

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันกระบวนการอบแห้งในผลิตภัณฑ์เกษตรกรรมยังจำกัดและมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก เพราะการอบแห้งแบบเดิมนั้นมีการกระจายตัวของความร้อนและความชื้นไม่ทั่วถึงตลอดชิ้นวัตถุดิบก่อให้เกิดความเสียหายให้กับวัตถุที่ได้นำมาอบ ทั้งยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ทำให้เกิดเชื้อรา สี และสภาพของวัตถุที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการอบนานทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ประกอบกับการอบทั่วไปจากเชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดมลภาวะ ปัจจุบันจึงมีการคิดกระบวนการอบแห้งใหม่ขึ้นมาหลากหลายวิธี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการอบให้สูงขึ้น รวมทั้งเพิ่มคุณภาพของวัสดุ ให้มีมูลค่ามากขึ้นวิธีทางหนึ่งคือนำคลื่นไมโครเวฟเข้ามาช่วยในการอบแห้ง ซึ่งทฤษฎีในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารโดยใช้ระบบไมโครเวฟนั้นมีความซับซ้อน โดยที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ สำหรับการอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในหลายวัสดุ ดังนี้

Shivhare et al. (1991) ศึกษาการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งข้าวโพดเพื่อวิเคราะห์ระดับความชื้นเริ่มต้น การดูดซับพลังงาน อุณหภูมิ และความเร็วเบื้องต้นของอากาศ โดยการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ร่วมในช่วงที่เส้นโค้งของการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง เขาได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพด แบบจำลองการแพร่ของความชื้นที่ผิวของเมล็ดข้าวโพด เพื่อใช้อธิบายขบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ และใช้สมการที่พัฒนาโดย Arrhenius เพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิของอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง $0.0008 - 0.0082 \text{ cm}^2/\text{h}$ ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟคงที่ เมื่อนำไปใช้สำหรับการอบแห้งข้าวโพดแบบต่อเนื่อง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นไปด้วยกับระดับพลังงาน และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วของอากาศแต่ว่าอุณหภูมิขาเข้าคงที่ เมื่อนำมาใช้อบแห้งข้าวโพดแบบต่อเนื่องพบว่าอัตราการอบแห้งที่ระดับพลังงานสูงทำให้ลดเวลาในการอบแห้งอย่างมาก แต่ว่าสูญเสียค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไปกับการผ่านของอากาศ ทำให้เปอร์เซ็นต์การงอก และมวลรวม (bulk density) ของข้าวโพดอบแห้งลดลงการใช้ระดับพลังงานที่ 0.25 วัตต์/กรัม ได้ผลดีคือมีอัตราการงอกของข้าวโพดอบแห้งที่ 92% เมื่อใช้ระดับพลังงานสูงกว่า 0.75 วัตต์/กรัม ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่ดี

Fu et al. (1994) ศึกษาเชิงทฤษฎีของการกระจายพลังงานดูดซับ (microwave power absorbed) ภายในเครื่องไมโครเวฟที่มีคลื่นเป็นลักษณะคลื่นผสม (multi-mode cavity) แบบ 3 มิติ ผลจากการคำนวณเชิงทฤษฎีและการทดลองนั้นสอดคล้องกัน

Tulasidas (1995) ศึกษาการอบแห้งอุณหภูมิสูงโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้เตาอบไมโครเวฟชนิด 2,450 MHz. อบแห้งอุณหภูมิสูงเพื่อทำลูกเกด พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เตาอบไมโครเวฟในระบบการอบแห้งแบบใหม่ ซึ่งใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดแบบพิเศษ และส่วนประกอบที่สามารถควบคุมระดับพลังงานได้ทุกระดับ และพบว่าเมื่อมีการจุ่มอุณหภูมิสูงตามวิธีการผลิตลูกเกดในอุตสาหกรรม การอบแห้งด้วยไมโครเวฟไม่เพียงแต่รวดเร็วเท่านั้นยังต้องการพลังงานต่ำอีกด้วย ลูกเกดที่ได้มีคุณภาพที่ดีสีไม่เข้มเนื่องจากไม่มีการรมควันของสารซัลไฟด์ ดังนั้น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีความเป็นไปได้ในการลดปริมาณสารเคมีและพลังงานที่ใช้ในการคงสภาพผลิตภัณฑ์อาหาร การหดตัวและความหนาแน่นของอุณหภูมิสูงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเปอร์เซ็นต์ความชื้น

Benjamin (1996) ทำการศึกษาโดยใช้ไมโครเวฟอบแห้งถั่วเหลืองเพื่อศึกษาผลของความร้อน และการถ่ายเทมวล เพื่อแสดงถึงพื้นฐานความแตกต่างระหว่างไมโครเวฟและระบบการพาความร้อน เขาได้สร้างสมการที่อธิบายถึงลักษณะปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลที่เกิดจากผลของการเพิ่ม หรือลดของสนามไฟฟ้าที่มีต้นกำเนิดมาจากไมโครเวฟ การถ่ายเทมวลและความร้อนของการอบแห้งที่อยู่ในช่วง 0.28 ถึง 0.44 วัตต์/กรัม ซึ่งพบว่าให้ค่าคงที่ของอุณหภูมิและค่าคงที่การดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งตามลำดับ ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำถูกต้อง การให้พลังงานไมโครเวฟ เพื่อกระตุ้นการคายความชื้นพบว่าเพิ่มสูงขึ้นกว่า 30% ถ้าต่ำกว่านั้นเหมือนกับใช้วิธีการพาความร้อน สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาและปรับปรุงสมการการแพร่ของ Fick โดยการแก้ไขสมการของ Gallaher เพื่อทำนายสมบัติการแพร่และการถ่ายเทมวลของแข็งที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและแสดงถึงการคายความชื้นที่เกิดจากการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ และจะได้แบบจำลองการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟที่ให้ผลการทำนายคุณลักษณะทางความร้อนของถั่วได้อย่างดี

Perre (1996) งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทำการคำนวณในเรื่องการให้ความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งด้วยการให้ความร้อนภายในพิจารณาเกี่ยวกับสถานะของของเหลว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกพัฒนาขึ้นใช้สำหรับขอบเขตที่มีการอิ่มตัวและขอบเขตที่ยังไม่อิ่มตัว รวมไปถึงการระเหิดตัวของของเหลว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะเน้นการศึกษาทางด้านการระเหย

ตัวของน้ำ ซึ่งในการทดลองโดยการนำพลังงานไมโครเวฟมาช่วยในการอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทดลอง โดยใช้วัสดุพูน Light Concrete เป็นวัสดุในการทดสอบ โดยปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ใช้เป็น 2 แบบ คือ กำลังงานสูง (high power) และกำลังงานต่ำ (low power) ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับภาระของน้ำภายในชิ้นงาน ความร้อนจะเกิดบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณ ผลดังกล่าวสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์การส่งผ่านและการระเหยของของเหลวภายใต้กำลังงานสูง ๆ ได้

Feng and Tang (1998) ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการอบแห้งแอปเปิ้ลจำนวน 3 พันธุ์ (Red Delicious, Golden และ Granny Smith) โดยใช้เทคนิควิธีการที่รวมเอาไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบดเข้ามาช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอของการเกิดความร้อน ทำการทดสอบอบแห้งแอปเปิ้ลแบบลูกเต๋าจากความชื้นเริ่มต้นที่ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายที่ 5 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก โดยใช้อุณหภูมิความร้อนที่ 70°C และระดับพลังงานไมโครเวฟที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0 ถึง 6.1 วัตต์/กรัม พบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีการพัฒนาคุณภาพสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงด้านสีต่ำและอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการอบแห้งด้วยแบบลมร้อนปกติหรือแบบสเปาเต็ดเบดธรรมดาสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 80% เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดแบบไม่ใช้ไมโครเวฟร่วมด้วย โดยอัตราการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟยังสมมุติให้มีการกระจายสม่ำเสมอ

Turner (1998) งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาทางด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบของการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อน โดยวัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุพูนแบบชื้นมาก (hygroscopic) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นการพัฒนาแบบจำลองมาจากการอบแห้ง 1 มิติ จะศึกษาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้กระบวนการอบแห้ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่สัมพันธ์กับความชื้นคงเหลือของชิ้นไม้, อุณหภูมิ, ความดันและการกระจายตัวของพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นผลที่ช่วยในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานของกระบวนการอบแห้งได้ดี จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนตัวพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับงานวิจัยภายใต้การให้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับการพาความร้อน ซึ่งโปรแกรมจะสามารถออกแบบการอบแห้งให้ถึงจุดสูงสุดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้และในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการทดลอง และนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนมาเปรียบเทียบ โดยคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราในการอบแห้ง และประสิทธิภาพของการอบแห้งซึ่งจะมี

ความสัมพันธ์กับค่าความชื้น, อุณหภูมิ, ความดัน, กำลังงาน ผลที่คาดว่าจะได้ก็คืองานวิจัยฉบับนี้ จะช่วยพัฒนากระบวนการอบแห้งที่ใช้ความร้อนร่วมระหว่างพลังงานไมโครเวฟและการพาความร้อนให้มีประสิทธิภาพดี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคธุรกิจต่อไป

Ni et al. (1999) ได้สร้างแบบจำลองของตัวกลางที่มีรูพรุนแบบหลายเฟส เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนระหว่างการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้นต่ำ ได้แก่ มันฝรั่งสด และวัสดุที่มีความชื้นสูง ได้แก่ ผักสด ด้วยไมโครเวฟเข้มข้น พบว่าการลดลงของความดันภายในวัสดุอบเกิดจากความร้อนภายใน การกลายเป็นไอและช่วยให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น การลดลงอย่างปานกลางของความดันภายในวัสดุอบที่มีความชื้นต่ำ จะทำให้ปริมาณน้ำเคลื่อนที่ไปยังผิววัสดุได้มากจนทำให้ผิววัสดุเปื่อย การลดลงอย่างมากของความดันภายในวัสดุอบที่มีความชื้นสูง จะทำให้ผิววัสดุเกิดการอึดตัว นำไปสู่การสูญเสียความชื้นโดยการเคลื่อนที่ของน้ำ

Boukadida et al. (2000) ได้จำลองสถานการณ์ทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวล 2 มิติ ในระหว่างการอบแห้งอิฐดินเหนียว แบบการพาความร้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันก๊าซ และความเข้มข้นของความชื้นของอากาศอบแห้งต่ออุณหภูมิ ความดันก๊าซ และการอึดตัวด้วยน้ำของวัสดุอบ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง วัสดุอบจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ลดลง เกิดความดันสูง และใช้เวลาในการอบแห้งลดลง เมื่อความดันก๊าซของอากาศอบแห้งลดลง จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุอบในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ลดลง เกิดความดันสูง การอึดตัวด้วยน้ำลดลงเร็วขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งลดลง ส่วนความเข้มข้นของความชื้นที่ลดลง จะทำให้น้ำที่ผิววัสดุระเหยเร็วขึ้น และเกิดความดันสูง

Zhao et al. (2000) งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบ 3 มิติ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในชิ้นไม้ที่มีความชื้นต่ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้โดยอาศัยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) สำหรับในการแก้ปัญหาในสมการ Maxwell ซึ่งสามารถใช้อธิบายในการกระจายตัวของความร้อนในชิ้นไม้ กระบวนการให้ความร้อนที่ซับซ้อนไม่เชิงเส้นนี้จะมีตัวแปรที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนภายในชิ้นไม้ การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ งานวิจัยฉบับนี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์ คือ การกระจายตัวของกำลังงานที่ใช้ในชิ้นงานภายใต้พลังงานไมโครเวฟและการเกิดความร้อนในกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการควบคุมสมบัติขอบเขตของชิ้นไม้จะมีผลต่อการกระจายตัวของกำลังงานที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนภายในชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ถูกออกแบบ

ให้เหมาะสมกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ส่วนการกระจายตัวของอุณหภูมิจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับ การทดลองต่อไป

Mhimid et al. (2000) ได้จำลองสถานการณ์ทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืชในเบดรูปทรงกระบอก แนวตั้ง ซึ่งคิดถึงผลของการระเหยที่เกิดขึ้นจากการบังคับให้อากาศไหลผ่านเบด ที่จะมากขึ้นเนื่องจากการนำความร้อนที่ผนัง โดยพิจารณาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลผ่านเมล็ดพืชเป็น 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลอง No Local Temperature Equilibrium Model และแบบจำลอง Local Temperature Equilibrium Model การถ่ายเทมวลผ่านอากาศและเมล็ดได้แสดงด้วยสมการอัตราการอบแห้ง สมการต่างๆ ได้แก้โดยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) ได้มีการวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงของความพรุนต่อพลังงานและการถ่ายเทมวล และได้มีการทดสอบความถูกต้องของสมมุติฐานของ Local Temperature Equilibrium

Wang et al. (2000) ได้สร้างแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและมวลสำหรับการอบแห้งอนุภาคชั้นที่มีความพรุน ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิ ความชื้นอิมิตัวและการกระจายความดันภายในอนุภาค การแก้สมการเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลองนี้ได้ใช้สมบัติทางกายภาพของแอปเปิล ได้มีการวิเคราะห์ถึงกลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลในกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แรงดันคาพิลลารีและการแพร่ของไอน้ำเป็น การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันในช่วงการอบแห้งที่ต่างกันการถ่ายเทความร้อนภายในส่งผลกระทบมากต่อกระบวนการอบแห้งขณะที่ผลของการกระจายความดันของก๊าซไม่มีผลสำคัญ

Feng et al. (2001) ได้สร้างแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารโดยใช้ระบบไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบดในการอบแห้งวัสดุพรุนแบบขึ้นมาก (hygroscopic porous material) ในที่นี้ใช้แอปเปิล (diced apple) โดยใช้สมการความดันรวมของแก๊สสำหรับการวิเคราะห์ผลของการเกิดไอน้ำที่ภายในแอปเปิล (diced apple) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งและใช้สมการปรากฏการณ์รวมสำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยใช้ Scaling Technique ในการลดรูปและแก้ปัญหามทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) และสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลอง เช่น สมบัติเชิงความร้อน สมบัติสัณฐานการถ่ายเทมวล สมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติเชิงอุณหภูมิ และสมบัติไดอิเล็กตริก ค่าสมบัติเหล่านี้หาได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการทดลอง พบว่าในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบด นั้นอิทธิพลของแรงดันที่ขับเคลื่อนความชื้นเป็นผลทำให้อัตราการ

อบแห้งสูง และจากการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าการกระจายอุณหภูมิที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งลักษณะของการกระจายอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบตทำให้ช่วยในการสามารถควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบ Fixed-Bed โดยใช้ลมร้อน อย่างไรก็ตามอัตราการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟยังสมมุติให้มีการกระจายสม่ำเสมอ

Johnner et al. (2001) ได้สร้างแบบจำลองของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบ Deep Bed แบบจำลองนี้มีลักษณะเป็น 2 เฟส คือ เฟสของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและเมล็ดข้าวโพด โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) แบบ Implicit ในการแก้สมการ 2 เฟสนี้ แล้วจึงนำไปใช้ในการหาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง พร้อมทั้งหาปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดพืช พบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความชื้นของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งลดลง ส่วนปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดพืชลดลงและเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

Ratanadecho et al. (2001) ทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดลองของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัว โดยศึกษาเน้นในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและความชื้น การแพร่ของไอน้ำในระบบ 1 มิติ พบว่าวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาพิลลารีสูงกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า วัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานชิ้นนี้ไม่ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ไมโครเวฟและค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า

Datta et al. (2002) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นสำหรับกระบวนการให้ความร้อนกับอาหารด้วยรังสีอินฟราเรดและการใช้ระบบลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจะทำให้ ความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุเพิ่มขึ้นเนื่องจากการผลักดัน (pressure-driven) ของความชื้นมายังผิวหน้ามาก และลมร้อนสามารถไล่ความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุได้เช่นเดียวกัน แต่ประสิทธิภาพไม่ดีเท่าการใช้รังสีอินฟราเรด

Glouannece et al. (2002) ทดลองอบแห้งวัสดุพูนโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการใช้อย่างมีประสิทธิภาพของการนำเทคโนโลยีการแผ่รังสีของคลื่นเข้ามาช่วยในการอบแห้ง ซึ่งผลการทดลองสามารถนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาแทนการอบแห้งแบบการพาความร้อนได้ จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาถึงจลนศาสตร์ของการอบแห้งและอุณหภูมิของการอบแห้ง อุปกรณ์ที่ใช้คือเตาอบที่สามารถพิจารณาผลได้ในระบบ 1 มิติ

โดยวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนและมวล วัสดุที่ใช้ในการศึกษามีทั้งวัสดุพรุนและวัสดุแข็ง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์การแผ่กระจายของคลื่นในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่มีผลต่อวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้

Ratanadecho et al. (2002) ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งวัสดุพูนชนิดคาพิวลารีที่มีหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟโดยศึกษาถึง การกระจายของสนามไฟฟ้า ความชื้นและอุณหภูมิในระบบ 2 มิติ พบว่าวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการถ่ายเทความชื้นได้สูงกว่าวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และรูปแบบของการจัดเรียงชั้นวัสดุตัวอย่างมีผลต่อการถ่ายเทความชื้น

Wang et al. (2002) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน ซึ่งในการทดลองได้ใช้แครอทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized-bed) แบบ Batch ร่วมกับไมโครเวฟ ได้ทดสอบการเปลี่ยนแปลงการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 4 แบบ พบว่าการเปลี่ยนแปลงการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจากสม่ำเสมอเป็นไม่สม่ำเสมอจะช่วยป้องกันวัสดุจากการไหม้ได้ และช่วงการเปิด/ปิดไมโครเวฟที่ 125/375 และ 375/375 วินาที จะทำให้ได้เวลาในการอบแห้งดีที่สุด คือ 750 และ 1000 วินาที

Adonis et al (2004) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอาหารและผลผลิตทางการเกษตรสำหรับการอบแห้งโดยใช้ระบบลมร้อนและการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาไม่เชิงเส้นของสมการอนุพันธ์ตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง ซึ่งระบบนี้มีจุดเด่นคือสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและยังช่วยรักษาคุณภาพของวัสดุหลังจากกระบวนการอบแห้ง

Salagnac et al. (2004) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหา 1 มิติเพื่อการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดและลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุพูนในระบบพิกัดฉาก ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยพิจารณาการกระจาย อุณหภูมิ ความชื้นและความดัน โดยใช้ทฤษฎีของ Lambert – Beer แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองด้วยคอนกรีต

Praveen et al. (2005) ทดลองอบแห้งหัวหอมโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเพื่อศึกษา อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการอบแห้ง ความหนาของวัสดุที่อบ อุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วของลมร้อน ซึ่งการทดลองนี้จะคำนึงถึงคุณภาพของวัสดุเป็นหลัก ผลจากการทดลองอบแห้งหัวหอม พบว่าการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน สามารถลดเวลาที่ใช้ใน

การอบแห้งรวมถึง คุณค่าทางอาหารและสีของหัวหอมหลังผ่านการอบมีคุณภาพดีกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ผดุงศักดิ์ (2546, 2547) ได้ทำการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและการทดลองโดยศึกษาถึงกระบวนการถ่ายเทความร้อนรวมถึงมวลสารที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งวัสดุพูน โดยกล่าวถึงระเบียบวิธีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้เทคนิคปริมาตรเฉลี่ย (volume average technique) เพื่อนำใช้ในการวิเคราะห์ในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของกระบวนการอบแห้ง

ผลจากการศึกษาของ Turner et al. (1991) พบว่าการอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟ นั้นทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ทำให้เกรเดียนของความดันมีอิทธิพลในการลดเวลาในกระบวนการอบแห้ง การถ่ายเทมวล อยู่ภายใต้อิทธิพลของเกรเดียนของความดันแก๊ส ซึ่งเป็นข้อแตกต่างของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนโดยทั่วไป งานวิจัยในช่วงแรกของ Jolly et al. (1989) และ Jansen et al. (1991) สร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิและความชื้นโดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลของความดัน ต่อมางานวิจัยของ Turner et al. (1991) ได้พิจารณาอิทธิพลของความดันแก๊สต่อการเคลื่อนย้ายมวลสารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทำให้ได้สมการการส่งถ่ายและสมการความดันรวมของแก๊ส ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของเกรเดียนของความดันแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟพัฒนาโดย Constant et al. (1996), Torringa et al. (1996) และ Ni et al. (1999)

กลไกทางกายภาพที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งนั้นมีความหลากหลาย เนื่องจากวัสดุพูนประกอบด้วย อนุภาคของแข็งกับของเหลว (free water) Bound Water ไขมัน และอากาศ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงอยู่ภายใต้อิทธิพลของการแพร่ หรือ แรงดันคาพิลลารี อิทธิพลของความชื้น อุณหภูมิและเกรเดียนของความดัน โดยกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัสดุและสมบัติของวัสดุ สภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง และวิธีการให้ความร้อน (external/volumetric) ในวิเคราะห์การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟนั้นของเหลว (free water) จะถูกพิจารณาภายใต้อิทธิพลของการแพร่ (Torrington et al., 1996 และ Adu et al., 1996) หรือแรงดันคาพิลลารี (Wei et al., 1985 Constant et al., 1996 Lian et al., 1997 Turner et al., 1998 และ Ni et al., 1999) หรือเกิดทั้งภายใต้อิทธิพลการแพร่ของไขมันและแรงดันคาพิลลารี (Chen et al., 1990 และ Constant et al., 1996) ต่อมา มีกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกลไกในการถ่ายเทมวลเชิงลึกพบว่า กลไกในการถ่ายเทมวลของเหลว (free water) และ Bound Water นั้นมี

ความแตกต่างกัน Turner et al. (1998) พิจารณาให้การถ่ายเทมวลของ Bound Water อยู่ภายใต้อิทธิพลของการแพร่ ในขณะที่ Chen et al. (1989) พิจารณาให้กลไกการถ่ายเทมวลของ Bound Water อยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงดันคาพิลลารี

การวิเคราะห์สมการปรากฏการณ์รวมสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งเพื่อศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิ และการถ่ายเทมวล จำเป็นต้องทราบข้อมูลของ แรงดันคาพิลลารี ค่าการซึมผ่าน ค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ การแพร่ของไอน้ำ การแพร่ของ Bound Water และค่าการนำความร้อน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทมวล ที่ต้องการในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการอบแห้ง ทั้งนี้ยังไม่มีการศึกษาข้อมูลดังที่กล่าวมาข้างต้นของวัสดุพูนแบบขึ้นมาก (hygroscopic porous material) โดยเฉพาะจำพวก อาหาร และผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้อมูลของแรงดันคาพิลลารี และการแพร่ของ Bound Water ในอาหาร และผลผลิตทางการเกษตร ค่าการซึมผ่าน ซึ่งข้อมูลที่ได้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากเป็นข้อมูลของ Single Phase เท่านั้น (Goedeken et al., 1993) ในกรณีที่มีข้อจำกัดของข้อมูลของค่าคงที่ หรือข้อมูลที่แตกต่างกันในแต่ละวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสามารถหาได้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาหรือบทความที่ได้รับการยอมรับ

สำหรับความรู้ทางทฤษฎีสำหรับกระบวนการอบแห้งนั้นมีการศึกษามากมายหลายทฤษฎี เช่น ทฤษฎีการแพร่ (diffusion theory) (Lewis, 1921 Sherwood, 1930 และ Cealgliske et al., 1937) ทฤษฎีการไหลคาพิลลารี (capillary flow theory) (Buckingham, 1907) และทฤษฎีการระเหยและกลั่นตัว (evaporation condensation theory) (Henry, 1939) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมุติฐานเดียวกันว่าวัสดุในกระบวนการอบแห้งคือวัสดุพูน (เป็นวัสดุที่มีสสารหลายสถานะปะปนกันอยู่ภายใน โดยมีโครงสร้างหลักเป็นวัสดุที่มีสถานะเป็นของแข็ง) และมีการพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Philip et al., 1957 Harmathy, 1969 Bager et al., 1973 และ Huang, 1979) โดยจุดเริ่มต้นของทฤษฎีเหล่านี้พัฒนามาจากทฤษฎีของลุยคอฟ (Luikov's Theory) และทฤษฎีของวิทเคอร์ (Whitaker's Theory)

Whitaker (1977) ทำการพิสูจน์สมการความสัมพันธ์แบบปริมาตรเฉลี่ยสำหรับของไหลสองสถานะในวัสดุพูน ซึ่งปริมาตรเฉลี่ยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสมการความสัมพันธ์เชิงมวลและพลังงานสำหรับสสารในแต่ละสถานะ (ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ) และสมการฟลักซ์ (สำหรับการแพร่ สมการคาพิลลารี และสมการการไหลแบบดาร์ซี) ซึ่งสัมพันธ์กับการส่งผ่านและสมมุติฐานมีความเข้าใจง่าย ตัวแปรสามารถนิยามได้ง่ายและวัดได้จริง

ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปรากฏการณ์ถ่ายเทมวลสารและความร้อนในการอบแห้งวัสดุพูนบนพื้นฐานทางทฤษฎีของวิเทเกอร์มากมาย โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานการคำนวณและการทดลองที่พิจารณาตัวแปรทางด้านการส่งผ่านความร้อนและมวลสาร ยิ่งไปกว่านั้นยังตำราเอกสารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารอีก เช่น Kaviany (1991), Nield et al. (1991) และ Mujumdar (1995) และสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้



ตารางที่ 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนด้วยกรรมวิธีไมโครเวฟ

Reference	Theory	Transport mechanism				Power estimation	Numerical method	Model validation	Power measurement
		Free water	Bound water	Vapor	Air				
Present study	Whitaker (implicitly)	Capillary flow	NA & Molecular diffusion	Capillary flow	Capillary flow + diffusion	Electric field analysis	FDM Control volume technique	Moisture and temperature were measured	Incident & reflected
Jun et al., 1999	Luikov	NA	NA	NA	NA	NA	FEM	Average moisture & temperature	Incident
Ni et al., 1999		Capillary flow	NA	Capillary flow + diffusion	Capillary flow + diffusion	Empirical	FDM Crank-Nicolson	Not conducted	NA
Turner et al., 1998	Whitaker (implicitly)	Capillary flow	Molecular diffusion	Capillary flow	Capillary flow + diffusion	Electric field analysis	FDM Control volume technique	Moisture	Incident
Lian et al., 1997	Philip & de Vries theory	Darcy's law	NA	Ficks law		Lambert law	FEM; Using commercial CFD software	Average moisture	Incident

Reference	Theory	Transport mechanism				Power estimation	Numerical method	Model validation	Power measurement
		Free water	Bound water	Vapor	Air				
Bajza, 1997	Luikov	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Moisture	Rated power of the oven
Constant et al., 1996	Whitaker (implicitly)	Capillary flow	NA	Capillary flow + diffusion	Capillary flow + diffusion	Empirical	FDM Control volume technique	Average moisture, temperature, and pressure	Incident & reflected
Torringa et al., 1996	Lumped diffusion	Fick's law	NA	NA	NA	Uniform throughout the sample	FDM	Moisture and temperature	Incident & reflected
Adu and Offen, 1996b	Lumped diffusion	Fick's law	NA	NA	NA	Uniform throughout the sample	FDM	Moisture and temperature	Incident & reflected
Constant et al., 1992	Whitaker (implicitly)	Capillary flow	NA	Capillary flow	Capillary flow + diffusion	Electric field analysis	FDM Control volume technique	Not conducted	NA
Turner and Jolly, 1991	Whitaker (implicitly)	Capillary flow	NA	Capillary flow	Capillary flow + diffusion	Electric field analysis	FDM Control volume technique	Not conducted	NA

Reference	Theory	Transport mechanism				Power estimation	Numerical method	Model validation	Power measurement
		Free water	Bound water	Vapor	Air				
Chen and Schmidt, 1990	Two region model	Capillary flow	NA	Capillary flow + diffusion	Capillary flow + diffusion	Uniform throughout the sample	Integral method	Moisture and temperature were measured	Incident & reflected
Jolly and Turner, 1989	Whitaker	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Chen and Pei, 1989	Two region model	Capillary flow	Darcy's law	Capillary flow + diffusion	Capillary flow + diffusion	NA	Moving FEM	Only hot-air drying tests were conducted	NA
Wei et al., 1985	Whitaker (implicitly)	Capillary flow	NA	Capillary flow	NA	Lambert law	FDM	Not conducted	NA
Ratanadecho P., 2002	Two region model, Whitaker	Capillary flow	NA & Molecular diffusion	Capillary flow	Capillary flow + diffusion	Electric field analysis	FDM Control volume technique	Moisture and temperature were measured	Incident & reflected

NA: Not Available or Not Applicable