



การออกแบบเครื่องนวัตกรรมลดความชื้นและเก็บรักษาข้าวเปลือกขนาดเล็กอยู่การสร้างต้นแบบ
ที่สามารถนำไปใช้งานจริง

DESIGNING AN INNOVATIVE DRYING AND STORAGE SYSTEM OF PADDY RICE: TOWARDS
A PROTOTYPE FOR PRACTICAL IMPLEMENTATION

ธีรภัทร์ ท่งทอง¹, กิติกอร์ ซื่อสัตยาภิรมย์², ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล³, สุดาธิพ์ แซ่ตัน⁴, มงคล พรนัฐวุฒิ⁵, และวีรชัย ชัยวรพฤษ⁶

¹นักวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²นิสิตมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁵กรรมการผู้จัดการ, บริษัท แอมเพิล คูล จำกัด

⁶รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding author, E-mail: fengwcc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการออกแบบเครื่องนวัตกรรมขนาดเล็กห้องปฏิบัติการสำหรับการลดความชื้นและเก็บรักษาข้าวเปลือก ซึ่งควบคุมความเร็วของการไหลของอากาศเพื่อการกระจายที่สม่ำเสมอผ่านกองข้าว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเบี่ยงเบนของความเร็วอากาศเฉพาะจุดเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยโดยรวมมีค่าเพียง 9.7% การศึกษานี้ยังใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Ansys FLUENT ในการทำนายลักษณะการไหลของอากาศภายในเครื่อง ซึ่งพบว่ามีความแตกต่าง 10.6% ระหว่างการคาดการณ์เชิงตัวเลขและผลการทดลอง ผลจากการศึกษานี้จะนำไปสู่การออกแบบเครื่องนวัตกรรมลดความชื้นที่สามารถใช้งานได้จริงและบรรจุข้าวเปลือกได้สูงถึง 2.7 ตัน ซึ่งเครื่องนี้จะช่วยแก้ปัญหาของเกษตรกรในประเทศไทย และให้ความรู้เกี่ยวกับการจัดระเบียบการไหลของอากาศภายในระบบลดความชื้น

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก; การลดความชื้น; การเก็บรักษา; นวัตกรรม

ABSTRACT

This research aimed to design a lab-scale innovative drying and storage system for paddy rice, which controlled the airflow velocity for uniform distribution through the grain bed. The experimental results showed that the deviation of the local air velocity compared to the overall average velocity was only 9.7%. The study also employed Ansys FLUENT computational fluid

Teerapat Thungthong¹, Kitikorn Suesattayaphirom², Damrongvudhi Onwimol³, Sudathip Sae-tan⁴, Mongkol Pornnattawut⁵ and Weerachai Chaiworapuek⁶

¹Researcher, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

²Master's Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University

⁴Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University

⁵Managing Director, Ample Cool Co., Ltd., and ⁶Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

dynamics software to predict the airflow characteristics within the system, revealing a 10.6% difference between the numerical predictions and the experimental results. The results from this study were utilized to co-design a practical innovative drying system capable of holding up to 2.7 tons of paddy rice. This machine would help solve problems for farmers in Thailand and provide knowledge regarding airflow organization within drying systems.

KEYWORDS: paddy; drying; storage; innovation

1. บทนำ

จากสภาพภูมิประเทศและอากาศที่เหมาะสม ทำให้ประเทศไทยผลิตข้าวเปลือกมากถึง 8.76 ล้านตันต่อปีในปี พ.ศ. 2566 ซึ่งคิดเป็นมูลค่ากว่า 180,000 ล้านบาท [1] แนวโน้มนี้ยังถูกคาดว่าจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ นั่นจึงทำให้การเกษตรที่เกี่ยวข้องกับข้าวไทยเป็นอุตสาหกรรมสำคัญที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและเพื่อความมั่นคงของอาหารของประชาชน อย่างไรก็ตาม การปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมและสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเป็นปัจจัยสำคัญที่เราต้องพิจารณาในกระบวนการเกษตร เช่นเดียวกับปัญหาที่พบว่าชาวนาในพื้นที่ต่าง ๆ นั้นตากข้าวบนพื้นดิน ทำให้เกิดความเสียหายจากปัญหาทางด้านการขึ้นเนื่องจากสภาพอากาศที่ไม่สามารถควบคุมได้ อีกทั้งยังทำให้ข้าวอาจมีคุณภาพลดลงและสามารถเกิดโรคและเชื้อราได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ทำให้เกษตรกรต้องยอมขายข้าวในราคาต่ำ รวมไปถึงการตากข้าวบนท้องถนน ซึ่งสามารถนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน นอกจากนี้ การตากข้าวเปลือกในที่โล่งแจ้งยังเสี่ยงต่อการสูญหายเนื่องจากการลักขโมยอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ การออกแบบและพัฒนาเครื่องลดความชื้นของข้าวเปลือกให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสม ซึ่งสิ่งนี้เป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญมากของอุตสาหกรรมการเกษตรในปัจจุบันที่จะสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ รวมถึงสามารถช่วยลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บรักษาข้าวเปลือก ลดการสูญเสีย และเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. การตรวจสอบเอกสาร

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีการคิดค้นเครื่องลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกที่สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลือต่ำกว่าประมาณ 12% ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ช่วยป้องกันการเน่าเสีย ลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งรักษาคุณค่าทางอาหารของเมล็ดข้าว นอกจากนี้ยังเป็นการแก้ปัญหาการตากข้าวบนพื้นดินตามทีกล่าวมาแล้ว ข้อพัฒนาของเครื่องอบแห้งเหล่านี้ได้แก่ เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบสเปาเต็คเบด [2] และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบด [3] ซึ่งมักพบปัญหาดังเช่น ฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายและรบกวนผู้ปฏิบัติงานรวมทั้งชาวบ้านในบริเวณใกล้เคียง การสึกหรอของอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และต้นทุนด้านพลังงานในการดำเนินงาน

ในปัจจุบัน นักวิจัยจึงได้เริ่มพัฒนาวิธีการผสมผสานเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ากับการลดความชื้นของข้าวเปลือก เช่น การลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบอัตโนมัติ [4] การอบแห้งด้วยเครื่องอบแบบพาหะลมหมุนเวียน [5] การทำระบบทำความร้อนด้วยแก๊สสูงดื่มสำหรับเครื่องลดความชื้นแบบถังหมุน [6] เครื่องอบรังสีอาทิตย์แบบพองขนาดเล็ก [7] และเครื่องลดความชื้นแบบสายพานลำเลียงที่ใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรด [8] อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เหล่านี้ยังอยู่ในขั้นต้นแบบที่สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้น้อย และมักมีความยุ่งยากในการใช้งานสำหรับเกษตรกร จากการศึกษาก่อนหน้านี้ [9] ได้มีการออกแบบนวัตกรรมเพื่อการลดความชื้นของข้าวเปลือก โดยควบคุมความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องที่บรรจุข้าวเปลือกประมาณ 0.1 และ 2.0 ตัน ซึ่ง

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการกระจายความชื้นอยู่ที่ 10.99% และ 1.74% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เครื่องต้นแบบดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องการนำข้าวออกจากเครื่อง ซึ่งทำให้การดำเนินงานไม่สะดวก จากข้อมูลการตรวจเอกสารข้างต้น จะเห็นได้ว่า ระบบลดความชื้นที่มีอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ กล่าวคือ เครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มักพบปัญหาต้นทุนด้านพลังงานสูง การสึกหรอของอุปกรณ์ และมีฝุ่นละอองฟุ้งกระจาย ในขณะที่เครื่องต้นแบบนวัตกรรมระดับห้องปฏิบัติการ (เช่น การใช้ไมโครเวฟหรืออินฟราเรด) ก็มักมีข้อจำกัดด้านความจุที่น้อยเกินไปและมีระบบที่ซับซ้อน ทำให้เกษตรกรนำไปใช้งานจริงได้ยาก รวมถึงต้นแบบของงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9] ที่แม้จะควบคุมความเร็วลมได้ แต่ยังขาดความสะดวกในกลไกการนำข้าวเข้าและออกจากเครื่อง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความแตกต่างและมุ่งเติมเต็มช่องว่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ใน 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ การมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องให้มีขนาดความจุที่สูงขึ้น พร้อมทั้งพัฒนาระบบกลไกให้สามารถนำข้าวเปลือกเข้าและออกจากเครื่องได้ง่ายดายยิ่งขึ้น เพื่อให้เกษตรกรสามารถนำไปใช้งานได้จริง และงานวิจัยนี้มีความแตกต่างโดยการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาวิเคราะห์เจาะลึกในส่วนของการจัดระเบียบการไหลของอากาศโดยเฉพาะ โดยจำลองการติดตั้งแผ่นกรองอากาศและแผ่นสแตนเลสรูพรุนเพื่อลดความปั่นป่วน บังคับให้อากาศกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่สุดก่อนเข้าสู่กองข้าวเปลือก ซึ่งแนวทางนี้จะช่วยแก้ปัญหาคุณภาพข้าวแห้งไม่สม่ำเสมอในกองข้าวขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลงานนี้คาดว่าจะนำไปใช้ในการพัฒนานวัตกรรมลดความชื้นของข้าวเปลือกที่สามารถใช้งานได้จริง ส่งผลให้สามารถแก้ปัญหาที่เกษตรกรและประชาชนในประเทศไทยเผชิญอยู่ต่อไป

3. สมการที่เกี่ยวข้อง

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลแบบปั่นใน 3 มิติ การแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะอยู่ในรูปแบบของกฎทรงมวลและอนุรักษ์ของโมเมนตัมสามารถถูกแสดงได้ในสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\partial (\rho v) / \partial t + \nabla \cdot (\rho v v) = \nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g + F \quad (2)$$

เมื่อ ρ , v , μ , g และ F คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) ความเร็วของของไหล (m/s) ความหนืดของของไหล (Pa.s) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) และแรงภายนอก (N) ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบพื้นฐานที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วน [10] เป็นแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำสูงแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยและสามารถประยุกต์ใช้ในงานประยุกต์ทางด้านวิศวกรรมของการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนได้หลากหลาย แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ นี้มีการกำหนดค่าคงที่พื้นฐานเพื่อเพิ่มความแม่นยำ และใช้สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy, k) และสมการการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation of Turbulence Kinetic Energy, ϵ) ในการคำนวณซึ่งแสดงดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - T_M + S_k \quad (3)$$

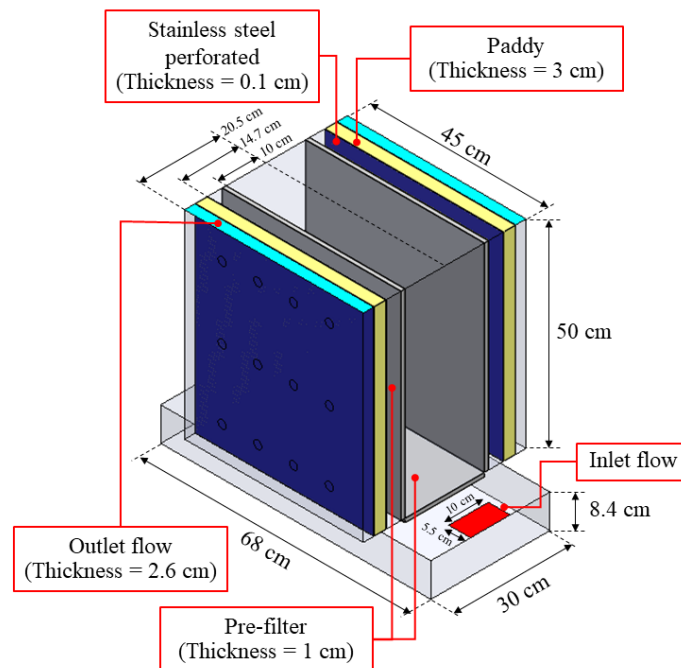
$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b)}{k} - \frac{\varepsilon^2 \rho C_{2\varepsilon}}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

โดย G_k และ G_b คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัวตามลำดับ T_M คือค่าการกดอัดได้ ค่าคงที่ของแบบจำลอง $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_k และ σ_ε มีค่า 1.44, 1.92, 0.09, 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ μ_t คือค่าความหนืด จากการไหลปั่นป่วนและ C_μ เป็นค่าคงที่ของแบบจำลองเท่ากับ 0.09

4. วิธีการดำเนินงาน

4.1 การสร้างส่วนทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองในส่วนทดลองซึ่งประกอบขึ้นด้วยกล่องอะคริลิก ขนาดกว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ $41 \times 68 \times 60$ เซนติเมตร เพื่อวัดความเร็วของอากาศบริเวณด้านหน้าก่อนที่จะผ่านกองข้าวเปลือก ภายในส่วนทดลองนี้ได้ติดตั้งแผ่นกรองอากาศ (Pre-filter) ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งมีความหนา 1 เซนติเมตร เพื่อจัดระเบียบการไหลของอากาศ ลดความปั่นป่วน และกรองฝุ่นก่อนที่อากาศจะเข้าสู่กองข้าวเปลือก (Paddy) ดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ยังใช้แผ่นสแตนเลสรูพรุน (Perforated sheet) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเท่ากับ 8 เซนติเมตร และมีความหนา 0.1 เซนติเมตร เนื่องจากแผ่นสแตนเลสรูพรุนนี้มีความคงทนสูง แต่ให้แรงดันสูญเสียต่ำในการใช้งาน จึงนำมาใช้กั้นกองข้าวเปลือกเพื่อรักษารูปร่างของกองในงานวิจัยนี้ สำหรับการทดสอบเพื่อวัดการกระจายตัวของอากาศในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ กข ปริมาณ 8.0 กิโลกรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 14.0 % มาตรฐานเปียก (w.b.) บรรจุลงในพื้นที่ทดสอบให้มีความหนาของชั้นข้าวเปลือกเท่ากับ 3 เซนติเมตร โดยเงื่อนไขการทำงานของระบบเป็นการทดสอบการไหลของอากาศที่สภาวะอุณหภูมิห้องและดำเนินการเปิดระบบพัสดมอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้การไหลของอากาศเข้าสู่สภาวะคงตัวก่อนที่จะทำการบันทึกผลความเร็วลม ข้อมูลเงื่อนไขการทำงานเหล่านี้ถูกใช้เป็นตัวแทนคุณสมบัติของวัสดุพรุนที่สมจริง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทางพลศาสตร์ของไหลที่แม่นยำที่สุด ก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับสภาวะการอบแห้งด้วยลมอุณหภูมิสูงในเครื่องต้นแบบจริงต่อไป มีการตั้งพัดลม Kruger รุ่น FSA 160D จำนวน 2 ตัว เพื่อสร้างลมเข้าสู่ส่วนทดลอง โดยมีค่าความเร็วลมและพื้นที่ทางเข้าเท่ากับ 9.20 เมตรต่อวินาที และ 27.5 ตารางเซนติเมตรตามลำดับ เพื่อให้ลมเข้าสู่เครื่องนวัตกรรมการลดความชื้นข้าวเปลือกอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบอุปกรณ์ภายนอกเพื่อช่วยบังคับให้อากาศจากพัดลมไหลเข้าสู่ภายในเครื่องอีกด้วย เมื่อประกอบส่วนทดลองแล้วจะมีรูปร่างตามรูปที่ 2 จากการขยายส่วนทดลองนี้เป็นเครื่องใช้งานจริง คาดว่าเครื่องจะสามารถบรรจุข้าวเปลือกเพื่อการลดความชื้นได้สูงสุดถึง 2.7 ตัน

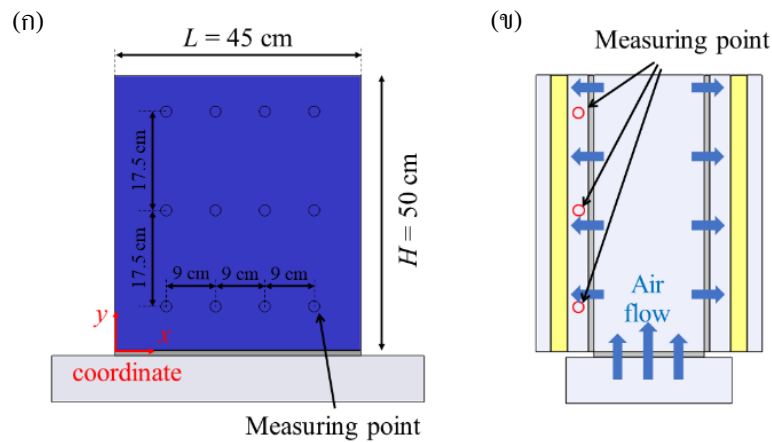


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงองค์ประกอบและขนาดของชุดจำลองส่วนทดลองสำหรับการจัดระเบียบการไหลของอากาศ



รูปที่ 2 ชุดจำลองส่วนทดลองจริงที่ใช้ในการวัดความเร็วและการกระจายตัวของอากาศก่อนเข้าสู่ห้องข้าวเปลือก

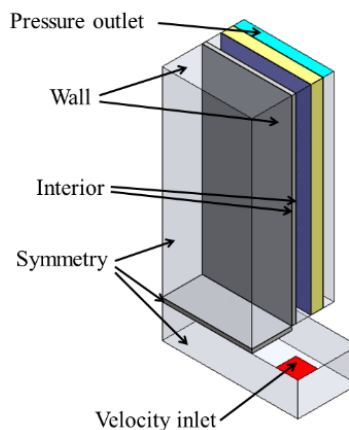
ความเร็วของอากาศภายในส่วนทดลองจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hotwire Anemometer) ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเท่ากับ $\pm 0.75\%$ โดยได้ทำการวัดในทั้งหมด 12 จุด แต่ละจุดจะมีระยะห่างกันเท่ากับ 9 เซนติเมตรในแนวนอน และ 17.5 เซนติเมตรในแนวตั้ง ตามรูปที่ 3 (ก) ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความเร็วของอากาศบริเวณด้านหน้าก่อนที่อากาศจะเข้าสู่ห้องข้าวเปลือก จะถูกยึดไว้บริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นกรองอากาศแนวตั้งและแผ่นสแตนเลสรูพรุน ซึ่งปรากฏในรูปที่ 3 (ข) เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดของหัววัดความเร็วลม ค่าความเร็วของอากาศที่รายงานในงานวิจัยนี้ จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองในแต่ละครั้ง รวมทั้งสิ้น 3 ครั้ง โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์สูงสุดเพียง 8.08%



รูปที่ 3 (ก) ตำแหน่งการวัดและ (ข) ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศภายในส่วนทดลอง

4.2 วิธีการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

แบบจำลองเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้จะอ้างอิงขอบเขตการไหลของอากาศจากผลการทดลองในส่วนทดลองทั้งหมด โดยจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังนี้: ส่วนที่อากาศไหลเข้าสู่ส่วนทดลองจะถูกกำหนดให้เป็นความเร็วขาเข้า (Velocity inlet) และส่วนที่อากาศไหลออกจากส่วนทดลองจะถูกกำหนดให้เป็นความดันขาออก (Pressure outlet) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 ปาสคาล เป็นการแสดงถึงการที่อากาศสามารถไหลออกสู่บรรยากาศอย่างอิสระ ผิวอะคริลิคด้านนอกจะถูกตั้งเป็นผนัง (Wall) ขณะที่รอยต่อระหว่างวัสดุพูนจะถูกกำหนดให้เป็นรอยต่อของของไหล (Interior) นอกจากนี้ ยังได้ใช้การสมมาตร (Symmetry) ของแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) สำหรับการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

งานวิจัยนี้จะมีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS FLUENT ในการคำนวณและใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ดังที่กล่าวไปข้างต้นเพื่อทำนายลักษณะการไหลของอากาศภายในแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งใช้ระเบียบวิธี SIMPLE เพื่อหาค่าความเร็วที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องและมีการกำหนดค่า Spatial discretization ทั้งหมดให้เป็นแบบ Second order upwind ยกเว้น Gradient ที่ถูกกำหนดให้เป็นแบบ Least squares cell based เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการ

คำนวณให้มีค่าสูงขึ้น ค่าข้อมูลในงานวิจัยนี้จะถูกสร้างด้วยโปรแกรม Ansys meshing โดยมีค่าเท่ากับ 3,505,157 เอลิเมนต์พร้อมทั้งกำหนดให้ของไหลเป็นอากาศทุกส่วน โดยมีการควบคุมคุณภาพของค่าข้อมูลให้มีค่า Skewness และ Orthogonal quality เล็กน้อยเท่ากับ 0.294 และ 0.823 ตามลำดับ รวมถึงค่า y^+ มีค่าประมาณ 1 ตลอดการวิเคราะห์ การควบคุมคุณภาพของค่าข้อมูลให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากลดังกล่าว ประกอบกับการพิจารณาขึ้นต้นความถูกต้องร่วมกับผลการทดลองจริง (Grid validation with experimental data) ที่พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมกรไหลและให้ค่าความเร็วลมที่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงจากเซนเซอร์ได้อย่างแม่นยำ เป็นสิ่งยืนยันว่าความละเอียดของค่าข้อมูลนี้ เป็นจุดที่มีความเหมาะสมสูงสุด ซึ่งมีความละเอียดเพียงพอในการดักจับพฤติกรรมกรไหลบริเวณวัสดุพุนและมีความน่าเชื่อถือทางคณิตศาสตร์ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย ความหนืด และค่าความพุนของวัสดุพุนของวัสดุจะถูกแสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุพุนที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ [9]

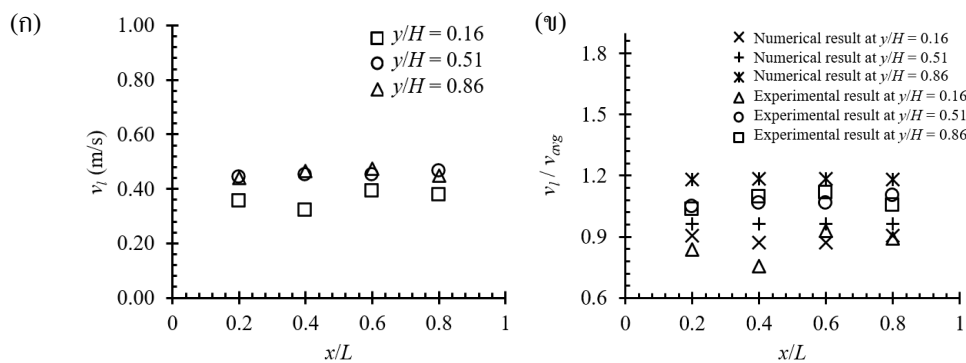
วัสดุพุน	ค่าสัมประสิทธิ์ ความเฉื่อย (1/ตารางเมตร)	ค่าความหนืด (1/เมตร)	ค่าความพุน
กองข้าวเปลือก	3.78×10^8	5467.2	0.41
แผ่นกรองอากาศ	2.51×10^8	4851.0	0.75
แผ่นสแตนเลสพุน	1.67×10^6	9575.5	0.77

5. ผลวิเคราะห์การทดลอง

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการวัดความเร็วของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อนที่บริเวณก่อนอากาศเข้าสู่กองข้าวเปลือกจำนวน 12 จุด ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) ซึ่งจะแสดงเป็นความเร็วเฉพาะจุด (v_p) โดยตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วจะถูกปรับให้เป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรืออ้างอิงเปรียบเทียบความเร็วของอากาศในงานวิจัยที่ต้องการต่อยอดได้ ผลจากการทดลองพบว่า ความเร็วเฉพาะจุดบริเวณด้านหน้ากองข้าวเปลือกที่ตำแหน่ง y/H เท่ากับ 0.51 และ 0.86 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.44 ถึง 0.47 เมตรต่อวินาทีที่ตำแหน่ง x/L เท่ากับ 0.2 ถึง 0.8 อย่างไรก็ตาม ตำแหน่ง y/H เท่ากับ 0.16 พบว่ามีค่าความเร็วอากาศต่ำกว่าตำแหน่งด้านบน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.32 ถึง 0.39 เมตรต่อวินาทีในช่วง x/L เท่ากับ 0.2 ถึง 0.8 ค่าความแตกต่างนี้อาจเกิดจากความหนาแน่นของอากาศที่อยู่บริเวณกองข้าวเปลือกด้านล่างมีมากกว่าบริเวณด้านบน ซึ่งส่งผลให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านกองข้าวเปลือกได้อย่างสะดวก นอกจากนี้ ความเร็วเฉพาะจุดบริเวณก่อนอากาศเข้าสู่กองข้าวเปลือกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 เมตรต่อวินาที ซึ่งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของความเร็วเฉพาะจุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเฉลี่ยอยู่ในระดับเพียง 9.7% ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอากาศนี้ ถือเป็นปัจจัยตั้งต้นที่สำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือก เนื่องจากในกระบวนการอบแห้งหรือลดความชื้นจริง การที่อากาศสามารถไหลผ่านกองข้าวเปลือกได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด จะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (ความชื้น) ที่เท่าเทียมกันในทุกบริเวณ ซึ่งจะช่วยป้องกันและลดความเสี่ยงในการเกิดจุดอับชื้นที่มักพบในเครื่องอบแห้งทั่วไปที่กระจายลมได้ไม่ดี อันเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ข้าวเปลือกบางส่วนแห้งไม่สนิทและเสื่อมสภาพ การออกแบบการจัดระเบียบการไหลในงานวิจัยนี้จึงเป็นรากฐานสำคัญที่ช่วยยกระดับประสิทธิภาพการลดความชื้นและรักษาคุณภาพของข้าวเปลือกทั้งกองได้อย่างเป็นรูปธรรม

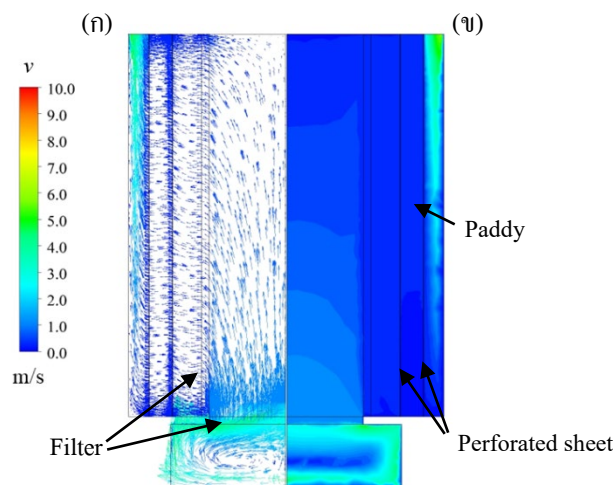
รูปที่ 5 (ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความเร็วของอากาศบริเวณก่อนผ่านกองข้าวเปลือก ระหว่างผลจากการทดลอง (Experimental result) กับผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical result) โดยแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างค่าความเร็วของ

อากาศเฉพาะจุดกับความเร็วมวลอากาศโดยเฉลี่ยบริเวณก่อนผ่านกองข้าวเปลือก ผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าความแตกต่างของอัตราส่วนความเร็วของอากาศบริเวณก่อนผ่านกองข้าวเปลือกที่ได้จากอุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบลวดร้อนและแบบจำลองเชิงตัวเลข มีค่าเท่ากับ 3.9%, 10.6% และ 9.48% ตามลำดับ ณ ตำแหน่ง y/H เท่ากับ 0.16, 0.51 และ 0.86 ดังนั้น ผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงสามารถอธิบายลักษณะการไหลของอากาศในส่วนทดลองได้เป็นอย่างดี



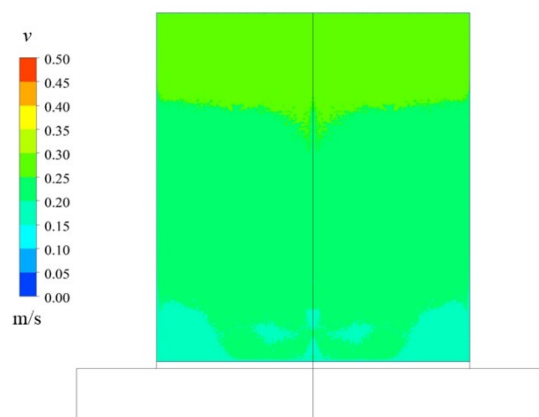
รูปที่ 5 (ก) ค่าความเร็วเฉพาะจุดและ (ข) อัตราส่วนความเร็วของอากาศที่บริเวณก่อนผ่านกองข้าวเปลือก

เมื่อพิจารณาลักษณะการไหลและการกระจายความเร็วของอากาศภายในแบบจำลองเชิงตัวเลขของส่วนทดลองจะถูกแสดงดังรูปที่ 6 (ก) - (ข) ตามลำดับ พบว่าอากาศที่มีความปั่นป่วนสูงบริเวณห้องโถงด้านล่างจะถูกลดความปั่นป่วนด้วยแผ่นกรองอากาศแนวนอน เมื่ออากาศผ่านขึ้นมายังห้องโถงด้านบนแล้วจะพบว่าอากาศบางส่วนยังมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งมีการไล่ระดับความเร็วของอากาศค่อนข้างสูง หลังจากนั้นอากาศจะถูกบังคับให้ไหลไปยังด้านข้างซึ่งจะถูกลดความปั่นป่วนและถูกจัดระเบียบการไหลอีกครั้งด้วยแผ่นกรองอากาศแนวดิ่ง ดังนั้นอากาศที่ผ่านออกมาจากบริเวณแผ่นกรองอากาศแนวดิ่งจึงมีการไหลที่คงตัวทั่วทั้งความสูงของส่วนทดลอง อีกทั้งยังพบการไล่ระดับความเร็วของอากาศที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่อากาศปราศจากการไหลผ่านแผ่นกรองอากาศแนวดิ่ง ในบริเวณนี้อากาศจะถูกจัดระเบียบอีกครั้งด้วยแผ่นสแตนเลสรูปวงรีที่ถูกติดตั้งบริเวณก่อนอากาศผ่านเข้ากองข้าวเปลือก ดังนั้นอากาศที่ผ่านกองข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้จึงมีความสม่ำเสมอทั้งทั้งบริเวณหน้าตัด อย่างไรก็ตาม ที่บริเวณขอบด้านบนและด้านล่างของกองข้าวเปลือกนั้นถูกพบว่ามีความปั่นป่วนหลงเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย อากาศไหลผ่านออกจากแผ่นสแตนเลสรูปวงรีที่ถูกติดตั้งบริเวณหลังอากาศผ่านออกจากกองข้าวเปลือกถูกพบว่ามีการไล่ระดับความเร็วของอากาศสูงซึ่งเกิดจากการสะสมของอากาศจากด้านล่างสู่ด้านบน ซึ่งไม่มีผลในการลดความปั่นป่วนข้าวเปลือก



รูปที่ 6 ผลการจำลองเชิงตัวเลขแสดง (ก) ลักษณะการไหลของอากาศ และ (ข) การกระจายความเร็วของอากาศ เมื่อผ่านแผ่นกรองและแผ่นสแตนเลสรูพรุน

รูปที่ 7 แสดงการกระจายความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณก่อนเข้าสู่กองข้าวเปลือก ซึ่งได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข จากผลการวิเคราะห์พบว่าอากาศมีความเร็วเฉลี่ยที่ไหลผ่านกองข้าวเปลือกในหน้าตัดเท่ากับ 0.22 เมตรต่อวินาที โดยความเร็วที่กระจายเข้าสู่บริเวณด้านหน้าของกองข้าวเปลือกอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 ถึง 0.27 เมตรต่อวินาที ที่ตำแหน่ง y/H เท่ากับ 0.16 ถึง 0.86 ทั้งนี้ เนื่องจากแบบจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าคุณสมบัติของวัสดุพูนที่อ้างอิงมาจากตารางที่ 1 ซึ่งมีความหนาของชั้นวัสดุพูนที่แตกต่างจากข้อมูลในเอกสารอ้างอิง [9] ซึ่งส่งผลกระทบทำให้ค่าความเร็วของอากาศที่ผ่านกองข้าวเปลือกในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลอง นอกจากนี้ ในบริเวณมุมของหน้าตัดกองข้าวเปลือกพบว่ามีความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.174 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นบริเวณที่มีพื้นที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ส่วนอื่นของหน้าตัด



รูปที่ 7 การกระจายตัวของความเร็วอากาศบนระนาบหน้าตัดบริเวณก่อนไหลเข้าสู่กองข้าวเปลือกจากแบบจำลองเชิงตัวเลข

จากผลการวิเคราะห์และแบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้นำองค์ความรู้มาต่อยอดสู่การสร้างเครื่องต้นแบบนวัตกรรมที่สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้สูงสุดถึง 2.7 ตันดังแสดงโครงสร้างเบื้องต้นในรูปที่ 8 คณะผู้วิจัยได้ใช้หลักการขยายขนาดโดยรักษาสัดส่วนทางเรขาคณิต (Geometric similarity) จากแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการที่ได้ศึกษาไว้ ซึ่งการรักษาอัตราส่วนของโครงสร้างทั้งความกว้าง ความสูง รวมถึงระยะห่างของตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บังคับทิศทางลม (แผ่นกรองอากาศและแผ่นสแตนเลสรูพรุน) จะเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยให้พฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของอากาศภายในเครื่องต้นแบบจริง ยังคงรักษาความสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพการกระจายลมที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์และแบบจำลอง (CFD) ในสเกลทดลองได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจุบันเครื่องต้นแบบนี้กำลังอยู่ระหว่างการดำเนินการสร้างและประกอบติดตั้งระบบ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการทำลดและการกระจายลมในสภาวะการใช้งานจริงต่อไป นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของระบบที่ออกแบบขึ้นใหม่กับการศึกษาก่อนหน้า [9] ซึ่งพบปัญหาด้านความไม่สะดวกในการปฏิบัติงานและข้อจำกัดของการกระจายความชื้นในเครื่องขนาด 2.0 ตัน จะเห็นได้ว่าระบบใหม่นี้มีข้อได้เปรียบที่ชัดเจน การออกแบบให้มีห้องโล่งกันพร้อมกับการประยุกต์ใช้แผ่นกรองอากาศและแผ่นสแตนเลสรูพรุนเพื่อจัดระเบียบลม สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของอากาศให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก (คลาดเคลื่อนเพียง 9.7%) ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ปัญหาข้อด้อยงานวิจัยเดิม โดยสามารถขยายสเกลความจุ (Scale-up) ได้โดยที่ยังคงรักษาประสิทธิภาพการกระจายลมที่สม่ำเสมอไว้ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 8 โครงสร้างเครื่องต้นแบบนวัตกรรมลดความชื้นและเก็บรักษาข้าวเปลือก (อยู่ระหว่างการสร้างและประกอบ)

6. สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบเครื่องนวัตกรรมลดความชื้นและเก็บรักษาข้าวเปลือกในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วของการไหลของอากาศให้กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณก่อนที่อากาศจะเข้าสู่กองข้าวเปลือก โดยกำหนดให้ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเครื่องมีค่าเท่ากับ 9.2 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมนี้ถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อนในจำนวน 12 จุด ผลการทดลองพบว่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศบริเวณหน้าก่อนเข้าสู่กองข้าวเปลือกอยู่ที่ 0.42 เมตรต่อวินาที ซึ่งค่า

ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าความเร็วในแต่ละจุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วเฉลี่ยโดยรวมมีค่าเพียง 9.7% เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบค่าความเร็วของอากาศบริเวณก่อนเข้าสู่ห้องข้าวเปลือก ระหว่างผลการทดลองและผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่ามีค่าความแตกต่างกันเพียง 10.6% ผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขยังแสดงว่าการติดตั้งแผ่นกรองอากาศแนวนอนและแนวตั้งช่วยในการจัดระเบียบการไหลและลดความปั่นป่วนของอากาศ ส่งผลให้อากาศที่ไหลผ่านห้องข้าวเปลือกมีความเป็นระเบียบและกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของห้องข้าวเปลือก ผลจากการศึกษานี้ได้ถูกนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลสำคัญในการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องนวัตกรรมการลดความชื้นของข้าวเปลือกที่สามารถบรรจุได้สูงสุดถึง 2.7 ตัน ซึ่งหากดำเนินการสร้างและทดสอบแล้วเสร็จ คาดว่าจะเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่สำคัญสำหรับเกษตรกรและประชาชนในประเทศไทย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ในด้านการจัดระเบียบการไหลของอากาศผ่านห้องข้าวเปลือก เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในวัฏกรรมสำหรับการลดความชื้นและการเก็บรักษาข้าวเปลือกอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บริษัท แอมเฟิล กูล จำกัดและหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. รายงานประจำปี 2566. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2566. Available from: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2567/MOACreport2566.pdf> [Accessed 26 August 2024].
- [2] ทวยนาถ, พ. และคณะ. การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. *SWU Engineering Journal*, 2014, 9 (1), pp. 68–74.
- [3] ชูปาว, ป. การศึกษากระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและลมหมุนอัดตัวสำหรับการเตรียมข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2564.
- [4] อุ่นพิณิจ, ธ. และคณะ. การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบอัตโนมัติ. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 2560, 7 (1), pp. 124–139.
- [5] ภักดีแก้ว, อ. และคณะ. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน. In: *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, 2561, 8 (2), pp. 185–188.
- [6] Uthapa, Y. et al. Heating system for paddy dehumidifier. *Journal of Industrial Technology and Innovation*, 2023, 2 (1), pp. 247214.
- [7] อินริราช, พ. และคณะ. การศึกษาสภาวะการลดความชื้นและคุณภาพของข้าวด้วยเครื่องอบแห้งรังสีอาทิตย์แบบพองขนาดเล็ก. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 2023, 28 (1), pp. 292–310.
- [8] วงศ์มาศ, ป. และคณะ. การศึกษาเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบสายพานลำเลียงโดยใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 2562, 50 (3 พิเศษ), pp. 340–343.

- [9] ชื่นบุญมา, ณ. ระบบลดความชื้นและจับเก็บน้ำเพื่อปลูกพืชหวาน 4.0. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2564.
- [10] Launder, B. E. and Spalding, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3 (2), pp. 269–289.