ของสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

สรุปผลงานวิจัยในอดีต

ผลงานวิจัยเรื่องการอบแห้งแบบไหลผ่านในอดีตเท่าที่รวบรวมมานี้ อาจแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

ก. ผลงานวิจัยการอบแห้งแบบไหลผ่าน และแบบจำลองคณิตศาสตร์

ข. ผลงานวิจัยเกี่ยวกับเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแบบไหลผ่าน

ค. ผลงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีประเมินสมรรถนะ และวิธีประหยัดพลังงานในการอบแห้งแบบไหลผ่าน

2.1 ผลงานวิจัยการอบแห้งแบบไหลผ่าน และแบบจำลองคณิตศาสตร์

Henderson และ Henderson (3) ได้ศึกษากระบวนการคำนวณการอบแห้งชั้นวัสดุหนา กระบวนการคำนวณนี้ใช้คำนวณความชื้นของเมล็ดพืชขนาดเล็ก ที่อบแห้งในชั้นวัสดุหนาเชิงวิเคราะห์ โดยอาศัยทฤษฎีการอบแห้งชั้นวัสดุบาง และเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการชีมูเลตกับผลการทดลอง พร้อมศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อการอบแห้งด้วย

Keey (4) ได้ศึกษาการอบแห้งเป็นงวดกรณีที่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้อีก เขาได้ทำการตรวจสอบวิธีวิเคราะห์การอบแห้งแบบงวดของ Van Meel และกล่าวถึงคำตอบเชิงตัวเลขสำหรับ กรณีการอบแห้งที่มีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีกในอัตราส่วนสูงมาก พบว่าอัตราการอบแห้งเฉพาะที่ (local drying rate) ภายในเตาอบ (oven) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุที่บริเวณปากทางเข้าของอากาศ เริ่มเข้าสู่ช่วงการอบแห้งช้าลง และในกรณีที่อัตราการหมุนเวียนลมทิ้งมีค่าสูง พบว่าอัตราการอบแห้งอาจมีค่าสูงกว่าอัตราการอบแห้งที่ปากทางเข้าเครื่องเมื่อเริ่มต้นอบแห้ง

Chhinan และ Young (5) ได้ศึกษาแบบจำลองการอบแห้งแบบไหลผ่านของชั้นวัสดุหนาของเมล็ดถั่วลิสง โดยอาศัยการแพร่ของความชื้นในรูปของของเหลวและไอในเบดบางเป็นฐาน แล้วประกบทับกันหลายชั้นแทนชั้นวัสดุหนา แบบจำลองนี้ใช้ทำนายความชื้นและอุณหภูมิของในวัสดุ และในลมร้อน พบว่าในกรณีที่ลมร้อนมีอุณหภูมิจุดน้ำค้างสูง การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทำได้ไม่แม่นยำเพียงพอ เป็นผลให้ทำนายผลการอบแห้งได้ไม่แม่นยำไปด้วย

Lai และ Haque (6) ได้ศึกษาการไหลของลมร้อนใน 3 มิติ ผ่านชั้นเมล็ดพืชที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เขาได้เสนอสมการคณิตศาสตร์ที่บรรยายการไหลของอากาศผ่านเมล็ดพืชใน 3 มิติ ซึ่งมีตัวแปรเชิงมิติเพียงตัวเดียวที่ต้านทานการไหล วิธีนี้เป็นแนวทาง (outlined) สำหรับการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของการไหลของอากาศภายในเบด และเป็นก้าวแรกที่เข้าใจการไหลของลมร้อนที่ไม่สม่ำเสมอด้วย

Agrawal และ Singh (7) ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นวัสดุบางของข้าวเปลือกเมล็ดสั้นที่อุณหภูมิ 32,35,39,43,47 และ 51 °ซ และเสนอสมการผลการทดลอง (empirical) ไว้ด้วย

Gonzalo และคณะฯ (8) ได้ศึกษาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์เชิงจลน์ของการอบแห้งชั้นวัสดุบาง และค่าความชื้นสมดุลย์ของวัสดุ วิธีที่เสนอนี้คิดว่า เกิดสมดุลย์ระหว่างความดันไอที่ผิวหน้าของวัสดุชื้น (ซึ่งมีค่าคงที่) กับความดันไอของอากาศ ซึ่งจะค่อยๆปรับเข้าสู่ค่านี้ โดยรับหรือคายความชื้นออกมาบ้างเล็กน้อย พวกเขาได้ใช้วิธีดังกล่าวศึกษาการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลือง และเมล็ดโกโก้

Parti (9) ได้ศึกษากระบวนการถ่ายเทในชั้นวัสดุ เป็นที่ทราบกันแล้วว่าลักษณะทางเรขาคณิตจริง (real geometrical condition) ของผลการทดลองที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทภายในเบด นั้นถูกทำให้ง่ายด้วยแบบจำลองคาปิลลารี่ของชั้นวัสดุอัดของ Carman มากจนเมื่อนำไปประยุกต์กับการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วดูเหมือนจะใช้ไม่ได้เลย เขาจึงพัฒนาแบบจำลองไฮโดรไดนามิค (hydrodynamic model) ขึ้นโดยอาศัยผลการทดลองเป็นฐาน โดยคำนึงว่าขนาดทางเรขาคณิตที่เป็นลักษณะเฉพาะของแบบจำลองนี้ นิยามขึ้นจากผลการวัดการถ่ายเทโมเมนตัม และต่อจากนั้นก็พัฒนาสมการสหสัมพันธ์ต่างๆ ขึ้นเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทที่เกิดขึ้นในท่อเปล่า แล้วนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองเรขาคณิตจริง สมการที่พัฒนาขึ้นสามารถบรรยายกลไกการถ่ายเทที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุอัดได้ค่อนข้างดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทต่างๆของเบด โดยมีความแน่ใจพอควร

Wang และ Singh (10) ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นวัสดุบางของเมล็ดข้าวเปลือกขนาดกลาง โดยทำการทดลองอบข้าวเปลือกหนัก 125 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่างในกล่อง (chamber) ที่ควบคุมเงื่อนไขการอบแห้งได้ และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาสมการผลการทดลอง เปรียบเทียบกับสมการอัตราการอบแห้งวัสดุชั้นเดียว (single-layer drying equation) 4 แบบ พบว่าสมการกำลังสองให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่สุด

Balazs (11) ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในการอบแห้งแบบไหลผ่าน โดยสร้างแบบจำลองการอบแห้งขึ้นสำหรับซีมูเลต และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร ด้วยวิธีการประเมินค่าของพารามิเตอร์ (off-line parameter) พบว่า ผลการซีมูเลตโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทเฉลี่ยสอดคล้องกับผลการทดลอง

Hasatani และ Arai (12) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในชั้นวัสดุบรรจุ (packed bed) ของซิลิก้าเจลและยิบซั่มละเอียด ที่มีการดูดความร้อนเกิดขึ้นด้วยในสภาวะไม่คงตัว (unsteady) พวกเขาได้เสนอสมการอนุพันธ์ของอุณหภูมิ และความเข้มข้น โดยคำนึงถึงอัตราการดูดความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเบดเป็นแบบกำลังหนึ่ง และถือว่าการไหลของอากาศเป็นแบบลูกสูบ พบว่าผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลอง

Misra และ Brooker (13) ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นวัสดุบางของเมล็ดข้าวโพด (shelled corn) และศึกษาการเกิดการเปียกชื้นใหม่ (rewetting) โดยทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 36-160 °F และความชื้นต่างๆ เพื่อสร้างสมการการอบแห้งชั้นวัสดุบาง และสมการของการเปียกชื้นใหม่ พบว่าการอบแห้งและการเปียกชื้นใหม่นั้นเป็นฟังก์ชันของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

Parti (14) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในชั้นวัสดุอัดของอนุภาคไม้ชื้น (wetted wooden particles) หรือ ตัวดูดซับแอคลอน (Aglon absorbent particles) ระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศ และหาค่าเวลาวิกฤตในการอบแห้ง (critical drying time) พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่เคยมีคนทำแล้ว (literature data)

Davila และคณะ (15) ได้ใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นวัสดุหนาของมหาวิทยาลัยมิชิแกนมาดัดแปลง เพื่อใช้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านขนาดเล็ก ในกรณีการอบแห้งธรรมดา และกรณีการอบแห้งที่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน พบว่าจังหวะของการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนที่เหมาะสมที่สุด คือประมาณ 54% ของเวลาการอบแห้งของกรณีการอบแห้งธรรมดา และข้อดีของการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน คือสามารถลดเกรเดียนท์ของความชื้นสุดท้ายในวัสดุได้ดี แต่มีข้อเสียคือพลังงานที่ใช้จะเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีการอบแห้งธรรมดาถึง 10 % และประสิทธิภาพของการอบแห้งจะต่ำกว่าเล็กน้อย

Hallstroem และ Wimmerstredt (16) ได้ศึกษาการอบแห้งวัสดุที่เป็นเม็ดรูพรุน 2 ชนิดคือ เม็ดปุ๋ยและเม็ดของ $Ca(H_2PO_4)_2\ H_2O$ ในเบดนิ่งด้วยอากาศ และวิเคราะห์ความชื้นของอากาศขาออกด้วยเครื่อง IR โฟโตมิเตอร์ พบว่าผลการศึกษาทั้งหมดยืนยันสมมติฐานว่าการแพร่ของไอเป็นกลไกของขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการอบแห้ง และพบว่าอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (ซึ่งคำนวณได้จาก sorption isotherms) และอัตราการอบแห้งจะเป็นปฏิภาคผกผันกับรัศมีของเม็ดยกกำลังสอง เขาใช้แบบจำลองการหดตัวของแกนกลาง (shrinking core model) มาทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุทั้งสองด้วย

Toei (17) ได้เสนอวิธีคำนวณเวลาในการอบแห้งแบบไหลผ่าน โดยอาศัยแผนภูมิ (chart) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งไร้มิติกับความชื้นไร้มิติ และพารามิเตอร์อีก 2 ตัว ที่บอกถึงว่าขณะนี้อยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่ หรือช่วงการอบแห้งช้าลง วิธีนี้หาโดยการทำอินทิเกรตเชิงกราฟ (graphical integration) ของสหสัมพันธ์ 2 มิติ ซึ่งได้มาจากการ

อินเทอร์โพเลต (interpolate) แผนภูมิดังกล่าว

Morey and Li (18) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสมการอบแห้งชั้นวัสดุบางที่มีต่อการทำนายการอบแห้งชั้นวัสดุหนา เขาใช้สมการการอบแห้งมาทำนายความชื้นในการอบแห้งชั้นวัสดุหนา แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 4 ผลการทดลอง พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกันดี แต่อัตราการอบแห้งที่ทำนายได้จะช้ากว่าผลของการทดลอง

ถมลรัตน์ พันธุ์อารยะ (2) ได้ศึกษาการอบแห้งขิงมันสำปะหลังทั้งชั้นวัสดุบาง และชั้นวัสดุหนา ในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน เพื่อดูอิทธิพลของความเร็วและอุณหภูมิของลมร้อนที่มีต่อเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณการกระจายความชื้นในวัสดุ และเวลาในการอบแห้ง จากการทดลอง 3 กรณีคือ กรณีการอบแห้งธรรมดา, กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราว และกรณีการอบแห้งที่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นครั้งคราว พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลได้สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ และพบว่าในกรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราวจะกินเวลาน้อยกว่าหรือเท่ากับกรณีการอบแห้งธรรมดาเสมอ ส่วนกรณีการอบแห้งที่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นครั้งคราว แทบจะไม่มีผลต่อการประหยัดเวลาในการอบแห้ง และในบางเงื่อนไขกลับใช้เวลานานกว่า

Rajan และ Ibrahim (19) ได้ศึกษาการอบแห้งแบบไหลผ่านของวานาเดียมเพนทอกไซด์, ซิลิก้าเจล, โมเลกคิวลาร์ซีฟ, ถ่านกัมมันต์ และถ่านหินบิทูมินัส โดยเสนอสมการสหสัมพันธ์ของการถ่ายเทในก๊าซเฟสกับความชื้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งมีพารามิเตอร์คือ อัตราการไหล, อุณหภูมิ, ขนาดของวัสดุ และความสูงของชั้นวัสดุ และทำการทดสอบความมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย

Syarief และคณะฯ (20) ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นวัสดุบางของเมล็ดทานตะวัน โดยทำการทดลองแล้วหาค่าอัตราการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นเริ่มต้นของเมล็ด โดยเฉพาะอุณหภูมิอากาศมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งมาก และพบว่าสมการผลการทดลองกับสมการกึ่งผลการทดลองของการอบแห้งชั้นวัสดุบางหลายสมการ ก็สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้

Palancz (21) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับซีมูเลตการถ่ายเทมวลสารและความร้อนภายในชั้นวัสดุอัดที่มีความต้านทานต่อการแพร่สูง เพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทมวลสารและความร้อนระหว่างก๊าซเฟส และเฟสของวัสดุในชั้นวัสดุนิ่งของของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน วัสดุที่ใช้ศึกษามีขนาดปานกลาง แต่มีความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลสารและความร้อนสูง เขาได้เสนอแบบจำลองของเซลอย่างง่าย (simple cell model) (เซลในที่นี้หมายถึงเม็ดวัสดุทรงกลม) ซึ่งรวมเอาเทอมความต้านทานต่อการถ่ายเทของแบบจำลองชนิดพารามิเตอร์กระจายแบบ Luikov (Luikov-type distributed parameter model) เข้าไว้ด้วย

เขาได้วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้กับแบบจำลองแบบเซลซึ่งมีตัวแปรแบบลัมพ์ (lumped variables) สำหรับวัสดุ และกับแบบจำลองสองเฟสต่อเนื่อง (continuous two phase model) ผลของการชีมูเลตแสดงให้เห็นว่าการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุจะเป็นตัวควบคุมกระบวนการอบแห้ง แม้ว่าค่าตัวเลขไบออท (Biot number) จะมีค่าปานกลาง

Zuritz และ Singh (22) ได้ศึกษาสมการที่ใช้คำนวณความร้อนแฝงการระเหยของน้ำจากข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้ง พวกเขาได้เสนอสมการกึ่งทฤษฎีซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอนธัลปีของการระเหยของน้ำนั้นเป็นฟังก์ชันของความชื้น และอุณหภูมิของข้าวเปลือก สมการนี้อนุพันธ์ได้จากสมการของความชื้นสมดุลย์ (EMC) และสมการของความดันไออิ่มตัว สำหรับสมการที่เสนอนี้ใช้คำนวณความร้อนแฝงการระเหยของน้ำในข้าวเปลือกได้ ในช่วงความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ ที่เคยมีคนทำไว้แล้ว นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณค่าเอนธัลปีของการระเหยในอดีตนั้นจะให้ผลผิดพลาดขึ้นอยู่กับสมการ EMC ที่ใช้คำนวณค่าความดันไอของน้ำในเมล็ดพืช วิธีที่พวกเขาเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเมล็ดธัญพืช (cereal) อื่นและผลิตภัณฑ์อาหารอื่นได้ ถ้าเลือกใช้สมการ EMC ที่เหมาะสมพอ

Nishiyama (23) ได้ทำการชีมูเลชันของการอบแห้งเมล็ดพืช โดยใช้แบบจำลองทรงกลม (sphere drying model) เขาได้ทำการอบแห้งข้าวสาลีและข้าวเปลือก ในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และแบบจำลองทรงกลมยังถูกดัดแปลงให้ง่ายขึ้นเพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองเครื่องอบแห้งแบบไหลตัด, แบบไหลทางเดียว และแบบไหลสวนทางกัน ซึ่งมีถัง "บ่ม" (tempering tanks) ต่ออยู่ด้วย ในกรณีการอบแห้งที่มีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีก นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการชีมูเลตกับผลการทดลองในการอบแห้งแบบไหลตัดและไหลทางเดียวกันที่มีการหมุนเวียนลมทิ้ง

Bala และ Woods (24) ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นวัสดุบางของมอลต์ โดยใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 30.3 - 90.2 °ซ และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 2.4 - 79.2 % เพื่อหาสมการการอบแห้ง จากนั้นได้นำผลการทดลองมาฟิตกับสมการอัตราการอบแห้งแบบเอกโปเนนเชียลเทอมเดียว, สมการแบบเอกโปเนนเชียลสองเทอม และสมการของเพจ (Page equation) จากผลของการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าสมการแบบเอกโปเนนเชียลสองเทอมให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด รองลงไปคือสมการของเพจและสมการแบบเอกโปเนนเชียลเทอมเดียวตามลำดับ แต่สมการแบบเอกโปเนนเชียลเทอมเดียวก็สามารถใช้อธิบายการอบแห้งได้อย่างเพียงพอ และพบว่าค่าคงที่ของสมการนั้นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของลมร้อน และความชื้นสมดุลย์เชิงจลน์ (dynamic equilibrium moisture content)

อรระวี รัตนภัณฑ์ และคณะฯ (25) ได้ทำการชิมูเลชันการอบแห้งชั้นวัสดุหนาด้วยลมร้อน โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากสมการดุลมวลสารและดุลพลังงาน ของชั้นวัสดุบางและของลมร้อน และเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งเชิงจลน์ที่เงื่อนไขของอุณหภูมิ, ความชื้นและความเร็วของลมร้อนต่างๆกัน เขาใช้แบบจำลองนี้ศึกษาการอบแห้งลูกพลัม (plum) พบว่าผลการชิมูเลตสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี อย่างไรก็ดีก็ยังมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการกระจายของลมร้อนไม่ดีทั่วถึง

Sokhansanj และ Cenkowski (26) ได้ทำการสำรวจทบทวนเกี่ยวกับอุปกรณ์ และการอบแห้งแบบไหลผ่านในอดีตจนถึงปัจจุบัน ปกติสมการการอบแห้งชั้นวัสดุบางมักถูกนำมาใช้ชิมูเลตการอบแห้งเมล็ดพืช จากการศึกษาสรุปได้ว่าแบบจำลองพวก distributed parameter model จะฟิตกับผลการทดลองได้ดีกว่าแบบจำลองพวก lumped parameter model และสมการการทดลอง ตลอดจนกล่าวถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์, ขั้นตอนการทดลองและวิธีวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย

2.2 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแบบไหลผ่าน

Chirife และ Cachero (27) ได้ศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมันสำปะหลังในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความสูงของชั้นวัสดุ 2-12 ซม., อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน 2,300-5,200 กก./ตร.ม./ชม. และอุณหภูมิลมร้อน 55-100 °ซ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลง ในกรณีของมันสำปะหลังไม่ควรใช้อุณหภูมิลมร้อนเกิน 84 °ซ เพราะจะทำให้เกิดรอยไหม้เกรียม (scorch) ขึ้น และพบว่าเวลาที่จะใช้ในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักของวัสดุต่อพื้นที่ของเครื่องอบแห้ง กก.วัสดุแห้ง/ตร.ม. มีค่ามากขึ้น

Shanokprasith และ Bunrungsanor (28) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน เพื่อหาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ในเงื่อนไขต่างๆ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิลมร้อน 37-60 °ซ, อัตราการไหลเชิงปริมาตรของลมร้อน 440-780 ลิตร/นาที และความสูงของชั้นเมล็ดข้าวเปลือก 10-15 ซม. ผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนความสูงในช่วง 10-15 ซม.ของชั้นเมล็ดข้าวเปลือก และอัตราการไหลของลมร้อนนั้นไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

ศักดิ์สิน รัศมิทัต (29) ได้ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งมันสำปะหลังในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความสูงของชั้นมัน 5-20 ซม., อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน 1,000-4,0000 กก./ตร.ม./ชม., ความหนาของชิ้นมัน 0.3-0.7 ซม. และอุณหภูมิลมร้อน 55-100 °ซ ผลการทดลองพบว่าเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง อยู่ในช่วงการ

อบแห้งที่ความเร็วช้าลง และอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น แต่เป็นส่วนกลับกันกับความหนาและความสูงของชั้นมัน อุณหภูมิลมร้อนนับเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด และไม่ควรใช้อุณหภูมิเกิน 80 °ซ นอกจากนั้นได้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากข้อมูลที่ได้ ในช่วงอุณหภูมิต่างๆกัน จาก 55 - 85 °ซ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $3x10^{6}$-$8x10^{6}$ ตร.ซม./วินาที

Chakraverty และ Jain (30) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนที่มีต่อเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nuts) และผลมะม่วงหิมพานต์ (cashew kernel) และเสนอสมการการทดลองที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของความชื้นกับการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และเวลาในการอบแห้ง พบว่าผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี อนึ่งอุณหภูมิของลมร้อนที่เหมาะสมต่อการอบแห้งเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และผลมะม่วงหิมพานต์ คือ 75 และ 70 °ซ ตามลำดับ

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และทักษิณา ลอยจิรากุล (31) ได้ศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของผลไม้ 4 ชนิด คือ องุ่น, ละมุด, พุทรา และมะยม เพื่อดูอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ คือ อุณหภูมิของลมร้อน 55-72 °ซ และความเร็วลมร้อน 0.9-1.6 เมตร/วินาที ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรที่ศึกษาทั้งหมดอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ช้าลง และอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นขณะที่อุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนความเร็วลมจะมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้งพุทรา แต่จะมีอิทธิพลพอประมาณต่ออัตราการอบแห้งของละมุด, องุ่น และมะยม

2.3 ผลงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีประเมินสมรรถนะ และวิธีประหยัดพลังงานในการอบแห้งแบบไหลผ่าน

Young และ Dickens (32) ได้ศึกษาถึงวิธีคำนวณค่าใช้จ่ายต่างๆในการอบแห้ง และผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยอาศัยวิธีวิเคราะห์การอบแห้งแบบไหลผ่านกรณีชั้นวัสดุหนา (หรือ การอบแห้งแบบไหลตัด) ของ H.V. Hukill จากนั้นได้ทำนายค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิง, ค่าใช้จ่ายของพัดลม, ค่าใช้จ่ายคงที่ และค่าใช้จ่ายทั้งหมดสำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด

Bakshi และคณะฯ (33) ได้ศึกษาอัตราที่ใช้พลังงานในการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบไหลตัด โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีก ในเงื่อนไขต่างๆกันและระหว่างตำแหน่งการหมุนเวียน (configuration) ต่างๆกัน พบว่ากรณีที่มีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีก สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานลง และทำให้อบแห้งข้าวเปลือกที่ได้คุณภาพสม่ำเสมอขึ้น โดยไม่มีการสูญเสียคุณภาพของข้าวระหว่างการโม่ด้วย

Ashworth และ Carter (34) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน เป็นฟังก์ชันของประสิทธิภาพเชิงพลังงาน, ค่าใช้จ่ายหลัก และเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่อง ในการออกแบบเครื่องอบแห้ง จะต้องคำนึงถึงเกณฑ์ของความสำคัญของเงื่อนไขสภาวะการอบแห้ง (อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง และศักยภาพการอบแห้งของลมทิ้ง) ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพเชิงพลังงานในเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนต่างๆ ประสิทธิภาพของการอบแห้งจะสูงขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่ทางออกให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (เพื่อให้ความสามารถที่จะพาความชื้นไปของลมร้อนสูงสุด) เราสามารถที่จะบรรลุเงื่อนไขเหล่านี้ได้ เช่น ในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านต้องควบคุมให้อุณหภูมิกระเปาะแห้งขาเข้าสูงไว้ หรือในกรณีการอบแห้งธรรมดา และถ้ามีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีกต้องควบคุมอุณหภูมิกระเปาะแห้งให้มีค่าปานกลาง เป็นต้น

เกณฑ์ที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือ เวลาในการอบแห้งทั้งหมด (overall drying time) ซึ่งถูกทดสอบกับการอบแห้งแบบถาดที่ปฏิบัติงานเป็นงวด, เครื่องอบแห้งแบบแบนด์ไหลผ่าน, เครื่องอบแห้งแบบพาทะลม (pneumetic conveying dryer) ที่ความยาวต่างๆกัน จากข้อมูลเหล่านี้สามารถคำนวณขนาดของเครื่องอบแห้งที่มีอัตราการผลิตตามต้องการ ในการออกแบบต้องอาศัยพารามิเตอร์ 3 กลุ่ม ซึ่งมักจะมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างขนาดเครื่องอบแห้งกับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ต่อไปได้กล่าวถึงผลกระทบซึ่งกันและกันของค่าใช้จ่ายหลักกับค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพื่อใช้ในการออปติไมเซชันของค่าใช้จ่ายรวม พบว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจะสำคัญกว่าค่าใช้จ่ายหลัก จากนั้นได้ยกตัวอย่างการทำการลดค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเครื่องอบแห้งแบบแบนด์ และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดที่ค่า NTU สูง, เครื่องอบแห้งแบบหมุน, เครื่องอบแห้งแบบถาด และเครื่องอบแห้งแบบพาทะลมที่มีค่า NTU ปานกลาง และยกตัวอย่างการทำออปติไมเซชันค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบเบื้องต้นภายใต้ข้อบังคับทั่วไป (practical constraints) ในเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ปฏิบัติงานเป็นงวด และเครื่องอบแห้งแบบหมุนไหลสวนทาง ผลที่ได้เหล่านี้กับการนำไปประยุกต์กับการอบแห้งวัสดุหลายแบบ นับเป็นการกระตุ้นให้มีการปรับปรุงการออกแบบเครื่องอบแห้งที่สามารถปฏิบัติงานด้วยลมร้อนมีความชื้นสูง

Poole และ Thygeson (35) ได้ศึกษาพลังงานที่คงที่ และพลังงานที่เป็นตัวแปร ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนในอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเน้นผลที่อัตราการปล่อยลมทิ้ง (ซึ่งลมทิ้งมีความร้อนสัมผัส และมีปริมาณมาก) มีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งจากดุลของพลังงาน และวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดของอัตราการปล่อยลมทิ้งของระบบจากค่าใช้จ่ายต่อกำไร

Mc Gaw และคณะฯ (36) ได้ศึกษาการอบเมล็ดโกโก้ในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน เพื่อหาสภาวะการอบแห้งและค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด ในแง่การประหยัดพลังงาน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

ก. กรณีที่มีเครื่องอบแห้งอยู่แล้ว ได้ทำการศึกษาหาสภาวะการปฏิบัติงานของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อที่จะลดปริมาณการใช้พลังงานให้มีค่าน้อยที่สุด

ข. กรณีที่ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งใหม่ ได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบ เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการอบแห้งต่อ 1 กิโลกรัมของวัสดุแห้งให้มีค่าน้อยที่สุด

ในการศึกษาทั้ง 2 กรณีได้ใช้ความเร็วลม 0.2 เมตร/วินาที และความหนาของชั้นวัสดุ 0.025-4 เมตร พบว่าในกรณีที่มีเครื่องอยู่แล้วพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งต่อกิโลกรัมของวัสดุแห้งจะลดลงจาก 10,156 กิโลจูล เหลือเพียง 2,321 กิโลจูล ถ้าเพิ่มปริมาณของวัสดุอบแห้งจาก 10 กิโลกรัม/ตร.ม. เป็น 45 กิโลกรัม/ตร.ม. ส่วนในกรณีที่ออกแบบเครื่องอบแห้งใหม่ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อกิโลกรัมของวัสดุแห้งจะลดลงจาก 0.114 เหรียญสหรัฐ เหลือเพียง 0.092 เหรียญสหรัฐ ถ้าพื้นที่ของเครื่องอบแห้งเพิ่มจาก 4.4 ตร.ม. เป็น 22.7 ตร.ม.

Loewer และ Bridge (37) ได้ศึกษาความประหยัดของการใช้เครื่องกวนในการอบแห้งเมล็ดพืช ปกติเครื่องกวนเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการอบแห้งเมล็ดพืชในถังเก็บ (in-bin) เขาได้วิเคราะห์ความประหยัดของการใช้เครื่องกวน 3 แบบ สรุปได้ว่า ความสำคัญของเครื่องกวนในระบบจะทำให้

ก. ประหยัดได้อย่างมากสำหรับการอบแห้งเป็นชั้น

ข. ประหยัดได้ไม่มากสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศธรรมดา

ค. ประหยัดได้บ้างสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะในถังเก็บที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ และราคาของเครื่องค่อนข้างสูง

Kulshrehtha และคณะฯ (38) ได้ศึกษาการทำซิมูเลชันของความต้องการพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแบบเบดนิ่ง (fixed bed) ของข้าวเจ้า และแสดงผลในรูปโนโมกราฟ โดยอาศัยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาซิมูเลตการอบแห้งที่เงื่อนไขของ ความสูงของเบด, อุณหภูมิ และอัตราการไหลของลมร้อนต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขที่มีต่อเวลาในการอบแห้ง, ความจุจำเพาะ (effective capacity), กำลังของเครื่องเป่าลม และเครื่องทำความร้อน และพลังงานที่ใช้จำเพาะ แล้วแสดงผลในรูปของโนโมกราฟ เพื่อให้สามารถนำผลไปใช้ได้โดยตรง

Kulshretha และคณะฯ (39) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยลมร้อนไหลผ่านเป็นครั้งคราว (grain drying with intermittent heated air) โดยอาศัยแบบจำลองการอบแห้งเมล็ดพืชในถังเก็บที่พัฒนาขึ้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงาน, ความต้องการพลังงานในการอบแห้ง, ความสามารถ และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพทางอ้อมอีกบางตัว พวกเขาทำการชีมูเลตการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °ซ, ช่วงเวลาการไหลของลมร้อนผ่านเบดทุกๆ 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที รวมทั้ง ในกรณีการอบแห้งแบบต่อเนื่องก็มีการชีมูเลตด้วย พบว่าการอบแห้งนี้สามารถลดพลังงานที่ใช้ รักษาคุณภาพของเมล็ดพืชไว้ดีกว่า

วิวัฒน์ ศัณฑะพานิชกุล และคณะฯ (40) ได้เสนอแบบจำลองและศึกษาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ สามารถใช้คำนวณการกระจายของความชื้นในวัสดุระหว่างทำการอบแห้งได้ดีพอควร นอกจากนี้ยังศึกษาวิธีการลดปริมาณการใช้พลังงาน (เช่น ลดเวลาในการอบแห้งต่องวด เป็นต้น) โดยทำการผสมวัสดุในเบดหรือสลับทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นครั้งคราว โดยอาศัยผลการทดลองอบแห้งชิ้นมันสำปะหลัง (เบดหนา 40 ซม.) ในเครื่องอบแห้งเป็นข้อมูลอ้างอิง พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายเวลาในการอบแห้งได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยผิดพลาดไม่เกิน +5.3%, +3.2 % และ +7.7 % ในกรณีการอบแห้งธรรมดา, กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราว (ทุกๆ 150 นาที) และกรณีการอบแห้งที่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อน (ทุกๆ 30 นาที) ตามลำดับ

เมื่อทำนายพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่องวด พบว่าในกรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราวจะสามารถประหยัดพลังงานได้ดีเสมอ และช่วงเวลาการผสมวัสดุที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าเท่ากับช่วงเวลาที่เมื่อนำไปหารเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งกรณีธรรมดา แล้วได้ค่าลงตัวหรือใกล้เคียงค่าลงตัวที่สุด ในทางตรงข้ามกรณีการอบแห้งที่มีการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นครั้งคราว ไม่ค่อยช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานลงเลย

วิวัฒน์ ศัณฑะพานิชกุล และ ชาตรี เจียรมิ่งขวัญ (41) ได้ศึกษาผลกระทบของการหมุนเวียนลมทิ้งที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน โดยสร้างแบบจำลองการอบแห้งอย่างง่ายขึ้น และทดสอบความเหมาะสมโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองอบแห้งชิ้นมันสำปะหลังในเบดหนา (40 ซม.) วิธีหนึ่งที่จะเพิ่มสมรรถนะของการอบแห้ง คือมีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราว ในกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีก คือสามารถลดทั้งพลังงานที่ต้องการต่องวดและลดเวลาในการอบแห้ง ส่วนในกรณีที่มีการหมุนเวียนลมทิ้งกลับมาใช้อีกนั้น อัตราส่วนการหมุนเวียนลมทิ้งที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับนิยามของออบเจคทีฟฟังก์ชัน และความสำคัญสัมพัทธ์ระหว่างความสามารถในการผลิตกับค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน พบว่าเมื่อความสามารถในการผลิตยิ่งสำคัญมาก ค่าอัตราส่วนการหมุนเวียนที่เหมาะสมจะมีค่าน้อยลง ในทางตรงข้ามเมื่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสำคัญมากกว่า (แพงกว่า) อัตราส่วนการหมุนเวียนที่เหมาะสมจะมีค่ามากขึ้น