

**การใช้เทคนิคทางด้านพลศาสตร์ของไหลสำหรับเปรียบเทียบการความเร็วการไหลของลม
ภายในห้องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด**
Computational fluid dynamics (CFD) Technique of Comparison for Air Flow Velocity inside
Fluidized Bed Drying Chamber

ปิยะพงษ์ วงศ์ขันแก้ว¹ และ วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล²

Piyapong Wongkhunkeaw¹ and Weerayoot Lah-Amornchaiyakul²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาออกแบบและจำลองสนามการไหลเชิงตัวเลขของอากาศและวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการอบแห้งของแบบจำลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา, ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Linear Blade และฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Helix Blade ซึ่งการจำลองสนามการไหลเชิงตัวเลขได้นำแบบจำลองชนิดมาตรฐาน k – epsilon ร่วมกับการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ เข้ามาช่วยจำลองการไหลของอากาศซึ่งความเร็วลมในการจำลอง คือ 10 เมตรต่อวินาที ที่รอบการหมุนสูงสุด 1,200 รอบต่อนาที โดยอาศัยแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้ง 0.5 เมตร สูง 2 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศ คือ 0.1 เมตร ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขของสนามการไหลภายในห้องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด, ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ (Linear Blade) และฟลูอิดไดซ์เบดแบบ (Helix Blade) พบว่า ที่แบบจำลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Linear Blade จะให้ค่าอัตราความเร็วการไหลของลมที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพทางกลร้อยละ 75

คำสำคัญ การอบแห้ง, ฟลูอิดไดซ์เบด และการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล

ABSTRACT

The research presents the proposed results of design and analyzing the performance of fluidized bed, fluidized bed with linear blade type and fluidized bed with helix blade type, using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique by application using k-epsilon turbulence model from the commercial software called which air flow velocity at simulation is 10 m/s. The modeling of fluidized bed is 0.5 meters diameter, high 2 meters and pipe for inlet air is 0.1 meters diameter using for the efficiency prediction in numerical method. The duplication of the numerical is modeled by the control volume methodology. Additionally, it is easier for solving of the conservations equations using mass and momentum theory. The simulation result are show that fluidized bed type linear model the highest efficiency 75 % at air flow velocity 10 m/s. at fan rotation speed 1200 rpm than all type.

Key word: Dryer, Fluidized Bed, Computational Fluid Dynamics (CFD)

E-mail address: werayoot_rmutl@hotmail.com

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชญโลก จังหวัดพิจญญโลก

¹ Faculty of Sciences and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชญโลก จังหวัดพิจญญโลก

² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรร้อยละ 60 ยึดอาชีพการเกษตรเป็นหลัก (เรวัต, 2525) การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเพื่อให้ผลผลิตการเกษตรต่อหน่วยพื้นที่มีปริมาณต่อหน่วยสูงสุดและคุณภาพของผลผลิตสามารถแข่งขันในตลาดต่างประเทศได้เป็นอย่างดีโดยมีต้นทุนการผลิตต่ำ การพัฒนาการผลิตจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ได้แก่ เมล็ดพันธุ์ ปุ๋ย สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช และอื่น ๆ ได้แก่ ที่ดิน แรงงานทุน และการจัดการที่เหมาะสม ซึ่งบรรดาปัจจัยการผลิตต่าง ๆ เมล็ดพันธุ์พืชจัดได้ว่าเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญประการแรกในการผลิต เนื่องจากการใช้เมล็ดพันธุ์พืชที่มีคุณภาพสูงไม่แต่จะเป็นส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณผลผลิตให้สูงขึ้นร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ แต่ยังทำให้คุณภาพของผลผลิตเกษตรมีคุณภาพสม่ำเสมอและสอดคล้องกับความต้องการของตลาด ความชื้นของเมล็ดมีผลต่อความมีชีวิตของเมล็ดพันธุ์มากที่สุดกระบวนการเคมีภายในเมล็ดจะเกิดมากหรือน้อยมีผลจากความชื้นความชื้นที่สูงจะช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นมากและมีผลพลอยได้เป็นความร้อนสะสมโดยรอบเมล็ด หากอุณหภูมิสะสมสูงเกิน 51 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานติดต่อกัน เมล็ดจะตายหากยังไม่ถึงตายอาหารภายในเมล็ดจะถูกใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั้นจะลดน้อยลงจนมีผลต่อความแข็งแรงของเมล็ดและอายุการเก็บรักษาด้วย (สมชาติ, 2535) ถ้าความชื้นสูงเพียงพอต่อการงอก ข้าวใช้ความชื้นในการงอกร้อยละ 45 ของน้ำหนักเมล็ด เมล็ดจะงอกเป็นต้นใหม่ในปัจจุบันการลดความชื้นสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ อาทิเช่น เครื่องอบแห้งแบบหมุนและเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ เบด ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างกันไปแต่โดยทั่วไปหลักการของกระบวนการอบแห้งจะเป็นวิธีการไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย (ทวิช, 2551) ซึ่งส่วนใหญ่จะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์จะช้าหรือเร็วเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจจะแบ่งได้เป็นสองชนิดคือเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (moving-bed dryer) เทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล พบมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย (อำนาจ, 2551) สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้นเป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงให้ลดลงได้อย่างรวดเร็ว ถึงและสม่ำเสมอภายในระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากตัวกลางกับผลิตภัณฑ์สามารถสัมผัสกันได้อย่างดีแล้วยังสามารถนำเอาพลังงานความร้อนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้เทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดพบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งทำได้ยากเนื่องจากมีเงื่อนไขหลายอย่างจึงได้ทำการทดลองหาเทคนิคใหม่ๆ มาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืชซึ่งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนควงและเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอดิวคลีน ก็เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจโดยในวิจัยได้นำเทคนิคดังกล่าวมาใช้และพัฒนาโดยเพิ่มพื้นผิวภายในของห้องอบแห้งให้มีลักษณะเป็นเกลียวตลอดทั้งห้องอบแห้งตามแนวแกนโดยทิศทางการหมุนของเกลียวจะเป็นไปตามทิศทางลมเข้าซึ่งคาดว่าจะช่วยลดค่าความชื้นได้เร็วขึ้นและให้อัตราการอบแห้งที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเร็วในการหมุนวนภายในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแต่ละแบบและนำผลการศึกษาไปทำการออกแบบรูปทรงห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ทฤษฎีพื้นฐาน

ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัววัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ซึ่งค่าความชื้นในวัสดุแสดงได้เป็น 2 แบบคือ

ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_{wb}

$$M_{wb} = \frac{mw}{mw + ms} \times 100 \quad (1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_{db}

$$M_{db} = \frac{mw}{ms} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำในวัสดุ, kg
 m_s คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

อัตราความเร็วของการอบแห้ง

เป็นตัวแปรที่บอกถึงความเร็วของการลดค่าความชื้นซึ่งถ้าค่าอัตราความเร็วของการอบแห้งมีค่าสูงแสดงว่าปริมาณความชื้นที่แพร่กระจายออกจากเมล็ดพืชต่อเวลาที่มีปริมาณสูงมาก ดังสมการที่ 3 (อำนาจ, 2551)

$$DryingRate = \frac{dX}{dt} \times \frac{X_o - X}{t - t_o} \quad (3)$$

เมื่อ $X_o - X$ คือ ค่าความเปลี่ยนแปลงของความชื้น
 $t - t_o$ คือ ค่าความเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา

ทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์ของไหล

ในบทความนี้เป็นกรณีวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ และเป็นกรไหลแบบมีความหนืดทางอากาศพลศาสตร์ สมการที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน โดยสามารถเขียนสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้ คือ

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial y_j} = 0 \quad (4)$$

โดยค่า ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศมีหน่วยเป็น (kg/m³), ตัว i, j จะเป็นตัวแสดงมิติการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์ความเร็วอากาศ, u คือ ค่าความเร็วอากาศ (m/s), g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s²), P คือ ความดัน (Pa), k คือ Turbulent Kinetic Energy และ μ คือ Turbulent Viscosity

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial y_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial y_j} \right] \right] \quad (5)$$

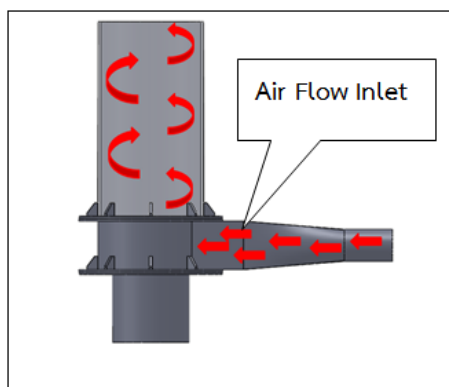
สมการโมเมนตัมในแนวแกน y

$$\frac{\partial(\rho u_i v_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial y_j} = -\frac{\partial p}{\partial y_i} + \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_j} \mu \left[\frac{\partial v_i}{\partial y_j} \right] \right] + (\rho - \rho_0)g \quad (6)$$

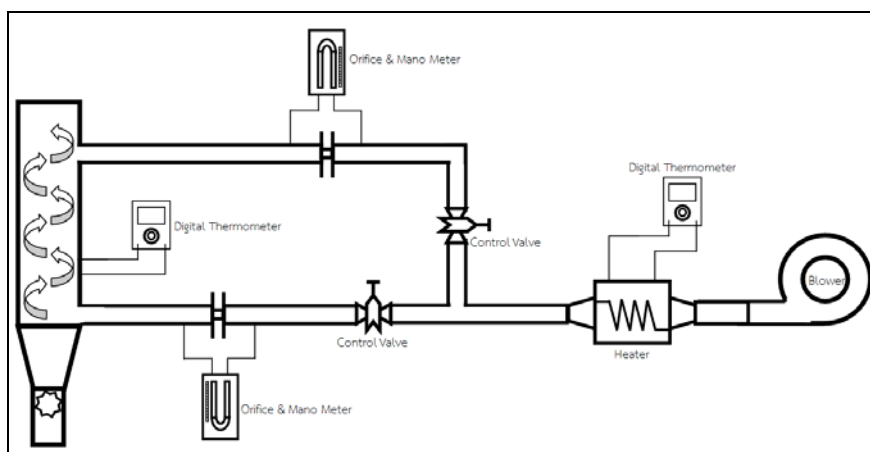
สมการพลังงาน

$$\rho c_p \left[\frac{\partial(u_i T_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial(v_i T_j)}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial y_i} \left[k \frac{\partial T_j}{\partial y_i} \right] \quad (7)$$

รูปแบบในการศึกษาและวิจัยในงานวิจัยนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์และความสามารถทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองสนามการไหลที่ซับซ้อนและมีรูปแบบการไหลของสภาพอากาศที่อัดตัวไม่ได้และมีรูปแบบการไหลเป็นแบบปั่นป่วนภายในแบบจำลองของฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบการไหลและสมมติฐานที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งจะมีลักษณะของสนามการไหลของอากาศเป็นแบบหมุนวนโดยอากาศที่วิ่งเข้ามาปะทะกับพื้นผิวส่วนโค้งของผนังห้องอบแห้งจะทำให้รูปแบบการไหลนั้นเกิดการไหลตามรูปทรง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 1



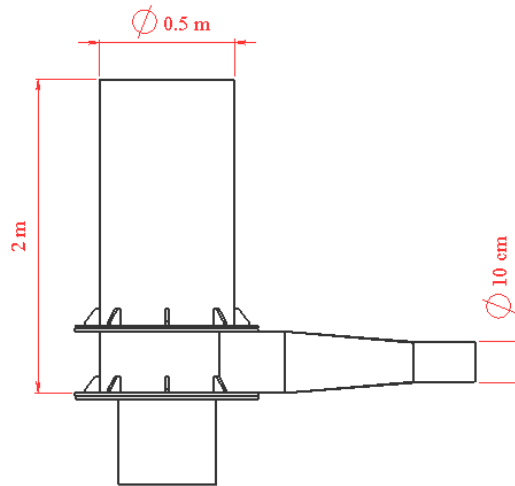
รูปที่ 1 แสดงการไหลวนของอากาศ



รูปที่ 2. อุปกรณ์การทดลองและหอทดลองแบบเทคนิคต่างๆ

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์

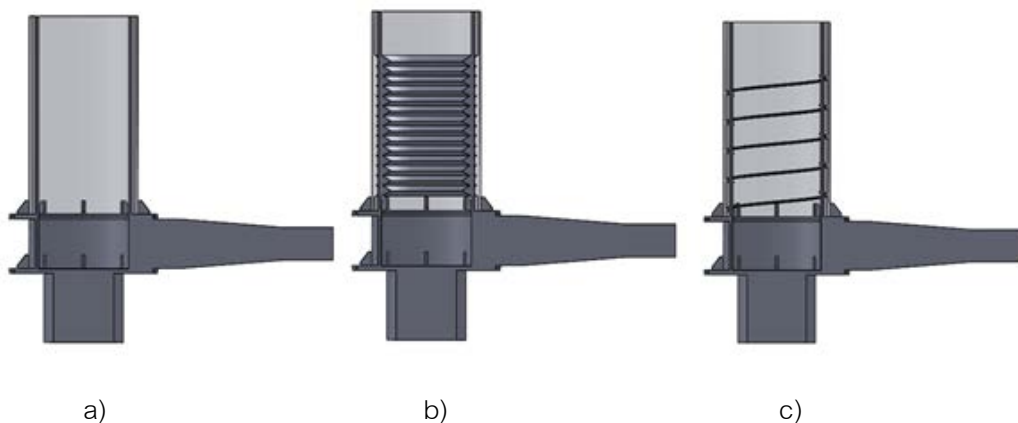
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดในงานวิจัยนี้มีลักษณะและรูปทรงเป็นแบบห้องอบแห้งสูง ซึ่งห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 3 แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความสูง 2 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้ง 0.5 เมตร โดยท่อทางเข้าของอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ซึ่งรายละเอียดด้านโครงสร้างของแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. แบบจำลองฟลูอิดไดซ์เบดสำหรับการวิเคราะห์

ขั้นตอนการกำหนดปัญหาขอบเขต

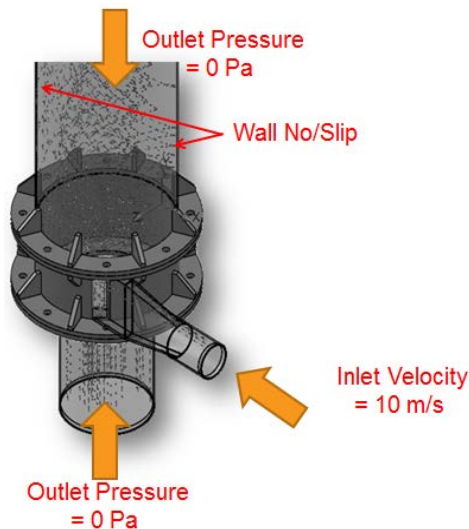
การกำหนดปัญหาขอบเขต (Boundary Condition) ในการจำลองสนามการไหลของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทั้ง 3 แบบ จำเป็นที่จะต้องกำหนดรูปแบบปัญหาให้กับงานวิจัยโดยให้มีความสอดคล้องกับสภาพเป็นจริงหรือให้ใกล้เคียงมากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบรูปทรงห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทั้งหมด 3 แบบจำลอง ซึ่งแต่ละแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4 สำหรับรายละเอียดและขั้นตอนการกำหนดปัญหาขอบเขตแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4

a) Fluidizedbed (no Blade Type), b) Fluidizedbed with (Linear Blade type),

c) Fluidizedbed with (Helix Blade Type)



รูปที่ 5 ปัญหาขอบเขต (Boundary Condition)

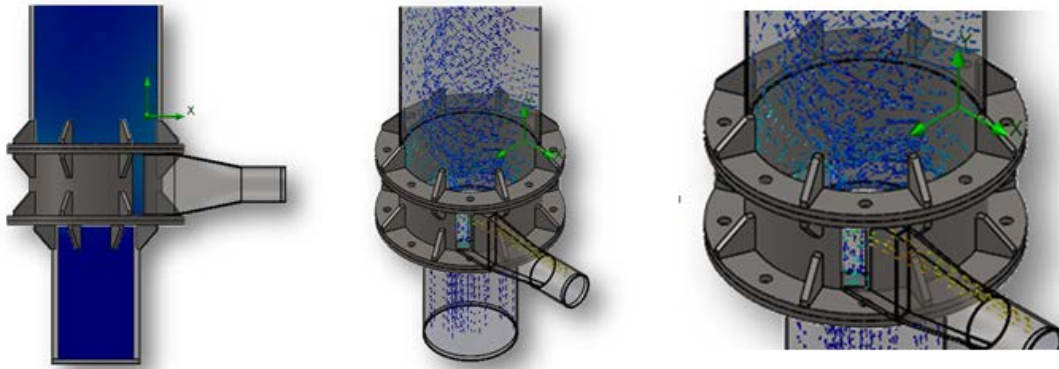
จากรูปที่ 5 ได้กำหนดค่าตัวแปรทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการไหลของอากาศ ภายในห้องอบแห้ง โดยมีค่าความเร็วอากาศที่ทางเข้า 10 m/s ซึ่งได้จากการวัดความเร็วของอากาศที่ได้จากพัดลม Blower ขนาดความเร็วรอบการหมุน 1,200 รอบต่อนาที โดยอากาศที่วิ่งเข้าไปภายในห้องอบแห้งจะไม่มีกรเคลื่อนไถลของอากาศ และความดันที่ทางออกจะกำหนดให้เป็นศูนย์เพราะเปิดสู่สภาวะบรรยากาศ ซึ่งรายละเอียดในเรื่องนี้การวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1.แบบจำลองที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบ การไหลแบบปั่นป่วน Turbulent Flow
- 2.ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองสนามการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยสมมติเป็นแบบการไหลใน 3 มิติ
- 3.แบบจำลองในการวิเคราะห์เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ Incompressible Flow
- 4.ภายในสนามการไหลของอากาศที่จำลองกำหนดให้ ไม่มีการเคลื่อนไถลของอากาศ (No/Slip)
- 5.ของไหลเป็นกระแสอากาศ Air flow ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของอากาศ 1.116 kg/m³
- 6.แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัย เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบชนิด Standard K-epsilon Model

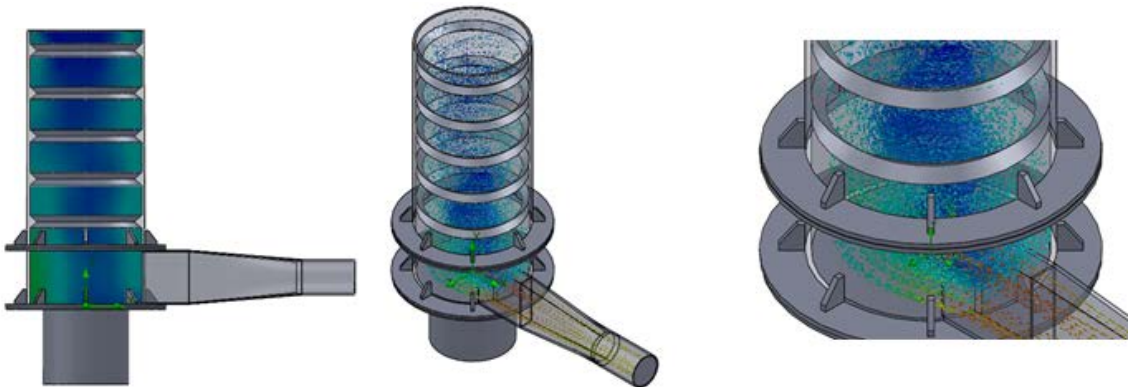
ผลและวิจารณ์

ผลการจำลองเชิงตัวเลข

ผลการจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองผลทางสนามการไหลของอากาศพลศาสตร์ภายในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทั้ง 3 แบบจำลอง สามารถแสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขได้ดังรูปที่ 6



(a) ฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา (No Blade)



(b) ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Linear Blade



(c) ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Helix Blade

รูปที่ 6 ผลการจำลองเชิงตัวเลข

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์เพื่อจำลองสนามการไหลของอากาศพลศาสตร์ภายในห้องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดทั้ง 3 แบบ พบว่าห้องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Linear Blade จะให้ค่าอัตราการไหลของอากาศและค่าความเร็วลมสูงกว่า แต่ค่าแรงต้านของอากาศที่เกิดจากการหมุนของอากาศที่วิ่งเข้าไปปะทะผนังยังมีค่าน้อยกว่าแบบอื่นๆ ผลการจำลองเชิงตัวเลขที่ได้สามารถแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองเชิงตัวเลข

ผลการวิเคราะห์	ชนิดของแบบจำลอง		
	ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ ธรรมดา	ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Linear Blade	ฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Helix Blade
1.ลมที่ทางออก	2m/s	8 m/s	6.5 m/s
2.แรงต้านตัวของอากาศ	119 N.m	121 N.m	157 N.m
3.ความดันที่ทางออก	201 kPa	101 kPa	135 kPa
4.ประสิทธิภาพเชิงกล	50%	75%	55%

สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองสนามการไหลของอากาศพลศาสตร์ภายในห้องอบแห้งทั้ง 3 แบบจำลอง ผลที่ได้คือ แบบจำลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา (No Blade) และฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Helix Blade เกิดค่าความดันภายในระบบสูงในช่วงระยะที่ลมวิ่งเข้าปะทะกับผนังผ่านตัว Blade ทำให้ความเร็วภายในห้องอบแห้งลดลง ตลอดจนแรงต้านทานอากาศก็สูงตามไปด้วยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Linear Blade ซึ่งให้ค่าแรงต้านอากาศ, ความดันภายในระบบที่ต่ำ แต่มีช่วงความเร็วลมที่สูงกว่า ทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกลสูงสุดถึง 75 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษาและการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล

เอกสารอ้างอิง

- ทวิช จิตรสมบูรณ์.2551 .ผลของความเร็วอากาศต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่22 มหาวิทยาลัยธรรม-ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต กรุงเทพฯ.
- เจวัต จิระสถาพร. 2525. โครงการพัฒนาข้าวไร่ทางการเกษตรและพัฒนาที่ดิน. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- วีรยุทธ หล้าอมรชัยกุล. 2554. การใช้หลักการทางพลศาสตร์ของไหลในการคำนวณหาความเร็วรอบการหมุนที่เหมาะสมของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก. งานประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.
- สมชาติ ไสภณธนฤทธิ์. 2535. การอบแห้งเมล็ดพืชอาหาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

อำนาจ บุญลอย. 2551. การเปรียบเทียบการอบแห้งระหว่างฟลูอิดไดซ์เบตและฟลูอิดไดซ์เบตแบบผิว
คลื่น. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต กรุงเทพฯ.