

## การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเทคนิค

### กระแสน

## Feasibility Study of Paddy Dehydration Using Impinging Stream Technique

วุฒิพงษ์ แต่งดี<sup>1</sup> วีระ จันทร์วัฒน์<sup>1</sup> ฉัตรชัย นิยมล<sup>2</sup> อนุชา หิรัญวัฒน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทรศัพท์ 086-6159554

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทรศัพท์ 086-9069754

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: jar\_tang@hotmail.com

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาความเป็นไปได้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน ในช่วงแรก เครื่องอบแห้งแบบกระแสนต้นแบบที่มีกระแสนสองกระแสร่วมแกนเดียวกัน ได้ถูกพัฒนาขึ้น จากนั้นผลกระทบตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ ระยะห่างระหว่างทางเข้าสองกระแสที่ตรงข้ามกัน (ระยะชน) และจำนวนจุดป้อนวัสดุ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง (ในแง่ของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร) และความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งได้ถูกศึกษาโดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงเป็นวัสดุทดสอบ จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการมีค่ามากขึ้น แต่กลับทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการป้อนวัสดุที่มากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้น แต่กลับทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการลดลง อย่างไรก็ตาม ระยะห่างในการชนที่น้อยลงจะส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้น แต่ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยลง เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการป้อนวัสดุเข้าระบบ จะพบว่าอัตราการป้อนวัสดุเข้าระบบสองทางจะทำให้สมรรถนะของระบบต่ำกว่ากรณีป้อนวัสดุทางเดียว ส่วนในด้านคุณภาพของข้าวหลังการอบแห้ง พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นและอัตราการป้อนวัสดุมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวมีค่ามากขึ้น แต่ระยะห่างในการชนที่น้อยลงทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวมีค่าน้อยลง

**คำสำคัญ:** การอบแห้งแบบกระแสน ข้าวเปลือก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร  
อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

### ABSTRACT

The objective of the present research was to study the possibility of reducing the high initial moisture content of paddy by using an impinging stream dryer as a first-stage drying. In this study, the coaxial two-impinging stream dryer prototype for paddy drying was developed and the effects of various operating and geometric parameters, i.e., inlet air temperature; particle flow rate; impinging distance the between two opposed inlets and number of particle feeding points, on the overall performance (in terms

of the volumetric water evaporation rate and volumetric heat transfer coefficient) and energy consumption of the impinging stream dryer were then investigated using the high-moisture paddy as a tested material. The results showed that an increase in the inlet air temperature led to an increase in the volumetric water evaporation rate and specific energy consumption (SEC) but led to a decrease in the volumetric heat transfer coefficient. In the case of particle flow rate it was found that an increase in the particle flow rate led to an increase in the volumetric water evaporation rate and volumetric heat transfer coefficient but led to a decrease in the SEC. It was also observed that performance of the dryer in the case of single-point particle feeding was higher than those in the case of double-points particle feeding. In terms of dried product quality it was found that an increase in the inlet air temperature and particle flow rate led to an increase in the head rice yield and whiteness. In addition, a decrease in the impinging distance resulted in lower head rice yield and whiteness.

**Keyword:** Impinging Stream Drying, Paddy, Volumetric Heat Transfer Coefficient,  
Volumetric Water Evaporation Rate

## 1. บทนำ

ข้าวถือเป็นพืชอาหารที่มีความสำคัญของโลก โดยเฉพาะสำหรับประเทศไทยซึ่งโดยปกติแล้วข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่มักมีความชื้นสูงจึงมีความจำเป็นต้องมีการอบแห้งเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเสื่อมคุณภาพของข้าวจากจุลินทรีย์และการหายใจของข้าวเปลือก ด้วยเหตุที่ข้าวเปลือกมีลักษณะเป็นวัสดุอนุภาค (Particulate material) เครื่องอบแห้งแบบกระแสน (Impinging stream dryer) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวและได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถลดความชื้นที่ผิวของวัสดุได้ดีก็ถือเป็นหนึ่งในเครื่องอบแห้งที่สามารถนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุอนุภาคได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเครื่องอบแห้งแบบกระแสนมาใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก

หลักการพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน คือการให้กระแสนไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้ง (โดยส่วนใหญ่คืออากาศร้อน) 2 กระแส (หรือมากกว่า) มาชนกัน [1] โดยให้กระแสใดกระแสหนึ่ง (หรือมากกว่า) พาววัสดุเข้ามาสู่ระบบ ผลของการชนกันของกระแสนไหลของตัวกลางที่ใช้การอบแห้งจะทำให้เกิดบริเวณการชน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราการ

ถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และโมเมนตัมสูง อันเป็นผลจากบริเวณดังกล่าวมีแรงเฉือนและความปั่นป่วนของกระแสนไหลมาก นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในระบบยังมีลักษณะพิเศษ กล่าวคือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นแบบสวนทางกลับไปกลับมาภายในบริเวณการชน ซึ่งเริ่มต้นจากการที่อนุภาคถูกเร่งให้มีความเร็วสูงโดยกระแสนไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งกระแสนหนึ่ง (กระแสที่พาอนุภาคเข้าสู่ระบบ) และวิ่งสวนเข้าไปในกระแสนไหลตรงกันข้ามอันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยของอนุภาคนั้น จนในที่สุดอนุภาคดังกล่าวจะหยุดการเคลื่อนที่เนื่องจากถูกต้านด้วยกระแสนไหลตรงกันข้าม หลังจากนั้นอนุภาคจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นอีกครั้งโดยกระแสนไหลตรงกันข้ามเพื่อเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการชนอีกครั้ง ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความเร็วของอนุภาคลดลงจนถึงค่าหนึ่ง อนุภาคจะถูกกระแสนไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งพาออกไปจากระบบ (ห้องอบแห้ง) ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบกลับไปกลับมาดังที่กล่าวจึงส่งผลให้อนุภาคอยู่ในระบบเป็นระยะเวลาที่ยาวขึ้น เวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารระหว่างอนุภาคกับตัวกลางที่ใช้ในการ

อบแห้งจึงมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุที่กล่าวข้างต้น จึงทำให้ระบบการอบแห้งแบบกระแสดชนมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าระบบการอบแห้งชนิดอื่นมาก นั้นหมายความว่าระบบการอบแห้งแบบกระแสดชนจะมีขนาดเล็กกว่า รวมไปถึงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่นที่ภาระการอบแห้งเท่ากัน จึงนับได้ว่าการอบแห้งแบบกระแสดชนเป็นระบบการอบแห้งที่มีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะมีจุดเด่นในแง่ของประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูง รวมไปถึงระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อน แต่เทคนิคกระแสดชนยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ในการลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรสำหรับประเทศไทย

Elperin [2] นำเสนอระบบการอบแห้งด้วยกระแสดชนซึ่งต่อมาได้มีนักวิจัยอีกหลายท่านที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดชนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น [1] ได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องแบบกระแสดชนที่มีการป้อนวัสดุแบบตามแนวรัศมีของห้องอบแห้ง (Tangentially feed impinging stream dryer) จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งดังกล่าวสูงกว่าเครื่องอบแห้งวัสดุอนุภาคชนิดอื่น ๆ เช่น เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด (Spouted bed dryer) Kitron and Tamir [3] ศึกษาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัสดุ การอบแห้งเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบ และการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดชน ผลจากการศึกษาพบว่า ปริมาตรประสิทธิผลของการถ่ายเทมวลและความร้อนไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของห้องอบแห้งแต่ขึ้นอยู่กับปริมาตรระหว่างท่อทางเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้าน นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนภาระ (Loading ratio) ซึ่งเป็นค่าระหว่างอัตราการป้อนวัสดุกับอัตราการไหลของอากาศในระบบ กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น เวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heat transfer coefficient) จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนวัสดุ ในเวลาต่อมา Kitron and Tamir [4] ได้ศึกษาคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดชนแกนเดียวกัน โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเมล็ดธัญพืช ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เวลาเฉลี่ยของวัสดุอยู่ในระบบจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนภาระ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุที่ค้างอยู่ในระบบ (Hold-up of particles) และตามอัตราการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้น Sathapornprasath et al. [5] ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดชนโดยการประเมินค่าอัตราการระเหยน้ำจากวัสดุอนุภาคเดี่ยวภายใต้ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วและอุณหภูมิของอากาศขาเข้าจะส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้นในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าจะทำให้อัตราการระเหยของน้ำออกจากวัสดุลดลง ในกรณีใช้อุณหภูมิร้อนยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วและอุณหภูมิขาเข้าของไอน้ำร้อนยิ่งส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความดันไอน้ำร้อนยิ่งจะส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิผกผัน (Inversion temperature) ของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดชนที่ศึกษามีค่าประมาณ 212 °C ที่อัตราการระเหยน้ำเท่ากับ 60 kg<sub>water</sub>/m<sup>3</sup>h เมื่อไม่นานมานี้ Sathapornprasath et al. [6] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า ความเร็วอากาศร้อนขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะห่างในการชนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดชนในแง่ของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (Volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยใช้เรซิน (Rasin) ที่มีความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 81% - 85% (d.b.) เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของอากาศส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่กลับไม่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

นอกจากนี้ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ  $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$  และ  $880 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$  ตามลำดับ แม้ว่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนที่พัฒนาโดย Sathapornprasath et al. [6] จะมีค่าสูงกว่าเครื่องอบแห้งวัสดุอนุภาคทั่วไป แต่เครื่องอบแห้งดังกล่าวยังไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทางการเกษตรบางชนิดได้เนื่องจากวัสดุทางการเกษตรบางชนิดมีความชื้นสูงและมีความสามารถในการจับตัวสูง ส่งผลให้เกิดการอุดตันในระบบและการควบคุมอัตราการป้อนวัสดุเข้าระบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว Choicharoen et al. [7] จึงได้พัฒนาระบบการป้อนวัสดุแบบสายพานและปรับปรุงระบบทำความร้อนของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนที่พัฒนาโดย Sathapornprasath et al. [6] หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาสมรรถนะและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนโดยใช้กากถั่วเหลือง (Okara) เป็นวัสดุในการทดสอบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนมีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาใช้ในการลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงได้ โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่า  $520 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{h}$  และ  $4500 \text{ W}/\text{m}^3\text{K}$  ตามลำดับ ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดของกระบวนการอบแห้งมีค่าเท่ากับ  $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$

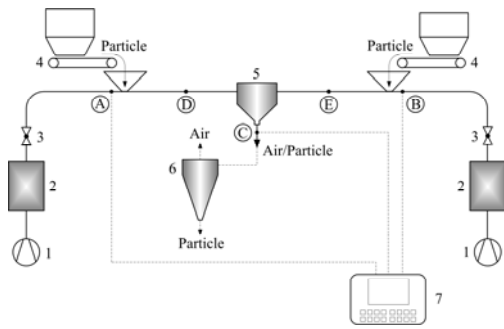
ถึงแม้ว่ามิงงานวิจัยจำนวนไม่น้อยที่รายงานถึงข้อดีต่าง ๆ ของการอบแห้งแบบกระแสดวน แต่การศึกษาถึงการนำเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนไปใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกทั้งในแง่ของสมรรถนะของเครื่องอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งยังไม่ปรากฏ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวน โดยทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ

เข้า อัตราการป้อนวัสดุ ระยะห่างในการชน และจำนวนจุดป้อนวัสดุที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนทั้งในแง่ของอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร รวมถึงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาคูณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งด้วยเทคนิคกระแสดวนด้วย

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 1) พัดลมแรงดันสูง (High-pressure blower) จำนวน 2 ตัว ซึ่งสามารถสร้างความดันได้ 3.25 kPa ที่อัตราไหลของอากาศ  $0.046 \text{ m}^3/\text{s}$  2) ชุดทำความร้อนแบบไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 15 kW จำนวน 2 ชุด ซึ่งถูกควบคุมการทำงานชุดควบคุมแบบ PID (DHC, model DHC1T-D, Wenzhou, China) ซึ่งมีความแม่นยำ  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  3) โกลบวาล์ว (Globe valve) ซึ่งใช้ในการควบคุมความเร็วของอากาศขาเข้า 4) ชุดป้อนวัสดุแบบสายพาน (Belt feeder) ซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการป้อนวัสดุเข้าระบบ 5) ห้องอบแห้ง (Drying chamber) ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลสโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3048 m และมีปริมาตร  $0.0462 \text{ m}^3$  หุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว และ 6) ไซโคลน (Cyclone) ซึ่งใช้สำหรับแยกวัสดุออกจากอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้ง (ไซโคลนจะถูกนำออกจากกระบวนในระหว่างการศึกษาศมรรถนะของเครื่องอบแห้ง) ในระหว่างการทดลอง อุณหภูมิกระเปาะแห่งของอากาศขาเข้า (จุด A และ B) จะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Hioki, 842-51, Japan) ส่วนอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้าจะถูกบันทึกด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพา (Vaisala, HM70, Finland) ส่วนค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ออกจากห้อง (จุด C) จะถูกบันทึกด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพาเช่นเดียวกัน



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

- 1) พัดลมแรงดันสูง 2) ชุดทำความร้อนแบบไฟฟ้า
- 3) โกลบวาล์ว 4) ชุดป้อนวัสดุแบบสายพาน 5) ห้องอบแห้ง 6) ไซโคลน

### 2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเปลือก (พันธุ์พวงทอง) ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28% (d.b.) เป็นวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง โดยก่อนเริ่มการทดลองในแต่ละครั้งจะนำข้าวเปลือกที่มีความชื้นประมาณ 12% (d.b.) มาทำการเพิ่มความชื้นให้มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 28% (d.b.) โดยการนำข้าวเปลือกแช่น้ำ 5 นาที แล้วนำขึ้นมาผึ่งเป็นเวลา 30 นาที

### 2.3 วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองเริ่มต้นด้วยการเปิดสวิตช์พัดลมแรงดันสูงโดยกำหนดความเร็วลมเท่ากับ 22 m/s ในทุกเงื่อนไขการทดลอง (เนื่องจากพัดลมแรงดันสูงที่ใช้ในการทดลองนี้ให้ค่าความเร็วสูงสุดเท่ากับ 22.7 m/s และความเร็วลมเท่ากับ 22 m/s สามารถทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในอากาศในลักษณะคล้ายของไหลได้จึงกำหนดให้ความเร็วลมเป็นตัวแปรคงที่) หลังจากได้อุณหภูมิของอากาศเข้าตามที่กำหนดไว้ก็จะป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบผ่านเครื่องป้อนแบบสายพาน หลังจากจุด A และ B ข้าวเปลือกที่ออกจากห้องอบแห้งจะถูกเก็บไว้เพื่อทดสอบคุณภาพ โดยจากการทดลองในเบื้องต้นพบว่า ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้การเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มต้นขึ้นเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไป 4 นาทีหลังการป้อนข้าวเปลือกเข้าระบบ การทดลองจะกระทำที่อุณหภูมิ

อากาศขาเข้า (T) 110 130 และ 150 °C ระยะห่างในการขน (ระยะชน) (L) 5 10 และ 15 cm อัตราป้อนวัสดุ (W<sub>p</sub>) 130 และ 150 kg<sub>dry solid</sub>/h และจำนวนจุดป้อนวัสดุแบบป้อนวัสดุทางเดียวและสองทาง โดยการทดลองในแต่ละเงื่อนไขจะกระทำไม่น้อยกว่า 6 ครั้ง

### 2.4 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนพิจารณาได้จากอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ [8]

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

โดยที่ N<sub>v</sub> คือ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (kg<sub>water</sub>/m<sup>3</sup>h) X คือ ความชื้นของวัสดุ (kg/kg (d.b.)) V<sub>r</sub> คือ ปริมาตรของห้องอบแห้ง (m<sup>3</sup>)

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

เมื่อ h<sub>v</sub> คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (W/m<sup>3</sup>K) λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg) และ ΔT<sub>lm</sub> คือ อุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (K) ซึ่งหาได้จาก

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

โดยที่ T<sub>d</sub> คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (K) T<sub>w</sub> คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (K) และตัวห้อย o และ i หมายถึงทางออกและทางเข้าห้องอบแห้ง

### 2.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption: SEC) เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยค่า SEC ของกระบวนการ

อบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$SEC_{blower} = E_{blower}/m_w \quad (4)$$

$$SEC_{heater} = E_{heater}/m_w \quad (5)$$

เมื่อ  $SEC_{blower}$  และ  $SEC_{heater}$  คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงและของชุดทำความร้อนตามลำดับ (MJ/kg<sub>water</sub>),  $E_{blower}$  และ  $E_{heater}$  คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานของพัดลมแรงดันสูงและของชุดทำความร้อนตามลำดับ (MJ) และ  $m_w$  คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ถูกนำออกจากผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง (kg<sub>water</sub>) ซึ่งประเมินได้จากสมการต่อไปนี้

$$m_w = W_p(X_i - X_o)t \quad (6)$$

เมื่อ  $W_p$  คือ อัตราการป้อนวัสดุ (kg<sub>dry solid</sub>/min) และ  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min)

### 2.6 คุณภาพของข้าวเปลือก

คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งสามารถวัดได้ด้วยเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield) และค่าความขาว (Whiteness) เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสามารถหาได้โดยทำความสะอาดข้าวเปลือกด้วยเครื่องเป่าทำความสะอาด (Aspirator) เพื่อกำจัดเมล็ดลีบ ระวังและสิ่งเจือปนต่าง ๆ จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้วจำนวน 125 g มากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะซึ่งจะทำให้ได้ข้าวกล้อง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของข้าวกล้องไว้ ต่อมาให้ขัดข้าวกล้องด้วยเครื่องขัดขาวจนกระทั่งได้เป็นข้าวสารและชั่งน้ำหนักไว้เช่นกัน นำข้าวสารทั้งหมดไปแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหักด้วยเครื่องคัดแยก แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง หลังจากนั้นจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดได้จากสมการต่อไปนี้

Head rice yield=

$$\frac{\text{Weight of Whole kernels}}{\text{Weigh of Paddy}} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ Head rice yield คือ เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด (%) Weight of whole kernels คือ น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด (g) และ Weight of paddy คือ น้ำหนักของข้าวเปลือก (g)

สำหรับค่าความขาวสามารถหาได้โดยใช้ข้าวสารที่ได้จากการสีจำนวน 15 g มาทำการวัดความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว (Whiteness Meter model C300, Japan)

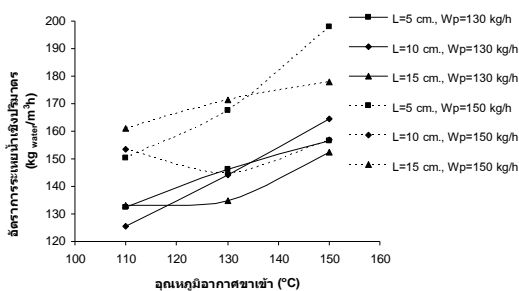
## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

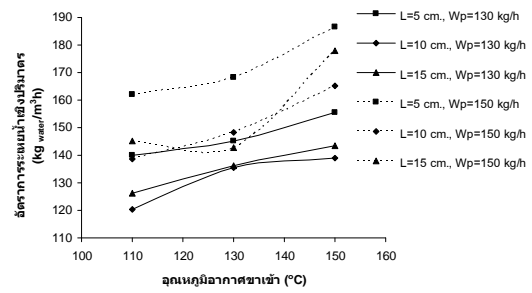
จากความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกประมาณ 28% (d.b.) และเงื่อนไขการอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสนสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงได้ประมาณ 3.4 ถึง 7.7% (d.b.) สำหรับผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 และ 3

สำหรับผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า ( $T_i$ , °C) ระยะห่างในการชน ( $L$ , cm.) อัตราการป้อนวัสดุ ( $W_p$ , kg/h) และจำนวนจุดป้อนที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่า อุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้น ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุจะเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนและมวลมีอัตราที่สูงขึ้น ในกรณีของอัตราป้อนวัสดุพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราป้อนวัสดุให้มีค่ามากขึ้น อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แม้ว่าภาวะความชื้นที่เครื่องอบแห้งต้องระเหยออกจากวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากเครื่องอบแห้งยังคงมีความสามารถในการระเหยน้ำมากอยู่ ทำให้เมื่อปริมาณวัสดุในระบบเพิ่มมากขึ้น อัตราการระเหยน้ำก็ยังคงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในกรณีของระยะชน พบว่าระยะห่างในการชนที่สั้นลงกลับส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก

ระยะห่างในการชนที่สั้นลงทำให้เกิดแรงเฉือนและความปั่นป่วนที่สูงขึ้นในบริเวณการชนมากกว่า สำหรับผลกระทบของจำนวนจุดบ่อน้ำสกปรก พบว่า การบ่อน้ำสกปรกทางเดียวจะทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงกว่าการบ่อน้ำสกปรกสองทางเล็กน้อย เนื่องจากการบ่อน้ำสกปรกทางเดียวนั้นอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งทั้งสองด้านมีค่าแตกต่างกันมากจึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุได้มากกว่าการบ่อน้ำสกปรกสองทางที่อุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ  $198 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$  (เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิอากาศเข้า  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ระยะชน 5 cm อัตราบ่อน้ำสกปรก  $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$  และบ่อน้ำสกปรกทางเดียว แต่ที่อุณหภูมิ  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าเมื่ออัตราการบ่อน้ำสกปรกเท่ากับ  $150 \text{ kg/h}$  (เมื่อบ่อน้ำสกปรกทางเดียว) ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ระยะห่างในการชนเท่ากับ 5 cm. แต่เมื่ออัตราการบ่อน้ำสกปรกเท่ากับ  $130 \text{ kg/h}$  ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดที่ระยะห่างในการชนเท่ากับ 10 cm. เนื่องจากอัตราการบ่อน้ำสกปรกเท่ากับ  $130 \text{ kg/h}$  ให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในกรณีที่ระยะห่างในการชนเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ระยะห่างในการชนเท่ากับ 10 cm. สูงกว่าระยะห่างในการชนเท่ากับ 5 cm. เล็กน้อย)



รูปที่ 2 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเมื่อบ่อน้ำสกปรกทางเดียว



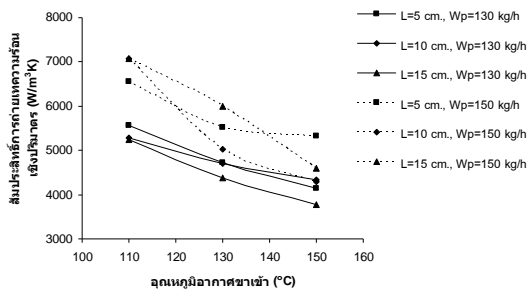
รูปที่ 3 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเมื่อบ่อน้ำสกปรกสองทาง

จะเห็นว่า อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนซึ่งพัฒนาโดย กิตติ [9] ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $474 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$  ที่อัตราส่วนภาระ 0.22 โดยอัตราส่วนภาระดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนภาระที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (มีค่าเท่ากับ 1.8) จึงทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการอบแห้งแห้งกากถั่วเหลืองของ Choicharoen et al. (2010) ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $520 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$  ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของกากถั่วเหลืองเท่ากับ 82% ถึง 85% (d.b.) ซึ่งสูงกว่าค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกในการทดลองนี้มาก

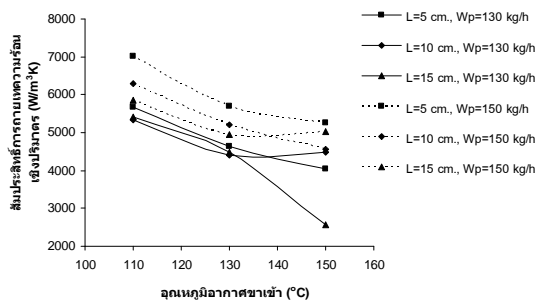
### 3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4 และ 5 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าลดลง เพราะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรแปรผกผันตรงกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำและแปรผกผันกับ  $\Delta T_{\text{lm}}$  ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าสูงขึ้นจึงทำให้ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำลดลงและ  $\Delta T_{\text{lm}}$  มีค่ามากขึ้นจึงทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าลดลง อัตราการบ่อน้ำสกปรกที่มากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรแปรผกผันตรงกับปริมาณน้ำที่

ระเหยออกจากผิววัสดุ ดังนั้นเมื่อป้อนวัสดุเข้าสู่ระบบมากขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผิววัสดุมากขึ้นจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้นด้วย ในกรณีของระยะห่างในการชน พบว่า ระยะห่างในการชนที่สั้นลงจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่ามากขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีความสัมพันธ์กับอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร การป้อนวัสดุทางเดียวให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงกว่าการป้อนวัสดุสองทางเนื่องจากการป้อนวัสดุทางเดียวทำให้ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผิววัสดุมากกว่าดังกล่าวข้างต้น โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ  $7080 \text{ W/m}^3\text{K}$  (เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , ระยะชน  $10 \text{ cm}$  อัตราการป้อนวัสดุ  $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$  และป้อนวัสดุทางเดียว)



รูปที่ 4 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเมื่อป้อนวัสดุทางเดียว



รูปที่ 5 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเมื่อป้อนวัสดุสองทาง

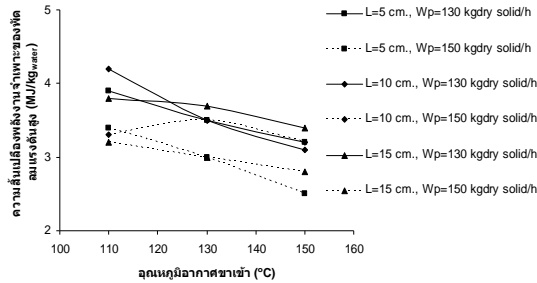
จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าการอบแห้งแห้งกักตัวเหลืองของ Choicharoen et al. [7] ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ  $4500 \text{ W/m}^3\text{K}$  เนื่องจากอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและขาออกมีค่าแตกต่างกันมากจึงส่งผลให้ค่า  $\Delta T_{lm}$  ของ Choicharoen et al. [7] มีค่าสูงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าที่ต่ำ และค่า  $\Delta T_{lm}$  นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันในสภาวะที่อุณหภูมิอากาศขาเข้ามีค่าแตกต่างกัน ( $130 \text{ }^\circ\text{C}$   $150 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ ) จึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้ามีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรอย่างไม่มีนัยสำคัญ

### 3.3 สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

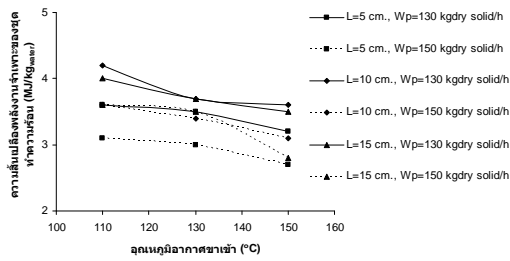
รูปที่ 6 - รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ จะเห็นว่า หากพิจารณาแยกเป็นความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูง ( $SEC_{blower}$ ) พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้น  $SEC_{blower}$  มีค่าลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้นปริมาณน้ำที่ระเหยจะมีค่ามากขึ้นแต่ปริมาณพลังงานที่พัดลมแรงดันสูงมีค่าคงที่ ทำให้  $SEC_{blower}$  มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้ามีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราการป้อนวัสดุมากขึ้นก็ส่งผลให้  $SEC_{blower}$  มีค่าลดลงเช่นกันเพราะปริมาณวัสดุในระบบมากขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่ระเหยมากขึ้นส่วนพลังงานที่พัดลมแรงดันสูงยังคงที่เท่าเดิม แต่ระยะห่างในการชนที่น้อยลงส่งผลให้  $SEC_{blower}$  มีค่าลดลงเพราะระยะห่างในการชนที่น้อยลงส่งผลให้เพิ่มปริมาณน้ำที่ระเหยเพิ่มขึ้นแต่พลังงานที่พัดลมแรงดันสูงใช้นั้นเท่าเดิมเช่นกัน ส่วนความสัมพันธ์พลังงานของชุดทำความร้อน ( $SEC_{heater}$ ) พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้นกลับทำให้  $SEC_{heater}$  มีค่าสูงขึ้นด้วยเนื่องจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้า ส่วนอัตราการป้อนวัสดุที่มากขึ้นทำให้ค่า  $SEC_{heater}$  ลดลงและระยะห่างในการชนที่น้อยลงส่งผลให้  $SEC_{heater}$  มีค่าลดลงเหมือนกรณีของพัดลมแรงดันสูง ในงานวิจัยนี้



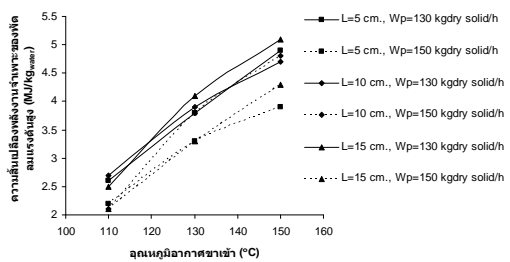
พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานของพัดลมแรงดันสูงต่ำสุดเท่ากับ 2.5 MJ/kg<sub>water</sub> และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 2.1 MJ/kg<sub>water</sub>



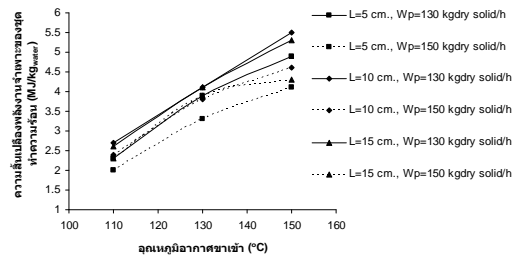
รูปที่ 6 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงเมื่อป้อนวัสดุทางเดียว



รูปที่ 7 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพัดลมแรงดันสูงเมื่อป้อนวัสดุสองทาง



รูปที่ 8 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อนเมื่อป้อนวัสดุทางเดียว



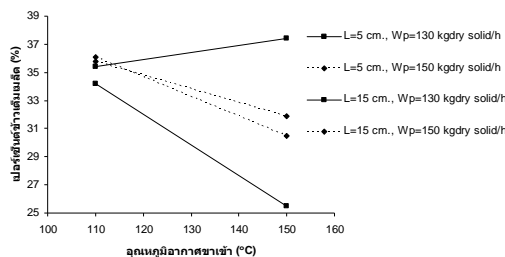
รูปที่ 9 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชุดทำความร้อนเมื่อป้อนวัสดุสองทาง

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนของ Choicharoen et al. [7] ซึ่ง  $SEC_{blower}$  และ  $SEC_{heater}$  มีค่าเท่ากับ 3.9 MJ/kg<sub>water</sub> และ 1.7 MJ/kg<sub>water</sub> ตามลำดับ จะเห็นว่า  $SEC_{blower}$  ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าเนื่องจากพัดลมที่เลือกใช้มีขนาดเล็กกว่าจึงสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า แต่ค่า  $SEC_{heater}$  ในงานวิจัยนี้ก็กลับมีค่ามากกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนในงานวิจัยนี้ ( $SEC_{blower}$  รวมกับ  $SEC_{heater}$ ) พบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าอยู่ระหว่าง 5.1 MJ/kg<sub>water</sub> ถึง 9.1 MJ/kg<sub>water</sub> ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของ Choicharoen et al. [7] ซึ่งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมอยู่ระหว่าง 5.7 MJ/kg<sub>water</sub> ถึง 9.7 MJ/kg<sub>water</sub> พบว่ามีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบกับกรอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ของสรายุทธ์และคณะ [10] พบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมใกล้เคียงกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดข้างต้นแม้ไม่มีการนำอากาศเวียนกลับมาใช้

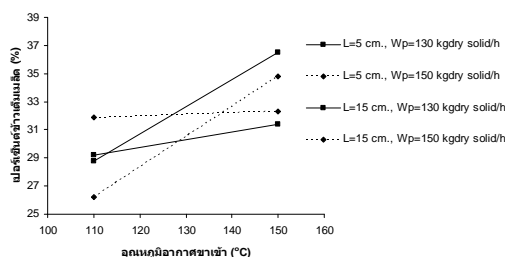
### 3.4 คุณภาพของข้าว

สำหรับผลการศึกษาคุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนในบางเงื่อนไขการทดลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 10 – รูปที่ 13 จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าสูงขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวมีค่า

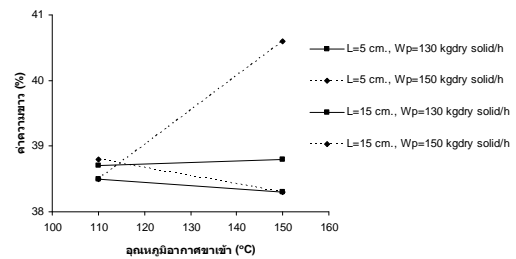
มากขึ้นในการป้อนวัสดุสองทางและเมื่ออัตราการป้อนวัสดุมากขึ้นก็ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวมีค่ามากขึ้น ระยะห่างในการชนที่มากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดมากขึ้นเนื่องจากระยะห่างในการชนที่น้อยทำให้เกิดการชนอย่างรุนแรงจึงทำให้ข้าวเปลือกเกิดการแตกข้าวมากขึ้นจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดและค่าความขาวมีค่าน้อยลง และการป้อนวัสดุทางเดียวให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าการป้อนวัสดุสองทางเพราะการป้อนวัสดุสองทางจะทำให้ข้าวเปลือกเกิดการชนกันมากขึ้นในบริเวณการชนจึงส่งผลให้ข้าวเปลือกเกิดการแตกหักมากขึ้นจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดลดลง แต่จำนวนจุดป้อนวัสดุให้ค่าความขาวที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดของข้าวที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบกระแสนมีค่าอยู่ในช่วง 25% - 37% เมื่อเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดอ้างอิง (ข้าวเปลือกที่แห้งตามธรรมชาติ) เท่ากับ 41.2% คิดเป็น 80% และค่าความขาวอยู่ในช่วง 37-40 เมื่อค่าความขาวอ้างอิง (ข้าวเปลือกที่แห้งตามธรรมชาติ) เท่ากับ 39.2 คิดเป็น 98%



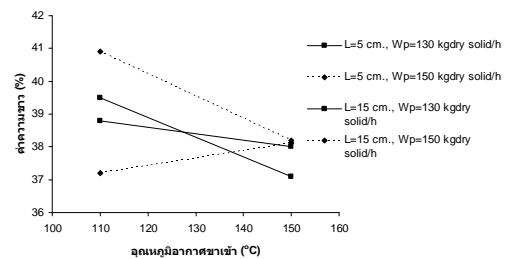
รูปที่ 10 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดเมื่อป้อนวัสดุทางเดียว



รูปที่ 11 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดเมื่อป้อนวัสดุสองทาง



รูปที่ 12 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความขาวเมื่อป้อนวัสดุทางเดียว



รูปที่ 13 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความขาวเมื่อป้อนวัสดุสองทาง

จะเห็นได้ว่าคุณภาพของข้าวหลังการอบแห้งในแง่ของเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนให้ค่าต่ำกว่าข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดของ Soponronnarit et al. [11] ที่อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากัน (150 °C) ซึ่งได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดคิดเป็น 86% แต่หากพิจารณาในแง่ของค่าความขาวของข้าวหลังการอบแห้ง พบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสนให้ค่าความขาวสูงกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ของ Soponronnarit et al. [11] ที่อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากัน (150 °C) ซึ่งได้ค่าความขาวเพียง 87% และสูงกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเตดเบดของ Madhiyanon et al. [12] เล็กน้อยซึ่งได้ค่าความขาวเท่ากับ 97 % ซึ่งจะพบว่าคุณภาพของข้าวที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบกระแสนในแง่ของเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดต่ำกว่าคุณภาพของข้าวที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเล็กน้อยและให้ค่าความขาว

ดีกว่าคุณภาพของข้าวที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 °C เท่ากัน แต่เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดใช้เวลามากถึง 30 ถึง 120 นาที ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 1 ถึง 2 วินาที และยังพบว่าคุณภาพของข้าวที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในแง่ค่าความขาวสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบสเปาเตดเบดเล็กน้อยทั้งยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่ามาก

#### 4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก นอกจากนี้ ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งยังได้ถูกศึกษาเช่นกัน ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกลงได้สูงสุดประมาณ 7.7% (d.b.) โดยใช้เวลาเพียง 1 ถึง 2 วินาที ในแง่ของการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง พบว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้โดยมีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรมีค่าสูงสุดเท่ากับ 197.88 kg<sub>water</sub>/m<sup>3</sup>h และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 7080.79 W/m<sup>3</sup>K ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดของกระบวนการอบแห้งจะอยู่ที่ 5.1 MJ/kg<sub>water</sub> ในแง่ของคุณภาพของข้าวที่ได้หลังการอบแห้ง พบว่า ข้าวเปลือกที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงสุดเท่ากับ 37.4% และมีค่าความขาวสูงสุดเท่ากับ 40.9 จากผลที่ได้จะเห็นว่า เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำถือเป็นเครื่องอบแห้งที่มีศักยภาพสูงพอที่สามารถนำมาใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกในระดับอุตสาหกรรมได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tamir A., Elperin I. and Luzzatto K., "Drying in a new two impinging streams reactor," *Chemical Engineering Science*, vol. 39, pp.139-146, 1984.
- [2] Elperin I.T., "Heat and mass transfer in opposing currents," *Journal of Engineering Physics*, vol. 6, pp. 62-68, 1961.
- [3] Kitron Y. and Tamir A., "Performance of a coaxial gas-solid two-impinging-stream (TIS) reactor : Hydrodynamics residence time distribution and drying heat transfer," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 27, pp. 1760-1767, 1988.
- [4] Kitron Y. and Tamir A., "Characteristics and scale-up of coaxial impinging streams gas-solid contractors," *Drying Technology*, vol. 8, pp. 781-810, 1990.
- [5] Sathapornprasath K., Devahastin S. and Soponronnarit S., "Effects of operating conditions on the overall performance of an air and superheated stream-operated impinging stream dryer," *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena*, Bangkok, Thailand, pp. 55-59, 2004.
- [6] Sathapornprasath K., Devahastin S. and Soponronnarit S., "Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials," *Drying Technology*, vol. 25, pp. 1121-1128, 2007.
- [7] Choicharoen K., Devahastin S. and Soponronnarit S., "Performance and energy

- consumption of an impinging stream dryer for high-moisture particulate material," *Drying Technology*, vol. 28, pp. 20-29, 2010
- [8] Tamir A., "Impinging stream reactors," *Elsevier*, Amsterdam, 1994.
- [9] กิตติ สถาพรประสาธน์. "การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสดวน". *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 5, พิษณุโลก: (2552).*
- [10] สรายุทธ์ สมิตะโยธิน สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ สมบูรณ์ เวชกามา งามชื่น คงเสรี และ สุนันทาวงศ์ปิยชน. "สมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดและคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง" *การประชุมวิชาการประจำปีของสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ประจำปี 2543, กรุงเทพฯ: (2543).*
- [11] Soponronnarit S., Prachayawarakorn S., Chiawet M., Tungtrakul P., and Taechapairoj C., "Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice," *Journal of Food Engineering*, vol. 85, pp. 268-276, 2008.
- [12] Madhiyanon T., Soponronnarit S. and Tia W., "A two-region model for batch drying of grains in a two-dimensional spouted bed," *Drying Technology*, vol. 19, pp. 389-404, 2001.