

การพัฒนากระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังเพื่อให้ได้โปรตีน
เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์

**DEVELOPMENT OF THE FERMENTATION PROCESS OF CASSAVA
ROOTS TO PRODUCE PROTEIN AS AN ANIMAL FEED INGREDIENT**

สากล ทองประภา¹ ศุภรัชชัย วรรัตน์^{2*} สุรศักดิ์ จันทร์ฉาย³ และ ณัฐ นาคร⁴

¹นักศึกษา บัณฑิตศึกษาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
627191120002@dpu.ac.th

^{2*}อาจารย์ บัณฑิตศึกษาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
vorarat@dpu.ac.th

³กรรมการผู้จัดการ, บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด 109/9 หมู่4 ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมือง
ชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20130, surasak_69@yahoo.com

⁴หัวหน้างาน 8, งานบริการและควบคุมน้ำสูญเสีย 1 การประปาส่วนภูมิภาคสาขาพัตยา (ชั้นพิเศษ)
26/1 หมู่12 ตำบลหนองปรือ อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150, natnakkorn@gmail.com

Sakol Thongprapa¹, Suparatchai Vorarat^{2*}, Surasak Janchai³ and Nat Nakkorn⁴

¹Ph.D. student, Graduate Program in Engineering Management, College of
Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen
Road, Laksi, Bangkok 10210, Thailand, 627191120002@dpu.ac.th

^{2*}Lecturer, Graduate Program in Engineering Management, College of Innovative
Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road,
Laksi, Bangkok 10210, Thailand, vorarat@dpu.ac.th

³Managing Director, A-West Property Co., Ltd., 109/9 Moo 4, Huai Kapi Subdistrict,
Mueang Chonburi District, Chonburi 20130, Thailand, surasak_69@yahoo.com

⁴Supervisor Level 8, Water Loss Services and Control, Provincial Waterworks Authority,
Branch Office Pattaya (Special Level), 26/1 Moo12, Nong Prue Subdistrict, Bang Lamung
District, Chonburi 20150, Thailand, natnakkorn@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังให้ได้ตะกอนที่มีปริมาณโปรตีนเพียงพอเพื่อนำผลไปเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่ได้จากกระบวนการซึ่งนำไปใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (factorial designed) และแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยมี 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ($a \times b$ factorial in CRD) ปัจจัยที่หนึ่งที่ใช้ในกระบวนการคือ หัวมันสำปะหลังสดบด (A. a_1, a_2) 300 กิโลกรัม และหัวมันสำปะหลังสับบดหมักแบบคลุมก่อน 1 เดือน 300 กิโลกรัม ร่วมกับปัจจัยที่สองคือ มอเตอร์ใบพัดกววนความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที (B. b_1, b_2) 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน และติดตั้งปั้มน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำและตะกอนจากบริเวณก้นถังหมักให้ผสมกับอากาศจ่ายกลับไปเข้าถังหมัก โดยเติมจุลินทรีย์ที่เลี้ยงเชื้อจากจากธรรมชาติถึงละ 100 กรัม และให้อาหารเสริมอินทรีย์ถึงหมักละ 10 กิโลกรัม โดยทำซ้ำ 4 ครั้ง ($2^2 \times 4$) และบันทึกค่า อุณหภูมิ (Temp) กรด-ด่าง (pH) และออกซิเจน (DO) จนครบ 30 วัน หลังจากหยุดกระบวนการ 1 เดือน ได้ทำการกรองเพื่อเก็บรวบรวมตะกอนจากบริเวณก้นถังและที่ลอยอยู่บริเวณผิวน้ำแล้วนำไปตากแดด (Solar drying) หลังจากตะกอนที่ตากแห้งแล้วและความชื้นไม่เกิน 10% และนำไปบดให้ละเอียดและนำตัวอย่างส่งไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าร้อยละของโปรตีนหยาบที่ได้จากกระบวนการ เพื่อยืนยันและรับรองผลว่ามีองค์ประกอบของโปรตีน จากข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้แล้วนำมาวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยแรกที่ใช้ในกระบวนการ (A ทั้ง a_1 และ a_2) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ได้จากกระบวนการ ($p = 0.025$) และในส่วนการนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณโปรตีนที่ได้ในแต่ละกระบวนการรวมถึงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ (Control) พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.000$) และในส่วนการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ พบว่าปริมาณธาตุโปรตีนจากทั้ง 4 กระบวนการมีปริมาณสารอาหารอยู่ในระดับที่เหมาะสมสามารถนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์หรือเลี้ยงสัตว์ได้หลายชนิด เช่น สัตว์ใหญ่ เล็ก ปีกและสัตว์น้ำ

คำสำคัญ: กระบวนการหมัก, หัวมันสำปะหลัง, การกวน, โปรตีน

ABSTRACT

This research aims to develop a fermentation process for agricultural products to produce sludge with enough crude protein and to use the analysis results to compare the amount of crude protein obtained from the method used as an ingredient in animal feed. The experiment was carried out with a factorial design and a completely randomized design (CRD) with two factors at two levels each ($a \times b$ factorial in CRD). The factors used in the process are freshly crushed cassava roots (A. a_1, a_2), 300 kilograms, and 300 kilograms of fresh crushed and

fermented cassava roots covered for one month. Use the stirring motor at 100 rpm (B. b1, b2) with the second factor for 2 and 6 hours/day. Install a water pump to circulate water and sediment from the bottom of the fermentation tank to mix with the air sent back into the fermentation tank. Add 100 grams of naturally inoculated microorganisms to each tank and 10 kilograms of organic food supplements. Replicate four replicates ($2^2 \times 4$), and record the temperature (Temp), acid-base (pH), and oxygen (DO) every day until 30 days. After stopping the process for one month, filter to collect sediment from the bottom of the tank or float on the water's surface, then dry it under sunlight (solar drying). After the sediment has dried and the moisture is lower than 10%, grind it thoroughly, take a fine sediment sample, and send it for analysis to a certified laboratory to ascertain and certify the results of any level of protein composition. From the resulting data analyzed. It showed that the first factor used in the process (A, both a1 and a2) was the factor that affected the quantity of crude protein obtained from the process ($p = 0.025$), and in the statistical analysis to compare the average protein content obtained in each process and including those that did not go through the process (control). It was found that there were statistically significant differences ($p = 0.000$). It was found that the protein content from all four processes was at an appropriate level of nutrients and could be mixed into animal feed or fed to many types of animals including large and small animals, poultry, and aquatic animals.

KEYWORDS: Fermentation Process, Cassava Root, Stirred, Protein

1. บทนำ

ปัจจุบันเหตุการณ์ตึงเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณทะเลแดงซึ่งเป็นเส้นทางขนส่งสินค้าที่สำคัญของโลกได้ส่งผลกระทบต่อการเดินทางเรือขนส่ง รวมทั้งสถานการณ์สงคราม ในประเทศอิสราเอล ส่งผลให้การขนส่งสินค้าผ่านทะเลแดงระหว่างทวีปยุโรปแอฟริกา และทวีปเอเชีย มีความยากลำบากในการขนส่งสินค้า ซึ่งส่งผลให้สินค้ามีแนวโน้มขาดตลาด และทำให้ราคาสินค้าปรับตัวสูงขึ้น เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง และ ธัญพืชต่างๆ ซึ่งส่วนมากเป็นธัญพืชที่ใช้สำหรับผลิตอาหารสัตว์ [1] โดยราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์ในช่วงปีที่ผ่านมาเฉลี่ย ข้าวโพด 11.91 บาท ปลายุ่น (โปรตีน 60% ขึ้นไป) 53.70 บาท ปลายุ่น (โปรตีน 65% ขึ้นไป) 64.48 บาท กากถั่วเมล็ดนอก 21.26 บาท รำสด 11.46 บาท กากรำสกัดน้ำมัน 10.28 บาท ปลายุ่นข้าว 14.00 บาท และมันเส้น 9.13 บาท/กิโลกรัม [2] และในปีที่ผ่านมา “สงครามระหว่างรัสเซียและยูเครน” เป็นอุปสรรคอย่างมากในการส่งออกธัญพืชสำคัญเพราะทั้งสองประเทศเป็นผู้ส่งออกข้าวสาลีรายใหญ่ของโลก มีการส่งออกรวมกันมากถึง

1 ใน 3 ของโลก และส่งออกข้าวโพดได้รวมกันมากถึง 1 ใน 6 ของโลก สงครามครั้งนี้จึงกระทบทั้งปริมาณผลผลิตและการส่งออก ซึ่งยังไม่มีทีท่าว่าสงครามจะยุติ ทำให้ปี 2566 ระดับราคาพืชวัตถุดิบอยู่ในเกณฑ์สูงเช่นกัน ขณะเดียวกันปัจจัยด้าน “ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ” ก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของฤดูกาล ทั้งภัยแล้งหรือฝนตกชุกในพื้นที่เพาะปลูกพืชสำคัญของโลก เช่น สหรัฐฯ และบราซิล ทั้งสองประเทศนี้รวมกันผลิตถั่วเหลืองได้ประมาณ 60% ของทั้งโลก และการเกิดเหตุการณ์ฝนไม่ตกตามฤดูกาล ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตของโลกก็ลดน้อยลง ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ ราคาธัญพืชสูงขึ้น นอกจากนี้ ประเทศจีน ซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิตอาหารสัตว์รายใหญ่อันดับต้นๆ ของโลก กำลังฟื้นตัวจากโควิด-19 มีความต้องการปริมาณอาหารสัตว์เพิ่มสูงขึ้นเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ เพิ่มปริมาณเนื้อสัตว์ในประเทศ ทำให้เกิดความต้องการธัญพืชจากทั่วโลกในปริมาณมหาศาลดันราคาขายพืชวัตถุดิบให้สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้มีแนวโน้มชัดเจนว่า ต้นทุนอาหารสัตว์ ที่เกษตรกรผู้เลี้ยงต้องแบกรับภาวะที่เพิ่มขึ้น ในปี 2566 จะขยับสูงขึ้นอีก อย่างน้อย 10% [3] อีกทั้งประเทศเปรู ซึ่งเป็นผู้ผลิตและส่งออกปลาป่นที่เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์รายใหญ่ของโลก มีการประกาศห้ามจับปลาในบางพื้นที่ เนื่องจากพบว่ามีสัตว์น้ำวัยอ่อนทำให้ปริมาณการจับปลาเพื่อส่งออกวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ลดลง [4]

2. ทบทวนวรรณกรรม

การเกิดสงครามระหว่างยูเครนกับรัสเซียส่งผลกระทบทั้งปริมาณผลผลิตและปริมาณการส่งออกของธัญพืช ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีแนวโน้มโอกาสที่สงครามจะยุติ ส่งผลให้ปี 2566 ราคาพืชวัตถุดิบสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันปัจจัยด้าน “ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ” นั้นเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของฤดูกาล ทำให้เกิดปัญหาภัยแล้งและฝนตกชุกมากกว่าสภาพอากาศปกติที่เป็นอยู่ สหรัฐฯ และบราซิล เป็นประเทศที่การเพาะปลูกถั่วเหลืองที่สำคัญของโลก โดยทั้งสองประเทศมีความสามารถในการเพาะปลูกและมีผลผลิตถั่วเหลืองจำหน่ายออกสู่ตลาดรวมกันได้มากถึงประมาณ 60% ของทั้งโลก วัตถุดิบปลาป่นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นส่วนผสมของโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำมานานหลายทศวรรษ เนื่องจากมีโปรตีนสูงและกรดอะมิโนที่สมดุลที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอาหารสูง อย่างไรก็ตาม ปลาป่นเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดแต่มีความต้องการนำมาใช้เป็นจำนวนมาก แต่ก่อให้เกิดข้อกังวลด้านผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน จึงมีความพยายามหันมาใช้ทางเลือกอื่น ๆ เช่น โปรตีนจากแมลง (แมลงวันลาย) ผลพลอยได้จากสัตว์ (กระดูก ปีก ขน) พืช สาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายขนาดใหญ่ ชีวมวลจุลินทรีย์ และเศษอาหาร ในบรรดาทางเลือกเหล่านี้ ส่วนผสมโปรตีนจากพืช เช่น กากถั่วเหลือง โปรตีนถั่ว คาโนลาป่น เมล็ดทานตะวัน เมล็ดฝ้ายป่น แคะน้ำมันถั่วลิสง และอาหารจากใบพืช ถือเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและคุ้มค่า ถึงแม้ว่าต้องมีการปรับเปลี่ยนในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันเพื่อจัดการกับข้อจำกัดของวัตถุดิบเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากถั่วเหลืองที่

ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีองค์ประกอบทางโภชนาการและการย่อยได้ค่อนข้างดี โดยปัจจุบันเป็นโปรตีนจากพืชที่ใช้มากที่สุดในทดแทนส่วนผสมของปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำ แต่การเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกถั่วเหลืองมากขึ้นก็มีข้อเสียที่เพิ่มมากขึ้นตามมาด้วย คือ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการพังทลายของดินที่เกิดจากการตัดไม้ทำลายป่าเพื่อทำเป็นพื้นที่เพาะปลูกและการเพิ่มการผลิตถั่วเหลืองที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น เพื่อวัตถุประสงค์ของความมั่นคงด้านอาหารที่ยั่งยืน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมองข้ามการใช้ถั่วเหลืองในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์น้ำ และแหล่งโปรตีนทางเลือกที่อุดมสมบูรณ์ที่ไม่ค่อยมีการนำไปใช้ คือ ไบโม่สำหรับปลา โดยไบโม่สำหรับปลานี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์น้ำได้ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเพาะปลูกมันสำปะหลัง มันสำปะหลังเป็นพืชที่ใช้เวลาประมาณหนึ่งปีที่จะให้ผลผลิตหัว ไบโม่สำหรับปลาสดในปริมาณที่มีนัยสำคัญซึ่งอาจมีปริมาณมากเท่ากับผลผลิตน้ำหนักหัวมันสำปะหลัง ไบโม่สำหรับปลาเหล่านี้มักจะถูกล่อยทิ้งไว้บนพื้นที่เพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวหัวมันผลผลิตมันสำปะหลัง [5]

ปลาป่นถือเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารที่มีมาตรฐานดีที่สุดในปลาหลายชนิดการผลิตขึ้นอยู่กับปลาทะเลตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม การผลิตปลาป่นในปัจจุบันนั้นถือว่ายังไม่ยั่งยืน ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ อีกทั้งยังมีแรงกดดันทางด้านสังคมและเศรษฐกิจต่ออุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการค้นพบโปรตีนทางเลือกอื่นนั้น ช่วยให้การใช้วัตถุดิบจากปลาป่นลดลง แต่การใช้โปรตีนจากพืชในส่วนผสมอาหารสัตว์ยังมีข้อจำกัดในการนำมาใช้สำหรับปลาที่กินเนื้อเป็นอาหารบางชนิดและสัตว์น้ำ เช่น กุ้ง กุ้ง ปู มีงานวิจัยจำนวนมากที่ยืนยันว่าโปรตีนจากพืชสามารถทดแทนโปรตีนจากปลาป่นได้ แต่จะต้องมีการใช้ส่วนผสมใหม่ที่เหมาะสมและเติมธาตุอาหารเสริมเข้าช่วย เช่น เอนไซม์จากภายนอก สารประกอบเพื่อทำปฏิกิริยาทางชีวภาพ และแร่ธาตุปริมาณน้อยที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแนวทางในการลดปริมาณปลาป่นในส่วนผสมอาหารสัตว์ให้ลดลงหรือไม่เลยและจะต้องมีการคำนวณสูตรอย่างระมัดระวัง [6] ส่วนหัวมันสำปะหลังเป็นแหล่งเก็บแป้งที่มีคาร์โบไฮเดรตที่ดีเยี่ยม แต่มีข้อจำกัดสำหรับการบริโภคของมนุษย์หรือสัตว์ คือ ปริมาณไซยาโนเจนกลูโคไซด์สูง สารไซยาไนด์ (HCN) ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกด้วยการใช้วิธีการแบบดั้งเดิม ได้แก่ การใช้ตะแกรงร่อน การหมัก การต้ม หรือทำให้แห้ง [7] องค์ประกอบส่วนใหญ่ในหัวมันสำปะหลังนอกจากน้ำแล้ว ยังมีแป้งอยู่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 70 - 80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ การนำหัวมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมจะต้องทำให้แห้งเพื่อลดความชื้นก่อน เช่น อุตสาหกรรมมันเส้น อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด หรือการสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากหัวมันสำปะหลัง โดยเมื่อทำให้หัวมันสำปะหลังแห้งแล้ว ความชื้นจะมีปริมาณคงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 70 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 2.63 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 0.51 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ หัวมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนและไขมันต่ำกว่าธัญพืชชนิดอื่น หากใช้

ผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเพื่อทดแทนธัญพืช จะต้องเพิ่มปริมาณโปรตีนในสูตรอาหาร [8] ซึ่งโดยรวมในหัวมันสำปะหลังส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตส่วนโปรตีนมีในปริมาณที่ต่ำ ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการ ด้วยการพัฒนาการใช้กลยุทธ์ทางเทคโนโลยีชีวภาพหลายอย่าง เพื่อให้ได้ปริมาณโปรตีนจากหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มสูงขึ้น [9]

จากสถิติการนำเข้าอาหารสัตว์เข้ามาในประเทศไทยปี 2566 ประเทศไทยนำเข้าวัตถุดิบอาหารสัตว์ อาหารเสริมสำหรับ ผลิตภัณฑ์นมสำหรับสัตว์ วัตถุดิบเติม วัตถุดิบผสมแล้ว อาหารสัตว์เลี้ยง และอื่นๆ รวมทั้งสิ้น 9,583,480.36 ล้านบาท เป็นมูลค่ารวม 168,161.30 ล้านบาท การนำเข้าอาหารสัตว์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทวัตถุดิบผลิตอาหารสัตว์จากประเทศบราซิล ถึง 3,120,814.73 ล้านบาท คิดเป็นมูลค่า 60,003.77 ล้านบาท และสถิติการส่งออกอาหารสัตว์ในปีเดียวกันประเภทอาหารสัตว์เลี้ยง (Pet food) อาหารปศุสัตว์ ทั้งหมดรวมกัน 1,102,102.43 ล้านบาท รวมมูลค่า 97,097.47 ล้านบาท ซึ่งส่วนใหญ่ส่งไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งอาหารสัตว์และอาหารปศุสัตว์ ปริมาณรวมกัน 112,071.04 ล้านบาท มูลค่า 21,285.74 ล้านบาท และส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่น 136,793.00 ล้านบาท รวมมูลค่า 13,099.85 ล้านบาท [10]

จากปัญหาการราคาอาหารสัตว์ที่สูงขึ้นเนื่องจากมีต้นทุนมาจากวัตถุดิบที่นำมาผลิตปรับตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การผลิตไข่ไก่มีต้นทุนต่อฟองสูงถึง 3.45-3.50 บาท สูงกว่าช่วงปกติถึง 30% ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าเป็นผลพวงจากราคาธัญพืชวัตถุดิบอาหารสัตว์พุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะกากถั่วเหลืองและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญของส่วนผสมอาหารเลี้ยงไก่ไข่ โดยเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่ไข่มีข้อเรียกร้องให้รัฐเร่งหาทางแก้ไขและให้ราคาขายผลผลิตสอดคล้องกับต้นทุนที่แท้จริง เพื่อให้เกษตรกรพอมีกำไรและอยู่ได้ เนื่องจากยังมีต้นทุนอื่นๆ ที่ล้วนขยับสูงขึ้นตาม ทั้งพลังงาน ก๊าซ น้ำมันและค่าไฟฟ้า รวมถึงค่าจ้างแรงงานที่มีความจำเป็นต้องใช้ในการประกอบอาชีพเลี้ยงไก่ไข่ [11] ปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อมเพื่อเพาะปลูกและเพิ่มผลผลิตพืชที่ให้โปรตีนหลายประเภท เพื่อใช้ทดแทนโปรตีนจากปลาป่นที่ได้จากปลาทะเลตามธรรมชาติ อีกทั้งเพื่อความมั่นคงทางด้านอาหารและมีความยั่งยืนสูงสุด การนำวัสดุเหลือใช้หรือผลผลิตทางการเกษตรบางชนิดที่ประเทศไทยมีผลผลิตและส่งออกเป็นจำนวนหลายล้านตันในแต่ละปี อย่างเช่นมันสำปะหลังมาใช้ จึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่จะแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปมันสำปะหลังที่นำมาใช้เลี้ยงสัตว์ จะอยู่ในรูปของมันเส้น การทำมันเส้นจะต้องนำหัวมันสำปะหลังสดมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วผึ่งแดดให้แห้งประมาณ 3-5 วัน คุณสมบัติแห้งประมาณ 75-80 เปอร์เซ็นต์ มีพลังงานใกล้เคียงกับข้าวโพด มีโปรตีนต่ำประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และข้อจำกัดในการใช้คือ ไม่สามารถใช้มันสำปะหลังสดไปเลี้ยงสัตว์ได้โดยตรง เนื่องจากมีสารพิษคือ กรดไฮโดรไซยานิก (ยกเว้นบางสายพันธุ์) ต้องนำไปผ่านกระบวนการลดสารพิษลงก่อน ด้วยการทำเป็นมันเส้น หรือมันหมัก [12] อย่างไรก็ตาม หัวมันสำปะหลังมีอัตราส่วนโปรตีนต่อพลังงานต่ำที่สุดในบรรดาพืชที่สำคัญหลัก ๆ ของโลก นอกจากนี้ อาหารที่มีมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบโดยทั่วไปยังให้ธาตุ

เหล็ก สังกะสี วิตามินเอ และวิตามินอี น้อยกว่า 10-20% ของปริมาณที่ต้องการ โดยรวมต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่มากขึ้น เช่น การใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีระดับสารอาหารเพิ่มขึ้น [13] ดังนั้นการจะนำไปใช้จะต้องนำหัวมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพที่เหมาะสมก่อนเพื่อให้ได้สารอาหารในระดับที่เพียงพอและมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้เลี้ยงสัตว์หรือเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ร่วมกับวัตถุดิบอย่างอื่น

กระบวนการหมักแบบกวนช่วยให้อาหารจุลินทรีย์และอากาศคลุกเคล้ากันได้อย่างทั่วถึง ระบบการกวนที่มีประสิทธิภาพจะทำให้การละลายของออกซิเจนในอาหารเหลวมีค่าสูง และมีปริมาณเท่ากันทุกๆ จุดในถังหมัก การกวนอาศัยแกนกวนต่อกับใบพัด เรียกว่า Impeller ช่วยตีฟองอากาศให้มีขนาดเล็กกระจายไปยังส่วนต่างๆ และมี baffle ช่วยป้องกันการไหลวนกลับของน้ำในถังหมัก [14] อุปกรณ์การกวนเป็นส่วนหนึ่งของถังปฏิกรณ์หมัก มีหลายประเภทสำหรับให้ปฏิกิริยาในการหมัก สิ่งที่พบบ่อยที่สุดคือถังหมักแบบถังกวนหรือฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Reactor) ตัวกวนส่วนใหญ่จะมีลักษณะพิเศษคือการมีใบพัดกวนหนึ่งตัวหรือมากกว่าติดตั้งไว้กับเพลากลาง โดยปกติแล้วภาชนะเหล่านี้จะมีแผ่นกั้น เพื่อเพิ่มอัตราหมุนเวียนของของไหลและมีสปาร์เจอร์ที่อยู่ด้านล่างของถัง ซึ่งเครื่องกวนมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางในการหมักและงานหลักที่ระบบกวนต้องการ หากงานหลักคือการกระจายและทำลายฟองก๊าซ จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนสูง โดยการใช้เครื่องกวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อย่างเช่นของ Ruston (กังหัน) การกวนสามารถหมุนด้วยความเร็วรอบสูงถ้าวัสดุหมักมีความหนืดค่อนข้างต่ำ แต่สำหรับวัสดุหมักที่มีความหนืดสูงและมีความเข้มข้นของเซลล์สูงกว่าจะต้องใช้เครื่องกวนขนาดใหญ่ที่มีความเร็วรอบต่ำ เช่น เครื่องกวนไฮโดรฟอยล์ ตามหลักการแล้วสามารถสันนิษฐานได้ว่าในถังหมักที่ถูกกวนจะผสมกันอย่างลงตัว กล่าวคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น จุลินทรีย์ และผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอในทุกจุดของถังหมัก [15] ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบถังกวน (Stirred Tank Bioreactor) เป็นถังปฏิกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะกระบวนการหมักที่ให้อากาศ เพราะการดำเนินการได้สะดวก ต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพดีพอสมควร [16]

การวิเคราะห์ข้อมูล (analysis of data) เป็นการประมวลผลข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้มา ตามวัตถุประสงค์ สมมติฐาน และคำถามการวิจัยที่ตั้งไว้ เช่น การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประชากร 2 กลุ่มโดยใช้ Z หรือ t หรือการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรที่มากกว่า 2 กลุ่ม โดยใช้การทดสอบความแปรปรวนสถิติทดสอบคือ F ใช้ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ และใช้ X² ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 ชุดที่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ โดยใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ทดสอบอิทธิพลและพยากรณ์ โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอย หรืออาจจะใช้สถิติขั้นสูง เช่น MANOVA CANONICAL FACTOR-ANALYSIS DISCREMINAN การประมวลผลสามารถประมวลด้วยมือหรือเครื่อง

คอมพิวเตอร์ได้ โดยในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูล เช่น โปรแกรมสำเร็จ SPSS for Windows, MINITAB, และ SAS ที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลรวมถึงการประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [17]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการทดลองการหมักหัวมันสำปะหลังที่องค์ประกอบของโปรตีนที่น้อย ให้มีประสิทธิภาพส่งผลต่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นและเพียงพอที่จะนำผลผลิตจากกระบวนการหมักไปใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์

3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างกระบวนการทดลอง เพื่อให้ได้กระบวนการในการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่ดีและมีประสิทธิภาพ ไม่มีกลิ่นเน่าเสียจากวัสดุหมักและอาหารเสริมที่เติมลงในถังหมักที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ และที่สำคัญคือ มีความสามารถในการย่อยสลายวัสดุที่นำมาหมัก และได้ตะกอนที่มีธาตุอาหารที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์หรือใช้เลี้ยงสัตว์

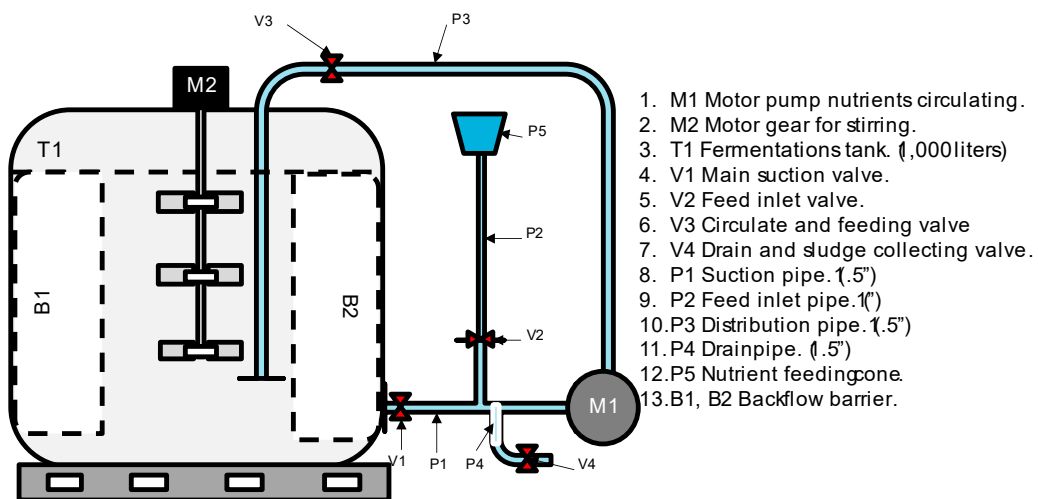
การวัดค่าพารามิเตอร์ในถังหมัก ใช้เครื่องวัด YSI Professional Plus ซึ่งเป็นแบบโมบายที่ใช้โพรบวัดด้วยการจุ่มลงในน้ำ สามารถวัดอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจน ความชื้น และค่าความเค็มในน้ำได้ หลังจากทำการเริ่มการหมักโดยเติมปุ๋ยหมักเหี่ยวในถัง (ทำงานตลอดวัน) รวมถึงเติมมอเตอร์กวนตามระยะเวลาที่ตั้งไว้และเติมวัสดุหมัก น้ำ จุลินทรีย์ ปากน้ำตาลอาหารเสริม ซึ่งในกรณีบางวันที่ค่าวัดระดับออกซิเจน (DO) ต่ำกว่า 2 ml/l จะไม่มีการเติมปากน้ำตาลและอาหารเสริมต้องรอจนกว่าค่าวัดสูงกว่า 2 ml/l จึงทำการเติมลงไป (Feed) ซึ่งการเติมปากน้ำตาลและอาหารเสริมจะเฉลี่ยเติม 30 ครั้ง จากปริมาณที่ต้องใช้ทั้งหมดในแต่ละกระบวนการหมัก (หมัก 30 วัน) โดยการวัดค่าวัดต่าง ๆ ในถังหมักเริ่มตั้งแต่วันที่เริ่มกระบวนการหมักและจดบันทึกค่าวัดที่ได้ในแต่ละวันจนครบ 30 วัน เพื่อนำข้อมูลที่ยืนยันไว้ไปวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากแต่ละถังหมัก ส่วนถังหมักควบคุม (control) ทำการวัดค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกับถังหมักในกระบวนการ แต่จะเติมวัสดุหมัก น้ำ จุลินทรีย์ รวมทั้งปากน้ำตาล และอาหารเสริมลงไปถังหมักทั้งหมดในวันแรกที่เริ่มหมัก

3.1 วัตถุดิบและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการดำเนินการวิจัยในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยใช้กระบวนการหมักแบบกวนผสมอากาศในน้ำหมักเพื่อให้ได้ตะกอนจากการย่อยสลายของวัสดุหมักที่ใช้ในกระบวนการและนำตะกอนไปตากแห้งแล้วนำไปบดเพื่อวิเคราะห์หาค่าปริมาณโปรตีน โดยมีปัจจัยหลักในการทดลองสองปัจจัยได้แก่ ปัจจัยที่หนึ่งใช้ในการทดลอง คือ ใช้หัวมันสำปะหลังสดสับหรือบด และหัวมันสำปะหลังบดหมักแบบคลุมก่อนนำไปหมักในถัง ใช้หัวมันสำปะหลังที่มีอายุตั้งแต่ 10-12 เดือน

ขึ้นไป จำนวน 300 กิโลกรัม และปัจจัยที่สองใช้ในการทดลอง คือ ไซมอเตอร์ไบพัดกวน กวนน้ำให้ผสมกับอากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และ ไซมอเตอร์ไบพัดกวน กวนน้ำให้ผสมกับอากาศเป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ในส่วนของจุลินทรีย์ใช้เป็นจุลินทรีย์ที่ได้จากการเลี้ยงต่อเชื้อจากธรรมชาติโดยนำเศษใบไม้ที่ย่อยสลายทับถมบริเวณจอมปลวก มาเลี้ยงเชื้อด้วยแ่งจากหัวมันสำปะหลังและกากน้ำตาล (100 กรัม) เติมจุลินทรีย์เหมือนกันในทุกกระบวนการ ธาตุอาหารที่เดิมเป็นธาตุอาหารเสริมจากอินทรีย์วัตถุถึงละ 10 กิโลกรัม อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหมักแบบกวนน้ำผสมอากาศประกอบไปด้วย 1) ถังหมักขนาด 1,000 ลิตร 4 ถัง 2) มอเตอร์กวนและมอเตอร์ปั๊มหมุนเวียนน้ำผสมกับอากาศ (DC 24 V) อย่างละ 4 ชุด และ 3) อุปกรณ์ต่อระบบท่อน้ำและระบบท่อเติมธาตุอาหาร

ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการหมักแบบกวนน้ำเพื่อผสมอากาศกับน้ำหมักสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยรายละเอียดของขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังต่อไปนี้ 1) เปิดมอเตอร์ (M2) เพื่อหมุนไบพัดในถังหมักให้อากาศเคล้าผสมกับน้ำให้มากขึ้นและมีความเสถียรภาพคงที่ในน้ำหมักให้นานที่สุด 2) เปิดมอเตอร์ (M1) เพื่อให้ระบบสูบน้ำทำงานและสูบน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำจากบริเวณส่วนล่างของถังหมัก (T1) ผ่านท่อ (P1) ขนาด 1.5 นิ้ว โดยเปิดวาล์ว (V1) ไว้ 3) ให้ปรับวาล์ว (V2) บริเวณจุดเชื่อมต่อกับท่อทางดูดของปั๊มน้ำเพื่อปรับปริมาณของอากาศที่เข้ามาผสมกับน้ำจากท่อ (P2) ขนาด 1 นิ้ว ในขั้นตอนนี้เติมอาหารเสริมเข้าไปพร้อมกัน 4) เปิดวาล์ว (V3) เพื่อเพิ่มออกซิเจนเข้าผสมกับน้ำร่วมกับอาหารเสริมที่ปั๊มผ่านท่อจ่ายอากาศลงถัง (P3) ขนาด 1.5 นิ้ว เมื่อน้ำไหลจากแรงดูดของปั๊มผ่านตรงจุดที่เชื่อมต่อ น้ำที่มีความเร็วสูงส่งผลทำให้เกิดสุญญากาศ โดยมอเตอร์กวนในแต่ละถังหมักและปั๊มน้ำจะทำงานจนกว่าจะหยุดการทำงาน ส่วนท่อ (P4) ขนาด 1.5 นิ้ว และวาล์ว (V4) ติดตั้งไว้เพื่อใช้สำหรับถ่ายเอาน้ำหมักและกรองตะกอนออกจากถังหมัก (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 การออกแบบกระบวนการหมักแบบกวน

3.2 ออกแบบการทดลองกระบวนการ

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยใช้ 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ และทำซ้ำเป็นจำนวน 4 ครั้ง โดยวัตถุดิบ (ปัจจัย) ที่ใช้คือหัวมันสำปะหลังสดสับหรือบด (A) ปริมาณที่ใช้ 300 กก./ถัง (a_1) และหัวหัวมันสำปะหลังสับหรือบดแล้วนำไปหมักแบบคลุ่มก่อน 300 (a_2) กก. /ถัง ร่วมกับใช้หมอดอร์กวน (B) ระยะเวลา 2 (b_1) และ 6 (b_2) ชม. /วัน

โดยแบ่งเป็น 4 รูปแบบการทดลองได้แก่

รูปแบบการทดลองที่ 1 ใช้หัวมันสำปะหลังสดที่สับหรือบด 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร [18] และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 2 ชั่วโมง/วัน

รูปแบบการทดลองที่ 2 ใช้หัวมันสำปะหลังสดที่สับหรือบด 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 6 ชั่วโมง/วัน

รูปแบบการทดลองที่ 3 ใช้หัวมันสำปะหลังสับหรือบดและหมักคลุ่มก่อน 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 2 ชั่วโมง/วัน

รูปแบบการทดลองที่ 4 ใช้หัวมันสำปะหลังสับหรือบดและหมักคลุ่มก่อน 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 6 ชั่วโมง/วัน และทุกกระบวนการเติมหาตุอาหารเสริม ถึงละ 10 กก. โดยมีทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combinations) ที่เป็นการจัดกลุ่มการทดลองที่ใช้ทั้งสองปัจจัย (2 factor) โดยแต่ละปัจจัยมีสองระดับ (2 level) การทดลองนี้เป็นแบบแฟกทอเรียลขนาด 2×2 ที่มีการรวมกันของระดับต่างๆ ของสองปัจจัย แสดงได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน

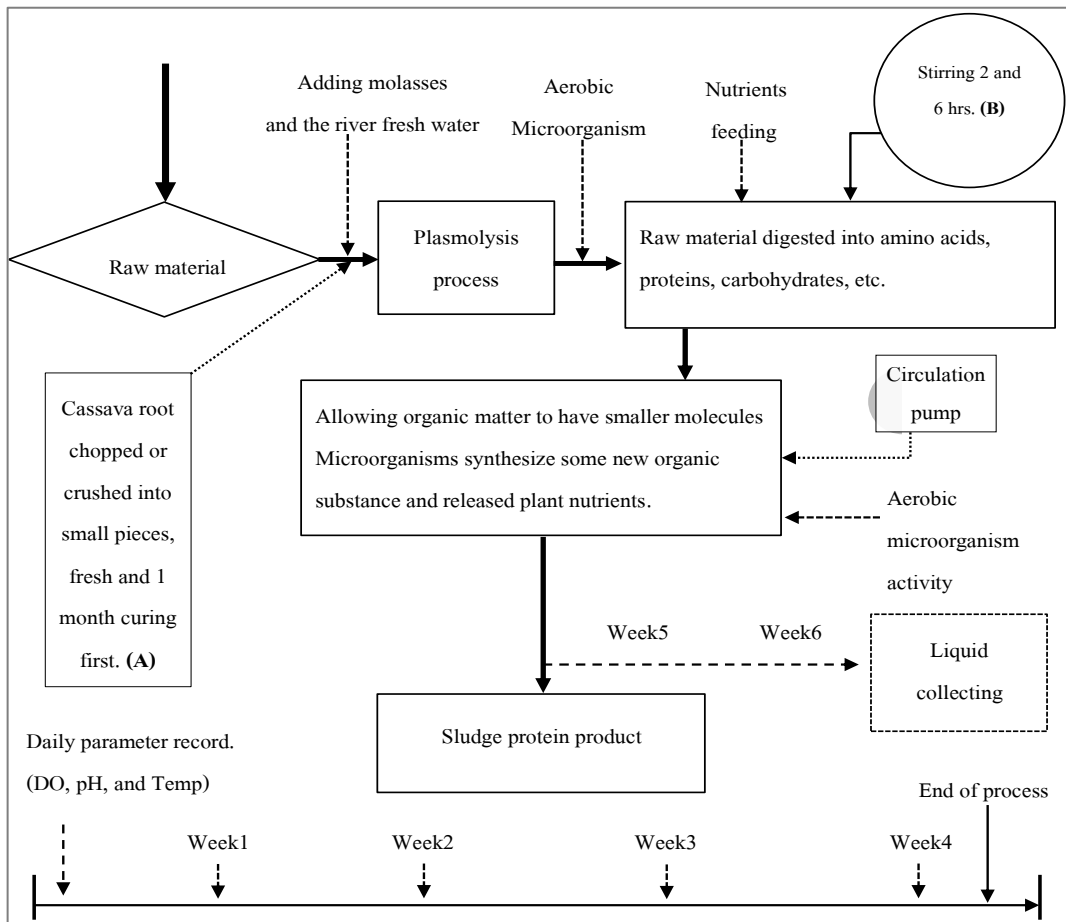
A (Cassava root)	B (Stirred)	
	b_1 (2 hrs. /day)	b_2 (6 hrs. /day)
a_1 (300 kg) fresh	a_1b_1	a_2b_1
a_2 (300 kg) pre-curing	a_1b_2	a_2b_2

จากการสุ่ม (CRD) เพื่อวางแผนการทดลองที่จะนำปัจจัยมาใช้ในการกระบวนการหมักจากทั้ง 2 ปัจจัยที่เป็นทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ คือหัวมันสำปะหลังแบบสดและแบบที่บ่มก่อนนำมาหมัก (A. a1, a2) กับระยะเวลาการกวนในถังหมักคือ 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน (B. b1, b2) โดยทำการทดลอง 4 กระบวนการหมัก ทำซ้ำ 4 ครั้ง รวมจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ($2^2 \times 4$) ซึ่งสามารถวางแผนการทดลองกระบวนการหมักได้ดังต่อไปนี้

D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม. D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม.

3.3 กระบวนการหมัก

ในกระบวนการพลาสโมไลซิส (plasmolysis) เป็นการเติมน้ำตาลเพื่อดึงน้ำเลี้ยงออกจากเซลล์ของพืชหรือสัตว์ หรืออาจใช้เกลือเพื่อช่วยในกระบวนการพลาสโมไลซิส แต่ต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม ส่วนจุลินทรีย์จะเข้าย่อยสลายเศษพืชหรือสัตว์ ทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ถูกย่อยออกมา มีโมเลกุลที่เล็กลง เพราะวัสดุอินทรีย์สารประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน และอาจจะมีการสร้างสารอินทรีย์ชนิดใหม่ให้เกิดขึ้นด้วยจุลินทรีย์ด้วยกัน กระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ ทำให้มีการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชออกมา ซึ่งในกระบวนการหมักนอกจะเติมน้ำตาลแล้วอาจต้องมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ลงไปเพิ่ม [19] เมื่อจุลินทรีย์ปล่อยธาตุอาหารพืชออกมา อย่างเช่น ธาตุไนโตรเจน โดยปริมาณธาตุไนโตรเจนร้อยละ 1 เมื่อเปลี่ยนเป็นปริมาณโปรตีนแล้ว จะได้เท่ากับร้อยละ 6.25 [20] จากนั้นเมื่อหยุดกระบวนการได้ 1 เดือนแล้วทำการกรองเอาตะกอนแยกออกจากน้ำแล้วนำตะกอนจากกระบวนการที่ได้ไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำมาบดให้ละเอียด และส่งตัวอย่างไปตรวจเพื่อวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโปรตีนในตะกอนแห้งที่ได้จากกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการหมัก

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลองว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองปัจจัยใดเป็นปัจจัยส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ (DOE analysis) โดยมี 2 ปัจจัยที่จะนำมาวิเคราะห์หาผลลัพธ์ คือ หัวมันสำปะหลังสดสับหรือบด หัวมันสำปะหลังสับหรือบดหมักแบบคลุ่มก่อน (Quality) กับการกวนในถังหมักเป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน (Quantity) จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและเคมีในแต่ละกระบวนการ ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ระหว่างกระบวนการที่ 1 (BP-1) กระบวนการที่ 2 (BP-2) กระบวนการที่ 3 (BP-3) และ กระบวนการที่ 4 (BP-4) กับกระบวนการควบคุม (C) โดยกำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นไว้ที่ระดับร้อยละ 95 และเมื่อได้ค่าความเชื่อมั่นที่ต้องการแล้วนำปริมาณร้อยละของโปรตีนที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบว่าสามารถให้เป็นอาหารสัตว์ชนิดใดได้

4. ผลการทดลอง

จากการจัดบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ค่ากรด-ด่าง (pH) และค่าออกซิเจนละลาย (DO) จากถังหมักของกระบวนการหมักมันสำปะหลังในถังหมักขนาด 1,000 ลิตร ทำการหมักโดยใช้วัสดุหมักทั้งสดและหมักแบบคลุ่มก่อนอย่างละ 300 kg ร่วมกับการกวนเป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ใช้เวลาในการหมัก 30 วัน แสดงดังนี้ และค่าเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 2

4.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรียและการไฮโดรไลซิสของสารตั้งต้น เนื่องจากการหมักจะเกิดความร้อนระหว่างการหมัก จึงต้องรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30-35 องศาเซลเซียส ในบางครั้งมีเปิดฝาทิ้งหมักเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้ดีขึ้น หรือเปิดวาล์วปรับอากาศเข้าปั๊มน้ำให้หมุนเวียนลงถังหมักให้มากขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากการบันทึกในแต่ละวันของแต่ละถังหมักในกระบวนการหมักหั่วมันสำปะหลังอยู่ในระดับอุณหภูมิปานกลาง ($25 - 40^{\circ}\text{C}$) และค่าเฉลี่ยของแต่ละกระบวนการหมักคือ ถังหมักควบคุม (C) 32.8°C ถังกระบวนการหมักที่ 1 (BP-1) 30.0°C ถังกระบวนการหมักที่ 2 (BP-2) 29.2°C ถังกระบวนการหมักที่ 3 (BP-3) 29.1°C และถังกระบวนการหมักที่ 4 (BP-4) 28.4°C

4.2 ค่ากรด-ด่าง (pH)

จากการเริ่มกระบวนการหมักในวันแรก พบว่าถังหมักกระบวนการควบคุม (C) มีค่า pH ที่ต่ำ และมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าเป็นกรดจัด และค่า pH ของถังกระบวนการหมักที่ 1 (BP-1) และถังกระบวนการหมักที่ 2 (BP-2) ที่ใช้วัสดุหมักเป็นหั่วมันสำปะหลังสดสับและบด มีค่า pH ที่เริ่มลดลงเรื่อย ๆ เป็นการบ่งชี้ว่าวัสดุหมักในถังมีความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ให้เป็นกรดอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และเมื่อการหมักผ่านไป 1 อาทิตย์ ค่า pH มีค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนเมื่อเริ่มหมักถึงกระบวนการหมักที่ 3 และถังกระบวนการหมักที่ 4 ที่ใช้วัสดุหมักเป็นหั่วมันสำปะหลังสับและบดแล้วหมักแบบคลุ่มไว้ก่อน 1 เดือน มีค่า pH ที่เป็นกลางในระดับ 6.9 และจะสูงขึ้นอีกไม่มากนัก ชี้ให้เห็นว่าวัสดุหมักในถังมีความเป็นด่างอ่อน ๆ โดยค่า pH เฉลี่ยของแต่ละกระบวนการหมักมีดังนี้ ถังหมักควบคุม (control) เท่ากับ 4.2 ถังกระบวนการหมักที่ 1 เท่ากับ 5.3 ถังกระบวนการหมักที่ 2 เท่ากับ 5.9 ถังกระบวนการหมักที่ 3 เท่ากับ 6.4 และถังกระบวนการหมักที่ 4 เท่ากับ 6.9

4.3 ค่า DO (Dissolved Oxygen)

DO มีผลโดยตรงต่อกลุ่มจุลินทรีย์ย่อยสลายวัสดุหมักที่ใช้ออกซิเจนเป็นหลักและออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักมีความสำคัญต่อการดำรงชีพและการเจริญเติบโตขยายเซลล์ของกลุ่มจุลินทรีย์ ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการควบคุม (control) เฉลี่ย 0.7 mg/l น้ำหมักในถังหมักมีลักษณะเน่าเสียและส่งกลิ่นเน่าเหม็นเปรี้ยว รวมทั้งวัสดุที่ใช้หมักไม่ย่อยสลาย และปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 1 เฉลี่ย 3.5 mg/l น้ำหมักในถังเป็นสีขาวขุ่นอมน้ำตาลมีกลิ่นเปรี้ยวเพียงเล็กน้อยและการย่อยสลายของวัสดุหมักดีพอสมควรและมีฟองบนพื้นผิวเล็กน้อย ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 2 เฉลี่ย 4.1 mg/l และมีลักษณะเหมือนกันกับน้ำหมักในถังหมักกระบวนการที่ 1 ส่วนค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 3 เฉลี่ย 4.3 mg/l น้ำในถังหมักเป็นสีดำนน้ำตาลไม่มีกลิ่นและเกิดฟองบนผิวน้ำ และค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 4 เฉลี่ย 4.4 mg/l มีลักษณะของน้ำหมักในถังหมักเช่นเดียวกันกับในถังหมักของกระบวนการที่ 3 โดยค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของแต่ละกระบวนการ ดังแสดงได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ในแต่ละกระบวนการ

Reactor tank	Control	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4
อุณหภูมิ (°C)	32.8 ±1	30 ±0.7	29.2 ±0.8	29.1 ±0.4	28.4 ±0.8
ค่ากรด-ด่าง (pH)	4.2 ±0.6	5.3 ±0.2	5.9 ±0.3	6.3±0.4	6.9 ±0.4
ออกซิเจนละลาย (mg/l)	0.7 ±0.2	3.5 ±0.3	4±0.1	4.2±0.2	4.3±0.2

4.4 ปริมาณของตะกอน

ได้จากการนำน้ำจากถังหมักแบบกวนมาตกตะกอนในกรวยอิมฮอฟฟ์ (Imhoff Cone) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เป็นระยะเวลา 30 นาที (SV30) มีค่าปริมาณที่ตกตะกอนในกรวยจากกระบวนการควบคุม (C) เท่ากับ 30 มล. กระบวนการหมักที่ 1 (BP-1) เท่ากับ 197.5 มล. กระบวนการหมักที่ 2 (BP-2) เท่ากับ 220.5 มล. กระบวนการหมักที่ 3 (BP-3) เท่ากับ 240 มล. และกระบวนการหมักที่ 4 (BP-4) เท่ากับ 280 มล. ซึ่งค่า SV30 ปกติอยู่ระหว่าง 200 – 300 มิลลิลิตร/ลิตร [21] ส่วนตะกอนแห้งที่ได้จากการกรองเอาเฉพาะตะกอน (Sludge) ไปตากแดด (Solar drying) นั้น น้ำหนักแห้ง (Dry matter) ของกระบวนการควบคุม (C, control) เท่ากับ 62.5 กก. กระบวนการหมักที่ 1 (BP-1,

bio process 1) เท่ากับ 85.5 กก. กระบวนการหมักที่ 2 (BP-2, bio process 2) เท่ากับ 83.2 กก. กระบวนการหมักที่ 3 (BP-3, bio process 3) เท่ากับ 105.7 กก. และกระบวนการหมักที่ 4 (BP-4, bio process 4) เท่ากับ 106.7 กก.

4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุโปรตีน

นำตะกอนตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียดบรรจุใส่ถุงพลาสติกแล้วส่งไปตรวจวิเคราะห์ธาตุโปรตีนหยาบ (CP) ที่ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นหน่วยงานที่ได้รับการรับรองและมีความเชี่ยวชาญทางด้านอาหารสัตว์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ของ AOAC 18th ed., 2010, Method 984.13 [22] ผลเมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณโปรตีนต่างจากกระบวนการควบคุม และสามารถนำไปเป็นส่วนผสมอาหารเลี้ยงสัตว์ได้ และปริมาณโปรตีนจาก BP-4 มีปริมาณมากที่สุดรองลงมาคือ BP-3, BP-2, และ BP-1 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างแต่ละกระบวนการหมักกับกระบวนการควบคุม (control) พบว่า BP-4, BP-3, BP-2 และ BP-1 ทั้ง 4 วิธีการหมักมีความแตกต่างของผลวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกระบวนการควบคุม ดังแสดงตามตารางที่ 3

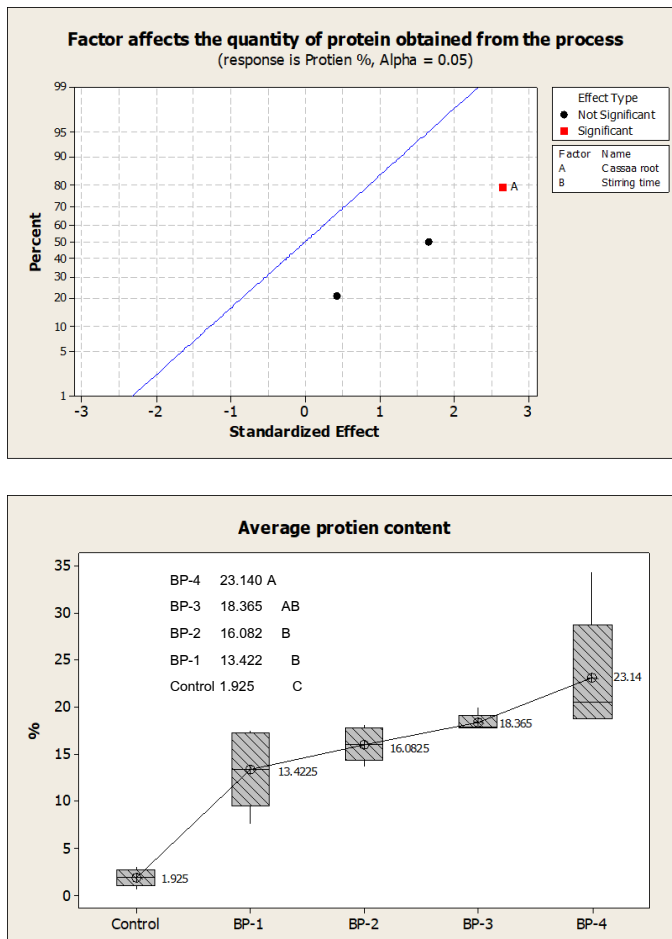
ตารางที่ 3 ปริมาณโปรตีนหยาบ

Process Characteristics\replicate	Control	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4
Protein _{r1} (%)	1.50	7.72	15.03	17.87	34.34
Protein _{r2} (%)	2.50	11.35	13.80	17.74	18.87
Protein _{r3} (%)	0.70	17.12	18.09	19.94	20.57
Protein _{r4} (%)	3.00	17.50	17.41	17.91	18.78
Mean	1.92 ±1 ^c	13.42 ±5 ^b	16.08 ±1 ^b	18.24 ±1 ^{ab}	23.14±7 ^a
P = 0.000					

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การทดลองการหมักหัวมันสำปะหลังเพื่อให้ได้ธาตุอาหารที่สามารถนำไปเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์นั้นจากการทดลองพบว่าทั้ง 4 รูปแบบการทดลองที่ใช้ หัวมันสำปะหลังสดสับหรือบดแล้วนำไปหมัก (ปัจจัย a₁, a₂) และ หัวมันสำปะหลังที่สับหรือบดหมักแบบคลุมไว้ก่อน 1 เดือนแล้วนำไปหมักในถังหมัก เป็นปัจจัยที่ส่งผลดีที่สุด ต่อปริมาณธาตุโปรตีนที่ได้จากกระบวนการ (A, p = 0.025)

ส่วนอีกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ การกวนด้วยใบกวนในถังหมักเป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง/วัน (ปัจจัย b_1 , b_2) จากผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณธาตุโปรตีนที่ได้จากกระบวนการ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้จากทุกกระบวนการทดลองกับกระบวนการควบคุม พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.000$) ดังแสดงในรูปที่ 3

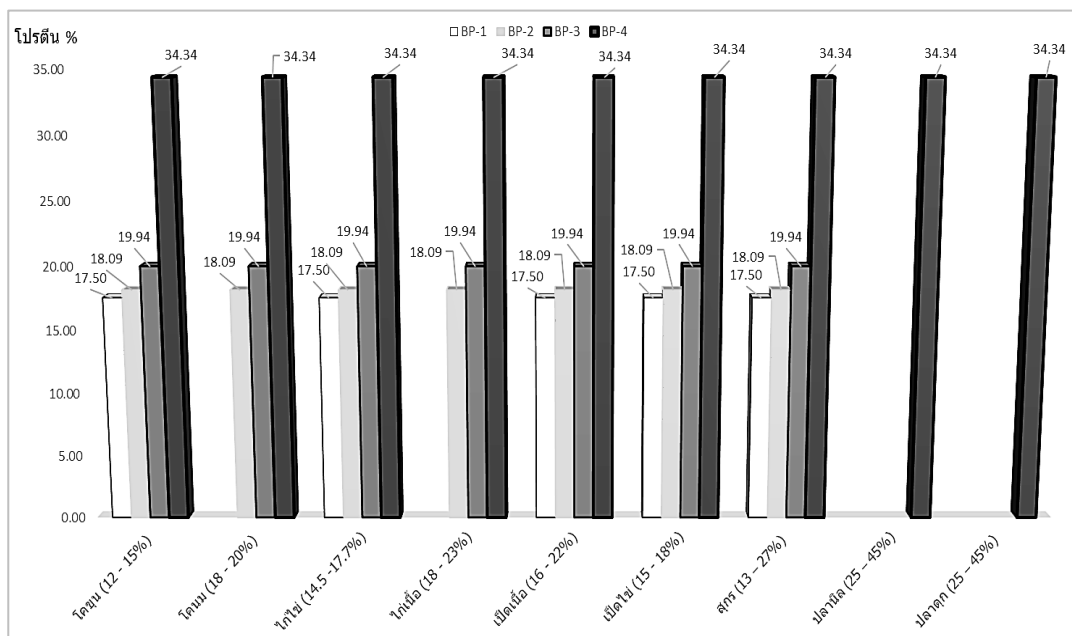


รูปที่ 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนและค่าเฉลี่ยปริมาณโปรตีน

จากการนำมาเทียบกับค่าโภชนาการอาหารสัตว์ แสดงให้เห็นว่าสามารถนำผลผลิตจากกระบวนการไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้หรือใช้เป็นส่วนผสมกับวัตถุดิบอย่างอื่นเพื่อเลี้ยงสัตว์ และจากกระบวนการ BP-4 ได้ปริมาณธาตุอาหารมากที่สุดและสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้หลายประเภท เช่น โคขุน โคเนื้อ ไก่ไข่ ไก่เนื้อ เป็ดเนื้อ เป็ดไข่ สุกร และปลา ซึ่งสัตว์เหล่านี้ถือว่าเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญ ตามตารางที่ 4 และรูปที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณโปรตีนผสมอาหารสัตว์

Animal feed \ process	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4
Crude protein %	7.72-17.50	13.80-18.09	17.74-19.94	18.78-34.34
โคขุน (12 - 15%) [23]	✓	✓	✓	✓
โคนม (18 - 20%) [24]		✓	✓	✓
ไก่ไข่สาวก่อนไข่ (14.5 -17.7%) [25]	✓	✓	✓	✓
ไก่เนื้อ (18 - 23%) [25]		✓	✓	✓
เป็ดเนื้อ (16 - 22%) [25]	✓	✓	✓	✓
เป็ดไข่ (15 - 18%) [25]	✓	✓	✓	✓
สุกร (13 - 27%) [25]	✓	✓	✓	✓
ปลานิล (25 - 45%) [26]				✓
ปลาดุก (25 - 45%) [26]				✓



รูปที่ 4 โปรตีนหายจากกระบวนการที่สามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้

5. อภิปรายผล

ผลจากการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นแนวทางที่สอดคล้องกับงานวิจัยการปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการของมันสำปะหลังและผลพลอยได้ของมันสำปะหลังที่ใช้จุลินทรีย์ในการหมัก ซึ่งนำเชื้อราและจุลินทรีย์จากธรรมชาติที่เป็นสายพันธุ์จากทวีปอเมริกา แอฟริกา และเอเชียมาใช้เป็นหัวเชื้อในการทดลองหมักหัวมันสำปะหลังบดที่มีปริมาณโปรตีนเพียง 3% ให้ได้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นเป็น 18-42% โดยจากการสังเกตพบว่าจุลินทรีย์เลือกใช้แป้งเป็นสารตั้งต้นของเจลลิตินซึ่งสามารถนำมาใช้หมักได้ และการเติมสารตั้งต้นที่เป็นเจลลิตินซึ่งให้กับจุลินทรีย์สามารถผลิตเอ็นไซม์ที่ย่อยสลายแป้งได้ดี [27] โดยรวมจากค่าที่ได้จากผลวิเคราะห์ของห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าตะกอนแห้งจากหัวมันสำปะหลังหมักจากทุกกระบวนการมีโปรตีนในปริมาณที่เพียงพอสามารถนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์เพื่อเลี้ยงสัตว์ได้ โดยรูปแบบวิธีการหมักที่ 4 (BP-4) ให้ปริมาณธาตุโปรตีนมากที่สุดคือ ร้อยละ 34.34 ซึ่งปริมาณโปรตีนที่ได้เป็นผลมาจากการใช้วัสดุหมักที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีและระยะเวลาการกวนผสมทั้งวัสดุหมัก อากาศ และอาหารเสริมจุลินทรีย์ที่นานพอในถังหมักส่งผลให้เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นตะกอนที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบมากขึ้น และการใช้วัสดุหมักมีลักษณะที่เหมือนกันในรูปแบบการหมักที่ 3 (BP-3) แต่ระยะเวลาการกวนน้อยกว่า ส่งผลให้ปริมาณตะกอนโปรตีนลดลงตามไปด้วย เนื่องจากมีปริมาณอากาศในถังหมักไม่เพียงพอที่จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศจะเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนและปลดปล่อยธาตุอาหารออกมา โดยการหมักรูปแบบที่ 3 ได้ปริมาณโปรตีนสูงสุดร้อยละ 19.54 ส่วนการใช้วัสดุหมักที่มีลักษณะสดในรูปแบบการหมักที่ 2 (BP-2) ปริมาณโปรตีนลดลงตามการใช้วัสดุในการหมักกับระยะเวลาการกวนได้ปริมาณสูงสุดร้อยละ 18.09 และรูปแบบการหมักที่ 1 (BP-1) ที่ใช้วัสดุหมักเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 2 แต่ใช้ระยะเวลาในการกวนน้อยกว่าทำให้ได้ปริมาณโปรตีนเพียงร้อยละ 17.50 จากปริมาณโปรตีนที่ได้ในแต่ละกระบวนการหมักก็ทวีผลส่งผลหลักเป็นผลมาจากการใช้หัวมันสำปะหลังที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมาเป็นวัสดุหมักเพื่อเป็นแหล่งอาหารที่ดีสำหรับจุลินทรีย์ รวมทั้งการกวนในกระบวนการหมักจะต้องใช้ระยะเวลาการกวนที่เพียงพอในถังหมักเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศและอาหารจุลินทรีย์ไปทั่วทุกพื้นที่ของถังหมักช่วยส่งเสริมให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศสามารถเจริญเติบโตแบ่งเซลล์ได้ดีและเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารอาหารออกมาในรูปของโปรตีนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น

ปริมาณโปรตีนที่ได้จากกระบวนการทดลองนี้ มีปริมาณธาตุอาหารในปริมาณที่สามารถนำไปใช้ในใช้ประโยชน์ได้ แม้ว่าจะมีปริมาณโปรตีนไม่เท่ากับแหล่งโปรตีนอย่างอื่นก็ตามก็สามารถนำมาเป็นส่วนผสมกับโปรตีนจากแหล่งอื่น เช่น ปลาป่น ปากถั่วเหลืองในอัตราที่ลดลง เพื่อนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์ และผลที่ได้จากกระบวนการทดลองอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนบ้างเนื่องจากมีปัจจัยภายนอกหลายอย่างที่ไม่สามารถควบคุมได้เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองและอาจจะส่งผลให้ปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากกระบวนการต่ำเกินไปหรือสูงมากเกินไป ซึ่งจะต้องมีการพัฒนา

ศึกษาแนวทาง (response surface methodology) ในการควบคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ให้ดีขึ้น ทั้งปัจจัยที่ส่งผลในเชิงที่เป็นผลดีและเป็นผลเสียที่เกิดขึ้นกับกระบวนการ

6. สรุปผล

ผลผลิตตะกอนโปรตีนที่ได้ โดยผ่านกระบวนการหมักที่ใช้วัตถุดิบจากหัวมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังที่บ่มก่อนนำมาหมักมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์และเพียงพอที่สามารถนำไปเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์หรือเลี้ยงสัตว์ได้ เป็นแนวทางการนำผลผลิตทางการเกษตรที่ประเทศไทยมีผลผลิตเป็นจำนวนมากมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อทดแทนอาหารสัตว์ที่ใช้ส่วนผสมจากกากถั่วเหลืองและปลาป่น

สรุปได้ว่าตะกอนโปรตีนที่ได้จากกระบวนการในงานวิจัยนี้ สามารถที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบผสมอาหารสัตว์แทนปลาป่น กากถั่วเหลืองและวัตถุดิบผสมอาหารสัตว์อย่างอื่นได้ หรือใช้ร่วมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ลดการทำลายสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติและเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้ผลิตผลทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านอาหารได้อย่างยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ในการทำการทำวิจัยครั้งต่อไปได้มีการวางแผนที่พัฒนากระบวนการหมักพืชด้วยการคอมเพรสเซอร์ในโตรเจนจากอากาศเข้าไปผสมในกระบวนการหมัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและได้สารอาหารที่มีประโยชน์ให้มากขึ้น (Air plant protein: APP)

7.2 ใช้ตะกอนโปรตีนและฮอร์โมนพืชที่ได้จากกระบวนการหมักมาทดลองเลี้ยงสัตว์ที่มีอายุมาก เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิต โดยทำการออกแบบการทดลองแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ว่ามีอิทธิพลต่อผลผลิตมากน้อยเพียงใด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทุกฝ่าย คุณนิภารัตน์ โคตะนนท์ นักวิทยาศาสตร์ ผู้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ และท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร มั่นคง หัวหน้าห้องปฏิบัติการ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ท่านอาจารย์วินิจ ต้นสกุล นักวิชาการอิสระและผู้เชี่ยวชาญทางด้านโปรตีนอาหารสัตว์ และท่านอาจารย์ที่ปรึกษาทุกท่านที่ให้ความรู้ ชี้แนะ และแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Online business news. The Red Sea crisis is likely to escalate, fearing it will affect the Thai economy and trade [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 18]. Available from: <https://www.kaohoon.com/news/651555> (In Thai)
- [2] CPF (Thailand). Raw material prices [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <https://www.cpffeed.com/price-update/> (In Thai)
- [3] Livestock News. Summary of agricultural product conditions for the weeks 11-15, 2024 [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <https://pasusart.com/category/> (In Thai)
- [4] Department of Fisheries. Product situation of duck fish and fishmeal [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <https://www4.fisheries.go.th/dof/main> (In Thai)
- [5] Olude OO, Sahu NP, Sardar P, Nuzaiiba PM. Utilization of valorized cassava leaf meal as an alternative feedstuff to defatted soybean meal in feed for rohu, Labeo rohita fingerlings. Bioresource Technology Reports 2023;22:101400.
- [6] Egerton S, et al. Replacing fishmeal with plant protein in Atlantic salmon (*Salmo salar*) diets by supplementation with fish protein hydrolysate. Scientific Reports 2020;10:4194. doi: 10.1038/s41598-020-60325-7.
- [7] Ceballos H, Sánchez T, Chávez AL, Iglesias C, Debouck D, Mafla G, et al. Variation in crude protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) roots. Journal of Food Composition and Analysis 2006;19(6-7):589-93.
- [8] Department of Science Services. Cassava and products [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <http://otop.dss.go.th/index.php/en/knowledge/informationrepack/> (In Thai)
- [9] Stupak M, Vanderschuren H, Gruissem W, Zhang P. Biotechnological approaches to cassava protein improvement. Trends in Food Science & Technology 2006;17(12):634-41.
- [10] Department of Livestock Development, statistics on import and export of animal feed, year 2023, January 1, 2024 [Internet]. 2024 [Cited 2024 Jan 10]. Available from: <http://eservice.afvc.dld.go.th/dld-portal/doLogin.do> (In Thai)
- [11] Livestock News. Animal feed prices continue to rise, January 25, 2024 [Internet]. 2024 [Cited 2024 Feb 1]. Available from: <https://pasusart.com/category/> (In Thai)

- [12] Cassava and Products Research Center, Suranaree University of Technology. Using cassava as animal feed [Internet]. 2008 [Cited 2024 Mar 18]. Available from: <http://web.sut.ac.th/cassava/> (In Thai)
- [13] Leyva-Guerrero E, Narayanan NN, Ihemere U, Sayre RT. Iron and protein biofortification of cassava: lessons learned. *Current Opinion in Biotechnology* 2012;23(2):257–64.
- [14] GIBTHAI. Fermenter & Control System [Internet]. 2024 [Cited 2024 March 20]. Available from: https://www.gibthai.com/service/note_detail/36/FermenterControl-System (In Thai)
- [15] Dionisi D. *Theory and Design of Fermentation Processes*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2021.
- [16] Moon-amart S. Stirred reactor tank. *KKU Engineering Journal* 1998;25(1):47-56. (In Thai)
- [17] Department of Agriculture. *Using statistics in agricultural research: volume 1*. Bangkok, Thailand: Department of Agriculture; 2010. (In Thai)
- [18] Thongkeawyuan A, Chairin T. Selection of carbon and nitrogen sources for protease production by *Metarhizium anisopliae* PSUM02 under solid state cultivation. *Khon Kaen Agriculture Journal* 2016;44(Suppl 1):924-29.
- [19] Sudmai P. Study on total phosphorus in bio-extract liquid [Internet]. 2003 [Cited 2024 March 20]. Available from: <http://lib.doa.go.th/multim/BB00635.pdf>. (In Thai)
- [20] Boulos S, Tännler A, Nyström L. Nitrogen-to-Protein Conversion Factors for Edible Insects on the Swiss Market: *T. molitor*, *A. domesticus*, and *L. migratoria*. *Front Nutr.* 2020 Jul 10;7.
- [21] Pollution Control Department. Wastewater treatment system [Internet]. 2020 [Cited 2024 Mar 20]. Available from: <https://www.pcd.go.th/waters/> (In Thai)
- [22] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). *Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists*. 18th ed. Rockville, USA: AOAC international; 2010.
- [23] Sumaman W. Beef cattle feed management to produce high quality meat [Internet]. Department of Livestock Development; 2022 [Cited 2024 Mar 25]. Available from: https://nutrition.dld.go.th/nutrition/images/pdf/beef_vitaya44.pdf (In Thai)
- [24] Netwichai W. Management of dairy cattle feed at different stages [Internet]. Lampang Animal Feed Research and Development Center Animal Feed Development Office, Department of Livestock Development; 2023 [Cited 2024 Jan 22]. Available from: https://region5.dld.go.th/webnew/images/stories/2560/idp2_60/12%20m%2023.pdf (In Thai)

- [25] Bulanarome K. Nutrient requirements of poultry and the use of feedstuffs replacement [Internet]. 2023 [Cited 2024 Feb 25]. Available from: <https://certify.dld.go.th/certify/images/newblsc/meeting/2561/610109/3.pdf> (In Thai)
- [26] Plaipetch P. Nutritional Management for Culturing Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). Thai Science and Technology Journal 2016;24(1):12-39. (In Thai)
- [27] Aro S. Improvement in the nutritive quality of cassava and its by-products through microbial fermentation. African Journal of Biotechnology 2008(7):4789-97.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายสากล ทองประภา นักศึกษาระดับปริญญาเอก วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ สาขาการจัดการด้านวิศวกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: 627191120002@dpu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ การพัฒนากระบวนการผลิตโปรตีนจากพืชและปลดปล่อยคาร์บอน



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์ ผู้อำนวยการหลักสูตรปริญญา ดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: vorarat@dpu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ การจัดการทางวิศวกรรม การออกแบบการทดลอง และการบำรุงรักษาทางวิศวกรรม



นายสุรศักดิ์ จันทน์ฉาย กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด ที่อยู่ 109/9 หมู่ 4 ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20130 E-mail: surasak_69@yahoo.com
งานวิจัยที่สนใจ การวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองระบบพลังงาน การปลดปล่อยคาร์บอนและเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม



นายณัฐ นาคกร หัวหน้างาน 8 งานบริการและควบคุมน้ำสูญเสีย 1 การ
ประปาส่วนภูมิภาคสาขาพัตยา(ชั้นพิเศษ) ที่อยู่ 26/1 หมู่12 ตำบลหนองปรือ
อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150 E-mail: natnakkorn@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ การวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองระบบพลังงาน การ
วิเคราะห์การปลดปล่อยคาร์บอน การวิเคราะห์โครงข่ายท่อประปา และ
เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

Article History:

Received: February 10, 2024

Revised: August 8, 2024

Accepted: August 9, 2024