

การศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารสำหรับปัญหา 1 มิติ โดยจะแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ออกเป็นสองกรณีใหญ่ คือ กรณีที่พิจารณาให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารซึ่งวิเคราะห์อยู่ภายใต้ระบบปิดตาย และในกรณีที่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายใต้ระบบเปิดทางกล โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองกรณิดังกล่าวนั้นในการวิเคราะห์นี้ได้พิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัว (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) จากนั้นทำการประยุกต์ให้อยู่ในรูปแบบของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยอาศัยหลักการของระเบียบระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) แล้วจึงทำการจัดสมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นให้สามารถหาคำตอบโดยใช้ระเบียบวิธี Newton-Raphson ได้ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลได้จากการทดลองและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างของวัสดุพูน (ขนาดอนุภาคหรือรูพูน) ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งความรู้ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการทำนายพฤติกรรมของการถ่ายเทมวลสารและความร้อน อุณหภูมิ ความดันและความชื้น ซึ่งสามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ความรู้ความเข้าใจในการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประยุกต์ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย

ผลจากงานวิจัยโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัว ภายใต้พลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรด: ระบบปิดตาย
2. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัว ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ: ระบบเปิดทางกล

### 7.1 สรุปผลการศึกษาการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรด: ระบบพิกัดฉาก

สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรดในระบบพิกัดฉาก นั้นได้ทำการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ได้ดังนี้

- 7.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (อิทธิพลของความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้น)
- 7.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ)
- 7.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรด (อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ)

โดยผลจากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรดในระบบพิกัดฉากสามารถสรุปเป็นภาพรวมได้ดังนี้

จากการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้นความดันคาพิลลารีจะมีอิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การถ่ายเทมวลสาร (การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) นั้นเป็นอิทธิพลจากการแพร่ของไอน้ำเป็นหลัก และเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่มีค่าต่ำ คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามากกว่า อนุภาคขนาดเล็กจะมีความดันคาพิลลารีที่สูงกว่าทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และพบว่าการใช้

คลื่นอินฟราเรดร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนค่อนข้างสม่ำเสมอ และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเนื่องจากอินฟราเรดจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นเป็นความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุ เพราะเป็นคลื่นที่มีย่านความถี่สูงซึ่งความยาวคลื่นสั้น ส่วนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) ดังนั้นเมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรดจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันนั้นเกิดได้ดีขึ้น ในส่วนของอิทธิพลของความดันรวมนั้นมีอิทธิพลน้อยมากต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งที่มีอุณหภูมิแพคเกจต่ำดังในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากกระบวนการอบแห้งได้ดำเนินไปถึงสภาวะที่อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่เกินจุดเดือด ( $100^{\circ}\text{C}$ ) หากมีการอบแห้งที่อุณหภูมิวัสดุที่ต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  จะสามารถตัดอิทธิพลของความดันรวมภายในวัสดุทิ้งได้ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวสำหรับการวิเคราะห์ในกรณีอื่น ๆ อีกด้วย

สำหรับกรณีสุดท้ายของการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในระบบพิกัดฉากคือ การใช้อินฟราเรดร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งวัสดุ ซึ่งถือเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ เพราะคลื่นอินฟราเรดมีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นไมโครเวฟ จึงช่วยให้เกิดความร้อนที่ผิวควบคู่กับการเกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุ

## 7.2 สรุปผลการศึกษากาการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ: ระบบพิกัดทรงกลม

สำหรับงานวิจัยในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การศึกษากาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระบบพิกัดทรงกลมภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยที่งานวิจัยชิ้นนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ถ่ายความร้อนและมวลสารได้ใกล้เคียงมากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

ซึ่งงานวิจัยส่วนนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ ในระบบพิกัดทรงกลม โดยในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพูน จากนั้นทำการประยุกต์ให้อยู่ในรูปแบบของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยอาศัยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) ซึ่งความรู้ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ก่อให้เกิดองค์ความรู้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่เป็นทรงกลมภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดในการศึกษานี้จะถูกตรวจสอบความถูกต้องและเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเพิ่มความมั่นใจต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งความรู้ที่ได้จากงานวิจัยทั้ง 2 ส่วนในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการทำนายพฤติกรรมกาการถ่ายเทมวลสารและความร้อน อุณหภูมิ ความดันและความชื้น ซึ่งสามารถนำไปควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และทำการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ความรู้ความเข้าใจในการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประยุกต์ด้านการออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นได้ในอนาคต

ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่

1. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟ (อิทธิพลของความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้น);การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 10-11 ตุลาคม 2548, ST-098, หน้า 113
2. การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ); การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, จังหวัดนครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2549, TSF011, หน้า 361
3. การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ (อิทธิพลของความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้น); วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (Accepted)
4. Theoretical Analysis of Heat-Mass Transport and Pressure in Unsaturated Porous Material : In Case of Providing the Combination of Infrared and Microwave Energy (Influence of Particle Size, Electric Field Intensity and Frequency); Prepare to submit in International Journal of Heat and Mass Transfer

### แนวทางการวิจัยในอนาคต

จากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน ภายใต้พลังงานไมโครเวฟที่ผ่านมา พบประเด็นปัญหาที่น่าสนใจเพิ่มเติมมากมายในการวิจัยและสามารถเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคตดังต่อไปนี้

1. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมิตัวโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นอินฟราเรดกลาง กับอินฟราเรดไกลเพื่อศึกษาอิทธิพลรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นต่าง ๆ
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุชีวภาพโดยใช้ระบบไมโครเวฟ-สเปาเต็ดเบดสำหรับระบบพิกัดทรงกลม
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุชีวภาพโดยใช้ระบบไมโครเวฟ-สเปาเต็ดเบดร่วมกับอินฟราเรดสำหรับระบบพิกัดทรงกลม
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นประโยชน์ในการทำนายพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารและความร้อน อุณหภูมิ ความดันและความชื้น ในกระบวนการอบแห้งสำหรับระบบอื่น ๆ
5. ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อิมิตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟแบบ 1 มิติ ที่มีอยู่เดิมเป็นแบบจำลองแบบ 2 มิติ รวมไปถึงการขยายผลไปสู่การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งกับวัสดุชีวภาพแบบ 2 มิติด้วย
6. เผยแพร่ความรู้ที่ได้ศึกษา โดยการตีพิมพ์ในวารสารต่าง ๆ ทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ เพื่อผลที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นความรู้พื้นฐาน หรือทำการศึกษาต่อในระดับต่อไป