



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

**การออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง สำหรับการ
ผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์**

**Design and Performance Evaluation of a Continuous Mixing–Pelletizing Machine for
Animal Feed and Organic Fertilizer Production**

วิรุณ โมณะตระกูล¹⁾ พันธิวา แก้วมาตย์²⁾ วสันต์ ปิณะเต³⁾ ทวีทรัพย์ ไชยรักษ์⁴⁾ และกันตพงษ์ แซ่โล^{5)*}

Wiroon Monatrakul¹⁾ Puntivar Keawmad²⁾ Wasan Pinate³⁾ Taweessab Chaiyarak⁴⁾

and Kantapong Khaeso^{5)*}

¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

²⁾ สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

³⁾ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

⁴⁾ สาขาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

⁵⁾ สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹⁾ Program in Agricultural Machinery Technology Innovation, Faculty of Agricultural Technology,
Rajabhat Maha Sarakham University

²⁾ Program in Biology, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

³⁾ Program in Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

⁴⁾ Program in Agriculture, Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

⁵⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received: 6 May 2026

Revised: 28 May 2026

Accepted: 11 June 2026

Available online: 26 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์ รวมทั้งประเมินสมรรถนะของเครื่องและปัจจัยการทำงานที่เหมาะสม โดยศึกษาผลของความชื้นวัตถุดิบที่ระดับ 12, 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) และอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบอัดเม็ดที่ระดับ 120, 160 และ 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ต่อคุณภาพเม็ดอัด อัตราการผลิต และการใช้พลังงานไฟฟ้า เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 4 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบถังบรรจวัตถุดิบ ระบบผสม ระบบพักและลำเลียง และระบบอัดเม็ด ซึ่งสามารถทำงานแบบต่อเนื่องสั่งการด้วยระบบ PLC ผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 181 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 168 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลของความชื้นวัตถุดิบพบว่า ระดับความชื้น 15% ให้ค่าความคงทนของเม็ดสูงสุดทั้งในอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ ขณะที่อัตราการป้อน 160 กิโลกรัมต่อชั่วโมงให้สมดุลที่เหมาะสมด้านอัตราการผลิต ความเสถียรของการทำงาน และการใช้พลังงาน การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนคงที่ของเครื่องประมาณ 69,900 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนของการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด 22,843 กิโลกรัมต่อปี และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด 25,985 กิโลกรัมต่อปี ซึ่งเทียบเท่ากับระยะเวลาการผลิตประมาณ 124 และ 160 ชั่วโมงต่อปี หรือประมาณ 0.8–1 เดือนของการใช้งานจริงภายใต้การทำงานเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ในระดับชุมชนหรือเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง, อาหารสัตว์อัดเม็ด, ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด, การออกแบบเครื่องจักร, สมรรถนะเครื่องจักร

Abstract

This study aimed to design and develop an continuous mixing–pelletizing machine for the commercial production of animal feed and organic fertilizer, and to evaluate its performance and optimal operating conditions. The effects of raw material moisture content at 12%, 15%, and 18% (wet basis) and feeding rates of 120, 160, and 200 kg/h on pellet quality, production capacity, and energy consumption were investigated. The developed prototype consisted of four main subsystems: a raw material hopper system, a mixing system, a conveying and holding system, and a pelletizing system, which operated continuously. The experimental results showed that the prototype achieved average production capacities of 181 kg/h for pelleted animal feed and 168 kg/h for pelleted organic fertilizer. A raw

material moisture content of 15% resulted in the highest pellet durability for both animal feed and organic fertilizer pellets, and the mixing uniformity was within an acceptable range. In addition, a feeding rate of 160 kg/h provided the most suitable balance between production rate, operational stability, and energy consumption. An engineering economic analysis indicated that the annual fixed cost of the machine was approximately 69,900 THB. The break-even production quantities were 22,843 kg/year for animal feed pellets and 25,985 kg/year for organic fertilizer pellets. These values correspond to approximately 124 and 160 operating hours per year, or about 0.8–1 month of actual operation assuming an average working time of 8 hours per day. The results demonstrate that the developed continuous mixing–pelletizing machine has strong potential for efficient production of animal feed and organic fertilizer at community or commercial scales.

Keywords: continuous mixing–pelletizing machine: pelletized animal feed: organic fertilizer pellets: machine design: machine performance

*ติดต่อ: kkantapong@kkumail.com, 061-415-8664

1. บทนำ

การผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์เป็นกิจกรรมสำคัญในภาคการเกษตร [1] เนื่องจากมีบทบาทต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงสัตว์ การปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร อาหารสัตว์อัดเม็ด (pelleted feed) เป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปศุสัตว์ เนื่องจากช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอาหาร ลดการสูญเสียจากฝุ่น และช่วยให้สัตว์ได้รับสารอาหารอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น [2,3] ในทำนองเดียวกัน การอัดเม็ดปุ๋ยอินทรีย์ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ทำให้สะดวกต่อการขนส่ง การเก็บรักษา และการใช้ในภาคการเกษตร [4,5]

กระบวนการอัดเม็ดโดยทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การผสม และการอัดเม็ดผ่านแม่พิมพ์ โดยแรงอัดและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ และทำให้เกิดการยึดเกาะของอนุภาค ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและคงรูป [6] ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัด ได้แก่ ความชื้นของวัตถุดิบ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อนวัตถุดิบ และสภาวะการทำงาน of เครื่องอัดเม็ด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความคงทนของเม็ด อัตราการผลิต และการใช้พลังงานของระบบ [7]

ในปัจจุบัน เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอัดเม็ดในระดับเกษตรกรหรือวิสาหกิจชุมชนมักเป็นเครื่องจักรแบบแยกส่วน เช่น เครื่องผสมวัตถุดิบและเครื่องอัดเม็ดที่ทำงานแยกกัน ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอน ต้องใช้แรงงาน

เพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง [8] ในขณะที่ระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (continuous processing system) สามารถเชื่อมต่อขั้นตอนการผลิต การลำเลียง และการอัดเม็ดเข้าด้วยกันในสายการผลิตเดียว ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดเวลาในการผลิต และเพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ [9]

อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรระบบต่อเนื่องส่วนใหญ่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งมีต้นทุนการลงทุนสูงและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับชุมชนหรือผู้ประกอบการขนาดเล็ก [10] ดังนั้น การพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ และสามารถใช้งานได้หลากหลายกับวัตถุดิบทางการเกษตร จึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [11] และสนับสนุนการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ในระดับท้องถิ่น [12]

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยพัฒนาเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์ในระดับชุมชนอยู่หลายชิ้น แต่ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอัดเม็ดเดี่ยว (single-unit pellet mill) ที่ต้องผสมวัตถุดิบด้วยมือหรือเครื่องผสมแยกก่อน ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านความสม่ำเสมอของส่วนผสม การสูญเสียเวลารอคอยระหว่างขั้นตอน การใช้แรงงานสูง และความแปรปรวนของคุณภาพเม็ดอัดระหว่างรุ่นการผลิต ขณะที่เครื่องระบบต่อเนื่องเชิงพาณิชย์ที่มีระบบผสม-ลำเลียง-อัดเม็ดในสายเดียวมักมีราคาสูงและกำลังผลิตเกินความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน จุดต่างของเครื่องต้นแบบนี้คือการรวมระบบผสมและอัดเม็ดให้ทำงานต่อเนื่องในสายการผลิตเดียว ควบคุมการบ้อนด้วย PLC ร่วมกับอินเวอร์เตอร์

ทำให้สามารถจัดสมดุลไลน์การผลิต (line balancing) ระหว่างชุดผสมและชุดอัดเม็ดได้ในต้นทุนที่เหมาะสมกับระดับชุมชน [โปรดเพิ่มการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2-3 รายการในตำแหน่งนี้]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์ รวมทั้งศึกษาสมรรถนะของเครื่องและปัจจัยการทำงานที่เหมาะสม โดยพิจารณาผลของความเร็วรอบวัตถุดิบและอัตราการบ้อนวัตถุดิบต่อคุณภาพเม็ดอัด อัตราการผลิต และการใช้พลังงานของระบบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุอัดเม็ดทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระดับชุมชนและเชิงพาณิชย์

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น ณ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม เครื่องต้นแบบประกอบด้วย 4 ระบบหลัก ได้แก่ 1) ระบบถังบรรจุวัตถุดิบ (raw material hopper system) 2) ระบบผสมวัตถุดิบ (mixing system) 3) ระบบพักและลำเลียง (conveying and holding system) และ 4) ระบบอัดเม็ด (pelletizing system) ระบบผสมใช้เครื่องผสมแบบใบพาย (paddle mixer) เพื่อให้วัตถุดิบเกิดการเคลื่อนที่ทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมวัสดุที่เป็นผงหรือเม็ด ส่วนระบบอัดเม็ดใช้

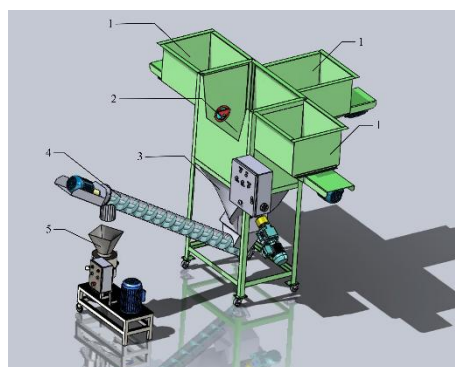
หลักการอัดผ่านแม่พิมพ์ (die) โดยแรงอัดจากลูกกลิ้ง และแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ ทำให้วัตถุดิบเกิดการยึดเกาะและอัดแน่นเป็นเม็ดตามขนาดที่กำหนด ระบบทั้งหมดถูกควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC เพื่อให้การทำงานของเครื่องเป็นแบบต่อเนื่องตลอดกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1

ระบบควบคุมใช้ PLC ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของสกรูป้อนและชุดอัดเม็ด การจ่ายวัตถุดิบตามสูตรควบคุมด้วยการนับรอบการหมุนของสกรูป้อน (proximity/encoder sensor) ร่วมกับโหลดเซลล์ (load cell) ที่ถึงซึ่งเพื่อกำหนดน้ำหนักวัตถุดิบแต่ละชนิด เมื่อซึ่งได้ตามสูตร PLC จะสั่งเปิดการลำเลียงเข้าถังผสม จับเวลาผสม แล้วจึงลำเลียงเข้าสู่ชุดอัดเม็ดต่อเนื่อง

รายละเอียดผลการออกแบบของแต่ละระบบมีดังนี้ (1) ระบบถังบรรจุวัตถุดิบ ประกอบด้วยถังแยกชนิด 3 ถัง ผลิตจากเหล็กแผ่นชุบสังกะสีหนา 1.5 มม. ออกแบบส่วนล่างเป็นทรงกรวยโดยใช้มุมเอียงผนัง 60 องศา ซึ่งมากกว่ามุมกอง (angle of repose ประมาณ 35–40 องศา) ของวัตถุดิบผงเพื่อให้ไหลลงได้โดยไม่ค้าง ความจุถังละประมาณ 0.12 ม³ (บรรจุได้ประมาณ 60–80 กก./ถัง) เพียงพอต่อการเดินเครื่องต่อเนื่องประมาณ 30–40 นาทีต่อการเติมหนึ่งครั้ง (2) ระบบลำเลียงใช้สกรูลำเลียง (screw conveyor) เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียว 100 มม. ระยะพิทช์ 100 มม. ขับด้วยมอเตอร์เกียร์ปรับความเร็วผ่านอินเวอร์เตอร์ที่ 60–180 รอบต่อนาที ให้ความสามารถลำเลียงประมาณ 120–220 กก./ชม. ครอบคลุมช่วงอัตราการป้อนที่ใช้ทดลอง (120–200 กก./ชม.) จึงใช้เป็นตัวแปรหลักในการจัดสมดุลไลน์การผลิตระหว่างชุดผสมและ

ชุดอัดเม็ด (3) ระบบผสมใช้ถังผสมแบบใบพาย (paddle mixer) ความจุประมาณ 50 กก./รอบ ขับด้วยมอเตอร์ 2.2 kW ความเร็วใบกวนประมาณ 60 รอบต่อนาที และ (4) ระบบอัดเม็ดใช้แม่พิมพ์ (die) รูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ขับด้วยมอเตอร์ 7.5 kW ส่วนถังพัก (buffer hopper) ระหว่างชุดผสมและชุดอัดเม็ดมีความจุประมาณ 30 กก. เพื่อรองรับการป้อนต่อเนื่อง ระบบส่งกำลังใช้ชุดเกียร์ทดรอบ

หลักการทำงานแบบต่อเนื่อง: วัตถุดิบจากถังบรรจุทั้ง 3 ถังถูกจ่ายลงถังซึ่งตามสัดส่วนของสูตร แล้วลำเลียงเข้าถังผสมแบบใบพายเพื่อคลุกเคล้าจนสม่ำเสมอ จากนั้นส่งผ่านถังพักและสกรูลำเลียงเข้าสู่ชุดอัดเม็ดอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการป้อนของสกรูปรับ ให้สอดคล้องกับกำลังการอัดเม็ดเพื่อป้องกันการอุดตันและรักษาสมดุลไลน์การผลิต



รูปที่ 1 เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

(1) ถังบรรจุ, (2) ถังผสม, (3) ถังพัก, (4) เกลียวลำเลียง, และ (5) เครื่องอัดเม็ด

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารสัตว์และวัสดุอินทรีย์สำหรับผลิตปุ๋ยอัดเม็ดที่

เพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ วัตถุดิบทั้งหมดถูกบดและปรับขนาดอนุภาคให้มีความเหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการผสมและอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1



รูปที่ 2 ตัวอย่างวัตถุดิบทดสอบ

(a) บลាយข้าว/รำข้าว (b) กากถั่วเหลือง (c) มูลโคบด และ (d) ปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 1

สูตรอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด

รายการ	ถังที่ 1 วัตถุดิบหลัก	ถังที่ 2 วัตถุดิบ โปรตีน	ถังที่ 3 วัตถุดิบ ประสาน (กากน้ำตาล)
สูตรอาหาร สัตว์	65%	25%	10%
รายการ	ถังที่ 1 วัตถุดิบหลัก	ถังที่ 2 วัสดุ ปรับสภาพ	ถังที่ 3 วัตถุดิบ ประสาน (แป้งมัน สำปะหลัง)
สูตรปุ๋ย อินทรีย์ อัดเม็ด	70%	20%	10%

ก่อนเริ่มการทดลอง วัตถุดิบแต่ละสูตรถูกปรับความชื้นให้อยู่ในระดับที่กำหนด โดยรายงานค่าความชื้นบนฐานเปียก (wet basis, w.b.) ซึ่งเป็น

พบทั่วไปในพื้นที่เกษตรกรรม โดยมีการคัดเลือกสูตรอาหารสัตว์ และสูตรปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด อย่างละ 1 สูตร

รูปแบบที่ใช้ทั่วไปในงานด้านการอัดเม็ดชีวมวลและการประเมินคุณภาพวัตถุดิบสำหรับการอัดแน่น สมการคำนวณความชื้นฐานเปียกแสดงดังสมการที่ 1

วัตถุดิบทุกชนิดถูกบดด้วยเครื่องบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดตา 2 มม. เพื่อควบคุมขนาดอนุภาคให้สม่ำเสมอ (≤ 2 มม.) ก่อนการผสม วัดความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบ moisture analyzer (อบที่ 105°C จนน้ำหนักคงที่) แล้วคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อปรับให้ได้ระดับ 12, 15 และ 18% (ฐานเปียก) จากนั้นฉีดพ่นน้ำสะอาดพร้อมคลุกเคล้าในเครื่องผสมให้ทั่ว และบ่มในถุงปิดประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ความชื้นกระจายสม่ำเสมอ ก่อนตรวจสอบความชื้นซ้ำให้อยู่ในช่วง $\pm 0.5\%$ ของค่าที่กำหนดก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้ง

$$MC_{wb}(\%) = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MC_{wb} คือ ความชื้นฐานเปียกของวัตถุดิบ (%)

W_{wet} คือ มวลวัตถุดิบก่อนอบแห้ง (g)

W_{dry} คือ มวลวัตถุดิบหลังอบแห้งจนคงที่ (g)

การทดลองออกแบบเพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ด โดยพิจารณา 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ความชื้นของวัตถุดิบ 3 ระดับ คือ 12, 15 และ 18% (ฐานเปียก) 2) อัตราการป้อน

วัตถุดิบเข้าสู่เครื่องอัดเม็ด 3 ระดับ คือ 120, 160 และ 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้น แผนการทดลองมีลักษณะเป็นแฟกทอเรียล เพื่อให้สามารถประเมินได้ทั้งผลหลักของแต่ละปัจจัยและผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการป้อนต่อค่าตอบสนองของระบบ การวิเคราะห์ข้อมูลใช้แนวคิด two-way ANOVA ซึ่งเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเมื่อมีปัจจัยอิสระมากกว่า 1 ปัจจัย และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

ในการทดลองแต่ละสภาวะ วัตถุดิบถูกปรับความชื้นให้ตรงตามระดับที่กำหนด จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่ระบบถึงบรรจุและส่งออกเข้าสู่ระบบผสม เมื่อส่วนผสมมีความสม่ำเสมอแล้ว วัตถุดิบจะถูกลำเลียงเข้าสู่ระบบพักและระบบอัดเม็ด โดยกำหนดอัตราการป้อนตามชุดการทดลอง

หลังจากเครื่องเดินเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state operation) แล้ว จึงเก็บข้อมูลค่าตอบสนอง ได้แก่ อัตราการผลิต ความคงทนของเม็ดอัด ความสม่ำเสมอของการผสม และการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยมีการบันทึกเวลา มวลผลิตภัณฑ์ มวลก่อนและหลังการทดสอบความคงทน และค่าพลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าในแต่ละสภาวะทดลองอย่างเป็นระบบ

การทดลองแต่ละสภาวะดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง ($n = 3$) และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การเก็บข้อมูลในแต่ละสภาวะมีดังนี้ (1) ความสม่ำเสมอของการผสม ประเมินโดยสุ่มเก็บตัวอย่างส่วนผสม 10 จุดจากถังผสม นำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation, CV) โดยถือว่าผสมสม่ำเสมอเมื่อ CV ต่ำกว่า 10% (2) ความคงทนของเม็ดอัด ทดสอบตาม

หลักการ pellet durability index โดยนำเม็ดที่ร้อนผงออกแล้วผ่านการกลิ้ง/กระแทกในเครื่องทดสอบ แล้วร่อนและชั่งมวลเม็ดที่คงสภาพ ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และ (3) การใช้พลังงานไฟฟ้า วัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า (kWh meter) ตลอดช่วงเดินเครื่องในสภาวะคงตัว พร้อมบันทึกเวลาและมวลผลิตภัณฑ์เพื่อคำนวณพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

2.3. ค่าชี้ผลและสมการที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะ

2.3.1. อัตราการผลิต

อัตราการผลิตของเครื่อง (PR) ใช้เป็นตัวชี้ความสามารถของระบบในการผลิตเม็ดอัดต่อหน่วยเวลา โดยคำนวณจากมวลผลิตภัณฑ์ที่ได้จริงหารด้วยเวลาในการผลิต [13] ดังสมการที่ (2)

$$PR = \frac{m_p}{t} \quad (2)$$

เมื่อ PR คือ อัตราการผลิต (kg/h)

m_p คือ มวลผลิตภัณฑ์เม็ดอัดที่ได้จริง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการผลิต (h)

ตัวแปรนี้ใช้ประเมินประสิทธิภาพเชิงกำลังการผลิตของเครื่องอัดเม็ด และนิยมใช้รายงานผลในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมงในงานวิจัยด้าน pelletization ทั้งอาหารสัตว์และชีวมวลอัดเม็ด

2.3.2. ความคงทนของเม็ดอัด

ความคงทนของเม็ดอัดหรือ pellet durability เป็นดัชนีที่สะท้อนความสามารถของเม็ดในการคงรูปและต้านทานการแตกหักระหว่างการขนถ่าย การลำเลียง

และการจัดเก็บ ซึ่งเป็นตัวชี้คุณภาพสำคัญของผลิตภัณฑ์อัดเม็ด ในการทดสอบ ให้หลักการนำเม็ดอัดที่ร้อนเอาผงละเอียดออกแล้วไปผ่านการกลิ้ง/กระแทกในเครื่องทดสอบ จากนั้นร่อนผงละเอียดออกอีกครั้ง และคำนวณร้อยละมวลเม็ดที่ยังคงสภาพอยู่หลังการทดสอบ [14,15] ดังสมการที่ (3)

$$PDI(\%) = \frac{W_a}{W_b} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ PDI คือ ค่าความคงทนของเม็ดอัด (%)

W_b คือ มวลเม็ดก่อนการทดสอบ (g)

W_a คือ มวลเม็ดที่เหลืออยู่หลังการทดสอบและร่อนผงละเอียดออกแล้ว (g)

หลักการคำนวณนี้สอดคล้องกับวิธีประเมิน pellet durability index ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย และการประเมินคุณภาพเม็ดอาหารสัตว์และเม็ดชีวมวล

2.3.3. การใช้พลังงานไฟฟ้า

การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบในแต่ละสภาวะทดลองประเมินจากค่าพลังงานรวมที่วัดได้ระหว่างการเดินเครื่อง หรือคำนวณจากกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยคูณกับระยะเวลาเดินเครื่อง ดังสมการที่ (4)

$$E = P_{avg} \times t \quad (4)$$

เมื่อ E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

P_{avg} คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างการเดินทาง (kW)

t คือ เวลาเดินเครื่อง (h)

นอกจากพลังงานรวมแล้ว งานวิจัยด้านการอัดเม็ด มักรายงาน พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption; SEC) เพื่อให้เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างสภาวะทดลองหรือระหว่างเครื่องจักรต่างชนิด ได้ชัดเจนขึ้นโดยคำนวณจากสมการที่ (5)

$$SEC = \frac{E}{m_p} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ พลังงานจำเพาะ (kWh/kg หรือ kWh/ton)

m_p คือ มวลผลิตภัณฑ์เม็ดอัดที่ผลิตได้จริง ตัวชี้วัดนี้ถูกใช้แพร่หลายในงานวิจัยด้าน pelletization เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกระบวนการผลิตเม็ดอัด [13]

2.3.4. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถคำนวณจุดคุ้มทุนเชิงปริมาณจากสมการมาตรฐานของการวิเคราะห์ต้นทุน-ปริมาณ-กำไร ดังสมการที่ (6)

$$BEQ = \frac{FC}{P-VC} \quad (6)$$

เมื่อ BEQ คือ ปริมาณผลผลิต ณ จุดคุ้มทุน (kg/year)

FC คือ ต้นทุนคงที่รวมต่อปี (THB/year)

P คือ ราคาขายต่อหน่วย (THB/kg)

VC คือ ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย (THB/kg) และหากต้องการแปลงเป็นระยะเวลาการผลิต ณ จุดคุ้มทุน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$T_{BE} = \frac{BEQ}{PR} \quad (7)$$

เมื่อ T_{BE} คือ เวลาในการผลิตเพื่อให้ถึงจุดคุ้มทุน (h หรือ day หรือ month ตามหน่วยที่ใช้)

PR คือ อัตราการผลิตเฉลี่ยของเครื่อง

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1. ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ ได้พัฒนาเครื่องผสมพร้อมอัดเม็ดแบบต่อเนื่อง โดยโครงสร้างเครื่องถูกออกแบบให้เป็นสายการผลิตเดียว (continuous processing line) เพื่อลดขั้นตอนการทำงานแบบแยกเครื่อง ซึ่งปกติการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอัดเม็ดจะต้องผ่านกระบวนการผสมและอัดเม็ดคนละเครื่อง ทำให้เกิดเวลารอคอยและใช้แรงงานสูง

เครื่องต้นแบบมีขนาดกว้าง 3.05 เมตร ยาว 3.51 เมตร สูง 2.00 เมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 7.5 กิโลวัตต์สำหรับชุดอัดเม็ด และ 2.2 กิโลวัตต์สำหรับชุดผสม ควบคุมการทำงานด้วย PLC ร่วมกับอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบของสกรูป้อนและชุดอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 นวัตกรรมเครื่องผสมพร้อมอัดเม็ด

ระบบการทำงานเริ่มจากวัตถุดิบถูกบรรจุในถังแยกชนิด ระบบจะกำหนดน้ำหนักตามสูตรที่ตั้งค่าไว้และจ่ายวัตถุดิบด้วยการนับรอบการหมุนของสกรูป้อนเข้าสู่ถังซึ่ง จากนั้นวัตถุดิบถูกส่งเข้าสู่ถังผสม โดยใช้ใบกวนแบบใบพาย ทำการคลุกเคล้าเป็นเวลาเฉลี่ย 4–6 นาที จนค่าความแปรปรวนของส่วนผสมต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และมีการคลุกเคล้าของวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นวัตถุดิบถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดผ่านแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และถูกตัดให้มีความยาวเฉลี่ย 8–12 มิลลิเมตร ก่อนเข้าสู่กระบวนการบรรจุ ดังแสดงในรูปที่ 4

ช่วงเวลาผสม 4–6 นาทีที่กำหนดจากการทดลองเบื้องต้นที่ติดตามค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (CV) ของส่วนผสมตามเวลา พบว่าค่า CV ลดลงต่ำกว่า 10% และคงที่หลังผสมประมาณ 4 นาทีสำหรับสูตรอาหารสัตว์ และประมาณ 6 นาทีสำหรับสูตรปุ๋ยอินทรีย์ ความแตกต่างนี้เกิดจากปุ๋ยอินทรีย์มีอนุภาคหยาบกว่าและความหนาแน่นแตกต่างระหว่างองค์ประกอบมากกว่า จึงต้องใช้เวลาผสมนานกว่าเล็กน้อยเพื่อให้

เกิดความสม่ำเสมอ การผสมนานเกินช่วงดังกล่าว ไม่ได้เพิ่มความสม่ำเสมออย่างมีนัยสำคัญแต่กลับสิ้นเปลืองพลังงาน จึงเลือกช่วง 4–6 นาทีเป็นเวลาผสมที่เหมาะสมก่อนป้อนเข้าสู่ชุดอัดเม็ด



รูปที่ 4 การทดสอบเครื่องผสมพร้อมอัดเม็ด

3.2. สมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่อง

3.2.1. ผลของอัตราการป้อนวัตถุดิบต่อสมรรถนะเครื่อง

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอุดตันของวัตถุดิบในระบบผสมและระบบอัดเม็ด ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด เครื่องต้นแบบสามารถผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 181 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดได้เฉลี่ย 168 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเครื่องต้นแบบในการผลิตเม็ดอัดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม โดยอัตราการป้อนวัตถุดิบมีผลต่ออัตราการผลิตและการใช้พลังงานของเครื่อง โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจาก 120

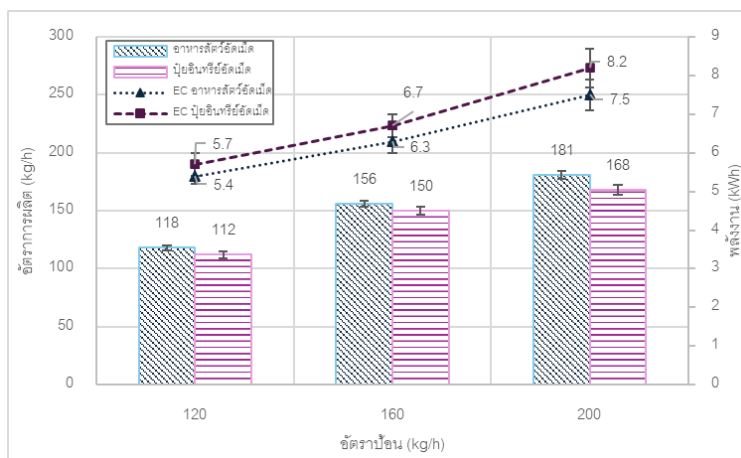
เป็น 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการผลิตของระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมีแนวโน้มลดลงและการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสูงเกินไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อน 160 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้สมดุลที่ดีระหว่างอัตราการผลิต ความเสถียรของระบบ และการใช้พลังงาน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับการอัดเม็ดชีวมวลที่รายงานว่า การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบช่วยเพิ่มกำลังการผลิตของระบบ แต่หากอัตราการป้อนสูงเกินไปจะทำให้แรงอัดในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้การใช้พลังงานสูงขึ้นและอาจลดคุณภาพของเม็ดอัด ดังแสดงในรูปที่ 5

ค่ากำลังการผลิตดังกล่าวอยู่ในช่วงเดียวกับงานวิจัยด้านการอัดเม็ดชีวมวลและวัตถุดิบทางการเกษตรในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ซึ่งรายงานว่าเครื่องอัดเม็ดแบบ ring die ระดับ pilot scale สามารถผลิตได้ประมาณ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [16] โดยอัตราการผลิตและคุณภาพของเม็ดอัดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบ ความชื้น ขนาดอนุภาค และสภาวะการเดินเครื่อง [17] ผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง จากการวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่าในการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด เครื่องใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 6.3 ± 0.3 kWh ในขณะที่การผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 6.7 ± 0.3 kW

การที่ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดใช้พลังงานสูงกว่าอาหารสัตว์อัดเม็ดเป็นผลจากคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ กล่าวคือ วัสดุอินทรีย์ (เช่น มูลโคบดและปุ๋ย

หมัก) มีปริมาณเส้นใยและความหยาบของอนุภาคสูงกว่า ทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ (die friction) มากกว่า ประกอบกับเมื่อปรับความชื้นแล้ว วัสดุอินทรีย์มีความหนืดและแรงยึดเกาะภายในสูง

กว่า จึงต้องใช้แรงอัดผ่านแม่พิมพ์มากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้าน ส่งผลให้มอเตอร์ชุดอัดเม็ดรับภาระและใช้พลังงานจำเพาะสูงกว่าการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดที่อนุภาคละเอียดและไหลตัวได้ดีกว่า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอัตราการป้อนต่ออัตราการผลิตและพลังงาน

3.2.2. ผลของความชื้นวัตถุดิบต่อคุณภาพเม็ดอัด

ผลของระดับความชื้นวัตถุดิบต่อความทนทานของเม็ดอัดและความชื้นหลังการอัดของอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด จากผลการทดลองพบว่าความชื้นของวัตถุดิบมีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยทั้งสองชนิดของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความชื้นวัตถุดิบจาก 12% เป็น 15% ทำให้ค่า

ความทนทานของเม็ดอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอาหารสัตว์อัดเม็ดมีค่าความทนทานสูงสุดที่ระดับความชื้น 15% เท่ากับ $91.8 \pm 1.2\%$ ขณะที่ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดมีค่าความทนทานสูงสุดที่ระดับเดียวกันเท่ากับ $84.9 \pm 1.5\%$ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบเป็น 18% พบว่าค่าความทนทานของเม็ดลดลงเมื่อเทียบกับระดับความชื้น 15% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความชื้นของวัตถุดิบมีช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการอัดเม็ด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

ผลของความชื้นวัตถุดิบต่อความทนทานเม็ดและความชื้นหลังอัดของอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด

ตัวอย่าง	ความชื้นวัตถุดิบ (%)	ความทนทานเม็ด (%)	ความชื้นหลังอัด (%)
อาหารสัตว์อัดเม็ด	12	82.4 ± 1.6 ^c	10.1 ± 0.3 ^c
	15	91.8 ± 1.2 ^a	12.6 ± 0.4 ^b
	18	87.2 ± 1.8 ^b	14.9 ± 0.5 ^a
ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด	12	74.6 ± 2.0 ^c	10.8 ± 0.4 ^c
	15	84.9 ± 1.5 ^a	13.3 ± 0.5 ^b
	18	79.8 ± 1.9 ^b	15.6 ± 0.6 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p \leq 0.05$ ตามวิธี LSD; สำหรับอาหารสัตว์อัดเม็ด เท่ากับ 3.10 สำหรับความทนทานเม็ด และ 0.82 สำหรับความชื้นหลังอัด; ส่วนปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด เท่ากับ 3.62 สำหรับความทนทานเม็ด และ 1.01 สำหรับความชื้นหลังอัด

การเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบมีผลต่อกระบวนการอัดเม็ด เนื่องจากน้ำสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นและช่วยให้เม็ดอัดมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 12% เป็น 15% จึงช่วยให้เม็ดอัดมีความคงทนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นสูงเกินไป เช่นที่ระดับ 18% จะทำให้วัตถุดิบมีความหนืดสูงขึ้นและลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดอัดมีความหนาแน่นลดลงและทำให้เม็ดแตกหักได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นหลังการอัดเม็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นของวัตถุดิบ โดยค่าความชื้นหลังการอัดของอาหารสัตว์อัดเม็ดเพิ่มจาก 10.1% เป็น 14.9% และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดเพิ่มจาก 10.8% เป็น 15.6% เมื่อความชื้นวัตถุดิบเพิ่มจาก 12% เป็น 18% ในเชิงทฤษฎีการอัดแน่น (compaction/agglomeration) น้ำทำหน้าที่เป็นตัวประสานของเหลว (liquid binder) ที่

สร้างสะพานของเหลว (liquid bridge) ระหว่างอนุภาค ที่ความชื้นเหมาะสม (~15%) แรงดึงดูดของสะพานของเหลวและแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ช่วยให้เกิดการยึดเกาะและความหนาแน่นสูงสุด แต่เมื่อความชื้นเพิ่มเป็น 18% ปริมาณน้ำส่วนเกินจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคจนเกิดการอิ่มตัว (over-saturation) ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubrication) ลดแรงเสียดทานภายในแม่พิมพ์ ทำให้แรงอัดที่ถ่ายทอดสู่วัสดุลดลง โครงสร้างเม็ดจึงมีความหนาแน่นและแรงยึดเกาะลดลง อีกทั้งเม็ดที่มีความชื้นสูงยังอ่อนตัวและแตกหักง่ายระหว่างการทดสอบความทนทาน จึงทำให้ค่าความทนทานที่ 18% ต่ำกว่าที่ 15% [18,19]

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยด้านการอัดเม็ดชีวมวลและอาหารสัตว์ที่รายงานว่าความชื้นของวัตถุดิบเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงและความคงทนของเม็ดอัด โดยระดับความชื้นที่เหมาะสมมักอยู่ในช่วงประมาณ 10–15%

ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและทำให้เม็ดอัดมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น แต่หากความชื้นสูงเกินช่วงดังกล่าวจะทำให้ความหนาแน่นของเม็ดลดลงและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดในที่สุด โดยมีตัวอย่างของอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด

3.2.3. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนคงที่ของเครื่องต้นแบบประมาณ 69,900 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนของการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ดเท่ากับ 22,843 กิโลกรัมต่อปี และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด 25,985 กิโลกรัมต่อปี โดยต้นทุนคงที่รวมประมาณ 69,900 บาทต่อปี ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร (คิดแบบเส้นตรงจากราคาเครื่องประมาณ 350,000 บาท อายุการใช้งาน 7 ปี มูลค่าซาก 10% $\approx$ 45,000 บาท/ปี) ค่าบำรุงรักษาและซ่อมแซมประจำปี ($\approx$ 5% ของราคาเครื่อง $\approx$ 17,500 บาท/ปี) และค่าดอกเบี้ย/ค่าเสียโอกาสของเงินลงทุน ($\approx$ 7,400 บาท/ปี) โดยไม่รวมต้นทุนผันแปร เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และค่าแรงงาน ซึ่งคิดแยกในส่วนต้นทุนผันแปรต่อหน่วย

เมื่อพิจารณาจากอัตราการผลิตของเครื่อง พบว่าปริมาณการผลิตดังกล่าวเทียบเท่ากับระยะเวลาการ

ผลิตประมาณ 124 ชั่วโมงต่อปีสำหรับอาหารสัตว์ และ 160 ชั่วโมงต่อปีสำหรับปุ๋ยอินทรีย์ หรือประมาณ 0.8–1 เดือนของการใช้งานจริง ภายใต้สมมติฐานการทำงานเฉลี่ยวันละ 8 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบมีศักยภาพในการใช้งานในระดับชุมชนหรือวิสาหกิจขนาดเล็ก เนื่องจากสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาการใช้งานที่ไม่ยาวนานเมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด พร้อมทั้งประเมินสมรรถนะของเครื่องและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัด จากผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการผลิตเฉลี่ย 181 กิโลกรัมต่อชั่วโมงสำหรับอาหารสัตว์อัดเม็ด และ 168 กิโลกรัมต่อชั่วโมงสำหรับปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด นอกจากนี้ระบบผสมของเครื่องให้ความสม่ำเสมอของส่วนผสมอยู่ในเกณฑ์ดี ผลการศึกษาปัจจัยด้านความชื้นของวัตถุดิบพบว่ามีผลต่อคุณภาพของเม็ดอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยระดับความชื้นวัตถุดิบ 15% ให้ค่าความทนทานของเม็ดสูงสุดทั้งในอาหารสัตว์อัดเม็ดและปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด ขณะที่การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบเป็น 18% ทำให้ความทนทานของเม็ดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นหลังการอัดเม็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความชื้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ในด้านการประเมินความ

คัมค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าเครื่องต้นแบบมีต้นทุนคงที่ประมาณ 69,900 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนของการผลิตอาหารสัตว์อัดเม็ด 22,843 กิโลกรัมต่อปี และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด 25,985 กิโลกรัมต่อปี ซึ่งเทียบเท่ากับระยะเวลาการผลิตประมาณ 124 และ 160 ชั่วโมงต่อปี หรือประมาณ 0.8–1 เดือนของการใช้งานจริงภายใต้การทำงานเฉลี่ยวันละ 8 ชั่วโมง ดังนั้น เครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดในระดับชุมชนหรือเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบทางการเกษตร ลดต้นทุนการผลิต และสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุอัดเม็ดทางการเกษตรในระดับท้องถิ่นได้

ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต: (1) พัฒนารุ่นต้นกำลังขนาดเล็กที่ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส หรือปรับลดขนาดมอเตอร์เพื่อให้เหมาะกับครัวเรือนและกลุ่มเกษตรกรรายย่อยที่เข้าถึงไฟ 3 เฟสได้จำกัด (2) ทดสอบเครื่องกับวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ เพื่อขยายขอบเขตการใช้งาน และ (3) พัฒนาระบบอบแห้งเม็ดอัดต่อเนื่องต่อยอดจากชุดอัดเม็ด เพื่อควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และยืดอายุการเก็บรักษา

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสม-อัดเม็ดแบบต่อเนื่องสำหรับการอัดโนมิตีสำหรับผลิตอาหารสัตว์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์” ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) โดยจัดสรรงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย

และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ภายใต้มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม (เลขที่สัญญา ววน.มรм 030/2568) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคามที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลองและพัฒนาเครื่องต้นแบบ ตลอดจนคณาจารย์และบุคลากรที่เกี่ยวข้องที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gamage A, Gangahagedara R, Gamage J, Jayasinghe N, Kodikara N, Suraweera P, et al. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. Farming System. 2023;1:100005.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005>
- [2] Thomas M, van der Poel AFB. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. Anim Feed Sci Technol. 1996;61:89–112.
doi:[https://doi.org/10.1016/0377-8401\(96\)00949-2](https://doi.org/10.1016/0377-8401(96)00949-2)
- [3] Touffet M, Délérís I, Bokhove J. Moisture sorption and diffusion in pelleted animal feed. Food and Bioproducts Processing. 2026;156:474–82.

- doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2026.02.001>
- [4] Chew KW, Chia SR, Yen HW, Nomanbhay S, Ho YC, Show PL. Transformation of Biomass Waste into Sustainable Organic Fertilizers. *Sustainability*. 2019;11. doi:[10.3390/su11082266](https://doi.org/10.3390/su11082266)
- [5] Romano E, Brambilla M, Bisaglia C, Pampuro N, Pedretti EF, Cavallo E. Pelletization of composted swine manure solid fraction with different organic co-formulates: effect of pellet physical properties on rotating spreader distribution patterns. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2014;3:101–11. doi:[10.1007/s40093-014-0070-2](https://doi.org/10.1007/s40093-014-0070-2)
- [6] Kaliyan N, Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*. 2009;33:337–59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- [7] Tumuluru JS, Wright C, Kenny K, Hess J. A Review on Biomass Densification for Energy Applications. In. 2011.
- [8] Behnke KC. Feed manufacturing technology: current issues and challenges. *Anim Feed Sci Technol*. 1996;62:49–57. doi:[https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01005-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01005-X)
- [9] Singh J, Gu S. Biomass conversion to energy in India—A critique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14:1367–78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.013>
- [10] Khan MI, Yasmeen T, Khan M, Hadi NU, Asif M, Farooq M, et al. Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustain Prod Consum*. 2025;54:149–89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>
- [11] Leman AM, Wahab RA, Zakaria S, Feriyanto D, Nor MIFCM, Muzarpar S. The development of mixer machine for organic animal feed production: Proposed study. *AIP Conf Proc*. 2017;1885:20158. doi:[10.1063/1.5002352](https://doi.org/10.1063/1.5002352)
- [12] Gilbert P, Ryu C, Sharifi V, Swithenbank J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*. 2009;88:1491–7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>

- [13] Sung-inthara T, Juntahum S, Senawong K, Katekaew S, Laloon K. Pelletization of soil amendment: Optimizing the production and quality of soil amendment pellets from compost with water and biochar mixtures and their impact on soil properties. *Environ Technol Innov.* 2024;33:103505. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103505>
- [14] Jan K, Riar C, Saxena D. Engineering and functional properties of biodegradable pellets developed from various agro-industrial wastes using extrusion technology. *J Food Sci Technol.* 2015;52. doi:10.1007/s13197-015-1938-5
- [15] You J, Hall K, Civiero J, Malpass MC, Tulpan D, Ellis JL. Evaluating variables affecting Pellet Durability Index (PDI) in pelleted corn-soy-based feeds for swine and poultry: A meta-analysis. *Anim Feed Sci Technol.* 2025;330:116566. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116566>
- [16] Pradhan P, Mahajani SM, Arora A. Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel.* 2021;285:119145. doi:10.1016/J.FUEL.2020.119145
- [17] Theerarattananoon K, Xu F, Wilson J, Ballard R, Mckinney L, Staggenborg S, et al. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Ind Crops Prod.* 2011;33:325–32. doi:10.1016/J.INDCROP.2010.11.014
- [18] Kaliyan N, Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy.* 2009;33:337–59. doi:10.1016/J.BIOMBIOE.2008.08.005
- [19] Serrano C, Monedero E, Lapuerta M, Portero H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology.* 2011;92:699–706. doi:10.1016/J.FUPROC.2010.11.031