ความร้อน และความดัน ในไม้ยางพารา

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองในกรณีไม้ยางพาราต่อพฤติกรรมทางด้านมวลสาร ความร้อน และความดัน



ภาพที่ 4-6 อุณหภูมิที่ระยะความลึกต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$(s_{\text{int}} = 0.6, T_{\text{int}} = 25^{\circ}\text{C}, P = 50\text{W})$$

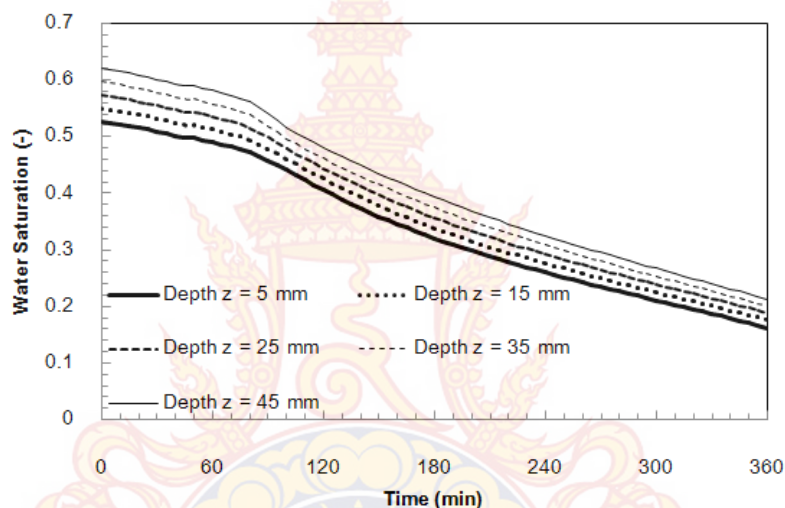


ภาพที่ 4-7 การตั้งข้อมูลจากขอบเขตที่พิจารณา

ภาพที่ 4-6 แสดงผลอุณหภูมิที่ระยะความลึกต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของไม้ยางพารา โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์เป็นไปตามภาพที่ 4-7 ซึ่งเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟจะให้ผลตรงข้ามจากการอบแห้งด้วยการพาความร้อนที่ผิว โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟจะมีอุณหภูมิภายในไม้ยางพาราสูงในขณะที่ผิวไม้ยางพารามีอุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสถานะอากาศแวดล้อม (T_{∞}) และในขณะเดียวกันการระเหยกลายเป็นไอของความชื้นที่เกิดขึ้นในไม้ยางพาราจะเกิดการกั้นตัวเมื่อไอเคลื่อนออกสู่ผิวหน้าที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อวิเคราะห์ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา พบว่าในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในไม้ยางพารา อุณหภูมิของไม้ยางพาราจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากไม้ยางพาราดูดซับคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนแต่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะไม่สูงมากนักเนื่องจากไม้ยางพารามีความอึดตัวของน้ำสูง (ความชื้น) ทำให้ความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นต่ำอีกทั้งยังส่งผลให้คลื่นส่วนใหญ่เกิดการสะท้อนกลับที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ (อ้างอิงจากภาพที่ 4-5) จนกระทั่งนาที่ที่ 60 อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเมื่อความชื้นลดลงส่งผลให้คลื่นสามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุได้ดีขึ้นทำให้ไม้ยางพาราดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากไม้ยางพาราอย่างรวดเร็ว (ดังภาพที่ 4-8) ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวนี้ทำให้สมบัติไดอิเล็กทริกของไม้ยางพาราเปลี่ยนแปลงตาม (มีความสามารถในการดูดซับคลื่นลดลง) ส่งผลให้อุณหภูมิของไม้ยางพาราเริ่มมีค่าลดลงที่เวลา 100 นาที และจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อสังเกตช่วงท้ายของกระบวนการพบว่าอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นอีกครั้งในขณะที่ความอึดตัวของน้ำมีค่าน้อยมาก (อ้างอิงภาพที่ 4-8) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อวัสดุเกิดคลื่นนิ่งที่ทำให้ค่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นและส่งผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ และจากแนวโน้มดังกล่าวคาดว่าหากเพิ่มระยะเวลาในการวิเคราะห์จะยิ่งเห็นผลจากปรากฏการณ์ดังกล่าวชัดเจนขึ้น

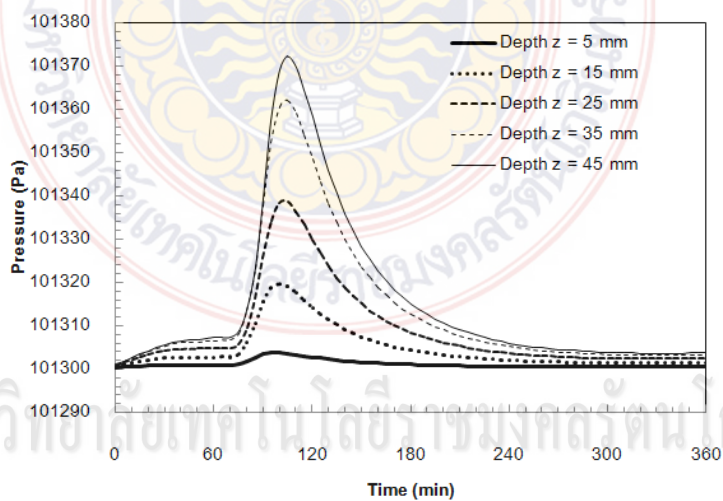
ภาพที่ 4-8 เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของความอึดตัวของน้ำต่อระยะความลึกไม้ยางพารา พบว่าอยู่ระหว่าง 0.52-0.62 ที่เวลาเริ่มต้นกระบวนการ (t_0) ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (p_c) ที่มีผลต่อแรงโน้มถ่วง (g_x) ส่งผลให้ไม้ยางพารา ซึ่งมีค่าความดันคาพิลลารีสูงมีช่วงการกระจายตัวของความอึดตัวของน้ำเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงน้อย และเมื่อพิจารณาความ

อิมตัวของน้ำ (ความชื้น) ที่เปลี่ยนแปลงไปในไม่ช้าพาราต่อระยะเวลาการอบแห้งพบว่าแนวโน้ม จะลดลงตามกลไกการถ่ายเทมวลสารและความร้อนออกจากระบบ (อ้างอิงภาพที่ 4-6)



ภาพที่ 4-8 ความอิมตัวของน้ำที่ระยะความลึกต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$(s_{\text{int}} = 0.6, T_{\text{int}} = 25^{\circ}\text{C}, P = 50\text{W})$$



(a)

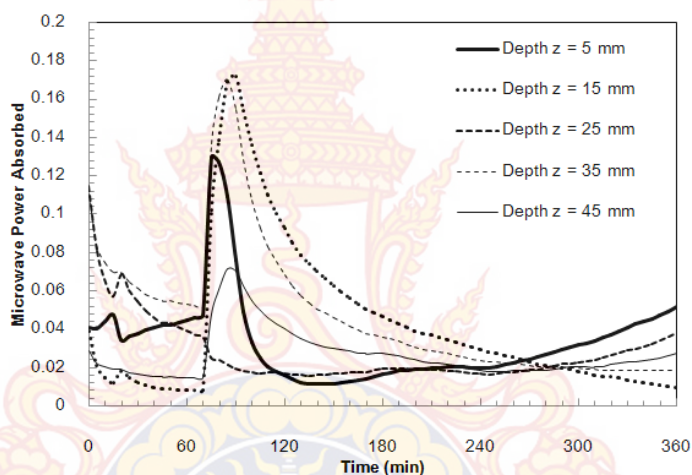
(b)

ภาพที่ 4-9 ความดันก๊าซที่ระยะความลึกต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$(s_{\text{int}} = 0.6, T_{\text{int}} = 25^{\circ}\text{C}, P = 50\text{W})$$

ภาพที่ 4-9 เมื่อวิเคราะห์ความดันก๊าซ พบว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการมีผลต่อความดันเป็นอย่างมาก ซึ่งอิทธิพลหลักดังกล่าวเกิดจากความดันคาพิลลารี และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ของของไหลทั้งในสภาวะก๊าซ (K_{rg}) และของเหลว (K_{rl}) ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของของไหลในแต่ละสถานะ เมื่อเปรียบเทียบจะเห็นชัดเจนว่า กรณีเวลาช่วงต้น จะเกิดความดันก๊าซสูงกว่ากรณี เวลาช่วงปลายการทำความร้อน (ความดันก๊าซสูงสุดกรณีเวลาช่วงต้น สูงถึง 101370 Pa ในขณะที่กรณี เวลาช่วงปลาย มีความดันก๊าซสูงสุดเพียง 101305 Pa) และเมื่อเปรียบเทียบระยะความลึกของแพคเกจ

พบว่าความดันที่ระยะลึกมากที่สุดจะมีค่าสูงสุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือแปรผันตรงกับอุณหภูมิของแพคเบตนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อศึกษาโดยภาพรวมของความดันก๊าซที่เกิดขึ้นต่อระยะเวลา พบว่าความดันก๊าซที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิเช่นเดียวกัน

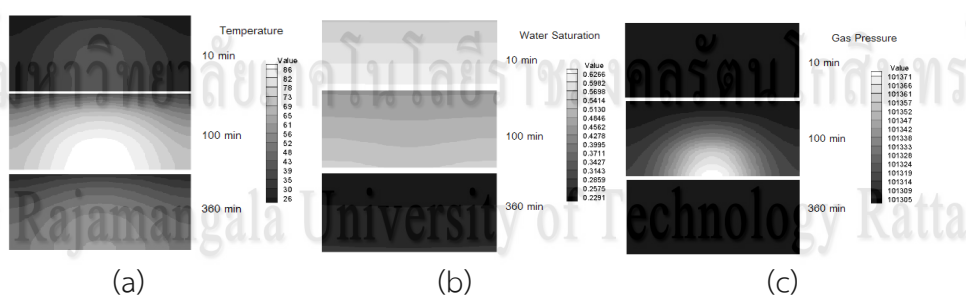


ภาพที่ 4-10 กำลังการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ระยะความลึกต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$(s_{int} = 0.6, T_{int} = 25^{\circ}C, P = 50W)$$

ภาพที่ 4-10 จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (Q) มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทั้งระยะความลึกและเวลา ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงและเน้นย้ำถึงอิทธิพลของการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กตริกของแพคเบตที่มีต่อพฤติกรรมทางความร้อนมวลสาร และความดันได้เป็นอย่างดี

ภาพที่ 4-11 เป็นการนำข้อมูลมาจัดเรียงเพื่อแสดงให้เห็นภาพโครงสร้างการกระจายตัวของ อุณหภูมิ ความอืดตัวของน้ำ และความดันก๊าซในไม้ยางพาราโดยรวมอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 4-11 การกระจายตัวของข้อมูล ((a) อุณหภูมิ (b) ความอืดตัวของน้ำ (c) ความดันก๊าซ) ในไม้ยางพารา ที่ระยะเวลา 10, 100 และ 360 นาที ตามลำดับ

2 กรณีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาการทดสอบออกเป็น 4 ลักษณะเพื่อใช้ในการสังเกตพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

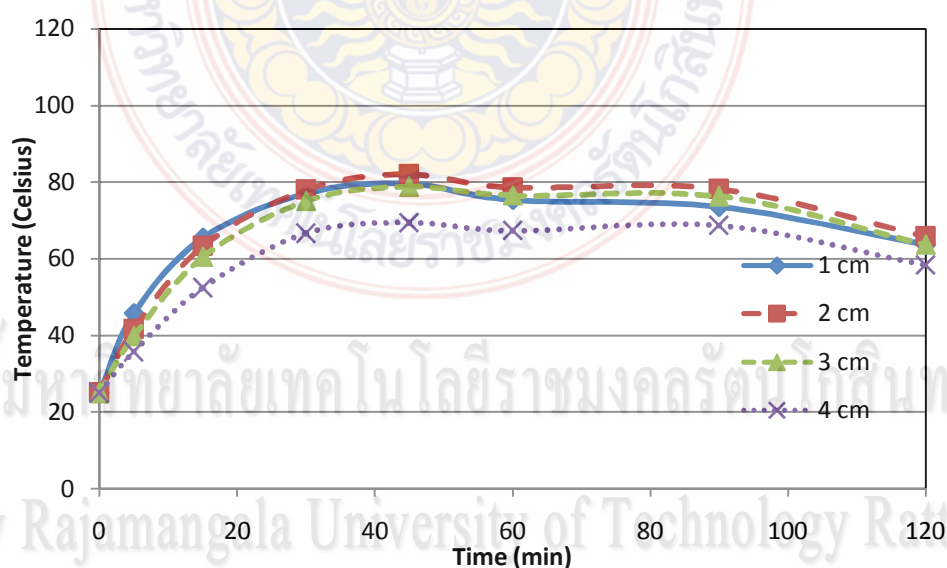
1. กรณีใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียวที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ ทดลองใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 120 นาที

2. กรณีใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียวที่กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ทดลองใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 120 นาที

3. กรณีใช้ลมร้อนจากฮีตเตอร์ลมร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและถ่ายเทมวลเพียงอย่างเดียวเป่าให้ลมพัดผ่านที่ผิววัสดุไม้ยางพาราทั้งด้านบนและด้านล่างที่กำลังไฟารวม 1800 วัตต์ ทดลองใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 120 นาที

4. กรณีใช้ลมร้อนจากฮีตเตอร์ลมร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนและถ่ายเทมวลเป่าให้ลมพัดผ่านที่ผิววัสดุไม้ยางพาราทั้งด้านบนและด้านล่างที่กำลังไฟารวม 1800 วัตต์ ร่วมกับการใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ ทดลองใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 120 นาที

และจากผลการศึกษาข้างต้นได้ผลที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์เทียบผลจากการศึกษาทดลองไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ยังไม่สอดคล้องกันมากนัก อาจเป็นเพราะเนื่องจากข้อจำกัดทางข้อมูลที่ศึกษาใส่ในข้อมูลป้อนเข้าในโปรแกรมยังไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ สำหรับผลการทดลองได้ภาพรวมดังต่อไปนี้

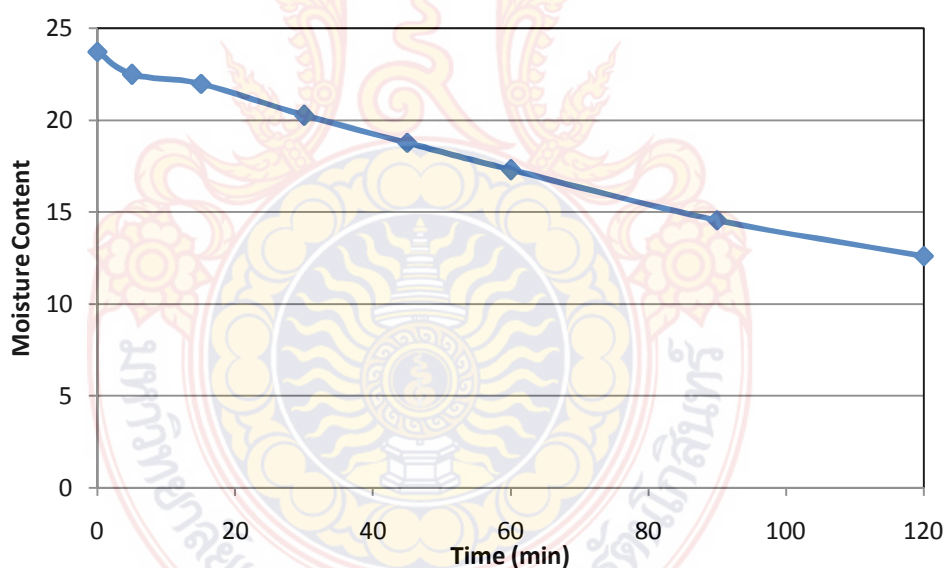


ภาพที่ 4-12 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ตามระยะลึกต่าง ตลอดกระบวนการ

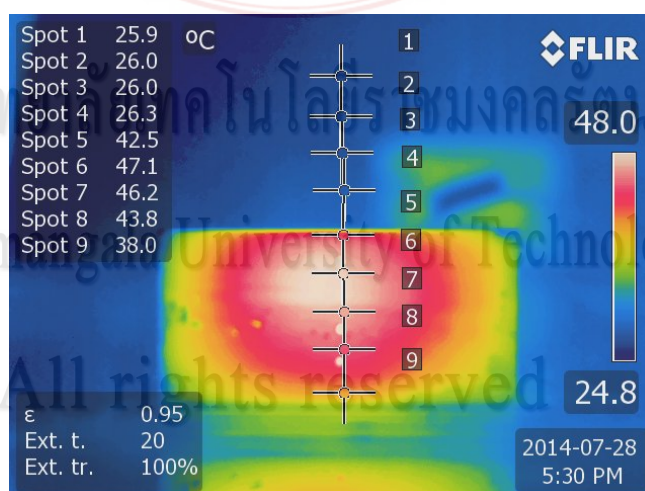
ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์

กรณีที่ใช้พลังงานไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในวัสดุเพียงอย่างเดียว พบว่า อุณหภูมิในการทำความร้อนตลอดกระบวนการมีลักษณะสม่ำเสมอ กำลังงานที่ป้อนเข้ามีความเหมาะสมไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงจนเกินไปที่จะทำให้ตัววัสดุไม้ยางพาราเสียหาย และเมื่อดูอุณหภูมิท้ายกระบวนการพบว่าอุณหภูมิการทำความร้อนเริ่มลดต่ำลง เนื่องจากปริมาณความชื้นในวัสดุที่ลดลงส่งผลให้สมบัติไดอิเล็กทริกที่เป็นปัจจัยหลักในการทำความร้อนต่ำลง และทำให้การดูด

ซับพลังงานคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากไมโครเวฟเป็นความร้อนน้อยลง ดังภาพที่ 4-12 อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการวิเคราะห์ความชื้น พบว่า ความชื้นยังคงอยู่ในระบบเป็นปริมาณมากดังภาพที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่ากลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 50 วัตต์ ยังไม่มีผลกระทบมากพอต่อการไล่ความชื้นภายในวัสดุไม้ยางพารา ออกมาสู่ผิวหน้าและระเหยไปสู่สภาวะภายนอก นอกจากนั้นเพื่อฉายภาพให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ทำการบันทึกอุณหภูมิของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนดังแสดงในภาพที่ 4-14 พบว่าวัสดุมีความร้อนเกิดขึ้นบริเวณตรงกลาง และอุณหภูมิจะลดต่ำลงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ ซึ่งหมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในวัสดุนั่นเอง

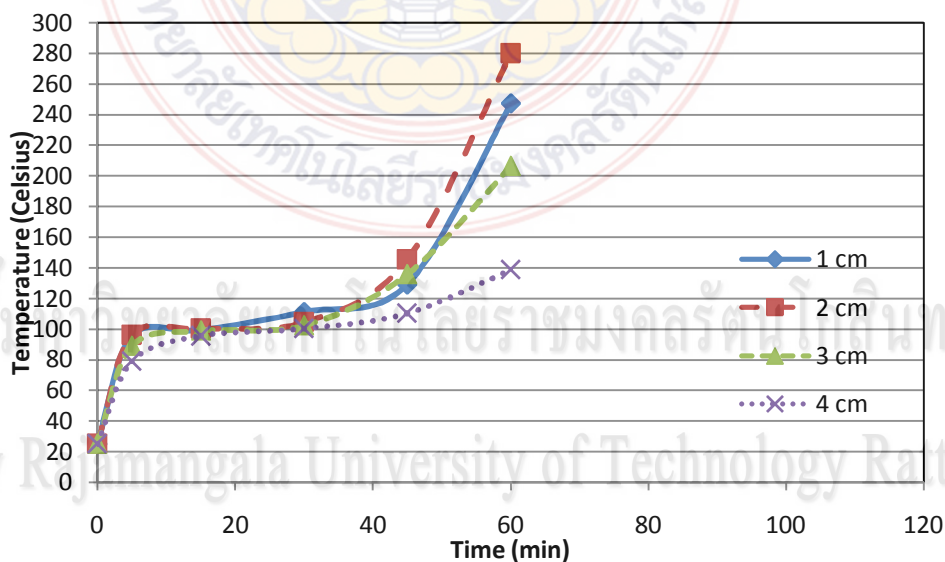


ภาพที่ 4-13 ความชื้นภายในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ
ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์

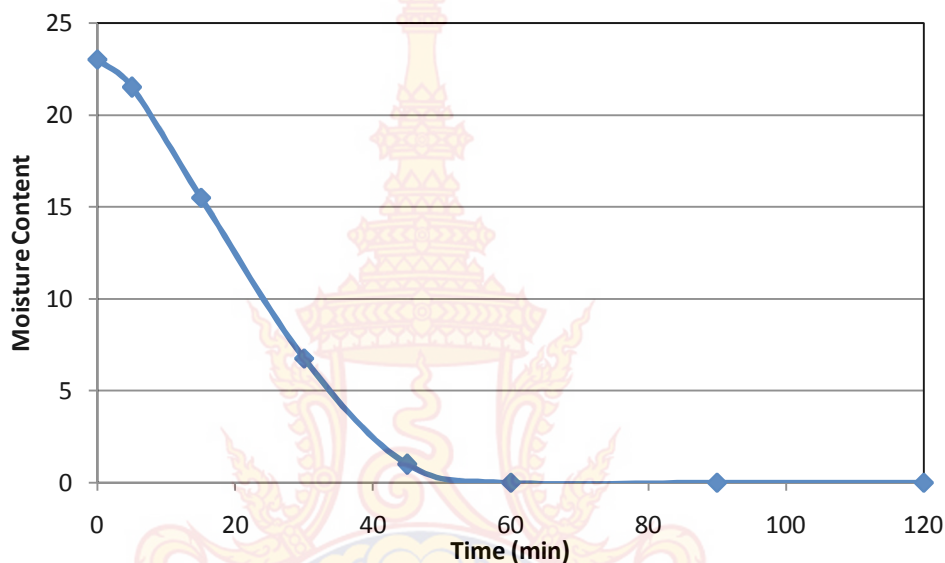


ภาพที่ 4-14 การกระจายตัวอุณหภูมิในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ
ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ (ที่เวลา 30 นาที)

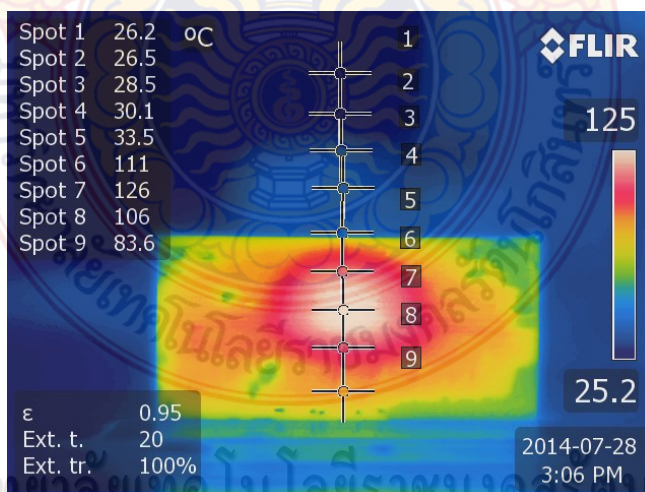
กรณีที่ใช้พลังงานไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในวัสดุเพียงอย่างเดียว พบว่า อุณหภูมิในการทำความร้อนตลอดกระบวนการมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ กำลังงานที่ป้อนเข้าไม่เหมาะสมส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงจนเกินไปจนทำให้ตัววัสดุไม่ย่างพาราเสียหาย อุณหภูมิกลางกระบวนการมีการสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และสามารถวัดอุณหภูมิภายในได้ถึง 280 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขนาดนี้ส่งผลเสียโดยตรงต่อวัสดุไม่ย่างพาราที่ต้องการอบแห้ง และมีความเสี่ยงต่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ทดลอง จึงสิ้นสุดกระบวนการทดลองใน 60 นาที ดังภาพที่ 4-15 นอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ความชื้น พบว่า ความชื้นในระบบลดลงได้อย่างรวดเร็ว และการหายไปของความชื้นที่วัสดุมีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้วัสดุไม่ย่างพาราที่แห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 4-16 แสดงให้เห็นว่ากลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 200 วัตต์ สามารถไล่ความชื้นภายในวัสดุไม่ย่างพาราออกมาสู่ผิวหน้าและระเหยไปสู่สภาวะภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะส่งผลเสียต่อระบบคือทำให้วัสดุเกิดความร้อนจนเกิดความเสียหาย นอกจากนี้เพื่อฉายภาพให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ทำการบันทึกอุณหภูมิของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนดังแสดงในภาพที่ 4-14 พบว่าวัสดุมีความร้อนเกิดขึ้นบริเวณตรงกลาง และอุณหภูมิจะลดต่ำลงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีใช้พลังงานไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์



ภาพที่ 4-15 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ตามระยะลิ็กต่าง ตลอดกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์



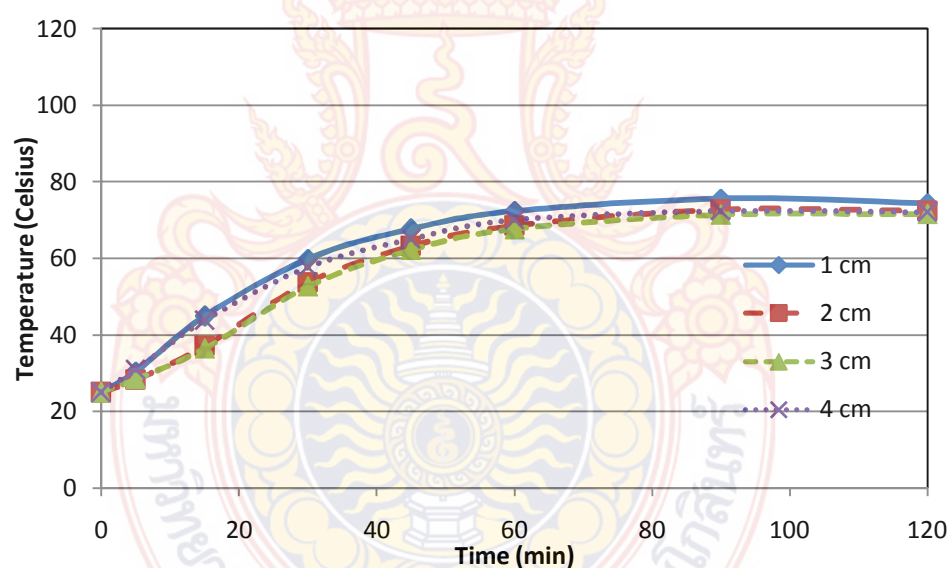
ภาพที่ 4-16 ความชื้นภายในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ
ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์



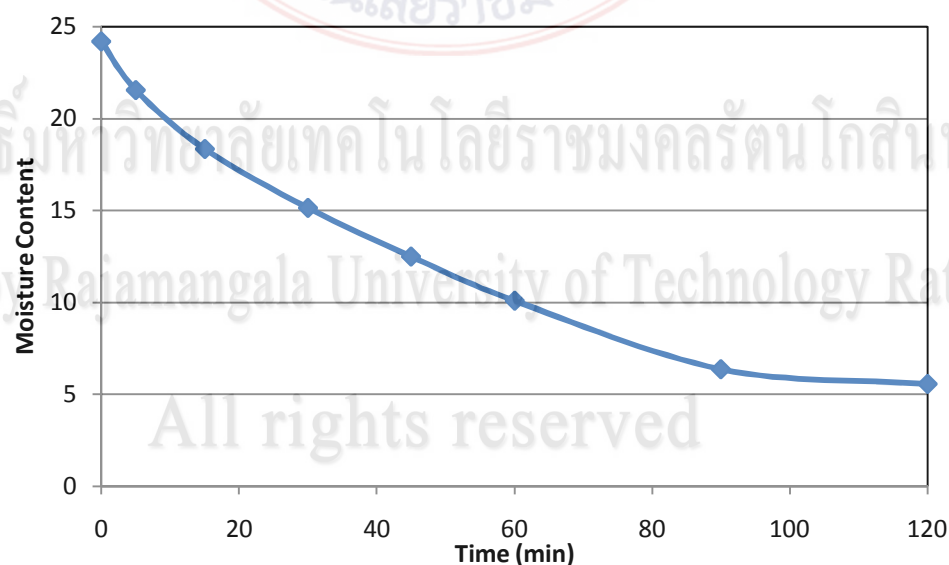
ภาพที่ 4-17 การกระจายตัวอุณหภูมิในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ
ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ (ที่เวลา 30 นาที)

กรณีที่ใช้พลังงานลมนร้อนกำลังไฟฟ้ารวม 1800 วัตต์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในวัสดุเพียงอย่างเดียว พบว่า อุณหภูมิในการทำความร้อนตลอดกระบวนการมีลักษณะสม่ำเสมอ กำลังงานที่ป้อนเข้ามีความเหมาะสมไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงจนเกินไปที่จะทำให้ตัววัสดุไม้ยางพาราเสียหาย และเมื่อดูอุณหภูมิท้ายกระบวนการพบว่าอุณหภูมิการทำความร้อนเริ่มลดต่ำลง เนื่องจากปริมาณความชื้นในวัสดุที่ลดลง ดังภาพที่ 4-18 อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 4-19 เมื่อนำไปเปรียบเทียบพลังงานในการไล่ความชื้นระหว่างลมนร้อน 1800 วัตต์ และไมโครเวฟ 200 วัตต์ พบว่า ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าน้อยกว่ามากแต่สามารถไล่ความชื้นได้ไวกว่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการพาความร้อนแม้จะให้อุณหภูมิที่สม่ำเสมอแต่สิ้นเปลืองพลังงาน เมื่อทำการวิเคราะห์ความชื้น พบว่า ความชื้นยังคงอยู่ในระบบเป็น

ปริมาณมากดังภาพที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่ากลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 50 วัตต์ ยังไม่มีผลกระทบมากพอต่อการไล่ความชื้นภายในวัสดุไม้ยางพารา ออกมาสู่ผิวหน้าและระเหยไปสู่สภาวะภายนอก นอกจากนั้นเพื่อฉายภาพให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ทำการบันทึกอุณหภูมิของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนดังแสดงในภาพที่ 4-14 พบว่าวัสดุมีความร้อนเกิดขึ้นบริเวณตรงกลาง และอุณหภูมิจะลดต่ำลงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ ซึ่งหมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในวัสดุนั่นเอง

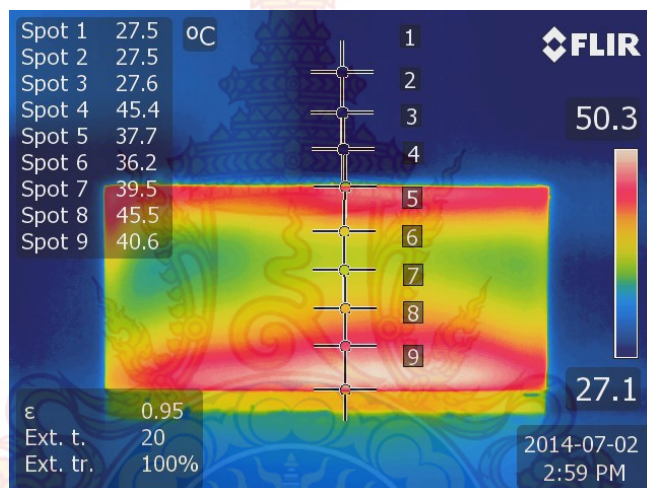


ภาพที่ 4-18 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ตามระยะลึกต่าง ตลอดกระบวนการให้ความร้อนด้วยสมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์



ภาพที่ 4-19 ความชื้นภายในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการให้ความร้อนด้วยสมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์

และเมื่อดูภาพความร้อนจากภาพที่ 4-20 เห็นชัดเจนว่าพลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผิวหน้าเข้าไปยังวัสดุด้วยกลไกการนำความร้อน ส่งผลให้กว่าที่อุณหภูมิจะเข้าไปในแกนกลางวัสดุ ต้องใช้ระยะเวลาานานกว่ากรณีทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 50 วัตต์



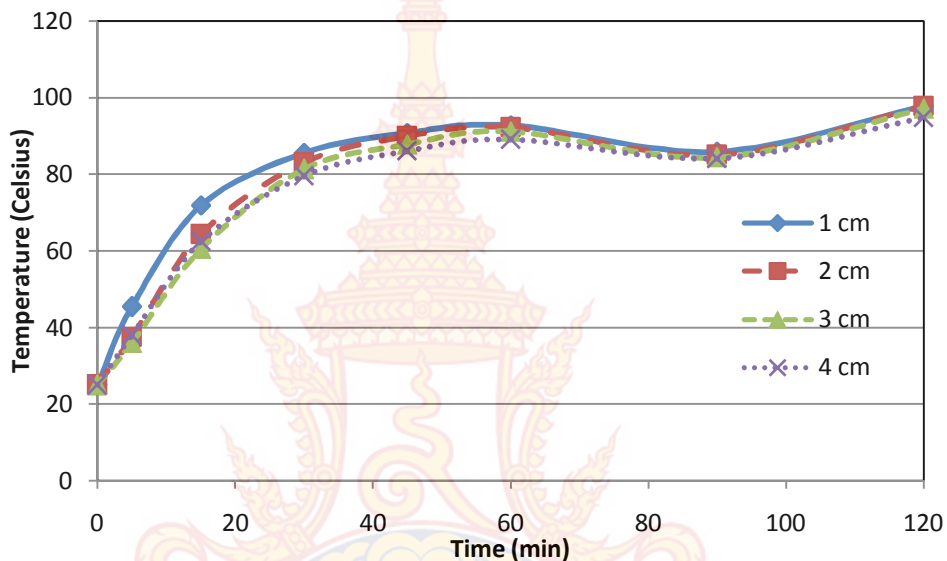
ภาพที่ 4-20 การกระจายตัวอุณหภูมิในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ

ทำความร้อนด้วยลมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์ (ที่เวลา 30 นาที)

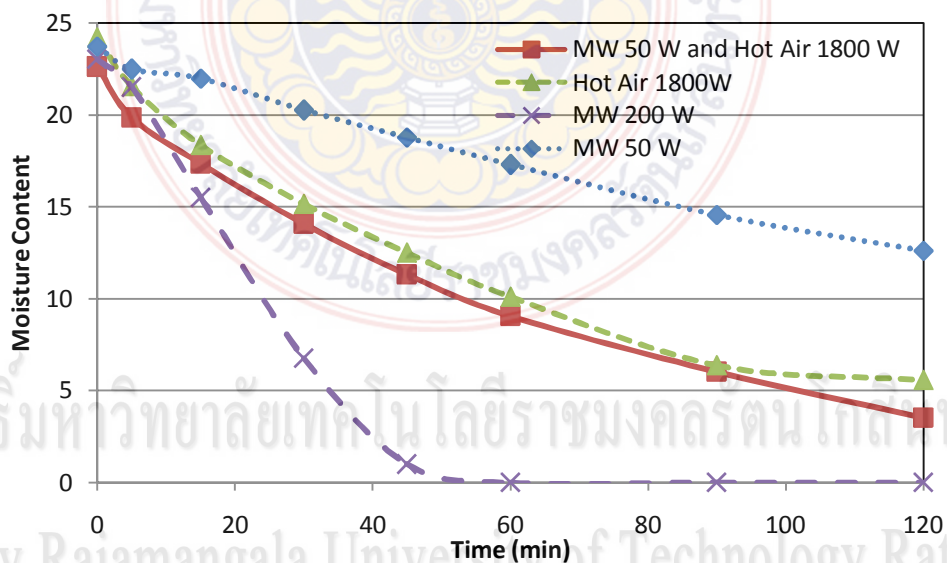
กรณีที่ใช้พลังงานลมร้อนกำลังไฟฟ้ารวม 1800 วัตต์ ร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ 50 วัตต์

เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในวัสดุไม้ยางพารา พบว่า อุณหภูมิในการทำความร้อนตลอดกระบวนการมีลักษณะสม่ำเสมอ และมีอุณหภูมิสูงกว่าทั้งสองกรณีเล็กน้อย แต่ไม่ถึงขั้นทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย เนื่องจากกำลังงานที่ป้อนเข้ามีความเหมาะสมไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงจนเกินไป และเมื่อดูอุณหภูมิท้ายกระบวนการพบว่าอุณหภูมิการทำความร้อนเริ่มลดต่ำลงและกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเห็นได้ว่า หากปล่อยให้ทำการอบแห้งนานกว่านี้ อาจเกิดพฤติกรรมทางความร้อนแบบเดียวกับกรณีไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ก็เป็นได้ เนื่องจากปริมาณความชื้นในวัสดุที่ลดลงมากและตัววัสดุมีอุณหภูมิที่สูง ดังภาพที่ 4-21 และ จากภาพที่ 4-22 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานในการไล่ความชื้น กับทุกรณีก่อนหน้า พบว่า สามารถไล่ความชื้นได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่เทียบเท่ากรณีไมโครเวฟที่ 200 วัตต์ ซึ่งจากผลตรงนี้หากต้องการให้ไล่ความชื้นได้เร็วขึ้นอาจจะเพิ่มกำลังไมโครเวฟไปอีกเล็กน้อย แต่การอบจะต้องใช้ความระมัดระวังมากขึ้น และเมื่อดูภาพถ่ายความร้อนที่ผิวพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุไม้ยางพารามีความสม่ำเสมอเมื่อมีการใช้แหล่งกำเนิดความร้อนสองแหล่งร่วมกันดังภาพที่ 4-23

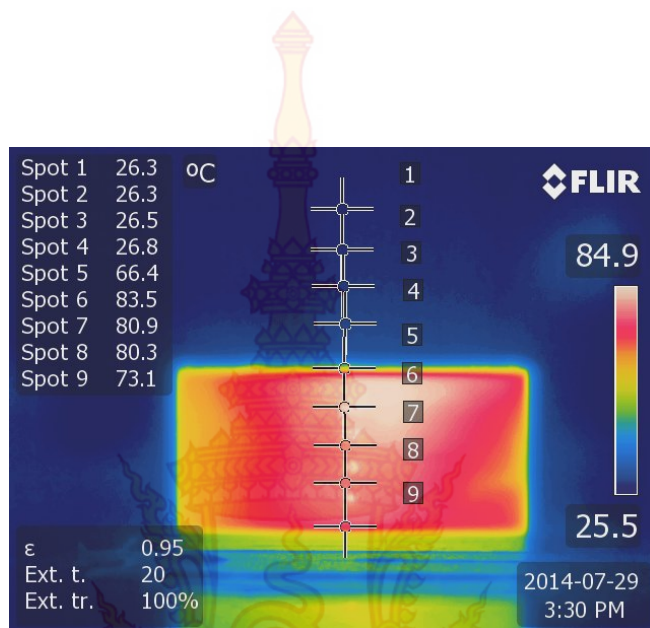
All rights reserved



ภาพที่ 4-21 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ตามระยะลึกต่าง ตลอดกระบวนการ
 ทำความร้อนด้วยลมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์ ร่วมกับการ
 ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์



ภาพที่ 4-22 ความชื้นภายในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ
 ทำความร้อนด้วยลมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์ ร่วมกับการ
 ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์
 เปรียบเทียบกับกรณีการทดลองอื่น



ภาพที่ 4-23 การกระจายตัวอุณหภูมิในวัสดุไม้ยางพาราตลอดกระบวนการ
 ทำความร้อนด้วยลมร้อนกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์ ร่วมกับการ
 ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพอร์นไม้อย่างพาราภายใต้พลังงานไมโครเวฟ เชิงทฤษฎีและประยุกต์ ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการศึกษา วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ครั้งนี้ได้ผลที่น่าสนใจหลายประการ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองยังไม่ค่อยสอดคล้องกันในหลายประเด็น ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดที่น่าสนใจได้ดังนี้

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ภายในวัสดุไม้อย่างพาราความหนา 50 มม. ค่อนข้างจะสม่ำเสมอ เนื่องจากอิทธิพลความแตกต่างของความชื้นที่ผิวหน้ากับความชื้นภายในแพคเบตมีค่าน้อย และลักษณะคลื่นสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตลอดกระบวนการเนื่องจากความชื้นที่สูงสูญเสียไปจากกระบวนการการถ่ายเทมวล

กลไกการไหลหลายสถานะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นหรือความอึดตัวภายในระบบและส่งผลต่อความดันรวมภายในวัสดุ ซึ่งหากสูงมากอาจเกิดแรงดันให้เกิดรอยปริของวัสดุได้

อุณหภูมิตลอดกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ขึ้นกับอิทธิพลของความชื้นภายในเป็นหลัก

จากการศึกษาการทดลองพบว่าความชื้นที่น้อยลงในระบบกลับทำให้อุณหภูมิในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากกรณีไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์

การใช้กำลังไมโครเวฟสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ก็ส่งผลต่ออุณหภูมิสูงมาก ซึ่งอาจจะทำให้วัสดุเสียหายได้

ไมโครเวฟให้พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าในขณะที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าลมร้อนมาก

การใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในระบบสม่ำเสมอขึ้นและสามารถไล่ความชื้นในระบบได้ดีขึ้น

2. การอภิปรายผล

ผลการศึกษาเป็นที่น่าพอใจแบบจำลองที่ได้สามารถใช้ในการขยายผลการศึกษาได้ต่อไปในอนาคต โดยมีรายละเอียดดังนี้

แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะของวัสดุพูนภายใต้พลังงานไมโครเวฟในภาพรวมที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเทเคอร์ ในการจำลองการไหลของวัสดุพูน อันส่งผลต่อภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุได้ แต่ยังไม่ให้ผลที่ไม่เหมาะสมในกรณีพัฒนาเป็นวัสดุพูนไม่ยาวพารา

การทดลองให้ผลที่น่าสนใจหลายประการสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเครื่องศึกษาในระดับที่ใหญ่ขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

3. ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกันมากกว่านี้ต่อไปในอนาคต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

บรรณานุกรม

1. Raj, P.P.K.; Emmons, H.W. Transpiration drying of porous hygroscopic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (5), 1975, 623-634.
2. Turner, I.W.; Ferguson, W.J. An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: Application to softwood drying, part I: The isotropic model. *Applied Mathematical Modelling*, 19 (11), 1995, 654-667.
3. Kolhapure, N.H.; Venkatesh K.V. An unsaturated flow of moisture in porous hygroscopic media at low moisture contents. *Chemical Engineering Science*, 52 (19), 1997, 3383-3392.
4. Hossain, M.A.; Vafai K.; Khanafer, K. M.N. Non-Darcy natural convection heat and mass transfer along a vertical permeable cylinder embedded in a porous medium. *International Journal of Thermal Sciences*, 1999, 38(10), 854-862.
5. Nithiarasu, P. Finite element modeling of a leaking third component migration from a heat source buried into a fluid saturated porous medium. *Mathematical and Computer Modelling*, 29 (4), 1999, 27-39.
6. Bejan, A. Designed porous media: maximal heat transfer density at decreasing length scales. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (14-16), 2004, 3073-3083.
7. Cheng, C.Y. Non-Darcy natural convection heat and mass transfer from a vertical wavy surface in saturated porous media. *Applied Mathematics and Computation*, 182 (2), 2006, 1488-1500.
8. Perre, P.; Turner, I.W. Microwave Drying of Softwood in an Oversized Waveguide. *AIChE J.* 1997, 43, 2579-2595.
9. Pakdee, W.; Rattanadecho, P. Unsteady effects on natural convective heat transfer through porous media in cavity due to top surface partial convection. *Applied Thermal Engineering*, 26 (17-18), 2006, 2316-2326.

10. Zhu, Q.Y.; Xie, M.H.; Yang, J.; Li, Y. Investigation of the 3D model of coupled heat and liquid moisture transfer in hygroscopic porous fibrous media International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 (19-20), 2010, 3914-3927.
11. Bories, S.A. Fundamental of Drying of Capillary-porous Bodies. in Kakac, S., Kilkis, B., Kulacki, F. and Arinc, F. (Ed.), Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media, NATO ASI series, Kluwer Publishers, 1991, 196, 391-434.
12. Boukadida, N.; Ben Nasrallah, S. Two Dimensional Heat and Mass Transfer during Convective Drying of Porous Media. Drying Technology 1995, 13 (3), 661-694.
13. Curcio, S. A Multiphase Model to Analyze Transport Phenomena in Food Drying Processes. Drying Technology 2010, 28, 773-785.
14. Rattanadecho, P.; Pakdee, W.; Stakulcharoen, J. Analysis of Multiphase Flow and Heat Transfer: Pressure Buildup in an Unsaturated Porous Slab Exposed to Hot Gas. Drying Technology 2008, 26, 39- 53.
15. Rakesh, V.; Datta A.K., Microwave puffing: Determination of Optimal Conditions using a Coupled Multiphase Porous Media – Large Deformation Model. Journal of Food Engineering 2011, 107, 152–163.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved

ประวัติผู้วิจัย

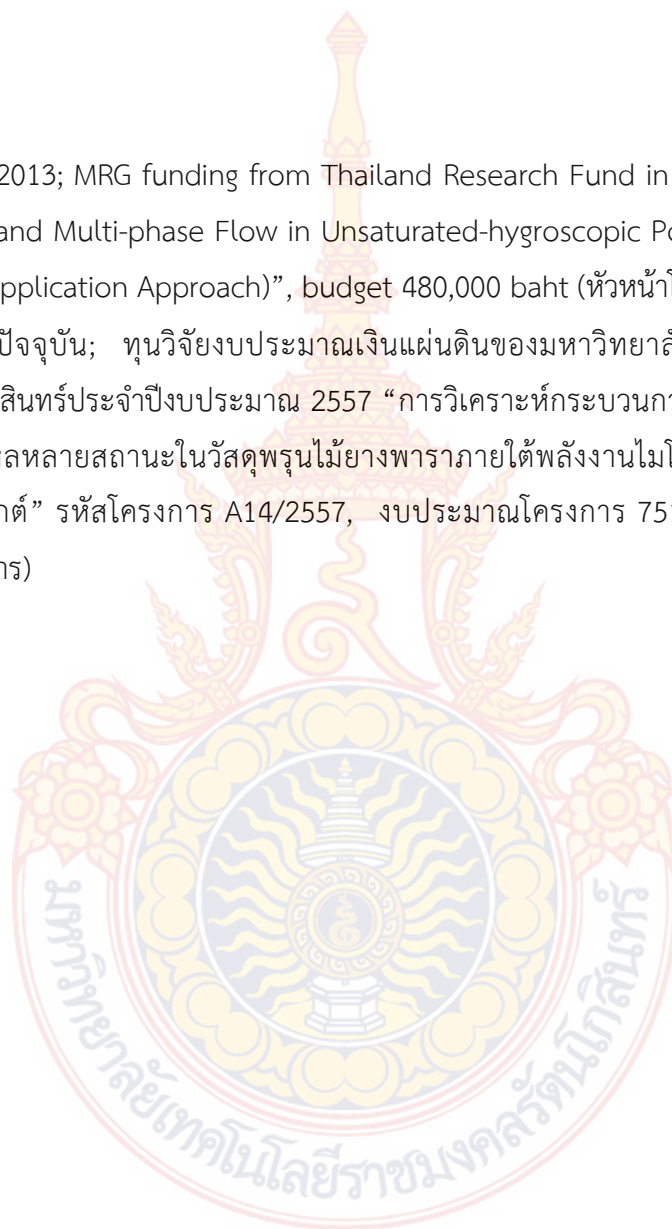
1. ชื่อ สกุล ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

หน่วยงาน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
 96 หมู่ 3 ถ.พุทธมณฑล สาย 5 ต.ศาลายา
 จ.นครปฐม 73170

หมายเลขโทรศัพท์ที่ทำงาน 0 2889 4585-7 ต่อ 2675
 โทรสาร 0 2889 4585-7 ต่อ 2675
 โทรศัพท์มือถือ 085 113 8001
 E-mail fitvan@gmail.com, nattawut.suw@rmutr.ac.th
4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาเอก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปร.ด. วิศวกรรมศาสตร์ (เครื่องกล), 2554
 ปริญญาโท มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล, 2549
 ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล, 2547
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษนอกเหนือจากการศึกษา
 - Advanced Computational Modeling (FVM, FEM, FDTD)
 - Multi-Phase Flow in Porous Media
 - Heat and Mass Transfer in Porous Media
 - Microwave and Dielectric Materials interactions
 - Microwave Heating and Drying
 - Microwave Computational Modeling
 - Microwave Curing Concrete
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
 - 2012; ทุนวิจัยงบประมาณเงินรายได้ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2555 “งานวิจัยและพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุไดอิเล็กทริกโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบพาความร้อนภายใต้ควาวิตที่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10” รหัสโครงการ INNO-02/2555, งบประมาณโครงการ 70,000 บาท (หัวหน้าโครงการ)

- 2012-2013; MRG funding from Thailand Research Fund in project “Analysis of Heat and Multi-phase Flow in Unsaturated-hygroscopic Porous Media (Theory and Application Approach)”, budget 480,000 baht (หัวหน้าโครงการ).
- 2013-ปัจจุบัน; ทุนวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ประจำปีงบประมาณ 2557 “การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพรุนไม่เชิงพาราภายใต้พลังงานไมโครเวฟ เชิงทฤษฎีและประยุกต์” รหัสโครงการ A14/2557, งบประมาณโครงการ 751,000 บาท (หัวหน้าโครงการ)



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Copyright © by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

All rights reserved