

บทความวิชาการ: การประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน

สำหรับวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทย

A review: Application of Impinging Stream Drying Process for Agricultural Products in Thailand

ปราชญา ตรีสุทธาชีพ^{1*} กิตติ สถาพรประสาธน์²

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

¹Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Email: prachaya_me@hotmail.com

บทคัดย่อ

การอบแห้งแบบกระแสนเป็นเทคโนโลยีที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายทั่วโลก ส่วนในประเทศไทยนั้นมีการเผยแพร่ผลการวิจัยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2550 และมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ในบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการพื้นฐานของกระแสน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง ซึ่งวัสดุทดสอบส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก และข้าวเหนียว (parboiled rice) ค่าตัวแปรที่ใช้วัดประสิทธิภาพของการอบแห้งในงานวิจัยส่วนใหญ่ ได้แก่ ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ในงานวิจัยการอบแห้งกระแสนในช่วงปีหลัง ๆ ที่ได้รวบรวมมานี้ ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การอบแห้งกระแสนเพื่ออบแห้งข้าวซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญ และได้มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณภาพของข้าวเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสนในอุตสาหกรรมการผลิตข้าวได้จริงในอนาคต

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบกระแสน วัสดุทางการเกษตร ข้าวเปลือก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ABSTRACT

Impinging stream drying (ISD) is technology that has been studied worldwide. In Thailand, the first publication of ISD was shown in 2007 and continuing been studied from then. This article reviewed the principle of impinging stream, and research of ISD in. Most research were focused on designing and verifying factors affected the efficiency of ISD. Testing materials are mostly agricultural products,

including soy bean residue, rice paddy and parboiled rice. To assess the efficacy of ISD, volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient and energy consumption were determined in most research. Recent research was focusing on using ISD in rice which is a most important agricultural product in Thailand. The research was expanded to study in the field of rice's quality. This will lead to the realistic for the application of ISD in rice production industry in the future.

Keyword: Impinging steam drying, agricultural products, paddy, volumetric heat transfer coefficient

1. หลักการของการอบแห้งแบบกระแสน

หลักการพื้นฐานของกระแสน หรือ impinging stream คือการนำกระแส 2 กระแสที่ประกอบด้วยของแข็งและแก๊สอยู่ในระบบให้ไหลสวนทางกันในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็วสูงและก่อให้เกิดการชน ส่งผลให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงมากในขณะที่เกิดการชน ซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายเทแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนระหว่างเฟสของทั้ง 2 กระแส [1] เมื่อสืบย้อนงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ของกระแสน Wu (2007) [1] รายงานว่ามีการนำเทคนิคกระแสนมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในเครื่องผลิตเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่มีชื่อว่า Koppers-Totzek gasifier ในปีค.ศ.1953 และมีการนำเสนอหลักการของกระแสนในเชิงวิทยาศาสตร์ครั้งแรกโดย Elperin ในปีค.ศ. 1961 นอกจากนี้ Wu (2007) ได้แบ่งยุคของการนำกระแสนมาประยุกต์ใช้ออกเป็น 3 ยุค ได้แก่ ยุคแรก (ช่วงปี ค.ศ. 1961 ถึงช่วงต้นของยุค 1970) โดยกลุ่มประเทศสหภาพโซเวียต ที่มุ่งเน้นการนำกระแสนที่มีแก๊สเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และมีทั้งของแข็งและของเหลวเป็นเฟสกระจายตัว (dispersed phase) ยุคที่ 2 (ช่วงปี ค.ศ. 1994 ถึงช่วงกลางยุค 1990) ที่นักวิจัยจากประเทศอิสราเอล นำโดย Tamir และคณะ ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระแสนที่มีแก๊สและของเหลวเป็นเฟสต่อเนื่อง ในช่วงนี้ได้มีการตีพิมพ์หนังสือภาษาอังกฤษเล่มแรกที่มีชื่อว่า “Impinging-Stream Reactors: Fundamentals and Applications” ซึ่งรวบรวมที่มาของกระแสน หลักการของกระแสน ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระแสน และการ

ประยุกต์ใช้เทคนิคของกระแสนในระบบและวัสดุหลากหลายประเภท [2] ยุคที่ 3 (นับตั้งแต่ช่วงปลายยุค 1990 เป็นต้นมา) มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระแสนโดยนักวิทยาศาสตร์จากหลากหลายประเทศ เช่น จีน สหรัฐอเมริกา แคนาดา และ เยอรมัน เป็นต้น ซึ่งในยุคนี้มีการศึกษากระแสนที่มีของเหลวเป็นเฟสต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคดังกล่าวที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม เช่น การผสมสารที่มีอนุภาคขนาดไมโคร (micro-mixing) การสกัด (extraction) การกำจัดซัลเฟอร์ (desulfurization) การทำให้เข้มข้น (concentration) และการอบแห้ง (drying) เป็นต้น

การอบแห้งแบบกระแสน (impinging stream drying) คือ การอบแห้งแบบรวดเร็ว (flash drying) ที่ความชื้นระเหยออกจากวัสดุเปียกหรือหยดของเหลว (liquid droplet) ในบริเวณที่เกิดการชนของกระแสนตรงกันข้าม 2 กระแส โดยมีเฟสต่อเนื่องหรือกระแสนเป็นแก๊ส และมีเฟสกระจายตัว หรือวัสดุที่ต้องการอบแห้งเป็นของแข็งหรือของเหลว การอบแห้งแบบกระแสน หรือ impinging stream drying มีชื่อคล้ายกับการอบแห้งแบบ impingement หรือ impinging jet แต่มีหลักการของการลดความชื้นวัสดุแตกต่างกัน การอบแห้งแบบ impingement คือการเป่าแก๊ส/อากาศความเร็วสูง (gas jet) จากหัวเป่า (nozzles) จำนวนมากลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการอบแห้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบในทิศทางตั้งฉากโดยตรง การระเหยของน้ำออกจากวัสดุจะเกิดขึ้นที่บริเวณ jet-zone [3] ดังนั้นจึงควรแยกการ

อบแห้งทั้ง 2 วิธีนี้ออกจากกัน

หลักการพื้นฐานของการอบแห้งแบบกระแสนวน การอบแห้งแบบกระแสนวนมีองค์ประกอบสำคัญในระบบ 2 องค์ประกอบ ได้แก่ (1) กระแส 2 กระแสที่ไหลในทิศทางตรงกันข้าม และ (2) วัสดุที่ต้องการลดความชื้น กระบวนการอบแห้งแบบกระแสนวนอาศัยหลักการชนกันของกระแส 2 กระแสที่เท่ากันและมีระยะห่างที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน และมีกระแสน้อยกว่า 1 กระแสที่มีอนุภาคหรือวัสดุที่ต้องการลดความชื้นเคลื่อนที่ร่วมด้วย กระแสที่ไหลสวนทางกันจะเกิดการชนในบริเวณตรงกลางของระบบ กระแสที่ใช้อาจเป็นกระแสลมร้อน หรือกระแสไอน้ำยิ่งยวด และให้วัสดุที่ต้องการลดความชื้นอยู่ในบริเวณตรงกลางของกระแส กระแสนี้ทำหน้าที่เป็นตัวพาวัสดุไปตามทิศทางของกระแสไปถึงระยะการชน ซึ่งเป็นบริเวณที่กระแสทั้งสองเคลื่อนที่ชนกัน และเกิดการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัมขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นจากการชนกันของกระแสของไหล 2 กระแส หลังจากกระแสของไหลชนกันแล้วก็จะไหลออกจากระบบ และทำให้วัสดุมีความชื้นลดลงเมื่อการชนของกระแสเกิดขึ้นจะเกิด narrow zone ที่มีความหนาแน่นของความปั่นป่วน (turbulent intensity) สูง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การถ่ายเทมวลและความร้อนสูง ซึ่งในบริเวณนี้มีความหนาแน่นของอนุภาคหรือวัสดุมากที่สุด และมีความหนาแน่นลดลงเมื่อเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งศูนย์กลาง Elperin (1961) ได้เสนอแนะว่าขนาดของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับระบบการอบแห้งแบบกระแสนวนควรมีขนาดอยู่ในช่วง $5 \mu\text{m}$ ถึง $2\text{-}5 \text{ mm}$ [2] รูปที่ 1 แสดงการเคลื่อนที่ในอุดมคติของวัสดุเมื่ออยู่ในระบบการอบแห้งแบบกระแสนวน โดยวัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลวเริ่มไหลไปกับกระแสใดกระแสหนึ่ง ความเร็วของวัสดุจะถูกเร่งจากความเร็วกว่าศูนย์ (zero velocity; U_0) จนถึงความเร็วระดับหนึ่งอันเป็นผลมาจากไฮโดรไดนามิกของการไหลของของแข็งและแก๊ส เมื่อผ่านระยะการชน (impingement plane) วัสดุจะแทรกตัว

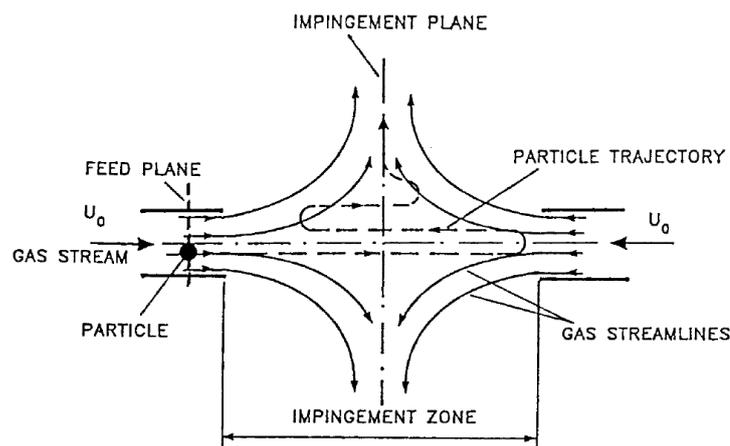
เข้าสู่กระแสตรงกันข้ามในระนาบเดิม และเมื่อผ่านบริเวณนี้ ความเร็วของวัสดุจะลดลง และหยุดที่ระยะทางหนึ่งในบริเวณกระแสตรงกันข้าม จากนั้นวัสดุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเคลื่อนที่ย้อนกลับเนื่องจากแรงของกระแสที่ไปจากทิศตรงกันข้าม และเคลื่อนตัวกลับไปกลับมาเนื่องจากการเพิ่มและลดความเร็วเข้าไปมา เนื่องจากการชนกันของกระแสตรงกันข้าม การเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันไปมาและเกิดขึ้นซ้ำ ๆ จนกระทั่งวัสดุในบริเวณที่เกิดการชน (impingement zone) มีความเร็วเท่ากับความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) และหลุดออกจากระบบการอบแห้งแบบกระแสนวน [3] ด้วยกลไกการอบแห้งเช่นนี้ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบการอบแห้งวัสดุ (เฟสกระจายตัว) ที่เป็นของเหลวหรือของแข็งขนาดเล็ก โดยมีแก๊สหรือของเหลวเป็นกระแส (เฟสต่อเนื่อง) แต่ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสนวนมีระยะเวลาของวัสดุที่อยู่ในระบบสั้นมาก โดยมีหน่วยของระยะเวลาเป็นวินาที ความชื้นที่ออกจากวัสดุส่วนใหญ่นั้นเป็นความชื้นที่อยู่บริเวณพื้นผิววัสดุ แต่ความชื้นในบริเวณภายในหรือตรงกลางของวัสดุนั้นถูกกักจัดออกได้ยาก เนื่องจากไม่มีเวลาที่ให้ความชื้นแพร่ออกจากบริเวณภายในออกสู่พื้นผิว ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษา วิจัย และออกแบบระบบการอบแห้งแบบกระแสนวนหลายรูปแบบ โดยตัวอย่างของตัวแปรที่มีการศึกษา เช่น (1) ทิศทางของกระแสแบบ coaxial และ แบบ mutually perpendicular x configuration (รูปที่ 2a และ 2b) (2) ลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสแบบเส้นโค้งในลักษณะต่าง ๆ (รูปที่ 2c, 2d, 2e และ 2f) (3) ระยะการชนของกระแส/รูปแบบการชน (impinging plane/zone geometries) เช่น รูปแบบกระแสการชนแบบ planar with radial flow ที่มีลักษณะการชนแบบตรงตามแนวแกน และกระแสเคลื่อนที่ออกจากระยะการชนเป็นแนวรัศมี (รูปที่ 3a) รูปแบบกระแสการชนแบบ planar with circumferential flow ที่มีลักษณะการชนแบบตรงตามแนวแกนและมีการหมุนวนของกระแสและระยะนาบ

การชน (รูปที่ 3b) รูปแบบกระแสน้ำแบบ tubular ที่มีลักษณะทิศทางของกระแสไหลวนตามแนวท่อดำเนินเดี่ยว (รูปที่ 3c) และรูปแบบกระแสน้ำแบบ annular ที่มีลักษณะทิศทางกระแสไหลวน 2 ทิศทางในทางตรงกันข้าม (รูปที่ 3d) [3] ซึ่งเป้าหมายของการศึกษาวิจัยเหล่านี้ก็เพื่อช่วยเพิ่มระยะเวลาการคงอยู่ของวัสดุในระบบ (residual time) ให้มีเวลานานขึ้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจากวัสดุหรือเพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพของการอบแห้งวัสดุให้มีประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดีที่สุด

2. การประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

กระบวนการอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นวิธีการอบแห้งแบบรวดเร็ว จึงทำให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งวัสดุได้มากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบเดิม เช่น



รูปที่ 1 หลักการของ impinging stream drying [3]

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ หรือการใช้ตู้อบลมร้อน ในการอบแห้งแบบกระแสน้ำนั้น กลไกการกำจัดความชื้นของวัสดุ เกิดขึ้นในบริเวณที่เรียกว่า impingement zone ซึ่งเกิดจากการชน (collision) โดยตรงของกระแสน้ำตรงกันข้าม 2 กระแสที่มีคุณลักษณะเป็นแก๊สที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และอย่างน้อย 1 ใน 2 กระแสน้ำเป็นตัวพาวัสดุที่ต้องการอบแห้งเข้าสู่บริเวณการชน ซึ่งวัสดุที่นำมาอบแห้งแบบนี้มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งเปียก (wet particles) หรือหยดของเหลว (liquid droplets) ก็ได้ [3] เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นวิธีการอบแห้งที่มีอัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นของวัสดุสูง ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนา เพื่อให้สามารถนำไปสู่การใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับหลักการเบื้องต้นของกระบวนการอบแห้งแบบกระแสน้ำ

ตัวแปรและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบกระแสน้ำ และงานวิจัยที่มีการศึกษาการใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำเพื่ออบแห้งข้าวเปลือกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลักของประเทศไทย เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้เพื่องานวิจัยหรือการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

สำหรับในประเทศไทย ก่อนที่จะมีการนำการอบแห้งแบบกระแสน้ำมาใช้อบแห้งวัสดุทางการเกษตรนั้น ในปี พ.ศ. 2550 Sathapomprasath et al. [4] ได้ออกแบบและผลิตเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำต้นแบบ (prototype) ขึ้น และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบดังกล่าวโดยใช้อบแห้งเรซิน (resin) ที่มีความชื้นสูง กำหนดให้เรซินมีความชื้นเริ่มต้น 81-85% (d.b.) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 70-110 °C และเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบประมาณ 2 วินาที พบว่าการอบแห้งแบบ

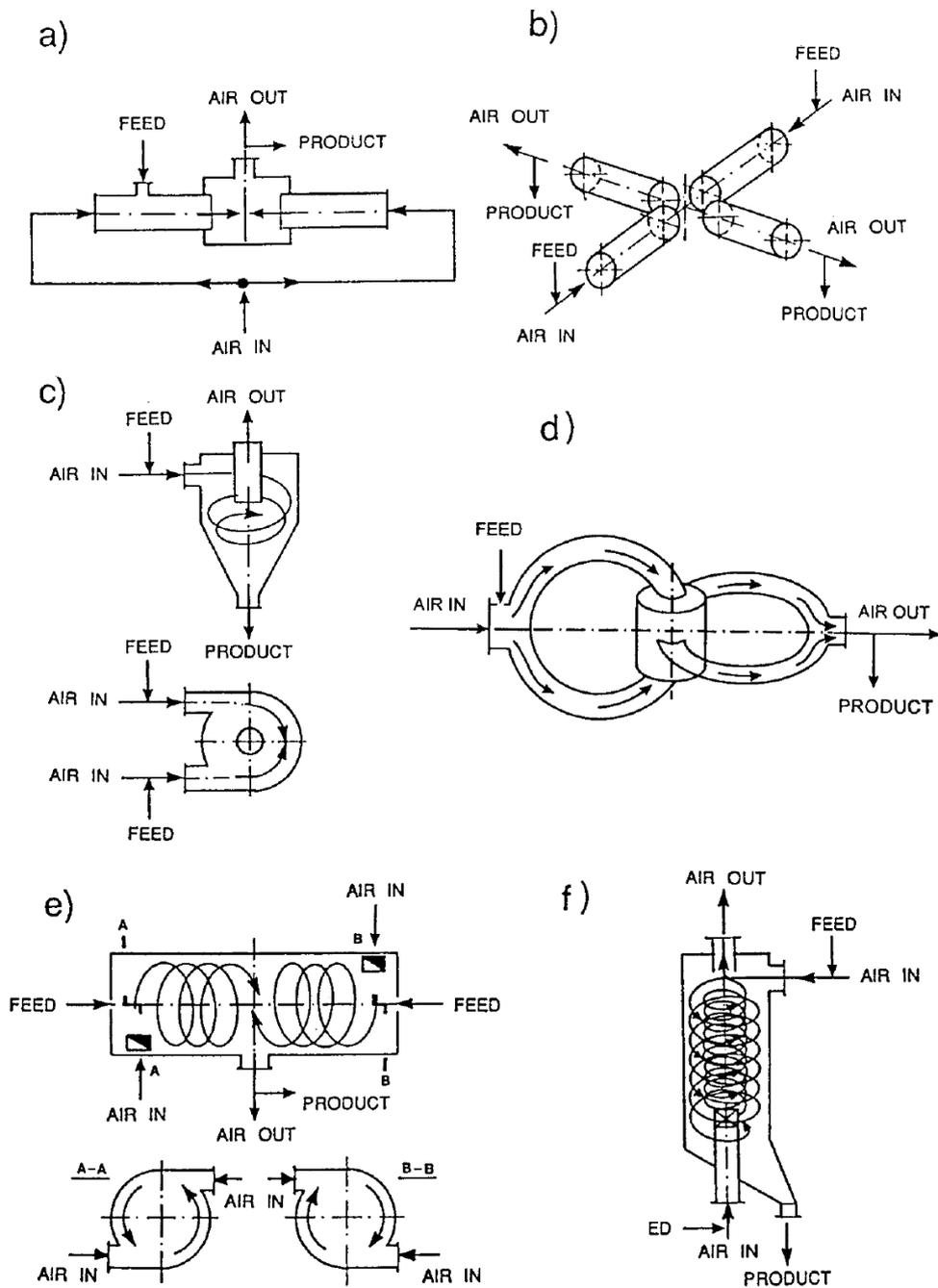
กระแสนสามารถลดความชื้นของเรซินได้ดี มีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงถึง $880 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ แม้ว่าในขณะนั้นเครื่องอบแห้งแบบกระแสนต้นแบบนี้ยังต้องการการพัฒนาเพิ่มเติม [5] แต่จากงานวิจัยเริ่มต้นนี้ [4] แสดงความเป็นไปได้ในการใช้การอบแห้งแบบกระแสนสำหรับลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก

ต่อมา Jantaka et al. [6] ในปี พ.ศ. 2551 ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการอบแห้งเรซินเพื่อใช้อบแห้งกากถั่วเหลือง โดยมีการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งวัสดุเข้าเครื่องอบแห้งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การไหลของวัสดุในท่อส่งวัสดุดีขึ้น และการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุจากเดิมที่เป็นแบบสายพานสกรู (screw conveyor) เป็นแบบสายพานลำเลียง (belt conveyor) ช่วยลดการเกาะติดกันของวัสดุที่ต้องการอบแห้งได้ [5] และในงานวิจัยของ Jantaka et al. นี้ [6] ได้ศึกษาผลของอัตราการป้อนวัสดุ (feed rate of drying particle) ระยะการชน (impinging distance) และอุณหภูมิอากาศขาเข้า (inlet air temperature) พบว่าที่อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ $10 \text{ kg}/\text{h}$ การเพิ่มระยะการชนจาก 5 cm เป็น 13 cm ทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat transfer coefficient) ของกากถั่วเหลืองลดลงประมาณ 16-20% แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มระยะการชนจาก 5 cm เป็น 13 cm ที่อัตราเร็วการป้อนวัสดุเท่ากับ $20 \text{ kg}/\text{h}$ และการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าจาก 130 เป็น $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร 7.5% แต่ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของกากถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) [6] การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากเครื่องต้นแบบของ Sathapornprasath [4] และจากงานวิจัยของ Jantaka [6] ยังคงมีการศึกษาและพัฒนาต่อโดย Choicharoen et al. [7] ได้ทำการเพิ่มจำนวน

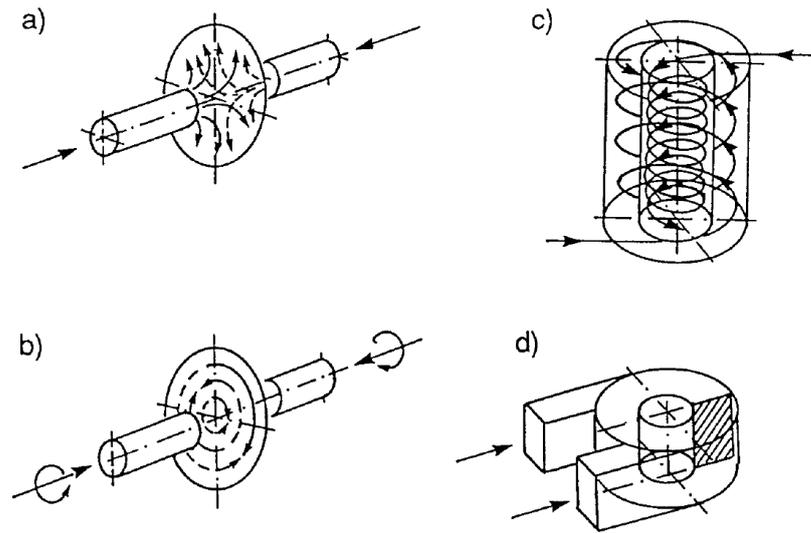
เครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (electric heater) อีก 1 ตัวและจัดวางตำแหน่งของเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้าทั้งสองด้านของท่อส่งลมร้อนไปยังห้องอบแห้ง (drying chamber) ในระยะที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังได้ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแยกเพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศขาเข้าแต่ละกระแสน และเปลี่ยนรูปแบบของการป้อนวัสดุขาเข้าจากแบบ orifice-type เป็นแบบ nozzle type

เมื่อทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนดังกล่าวแล้ว Choicharoen et al. [7] ได้ศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า ($130, 150, 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ระยะการชน ($5, 9, 13 \text{ cm}$) อัตราการป้อนวัสดุ (particle flow rate; $10, 20 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$) ความเร็วอากาศขาเข้า (inlet air velocity; $20, 27 \text{ m}/\text{s}$) โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ จากงานวิจัยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้า, ความเร็วอากาศขาเข้า และอัตราการป้อนวัสดุ ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ผลของระยะการชนต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจะขึ้นกับค่าของความเร็วอากาศขาเข้า การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้มีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $524 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $4,593 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption) ต่ำสุดเท่ากับ $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ในปี พ.ศ. 2552 ัญญาพรและกิตติ [8] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากเครื่องต้นแบบที่ได้ผลิตขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2550 และนำเครื่องอบแห้งที่พัฒนาแล้วมาทำการอบแห้งข้าวเปลือกเป็นครั้งแรก โดยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่พัฒนาขึ้นมีห้องอบแห้งถูกสร้างขึ้นจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm (3.5 นิ้ว) ยาว 25 cm ระยะห่างในการชนเท่ากับ 20 cm

ท่ออากาศเข้าทั้งสองด้านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm



รูปที่ 2 ทิศทางพื้นฐานของการไหลแบบกระแสน: a) Coaxial; b) Mutually perpendicular X configuration; c) Curvilinear countercurrent; d) Semicircular impinging streams ("chain" configuration); e) counter rotating countercurrent; f) Co-rotating countercurrent. [13]



รูปที่ 3 Impinging plane/zone geometries: a) Planar with radial flow; b) Planar with circumferential flow; c) Tubular; d) Annular [3]

สภาวะในการทดลองคือ อัตราเร็วคงที่เท่ากับ 25 m/s อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 70, 90 และ 110 °C และแรงดันไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 4, 10 และ 14 โวลต์ เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการป้อนวัสดุ มีค่าอัตราส่วนภาระ (loading ratio) ระหว่าง 0.1 – 0.7 (อัตราส่วนภาระ คืออัตราส่วนของอัตราการป้อนวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ) ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 - 30% (d.b.) ของการอบแห้งแบบกระแสน้ำเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราส่วนภาระ ความชื้นของข้าวเปลือกลดลง ซึ่งแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นซึ่งในการทดลองนี้ สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้สูงสุดประมาณ 5% (d.b.) ที่เวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบประมาณ 1-2 วินาที

การพัฒนาและประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำกับวัสดุอื่นยังคงมีการพัฒนาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง ในปี พ.ศ. 2553 Nimmol and Devahastin [9] ได้ประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำเพื่อทำการอบแห้งเบื้องต้นในข้าวเปลือกหลังเก็บเกี่ยวใหม่ มี

วัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกบางส่วน โดยศึกษาเปรียบเทียบระบบการอบแห้งที่มีจุดป้อนวัสดุ 1 จุด เทียบกับการมีจุดป้อนวัสดุ 2 จุด โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (110, 130, 150 °C) ระยะการชน (5, 10, 15 cm) อัตราการป้อนวัสดุ (particle flow rate; 130, 150 kg_{dry solid}/h) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบกระแสน้ำของชุดการทดลองด้วยค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าการใช้พลังงาน (energy consumption) พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 150 °C อัตราการป้อนวัสดุ 150 kg_{dry solid}/h ระยะการชน 5 cm และระบบการป้อนวัสดุแบบ 1 จุด ส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 198 kg_{water}/m³ h แต่การอบแห้งที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดคือการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 150 °C อัตราการป้อนวัสดุ 150 kg_{dry solid}/h ระยะการชน 5 cm และระบบการป้อนวัสดุแบบ 2 จุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร 7,013 W/m³ K และจากงานวิจัยนี้พบว่าการอบแห้งแบบกระแสน้ำในสภาวะดังกล่าว

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึงประมาณ 3.4 – 7.7% (d.b.) ในระยะเวลา 1.81 - 2.42 วินาที โดยไม่พบการแตกหักของเมล็ดข้าว และผู้วิจัยได้เสนอแนะว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 110 °C ระยะการชน 5 cm อัตราการป้อนวัสดุ 150 kg_{dry solid}/h โดยใช้ระบบการป้อนวัสดุแบบ 2 จุด เนื่องจากมีค่าการใช้พลังงานต่ำสุด และให้ผลในการลดความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

และในปี พ.ศ. 2554 นี้ Choicharoen et al. [10] ยังคงพัฒนาระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ แต่ได้ใช้ไอน้ำยิ่งยวด (superheated steam) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนแทนลมร้อนในระบบที่ได้ทำการศึกษาในกากถั่วเหลืองก่อนหน้านี้ [7,8] โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ การใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 °C เปรียบเทียบกับการใช้ไอน้ำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 130, 150, 170 และ 190 °C เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ระยะการชน 5, 9 และ 13 cm อัตราการป้อนวัสดุ (particle flow rate) 10 และ 20 kg_{dry solid}/h โดยพบว่าเมื่อใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดยังเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงกว่าการใช้อากาศร้อน สำหรับการใช้อากาศร้อนส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 549 kg_{water}/m³ h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 4,805 W/m³ K สำหรับไอน้ำอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 807 kg_{water}/m³ h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 7,983 W/m³ K และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดยังสามารถประหยัดค่าการใช้พลังงานจำเพาะทั้งหมด (total specific energy consumption) อยู่ในช่วง 9 – 46% เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้กับไอน้ำร้อนที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาเป็นแหล่งให้ความร้อนกับการอบแห้งแบบกระแสน้ำ

ซึ่งถือเป็นการนำพลังงานกลับมาใช้ซ้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ในปี พ.ศ. 2555 สุชาติและคณะ [11] ได้ศึกษาการอบแห้งแบบกระแสน้ำในข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 เพื่อติดตามผลของการอบแห้งดังกล่าวต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ร้อยละต้นข้าว และการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบกระแสน้ำ เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้เป็นเครื่องที่พัฒนาจากเครื่องต้นแบบแล้ว เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในการทดลองนี้ ประกอบด้วย พัดลมแรงดันสูงขนาด 5.5 kW เครื่องทำความร้อนขนาด 6 kW จำนวน 2 ชุด เครื่องป้อนวัสดุแบบโรตารีขนาด 117 W พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ กระแสตรง ปริมาตรห้องอบแห้งมีขนาดเท่ากับ 0.018 m³ และใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 130, 150 และ 170 °C ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s ระยะห่างการชนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อนวัสดุ 90 kg/h จากการทดลองพบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยเบื้องต้น แต่ได้มีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกเพิ่มเติม โดยพบว่าค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก และร้อยละต้นข้าวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และหลังผ่านการอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน ค่าสีของเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งที่แสดงด้วยค่า L*, a*, b* มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการอบแห้งด้วยเทคนิคกระแสน้ำใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น

ในปี พ.ศ. 2555 นี้ Nimmol et al. [12] ได้ทำการทดลองต่อโดยงานวิจัยเรื่องการใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง โดยได้ทำการศึกษามลของสถานะในการอบแห้งที่ใช้ในระบบการอบแห้งดังกล่าว ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง (70, 90 และ 110 °C) อัตราการป้อนวัสดุ (22, 47 และ 62 kg/h) โดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง และระยะห่างในการชนเท่ากับ 20

cm ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (energy consumption coefficient) อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การใช้พลังงาน (energy consumption) และคุณภาพของข้าวเปลือก โดยพบว่าการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน อัตราการป้อนวัสดุที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดการใช้พลังงาน ค่าของร้อยละต้นข้าว (head rice yield) ขึ้นกับอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุ เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละต้นข้าวลดลง แต่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขาว (whiteness) ของข้าวเปลือก การอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมร้อนสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากถึง 9.7% (ร้อยละความชื้นเริ่มต้น - ร้อยละความชื้นหลังการอบแห้ง) ในระยะเวลา 3.2 วินาที ส่วนการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ 6.5% ในเวลา 1.9 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้นมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบ spouted bed drying และ fluidized bed drying เพื่อให้ได้อัตราการลดความชื้นที่ใกล้เคียงกันที่ต้องใช้เวลา 900 และ 144 วินาที ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละของต้นข้าวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ต่อมาในปี พ.ศ. 2556 Swasdisewi et al. [13] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนในข้าวเปลือกโดยใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน 2 ชนิด คือ อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) และยังได้ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งแบบ 1 และ 2 รอบ (passes of drying) โดยได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนต่อคุณภาพของข้าวเปลือกด้าน สี ค่าของร้อยละต้นข้าว และระดับการเกิดเจลของสตาร์ชจากแป้งข้าว (degree of starch

gelatinization) รวมถึงประสิทธิภาพของการอบแห้ง จากการทดลองพบว่าในการอบแห้งแบบ 1 รอบ อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการอบแห้งรอบที่ 2 อุณหภูมิในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง และนอกจากนั้นอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (130, 150, 170 °C) ไม่มีผลต่อลักษณะสีของข้าวเปลือก แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้ข้าวมีสีแดงและสีเหลืองมากกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนที่ใช้อากาศร้อน แต่ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ค่าร้อยละต้นข้าวลดลง และการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งช่วยเพิ่มระดับการเกิดเจลของสตาร์ชในแป้งข้าวมากกว่าการใช้อากาศร้อน ซึ่งสามารถนำแป้งข้าวที่มีคุณสมบัติในการเกิดเจลต่างกันนี้ไปใช้ในการผลิตอาหารที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้

ในปี พ.ศ. 2556 และ พ.ศ. 2557 Pruengam et al. [14,15] ได้พัฒนาระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่ง (parboiled paddy) ซึ่งทำการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งด้วยการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนสลับกับการบ่ม (tempering) เป็นจำนวน 2 รอบ [15] และ 7 รอบ [15] เพื่อลดการเกิดรอยร้าวบนเมล็ดข้าว (kernel fissuring) หากมีการใช้อุณหภูมิสูงเพื่อลดความชื้นของเมล็ดข้าวและทำให้เกิดความเครียดภายในเมล็ดข้าว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว หรือทำให้ค่าของร้อยละต้นข้าวต่ำลงนั่นเอง โดยในการทดลองของ Pruengam et al. [15] มีสภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิอากาศร้อนที่ 130, 150 และ 170 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s ระยะการชนเท่ากับ 5 cm อัตราการป้อนข้าวเปลือกนึ่งเท่ากับ 40 kg_{dry paddy}/h ทำการอบแห้งสลับกับการบ่มเป็นจำนวน 7 รอบ แต่ละรอบของการบ่มใช้เวลาแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 15, 30, 60 และ 120 นาที จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งนั้นขึ้นกับ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

อุณหภูมิอากาศร้อนและเวลาในการต้ม เมื่อรอบในการทำแห้งเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่ค่าร้อยละต้นข้าวและค่าดัชนีความขาวของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของข้าวเปลือกหนึ่ง โดยค่าร้อยละของต้นข้าวต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 ซึ่งถือเป็นค่าที่อุตสาหกรรมยอมรับได้ และค่าดัชนีความขาวของเมล็ดข้าวควรมีค่าสูง โดยค่าดัชนีความขาวอ้างอิงจากการอบแห้งแบบถาดที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน มีค่าเท่ากับ 55.4 ± 0.1 ค่าดัชนีความขาวสูงหมายความว่าข้าวมีความขาวมาก จากการทดลองผู้วิจัยได้เสนอแนะว่าการอบแห้งแบบกระแสนที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ควรมีระยะเวลาการต้มอย่างน้อย 15 นาทีในแต่ละรอบของการอบแห้งและการต้มมากกว่า 30 นาทีขึ้นไปส่งผลให้ค่าร้อยละต้นข้าวมีค่าเพิ่มมากขึ้น และการอบแห้งแบบกระแสนไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงกว่า $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อไม่ส่งผลให้เกิดสีเหลืองในเมล็ดข้าว

ในปี พ.ศ. 2559 Pruegam et al. [16] ได้ทำการวิจัยต่อเนื่องเพื่อประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสนในอุตสาหกรรมการผลิตข้าวหนึ่ง (parboiled rice) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวกล้องหนึ่ง (parboiled brown rice kernel) ทำการทดสอบในสภาวะที่คล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้า [14,15] โดยทดสอบที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ $130, 150$ และ $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s ระยะการชนเท่ากับ 5 cm อัตราการป้อนข้าวเปลือกหนึ่งเท่ากับ $40\text{ kg}_{\text{dry paddy}}/\text{h}$ ทำการอบแห้งสลับกับการต้มเป็นจำนวน 7 รอบ ใช้เวลาในการต้มเท่ากับ 0 และ 30 นาที ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องหนึ่งเพิ่มเติม คุณลักษณะที่ทำการศึกษา ได้แก่ ลักษณะสีฐานของเมล็ดข้าว ค่าร้อยละต้นข้าว ค่าคุณสมบัติทางกายภาพที่วัดด้วยการทดสอบ three-point bending test ที่ทำการทดสอบความสามารถในการต้านการหักของเมล็ดข้าว และการวัดค่าเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวที่แสดงด้วยค่า tensile strength และ ค่า modulus of elasticity จากงานวิจัยพบว่าการอบแห้งในรอบที่ 1

และ 2 มีค่าอัตราการอบแห้งที่สูง แต่ภายหลังจากการอบแห้งรอบที่ 2 อัตราการอบแห้งมีค่าลดลง การต้มช่วยให้ค่าร้อยละต้นข้าวมีค่าสูงกว่าการทดลองที่ไม่มีการต้ม และในการทดลองนี้พบว่าการอบแห้งแบบกระแสนส่งผลให้เกิดรอยแยกขนาดเล็ก (microcrack) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในอุตสาหกรรม เนื่องจากรอยแยกนี้นำไปสู่การลดลงของร้อยละต้นข้าว โดยอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดรอยแยกขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น (มีค่ามากกว่า 25% ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงของข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ $45\text{ }^{\circ}\text{C}$) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการหัก (maximum breaking force) ค่า tensile strength และ ค่า modulus of elasticity ของเมล็ดข้าวกล้องหนึ่งมีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น และผ่านการอบแห้งที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและเวลานานส่งผลให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวอ่อนแอลง

ในปี พ.ศ. 2560 ฉัตรชัยและคณะ [17] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เครื่องอบแห้งกระแสนในกากถั่วเหลืองซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลือง โดยมุ่งเน้นเรื่องการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยกากถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 288 ถึง 342% (d.b.) โดยที่ความชื้นต่ำที่สุดที่ได้จากการอบแห้งนี้เท่ากับ 23.7% (d.b.) ในการศึกษานี้ได้ใช้อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ 100, 130 และ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการป้อนกากถั่วเหลืองเท่ากับ 15, 30 และ $45\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ได้ทำการศึกษาการอบแห้งที่ 1 รอบ และ 2 รอบ พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่า $1,784.2\text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{ h}$ และ $3,385.3\text{ W}/\text{m}^3\text{ K}$ ตามลำดับ จะเกิดขึ้นที่รอบที่ 1 ที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่อัตราการป้อน $45\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ค่า $\text{SEC}_{\text{total}}$ ต่ำที่สุดมีค่า $2.07\text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และที่อัตราการป้อน $45\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ซึ่งถือว่าเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของงานวิจัยนี้ และทำให้เห็นว่าค่าของ $\text{SEC}_{\text{total}}$ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราการป้อน 15

เมื่อ h_v คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
เชิงปริมาตร (W/m^3K)

λ คือ ความร้อนแฝงของการระเหย
(kJ/kg)

ΔT_{lm} คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม
(K)

$kg_{dry\ solid}/h$ พบว่า SEC_{total} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการ
อบแห้ง ส่วนในการอบแห้งรอบที่ 2 พบว่าอัตราการระเหย
น้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิง
ปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนกากถั่วเหลือง แต่
อุณหภูมิการอบแห้งไม่ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิง
ปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
มากนัก

3. ค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบ กระแสขน

ในงานวิจัยส่วนใหญ่ทำการวัดประสิทธิภาพการ
ทำงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสขนจากการคำนวณ
ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การ
ถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และในงานวิจัยยัง
คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ และวัดค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจาก
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นผลมา
จากหลายตัวแปร เช่นอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร
สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_o)}{V_r} \quad (1)$$

เมื่อ N_v คือ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร
(kg_{water}/m^3h)

W_p คือ อัตราการป้อนวัสดุ ($kg_{dry\ solid}/h$)

X_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (kg/kg;
d.b.)

X_o คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (kg/kg;
d.b.)

V_r คือ ปริมาตรของห้องอบแห้ง (m^3)

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
หาได้จากสมการที่ (2)

$$h_v = \frac{W_p \lambda (X_i - X_o)}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (2)$$

ค่า ΔT_{lm} หาได้จากสมการที่ (3)

$$\Delta T_{lm} = \frac{[(T_d - T_w)_o - (T_d - T_w)_i]}{\ln[(T_d - T_w)_o / (T_d - T_w)_i]} \quad (3)$$

เมื่อ T_d คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (K)

T_w คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (K)

(ตัวห้อย o และ i หมายถึงทางออกและทางเข้าของห้อง
อบแห้งตามลำดับ)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการ
อบแห้งหาได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ
กระบวนการอบแห้ง (MJ/kg_{water})

E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลม
แรงดันสูงหรือชุดทำความร้อนด้วย
ไฟฟ้า (MJ)

m_w คือ ปริมาณความชื้นที่นำออกจากวัสดุ
(kg)

ค่า m_w หาได้จากสมการที่ (5)

$$m_w = W_p (X_i - X_o) t \quad (5)$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบ กระแสขน

ในงานวิจัยนั้น นักวิจัยสามารถจำลองผลการทดลองและการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ได้ด้วยจากการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) โดยการจำลอง (simulation) ผลการวิจัยที่เป็นไปได้โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำนายผลการทดลอง และเครื่องมือที่นิยมใช้จำลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ คือ โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD)

ในงานวิจัยของ Khomwachirakul et al. ในปี พ.ศ. 2559 [18] ได้ใช้โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) และโปรแกรม computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) ในการจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูงในการอบแห้งแบบกระแสขน จากงานวิจัยได้กำหนดตัวแปรต้นซึ่งเป็นสภาวะในการทดลอง ได้แก่ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ค่าความจุความร้อนของอนุภาค ค่าการนำความร้อนของอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นของอนุภาค อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะเวลาขน และในการใช้โปรแกรม CFD เพื่อจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งนั้น มีการกำหนดค่าตัวแปรเพิ่มเติม คือ ค่า restitution coefficient of particle-wall ค่า gas time step และค่า particle time step ในขณะที่การจำลองโดยใช้โปรแกรม CFD-DEM ได้ใช้ค่า spring constant ค่า friction coefficient และ ค่า restitution coefficient of particle-particle เพิ่มเติม โดยหลักการที่เกี่ยวข้องกับการจำลองดังกล่าว ได้แก่ พฤติกรรมเคลื่อนที่ของแก๊ส (gas motion behavior) พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle motion behavior) และ จลนศาสตร์ของการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูง (kinetic drying of high moisture particle) และมี

สมการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการ continuity equation (สมการที่ (6))

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha\rho u_i) = M_m \quad (6)$$

เมื่อ	t	คือ time (s)
	α	คือ void fraction
	ΔT_{lm}	คือ gas density (kg/m ³)
	x_i	คือ coordinates (m)
	u_i	คือ gas-phase velocity component (m/s)
	M_m	คือ source term in mass balance equation (kg/m ³ .s)

สมการโมเมนตัม (Momentum equation) (สมการที่ (7))

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha\rho u_i u_j) = -\alpha \frac{\partial P}{\partial x_i} + \left[\alpha(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \alpha\rho g + M_F \quad (7)$$

เมื่อ	u_j	คือ gas-phase velocity component (m/s)
	P	คือ pressure (N/m ²)
	x_j	คือ coordinates (m)
	μ	คือ gas dynamic viscosity (kg/m.s)
	μ_t	คือ turbulent viscosity (kg/m.s)
	g	คือ gravitational acceleration (m/s ²)
	M_F	คือ source term in momentum balance equation (N/m ³)

สมการ Particle motion equations (สมการที่ (8))

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_D + F_C \quad (8)$$

เมื่อ	m_p	คือ mass of particle (kg)
-------	-------	---------------------------

u_p คือ particle velocity (m/s)

F_g คือ gravitational force (N)

F_D คือ drag force (N)

F_C คือ contact force (N)

สมการพลังงาน (energy equation for the gas phase) (สมการที่ (9))

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (9)$$

เมื่อ c_p คือ heat capacity of drying air (J/kg.K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

k คือ turbulence kinetic energy (m²/s²)

M_h คือ source term in energy balance equation (W/m³)

และสมการ species (water) balance equation (สมการที่ (10))

$$\frac{\partial (\alpha \rho C)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (10)$$

เมื่อ C คือ particle concentration (kg/m³)

D คือ diffusion coefficient in gas phase (m²/s)

Sc_t คือ turbulent Schmidt number

M_m คือ source term in mass balance equation (kg/m³.s)

จากงานวิจัยดังกล่าว [18] ซึ่งได้นำสมการคณิตศาสตร์มาใช้จำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งอนุภาคที่มีความชื้นสูง โดยเปรียบเทียบความแม่นยำ

ระหว่างการคำนวณผ่านโปรแกรม CFD และโปรแกรม CFD-DEM เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าการใช้โปรแกรม CFD-DEM ให้ผลการทดลองที่แม่นยำกว่าการใช้โปรแกรม CFD นอกเหนือไปจากการสร้างภาพจำลองของอนุภาคในระหว่างการอบแห้งแบบกระแสนด้วยโปรแกรมดังกล่าวแล้ว Khomwachirakul et al. [18] ได้รายงานผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (mean residence time) และค่าความชื้นของวัสดุ (moisture content of particle) โปรแกรม CFD-DEM แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเพียง ±4% เท่านั้น แต่โปรแกรม CFD แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง ±8% สำหรับค่าความชื้นของวัสดุนั้น โปรแกรม CFD-DEM และโปรแกรม CFD แสดงค่าความชื้นของวัสดุคลาดเคลื่อน ± 3% และ ± 7% ตามลำดับ

5. สรุป

การอบแห้งแบบกระแสนเป็นวิธีการอบแห้งที่มีศักยภาพในการใช้ลดความชื้นของวัสดุทางการเกษตรของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวเปลือก ซึ่งเป็นวัสดุทางการเกษตรที่เป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสนเป็นวิธีการอบแห้งที่รวดเร็วมีค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง แต่ทั้งนี้ปัจจัยที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบกระแสน เช่น ชนิดของตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิของอากาศร้อน ระยะห่างการชน อัตราการป้อนวัสดุ ระบบท่อ ต้องมีการควบคุมให้เหมาะสมเพราะมีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง และค่าการใช้พลังงานในการอบแห้ง

ในด้านคุณภาพของวัสดุที่ผ่านการอบแห้งแบบกระแสน โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวเปลือก ลักษณะคุณภาพที่คำนึงถึง ได้แก่ ค่าสีของเมล็ดข้าว ความชื้น ร้อยละต้นข้าว ระดับการเกิดเจลของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เป็น

เกณฑ์พิจารณาคุณภาพของข้าว พบว่าข้อดีของการอบแห้งแบบกระแสนคือใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น แต่ยังไม่สามารถใช้ทดแทนวิธีการอบแห้งแบบเดิมที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้เนื่องจากคุณภาพด้านสีและการแตกหักของเมล็ดข้าวที่ยังมีค่าต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบเดิม ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาต่อเนื่องเพื่อพัฒนาเครื่องมือหรือวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมต่อไป

จากการรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งแบบกระแสนในวัสดุทางการเกษตร พบว่าการศึกษาวิจัยได้ศึกษาจนเข้าใจการประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้เทคนิคการอบแห้งแบบกระแสนได้จริงจึงควรมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องต่อไป โดยต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อให้วัสดุทางการเกษตรที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หรืออยู่ในเกณฑ์ดี และควรขยายหรือยกระดับ (Up scaling) การประยุกต์ใช้ให้สามารถใช้ในระบบการอบแห้งจริง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Wu, *Impinging Streams Fundamental Properties Application*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2007.
- [2] A. Tamir, *Impinging- Stream Reactors*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.
- [3] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [4] K. Sathapornprasath, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials," *Drying Technol.*, vol. 25, pp. 1121-1128, 2007.
- [5] K. Supakumnerd, and K. Sathapornprasath, "A review of the impinging stream dryer," *SWU Eng. J.*, vol. 8, pp. 16-23, 2013.
- [6] P. Jantaka, C. Nimmol and S. Devahastin, "Use of an impinging stream dryer for agricultural waste: case study with soy residue," in *The 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Pathum Thani, Thailand, 2008, pp. 207-211.
- [7] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high- moisture particulate materials," *Drying Technol.*, vol. 28, pp. 20-29, 2010.
- [8] ธัญญาพร ปัตตาชารี และ กิตติ สถาพรประสาธน์. "การศึกษาศมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับวัสดุทางการเกษตร". ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, จังหวัดเชียงใหม่, 2552, [ระบบออนไลน์].
- [9] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Eng.*, vol. 30, pp. 2204-2212, 2010.
- [10] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryers for high- moisture particulate materials," *Applied Thermal Eng.*, vol. 31, pp. 3444-3452, 2011.
- [11] สุชาติ ชนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และสมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, "การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* ปีที่ 1 ฉบับที่ 2, หน้า 1-10, 2555.
- [12] C. Nimmol, K. Sathapornprasath, and S. Devahastin, "Drying of High-moisture paddy

- using a combined impinging stream and pneumatic drying system," *Drying Technol.*, vol. 30, pp. 1854-1862, 2012.
- [13] T. Swasdisevi, S. Devahastin, S. Thanasookprasert, and S. Soponronnarit, "Comparative evaluation of hot-air and superheated-steam impinging stream drying as novel alternatives for paddy drying," *Drying Technol.*, vol. 31, pp. 717-725, 2013.
- [14] P. Pruengam, S. Prachayawarakorn, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Drying of parboiled paddy using an impinging stream dryer," in The 14th TASE National Conference and The 6th International Conference: TSAE 2013, Prachuap khiri khan, Thailand, 2013, pp. 127-130.
- [15] P. Pruengam, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn and, S. Devahastin. "Rapid drying of parboiled paddy using hot air impinging stream dryer," *Drying Technol.*, vol. 32, pp. 1949-1955, 2014.
- [16] P. Pruengam, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn and, S. Devahastin. "Evolution of mechanical properties of parboiled brown rice kernels during impinging stream drying," *Drying Technol.*, vol. 34, no. 15, pp. 1843-1853, 2016.
- [17] ฉัตรชัย นิยมมล, อนุชา ทิรัญวัฒน์ และกิตติ สถาพร ประสาธน์. "สมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับถั่วเหลือง," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เชียงใหม่* ฉบับที่ 24, เล่มที่ 1, หน้า 45-59, 2560.
- [18] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisevi and, S. Soponronnarit. "Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM," *Drying Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 403-419, 2016.