

การศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อน A Study and Parameters Analysis of Conveyor Drier

รุ่งตะวัน วิวัฒน์ศิริกุล , ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง , ธีรชูนท์ เมืองนาโพธิ์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ. พิบูลสงคราม เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10800
โทร. 0-291325000 ต่อ 8319 , โทรสาร. 0-5870026

Rungtawan Wiwattanasirikul , Thanakom Soontornchainacksaeng, Tirachoon Muangnapoh
Department of Mechanical Engineering , Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Rd. Bangkok 10800
Tel. 0-291325000 ext. 8319 Fax.0-5870026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนเป็นกรณีศึกษาจากเครื่องอบแห้งขนาด ความกว้าง 2.7 m x ความยาว 7 m x ความสูง 5.5 m โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องอบแห้ง แล้วนำไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณโดยใช้วิธีนิวตันราฟสัน เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน อัตราส่วนความชื้นผลิตภัณฑ์เริ่มต้น อัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง อัตราการป้อนผลิตภัณฑ์ โดยมีเงื่อนไขของการจำลองแบบ ดังนี้ อุณหภูมิของลมร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง 95 °C ขั้วกรวยกึ่งมีขนาดเฉลี่ย ความกว้าง 0.035 m x ความยาว 0.005 m x ความหนา 0.003 m อัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นของขั้วกรวยกึ่งเท่ากับ 0.35 มาตรฐานเปียก อัตราส่วนความชื้นสุดท้าย 0.14 มาตรฐานเปียก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อมเท่ากับ 34.6 °C และ 0.06 kg water/kg dry air ตามลำดับ อัตราการป้อนขั้วกรวยกึ่งที่ 5888 kg/h อัตราเร็วของสายพาน 1.42 m/min ผลจากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ พบว่า อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนที่ป้อนเข้า

เครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับ 15515 kg/h หรือมีอัตราเร็วเท่ากับ 2.6 m/s เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 82 min ใช้พลังงานความร้อนเพื่อให้เครื่องอบแห้ง 5.9 GJ/h ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งเท่ากับ 49.9 % ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อนเท่ากับ 512.3 Bath/ห อัตรารวมร้อนที่สูญเสียให้แก่สิ่งแวดล้อมเท่ากับ 2.9 GJ/h เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ออบแห้งระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดจากเครื่องอบแห้งที่ทำงานจริง จะสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้ 8.9% ซึ่งจะทำให้ลดพลังงานความร้อนที่ให้เครื่องอบแห้ง 918 kJ/h และอัตราการผลิตเพิ่มขึ้น 70.58 kg/h หรือ 1.2 % ของอัตราการผลิตเดิม

Abstract

The objective of this research is to study the effective parameters analysis of the existing conveyor drier with the dimension of 2.7 m x 7 m x 5.5 m in our case-study. We have developed the mathematical model by using computer program, calculated by Newton – Raphson method to find the most appropriate parameters such as the inlet temperature of the hot air, initial moisture content of the solid, inlet velocity of the hot air and the feed of the product.

We suggest maintaining the drying condition at the hot air inlet temperature of $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, the prawn crackers with the average dimension of $0.035\text{ m} \times 0.005\text{ m} \times 0.003\text{ m}$, with the initial moisture content of the product on the 0.35 wet-weight basis, and the desired final moisture content of the product of 0.14 wet-weight basis. The note on the ambient air temperature of $34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the humidity ratio of 0.06 kg water/kg dry air, with the feed of product of 5888 kg/h, and the velocity of band of 1.42 m/min. The results of our mathematical model, show the inlet amount of hot air of 15515 kg/h, with the velocity of 2.6 m/s, yielded the drying time of 82 min., with the energy consumption of 5.9 GJ/h, and the thermal efficiency of the conveyor drier of 49.9% the cost for energy consumption of 512.3 Baht/h and the lost of energy consumption to the surrounding of 2.9 GJ/h. Comparing the drying time predicted by the model to that of the experiment, yields the decreasing in the drying time of 8.9% and the decrease in the energy consumption of 918 kg/h with the increasing product rate of 70.58 kg/h or 1.2% better than that of the previous value.

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อบแห้งในเชิงอุตสาหกรรมนั้น กระบวนการหนึ่งนั้นจะต้องผ่านการอบแห้งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ ซึ่งพบว่าจากเครื่องอบแห้งเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ยังขาดการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อระบบของเครื่องอบแห้ง อันได้แก่ปัญหาการสิ้นเปลืองของพลังงานความร้อน ปัญหากระจายตัวของค่าอุณหภูมิของลมร้อนภายในเครื่องอบแห้ง และปัญหาการปล่อยความร้อนออกจากเครื่องอบแห้งด้านบนสู่บรรยากาศภายในโรงงานโดยตรง เป็นต้น

การจำลองแบบของเครื่องอบแห้งโดยใช้วิธีนิวตันราฟสัน [1] หาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งเพื่อจะนำไปใช้กับการอบแห้งข้าวเกรียบกุ้งเพื่อลดการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายของการอบแห้ง ดังนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้องมีผลสรุปดังนี้

FELLOWS. [2] ได้ศึกษาการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนซึ่งมีความยาวและความกว้างของแบนด์เท่ากับ 20 และ 3 m ตามลำดับ และความหนาของ

ชั้นอาหาร 5 – 15 cm โดยให้อากาศไหลผ่านจากด้านล่างขึ้นมาด้านบน ในช่วงแรกและไหลจากด้านบนลงด้านล่างในช่วงที่ 2 และ 3 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของอาหาร และเวลาที่ใช้ในการ อบแห้งเป็นไปตามทฤษฎีของการอบแห้งและสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา

KEYEY [3] ได้ศึกษาและจำลองแบบของเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนแบบสวนทาง โดยใช้สมมูลมวลและพลังงาน ทำการอบแห้ง Gypsum wallboard หนา 10 mm ที่มีอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้น 0.5 มาตรฐานเปียก จนมีอัตราส่วนความชื้นเหลือ 0.05 มาตรฐานเปียก ด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิกระเปาะเปียก $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งสิ้น 1 hr นอกจากนี้ยังทดลองอบไม้สัก หนา 2.5 mm ความหนาแน่นปรากฏ $500\text{ kg dry solid/m}^3$ ที่มีอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้น 1.35 มาตรฐานเปียก จนมีอัตราส่วนความชื้น 0.15 มาตรฐานเปียก โดยให้ลมร้อนไหลเข้าเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราส่วนความชื้น 0.186 kg water / kg dry air และมีอุณหภูมิกระเปาะเปียก $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยสายพานมีความยาว 20 m พบว่า ใช้เวลาทั้งสิ้น 46.8 min และความเร็วของสายพาน 0.427 m/min

เรียวโซ โทเอ [4] ได้ทำการศึกษาและสร้างสมการสำหรับเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนแบบไหลสวนทาง โดยอาศัยสมมูลมวลและพลังงาน และได้ทดลองอบเมล็ดพืชที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความสูงของชั้นเมล็ดพืชบนแบนด์ 6 cm ความหนาแน่นปรากฏของชั้นผลิตภัณฑ์เท่ากับ $800\text{ kg dry solid /m}^3$ ความหนาแน่นของอนุภาคแห้งเท่ากับ $1600\text{ kg dry solid /m}^3$ อัตราส่วนความชื้นวิกฤตของแต่ละอนุภาคมีค่าเท่ากับ 0.1 ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราส่วนความชื้น 0.02 kg water /kg dry air ความเร็วของลมร้อน 1 m/sec และความยาวของแบนด์ 10.6 m กว้าง 1.5 m พบว่า ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งสิ้น 23 min ด้วยอัตราการผลิตผลิตภัณฑ์แห้ง 2000 kg/hr

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [5] ได้ศึกษาเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนพบว่า สภาวะของอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของสายพาน ซึ่งหมายถึงที่ตอนต้นของสายพานผลิตภัณฑ์อบแห้งยังมีความชื้นสูงอยู่ที่ใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ส่วนตอนปลายของแบนด์ก็ใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

เพราะผลิตภัณฑ์อบแห้งมีอัตราส่วนความชื้นลดลงใกล้ถึงจุดที่ต้องการแล้ว

Ashworth และ Carter [6] ได้ศึกษาเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อน พบว่า สมรรถนะของเครื่องอบแห้งเป็นฟังก์ชันของประสิทธิภาพเชิงความร้อน พลังงานความร้อนที่ให้กับเครื่องอบแห้ง ค่าใช้จ่ายหลัก และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

เรียวโซ โทเอ [4] ได้แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนในทางปฏิบัติสำหรับเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อนแบบไหลสวนทางไว้ คือ ในกรณีที่เครื่องอบแห้งใช้ลมร้อนในการอบแห้ง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 30 – 60 % หากมีการหมุนเวียนลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 50 – 75 % นอกจากนี้เพื่อให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงจึงต้องป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างเครื่องอบแห้งกับสิ่งแวดล้อม การป้องกันการสูญเสียความร้อน เช่น การติดตั้งฉนวนความร้อน การป้องกันการรั่วของลมร้อน การป้องกันการรั่วแถวข้อต่อต่าง ๆ การปรับสมดุลความดันภายในและข้างนอกของเครื่องอบแห้ง

การวิจัยนี้เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปร อันได้แก่ อัตราการป้อนผลิตภัณฑ์ อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน อุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง พลังงานความร้อนที่ป้อนให้แก่เครื่องอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ที่เหมาะสมในการอบแห้งผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องโดยใช้การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัญหาและตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งเดิมที่ใช้งานจริง
2. เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องอบแห้ง
3. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงระบบของเครื่องอบแห้งเดิม

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

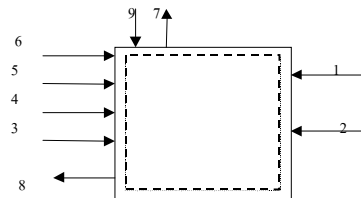
สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ ทำได้โดยใช้กฎของการอนุรักษ์มวล และ กฎการอนุรักษ์พลังงาน

3.1 สมมุติฐาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์มีข้อสมมุติฐานดังนี้

1. การทำงานของระบบ ต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
2. การวิเคราะห์ ระบบจะต้องอยู่ภายใต้สภาวะคงที่ (Steady State)
3. ค่าที่กำหนดคือ อุณหภูมิที่ทางเข้าของเครื่องอบแห้ง , อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง ขนาดของเครื่องอบแห้ง , อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ ทั้งก่อนอบแห้ง และหลังอบแห้งที่ต้องการ , ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
4. ไม่คิดความร้อนสูญเสีย (Heat Loss)
5. ไม่มีอากาศไหลออกจากเครื่องอบแห้งที่บริเวณทางออกของผลิตภัณฑ์
6. ในการอบแห้งไม่คิดช่วงเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

พิจารณาปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้งตามภาพที่ 1 กำหนดให้ลมร้อนเข้าไปในเครื่องอบแห้ง คือ ทางช่องทางที่ 1 ถึง ช่องทางที่ 6 ลมร้อนออกจากเครื่องอบแห้งที่ช่องทางที่ 7 ผลิตภัณฑ์เข้าเครื่องอบแห้งทางช่องทางที่ 9 และออกทางช่องทางที่ 8



ภาพที่ 1 การพิจารณาปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์

3.2 สมดุลมวลของอากาศแห้ง

จะได้ว่า ผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่ทางเข้าของเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลของลมแห้งที่ทางออกของเครื่องอบแห้งเขียนสมการ[7]ได้

$$\sum_{i=1}^6 \dot{m}_{i,in} = \sum \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} + \dot{m}_{a3} + \dot{m}_{a4} + \dot{m}_{a5} + \dot{m}_{a6} = \dot{m}_{a7} \quad (1)$$

เมื่อ \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

1,2,3...7 คือ ช่องทางที่ 1,2,3...7

ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่ทางเข้ามีค่าเท่ากัน

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a4} = \dot{m}_{a5} = \dot{m}_{a6} = \dot{m}_a \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้

$$6\dot{m}_a = \dot{m}_{a7} \quad (3)$$

3.3 สมดุลมวลของไอน้ำ

พิจารณา อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำที่ปะปนมากับอากาศที่ทางเข้าทุกทาง มีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำที่ปะปนออกไปกับอากาศที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง[8]

$$\sum_{i=1}^6 \dot{m}_{i,in} = \sum_{i=7}^8 \dot{m}_{i,out} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{v3} + \dot{m}_{v4} + \dot{m}_{v5} + \dot{m}_{v6} + \dot{m}_{v9} \\ = \dot{m}_{v7} + \dot{m}_{v8} \end{aligned}$$

(5)

จะได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำที่ปะปนไปกับอากาศที่ทางเข้ามีค่าเท่ากัน

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} = \dot{m}_{v4} = \dot{m}_{v5} = \dot{m}_{v6} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) และ (6) จะได้

$$\dot{m}_{v9} - \dot{m}_{v8} = \dot{m}_{v7} - 6\dot{m}_{v1}$$

$$\dot{m}_{a7}\omega_7 - 6\dot{m}_a\omega_1 = \dot{m}_{D9}\omega_9 - \dot{m}_{D8}\omega_8$$

$$6\dot{m}_a(\omega_7 - \omega_1) = \dot{m}_D(\omega_9 - \omega_8) \quad (7)$$

3.4 สมดุลพลังงาน ของเครื่องอบแห้ง

จากการสมดุลพลังงานของระบบเครื่องอบแห้งจะได้ว่า ผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมด้วยผลรวมของงานที่ให้หรือทำกับระบบของเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับ ผลของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของระบบเครื่องอบแห้ง[9]

$$\sum Q - \sum W = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (8)$$

พิจารณา $\sum Q$ โดยกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังเครื่องอบแห้งกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเขียนสมการได้

$$\sum_{i=1}^6 Q = 0 \quad (9)$$

พิจารณา $\sum W$ เนื่องจากพิจารณาที่ทางเข้าและทางออกของผลิตภัณฑ์อบแห้งและลมร้อนเท่านั้นจึงไม่มีงานเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง จะได้

$$\sum_{i=1}^6 W = 0 \quad (10)$$

พิจารณาผลรวมของเอนทัลปีที่ทางออกของเครื่องอบแห้งจะเห็นว่า มีทั้งเอนทัลปีของอากาศและของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง เขียนสมการได้คือ

$$\begin{aligned} \sum \dot{m}_{out} h_{out} &= \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{D8} h_8 \\ &= 6\dot{m}_a (C_a T_7 + \omega_7 (2501.3 + C_v T_7)) \\ &\quad + \dot{m}_{D8} (C_a T_8 + C_v T_8 \omega_8) \end{aligned} \quad (11)$$

ที่ทางเข้าของเครื่องอบแห้งจะมีทั้งเอนทัลปีของลมร้อนและเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ที่ใส่อบแห้ง เขียนสมการได้คือ

$$\begin{aligned} \sum \dot{m}_{in} h_{in} &= 6\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_{D9} h_9 \\ &= 6\dot{m}_a (C_a T_1 + \omega_1 (2501.3 + C_v T_1)) \\ &\quad + \dot{m}_{D9} (C_a T_9 + C_v T_9 \omega_9) \end{aligned} \quad (12)$$

จากสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (12) จะได้

$$\begin{aligned} 0 &= 6\dot{m}_a (C_a T_7 + \omega_7 (2501.3 + c_v T_7)) \\ &\quad + \dot{m}_{D8} (C_a T_8 + C_v T_8 \omega_8) \\ &\quad - 6\dot{m}_a (C_a T_1 + \omega_1 (2501.3 + c_v T_1)) \\ &\quad - \dot{m}_{D9} (C_a T_9 + C_v T_9 \omega_9) \end{aligned} \quad (13)$$

3.5 การพิจารณาตัวแปรการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบสายพานเคลื่อน

เนื่องจากสมมูลมวลและสมมูลพลังงานของระบบเครื่องอบแห้งรวมจะทำให้ได้เพียงสองสมการเท่านั้น ซึ่งตัวแปรที่ไม่รู้ค่า คือ $T_7, T_8, \omega_7, \dot{m}_a, \dot{m}_D$ ซึ่งการหาค่าตัวแปรเหล่านี้จำเป็นต้องสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เหลือนั้น โดยการพิจารณาภายในเครื่องอบแห้งซึ่งแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ของผลิตภัณฑ์ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 2 [5]



ภาพที่ 2 ช่วงการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ [5]

3.5.1. การพิจารณาตัวแปรช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้ในการระเหยน้ำ มีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสของอากาศที่ลดลง จะได้ว่า

$$q = \dot{m}_a C_a (T_c - T_7) = \dot{m}_D (\omega_9 - \omega_8) h_{fg@T_w} \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) จะได้ว่า

$$T_c = \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_a C_a} (\omega_9 - \omega_8) h_{fg@T_w} + T_7 \quad (15)$$

ในกรณีที่ลมร้อนไหลขนานกับแผ่นผลิตภัณฑ์ [5]

$$h' = CG_a^{0.8} \quad (16)$$

C คือ ค่าคงที่ มีค่าระหว่าง 0.0748 – 0.101

หาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและเลขหน่วยถ่ายเท [4]

$$t_c = \rho_p \delta \frac{(\omega_9 - \omega_c)}{R_c} \quad (17)$$

$$G_o = \frac{\dot{m}_a}{Wb} \quad (18)$$

$$N_t = \frac{ha\delta}{G_o C_a} \quad (19)$$

3.5.2. การพิจารณาตัวแปรช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จาก T_9 เป็น T_8 หาได้จาก

$$q = \dot{m}_a C_a (T_1 - T_c) = \dot{m}_D (C_s + C_w \omega_8) (T_8 - T_9) \quad (20)$$

แทนค่าสมการที่ (15) ลงในสมการที่ (20) ได้

$$\dot{m}_a C_a \left(T_1 - \frac{\dot{m}_D}{6\dot{m}_a C_a} (\omega_9 - \omega_8) h_{fg@T_w} - T_7 \right) = \dot{m}_D (C_s + C_w \omega_8) (T_8 - T_9) \quad (21)$$

หาเวลาที่ใช้ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงได้จาก สมการซึ่งเป็นสมการที่ได้มาจากการสร้างสมการเส้นโค้ง โดยใช้กราฟจาก [4] จะได้สมการคือ

$$t_d = -1 \times 10^7 \frac{\rho_p \delta}{R_c} \left(\frac{\omega_c^2}{Y} \right) \left[a \tanh \left(\frac{X}{Y} \right) + a \tanh \left(\frac{Z}{Y} \right) \right] \quad (22)$$

เมื่อ

$$Y = (3235823753 \ 7500 \omega_c^2 + 4871477386 \ 7500 \ N_t \omega_c^2 + 1908166833 \ 4180 \ N_t^2 \omega_c^2 - 1236684112 \ 9170 \ N_t^3 \omega_c^2 + 1212641390 \ 763 \ N_t^4 \omega_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$X = 5(234140 \ \omega_2' + 2297590 \ \omega_2' N_t - 531726 \ \omega_2' N_t^2 - 1141970 \ \omega_c - 874100 \ N_t \omega_c + 216069 \ N_t^2 \omega_c) \quad (24)$$

$$Z = 5 \omega_c (907830 - 1423490 \ N_t + 315657 \ N_t^2) \quad (25)$$

เพราะฉะนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งสองช่วงของการอบแห้งหาได้จาก

$$t = t_c + t_d \quad (26)$$

3.6 การคำนวณพลังงานความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง

1. การคำนวณหาพลังงานความร้อนของเครื่องอบแห้ง
พิจารณาความร้อนที่ใช้ทั้งหมดที่เข้าในเครื่องอบแห้ง (ความร้อนที่แลกเปลี่ยนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน) ทางช่องทางที่ 1 ถึง 6 ดังภาพที่ 1 โดยกำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในเครื่องอบแห้งกับสิ่งแวดล้อม จะได้สมการคือ

$$Q = \dot{m}_a C_a (T_1 - T_{surr}) \quad (27)$$

ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ พิจารณาจากอัตราการป้อนของผลิตภัณฑ์คูณกับผลต่างของอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์กับอัตราส่วนความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์คูณกับความชื้นแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ กระเปาะเปียกของอุณหภูมิมลร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจะได้สมการ

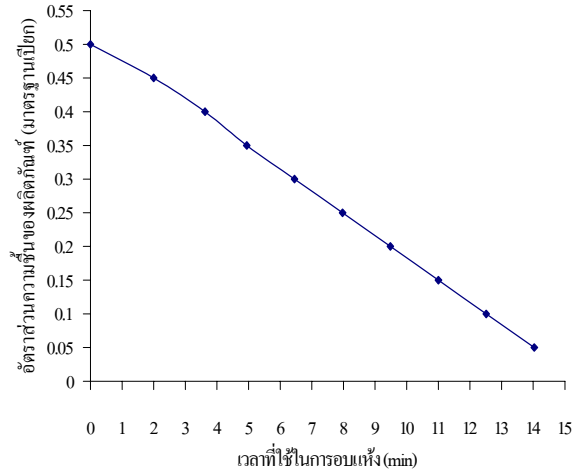
$$q_d = \dot{m}_D (\omega_9 - \omega_8) h_{fg} \quad (28)$$

2. การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งหาได้จากปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์หารด้วยปริมาณความร้อนที่ให้กับเครื่องอบแห้งจะได้สมการคือ

$$\eta_D = \frac{q_D}{Q} \times 100\% \quad (29)$$

4. ผลและวิจารณ์

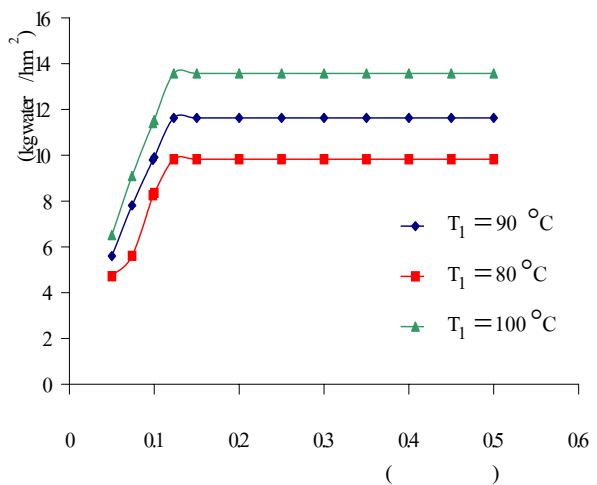
ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลาที่ได้จากการจำลองแบบ มีลักษณะเหมือนกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทั่วไปนั่นคือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งได้อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์

4.1 อิทธิพลของอัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ภาพที่ 4 ความเร็วของการอบแห้งมีค่าคงที่จนถึงค่าของอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 0.123 มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤตของผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้น หลังจากนั้นความเร็วของการอบแห้งจะลดลงจนถึงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ คือ 0.05 มาตรฐานเปียกซึ่งกราฟทั้งสามเส้นมีลักษณะเหมือนกันคือ

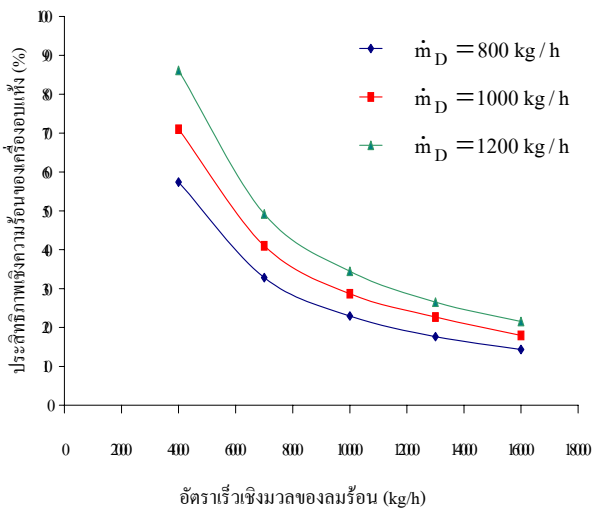


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์

เมื่ออัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลง และที่อุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งยิ่งสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็จะลดลง เช่นกันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง และอุณหภูมิของลมร้อนมีการแปรผันตรงซึ่งกันและกัน

4.2 อิทธิพลของอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง

ภาพที่ 5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง ที่ได้จากการจำลองแบบ จากกราฟทั้งสามจะเห็นว่า มีลักษณะที่เหมือนกันคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งจะต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่ออัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนเพิ่มขึ้น กราฟเส้นที่อยู่ล่างสุดจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยต่ำที่



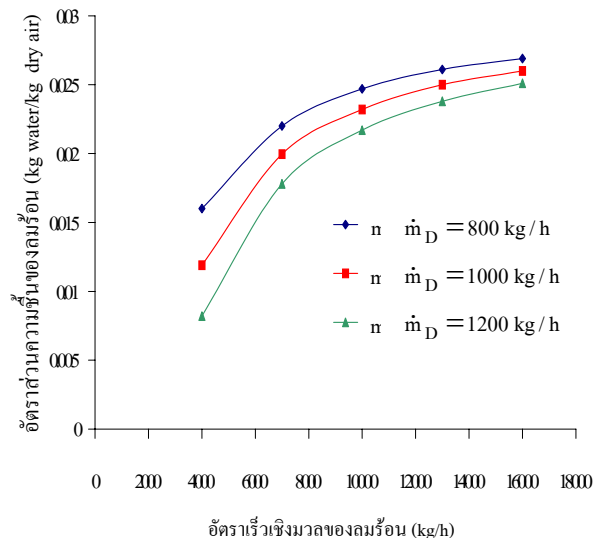
ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน

สุดเนื่องจากอัตราการป้อนผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยที่สุด (800 kg/hr) ส่วนกราฟเส้นที่อยู่บนสุดจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของเครื่องอบแห้งสูงที่สุด เนื่องจากอัตราการป้อนผลิตภัณฑ์มีค่ามากที่สุด เมื่อพิจารณากราฟเส้นใดเส้นหนึ่ง อุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนจะ

ทำให้พลังงานความร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่พลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์กับพลังงานที่ให้แก่เครื่องอบแห้ง มีค่าลดลงเมื่ออัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3 อิทธิพลของอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนและอัตราส่วนความชื้นของลมร้อนที่มีผลต่ออัตราการป้อนของผลิตภัณฑ์

ภาพที่ 6 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของลมร้อนกับอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง เมื่ออัตราการป้อนเปลี่ยนไป จากการจำลองแบบ จากกราฟทั้งสามเส้น เมื่ออัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนเพิ่มขึ้นอัตราส่วนความชื้นของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการไขว่คว้าในการจำลองแบบให้ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังอบแห้งอุณหภูมิและอัตราส่วน



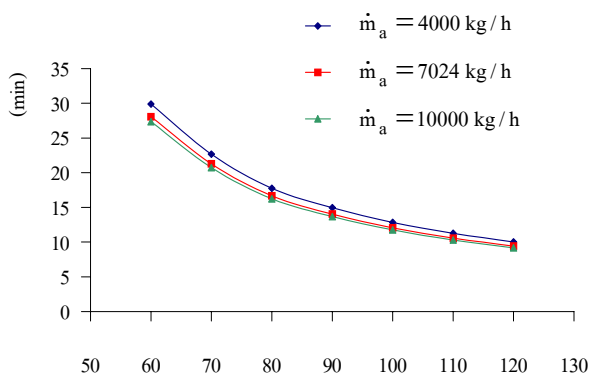
ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับอัตราเร็วเชิงมุมของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง

ความชื้นของลมร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้งเป็นค่าคงที่ จึงทำให้กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองมีลักษณะเช่นนี้ เมื่อพิจารณากราฟทีละเส้น กราฟเส้นที่อยู่ล่างสุดจะมีอัตราส่วน

ความชื้นเฉลี่ยต่ำสุดเมื่ออัตราการป้อนผลิตภัณฑ์สูงสุด ($\dot{m}_D = 1200 \text{ kg/hr}$) กราฟเส้นที่อยู่บนสุดจะมีอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยสูงที่สุดเมื่ออัตราการป้อนต่ำสุด ($\dot{m}_D = 800 \text{ kg/hr}$) ส่วนที่อัตราการป้อนที่ได้จากการจำลองแบบ ($\dot{m}_D = 1000 \text{ kg/hr}$) จะมีค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่างกราฟทั้งสองเส้น

4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิของลมร้อนที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ภาพที่ 7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าในเครื่องอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งได้จากการจำลองแบบ กราฟทั้งสามเส้นมีลักษณะที่เหมือนกันคือ ที่อุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง เมื่อพิจารณากราฟที่ละเส้นจะเห็นว่ากราฟเส้นที่อยู่บนสุดใช้เวลาเฉลี่ยในการอบมากที่สุดเนื่องจากอัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าน้อยที่สุด คือ 4000 kg/hr ส่วนกราฟเส้นที่อยู่ล่างสุดมีเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากอัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่ามากที่สุดคือ 10000 kg/hr ส่วนกราฟเส้นที่อยู่ตรงกลางจะมีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ระหว่างกราฟทั้งสองเส้นเนื่องจากมีอัตราเร็วเชิงมวลของอากาศเข้าที่เครื่องอบแห้งที่ 7024.7744 kg/hr ซึ่งเป็นจุดที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้



(C)

ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

5. สรุป

ผลการวิจัยเครื่องอบแห้งได้พิจารณาช่วงความเร็วของการอบแห้งที่แสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่าความเร็วของการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง[1] มีค่าน้อยกว่าความเร็วของการอบแห้งที่ได้จากการจำลองแบบประมาณ -0.073% เนื่องจากการระเหยน้ำที่ได้จากการจำลองแบบมีค่าเท่ากับ 2407.33 kJ/kg มีค่าต่ำกว่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ได้จากการทดลองคือ 2409.5 kJ/kg ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจากการจำลองแบบน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ผลของการจำลองแบบมีค่าความคลาดเคลื่อน -1.2% ส่วนในช่วงความเร็วของการอบแห้งลดลง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จากการจำลองแบบ ผลที่ได้จากการจำลองแบบคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.26% แต่เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งรวมของผลิตภัณฑ์ทั้งสองช่วงผลการทดลองและการจำลองแบบจะมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.43%

สำหรับผลที่ได้จากการจำลองแบบนี้ได้อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์จะสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้นช่วงที่ศึกษา คือ 70°C , 80°C , 90°C , 100°C , 110°C และ 120°C จะทำให้ค่าอัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าลดลงตามลำดับดังนี้ 30440 kg/h , 11415 kg/h , 7024 kg/h , 5073 kg/h , 3970 kg/h และ 3261 kg/h เมื่อกำหนดให้ อัตราการป้อนผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 1000 kg/h ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง มีค่าเท่ากับ 50.63 m^3 อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับ 64°C เป็นค่าคงที่ ซึ่งเป็นผลทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 6.9 min , 11.7 min , 14.03 min , 15.7 min , 16.2 min และ 16.7 min ตามลำดับ

2. เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นซึ่งศึกษาช่วง คือ 60°C , 70°C , 80°C , 90°C , 100°C , 110°C และ 120°C จะทำให้พลังงานความร้อนที่ให้เครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 1.32 GJ , 1.76 GJ , 2.21 GJ , 2.65 GJ , 3.09 GJ , 3.53 GJ และ 3.97 GJ ตามลำดับ ซึ่งจะส่งผลทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงด้วย เมื่อพิจารณาที่ อัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนมีค่าเท่ากับ 7024 kg/h อัตราการป้อนผลิตภัณฑ์

มีค่าเท่ากับ 1000 kg/h อุณหภูมิของลมร้อนเฉลี่ยที่ทางออกของเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับ 64 °C เป็นค่าคงที่ แต่จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลงจาก 70.3 % จนกระทั่งถึง 27.1 % เนื่องจากอัตราการป้อนผลิตภัณฑ์คงที่ ค่าใช้จ่ายของพลังงานความร้อนที่ให้เครื่องอบแห้งต่อชั่วโมงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อให้อัตราเร็วเชิงมวลของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

3. ที่อุณหภูมิของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าสูงคือ 120 °C ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อนคือมีค่าเท่ากับ 1167.34 Baht/h ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าที่อัตราการป้อนผลิตภัณฑ์และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1000 kg/h และ 1.08 GJ ตามลำดับ

4. อัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการอบแห้ง เนื่องจากที่อัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งและใช้เวลานาน

เมื่อนำแบบจำลองมาวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องอบข้าวเกรียบกุ้ง ขนาด ความกว้าง 2.7 m x ความยาว 7 m x ความสูง 5.5 m จำนวน 3 เครื่อง ข้าวเกรียบกุ้งมีขนาดเฉลี่ย ความยาว 0.035 m x ความกว้าง 0.005 m x ความหนา 0.003 m อุณหภูมิของลมร้อนเข้าเครื่องอบแห้ง 95 °C อัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นของข้าวเกรียบกุ้งเท่ากับ 0.35 มาตรฐานเปียก อัตราส่วนความชื้นสุดท้าย 0.14 มาตรฐานเปียก อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อมเท่ากับ 34.6 °C และ 0.06 kg water/kg dry air ตามลำดับ จะได้อัตราการป้อนข้าวเกรียบกุ้งที่ 5888 kg/h อัตราเร็วของสายพาน 1.42 m/min อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนเข้าเครื่องอบแห้ง 15515 kg/h หรือมีอัตราเร็วเท่ากับ 2.6 m/s เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 82 min ใช้พลังงานความร้อนเพื่อให้เครื่องอบแห้ง 5.9 GJ/h ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งเท่ากับ 49.9 % ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อนเท่ากับ 512.3 Baht/h และปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้แก่สิ่งแวดล้อมเท่ากับ 2.9 MJ/h เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ออบแห้งระหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดจากเครื่องอบแห้งที่ทำงานจริง จะสามารถลดเวลาในการอบแห้งลงได้ 8.9 % ซึ่งจะทำให้ลดพลังงานความร้อนที่ให้เครื่องอบ

แห้งได้เท่ากับ 918 kJ/h และอัตราการผลิตเพิ่มขึ้น 70.58 kg/h หรือ 1.2 % ของอัตราการผลิตเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. F. Stoecker : **Design of Thermal Systems**, 3rd ed. Singapore : McGraw – hill Co., 1989.
- [2] P. FEIOWS. **Food Processing Technology Principles and Practice**. Ellis Hor Wood Ltd., 1990.
- [3] RB. KEEL. **Introduction to Industrial Drying Operations**. London : Beccles and Colcedter, 1978.
- [4] เรียวโซ โทเอ. **อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม**. แปลโดย วิวัฒน์ คัมพะพานิชกุล. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : ภาพพิมพ์, 2529
- [5] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. **การอบแห้งเมล็ดข้าวโพดและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [6] Ashworth, J. C. and J. W. Carter. The performance of convective dryers as a function of inergy efficiency capital cost and solid residence time. **Drying '80 (Mujumdar. A.)**. 293-303. Hemisphere : Washington, D. C., 1980.
- [7] Yunud A. Cengel and Michael A. Boles. **Thermodynamics ; An Engineering Approach**. 2nd ed. The United States of America ; McGraw. Hill, Inc., 1989.
- [8] M. Necati OZISIK : **Heat Transfer a basic approach**. Singapore : McGraw – hill Co., 1985.
- [9] Incropera, F. P. and Dewirt, D. P. **Fundamental of Heat and Mass Transfers**. 3rd ed. New York : John Wiley & Sons Inc, 1990.