



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งแบบหมุนชนิดไหลสวนทาง Mathematical Modelling of A Counter Flow Rotary Dryer

วรวิรี ปัญญาคำ¹ และ ธนา ราษฎร์ภักดี^{*1}Voravee Punyakum¹ and Thana Radpukdee^{*1}¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 4002¹Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

Received: September 2015

Accepted: January 2016

บทคัดย่อ

ในการควบคุมผ่านระบบควบคุมกำกับดูแลระยะไกล เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องทราบค่าที่เหมาะสมในการสั่งการอุปกรณ์ทำงาน โดยในการหาค่าที่เหมาะสมสามารถหาได้จากวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง ซึ่งต้องใช้ผลการทดลองในกระบวนการจริงเป็นจำนวนมาก ซึ่งการทดลองอาจรบกวนกระบวนการผลิตและส่งผลต่อความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆในกระบวนการผลิตหากวางแผนการทดลองไม่ดีพอ เพื่อแก้ปัญหาความยุ่งยากดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้เป็นตัวแทนของกระบวนการผลิต ในที่นี้คือระบบอบแห้งแบบหมุน เพื่อที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงตามสภาพการดำเนินงาน ซึ่งแนวโน้มของการตอบสนองของแบบจำลองสามารถนำไปใช้แทนระบบจริงได้ โดยมีข้อผิดพลาดของอุณหภูมิของแข็ง, อุณหภูมิก๊าซร้อนและความชื้นของแข็งเท่ากับ 1.79%, 4.72% และ 3.54% ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำให้ได้ค่าตัวแปรที่ใช้ในระบบควบคุมกำกับดูแลระยะไกลต่อไป

คำสำคัญ : ระบบอบแห้งแบบหมุน ปุ่มอินทรีย์จากมูลไก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

A remote supervisory control system, graphic user interface (GUI) was used for system communication via monitors is used for minimizing operating cost of a process. The automated system was designed, installed and operated properly by a set of optimal control variables. The Response Surface Method (RSM) can be used to find the optimal value of such variables. However, improper design of an experiment may lead to process interference and actuator damage. To avoid this issue, a mathematical model of a rotary dryer plant was developed in terms of interested

parameters along a dimensionless longitudinal axis. The model was validated by comparison with actual process operating condition. The trend of the simulated responses was relatively consistent with the real results as their errors of solid temperature; hot gas temperature and solid moisture were 1.79%, 4.72% and 3.54% respectively. Therefore, the model can be used to describe the plant's behavior and to calculate some optimal operating points for the remote controller in a further work.

Keywords : A rotary dryer Organic fertilizer from chicken manure Mathematical modeling

*ติดต่อ: *E-mail: tthanar@gmail.com, voravee9@gmail.com, โทรศัพท์ 0-4320-2097, โทรสาร 043-202097

1. บทนำ

การจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดการใช้พลังงาน การผลิตปุ๋ยเม็ดอินทรีย์ในปัจจุบันส่วนใหญ่กระบวนการอบใช้ท่ออบแห้งแบบหมุน ซึ่งจำเป็นต้องใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเชื้อเพลิงแบบแก๊ส (Gas Fuel) การจัดการการใช้พลังงานให้คุ้มค่าจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง โดยจำเป็นต้องควบคุมการใช้พลังงานของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดอัตราการทำงานของอุปกรณ์ เหล่านั้นลงเพื่อไม่ให้เกิดการทำงานที่สูญเสียไป แต่การลดอัตราการทำงานของอุปกรณ์เหล่านั้นต้องไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ [1]

การลดอัตราการทำงานของอุปกรณ์ไม่สามารถทำได้โดยตรงในกระบวนการผลิตปุ๋ยเม็ดอินทรีย์จากมูลไก่ของโรงงานกรณีศึกษา เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับค่าการทำงานของอุปกรณ์ได้และการทำงานของอุปกรณ์ใช้อัตราการทำงานสูงสุด (100%) ทุกอุปกรณ์ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยของ [2] พบว่าระบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมเชิงตรรกะ (Programmable Logic Controller, PLC) สามารถนำมาควบคุมปรับค่าการทำงานของอุปกรณ์ได้ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้ประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติเพื่อควบคุมระดับน้ำในถังกักน้ำ โดยการควบคุมอัตราความเร็วของปั๊ม ซึ่งสามารถรักษาระดับน้ำได้เพื่อควบคุมแรงดันในการจ่ายได้อย่างเหมาะสม ต่อมา [3] ได้

นำระบบอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วย PLC ผ่านระบบกำกับควบคุมดูแลระยะไกลซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมกำกับดูแลและเก็บข้อมูล (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA) มาใช้ในการควบคุมระบบคลองส่งน้ำเพื่อทำให้น้ำในแต่ละช่วงระยะทางมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้การจ่ายน้ำไปยังเกษตรกรมีอัตราการจ่ายอย่างสม่ำเสมอ จากงานวิจัยที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงเลือกที่จะนำระบบอัตโนมัติมาใช้ในโรงงานกรณีศึกษาเพื่อควบคุมอัตราการทำงานของอุปกรณ์ในกระบวนการอบแห้งเม็ดปุ๋ย

ทั้งนี้ระบบ SCADA ยังเป็นระบบตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเวลาจริง โดยการแสดงภาพกราฟิกของกระบวนการในระยะไกลผ่านจอสังเกตการณ์ส่งข้อมูลด้วยระบบท้องถิ่นหรืออินเทอร์เน็ต ซึ่งกราฟิกในจอสังเกตการณ์จะนำมาใช้ในการตรวจสอบสถานะตลอดจนถึงควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม (S.A. Boyer, 2009) โดยอุปกรณ์ PLC สามารถทำการสื่อสารกับ SCADA ผ่านการติดป้าย(TAG)ได้ ซึ่งการติดป้ายคือการนำสัญญาณของอุปกรณ์มาแสดงผลผ่านกราฟิกในจอสังเกตการณ์ ดังนั้นจึงทำให้สามารถควบคุม PLC ผ่าน SCADA ได้ ซึ่งทำให้สามารถปรับอัตราการทำงานของอุปกรณ์ที่จะควบคุมได้ตามที่ต้องการและสามารถควบคุมแบบเวลาจริงผ่านภาพกราฟิกจากระยะไกลได้ [5] อย่างไรก็ตามระบบนี้

ยังต้องการค่าอ้างอิงสำหรับการควบคุม จาก การศึกษางานวิจัยของ [6] ได้ประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิว ตอบสนอง (Response Surface metrology, RSM) เพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อแรงที่กระทำ ต่อส่วนในการเจาะโลหะ พบว่าอัตราการบิ่นมีผล ต่อแรงที่กระทำต่อส่วนสูงสุด

ดังนั้นวิธีพื้นผิวตอบสนองจึงเป็นวิธีการทาง คณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้าง แบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งจะแสดง ผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่างๆโดยมี วัตถุประสงค์เพื่อหาจุดค่าที่ดีที่สุดหรือความ เหมาะสมต่อผลนั้น [7] ทั้งนี้วิธีพื้นผิวตอบสนองเป็น เทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่มีความ ซับซ้อนทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผลเมื่อ เปรียบเทียบกับวิธีการอื่น [8] ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หา ค่าที่เหมาะสมจากผลที่ได้จากการออกแบบการ ทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3k จะได้ค่าที่ดี [9] แต่เนื่องจากวิธีพื้นผิวตอบสนองในการวิเคราะห์หา ค่าการทำงานที่เหมาะสมของอุปกรณ์นั้นจำเป็นต้องใช้ ผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการ ซึ่งการทดลองใน กระบวนการจริงไม่สามารถทำได้เพราะอาจทำให้ อุปกรณ์เสียหายและส่งผลกระทบต่อระบบการผลิต จากการศึกษางานวิจัยของ [10] ได้ประยุกต์ใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีศึกษาการผลิตปุ๋ย superphosphate ด้วยท่ออบแห้งแบบหมุนชนิดไหล สวนทาง ในปรับค่าตัวแปรควบคุมเพื่อให้แบบจำลอง ทำนายค่าตัวแปรตามที่ต้องการ โดยตัวแปรควบคุมที่ นำมาใช้นำมา ได้แก่ อุณหภูมิวัสดุ อุณหภูมิอากาศ ร้อนในท่ออบ ความชื้นวัสดุ ความชื้นอากาศ ความเร็ว ในการหมุนของระบบอบแห้งแบบหมุน อัตราการไหล ของวัสดุและอัตราการไหลของอากาศ ก่อนที่จะ นำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง เพื่อให้แบบจำลอง ของ [10] สมบูรณ์ขึ้น [11] ได้ใช้

วิธี Different Evolution เพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จากนั้น [12] ได้ปรับปรุงแบบจำลองของ [10] เพื่อให้ สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ได้ง่าย ขึ้น ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นตัวเลือก ที่ดีในการนำมาประกอบกรวิเคราะห์ผลของวิธีพื้นผิว ตอบสนอง ก่อนนำไปใช้กับกระบวนการผลิตจริง

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะหาค่าตัวแปรใน การควบคุมระบบกำกับดูแลระยะไกลโดยใช้วิธี พื้นผิวตอบสนอง โดยจะทำการทดลองใน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหลีกเลี่ยงความ เสี่ยงที่จะเกิดขึ้นกับกระบวนการจริง เมื่อได้ค่า ควบคุมอัตราการทำงานที่เหมาะสมจากแบบจำลอง แล้วจึงจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในกระบวนการจริงผ่าน ระบบควบคุมกำกับดูแลระยะไกล

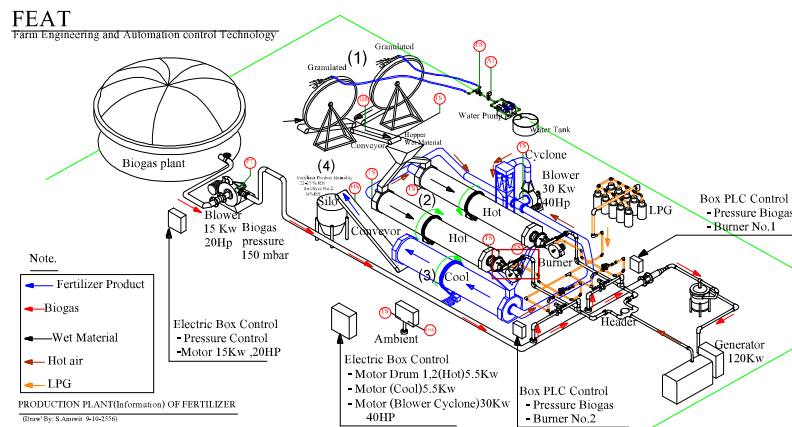
2. กระบวนการอบเม็ดปุ๋ยอินทรีย์จากมูลไก่

วัตถุดิบในการทำปุ๋ยมาจากตะกอนมูลไก่ที่ผ่าน การหมักเป็นแก๊สชีวภาพแล้ว จะนำมาเข้า กระบวนการผลิตเม็ดปุ๋ยดังแสดงลำดับขั้นตอน กระบวนการในภาพที่ 1 โดยจะอธิบายตามหมายเลข ในภาพดังต่อไปนี้ (1) ในส่วนนี้ตะกอนมูลไก่จะถูก แยกเศษหินหรืออื่นๆที่ไม่ใช่มูลไก่ออก จากนั้นนำมา ปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดปุ๋ยเพื่อให้มีคุณภาพตามที่ กำหนด แล้วทำการขึ้นรูปปุ๋ยโดยใช้จานปั่นเม็ด ซึ่งเม็ด ปุ๋ยที่ได้จะมีขนาด 3-5 มม. เมื่อเม็ดปุ๋ยมีขนาดที่ พอเหมาะแล้วจะถูกส่งโดยสายพานเข้าสู่กระบวนการ อบแห้งเม็ดปุ๋ย เม็ดปุ๋ยที่เข้ามามีความชื้นประมาณ 46 % มาตรฐานแห้ง โดยจะใส่เม็ดปุ๋ยผ่านกรวย บ่อนเข้าสู่เครื่องอบ (2) เมื่อเม็ดปุ๋ยเข้ามายังท่อ อบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer drum) ซึ่งจะมี ลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาว ด้านตรงข้ามกับที่ใส่ เม็ดปุ๋ยในท่ออบแห้งแบบหมุนจะมีลมร้อนไหลสวน ทางกับเม็ดปุ๋ยซึ่งใบตักในท่ออบหมุนจะทำหน้าที่ป้อน เม็ดปุ๋ยเพื่อให้เม็ดปุ๋ยสัมผัสกับลมร้อนเพื่อไล่ความชื้น

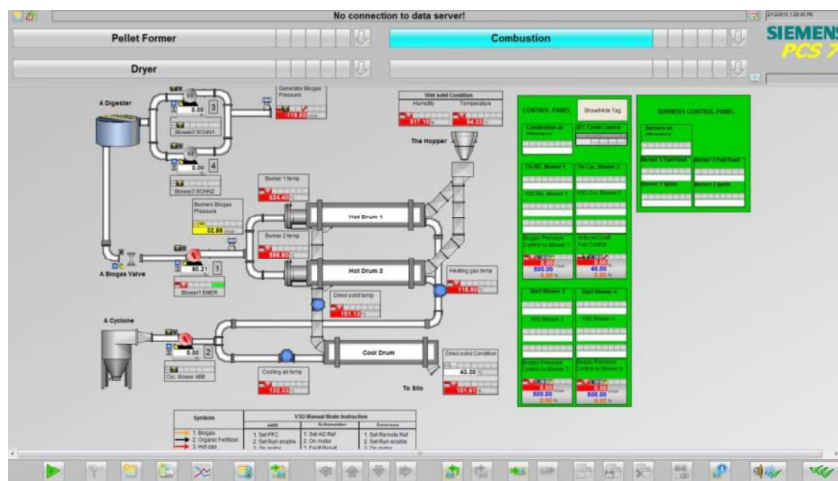
ที่อยู่ในเม็ดปุ๋ย โดยลมร้อนจะมาจากหัวเผาเชื้อเพลิง
ท่ออบแห้งแบบหมุนจะมีการหมุนอยู่ตลอดเวลาเพื่อ
โปรยและลำเลียงเม็ดปุ๋ยให้ไหลตามท่อจนออกไปอีก
ฝั่งของท่ออบแห้งแบบหมุนแล้วจะตกลงมาในท่อพัก
ปุ๋ย (3) ท่อพักแบบหมุนจะทำหน้าที่โปรยเม็ดปุ๋ย
เพื่อให้เม็ดปุ๋ยสัมผัสกับอากาศเย็น ซึ่งจะทำให้เม็ดปุ๋ย
เย็นตัวอย่างช้าๆ จากนั้นท่ออบเย็นจะลำเลียงเม็ดปุ๋ย
ให้ไหลตามท่อจนออกไปอีกฝั่งของท่อ

อบแห้ง ซึ่งจะถูกลำเลียงไปยังไซโล (4) เพื่ออบซ้ำ
ให้ได้ความชื้นที่ 12 % มาตรฐานแห้ง หรือถ้าความชื้น
ได้ตามที่กำหนดแล้วก็จะจัดเก็บรอการจำหน่ายต่อไป

การควบคุมกระบวนการผลิตปุ๋ยเม็ดอินทรีย์จาก
มูลไก่จะใช้ระบบควบคุมกักกักับดูและระยะไกลดังแสดง
ในรูปที่ 2 ซึ่งจะสามารถควบคุมตัวแปรในกระบวนการ
ได้ดังนี้ คือ เปอร์เซ็นต์การทำงานของท่ออบแห้งแบบ
หมุน เปอร์เซ็นต์การทำงานของโบลเวอร์ไซโคลน และ
เปอร์เซ็นต์การทำงานของโบลเวอร์แก๊สชีวภาพ



รูปที่ 1 กระบวนการอบแห้งเม็ดอินทรีย์จากมูลไก่และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม



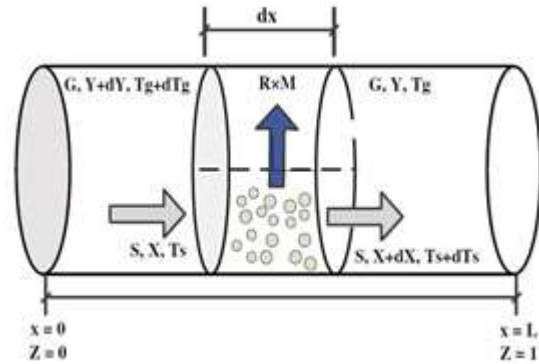
รูปที่ 2 ระบบควบคุมกักกักับดูและระยะไกลของกระบวนการอบแห้งเม็ดอินทรีย์จากมูลไก่

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งระบบซึ่งประกอบด้วยท่ออบร้อนสองท่อและท่ออบเย็นนั้นทำได้ลำบากเนื่องจากมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่มากมาย ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงเลือกท่ออบร้อน 1 ท่อซึ่งเป็นส่วนที่มีผลสูงสุดต่อค่าความชื้นของเม็ดปฏุยมาทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งท่ออบร้อนแสดงดังภาพที่ 3 ในภาพที่ 4 แสดงการพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของความชื้นและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ตัวแปรต่างๆ ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 1) ตามความยาวของท่อซึ่งพิจารณาในลักษณะของตัวแปรความยาวไร้มิติ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ของท่ออบแบบหมุนจะพิจารณาโดยใช้แนวทางของ [12] ซึ่งเป็นการไหลแบบขนานประกอบด้วยความสัมพันธ์ของการถ่ายเทมวลและพลังงาน โดยที่ Z เป็นความยาวแบบสัดส่วนซึ่งถ้า $Z = 1$ จะเท่ากับ ความยาวทั้งหมดของท่อ (L) ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยในการประยุกต์สมการจากท่ออบหมุนแบบไหลขนานเป็นแบบไหลสวนทางจะใช้สมการคณิตศาสตร์ตามแนวทางของ [11] ในการเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งจะได้สมการท่ออบของโรงงานกรณีศึกษาดังนี้



ภาพที่ 3 ท่ออบแห้งเม็ดปฏุยชนิดไหลสวนทาง (ท่อร้อน)



ภาพที่ 4 ตัวแปรที่พิจารณาในท่ออบชนิดไหลสวนทาง

สมการหาค่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของของแข็งต่อระยะของท่ออบแห้ง

$$\frac{dX}{dz} = -\frac{R \times M}{S} \quad (1)$$

สมการหาค่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแก๊สต่อระยะของท่ออบแห้งแบบหมุน

$$\frac{dY}{dz} = -\frac{R \times M}{G} \quad (2)$$

สมการหาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของแข็งต่อระยะของท่ออบแห้งแบบหมุน

$$\frac{dT_s}{dz} = \frac{+Q - (0.25)\lambda RM}{S(C_{pd} + XC_{pv})} \quad (3)$$

สมการหาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแก๊สต่อระยะของท่ออบแห้งแบบหมุน

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{Q + C_{pv}RM(T_s - T_g) + Q_p}{G(C_{pg} + YC_{pv})} \quad (4)$$

สมการการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่าง
ของแข็งและแก๊สในปริมาตรนั้นๆ

$$Q = U_{va} V(T_g - T_s) \quad (5)$$

สมการการสูญเสียพลังงานบนพื้นที่ผิวของ
ท่ออบแห้ง

$$Q_p = U_p A(T_g - T_{amb}) \quad (6)$$

สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
ในปริมาตรทั้งหมดในท่ออบแห้ง

$$U_{va} = 0.119 \left(\frac{G}{A}\right)^{0.289} \left(\frac{S}{A}\right)^{0.541} \quad (7)$$

สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน
ของท่ออบแห้ง

$$U_p = 1.28 \left(\frac{G}{A}\right)^{0.879} \quad (8)$$

สมการหาค่าอัตราการอบแห้งของของแข็ง

$$R = 0.003 \exp\left(\frac{-7.95}{T_g}\right) \quad (9)$$

สมการหาปริมาณวัตถุดิบที่อยู่ในท่ออบแห้ง
แบบหมุน

$$M = TR \times S \quad (10)$$

สมการหาปริมาณมวลของอากาศที่ไหลในท่อ
อบแห้ง

$$G = v_{air} \times \rho_{air} \times A \quad (11)$$

สมการหาค่ามวลวัตถุดิบแห้ง

$$S = \left(\frac{S_{wet}}{1 + X_0}\right) \quad (12)$$

สมการแสดงค่าเริ่มต้นสำหรับระบบ

$$X(0) = X_0; Y(1) = Y_0; T_s(0) = T_{s0}; Tg(1) = T_{g0}; \quad (13)$$

สมการที่ไม่สามารถหาค่าได้ จะสามารถหาได้
โดยทำการเก็บข้อมูลและนำข้อมูลมาหาแนวโน้มให้
เป็นสมการถดถอย ซึ่งประกอบด้วยสมการดังนี้

สมการถดถอยสำหรับเปอร์เซ็นต์การทำงานของ
ท่ออบแห้งต่อเวลาที่ป้อนอยู่ในท่ออบแห้ง (TR) โดยมีค่า
R-square: 0.9894 Adjusted R-square: 0.9867
โดยมี Curve Fitting ดังรูปที่ 5

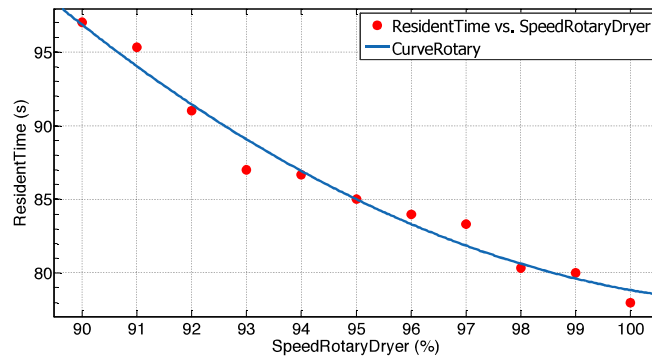
$$TR = 0.09866 a^2 - 20.43 a^1 - 1135 \quad (14)$$

สมการถดถอย สำหรับเปอร์เซ็นต์การทำงานของ
ไซโคลนต่อปริมาณความเร็วลมต่อวินาทีที่ผ่านท่อ
อบแห้ง (v_{air}) โดยมีค่า R-square: 0.9913 Adjusted
R-square: 0.9884 โดยมี Curve Fitting ดังรูปที่ 6

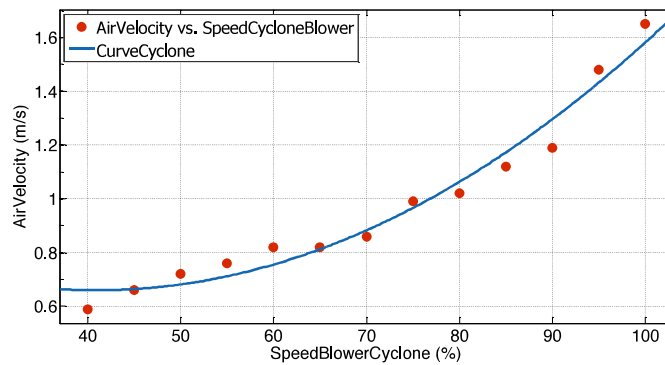
$$v_{air} = (9.044^c)b^3 - 0.001634b^2 - 1.601b - 1.601 \quad (15)$$

สมการถดถอยสำหรับเปอร์เซ็นต์การทำงานของ
โบลเวอร์แก๊สชีวภาพต่ออุณหภูมิหัวเผา ($Tg(Z=1)$)
โดยมีค่า R-square: 0.9999 Adjusted R-square:
0.9998 โดยมี Curve Fitting ดังรูปที่ 7

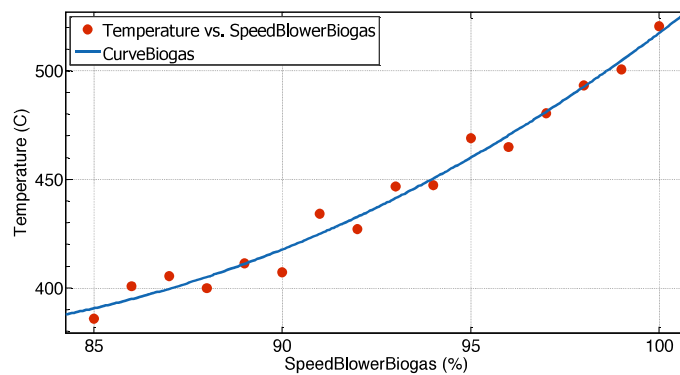
$$T_g = 0.01147c^3 - 2.793c^2 - 230.5c - 6071 \quad (16)$$



ภาพที่ 5 แสดง Curve Fitting ของเปอร์เซ็นต์การทำงานของท่อ
อบแห้งและเวลาที่ป้อนอยู่ในท่ออบแห้ง



ภาพที่ 6 แสดง Curve Fitting ของเปอร์เซ็นต์การทำงานของไซโคลน
และความเร็วลมต่อวินาทีที่ผ่านท่ออบแห้ง



ภาพที่ 7 แสดง Curve Fitting ของเปอร์เซ็นต์การทำงานของโบลเวอร์
แก๊สชีวภาพและอุณหภูมิหัวเผา

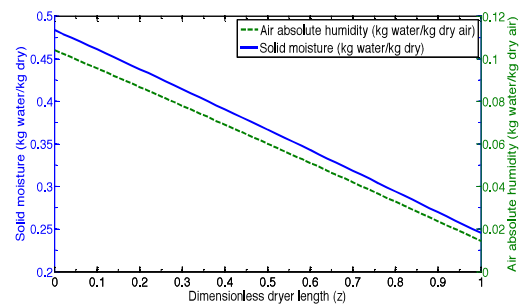
4. ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งการหาผลเฉลยของอนุพันธ์จะใช้วิธีของ Runge–Kutta อันดับที่ 4 โดยค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณจะแสดงดังตารางที่ 1 ค่าผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อระยะของท่ออบแห้งแบบหมุนในภาพที่ 8 และ แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อระยะของท่ออบแห้งแบบหมุนในภาพที่ 9 ซึ่งที่ตำแหน่ง $z = 1$ คือบริเวณหัวเผาและจุดที่ป้อนออกจากท่ออบร้อน

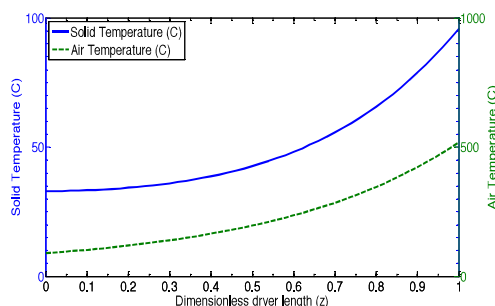
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

สัญลักษณ์	ค่า	ค่า(หน่วย)
A	พื้นที่หน้าตัดของท่ออบแห้งแบบหมุน	1.131 (m ²)
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	1.2 (m)
C _{pd}	ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุดิบ	3.5 (kJ/kg°C)
C _{pg}	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง	1.009 (kJ/kg°C)
C _{pv}	ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	4.1858 (kJ/kg°C)
C _{pw}	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ	1.1723 (kJ/kg°C)
L	ความยาวของท่ออบแห้งแบบหมุน	10 (m)
S _{wet}	อัตราการไหลของวัสดุดิบเปียก	0.79 (kg/s)
T _{s0}	อุณหภูมิของของแข็งเริ่มต้น	33 (°C)
T _{g0}	อุณหภูมิของแก๊สเริ่มต้น	520 (°C)

T _{amb}	อุณหภูมิภายนอก	35 (°C)
V	ปริมาตรท่ออบแห้งแบบหมุน	11.3097 (m ³)
X ₀	ความชื้นของของแข็งเริ่มต้น	0.46 (kg water/kg dry solid)
Y ₀	ความชื้นของอากาศเริ่มต้น	0.19 (kg water/kg dry solid)
λ	ค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ	2,502 (kJ/kg)
TR	เวลาที่อยู่ในท่ออบแห้งแบบหมุนโดยเฉลี่ย	78 (s)
G	อัตราการไหลของมวลอากาศ	1.27 (kg/s)



ภาพที่ 8 แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อระยะของท่ออบแห้งแบบหมุน



ภาพที่ 9 แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิต่อระยะของท่ออบแห้ง

แบบหมุน

จากภาพที่ 8 และ 9 พบว่าค่าความชื้นของปุ๋ยค่อยๆ ลดลงจากทางเข้าจนถึงทางออกที่ใกล้กับหัวเผา ซึ่งมีลักษณะอัตราค่อนข้างคงที่ เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีลักษณะเป็น exponential decay และ rise เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับการระเหย การพาและนำความร้อน ที่เป็นไปได้รวดเร็วกว่า ขณะที่การลดความชื้นให้ของแข็งทำได้ช้ากว่ามาก นอกจากนี้อัตราการลดลงของความชื้นที่ใกล้กับการเป็นเส้นตรงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ของแข็งยังสามารถนำเอาความชื้นออกจากวัสดุได้อีก ดังที่ในระบบจริงมีการเพิ่มท่ออบเย็น เพื่อลดความชื้นอีกต่อหนึ่งพร้อมกับลดอุณหภูมิไปพร้อมๆ กัน

5. การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับระบบจริง

ในการตรวจสอบความแม่นยำจะเก็บค่าจากระบบ SCADA และวัดจริงโดยได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 2 ซึ่งในการเปรียบเทียบค่าตัวแปรหลังจากออกจาก

ท่ออบแห้ง ค่าจากการวัดและค่าที่ได้ จากแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิของแข็งมีค่า 1.79 % ค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิของแก๊สร้อนมีค่า 4.72 % ค่าความคลาดเคลื่อนความชื้นของของแข็งมีค่า 3.54 % ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบจริงได้

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการอบแห้งต่อความยาวไร้มิติของท่ออบ ซึ่งความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กำหนดจากทิศทางการถ่ายเทมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นในปริมาตรการอบแห้ง ขณะที่ความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ซับซ้อนกับตัวแปรบางส่วน เช่น เวลาที่ของแข็งเปียกอยู่ในท่ออบ ความเร็วลมร้อนที่วิ่งผ่านท่ออบ อุณหภูมิของหัวเผา ใช้วิธีหาจากสมการถดถอย ของผลการทดลอง ซึ่งแบบจำลองที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิของแข็งมีค่า 1.79 % ค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิของแก๊สร้อนมีค่า 4.72 % ค่าความคลาดเคลื่อนความชื้นของของแข็งมีค่า 3.54 % ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบ 3k แฟคทอเรียล ด้วยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าตัวแปรแทนกระบวนการจริง เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับควบคุมระบบกำกับดูแลระยะไกลต่อไป

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจริงจากโรงงานกรณีศึกษาและค่าที่ได้จากแบบจำลอง

Run No.	ค่าตัวแปรก่อนเข้าท่ออบแห้ง(ค่าจากการวัด)							ค่าตัวแปรหลังจากออกจากท่ออบแห้ง (ค่าจากการวัด)		ค่าตัวแปรหลังจากออกจากท่ออบแห้ง (แบบจำลอง)				
	TR	S _{wet}	G	Tamb	Ts(z=0)	Tg(z=1)	X (z=0)	Y (z=1)	Ts (z=1)	Tg (z=0)	X (z=1)	Ts (z=1)	Tg (z=0)	X (z=1)
	(s)	(kg/s)	(kg/s)	(°C)	(°C)	(°C)	(%db)	(%db)	(°C)	(°C)	(%db)	(°C)	(°C)	(%db)
1	78.10	0.76	1.5	29.9	30.1	522.2	46.1	2.0	98.4	98.5	24.2	96.37	89.90	23.81
2	79.23	0.81	1.6	30.0	30.4	517.2	45.2	2.0	95.2	94.1	24.4	94.91	89.13	23.21
3	81.33	0.72	1.6	30.2	30.3	521.7	46.3	2.0	95.3	92.4	23.5	94.89	88.82	22.81
4	82.31	0.76	1.6	30.2	30.6	521.7	43.9	2.0	92.1	82.7	24.2	94.61	88.70	22.41
5	82.33	0.76	1.7	31.7	31.5	522.6	42.3	1.9	98.7	92.8	21.9	94.33	88.50	22.01
6	84.20	0.74	1.6	31.8	31.6	522.1	48.0	1.9	95.1	88.6	20.7	94.05	88.30	21.49
7	85.67	0.72	1.6	31.5	31.8	519.6	46.8	1.9	92.7	86.3	21.5	93.77	88.10	21.04
8	88.91	0.71	1.6	32.7	31.4	517.4	46.2	1.9	95.4	92.7	21.6	93.49	87.90	20.57

6. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ บริษัท ศรีวิโรจน์ ฟาร์ม (ขอนแก่น) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ กระบวนการ และ อุปกรณ์ในการวิจัย กองบริหาร งานวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น โครงการวิจัยประเภท พหุคูณทุนการวิจัย มุ่งเป้า ประจำปี 2556 และ กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์ม และ เทคโนโลยีการควบคุม อัตโนมัติมหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับเงินทุน สนับสนุนงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Martin N, et al. Price, Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry. n.p.: 2000.
- [2] Ramazan B, et al. A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants-An experimental setup. ISA Transactions. 2011; 50(1), 321-328.

- [3] Figueiredo J, et al. SCADA system with predictive controller applied to irrigation canals. *Control Engineering Practice*. 2013; 21, 870-886.
- [4] Boyer SA. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. 4th ed. International Society of Automation. n.p.: 2009.
- [5] Salihbegovica A, Marinkovia V, Cicoa Z, Karavdicb E, Delica N. Web based multilayered distributed SCADA/HMI system in refinery application. *Computer Standard Interface*. 2009; 31(3), 599-612.
- [6] Kyratsis A, Bilalis N, Antoniadis A. CAD-based simulations and design of experiments for determining thrust force in drilling operations. *Computer-Aided Design*. 2011; 43, 1879-1890.
- [7] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons; 2001.
- [8] Gan CY, Latiff AA. Optimization of the solvent extraction of bioactive compounds from *Parkia speciosa* pod using response surface methodology. *Food Chemistry*. 2011; 124, 1277-1283.
- [9] Myers RH, Montgomery DG. Response Surface Methodology. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2001.
- [10] Arruda EB. Comparison of the performance of the roto-fluidized dryer and conventional rotary dryer. n.p.:2008.
- [11] Lobato FS, et al. Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008; 135, 012063.
- [12] Abbasfard H, et al. Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: A case study of ammonium nitrate plant. *Powder Technology*. 2013; 239, 499-505.