



การสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรในเครื่องอัดอาหารเม็ดแบบสกรูเดี่ยวในเครือเบทาโกร Statistical Modeling for Process Parameters of a Single-Screw Extruder in Betagro Group

พิชชากร ตันตระวาณิช¹, ผศ.ดร.ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์², วิศว์ ศรีพวาทกุล³

¹ หลักสูตร วศ.ม. สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, pischakorn.ta@ku.th

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, fengpma@ku.ac.th

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, fengvisp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการผลิตอาหารสัตว์ได้เติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องนำเครื่องจักรเข้ามาใช้เป็นจำนวนมากขึ้น โดยปัญหาของทางบริษัทเบทาโกรที่เกิดขึ้น คือ พนักงานแต่ละคนจะมีวิธีการปรับตั้งค่าควบคุมเครื่องจักรที่แตกต่างกันออกไปตามประสบการณ์การทำงาน ทำให้บริษัทสูญเสียเวลาและวัตถุดิบไปเป็นจำนวนมาก งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาตัวแปรอิสระที่ประกอบไปด้วย Feed rate (f) (3.8-4.5 ตัน/ชั่วโมง), Steam precondition (sp) (0.29-0.45 ตัน/ชั่วโมง), Water precondition (wp) (0.64-0.87 ตัน/ชั่วโมง), Steam barrel (sb) (0-0.4 ตัน/ชั่วโมง), และ Water barrel (wb) (0-0.29 ตัน/ชั่วโมง) โดยตัวแปรเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ Bulk density (b) (418-468 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร), Die pressure (recip_die) (20-26 บาร์), และ Load (l) (44-54% ภาระเต็มของมอเตอร์) ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงต้องการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง โดยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวน 318 ข้อมูล องค์กรใดก็ตาม ข้อมูลดิบเหล่านี้ จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วย การสุ่มตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล, การตรวจสอบการแจกแจงปกติ, การตัดข้อมูลบางส่วนเพื่อสะดวกต่อการสร้างโมเดล, การเปลี่ยนรูปของข้อมูลให้สามารถใช้งานได้และสุดท้ายมีการตรวจสอบความซ้ำซ้อนของข้อมูลอีกครั้งหนึ่ง ทำให้จำนวนข้อมูลที่สามารถนำมาสร้างเป็นโมเดลมีอยู่ทั้งสิ้น 262 ข้อมูล ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะใช้โปรแกรม Minitab18 เพื่อการสร้างแบบจำลองสมการถดถอยพหุนามดีกรีสองรวมกับการใช้พื้นผิวตอบสนอง จากการใช้พื้นผิวตอบสนองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ Bulk density มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ Feed rate และ Water precondition ในส่วนของ Load ที่เพิ่มขึ้น มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ Feed rate และ Steam precondition และส่วนสุดท้ายของการเพิ่ม Die pressure นั้น มีผลมาจาก Steam precondition และ Water barrel ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับค่า Feed rate, Steam precondition และ Water precondition มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ในเครื่องอัดอาหารเม็ด

คำสำคัญ: เครื่องอัดอาหารเม็ด, แบบจำลองเชิงสถิติ, การทำความสะอาดข้อมูล



ABSTRACT

Although the technology of producing the fish feed of Betagro Co. Ltd. is high, there is an issue that each employee might set the initial condition of variables differently. This makes the company lost time and raw materials. This research framework focuses on the independent variables, which are Feed rate (f) (3.8-4.5 ton/hr), Steam precondition (sp) (0.29-0.45 ton/hr), Water precondition (wp) (0.64-0.87 ton/hr), Steam barrel (sb) (0-0.4 ton/hr), and Water barrel (wb) (0-0.29 ton/hr). These variables are independent. They affect the dependent variables, which are Bulk density (b) ($418-468 \text{ kg/cm}^3$), Die pressure (recip_die) (20-26 bar) and Load (l) (44-54% full motor). This research aims to explain the relationship between the independent variables and dependent variable. This research collects 318 data. Nevertheless, the raw data needs the processing of data cleansing to random sampling 3 times that recheck wrong data. Furthermore, the data were normalized, removed the outlier, transformed, and de-duplicated to make them useful. Therefore, the data remaining for generating the model is 262 data. This research used Minitab18 to reach the goal by using the second-order polynomial in responses surface methodology (RSM). The result of RSM showed that bulk density was increased by increasing feed rate and water precondition. Load was increased by high feed rate, and steam precondition, while Die pressure was risen by high steam precondition and water barrel. Finally, the independent variables include Feed rate, Steam precondition, and Water precondition impact the final product.

Keywords: Extrusion cooking, Statistical modeling, Data cleansing

1. บทนำ

ในสภาพอุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่กำลังเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีการนำเครื่องจักรเข้ามาใช้ร่วมกับมนุษย์มากยิ่งขึ้น ซึ่งผู้ใช้งานเครื่องจักรจำเป็นต้องมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตอย่างละเอียด (Halden, Lindberg, and Masembe, 2014) และรวมถึงเครื่องอัดอาหารเม็ดด้วย ซึ่งเครื่องจักรดังกล่าวสามารถสร้างความหลากหลายให้แก่อาหารได้ทั้งด้านรูปร่าง, ขนาด, เนื้อสัมผัสและอื่นๆ โดยเกิดจากการปรับค่าหลายๆปัจจัยของเครื่องอัดอาหารเม็ด ซึ่งกระบวนการผลิตยังใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำแต่ให้ผลอัตราการผลิตที่สูง (Munguti, Kim, and Ogello, 2014) ซึ่งทำให้เครื่องจักรดังกล่าว มีความสำคัญอย่างมากต่อสายการผลิตอาหารเม็ดในโรงงานอาหารสัตว์

ปัจจุบันได้มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตอาหารสัตว์ในเครื่องอัดอาหารเม็ดมากมาย ไม่ว่าจะเป็นการปรับสูตรอาหารให้เหมาะสม (Levic & Sredanovic, 2010), การเปลี่ยนชนิดชิ้นส่วนของเครื่องจักร (Akdogan, 1999) หรือแม้แต่การปรับตั้งค่าเริ่มต้นในเครื่องอัดอาหารเม็ด (Irungu, & Mutungi, 2018) ซึ่งในบทความวิจัยต่างๆได้มีการศึกษาตัวแปรที่แตกต่างกันออกไปและส่วนใหญ่ทำการศึกษาวัดแปรอิสระที่ไม่เกิน 3 ตัวแปร (Ahmed & Rahman, 2012) โดยจากการศึกษาและสังเกตปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงานอาหารสัตว์ที่สูตรวัตถุดิบถูกกำหนดไว้จากทางบริษัท และอยู่บนพื้นฐานของเครื่องจักรเดิมในปัจจุบัน ทำให้สามารถพิจารณาได้เพียงการปรับตั้งค่าควบคุมเริ่มต้นเท่านั้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดจากที่พนักงานจะมีวิธีการปรับตั้งค่าที่แตกต่างกันไปตามประสบการณ์การทำงาน อันนำไปสู่การสูญเสียโอกาสในการผลิตอาหารในอัตราการผลิตที่สูงสุดและส่งผลให้สิ้นเปลืองวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบการปรับสูตรอาหารให้ได้ตามที่ต้องการ



จากสาเหตุข้างต้นนี้ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการปรับตั้งค่าควบคุมเครื่องจักรอัดอาหารเม็ด โดยงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นเกี่ยวกับการสร้างสมการพหุนามดีกรีสอง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง

1.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อเครื่องจักรอัดอาหารเม็ด

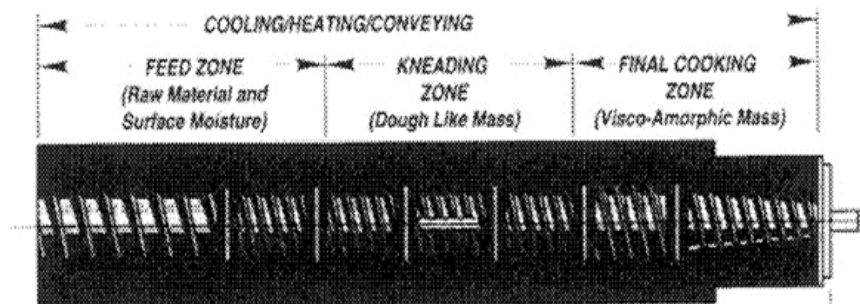
จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ทำให้สามารถจำแนกตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องออกมาได้ 4 ส่วน ได้แก่

- 1) ตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อม 2) ตัวแปรด้านชิ้นส่วนในเครื่องจักร 3) ตัวแปรด้านวัตถุดิบ และ 4) ตัวแปรด้านการตั้งค่า
- 1) ตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความชื้นและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพวัตถุดิบก่อนส่งเข้ากระบวนการผลิต เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป
- 2) ตัวแปรด้านชิ้นส่วนในเครื่องจักร ได้แก่ แม่พิมพ์ (Die) โดยขนาดของแม่พิมพ์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดอาหารและการขยายตัวของอาหาร (Alves, Grossmann, & Silva, 1999) และมีผลต่อการไหลของอาหารในบาร์เรล ทำให้ความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรเปลี่ยนแปลง (Giles, Wagner, and Mount, 2005) ประเภทของสกรูและทิศทางการหมุนของสกรู ส่งผลให้อัตราการสร้างแรงเฉือนและความร้อนเปลี่ยนแปลง ในส่วนประเภทของบาร์เรล, ประเภทของ Precondition และประเภทของเครื่องอัดอาหารเม็ด ก็มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมาเช่นกัน (Ahmed & Rahman, 2012)
- 3) ตัวแปรด้านวัตถุดิบ ซึ่งจะแบ่งเป็นปัจจัยหลัก 6 ตัว ได้แก่ 1) โปรตีน (Protein) ประกอบไปด้วยกรดอะมิโน เมื่อใส่โปรตีนเพิ่มเข้าไปในปริมาณที่สูงขึ้น จะช่วยลดการขยายตัวของอาหาร, 2) แป้ง (Starch) โดย 1 Starch จะประกอบไปด้วย “Amylopectin + Amylose” ซึ่งจะช่วยในเรื่องของการขยายตัวของอาหารและลดความหนาแน่น อีกทั้งเมื่อได้รับน้ำและความร้อน อนุภาคจะเกิดการแตกออกทำให้เกิดกระบวนการ “Gelatinization” (Harper, 1981) ทำให้อนุภาคหลอมรวมกลายเป็นเจล เมื่อแป้งได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอ จะทำให้เกิดการขาดออกของโครงสร้าง โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า “Dextrinization” โดยปกติปัจจัยที่จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง คือ ความชื้น, ความร้อน, ความดัน, และแรงเฉือน, 3) ไขมัน (Fat) โดยการใส่ไขมันจะช่วยในเรื่องการหล่อลื่น, เพิ่มความน่ากินของอาหารและยังลดความดันที่จะเกิดขึ้นตรงบริเวณปลายแม่พิมพ์อีกด้วย อีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการขยายตัวและป้องกันการไหลย้อนกลับของอาหารอีกด้วย (Drag flow) (Forte & Young, 2016) โดยปัญหาที่จะเกิดขึ้น คือ ถ้าไขมันมีปริมาณต่ำๆ จะเกิดปัญหา “Lipid oxidation” (Camire, 2000), 4) ความชื้น (Moisture) ถ้าวัตถุดิบมีความชื้นอยู่ที่ 16-30% จะส่งผลให้ใช้แรงเฉือนระดับปานกลาง หากปริมาณความชื้นมีค่าสูงมาก จะส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานที่ลดลง อีกทั้งยังลดการสึกหรอของเครื่องจักรและลดการสูญเสียวิตามิน, 5) ขนาดอนุภาคอาหาร (Particle size) ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคมีผลต่อการใช้ปริมาณน้ำ เพราะ อาหารจะคลุกเคล้าได้ไม่เต็มที่ โดยวิธีแก้ปัญหาที่ดีที่สุด คือ การเพิ่มระยะเวลาอาหารให้อยู่ใน Precondition ให้นานยิ่งขึ้น โดยปกติจะใช้ขนาดอนุภาค $\leq 1/3$ ของเส้นผ่าศูนย์กลางแม่พิมพ์ (Dennis Forte, 2016), 6) ไฟเบอร์ (Fiber) จะประกอบไปด้วย Hemicellulose + Pectin particles ซึ่งทำให้อาหารเกิดการขยายตัวได้น้อยลง ยิ่งไฟเบอร์สูง จะทำให้เกิดความเสียหายต่อสกรูอย่างมาก (Camire, 1998), ปัจจัยรอง 3 ตัว ได้แก่ วิตามิน แร่ธาตุ และเกลือ โดยเกลือจะช่วยใน



การคงสภาพของความชื้นของวัตถุดิบ เมื่อปริมาณเกลือมีค่าต่ำลง จะส่งผลให้อาหารขยายตัวได้ไม่ดีเท่าที่ควร (Ilo, Schoenlencher, and Berghofe, 2000)

- 4) ตัวแปรด้านการตั้งค่าการผลิต ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 7 ตัว ได้แก่ Feed rate (f), Steam precondition (sp), Water precondition (wp), Steam barrel (sb), Water barrel (wb), Extrude speed, และ Precondition speed ซึ่งในส่วนของ Precondition จะทำหน้าที่คลุกเคล้าอาหารรวมกับน้ำมัน ส่งผลให้อาหารสุกได้ง่ายขึ้น โดยใช้ Steam precondition (P=2.5 bar) กับ Water precondition คังนั้นถ้าไม่มี Precondition วัตถุดิบจะอยู่ในรูปผลึกและส่งผลทำให้อาหารมีคุณสมบัติเป็นเหมือนสารขจัด ทำให้เกิดความเสียหายในส่วนของ Barrel ในส่วนของพื้นที่บาร์เรลนั้น จะประกอบไปด้วยพื้นที่ 3 ส่วน ดังรูปที่ 1 ได้แก่ พื้นที่ใส่วัตถุดิบ (Feed zone), พื้นที่ในการบีบอัด (Kneading zone), และพื้นที่หลอมละลาย (Final cooking zone) ซึ่งในช่วงแรก เป็นจุดที่อาหารมีความหนาแน่นที่ต่ำ เพราะอากาศถูกเก็บไว้ภายในอนุภาค (Granular nature) และในช่วงนี้จะมีการเติม Water barrel เข้าไปเพื่อเพิ่มการจัดองค์ประกอบและเพิ่มความชื้นให้กับอาหาร ทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นแต่ไม่มาก, ในช่วงที่สอง ระยะระหว่างตำแหน่งเดียวกันบนสกรูที่ลดลง รวมถึงการนวดอาหารที่เพิ่มมากขึ้น สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้อนุภาคเริ่มสูญเสียความเป็นเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของอาหารเพิ่มขึ้น ในส่วนของความดันและแรงเฉือนจะค่อยๆสูงขึ้น ในช่วงนี้จำเป็นต้องเพิ่ม Steam barrel (P = 3.5 bar) เข้าไปเพื่อระบองอุณหภูมิจนในบาร์เรลและทำให้ไม่เกิดการย้อนกลับของอาหาร ที่เรียกว่า "Countercurrent flow back to inlet" (Orisaleye, Adefuyeye, Ogundare, & Fadipe, 2018) หลังจากที่ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิจะค่อยๆสูงขึ้นแต่แรงเฉือนจะเริ่มคงที่, ในส่วนที่สาม วัตถุดิบจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เรียกว่า "Amorphousizing" โดยส่วนนี้อุณหภูมิและความดันจะค่อยๆสูงขึ้น แต่แรงเฉือนจะมีค่ามากที่สุด เพราะ รูปร่างของสกรูสุดท้ายเป็นจุดที่มีการอัดอาหารสูงที่สุด สุดท้ายอาหารจะถูกอัดออกมาเป็นเม็ดอาหารตามต้องการ (Forte, 2016)



รูปที่ 1 พื้นที่ในแต่ละส่วนของบาร์เรล (Riaz, 2000)

1.2 ตัวแปรตอบสนองที่เกี่ยวข้องต่อเครื่องจักรอัดอาหารเม็ด

ในส่วนของการวัดค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ผลลัพธ์ดังกล่าวจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเริ่มต้น ดังที่กล่าวมาในข้อ 1.1 ปัจจัยที่ทำการวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีดังนี้ ได้แก่ 1) ความหนาแน่น (Bulk density) ซึ่งทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดอาหารและน้ำหนักเพื่อทดสอบความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, 2) ขนาดเม็ดอาหาร, 3) รูปร่าง, 4) ความชื้น, 5) สี, 6) ความสามารถในการลอยน้ำ (Floatability) โดยจะทำการสุ่มตัวอย่างเม็ดอาหาร เพื่อนำมาลอยในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิปกติ โดยทำการเก็บผลลัพธ์หลังจากทิ้งไว้ 20 นาที



(Umar, Kamarudin, and Remenzani-Fard, 2013), 7) ความทนทาน (Durability index) จะทำการตรวจสอบโดยทำการแช่อาหารเป็นเวลา 20 นาที ที่การสั่น 260 รอบ/นาที แล้วทำการวัดมวลก่อนหลัง เพื่อหาค่าดังกล่าว (Umar et al, 2013), 8) ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption index), 9) ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility) (Rosentrater, Muthukumarappan, and Kannadhason, 2009), 10) ภาระเต็มของมอเตอร์ (Load), และ 11) ความดันที่แม่พิมพ์ (Die pressure) ซึ่งสามารถใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจจับค่า โดยที่ตัวแปรโหลด (L) บ่งบอกถึงสถานะการทำงานของเครื่องจักร และความดันแม่พิมพ์ (Die pressure) บ่งบอกถึงการขยายตัวของวัตถุดิบ ซึ่งตัวแปรการวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามการปรับเปลี่ยนของปัจจัยในข้อ 1.1 เช่นกัน

1.3 รูปแบบวิธีการจัดเก็บข้อมูล

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ทำให้ทราบได้ว่า รูปแบบการจัดเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็นหลักๆ 2 แบบ ได้แก่ 1) Design of experiment (DOE) ซึ่งการออกแบบการทดลองจะช่วยให้สามารถกำหนดการตั้งค่าของปัจจัยหรือสัดส่วนขององค์ประกอบได้อย่างเหมาะสม โดยแบ่งวิธีออกเป็น 5 ตัวหลักๆ ได้แก่

- 1) 2^k Full factorial design เป็นการศึกษาปัจจัยที่สอองระดับเท่านั้นและสามารถสรุปผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาได้ โดยกำหนดปัจจัยหลักไว้ที่ระดับสูง (+1), ระดับต่ำ(-1) เท่านั้น
- 2) 2^{k-q} Fractional factorial design เป็นการศึกษาปัจจัยที่สอองระดับเช่นกัน โดยการออกแบบการทดลองแบบนี้จะใช้จำนวนชุดข้อมูลที่น้อยกว่า Full factorial design ซึ่งเมื่อปัจจัยมีมากกว่า 3 ปัจจัย การทดลองแบบ 2^k จะไม่มีความเหมาะสม แต่สามารถแก้ไขได้ โดยการใ้การทดลองที่ตำแหน่งค่ากลาง (Center point) (ณัชชา พลศิลป์, 2010) ซึ่งถ้าปัจจัยมีแค่ 2 ตัว การใ้ที่ 2^{k-q} จะสามารถลดปริมาณข้อมูลลงไปได้ครึ่งหนึ่ง แต่การที่ลดปริมาณข้อมูลลงไปได้ครึ่งหนึ่ง ก็จะมีผลเสียในเรื่องของการเกิดโครงสร้างซ้ำซ้อน (Aliases structure) ทำให้ไม่สามารถอธิบายผลกระทบระหว่างปัจจัยหลักและอันตรกิริยาได้ ทำให้ทั้ง 2^k และ 2^{k-q} จะสามารถสร้างสมการได้เพียงสมการเชิงเส้นตรงเท่านั้น
- 3) Central composition design (CCD) เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการสร้างสมการเส้นโค้ง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ 2^k โดยมีการเพิ่มการทดลองในแนวแกน Axial Points เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สมการกำลังสองได้ (Keawpeng, Charunuch, Roudaut, & Meenune, 2014) และ (Danbaba, Nkama, Badau, & Idakwo, 2018)
- 4) Box-Behnken design เป็นการออกแบบการทดลองที่มี 3 ระดับ คือ สูง, กลาง, และ ต่ำ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ 2^k โดยทำการออกแบบที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปร ทำให้ข้อมูลที่อยู่ตรงมุมของลูกบาศก์ เป็นการทดลองที่เป็นไปไม่ได้ทางด้านกายภาพของกระบวนการผลิต (Alam & Kumer, 2014), และ (Irungu & Mutungi, 2018)
- 5) การทดลองแบบแต่ละปัจจัยมีจำนวนระดับไม่เท่ากัน (General mixed level design) เป็นการออกแบบโดยที่ระดับปัจจัยของแต่ละตัวแปรมีจำนวนไม่เท่ากัน ทำให้สามารถสร้างการทดลองได้งายมากยิ่งขึ้น

การจัดเก็บข้อมูลอีกรูปแบบหนึ่ง คือ 2) การเก็บข้อมูลจริง (Real data) จะใช้เมื่อไม่สามารถทำการสร้างการทดลองได้ (DOE) โดยจะเก็บค่าแบบข้อมูลจริงและใ้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น



อย่างง่าย จะศึกษาความสัมพันธ์ที่ 1 ตัวแปรต้น กับ 1 ตัวแปรตอบสนอง (Linear regression, Quadratic regression, and Cubic), 2) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple regression) จะศึกษาความสัมพันธ์ที่ตั้งแต่ 2 ตัวแปรต้น ขึ้นไปกับ 1 ตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะคิดในเชิงอันตรกิริยาเข้าไปร่วมด้วย (Polynomial degree 1, 2, 3, ... + interaction) ในส่วนของวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เป็นวิธีการที่มีประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น จากหลายๆตัวแปรให้ออกมาเป็นกราฟที่เข้าใจได้ง่าย เพื่อวัตถุประสงค์ในการหาจุดที่เหมาะสมต่อการทดลองนั้นๆ ต่อไป (Montgomery, 2005) โดยจะทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) และจะมีค่าความแปรปรวนต่ำที่สุดซึ่งจะใช้วิธีการวิเคราะห์ ANOVA (Alam & Kumer, 2014)

$$Y = f(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

โดย Y คือ ตัวแปรตอบสนอง ที่สัมพันธ์กับ k (จำนวนตัวแปรอิสระ) ในขณะที่ β_j , $j = 0, 1, 2, \dots, k$ ซึ่ง β_j เรียกว่า สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ ที่วัดการเปลี่ยนแปลงของ Y เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของ X_i โดยที่ X คือ ตัวแปรอิสระที่นำมาหาความสัมพันธ์ร่วมกับตัวแปรตอบสนอง

1.4 รูปแบบขั้นตอนการจัดการข้อมูล

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการข้อมูล ทำให้ทราบขั้นตอนและวิธีการต่างๆ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักๆ (ฐณัฐ วงศ์สายเชื้อ, 2561) ได้แก่

- 1) Verify & Enrich เป็นวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งจะมีการตรวจสอบโดยใช้ Random sample of case เพื่อสุ่มตรวจสอบข้อมูลว่ามีกรรกรอกข้อมูลผิดหรือไม่, การตรวจสอบค่าที่ผิดปกติ โดยดูจากความถี่ของข้อมูลแต่ละตัวแปร เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล รวมทั้งการตรวจสอบข้อมูลว่ามีการซ้ำซ้อนหรือไม่
- 2) Normalize data คือ การตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล โดยการตรวจสอบค่า Kurtosis และ Skewness ซึ่งมีเกณฑ์ในการตรวจสอบคือ ($|Z_{Kurtosis}| < 2$, $|Z_{skewness}| < 2$) หรือการตรวจสอบโดยใช้ Kolmogorov-Smirnov (ใช้กับตัวอย่างจำนวนมากๆ) และ Shapiro & Wilk (ใช้กับตัวอย่างน้อยๆ เป็นที่นิยม) ซึ่งถ้าค่า P-value < 0.05 ถือว่าข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติ และถ้าข้อมูลไม่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนข้อมูล
- 3) Rebuild data คือ การจัดการข้อมูล เพื่อให้ชุดข้อมูลมีค่าเข้าใกล้การกระจายตัวแบบปกติ โดยการตัดข้อมูล (Outlier) ซึ่งวิธีการมีหลายวิธี เช่น 1) Extreme value คือ การตัดชุดข้อมูลที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดมากๆ โดยใช้ box plot และ Scatter plot, 2) Winsoring or Trimming data คือ การตัดแต่งชุดข้อมูล โดยการแทนค่าให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับชุดข้อมูลที่อยู่ข้างๆ และวิธีสุดท้าย 3) Mahalanobis distant คือ การตัดชุดข้อมูลที่มีค่าสุดโต่ง โดยใช้การดูเรื่องระยะห่างของข้อมูล
- 4) Transform data คือ การปรับข้อมูลให้เข้าใกล้การแจกแจงแบบปกติมากขึ้น โดยการเปลี่ยนรูปของข้อมูลดิบ ให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่ง เช่น ถ้าชุดข้อมูลมีความเบ้ขวา ต้องใช้การแปลงข้อมูลแบบ Root, Log และ Reciprocal root แต่ถ้าชุดข้อมูลมีความเบ้ซ้าย ต้องใช้การแปลงข้อมูลแบบ Square และ Cube



แทน ซึ่งหลังจากที่มีการแปลงชุดข้อมูลเป็นที่เรียบร้อย ต้องทำการตรวจสอบในข้อ 2 อีกครั้งหนึ่ง เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล

- 5) De-duplicate data คือ การตรวจสอบชุดข้อมูลอีกครั้งหนึ่ง เพื่อตรวจสอบการซ้ำซ้อนของข้อมูล
- 6) Random sample of case คือ การสุ่มตัวอย่างจำนวน 40 ข้อมูล เพื่อตรวจสอบการกรอกข้อมูล ว่ามีการกรอกข้อมูลผิดพลาดอีกหรือไม่ ซึ่งถ้าเกิดความผิดพลาด > 2 ข้อมูล ต้องทำการแก้ไขข้อมูลชุดนั้นและทำขั้นตอนตั้งแต่ข้อ 1 จนถึงข้อ 6 อีกครั้งหนึ่ง

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยและตัวแปรที่มีผลต่อการตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรอัดอาหารเม็ดในเครื่องเปทาโกร
2. เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในเครื่องอัดอาหารเม็ดในอาหารชนิดเดียวเท่านั้น

3. การดำเนินการวิจัย

จากการค้นคว้าข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวกับเครื่องจักรอัดอาหารเม็ด ทำให้ทางคณะผู้จัดทำจำเป็นต้องเลือกปัจจัยที่มีผล โดยคัดเลือกจากข้อ 1.1 ทำให้ตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อม, ตัวแปรด้านชิ้นส่วนในเครื่องจักร และตัวแปรด้านวัตถุดิบในงานวิจัยฉบับนี้ จะใช้เป็นค่าคงที่ ในส่วนของตัวแปรด้านการตั้งค่าการผลิตนั้น หลังจากปรึกษาทางผู้เชี่ยวชาญ ทำให้ทราบว่า จำเป็นต้องมี f, sp, และ wp อยู่ในรูปสมการถดถอยเสมอ เพราะ เป็นส่วนหลักในการปรับตั้งค่าของเครื่องจักร ซึ่งขอบเขตของการปรับตั้งค่าของเครื่องจักรมีดังนี้ Feed rate (f) (3.8-4.5 ตัน/ชั่วโมง), Steam precondition (sp) (0.29-0.45 ตัน/ชั่วโมง), Water precondition (wp) (0.64-0.87 ตัน/ชั่วโมง), Steam barrel (sb) (0-0.4 ตัน/ชั่วโมง), และ Water barrel (wb) (0-0.29 ตัน/ชั่วโมง) ซึ่งในส่วนของ Extrude speed และ Precondition speed จะไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าแต่อย่างใด ทำให้ทั้งสองค่าดังกล่าวเป็นค่าคงที่ ส่วนในเรื่องของคุณภาพของอาหารในโรงงานนั้น จะคัดเลือกจากข้อ 1.2 โดยในโรงงานจะให้ความสำคัญในเรื่องของ Bulk density (b) (418-468 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นสำคัญ ซึ่งถ้ามองในเชิงของประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรนั้น จะสนใจในเรื่องของ Die pressure (die) (20-26 บาร์) และ load (l) (44-54% ภาระเต็มของมอเตอร์) ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มุ่งสนใจในตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัวแปร (f, sp, wp, sb, และ wb) และตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ตัวแปร (b, die, และ l)

ในส่วนของรูปแบบวิธีการจัดเก็บข้อมูลในข้อ 1.3 นั้น มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้การออกแบบการทดลองได้ (DOE) เพราะ ไม่สามารถหยุดเครื่องจักรในโรงงาน เพื่อให้มีการปรับค่าตามที่เราต้องการได้ ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องเก็บข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในการผลิตอาหารชนิดนั้นๆ แทน

ในส่วนของรูปแบบขั้นตอนการจัดการข้อมูลนั้น ได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งสิ้น 318 ข้อมูล ระหว่างวันที่ 1 ก.พ. – 30 เม.ย. 2564 ในขั้นตอนที่ 1) Verify & enrich นั้นจะทำการ Random sample of case จำนวน 3 ครั้ง เพื่อทดสอบว่ามีการกรอกข้อมูลผิดพลาดหรือไม่และทำการตรวจสอบข้อมูลว่ามีการซ้ำซ้อนหรือไม่ ทำให้ข้อมูลลดลงเหลือ 312 ข้อมูล, ในขั้นตอนที่ 2) Normalize data โดยทำการตรวจสอบค่า $Z_{Kurtosis}$, $Z_{skewness}$ ซึ่งตรงจุดนี้จะใช้นิยาม $|Z_{Kurtosis}| < 10$, $|Z_{skewness}| < 3$ (Kline, 2016) ซึ่งถือว่าข้อมูลไม่เบ้/ไม่โค้ง และสามารถใช้ชุดข้อมูลนี้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ โดยถ้า $n \geq 200$ ข้อมูล การแจกแจงปกติถือว่าไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญ (Hair, Black, Babin, & Anderson, 2019) ทำให้ตรงจุดนี้การตรวจสอบในส่วนของการแจกแจงปกติถือว่าไม่จำเป็น, ในส่วนของขั้นตอนที่ 3) Rebuild data

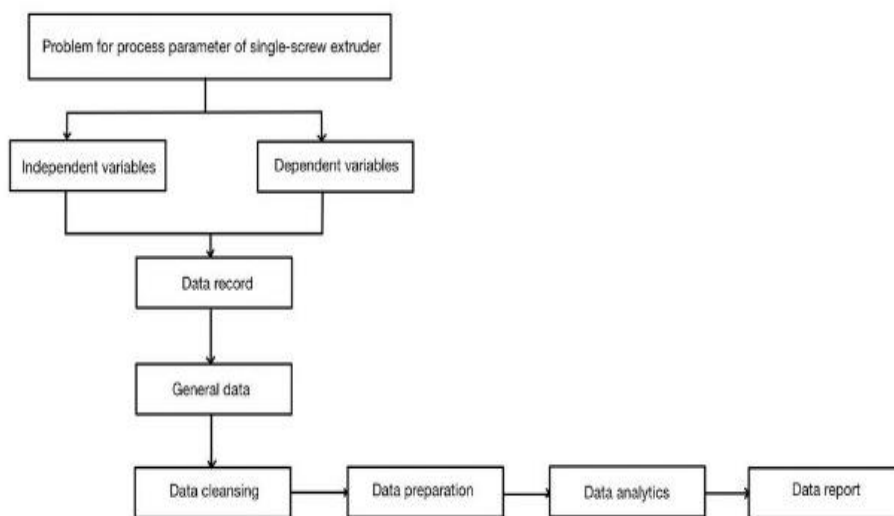


นั้น จะเลือกใช้เป็นการตัด Extreme value เพื่อลดจำนวนข้อมูลและพยายามเข้าใกล้การแจกแจงปกติเท่าที่จะเป็นไปได้, ใน ส่วนของขั้นตอนที่ 4) Transform data ต้องทำการตรวจสอบชุดข้อมูลแต่ละตัวแปรว่ามีการแจกแจงแบบปกติ หรือ เบ้ซ้าย หรือ เบ้ขวา เพื่อจัดการข้อมูลให้เหมาะสมต่อการใช้ในการสร้างโมเดล ซึ่ง sp มีข้อมูลแบบเบ้ซ้ายและ f มีข้อมูลแบบเบ้ ขวา ทำให้มีความจำเป็นต้องแปลงชุดข้อมูลทั้งสองตัวดังนี้ $sp \rightarrow [sp^2 (sp^2) \text{ และ } sp^3 (sp^3)]$ รวมทั้งสิ้น 3 ตัว และ $f \rightarrow [\sqrt{f} (\sqrt{f}), \log_f (\log f), \text{ และ } \text{recip}_f (-1/\sqrt{f})]$ รวมทั้งสิ้น 4 ตัว เพื่อจะได้ทดสอบการสร้างสมการร่วมด้วย ทำให้แต่ละ ตัวแปรตอบสนอง จะมีสมการทั้งสิ้น 12 สมการ และ Die มีข้อมูลแบบเบ้ขวา $die \rightarrow [\sqrt{\text{die}} (\sqrt{\text{die}}), \log_{\text{die}} (\log \text{die}), \text{ และ } \text{recip}_{\text{die}} (-1/\sqrt{\text{die}})]$ ในส่วนของขั้นตอนที่ 5) De-duplicate data และขั้นตอนสุดท้าย 6) Random sample of case นั้น จะทำตามขั้นตอนตามปกติ เมื่อเสร็จสิ้นทุกขั้นตอน ทำให้ข้อมูลลดลงเหลือ 201 ข้อมูล

หลังจากทำการจัดการข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในการดำเนินการการสร้างสมการความสัมพันธ์ โดยใช้ โปรแกรม Minitab18 ซึ่งในส่วนของรูปสมการที่จะเลือกใช้ในข้อ 1.3 แบบ 2 นั้น จากปัจจัยที่เราสนใจมีตัวแปรอิสระ ทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ส่งผลให้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายนั้น ไม่มีความเหมาะสมเท่าที่ควร ทำให้มีความ จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple regression) แทน ซึ่งจะใช้ในรูปสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Degree 1 + non interaction) เพื่อตรวจสอบความสำคัญของแต่ละตัวแปรอิสระ ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ตัว โดยทำการดูค่า Standard coefficient (Beta) และสมการ โพลิโนเมียล (Polynomial degree 2 + interaction) โดยเลือกใช้ ที่กำลังสอง เพราะ ต้องการที่จะอธิบายความสัมพันธ์ของสมการ โดยให้ตัวแปรแต่ละตัว มีค่า P-value ($P < 0.05$) ให้ ได้มากที่สุด แต่ถ้ามีการเพิ่มกำลังดีกรีให้สูงมากยิ่งขึ้น แม้ว่าค่า R-sq จะมีค่าสูงขึ้น แต่กลับส่งผลให้ตัวแปรมีค่า P-value ($P > 0.05$) หลายตัว จึงมีความจำเป็นที่ต้องเลือกการใช้การสร้างสมการที่กำลังสองแทน

หลังจากได้สมการ โพลิโนเมียลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว มีความจำเป็นต้องทดสอบชุดสมการกับชุดข้อมูลทดสอบ จำนวน 60 ข้อมูล (Validation) โดยใช้ Root Mean Square Error (RMSE) ในสมการที่ (2) และ (3)

โดยขั้นตอนวิธีการต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะแสดงเป็นแผนผังการสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร อิสระและตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการดำเนินการสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ของเครื่องอัดอาหารเม็ด



$$\text{Error} = \text{actual} - \text{predicted} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Error})^2} \quad (3)$$

โดยค่า *actual* คือค่าที่เกิดขึ้นจริง และค่า *predicted* คือค่าที่ได้จากการทดสอบการใส่ค่าตัวแปรอิสระในสมการการทำนาย ซึ่ง n คือ จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

4. ผลการวิจัย

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งสิ้น 318 ข้อมูล ข้อมูลที่ถูกจัดการข้อมูล จะเริ่มมีปัญหา น้อยลง หลังจากการตัดข้อมูลลงไปถึง 263 ข้อมูล ซึ่งจะเห็นได้ว่า ข้อมูลตั้งแต่ 263 ถึง 201 นั้น มีความเป็นไปได้ที่สุดที่จะนำมาสร้างเป็นแบบจำลองต่อไป ซึ่งจะต้องนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการปรับเปลี่ยนข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลเข้าสู่การ แจกแจงปกติให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ตารางที่ 1 จำนวนข้อมูลหลังจากผ่านการทำความสะอาดข้อมูล (318 ข้อมูล → 201 ข้อมูล)

Data	Parameter	f	sp	wp	sb	wb	b	die	l
318	Z skewness	6.906	5.810	1.335	2.172	2.161	3.041	16.436	0.600
	Z kurtosis	1.277	0.694	4.460	2.546	4.828	2.124	22.607	0.035
312	Z skewness	6.842	5.559	1.343	2.289	1.905	3.154	16.189	0.607
	Z kurtosis	1.287	0.886	4.395	2.536	4.692	2.101	22.000	0.041
288	Z skewness	5.167	6.494	0.855	2.136	4.550	1.694	10.955	1.870
	Z kurtosis	0.310	0.819	4.537	2.444	6.397	1.398	11.471	2.399
263	Z skewness	3.561	6.338	1.080	1.986	2.605	0.520	9.181	1.872
	Z kurtosis	3.466	0.854	4.328	2.707	7.785	0.680	5.033	2.820
243	Z skewness	3.706	7.027	1.050	2.021	0.105	0.418	9.515	2.054
	Z kurtosis	3.240	0.457	4.187	2.720	7.255	0.893	7.234	2.691
226	Z skewness	4.187	6.989	1.163	1.965	3.690	0.548	8.606	2.202
	Z kurtosis	2.539	0.983	3.776	2.642	3.855	0.895	7.155	2.695
212	Z skewness	4.327	7.230	1.091	1.681	2.478	0.613	7.348	2.476
	Z kurtosis	2.393	1.929	3.594	2.736	4.085	0.716	5.730	2.652
201	Z skewness	4.373	7.576	0.659	1.324	0.806	0.438	7.094	2.642
	Z kurtosis	2.284	3.334	3.557	2.811	2.687	0.506	6.408	2.520

หมายเหตุ: ตารางสีเทา คือ ข้อมูลมีค่าเกินเกณฑ์ ($|Z_{Kurtosis}| < 10$, $|Z_{skewness}| < 3$)

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลไปเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ข้อมูลในชุดที่ 262 และ 242 ข้อมูล จะมีปัญหาในเรื่องของการแจกแจงปกติที่น้อยที่สุด ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดของปริมาณข้อมูลที่สามารถเก็บได้ ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ตัวแปรที่มีการแปลงรูปเข้าร่วมทดสอบการสร้างสมการด้วย ดังนั้นจึงนำชุดข้อมูลที่ 262 และ 242 ไปทดสอบการสร้างโมเดลต่อไป

ตารางที่ 2 ข้อมูลหลังจาก Transform data (262 ข้อมูล → 201 ข้อมูล)

Data	Parameter	f	sp	wp	sb	wb	b	die	l	sqrt_f	log_f	recip_f	sp2	sp3	sqrt_die	log_die	recip_die
262	Z skewness	2.869	6.288	1.092	2.093	2.566	0.504	9.292	1.824	2.783	2.696	2.606	5.467	4.624	8.807	8.326	7.848
	Z kurtosis	4.995	0.895	4.338	2.756	7.722	0.713	5.385	2.825	5.003	5.010	5.014	1.506	1.904	4.655	3.976	3.348
242	Z skewness	3.019	6.974	1.063	2.120	0.071	0.405	9.616	2.004	2.943	2.865	2.786	6.121	5.237	9.070	8.530	2.786
	Z kurtosis	4.787	0.405	4.198	2.766	7.200	0.927	7.699	2.700	4.795	4.801	4.805	0.306	0.800	6.779	5.928	4.805
225	Z skewness	3.448	6.933	1.180	2.059	3.717	0.536	8.584	2.151	3.371	3.292	3.211	6.066	5.163	8.037	7.500	6.972
	Z kurtosis	4.277	0.925	3.787	2.684	3.833	0.990	7.494	2.707	4.291	4.304	4.314	0.201	0.291	6.563	5.715	4.946
212	Z skewness	3.610	7.172	1.109	1.767	2.517	0.604	7.087	2.424	3.544	3.476	3.406	6.277	5.340	6.605	6.128	5.657
	Z kurtosis	4.114	1.862	3.605	2.775	4.068	0.754	5.580	2.668	4.125	4.134	4.142	1.086	0.558	4.908	4.291	3.728
201	Z skewness	3.646	7.515	0.678	1.417	0.859	0.436	6.764	2.589	3.593	3.538	3.482	6.347	5.528	6.247	5.740	5.241
	Z kurtosis	4.057	3.254	3.570	2.859	2.690	0.546	6.217	2.539	4.073	4.088	4.103	2.383	1.798	5.451	4.752	4.119

หมายเหตุ: ตารางสีเทา คือ ข้อมูลมีค่าเกินเกณฑ์ ($|Z_{Kurtosis}| < 10$, $|Z_{skewness}| < 3$)



จากตารางที่ 3 เมื่อทดสอบการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (Degree 1) ที่ 262 ข้อมูล เพื่อตรวจสอบความสำคัญของแต่ละตัวแปรอิสระ ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ตัว โดยทำการดูค่า Standard coefficient (Beta) จะเห็นได้ว่า การสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่ตัวแปรตอบสนอง Bulk density (b) นั้น ตัวแปรอิสระ f, sp, และ wp มีความสำคัญต่อ Bulk density (b) ในส่วนของตัวแปรตอบสนอง Load (l) นั้น ตัวแปรอิสระ f, wp, และ sb มีความสำคัญต่อ Load (l) เช่นกัน ในส่วนสุดท้ายของตัวแปรตอบสนอง Die pressure (Recip_die) นั้น ตัวแปรอิสระ f, wp, และ wb มีความสำคัญต่อ Die pressure (Recip_die) ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัวนั้น มีความสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่แตกต่างกันออกไป แต่ล้วนแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตอบสนองทั้งสิ้น ซึ่งจะเห็นได้จากค่า R-sq ที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มตัวแปร ทำให้ทางคณะผู้จัดทำเลือกทั้ง 5 ตัวแปรอิสระ ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ ซึ่งจะให้ความสำคัญ โดยต้องมีตัวแปร f, sp, และ wp เป็นหลัก ซึ่งตารางที่ 4 ข้อมูลในตารางสี่เหลี่ยมผ่านเกณฑ์ในการสร้างสมการ จึงมีความเหมาะสมที่จะเป็นสมการตัวแทนต่อไป ในส่วนของตารางที่ 5 สมการ 1 นั้น แม้ว่าในตารางสี่เหลี่ยมผ่านเกณฑ์ในการสร้างสมการ แต่รูปสมการขาดตัวแปร sp ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้รูปสมการที่มีตัวแปรอิสระทั้ง 5 เป็นสมการหลักไว้ก่อน โดยทำการเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนรูปของตัวแปรอิสระ (Transform data) ในส่วนของตารางที่ 6 สมการ recip_die นั้น ไม่มีตารางสี่เหลี่ยมที่ผ่านเกณฑ์ในการสร้างสมการ ทำให้มีความจำเป็นที่จะใช้รูปสมการที่มีตัวแปรอิสระทั้ง 5 เป็นสมการหลักไว้ก่อนเช่นเดียวกับตารางที่ 5 ตารางที่ 3 ตารางตรวจสอบความสำคัญของสมการดีกรีหนึ่งของตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัว และตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ตัว

Parameter	Bulk density		Load		Recip_die	
	Coef	Beta	Coef	Beta	Coef	Beta
f	2.6000	0.0562	1.5730	0.1607	0.0017	0.0602
sp	-3.8870	-0.0134	0.4910	0.0080	-0.0011	-0.0061
wp	1.8700	0.0134	-1.0390	-0.0353	0.0012	0.0140
wb	-1.7740	-0.0064	0.3240	0.0055	0.0025	0.0148
sb	0.6050	0.0055	-0.5940	-0.0255	-0.0001	-0.0013
R-sq	17.75%		27.54%		46.18%	
R-sq(adj)	16.14%		26.13%		45.13%	

ตารางที่ 4 ตารางแสดงสมการความสัมพันธ์ ในตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัว กับตัวแปรตอบสนอง bulk density

Best Subsets Regression: b versus f, sp, wp, wb, sb									
Response is b									
Vars	f	sp	wp	wb	sb	Degree 1		Degree 2	
						R-sq	R-sq(adj)	R-sq	R-sq(adj)
1		X				5.80%	5.40%		
1	X					4.10%	3.80%		
2	X	X				15.00%	14.30%		
2		X	X			13.50%	12.90%		
3	X	X		X		16.70%	15.80%	28.62%	26.94%
3	X	X	X			15.40%	14.40%	29.77%	28.11%
4	X	X	X	X		17.50%	16.20%	40.18%	38.04%
4	X	X		X	X	16.90%	15.60%	30.52%	28.03%
5	X	X	X	X	X	17.70%	16.10%	42.30%	40.00%

หมายเหตุ: ตารางสี่เหลี่ยม คือ สมการที่ดีกรีหนึ่งมี R-sq(adj) มากที่สุด, ตารางสี่เหลี่ยม คือ สมการที่ดีกรีสองที่ผ่านเกณฑ์การสร้างสมการ, Degree 1 = Multiple regression degree 1 + non interaction, Degree 2 = Polynomial degree 2 + interaction



ตารางที่ 5 ตารางแสดงสมการความสัมพันธ์ ในตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัว กับตัวแปรตอบสนอง load

Best Subsets Regression: l versus f, sp, wp, wb, sb									
Response is l									
Vars	f	sp	wp	wb	sb	Degree 1		Degree 2	
						R-sq	R-sq(adj)	R-sq	R-sq(adj)
1	X					16.30%	16.00%		
1				X		9.00%	8.60%		
2	X				X	19.70%	19.10%		
2	X		X			18.80%	18.20%		
3	X		X		X	22.10%	21.20%		
3	X		X	X		21.20%	20.30%		
4	X	X	X		X	26.00%	24.90%	35.94%	33.65%
4	X		X	X	X	24.50%	23.30%	53.38%	51.33%
5	X	X	X	X	X	27.50%	26.10%	58.72%	56.38%

หมายเหตุ: ตารางสีฟ้า คือ สมการที่ดีกรีหนึ่งมี R-sq(adj) มากที่สุด, ตารางสีเขียว คือ สมการที่ดีกรีสอง ที่ผ่านเกณฑ์การสร้างสมการ, Degree 1 = Multiple regression degree 1 + non interaction, Degree 2 = Polynomial degree 2 + interaction

ตารางที่ 6 ตารางแสดงสมการความสัมพันธ์ ในตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัว กับตัวแปรตอบสนอง recip_die

Best Subsets Regression: recip_die versus f, sp, wp, wb, sb									
Response is recip_die									
Vars	f	sp	wp	wb	sb	Degree 1		Degree 2	
						R-sq	R-sq(adj)	R-sq	R-sq(adj)
1				X		33.40%	33.20%		
1	X					32.70%	32.40%		
2	X			X		43.60%	43.20%	44.38%	43.74%
2			X	X		40.70%	40.20%		
3	X	X		X		45.20%	44.50%	47.98%	46.75%
3	X			X	X	44.20%	43.50%	50.68%	49.52%
4	X	X	X	X		46.20%	45.30%	56.05%	54.30%
4	X	X		X	X	45.20%	44.40%	52.31%	50.80%
5	X	X	X	X	X	46.20%	45.10%	65.50%	63.69%

หมายเหตุ: ตารางสีฟ้า คือ สมการที่ดีกรีหนึ่งมี R-sq(adj) มากที่สุด, Degree 1 = Multiple regression degree 1 + non interaction, Degree 2 = Polynomial degree 2 + interaction

จากตารางที่ 7 เมื่อนำชุดข้อมูลที่ 262 และ 242 ข้อมูล มาสร้างโมเดลสมการพหุนามดีกรีสอง จะเห็นได้ว่าสมการของชุด 262 กับชุด 242 ที่เงื่อนไข (f และ sp) มี R-sq ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก รวมถึงการแปลงชุดข้อมูลก็ไม่ได้ให้ค่า R-sq ที่สูงขึ้นจากแบบปกติมากเท่าที่ควร หลังจากนั้นทางคณะผู้จัดทำทำการทดสอบสมการความสัมพันธ์ด้วย RMSE ที่ (Train data และ Test data) ทำให้ทราบได้ว่า ที่การแปลงชุดข้อมูลและจำนวนข้อมูลที่ลดลงจาก 262 ไปสู่ 242 นั้นแทบไม่ได้ทำให้ RMSE แตกต่างกันมากเท่าที่ควร ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้ชุดข้อมูลที่ 262 ข้อมูล และเลือกใช้สมการที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูล เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อไป



ตารางที่ 7 ตารางสมการพหุนามดีกรีสอง จากชุดข้อมูล (262 ข้อมูล และ 242 ข้อมูล) เปรียบเทียบกับสมการที่ได้ R-sq (adj) สูงสุดในแต่ละชุดตัวแปรและเปรียบเทียบที่ Train data และ Test data

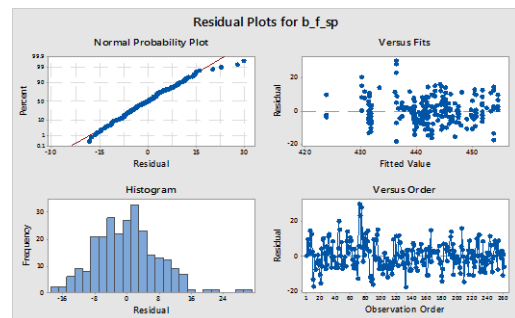
Data	Independent variable	Dependent variable	Condition	R-sq	R-sq(adj)	Train data RMSE	Test data RMSE
262	f(),sp(),wp,wb,sb	Bulk	f,sp	42.30%	40%	7.732	9.271
			f,sp3	42.80%	40.52%	7.698	9.213
		Load	f sp	58.72%	56.38%	1.388	1.893
			log_f sp	60.25%	57.48%	1.414	2.102
		Recip_die	f sp	65.50%	63.69%	0.004	0.006
			recip_f sp	65.53%	63.73%	0.004	0.006
242	f(),sp(),wp,wb,sb	Bulk	f,sp	44.22%	41.04%	7.650	9.407
			f sp2	44.44%	41.28%	7.596	9.259
		Load	f sp	60.99%	58.94%	1.374	1.802
			f sp	64.06%	62.01%	0.003	0.007
		Recip_die	f sp	64.11%	62.07%	0.003	0.007
			recip_f sp	64.11%	62.07%	0.003	0.007

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม f ($P < 0.05$) ส่งผลให้อาหารอยู่ในเครื่องจักรไม่นานพอ ซึ่งทำให้อาหารได้รับความร้อนไม่เพียงพอ ทำให้ค่า b สูงขึ้น, การเพิ่ม wb ($P < 0.05$) จะเห็นได้ว่าจุดหลัก คือการควบคุมอุณหภูมิในบาร์เรลเป็นหลัก ซึ่งจากที่เห็นการเพิ่ม wb ปริมาณน้ำจะมีพอสสมควรกับการทำหน้าที่ที่ก่อนออกแม่พิมพ์ เมื่อถึงปลายแม่พิมพ์ ความดันจะสูงขึ้น อุณหภูมิก็จะสูงขึ้นด้วย ส่งผลทำให้ b ต่ำลง, การเพิ่ม sp ($P < 0.05$) คือการใส่ความร้อนเข้าสู่อาหารโดยตรง ส่งผลทำให้ b ต่ำลงเช่นกัน เพราะ เกิดจากการลด Melt viscosity ทำให้เกิด Bubble growth ส่งผลทำให้เกิดการขยายตัวของอาหารและเกิด Starch gelatinization, การเพิ่ม wp ($P < 0.05$) จะส่งผลให้อาหารได้รับความชื้นมากยิ่งขึ้น ทำให้ b สูงขึ้น, การเพิ่ม sb ($P < 0.05$) จะส่งผลคล้ายกับ sp แต่จะมีผลกระทบน้อยกว่า sp ซึ่งจะส่งผลให้ b ต่ำลงเช่นเดียวกัน ซึ่งสมการที่ (4) จะได้ $R\text{-sq} = 42.30\%$ และ $S = 7.89915$

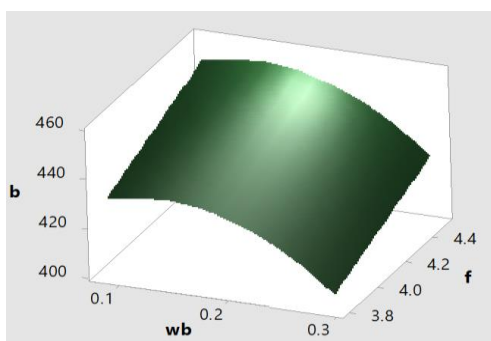
(a)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	10	11479.7	1147.97	18.4	0
f	1	1855.3	1855.33	29.73	0
sp	1	754.5	754.55	12.09	0.001
wp	1	845.1	845.11	13.54	0
wb	1	625.2	625.23	10.02	0.002
sb	1	574.5	574.52	9.21	0.003
wb*wb	1	395.6	395.63	6.34	0.012
f*wp	1	3547.7	3547.74	56.86	0
sp*wp	1	3172.7	3172.69	50.85	0
sp*wb	1	1077.5	1077.48	17.27	0
wp*wb	1	2635.5	2635.53	42.24	0
Error	251	15661.5	62.4		
Total	261	27141.2			
R-sq		42.30%			
R-sq (adj)		40.00%			
S		7.89915			

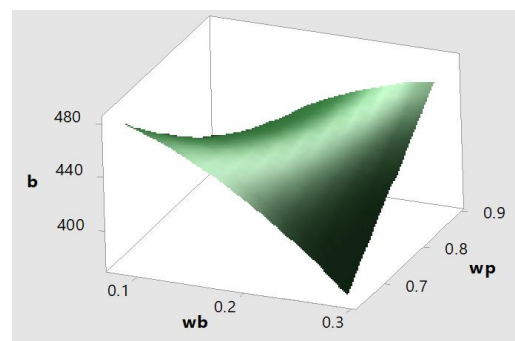
(b)



(c)



(d)



รูปที่ 3 ตาราง Analysis of variance of bulk density (a), Residual plot (b), กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม Bulk density กับตัวแปรอิสระ (c), (d)



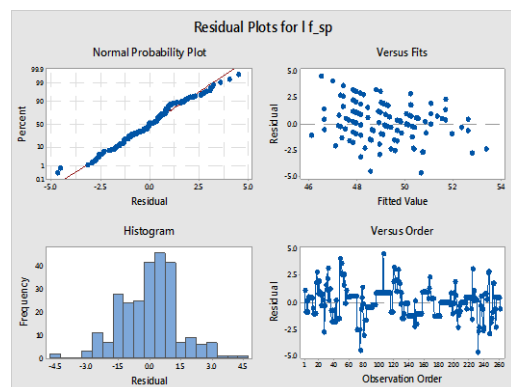
$$\text{Bulk density} = -715 + 509.3 f - 1295 sp + 1026 wp - 1145 wb - 22.48 sb - 1153 wb*wb - 648.7 f*wp + 2700 sp*wp - 3603 sp*wb + 3784 wp*wb \quad (4)$$

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม f ($P < 0.05$) เป็นการปรับอาหารเข้าสู่เครื่องอัดอาหารเม็ดมากขึ้น ส่งผลทำให้เครื่องจักรต้องทำงานหนักขึ้น Load จึงเพิ่มขึ้น, การเพิ่ม sp ($P < 0.05$) ทำให้อาหารได้รับความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการขยายของอาหารเพิ่มขึ้นและทำให้ Die pressure สูงขึ้นด้วย ดังนั้น Load จึงสูงขึ้น, การเพิ่ม wp ($P < 0.05$) ที่มากขึ้นเรื่อยๆ อาหารจะมีความเหลวมากขึ้น แม้ว่าที่ส่วนปลายของ die pressure จะทำให้น้ำเกิดการเดือดและส่งผลให้อาหารเกิดการขยายตัว ซึ่ง Load จะมีค่าสูงในช่วง transition phase แต่เมื่อใส่น้ำมากขึ้นเรื่อยๆ อาหารจะมีความเหลวมากขึ้น ส่งผลให้ Load เริ่มต่ำลง ซึ่งตรงจุดนี้จะเห็นได้ว่า ถ้า wb มากขึ้น ($P < 0.05$) ส่งผลให้น้ำเกิดการเดือดที่ปลายแม่พิมพ์ ทำให้ Load สูงขึ้น, ส่วนการเพิ่ม sb ($P > 0.05$) จะช่วยในเรื่องการลด Load motor แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้อาหารเกิดการขยายตัวและทำให้ Load สูงขึ้นแต่ไม่มาก โดยจะเห็นได้ว่าการเพิ่ม sb แทบจะไม่มีผลต่อ Load เท่าที่ควร ซึ่งสมการที่ (5) จะได้ $R\text{-sq} = 58.72\%$ และ $S = 1.42459$

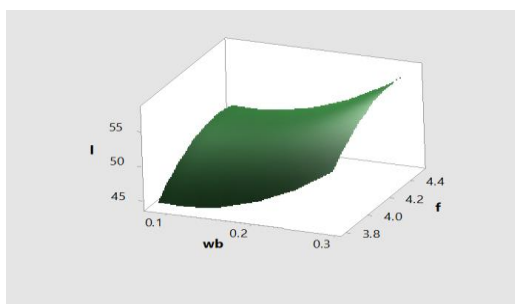
(a)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	14	713.17	50.94	25.1	0
f	1	63.55	63.554	31.32	0
sp	1	16.38	16.38	8.07	0.005
wp	1	12.02	12.024	5.92	0.016
wb	1	86.63	86.625	42.68	0
sb	1	7.05	7.054	3.48	0.063
f*f	1	11.09	11.091	5.46	0.02
sp*sp	1	45.82	45.82	22.58	0
wp*wp	1	18.54	18.536	9.13	0.003
wb*wb	1	12.21	12.213	6.02	0.015
f*wp	1	38.78	38.783	19.11	0
f*sb	1	42.16	42.162	20.77	0
sp*wb	1	47.64	47.635	23.47	0
wp*wb	1	136.44	136.442	67.23	0
wb*sb	1	27.13	27.129	13.37	0
Error	247	501.28	2.029		
Total	261	1214.44			
R-sq		58.72%			
R-sq (adj)		56.38%			
S		1.42459			

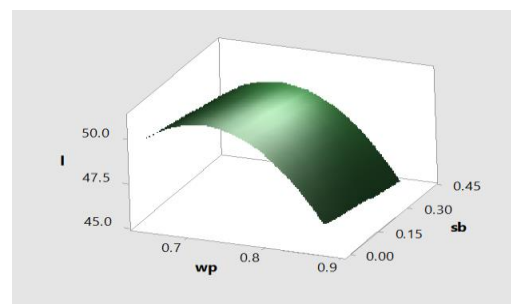
(b)



(c)



(d)



รูปที่ 4 ตาราง Analysis of variance of Load (a), Residual plot (b), กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม Load กับตัวแปรอิสระ (c), (d)

$$\text{Load} = -35.8 + 44.2 f + 220.4 sp - 243.5 wp + 310.2 wb + 86.7 sb - 18.14 f*f - 479 sp*sp - 199.8 wp*wp + 222.4 wb*wb + 161.9 f*wp - 28.71 f*sb + 706 sp*wb - 889 wp*wb + 187.3 wb*sb \quad (5)$$

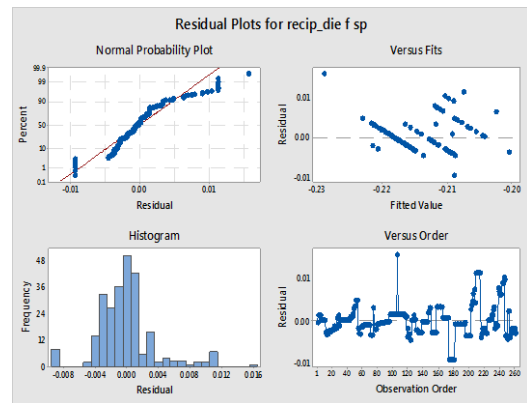


จากรูปที่ 5 ในกรณีที่อาหารมีความแห้งอยู่พอสมควร การเพิ่ม wp (P<0.05) จะทำให้อาหารเกิดการคลุกเคล้ากันจนถึงจุดพอเหมาะ ทำให้ Die pressure จะเพิ่มขึ้น เพราะ อาหารสามารถขยายตัวได้มากยิ่งขึ้น, การเพิ่ม f (P<0.05) ในช่วงแรกและที่ wp สูงๆ อาหารจะมีลักษณะเป็นของเหลว ทำให้ Die pressure จะต่ำลงชั่วขณะ หลังจากที่เพิ่ม f มากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้อาหารได้รับความร้อนและน้ำไม่นานพอ ส่งผลให้อาหารยังมีความแห้งอยู่พอสมควร ดังนั้น Die pressure จะค่อยๆสูงขึ้น, การเพิ่ม sb (P>0.05) จะส่งผลทำให้อาหารเกิดการขยายตัวมากขึ้น ทำให้ Die pressure เพิ่มขึ้นเล็กน้อย, การเพิ่ม sp (P<0.05) จะส่งผลทำให้อาหารเกิดการขยายตัวมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้น Die pressure จึงสูงขึ้น, การเพิ่ม wb (P<0.05) ในส่วนของบาร์เรล ปริมาณน้ำที่เพิ่มให้กับมวลอาหาร จะส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเหล่านี้เกิดการขยายตัว ทำให้ Die pressure สูงขึ้น ซึ่งสมการที่ (6) จะได้ R-sq = 65.50% และ S = 0.003806

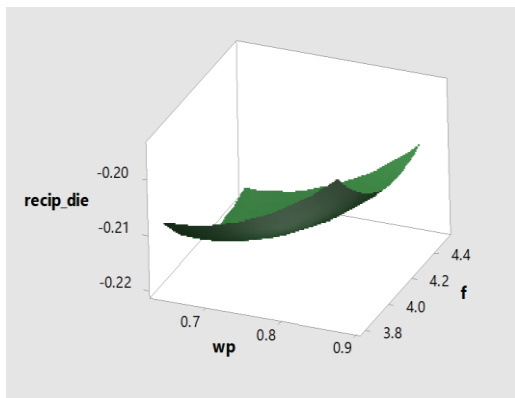
(a)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regressor	13	0.006821	0.000525	36.22	0
f	1	0.000196	0.000196	13.56	0
sp	1	0.000368	0.000368	25.37	0
wp	1	0.000604	0.000604	41.68	0
wb	1	0.001547	0.001547	106.76	0
sb	1	0	0	0.01	0.926
f*f	1	0.000155	0.000155	10.69	0.001
wp*wp	1	0.000103	0.000103	7.11	0.008
wb*wb	1	0.000072	0.000072	4.99	0.026
f*wb	1	0.000868	0.000868	59.95	0
f*sb	1	0.000541	0.000541	37.34	0
sp*sb	1	0.00053	0.00053	36.58	0
wp*wb	1	0.000456	0.000456	31.48	0
wp*sb	1	0.000067	0.000067	4.64	0.032
Error	248	0.003593	0.000014		
Total	261	0.010414			
R-sq		65.50%			
R-sq (adj)		63.69%			
S		0.003806			

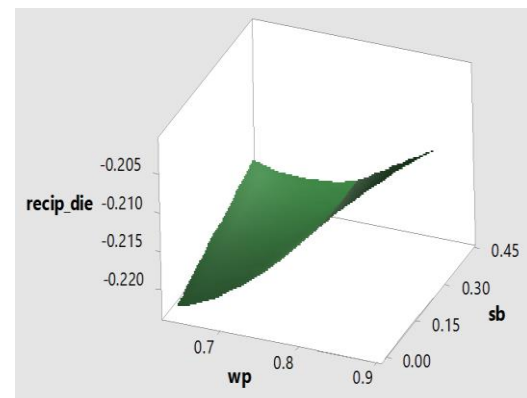
(b)



(c)



(d)



รูปที่ 5 ตาราง Analysis of variance of Reciprocal_die (a), Residual plot (b), กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม Reciprocal_die กับตัวแปรอิสระ (c), (d)

$$\begin{aligned} \text{Recip_die} = & 0.534 - 0.306 f + 0.0493 sp - 0.608 wp + 1.685 wb - 0.2793 sb + 0.0451 f*f + 0.2571 wp*wp \\ & - 0.510 wb*wb - 0.6657 f*wb + 0.1442 f*sb - 0.5512 sp*sb + 1.853 wp*wb - 0.1627 wp*sb \end{aligned} \quad (6)$$



5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการศึกษาปัจจัยและตัวแปรที่มีผลต่อการตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรอัดอาหารเม็ดและรวมถึงการสร้างสมการความสัมพันธ์ เพื่อใช้อธิบายความเข้าใจทางทฤษฎีเพิ่มเติม ทำให้ทราบได้ว่าตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ใน การตั้งค่าเริ่มต้นมีอยู่ 5 ตัวแปร คือ f , sp , wp , wb , และ sb ซึ่งส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่มีอยู่ 3 ตัว คือ Bulk density, Load, และ Die pressure ซึ่งจากการสร้างสมการความสัมพันธ์ทำให้เห็นว่า ตัวแปรอิสระทั้ง 5 ตัวสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนองได้อยู่ที่ประมาณ 42.30-65.50% การที่ $R-sq$ มีค่าที่ต่ำ เกิดจากการเลือกใช้สมการถดถอยพหุนามดีกรีสองในการอธิบายความสัมพันธ์แทนที่สมการดีกรีสูง เพราะ สมการที่ดีกรีสูง แม้ว่าจะให้ $R-sq$ ที่สูงขึ้นแต่ส่งผลให้ตัวแปรที่ถูกสร้างในสมการถดถอยพหุนาม มีค่า P -value มากกว่า 0.05 เพิ่มมากขึ้น ทำให้ทางคณะผู้จัดทำเลือกสมการที่ดีกรีสองในการอธิบายความสัมพันธ์ ในท้ายที่สุดตัวแปรที่มีผลและต้องให้ความสำคัญต่อการปรับค่าเริ่มต้น คือ f , sp , และ wp เป็นหลัก จากที่ได้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของกฎการอนุรักษ์พลังงานที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรอัดอาหารเม็ด อาจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ได้ดีมากยิ่งขึ้นก็เป็นไปได้ โดยสุดท้ายทางคณะผู้จัดทำจะนำสมการความสัมพันธ์ที่สร้างไว้ข้างต้น ไปทดสอบการหาค่าจุดที่เหมาะสม (Optimization) และทำการเปรียบเทียบกับค่าในการทำงานจริงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์ และ อาจารย์ วิศว์ ศรีพวาทกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการฉบับนี้ สำหรับคำแนะนำตลอดเวลาดำเนินโครงการ และขอขอบพระคุณทางบริษัทเบทาโกรที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ อย่างครบถ้วน

เอกสารอ้างอิง

- ฐณัฐ วงศ์สายเชื้อ. (2561). *การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับงานวิจัยเชิงปริมาณ* [เอกสารประกอบการสอน]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัชชา พลศิลป์. (2553). *การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการพ่นสีรถยนต์: กรณีศึกษาโรงงานประกอบรถยนต์*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).
- Ahmed, G., & Rahman, M. S. (2012). *Handbook of Food Process Design*. Hoboken, NJ: Blackwell Publishing.
- Akdogan, H. (1999). High moisture food extrusion. *International Journal of Food Science & Technology*, 34(3), 195-207.
- Alam, M. S., & Kumer, S. (2014). Optimization of extrusion process parameters for red lentil-carrot pomace incorporated ready-to-eat expanded product using response surface. *Food Science and Technology*, 2(7), 106-119. doi:10.13189/fst.201.020703
- Alves, R. M. L., Grossmann, M. V. E., & Silva, R. S. S. F. (1999). Gelling properties of extruded yam (*Dioscorea alata*) starch. *Food Chemistry*, 67, 123-127.
- Camire, M. E. (1998). Chemical changes during extrusion cooking - Recent advances. In F. Shahidi, C.T. Ho, & N.V. Chuyen (Eds.), *Process Induced Chemical Changes in Food* (pp. 109-121). New York, NY: Plenum Press.



- Camire, M. E. (2000). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In M. N. Riaz (Ed.), *Extruders in Food Applications* (pp. 127-147). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Danbaba, N., Nkama, I., Badau M. H., & Idakwo P. Y. (2018). Statistical modeling and optimization of processing conditions of twin-screw extruder rice-legume instant breakfast gruel. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 14(4), 693-712.
- Forte, D. (2016). *The Design of Food Extrusion Dies*. G. Young (Ed.). Brisbane: Food Industry Engineering.
- Forte, D., & Young, G. (2016). *Food and Feed Extrusion Technology: An Applied Approach to Extrusion Theory* (2nd ed.). Brisbane: Food Industry Engineering.
- Giles, H. F., Jr., Wagner, J. R., Jr., & Mount, E. M., III. (2005). *Extrusion: The definitive processing guide and handbook*. New York, NY: William Andrew.
- Hair, J. F., Jr., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Hampshire: Cengage Learning, EMEA.
- Halden, A. N., Lindberg, J. E., & Masembe, C. (2014). Aquaculture-A fast growing food production sector. *SLU Global Report*, 42-45.
- Harper, J. M. (1981). *Extrusion of Foods (Vol. 1)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ilo, S., Schoenlechner, R. & Berghofe, E. (2000). Role of lipids in the extrusion cooking processes. *Grasas y Aceites*, 51(1-2), 97-110.
- Irungu, F., & Mutungi, C. (2018). Optimization of extruder cooking conditions for the manufacture of fish feeds using response surface methodology. *Wiley Journal of Food Process Engineering*. doi:10.1111/jfpe.12980
- Keawpeng, I., Charunuch, C., Roudaut, G., & Meenune, M. (2014). The optimization of extrusion condition of Phatthalung Sungyod rice extrudate: a preliminary study. *International Food Research Journal*, 21(6), 2395-2300.
- Kline, R. B. (2016). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (4th ed.). D. A. Kenny & T. D. Little (Eds.). New York, NY: The Guilford Press.
- Levic, J., & Sredanovic, S. (2010). Heat treatments in animal feed processing. 2nd Workshop "Extrusion technology in feed and food processing", 1-24.
- Montgomery D.C. (2005). *Design and Analysis of Experiments* (6th ed.). New York, NY: John Wiley and Son.
- Munguti, J. M., Kim, J. D., & Ogello, E. O. (2014). An overview of Kenyan aquaculture: Current status, challenges, and opportunities for future development. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 17(1), 1-11. doi:10.5657/FAS.2014.0001
- Orisaleye, J. I., Adefuye, O. A., Ogundare, A. A., & Fadipe, O. L. (2018). Parametric analysis and design of screw extruder for slightly non-Newtonian (pseudoplastic) materials. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 229-237.
- Riaz, M. N. (2000). *Extruders in Food Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.



- Rosentrater, K. A., Muthukumarappan, K., & Kannadhasan, S. (2009). Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*, 1(1), 22-38.
- Umar, S., Kamarudin, M. S., & Remezani-Fard, E. (2013). Physical properties of extruded aquafeed with a combination of sago and tapioca starches at different moisture contents. *Animal Feed Science and Technology*, 183(1-2), 51-55.