

การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน

I หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการ อบแห้งวัสดุพูน

Analysis of Drying Process in Porous Media

(I Principle of Heat and Mass Transfer in Porous Media for Drying Process)

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้จะเน้นการนำเสนอถึงหลักการพื้นฐานทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนย้ายมวลสาร (ความร้อน) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน โดยหลักการพื้นฐานที่ได้กล่าวในที่สุดสามารถนำไปวิเคราะห์กระบวนการอื่นๆ ที่ต้องอาศัยองค์ความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร เช่นกระบวนการอบแห้งแบบแข็ง (freeze drying) กระบวนการทำละลาย (melting) และกระบวนการอบแห้งโดยใช้คลินไมโครไฟฟ์ เป็นต้น หลักการพื้นฐานทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนย้ายมวลสารที่ได้นำเสนอในที่นี้ จะนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจำนวนค่าสัต嚏ของกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนที่สภาวะต่างๆ ดังแสดงในบทความวิจัยอีกฉบับ [1]

ABSTRACT

This paper presents a fundamental of heat and mass transfer during conventional drying process in porous media. A mechanistic approach was adopted that extends to other processes based formulation of coupled heat and mass transfer, i.e., freeze drying, melting and microwave drying. Based on the fundamental phenomena presented here, a fully coupled analysis of drying kinetics in porous media will be then presented in next paper [1]

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา รายงานการวิจัยในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูน (porous media) ในระดับ นานาชาติยังจำกัดอยู่กับวัสดุ พูนชนิดอิมตัว (saturated porous media) ในขณะที่ การวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนชนิดไม่ อิมตัว (unsaturated porous media) ยังมีการวิจัยกันน้อยโดยเฉพาะ การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพูนในระดับจุลภาค ด้วยเหตุผลของความซับซ้อนในปฏิกิริยาณ อันเนื่องมาจาก การเปลี่ยนสถานะของสารหลาຍชนิด คุณสมบัติด้านความร้อน

ประสิทธิผลของวัสดุพูน (effective thermal property) รวมถึงคุณสมบัติด้านชลศาสตร์ (hydrodynamic property) และคุณลักษณะการเคลื่อนย้ายมวลสาร (ของเหลวและแก๊ส) ในรูปแบบที่ผ่านมาข้างมีการศึกษาอย่างเป็นระบบ นอกเหนือค่าสัต嚏ดังกล่าวที่ต้องอาศัยองค์ความรู้ในหลายสาขาวิชาเข้าด้วยกัน กล่าวคือ ความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร กลศาสตร์ ของไอลในระบบที่มีความซับซ้อน และวัสดุศาสตร์ รวมจนถึงระเบียบวิธีซึ่งคำนวณทางตัวเลขขั้นสูง เพื่อหาคำตอบของปัญหาที่มีความเป็นไปได้เชิงเส้นสูง (strongly non-linear problem)

และการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำและมีสมรรถนะสูง

ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ทำให้การวิจัยในสาขาดังกล่าวข้างต้นนี้ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย ในความเป็นจริงแล้ว ประเทศไทย พัฒนาแล้วจะให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนาในสาขานี้เป็นอันมาก การวิจัยในสาขาวิชาถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพื้นเมืองอยู่ในภาคใต้ของประเทศไทย ทั้งนี้ เพราะวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้งานในทางวิศวกรรมจัดเป็นวัสดุพูน กล่าวคือตัววัสดุประกอบด้วย 3 สถานะ คือ สถานะของแก๊สหรือ solid matrix และของเหลวและก๊าซ ที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพรุน (void) เป็นที่ทราบกันดีว่าในทางวิศวกรรมแล้ววัสดุส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุพูน ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินในงานวิศวกรรมปูผิว, คอนกรีตในงานวิศวกรรมโยธา Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะ, catalyst ในงานวิศวกรรมเคมี, ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกลและเคมี, เม็ดเยื่อต่างๆ ผิว หรือ membrane ในงานวิศวกรรมชีวภาพ และการแพทย์ รวมจนถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ในงานวิศวกรรมการเกษตร จึงพูดได้ว่าความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนมีความสำคัญต่องานวิศวกรรมทุกสาขา ประเทศไทยยังขาดแคลนนักวิจัยในสาขาวิชาถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนชนิดอื่นๆและชนิดใหม่อีกด้วย รวมถึง เทคโนโลยี วัสดุพูนในด้านอื่นๆ อาทิ เช่น กระบวนการทำลาย(melting process) และกระบวนการแข็งแข็ง(freezing process) เป็นต้น

ต่อไปนี้จะแสดงถึงรายงานผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆท่านเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการอบแห้งในช่วงเวลาที่ผ่านมา

Ceaglske and Hougren [2] ได้สมมติว่าการเคลื่อนตัวของน้ำในวัสดุพูนอยู่ภายใต้อิทธิพลของความดันแคปิลารี่เป็นสำคัญ ต่อมาก Sherwood [3] ได้ใช้กลไกการถ่ายเทมวลความชื้นภายในตัววัสดุพูน ที่มีความดันแคปิลารี่ สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติของกระบวนการอบแห้งดินเหนียว ในงานการนิ่งมากลไกการถ่ายเทมวลสารภายในอันเนื่องมาจากเกรเดียนของความดันร้อนที่ได้ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งจำพวกอาหารและผลิตภัณฑ์ไม้ รวมจนถึง Catalyst ในงานวิศวกรรมเคมี โดยทั้งนี้อุณหภูมิภายในวัสดุตัวอย่างเพิ่มขึ้นจนเกินจุดเดือดของน้ำ ไอน้ำภายใน

วัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการเดินของความดันรวมเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากเกรเดียนของความดันอย่างอ่อนน้ำ ความดันรวมยังเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนความชื้นออกจากวัสดุ ในการนี้กระบวนการอบแห้งภายใต้สภาพสุญญากาศที่มีอุณหภูมิปานกลาง และในการนี้กระบวนการอบแห้งระบบสัมผัสถีร์อุณหภูมิสูง

Moynen and Degiovanni [4] ได้พิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบ 1 มิติสำหรับกระบวนการอบแห้งโดยคำนึงถึงผลกระทบความดันรวมที่มีต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นในกระบวนการการทำนายเชิงทฤษฎีได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง สำหรับกระบวนการอบแห้งแห่งหนึ่งค่อนกรีตบางโดยใช้ไอกอง ซึ่งผลที่ได้จากการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

Cross et al [5] และ Gibson et al [6] ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีในกระบวนการอบแห้งอนุภาคเหล็ก โดยพิจารณาการเดินของความดันที่เกิดขึ้นเป็นกลไกหลัก ผลลัพธ์ที่ได้จากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า porosity มีอิทธิพลต่อการเดินสูงสุดของความดัน พบว่าการเดินของความดันจะไม่เกิดขึ้นในวัสดุหาก porosity มีค่ามากกว่า 0.3 ผลการสูปน้ำได้รับการสนับสนุนจากประสบการณ์ของบริษัทผู้ผลิต อายุโรงน้ำมีการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันความถูกต้องในรายงานผลดังกล่าว

นิยามของกระบวนการอบแห้งในวัสดุพูน คือกระบวนการที่ทำการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากวัสดุชื้นที่นำมาอบแห้ง หรือที่เรียกว่ากระบวนการวิจัยว่าวัสดุพูนซึ่งประกอบด้วยสารที่เป็นส่วนประกอบของของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยอาศัยพลังงานในรูปความร้อนในรูปแบบต่างๆ โดยปกติวิธีการอบแห้งสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการให้พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าไปในวัสดุชื้น การให้พลังงานความร้อนโดยวิธีธรรมด้าทั่วไป (conventional method) ซึ่งอาศัยกลไกของโถมจากการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญก็คือการนำความร้อน การพากความร้อนและ การแพร่งสีความร้อน อาทิเช่น การอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง การอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้ไอกัน เป็นต้น เนื่องจากการอบแห้งโดยวิธีธรรมด้านั้น ความร้อนที่ป้อนให้จะสัมผัสเฉพาะผิวน้ำหน้าวัสดุที่นำมาอบแห้ง ทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างไม่ส่งเสริมทำให้ความแห้งเป็นไป

ไม่ส่งมาเสมอ ตำแหน่งที่วัดสุดสัมผัสร่วมด้วยตรงอาจจะเกิด การเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ลำบาก

ปัจจัยนี้มีกระบวนการออบแห้งใหม่หลายวิธีที่สามารถเพิ่ม คุณภาพและมูลค่าเพิ่มของผลิตภัณฑ์ เช่นกระบวนการออบแห้ง โดยใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้จะมีคุณลักษณะ ตรงกันข้ามกับการให้พลังงานความร้อนแบบธรรมดា (การนำ ความร้อนและการ พากความร้อน) ซึ่งความร้อนจะเริ่มป้อนให้ที่ผิว ของวัสดุ ก่อนที่จะถ่ายเทไปยังชั้นเนื้อในของวัสดุ ในขณะการให้ พลังงานความร้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ความร้อนจะเกิดขึ้น ภายในเนื้อวัสดุ (internal heat generation) แล้วจึงค่อย ถ่ายเทไปทั่วเนื้อวัสดุทั้งก้อน กระบวนการออบแห้งโดยใช้พลังงาน คลื่นไมโครเวฟเป็นกระบวนการสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและ เหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้เกี่ยวกับกระบวนการออบแห้งในผลิต ภัณฑ์เกษตรกรรมของเกษตรกรในประเทศไทยในฐานะเป็น แหล่งที่มีผลผลิตด้านเกษตรรายใหญ่ของโลก ข้อดีของกระบวนการ ออบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟมีหลายประการดังนี้ดือ (Ratanadecho et al. [7], Ratanadecho et al. [8] and Ratanadecho et al. [9]).

- เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านทะลุเข้าไปใน วัสดุที่นำมาออบแห้ง ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุที่จะกระจาย สม่ำเสมอทำให้ความแห้งเป็นไปอย่างส่ง่่าเมื่อ ในทุกตำแหน่ง ด้วยเหตุนี้ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ง่าย

- เวลาที่ใช้ในการกระบวนการมีระยะเวลาสั้น คือประมาณ หนึ่งในสี่ของการออบแห้งโดยวิธีธรรมดា

- รักษาคุณภาพดั้งเดิมของวัสดุที่นำมาอบเปลี่ยนแปลง ไว้ อาทิเช่น รูปทรง สี กลิ่น และน้ำหนัก

- มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง กล่าวคือประมาณ 60% - 70% ในขณะที่ใช้กระบวนการออบแห้งแบบวิธีธรรมดามี ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน แค่ประมาณ 20% - 30%

- เนื่องจากไม่มีการบล่อยคั่น ไอเสียออกมากในระหว่าง กระบวนการ ทำให้ไม่มีปัญหากับสิ่งแวดล้อม

- เนื่องจากในกระบวนการมีชั้นส่วนทำงานที่มีลักษณะ เคลื่อนไหวมีน้อย ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง

- เนื่องจากในกระบวนการมีชั้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็ก ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย

- ในทางปฏิบัติอาจจะมีการใช้งานร่วมกันระหว่าง กระบวนการออบแห้งโดยวิธีธรรมดากับกระบวนการที่ใช้พลังงาน คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจากการยงานวิจัยและการใช้งานจริงในภาค อุตสาหกรรมที่พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

วัตถุประสงค์ที่ความต้องการนี้เพื่อจะนำเสนอด้วยผลการ ที่พัฒนาทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อน ย้ายมวลสาร ในกระบวนการออบแห้งวัสดุพูนเนื่องจากเป็น กระบวนการที่มีบทบาทอย่างสูงในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ทางการ เกษตรในประเทศไทย

2. กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน วัสดุพูน

เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างแท้จริงในกระบวนการออบ แห้ง การวิเคราะห์ในเชิงลึกของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและ มวลสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพูนในระหว่างกระบวนการออบแห้งถือว่า เป็นสิ่งสำคัญ ก่อนที่จะไปออกแบบระบบที่ใช้งานในทางปฏิบัติ กระบวนการออบแห้งวัสดุ จะคำนึงถึงเกี่ยวกับกระบวนการเมือง ต้นที่เกิดขึ้นพร้อมกัน สองกระบวนการ นั่นก็คือ

- กระบวนการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ ความร้อนที่ ถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อม (เช่น ลมร้อนและไอน้ำเป็นต้น) ไปยังเนื้อ วัสดุ เพื่อทำการเคลื่อนย้ายความชื้นและระเหยความชื้นที่มีอยู่

- กระบวนการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือ มวลสารที่ถ่าย เทจากอยู่ในรูปของเหลวหรือไอ ภายในเนื้อวัสดุและที่ผิวของวัสดุ แฟคเตอร์สำคัญที่ครอบคลุมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ กระบวนการเพื่อหาปรกติการณ์ต่างๆในกระบวนการ เช่น อัตรา อบแห้งและการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อ วัสดุซึ่งจะพิจารณาให้เป็นพั้งก์ชันของเวลา

ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านที่พยายามศึกษาถึงปรกติ การณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทมวลสาร ใน กระบวนการออบแห้งวัสดุพูน นับตั้งแต่นักวิจัยในท่านแรกๆ เช่น Lewis [10] ที่ได้พยายามเสนอแนวคิดใหม่ๆในการวิเคราะห์ กระบวนการออบแห้งในวัสดุของแข็ง

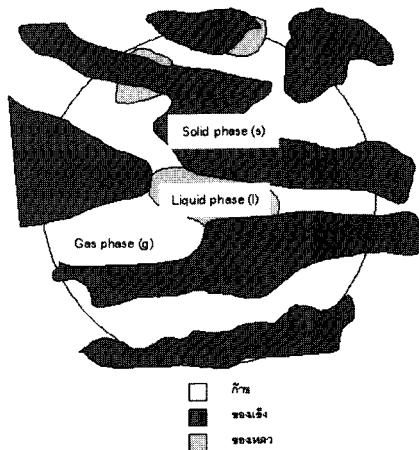
เมื่อที่ทราบกันดีว่าเมื่อทำการออบแห้งวัสดุพูนที่ไม่อิ่มน้ำ จะต้องเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนตัวของ ความชื้นซึ่งประกอบไปด้วยของเหลว ไอน้ำและอากาศ ซึ่งจะเกิด ขึ้นพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของกระบวนการ

การอบแห้งจะมีความซับซ้อนเป็นอันมาก ซึ่งเนื่องมาจากการควบคุมภัยสิ่งแวดล้อมที่เป็นลักษณะไม่เชิงเส้น รวมถึงเงื่อนไขของเขตที่ซับซ้อนกว่าการเผาทั่วไป อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเนื่องจากมีความสามารถและสมรรถนะในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มีสูงมาก ทำให้สามารถใช้ช่วยในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทฤษฎีต่างๆทางด้านการถ่ายทอดความร้อนและมวลสารก็มีการพัฒนาเป็นอย่างมากเมื่อมีคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงมาช่วยในการคำนวณ

3. รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูน

เป็นที่ทราบกันดีว่าในทางวิศวกรรมแล้ววัสดุส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุพูนกล่าวคือตัววัสดุประกอบด้วยสารที่มี 3 สถานะคือ สถานะของแข็ง (solid phase) หรือ solid matrix ของเหลว (liquid phase) และก๊าซ (gas phase) ที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพูน (void) ดังแสดงในรูปที่ 1

ตัวอย่างวัสดุพูนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและหินหรือในงานวิศวกรรมปูรูป, Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะ, catalyst ในงานวิศวกรรมเคมี, ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกลและเคมี, เนื้อเยื่อต่างๆ ผ้า หรือ membrane ในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมจนถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมการเกษตร



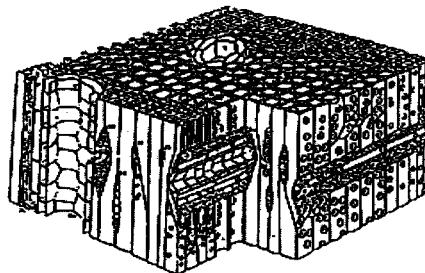
รูปที่ 1 โครงสร้างของวัสดุพูนทั่วไป

เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างของวัสดุพูน เราสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบใหญ่ๆ ชนิดแรกของเหลวหรือความชื้นจะเคลื่อนตัวอยู่รอบนอกอนุภาคของแข็งหรือ solid matrices ไปตามช่องว่าง (pores) ที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบของผิวอนุภาคของแข็ง โดยที่ความชื้นดังกล่าวไม่สามารถส่งผ่านหรือถูกกีดขวางได้ในชั้นผิวของอนุภาคของแข็งได้ ดังนั้นเราจะเรียกวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบไม่ซึมน้ำ (nonhygroscopic porous media) หากพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบร่วมกับระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดรัศมีเล็กมาก ประมาณ 0-1 μm เราจะเรียกวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบซึมน้ำ (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพูนบางชนิด เช่นวัสดุชีวภาพ เราไม่สามารถที่จะแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจน ยกตัวอย่างเช่น เนื้อผ้าทั้งสองในรูปที่ 2 ซึ่งจะมีโครงสร้างเนื้อวัสดุที่ซับซ้อนที่เรียกว่าโครงสร้างวัสดุพูน

มีความลักษณะน้อย โครงสร้างของวัสดุพูนชนิดที่สอง ความชื้นจะยึดอยู่กับโครงสร้างของอนุภาคของแข็งภายใต้พันธะทางเคมีและพิสิกส์ ซึ่งจะเป็นพันธะที่สำคัญในการหน่วงให้ความชื้นคงอยู่ในโครงสร้างมีพิจารณาโครงสร้างของวัสดุพูนชนิดนี้ พบร่วมกับช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งมีขนาดรัศมีเล็กมาก ประมาณ 0-1 μm เราจะเรียกวัสดุพูนชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบซึมน้ำ (hygroscopic porous media) ซึ่งกรณีนี้จะรวมถึงวัสดุพูนบางชนิด เช่นวัสดุชีวภาพ เราไม่สามารถที่จะแบ่งแยกลักษณะโครงสร้างได้ชัดเจน ยกตัวอย่างเช่น เนื้อผ้าทั้งสองในรูปที่ 2 ซึ่งจะมีโครงสร้างเนื้อวัสดุที่ซับซ้อนที่เรียกว่าโครงสร้างวัสดุพูน

แบบเซลลูลาร์-แคปปิลารี่ (cellular capillary) ซึ่งในกรณีนี้การเคลื่อนที่ของความชื้นจะไม่เสถียรภาพและการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

จะทำให้ความซับซ้อนกว่าในการณ์แรก

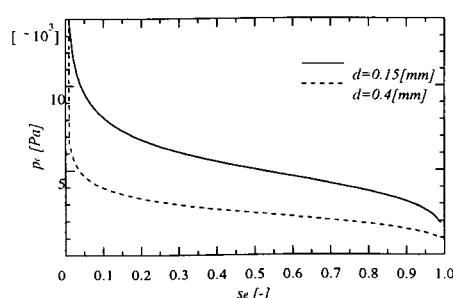


รูปที่ 2 โครงสร้างวัสดุพูนแบบเซลลูลาร์-แคปปิลารี่ (cellular capillary)

วัสดุพูนในการณ์แรกนั้นเป็นวัสดุพูนแบบไม่มีช่องมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเรียกวัสดุชนิดนี้ว่า วัสดุพูนแบบแคปปิลารี่ (capillary porous media) ซึ่งของเหลวหรือความชื้นสามารถเคลื่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพูน (รูปที่ 4) อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความดัน แคปปิลารี่ (capillary pressure) โดยที่ความดันแคปปิลารี่นี้จะเป็นพังค์ชั่นของแรงดึงดัว มุกที่สัมผัส และลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพูนเป็นสำคัญ โดยปกติความดันแคปปิลารี่สามารถให้ได้ตามนี้คือ เมื่อของไหหลังชนิดที่ไม่ผสมกัน (immiscible fluids) เข้ามายังอากาศ เป็นต้น เกิดการสัมผัสกันในช่องว่างของวัสดุพูน ความไม่ต่อเนื่องกันของความดันที่เกิดขึ้นต่อผลของการดึงดูดของไหหลังส่องชนิดออกจากกัน ความดันที่แตกต่างกันตลอดช่วงรอยต่อเรียกว่า ความดันแคปปิลารี่ (p_c) ซึ่งมีข้อบ่งบอกว่าความดันแคปปิลารี่ (p_c) ได้เพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัอมตัวของของไหหลังที่มีสถานะแห้งมากขึ้น แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับประวัติของความอัอมตัวของวัสดุนั้นๆด้วย รูปที่ (3) แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันแคปปิลารี่ภายในวัสดุพูนและคุณสมบัติของของไหหลังที่สภาวะต่างๆ (Ratanadecho et al. [7]).

$$p_c = p - p_l$$

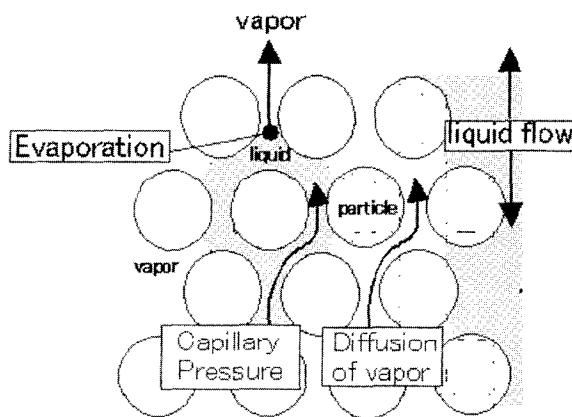
เมื่อ p คือความดันในของไหหลังที่มีสถานะแห้ง (non-wetting phase) เช่นอากาศ ส่วน p_l คือความดันในของไหหลังที่มีสถานะเปียก (wetting phase) ที่เกิดขึ้นในตัวแหน่งที่เราสนใจในวัสดุพูน ความดันแคปปิลารี่มีคุณสมบัติที่สมดุล และสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดึงดูดระหว่างสถานะของของไหหลังสองพบร้าค่าความดันแคปปิลารี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัอมตัวของของไหหลังที่มีสถานะแห้งมากขึ้น แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับประวัติของความอัอมตัวของวัสดุนั้นๆด้วย รูปที่ (3) แสดงข้อมูลจากการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันแคปปิลารี่ภายในวัสดุพูนและคุณสมบัติของของไหหลังที่สภาวะต่างๆ (Ratanadecho et al. [7]).



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันแคปปิลารี่ภายในวัสดุพูนและคุณสมบัติของของไห

ส่วนกลไกที่สำคัญอีกหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของไอ้น้ำคืออ่อนตัวในช่องว่างที่เป็นรูพรุน เรายังก้าวผลของการแพร่กระจาย ไอ้น้ำ (vapor diffusion force) ซึ่งสามารถอธิบายอยู่

ในกฎของฟิกส์ (Fick's law) สำหรับรูปที่ 4 แสดงถึงกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทมวลสารในรูพรุนแบบแคปิปิลารี

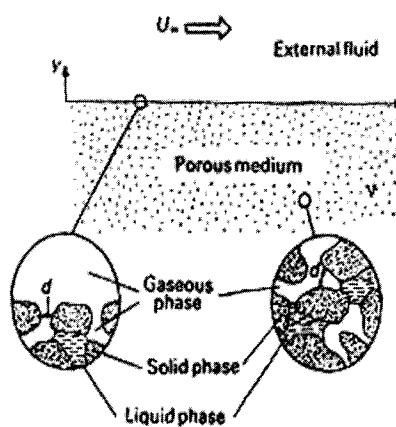


รูปที่ 4 กระบวนการถ่ายเทมวลสารในรูพรุน

4. กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอ่อนตัวในรูพรุน

จากหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอ่อนตัวในรูพรุนแบบแคปิปิลารี ซึ่งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอิทธิพลจากความดันแคปิปิลารีถือว่าเป็น

กลไกหลักในการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นออกจากโครงสร้างรูพรุน แต่ในรูพรุนทั่วไปในทางปฏิบัติมักจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีหลายกลไกที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายมวลความชื้น หัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงกลไกต่างๆ เหล่านี้



รูปที่ 5 ไดอะแกรมของกระบวนการอ่อนตัวในรูพรุน

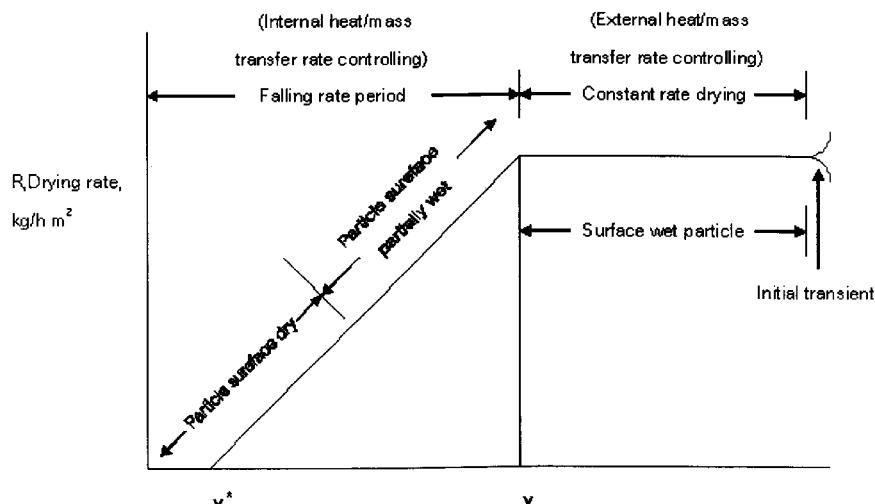
จากูปที่ 5 เมื่อตัวอย่างวัสดุพูนที่เปียกชื้นผ่านกระบวนการ การอบแห้งภายใต้สภาวะภายนอกคงที่ กล่าวคือ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วอากาศจะรักษาให้คงที่ตลอดช่วงการ ทดสอบ การเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่ผิวน้ำหน้าที่เป็น ผิวเปิดภายใต้อิทธิพลของกลไกต่างๆ ก็จะเกิดขึ้น

ลักษณะการเคลื่อนตัวของความชื้นในวัสดุพูนในระหว่าง สอนมิติที่เราสามารถลังเลได้จากูปที่ 2 นี้จะมีกลไกหลาย อย่างเกิดขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัววัสดุ ชนิดของ ลักษณะการแก้ตัวของความชื้น ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ อุณหภูมิและความตันภายในวัสดุ

กลไกต่างๆ ที่ควบคุมการเคลื่อนตัวของความชื้นสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. แรงดันแคบปิลารี
2. การแพร่กระจายตัว (diffusion) เนื่องจากความแตกต่างของ ความเข้มข้นของสาร
3. การเปลี่ยนสถานะของสารกล่าวคือ เกิดการระเหย และ การกลั่นตัว (evaporation-condensation mechanism) ภาย ในช่องว่าง

พิจารณาโดย大概ในรูปที่ 6 เพื่อกรอให้เกิดความสะอาดในการทำความสะอาดให้ในปรากฏการณ์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น



X, Moisture content, kg water/kg dry solid

รูปที่ 6 ความเวลาของกระบวนการอบแห้งและกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสาร

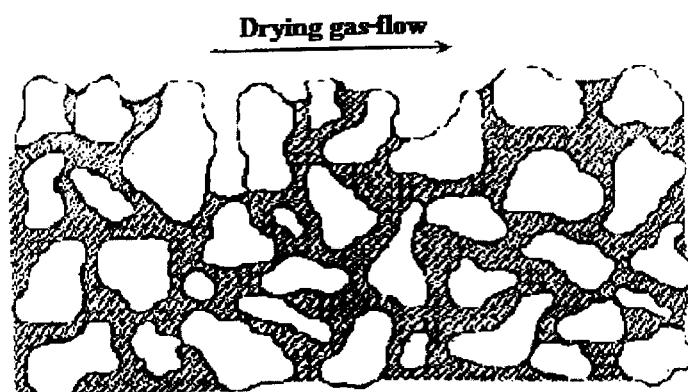
ไดอะแกรมนี้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการรอบแห้งซึ่งสามารถแบ่งแยกออกเป็นสองกระบวนการเวลาใหญ่ๆ กล่าวคือ ที่คำว่าอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ในที่นี้ อัตราการระเหยของไอน้ำที่ออกจากผิวน้ำจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำ (ของเหลว) จากภายในวัสดุพูนที่มาเติมเต็มที่ผิวน้ำ ช่วงปลายของคำว่าเวลาจะสังเกตได้จากความชื้นภายในวัสดุซึ่งค่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content, x_c) ซึ่งค่าความชื้นวิกฤตินี้จะขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดโครงสร้างวัสดุ ที่มีความชื้นภายนอก ต่อไปนี้จากค่าความชื้นวิกฤติที่จะเป็นคำว่าเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) ซึ่งโดยปกติแล้วคำว่าเวลาที่จะกินระยะเวลามากกว่าคำว่าเวลาอัตราการอบแห้งคงที่ ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้คุณย์ ซึ่งในกรณีนี้จะมีความชื้นที่มีอยู่อย่างมากค่าหนึ่งที่ยังคงอยู่ภายใต้สภาพการอบแห้ง ค่าความชื้นนี้เรียกว่าค่าความชื้นสมดุลย์ (equilibrium moisture content)

อย่างไรก็ตามจุดสำคัญในไดอะแกรมที่แสดงคุณสมบัติของการอบแห้งอาจอธิบายได้เป็นเช่นนี้ด้วยๆ ดังนี้

1. ในคำว่าอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) เมื่อวัสดุมีความชื้นสูงมากๆ อัตราการอบแห้งโดยปกติจะถูกควบคุมโดยจากอิทธิพลของสภาพภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของลม ความตันรวม และความตันย่อยของไอน้ำ ที่มีต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง หากสภาพรอบนอกถูกควบคุมให้คงที่ ในคำว่าเวลาที่อัตราการระเหยของไอน้ำที่ออกจากผิวน้ำจะเท่ากับ

อัตราการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัสดุพูนที่มาเติมเต็มที่ผิวน้ำ ดังนั้นทำให้มีพิล์มน้ำของช่องเหลวบางๆ ปกคลุมที่ผิวน้ำวัสดุ ตลอดเวลา พารามิเตอร์ที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในคำว่าเวลา นี้ คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทเมล็ดสารที่ออกจากผิววัสดุ การถ่ายเทเมล็ดสารในขณะช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้จะเกี่ยวข้องกับการเพร่กระจายตัวของไอน้ำออกจากผิววัสดุ (surface diffusion) เป็นที่ทราบกันดีว่าหากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำซึ่งถ่ายเทมาจากลมร้อน อุณหภูมิของผิวน้ำวัสดุที่สามารถประมวลได้ด้วยอุณหภูมิ平均เป็นยกในคำว่าการคำนวณอัตราการอบแห้งสามารถทำได้ง่าย โดยปกติการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (force convection) จะใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการในคำว่าเวลาตั้งแต่ล่า

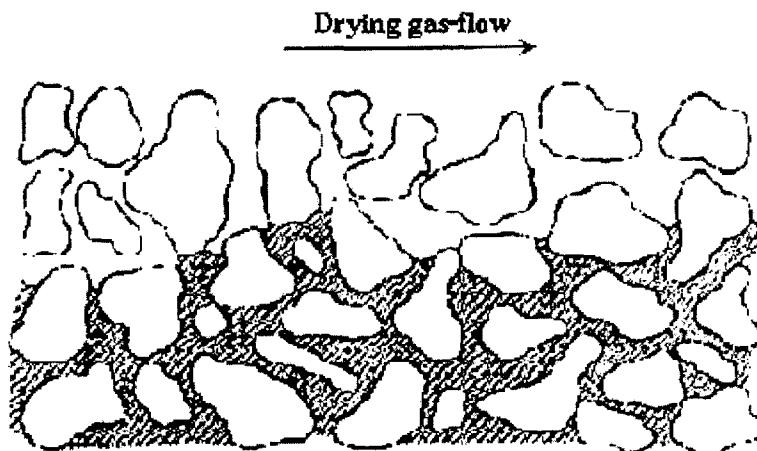
2. คำว่าเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เมื่อกระบวนการการอบแห้งดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ เมื่อความชื้นมีค่าเข้าสู่ความชื้นวิกฤติ ซึ่งค่าของความชื้นวิกฤตินี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในโครงสร้างที่แตกต่างกันของวัสดุเป็นสำคัญ น้ำที่เคลื่อนตัวไปบังผิวน้ำภายในตัววัสดุจะถูกดูดซึ�อมโดยอิทธิพลของความดันแคนบีลาร์มีไม่เพียงพอที่จะไปเติมเต็มแทนที่น้ำที่เพิ่งระเหยออกไป ทำให้มีพิล์มน้ำของเหลวบางๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวน้ำเกิดการแยกตัวในบางจุด ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ไดอะแกรมแสดงปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (first falling rate period)

ในคานเวลาที่อัตราการอบแห้งโดยรวมจะเริ่มลดลง บางครั้งอาจ มีการเรียกว่าช่วงคานเวลาที่ควบคุมโดยกระบวนการอัตราการอบแห้งลดลงระยะแรก (first falling rate period) หลังจากกระบวนการอบแห้ง ดำเนินต่อไป ชั้นของความแห้งจะเริ่มก่อตัวขึ้นอย่างสมมูลน์ที่ผิว ของวัสดุที่นำมาอบแห้ง แล้วค่อยๆ เคลื่อนตัวขึ้นไปในเนื้อวัสดุ ดังแสดงใน รูปที่ 8 เริ่มน้ำเรียกว่าช่วงคานเวลาที่ ว่า คานเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (second falling rate period) ซึ่งการระเหยตัวจะเกิดขึ้นที่ผิวroyต่อระหว่างชั้นที่ แห้งกับชั้นที่เปียกซึ่งมีความชื้นอยู่ ผิวroyต้อนนี้นิยมเรียกว่า กันโดยทั่วไปว่า ผิวของกระบวนการระเหย (evaporation Front) หรือ ผิวของกระบวนการแห้ง (drying Front) หรือขอบเขตของการ

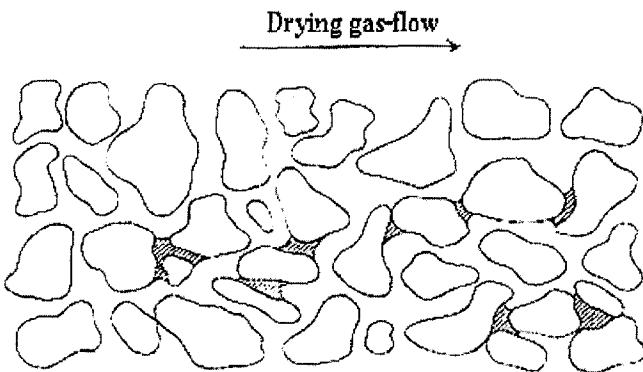
เคลื่อนที่ (moving boundary) ซึ่งนั้นจะเริ่มเคลื่อนตัวไปบัน คานเวลาของกระบวนการแห้ง การระเหยตัวจะเกิดขึ้นที่ผิวของการ ระเหย สามารถคำนวณได้จากกฎของ Kelvin ที่อุณหภูมิเดียว ตำแหน่งนั้นและที่ความดันไอกลมีตัว ซึ่งในคานเวลาที่ อัตราการ เคลื่อนตัวของมวลสารหรือความชื้นภายในจะเป็นพารามิเตอร์ที่ สำคัญในการควบคุมกระบวนการ คานเวลาที่อัตราการอบแห้ง ลดลงนี้อาจจะสังเกตได้จากการที่อัตราการถ่ายเทมวลสารที่ผิว และความดันไอกลมีวัสดุที่ลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามใน คานเวลาดังกล่าวนี้จะมีความยุ่งยากที่จะสังเกตได้จากการทดลอง และเขียนกันกับวิเคราะห์ที่ใช้ทฤษฎีอันนี้องมาจากการชับช้อน ปรากฏการณ์ของโครงสร้างวัสดุ



รูปที่ 8 ไดอะแกรมแสดงปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง (second falling rate period)

ช่วงปลายของคานเวลาอัตราการอบแห้งลดลงระยะที่สอง จะสังเกตว่าความชื้นภายในวัสดุจะเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยมากใน ช่วงว่างหรือพรุนที่มีขนาดเล็กๆ ที่กระจายอยู่ตลอดช่วงของวัสดุ

ตัวอย่าง ดังที่แสดงในรูปที่ 9 ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการนี้ อัตราการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในการนี้ความชื้นที่มีอยู่เรา เรียกว่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)



รูปที่ 9 ไดอะแกรมแสดงปรากฏการณ์ที่อัตราการอบแห้งขั้นสุดท้าย (end stage of drying)

5. บทสรุป

สิ่งที่สำคัญของการวิเคราะห์กระบวนการอัตราการอบแห้งในเชิงทฤษฎีคือการทราบกลไกหลักที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมกระบวนการ เพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับปรากฏการณ์นั้น ปกติกระบวนการอัตราการอบแห้งจะถูกแบ่งเป็นสองช่วงเวลา คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง (falling rate period) ในกรณีแรกอัตราการอบแห้งที่ได้จากอิทธิพลของสภาวะภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ ความดันรวม และความดันย่อยของไออกซิเจน ที่มีต่อวัสดุที่นำมาอบแห้ง กลไกที่ควบคุมกระบวนการอัตราการอบแห้งในช่วงเวลาที่ 1 คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับตัววัสดุหรือการถ่ายเทมวลสารที่ออกจากผิววัสดุ การถ่ายเทมวลสารในขณะช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นี้จะเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของไอน้ำออกจากผิววัสดุ (surface diffusion)

ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง อัตราการอบแห้งจะลดลงตามเวลาที่ผ่านไปและอัตราการถ่ายเทมวลสารภายในจะเป็นกลไกที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการ ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลงนี้อาจจะสังเกตได้จากการถ่ายเทมวลสารที่ตื้นและความดันไอน้ำที่ผิววัสดุที่ลดลงอย่างรวดเร็ว

จากประสบการณ์ พบว่าหากมีการวัดค่าการกระจายของอุณหภูมิของวัสดุตัวอย่างในระหว่างกระบวนการ ก็สามารถทำให้เราทราบได้ว่า กระบวนการอัตราการอบแห้งที่พิจารณาตนจะถูกควบคุมด้วยกลไกอันใดเป็นหลัก กล่าวคืออาจจะเป็นกลไกถ่ายเทพัฒนาความร้อนหรือกลไกการถ่ายเทมวลสาร ถ้าอุณหภูมิของวัสดุตัวอย่างเท่ากับอุณหภูมิกรีดเปลี่ยนของสิ่งแวดล้อม แสดง

ว่ากระบวนการนั้นจะถูกควบคุมด้วยกลไกถ่ายเทพัฒนาความร้อน ในทำนองเดียวกับวัสดุตัวอย่างมีอุณหภูมิที่เพิ่มจนถึงอุณหภูมิกรีดเปลี่ยนของสารตัวกลางที่ร้อน เช่นลมร้อน หรือไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการ แสดงว่ากระบวนการจะถูกควบคุมด้วยกลไกถ่ายเทมวลสาร

ในการวิเคราะห์กระบวนการอัตราการอบแห้งจะทำการพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ การกระจายของความร้อนและอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุ รวมถึงอัตราการอบแห้งโดยที่พารามิเตอร์ที่ก่อตัวขึ้นด้วยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องไปกับตำแหน่งและเวลาในการใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์ดำเนินการกระบวนการอัตราการอบแห้งที่ค่าเวลาที่จะมีความยุ่งยากมากกว่าที่ค่าเวลาอื่น อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์ทางกายภาพและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนและความร้อน รวมถึงเงื่อนไขขอบเขตที่มีลักษณะเคลื่อนที่

อย่างไรก็ตามในหลาย ๆ กรณี พบว่าความต้านทานภายในที่มีต่อการเคลื่อนตัวของความชื้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์จะไม่พิจารณาช่วงเวลาที่อัตราการอบแห้งคงที่ ดังนั้นจึงคิดเฉพาะช่วงเวลาที่อัตราการอบแห้งลดลงเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้ลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ได้เป็นอย่างมาก

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการเคลื่อนย้ายมวลสารในกระบวนการอัตราการอบแห้งวัสดุพูนจะแสดงรายละเอียดในบทความวิจัย [1]

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ผดุงคัมภีร์ รัตนเดช , การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งใน วัสดุพูน II , การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน กระบวนการอบแห้งวัสดุพูน, วารสารวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี(ภาษาไทย), มหาวิทยลัยธรรมศาสตร์ .
- [2] Ceaglske, N.H. and Hougen, O.A., The Drying of Grainular Solids , Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., Vol. 33(3), pp. 283-312 , 1937.
- [3] Sherwood, T.K. and Comings, E.W., The Drying of Solid-V, Mechanism of Drying Clays , Ind.&Engr. Chemistry, Vol. 25(3), pp. 311-316 , 1933.
- [4] Moyne, C. and Degiovanni, A., Importance of Gas Phase Momentum Equation in Drying above the Boiling Point of Water, In: Mujumdar, A.S. and Toei, R. (ed). "Drying" 85, Hemisphere Publishing Corp., Washington, DC., pp. 109-115 , 1985.
- [5] Cross, M., Gibson, R.E. and Young, R.W., Pressure Generation during the Drying of Porous Half- Space , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 47-50 , 1979.
- [6] Gibson, R.E., Cross, M. and Young, R.W., Pressure Gradients Generated during the Drying of Porous Shapes , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 827-830 , 1979.
- [7] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., A Numerical and Experimental Investigation of the Modeling of Microwave Drying Using a Rectangular Wave Guide , Drying Technology, International J., ol. pp. 2209-2234 , 19(9) , 2001.
- [8] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material , Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 28 (5), pp. 605-616 , 2001.
- [9] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials, ASME J. Heat Transfer, Vol. 124 (1), pp. 151-161, 2002.