



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะใน
วัสดุพูนชนิดไฮโกรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัว
(เชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์)

โดยณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ

กรกฎาคม 2563

สัญญาเลขที่ MRG5580093

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการโครงการการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลาย
สถานะในวัสดุพูนชนิดไฮโกรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัว
(เชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์)

ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว. และ สกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Project Code : MRG5580093

Project Title : โครงการโครงการการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพรุนชนิดไฮโกรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัว (เชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์)

Investigator : ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

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

Project Period : 2 ปี (2 กรกฎาคม 2555 ถึง 1 กรกฎาคม 2557)

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาความรู้ในการการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพรุนทั้งชนิดปกติและชนิดไฮโกรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยศึกษาทั้งในส่วนการทดลองเชิงประยุกต์เพื่อเก็บข้อมูลและในเชิงทฤษฎีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นภายในทั้งจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากภายนอกด้วยวิธีปกติ และการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลระหว่างกระบวนการผลการศึกษาวิจัยพบว่าทั้งการวิจัยเชิงทฤษฎีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเชิงประยุกต์จากการศึกษาทดลองสามารถอธิบายกลไกและปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารของวัสดุพรุนแบบต่างๆ ได้

Keywords : ความร้อนและการไหลหลายสถานะ วัสดุพรุน ไฮโกรสโคปิก

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
ปกใน	1
บทคัดย่อ	2
สารบัญ	3
เนื้อหา	
1. บทนำ	4
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
3. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการลดความชื้น ของวัสดุพูนไฮโกรสโคปิกชนิดข้าวข้าวเปลือกด้วยการพาความร้อน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต	28
4. การศึกษาวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนซีเมนต์เพสต์ที่ มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีโดยกรณีศึกษาการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วย คลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น และช่วงการก่อตัวสุดท้ายในควิต์ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10	41
5. การศึกษาการกระจายตัวทางอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนหลายชั้น ในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตในควิต์ ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10	54
6. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกหลายชั้นภายใต้ พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE10 ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
7. การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของอิทธิพลของการพาความร้อนที่พื้นผิวร่วมกับการ ทำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟในวัสดุไดอิเล็กตริก ที่มีค่าการสูญเสียต่ำและสูญเสียสูง	71
สรุปรวม และผลลัพธ์จากโครงการวิจัย	89
เอกสารอ้างอิง	90

เนื้อหา

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

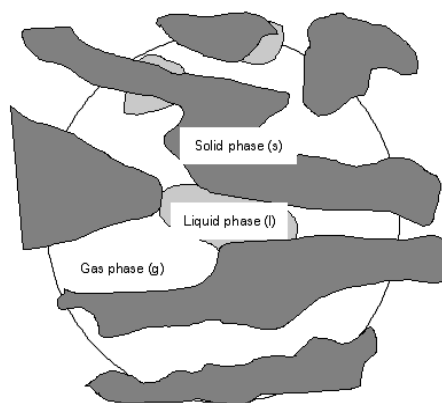
วัสดุพูนโดยปกติสามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น สัตว์ พืช ดิน หิน และอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งวัสดุเหล่านี้ถูกใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายประเทศทั้งทางด้าน งานโยธา อุตสาหกรรมอาหาร งานทางด้านเคมี งานทางด้านการแพทย์ งานทางด้านวัสดุ และงานทางด้านเครื่องจักรกล เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นมียานทางอุตสาหกรรมจำนวนไม่น้อยที่ต้องอาศัยกระบวนการทำความร้อนและการอบแห้งในวัสดุพูนที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกลไกของการทำความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ความรู้เชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนนั้นยังมีความไม่ครบถ้วนสมบูรณ์

รายละเอียดการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนที่มีความซับซ้อนซึ่งถูกนำเสนอโดยนักวิจัยหลายกลุ่มนั้นส่วนใหญ่มีพื้นฐานจากทฤษฎีของวิทเคอร์ (Whitaker's Theory.) ซึ่งทฤษฎีเหล่านั้นได้นำเสนอและอธิบายพฤติกรรมทางกลของกระบวนการอบแห้งของวัสดุพูน ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการวิเคราะห์ได้ออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

1. แบบ 1 ตัวแปร การวิเคราะห์แบบนี้จะพิจารณาสมการหลักเพียงสมการเดียว คือ สมการการแพร่ ซึ่งใช้เพื่อหาข้อมูลในลักษณะเชิงพฤติกรรมพื้นฐานเบื้องต้น
2. แบบ 2 ตัวแปร การวิเคราะห์แบบนี้จะใช้ตัวแปรอิสระสองตัวเข้ามาร่วมวิเคราะห์ ได้แก่ ความชื้น และอุณหภูมิในวัสดุ ในแบบจำลองประเภทนี้จะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของความดันอันเนื่องมาจากกลไกการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุ ซึ่งระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถอธิบายอิทธิพลที่สำคัญของกระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพในกรณีที่อุณหภูมิการอบแห้งไม่สูงเพียงพอที่จะส่งผลต่อความดันภายในวัสดุ
3. แบบ 3 ตัวแปร การวิเคราะห์แบบนี้จะใช้ตัวแปรอิสระสามตัวเข้ามาร่วมวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้ทั้งระบบ และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สถานะการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิสูง หรือการถ่ายเทความร้อนในสถานะสูญญากาศได้อีกด้วย

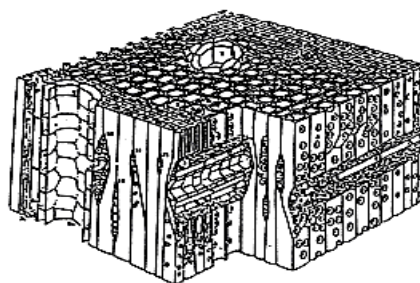
อย่างไรก็ตาม นักวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาเพียงกรณีแบบแรกซึ่งพิจารณาตัวแปรเดียวโดยมีอิทธิพลของสมการการแพร่เป็นปัจจัยหลักเพียงเท่านั้น และก็มีนักวิจัยบางส่วนที่ซับซ้อนแบบจำลองมาเป็นแบบสองตัวแปร มีเพียงส่วนน้อยมากๆ ที่จะใช้การวิเคราะห์แบบ 3 ตัวแปรมาพิจารณาในงานของตนเอง เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแบบจำลองมีความซับซ้อนยุ่งยากต่อความเข้าใจและแบบจำลองแบบ 1 หรือ 2 ตัวแปรก็มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะอธิบายกลไกพื้นฐานในงานของตนเองแล้ว

โครงสร้างของวัสดุพูนนั้นประกอบไปด้วย เฟสของแข็ง ของเหลว และก๊าซ (ดังภาพที่ 1-1) ซึ่งเฟสของเหลวจะถูกกับเก็บในลักษณะเป็นความชื้นในวัสดุภายในโพรงของแข็ง ซึ่งหากภายในโพรงของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมดจะเรียกว่าวัสดุพูนแบบอิมมิด์ แต่หากภายในโพรงมีของเหลวและก๊าซผสมกันอยู่จะเรียกว่าวัสดุพูนแบบไม้อิมมิด์



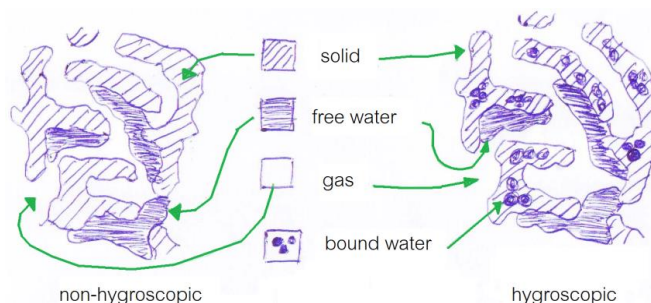
ภาพที่ 1-1 โครงสร้างวัสดุพรุน

วัสดุพรุนแบบนอนไฮโกรสโคปิก เช่นทราย เซรามิก หรือคอนกรีต จะเป็นวัสดุพรุนประเภทที่มีโครงสร้างเฟสของแข็งและโพรงอย่างชัดเจน ของไหลจะสามารถไหลผ่านโพรงได้เท่านั้น ในขณะที่วัสดุพรุนแบบไฮโกรสโคปิก (ภาพที่ 1-2) เช่น ดิน ไม้ และยาง จะมีโครงสร้างของแข็งไม่ชัดเจน กล่าวคือ โครงสร้างของแข็งอาจจะมีการแทรกตัวรวมองค์ประกอบของของไหลผสมอยู่ภายในที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งหากต้องการจะไล่ความชื้นดังกล่าวออกจะต้องให้พลังงานสูงกว่าปกติเพื่อสลายพันธะเคมีที่ยึดเหนี่ยวในโครงสร้างก่อนที่จะไล่ความชื้นออกจากวัสดุไป



ภาพที่ 1-2 วัสดุพรุนแบบไฮโกรสโคปิก

ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างวัสดุพรุนแบบนอนไฮโกรสโคปิกและไฮโกรสโคปิกคือของไหลที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งแสดงให้เห็นเปรียบเทียบดังภาพที่ 1-3



ภาพที่ 1-3 โครงสร้างวัสดุพรุนแบบนอนไฮโกรสโคปิก และแบบไฮโกรสโคปิก

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาความรู้ในการการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพรุนทั้งชนิดปกติและชนิดไฮโกรสโคปิกแบบอิมมิดและไมอิมมิด โดยศึกษาทั้งในส่วนการทดลองเชิงประยุกต์เพื่อเก็บข้อมูลและในเชิงทฤษฎีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นภายในทั้งจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากภายนอกด้วยวิธีปกติ และการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ รวมถึงการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลระหว่างกระบวนการ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ได้องค์ความรู้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะของวัสดุพูนไฮโดรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัว
2. สามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนและการไหลหลายสถานะของวัสดุพูนไฮโดรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในงานทางวิศวกรรม และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติหลายสาขา
3. สร้างองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาประเทศ และเพื่อขยายผลงานวิจัยของกลุ่มนักวิจัยไทยให้ครอบคลุมถึงสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประเทศและเพื่อเสริมสร้างสมรรถนะขีดความสามารถในการแข่งขัน และสร้างเทคโนโลยีเป็นของตนเองในอนาคตยกระดับงานวิจัยไทยให้เข้าสู่มาตรฐานสากล

1.3 กรอบแนวคิดการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาความรู้ในการการวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพูนทั้งชนิดปกติและชนิดไฮโดรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยศึกษาทั้งในส่วนการทดลองเชิงประยุกต์เพื่อเก็บข้อมูลและในเชิงทฤษฎีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นภายในทั้งจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากภายนอกด้วยวิธีปกติ และการถ่ายเทความร้อนและความชื้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลระหว่างกระบวนการซึ่งในส่วนของการออกแบบและพัฒนารูปแบบการศึกษาในแต่ละเงื่อนไขนั้นจะอาศัยการกำหนดเงื่อนไขทางกายภาพที่มีลักษณะเดียวกันเพื่อควบคุมลักษณะการวิเคราะห์ปัญหาให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันและนอกจากนั้นเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาเนื่องจากใช้ทั้งการให้เกิดกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบทั่วไปที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นรูปทรงทางกายภาพและเงื่อนไขในการศึกษาเบื้องต้นสามารถดูเป็นแนวทางได้จากตัวอย่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่มีรายละเอียดการตั้งสมมติฐานเงื่อนไขโดเมนทางกายภาพแสดงได้ดังภาพที่ 1-4

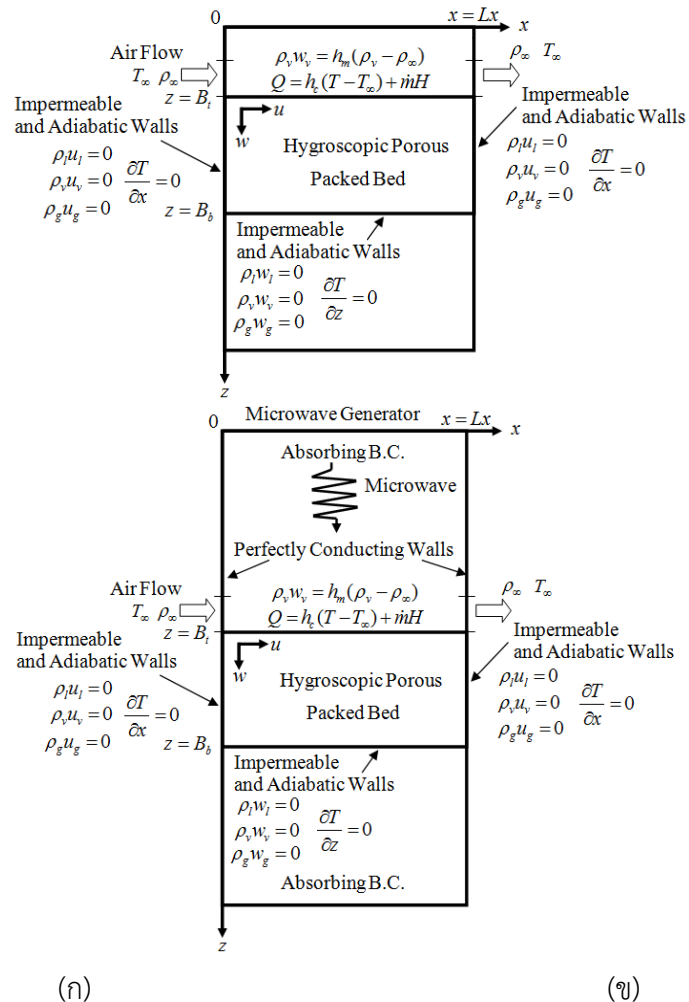
สำหรับเนื้อหารายละเอียดการศึกษาของงานโดยย่อในเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะศึกษาทั้งหมด 5 เนื้อหาดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการลดความชื้นของวัสดุพูนไฮโดรสโคปิกชนิดข้าวข้าวเปลือกด้วยการพาความร้อนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต
2. การศึกษาวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนซีเมนต์เพสต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยกรณีศึกษาการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น และช่วงการก่อตัวสุดท้ายในควิต์ที่อุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมโหมดที่ 10
3. การศึกษาการกระจายตัวทางอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนหลายชั้นในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตในควิต์ที่อุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมโหมดที่ 10

4. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกหลายชั้นภายใต้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE₁₀ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5. การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของอิทธิพลของการพาความร้อนที่พื้นผิวร่วมกับการทำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำและสูญเสียสูง

โดยเนื้อหาที่ศึกษาทั้งหมดมีจุดมุ่งหมายเพื่อมุ่งเน้นศึกษาองค์ความรู้ของการถ่ายเทมวลและความร้อนในวัสดุพูนทั้งแบบไฮโกรสโคปิกและนอนไฮโกรสโคปิก ที่ผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมและการถ่ายเทความร้อนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 1-4 โดเมนทางกายภาพ (ก) ไม่มี EM, (ข) มี EM

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

ในส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในวัสดุพูน ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกและปรากฏการณ์พื้นฐานนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

2.1.1 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างแท้จริงในกระบวนการอบแห้ง การวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนถือเป็นสิ่งสำคัญ กระบวนการอบแห้งวัสดุจะเกิดกระบวนการพื้นฐานสองกระบวนการพร้อมกัน นั่นคือ

1. กระบวนการถ่ายเทความร้อน เป็นกระบวนการที่ถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อวัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหย ความชื้นที่มีอยู่
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

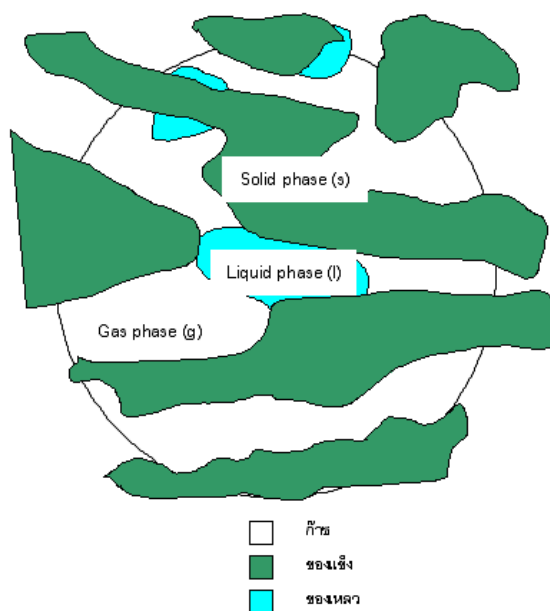
2.1.2 รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน

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

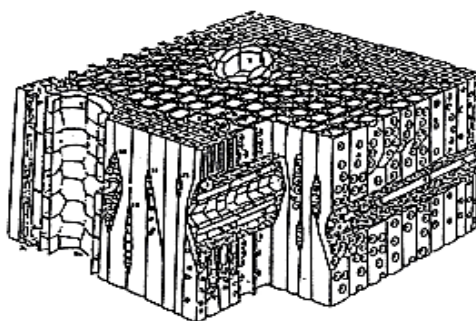
ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้ในงานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรมปฐพี เซรามิกในงานวิศวกรรมโลหะ ตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงาน

วิศวกรรมเครื่องกลและเคมี เนื้อเยื่อต่าง ๆ หรือเยื่อผิวในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมไปถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมเกษตร

วัสดุพูนสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ ชนิดแรกของไหลหรือความชื้นจะเคลื่อนตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็ง (solid matrices) ไปตามโพรงช่องว่าง (pores) ภายในวัสดุโดยไม่มีการส่งผ่านหรือดูดกลืนเข้าไปในชั้นผิวของอนุภาคของแข็ง เราเรียวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบไม่ขึ้นมาก (nonhygroscopic porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งหรือรูพูนมีขนาดใหญ่ ดังนั้นอิทธิพลของความดันไอภายในช่องว่างจะมีความสำคัญน้อย วัสดุพูนชนิดที่สองความชื้นจะถูกยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและฟิสิกส์ (เป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้าง) ทำให้การเคลื่อนตัวของความชื้นทำได้ยาก อิทธิพลของความดันไอภายในมีความสำคัญมากเนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กมาก (ประมาณ $0-1\ \mu\text{m}$) เราเรียวัสดุพูนชนิดนี้ว่าวัสดุพูนแบบขึ้นมาก (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพูนบางชนิด เช่นวัสดุชีวภาพที่ไม่สามารถแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจนเนื่องจากเนื้อวัสดุมีโครงสร้างซับซ้อน (เช่น เนื้อไม้ ดังแสดงในภาพที่ 2-2) ซึ่งการเคลื่อนที่ของความชื้นไม่มีเสถียรภาพทำให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลล์ลาร์-คาพิลลารี (cellular capillary)

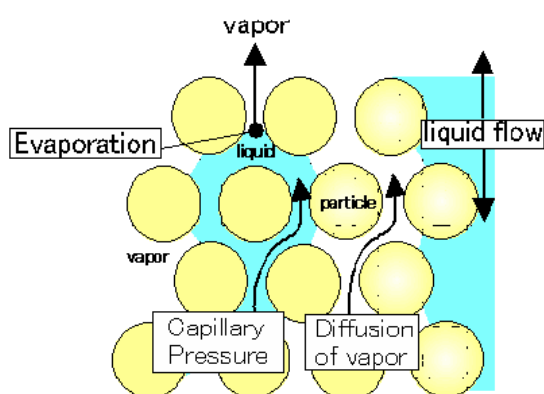
วัสดุพอร์ชนิดแรก (nonhygroscopic porous media) ส่วนใหญ่เรียกว่าวัสดุพอร์แบบคาพิลลารี (capillary porous media) เนื่องจากของเหลวหรือความชื้นภายในวัสดุเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพอร์ (ภาพที่ 2-3) โดยอิทธิพลของความดันคาพิลลารี (capillary pressure) (เป็นฟังก์ชันของแรงตึงผิว มุมสัมผัส และลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพอร์)

วัสดุพอร์ชนิดที่สองหรือวัสดุพอร์แบบชื้นมาก (hygroscopic porous media) ซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อน การเคลื่อนที่ของความชื้นจะมีกลไกการเคลื่อนตัวทั้งในส่วนของอิทธิพลของความดันคาพิลลารี และในส่วนของการของเหลวที่อยู่ในเนื้อของแข็ง (bound water) จะมีกลไกทางพันธะทางเคมีเข้ามาเพิ่มเติมเกี่ยวข้องด้วย จึงส่งผลให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมีความซับซ้อนกว่าในกรณีแรก

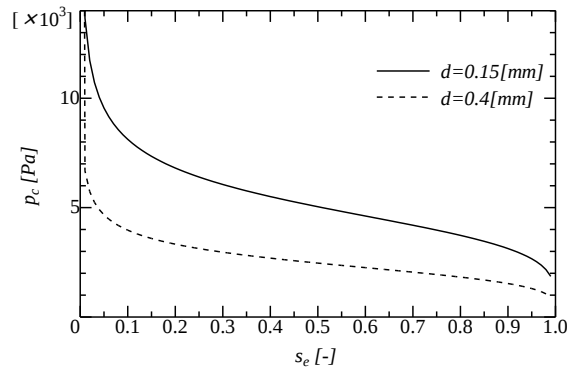
สำหรับความดันคาพิลลารีสามารถนิยามได้ดังนี้คือ เมื่อของไหลสองชนิดที่ไม่ผสมกัน (immiscible fluids) (เช่น น้ำและอากาศ) เกิดการสัมผัสกันในช่องว่างของวัสดุพอร์ การไม่ผสมกันของของไหลสองชนิดทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของความดันตลอดช่วงผิวรอยต่อ เรียกว่าความดันคาพิลลารี (p_c) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$p_c = p - p_l \quad (2.1)$$

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



ภาพที่ 2-3 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพอร์

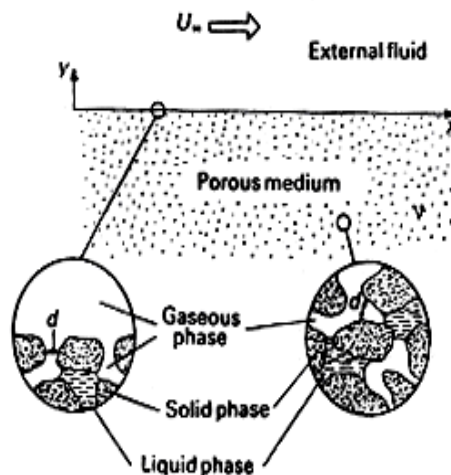


ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีภายในวัสดุพูน
และคุณสมบัติของของไหล

กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอน้ำในช่องว่างที่เป็นรูพูน คือผลของการแพร่กระจายไอน้ำ (vapor diffusion force) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ภาพที่ 2-3 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในวัสดุพูนแบบคาพิลลารี

2.1.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน

หัวข้อที่แล้วกล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูนแบบคาพิลลารี ซึ่งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันคาพิลลารีเป็นกลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างวัสดุพูน แต่ในทางปฏิบัติวัสดุพูนมีโครงสร้างซับซ้อนและมีกลไกหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น



ภาพที่ 2-5 โดอะแกรมของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน

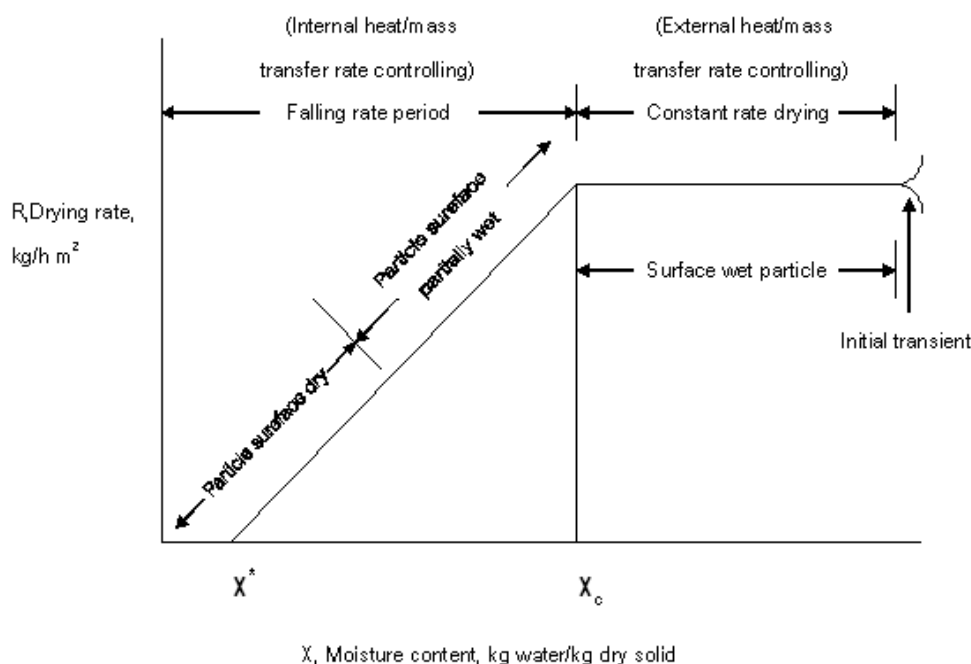
ภาพที่ 2-5 เมื่อวัสดุพูนเปียกชื้นผ่านกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคืออุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศถูกรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวหน้าภายใต้อิทธิพลของกลไกต่าง ๆ จะปรากฏขึ้น (ภาพที่ 2-3) โดยที่กลไกที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แรงดันคาพิลลารี

2. การแพร่กระจายตัว (diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสสาร กล่าวคือเกิดการระเหยและการกลั่นตัว (evaporation-condensation mechanism) ภายในรูพรุน
4. การแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion)
5. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
6. การเคลื่อนตัวของความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง
7. การเคลื่อนตัวหาความชื้นเนื่องจากการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิ (thermo-diffusion)

โดยทั่วไปกลไกที่กล่าวมาข้างต้นมีความสำคัญต่อกระบวนการการอบแห้งวัสดุพูนที่คาบเวลาต่างกัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถแยกกลไกแต่ละชนิดออกจากกันได้ชัดเจนเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการอบแห้ง ทำให้เพียงพิจารณาเฉพาะกลไกหลักที่สำคัญกว่าเท่านั้น การพิจารณาว่ากลไกใดมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของวัสดุรวมไปถึงวิธีการให้พลังงานความร้อน โดยทั่วไปข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมักนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์กลไกหลักด้วย

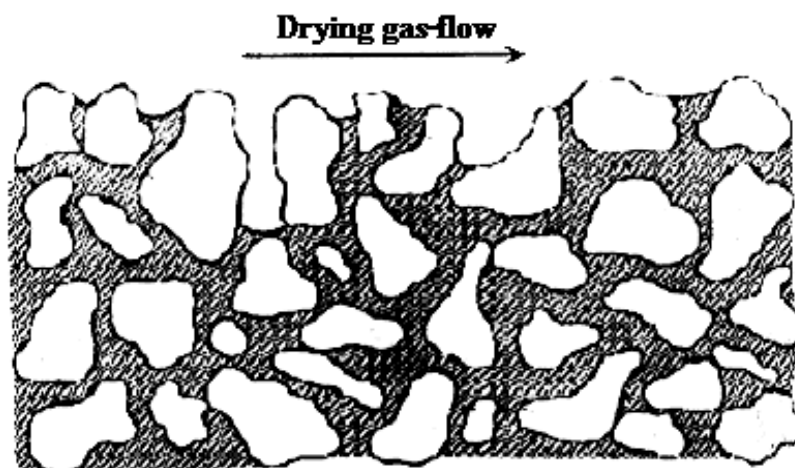
ภาพที่ 2-6 กระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็นสองคาบเวลาใหญ่ ๆ คือ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) ภายในวัสดุพูนที่เติมเต็มที่ผิวหน้า ช่วงปลายของคาบเวลานี้ ความชื้นภายในวัสดุเข้าใกล้ค่าความชื้นวิกฤติ (critical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



ภาพที่ 2-6 คาบเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

1. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) โดยปกติเมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมาก ๆ อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลภายนอกซึ่งมีผลต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไอน้ำ หากอิทธิพลภายนอกถูกควบคุมให้คงที่ อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวหน้าจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุพรมที่มาเติมเต็มที่ผิวหน้าทำให้มีฟิล์มของเหลวปกคลุมที่ผิวหน้าวัสดุตลอดเวลา ตัวแปรที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคาบเวลานี้ คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารออกจากผิววัสดุ การถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ (surface diffusion) เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อนอุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุสามารถประมาณได้ด้วยอุณหภูมิกระเปาะเปียก การคำนวณอัตราการอบแห้งในคาบเวลานี้สามารถทำได้ง่าย โดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (force convection) จะใช้คาบเวลาดังกล่าวในการวิเคราะห์

2. คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนความชื้นเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ (ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นกับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างวัสดุเป็นสำคัญ) ความชื้นในวัสดุที่เคลื่อนตัวไปยังผิวหน้าภายใต้อิทธิพลการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุเริ่มมีไม่เพียงพอต่อปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป ทำให้ฟิล์มของเหลวที่บริเวณผิวหน้าวัสดุเกิดการแยกตัวและเกิดขึ้นความแห้งในบางจุดดังแสดงในภาพที่ 2-7

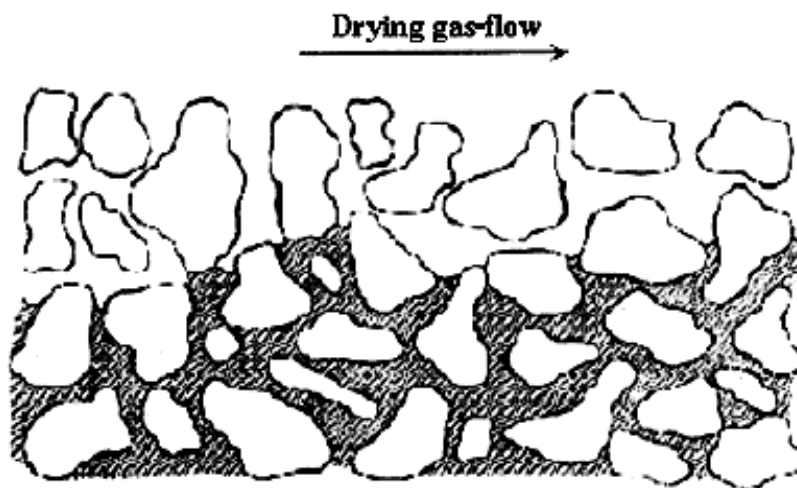


ภาพที่ 2-7 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก
(first falling rate period)

หลังจากกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ กระบวนการอบแห้งก็เข้าสู่คาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงอย่างสมบูรณ์ ในช่วงต้นของในคาบเวลานี้อัตราการอบแห้งโดยรวมเริ่มลดลง บางครั้งเรียกช่วงเวลานี้ว่าคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (first falling rate period) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของความแห้งก่อตัวขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ผิวของวัสดุและเคลื่อนตัวเข้าสู่เนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 2-8 ช่วงนี้เรียกว่าคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (second falling rate period) การระเหยความชื้นในช่วงนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแห้ง (ความชื้นในวัสดุบริเวณนี้ระเหยออกหมด) กับชั้นวัสดุเปียก (เนื้อวัสดุบริเวณที่ยังมีความชื้นอยู่) ซึ่งเรียกว่าผิวการระเหย (evaporation front) หรือผิวการอบแห้ง (drying front) หรือ

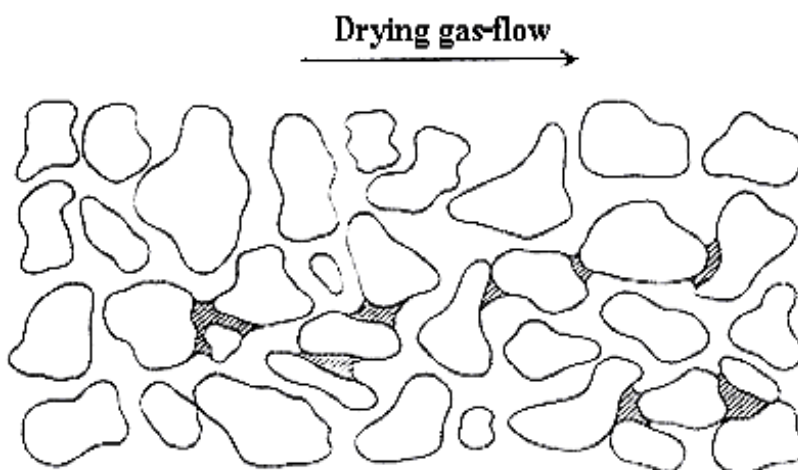
ขอบเขตของการเคลื่อนที่ (moving boundary) โดยที่ผิวการระเหยจะเคลื่อนที่ตลอดคาบเวลาของการอบแห้ง การระเหยตัวของความชื้นที่ผิวของการระเหย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากกฎของเคลวิน (Kelvin's law)

ในคาบเวลานี้อัตราการเคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการ คาบเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงนี้อาจสังเกตได้จากการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราการถ่ายเทมวลสารและความดันไอที่ผิววัสดุ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคาบเวลานี้สังเกตได้ยากจากการทดลองเนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์



ภาพที่ 2-8 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง
(second falling rate period)

ช่วงปลายของคาบเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สองสังเกตได้ว่าความชื้นภายในวัสดุเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยและกระจายตัวในช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2-9 ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้ อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้ความชื้นที่เหลืออยู่เรียกว่าค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)



ภาพที่ 2-9 ปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย
(end stage of drying)

2.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนอยู่บนพื้นฐานของสมการส่งถ่าย (transport equation) ซึ่งเป็นผลมาจากกฎการสมดุลเชิงอนุพันธ์ ในการทำนายพฤติกรรมรวมของกระบวนการ เช่น อัตราการไหล หรือฟลักซ์ความร้อน ต้องอาศัยข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมหรือเงื่อนไขขอบเขตของระบบมาช่วยประกอบในการคำนวณ

เมื่อมีของไหลไหลผ่านโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น วัสดุพรุน สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องอาศัยสมการเฉพาะตำแหน่ง (เชิงจุลภาค) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลภายในช่องว่างหรือรูพรุน แต่เนื่องจากวัสดุพรุนมีโครงสร้างรูพรุนภายในซับซ้อนทำให้ปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพรุนมีความซับซ้อนตาม ดังนั้นการหาคำตอบสำหรับวิเคราะห์ความชื้นและอุณหภูมิจึงเป็นไปได้ยาก เพื่อจัดการความยุ่งยากดังกล่าวปรากฏการณ์ทางกายภาพในวัสดุพรุนจึงมักอธิบายในรูปสมการเชิงมหภาค (macroscopic equations) ซึ่งเป็นจริงก็ต่อเมื่อโดเมนที่พิจารณาถือว่าเป็นปริมาตรเฉลี่ยที่ประกอบจากรูพรุนจำนวนมาก ปรากฏการณ์นี้หาได้จากสมการเชิงจุลภาคโดยเทคนิคปริมาตรเฉลี่ย (volume average technique) โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้จริงสำหรับค่าเฉลี่ยปริมาณเชิงจุลภาคต่าง ๆ ซึ่งพบกันบ่อยในการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุพรุน อาทิเช่น ความพรุน (porosity) ϕ และความเร็ว u ซึ่งปริมาณเหล่านี้ถือว่าเป็นค่าเฉลี่ยเท่านั้น

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

สมการการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equations)

สมการการอนุรักษ์มวลสำหรับของเหลว ไอน้ำ อากาศ และก๊าซ ในกรณีวัสดุพรุนแบบไฮโดรโฟบิกได้ถูกอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

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

สำหรับไอน้ำ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_v \phi(1-s)) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_v u_v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_v w_v) = \dot{m} \quad (2.3)$$

โดยที่ตัวห้อย v คือ ของไอน้ำที่เกิดจากของเหลวเปลี่ยนรูปเป็นสถานะไอ

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 ของไอน้ำที่เป็นก๊าซในสภาวะบรรยากาศ 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 ของไหลที่เป็นก๊าซในสภาวะบรรยากาศร่วมกับไอ

เมื่อ

t คือ เวลา

ρ_i คือ ความหนาแน่นของสารแต่ละสถานะ

u_i, w_i คือ ความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล

s คือ ปริมาณความอิ่มตัวของน้ำ

ในที่นี้ $\dot{m}$ คืออัตราการกลั่นตัวหรืออัตราการกลายเป็นไอระหว่างการเปลี่ยนสถานะและ ϕ คือความพรุนของวัสดุพรุน

สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equations)

ในการวิเคราะห์จะไม่คำนึงถึงผลของพลังงานจลน์และความดัน การวิเคราะห์สมการอนุรักษ์พลังงานจะสมมติให้ทุกสถานะนั้นสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิของวัสดุทดสอบคำนวณจากสมการการส่งถ่ายความร้อนซึ่งรวมเทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation) สมการการส่งถ่ายความร้อนซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในวัสดุทดสอบโดยขึ้นกับเวลาคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(\rho C_p)_T T] + \nabla \left[\left\{ \rho_l C_{pl} (u_l + u_b) + \left(\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv} \right) u_g \right\} T \right] + H_v \dot{m} \\ = \nabla [k \nabla T] + Q_g \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ

T คือ อุณหภูมิ

C_{pi} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารแต่ละสถานะ

$[k \nabla T]$ 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

$$D = D_0 \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2.2} \quad (2.11)$$

กฎของฟูริเออร์ (Fourier's law) ใช้ในการอธิบายฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านวัสดุพรุน

$$q = -k \nabla T \quad (2.12)$$

Equilibrium Relations

สมการอนุรักษ์การส่งถ่ายของสารในหลาย ๆ สถานะต้องการสมการประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (relative permeability) K_r ความดันคาพิลลารี p_c ค่าฟังก์ชันของความดันคาพิลลารี (Leverett functions) J และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) k

สมการของการซึมผ่าน (permeability) สำหรับของเหลวและก๊าซมีดังนี้

$$K_{rl} = s_e^3, K_{rg} = (1-s_e)^3 \quad (2.13)$$

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

$$s_e = \frac{s - s_{ir}}{1 - s_{ir}} \quad (2.14)$$

ความดันคาพิลลารี p_c แสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของความดันคาพิลลารี (Leverett functions) $J(s_e)$ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารี และความอิ่มตัวของน้ำจะถูกนิยามโดยใช้ฟังก์ชันของความดันคาพิลลารี

$$p_c = p_g - p_l = \frac{\xi}{\sqrt{K/\phi}} J(s_e) \quad (2.15)$$

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)

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

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{p_a M_a}{R_o T} & \rho_v &= \frac{p_v M_v}{R_o T} & \rho_g &= \rho_a + \rho_v \\ p_a &= \rho_a R_a T & p_v &= \rho_v R_v T & p_g &= p_a + p_v \\ \rho_g u_g &= \rho_a u_g + \rho_v u_v \end{aligned} \quad (2.18)$$

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)

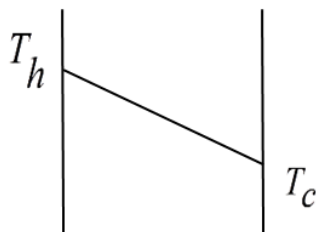
การทำนายอัตราการแห้งตัวหรือการกระจายตัวของความชื้นภายในวัสดุ การคำนวณพร้อมกันของระบบสมการที่ควบคุมปรากฏการณ์การอบแห้งทั้งหมดต้องอาศัยระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (numerical calculation)

2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

จากหัวข้อก่อนหน้าการถ่ายเทความร้อนและมวลด้วยวัสดุพรุนที่มีรูปแบบสมการการคิดวิเคราะห์ที่ซับซ้อนนั้นมาจากพื้นฐานของทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนทั้งจากการนำความร้อน และการพาความร้อน ดังนั้นเพื่อช่วยให้ง่ายต่อความเข้าใจในหัวข้อก่อนหน้าในหัวข้อนี้จึงขออธิบายกลไกทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนดังนี้

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งพิจารณาค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันในเนื้อของวัสดุ ในวิชาอุณหพลศาสตร์มักสอนว่าการถ่ายเทพลังงานนั้นกำหนดได้ด้วยความร้อน การถ่ายเทความร้อนในด้านวิทยาศาสตร์จะไม่อธิบายว่าพลังงานความร้อนเกิดการถ่ายเทขึ้นได้อย่างไร การถ่ายเทความร้อนมีข้อแตกต่างจากอุณหพลศาสตร์คือ การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มหลักการในกฎข้อหนึ่งและสองของอุณหพลศาสตร์ ใช้เพื่อหาอัตราของการถ่ายเทความร้อนขณะเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ทางด้านอุณหพลศาสตร์นำเอากฎที่ได้จากการทดลองมาใช้เป็นพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก ซึ่งทำให้ง่ายกับการนำไปใช้ในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างได้ การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งการถ่ายเทความร้อนได้เป็น 3 วิธี คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน และกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบจะแตกต่างออกไปจึงสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน



ภาพที่ 2-10 การนำความร้อนผ่านผิวผนังหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

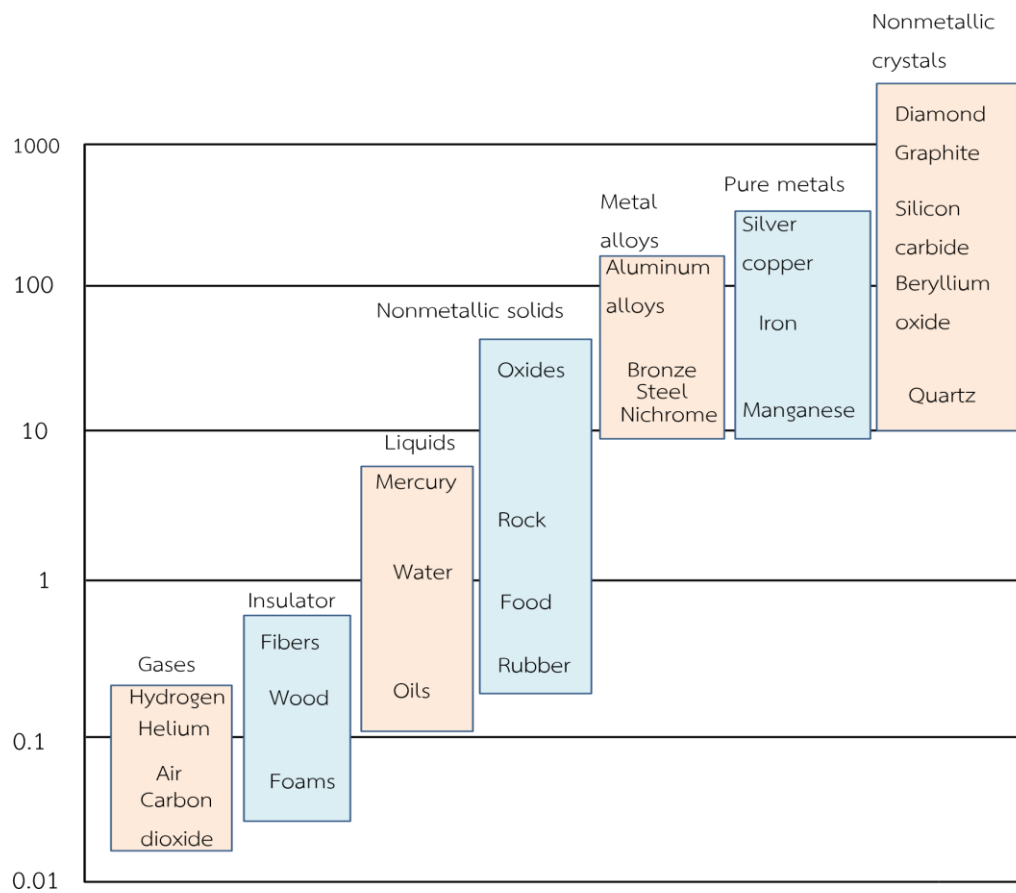
เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนดังภาพที่ 2-10 พลังงานจากขอบเขตที่มีอุณหภูมิสูง T_h จะถ่ายเทพลังงานไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ T_c การถ่ายเทความร้อนแบบดังกล่าว เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิตั้ง สมการที่ (2.20) สภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดโดยค่าดังกล่าวหาได้จากการทดลองและในปัจจุบันมีการรวบรวมค่าดังกล่าวอยู่ในรูปข้อมูลตารางมาตรฐานโดยเรียกค่าดังกล่าวนี้ว่าค่าการนำความร้อน (k) ซึ่งพบว่าวัสดุแต่ละประเภทจะมีค่า (k) ไม่เท่ากันและสามารถสรุปเป็นภาพรวมได้ดังภาพที่ 2-11

$$\frac{\dot{Q}}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.20)$$

และเมื่อแทนค่าการนำความร้อน k ในรูปสัดส่วนคงที่ลงในสมการที่ (2.20) จะเขียนสมการได้เป็น

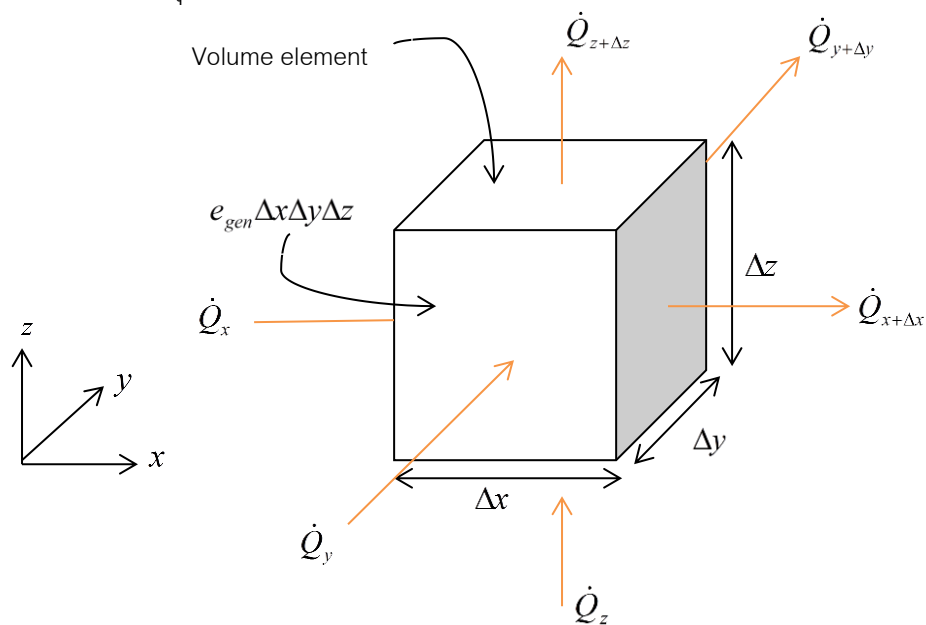
$$\dot{Q} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.21)$$

เมื่อ	$\dot{Q}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	$\frac{\partial T}{\partial x}$	คือ ค่าความต่างของอุณหภูมิต่อความต่างของระยะ
	k	คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (W/m·K)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

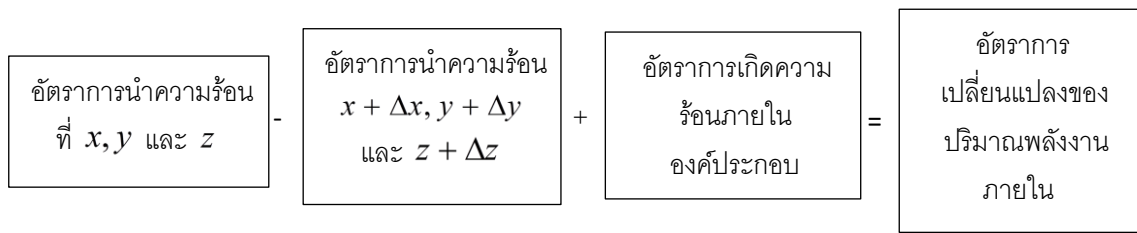


ภาพที่ 2-11 ค่าของ k ของวัสดุแต่ละชนิด

อัตราการถ่ายเทความร้อนในวัตถุ ($\dot{Q}$) ที่เกิดขึ้นนั้นหากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนในปริมาตรควบคุมในกรณีพิกัดฉาก สามมิติดังภาพที่ 2-12 โดยใช้การสมมูลพลังงานในปริมาตรควบคุมระบบพิกัดฉาก สามารถอธิบายสมการได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2-12 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนในระบบพิกัดฉาก



หรือ

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{E}_{gen,element} = \frac{\Delta E_{element}}{\Delta t} \quad (2.22)$$

โดย $\dot{Q}_x, \dot{Q}_y, \dot{Q}_z$ คือ อัตราการนำความร้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุม
 $\dot{Q}_{x+\Delta x}, \dot{Q}_{y+\Delta y}, \dot{Q}_{z+\Delta z}$ คือ อัตราการนำความร้อนออกจากปริมาตรควบคุม
 $\dot{E}_{gen,element}$ คือ อัตราการเกิดความร้อนภายในปริมาตรควบคุม
 $\frac{\Delta E_{element}}{\Delta t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณพลังงานภายใน

จากสมการข้างต้นหากแทนค่า $\dot{Q}$ จากสมการที่ (2.21) ลงในสมการที่ (2.22) และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.23)$$

โดย T คือ อุณหภูมิ
 $\dot{e}_{gen}$ คือ อัตราการเกิดความร้อน (W/m^3)
 k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot K$)

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

มักทราบกันว่าวัตถุจะเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อนำไปวางให้พัดลมเป่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การวางไว้ในอากาศนิ่งๆ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้คือตัวอย่างของกลไกการพาความร้อนแบบบังคับ สำหรับการพาความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากผิววัสดุกับของไหลสามารถอธิบายเป็นค่าถ่ายเทความร้อนดังสมการที่ (2.24)

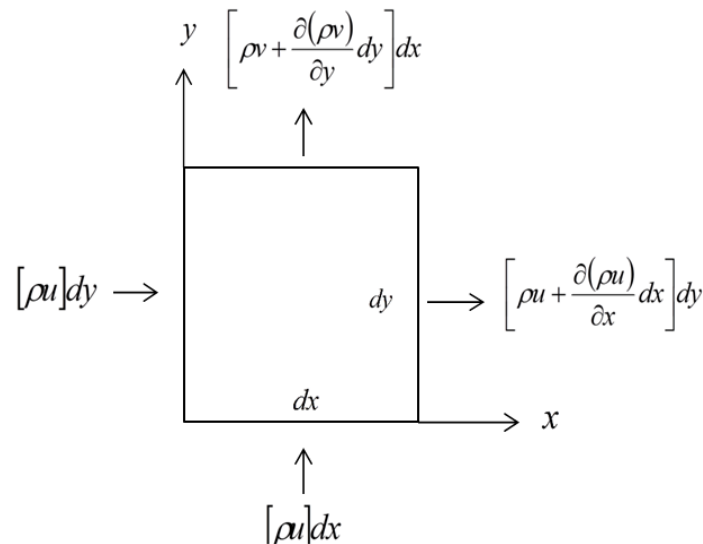
$$\dot{Q} = h_c A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.24)$$

โดย $\dot{Q}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 h_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
 A_s คือ พื้นผิวสัมผัส (m^2)
 T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว (K)
 T_∞ คือ อุณหภูมิแวดล้อม (K)

สำหรับการมีกลไกการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวของไหลสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีพลศาสตร์ของไหลที่มีสมการอธิบายการเคลื่อนที่ของมวลของไหล และการถ่ายเทความร้อนในของไหลจากสมการหลัก 3 สมการโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.2.1 สมการเชิงอนุรักษ์มวล

สมการต่างๆ ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลต้องแสดงถึงความเป็นจริงที่มีความหมายทางกายภาพและสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย สมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของ



ภาพที่ 2-13 รูปแบบแสดงฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล เพื่อใช้ในการประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์มวล

การไหลนี้เป็นสมการของการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) ซึ่งมีความหมายให้เข้าใจได้ง่ายๆ ว่า มวลนั้นไม่สูญหายไป การประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์นี้สามารถเข้าใจได้โดยง่าย หากพิจารณาจากการไหลผ่านกรอบเล็กๆ ขนาดกว้าง dx และ dy ซึ่งมีความลึกหนึ่งหน่วยแสดงในภาพที่ 2-13 ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.24)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น
 $\vec{V}$ คือ ความเร็ว

สมการที่ (2.24) นี้คือสมการเชิงอนุพันธ์มวล ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของความเป็นจริงสมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล โดยบ่งบอกว่ามวลนั้นไม่มีการสูญหายไปไหน สมการดังกล่าวนี้อยู่ในรูปแบบของพจน์เชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง อันประกอบไปด้วยตัวไม่รู้ค่าถึง 3 ค่า ρ, u, v ซึ่งต่างเปลี่ยนแปลงได้โดยตลอดโดเมนของการไหล ดังนั้นสมการเชิงอนุพันธ์นี้เพียงสมการเดียวจึงไม่สามารถใช้แก้ปัญหาได้ และจำเป็นต้องประดิษฐ์สมการของความเป็นจริงอื่นๆ ในการไหลเพิ่มเติมอีก

2.2.2.2 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

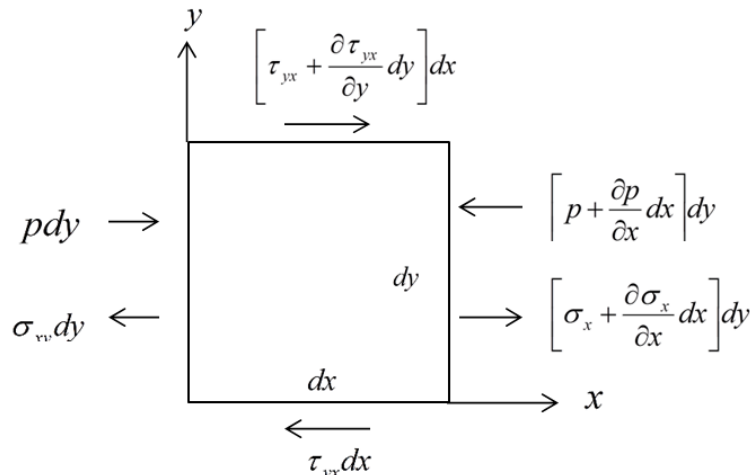
ความเป็นจริงชนิดที่สองของการไหลโดยทั่วไปที่สามารถนำมาประดิษฐ์ขึ้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพิ่มเติมได้นั้นมาจากการใช้กฎข้อที่สองของนิวตันที่กล่าวว่า $F = ma$ ในกฎข้อที่สองของนิวตันที่ต้องมีความสัมพันธ์กับการเร่ง หากพิจารณามวลซึ่งมีขนาดกว้าง dx และ dy โดยมีความลึกหนึ่งหน่วยดังแสดงในภาพที่ 2-14 ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล ภาพที่ 2-14 นี้แสดงแรงต่างๆ ที่กระทำในทิศแกน x เท่านั้น กฎข้อที่สองของนิวตันเมื่อพิจารณาในทิศแกน x คือ

$$F_x = ma_x \quad (2.25)$$

โดยที่ F_x คือ แรงรวมในทิศแกน x

m คือ มวลของก้อนของไหล (kg)

a_x คือ ความเร่งของมวลในแกน x



ภาพที่ 2-14 รูปแบบแสดงต่างๆ ในทิศแกน x ที่กระทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับของไหล

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \quad (2.26)$$

และ
$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho f_y \quad (2.27)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่น

p คือ ความดัน

τ_{yx} คือ ความเค้นเฉือนที่ตั้งฉากกับแกน y และกระทำในแกน x

τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนที่ตั้งฉากกับแกน x และกระทำในแกน y

σ_x คือ ความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x

σ_y คือ ความเค้นตั้งฉากในแนวแกน y

f_x คือ แรงภายนอกที่กระทำในแนวแกน x ทำให้ของไหลเปลี่ยนทิศทางการไหล

f_y คือ แรงภายนอกที่กระทำในแนวแกน y ทำให้ของไหลเปลี่ยนทิศทางการไหล

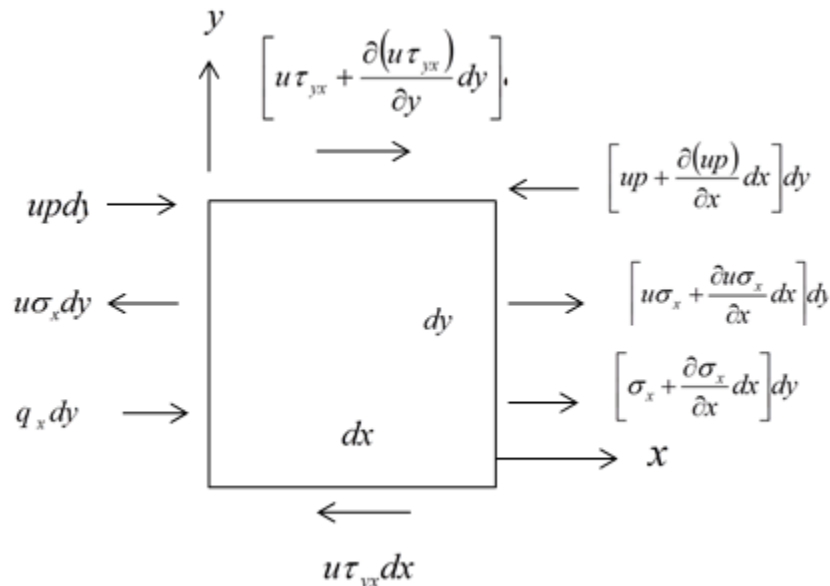
สมการที่ (2.26) และ (2.27) นั้นเรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equations) เพื่อเป็นเกียรติแก่ชาวฝรั่งเศสชื่อ M. Navier และชาวอังกฤษชื่อ G. Stokes ซึ่งสามารถประดิษฐ์สมการนี้ขึ้นมา

สมการนาเวียร์-สโตกส์ ต่างอยู่ในรูปแบบค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์อันเนื่องมาจากการประดิษฐ์สมการโดยการจับตามองก้อนมวลของไหลที่เคลื่อนตัวไป ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์นี้สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของค่าอนุพันธ์ธรรมดาซึ่งเปรียบเสมือนผู้สังเกตจับตานิ่งอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้วเฝ้ามองการเปลี่ยนแปลงของของไหลที่ผ่านไป

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u \quad (2.28)$$

2.2.2.3 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน

การไหลหลายชนิด ๆ ความเร็วของการไหลและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในของไหลนั้นต่างมีความสัมพันธ์ต่อกันและกัน ดังนั้น ความจริงชนิดที่สามของการไหลใดๆ ที่สามารถนำไปใช้ประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพิ่มเติมได้อีกนั้น คือกฎที่ว่าด้วยพลังงานนั้นไม่สูญหายไป ภาพที่ 2.15 แสดงมวลที่มีขนาดกว้าง dx และ dy โดยมีความลึกหนึ่งหน่วยซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล สมการเชิงอนุพันธ์พลังงานสามารถประดิษฐ์ได้โดยการใช้กฎข้อแรกของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งกล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณ พลังค์ความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น



ภาพที่ 2-15 รูปแบบแสดงงานที่เกิดขึ้นและปริมาณพลังค์ในทิศแกน x ที่ไหลผ่านก้อนมวลของซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหลเพื่อใช้ในการประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน

อัตราการเปลี่ยนแปลงของ พลังงานในก้อนมวล	=	ปริมาณพลังค์ความร้อน ที่ให้แก่มวล	+	อัตราของงานที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงต่างๆ บนก้อนมวล
--	---	--------------------------------------	---	--

หรือ $A = B + C \quad (2.28)$

หากเริ่มต้นพิจารณาที่พจน์ C ซึ่งแทนอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนี้ แรงชนิดแรกคือแรงจากน้ำหนักของก้อนมวลเอง ซึ่งเมื่อคูณกับความเร็วของการไหลในทิศทางนั้น ก่อให้เกิดอัตราการไหลของงาน

$$C = \left[- \left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} \right) + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} \right] dx dy + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} dx dy \quad (2.29)$$

สำหรับพจน์ B ซึ่งแทนปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่ก้อนมวลนั้นประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นบนปริมาตรของก้อนมวล ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นได้เองภายในก้อนมวลนั้น (internal heat generation) หากกำหนดให้ $\bar{Q}$ แทน ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นเองต่อมวลหนึ่งหน่วย ดังนั้น ปริมาณฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเองสำหรับก้อน มวลนี้คือ

$$B = \left[\rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (2.30)$$

ส่วนพจน์ A ซึ่งแทนอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลอันประกอบด้วย พลังงานภายใน ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลภายในของไหลนั้น และพลังงานภายใน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากของไหลนั้นเกิดการไหล หาก e แทนพลังงานภายใน และ $V^2/2$ คือพลังงานจลน์ที่ก้อนมวลนั้นไหลด้วยความเร็ว V ดังนั้นพลังงานรวม (total energy) คือ $e + V^2/2$ ซึ่งมีหน่วยต่อหนึ่งหน่วยมวล เนื่องจากปริมาณมวลทั้งหมดของก้อนมวลนี้คือ $\rho dx dy$ ดังนั้น พจน์ A ซึ่งแทนอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy \quad (2.31)$$

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน

การเปรียบเทียบถึงกลไกของการนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งพลังงานที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ ตัวกลางการแผ่รังสีความร้อนนี้อาจจะถ่ายเทผ่านขอบเขตที่ต้องการ และสามารถผ่านสถานะที่เป็นสุญญากาศได้อย่างสมบูรณ์ กลไกในกรณีนี้เป็นกรแผ่รังสีในรูปของคลื่นสนามแม่เหล็ก

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.32)$$

โดยที่	$\dot{Q}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	ε	คือ อัตราแลกเปลี่ยนความร้อน
	σ	คือ ค่าคงที่ Stefan Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
	T_s	คือ อุณหภูมิพื้นผิว (K)
	T_∞	คือ อุณหภูมิแวดล้อม (K)

2.3 ความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ

สำหรับกรรมวิธีทางความร้อนโดยทั่วไปจะอาศัยหลักการของผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิผิวหน้าวัสดุที่ทำให้อุณหภูมิผิวหน้าวัสดุสูงขึ้นตามอุณหภูมิแวดล้อมจากนั้น พลังงานความร้อนจะถูกส่งต่อภายในวัสดุไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยกลไกการนำความร้อนในตัววัสดุ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย กล่าวคือใช้ระยะเวลาเวลานาน ประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป มีปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุเนื่องจากใช้ระยะเวลาเวลานาน ในทางตรงข้ามกรรมวิธีทางความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric

heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการทะลุทะลวงหรือความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (resonance) ภายในวัสดุ ทำให้การกระจายของสนามมีลักษณะเป็นคลื่นนิ่งที่มีจุดร้อนเกิดอยู่บริเวณกึ่งกลางวัสดุ และการสะท้อนของคลื่นดังกล่าวยังส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น

ในการศึกษาความร้อนจากกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความรู้เกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีความจำเป็นเพราะสมบัตินี้ส่งผลต่อการเกิดความร้อน และการกระจายตัวของความร้อนภายในวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (2.33)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) ซึ่งเป็นสมบัติ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คือสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m, ε_r' เป็นจำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก (relative permittivity หรือ relative dielectric constant)ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ และ ε_r'' เป็นจำนวนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ (dielectric loss factor) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ

สำหรับค่าประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$)) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r' \varepsilon_0} \quad (2.34)$$

และในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้กำลังสองของความเข้มของสนามไฟฟ้าในการประมาณค่าการดูดกลืนพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดกลืนหรือความร้อนเชิงปริมาตร (Q) สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q \cdot \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (2.35)$$

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า, f คือ ความถี่ (GHz) และ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ โดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) ซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุรวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะความเข้มของพลังงานในวัสดุ

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\varepsilon_r' (\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1)}} \quad (2.36)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง และ v คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความลึกทะลุทะลวงแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นค่าความลึกทะลุทะลวงวัสดุจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่

บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ได้รับคลื่นและอุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล แต่หากวัสดุมีความหนาแน่นน้อยกว่าความลึกทะลุทะลวงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะไม่เป็นลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริก

3 การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการลดความชื้นของวัสดุ พอร์ไฮโดรสโคปิกชนิดข้าวข้าวเปลือกด้วยการพาความร้อนและ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต

3.1 บทนำ

ในการศึกษาวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงประยุกต์ด้วยกระบวนการทดลองจากการถ่ายเทมวลในวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดไฮโดรสโคปิก โดยวัสดุตัวอย่างที่นำมาศึกษาคือข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศมาอย่างยาวนาน เป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่สำคัญของประเทศอย่างต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ

ในปัจจุบันข้าวได้ก้าวจากการเป็นพืชเศรษฐกิจไปสู่การเป็น “พืชการเมือง” (สมพร อิศวิลานนท์) [3-7] ซึ่งเห็นได้จากบทบาททางการเมืองที่มีต่อนโยบายที่เกี่ยวข้องกับข้าวในประเทศไทย ดังนั้นการพัฒนาเทคนิควิธีการต่างๆ ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ในผลิตภัณฑ์ข้าวจึงมีความจำเป็นต่องานอุตสาหกรรมเกษตรทางด้านข้าวเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีทางการปลูก ผลิต และปรับปรุงพันธุ์ เพื่อจำหน่ายเป็นข้าวสาร หรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น เครื่องดื่มธัญพืช ส่วนผสมเครื่องสำอาง เป็นต้น สำหรับกระบวนการปลูกและผลิตข้าวสารเพื่อจำหน่ายนั้น จะเริ่มต้นด้วยการปลูกข้าว เก็บเกี่ยวเมล็ดพันธุ์ กระบวนการลดปริมาณความชื้น และแปรรูปเป็นข้าวสารเพื่อจำหน่าย

ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งจากที่กล่าวข้างต้นในกระบวนการผลิตข้าวคือกระบวนการลดปริมาณความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งข้าว ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งข้าวได้มีการวิจัยพัฒนาเพิ่มมากขึ้น มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานต่างๆ รวมถึงเทคนิควิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้งข้าว เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ๆ ให้กับผู้ประกอบการในการเลือกใช้เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการผลิต รวมไปถึงการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการลดปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกนั้นมี กระบวนการหลากหลายกระบวนการ อาทิ เช่น ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว (ฉัตรชัย นิยมล) [3-2] การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์) [3-4] การอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บและการเก็บรักษาในสถานที่ใช้จริง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์) [3-6] เครื่องอบข้าวแบบโรตารี (ยงยุทธ พิชกมฺุทร) [3-8] การชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกขึ้นโดยการระบายอากาศ (อรรถพร อภิพัฒนานุกุล) [3-9] และการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยเทคนิคสปาดัดเบดสองมิติ (จินดา พานิชอิงอร) [3-1] การศึกษาเปรียบเทียบการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้มะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวกลางในการดูดซับร่วมกับลมร้อน (พรณิ ยางโว) [3-3] การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Tulasidas et al., Varithet al.) [3-11] และ [3-12] เป็นต้น จะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีการล้วนน่าสนใจและเป็นวิธีการที่มีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและเทคนิคการอบไล่ความชื้นข้าวให้ใช้พลังงานน้อยลง ใช้ระยะเวลาในกระบวนการอบน้อยลง รวมทั้งใช้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการน้อยลงด้วย

จากตัวอย่างเทคนิควิธีการที่กล่าวมาข้างต้น มีเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจคือการอบแห้งด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ เนื่องจากหลักการของการทำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการปล่อยพลังงานคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุและวัสดุนั้นจะดูดซับพลังงานทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนด้วยตัวมันเอง ซึ่งส่งผลให้เกิดการปล่อยพลังงาน

ความร้อนจากในตัววัสดุ แต่หลักการดังกล่าวก็มีข้อเสียตรงที่ความซับซ้อนของโหมดคลื่นที่ไม่แน่นอน อันเกิดจากขนาดควาิตี้ ขนาดความหนาวัสดุ รวมถึงปริมาณความชื้นในวัสดุ ส่งผลให้เกิดบริเวณจุดที่สะสมความร้อนและจุดเย็นที่ไม่ได้รับพลังงานในกระบวนการ รวมถึงอุณหภูมิบริเวณผิววัสดุที่มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมส่งผลให้กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาตินั้นเกิดขึ้นน้อย อันส่งผลเสียต่อพฤติกรรมการณ์การไล่ความชื้นในภาพรวม

สำหรับงานวิจัยในบทนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการอบแห้งข้าวซึ่งเป็นวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกด้วยการพาความร้อนเปรียบเทียบกับประยุกต์ใช้พลังงานทางดำนไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อนในสภาวะที่สมดุลกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งของข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยว และศึกษากลไกทางด้านการความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อน โดยมุ่งเน้นไปที่ขนาดแลบสเกลเพื่อลดความซับซ้อนของโหมดคลื่นไมโครเวฟให้อยู่ในรูปคลื่นระนาบเดียวโดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์เคลื่อนที่ในควาิตี้ที่หอน้ำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10 และบริเวณควาิตี้ที่ใส่ชิ้นงานทดสอบจะใช้ระบบการพาความร้อนด้วยลมร้อนที่ผิว เพื่อศึกษาลักษณะทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุในแต่ละช่วงเวลาการอบ และเพื่อหาแนวทางในการลดปริมาณความชื้นข้าวเปลือก

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 สมการการความรู้พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

สำหรับกรรมวิธีทางความร้อนโดยทั่วไปจะอาศัยหลักการของผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิผิวหน้าวัสดุที่ทำให้อุณหภูมิผิวหน้าวัสดุสูงขึ้นตามอุณหภูมิแวดล้อมจากนั้นพลังงานความร้อนจะถูกส่งต่อภายในวัสดุไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าด้วยกลไกการนำความร้อนในตัววัสดุ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย กล่าวคือใช้ระยะเวลานาน ประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป มีปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุเนื่องจากใช้ระยะเวลานาน ในทางตรงข้ามกรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการทะลุทะลวงหรือความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (resonance) ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามมีลักษณะเป็นคลื่นนิ่งที่มีจุดร้อนเกิดอยู่บริเวณกึ่งกลางวัสดุ และการสะท้อนของคลื่นดังกล่าวยังส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น

ในการศึกษาความร้อนจากกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความรู้เกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีความจำเป็นเพราะสมบัตินี้ส่งผลต่อการเกิดความร้อน และการกระจายตัวของความร้อนภายในวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [3-10]

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (3.1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) ซึ่งเป็นสมบัติ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คือสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m, ε_r' เป็นจำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก (relative permittivity หรือ relative dielectric constant) ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ และ ε'' เป็นจำนวน

จินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปเรียกไดอิเล็กตริกลอสมแฟกเตอร์ (dielectric loss factor) ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ

สำหรับค่าประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$)) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ [3-10]

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r' \epsilon_0} \quad (3.2)$$

และในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้กำลังสองของความเข้มของสนามไฟฟ้าในการประมาณค่าการดูดกลืนพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดกลืนหรือความร้อนเชิงปริมาตร (Q) สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้ [3-10]

$$Q \cdot \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (3.3)$$

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า, f คือ ความถี่ (GHz) และ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ โดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) ซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุรวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะความเข้มของพลังงานในวัสดุ [3-10]

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' (\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1)}{2}}} \quad (3.4)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง และ v คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความลึกทะลุทะลวงสามารถคำนวณได้แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นกว่าค่าความลึกทะลุทะลวงวัสดุจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่โดนคลื่นและอุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซีโปเนนเชียล แต่หากวัสดุมีความหนาแน่นน้อยกว่าความลึกทะลุทะลวงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะไม่ใช่ลักษณะเอ็กซีโปเนนเชียล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์อันตรายกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริก

3.2.2 อัตราการอบแห้ง

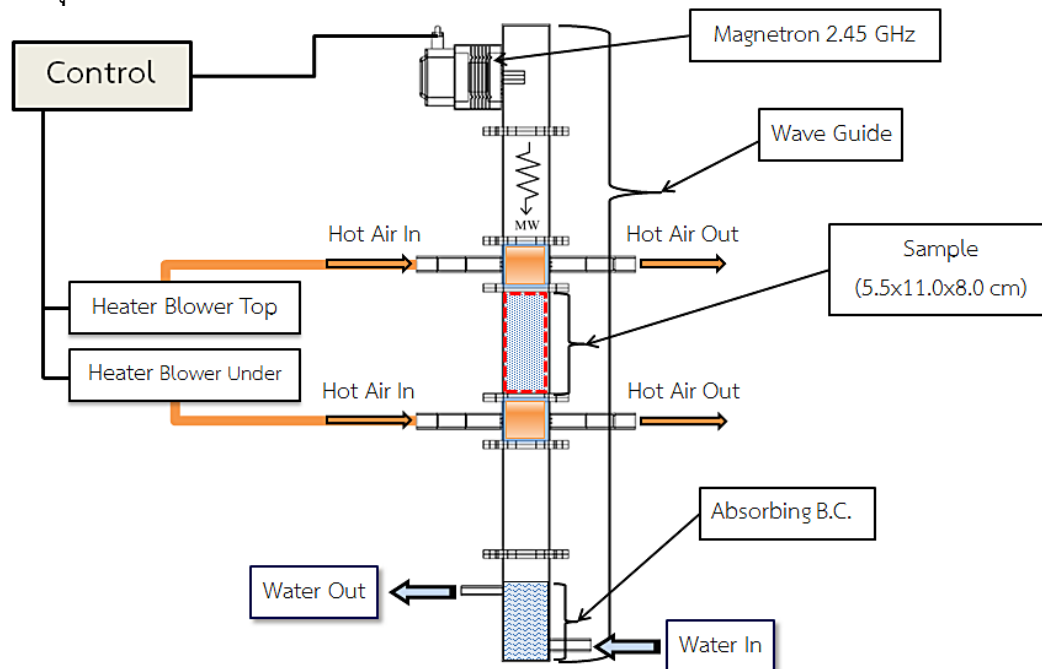
จากผลการทดลองทำการคำนวณหาอัตราการอบแห้ง เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นในแต่ละกระบวนการ โดยความชื้นในเมล็ดพืชคือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช เมื่อพิจารณาจะพบว่าในเมล็ดพืชประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืชซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอดกับส่วนที่เป็นน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช ส่วนน้ำหนักน้ำในเมล็ดพืชจะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของเมล็ดพืช โดยคำนวณจากฐานมวลแห้ง (dry basis) [3-5]

$$M = \frac{w - d}{d} (100\%) \quad (3.5)$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้น (%), w คือ น้ำหนักเปียก (g) และ d คือ น้ำหนักแห้ง (g)

3.3 ระเบียบวิธีทดลอง

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3-1 ระบบการถ่ายเทความร้อนที่มีแหล่งกำเนิดความร้อนด้วยลมร้อน และแหล่งกำเนิดความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟคาวิตีท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10

ระบบที่ใช้ในการศึกษากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ย่านไมโครเวฟที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับศึกษาเปรียบเทียบผล งานวิจัยส่วนนี้เป็นระบบไมโครเวฟ ระบบไมโครเวฟคาวิตีท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 ที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ซึ่งชุดทดสอบ จะต้องออกแบบให้สอดคล้องรองรับการศึกษาได้ทั้งกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลด้วยลมร้อน ปกติ และการถ่ายเทความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงาน ร่วมกันได้กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ 2.45 GHz ที่ต้องการให้พฤติกรรมคลื่นยังเป็นลักษณะ คลื่นระนาบอยู่ดังนั้น การออกแบบระบบจะมีหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูก ใส่ไว้ในบริเวณตำแหน่งวางชิ้นงาน (sample) ภายในคาวิตีแบบสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ที่มี ขนาดหน้าตัดตลอดท่อเท่ากับ 55 X 110 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งด้านบนของท่อนำคลื่นจะติดตั้งแมกนีตรอน (magnetron) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) กำลังสูงสุด 900 วัตต์ ไว้จำนวน 1 ตัว เพื่อกำเนิด คลื่นซึ่งป้อนคลื่นระนาบ (โหมด TE₁₀) และระบบพาความร้อนผ่านผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่าง เพื่อกำเนิดความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (ภาพที่ 3-1) โดยระบบไมโครเวฟจะมีการ ดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งค่าการรั่วไหลมี มาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 mW/cm²

การวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบนั้นทางผู้วิจัยมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์การวัดที่ไม่สามารถใช้วัด ในขณะที่เกิดคลื่นไมโครเวฟได้ (เทอร์โมคัปเปิลเป็นโลหะซึ่งเป็นตัวนำยิ่งยวดจะส่งผลโดยตรงต่อ พฤติกรรมการกระจายตัวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) ส่งผลให้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงในขณะทำ การทดลอง ดังนั้นการวัดอุณหภูมิจึงใช้วิธีการนำชิ้นงานทดสอบออกมาวัดด้านนอกคาวิตี โดยวัดค่า การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุจากเครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ด้วยสายวัด อุณหภูมิ (Thermocouples) วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางภายในวัสดุทดสอบโดยมีระยะห่างในแต่

ละช่วงเท่ากับ 1 cm (ภาพที่ 3-2) พร้อมทั้งบันทึกพฤติกรรมทางความร้อนบริเวณผิววัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography) (ภาพที่ 3-3) เพื่อสังเกตพฤติกรรมการกระจายตัวของความร้อน



ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-3 อุปกรณ์สำหรับเก็บค่าอุณหภูมิ

(ก) เครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) YOKOGAWA โมเดล FX1012
พร้อมสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

(ข) กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermography) FLIR โมเดล T640

3.3.2 กระบวนการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ เมล็ดพันธุ์ข้าว ประเภทปทุมธานี 60 หรือ กข 31 ที่มีความชื้นหลังจากการเก็บเกี่ยวประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยการทดสอบจะใช้ภาชนะขนาด $80 \times 55 \times 110 \text{ mm}^3$ โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองดังนี้

1.) ทำการทดลองโดยการปล่อยลมร้อนผ่านบริเวณผิวหน้าด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

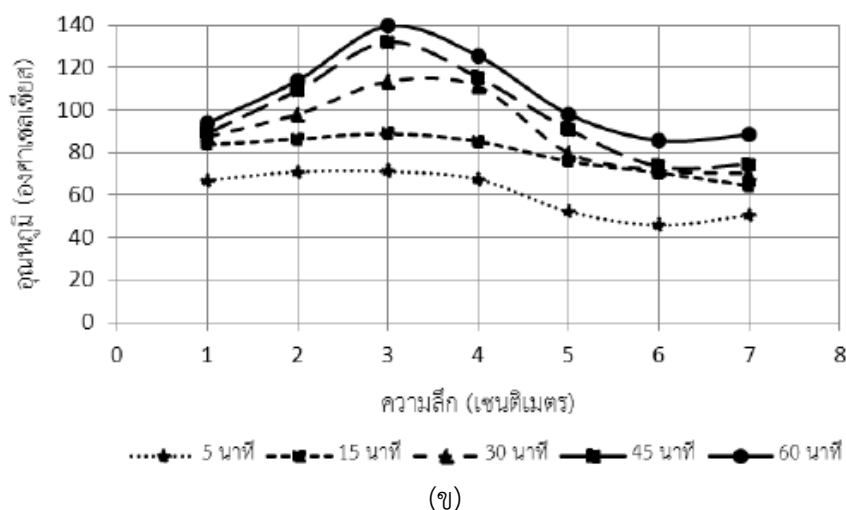
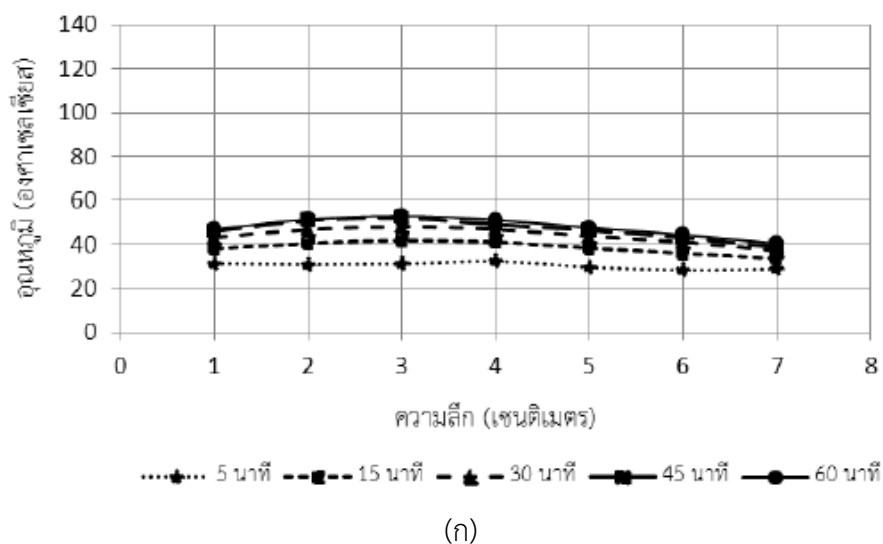
2.) ทำการทดลองโดยการปล่อยพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ และกำลัง 100 วัตต์ ในย่านคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

3.) ทำการทดลองโดยปล่อยพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ และกำลัง 100 วัตต์ ร่วมกับการปล่อยลมที่อุณหภูมิห้องผ่านบริเวณผิวหน้าด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

4.) ทำการทดลองโดยการปล่อยพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ และกำลัง 100 วัตต์ ร่วมกับการปล่อยความร้อนผ่านบริเวณผิวหนังด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5, 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

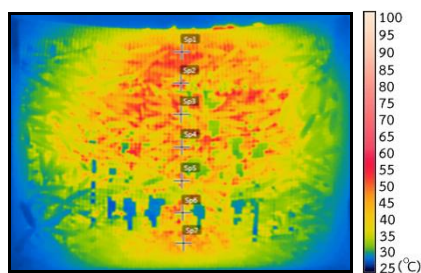
3.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมความร้อนของข้าวเปลือก โดยการให้ความร้อนด้วย ลมร้อนที่ผิวหนังอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพียงอย่างเดียว การให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ และ การให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ พิจารณาได้ว่าการให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ (ภาพที่ 3-4ก) พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความลึก 1-7 เซนติเมตร ค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ ซึ่งเกิดอุณหภูมิ ไม่สูงมากนักประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ไม่มากนัก ส่งผลต่อการดูดกลืนพลังงานที่ต่ำตามไปด้วย เมื่อทำการเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้า (กำลังวัตต์ ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น) โดยการให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ (ภาพที่ 3-4ข) พบว่าพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความลึกเริ่มต้น 1 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมิสูง เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 140 องศาเซลเซียส ที่ความลึก 3 เซนติเมตร และ อุณหภูมิเริ่มลดลงตามระยะความลึก เนื่องจากปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าทำให้มี ปริมาณการดูดกลืนพลังงานมากกว่า และใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้นกว่า ดังนั้นการให้ พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์ ลักษณะทางด้านอุณหภูมิโดยรวม ค่อนข้างสูงจึงไม่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นแก่ข้าวเปลือก เพราะอาจทำให้ข้าวเปลือกเกิดการ ไหม้เกรียมและเสียหายได้ สังเกตการกระจายตัวทางความร้อนเพิ่มเติม (ภาพที่ 3-5) และในส่วนของการให้ให้ความร้อนด้วยลมร้อนที่ผิวหนังอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพียงอย่างเดียวจากผิวหนังด้านบน และด้านล่างพบว่าจะมีการถ่ายเทความร้อนจากผิวหนังด้านนอกเข้ามาสู่ด้านใน โดยอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนผิวหนังด้านนอกของวัสดุก่อนในขณะที่บริเวณกึ่งกลางยังมีอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่และความร้อนจะ ค่อยๆ เคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในวัสดุส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีอุณหภูมิกระจายตัวสม่ำเสมอเท่ากับ 60 องศาเซลเซียสเมื่อมีระยะเวลาการอบแห้งจนถึงจุดหนึ่ง

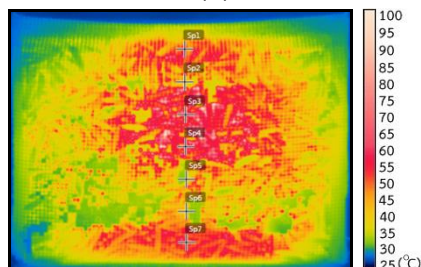


ภาพที่ 3-4 เปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิโดยให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือก ด้วยพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ
 (ก) การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ กำลัง 100 วัตต์
 (ข) การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ กำลัง 200 วัตต์

ภาพที่ 3-5 เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวความร้อนด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 และ 200 วัตต์ พบว่าเมื่อค่ากำลังวัตต์ป้อนเข้าต่างกันความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนจะมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 200 วัตต์ (ภาพที่ 5ข) ข้าวเปลือกสามารถผลิตพลังงานความร้อนภายในได้มากกว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ (ภาพที่ 3-5ก) ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เข้มข้นขึ้นทำให้อัตราการผลิตพลังงานความร้อนมากขึ้นสังเกตได้ว่าการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีการกระจายตัวภายในไม่ดีเท่ากับการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 200 วัตต์ ดังนั้นการให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังสูงทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงได้ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้กำลังไมโครเวฟที่ต่ำ



(ก)



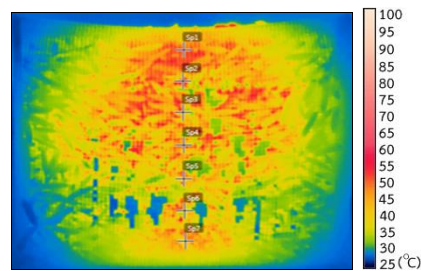
(ข)

ภาพที่ 3-5 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เวลา 60 นาที

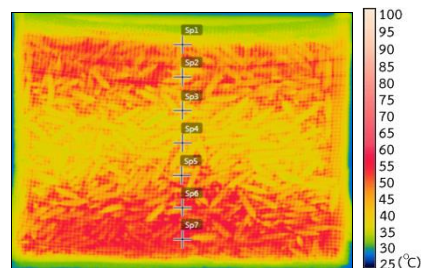
(ก) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟ กำลัง 100 วัตต์

(ข) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟ กำลัง 200 วัตต์

จากผลการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมความร้อนของข้าวเปลือก โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์ และการพาความร้อนด้วยลมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าในการให้พลังงานความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ (ภาพที่ 3-6ก) พฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเกิดจากบริเวณกึ่งกลางของวัสดุและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไปยังบริเวณด้านข้างของวัสดุเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงและทำความร้อนได้ดีกับวัสดุที่มีความชื้น ประกอบกับข้าวเปลือกนั้นเรียงตัวแบบไม่หนาแน่นมากจึงทำให้เกิดความร้อนจากภายใน ส่วนการให้พลังงานความร้อนด้วยการพาความร้อนด้วยลมร้อนด้านบน-ล่าง (ภาพที่ 3-6ข) พฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเกิดจากบริเวณผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุเข้าสู่กึ่งกลางของวัสดุ โดยจะสังเกตได้ว่าการพาความร้อนด้วยลมร้อนจะมีประสิทธิภาพในการทำความร้อนมากกว่าเนื่องจากการเรียงตัวของข้าวเปลือกที่ไม่หนาแน่นทำให้มีช่องว่างระหว่างเม็ดข้าวค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ดังนั้นการพาความร้อนด้วยลมแก่ข้าวเปลือกจึงเกิดการกระจายความร้อนทั่วทั้งวัสดุได้ง่าย



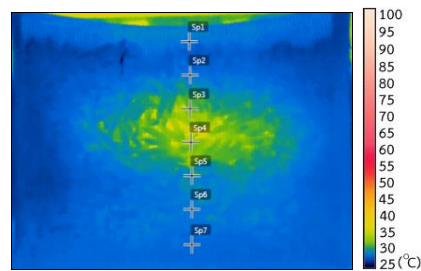
(ก)



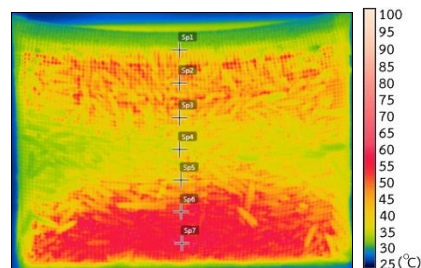
(ข)

ภาพที่ 3-6 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ และการพาความร้อนด้วยลมร้อน ที่เวลา 60 นาที
 (ก) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟ กำลัง 100 วัตต์
 (ข) การพาความร้อนที่ผิวด้านบน-ล่างด้วยลมร้อน กำลัง 700 วัตต์
 (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมความร้อนของ ข้าวเปลือก โดยการให้ความร้อน ด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 100 วัตต์รวมกับการพาความร้อนด้วยลมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และการให้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ รวมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในเรื่องเขตสีที่บ่งบอกถึงความร้อนภายในวัสดุทดสอบ พิจารณาจากการให้พลังงานไมโครเวฟรวมกับการพาความร้อนด้วยลมปกติ (อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส) (ภาพที่ 3-7ก) พฤติกรรมการกระจายตัวทางความร้อนที่ไม่สูงมากนักอยู่ในช่วงประมาณ 26-36 องศาเซลเซียส โดยมีปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดความร้อนที่เกิดขึ้น คือ ลมเนื่องจากมีอุณหภูมิที่ต่ำเกิดการพาความร้อนและความชื้นเข้ามาสู่ระบบ จึงทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดจาก กระบวนการไมโครเวฟนั้นลดประสิทธิภาพลงอย่างมาก ซึ่งแตกต่างจากการให้พลังงานไมโครเวฟ รวมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) (ภาพที่ 3-7ข) พฤติกรรมการ กระจายตัวทางความร้อนที่สม่ำเสมออยู่ในช่วงประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดความร้อนทั่ว บริเวณวัสดุทดสอบ สังเกตได้ว่าการกระจายตัวความร้อนบริเวณด้านบนและด้านล่างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อนด้วยลมผ่านผิวด้านบนและด้านล่าง ทำให้เกิดความร้อนสะสม บริเวณดังกล่าว



(ก)



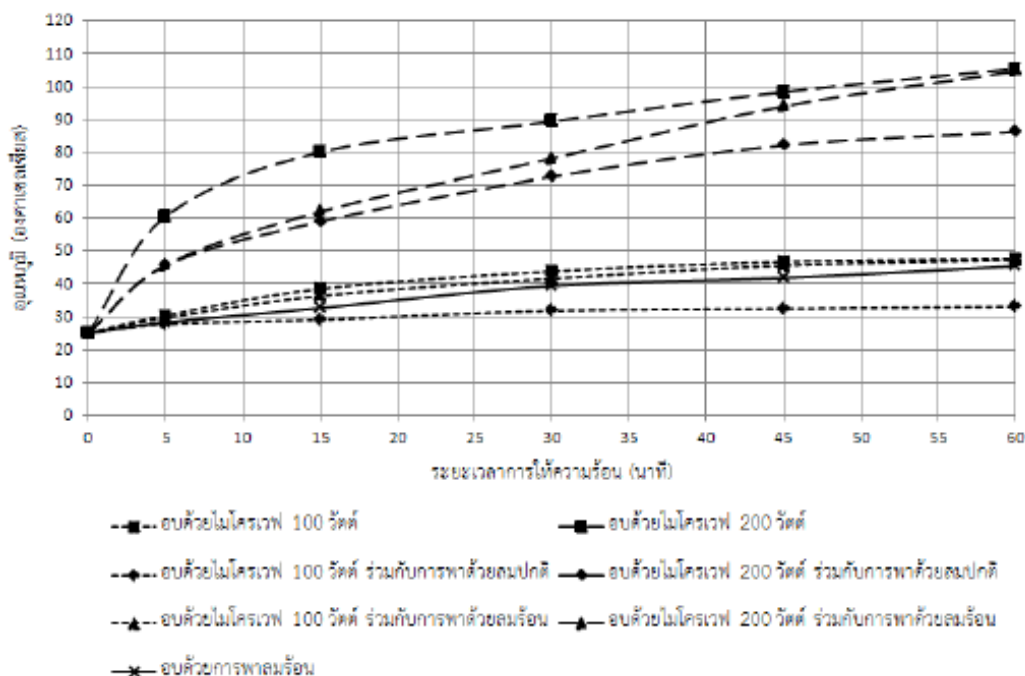
(ข)

ภาพที่ 3-7 เปรียบเทียบการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ
ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมที่เวลา 60 นาที

(ก) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟ กำลัง 100 วัตต์ร่วมกับการพาความร้อนที่ผิวด้วยลมปกติ
(อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

(ข) การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟ กำลัง 100 วัตต์ร่วมกับลมร้อนกำลัง 700 วัตต์
(อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 3-8 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนเมื่ออบข้าวเปลือกที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 และ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมที่ระยะเวลา 0-60 นาที ภายในกระบวนการให้พลังงานความร้อนอุณหภูมิแรกเริ่มของข้าวเปลือกประมาณ 25 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ (ข้าวเปลือก) โดยรวมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้พลังงานความร้อน เนื่องจากเกิดการสะสมปริมาณความร้อนภายในวัสดุตามระยะเวลาการอบ พิจารณาที่การอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ เนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำทำให้การผลิตปริมาณความร้อนไม่สูงมากนักซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการอบข้าวเปลือก โดยอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 50 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เปรียบเทียบกับกระบวนการพาความร้อนด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส พฤติกรรมการเกิดความร้อนตามช่วงเวลาการอบมีลักษณะใกล้เคียงกับการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ สังเกตได้ว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อยประมาณไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส เมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ลักษณะการเกิดความร้อนจึงพัฒนาไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลม 25 องศาเซลเซียส เห็นได้ชัดเจกว่าอุณหภูมิในกระบวนการอบนั้นต่ำลงอย่างมาก โดยอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30-35 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากอิทธิพลของการพาที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟออกไป ร่วมกับการพาความร้อน



ภาพที่ 3-8 การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือกที่ความชื้น 20เปอร์เซ็นต์

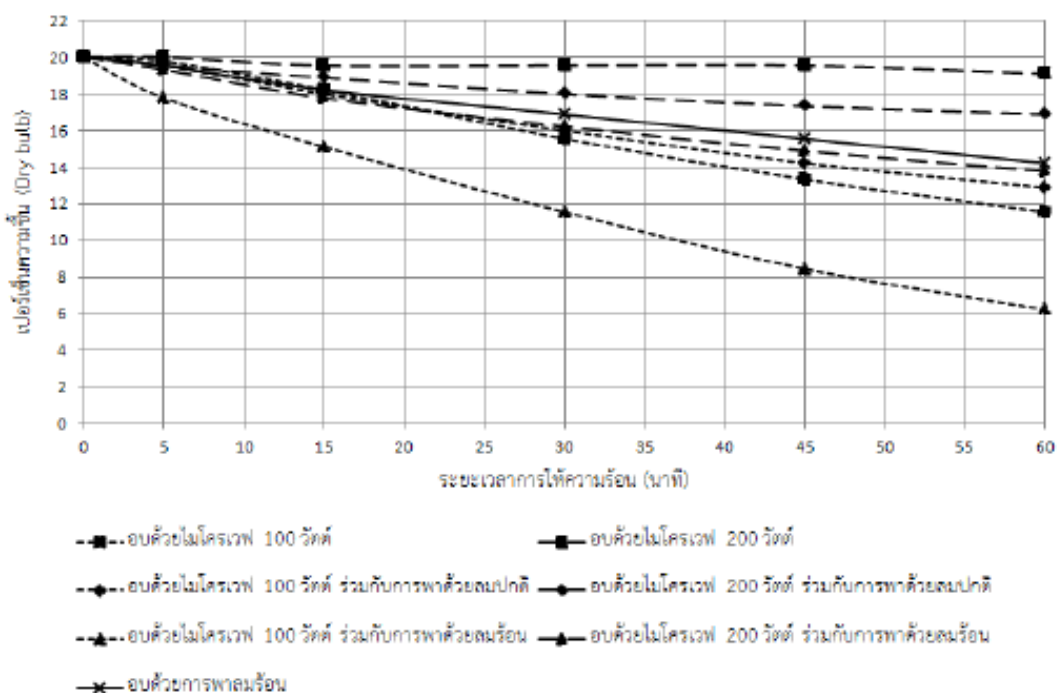
โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการพาคความร้อนด้วยลม

เมื่อพิจารณาที่การอบด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 200 วัตต์ อุณหภูมิระหว่างกระบวนการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงมากประมาณ 105 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาคความร้อนด้วยลมร้อน 60 องศาเซลเซียส กระบวนการอบช่วงแรกที่ 0-30 นาที อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก สังเกตได้ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ประมาณ 10-20 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระบวนการพานั้นส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนภายในที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟ เพราะว่าความร้อนที่เกิดจากกระบวนการพามีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟจึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกไปจากระบบ แต่เมื่อการอบถึงช่วงระยะเวลา 45-60 นาที สังเกตได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟมีอิทธิพลสูงกว่าการพาคด้วยลม เพราะว่ากระบวนการเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟมีการกระจายตัวอุณหภูมิทั่วทั้งปริมาตร และเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ร่วมกับการพาคความร้อนด้วยลม 25 องศาเซลเซียส สังเกตว่าอุณหภูมิในกระบวนการอบนั้นต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 85 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากอิทธิพลของการพาคที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟออกไปพร้อมกับการพาเช่นเดียวกับการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์

การลดปริมาณความชื้นในทางปฏิบัติ มิได้สนใจในเรื่องระยะเวลาการอบและความสามารถในการลดปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึงการรักษาคุณภาพของวัสดุด้วย ซึ่งการลดความชื้นของข้าวเปลือกให้ยังมีคุณภาพข้าวที่ดีนั้นอุณหภูมิการไล่ความชื้นไม่ควรสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดลองเห็นได้ว่าอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลัง 200 วัตต์ มีบางคาบเวลาที่มีอุณหภูมิสูงมาก (ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิเนื่องจากต้องการศึกษาพฤติกรรมพื้นฐาน) ส่วนการอบที่เหมาะสมสำหรับข้าวเปลือกนั้นควรใช้พลังงาน

ไมโครเวฟที่ไม่เกิน 100 วัตต์ ซึ่งจะเป็นกระบวนการอบที่ไม่สูญเสียคุณภาพของข้าวเปลือก อย่างไรก็ตามข้อมูลการศึกษาพฤติกรรมการณ์การลดความชื้นในทุกกรณีที่ศึกษา ยังจำเป็นต้องนำเสนอข้อมูลซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-9

ภาพที่ 3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน โดยทำการทดสอบข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มแรกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำการเปรียบเทียบพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ ตามลำดับ พบว่าปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกที่อบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ สามารถระเหยออกจากข้าวเปลือกได้ช้ากว่าการอบด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาในส่วนของการอบข้าวเปลือกด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ ความชื้นสามารถระเหยออกจากข้าวเปลือกได้เร็วกว่าการอบด้วยลมร้อน เนื่องจากน้ำหรือความชื้นเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มาก ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณความชื้นสนามไฟฟ้าหรือกำลังวัตต์ป้อนเข้าสูง (เช่น 200 วัตต์) อุณหภูมิของข้าวเปลือกจึงสูงอย่างรวดเร็วเพราะปริมาณความชื้น (น้ำ) ภายในโครงสร้าง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในข้าวเปลือกจึงส่งผลต่อกลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารในข้าวเปลือก การระเหยความชื้นออกจากข้าวเปลือกจึงทำได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น



ภาพที่ 3-9 ประสิทธิภาพการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

สำหรับกระบวนการอบข้าวเปลือกด้วยการพาความร้อนด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ใช้พลังงาน 700 วัตต์ ในการผลิตความร้อน) พิจารณาเมื่อทำการให้พลังงานความร้อนด้วยลมร้อนผ่านผิวด้านบนและด้านล่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนความชื้นลดลงตามระยะเวลาการให้พลังงานความร้อน เนื่องจากภายในข้าวเปลือกมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากข้าวเปลือกออกไปยังผิวน้ำทำได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งปริมาณความชื้นภายในระเหยออกมาสู่ผิววัสดุจากความร้อนซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน โดยความชื้นมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาการให้ความร้อน เนื่องจากคาบระยะเวลาการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่สูญเสียออกไปภายนอกกระบวนการ

เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (ใช้พลังงาน 700 วัตต์ ในการผลิตความร้อน) เห็นได้ชัดว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นได้อย่างมาก เนื่องจากการเกิดความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลให้ความชื้นภายในเกิดการระเหยขึ้นสู่ผิวด้านบนของวัสดุร่วมกับกระบวนการพาความร้อนพัดพาความชื้นออกไปจากผิววัสดุด้วยลมร้อน ทำให้การเคลื่อนย้ายของมวลความชื้นออกไปได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ส่วนการให้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมลมปกติอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ไม่ใช้พลังงานในการผลิตความร้อน) อัตราส่วนความชื้นลดลงน้อยมาก เนื่องจากลมที่สภาวะธรรมชาติ (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) จะมีความชื้นของอากาศที่สูงกว่าลมร้อน (อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ทำให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นข้าวเปลือกได้ผลที่ไม่ดีนัก ซึ่งสังเกตเพิ่มเติมได้จากการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมปกติพบว่าปริมาณความชื้นในข้าวเปลือกหลังจากการอบมีอัตราส่วนความชื้นที่มากกว่าการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ 200 วัตต์เพียงอย่างเดียว

3.5 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนแบบไฮโกรสโคปิกในกระบวนการทดลองอบข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้พลังงานจากกระบวนการพาความร้อน และการใช้พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ต (GHz) ขนาด 100 วัตต์และ 200 วัตต์ แบบคลื่นระนาบภายใต้ควิตี้ที่ทนาคัลแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE₁₀ และการพาความร้อนด้วยลมร้อนสามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนจะเกิดกลไกการถ่ายเทความร้อนจากที่ผิวข้าวเปลือกทั้งจากผิวด้านบนและด้านล่างทำให้อุณหภูมิที่ผิวด้านบนและด้านล่างสูงขึ้นก่อนที่จะกระจายอุณหภูมิเข้าไปยังด้านในวัสดุ ในขณะที่หากใช้แหล่งความร้อนเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าปริมาณกำลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกควรปล่อยในปริมาณที่เหมาะสม (100 วัตต์) ไม่ควรให้มากเกินไป เนื่องจากจะส่งผลต่ออุณหภูมิที่สูงในการลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของข้าวเปลือก คือ ถ้าหากใช้กำลังวัตต์ที่สูง (200 วัตต์) ข้อดีคือความชื้นจะออกไปอย่างรวดเร็วแต่แลกมาด้วยข้อเสีย คือ อุณหภูมิจะสูงมากทำให้ข้าวเปลือกเกิดการไหม้เกรียมได้ ดังนั้นจึงควรเลือกปรับกำลังวัตต์และควบคุมระยะเวลาการให้พลังงานที่เหมาะสม

ปริมาณความชื้นมีผลต่อการเก็บรักษาเมล็ดพืช และลักษณะการนำไปใช้ ดังนั้นการลดปริมาณความชื้นควรอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น เมล็ดพันธุ์ข้าวที่เก็บไว้ทำพันธุ์ ความชื้นให้เหลือ 9-10% หากต้องการเก็บรักษาไว้นานควรลดความชื้นให้เหลือประมาณ 12% ดังนั้นจากผลการทดลองปริมาณกำลัง 100 วัตต์ ร่วมกับการพาความร้อนด้วยลม 60 องศาเซลเซียส จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมในการลดความชื้น

การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมแก่ข้าวเปลือก จากการทดสอบนั้นเป็นการปล่อยคลื่นระนาบเดียว เพื่อที่จะสังเกตพฤติกรรมการเกิดความร้อนของพลังงานไมโครเวฟ ลักษณะความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจึงเกิดขึ้นจากบริเวณด้านบน โดยสามารถทำความร้อนแก่ข้าวเปลือกที่มีความหนา 8 ซม.ได้ทั่วทั้งปริมาตร และเมื่อมีการทำงานร่วมกับการพาความร้อนด้วยลมทั้งด้านบนและล่างนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณความชื้นได้เป็นอย่างดี

4. การศึกษาวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนซีเมนต์เพสต์ที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีโดยกรณีศึกษาการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น และช่วงการก่อตัวสุดท้ายในควาวิตที่โอนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10

4.1 บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยและการประยุกต์ใช้พลังงานทางเลือกอย่างไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนหลากหลายประเภทเช่น การทำอาหาร การอบแห้ง และการฆ่าเชื้อ เป็นต้น พฤติกรรมทางความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟจะเกิดขึ้นในวัสดุที่อยู่ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเอง ซึ่งความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ (penetration depth) ในวัสดุจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตความร้อน สำหรับการกระจายความร้อนของวัสดุจากพลังงานไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด อาทิเช่น โครงสร้างและรูปทรงของวัสดุ กำลังและการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟ (power level and microwave field distribution) รวมทั้งสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (dielectric properties) ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิง [4-1]-[4-20] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอกสารอ้างอิงของ Mujumdar [4-1] Metaxas [4-2] และ Schubert and Rogier [4-3] ซึ่งเป็นต้นแบบของงานวิจัยเทคนิคกระบวนการสร้างความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ

สำหรับวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นเกือบทั้งหมดจะเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นวัสดุพูน และวัสดุพูนบางประเภทก็มีพฤติกรรมที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตนเองได้จากปฏิกิริยาทางเคมีแบบต่างๆ ซึ่งวัสดุในกลุ่มคอนกรีตถือว่าเป็นหนึ่งในนั้น ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุพูนที่มีลักษณะเป็นผงซ้อน ๆ กัน และในช่องว่างภายในระหว่างผงจะเป็นโพรงอากาศ หากแทนที่โพรงอากาศด้วยน้ำผงซีเมนต์เหล่านี้จะเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งส่งผลให้ตัวผงซีเมนต์เปลี่ยนโครงสร้างจากวัสดุพูนที่มีลักษณะเป็นผงแบ่งกลายเป็นวัสดุพูนที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็งที่สามารถรับแรงทางกลได้

ในส่วนเทคนิคทางความร้อนในงานคอนกรีตเริ่มต้นขึ้นเมื่อ 40-50 ปี ที่ผ่านมา เนื่องจากความร้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุพูนที่ทำให้คอนกรีตแข็งตัวและรับกำลังอัดได้รวดเร็วขึ้น และในปัจจุบันการใช้ความร้อนบ่มคอนกรีตเพื่อเร่งการพัฒนากำลังรับแรงอัดขั้นพื้นฐานการนำความร้อนจากผิวหน้าวัสดุซึ่งรับความร้อนจากไอน้ำ เช่น การบ่มด้วยวิธีออโตเคลฟ (autoclaves curing) สาเหตุสำคัญซึ่งนำไปสู่การพัฒนากรรมวิธีการบ่มเร่งพัฒนากำลังของคอนกรีตคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการรับกำลังอัดอย่างรวดเร็วของผลิตภัณฑ์ส่งผลเพิ่มศักยภาพในด้านการก่อสร้างให้รวดเร็วทันกับความต้องการทางธุรกิจสำหรับการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการบ่มเร่งพัฒนากำลังของคอนกรีตมีศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับงานวิจัยต้นแบบ [4-11] ถึง [4-20]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในลักษณะมัลติโหมด (เช่น เตาไมโครเวฟบ้าน) ส่งผลให้การกระจายตัวของคลื่นมีทิศทางและลักษณะไม่แน่นอน เนื่องจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาภายในควาวิตทำความร้อน ส่งผลให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมแท้จริงได้

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในการบ่มซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ) ด้วยไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ที่ช่วงการก่อตัวเริ่มต้น และช่วงการก่อตัวสุดท้าย ในควาวิตที่ทนาคลิ้นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี่ 10 เพื่อศึกษาลักษณะทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุซีเมนต์เพสต์ในแต่ละช่วงเวลาหลังการผสม

4.2 พฤติกรรมระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริก

กรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (resonance) [4-4] ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (พลังงานไมโครเวฟจะลดลงในลักษณะเอ็กซีโปเนนเชียล (exponential decay) [4-2]) ซึ่งการสะท้อนในวัสดุที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น

ในการศึกษาความร้อนจากกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความรู้เกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีความจำเป็น เพราะสมบัตินี้ส่งผลต่อการเกิดความร้อน และการกระจายตัวของความร้อนภายในวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [4-4]

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (4.1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ε คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) ซึ่งเป็นสมบัติ ที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ε_0 คือสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ε_r' เป็นจำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ε_r'' เป็นจำนวนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริก ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ

สำหรับค่าประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$)) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r' \varepsilon_0} \quad (4.2)$$

นอกจากสมบัติไดอิเล็กตริกจะใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางความร้อนแล้วยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีก อาทิเช่น มีงานวิจัยทางด้านคอนกรีตชิ้นหนึ่งที่ใช้สมบัติไดอิเล็กตริกในการหาสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเหลว (ช่วงเวลาก่อตัวหลังผสม) [4-21]

และในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้ค่ากำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กในการประมาณค่าการดูดซับพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดซับหรือความร้อนเชิงปริมาตร (density of microwave power absorbed, Q (W/m³)) สามารถอธิบายเป็นสมการที่ (4.1) [4-11]

$$Q = \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (4.3)$$

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า

f คือ ความถี่ (เฮิร์ต (GHz))

ε_0 คือ สมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง

$$(8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m})$$

$\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (ϵ_r''/ϵ_r')

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อค่าการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ

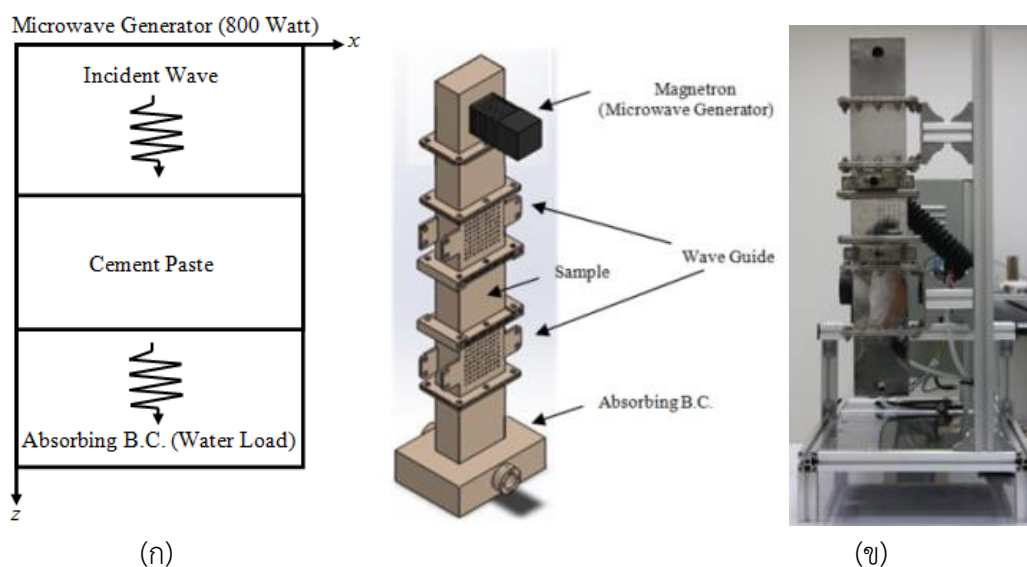
ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งคือค่าความลึกทะลุทะลวง ซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุ รวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะที่ความเข้มของพลังงานในวัสดุมีค่าเหลือร้อยละ 37 จากพลังงานที่ผิวหน้าวัสดุ [9] ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้ดังนี้

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(\sqrt{1+(\tan \delta)^2} - 1)}{2}}} \quad (4.4)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง

v คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

4.3 ระเบียบวิธีทดลอง



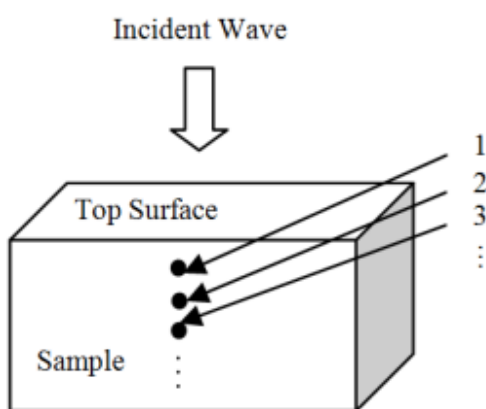
ภาพที่ 4-1 ระบบไมโครเวฟควิตี้ที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10

(ก) โดเมนทางกายภาพที่พิจารณา

(ข) อุปกรณ์สำหรับทดสอบตามเงื่อนไขโดเมน

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟระบบไมโครเวฟควิตี้ที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10 ที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกใส่ไว้ในบริเวณตำแหน่งวางชิ้นงานภายในควิตี้แบบสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ที่มีขนาดหน้าตัดตลอดท่อเท่ากับ 55×110 มิลลิเมตร² ซึ่งด้านบนของท่อนำคลื่นจะติดตั้งแมกนีตรอน (magnetron) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) กำลัง 800 วัตต์ไว้จำนวน 1 ตัว เพื่อกำเนิดคลื่นและป้อนคลื่นระนาบ (โหมดทีอี 10) เพื่อกำเนิดความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (ภาพที่

4-1) ระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบนั้นทางผู้วิจัยมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์การวัด ที่ไม่สามารถใช้วัดในขณะที่เกิดคลื่นไมโครเวฟได้ (เทอร์โมคัปเปิลเป็นโลหะซึ่งเป็นตัวนำยิ่งยวดจะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการกระจายตัวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) ส่งผลให้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงในขณะที่ทำการทดลอง ดังนั้นการวัดอุณหภูมิ จึงใช้วิธีการนำชิ้นงานทดสอบออกมาวัดอุณหภูมิในจุดกึ่งกลางภายในวัสดุ ณ ตำแหน่งต่างๆ (ภาพที่ 4-2) ในเวลาการทำความร้อนที่กำหนดไว้ ตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 วินาที (ชิ้นงานหลังนำออกมาวัดอุณหภูมิตามเวลาทำความร้อนที่กำหนดจะถูกทิ้งทันทีและใช้ชิ้นงานทดสอบใหม่ในเวลาทำความร้อนถัดไป) โดยอุปกรณ์เก็บบันทึกอุณหภูมิร่วมกับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิชิ้นงาน และตรวจสอบเพิ่มเติมโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ± 0.5 องศาเซลเซียส) วัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุเปรียบเทียบกับขณะทำการวัด (ภาพที่ 4-3)



ภาพที่ 4-2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์
(ตำแหน่งแรกวัดจากผิวด้านบนของวัสดุลงมา 0.5 ซม. จากนั้นวัดทุกระยะอีก 1 ซม.)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-3 อุปกรณ์เก็บค่าอุณหภูมิ

(ก) อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ของ EXTECH โมเดล 42515

(ข) อุปกรณ์เก็บบันทึกอุณหภูมิของ DATATAKER รุ่น DT80M พร้อมสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K



(ก)

(ข)

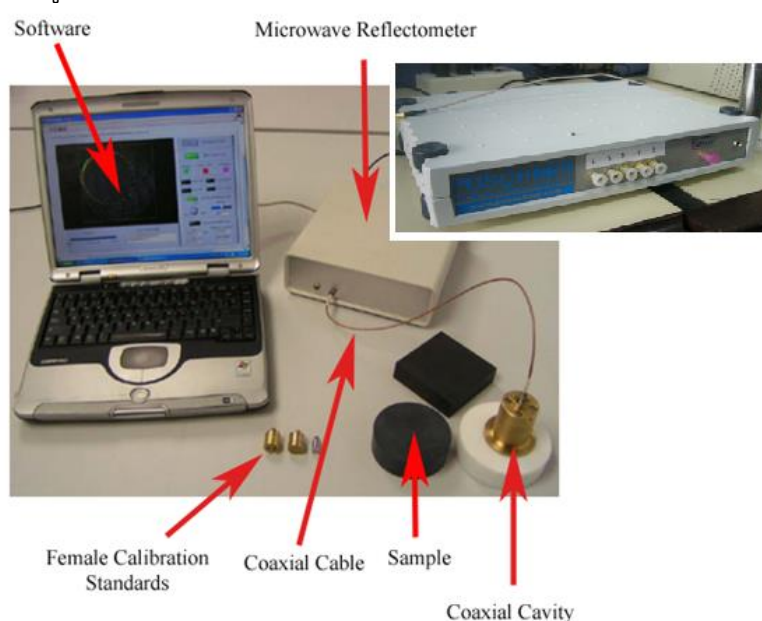
ภาพที่ 4-4 กล้องถ่ายภาพความร้อน ของ FLIR โมเดล T640

(ก) ตัวกล้องถ่ายภาพความร้อน

(ข) ภาพถ่ายและรายละเอียดที่ได้จากกล้อง

นอกจากนั้นได้ทำการวัดลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมอุณหภูมิในวัสดุซีเมนต์เพสต์อีกครั้งด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนของ FLIR โมเดล T640 (ภาพที่ 4)

สำหรับวัสดุทดสอบเป็นซีเมนต์เพสต์ขนาด 30x55x110, 50x55x110 และ 80x55x110 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm³) ตามลำดับ โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ น้ำประปา (ค่าความกรดต่าง (pH) เท่ากับ 7.0) ตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM C 305 [4-22] สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ทำการทดสอบสามารถรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.1 หลังจากผสมจึงนำซีเมนต์เพสต์ใส่แบบหล่อและหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและปล่อยให้วัสดุแข็งตัวตามปฏิกิริยาเคมีแล้วถอดแบบตามช่วงระยะเวลาทดลองที่กำหนดได้แก่ ที่อายุ $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง, $6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง, $12\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง, $18\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง และ $24\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง. ในส่วนการทำความร้อนซีเมนต์เพสต์ด้วยไมโครเวฟนั้นทำโดยนำซีเมนต์เพสต์ที่ถอดแบบมาใส่ในภาชนะที่ทนความร้อนแบบสี่เหลี่ยมและให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 60 วินาที และทดสอบหาค่าอุณหภูมิตามลำดับ

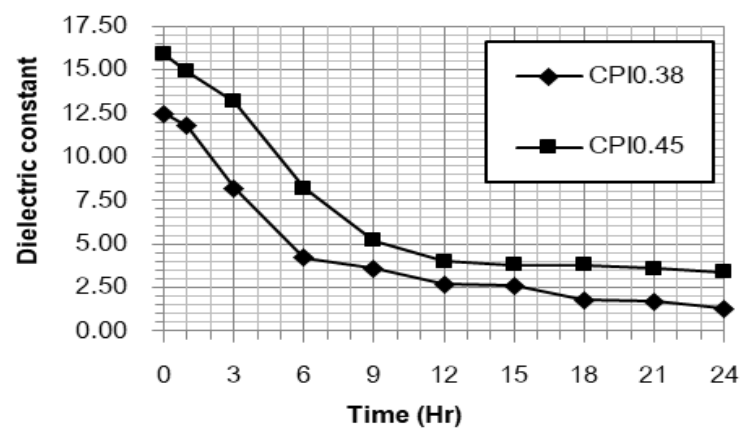


ภาพที่ 4-5 เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์ ของ Puschner

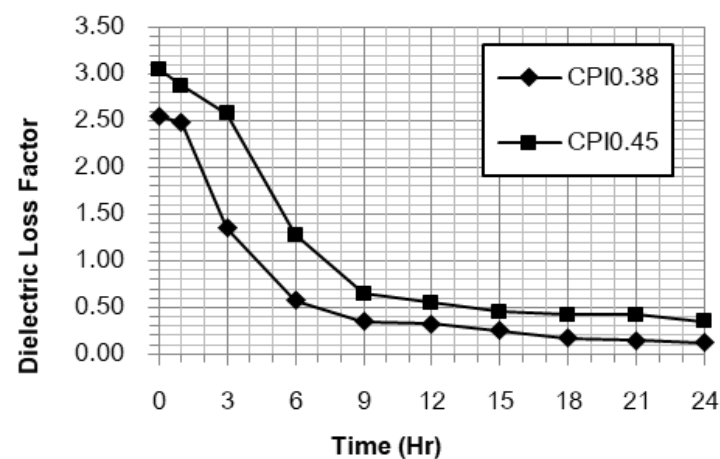
ในส่วนของการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์หลังผสมนั้น ทำโดยการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุหลังการผสมตั้งแต่เริ่มต้นไปจนครบ 24 ชั่วโมง (0, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ) ด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์ ของ Puschner (ภาพที่ 4-5) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ CEE จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

สูตร	ปูนซีเมนต์ (กก.)	น้ำ (กก.)
1 w/c =0.38 (CPI0.38)	1	0.38
2 w/c =0.45 (CPI0.45)	1	0.45



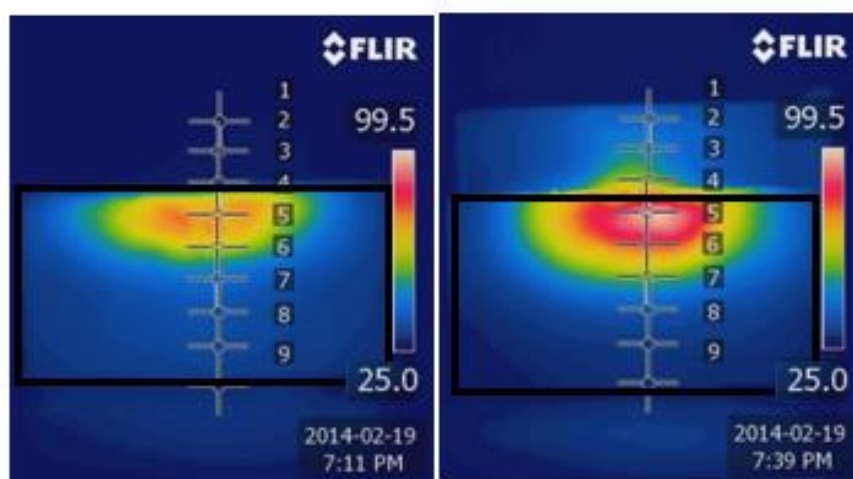
ภาพที่ 4-6 จำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก
(ไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์)



ภาพที่ 4-7 จำนวนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริก
(ไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์)

4.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4-6 และ 4-7 ซึ่งแสดงพฤติกรรมสมบัติไดอิเล็กตริก ที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหลังจากเริ่มผสมจนครบ 24 ชั่วโมงพบว่า ซีเมนต์เพสต์ทั้งสองส่วนผสมมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กตริกในทั้งในส่วนของคุณค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนต์ และไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอร์ (ดังสมการที่ (4.1)) ซึ่งค่าทั้งสองส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัววัสดุซึ่ง ส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการกำเนิดความร้อน (ดังสมการที่ (4.3)) ซึ่งค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่มากโดยธรรมชาติจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำกว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีค่าน้อย ดังนั้นการที่สมบัติไดอิเล็กตริกที่ลดลงของซีเมนต์เพสต์ทั้งสองสูตรหลังการผสมจึงส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟดีขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งสามารถสังเกตเพิ่มเติมได้ดังภาพที่ 8



(ก)

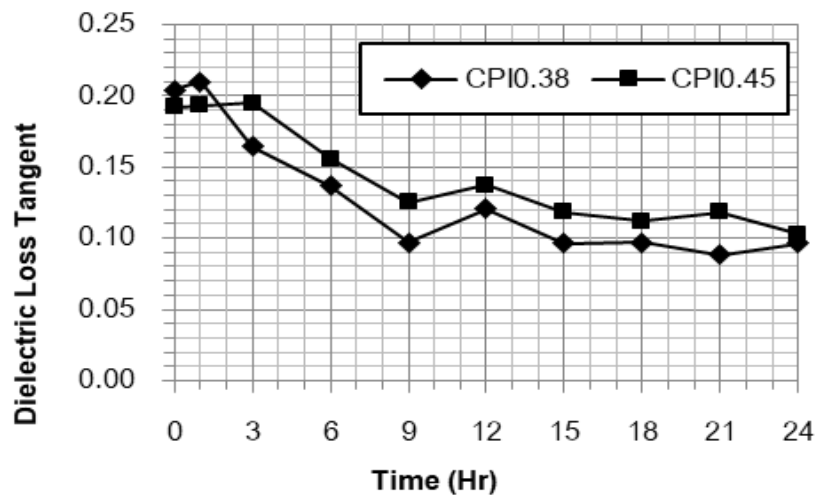
(ข)

ภาพที่ 4-8 การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ (W/C 0.38) ขนาดความหนา 50 มม. เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 60 วินาที

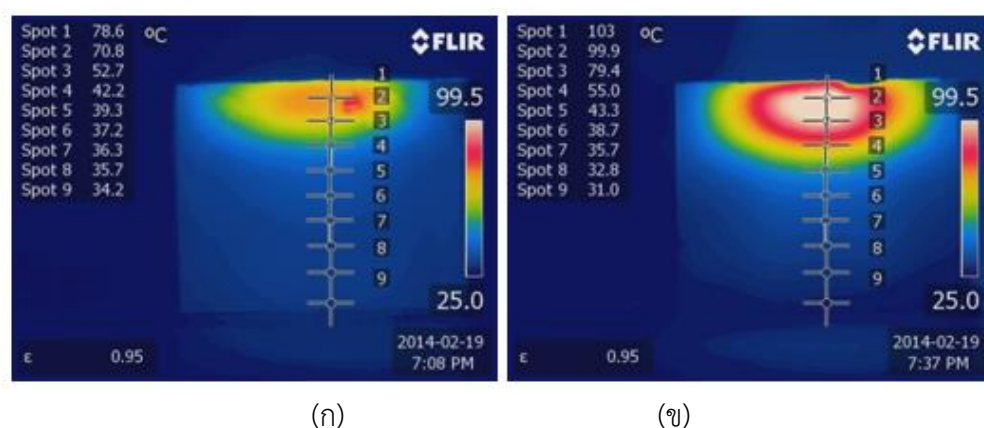
(ก) หลังผสม $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

(ข) หลังผสม $24\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

นอกจากนั้นในภาพที่ 4-9 เมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์ฮิสเทอสิสของสมบัติไดอิเล็กตริก (รายละเอียดดังสมการที่ (4.2)) ที่เป็นปัจจัยโดยตรงต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (รายละเอียดดังสมการที่ (4.3)) พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสูตรและมีความแตกต่างกันของค่าในแต่ละช่วงเวลาไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบช่วงเวลาหลังการผสมพบว่า ความร้อนในช่วงเวลาเริ่มผสมหรือช่วงการก่อตัวเริ่มต้น จะมีค่าสูงสุดและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการก่อตัวสุดท้ายที่พิจารณา (24 ชั่วโมง)



ภาพที่ 4-9 สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (ϵ_r''/ϵ_r') ของสมบัติไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-10 การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ (W/C 0.38) ขนาดความหนา 80 มม.

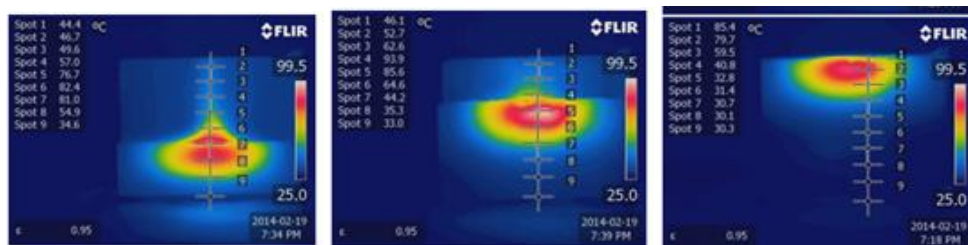
เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 60 วินาที

(ก) หลังผสม $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

(ข) หลังผสม $24\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

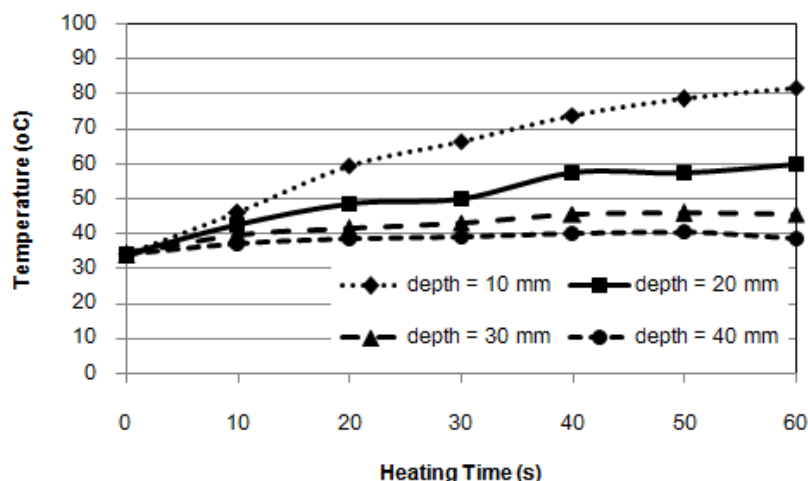
อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าความร้อน Q ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นจากการตั้งเงื่อนไขที่พิจารณาจากค่าลอสมแทนเจนท์ที่เปลี่ยนแปลงไป (ค่ากำลังงานจากสนามไฟฟ้า E คงที่) จากข้อมูลในภาพที่ 4-9 ซึ่งควรจะให้ผลอุณหภูมิที่ระยะเวลาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟหลังจากผสมซีเมนต์เพสต์ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มากกว่าการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟหลังจากผสมซีเมนต์เพสต์ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่าผลการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามดังภาพที่ 10 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลที่น่าจะเป็นไปได้ อาจเกิดจากในช่วงต้นของการผสมมีปริมาณน้ำจำนวนมากที่ยังเป็นน้ำอิสระ ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของน้ำ ($4.184 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) และคอนกรีต ($0.880 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) จากเอกสารอ้างอิง [4-23] พบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก ดังนั้นในปริมาณความร้อนที่เท่ากัน ซีเมนต์เพสต์เหลว (ช่วงการก่อตัวเริ่มต้น) จึงควรมีอุณหภูมิต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์แข็ง (ช่วงการก่อตัวสุดท้าย) ดังภาพที่ 4-10 ที่ปรากฏขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์ทึบแสงแทนเจนต์ ของสมบัติไดอิเล็กตริก (รายละเอียดดังสมการที่ (4.2)) ที่เป็นปัจจัยโดยตรงต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (รายละเอียดดังสมการที่ (4.3)) พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสูตรและมีความแตกต่างกันของค่าในแต่ละช่วงเวลาไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบช่วงเวลาหลังการผสมพบว่า ความร้อนในช่วงเวลาเริ่มผสมหรือช่วงการก่อตัวเริ่มต้น จะมีค่าสูงสุดและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการก่อตัวสุดท้ายที่พิจารณา (24 ชั่วโมง)

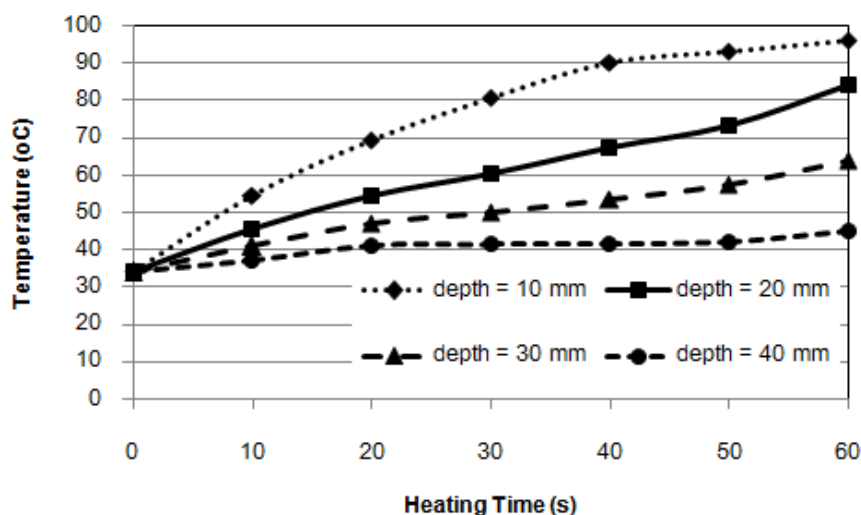


ภาพที่ 4-11 การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ (W/C 0.38) ขนาดความหนา 30, 50 และ 80 มม. เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 60 วินาที

จากภาพที่ 4-11 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนาของวัสดุที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในซีเมนต์เพสต์พบว่า ในช่วงความหนาดังกล่าว การกระจายตัวตามระยะความลึกมีลักษณะใกล้เคียงกัน คือร้อนบริเวณผิวหน้าด้านบนโดยมีจุดร้อนสูงสุดที่ระยะต่ำกว่าผิวหน้าด้านบนประมาณ 10 มม. และอุณหภูมิจะลดต่ำลงที่ระยะที่ลึกขึ้น โดยบริเวณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงความลึก 0 - 25 มม. จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถที่สร้างความร้อนในวัสดุซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนาไม่สูงมากนัก หากมีความหนามากกว่า 30 มม. ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำอย่างมาก ดังนั้นไมโครเวฟที่ความถี่นี้น่าจะเหมาะสมกับซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนาไม่เกิน 30 มม. และจากภาพความร้อนดังกล่าวอาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ในกรณีซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนาเกิน 30 มม. หรือมีความหนาเกินค่าระยะทะลุทะลวง (รายละเอียดดังสมการที่ (4.4)) สามารถที่จะใช้กฎของแลมเบิร์ต (อุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล)



ภาพที่ 4-12 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาดหนา 50 มม. ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์ ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง

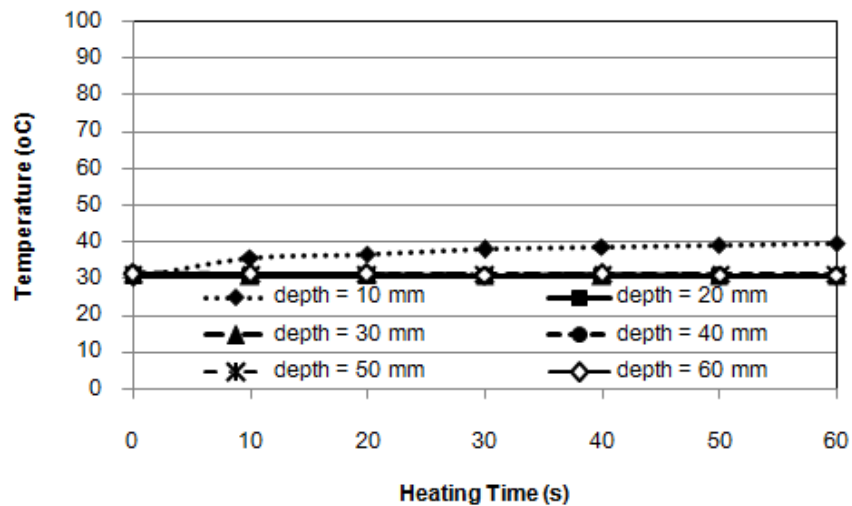


ภาพที่ 4-13 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.38 ขนาดหนา 50 มม.
ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์ ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง

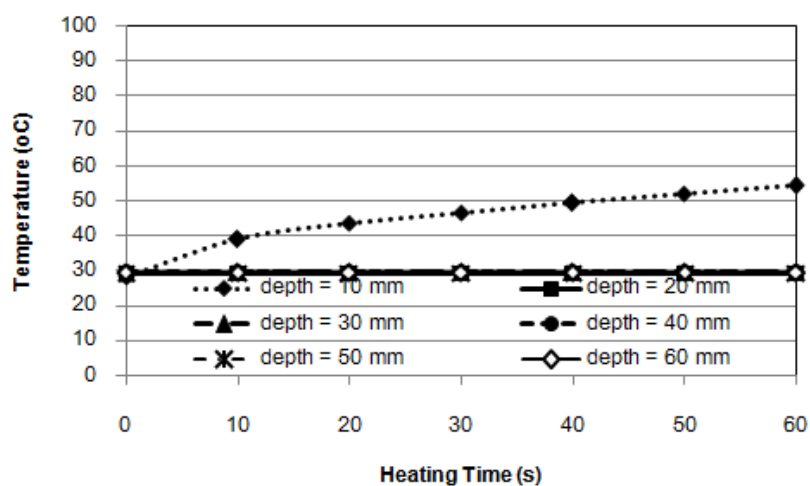
เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนที่สัดส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ต่างกันที่ระยะเวลาเดียวกัน จากข้อมูลค่าอุณหภูมิที่ปรากฏในภาพที่ 9 ที่อธิบายไปข้างต้นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิเปรียบเทียบจุดตามระยะลึก (ภาพที่ 4-12 และ 4-13) พบว่า ที่สัดส่วน w/c 0.38 (น้ำน้อย) ให้ผลอุณหภูมิที่สูงกว่า w/c 0.45 (น้ำมาก) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากสมบัติค่าความจุความร้อนเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ แต่การวิเคราะห์ในรายละเอียดเชิงลึก คงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

ในส่วนของการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและการให้ความร้อนด้วยการพาความร้อนที่ผิว จากภาพที่ 4-14 ถึง 4-17 พบว่า การให้พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์สามารถให้อุณหภูมิที่สูงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 60 วินาที ในขณะที่การพาความร้อนที่ผิวใช้กำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์ผลิตความร้อน 900 วัตต์ (อุณหภูมิความร้อนตลอดการทดลอง ประมาณ 80 องศาเซลเซียส) มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครเวฟ และการกระจายตัวของอุณหภูมิแยกกว่าอีกด้วย ทั้งในกรณีช่วงเวลาก่อนตัวเริ่มต้น และช่วงเวลาก่อนตัวสุดท้าย

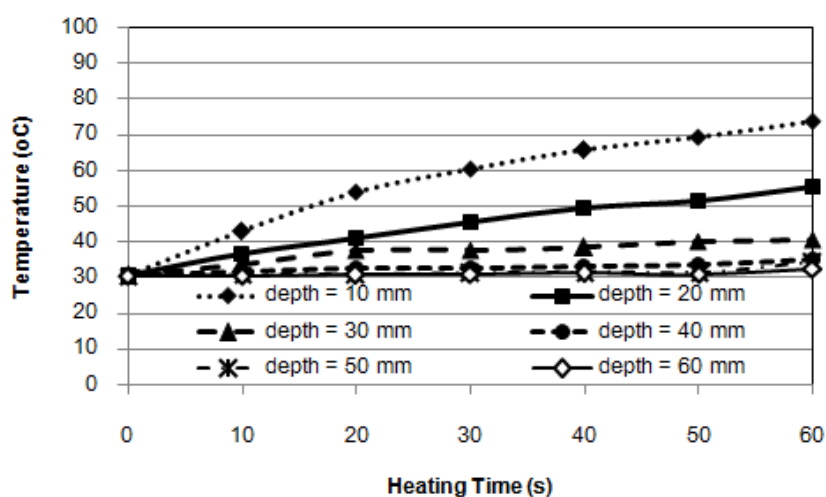
อย่างไรก็ตามในงานทดสอบครั้งนี้ ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานไมโครเวฟทำความร้อนในซีเมนต์เพสต์ที่ช่วงการก่อตัวเริ่มต้น (2 ชั่วโมง) พบว่า ในกรณี w/c 0.45 ชิ้นงานทดสอบส่วนใหญ่เกิดความเสียหายตามการกระจายตัวของอุณหภูมิ ในขณะที่กรณี w/c 0.38 ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย (ดังภาพที่ 4-18) ทั้งนี้เพราะซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำส่วนเกินในการผสมน้อย (w/c ต่ำ) จะเกิดความแข็งแรงของโครงสร้างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือไหลเข้าแบบยาก และผลที่ได้นี้บอกได้เป็นนัยว่าการใช้ไมโครเวฟทำความร้อนเร็วเกินไปก่อนที่ซีเมนต์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรงในระดับหนึ่ง แทนที่จะได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีสมบัติรับแรงที่ดีขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อาจจะทำให้วัสดุเกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้เลยก็เป็นได้



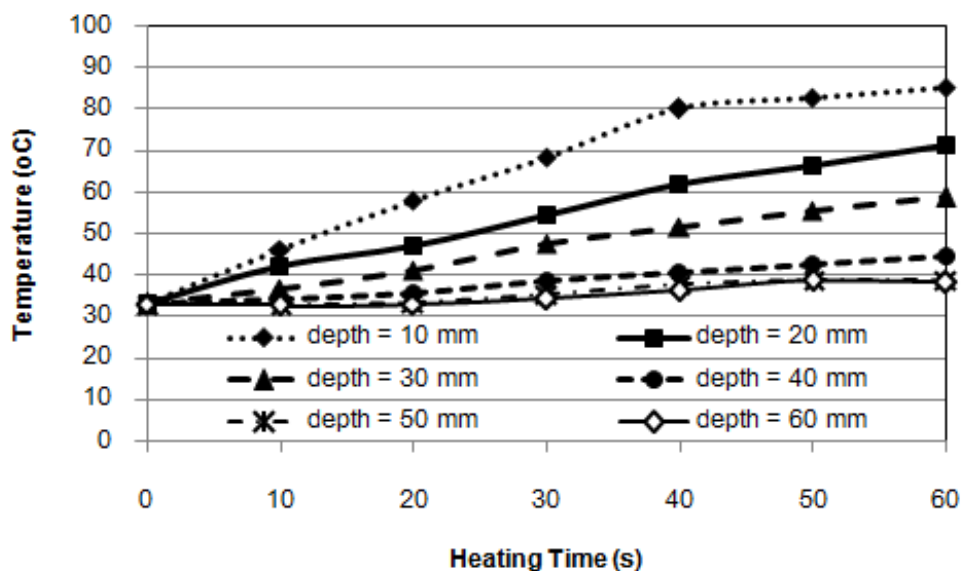
ภาพที่ 4-14 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาดหนา 80 มม. ด้วยการพาความร้อนที่ผิว ด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 80 °C ที่เวลาหลังผสม 2 ชั่วโมง



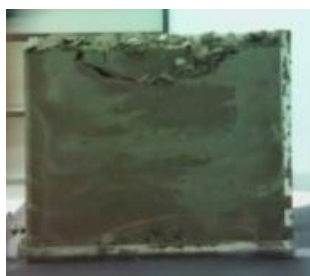
ภาพที่ 4-15 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาดหนา 80 มม. ด้วยการพาความร้อนที่ผิว ด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 80 °C ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4-16 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาดหนา 80 มม. ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์ ที่เวลาหลังผสม 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 4-17 การให้ความร้อนซีเมนต์เฟสค์ w/c 0.45 ขนาดหนา 80 มม.
ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์ ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-18 ชิ้นงานความหนา 80 มม. หลังจากผสมเป็นเวลา $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง
เมื่อนำไปผ่านกระบวนการไมโครเวฟที่ระยะเวลา 1 นาที
(ก) w/c 0.45
(ข) w/c 0.38

4.5 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาการทำความร้อนซีเมนต์เฟสค์ที่ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายด้วยพลังงานไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ แบบคลื่นระนาบภายใต้ควิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

พลังงานไมโครเวฟสามารถทำความร้อนและให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุได้ดีกว่ากรรมวิธีการพาคความร้อนที่กำลังงานป้อนเข้าใกล้เคียงทุกกรณีจากการทดลอง

สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีค่าลดลงตลอดเวลาทั้งค่าไดอิเล็กตริกอสคอนสแตนท์และค่าไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอร์ ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในซีเมนต์เฟสค์ในช่วงระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายดีกว่าช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเล็กน้อย

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ณ ช่วงเวลาก่อตัวเริ่มต้น มีค่าต่ำกว่าช่วงระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเนื่องจากสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่เปลี่ยนไป (มีปริมาณน้ำอิสระที่มีค่าความจุความร้อนสูงน้อยลง)

สัดส่วนผสมของน้ำในการผสมซีเมนต์เพสต์มีผลต่อทั้งความสามารถในการรับความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแล้วไม่เกิดความเสียหายในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น และส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ กล่าวคือซีเมนต์เพสต์ที่มีสัดส่วนผสมน้ำน้อยจะมีความแข็งแรงทางโครงสร้างที่สามารถนำมาผ่านการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเร็วกว่า และตัววัสดุมีอุณหภูมิเมื่อได้รับพลังงานไมโครเวฟที่เท่ากันสูงกว่าเช่นกัน

5. การศึกษาการกระจายตัวทางอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูน หลายชั้นในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต ในภาชนะที่ทนนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10

5.1 บทนำ

กระบวนการทำความร้อนในวัสดุพูนด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นสิ่งใกล้ตัวที่สามารถพบเห็นได้ในปัจจุบัน เช่น การทำและอุ่นอาหารในร้านอาหารหรือร้านสะดวกซื้อ แต่ความจริงแล้วนั้นการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีความพยายามในการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น การทำความร้อนในอุตสาหกรรมอาหาร การอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและยา กระบวนการทอดอาหารด้วยไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานร่วม กระบวนการฆ่าเชื้อในขยะ กระบวนการบ่มผลิตภัณฑ์ด้านซีเมนต์ รวมถึงการทำความร้อนในอุตสาหกรรมยาง เป็นต้น สำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเมื่อศึกษาไประดับหนึ่งจะพบว่ากลไกการเกิดความร้อนนั้นมีความซับซ้อนและมีลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอหากไม่ทำให้แหล่งพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟมีการกระจายตัวอย่างเหมาะสม ดังนั้น การเข้าใจถึงพฤติกรรมของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนที่มีสมบัติเป็นลักษณะไดอิเล็กตริก (สภาพเชิงขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น) จึงมีความจำเป็น

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาในเชิงทดลองและทฤษฎีในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุมากมาย เช่น Ayappa et al. [5-1] และ [5-2] ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับอิทธิพลของสมบัติไดอิเล็กตริกต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สภาวะไมโครเวฟ ซึ่งพบว่าสมบัติดังกล่าวเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปรากฏการณ์ Perre and Turner [5-3] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งวัสดุพูนเป็นไม้เนื้ออ่อนด้วยพลังงานไมโครเวฟในท่อนำคลื่นขนาดใหญ่ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติโดยใช้พื้นฐานทฤษฎีของวิเทเกอร์และสมการแมกเวลล์ Ratanadecho et al. [5-4] และ [5-5] ศึกษากระบวนการทำความร้อนวัสดุพูนด้วยไมโครเวฟโดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผลการศึกษาพบว่าขนาดโพรงมีผลต่อการกระจายตัวและการเคลื่อนตัวของมวลความชื้นซึ่งได้รับอิทธิพลจากความดันคาพิลลารี Prommas [5-6] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนหลายชั้นพบว่าขนาดโพรงที่ต่างกันส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในการกระจายตัวของความชื้นในวัสดุจากอิทธิพลของความดันคาพิลลารี ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานของ Hoogland et al. [5-7] นอกจากนั้น Klayborworn et al. [5-8] ได้ศึกษาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุพูนสองชั้นแบบอิมมิดี พบว่าชั้นของวัสดุที่มีขนาดรูพูนไม่เท่ากันส่งผลให้สมบัติทางความร้อนในวัสดุแตกต่างกันส่งผลต่อการทำความร้อน แต่ผลที่ได้ยังไม่ชัดเจนนัก ซึ่งจากข้อมูลงานวิจัยข้างต้นพบว่าการศึกษาการทำความร้อนในวัสดุพูนหลายชั้นแบบอิมมิดียังมีการศึกษาแบบไม่ครอบคลุมจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวทางอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนหลายชั้นในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในภาชนะที่ทนนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 โดยทำการวิเคราะห์การกระจายตัวทางความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนหลายชั้น ชนิดอิมมิดีและอิมมิดีด้วยน้ำที่มีขนาดชิ้นงานทดสอบเท่ากับ $5.5 \times 11 \times 11$ เซนติเมตร³ จากการปล่อยคลื่นไมโครเวฟในทิศทางที่แตกต่างกัน ได้แก่ ด้านบน ด้านล่าง และด้านข้าง เพื่อศึกษาอิทธิพลของชั้นวัสดุพูน ความอิมมิดีของ

วัสดุพูน และทิศทางการยึคลื่นไมโครเวฟมีผลต่อการกระจายตัวทางความร้อน และความชื้นในวัสดุพูนอย่างไร

5.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และระเบียบวิธีวิจัย

5.2.1 พลังงานไมโครเวฟในวัสดุไดอิเล็กตริก

การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟนั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิ และความชื้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก (อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัย [1-6]) สำหรับการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้นสามารถนำเสนอได้อีกรูปแบบหนึ่งคือความหนาแน่นของพลังงานที่ถูกดูดซับในวัสดุ ซึ่งพลังงานดังกล่าวจะถูกแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริก แต่เนื่องจากอุณหภูมิ และความชื้น มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ดังนั้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนและเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ย่อมส่งผลให้สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\epsilon_r(s, T) = (\epsilon_r'(s, T) - j\epsilon_r''(s, T)) \quad (5.1)$$

เมื่อ ค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริกตามลำดับ ในขณะที่ s แสดงถึงค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟและ T คืออุณหภูมิของวัสดุ

สำหรับค่า ϵ_r' ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ϵ_r'' ใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองให้อยู่ในรูปค่าประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$)) โดยมีสมการคือ

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r' \epsilon_0} \quad (5.2)$$

และในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก ร่วมกับค่ากำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กในการประมาณค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบปริมาตร (density of microwave power absorbed, Q (W/m³))

$$Q = \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (5.3)$$

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า

f คือ ความถี่ (เฮิร์ต (GHz))

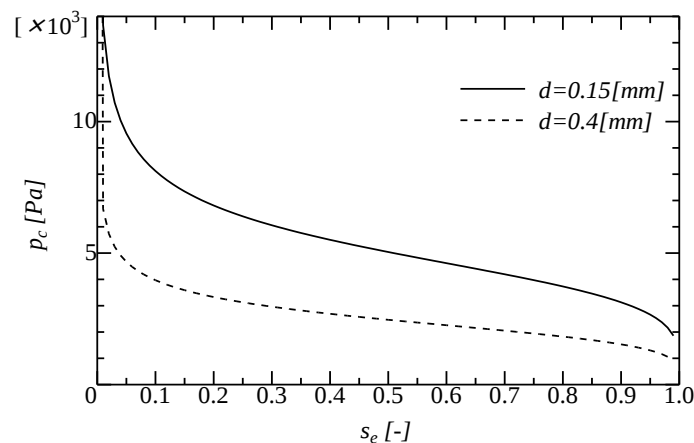
ϵ_0 คือ สมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง

$\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (ϵ_r''/ϵ_r')

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

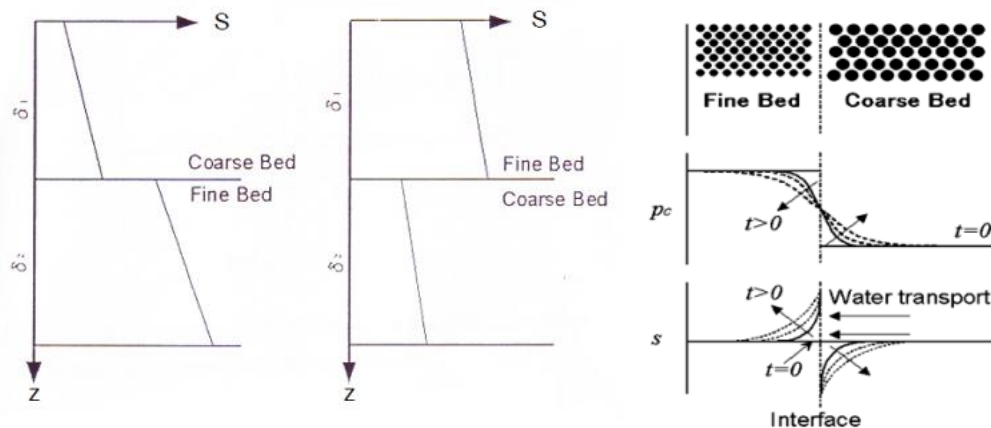
จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุส่งผลโดยตรงต่อสมบัติไดอิเล็กตริกและส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนในตำแหน่งต่างๆ ของวัสดุ

5.2.2 การกระจายตัวของความชื้นในวัสดุพูน



ภาพที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารี (p_c) และความอิ่มตัวของน้ำ (s) [5-5]

ความสามารถในการดูดซับความชื้นให้อยู่ภายในวัสดุพูนนั้นมาจากองค์ประกอบหลายๆ อย่าง แต่หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญคือความดันคาพิลลารี จากงานวิจัย [5-4] และ [5-7] พบว่าแรงดันคาพิลลารีนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดรูพูนและปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในของวัสดุพูน กล่าวคือ หากวัสดุพูนมีความชื้นน้อยลงความดันคาพิลลารีจะมีค่าสูงมากขึ้น และวัสดุพูนที่มีขนาดรูพูนเล็กกว่าจะมีความดันคาพิลลารีสูงกว่าที่ความชื้นเท่ากัน (ดังภาพที่ 1) ดังนั้นหากกำหนดให้มีวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัวที่มีขนาดรูพูนต่างกันแต่มีความชื้นเท่ากันแล้วนำมาวางซ้อนทับกันเป็นชั้นวัสดุ จะทำการปรับสมดุลของความดันคาพิลลารีให้เท่ากันที่ผิวรอยต่อของวัสดุส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากบริเวณที่มีแรงดันคาพิลลารีต่ำไปสู่บริเวณแรงดันที่มีคาพิลลารีสูง ดังแสดงในภาพที่ 5-2

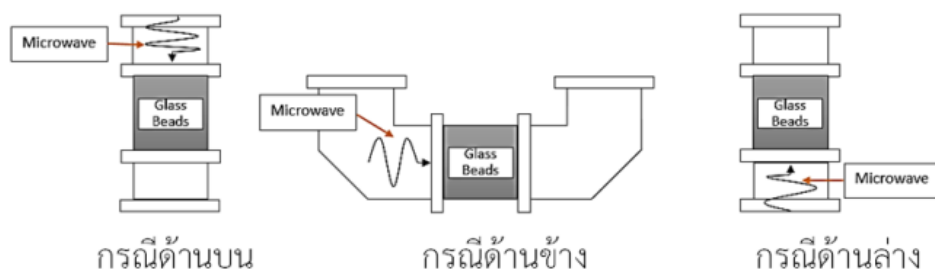
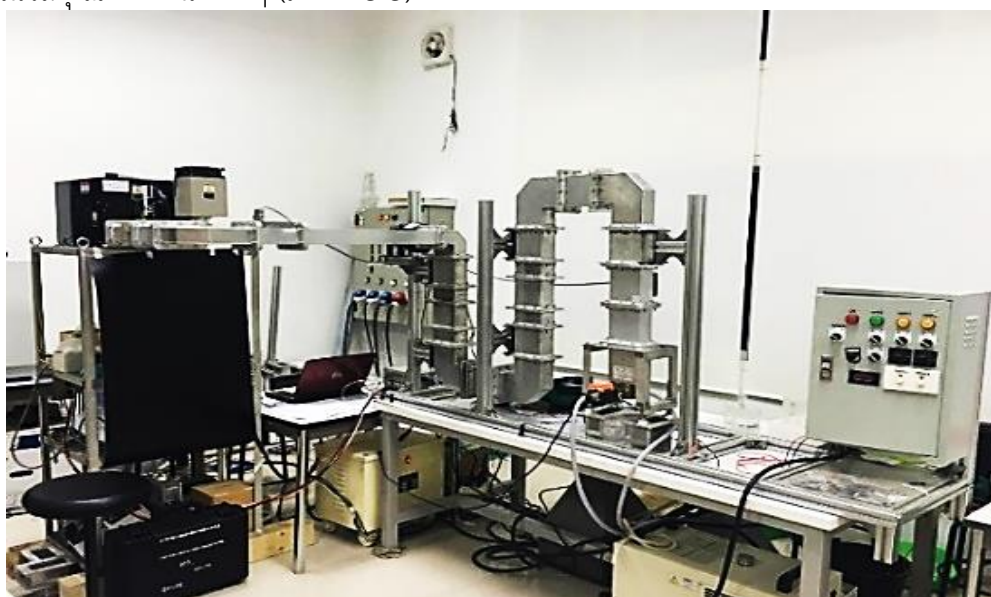


ภาพที่ 5-2 การเคลื่อนตัวของความชื้นและความดันคาพิลลารีภายในแพคเบตที่มีความละเอียดต่างกัน [5-5]

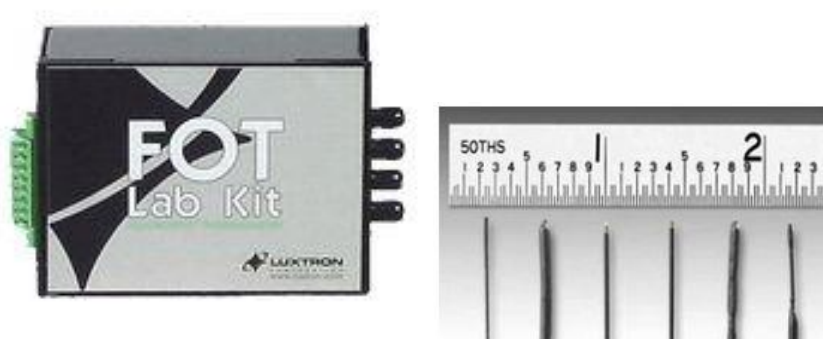
5.3 ระเบียบวิธีทดลอง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟระบบไมโครเวฟควาิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10 วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกใส่ไว้ในบริเวณตำแหน่งวางชิ้นงานภายในควาิตี้แบบสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ที่มีขนาดหน้าตัดตลอดท่อเท่ากับ 55 X 110 มิลลิเมตร² ซึ่งด้านบนของท่อนำคลื่นจะติดตั้งแมกนีตรอน (magnetron) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) กำลังปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-1500 วัตต์ (Micro Denshi Co., model UM-1500CS-A) ไว้จำนวน 1 ตัว เพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ส่วนตำแหน่งการใส่วัสดุมีให้เลือกใส่ได้ 3 ตำแหน่งขึ้นอยู่กับทิศทางที่

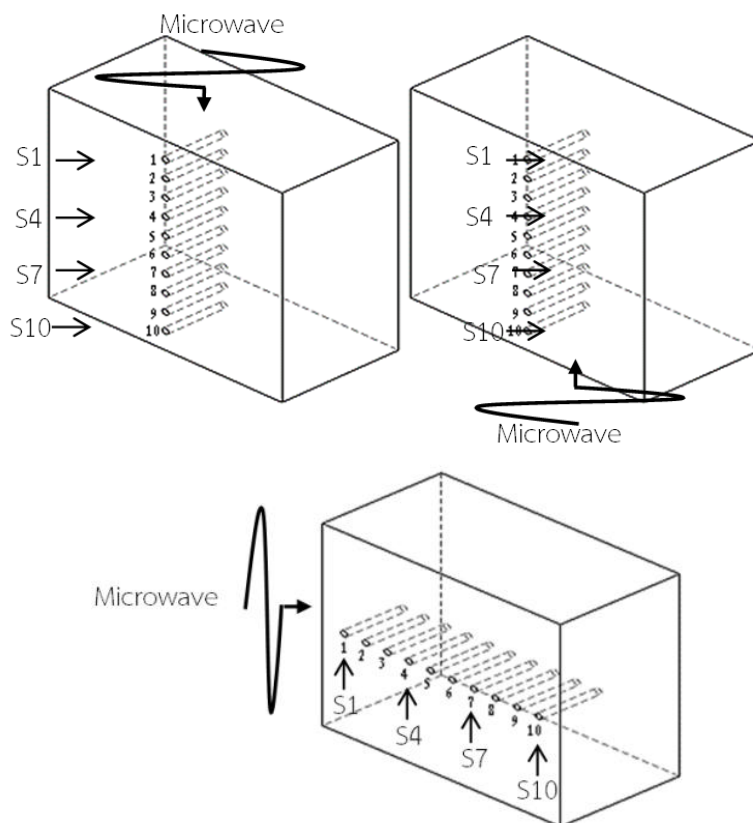
ต้องการให้วัสดุรับคลื่นไมโครเวฟ ดังภาพที่ 3 สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบขณะอยู่ภายใต้คลื่นไมโครเวฟนั้นวัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไฟเบอร์ออฟติก (LUXTRON FOT Lab kit) ซึ่งมีความแม่นยำ $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิสอบเทียบและมีความละเอียดที่ $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยรับสัญญาณผ่านสายไฟเบอร์ออฟติกและแปลงค่าเป็นอุณหภูมิ (ภาพที่ 5-4) โดยมีตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในจุดกึ่งกลางภายในวัสดุ ณ ตำแหน่งต่างๆ (ภาพที่ 5-5)



ภาพที่ 5-3 ระบบไมโครเวฟคาร์ตีที่โอนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10



ภาพที่ 5-4 อุปกรณ์สำหรับบันทึกอุณหภูมิ



ภาพที่ 5-5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ กรณียิงคลื่นไมโครเวฟในทิศทางต่างๆ

นอกจากนั้นทำการวัดลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมอุณหภูมิในวัสดุอีกครั้งด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนของ FLIR โมเดล T640 ที่มีความแม่นยำ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ หรือ $\pm 2\%$ มีความละเอียดที่ 0.035°C สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40°C ถึง 2000°C (ภาพที่ 5-6)



(ก)

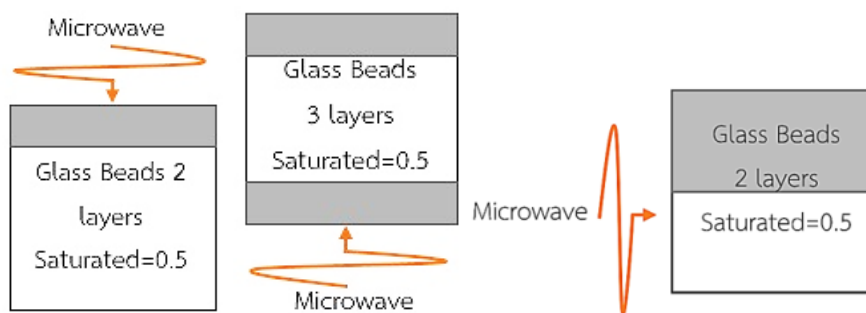
(ข)

ภาพที่ 5-6 กล้องถ่ายภาพความร้อน ของ FLIR โมเดล T640

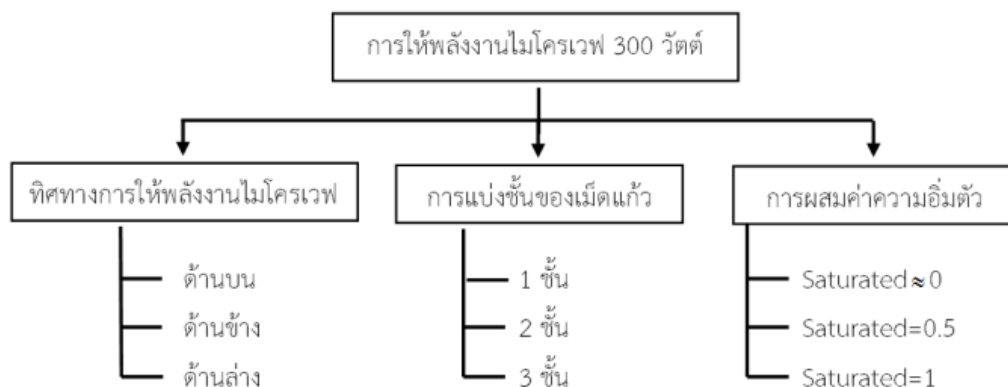
(ก) ตัวกล้องถ่ายภาพความร้อน

(ข) ภาพถ่ายและรายละเอียดที่ได้จากกล้อง

สำหรับกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษา คือ 300 วัตต์ ใช้ระยะเวลาให้พลังงาน 180 วินาที และมีอุณหภูมิชิ้นงานเริ่มต้นรวมถึงอุณหภูมิบรรยากาศที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 5-7 ตัวอย่างเงื่อนไขการทดลองกรณีวัสดุพูนหลายชั้น



ภาพที่ 5-8 เงื่อนไขการทดลอง

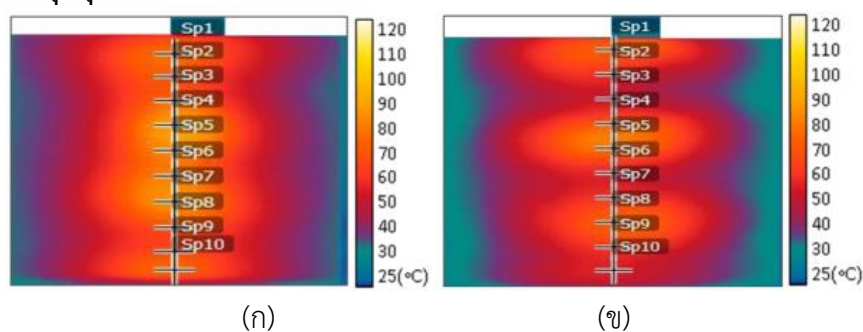
วัสดุพูนที่นำมาทดสอบใช้เป็นผงวัสดุเม็ดแก้วขนาดเล็กมาบรรจุในภาชนะจนมีลักษณะเป็นวัสดุพูนที่มีโพรงอยู่ภายใน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแก้วที่ใช้มี 2 ขนาด คือ ช่วง 0-45 ไมโครเมตร (วัสดุพูนที่มีโพรงขนาดเล็ก) และช่วง 180-300 ไมโครเมตร (วัสดุพูนที่มีโพรงขนาดใหญ่) นอกจากนั้นเมื่อทำการคำนวณค่าความพูนพบว่า วัสดุพูนโพรงขนาดเล็กมีค่าความพูน 0.35 ในขณะที่วัสดุพูนโพรงขนาดใหญ่มีค่าความพูน 0.38

ในการศึกษาความอิ่มตัวของน้ำในวัสดุจะศึกษาที่สัดส่วนความอิ่มตัวเท่ากับ 1 (ในโพรงมีน้ำอยู่ 100 เปอร์เซ็นต์) 0.5 (ในโพรงมีน้ำอยู่ 50 เปอร์เซ็นต์) และ 0 (ในโพรงไม่มีน้ำอยู่) ส่วนในการศึกษากรณีวัสดุพูนหลายชั้นของวัสดุจะมีการจัดเรียงชั้นหยาบและละเอียดหลายเงื่อนไข โดยมีเงื่อนไขตัวอย่างดังภาพที่ 7 และมีการจัดกลุ่มเงื่อนไขการทดลองดังภาพที่ 8

5.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

ในการศึกษามีผลการทดลองหลายส่วนหลายประเด็น เพื่อให้เนื้อหาบทความมีความกระชับ จึงเลือกข้อมูลเพียงบางส่วนที่สำคัญโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.1 กรณีวัสดุพูนไม่มีความชื้นภายใน ($s=0$)



ภาพที่ 5-9 การกระจายตัวของอุณหภูมิกรณี $s=0$

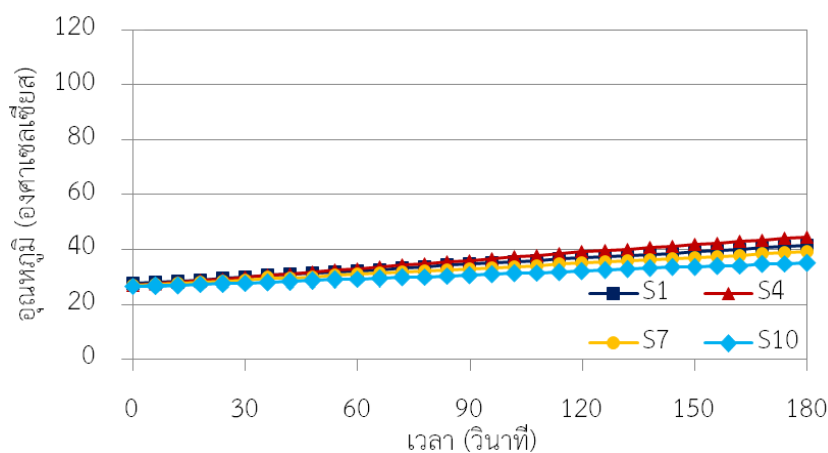
(ก) วัสดุพูนชั้นเดียวยังคลื่นไม่โครเวฟด้านบน

(ข) วัสดุพูนสองชั้นยังคลื่นไม่โครเวฟทางด้านบน

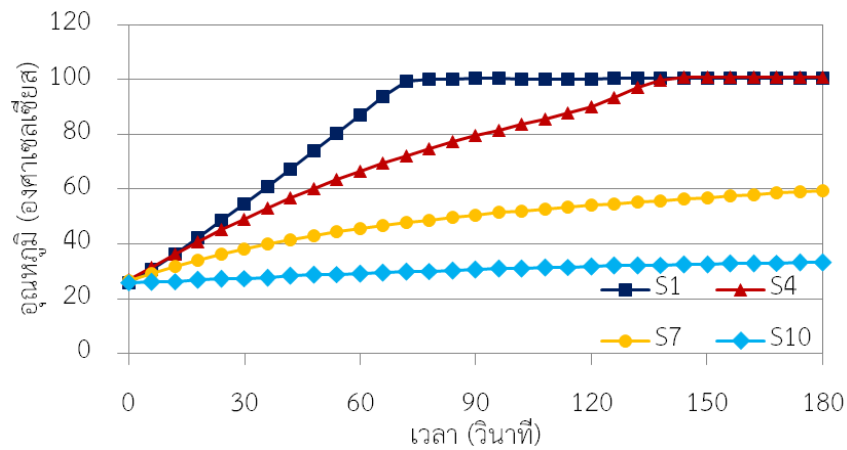
จากกรณีศึกษาดังกล่าว ไม่ว่าใช้วัสดุพูนที่มีโพรงขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ หรือมีทิศทางการปล่อยคลื่นไม่โครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าไม่เกิดความแตกต่างของผลการกระจายอุณหภูมิในวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อวัสดุไม่มีความชื้นสภาพเชิงขั้วในวัสดุจึงมีค่าน้อยส่งผลให้พลังงานคลื่นไม่โครเวฟส่วนใหญ่สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัสดุไปได้โดยไม่ถูกดูดซับพลังงานไว้ ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาพที่ 5-10

5.4.2 กรณีวัสดุพูนมีความชื้นต่างกัน ($s=0, 0.5, 1$)

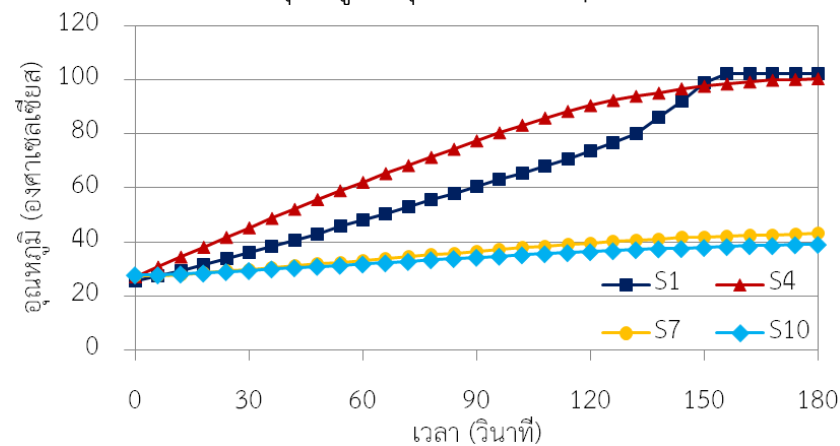
จากการศึกษากรณีดังกล่าวพบว่าความชื้นหรือความอิ่มตัวของน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุรวมถึงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในวัสดุ ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุกทิศทางการยิงคลื่นไม่โครเวฟกล่าวคือ กรณีไม่มีความชื้น ($s=0$) วัสดุมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทั่วถึงตลอดชิ้นงาน แต่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมีน้อยมาก แต่เมื่อความชื้นมากขึ้นการกระจายตัวของอุณหภูมิแย่งที่ระดับความลึกมากขึ้นแต่ในวัสดุมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นหรือน้ำเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับคลื่นไม่โครเวฟและเปลี่ยนพลังงานคลื่นเป็นพลังงานความร้อนได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการเกิดความร้อนในวัสดุมีค่ามากขึ้น แต่ในทางกลับกันความสามารถทะลุทะลวงของคลื่นจึงลดลงจากการสูญเสียพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 5-10 ถึง 5-13



ภาพที่ 5-10 อุณหภูมิวัสดุที่มีความลึกต่างๆ กรณี $s=0$



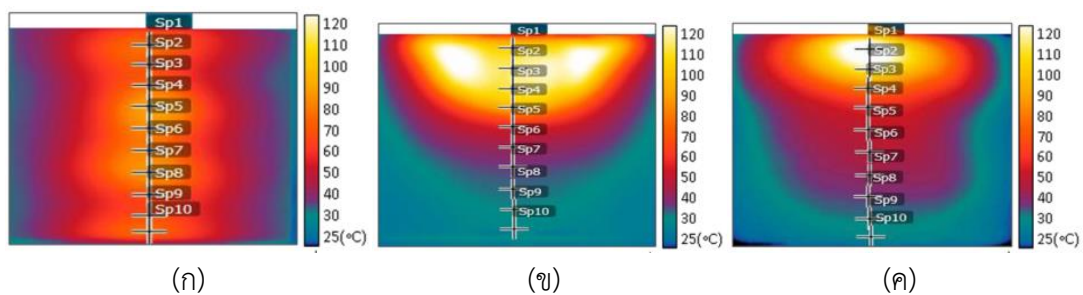
ภาพที่ 5-11 อุณหภูมิวัสดุที่มีความลึกต่างๆ กรณี $s=0.5$



ภาพที่ 5-12 อุณหภูมิวัสดุที่มีความลึกต่างๆ กรณี $s=1$

5.4.3 กรณีวัสดุพรมอิมตัวด้วยความชื้นภายใน ($s=1$)

ในกรณีวัสดุพรมชั้นเดียว วัสดุพรมที่มีขนาดโพรงใหญ่กว่ามีการกระจายอุณหภูมิที่ดีกว่าในทุกกรณีของทิศทางการปล่อยคลื่น เนื่องจากโพรงขนาดใหญ่ส่งผลให้เกิดกลไกการพาความร้อนด้วยธรรมชาติได้ง่ายกว่ากรณีโพรงขนาดเล็กที่ถูกยึดไว้ด้วยความดันคาพิลลารี ดังแสดงในภาพที่ 5-14

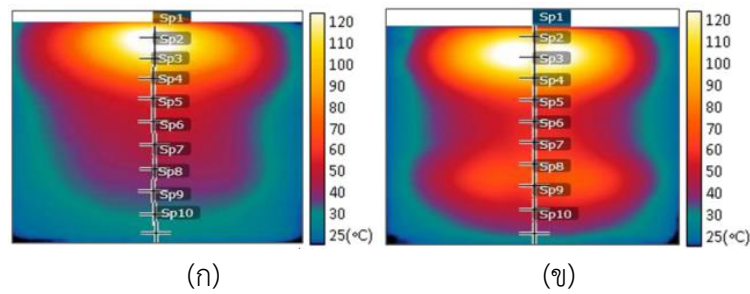


ภาพที่ 5-13 อุณหภูมิวัสดุพรมชั้นเดียวกรณียิงคลื่นไมโครเวฟด้านบนที่เวลา 180 วินาที

(ก) $s=0$

(ข) $s=0.5$

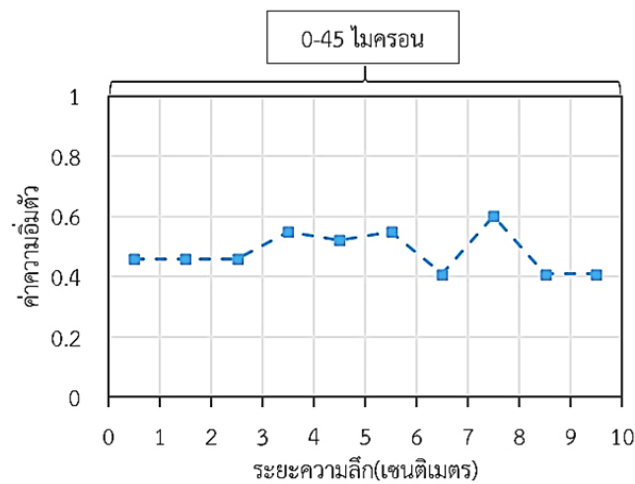
(ค) $s=1$



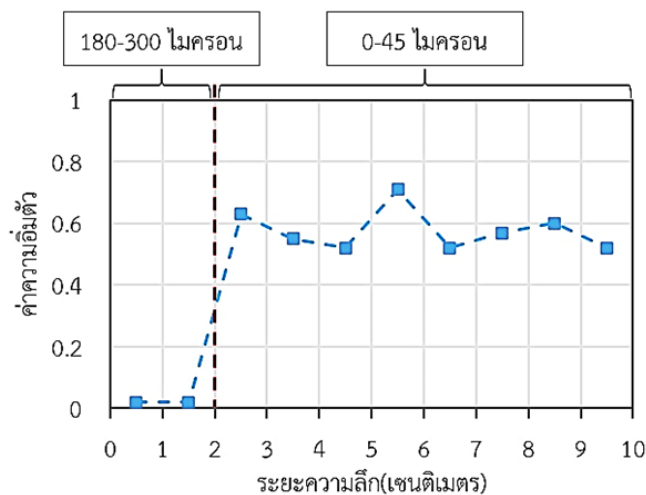
ภาพที่ 5-14 อุณหภูมิวัสดุพูนชั้นเดียวกรณียิงคลื่นไมโครเวฟด้านบนที่เวลา 180 วินาที
(ก) รูพูนขนาดเล็ก (ข) รูพูนขนาดใหญ่

5.4.4 ความชื้นภายในวัสดุพูนหลายชั้น ($s=0.5$)

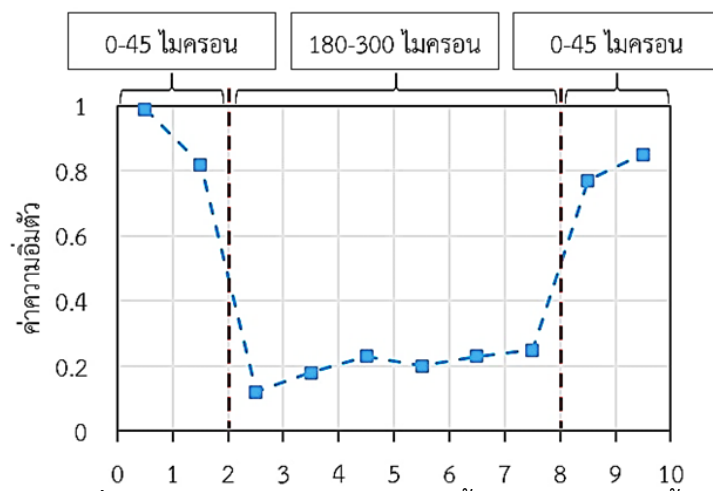
กรณีวัสดุอิ่มตัวด้วยน้ำ ($s=1$) ไม่ว่าจะเป็นวัสดุพูนชั้นเดียวหรือหลายชั้น จะมีพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิรวมถึงความชื้นแตกต่างกันไม่มากนัก แต่หากเป็นกรณีวัสดุพูนแบบไม่อิ่มตัวจากการทดลองกรณี $s=0.5$ พบว่าในกรณีวัสดุพูนชั้นเดียวมีการกระจายตัวของความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอตั้งตัวอย่างในภาพที่ 15 แต่ในกรณีที่วัสดุพูนหลายชั้นพบว่าความชื้นถูกดูดเข้าไปสะสมในชั้นที่มีขนาดโพรงละเอียดหรือมีความดันคาพิลลารีสูงกว่าในทุกกรณีดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 5-16 และ 5-17



ภาพที่ 5-15 การกระจายตัวของความชื้นในวัสดุพูนชั้นเดียว



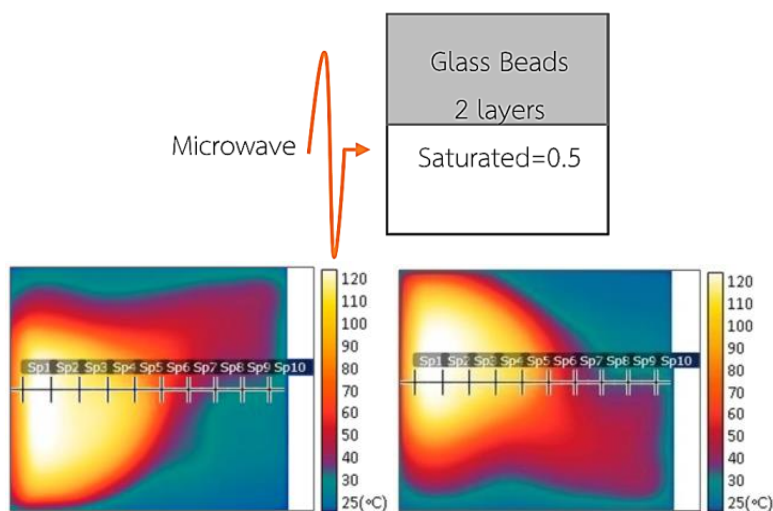
ภาพที่ 5-16 การกระจายตัวของความชื้นในวัสดุพูนสองชั้น (โพรงหยาบหนา 2 ซม. อยู่ด้านบน)



ภาพที่ 5-17 การกระจายตัวของความชื้นในวัสดุพูนสามชั้น

(โพรงละเอียดหนา 2 ซม. อยู่ด้านบนและล่าง)

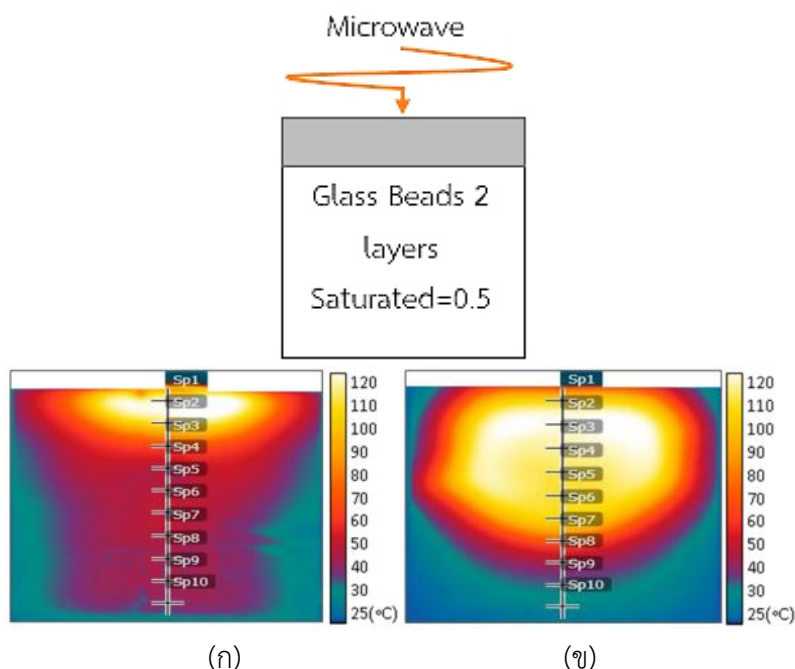
จากลักษณะการกระจายตัวของความชื้นในลักษณะข้างต้นส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุพูนที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ กล่าวคือบริเวณที่มีความชื้นสูงจะดูดซับคลื่นได้ดีในขณะที่บริเวณที่มีความชื้นต่ำจะส่งผ่านคลื่นได้ดียกตัวอย่างได้ในกรณีไมโครเวฟยิงคลื่นด้านข้างเข้าไปในวัสดุพูนสองชั้น ดังภาพที่ 18 ที่อุณหภูมิจะเกิดขึ้นในโซนที่มีวัสดุพูนโพรงขนาดเล็กอยู่



ภาพที่ 5-18 อุณหภูมิวัสดุพูนสองชั้นกรณียิงคลื่นไมโครเวฟด้านข้างที่เวลา 180 วินาที (หนาชั้นละ 5 ซม.)

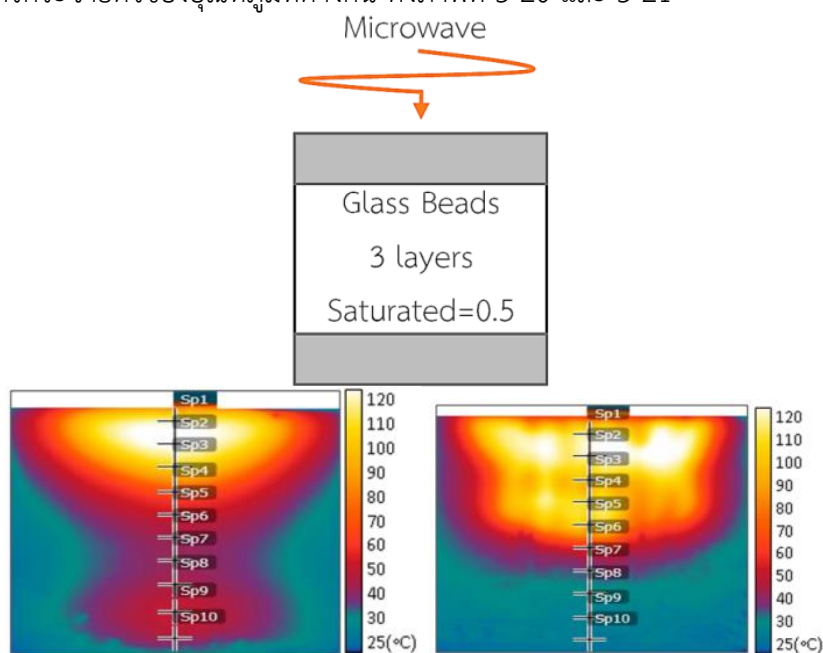
(ก) รูพูนขนาดเล็กอยู่บน (ข) รูพูนขนาดใหญ่อยู่บน

นอกจากนั้นหากต้องการให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในวัสดุพูนหลายชั้นควรให้วัสดุพูนโพรงขนาดเล็กอยู่ด้านในและให้วัสดุพูนโพรงขนาดใหญ่อยู่ที่ผิวหน้า ดังแสดงในภาพที่ 5-19

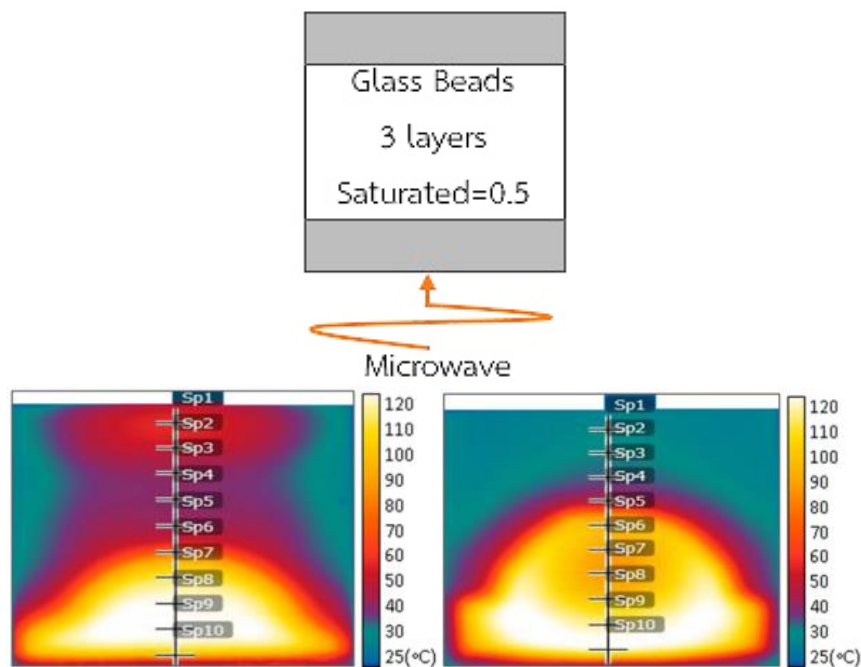


ภาพที่ 5-19 อุณหภูมิวัสดุพูนสองชั้น (ชั้นบนหนา 2 ซม.)
กรณียิงคลื่นไมโครเวฟด้านบนที่เวลา 180 วินาที
(ก) รูพูนขนาดเล็กอยู่บน (ข) รูพูนขนาดใหญ่อยู่บน

กรณีมีชั้นรูพูนหยาบและละเอียดปนกันหลายชั้นพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิแ่ลงเมื่อเทียบกับสองชั้นแต่ให้ผลในลักษณะเดียวกัน ส่วนทิศทางการยิงคลื่นไมโครเวฟกรณีด้านบนกับด้านล่างให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ต่างกัน ดังภาพที่ 5-20 และ 5-21



ภาพที่ 20 อุณหภูมิวัสดุพูนสามชั้นกรณียิงคลื่นไมโครเวฟด้านบนที่เวลา 180 วินาที
(ชั้นบนและล่างหนา 2 ซม.)
(ก) รูพูนขนาดใหญ่อยู่ตรงกลาง (ข) รูพูนขนาดเล็กอยู่ตรงกลาง



ภาพที่ 5-21 อุณหภูมิวัสดุพูนสามชั้นกรณียิงคลื่นไมโครเวฟด้านล่างที่เวลา 180 วินาที (ชั้นบนและล่างขนาดด้านละ 2 ซม.)

(ก) รูปพูนขนาดใหญ่อยู่ตรงกลาง (ข) รูปพูนขนาดเล็กอยู่ตรงกลาง

5.5 สรุปผลการศึกษา

ในวัสดุพูนชั้นเดียวนั้นมีการกระจายตัวของความชื้นสม่ำเสมอและให้ผลการกระจายตัวตามลักษณะปริมาณความชื้นภายในที่วัสดุมี แต่ในกรณีวัสดุพูนหลายชั้นนั้นจะมีลักษณะการกระจายตัวของความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอในกรณีมีความชื้นแบบไม่อิมตัว ส่งผลให้บริเวณที่มีความชื้นสูงมีการดูดซับความร้อนเยอะส่งผลให้เกิดการกระจายอุณหภูมิ ณ บริเวณดังกล่าว นอกจากนั้นการมีชั้นรูปพูนหยาบอยู่ผิวหน้าวัสดุพูนละเอียดจะส่งผลช่วยให้การกระจายตัวทางความร้อนในวัสดุดี ในทางตรงข้ามหากมีชั้นรูปพูนละเอียดอยู่ที่ผิวหน้าจะส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุพูนนั้นแย่งอย่างเห็นได้ชัด

6 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพุนไดอิเล็กตริกหลายชั้นภายใต้ พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE₁₀ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

6.1. บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นพลังงานทางเลือกที่ประสบความสำเร็จในการใช้งานมากมาย เนื่องจากปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุจากพลังงานไมโครเวฟมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนทั่วไป ดังนั้นจึงมีการศึกษาโดยนักวิจัยมากมายหลายท่าน ([6-1] ถึง [6-7]).

แม้ว่างานวิจัยจำนวนมากจะศึกษาการใช้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ แต่การตรวจสอบส่วนใหญ่จะพิจารณาจากการใช้งานทดลอง เนื่องจากง่ายต่อการนำไปใช้เพื่อค้นหาผลลัพธ์ในการใช้งานของตน ในทางกลับกันการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเป็นเรื่องยากที่จะเข้าใจและค้นหาผลลัพธ์ที่แม่นยำ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลขได้รับการพัฒนาโดยนักวิจัยบางท่านโดยอาศัยกฎของ Lambert ควบคู่กับแบบจำลองการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในปัญหา 1 มิติ และพัฒนาไปถึงการใช้สมการของแมกซ์เวลล์ร่วมกับแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน 2 มิติ ตามลำดับ สำหรับปัญหาลำดับงานหรือวัตถุขนาดเล็กการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะอาศัยพื้นฐานของสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มาจากสมการของแมกซ์เวลล์ ตัวอย่างสมการของแมกซ์เวลล์ซึ่งใช้ในการศึกษากระบวนการให้ความร้อนจำนวนมากของวัสดุในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีตัวอย่างดังบทความวิจัย [6-8] และ [6-9] ในทางปฏิบัติการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟส่วนใหญ่จะใช้กับวัสดุพุนไดอิเล็กตริกที่มีหลายชั้น เช่น แชนวิช ขนมหิงขี้ คอนกรีต และไม้ เป็นต้น แต่ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเชิงตัวเลขจะใช้วัสดุไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันในการศึกษาเป็นส่วนใหญ่ เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา

ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้งานจะศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยแบบจำลองสองมิติในปัญหาการถ่ายเทความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านควมไปไมโครเวฟ (โหมด: TE₁₀ ที่ความถี่ 2.45 GHz) ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชั้นโดยใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม การศึกษาเชิงตัวเลขนี้ใช้เพื่อตรวจสอบปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชั้นซึ่งอยู่ในแนวคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อประเมินความแปรผันของอุณหภูมิและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่น่าเสนอนี้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก

6.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และระเบียบวิธีวิจัย

6.2.1 สมบัติไดอิเล็กตริก

ปัญหาการทำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสมบัติไดอิเล็กตริก (ϵ) ของวัสดุพุนที่นำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนซึ่งสมบัตินี้เป็นปัจจัยที่สำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในการทำนายปรากฏการณ์ทางทฤษฎี ([6-10])

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon_r' + j\epsilon_r'') \quad (6.1)$$

โดย ϵ_r' คือจำนวนจริงของค่าความสามารถทะลุผ่านของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ ϵ_r'' จำนวนจินตภาพของค่าความสามารถทะลุผ่านสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์และ ϵ_0 คือค่าความสามารถทะลุผ่านสนามไฟฟ้าในช่องว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m

เมื่อ $\tan \delta$ คือค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ซึ่งใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นจากการดูดซับของวัสดุไปสู่พลังงานรูปแบบอื่น เช่น ความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ([6-11])

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (6.2)$$

6.2.2 สมการแมกซ์เวลล์

ในกรณีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ายานไมโครเวฟโหมด TE₁₀ สมการแมกซ์เวลล์สามารถเขียนได้ในเทอมองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดังนี้ ([6-12])

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (6.4)$$

$$-\left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z}\right) = \sigma E_y + \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (6.5)$$

โดยค่าการทะลุผ่านของไดอิเล็กตริก (ϵ), ค่าซึมผ่านทางแม่เหล็ก (μ) และค่าการนำไฟฟ้า (σ) มีรายละเอียดคือ ([6-12])

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad \mu = \mu_0 \mu_r, \quad \sigma = 2\pi f \epsilon \tan \delta \quad (6.6)$$

เมื่อ f คือความถี่ไมโครเวฟ $\tan \delta$ คือค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ ϵ_r และ μ_r คือค่าการทะลุผ่านทางไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าการซึมผ่านทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ตามลำดับ

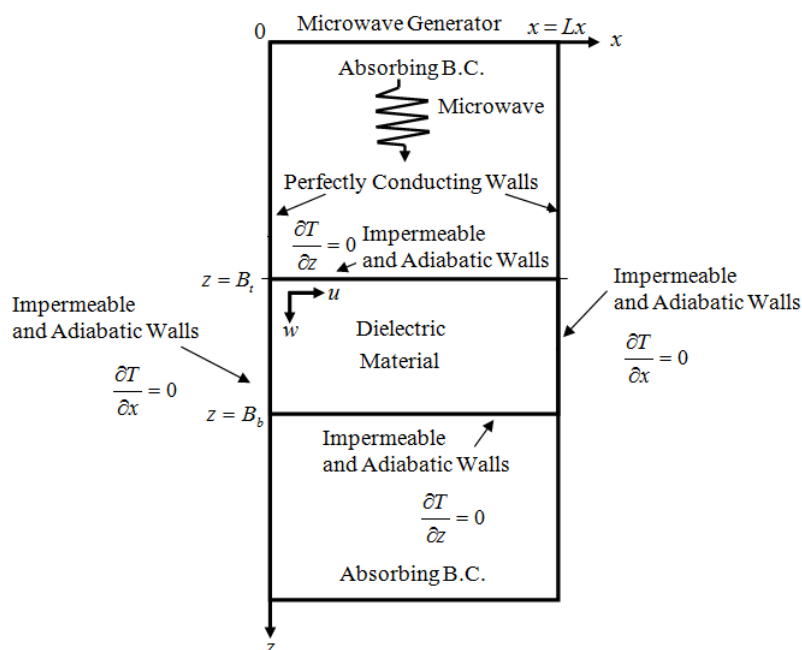
6.2.3 สมการการถ่ายเทความร้อน

ภาพจากแบบจำลองโดเมนทางกายภาพของปัญหาที่แสดงในภาพที่ 6-1 สมการการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัวในสภาพการนำความร้อนสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (6.7) ([6-12]) เพื่อให้สามารถเห็นอิทธิพลของวัสดุพูนไดอิเล็กตริกหลายชั้นได้อย่างชัดเจน ในปัญหานี้เงื่อนไขขอบเขตที่ผิววัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกกำหนดให้เป็นฉนวนทางความร้อนซึ่งฟลักซ์ความร้อนไม่มีการเคลื่อนที่ผ่านหรือมีค่าเป็นศูนย์ และคลื่นไมโครเวฟที่ใช้วิเคราะห์มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นมาจากทิศทางด้านบนของปัญหา

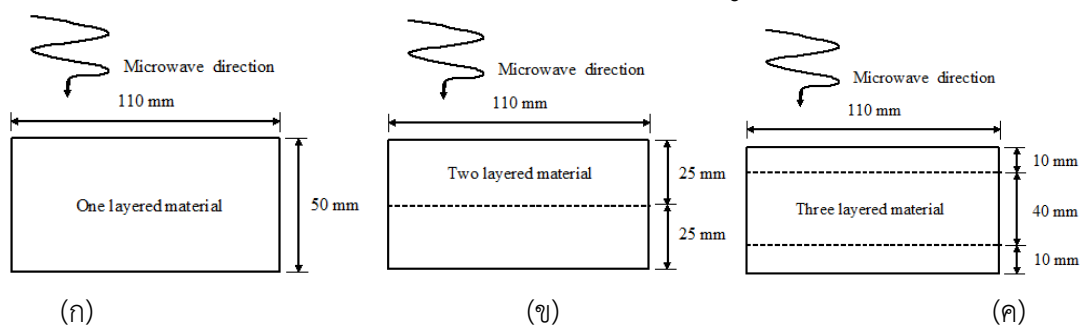
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] + k \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q \quad (6.7)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ C_p คือค่าความจุความร้อนและ k คือค่าการนำความร้อน และสำหรับค่าการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรที่เกิดจากการดูดซับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไมโครเวฟ Q สามารถเขียนได้ดังนี้ ([6-12])

$$Q = \omega \epsilon_r'' E^2 = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' (\tan \delta) E_y^2. \quad (6.8)$$



ภาพที่ 6-1 โดเมนทางกายภาพของปัญหา



ภาพที่ 6-2 ขนาดวัตถุที่ใช้ในการศึกษา

- (ก) วัสดุพูนไดอิเล็กตริกชั้นเดียว
- (ข) วัสดุพูนไดอิเล็กตริกสองชั้น
- (ค) วัสดุพูนไดอิเล็กตริกสามชั้น

6.2.4 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะปัญหาตามภาพที่ 6-1 และ 6-2 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหาทางความร้อนสามารถแสดงได้ดังนี้

ผิวหน้าที่ไม่สามารถผ่านทะลุได้

เงื่อนไขผิวหน้าที่ไม่สามารถผ่านทะลุได้ทางความร้อนนั้นจะถูกตั้งสมมติฐานให้ค่าผลต่างของอุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งหมายความว่าฟลักซ์ความร้อนไม่เกิดการแลกเปลี่ยนที่ผิวหน้านั้น

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6.9)$$

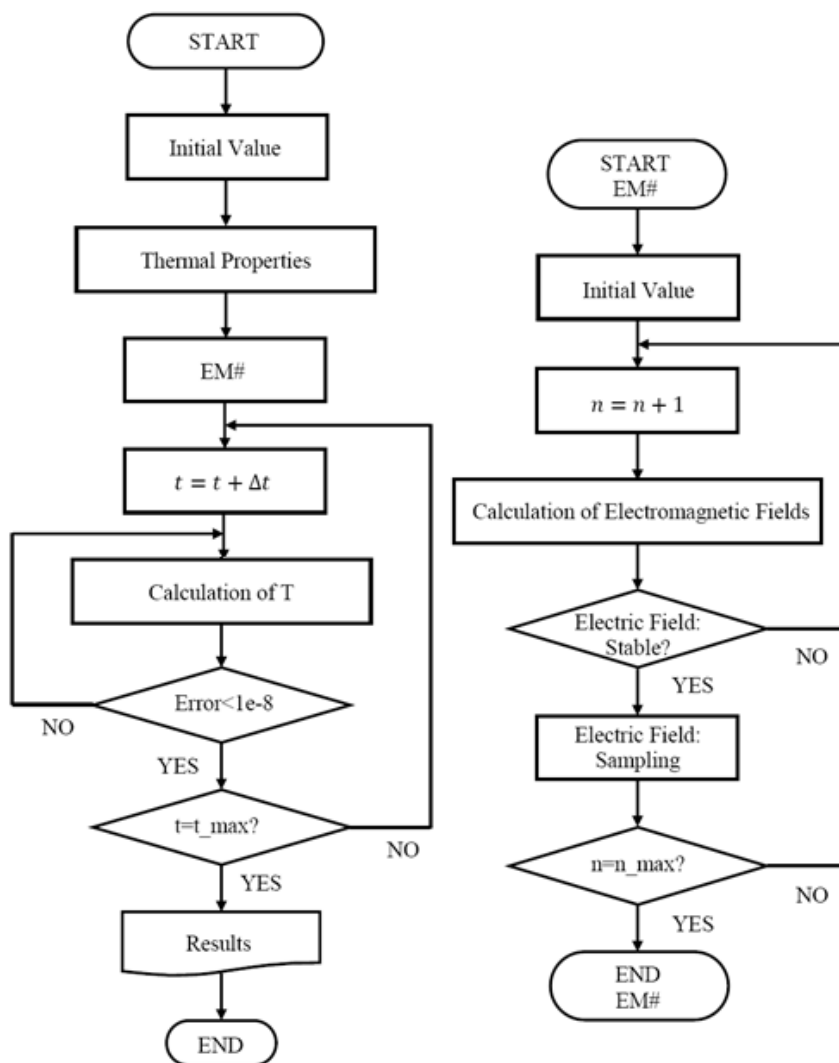
ผิวหน้ารอยต่อที่ชั้นแพคเบตของวัสดุพูนหลายชั้น

อุณหภูมิและผลต่างอุณหภูมิจะถูกตั้งสมมติฐานให้มีความต่อเนื่องกันที่รอยต่อผิวหน้าระหว่างชั้นแพคเบต

$$T_{\text{LAYER A}} = T_{\text{LAYER B}}, \quad -k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{LAYER A}} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{LAYER B}} \quad (6.10)$$

6.2.5 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การวิเคราะห์ปัญหาสมการการถ่ายเทความร้อนจะถูกใช้ควบคู่กับสมการแมกซ์เวลล์เพื่อที่จะหาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในวัตถุ ดังนั้นในการที่จะคำนวณสมการแมกซ์เวลล์เพื่อใช้ทำนายลักษณะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องโดเมนเวลาในการวิเคราะห์ และในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนเพื่อทำนายการกระจายตัวทางความร้อนหรืออุณหภูมิในวัตถุจะใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง สำหรับขั้นตอนกลไกการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณด้วยคอมพิวเตอร์สามารถเขียนรายละเอียดได้ดังภาพที่ 6-3



ภาพที่ 6-3 ขั้นตอนการคำนวณของปัญหา

6.2.5 รายละเอียดสมบัติของวัสดุ

โดเมนของการจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กทริกภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ไมโครเวฟนี้จะใช้ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ที่มีโหมดของคลื่นเป็นโหมด TE₁₀ เนื่องจากโหมดดังกล่าวสามารถลดความซับซ้อนของการแก้ปัญหาสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการตัดตัวแปรไม่ทราบค่าบางตัวออกไปได้จากเงื่อนไขขอบเขตทางไฟฟ้า โดยท่อนำคลื่นที่ทำให้เกิดสภาพดังกล่าวหากใช้ขนาดท่อตามมาตรฐานจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดคือ 110x55 mm² ดังนั้นวัตถุในแบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์ในปัญหานี้จะมีขนาดความยาวตามแนวแกน x ที่ 110 mm

ตามภาพที่ 6-2 ในขณะที่ความหนาของวัตถุตามแนวแกน z มีค่าเท่ากับ 50 mm เนื่องจากที่ความหนาดังกล่าวสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุยังคงมีพฤติกรรมที่มีลักษณะเป็นคลื่นอย่างชัดเจน

ในการที่จะศึกษาผลกระทบจากวัสดุพูนหลายชั้นซึ่งมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ดังนั้นค่าสมบัติทางความร้อนของวัตถุจะถูกกำหนดให้วัสดุพูนไดอิเล็กตริกทุกชั้นมีค่าเดียวกัน แต่จะมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกในแต่ละชั้นที่แตกต่างกัน โดยค่าหนึ่งจะใช้เป็นสมบัติไดอิเล็กตริกที่เกิดการสูญเสียมาก (High lossy) และอีกค่าหนึ่งจะใช้เป็นสมบัติไดอิเล็กตริกที่เกิดการสูญเสียน้อย (Low lossy) โดยค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเหล่านี้แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ

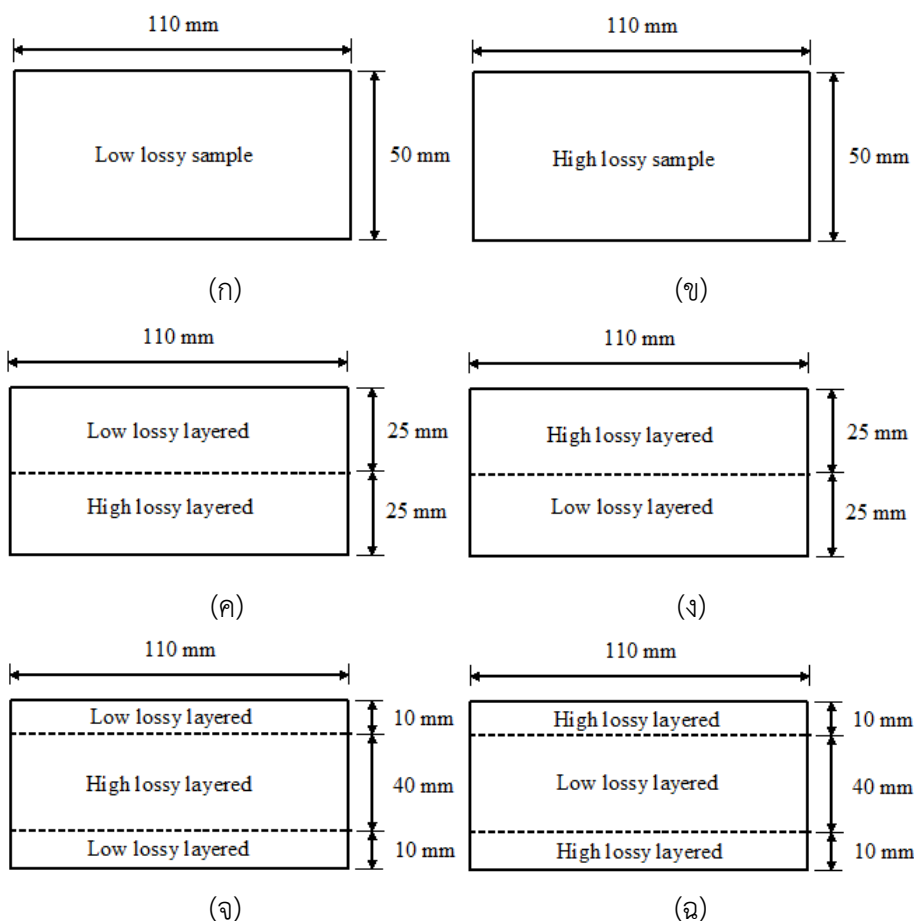
Dielectric material	Real part of relative permittivity ϵ_r' (-)	Loss tangent coefficient $\tan \delta$ (-)	Magnetic permeability (μ)	Electric conductivity (σ)
High lossy	75	0.125	1	0
Low lossy	5.1	0.01	1	0

ค่าอื่นๆ ทั้งสมบัติทางความร้อนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารวมถึงเงื่อนไขเริ่มต้นของปัญหาแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สมบัติทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อนและเงื่อนไขเริ่มต้นของปัญหา

$\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$	$\mu_0 = 4.0\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$
$\epsilon_{ra} = 1.0, \mu_{ra} = 1.0$	$\tan \delta_a = 0.00$
$\rho_p = 2,500 \text{ [kg / m}^3\text{]}$	$k_p = 1.0 \text{ [W / (m} \cdot \text{K)]}$
$C_{pp} = 0.80 \text{ [kJ / (kg} \cdot \text{K)]}$	$T_{int} = 25^\circ\text{C}$
$Power = 350 \text{ [Watt]}$	$t_0 = 0 \text{ sec}$
$f = 2.45 \text{ [GHz]}$	$t_{end} = 60 \text{ sec}$

ในการจำลองจะวิเคราะห์ในรูปแบบปัญหาสถานะไม่คงตัวซึ่งเริ่มต้นปัญหาที่เวลา 0 จนกระทั่งเสร็จสิ้นที่ 60 วินาที โดยมีรายละเอียดของลักษณะชิ้นงานในปัญหาที่ใช้วิเคราะห์รูปแบบต่างๆ ดังภาพที่ 6-4



ภาพที่ 6-4 เจื่อนไขในการศึกษาวัสดุพูนหลายชั้นแบบต่างๆ

(ก) Single layered, low lossy sample

(ข) Single layered, high lossy sample

(ค) Double layered, low lossy layered at top

(ง) Double layered, low lossy layered at bottom

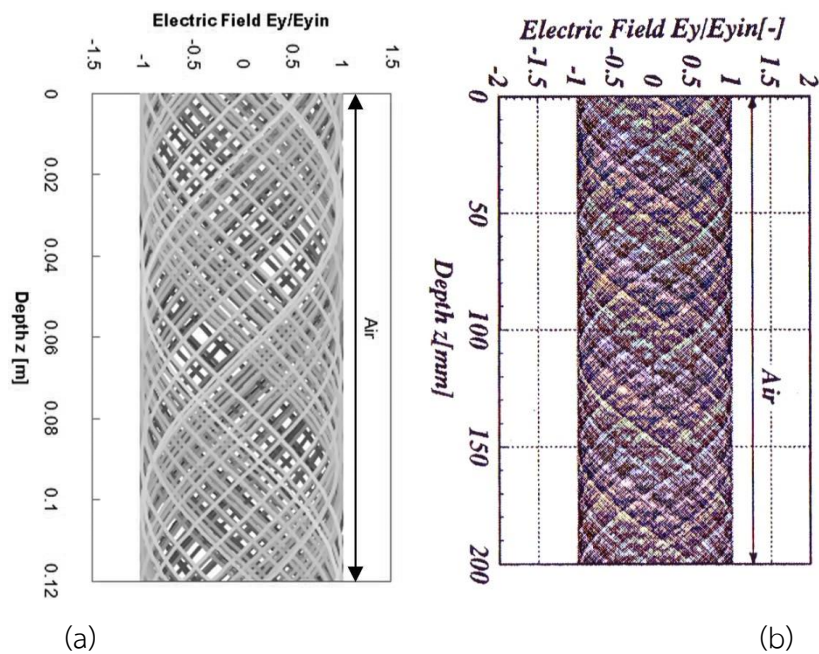
(จ) Triple layered, high lossy layered at middle

(ฉ) Triple layered, low lossy layered at middle

6.3 ผลและการวิเคราะห์

6.3.1 การจำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นและวัตถุ

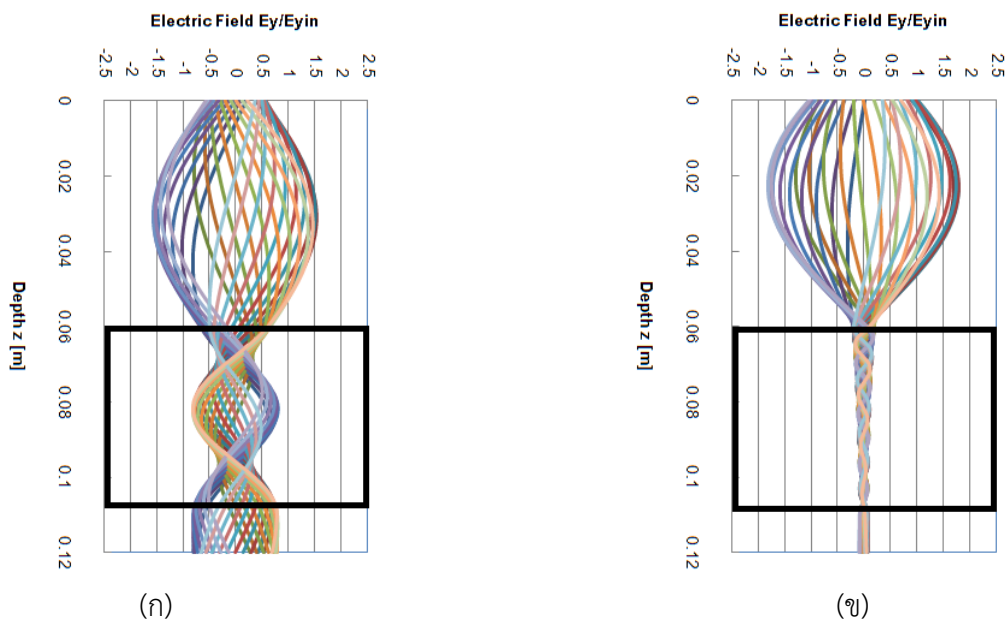
ก่อนที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา แบบจำลองได้ถูกนำไปสอบเทียบกับการวิจัยของ Rattanadecho และคณะ [6-14] โดยภาพที่ 6-5(ก) แสดงคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นเปล่าซึ่งสังเกตได้ว่าพฤติกรรมคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นคลื่นที่มีขนาดที่สม่ำเสมอตลอดความยาวท่อนำคลื่นและมีสอดคล้องกันเมื่อสอบเทียบกับการงานของ Rattanadecho และคณะ [6-14] (ภาพที่ 6-5(ข))



ภาพที่ 6-5 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในกรณีท่อนำคลื่นเปล่า
ที่เวลา 60 s ($x = 55$ mm.)

(ก) ผลจากแบบจำลอง

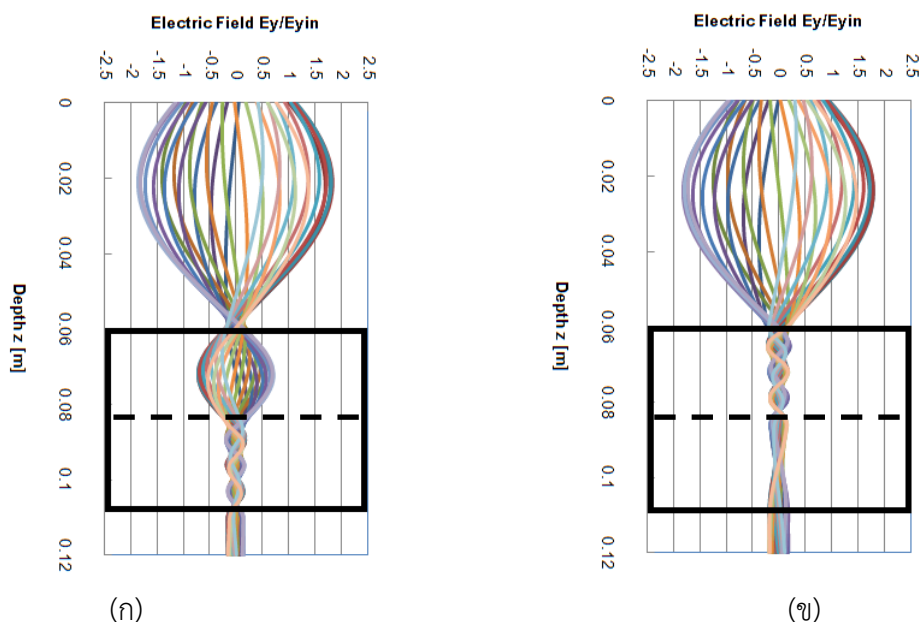
(b) ผลจากการศึกษาของ Rattandecho และคณะ [6-14]



ภาพที่ 6-6 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกชั้นเดียวที่เวลา
60 s ($x = 55$ mm.)

(ก) ชั้นงานวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบ Low lossy

(ข) ชั้นงานวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบ High lossy

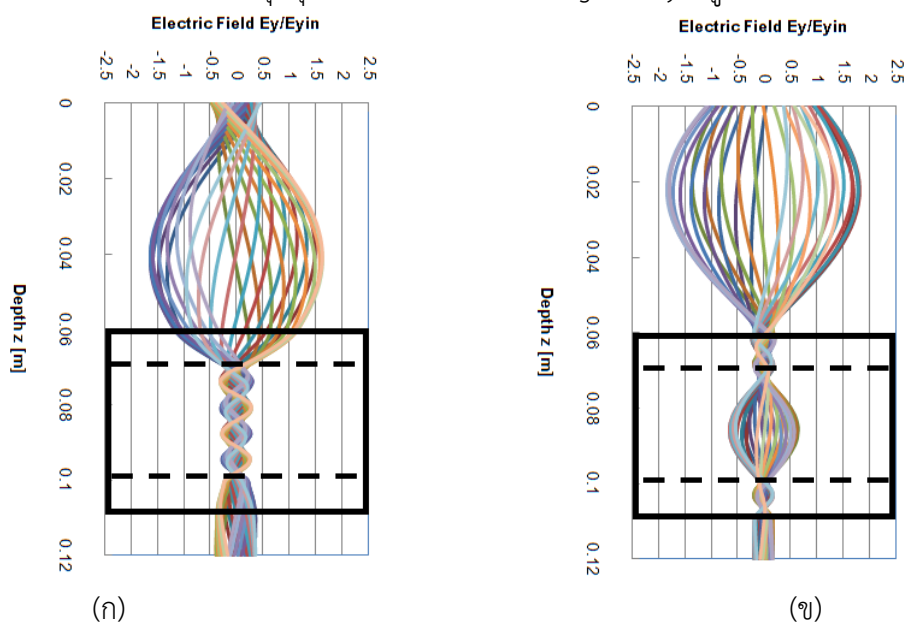


ภาพที่ 6-7 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนสองชั้น

ที่เวลาการทำความร้อนที่ 60 s ($x = 55$ mm.)

(ก) ชั้นงานวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบชั้น Low lossy อยู่ด้านบน

(ข) ชั้นงานวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบชั้น High lossy อยู่ด้านบน



ภาพที่ 6-8 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนสามชั้น

ที่เวลาการทำความร้อนที่ 60 s ($x = 55$ mm.)

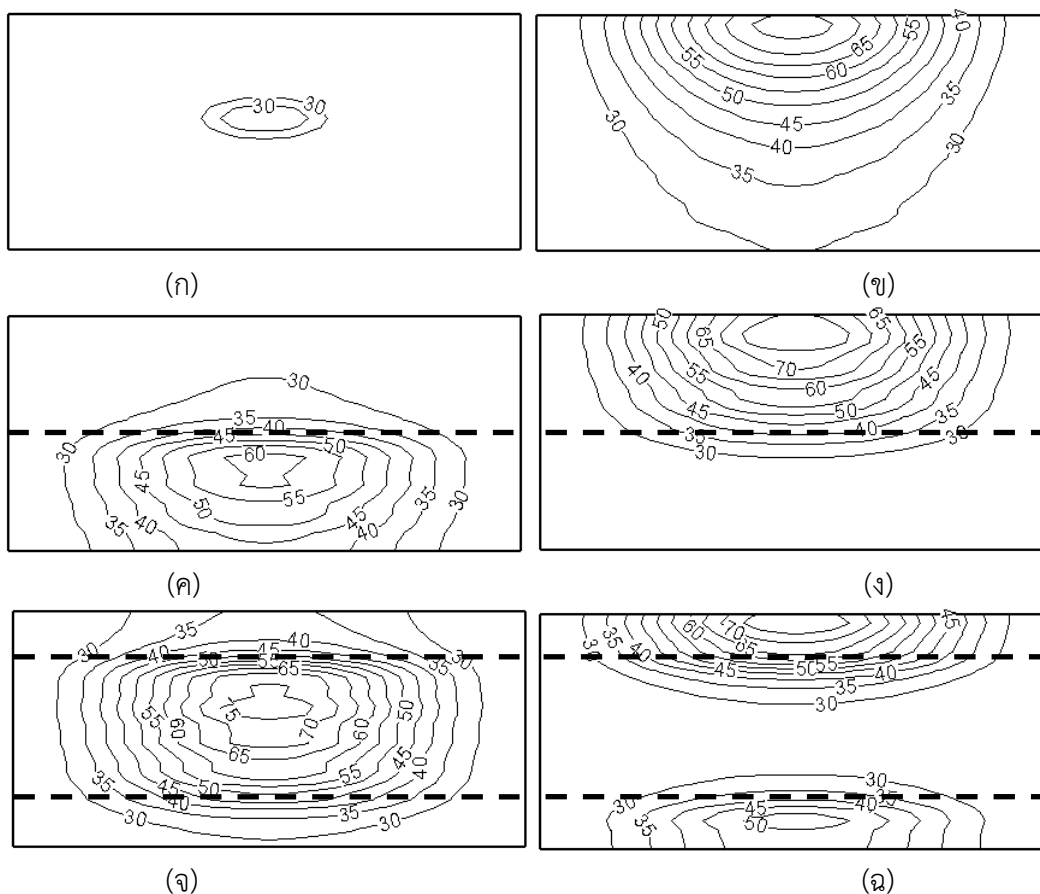
(ก) ชั้นงานวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบชั้น Low lossy อยู่ด้านบนและด้านล่าง

(ข) ชั้นงานวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบชั้น High lossy อยู่ด้านบนและด้านล่าง

6.3.1.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนชั้นเดียว

ภาพที่ 6-6(ก) และ 6-6(ข) แสดงการกระจายตัวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกชั้นเดียว ในกรณีของวัสดุแบบสูญเสียมากสนามไฟฟ้าจะลดทอนลงเนื่องจากการดูดซับพลังงานและหลังจากนั้นพลังงานที่ดูดซับจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุ ซึ่งจะทำให้

อุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าภายในวัสดุเกือบจะหมดพลังงานลงเนื่องจากวัสดุมีสมบัติการสูญเสียสูงมาก จากผลดังกล่าวพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่พื้นผิวเกือบด้านบน ดังนั้นพฤติกรรมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงไม่เป็นคลื่นภายในตัววัสดุอย่างชัดเจน และปรากฏลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในรูปแบบการสลายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลเหมือนกับลึกลับกับกรณีวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง ในทางตรงกันข้ามวัสดุที่สูญเสียต่ำสนามไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านวัสดุส่งผลให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่ผิวรอยต่อด้านล่างส่งผลให้มีคลื่นนิ่งสูงภายในวัสดุเหมือนกับภายนอกตัวอย่าง พลังงานบางส่วนลดทอนเนื่องจากการดูดซึมพลังงานและถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อนภายในตัวอย่างซึ่งจะเพิ่มอุณหภูมิ แต่มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีการสูญเสียสูงเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟไม่ได้ถูกดูดซับโดยวัสดุที่มีการสูญเสียต่ำซึ่งมีสมบัติสภาพเชิงขั้วน้อย ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่จึงสามารถผ่านได้อย่างอิสระในวัสดุและในพื้นที่ว่าง อย่างไรก็ตามขนาดสูงสุดของแอมพลิจูดของคลื่นภายในวัสดุอยู่ที่จุดกึ่งกลางของตัววัสดุซึ่งนำไปสู่อุณหภูมิจุดร้อนที่บริเวณกึ่งกลางของวัสดุ



ภาพที่ 6-9 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในวัสดุที่เวลาทำความร้อนที่ 60 s.

(ก) Single layered, low lossy sample

(ข) Single layered, high lossy sample

(ค) Double layered, low lossy layered at top

(ง) Double layered, low lossy layered at bottom

(จ) Triple layered, high lossy layered at middle

(ฉ) Triple layered, low lossy layered at middle

6.3.1.2 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนหลายชั้น

ภาพที่ 6-7 และ 6-8 แสดงการกระจายตัวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกหลายชั้นในกรณีสองชั้น สนามไฟฟ้าส่วนมากจะถูกดูดซับในชั้นที่มีค่าการสูญเสียมาก ซึ่งส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ผ่านเป็นส่วนใหญ่ในชั้นที่มีค่าการสูญเสียน้อย ด้วยเหตุนี้ขนาดของคลื่นนิ่งที่มีค่าขนาดใหญ่จะปรากฏได้ในชั้นวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียน้อยที่ชั้นด้านบนดังในกรณีเงื่อนไขปัญหาในภาพที่ 6-7(ก) แต่ในทางตรงข้ามคลื่นนิ่งขนาดใหญ่จะไม่ปรากฏในกรณีที่วัสดุพูนที่มีค่าการสูญเสียน้อยอยู่ด้านล่างเนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ถูกดูดซับจากชั้นที่มีการสูญเสียมากที่บริเวณด้านบนดังแสดงในภาพที่ 6-7(ข)

ในกรณีศึกษาวัสดุพูนไดอิเล็กตริกสามชั้นนั้น ผลการศึกษาค่อนข้างน่าสนใจกล่าวคือ คลื่นนิ่งของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุมีความแข็งแรงสม่ำเสมอ ผลลัพธ์นี้นำไปสู่การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุอย่างสม่ำเสมอโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ชั้นสูญเสียสูงอยู่ตรงกลางของตัวอย่างวัสดุ

การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและความยาวคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลให้เกิดพฤติกรรมทางความร้อนในวัสดุซึ่งอธิบายไว้ในสมการที่ (6.8) สมการนี้ใช้เพื่อเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และสำหรับการกระจายความร้อนการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขซึ่งแยกออกจากสมการที่ (6.7) จะใช้เพื่อจำลองผลลัพธ์ของการกระจายอุณหภูมิ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ทางอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ดังหัวข้อถัดไปนี้

6.3.2 การกระจายทางความร้อนและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพูน

ภาพที่ 9-9(ก)ถึง 9-9(ฉ) แสดงการกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุเมื่อสิ้นสุดเวลาทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (60 วินาที) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลของสมบัติไดอิเล็กตริกและชั้นตัวอย่างมีนัยสำคัญต่อการกระจายความร้อน ในกรณีของวัสดุพูนไดอิเล็กตริกชั้นเดียวลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีพฤติกรรมเหมือนกันเมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิมีค่าสูงสุดเกือบพื้นผิวด้านบนในวัสดุที่มีการสูญเสียสูงและมีค่าสูงสุดเกือบกึ่งกลางของวัสดุในวัสดุที่สูญเสียต่ำ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสองกรณีนั้นสูงมาก นั่นเป็นเพราะวัสดุที่มีการสูญเสียสูงมีการดูดซับพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนได้ดี แต่วัสดุที่สูญเสียต่ำนั้นไม่ดี นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุที่มีการสูญเสียสูงจะแสดงอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่มีการกระจายของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีค่าการสูญเสียน้อย

ในกรณีของวัสดุพูนไดอิเล็กตริกสองชั้น การวางวัสดุพูนชั้นที่มีการสูญเสียน้อยไว้ด้านบนของตัวอย่างจะทำให้การกระจายอุณหภูมิดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชั้นเดียวที่มีการสูญเสียสูง และในกรณีวางวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียน้อยไว้ที่ด้านล่างของตัววัสดุ จะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพูนไดอิเล็กตริกชั้นเดียวที่มีค่าการสูญเสียสูง ทั้งนี้เป็นเพราะอิทธิพลการสะท้อนอย่างรุนแรงจากการสะท้อนคลื่นที่พื้นผิววัสดุไดอิเล็กตริกในแต่ละชั้น ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแนะนำให้อายุวัสดุที่มีค่าการสูญเสียน้อยขึ้นที่วัสดุเพื่อช่วยปรับปรุงกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟให้เหมาะสมในแต่ละสถานะได้

ในกรณีของวัสดุพูนสามชั้น กรณีที่วางวัสดุที่มีค่าการสูญเสียน้อยที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างจะทำให้อุณหภูมิในวัสดุสูงขึ้นและมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ดีที่สุด ดังนั้นนี่จึงเป็นแนวทางที่ดีมากในการปรับปรุงความร้อนของไมโครเวฟในทางปฏิบัติ ในทางตรงกันข้ามหากวางชั้นวัสดุพูนที่มีค่าการสูญเสียน้อยไว้ตรงกลางวัสดุจะส่งผลให้มีบริเวณบางส่วนที่มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมี

การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่ดี คือบริเวณที่เกือบถึงพื้นผิวด้านบนของวัสดุ ณ ชั้นที่มีค่าการสูญเสียสูงเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุด ในขณะที่ชั้นที่มีค่าการสูญเสียสูงในชั้นพื้นผิวด้านล่างมีอุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน

6.4 สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่นำเสนอนี้อธิบายถึงปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญมากมายภายในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูงและการสูญเสียต่ำในกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในกรณีของวัสดุพอร์ซเลนไดอิเล็กตริกหลายชั้นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม โดยมีข้อสรุปของการศึกษาดังนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนสามารถใช้เพื่ออธิบายผลกระทบของสมบัติไดอิเล็กตริกต่อสถานะความร้อนของไมโครเวฟได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนสามารถใช้เพื่ออธิบายผลของวัสดุพอร์ซเลนไดอิเล็กตริกหลายชั้นต่อสถานะความร้อนของไมโครเวฟได้

สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีความสำคัญต่อการอธิบายรูปแบบการถ่ายเทความร้อนจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

วัสดุที่มีค่าการสูญเสียต่ำสามารถนำมาวางซ้อนทับเพื่อช่วยปรับปรุงการกระจายอุณหภูมิและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อวางบนพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุที่มีค่าการสูญเสียสูง

วัสดุที่มีค่าการสูญเสียต่ำไม่สามารถช่วยปรับปรุงการกระจายอุณหภูมิและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อวางไว้บริเวณชั้นกึ่งกลางของวัสดุที่มีการสูญเสียสูง

7 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของอิทธิพลของการพาความร้อนที่พื้นผิว ร่วมกับการทำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ ในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำและสูญเสียสูง

7.1 บทนำ

ในทศวรรษที่ผ่านมา มีตัวอย่างการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ประสบความสำเร็จมากมายที่ปรากฏในบทความวิจัย ([7-1] ถึง [7-7]) ในการให้ความร้อนแบบกระบวนการพาความร้อน พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายโอนจากพื้นที่ผิวของวัสดุโดยการพาความร้อนเท่านั้นและหลังจากนั้นจะถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุภายในโดยการนำความร้อน ในกระบวนการนี้การไล่ระดับอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวและวัสดุภายในจะช่วยเพิ่มพลั๊กซ์ความร้อนภายในวัสดุ หากวัสดุในการบวนการดังกล่าวมีค่าการนำความร้อนต่ำและมีความหนาสูงวิธีทำความร้อนด้วยกระบวนการพาความร้อนนี้จะเสียเปรียบเนื่องจากใช้เวลาในการทำความร้อนมากเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้วิธีนี้ยังมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำและใช้เวลาในการทำความร้อนนานซึ่งมักส่งผลให้วัสดุเสียหายในทางปฏิบัติ

ในการให้ความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟสามารถมีปฏิกิริยากับวัสดุผ่านกระบวนการโพลาไรซ์หรือการเหนี่ยวนำทางประจุ ซึ่งโพลาไรซ์เกี่ยวข้องกับการการจัดของประจุในระยะสั้นผ่านการก่อตัวและการหมุนของสภาพเชิงขั้วทางไฟฟ้าในตัววัสดุไดอิเล็กตริก ในขณะที่การเหนี่ยวนำทางประจุเป็นการเคลื่อนย้ายประจุในระยะไกล กระบวนการทั้งสองก่อให้เกิดการสูญเสียของพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแน่นอนในช่วงความถี่ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ϵ'' เกิดจากการนำไอออนิกซึ่งมีความโดดเด่นที่ความถี่ต่ำและการหมุนไดโพลแบบถาวรที่ความถี่สูงกว่า ดังนั้นพลังงานความร้อนของวัสดุในกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงถูกสร้างขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของประจุในระยะสั้นผ่านการก่อตัวและการหมุนของไดโพลไฟฟ้า วัสดุที่มีไดโพลไฟฟ้าและสามารถโต้ตอบกับพลังงานไมโครเวฟเรียกว่าวัสดุไดอิเล็กตริก สำหรับข้อดีของการทำความร้อนไมโครเวฟสามารถสรุปได้ดังย่อหน้าต่อไปนี้

การแทรกซึมของพลังงาน: การทะลุทะลวงพลังงานไมโครเวฟสามารถสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในเช่นเดียวกับที่พื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กตริก พลังงานไมโครเวฟช่วยลดเวลาในการทำความร้อนและการไล่ระดับอุณหภูมิ

การดูดซับพลังงานที่เลือก: วัสดุบางอย่างดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ง่ายในขณะที่วัสดุอื่นๆ ไม่ดูดซับ ดังนั้นไมโครเวฟจึงสามารถพาสเจอร์ไรส์ภายในบรรจุภัณฑ์ได้โดยไม่ต้องเผาวัสดุบรรจุภัณฑ์

ประสิทธิภาพสูง: กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟต้องการพลังงานที่ต่ำกว่าวิธีการปกติเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันหรือดีกว่าซึ่งมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง 60% ถึง 70% เมื่อเทียบกับ 10% ถึง 30% สำหรับวิธีการทำความร้อนทั่วไป)

ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในส่วนของทศวรรษที่ผ่านมา สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในวัสดุขนาดเล็กสามารถอธิบายได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ สำหรับการศึกษาวิจัยกระบวนการให้ความร้อนของวัสดุจากไมโครเวฟจำนวนมากได้รับการศึกษาโดยการแก้สมการแมกซ์เวลล์สองมิติ [7-8] และ [7-9] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบของการพาความร้อนที่พื้นผิวในวัสดุไดอิเล็กตริก

เนื่องจากข้อได้เปรียบของการสร้างความร้อนเชิงปริมาตรจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟและข้อได้เปรียบของการถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิวจากการให้ความร้อนแบบพาความร้อนงานวิจัยใน

ส่วนนี้จึงดำเนินการตรวจสอบกระบวนการให้ความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนที่พื้นผิวซึ่งผลของสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดการถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรภายในวัสดุ ผลลัพธ์ที่น่าเสนอนี้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก

7.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

7.2.1 สมบัติไดอิเล็กตริก

ปัญหาของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับสมบัติไดอิเล็กตริกภายในวัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่จำเป็นสำหรับการทำนายการดูดซับพลังงานทางทฤษฎี สำหรับวัสดุที่ปรากฏในธรรมชาติหลาย ๆ ประเภทนั้นมักจะมีโครงสร้างเป็นวัสดุพูนที่มีโพรงประกอบไปด้วยน้ำ ซึ่งน้ำเป็นหนึ่งในตัวอย่างของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีไดโพลไฟฟ้าในโครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นวัสดุที่มีน้ำอยู่ภายใน เช่นตัวกลางที่มีรูพูนก็เป็นวัสดุไดอิเล็กตริกเช่นกัน

ในการศึกษาวัสดุไดอิเล็กตริกประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและรูพูนซึ่งมีน้ำและก๊าซอยู่ภายใน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (ϵ_r) ได้มาจากฟังก์ชันของความอึดตัวของน้ำ (s) และอุณหภูมิสำหรับสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้รูปแบบฟังก์ชันจากการรวมกันของความอึดตัวของน้ำและอุณหภูมิที่อยู่ในรูปเศษส่วนเชิงปริมาตรของความอึดตัวของน้ำ ไอออนและอนุภาคของแข็งในวัสดุ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [6-10]

$$\epsilon_r'(s,T) = \phi_s \epsilon_{r_s}' + \phi(1-s) \epsilon_{rg}' + (1-\phi) \epsilon_{rp}' \quad (7.1)$$

$$\epsilon_r''(s,T) = \phi_s \epsilon_{r_s}'' + \phi(1-s) \epsilon_{rg}'' + (1-\phi) \epsilon_{rp}'' \quad (7.2)$$

เมื่อ ϵ_r' คือจำนวนจริงของค่าการทะลุผ่านทางสนามไฟฟ้าสัมพันธ์ ϵ_r'' จำนวนจินตภาพของค่าการทะลุผ่านทางสนามไฟฟ้าสัมพันธ์ ϕ คือค่าความพูนของวัสดุ และตัวห้อย i, g และ p แทนสถานะของของเหลว ก๊าซและของแข็งตามลำดับ นอกจากนั้นค่าการทะลุผ่านทางไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ค่าลอสมแทนเจนท์ของน้ำที่ความถี่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.45 GHz สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้ [6-10]

$$\epsilon_{r_s}'(T) = \left(\frac{88.15 - 0.414T + (0.131 \times 10^{-2})T^2 - (0.046 \times 10^{-4})T^3}{(0.131 \times 10^{-2})T^2 - (0.046 \times 10^{-4})T^3} \right) \quad (7.3)$$

$$\tan \delta_f(T) = \left(\frac{0.323 - (9.499 \times 10^{-3})T}{(1.27 \times 10^{-4})T^2 - (6.13 \times 10^{-7})T^3} \right) \quad (7.4)$$

เมื่อค่า $\tan \delta$ คือค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ [7-11]

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''(s,T)}{\epsilon_r'(s,T)} \quad (7.5)$$

7.2.2 สมการแมกซ์เวลล์

สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมด TE_{10} สมมติฐานของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสามารถกำหนดได้เป็น $E_x = E_z = H_y = 0$ และ $E_y, H_x, H_z \neq 0$ ดังนั้นสมการแมกซ์เวลล์สำหรับวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหมด TE_{10} สามารถเขียนได้เป็น [7-12]

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (7.6)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (7.7)$$

$$-\left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z}\right) = \sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (7.8)$$

เมื่อค่าการทะลุทะลวงทางสนามไฟฟ้า ε ค่าการซึมผ่านทางสนามแม่เหล็ก μ และค่าการนำไฟฟ้า σ สามารถเขียนได้โดย: [7-12]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \mu = \mu_0 \mu_r, \sigma = 2\pi f \varepsilon \tan \delta \quad (7.9)$$

เมื่อ f คือความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ $\tan \delta$ คือสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ ε_r และ μ_r คือค่าการทะลุทะลวงสัมพัทธ์และค่าการซึมผ่านทางสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ตามลำดับ

7.2.3 สมการการถ่ายเทความร้อน

จากภาพเงื่อนไขทางกายภาพของปัญหาที่แสดงในภาพที่ 7-1 ถึง 7-4 สมการที่ (7.10) คือสมการหลักสำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัวในปัญหาสองมิติ ซึ่งรวมพจน์ของการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรจากพลังงานไมโครเวฟ สำหรับพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างของชิ้นงานถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตการพาความร้อนหรือฉนวนทางความร้อน คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของปัญหาจะเครื่องที่เป็นคลื่นระนาบวิ่งเข้าสู่วัสดุที่ผิวด้านบน ผังด้านข้างของวัสดุเป็นฉนวนซึ่งมีฟลักซ์ความร้อนเป็นศูนย์ [7-12]

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho c_p)_T \tau] = \quad (7.10)$$

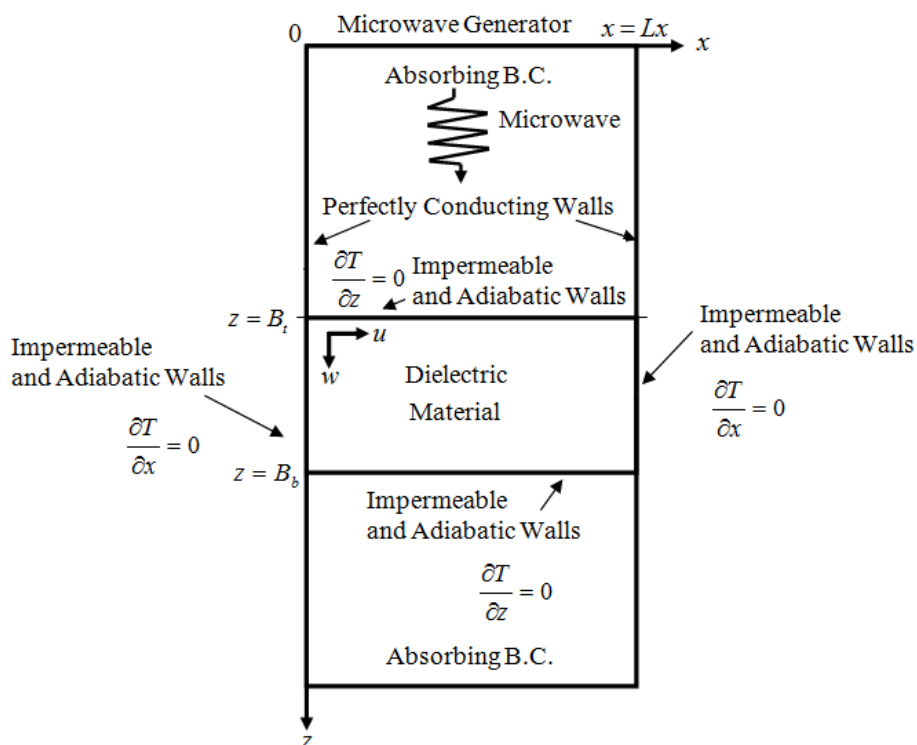
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q$$

เมื่อ $(\rho c_p)_T$ คือค่าความจุความร้อนที่ผสมกันระหว่างโครงสร้างของแข็งน้ำและก๊าซของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถขยายความได้เป็น

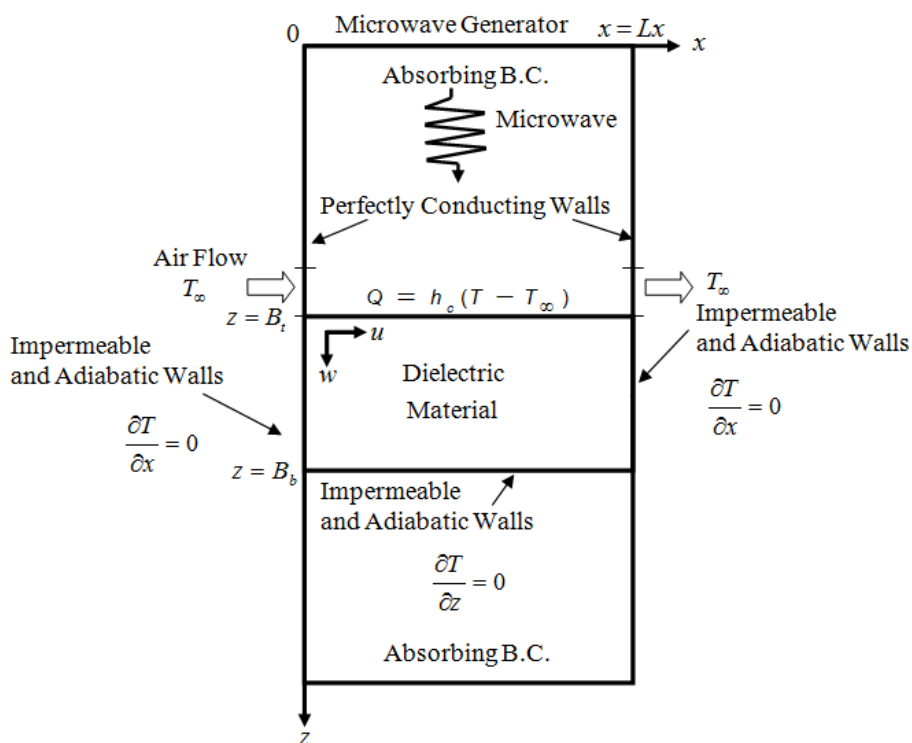
$$(\rho c_p)_T = \rho_l c_{pl} \phi s + \rho_g c_{pg} \phi (1-s) + \rho_p c_{pp} (1-\phi) \quad (7.11)$$

อัตราการเกิดความร้อนเชิงปริมาตรที่เกิดจากการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ Q สามารถเขียนได้ว่า [7-12]

$$Q = \omega \varepsilon_r'' E^2 = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r' (\tan \delta) E_y^2 \quad (7-12)$$



ภาพที่ 7-1 โดเมนกายภาพกรณีผิวหน้าเป็นฉนวนความร้อน



ภาพที่ 7-2 โดเมนกายภาพกรณีที่มีการพาความร้อนที่ผิวด้านบน

เงื่อนไขขอบเขตเปิด

เงื่อนไขขอบเขตที่มีผิวหน้าเปิดซึ่งมีการแลกเปลี่ยนพลังงานทางความร้อนที่ผิวหน้าเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว ซึ่งในกรณีการศึกษานี้จะเป็นเงื่อนไขการพาความร้อนที่ผิวหน้าซึ่งสามารถเขียนเงื่อนไขได้เป็น

$$-\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_{\infty}) \quad (7.13)$$

เงื่อนไขขอบเขตปิด

เงื่อนไขขอบเขตที่ไม่มีพลังงานทางความร้อนและมวลเคลื่อนที่ผ่านเข้าออกระบบ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (7.14)$$

เงื่อนไขเริ่มต้น

อุณหภูมิวัสดุมีค่าเป็น 25°C ที่ค่าเริ่มต้น และค่าเงื่อนไขเริ่มต้นอื่นๆ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 7.1 และ 7.2

ตารางที่ 7.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุไดอิเล็กตริก

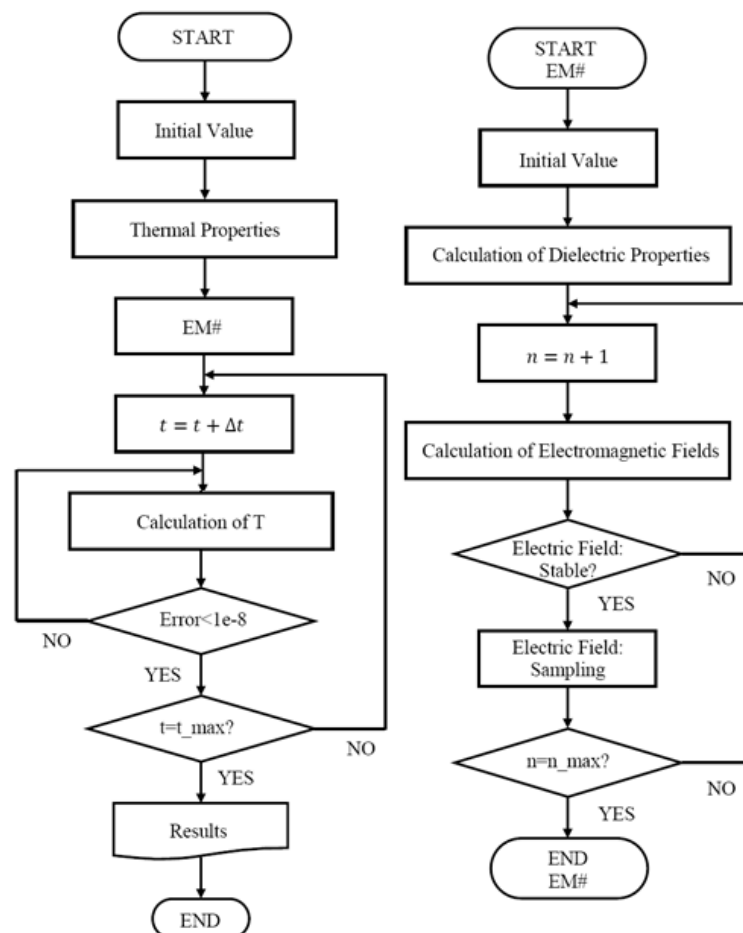
Particle size $d(\text{mm.})$	Porosity ϕ (-)	Permeability κ (m^2)
0.4	0.371	3.52×10^{-11}

ตารางที่ 7.2 สมบัติทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนรวมถึงเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้ในการวิเคราะห์

$\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$	$\mu_0 = 4.0\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$
$\epsilon_{ra} = 1.0, \mu_{ra} = 1.0$	$\epsilon_{rp} = 5.1, \mu_{rp} = 1.0$
$\mu_{rl} = 1.0$	$\tan \delta_p = 0.01,$ $\tan \delta_a = 0.00$
$\rho_a = 1.205 [\text{kg/m}^3]$	$\rho_l = 1,000 [\text{kg/m}^3]$
$\rho_p = 2,500 [\text{kg/m}^3]$	$C_{pa} = 1.007 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$C_{pp} = 0.80 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	$C_{pp} = 4.186 [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$\lambda_l = 0.610 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$\lambda_p = 1.0 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
$\lambda_a = 0.0256 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	$s = 0.8$ (High lossy)
$T_{\infty} = 75^{\circ}\text{C}$ (Hot air)	$s = 0.1$ (Low lossy)
$h_c = 50 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	$f = 2.45 [\text{GHz}]$
$\text{Power} = 200 [\text{Watt}]$	$T_{\text{int}} = 25^{\circ}\text{C}$

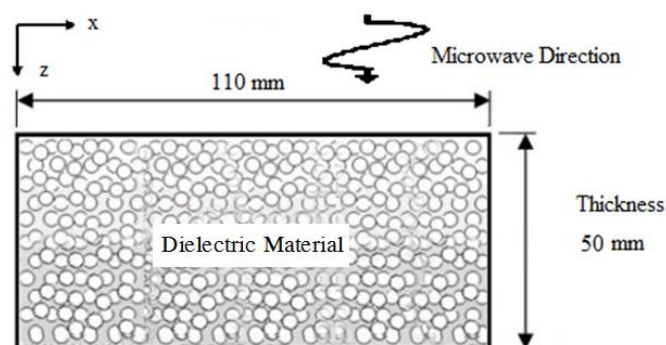
7.2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

สมการการถ่ายเทความร้อนนั้นถูกใช้ควบคู่กับสมการแมกซ์เวลล์เพื่อใช้หาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ในการที่จะทำนายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องใช้วิธีการระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสลับเนื่องโดเมนเวลา ในขณะที่การหาการกระจายตัวทางอุณหภูมิจะใช้วิธีการผลต่างสลับเนื่อง ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณสามารถเขียนได้ดังภาพที่ 7-5



ภาพที่ 7-5 ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของปัญหา

ข้อมูลทางกายภาพของสมบัติไดอิเล็กตริกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1 และสมบัติทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน รวมถึงเงื่อนไขของปัญหาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.2



ภาพที่ 7-6 ขนาดวัสดุทดสอบ

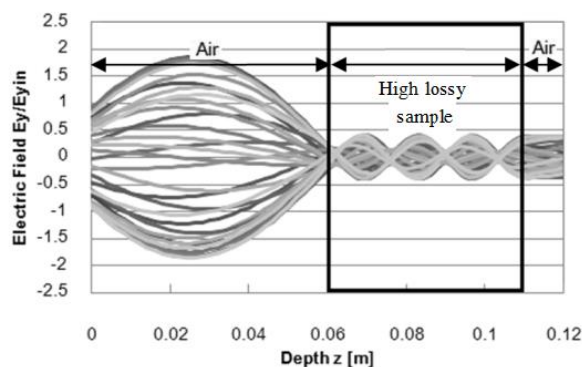
การจำลองผลการศึกษาก็ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกคือการวิเคราะห์หัตถิพลการพาความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียมาก ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์หัตถิพลการพาความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียน้อย การวิเคราะห์ปัญหาเป็นการวิเคราะห์ในสถานะไม่คงตัวซึ่งเริ่มวิเคราะห์ตั้งแต่เวลาที่ 0 จนกระทั่ง 600 วินาที โดยรายละเอียดขนาดขึ้นงานทดสอบแสดงดังภาพที่ 7-6

7.3 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

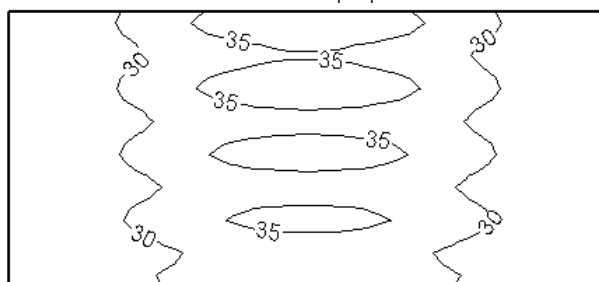
สำหรับแบบจำลองที่ได้พัฒนาและศึกษาขึ้นซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกคือการวิเคราะห์หัตถิพลการพาความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียมาก ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์หัตถิพลการพาความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียน้อย สามารถแสดงผลและวิเคราะห์ผลต่างๆ ได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

7.3.1 สนามไฟฟ้า การกระจายทางความร้อน และสมบัติไดอิเล็กตริก

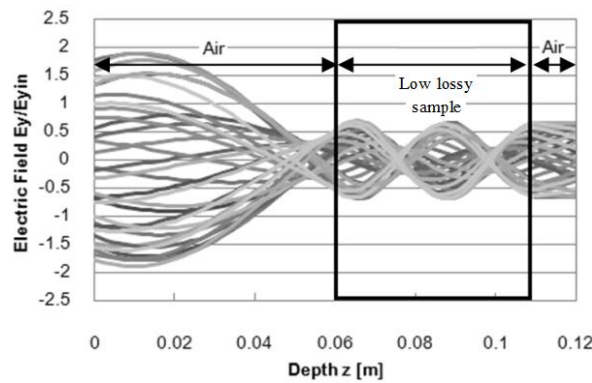
ภาพที่ 7-7 ถึง 7-10 แสดงสนามไฟฟ้าและการกระจายความร้อนระหว่างวัสดุที่มีการสูญเสียสูงและการสูญเสียต่ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิสอดคล้องกับการกระจายสนามไฟฟ้าภายในวัสดุ เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในตัววัสดุลดทอนลงเนื่องจากการดูดซับพลังงาน และหลังจากนั้นพลังงานที่ดูดซับจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างวัสดุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในตัววัสดุที่มีการสูญเสียสูงจะมีการแสดงค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำลง (ผลกระทบจากการสั้นพ้องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ในขณะที่เปรียบเทียบกับตัววัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในวัสดุที่มีการสูญเสียสูงจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าตัววัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ โดยผลของสมบัติไดอิเล็กตริก



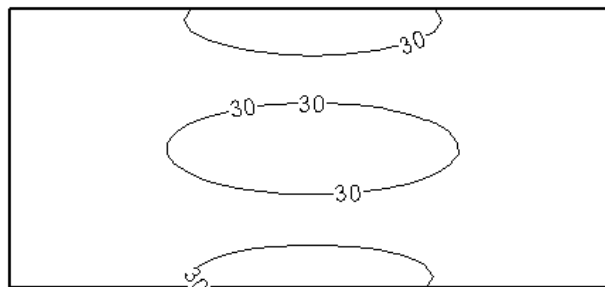
ภาพที่ 7-7 การกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง



ภาพที่ 7-8 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง ที่เวลา 60 วินาที



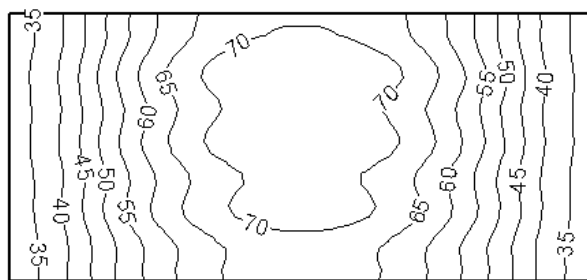
ภาพที่ 7-9 การกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ



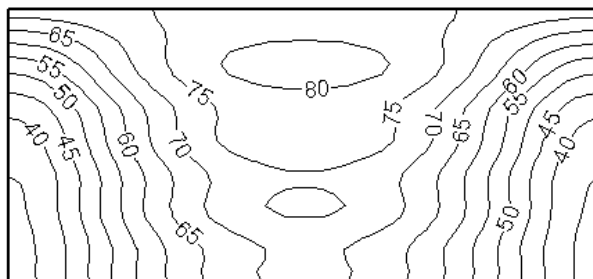
ภาพที่ 7-10 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำที่เวลา 60 วินาที

7.3.2 อิทธิพลของการพาความร้อนที่ผิวหน้าในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบค่าการสูญเสียสูง

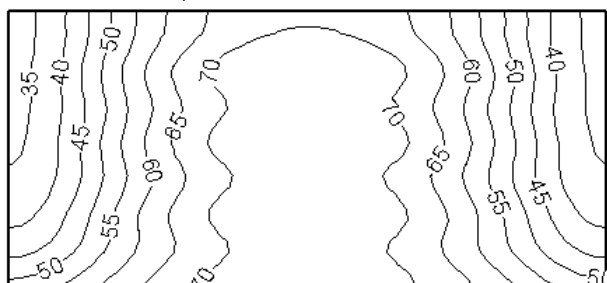
ภาพที่ 7-11 ถึง 7-14 แสดงผลการกระจายความร้อนจากทั้ง 4 กรณีศึกษา ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกที่สูญเสียสูง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในวัสดุเกิดจากผลกระทบ 2 ประการนั่นคือการสร้างความร้อนเชิงปริมาตรจากพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนภายนอกจากอากาศร้อน ในภาพที่ 7-11 การกระจายอุณหภูมิซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่ตรงกลางของตัวอย่างจะสอดคล้องกับการกระจายสนามไฟฟ้าภายในตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นในทางปฏิบัติตัววัสดุอาจไหม้และเสียหายภายในในขณะที่ภายนอกยังมีลักษณะอยู่ในสภาพที่ดี สำหรับผลลัพธ์ในภาพที่ 7-12 และ 7-13 แสดงให้เห็นว่าสภาพความร้อนที่พื้นผิวด้านบนหรือด้านล่างสามารถเปลี่ยนแปลงการกระจายของอุณหภูมิและทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่มากขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามสิ่งเหล่านี้ยังไม่ส่งผลดีพอที่จะทำให้มีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอภายในตัววัสดุเนื่องจากยังมีบริเวณจุดเย็นเกิดขึ้นภายใน เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนได้ถ่ายเทจากอากาศร้อนสู่พื้นผิวเข้าสู่ภายในโดยกลไกการพาความร้อนที่ผิวแล้วเคลื่อนที่เข้าสู่วัสดุด้วยการนำความร้อนเท่านั้น ดังนั้นการกระจายอุณหภูมิจากการนำความร้อนภายในวัสดุจึงไม่สามารถทำงานได้ดีในกรณีที่วัสดุมีสมบัติการนำความร้อนต่ำหรือตัววัสดุมีขนาดหนาๆ ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงร่วมกับการพาความร้อนภายนอกที่การพาความร้อนที่ผิวด้านบนและด้านล่างจากภาพที่ 14 จึงมีการกระจายความร้อนที่ดีที่สุด เนื่องจากผลของการพาความร้อนจากพื้นผิวด้านบนและด้านล่างช่วยให้ลดบริเวณจุดเย็นและทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ



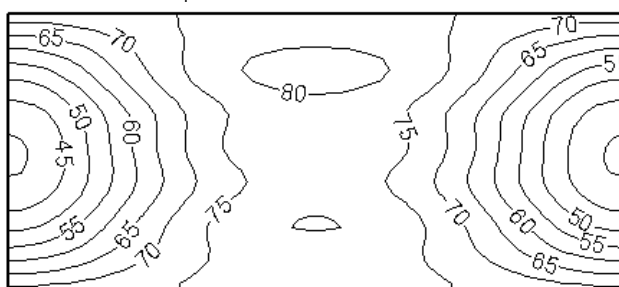
ภาพที่ 7-11 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุเป็นฉนวนทางความร้อนที่เวลา 300 วินาที



ภาพที่ 7-12 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านบนมีการพาความร้อนที่เวลา 300 วินาที



ภาพที่ 7-13 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านล่างมีการพาความร้อนที่เวลา 300 วินาที

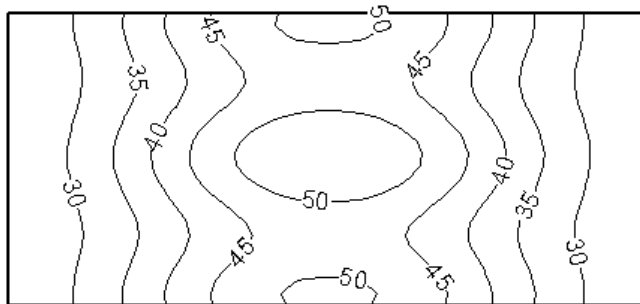


ภาพที่ 7-14 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่างมีการพาความร้อนที่เวลา 300 วินาที

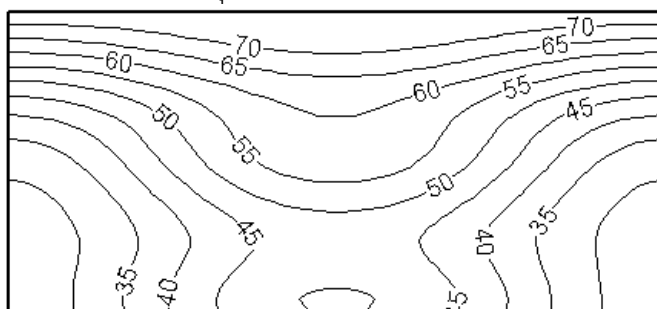
7.3.3 อิทธิพลของการพาความร้อนที่ผิวหน้าในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกแบบค่าการสูญเสียต่ำ

ภาพที่ 7-15 ถึง 7-18 แสดงการกระจายตัวทางความร้อนจากทั้ง 4 กรณีภายในตัววัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในวัสดุมีแนวโน้มพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาในส่วนนี้พบว่าผลของการพาความร้อนมีความสำคัญมากกว่าการสร้างความร้อนด้วยไมโครเวฟในกรณีที่วัสดุมีค่าการ

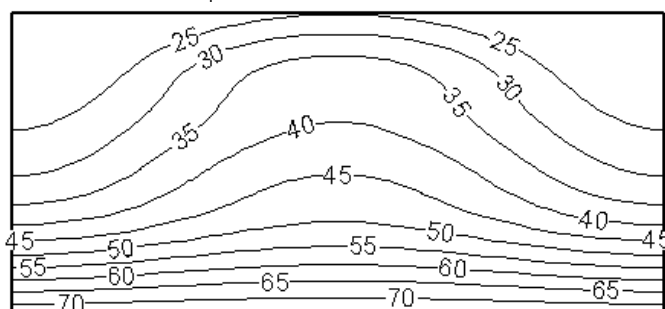
สูญเสียต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการสร้างความร้อนภายในวัสดุมีขนาดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฟลักซ์ความร้อนที่ได้รับจากการพาความร้อน



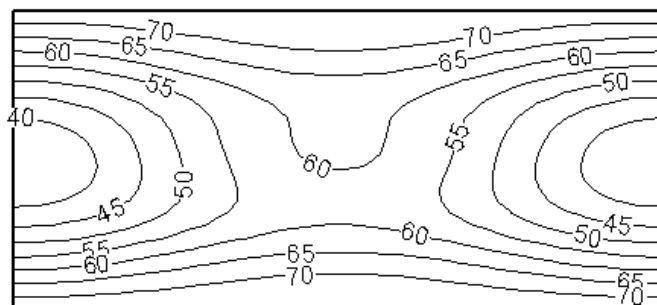
ภาพที่ 7-15 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนได้อิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุเป็นฉนวนทางความร้อนที่เวลา 300 วินาที



ภาพที่ 7-16 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนได้อิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านบนมีการพาความร้อนที่เวลา 300 วินาที



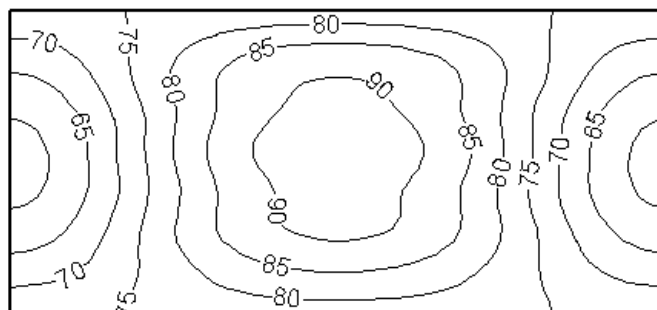
ภาพที่ 7-17 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนได้อิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านล่างมีการพาความร้อนที่เวลา 300 วินาที



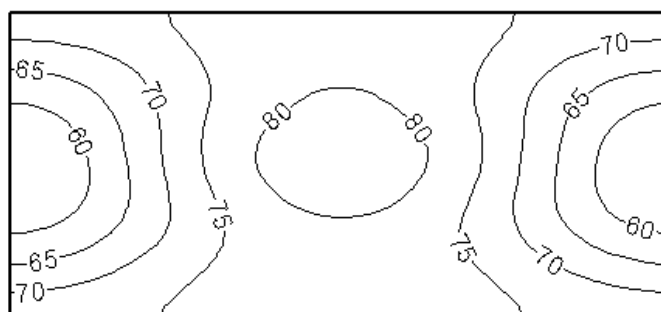
ภาพที่ 7-18 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนได้อิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ
ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่างมีการพาความร้อนที่เวลา 300 วินาที

7.3.4 อิทธิพลของการพาความร้อนที่ผิวหน้าระหว่างวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียมากและค่าการสูญเสียน้อย

ภาพที่ 7-19 และ 7-20 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวทางอุณหภูมิมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการอธิบายก่อนหน้านี้ ดังนั้นการพาความร้อนภายนอกจึงมีประโยชน์ในการช่วยกระจายอุณหภูมิในวัสดุพูนที่มีค่าการสูญเสียสูงและการสูญเสียต่ำให้เกิดความสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามสมบัติไดอิเล็กตริกมีนัยสำคัญหลักในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นหากสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าที่สูงเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากกรณีศึกษา แนวโน้มการกระจายอุณหภูมิอาจมีลักษณะที่แตกต่างกันเกิดขึ้นได้



ภาพที่ 7-19 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูง ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่างมีการพาความร้อนที่เวลา 600 วินาที



ภาพที่ 7-20 การกระจายอุณหภูมิ (°C) ในกรณีวัสดุพูนไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ ในเงื่อนไขผิวหน้าวัสดุด้านบนและด้านล่างมีการพาความร้อนที่เวลา 600 วินาที

7.4 สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถนำเสนอปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญมากมายภายในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียสูงและค่าการสูญเสียต่ำในกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยใช้ช่องนำคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนสามารถใช้เพื่ออธิบายผลของการพาความร้อนภายนอกที่มีต่อสภาวะความร้อนของไมโครเวฟได้

สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีนัยสำคัญในการอธิบายรูปแบบการถ่ายเทความร้อนจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การพาความร้อนภายนอกมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมในการให้ความร้อนของไมโครเวฟเนื่องจากสามารถเปลี่ยนรูปแบบการกระจายความร้อนและทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอได้

ผลลัพธ์ในงานนี้มีประโยชน์ในการออกแบบเครื่องทำความร้อนหรือปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์จากกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

สรุปรวม และผลลัพธ์จากโครงการวิจัย

สรุปรวม

จากการศึกษางานวิจัยเรื่องวิเคราะห์ความร้อนและการไหลหลายสถานะในวัสดุพูนชนิดไฮโกรสโคปิกแบบไม่อิ่มตัว (เชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์) ซึ่งมีการศึกษาเนื้องานย่อยทั้งในส่วนของการศึกษาเชิงประยุกต์ทดลองและการศึกษาเชิงทฤษฎีด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาย่อยๆ เป็น 5 เรื่อง ดังนี้

1. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการลดความชื้นของวัสดุพูนไฮโกรสโคปิกชนิดข้าวข้าวเปลือกด้วยการพาความร้อนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต

2. การศึกษาวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนซีเมนต์เพสต์ที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีโดยกรณีศึกษาการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้น และช่วงการก่อตัวสุดท้ายในควิตีที่อนาคลีนแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10

3. การศึกษาการกระจายตัวทางอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนหลายชั้นในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตในควิตีที่อนาคลีนแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10

4. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนไดอิเล็กตริกหลายชั้นภายใต้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนาคลีนแบบสี่เหลี่ยมโหมด TE10 ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5. การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของอิทธิพลของการพาความร้อนที่พื้นผิวร่วมกับการทำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านไมโครเวฟในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำและสูญเสียสูง

ซึ่งจากข้อมูลการศึกษาที่ได้ทั้งหมดทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุพูนทั้งแบบไฮโกรสโคปิกและนอนไฮโกรสโคปิกที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายเทความร้อนธรรมดาจากกลไกการพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดภายในตัววัสดุที่มีต้นกำเนิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยองค์ความรู้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ต่อยอดศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาระบบ เครื่องจักร หรืองานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในอนาคตต่อไปได้

ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย

ในส่วน of ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากงานวิจัยคือเมื่อได้ผลการศึกษา องค์ความรู้ที่ได้จะต้องนำไปเปิดเผยองค์ความรู้ด้วยการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มีอิมแพคแฟกเตอร์ให้ได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผลจากงานวิจัยที่พัฒนาเป็นบทความวิจัยในปัจจุบันยังไม่ได้มีการตีพิมพ์ และเนื่องด้วยระยะเวลาโครงการในสัญญาทุนวิจัยนั้นสิ้นสุดลงลงเลี่ยนานมากแล้ว ดังนั้นโครงการนี้จึงขอปิดโครงการวิจัยตามเงื่อนไขจาก สกสว. ที่ได้แจ้งแก่หัวหน้าโครงการวิจัยคือ ส่งเล่มรายงานโครงการวิจัยโดยไม่มีผลลัพธ์จากงานวิจัย อย่างไรก็ตามหัวหน้าโครงการวิจัยนี้จะพยายามพัฒนาปรับปรุงบทความวิจัยฉบับภาษาอังกฤษให้มีเนื้อหาที่ดีมีองค์ความรู้ที่ยอมรับได้เพื่อให้สามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการนานาชาติที่มีอิมแพคแฟกเตอร์อันเป็นประโยชน์แก่สากลโดยให้กิตติกรรมประกาศภายใต้สัญญาทุนดังกล่าวในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

บทที่ 3

- [3-1] จินดา พานิชอิงอร, การอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นสูงโดยเทคนิค สเปาเต็ดเบตสองมิติ, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551.
- [3-2] ฉัตรชัย นิยมมล, มกราคม 2555, “ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว”, ฉบับที่ 17, เล่มที่ 1, หน้า 97-109.
- [3-3] พรรณี ยางโว, การศึกษาเปรียบเทียบการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้ขุยมะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวกลางในการดูดซับร่วมกับลมร้อน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2550.
- [3-4] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, กันยายน 2542, “การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย”, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, หน้า 121-136
- [3-5] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, คู่มือการอบแห้งเมล็ดพืชในที่เก็บ, กรุงเทพฯ : คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.
- [3-6] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, พิพัฒน์ อมตฉายา และสมเกียรติ ปรัชญา วรากร, 2540, “การอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บและการเก็บรักษาในสถานที่ใช้จริง”, วารสารเกษตรศาสตร์ (สังคม), ฉบับที่ 1, หน้า 86-100.
- [3-7] สมพร อิศวิลานนท์, มองสถานการณ์ข้าวไทยผ่านตลาดการค้าข้าวโลก, กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2557.
- [3-8] ยงยุทธ พิษกมฺุท, มกราคม 2529, “เครื่องอบข้าวแบบโรตารี”, การประชุมวิชาการประจำปีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 15-27.
- [3-9] อรรถพร อภิพัฒนานุกุล, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และทิพาพร อยู่วิทยา, 2539, “การชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกขึ้นโดยการระบายอากาศ” วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย.), ฉบับที่ 3, หน้า 351-363.
- [3-10] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, “Influence of Irradiation Time, Particle Sizes, and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials”, ASME J. Heat Transfer, Vol.124, pp.151-161
- [3-11] Tulasidas, T. N., Raghavan, G.S.V. & Mujumdar and A.S., 1995, “Microwave drying of grapes in a single mode at 2450 MHz-II and energy aspect”, Drying Technology, Vol.13, pp.1973-1992.
- [3-12] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. & Achariyaviriya and S., 2007, “Combined microwave-hot air drying of peeled longan”, Journal of Food Engineering, Vol.81, pp.459-466.

บทที่ 4

- [4-1] Mujumdar, A.S., (1995), Handbook of Industrial Drying, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York.
- [4-2] Metaxas, A.C., and Meredith, R.J., (1983), Industrial Microwave Heating, Peter Peregrinus, Ltd., London.
- [4-3] Schubert, H., and Regier, M., (2005), The Microwave Processing of Foods, Woodhead Publishing Limited and CRC Press, Cambridge.
- [4-4] Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., (2001), Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material, Int. Commun. Heat Mass Trans, Vol. 28, pp. 605-616.
- [4-5] Wei, C.K., Davis, H.T., Davis, E.A., and Gordon, J., (1985), Heat and Mass Transfer in Water-Laden Sand Stone, Microwave Heating, AIChE J., Vol. 31 (5), pp. 842-848.
- [4-6] Atong, D., and Clark, D.E., (2003), The Effect of Reaction Parameters on Microwave Induced Combustion Synthesis of Al_2O_3/TiC Composite Powders, Microwave and Radio Frequency Applications: American Ceramics Society, Westerville, Ohio, pp. 207-220.
- [4-7] Kriegsmann, G.A., (1992), Thermal Runaway in Microwave Heated Ceramics: A One-Dimensional Model, J. Appl. Phys. Vol. 71(4), pp. 1960-1966.
- [4-8] Wang, J., and Schmugge, T., (1980), An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of Water Content, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. GE-18 (4), pp. 288-295.
- [4-9] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., (2002), Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials, ASME J. Heat Transfer, Vol. 124 (1), pp. 151-161.
- [4-10] Rattanadecho, P., Watanasungsit, A., and Atong D., (2007), Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace., ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering, Volume 129 (1).
- [4-11] Rattanadecho P., Suwannapum N., Chatveera B., Atong D., and Makul N., (2008), Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by using a continuous microwave thermal processor, Materials Science and Engineering: A, Vol. 472, Issues 1-2, , pp. 299-307
- [4-12] Watson, A., (1968), Curing of Concrete, Microwave Power Engineering. Edited by E.C. Okress. Academic Press, New York.
- [4-13] Hutchison, J.T., Chang, H.M., Jennings, H.M. and Brodwin, M.E., (1991), Thermal Acceleration of Portland Cement Mortars With Microwave Energy, Cement & Concrete Research, 21, 795-799.
- [4-14] Leung, C.K. and Peeraphan, T., (1995), Very High Early Strength of Microwave Cured Concrete, Cement & Concrete Research, 25[1], pp. 136-46.

- [4-15] Leung, C.K. and Peeraphan, T., (1995), Microwave Curing of Portland Cement Concrete: Experimental Results and Feasibility for Practical Applications, *Construction & Building Materials*, 9[2], pp. 67-73.
- [4-16] Jeevaka S., Deepak R., and Narayanan N., (2010), Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, Issue 12, pp 1688-1696.
- [4-17] Benedetto A., and Calvi A., (2013), A pilot study on microwave heating for production and recycling of road pavement materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp 351-359.
- [4-18] Holtz E., Ahrné L., Rittenauer M., And Rasmuson A., (2010), Influence of dielectric and sorption properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials, *Journal of Food Engineering*, Vol. 97, Issue 2, pp. 144-153.
- [4-19] Makul N., Rattanadecho P., and Agrawal D.K., (2010), Microwave curing at an operating frequency of 2.45 GHz of Portland cement paste at early-stage using a multi-mode cavity: Experimental and numerical analysis on heat transfer characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, Issue 10, pp. 1487–1495.
- [4-20] Makul N., Keangin P., Rattanadecho P., Chatveera B., and Agrawal D.K., (2010), Microwave-assisted heating of cementitious materials: Relative dielectric properties, mechanical property, and experimental and numerical heat transfer characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, Issue 8, pp. 1096–1105.
- [4-21] Wei C., Peiliang S., and Zhonghe S., (2012), Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, , pp, 306–312.
- [4-22] American Society for Testing and Materials, (2006), *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4, No. 02, Philadelphia, PA, USA.
- [4-23] Yunus A. Çengel, (2011), *Heat and Mass Transfer (SI Unit) 4th edition*, McGraw-Hill Education, Europe.

บทที่ 5

- [5-1] Ayappa, K.G., Davis, H.T., Davis, E.A., and Gordon, J., (1991), Analysis of Microwave Heating of Material with Temperature-Dependent Properties, *AIChE J.*, 37, No.3, pp.313-322.
- [5-2] Ayappa, K.G., Davis, H.T., Davis, E.A. and Gordon, J., 1992, Two-dimensional Finite Element Analysis of Microwave Heating, *AIChE. J.*, 38, pp. 1577–1592.
- [5-3] Perre, P. and Turner, I.W., (1997), Microwave Drying of Softwood in an Oversized Waveguide, *AIChE J.*, 43, pp. 2579-2595.

- [5-4] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M.,(2001), Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material., Int. Commune. Heat Mass Transfer, Vol.28, pp.605-616.
- [5-5] P., Aoki, K. and Akahori, M., (2002), Influence of Irradiation Time, Particle Sizes, and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials., ASME J. Heat Transfer, Vol.124, pp.151-161.
- [5-6] Prommas R., (2011), Theoretical and experimental study of heat and mass transfer mechanism during convective drying of multi-layered porous packed bed, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 38, Issue 7, Pages 900-905
- [5-7] Hoogland F., Lehmann P., and Or D., (2017), Capillary flows across layers and textural interfaces – pathways and colloid transport considerations in unsaturated layered porous media, Journal of Colloid and Interface Science, Available online, In Press, Accepted Manuscript.
- [5-8] Klayborworn, S., Pakdee, W., Rattanadecho, R., and Vongpradubchai, Somsak., (2013), Effects of material properties on heating processes in two-layered porous media subjected to microwave energy, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 61, June 2013, Pages 397-408

บทที่ 6

- [6-1] Ayappa, K.G.; Davis, H.T.; Davis, E.A.; Gordon, J. Analysis of Microwave Heating of Materials with Temperature-dependent Properties. A.I.Ch.E. Journal (1991), 37, 313-322.
- [6-2] Curcio, S. A Multiphase Model to Analyze Transport Phenomena in Food Drying Processes. Drying Technology (2010), 28, 773-785.
- [6-3] Tada, S.; Echigo, R.; Kuno, Y.; Yochida, H. Numerical Analysis of Electro-magnetic Wave in Partially Loaded Microwave Applicator. Int. J. Heat and Mass Transfer (1998), 41, 708-718.
- [6-4] Basak, T.; Meenakshi, A.; A Theoretical Analysis on Microwave Heating of Food Slabs Attached with Ceramic Plates: Role of Distributed Microwave Incidence. Food Research International (2006), 39 (8), 932-944.
- [6-5] Rattanadecho, P.; Suwannapum, N.; Chatveera, B.; Atong, D.; Makul N. Development of Compressive Strength of Cement Paste under Accelerated Curing by using a Continuous Microwave Thermal Processor. Materials Science and Engineering: A (2008); 472 (1-2), 299-307.
- [6-6] Kowalski, S. J.; Rajewska, K. Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation. Drying Technology (2009), 27, 878-887.
- [6-7] Alibas, I.; Microwave, Vacuum, and Air Drying Characteristics of Collard Leaves. Drying Technology (2009), 27, 1266-1273.

- [6-8] Perre, P.; Turner, I.W. Microwave Drying of Softwood in an Oversized Waveguide. *AIChE J.* (1997), 43, 2579-2595.
- [6-9] Rattanadecho, P. The Simulation of Microwave Heating of Wood using a Rectangular Wave Guide: Influence of Frequency and Sample Size. *Chemical Engineering Science* (2006), 61 (14), 4798-4811.
- [6-10] Osepchuk, J.M, A History of Microwave Heating Applications, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 32, (1984), pp. 1201-1224.
- [6-11] Wang, J.; Schmugge, T. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of Water Content. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* GE18 (1980), 288-295.
- [6-12] Suwannapum, N., and Rattanadecho, P. Analysis of Heat-mass Transport and Pressure Buildup Induced Inside Unsaturated Porous Media Subjected to Microwave Energy Using a Single (TE₁₀) Mode Cavity. *Drying Technology* (2011), 29 (09), 1010 – 1024.
- [6-13] Rattanadecho, P.; Suwannapum, N.; Cha-um, W. Interactions Between Electromagnetic and Thermal Fields in Microwave Heating of Hardened Type I-Cement Paste Using a Rectangular Waveguide (Influence of Frequency and Sample Size). *ASME J. Heat Transfer* (2009), 131, 082101-082112.
- [6-14] Ratanadecho, P. Aoki, K. Akahori, M. Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multilayered Capillary Porous Materials. *ASME J. Heat Transfer*, (2002); 124, 1:151-61.

บทที่ 7

- [7-1] Ayappa, K.G.; Davis, H.T.; Davis, E.A.; Gordon, J. Analysis of Microwave Heating of Materials with Temperature-dependent Properties. *A.I.Ch.E. Journal* 1991, 37, 313-322.
- [7-2] Curcio, S. A Multiphase Model to Analyze Transport Phenomena in Food Drying Processes. *Drying Technology* 2010, 28, 773-785.
- [7-3] Tada, S.; Echigo, R.; Kuno, Y.; Yochida, H. Numerical Analysis of Electromagnetic Wave in Partially Loaded Microwave Applicator. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 1998, 41, 708-718.
- [7-4] Basak, T.; Meenakshi, A.; A Theoretical Analysis on Microwave Heating of Food Slabs Attached with Ceramic Plates: Role of Distributed Microwave Incidence. *Food Research International* 2006, 39 (8), 932-944.
- [7-5] Rattanadecho, P.; Suwannapum, N.; Chatveera, B.; Atong, D.; Makul N. Development of Compressive Strength of Cement Paste under Accelerated Curing by using a Continuous Microwave Thermal Processor. *Materials Science and Engineering: A* 2008; 472 (1-2), 299-307.

- [7-6] Kowalski, S. J.; Rajewska, K. Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation. *Drying Technology* 2009, 27, 878-887.
- [7-7] Alibas, I.; Microwave, Vacuum, and Air Drying Characteristics of Collard Leaves. *Drying Technology* 2009, 27, 1266-1273.
- [7-8] Perre, P.; Turner, I.W. Microwave Drying of Softwood in an Oversized Waveguide. *AIChE J.* 1997, 43, 2579-2595.
- [7-9] Rattanadecho, P. The Simulation of Microwave Heating of Wood using a Rectangular Wave Guide: Influence of Frequency and Sample Size. *Chemical Engineering Science* 2006, 61 (14), 4798-4811.
- [7-10] Suwannapum, N., and Rattanadecho, P. Analysis of Heat-mass Transport and Pressure Buildup Induced Inside Unsaturated Porous Media Subjected to Microwave Energy Using a Single (TE₁₀) Mode Cavity. *Drying Technology* 2011, 29 (09), 1010 – 1024.
- [7-11] Wang, J.; Schmugge, T. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of Water Content. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* GE18 1980, 288-295.
- [7-12] Rattanadecho, P.; Suwannapum, N.; Cha-um, W. Interactions Between Electromagnetic and Thermal Fields in Microwave Heating of Hardened Type I-Cement Paste Using a Rectangular Waveguide (Influence of Frequency and Sample Size). *ASME J. Heat Transfer* 2009, 131, 082101-082112.