



การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมะม่วงสำหรับการออกแบบสร้างเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง Study on Physical Properties of Mango for Design and Fabrication Picked Mango Cutting and Peeling Machine

ณฤตล พูนรัตน์¹, เกียรติกร มีถาวร¹, กิตติยา วงศ์สกุลสุขกุล², ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์³, สิรินาถ น้อยพิทักษ์^{3*}
Naridol Paunrat¹, Kriengkrai Meethaworn¹, Kittiya Wongsakulsukkul², Siwalak Pathaveerat³,
Sirinad Noypitak^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและการจัดการ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม 73000

¹Agricultural Innovation and Management Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000

²สาขาวิชาการจัดการอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม 73000

²Food Management Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000

³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม 73140

³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen campus, Nakhon Pathom 73140

*Corresponding author: Tel.: +66-851-755-727, Fax: +66-0-3435-1896, E-mail: fengsn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของมะม่วงแก้วผลสดและผลดอง ด้วยการวัดขนาดของผลมะม่วง จากการทดสอบแรงเฉือนเนื้อมะม่วงแบบตามยาวผลและตามขวางผล และการทดสอบความแน่นเนื้อของมะม่วงแบบปอกเปลือกและแบบไม่ปอกเปลือก ได้ใช้ข้อมูลเหล่านี้ออกแบบเครื่องหั่นและปอกมะม่วงดอง จากขนาดของผลมะม่วงที่วัดได้สามารถกำหนดระยะห่างของใบมีดการหั่นได้ 1.5 cm จะได้ชิ้นเนื้อที่มีขนาดที่เหมาะสม แรงที่กระทำกับเนื้อมะม่วงสามารถทำให้ทราบถึงแรงในการหั่นเนื้อมะม่วง และสามารถออกแบบกลไกชุดปอกให้สามารถกดชิ้นมะม่วงดองเป็นระนาบให้กับใบมีดปอก เครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองถูกออกแบบสร้างและทดสอบใน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 การหั่นชิ้นมะม่วง ที่ความเร็วรอบชุดใบมีดหั่น 80 rpm มีอัตราการทำงาน 105.61 kg h⁻¹ และรูปแบบที่ 2 ใช้งานในกระบวนการหั่นร่วมกับการปอกเปลือกชิ้นเนื้อมะม่วงดอง ด้วยความเร็วรอบชุดใบมีดหั่น 80 rpm มุมใบมีดปอกที่ 2° และความเร็วเชิงเส้นสายพานตัวล่างสำหรับลำเลียงชิ้นมะม่วงดองและสายพานชุดลูกกลิ้งตัวบนที่ระดับ 0.06 m s⁻¹ มีประสิทธิภาพการปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง 83.90% และอัตราการทำงาน 48.70 kg h⁻¹

คำสำคัญ: มะม่วง, มะม่วงดอง, เครื่องหั่น, เครื่องปอก, สมบัติทางกายภาพ

Abstract

The objective of this research was to study the physical characteristics of fresh and pickled Kaew mango by measuring the size of the mango. The shear strength of the mango pulp was tested on longitudinal and transversal of the fruit, and the firmness test of the pulp was done and compared between peeling and unpeeling fruit. These data were used to design a pickled mango cutting and peeling machine. Based on the measured size of the mango fruits, a blade spacing of 1.5 cm was determined for slicing the mango pulp into optimal size pieces. The action force on the mango pulp could reveal the cutting force of the mango flesh and the peeling mechanism could be designed to press the pickled mango flesh into a plane for the peeling blade. The pickled mango cutting and peeling machine was designed, built and tested in 2 functional forms. The first form involved cutting the mango pieces at a blade rotation speed of 80 rpm, achieving an operational rate of 105.61 kg h⁻¹. The second form involved simultaneous cutting and peeling of the pickled mango pieces, with a blade rotation speed of 80 rpm, a peeling

Received: August 10, 2023

Revised: May 11, 2023

Accepted: May 15, 2023

Available online: January 27, 2024

angle of 2° , a lower belt conveyor speed of 0.06 m s^{-1} for transporting the mango and an upper roller belt conveyor. the peeling efficiency was 83.90%, and an operational rate was 48.70 kg h^{-1} .

Keywords: mango, pickled mango, cutting machine, peeling machine, physical properties.

1 บทนำ

มะม่วงไทย เป็นที่นิยมในตลาดต่างประเทศ เนื่องจากผลผลิตที่มีตลอดทั้งปี มีหลากหลายพันธุ์ คุณภาพดี รสชาติหอมหวาน และรูปลักษณะสวยงาม จึงครองใจผู้บริโภค จากสถิติการส่งออกในปี 2565 ไทยส่งออกมะม่วงไปต่างประเทศ จำนวน 154,000 Tons มีมูลค่าการส่งออกถึง 6,400 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) มะม่วงตามฤดูกาลรอบปีมักจะมีผลผลิตจำนวนมากและล้นตลาด การแปรรูปจึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่ช่วยขยายตลาดและถนอมอาหารให้สามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น (อุษาพร, 2557) มะม่วงแก้วเป็นอันดับหนึ่งในการนำมาแปรรูปเป็นมะม่วงดอง เพราะมีเนื้อแน่นมีปริมาณเนื้อมาก เส้นใยน้อย มีสีและรสชาติเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค โดยการดองจะใช้ระยะเวลาประมาณ 3 weeks ถึง 1 month (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565) การจำหน่ายมะม่วงดองมี 2 รูปแบบ คือ แบบเป็นผลทั้งลูก และแบบปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้น แต่ด้วยมะม่วงดองมีปริมาณที่มาก ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องใช้แรงงานสำหรับการปอกเปลือกและหั่นขึ้นเพื่อจำหน่ายมาก และมักพบปัญหาความไม่ชำนาญในการปอกและหั่นขึ้นมะม่วงดอง ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาฝึกฝนมากและเกิดความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันยังขาดการพัฒนาเครื่องปอกมะม่วงดองไว้ใช้ภายในประเทศ ส่วนเครื่องปอกเปลือกมะม่วงที่นำเข้ามีราคาสูง

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์เป็นกระบวนการสำคัญเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล (Mahmoud et al., 2022) ในการออกแบบเครื่องหั่นและปอกเปลือกขึ้นมะม่วงดองอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการศึกษาการประเมินมะม่วงแก้วเพื่อการแปรรูป ซึ่งความแน่นเนื้อที่วัดได้บอกถึงเนื้อที่ไม่แน่นไม่ละเอียดเป็นลักษณะที่ต้องการของอุตสาหกรรมแปรรูป (ลำพอง, 2548) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีการศึกษาเครื่องหั่นขึ้นมันเส้นด้วยการกำหนดตัวแปร 2 ตัวแปร ในการทดสอบ คือ ความเร็วเพลาชับใบมีดและขนาดของหัวมันสำหรับหลัง 3 ระดับ ให้อัตราการทำงาน $1,457.4 \text{ kg h}^{-1}$ มีประสิทธิภาพการหั่นขึ้นมัน 85.6% (วิรัตน์, 2556) และเครื่องปอกมะม่วงดองมีออกแบบเป็นใบมีดจานหมุนในการปอก พบว่าความเร็วรอบใบมีดปอก 200 rpm ความสูงใบมีด 3 mm ความเร็วใบกวน 65 rpm มีอัตราการทำงาน 60 kg h^{-1} ซึ่งทำงานสูงกว่าแรงงานคนปอก 2.23 เท่า ทั้งนี้การปอกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ใกล้เคียงกับการปอกด้วยแรงงานคน และมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน (อิศราวุฒิ, 2562)

คุณสมบัติเหล่านี้ เช่น ขนาดทางกายภาพของมะม่วงแก้ว เนื้อเยื่อ ความแข็งแรง และโครงสร้างภายใน เป็นต้น นอกจากจะมีผลต่อกระบวนการดองมีผลต่อกระบวนการดองแล้ว ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น ระยะห่าง

ระหว่างใบมีดสำหรับการหั่น ขนาดช่องลำเลียงขึ้นมะม่วงสู่กลไกชุดปอก แรงกดขึ้นมะม่วงดองเข้าสู่ใบมีดปอกสำหรับเครื่องหั่นและปอกเปลือกขึ้นมะม่วงดองได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการดองมะม่วงแก้วแล้วออกแบบสร้างทดสอบเครื่องหั่นและปอกเปลือกขึ้นมะม่วงดอง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพก่อนและหลังการดอง โดยใช้มะม่วงแก้วที่มีอายุเก็บเกี่ยว 13-17 week หลังดอกบาน (ภคินีและคณะ, 2532) โดยมะม่วงดองผ่านกระบวนการดองด้วยน้ำเกลือและน้ำปูนใสเรียบร้อยแล้ว ทำการเก็บตัวอย่างมาจากตลาด ปทุมมงคล จังหวัดนครปฐม โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

2.1 การวัดขนาดของมะม่วง

การวัดขนาดของมะม่วงผลสดและผลดอง ประกอบด้วย ความยาว (Length) ความกว้าง (Width) 3 ตำแหน่ง คือ ระยะ A B และ C ตามลำดับ ดัง Figure 1 และชั่งน้ำหนัก (Weight) ของผลมะม่วงด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง (PA4102, OHAUS, USA)

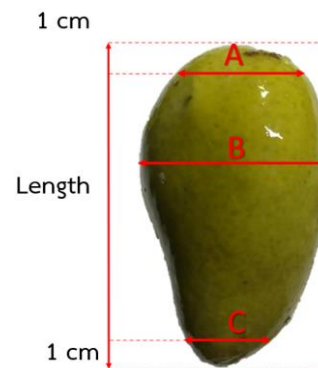


Figure 1 The position of mango size measurement.

มะม่วงถูกตัดส่วนหัวขึ้นมะม่วงที่ตำแหน่ง A และตัดส่วนท้ายผลมะม่วงที่ตำแหน่ง C ประมาณ 1 cm ออกก่อนการแบ่งเนื้อมะม่วงออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ เนื้อส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 ส่วนที่ 3 ส่วนที่ 4 เพื่อวัดความหนาขึ้นเนื้อมะม่วง ณ ตำแหน่งที่หนาที่สุดของชิ้นนั้นๆ และขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาที่สุดของเมล็ดส่วนที่ 5 ดัง Figure 2

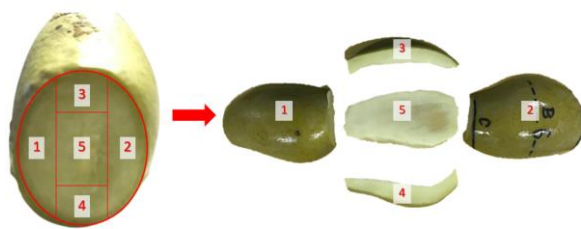


Figure 2 The position to divide the pulp of mango to measure the size of the pulp.

2.2 การทดสอบแรงเค้นในการตัดชิ้นมะม่วง

การทดสอบแรงเค้นในการตัดชิ้นมะม่วงพันธุ์แก้วผลสด จำนวน 20 ผล และผลดอง จำนวน 20 ผล เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างชิ้นเนื้อมะม่วงสำหรับการทดสอบ โดยมะม่วงถูกนำเมล็ด (ส่วนที่ 5) ออกจากผลด้วยเครื่องหั่นมะม่วงอเนกประสงค์ทำให้ได้ชิ้นเนื้อส่วนที่ 1 ชิ้นเนื้อส่วนที่ 2 (Figure 2) จากนั้นนำชิ้นเนื้อมาหั่นเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่ขนาดความกว้าง และความยาว ความหนา ด้านละ 10 mm x 10 mm x 2 mm ตามลำดับ (ปานมนัส, 2554) ตัวอย่างชิ้นเนื้อมะม่วงถูกวางตามยาวผล (ขนานเส้นใย) และตามขวางผล (ขวางเส้นใย) กับใบมีด แล้วทดสอบแรงเค้นด้วยเครื่อง Texture Analyzer (รุ่น LR5K, Lloyd instrument, Fareham, Hants, England) โดยหัวตัดแบบใบมีด Warner-Bratzler Shear blade with a rectangular notch ดัง Figure 3 ใช้หัวโหลดเซลล์ 500 N ความเร็วหัวกด 60 mm min⁻¹ และระยะกด 4 mm บันทึก ค่าพลังงานในการเค้น (Work to maximum load) และ ค่าความแข็ง (Stiffness) เพื่อเปรียบเทียบแรงเค้นในการตัดชิ้นมะม่วงสดและมะม่วงดอง (ปานมนัส, 2554)



Figure 3 Cutting force measurement of mango using a texture analyzer machine.

2.3 การทดสอบความแน่นเนื้อของมะม่วง

การทดสอบความแน่นเนื้อมะม่วงพันธุ์แก้ว ซึ่งการทดสอบแบ่งออก 2 รูปแบบ คือ ผลมะม่วงแบบปอกเปลือกและ แบบไม่ปอกเปลือก โดยมะม่วงที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ลักษณะ คือ ผลสดจำนวน 40 ผล และผลดองจำนวน 40 ผล สำหรับการทดสอบความแน่นเนื้อด้วยเครื่อง Universal testing machine; UTM (รุ่น 5567 Instron Engineering Co, High Wycombe, England) ดัง Figure 4 โดยหัวกดแบบปลายหน้าตัดเรียบ ขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัด 1.6 mm ความเร็วในการเจาะ 0.2 mm s⁻¹ (Sirisomboon et al., 2011) แล้วบันทึกค่าแรงสูงสุดในการกด (*Fmax*) และระยะที่วัสดุแตก (*Deformation*) และคำนวณค่าความแน่นเนื้อ (*Firmness*) ดังสมการที่ (1)

$$(\text{Firmness, N}\cdot\text{mm}^{-1}) = \frac{F_{\text{max}}}{\text{Deformation}} \quad (1)$$

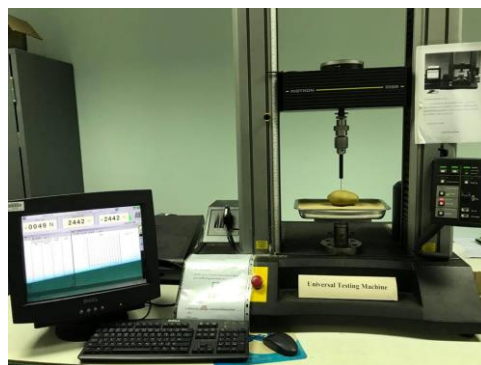


Figure 4 Firmness measurement of mango using a universal testing machine.

2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมะม่วงแก้วก่อนและหลังการดอง

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพในลักษณะผลสดและผลดองของมะม่วงแก้ว ได้แก่ การวัดขนาดผลของมะม่วง การทดสอบแรงเค้นในการตัดชิ้นมะม่วง และค่าการทดสอบความแน่นเนื้อของมะม่วง เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยโปรแกรม SPSS version 28 (IBM; Armonk, NY, USA) แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบและสร้างเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง

2.5 การออกแบบและสร้างเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง

การออกแบบเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองมีเกณฑ์การออกแบบตามความต้องการปอกเปลือกมะม่วงดองที่ผ่านกระบวนการนำเมล็ดออกจากผลแล้วได้เป็นชิ้นเนื้อลักษณะเช่นเดียวกับส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ใน Figure 2 ที่ยังคงติดเปลือกมะม่วงอยู่ โดยเครื่องสามารถหั่นชิ้นมะม่วงที่ยังไม่ปอกขาดได้ตลอดความยาวผล เมื่อหั่นเป็นชิ้นแล้วสามารถไหลเข้าสู่กระบวนการปอกเปลือกได้ สามารถแยกเนื้อมะม่วงดองและเปลือกมะม่วงดองออกจากกันหลังปอกด้วยใบมีด โดยชิ้นเนื้อที่ปอกเปลือกแล้วต้องคงความสวยของชิ้นและคงสภาพเนื้อชิ้นไม่แตกหรือเสียหาย ซึ่งเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองสามารถแยกส่วนในการใช้งานได้ เช่น ใช้เฉพาะการหั่นมะม่วงดองให้เป็นชิ้น หรือ ใช้งานร่วมกันระหว่างส่วนหั่นและส่วนปอกเปลือก

การออกแบบและสร้างเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง ดัง Figure 5 ประกอบด้วยการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนหั่นเนื้อมะม่วงต้องเป็นชิ้น และส่วนปอกเปลือกชิ้นเนื้อมะม่วงต้อง

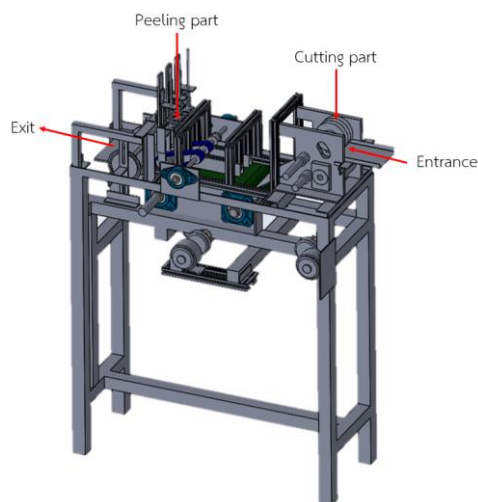


Figure 5 Drawing of pickled mango cutting and peeling machine.

ส่วนหั่นเนื้อมะม่วงต้อง ดัง Figure 6 ประกอบด้วย ชุดใบมีดสแตนเลสกลมแบบ 2 คม จำนวน 4 ใบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 cm ความหนา 0.1 cm ทำหน้าที่หั่นชิ้นมะม่วงต้อง แต่ละใบมีดมีระยะห่างระหว่างใบมีด 1.5 cm ดัง Figure 6 เพื่อกำหนดขนาดของชิ้นมะม่วงต้อง ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ชิ้นมะม่วงต้องใกล้เคียงกับที่จำหน่ายอยู่ในท้องตลาด ชุดลูกกลิ้งตัวล่างเป็นพลาสติกวิศวกรรม (Superlene) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 cm ความยาว 11 cm ทำหน้าที่เป็นฐานการหั่นเนื้อมะม่วงต้อง และพาชิ้นเนื้อมะม่วงต้องไปสู่ ถาดรับชิ้นมะม่วงต้อง ถาดรองรับชิ้นเนื้อมะม่วงหลังการหั่นจะมี 2 รูปแบบการทำงาน กรณีที่ 1 หั่นชิ้นมะม่วงต้องที่ปอกเปลือกแล้ว จะมีถาดรองรับเพียง 1 ชั้นรองรับและไหลลงสู่สายพานลำเลียง แต่ในกรณีที่ 2 จะเป็นการหั่นชิ้นเนื้อมะม่วงต้องที่ยังไม่ได้ปอกเปลือก ถาดรองรับมี 2 ชั้นในการรับชิ้น มะม่วงต้องซึ่งถูกหั่นเป็น 5 ชิ้น โดยชิ้นมะม่วงต้องจะไหลลงสู่สายพานลำเลียง ที่มี 3 ช่องในการปอกเปลือกชิ้นมะม่วงต้อง

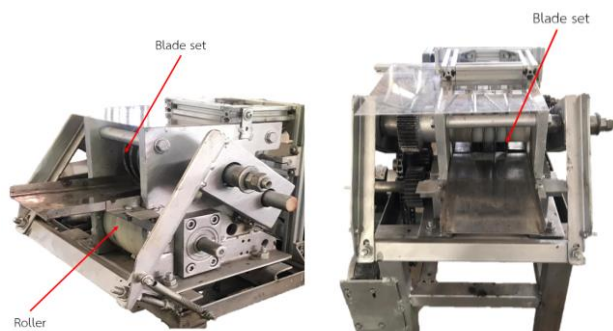


Figure 6 The part of mango cutting machine.

ส่วนการปอกเปลือกชิ้นเนื้อมะม่วงต้อง ดัง Figure 7 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) สายพานชุดลูกกลิ้งตัวบน 2) ชุด

สายพานลำเลียง และ 3) ชุดใบมีดปอก การทำงานชิ้นมะม่วงต้องที่ถูกหั่นเป็นชิ้นแล้วจะลำเลียงมาชุดปอกเปลือก ด้วยสายพานลำเลียงเป็นชนิดอุตสาหกรรมอาหารแบบผิวขรุขระ ที่มีขนาดความกว้าง 16 cm โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 84 cm ทำหน้าที่ลำเลียงและดึงชิ้นเนื้อมะม่วงต้องเข้าสู่ชุดใบมีดปอก และหลังถูกปอกจะทำหน้าที่ดึงเปลือกของมะม่วงต้องออก และชุดใบมีดปอกขณะที่ชิ้นมะม่วงต้องเข้าสู่ชุดใบมีดปอก สายพานชุดลูกกลิ้งตัวบนเป็นสายพานชนิดอุตสาหกรรมอาหาร จำนวน 3 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก ที่ทำจากพลาสติกวิศวกรรม (Superlene) ลูกกลิ้งลูกที่ 1 ขนาด 2.5 cm ทำหน้าที่ขับเคลื่อนสายพานในทิศทางเข็มนาฬิกาให้กับลูกกลิ้งลูกที่ 2 โดย มีขนาด 4 cm ติดกับลูกปืน linear guide และสปริง ทำหน้าที่กดชิ้นเนื้อมะม่วงต้องที่ระดับความหนาที่แตกต่างกันและดึงชิ้นมะม่วงต้องขณะปอกเปลือก ชุดใบมีดปอกเป็นใบมีดสองคมสามารถปรับระยะใบมีดและมุมใบมีดปอกได้ หลังจากปอกชิ้นเนื้อมะม่วงต้องชิ้นเนื้อจะอยู่ด้านบนชุดใบมีด ส่วนเปลือกจะออกมาทางด้านล่างของใบมีด

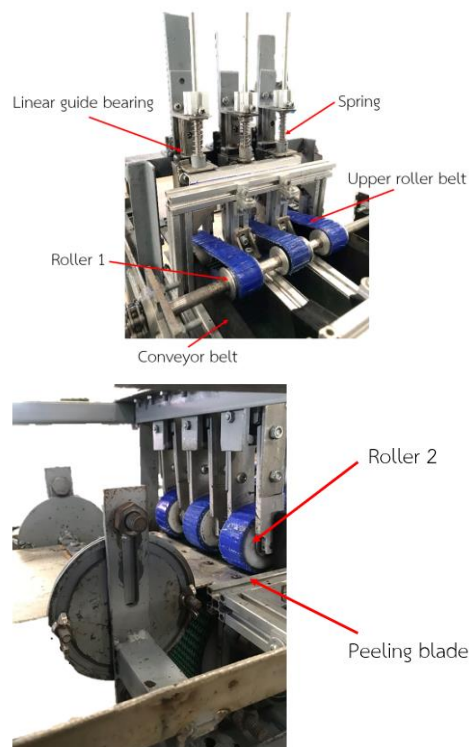


Figure 7 The part of mango peeling machine.

2.6 การทดสอบสมรรถนะเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงต้อง

2.6.1 การทดสอบเฉพาะเครื่องหั่นชิ้นมะม่วงต้อง

ทดสอบด้วยชิ้นมะม่วงต้องที่ปอกเปลือกและเอาเมล็ดออกแล้ว จำนวน 72 ผล ที่ความเร็วรอบชุดใบมีดหั่น 3 ระดับ คือ 80 100 และ 120 rpm หรือที่ความเร็วเชิงเส้น 0.3969 0.5462 และ 0.5969 m s^{-1} ซึ่งเป็นช่วงความเร็วที่ชิ้นมะม่วงต้องไม่ติดค้างในช่องทางออกชิ้นเนื้อมะม่วงหลังจากการหั่น ทดสอบครั้งละ 8 ผล

(ประมาณ 1 kg) และระดับละ 3 ชั่วโมงเพื่อคำนวณหาอัตราการการทำงาน kg h^{-1}

แล้วการทดสอบเฉพาะส่วนหั่นชิ้นเนื้อมะม่วงดอง ทดสอบผลของระดับความเร็วรอบชุดใบมีดต่ออัตราการการทำงาน และเปอร์เซ็นต์การได้ขนาดชิ้นมะม่วงดองที่เหมาะสม เปอร์เซ็นต์การหั่นได้เศษชิ้นมะม่วงดอง ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One-way ANOVA แล้ววิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยโปรแกรม SPSS version 28 (IBM; Armonk, NY, USA)

2.6.2 การทดสอบเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วง

ทดสอบด้วยมะม่วงดองแบบยังไม่ปอกเปลือกและหั่นเอาเมล็ดออกแล้ว การทดสอบจะใช้เนื้อมะม่วงดองในการทดสอบครั้งละ $0.5 \pm 0.05 \text{ kg}$ โดยทดสอบความเร็วรอบเชิงเส้นของชิ้นเนื้อมะม่วงดองที่ผ่านสายพานลำเลียงตัวล่างและสายพานชุดลูกกลิ้งตัวบน 3 ระดับ ที่ 0.04 m s^{-1} , 0.05 m s^{-1} และ 0.06 m s^{-1} ซึ่งเป็นช่วงความเร็วที่สามารถดึงชิ้นมะม่วงเข้าสู่ใบมีดได้สำเร็จ และทดสอบมุมใบมีดในการปอก 2 ระดับ เนื่องจากตัวใบมีดอยู่ตำแหน่งระหว่างสายพานลำเลียงและสายพาน ชุดลูกกลิ้งตัวบนซึ่งมีระยะที่น้อย การทดสอบด้วยมุมที่มากอาจทำให้เกิดความเสียหาย เพราะฉะนั้นจึงทำการทดสอบที่มุมใบมีด 2° และ 4° โดยทดสอบระดับละ 3 ชั่วโมง นำชิ้นเนื้อมะม่วงดองที่ผ่านการปอก และเปลือกที่ปอกออกแล้วมาชั่งน้ำหนักและนำชิ้นมะม่วงดองที่ผ่านการทดสอบมาถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล (A2300, Canon, China) แล้วนำภาพถ่ายไปคิดเปอร์เซ็นต์การปอกเปลือกเฉลี่ย ด้วยโปรแกรม Image J (1.52a, USA) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ที่ปอกได้

การทดสอบส่วนหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองทดสอบผลของระดับความเร็วรอบชุดสายพานลำเลียงและชุดลูกกลิ้งติดสายพานซึ่งเป็นความเร็วเชิงเส้น 3 ระดับที่ 0.04 m s^{-1} , 0.05 m s^{-1} และ 0.06 m s^{-1} กับมุมใบมีดปอก 2 ระดับ ที่ 2° และ 4° ต่อเปอร์เซ็นต์การปอกเปลือกได้ ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี completely randomized design (CRD) แบบ 3×2 factorial แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยการทดสอบแบบ Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยโปรแกรม SPSS version 28 (IBM; Armonk, NY, USA)

2.7 การทดสอบเปรียบเทียบอัตราการทำงานคนปอกกับเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง

ทำการทดสอบเปรียบเทียบอัตราการการทำงาน แบ่งเป็นการพิจารณาการทดสอบอัตราการการทำงานเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องหั่นกับแรงงานคนในการหั่น และส่วนของเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองกับแรงงานคนในการหั่นและปอก

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการวัดลักษณะทางกายภาพของผลมะม่วงแก้วในลักษณะผลสดและผลดอง

ผลการวัดลักษณะทางกายภาพขนาดผลสดและผลดอง พบว่ามะม่วงผลดองมีขนาดผล ความยาวของผล ขนาดชิ้นเนื้อของมะม่วง และน้ำหนักมากกว่ามะม่วงผลสด น้ำหนักของมะม่วงดองที่มีความแตกต่างกันมากกับมะม่วงสดนั้น เนื่องจากน้ำเกลือที่แทรกซึมในกระบวนการหมักดอง มีเพียงส่วนขนาดของเมล็ดมะม่วงสดที่มีขนาดมากกว่ามะม่วงดอง ดัง Table 1

Table 1 Physical characteristics analysis of fresh Mango and pickled mango.

Fruit size	Type of mango	
	Fresh mango (Average $\pm$ SD)	Pickled mango (Average $\pm$ SD)
Maximum width of position A (mm)	51.69 $\pm$ 8.78	52.94 $\pm$ 3.26
Maximum width of position B (mm)	61.33 $\pm$ 3.21	68.96 $\pm$ 2.67
Maximum width of position C (mm)	40.18 $\pm$ 3.79	46.47 $\pm$ 3.17
Length of fruit (mm)	99.50 $\pm$ 4.29	108.60 $\pm$ 4.55
Weight (g)	181.24 $\pm$ 22.30	251.52 $\pm$ 25.58
Thickness of fruit pulp part 1 (mm)	13.25 $\pm$ 1.98	18.99 $\pm$ 1.38
Thickness of fruit pulp part 2 (mm)	12.13 $\pm$ 1.54	17.75 $\pm$ 2.97
Thickness of fruit pulp part 3 (mm)	8.33 $\pm$ 3.11	11.73 $\pm$ 2.18
Thickness of fruit pulp part 4 (mm)	8.75 $\pm$ 1.61	11.97 $\pm$ 1.84
Seed length (mm)	87.98 $\pm$ 5.02	84.67 $\pm$ 8.42
Seed width (mm)	44.41 $\pm$ 2.81	43.82 $\pm$ 5.37
Seed thickness (mm)	26.21 $\pm$ 2.92	21.61 $\pm$ 2.36

จากข้อมูลลักษณะทางกายภาพใน Table 1 ของทั้งมะม่วงสดและมะม่วงดอง พบว่าตำแหน่งที่กว้างที่สุด (Maximum width of position) ของผลอยู่ในตำแหน่ง B มีความกว้างเฉลี่ยสูงสุด 68.96 $\pm$ 2.67 mm นำไปสู่การออกแบบช่วงความกว้างของส่วนหั่นชิ้นมะม่วงดองและระยะใบมีดหั่นเนื้อมะม่วง ในส่วนข้อมูลความยาวของผล (Length of fruit) มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 108.60 $\pm$ 4.55 mm ถูกนำมาใช้ในการออกแบบระยะของสายพานลำเลียง และระยะทางในการติดตั้งส่วนหั่นชิ้นมะม่วงดองและส่วนปอกชิ้นมะม่วงดองที่เหมาะสม ในส่วนข้อมูลความ

หนาของชิ้นเนื้อ (Thickness of fruit pulp) พบว่าส่วนที่ 1 ให้ความหนาชิ้นเนื้อเฉลี่ยสูงสุด 18.99 ± 1.38 mm และส่วนที่ 3 ให้ความหนาชิ้นเนื้อเฉลี่ยต่ำสุด 8.33 ± 3.11 mm ซึ่งข้อมูลความหนานี้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสายพานชุดสายพานลำเลียงและสายพานชุดลูกกลิ้งตัวบนที่ใช้ดึงชิ้นมะม่วงเข้าสู่ใบมีดที่ขนาดความหนาของชิ้นมะม่วงที่แตกต่างกันโดยชิ้นเนื้อมะม่วงที่ปอกได้ต้องไม่เสียหาย

3.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนเนื้อมะม่วงแก้ว ในลักษณะผลสดและผลดอง

ผลการทดสอบแรงเฉือนเนื้อมะม่วงแก้วผลสดและผลดองแบบตามยาวของผลมะม่วง ด้วยเครื่อง Texture analyzer พบว่าค่างานสูงสุดของมะม่วงผลสดมีค่างานที่มากกว่าผลดอง โดยมีค่า 0.02 และ 0.01 J ตามลำดับ แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของผลสดมีค่ามากกว่าผลดองที่ 32.29 และ 18.77 kN m^{-1} ตามลำดับ (Table 2) นอกจากนี้การทดสอบมะม่วงดองแบบตามความยาวของผลมะม่วงมีค่าความแข็งแรงที่น้อยเนื่องจากการนำมะม่วงมาดองนั้นทำให้ความแน่นเนื้อน้อยลง

Table 2 Slice force the pulp of fresh and pickled mango along lengthwise of mango fruit by using texture analyzer.

Texture Analyzer	Lengthwise of the fruit		t-test
	Fresh Mango	Pickled Mango	
Work to maximum load (J)	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00	ns
Stiffness (kN m^{-1})	32.29 ± 1.90	18.77 ± 1.22	*

* Indicates significant differences between treatments at $p < 0.05$, ns = not significant.

ผลการทดสอบแรงเฉือนของมะม่วงแก้วผลสดและผลดองแบบตามขวางของผล ด้วยเครื่อง Texture analyzer พบว่าค่างานที่ได้ของมะม่วงผลสดมีค่างานที่เท่ากับผลดองที่ 0.02 J และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของมะม่วงผลสดมีค่าความแข็งแรงที่มากกว่าผลดองที่ 77.09 และ 18.35 kN m^{-1} ตามลำดับ ดัง Table 3 นอกจากนี้มะม่วงดองแบบตามขวางผล มีค่าความแข็งแรงที่ลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพของมะม่วงซึ่งเกิดจากกระบวนการหมักดอง

Table 3 Slice force of fresh and pickled mango along crosswise of mango fruit by using texture analyzer.

Texture Analyzer	Crosswise of the fruit		t-test
	Fresh mango	Pickled Mango	
Work to maximum load (J)	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	ns
Stiffness (kN m^{-1})	77.09 ± 85.29	18.35 ± 1.74	*

* Indicates significant differences between treatments at $p < 0.05$, ns = not significant.

ผลการทดสอบแรงเฉือนของมะม่วงแก้วสดแบบตามยาวผลและแบบตามขวางผล ด้วยเครื่อง Texture Analyzer เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพบว่าค่างานที่ได้ของมะม่วงผลสดแบบตามยาวผล มีค่างานที่เท่ากับแบบตามขวางผลที่ 0.02 J แต่ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของมะม่วงสดแบบตามขวางผลมีมากกว่าแบบตามยาวผลที่ 77.09 และ 32.29 kN m^{-1} ตามลำดับ ดัง Table 4 โดยพบว่ามะม่วงสดแบบตามขวางผลเนื้อมะม่วงเป็นการตัดผ่านเส้นใยทำให้ต้องใช้แรงในการเฉือนที่สูงกว่าแบบตามยาวผล เช่นเดียวกับการศึกษาในมะเขือเทศ (Lana et.al, 2007)

Table 4 Slice force comparison between lengthwise and crosswise of fresh mango fruit by texture analyzer.

Texture Analyzer	Fresh mango		t-test
	Lengthwise	Crosswise	
Work to maximum load (J)	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	ns
Stiffness (kN m^{-1})	32.29 ± 32.29	77.09 ± 85.29	*

* Indicates significant differences between treatments at $p < 0.05$, ns = not significant.

ผลการทดสอบแรงเฉือนของมะม่วงแก้วดองแบบยาวตามผลและแบบตามขวางผล ด้วยเครื่อง Texture Analyzer เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพบว่าค่างานที่ได้ของมะม่วงแบบตามยาวผลมีค่างานที่น้อยกว่ากับแบบตามขวางผลที่ 0.01 และ 0.02 J ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของมะม่วงดองแบบตามขวางผลมีค่าความแข็งแรงที่น้อยกว่าแบบตามยาวผลอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 18.77 และ 18.35 kN m^{-1} ตามลำดับ ดัง Table 5 เนื่องจากการดองอาจทำให้เนื้อและเส้นใยนิ่มลง จึงใช้แรงในการเฉือนที่น้อยกว่ามะม่วงสด

Table 5 Slice force comparison between lengthwise and crosswise of pickled mango fruit by texture analyzer.

Texture Analyzer	Pickled Mango		t-test
	Lengthwise	Crosswise	
Work to maximum load (J)	0.01±0.00	0.02±0.00	*
Stiffness (kN m ⁻¹)	18.77±1.22	18.35±1.74	ns

* Indicates significant differences between treatments at $p < 0.05$, ns = not significant.

จากข้อมูลการทดสอบค่าพลังงานในการเฉือน และค่าความแข็งแรงในการเฉือนเนื้อมะม่วงดอง Table 2-Table 5 ถูกนำไปใช้ในการเลือกต้นกำลังมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขับเคลื่อนในการหั่นชิ้นมะม่วงดองให้ขาดตลอดความยาวชิ้น

3.3 ผลการทดสอบความแน่นเนื้อของผลมะม่วงแก้วในลักษณะผลสดและผลดอง

ผลการทดสอบความแน่นเนื้อของมะม่วงแก้วสดโดยพิจารณาเปรียบเทียบแบบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) พบว่าค่าความเค้นเฉลี่ยของมะม่วงสดแบบปอกเปลือกน้อยกว่าแบบไม่ปอกเปลือกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า 0.18 และ 0.43 MPa ตามลำดับ และค่าความแน่นเนื้อเฉลี่ยของมะม่วงสดแบบปอกเปลือกน้อยกว่าแบบไม่ปอกเปลือกอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า 4.93 และ 9.94 N mm⁻¹ ตามลำดับ คล้ายคลึงกับการศึกษาของ (Costa, 2016) ที่ศึกษาความแน่นเนื้อของผลแอปเปิ้ลทั้ง 65 สายพันธุ์ ที่ปอกเปลือกแล้ว ค่าความแน่นเนื้อจะน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ปอกเปลือก ดัง Table 6 ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อปอกเปลือกมะม่วงสดแล้ว ค่าความแน่นเนื้อจะลดลง

Table 6 Fruit firmness test result of fresh mango by universal testing machine.

Universal Testing Machine	Fresh fruit		t-test
	Peeled	Not peeled	
Stress (MPa)	0.18±0.11	0.43±0.09	*
Firmness (N mm ⁻¹)	4.93±2.08	9.94±1.28	*

* Indicates significant differences between treatments at $p < 0.05$.

ผลการทดสอบความแน่นเนื้อของมะม่วงแก้วดองด้วยเครื่อง Universal Testing Machine เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแบบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก พบว่าค่าความเค้นเฉลี่ยของมะม่วงดองแบบปอกเปลือกมากกว่าแบบไม่ปอกเปลือก อย่างไม่มีนัยสำคัญโดยมีค่า 0.03 และ 0.01 MPa ตามลำดับ และค่าความแน่นเนื้อเฉลี่ยของมะม่วงดองแบบปอกเปลือกมากกว่าแบบไม่ปอกเปลือกอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า 2.30 และ 1.26 N mm⁻¹ ตามลำดับ โดยพบว่ามะม่วงแก้วดองแบบไม่ปอกเปลือก เมื่อปอก

เปลือกแล้วค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงแก้วดองจะมากขึ้น ดัง Table 7 เนื่องจากการดองอาจทำให้เปลือกของมะม่วงนั้นเกิดความเสียหาย ทำให้ความแน่นเนื้อน้อยกว่าแบบปอกเปลือกแล้ว

Table 7 Fruit firmness test result of pickled mango by universal testing machine.

Universal Testing Machine	Pickled fruit		t-test
	Peeled	Not Peeled	
Stress (MPa)	0.03±0.01	0.01±0.01	ns
Firmness (N mm ⁻¹)	2.30±0.71	1.26±0.58	*

* Indicates significant differences between treatments at $p < 0.05$, ns = not significant.

จากข้อมูลการทดสอบค่าความเค้นและความแน่นเนื้อของมะม่วงดองแบบปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก ดัง Table 7 ถูกนำไปใช้ในการกำหนดแรงกระหว่างสายพานลำเลียง สายพาน ลูกกลิ้งตัวบนและใบมีด ในส่วนการปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองที่เหมาะสม ชิ้นเนื้อหลังปอกไม่เสียหายเกินแรงจุดแตกของชิ้นมะม่วง (Rupture force) ณ ระยะแตกหัก (Rupture distance) ตามความเค้นและความแน่นเนื้อที่ทดสอบได้

3.4 ผลการทดสอบเครื่องหั่นชิ้นเนื้อมะม่วงดอง

ผลการทดสอบอัตราการทำงานของส่วนหั่นชิ้นเนื้อมะม่วงดอง การทดสอบที่ความเร็วรอบชุดใบมีดหั่น 3 ระดับ คือ 80 100 และ 120 rpm โดยใช้ตัวอย่างเป็นมะม่วงดองที่ปอกเปลือกแล้วและนำเมล็ดออกด้วยเครื่องหั่นเมล็ดเนกประสงค์ พบว่าทุกความเร็วรอบหั่นเนื้อมะม่วงดองได้เป็นชิ้นทั้งหมดดัง Figure 8 เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติแล้ว พบว่าระดับความเร็วรอบของชุดใบมีดไม่มีผลต่ออัตราการหั่นชิ้นมะม่วงดองอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นความเร็วรอบชุดใบมีดหั่นที่ 80 rpm เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมเนื่องจากไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเครื่องหั่นน้อยกว่า โดยมีอัตราการหั่นเนื้อโดยมีอัตราการหั่นเนื้อมะม่วงดองสูงสุด 105.61 kg h⁻¹ ดัง Table 8 ได้ชิ้นมะม่วงดองเหมาะสมเฉลี่ย 94.06% ได้ชิ้นมะม่วงดองไม่เหมาะสมเฉลี่ย 4.91% ดัง Figure 9

Table 8 The performance of work rate of mango slicer.

Blade speed (rpm)	Complete pieces (%)	Incomplete pieces (%)	Working rate (kg h ⁻¹)
80	94.06±1.68 ns	4.91±1.69 ns	105.61±10.62 ns
100	94.42±2.60 ns	3.57±1.38 ns	100.15±6.01 ns
120	94.10±1.82 ns	4.95±1.78 ns	98.08±10.67 ns

ns = not significant.



Figure 8 Picked Mango pieces cut by cutting machine.

3.5 ผลการทดสอบเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดอง

ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ของเปลือกที่ปอกได้ของส่วนหั่นชิ้นเนื้อมะม่วงดองร่วมกับส่วนปอกเปลือก จากการทดสอบที่ความเร็วใบมีดหั่นชิ้นชิ้นเนื้อมะม่วงดองที่ 80 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสมดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และความเร็วรอบสายพานลำเลียงตัวล่างและความเร็วสายพานชุดลูกกลิ้งตัวบนที่มีความเร็วเชิงเส้น 3 ระดับ ที่ 0.04 0.05 และ 0.06 m s⁻¹ และมุมใบมีดในการปอกที่มุม 2° และ 4° พบว่า มุมใบมีด ในการปอกที่ 2° เมื่อใช้งานร่วมกับสายพานตัวล่างสำหรับลำเลียงชิ้นมะม่วงดองและสายพานชุดลูกกลิ้งตัวบนที่ระดับ 0.06 m s⁻¹ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปอกมะม่วงดองให้เปอร์เซ็นต์ของเปลือกที่ปอกได้สูงอย่างมีนัยสำคัญที่ 83.90% และอัตราการทำงาน 48.70 kg h⁻¹ ดัง Table 9 และมีลักษณะ ชิ้นมะม่วงดองที่หั่นและปอกแล้ว ดัง Figure 9

Table 9 Performance of cutting and peeling machine on pickled mango.

	Blade angle	Linear speed of belt (m s ⁻¹)		
		0.04	0.05	0.06
Average peeling percent age (%)	2°	77.80 ±3.15 ^{ab}	83.93 ±8.36 ^{ab}	83.90 ±4.70 ^{ab}
Working rate (kg h ⁻¹)	4°	69.30 ±3.31 ^{aA}	68.02 ±4.20 ^{aA}	68.60 ±4.88 ^{aA}
average	2°	47.04 ±7.47 ^{aA}	42.80 ±10.89 ^{aA}	48.70 ±12.32 ^{aA}
	4°	47.38 ±5.37 ^{aA}	47.47 ±11.62 ^{aA}	53.37 ±5.85 ^{aA}

Difference capital letter superscripts in the same column and lowercase superscripts in the same row indicate that the values are significantly difference (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

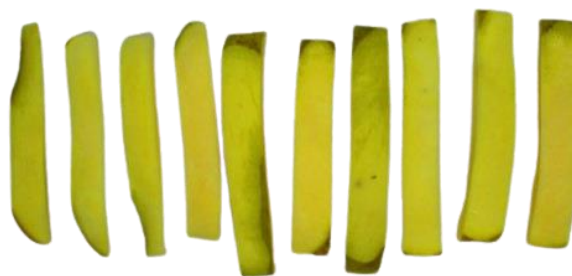


Figure 9 Pieces of peel and pulp of pickled mango using a cutting and peeling machine.

3.6 ผลการการเปรียบเทียบอัตราการทำงานระหว่างเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองกับแรงงานคน

ผลการทดสอบการเปรียบเทียบอัตราการทำงาน ดัง Table 10 โดยพิจารณา 2 ส่วน คือ ส่วนการหั่นและส่วน ของการปอกเปลือก โดยการเปรียบเทียบอัตราการทำงานระหว่าง เครื่องแรงงานที่มีความชำนาญและแรงงานทั่วไป โดยพบว่าการพิจารณาส่วนการหั่น เครื่องหั่นชิ้นมะม่วงดองสามารถหั่นชิ้นมะม่วงดองได้ 105.61 kg h⁻¹ ซึ่งมีอัตราการหั่นเป็นชิ้นได้สูงสุด และส่วนของการปอกเปลือก แรงงานคนที่มีความชำนาญสามารถปอกมะม่วงดองได้ 77.58 kg h⁻¹ แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการอัตราการทำงานของเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองพบว่าอัตราการปอกที่ 48.70 kg h⁻¹ ทั้งนี้อัตราการทำงานของเครื่อง ไม่รวมระยะเวลาของการนำเมล็ดออกและน้ำหนักของเมล็ด ซึ่งการพิจารณาอัตราการทำงานของเครื่องและแรงงานประเภทต่าง แล้วในกระบวนการของการหั่นเป็นชิ้นเครื่องสามารถให้อัตราการทำงานที่สูงกว่าแต่พบว่าชิ้นเนื้อที่มีขนาดไม่เหมาะสม

Table 10 Work rates comparison between pickled mango cutting and peeling machine and manual labor.

Work rate for cutting and peeling pickled mango	(kg h ⁻¹)
Cutting machine	105.61
Cutting and peeling machine	48.70
Skilled workers in cutting	75.32
Skilled workers in peeling	77.58
General labor in cutting	44.79
General labor in peeling	13.91

4 สรุป

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของมะม่วงแก้ว โดยการเปรียบเทียบมะม่วงผลสดและผลดองด้วยการวัดขนาดผล แรงแผ่นเนื้อมะม่วงในลักษณะตามยาวผลและขวางผลของมะม่วง และความแน่นเนื้อในลักษณะปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก นำมาใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องหั่นและปอกเปลือกชิ้นมะม่วงดองที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการปอกเปลือกและหั่นชิ้นมะม่วงดองได้ โดยมีการใช้งาน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ใช้งานสำหรับการหั่นชิ้นเนื้อมะม่วงมีอัตราการทำงาน 105.61 kg h⁻¹ ได้ขนาดชิ้นมะม่วงดองเหมาะสมเฉลี่ย 94.06% และรูปแบบที่ 2 ใช้งานการหั่นรวมกับการปอกเปลือกชิ้นเนื้อมะม่วงดองมีอัตราการทำงาน 48.70 kg h⁻¹ และเปอร์เซ็นต์การปอกเปลือกได้ 83.90% โดยที่ชิ้นมะม่วงยังคงความสวยของชิ้นและคงสภาพเนื้อชิ้นไม่แตกหรือเสียหาย อย่างไรก็ตามยังคงต้องมีการพัฒนาในส่วนการปอกเปลือกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สัญญาเลขที่ ร-ม.22.60 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2565. ผลิตภัณฑ์มะม่วง. แหล่งที่มา: <https://ebook.lib.ku.ac.th/ebook27/ebook/2011-005-0117/#p=4>. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2566.

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2554. เทคโนโลยีเนื้อสัมผัสของผลผลิตเกษตรและอาหาร. กรุงเทพฯ: หจก. มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.

ภคินี อัครเวสพงษ์, พูนศักดิ์ ดิษฐ์กระจัน, ปัญจรัศม์ นันทพล, ศศิธร วสุนันต์, กัลยาณี ตันติธรรม, สุนันทา เวสสุริย์. 2532. ศึกษาอายุการเก็บเกี่ยวมะม่วงแก้วเพื่อการดอง. กรมวิชาการเกษตร 7(1-3), 9-15.

ลำพอง แต้มครบุรี, ธวัชชัย รัตน์ชเลศ. 2548. การประเมินสายต้นมะม่วงแก้วเพื่อการแปรรูปเป็นมะม่วงอบแห้ง. วารสารเกษตร 21(3), 219-228.

วิรัตน์ หวังเชื่อนกลาง. 2556. เครื่องหั่นมันขึ้น. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6 ประจำปี 2556, 255-261. ประจวบคีรีขันธ์ : โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. 1-4 เมษายน 2556, หัวหิน, ประจวบคีรีขันธ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2565. มูลค่าการส่งออกมะม่วง. แหล่งที่มา: www.arda.or.th/datas/file/1473755018.pdf. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2565.

อิสราวุฒิ บุญแก้ว, สุดสายสิน แก้วเรือง, ศุภกิตต์ สายสุนทร, รติยา ฐวาทนิขยานันท์. 2562. การพัฒนาออกแบบเครื่องปอกมะม่วงดองเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปมะม่วงดอง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 50(3), 268-283.

อุษาพร ภูค์สมาส. 2557. มะม่วง ผลไม้รสชาติดีมีประโยชน์. วารสารอาหาร 44(3), 51-53.

Costa, F. 2016. Mechanical investigation to assess the peel contribution in apple fruit. Postharvest Biology and Technology 111, 41-47.

Lana, M. M., Tijskens, L. M., De Theije, A., Dekker, M., Barrett, D. M. 2007. Measurement of firmness of fresh-cut sliced tomato using puncture tests—studies on sample size, probe size and direction of puncture. Journal of Texture Studies 38(5), 601-618.

Mahmoud, W. A. E. M., Mahmoud, R. K., and Eissa, A. S. 2022. Determining of some physical and mechanical properties for designing tomato fruits cutting machine. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 24(4), 131-142.

Sirisomboon, P., Pornchaloempon, P. 2011. Instrumental textural properties of mango (cv Nam Doc mai) at commercial harvesting time. International Journal of Food Properties 14, 441-449.



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถ่านเหง้ามันสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก Performance Comparison of a Vertical Kiln and Feasibility Study of Using Cassava Rhizome Charcoal for Smith Forging Process

นพฤทธิ์ พรหมลั่ง¹, บุญโชค พอตาสง¹, รณศักดิ์ วิวัฒน์ปรีชาพันธ์¹, วิชาญ ใจสุข², จักรชัย ชินโคตร³, พูลทวิ ศรพรหม³,
วัชรินทร์ เขียวไกร³, พิศมาส หวังดี^{3*}

Noppalith Promlung¹, Boonchock Potasang¹, Ronnasak Wiwatpreechanon¹, Wichan Jaisuk²,
Jakrachai Chinnakotr³, Pooltawee Sornprom³, Watcharin Kiaokrai³, Phisamas Hwangdee^{3*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม 48000

²Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhonpanom University, Nakhonpanom 48000

³วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม 48150

²Sisongkhram Industrial Technology College, Nakhonpanom University, Nakhonpanom 48150

³สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร, คณะเกษตรและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม 48000

³Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture and Technology, Nakhonpanom University, Nakhonpanom 48000

*Corresponding author: Tel.: +66-6-3737-3788, E-mail: samas_dee@npu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาและศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ถ่านเหง้ามันสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก เพื่อนำถ่านเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปทดแทนการใช้ถ่านไม้ ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้ ค่าความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังเฉลี่ยที่ได้จากเตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร แบบตั้ง (พพ.) 2) เตาเผาถ่านแบบไร้ควัน 3) เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร แบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน อยู่ระหว่าง 6,269.38-6,431.42 cal g⁻¹ และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เตาเผาถ่านแบบเผาโดยตรงแบบเปิดฝาด้านให้อัตราการผลิตถ่าน เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่าน ประสิทธิภาพของเตาเผาถ่านมากที่สุด เมื่อนำถ่านเหง้ามันสำปะหลังไปใช้ทดแทนถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก พบว่า ถ่านเหง้ามันสำปะหลังสามารถเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงสุด 961.44 °C ให้อัตราการเผาไหม้ 11.14 kg h⁻¹ มีความสามารถในการเผาเหล็กได้ 0.63 kg_(iron) kg⁻¹_(coal) และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลัง 2.80 Baht kg⁻¹ สรุปได้ว่า ถ่านเหง้ามันสำปะหลังไม่สามารถให้ความร้อนถึงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปได้ แต่ผลการศึกษาโดยรวมชี้ให้เห็นแนวทางการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลัง ต้นทุนการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งถ่านเหง้ามันสำปะหลังยังมีศักยภาพสามารถนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้มในครัวเรือนได้ ตลอดจนนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ หรือนำไปใช้ในรูปไบโอชาร์ปรับปรุงดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำได้

คำสำคัญ: การตีเหล็ก, เหง้ามันสำปะหลัง, ถ่านเหง้ามันสำปะหลัง, ถังเผาถ่าน 200 ลิตร

Abstract

The present research aimed to compare the efficiency and feasibility of using a vertical kiln with cassava rhizome charcoal in the blacksmithing process; cassava rhizome charcoal was tested as fuel in the process of burning steel for forging, substituting the use of vegetal charcoal. The results are as follows. Average heating values of cassava rhizome charcoal obtained from all 3 charcoal drum kilns viz. 1) 200 L vertical drum kiln (DEDE) 2) 200 L pyrolysis vertical drum kiln 3) 200 L open top lid drum kiln were between 6,269.38-6,431.42 cal g⁻¹; all the values were not significantly different. Open-top lid drum kiln exhibited highest production rate of charcoal, percentage charcoal yield and kiln efficiency. When cassava rhizome charcoal was used to replace charcoal in the blacksmithing process, it was found that cassava rhizome charcoal could burn steel for forging at a maximum temperature of 961.44 °C, burning rate of 11.14 kg h⁻¹ and burning ability of 0.63 kg_(iron) kg⁻¹_(coal). The cost of producing cassava

Received: March 23, 2023

Revised: October 27, 2023

Accepted: October 27, 2023

Available online: March 16, 2024

rhizome charcoal was 2.80 Baht kg⁻¹. It can be concluded that the cassava rhizome charcoal under the study was unable to yield the optimum temperature for burning steel for forging. However, the overall study results reveal the cassava rhizome charcoal production methods and cost of cassava rhizome charcoal production. The cassava rhizome charcoal still exhibits potential to be used as cooking charcoal in households. It can also be produced into pelleted fuel or can be used in the form of biochar to improve soils with low fertility.

Keywords: Smith forging process, Cassava rhizome, Cassava rhizome coal, 200 l drum kiln

1 บทนำ

วิธีการทำเครื่องมือจากโลหะกลุ่มเหล็กในสมัยโบราณ ประกอบด้วยการตีขึ้นรูปในขณะที่เหล็กยังร้อน (Hot working) กรรมวิธีการตีเหล็กทำได้โดย การนำเหล็กมาเผาในเตาให้ร้อนแดง ก่อน แล้วจึงนำมาตีด้วยพะเนินبيب และรีดด้วยเหล็กให้มีการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะตามที่ต้องการ หากเหล็กเย็นตัวลง ต้องนำกลับมาเผาให้ความร้อนแดงใหม่อีกครั้งก่อนนำมาตีซ้ำอีก ทำสลับกันแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้จะได้รูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงนำมาทำกรรมวิธีในขั้นตอนสุดท้าย คือ “การชุบ” ขั้นตอนนี้โดยการนำเครื่องมือเหล็กมาเผาให้ร้อนแดงอีกครั้งก่อนนำไปจุ่มแชลงในน้ำเย็นทันที การทำเช่นนี้ทำให้โครงสร้างภายในเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นหลักการทางโลหวิทยา ที่นำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้า ให้มีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น (สุริยา, มปป) ชาวตำบลนาถ่อน อำเภอลำดวน จังหวัดสุรินทร์ มีการดำเนินชีวิตโดยยึดภูมิปัญญาไทย ผลิตอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น มีด พร้า ขวาน จอบ เสียม เคียวและอุปกรณ์การเกษตรอื่น ๆ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือน ตามคำกล่าวที่ว่า “เสร็จจากหนานา ผู้หญิงทอผ้า ผู้ชายตีเหล็ก” ทำให้เกิดเป็นอาชีพ เป็นอุตสาหกรรมในระดับครัวเรือนและกลายเป็นวิสาหกิจขนาดเล็กในปัจจุบัน โดยได้มีการพัฒนาวิธีการ มีการใช้เครื่องทุ่นแรงช่วยในการผลิต เช่น การใช้เครื่องตีเหล็ก (Pneumatic Power Hammer) นำเข้าจากต่างประเทศ ทดแทนการใช้แรงงานคนตีด้วยค้อน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ประหยัดเวลาการทำงาน ทำให้ต้องมีการทำลายทรัพยากรป่าไม้ เพื่อที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านไม้ใช้ในขั้นตอนการเผาเหล็กให้ร้อน และในขั้นการเผาชุบแข็งในปริมาณมาก ตรงกันข้ามกับปริมาณป่าไม้ ถ่าน และฟืน หาได้ยากและมีราคาแพงขึ้น ในพื้นที่ตำบลนาถ่อนมีผู้ประกอบการตีเหล็กหลายราย มีจำนวนเครื่องตีเหล็ก (Pneumatic Power Hammer) จำนวน 40 เครื่อง ในแต่ละเดือนจะต้องใช้วัตถุดิบเหล็กแท่ง 40 Tons month⁻¹ คิดเป็นมูลค่า 1,000,000 Baht month⁻¹ (คิดที่ราคา 25 Baht kg⁻¹) ในขณะที่ต้องใช้ถ่านไม้ 125 kg ต่อเหล็กแท่ง 100 kg ในหนึ่งเดือนมีความต้องการใช้ถ่านไม้ทั้งหมด 50 Tons month⁻¹ (พิศมาส และคณะ 2558) ต้องมีการตัดไม้ทำลายป่าจำนวน 155 Tons (firewood) month⁻¹ คิดจากเปอร์เซ็นต์ถ่านที่ได้ต่อไม้ดิบที่ใช้ 32.20% (ประลอง, 2540) เพื่อผลิตเป็นถ่านในการตีเหล็กของ

ตำบลนาถ่อน แต่จากการสำรวจข้อมูลปัจจุบัน พบว่าผู้ประกอบการหลายรายหยุดกิจการ ผู้ประกอบการที่มีศักยภาพ บางรายเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากถ่านไม้เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ซึ่งมีต้นทุนแรกเริ่มที่สูง ทำให้ยังมีผู้ประกอบการรายเล็กซึ่งมีจำนวนมากกว่า ยังต้องใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันมีผู้ประกอบการที่ยังใช้เครื่อง Pneumatic Power Hammer และ ยังใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง จำนวน 12 เครื่อง ใช้วัตถุดิบเหล็กแท่ง 21.6 Tons month⁻¹ คงต้องการใช้ถ่านในเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูป 27 Tons month⁻¹ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องแสวงหาและพัฒนาการใช้พลังงานจากแหล่งอื่น โดยเฉพาะแหล่งพลังงานจากธรรมชาติ จากวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร แหล่งพลังงานที่จะช่วยลดการใช้พลังงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยมีพืชมากมายหลายชนิดที่เป็นชีวมวลนำมาใช้เป็นพลังงานได้ เช่น แกลบ ฟางข้าว ใบอ้อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน กะลามะพร้าว เศษไม้ เหง้ามันสำปะหลังฯ (รุ่งโรจน์และคณะ, 2553) เหง้ามันสำปะหลังเป็นเศษเหลือทิ้งจากการจากการเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ผลิต ปี 2563/64 มีพื้นที่เก็บเกี่ยว 9,000,000 Rai ได้ผลผลิต 28,000,000 Tons (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2565)

มันสำปะหลังมีปริมาณเหง้า 0.29 Tons Rai⁻¹ สัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังสดต่อหัวมันสำปะหลังสด (Crop Residual Ratio, CRR) มีค่าประมาณ 0.12 หรือ 12% ของหัวมันสำปะหลังสด เหง้ามันสำปะหลังมีศักยภาพในการนำมาผลิตพลังงาน ดังแสดงใน table 1 เป็นเชื้อเพลิงในเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (วีรชัยและคณะ, 2553) และยังสามารถนำมาเผาให้เป็นถ่าน (Tippayawong et al., 2017) และเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านอัดแท่งได้ (Sen et al., 2016; จุฑามาศ, 2547) แต่ในบางพื้นที่ เหง้ามันสำปะหลังยังไม่ได้มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์และยังก่อให้เกิดภาระที่ต้องทำลายหรือกำจัดทิ้งแบบเผาในแปลงที่โล่งซึ่งเป็นสาเหตุของโลกร้อนและฝุ่นควัน PM 2.5 (นิกรานและคณะ, 2564) ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าการรวบรวมและการขนส่งนั้นมีต้นทุนสูง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญดังกล่าว และมีความสนใจนำถ่านเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานความร้อนในกระบวนการเผาเหล็ก ตีเหล็กและเผาอบชุบแข็ง ทดแทนการใช้ถ่านไม้เพื่อลดการตัดไม้ทำลายป่า ทำลายสิ่งแวดล้อม และช่วยเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตร

Table 1 Comparison of physical properties, proximate analysis values and calorific values between cassava rhizome charcoal and wood charcoal.

Property	Wood charcoal ¹	cassava rhizome charcoal ²	cassava rhizome charcoal ³
Bulk density; g cm ⁻³	-	0.162	-
Moisture; % w.b.	0.76	7.23	-
Fixed carbon; %	61.23	32.90	23.13
Ash; %	1.15	13.48	4.95
Volatile; %	36.86	46.39	71.92
HHV; cal g ⁻¹	7,069	5,269	4,309

¹Sayakoummane and Ussawarujikulchai, 2009; ²Sen et al., 2016; ³Nakason et al., 2019

2 อุปกรณ์และวิธีการ

เหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ เหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ PKM จากแหล่งปลูกตำบลอู่หม้า อำเภอรามวงค์ จังหวัดนครพนม อายุเก็บเกี่ยวที่ 11 month ที่ระดับความชื้นเหง้ามันสำปะหลังก่อนเผาในเตาเผาถ่านเฉลี่ย $32.82 \pm 2.23\%$ w.b. ความหนาแน่นเฉลี่ย 206.14 ± 19.95 kg m⁻³

2.1 การศึกษาสมรรถนะของเตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่านที่นำมาทำการศึกษานี้เปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร 3 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบเตาเผาถ่านทั้งสามแบบนี้เป็นเตาเผาที่มีขนาดเล็ก สร้างง่าย ราคาถูก (Sangsuk et al., 2020) เหมาะสำหรับผู้มีทุนทรัพย์น้อย สามารถย้ายไปยังแหล่งที่มีวัตถุดิบได้ง่าย ได้แก่ 1) เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบตั้ง ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) 2) เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตรหุ้มฉนวน(ระบบไฟโรไลซิส) และ 3) เตาเผาถ่านแบบ 200 ลิตร แบบเผาโดยตรงเปิดฝาบาน

2.1.1 เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบตั้ง ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.)

คุณลักษณะ เป็นเตาเผาถ่านที่ผลิตจากถังขนาด 200 ลิตร ปริมาตรความจุเหง้ามันสำปะหลัง เส้นผ่านศูนย์กลาง 56.5 cm ความสูง 60 cm คิดเป็นความจุ 0.150 m^3 (150.35 L) ดังแสดงใน Figure 1



Figure 1 A 200 litre vertical drum kiln (DEDE).

วิธีการใช้งาน

- 1) เรียงเหง้ามันสำปะหลังที่ต้องการเผาเป็นถ่านลงในเตาให้เต็ม แล้วปิดฝาและใช้ดินเหนียวปิดรอยรั่ว
- 2) เตรียมไม้ฟืนเชื้อเพลิง จุดไฟบริเวณหน้าเตาปล่อยให้ไอความร้อนสะสมในเตาเพื่อไล่ความชื้นจากเหง้ามันสำปะหลังจนกระทั่งเตาติดจึงหยุดป้อนเชื้อเพลิงบริเวณหน้าเตา
- 3) ปล่อยให้เกิดการเผาไหม้ภายในเตาจนกระทั่ง ไม่มีควันออกที่ปล่อง จึงทำการปิดปล่องแล้วทิ้งไว้ให้ถ่านดับและเย็นลงค่อยทำการเปิดเตาเก็บถ่าน

2.1.2 เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตร หุ้มฉนวน(ระบบไฟโรไลซิส)

คุณลักษณะเป็นเตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถังน้ำมัน 200 ลิตร หุ้มฉนวน (ระบบไฟโรไลซิส) ปริมาตรความจุเหง้ามันสำปะหลัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56.5 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องควัน 14 cm ความสูง 84.5 cm คิดเป็นความจุ 0.199 m^3 (198.75 L) ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 A 200 litre pyrolysis vertical drum kiln.

วิธีการใช้งาน

- 1) ทำการเรียงเหง้ามันสำปะหลังที่ต้องการเผาให้เป็นถ่านลงไปให้เต็มเตาจึงปิดฝาให้สนิท
- 2) ทำการเตรียมเชื้อเพลิง ในที่นี้จะใช้น้ำมันเครื่องเก่าเป็นเชื้อเพลิง จุดไฟให้ความร้อนที่ด้านล่างของถัง เพื่ออบแห้งเหง้า

มันสำปะหลัง โดยที่เหง้ามันสำปะหลังในถังจะไม่ได้สัมผัสเปลวไฟ และไม่เกิดการลุกไหม้

3) เมื่ออุณหภูมิในเตาสูงมากพอ ประมาณ 400-800°C สารระเหยที่อยู่ในเหง้ามันสำปะหลังจะปลดปล่อยออกมาทางรูปล่อยระบายก๊าซ กลายเป็นเชื้อเพลิงลุกไหม้ได้เอง โดยไม่ต้องใช้น้ำมันเครื่องเก่าเป็นเชื้อเพลิงอีก

4) ปล่อยให้เกิดการลุกไหม้ของก๊าซต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีการปลดปล่อยก๊าซที่อยู่ในเหง้ามันสำปะหลังอีก แสดงว่าเหง้ามันสำปะหลังที่อยู่ในเตากลายเป็นถ่านหมดแล้ว ปล่อยให้ดับเอง และรอให้เตาเย็นลง จึงทำการเปิดเตาเพื่อเก็บถ่าน

2.1.3 เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร แบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้านบน

คุณลักษณะ เป็นเตาเผาถ่านที่ไม่ต้องมีการดัดแปลงใด ๆ ใช้ถังน้ำมัน 200 ลิตร แบบมีฝาปิด ปริมาตรความจุเหง้ามันสำปะหลัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56.5 cm ความสูง 84.5 cm คิดเป็นความจุ 0.212 m³ (211.75 L) ดังแสดงใน Figure 3



Figure 3 A 200 litre open top lid drum kiln.

วิธีการใช้งาน

1) ทำการจุดไฟที่ด้านล่างของถัง แล้วค่อยๆ เติมเหง้ามันสำปะหลัง เมื่อเกิดการติดไฟดีแล้ว

2) ทำการเติมเหง้ามันสำปะหลังที่จะเผาเป็นถ่านเรื่อยๆ จนเต็มถัง

3) เมื่อไฟลุกไหม้เหง้ามันสำปะหลังที่ด้านล่างกันถัง จะทำให้เกิดการยุบตัวของเหง้ามันสำปะหลัง สามารถที่จะเติมเหง้ามันสำปะหลังลงไปได้อีกตามต้องการ หรือเมื่อไฟลุกไหม้เหง้ามันสำปะหลังจนกลายเป็นถ่านแล้วให้ทำการปิดฝาดังไม่ให้อากาศเข้าได้เพื่อดับไฟ

4) ทิ้งไว้จนกระทั่งเตาเย็น แล้วจึงทำการเปิดเตาเพื่อเก็บถ่าน โดยมีค่าชี้ผล ดังนี้ อัตราการผลิตถ่าน ผลผลิตถ่านและประสิทธิภาพของเตาเผาถ่าน ดังสมการที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ อัตราการผลิตถ่าน (P_{char}); kg h⁻¹

$$P_{char} = M_{char} / P_{time} \quad (1)$$

ผลผลิตถ่าน (Y_{char}); % (Sangsuk et al., 2020; Homchat et al., 2012)

$$Y_{char} = (M_{char} / M_{feedstock}) \times 100 \quad (2)$$

ประสิทธิภาพเตาเผาถ่าน; η_{char} ; %

$$\eta_{char} = (M_{char} / (M_{feedstock} - M_{unburnt\ wood})) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ M_{char}	คือ	น้ำหนักถ่านที่ได้ (kg)
P_{time}	คือ	เวลาที่ใช้ในการเผาถ่าน (h)
$M_{feedstock}$	คือ	น้ำหนักวัสดุถ่านก่อนเผา (kg)
$M_{unburnt\ wood}$	คือ	น้ำหนักถ่าน เศษถ่าน และขี้เถ้า (kg)

2.2 การหาสมบัติความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังและถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก

ค่าความร้อนของถ่าน (heating value) คือปริมาณพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของเชื้อเพลิง บ่งชี้คุณภาพของเชื้อเพลิง (ปฐมศก, 2551; กิตติพงษ์, 2557; Carnaje et al., 2018) การวิเคราะห์ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM 3186-96 เป็นการเผาตัวอย่างที่ทราบค่าน้ำหนักที่แน่นอนใน bomb calorimeter ภายใต้ภาวะที่กำหนด การหาค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ PARR รุ่น 1341 โดยก่อนทำการทดสอบค่าความร้อนของถ่าน ผู้วิจัยได้ทำการ Standardization โดยการใช้ Benzoic Acid ซึ่งมีค่าความร้อนคงที่ เท่ากับ 6,318 cal g⁻¹ เพื่อหาค่าพลังงานลูกบอมบ์ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านตัวอย่าง ซึ่งจากการ Standardization พบว่า ค่าของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ PARR รุ่น 1341 ในขณะทำการศึกษามีค่าระหว่าง 2,394.24–2,523.88 ค่าเฉลี่ย 2,442.05 cal g⁻¹

วัตถุประสงค์ในการศึกษานี้ คือ ต้องการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังที่ได้มาจากเตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบ และนำไปเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก(ถ่านตีเหล็ก) ซึ่งเป็นถ่านไม้เบญจพรรณที่ช่างตีเหล็กใช้ในปัจจุบัน

2.3 การศึกษาการใช้ถ่านเหง้ามันสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก

2.3.1 การทดสอบอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของถ่านที่ใช้ในปัจจุบัน

โดยการให้ช่างตีเหล็กปฏิบัติตามวิธีปกติในขั้นตอนการตีบ้อง (การตีตามจับและตียึด ปรับรูปทรงเหล็กให้ได้รูปทรงของมีดพริ้วตามต้องการ) ดังแสดงใน Figure 4

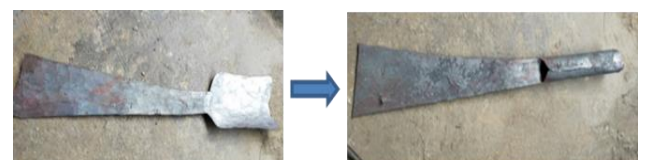


Figure 4 The knife handle forging.

ทำการบันทึกข้อมูลประกอบด้วยอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของถ่าน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ทำการวัดที่เตาร่างเผาเหล็กดังแสดงใน Figure 5



Figure 5 The iron furnace for forging.

2.3.2 การศึกษาสมรรถนะถ่านหังามันสำปะหลังในการตีมีด

ทำการบันทึกข้อมูลโดยการให้ช่างตีเหล็กปฏิบัติตามวิธีปกติแต่ใช้ถ่านหังามันสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วยน้ำหนักถ่านที่ใช้ น้ำหนักเหล็กที่ใช้ เวลาที่ใช้ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ของถ่านที่ใช้ และคำนวณงานที่ทำได้ ดังสมการที่ 4 และ 5

อัตราการเผาไหม้ (Br); kg h^{-1}

$$\text{Br} = M_{\text{char}} / \text{Br}_{\text{time}} \quad (4)$$

งานที่ทำได้ (Coal Capacity); $\text{kg}_{(\text{iron})} \text{kg}_{(\text{coal})}^{-1}$

$$\text{Coal Capacity} = M_{\text{iron}} / M_{\text{char}} \quad (5)$$

เมื่อ M_{char}	คือ	น้ำหนักถ่านที่ใช้สุทธิ (kg)
Br_{time}	คือ	ระยะเวลาที่ไหม้หมด (h)
M_{iron}	คือ	น้ำหนักเหล็กวัตถุตี (kg)

2.4 การศึกษาต้นทุนการใช้ถ่านหังามันสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่าน ประกอบด้วย ค่าแรงงานเก็บรวบรวมหังามันสำปะหลังออกจากพื้นที่ ค่าขนส่งจากแปลงสู่เตาเผาถ่าน และค่าแปลงสภาพหังามันสำปะหลังเป็นถ่านหังามันสำปะหลัง

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาสมรรถนะของเตาเผาถ่าน

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเผาถ่านหังามันสำปะหลัง ดังแสดงใน Table 2 พบว่า เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแนวตั้ง (พพ.) เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถัง 200 ลิตรหุ้มฉนวน (ระบบไพโรไลซิส) และเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน มีอัตราการผลิตถ่านเฉลี่ย $9.30 \text{ } 25.92$ และ 56.23 g min^{-1} ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านเฉลี่ย $9.27 \text{ } 14.48$ และ 27.39% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพของเตาเผาเฉลี่ย $10.08 \text{ } 15.31$ และ 27.67% ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า เตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน ที่ใช้ในการเผาถ่านหังามันสำปะหลัง มีอัตราการผลิตถ่านได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านและประสิทธิภาพของเตาเผาสูงกว่าเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแนวตั้ง (พพ.) และเตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถัง 200 ลิตรหุ้มฉนวน (ระบบไพโรไลซิส) ซึ่งเป็นผลมาจากความจุที่มากกว่าและในช่วงเวลาการใช้งานเตาเผา ผู้ควบคุมจะสามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ได้ตลอดเวลา ช่วยลดอัตราการเกิดเถ้าหรือสันถ่าน (เผาไหม้ไม่หมด) และยังสามารถป้องกันวัตถุตีเพิ่มเติมได้ตามต้องการจนกว่าได้ถ่านเต็มความจุของเตา และสำหรับเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้านมีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่าน (Y_{char}) ใกล้เคียงกับรายงานการใช้เตาเผาแบบถ่านหังามัน 200 ลิตร เตาเผาถ่านไม้และถ่านไม้ไผ่ ตามแบบของ Tippayawong et al. (2010) ที่ $28\text{-}33\%$ และ Homchat et al. (2012) ได้รายงานผลการศึกษาการเผาถ่านหังามันสำปะหลังโดยใช้ถังเหล็กทรงกระบอกขนาดใกล้เคียงกันกับเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร ไว้ที่ $25\text{-}28\%$ ที่ความชื้นวัตถุดิบหังามันสำปะหลัง $11.22\% \text{ w.b.}$ และ 35.65% ที่ความชื้นวัตถุดิบหังามันสำปะหลัง $35.5\% \text{ w.b.}$ แต่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงต่อรอบการเผา $9.8\text{-}20 \text{ kg.}$ ต่อครั้ง และถึงแม้ว่าจะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านต่ำกว่าการใช้เตาเผาถ่านหังามันสำปะหลังระบบ Semi-continuous carbonization ที่รายงานไว้โดย Tippayawong et al. (2017) ที่ $33\text{-}35\%$ ที่ระยะ เวลาในการเผาถ่านใกล้เคียงกัน $1.5\text{-}4 \text{ h}$ แต่การเลือกใช้เตาเผาถ่านเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแบบเผาโดยตรงเปิดฝาด้าน เป็นเตาเผาที่มีขนาดเล็ก สร้างง่าย ราคาถูกเหมาะสมสำหรับผู้มีทุนทรัพย์น้อย สามารถย้ายไปยังแหล่งที่มีวัตถุดิบได้ง่าย

Table 2 Properties of charcoal obtained from different types of charcoal kilns.

Property	200 litre vertical drum kiln.(DEDE)	200 litre pyrolysis vertical drum kiln	200 litre open top lid drum kiln
Volume capacity (m^3)	0.150	0.199	0.212
Volume capacity (L)	150.35	198.75	211.75
Fuel type	Wood twig fragments	Used lube oil	Wood twig fragments (small quantity)
Weight of raw cassava rhizomes in kiln ($M_{feedstock}$); (kg)	31.33±4.04	41.50±3.28	42.06±2.09
Process time (P_{time}); (h)	6.0±2.1	3.9±0.5	3.4±1.4
Yield production charcoal (M_{char}); (kg)	3±1.56	6±0.56	11.67±5.13
Yield charcoal rate (P_{char}); ($g\ min^{-1}$)	9.30±6.87	25.92±6.25	56.23±3.68
Charcoal Yield (Y_{char}); (%)	9.27±4.26	14.48±1.23	27.39±11.05
Efficiency (η_{char}); (%)	10.08±3.17	15.31±0.39	27.67±11.39

Table 3 Comparison of calorific values of cassava rhizome charcoal and blacksmith charcoal.

Type of Charcoal Kiln	High Heating Value ($cal\ g^{-1}$)
200 litre vertical drum kiln. (DEDE)	6,388.45 ^b ±131.42
200 litre pyrolysis vertical drum kiln	6,431.42 ^b ±126.20
200 litre open top lid drum kiln	6,269.38 ^b ±154.66
blacksmith charcoal	6,693.58 ^a ±25.49

^{a-b} Mean values with different letters for each row are significantly difference (DMRT) at $P < 0.05$.

3.2 ผลการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลัง

จากค่าความร้อนที่พบในถ่านเหง้ามันสำปะหลัง ดังแสดงใน table 3 ที่ได้จากเตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ เตาเผาถ่านแบบแนวตั้งเตาแบบจำกัดอากาศ เตาเผาถ่านแบบไร้ควันที่ผลิตจากถ่านน้ำมัน 200 ลิตร หุ้มฉนวน (ระบบไพโรไลซิส) และเตาเผาถ่านแบบเผาโดยตรงแบบเปิดฝาบาน มีค่าความร้อนเฉลี่ย 6,388.45 6,431.42 และ 6,269.38 $cal\ g^{-1}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนเฉลี่ยด้วยวิธีการทางสถิติ พบว่า เตาเผาถ่านทั้ง 3 รูปแบบให้ค่าความร้อนเฉลี่ยของถ่านที่ได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ จากค่าความร้อนที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งเหง้ามันสำปะหลังที่รายงานไว้โดย จุฑามาศ (2547) ที่ 6,281.08 $cal\ g^{-1}$ และสอดคล้องกับที่ ประเทืองและธารินี (2548) รายงานไว้ที่ 6,165.65 $cal\ g^{-1}$ และยิ่งพบว่าสูงกว่าค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน ที่รายงานไว้โดย จารุณี และภูมิินทร์ (2022) รายงานไว้ที่ 5,927.10 $cal\ g^{-1}$ ในขณะที่ Sen et al. (2016) ได้ทำการเผาถ่านเหง้ามันสำปะหลังด้วยเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตรแนวนอนพบว่า มีค่าความร้อนที่ 5,269 $cal\ g^{-1}$ ซึ่งค่าความร้อนที่แตกต่างกันของถ่านเหง้ามันสำปะหลัง น่าจะมีอิทธิพลมาจากความ

แตกต่างของพันธุ์มันสำปะหลัง ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ PKM จะมีขนาดของเหง้าค่อนข้างใหญ่มีส่วนที่เป็นแก่นเนื้อไม้มากกว่าพันธุ์อื่น

ในขณะที่ถ่านดีเกลือมีค่าความร้อนเฉลี่ย 6,693.58 $cal\ g^{-1}$ มีค่าความร้อนอยู่ระดับค่าเฉลี่ยกับค่าความร้อนของถ่านไม้ ที่ระบุไว้โดยผู้วิจัยที่อ้างอิงมาซึ่งรายงานค่าความร้อนของถ่านไม้ที่ 4,468–7,955 $cal\ g^{-1}$ (FAO, 1985; Juizo et al. 2017; Sayakoummame and Ussawarujikulchai, 2009; Ruiz-Aquino et al. 2015) ซึ่งแน่นอนว่าถ่านเหง้ามันสำปะหลังไม่สามารถให้ค่าความร้อนเทียบเท่าถ่านไม้ได้ ซึ่งจากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบเตาเผาถ่านที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อค่าความร้อนของถ่านเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ แต่เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตถ่าน เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่าน ประสิทธิภาพของเตาเผาถ่าน จะพบว่าเตาเผาถ่านแบบเผาโดยตรงแบบเปิดฝาบานจะมีความเหมาะสมมากกว่าเตาเผาถ่านแบบอื่น จึงจะนำถ่านที่ได้จากเตาเผาไปทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป

3.3 ผลการศึกษาการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ในกระบวนการตีเหล็ก

3.3.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของถ่านไม้ที่ใช้ตีเหล็กในปัจจุบัน

ผลการตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิของการใช้ถ่านตีเหล็กปัจจุบันเปรียบเทียบกับถ่านห้ำม้นสำปะหลังทดแทนถ่านไม้ในการตีเหล็ก ซึ่งผลที่ได้ดังแสดงใน table 4 จากผลการตรวจวัด

พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถ่านห้ำม้นสำปะหลังในช่วงที่ไม่มีเป่าอากาศ 625.67°C และให้อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในช่วงที่มีการเป่าอากาศ 961.33°C ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านตีเหล็กปัจจุบัน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูป ระหว่าง $900 - 1,100^{\circ}\text{C}$ (ไพฑูรย์, 2548; หาญณรงค์, 2553) ถ่านห้ำม้นสำปะหลังที่ทำการศึกษานี้ไม่สามารถให้ค่าความร้อนถึงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูปได้

Table 4 Performance comparison results between cassava rhizome charcoal and blacksmith charcoal.

Performance	Blacksmith Charcoal	Cassava Rhizome Charcoal
The lowest temperature on the steel furnace rail; without blowing air ($^{\circ}\text{C}$)	860.33 ± 56.58	625.67 ± 107.87
The highest temperature on the steel furnace rails; air blowing range ($^{\circ}\text{C}$)	$1,078.20 \pm 49.89$	961.33 ± 28.20
Burning rate (kg h^{-1})	9.91 ± 0.33	11.14 ± 1.60
Coal Capacity ($\text{kg}_{(\text{iron})} \text{ kg}_{(\text{coal})}^{-1}$)	1.66 ± 0.07	0.63 ± 0.06

3.3.2 ผลการศึกษสมรรถนะการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังตีเหล็ก

ผลการศึกษาสมรรถนะการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังจากผลการวิเคราะห์ข้อมูล ที่ประกอบด้วยน้ำหนักถ่านที่ใช้ น้ำหนักเหล็กที่ใช้ เวลาที่ใช้ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ของถ่านที่ใช้ และคำนวณงานที่ทำได้ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังแสดงใน table 4 พบว่า ถ่านห้ำม้นสำปะหลังที่นำมาใช้ตีเหล็ก มีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ย 11.14 kg h^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ที่ใช้ตีเหล็กที่มีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ย 9.91 kg h^{-1} พบว่า ถ่านห้ำม้นสำปะหลังมีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ยมากกว่าถ่านไม้ 11% ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองมากกว่า สมรรถนะของถ่านห้ำม้นสำปะหลังสามารถเผาเหล็กได้งานเฉลี่ย $0.63 \text{ kg}_{(\text{iron})} \text{ kg}_{(\text{coal})}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะของถ่านไม้ที่ใช้ตีเหล็กในปัจจุบัน พบว่า ถ่านห้ำม้นสำปะหลังมีสมรรถนะต่ำกว่าถ่านไม้ถึง 62% เมื่อนำมาใช้ในการเผาเหล็กเพื่อตีขึ้นรูป ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิในเตาเผาที่ถ่านห้ำม้นสำปะหลังทำได้ต่ำกว่าถ่านไม้และยังมีอัตราการเผาไหม้ที่มากกว่าถ่านไม้

แต่จากผลการศึกษาโดยรวม สามารถชี้ให้เห็นแนวทางการผลิตถ่านห้ำม้นสำปะหลัง ต้นทุนการผลิตถ่านห้ำม้นสำปะหลังซึ่งถ่านห้ำม้นสำปะหลังยังมีศักยภาพสามารถนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้มในครัวเรือนได้ โดยการเพิ่มความหนาแน่นในรูปถ่านอัดแท่งตามรายงานของ Nakason et al. (2019); Sen et al. (2016); ปรีชา และคณะ (2562); จุฬารัตน์ และสมโภชน์ (2554); จุฑามาต (2546) นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ตามรายงานของ Intagun and Maden (2020); Soponpongpiat et al. (2019); ธริณี และคณะ (2556) หรือนำไปใช้ในรูปไบโอชาร์ปรับปรุงดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำได้เช่นกัน ตามรายงานของ Wijitkosum and Sriburi (2021) ซึ่งการนำถ่านห้ำม้นสำปะหลังมาใช้ประโยชน์จะเป็นช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังได้อีกทางหนึ่ง

3.4 ผลการศึกษาด้านทุนการใช้ถ่านห้ำม้นสำปะหลังในกระบวนการตีเหล็ก

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่าน ซึ่งได้ผลการศึกษา ดังแสดงใน table 5 and figure 6 ซึ่งไม่คิดต้นทุนวัตถุดิบถ่านห้ำม้นสำปะหลังในแปลง

Table 5 Cost analysis of the use of cassava rhizome charcoal in blacksmithing process.

Cost item	Analysis list	Cost (Baht kg ⁻¹) (raw material)	Cost ratio (%)
Cassava rhizome *	There is no buying-selling of cassava rhizomes in the area (only labor costs are collected and removed from the area).	0	0
Labor costs for collecting cassava rhizomes from the crop area	(350 Baht day ⁻¹ x 4 man)/2,700 kg.	0.51	18.2
Transportation costs from the crop area to the charcoal kiln plant (at a distance of 50 km; The average cassava rhizome density was 206.14 kg m ⁻³).	4-wheel pickup trucks, load capacity 3.25 m ³ ; 400 Baht trip ⁻¹ x 670 kg trip ⁻¹	0.59	21.1
Conversion cost of cassava rhizomes to cassava rhizome charcoal (Charcoal production rate per day = 11.67 kg charcoal kiln ⁻¹ x 5 kiln day ⁻¹ = 58.35 kg(charcoal) day ⁻¹ ; Calculating the quantity of raw materials of cassava rhizomes** 58.35 kg(charcoal) day ⁻¹ x 3.6 = 210.06 kg (cassava rhizomes) day ⁻¹	1) Kiln cost 600 Baht kiln ⁻¹ x 5 kiln = 3,000 Baht, estimated service life 365 Times, costing 8.22 Baht day ⁻¹ . 2) Labor cost 350 Baht day ⁻¹ 3) no fuel charge Total expenses 358.22 Baht day ⁻¹	1.70	60.7
Total cost of cassava rhizome charcoal production		2.80	100

* No charge for the cost of cassava rhizomes, because the farmers already wish to remove the rhizomes from the the crop area. Usually have to hire workers to collect out, collect the incineration pile or plow, but be careful not to become weeds in the new round of planting.

** Calculated from the ratio of the conversion rate from cassava rhizomes to cassava rhizome charcoal at 3.6:1.

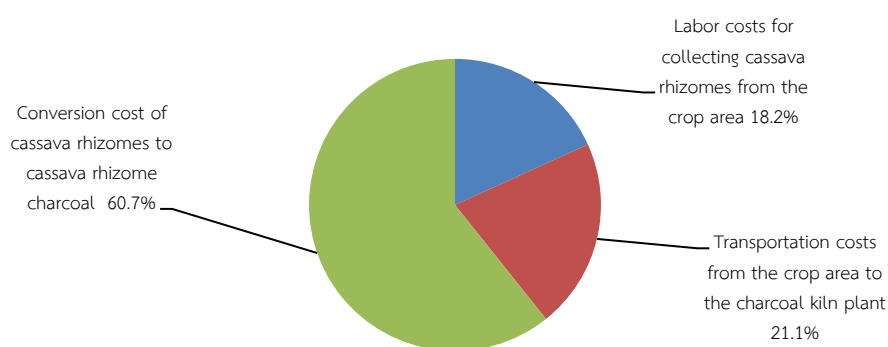


Figure 6 The production cost of cassava rhizome charcoal.

พบว่า ค่าแรงงานเก็บรวบรวมเหง้ามันสำปะหลังออกจากพื้นที่ 0.51 Baht kg⁻¹ คิดเป็น 18.2% ค่าขนส่งจากแปลงสู่เตาเผาถ่าน 0.59 Baht kg⁻¹ คิดเป็น 21.1% ค่าแปลงสภาพเหง้ามันสำปะหลังเป็นถ่านเห้งมันสำปะหลัง 1.70 Baht kg⁻¹ คิดเป็น 60.7% รวมต้นทุนการผลิตถ่านเห้งมันสำปะหลัง 2.80 Baht kg⁻¹ (เห้งมันสำปะหลัง) ถ้าคิดวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายในส่วนของ

ค่าแรงงานเก็บรวบรวมและค่าขนส่งจากแปลง เท่ากับ 1,100 Baht tons⁻¹ (เข้ามาเก็บรวบรวมภายหลังจากที่เก็บหัวมันสำปะหลังออกจากแปลงไปก่อนหน้านี้แล้ว) ในขณะที่ราคาซื้อขายของผู้ประกอบการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวลจากเห้งมันสำปะหลังตันละ 670-970 Baht (ธรีณี, 2556) และ 615 Baht (อุกฤษ, 2565) ทำให้เกษตรกรขาดแรงจูงใจที่จะเก็บรวบรวม

เห้จ้มน้ส้ปปะหล้งออกจ้กฟ้้นที่เปล้งปล้ก แต่ถ้มีกรว้งแพน เก้บเก้ยวเห้จ้พรว้มน้ส้ปปะหล้ง และม่เครื่งจ้กรกเล เกษตรช้วยท้่นแร้งและสมารถจ้ดการเก้บเก้ยวได้น้ซ้้นตอนเด้ยว จะส้งผลให้ค้ใช้จ้ยในซ้้นตอนน้้ดล้งได้

4 สรุปผลการศึกษา

การศ้กษารูปแบบและว้ธีการเผาถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง รูปแบบเตาเผาถ้่านแบบ 200 ล้ตรที่น้าศ้กษาม้ 3 รูปแบบ พบว้ ค่าควมร้อนของถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งเฉล้ยที่้ได้จากเตาเผาถ้่าน ท้้ 3 รูปแบบอยู่ระหว้าง 6,269.38-6,431.42 cal g⁻¹ มม่ควม แตกต่างก้นเมื่อเปร้ยบเท้ยบค่าควมร้อนเฉล้ยด้วยว้ธีการทาง สลลล แต่เมื่อพ้จารณาอ้ตราการผลล้ถ้่าน เปร้เช้้นด้ผลผลล้ถ้่าน ประสลลลภาพของเตาเผาถ้่าน จะพบว้เตาเผาถ้่านแบบเผา โดยตรงแบบเป้ดฝ้าบน จะม่ควมเหมาสมมากกว้เตาเผาถ้่าน แบบอ้้น

ผลการศ้กษาควมเป็นไปได้การใช้ถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง ทดแทนถ้่านม่ในการเผาเหล้กเพื่อด้ซ้้นรูปของผ้ประกบการด้ เหล้กบ้่านน้าถ้่าน เปร้ยบเท้ยบกับถ้่านม่ที่ใช้ในป้จจุบั้น ซ้้ สามารถสร้บได้ว้ถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งที่้การศ้กษามม่ สามารถให้ค่าควมร้อนถ้ถึงค่าอุนหภูมิที่้เหมาสมในการเผาเหล้ก เพื่อด้ซ้้นรูปได้ ม้อตราการเผาม่สูงกว้ถ้่านม่ด้เหล้กถ้ถึง 11% ทำให้ส้้นเปล้ืองถ้่านมากกว่าและถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งม่ สมรรถนะด้กว้ถ้่านม่ถ้ถึง 62% เมื่อน้ามาใช้ในการเผาเหล้กเพื่อ ด้ซ้้นรูป ซ้้เป็นผลมาจากอุนหภูมิในเตาเผาที่้ถ้่านเห้จ้มน้ ส้ปปะหล้งทำด้ด้กว้ถ้่านม่และย้ม่้อตราการเผาม่ที่้มากกว่า ถ้่านม่

ด้นทุนการผลล้ถ้่านจากเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง พบว้ ค่าแร้งงาน เก้บรวบรวมเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งออกจ้กฟ้้นที่ 0.51 Baht kg⁻¹ คล้ เป็น 18.2% ค่าซ้ส่งจากเปล้งสู่เตาเผาถ้่าน 0.59 Baht kg⁻¹ คล้ เป็น 21.1% ค่าเปล้งสภาพเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งเป็นถ้่านเห้จ้มน้ ส้ปปะหล้ง 1.70 Baht kg⁻¹ คล้เป็น 60.7% รวมด้นทุนการผลล้ ถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง 2.80 Baht kg⁻¹

สร้บได้ว้ เป็นไปม่ได้ที่้จะน้าถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งมาใช้ ทดแทนถ้่านม่ในกระบวนการด้เหล้ก

5 กิตติกรรมประกาศ

โครงการน้้สำเร็จล้่งไปได้ด้วยด้ ขอขอบคุนกองท้่นว้จ้ยและ พ้ฒนา มหาวล้ยาล้ยนครพนม ประจ้าป้ิงบประมาณ พ.ศ. 2565 ที่สน้บสนุนท้่นว้จ้ย ขอบคุนสาขาวิชาเครื่งกล คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรมและสาขาวิชาเครื่งจ้กรกเลเกษตร คณะเกษตรและ เทคโนโลยี มหาวล้ยาล้ยนครพนม ที่ให้ส้ถานที่้และเครื่งม้อในการ ทำว้จ้ย

ขอขอบคุนกลุ่มช่างด้เหล้ก บ้่านน้าถ้่าน ต้าบลน้าถ้่าน อำเภอ ธาตุพนม จ้งหว้ดนครพนม ที่ให้ข้อมูลและควมร้วมม้อ อ้นเป็น ประโยชน้ในการศ้กษาในคร้้งน้้

6 เอกสารอ้างอิง

- กรมพ้ฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง พลังงาน. 2566. โครงการพ้ฒนาการผลล้และการใช้เตาเผา ถ้่านแบบถ้ 200 ล้ตร. แหล่งข้อมูล: <http://e-lib.dede.go.th>. เข้าถ้ถึงเมื่อ 6 มกราคม 2566.
- กิตติพงษ์ ลาถุน. 2557. การศ้กษาและพ้ฒนาเครื่งผลล้ถ้่านอ้ด แ่่งจากถ้่านช้วมวล. วล้ยานพนธ์ป้ริญญาดุษฎีบัณฑิต. ขอนแก่น: บัณฑิตวล้ยาล้ย มหาวล้ยาล้ยขอนแก่น.
- จุฑามาศ บุษราคัมวดี. 2547. สมบัต้ของถ้่านอ้ดแ่่งจากเห้จ้มน้ ส้ปปะหล้งโดยอ้างถ้ถึงแหล่งว้ดถุ้ดบ ขนาคผงและอ้ตรา ส่วนด้วประสาน. วล้ยานพนธ์ว้ศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวล้ยาล้ย, มหาวล้ยาล้ย เกษตรศาสตร.
- จุฬารัตน์ ขาวก้าแพง, สมโกชน์ สดุดจันทร. 2554. การศ้กษาและ พ้ฒนาถ้่านอ้ดแ่่งจากว้สดุเกษตร. วารสารวล้ยาสาสตร เกษตร 42(3)พิเศษ, 481-484.
- ธัญชัย สาทะกลาง, ปรีญ คงกระพนธ์, อัครินทร์ อินทน้เวศน. 2559. การศ้กษาเตาเผาถ้่านไร่คว้นด้วยการด้ดตั้งคร้บนำ ควมร้อนรูปส้เหล้ยมผ้้นฝ้าเพื่อเพิ่มประสลลลภาพเช้งควม ร้อนและประหยดพลังงาน. รายงานการประกุมว้วิชาการ เครื่งช้ยพลังงานแ่่งประเทศไทย คร้้งที่ 12, พิชญโลก: คณะวล้ยาสาสตร และวล้ยาล้ยพลังงานทดแทน มหาวล้ยาล้ยนเรศวร ร้วมกับ มหาวล้ยาล้ยแม่จ้. 8-10 มิถุนายน 2559, โรงแรมว้งจันทร้เอร์ว้ว, พิชญโลก.
- ธรรณิ มณัศร้, ศิรศัทย เทพจล้, ธนภณ เจียรณ้ย. 2556. การศ้กษา รูปแบบธุรกิจการผลล้เช้ยเพลิงช้วมวลจากเห้จ้มน้ส้ปปะหล้ง ด้วยแนวค้ดการจ้ดการโลจล้สติกส์และโซ่อุปทาน. วารสารศร้ ปทุมป้รล้ศน 5(ฉบับวล้ยาสาสตรและเทคโนโลย้), 100-109.
- น้กราน หอมดว, พ้นธวัณน ไซยวรรณ, ญนัฒ สยแ่้ว, ประภัสสร ร้ตนไพลล้, กิตติกร สาสุจล้ด, เสริมสุข บัวเจรญ, นงเยาว์ หอมดว, ย้งร้กษ อรรถเวชกุล,ชุร้ตน์ ธาราร้กษ. 2564. การพ้ฒนาเครื่งป้ฏลัณณ์ไฟโรล้ซ้สสำหรับการใช้งาน ผลล้ควมร้อนและถ้่านช้วมวล. วารสารวล้ยการพลังงาน ทดแทนสู่ชุมชน 4(1), 47-53.
- ปฐมศก วล้พล. 2551. เศษว้สดุจากการเกษตรอ้ดแ่่ง. กรุงเทพมหานคร: จรัสสน้ทวงศ้การพ้พิมพ์.
- ประเทือง อุษาบลล้ศุทธิ์, ธารน้ มหายนันท์. 2548. การศ้กษาการ อ้ดแ่่งถ้่านเห้จ้มน้ส้ปปะหล้งโดยใช้เครื่งอ้ดถ้่านแบบม่ แร้งไฮโดรลล้ก. ว้ศวกรรมสาร มก. 56(19), 32-40.
- ประลอง ดำรงค์ไทย. 2540. การศ้กษาทดลองเปร้ยบเท้ยบว้ธีการ ผลล้และคุณภาพของถ้่านตามว้ธีการเผาแบบท้งถ้้นกับว้ธี ของกรมป่าม่. รายงานการประกุมทางว้วิชาการของ มหาวล้ยาล้ยเกษตรศาสตร คร้้งที่ 35, 709-717. กรุงเทพมหานคร: สาขาพ้ช ส่งเสริมและน้เทศศาสตรเกษตร อุตสาหกรรมเกษตร มหาวล้ยาล้ยเกษตรศาสตร. 3-5 กุมภาพันธ์ 2540, กรุงเทพมหานคร.

- ปรีชา ชันติโกมล, ไมตรี พลสงคราม, ดิณกร ภูวดิน, วิวัฒน์ อภิสิทธิ์ภิญโญ. 2562. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการไพโรไลซิส เหน้กมันสำปะหลังอัดแท่งเย็นโดยเตาแบบแก๊สหมุนวนปิด. รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 ประจำปี 2562, 707-712. อุตรธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2-5 กรกฎาคม 2562, โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์, อุตรธานี.
- พัชรินทร์ ฤชวรารักษ์, พันธุ์ทิพย์ ตาทอง. 2557. การเผาถ่าน วิธีดั้งเดิมของชุมชนท้องถิ่นสู่เทคโนโลยีพลังงานทางเลือก. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ 6(2), 52-71.
- พิตมาศ หวังดี, วุชรินทร์ เขียวไกร, จิรศักดิ์ บุอ่อน. 2558. การศึกษาการใช้ถ่านชีวมวลอัดแท่งทดแทนถ่านไม้ในอุตสาหกรรมตีเหล็ก. รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติการพัฒนาชุมชนที่ยั่งยืน ครั้งที่ 5, 178-188. ขอนแก่น. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 23-25 ธันวาคม 2558, โรงแรมเซ็นทารา แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์, ขอนแก่น.
- พิสิษฐ์ มณีโชติ, ประพิศาร ธารักษ์, บงกช ประสิทธิ์, ชาติ ไชยสิทธิ์, ณัฐภูมิ ขาวสะอาด, กิ่งกานต์ พันธวานิชย์, วิกานต์ วันสูงเนิน, อันธิกา เพชร, จันจิรา คุ่มปากพัง. มปป. คู่มือการสร้างเตาเผาถ่านแบบแนวนอนขนาด 200 ลิตร. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน). แหล่งข้อมูล: <https://social.nia.or.th/wp-content/uploads/2019/12/05-การสร้างเตาเผาถ่านแบบแนวนอนขนาด-200-ลิตร.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 6 มกราคม 2566.
- ไพฑูรย์ สาลี. 2548. งานตีเหล็กและชุบแข็ง ภูมิปัญญาท้องถิ่นจังหวัดนครนายก. แผนกวิชาพื้นฐานช่างอุตสาหกรรม: วิทยาลัยเทคนิคนครนายก.
- มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2565. ผลสำรวจมันสำปะหลังของคณะสำรวจภาวะการผลิต การค้ามันสำปะหลัง. แหล่งข้อมูล: <https://tapiocathai.org/L1.html>. เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2566.
- รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล, อุวิทย์ สุวคันธกุล, อัมพร ฤกษ์รัตน์. 2553. การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเหน้กมันสำปะหลัง. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา 4(2), 18-28.
- หาญณรงค์ บำรุงศิริ. 2553. สมบัติทางกลและทางกายภาพของถ่านไม้อัดก้อนที่ผลิตจากเศษถ่านไม้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. อุบลราชธานี: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- อับดุลรอหมัน โต๊ะฮิเล, มูฮัมหมัด ยือลาแป, โรสลินา จาราแว. 2561. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร. รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 3 ประจำปี 2561, 642-657. ยะลา: คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. 11-12 กุมภาพันธ์ 2561, ยะลา.
- อุกฤษ อุณหเลขกะ. 2565. การส่งเสริมเกษตรกรเก็บซากวัสดุทางการเกษตรผ่านแอปพลิเคชัน รีคัลท์. รายงานฉบับสมบูรณ์ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. แหล่งข้อมูล: https://www.khonthai4-0.net/system/resource/file/kpfgo_content_attach_file_320_1.pdf?date=2022-02-23%2016:28:56.1. เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2566.
- Carnaje, N.P., Talagon, R.B., Peralta, J.P., Shah, K., Paz-Ferreiro, J. 2018. Development and characterisation of charcoal briquettes from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)-molasses blend. PLOS ONE 13(11), e0207135.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. 1985. Industrial Charcoal Making. Rome: FAO.
- Homchat, K., Sucharitakul, T., Khantikamol, P. 2012. The experimental study on pyrolysis of the cassava rhizome in the large scale metal kiln using flue gas. Energy Procedia 14(2012), 1684 - 1688.
- Intagun, W., Maden, A. 2020. Effect of mixing ratios on physical properties and energy consumption of leucaena pellets by using fermented cassava rhizome. Science, Engineering and Health Studies 14(3), 193-202.
- Jarunee Khempila, Pumin Kongto. 2022. Torrefaction of Cassava Rhizome to Produce High-Grade Solid Biofuels. Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST) 21(1), 88-102.
- Juizo, C.G.F., Lima, M.R., Silva, D.A. 2017. Quality of the bark and wood of nine Eucalyptus species for the charcoal production. Revista Brasileira de Ciências Agrárias-Brazilian 12(3), 386-390.
- Nakason, K., Pathomrotsakun, J., Kraithong, W., Khemthong, P., Panyapinyopol, B. 2019. Torrefaction of agricultural wastes: Influence of lignocellulosic types and treatment temperature on fuel properties of biochar. International Energy Journal 19(4), 253-266.
- Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M.M., Valdez-Hernández, J.I., Revilla, U.S., Romero-Manzanares, A. 2015. Chemical characterization and fuel properties of wood and bark of two oaks from Oaxaca, Mexico. Industrial Crops and Products 65(March 2015), 90-95.
- Sangsuk, S., Buathong, C., Suebsiri, S. 2020. High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. Energy for Sustainable Development 59(December 2020), 1-7.

Sayakoummane, V., Ussawarujikulchai, A. 2009.

Comparison of the physical and chemical properties of briquette and wood charcoal in Khammouane Province, Lao PDR. *Environment and Natural Resources Journal* 7(1), 12–24.

Sen, R., Wiwatpanyaporn, S., Annachhatre, A.P. 2016.

Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management* 17(2), 158–175.

Soponpongpipat, N., Comsawang, P., Nanetoe, S. 2019.

Quality properties and pyrolysis characteristics of cassava rhizome pellets produced by alternating between pelletizing and torrefaction. *Processes* 7(12), 930.

Tippayawong, N., Rerkkriangkraia, P., Aggarrangsi, P.,

Pattiya, A. 2017. Biochar production from cassava rhizome in a Semi-continuous carbonization system. *Energy Procedia* 141(2017), 109–113.

Tippayawong, N., Saengow, N., Chaiya, E., Srisang, N.

2010. Production of charcoal from woods and bamboo in a small natural draft carbonizer. *International Journal of Energy and Environment (IJEE)* 1(5), 911-918.

Wijitkosum, S., Sriburi, T. 2021. Applying cassava stems

biochar produced from agronomical Waste to enhance the yield and productivity of maize in unfertile soil. *Fermentation* 7(4), 277.



การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

Development and Efficiency Evaluation of Cassava Cubes Cutting Machine

ธันวาคม ไม้ซุง^{1*}, ธีรพงศ์ พลโพธิ์¹, วสุ อุดมเพทายกุล¹

Thanawan Maichoon^{1*}, Teerapong Pholpho¹, Vasu Udompetaikul¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

*Corresponding author: Tel.: +66-6-3221-5900, E-mail: thanawan.180240@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบแปรรูปสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า เพื่อเพิ่มผลผลิต ลดระยะเวลาในการทำงาน และลดจำนวนแรงงาน ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย เครื่องหั่นหัวมันสำปะหลังแบบแผ่น เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า ชุดสายพานลำเลียง และระบบควบคุมการทำงานของชุดสายพานลำเลียง เพื่อตอบสนองการทำงานของระบบให้มีความต่อเนื่องตลอดเวลา จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่นของสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 พบว่า ความเร็วรอบสำหรับการหั่นเท่ากับ 1,162.38 และ 1,199.15 rpm และอัตราการป้อนเท่ากับ 22.07 และ 20.5 kg min⁻¹ ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์มันสำปะหลังแผ่นสมบูรณ์เท่ากับ 77.45% และ 72.65% ตามลำดับ และสำหรับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าของสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 คือ ความเร็วรอบของชุดหั่นลูกเต๋าเท่ากับ 1,231.69 และ 1,224.74 rpm และอัตราการป้อนเท่ากับ 20.92 และ 22.07 kg min⁻¹ ตามลำดับ จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบแปรรูปสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า พบว่าในกรณีมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 ความสามารถในการผลิตเท่ากับ 767.59±49.31 kg hr⁻¹ และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋าทะกัก 38.01±2.35% ส่วนมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 ความสามารถในการผลิตเท่ากับ 784.31±35.76 kg hr⁻¹ และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋าทะกัก 40.23±2.46%

คำสำคัญ: มันสำปะหลังแบบลูกเต๋า, เครื่องหั่นมันสำปะหลัง, การออกแบบส่วนประกอบกลาง

Abstract

This research aimed to develop and evaluate the efficiency of a cassava cubes cutting machine, which was designed to increase productivity, shorten working time and reduce the number of required workers. In order to continuously respond to the system operation at all times, the developed system consists of a cassava cutting machine, cassava cubes cutting machine, conveyor belt and conveyor belt control system. Based on the experiments to find the most suitable conditions for the cassava cutting machine when testing with Rayong 9 and Kasetsart 50 cassava cultivars, the cutting speeds were noted to be 1,162.38 and 1,199.15 rpm, feed rates were noted to be 22.07 and 20.5 kg hr⁻¹, and percentage of perfectly sliced cassava were 77.45% and 72.65%, respectively. Based on the experiments to find the most suitable conditions for the cassava cubes cutting when tested against the Rayong 9 and Kasetsart 50 cultivars, the cutting speeds were 1,231.69 and 1,224.74 rpm, while the feed rates were 20.92 and 22.07 kg hr⁻¹, respectively. System performance testing revealed that when working with Rayong 9 cultivar, the production capability was 767.59±49.31 kg hr⁻¹ and percentage of cassava cubes was 38.01±2.35%. When working with Kasetsart 50 cultivar, the production capability was 784.31±35.76 kg hr⁻¹ and percentage of cassava cubes was 40.23±2.4%.

Keywords: Cassava cubes, Cassava cutting machine, Central composite design.

Received: September 5, 2023

Revised: November 11, 2023

Accepted: December 8, 2023

Available online: March 16, 2024

1 บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพอากาศที่แปรปรวนได้ดี สามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีปริมาณแป้งสูง (Carbohydrate-rich crops) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น อาหารสำหรับมนุษย์ อาหารเลี้ยงสัตว์ วัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเพื่อใช้แทนพลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม เป็นต้น เนื่องจากมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลาย ๆ ด้าน ทำให้ความต้องการมันสำปะหลังในตลาดโลกเติบโตต่อเนื่อง ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลกรองจากข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวเจ้า และมันฝรั่ง

ประเทศไทยได้ขยายพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลังตามความต้องการในตลาดส่งออก สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร อธิบายสถานการณ์การผลิตมันสำปะหลังของไทยพบว่า ฤดูการผลิตปี 2564 และ ปี 2565 มีเนื้อที่เก็บเกี่ยว รวมทั้งประเทศ 10.18 ล้านไร่ ผลผลิต 34.69 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) เนื่องจากความพร้อมด้านแหล่งผลิตวัตถุดิบมันสำปะหลังของไทย ทำให้ไทยเป็นผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีประเทศ เวียดนาม กัมพูชา ไนจีเรีย บราซิล และ อินโดนีเซีย เป็นประเทศส่งออกรองลงมา

ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง โดยมีส่วนแบ่งการตลาด อยู่ที่ประมาณร้อยละ 70-80 ของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังรวมทั้งหมดในตลาดโลก เนื่องจากประเทศอื่นๆ ที่มีการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังส่วนมากจะบริโภคมันสำปะหลังเป็นอาหารหลักของประเทศ ประมาณร้อยละ 80-90 ของผลผลิต (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) ทำให้ประเทศไทย ซึ่งเป็นประเทศที่มันสำปะหลังไม่ใช่อาหารหลัก ทำให้ผลผลิตที่ได้ภายในประเทศ ถูกส่งออกเป็นจำนวนมากที่สุดในโลก ปริมาณการส่งออกอยู่ที่ประมาณร้อยละ 70 ของผลผลิตที่ได้ในประเทศไทย มันสำปะหลังจะส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์แปรรูป จากงานวิจัยพบว่า การส่งออกมันสำปะหลังในประเทศไทย มีส่วนแบ่งในตลาดส่งออกแป้งมันสำปะหลังดิบ (Cassava native starch) มันสำปะหลังเส้น (Cassava chip) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Cassava modified starch) อยู่ที่ 66% 59% และ 31% ตามลำดับ (สำนักงานวิจัยกรุงศรี, 2566)

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลังในประเทศไทยเป็นการแปรรูปในลักษณะของมันสำปะหลังเส้น ซึ่งมีลักษณะที่ใหญ่ ส่งผลทำให้กระบวนการลดความชื้นใช้เวลานาน ซึ่งส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงาน และมีโอกาสเกิดการเน่าเสีย หรือเกิดเชื้อราในระหว่างกระบวนการลดความชื้น ในปัจจุบัน จึงได้มีการพัฒนาเครื่องแปรรูปมันสำปะหลังแบบเตาขึ้นมา สามารถลด

อัตราการเกิดของเชื้อราในผลิตภัณฑ์แปรรูป และส่งผลทำให้กระบวนการลดความชื้น ใช้เวลาน้อยลง ความสามารถของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบเตาที่ทำการพัฒนาขึ้น มีความสามารถในการเป็นลูกเต๋าสัมบูรณ์ 33% ลูกเต๋าสัมบูรณ์ 54.7% และกำลังการผลิต 532.8 kg hr^{-1} (ไชยวัฒน์ และคณะ, 2561) เนื่องจากในส่วนของชุดหั่นมันสำปะหลังแบบเดิมที่ใช้อยู่มีลักษณะเป็นชุดใบมีด 2 ซม. ทำการหั่นมันสำปะหลังในแนวนอน มีความสามารถในการผลิตมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการในอุตสาหกรรม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบแปรรูปมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า ทำให้กระบวนการแปรรูปมีความต่อเนื่อง ส่งผลต่อกำลังในการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปของมันสำปะหลังให้มากยิ่งขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลังในประเทศไทย

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 หัวมันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้เลือกใช้มันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 แสดงใน Figure 1 โดยทำการสุ่มเลือกหัวมันสำปะหลัง 50 หัว ของแต่ละสายพันธุ์ โดยการใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ในการวัดขนาดของหัวมันสำปะหลังทั้งสามแนวแกน ได้แก่ ความยาวของหัวมันสำปะหลัง (L) ความกว้างของหัวมันสำปะหลัง (D1) และความหนาของหัวมันสำปะหลัง (D2) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการบันทึกผล นำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของหัวมันสำปะหลัง



Figure 1 Characteristics of cassava.

2.2 ระบบแปรรูปสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

ปัจจัยสำคัญของระบบแปรรูปสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า และสายพานลำเลียงที่ใช้ในระบบ สามารถอธิบายขั้นตอนการออกแบบในส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น

เครื่องหั่นมันสำปะหลังมีหน้าที่ลดขนาดของหัวมันสำปะหลังเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการหั่นมันสำปะหลังในลักษณะลูกเต๋า

เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่นมีขนาด ยาว x กว้าง x สูง เท่ากับ 75 x 54 x 79 cm งานวิจัยนี้มีการปรับปรุงและพัฒนาตัวเครื่องให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น และการทำงานที่สอดคล้องกับตัวระบบ สำหรับใบมีด งานวิจัยนี้ทำการเลือกใช้ใบมีดวงเดือนชนิดฟันแหลม โดยมีขนาด 10 inch และมีจำนวนฟัน 30 ฟัน แสดงใน Figure 2 ใบมีดติดตั้งบนเพลลาที่มีขนาด 1 inch ลักษณะสลับฟันปลา ซึ่งถูกขับโดยเครื่องต้นกำลังเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ที่ความถี่ 50 Hz ความเร็วรอบที่ 1430 rpm เครื่องต้นกำลังถูกควบคุมโดย Inverter ยี่ห้อ Sumitomo รุ่น AF-500 สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต้นกำลัง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการตัดกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นของมันสำปะหลัง เมื่อมันสำปะหลังผ่านการบดการแปรรูป มีลักษณะแสดงดัง Figure 3 โดยที่ a คือมันสำปะหลังแผ่นสมบูรณ์ b คือ มันสำปะหลังแผ่นไม่สมบูรณ์ และ c คือ เศษมันสำปะหลัง โดยที่มันสำปะหลังแผ่นจะถูกลำเลียงผ่านสายพานลำเลียงเพื่อเคลื่อนที่ไปยังเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า



Figure 2 Blade arrangement of cassava cutting machine.

2.2.2 สายพานลำเลียง

ชุดสายพานลำเลียงมีลักษณะการลำเลียงแบบลาดเอียง (Inclined conveyor belt) เลือกใช้สายพานชนิด PVC หนา 5 mm ขนาด ความกว้างเท่ากับ 30 cm และความยาวรอบวงเท่ากับ 400 cm และโครงสร้างเป็น Aluminum profile ขนาด 20x20 mm หลังจากทำการติดตั้งสายพานลำเลียงมีความยาว

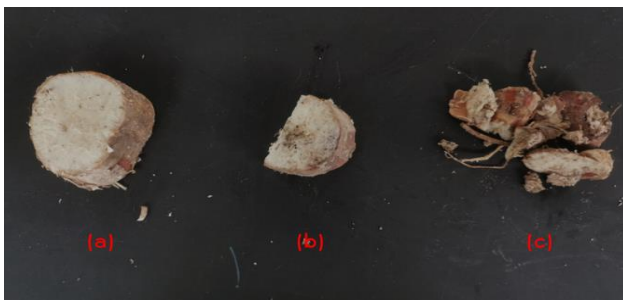


Figure 3 Characteristics of various types of cassava.

เท่ากับ 2 m มีความลาดเอียง 16° การขับเคลื่อนสายพานลำเลียง เลือกใช้เครื่องต้นกำลังเป็นมอเตอร์ 12 VDC ที่ความเร็วรอบ 110 rpm โดยนำไปใช้ในการขับเคลื่อนสายพานชนิด 5M ที่ขนาด 48 ฟัน และมีเฟืองตามขนาด 12 ฟัน โดยมีความเร็วรอบบนสายพานเท่ากับ 1.17 m s⁻¹ การทำงานของสายพานลำเลียง

ถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมการทำงานของระบบให้มีความสอดคล้องกับอัตราการป้อนของเครื่องหั่นมันสำปะหลัง และเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า เพื่อให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะการเชื่อมต่อของวงจรควบคุมมีลักษณะแสดงดัง Figure 4 ระบบควบคุมการลำเลียง เลือกใช้บอร์ดคอลโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 ซึ่งมีขา analog inputs แต่ละ pins ให้ความละเอียด 10 bits ส่งผลทำให้การส่งสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ให้ Motor driver ได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น สำหรับระบบควบคุมการลำเลียง เลือกใช้ตัวตรวจจับ Infrared Sensor รุ่น GP2Y0A02 สามารถวัดระยะตั้งแต่ 20 ถึง 150 cm ระยะทางที่ได้จากเซ็นเซอร์ถูกนำไปใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดสายพานลำเลียง เพื่อสอดคล้องกับปริมาณของมันสำปะหลังที่อยู่ในระบบ

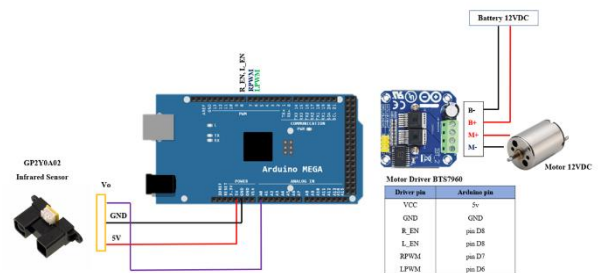


Figure 4 Conveyor Control Circuit.

2.2.3 เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

มันสำปะหลังแบบลูกเต๋ามีขนาด ยาว x กว้าง x สูง เท่ากับ 60 x 80 x 130 cm เลือกใช้ชุดต้นกำลังมอเตอร์ 3 เฟส ความเร็วรอบ 1400 rpm ที่ความถี่ 50 Hz ใช้สำหรับการขับเคลื่อนชุดต้นกำลังและถ่วงสมดุลรวมถึงชุดกดมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า ซึ่งถูกควบคุมโดย Inverter เช่นเดียวกับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแผ่นเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วในการหั่นกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นเป็นลูกเต๋าของมันสำปะหลังแผ่น ชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋าลูกเลือกใบมีดทำจาก Stainless blade นำใบมีดทั้ง 14 ใบสานกัน มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมขนาด 2.54 x 2.54 cm เพื่อให้ได้มันสำปะหลังลูกเต๋ามีขนาดเท่ากับช่องว่างที่กำหนด แสดงดัง Figure 5 และ Figure 6 แสดงลักษณะของมันสำปะหลังที่ผ่านการหั่นของเครื่อง โดยที่ a คือ มันสำปะหลังลูกเต๋าสสมบูรณ์ b คือมันสำปะหลังลูกเต๋าสไม่สมบูรณ์ และ c เศษมันสำปะหลัง งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงแก้ไขในส่วนของการตัดมันสำปะหลังออก โดยชุดตัดถูกแทนที่โดยเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น จากนั้นทำการยกตัวเครื่องให้มีความลาดเอียงเท่ากับ 18 องศา ซึ่งเป็นมุมไหลของมันสำปะหลังแผ่นเมื่อทำการทดสอบกับแผ่นสแตนเลสหนา 2 mm ซึ่งมีส่วนช่วยให้มันสำปะหลังไหลไปยังชุดหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าสได้ดียิ่งขึ้น



Figure 5 Blade for cassava cubes cutting.

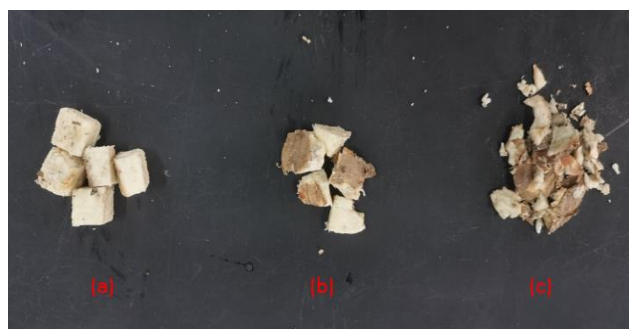


Figure 6 Characteristics of various types of cassava cubes.

2.2.4 การทำงานของระบบแปรรูปสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

จากการออกแบบและพัฒนาแปรรูปมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าระบบที่ทำการออกแบบแสดงดัง Figure 7 แสดงลักษณะการเชื่อมต่อในระบบที่ออกแบบ โดยหั่นมันสำปะหลังจะถูกป้อนเข้าที่เครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น (หมายเลข 1) โดยกำหนดความเร็วรอบในการหั่นที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลอง จากนั้นมันสำปะหลังแผ่นถูกลำเลียงผ่านสายพานลำเลียงที่มีความลาดเอียง 16° (หมายเลข 2) เพื่อขนย้ายไปยังเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า (หมายเลข 5) กำหนดความเร็วรอบในการหั่นเต๋าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลอง โดยที่มันสำปะหลังแผ่นจะไหลลงไปยังชุดรองรับมันสำปะหลังแผ่น (หมายเลข 3) ซึ่งเป็นจุดสำหรับการตรวจวัดปริมาณมันสำปะหลังแผ่นที่รอการหั่นในระบบ โดย Infrared sensor (หมายเลข 4) เพื่อควบคุมการทำงานของสายพานลำเลียงให้มีความสอดคล้องกับปริมาณมันสำปะหลังแผ่นในระบบ เมื่อมันสำปะหลังถูกหั่นให้อยู่ในรูปแบบลูกเต๋ได้แล้ว ในงานวิจัยนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพในระบบ และคำนวณความสามารถในการผลิตเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์งานวิจัย

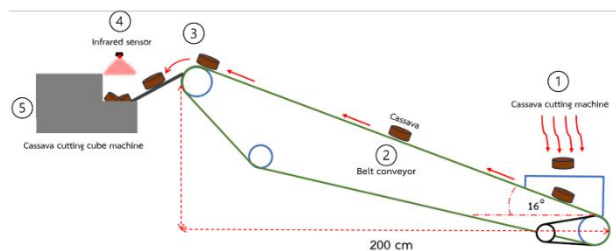


Figure 7 Principal cassava cubes cutting Machine.



Figure 8 Cassava cubes cutting system.

2.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลัง

การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลัง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) โดยที่งานวิจัยนี้การวิเคราะห์ข้อมูลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

2.3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น

มันสำปะหลังแต่ละสายพันธุ์ถูกใช้ในการศึกษาโดยการทดลองแบบ Central Composite Design แบบ 2 factor 5 levels ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบของชุดใบมีด (X1) ที่ระดับ 798.77, 858.00, 1001.00, 1144.00 และ 1203.23 rpm และอัตราการป้อน (X2) ที่ระดับ 7.93, 10.00, 15.00, 20.00 และ $22.07 \text{ kg min}^{-1}$ โดยมีตัวแปรตาม (Y) คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นแผ่นสมบูรณ์ จากการออกแบบการทดลองมีจำนวนการทดลอง คือ 13 การทดลอง

2.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

มันสำปะหลังแต่ละสายพันธุ์ถูกใช้ในการศึกษา โดยการทดลองแบบ Central Composite Design แบบ 2 factor 5 levels ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบของชุดหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า (X1) ที่ระดับ 922.01 980.00 1120.00 1260.00 และ 1317.99 rpm และอัตราการป้อน (X2) ที่ระดับ 7.93 10.00 15.00 20.00 และ $22.07 \text{ kg min}^{-1}$ โดยมีตัวแปรตาม (Y)

คือ เปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋าสมบูรณ์ จากการออกแบบการทดลองมีจำนวนการทดลอง คือ 13 การทดลอง เช่นเดียวกับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น จากการทดสอบเบื้องต้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแผ่น มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์เฉลี่ยทั้ง 2 สายพันธุ์ เท่ากับ $74.54 \pm 2.18\%$ ในการทดลองครั้งนี้ จึงกำหนดเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์ที่ป้อนเข้าระบบเท่ากับ 70% ของน้ำหนักที่ทำการทดลอง

2.4 ประสิทธิภาพของระบบแปรรูปมันสำปะหลังแบบลูกเต๋

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ประเมินโดยความสามารถในการผลิต และเปอร์เซ็นต์ลูกเต๋าสมบูรณ์ ลูกเต๋ที่ไม่สมบูรณ์ เศษมันสำปะหลัง และมันสำปะหลังที่สูญหายในระบบ ในการทดลองกำหนดอัตราการป้อน 20 kg min^{-1} ทำการจับเวลาในการทำงานของระบบ จำนวน 10 ชั่วโมง ทำการประเมินเปอร์เซ็นต์มันสำปะหลังรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทำงานทั้งระบบ

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ลักษณะทางกายภาพของหัวมันสำปะหลัง

จากการทดลอง พบว่าขนาดของหัวมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 มีความกว้างเฉลี่ย เท่ากับ $5.80 \pm 0.71 \text{ cm}$ ความยาวเฉลี่ย เท่ากับ $24.68 \pm 4.96 \text{ cm}$ และความหนาของหัวมันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 9 มีความยาวเฉลี่ย เท่ากับ $5.34 \pm 0.64 \text{ cm}$ จากการทดลองหาขนาดของหัวมันสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีความกว้างเฉลี่ย เท่ากับ $5.94 \pm 0.74 \text{ cm}$ ความยาวเฉลี่ย เท่ากับ $43.96 \pm 8.04 \text{ cm}$ และความยาวเฉลี่ย เท่ากับ $5.07 \pm 0.65 \text{ cm}$ จากการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ย (t-test) เพื่อหาความแตกต่างของขนาดหัวมันสำปะหลังทั้ง 2 สายพันธุ์ จาก Table 1 แสดงความแตกต่างของขนาดหัวมันสำปะหลัง 2 สายพันธุ์ที่ทำการทดสอบ พบว่าความกว้าง และความหนาของหัวมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และจากการทดสอบสมมติฐานพบว่า ความยาวของหัวมันสำปะหลังทั้ง 2 สายพันธุ์ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

Table 1 Physical characteristics of cassava roots.

Cultivar	Dimension		
	Width	Length	Thickness
Rayong 9	5.80 ± 0.71	24.68 ± 4.96	5.34 ± 0.64
	ns	b	ns
Kasetsart 50	5.94 ± 0.74	43.96 ± 8.04	5.07 ± 0.65
	ns	a	ns

* a, b = means in the same column are significantly different ($\alpha=0.05$).

** ns = means in the same column are not significantly different ($\alpha=0.05$).

3.2 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลัง

จากการทดลองการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น และการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋ สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น

จากการทดลองหั่นหัวมันสำปะหลังตามรูปแบบการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองที่มีความเร็วรอบของชุดใบมีด คือ 798.77 rpm มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นเท่ากับ 21.27% เมื่อทำการทดลองกับสายพันธุ์ระยอง 9 และสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีค่าเท่ากับ 29.27% ซึ่งเป็นความเร็วรอบในการหั่นที่ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นน้อยที่สุดในการทดลอง จากการทดลองที่ความเร็วรอบของชุดใบมีด 1,144 rpm พบว่าส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์มากที่สุด โดยมีค่าความเป็นแผ่นสมบูรณ์ของสายพันธุ์ระยอง 9 เท่ากับ 77.45 % และสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีค่าเท่ากับ 72.65% ที่การทดสอบอัตราการป้อนเท่ากับ 20 kg min^{-1} ทั้งนี้ในการทดลองพบว่า หากเพิ่มความเร็วรอบในการหั่นมันสำปะหลัง คือ 1,203.23 rpm ส่งผลทำให้ความเป็นแผ่นสมบูรณ์ลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการทดสอบกับมันสำปะหลังทั้ง 2 สายพันธุ์

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) พบว่าปัจจัยทั้ง 2 ได้แก่ ความเร็วรอบของชุดใบมีด และอัตราการป้อนไม่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) และจากการทดลองพบว่าปัจจัยความเร็วรอบของชุดใบมีด มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และอัตราการป้อนไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จาก Figure 9 แสดงอิทธิพลของความเร็วรอบชุดใบมีดกับอัตราการป้อนต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์ของมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 และ Figure 10 แสดงอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 จากภาพเมื่อเพิ่มความเร็วรอบส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เหมาะสม เมื่อทำการเพิ่มอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์ลดลง แต่การเพิ่มอัตราการป้อนพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังที่ทำการทดสอบกับมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 ได้ดังนี้ ความเร็วรอบของชุดใบมีดเท่ากับ 1,162.38 rpm และอัตราการป้อนเท่ากับ $22.07 \text{ kg min}^{-1}$ ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็น

แผ่นสมบูรณ์เท่ากับ 75.35% และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีความเร็วรอบของชุดใบมีด เท่ากับ 1,199.15 rpm และอัตราการป้อนเท่ากับ 20.50 kg min⁻¹ ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นแผ่นสมบูรณ์เท่ากับ 74.64%

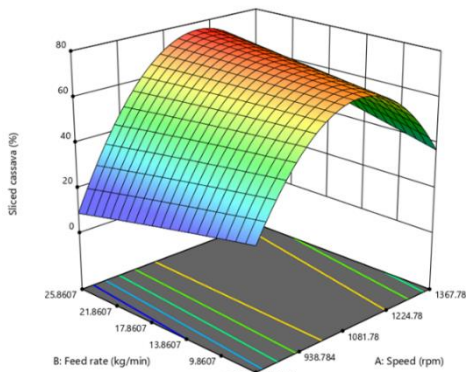


Figure 9 Effects of linear velocity and feed rate on Rayong 9 cassava slices percentage.

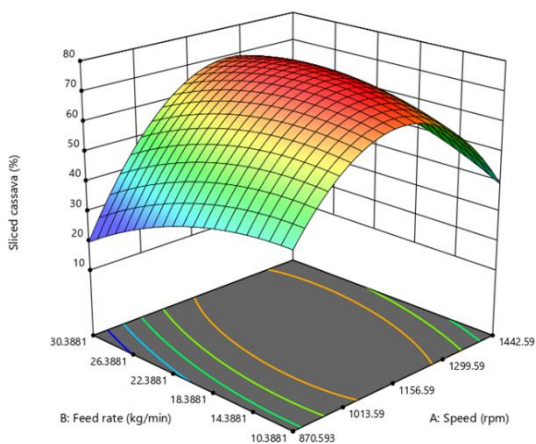


Figure 10 Effects of linear velocity and feed rate on Kasetsart 50 cassava slices percentage.

3.2.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

จากการทดลองหั่นหัวมันสำปะหลังตามรูปแบบการทดลองแบบ Central Composite Design พบว่าเมื่อใช้ความเร็วของชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋า 1,260 rpm ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋ามีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.45% เมื่อทดลองกับสายพันธุ์ระยะยง 9 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 41.15% เมื่อทำการทดลองกับสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 โดยมีอัตราการป้อนเท่ากับ 20 kg min⁻¹ หากเพิ่มความเร็วยรอบของชุดหั่นเป็น 1,317.99 kg min⁻¹ ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋าลดลงเหลืออย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นจากค่าความเร็วรอบในการหั่นที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์ในการทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าดำสุดของสายพันธุ์ระยะยง 9 เท่ากับ 10.27% และสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เท่ากับ 12.40% เมื่อทำ

การทดลองที่ความเร็วเชิง 922.01 rpm ซึ่งเป็นความเร็วที่น้อยสุดในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) พบว่าปัจจัยทั้ง 2 ได้แก่ ความเร็วของชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋า และอัตราการป้อนไม่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) และจากการทดลองพบว่าปัจจัยความเร็วของชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋ามีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) และอัตราการป้อนไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่น

จาก Figure 11 แสดงอิทธิพลของความเร็วของชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋ากับอัตราการป้อนต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์ของมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยะยง 9 และ Figure 12 แสดงอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 หากทำการเพิ่มความเร็วยรอบในการหั่นส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เหมาะสม หากทำการเพิ่มความเร็วยรอบต่อเนื่อง ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 2 สายพันธุ์ แต่การเพิ่มหรือลดอัตราการป้อนพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ดังนั้น สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า ที่ทำการทดสอบกับมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยะยง 9 ได้ดังนี้ ความเร็วของชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋าทะกั 1,231.69 rpm และอัตราการป้อนเท่ากับ 20.92 kg min⁻¹ ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์เท่ากับ 38.58% และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีความเร็วของชุดหั่นมันสำปะหลังลูกเต๋าทะกั 1,224.74 rpm และอัตราการป้อนเท่ากับ 22.07 kg min⁻¹ ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสสมบูรณ์เท่ากับ 40.96%

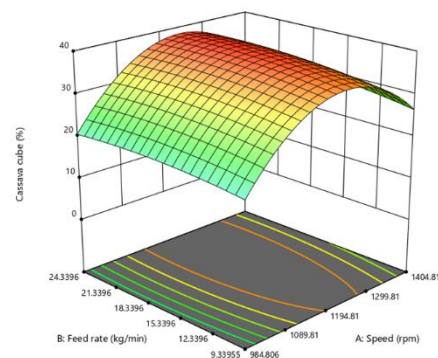


Figure 11 Effects of linear velocity and feed rate on Rayong 9 cassava cubes percentage.

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังทั้ง 2 รูปแบบ โดยวิธี Central Composite Design ทำให้ทราบค่าที่สภาวะเหมาะสมในการทำงานของตัวระบบของ มันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 จากนั้น กำหนดการทำงานของเครื่องให้เหมาะสมที่สุดของแต่ละสายพันธุ์ และทำการทดลองหาความสามารถในการผลิตโดยที่กำหนดอัตรา

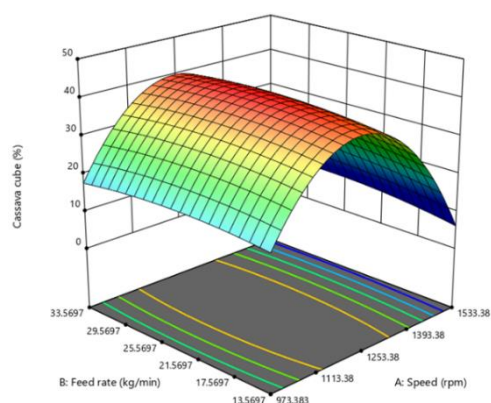


Figure 12 Effects of linear velocity and feed rate on Kasetart 50 cassava cubes percentage.

การป้อนมันสำปะหลังที่ 20 kg min^{-1} จากนั้นทำการทดสอบเป็นจำนวน 10 ซ้ำ จาก Figure 13 แสดงความสามารถในการผลิตที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง พบว่ามันสำปะหลังสายพันธุ์

ระยอง 9 มีความสามารถในการผลิตสูงสุดเท่ากับ $857.14 \text{ kg hr}^{-1}$ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ $699.03 \text{ kg hr}^{-1}$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $767.59 \pm 49.31 \text{ kg hr}^{-1}$ และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ $38.01 \pm 2.35\%$ ความเป็นเต๋ที่ไม่สมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ $58.23 \pm 2.40\%$ เศษมันสำปะหลังเฉลี่ยเท่ากับ $1.40 \pm 0.32\%$ และค่าการสูญเสียในระบบเฉลี่ยเท่ากับ $2.36 \pm 0.39\%$ จากการทดลองสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีความสามารถในการผลิตสูงสุดเท่ากับ $827.59 \text{ kg hr}^{-1}$ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ $720.00 \text{ kg hr}^{-1}$ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $784.31 \pm 35.76 \text{ kg hr}^{-1}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ $40.26 \pm 2.46\%$ ความเป็นเต๋ที่ไม่สมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ $55.20 \pm 2.30\%$ เศษมันสำปะหลังเฉลี่ยเท่ากับ $1.69 \pm 0.39\%$ และค่าการสูญเสียในระบบเฉลี่ยเท่ากับ $2.88 \pm 0.41\%$ จากนั้นทำการทดสอบ t-test เพื่อหาความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดง Table 2

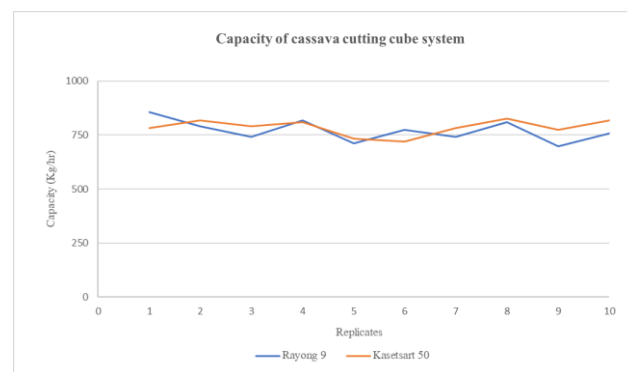


Figure 13 Capacity of cassava cubes cutting system.

Table 2 Efficiency system of cassava cubes cutting machine.

Cultivars	Capacity (kg hr^{-1})	Cube (%)	Non-Cube (%)	Scrap (%)	Loss (%)
Rayong 9	$767.59 \pm 49.31 \text{ ns}$	$38.01 \pm 2.35 \text{ ns}$	$58.23 \pm 2.40 \text{ ns}$	$1.40 \pm 0.32 \text{ ns}$	$2.36 \pm 0.39 \text{ ns}$
Kasetart 50	$784.31 \pm 35.76 \text{ ns}$	$40.26 \pm 2.46 \text{ ns}$	$55.20 \pm 2.30 \text{ ns}$	$1.69 \pm 0.39 \text{ ns}$	$2.88 \pm 0.41 \text{ ns}$

*** ns – means in the same column there is not significant difference ($\alpha=0.05$).

จาก Table 2 แสดงผลการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ย (t-test) พบว่าความสามารถในการผลิตของ 2 สายพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และจากการประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต๋าสมบูรณ์ ความไม่เป็นที่ เศษมันสำปะหลัง และค่าความสูญเสียในระบบของ 2 สายพันธุ์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) ซึ่งแสดงถึงความสามารถของระบบในการแปรรูปมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าที่สามารถแปรรูปหัวมันสำปะหลังได้หลายสายพันธุ์ อีกทั้งระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มกำลังการผลิตโดยประมาณ 40% เมื่อเทียบกับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าก่อนมีการปรับปรุง

4 สรุป

ระบบเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าที่พัฒนาขึ้น มีส่วนช่วยให้กระบวนการแปรรูปมีความต่อเนื่องมากขึ้น จากผลการทดลองหาขนาดหัวมันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 ทั้งสามแนวแกน พบว่าความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ $5.80 \pm 0.71 \text{ cm}$ ความยาวเฉลี่ยเท่ากับ $24.68 \pm 4.96 \text{ cm}$ และความหนาเฉลี่ยเท่ากับ $5.34 \pm 0.64 \text{ cm}$ สำหรับสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ $5.94 \pm 0.74 \text{ cm}$ ความยาวเฉลี่ยเท่ากับ $43.96 \pm 8.04 \text{ cm}$ และความหนาเฉลี่ยเท่ากับ $5.07 \pm 0.65 \text{ cm}$

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบแผ่นของสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 ความเร็วรอบชุดหั่นเท่ากับ 1,162.38 และ 1,199.15 rpm อัตราการป้อนเท่ากับ 22.07 และ 20.5 kg hr^{-1} และมีเปอร์เซ็นต์มันสำปะหลังแผ่น

สมบูรณ์เท่ากับ 77.45% และ 72.65% ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋าของสายพันธุ์ระยอง 9 และเกษตรศาสตร์ 50 ความเร็วรอบของชุดหั่นเท่ากับ 1,231.69 และ 1,224.74 rpm อัตราการป้อนเท่ากับ 20.92 และ 22.07 kg hr⁻¹ และเปอร์เซ็นต์ความเป็นเต้าสมบูรณ์เท่ากับ 38.58% และ 40.96% ตามลำดับ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนของความสามารถในการผลิต ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ประมาณ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องหั่นมันสำปะหลังที่พัฒนาขึ้นก่อนหน้า (ไชยวัฒน์และคณะ, 2561) ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพของระบบแปรรูปสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า มันสำปะหลังสายพันธุ์ระยอง 9 มีความสามารถในการผลิตเท่ากับ 767.59±49.31 kg hr⁻¹ และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋าทะกั 38.01±2.35% และมันสำปะหลังสายพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีความสามารถในการผลิตเท่ากับ 784.31±35.76 kg hr⁻¹ และมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นลูกเต๋าทะกั 40.23±2.46%

5 กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้มีส่วนช่วยในการสนับสนุนด้านการศึกษา ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้มีส่วนช่วยด้านคำปรึกษา โครงการวิจัย เสนอแนวทางแก้ไขปัญหา และวิเคราะห์ผลข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ที่ให้ใช้สถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆในการทำวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- ไชยวัฒน์ มณีอินทร์, อาทิงค์ รัชฎานนท์, อาลีฟ กัลยามิตร. 2561. การออกแบบและพัฒนาชุดกดและชุดมิดสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า. ปรินญาณพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิรัตน์ หวังเชื่อนกลาง. 2556. เครื่องหั่นมันเส้น. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ระดับชาติ ครั้งที่ 14 ประจำปี 2556, 256-261. ประจวบคีรีขันธ์: โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์พลาซ่า. 1-4 เมษายน 2556, หัวหิน, ประจวบคีรีขันธ์.
- ธัชพล อรรถประวิทย์, ชีรเดช ธัญญเจริญ, พชรพล ประภารัตน์. 2562. การสร้างและออกแบบชุดใบมีดสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า. ปรินญาณพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ธนพล ศิริแพทย์, สุรียัน โมคศิริ, อติวิชญ์ วงศ์สุวานิช. 2560. การออกแบบและพัฒนาใบมีดสำหรับเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบลูกเต๋า. ปรินญาณพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งานวิจัยกรุงศรี. 2566. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม 2566-2568 มันสำปะหลัง. แหล่งข้อมูล: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/cassava/io/cassava-2023-2025>. เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2566.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. มันสำปะหลังโรงงาน. แหล่งข้อมูล: <https://www.oae.go.th>. เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2566.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. ความเป็นมาของมันสำปะหลังในประเทศไทย. แหล่งข้อมูล: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=17891>. เข้าถึงเมื่อ 2 มิถุนายน 2566.



การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตถ่านด้วยอุปกรณ์แบบ 3 ขั้นตอน

Analysis of Properties of Products from a 3-Step Charcoal Production Process

ทินกฤต นฤนันต์¹, ศรีณรัตน์ คงมัน¹, อจเรย์ เงินงาม², ชญาภาณท์ สิทธิโอด², ทิพาพร คำแดง², ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย²,
นำพร ปัญโญใหญ่^{2*}

Thinnakrit Naruethanan¹, Sarunrat Khongman¹, Ajaree Ngerngam², Chayakarn Sittioad²,
Tipaporn Khamdaeng², Thanasit Wongsiriamnuay², Numpon Panyoyai^{2*}

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, นครสวรรค์ 60000

¹Mechanical Engineering, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, Nakhon Sawan 60000

²หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่ 50290

²Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai 50290

*Corresponding author: Tel.: +66-81-784-0249, E-mail: n.panyoyai@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตถ่านด้วยอุปกรณ์การผลิตแบบ 3 ขั้นตอน ทำการศึกษาโดยใช้ชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ไม้ไผ่ ไม้ลำไย และซังข้าวโพด ปริมาณ 40 40 และ 35 kg ตามลำดับ อุปกรณ์ ประกอบด้วย เตาเผาถ่านรูปทรงกระบอกขนาด 200 L ชุดกลั่นน้ำส้มควันไม้ และชุดเตาชีวมวลสำหรับเผาควันซ้ำเพื่อลดมลพิษที่ปล่อยสู่ สภาพแวดล้อม จากผลการทดลอง พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์น้ำส้มควันไม้ดิบจากถ่านซังข้าวโพด ถ่านไม้ลำไย และถ่านไม้ไผ่เป็น 28.80% 27.68% และ 27.83% ตามลำดับ มีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.27-3.40 มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.0089-1.0091 หลังจากนั้น ทำให้น้ำส้มควันไม้บริสุทธิ์ โดยทิ้งให้ตกตะกอน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลวเนื้อเดียวกันไม่แยกชั้น มีกลิ่นควันไฟ สีน้ำตาลแดงใสหรือสี น้ำตาลเหลืองใส มีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.62-3.89 ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.0052-1.0072 และได้ปริมาณถ่านเฉลี่ยที่ได้จาก เตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอนในกรณีซังข้าวโพด 24.86% ไม้ลำไย 24.50% และไม้ไผ่ 24.00% ค่าความร้อนของถ่านไม้ลำไย ถ่านไม้ไผ่ และถ่านซังข้าวโพด เท่ากับ 6,923 Cal g⁻¹ 7,381 Cal g⁻¹ และ 7,632 Cal g⁻¹ ตามลำดับ โดยชีวมวลที่ดีที่สุดในการผลิตถ่านและน้ำส้ม ควันไม้คือ ไม้ไผ่

คำสำคัญ: น้ำส้มควันไม้, ถ่าน, ชีวมวล

Abstract

The present study aimed to investigate the characteristics of products produced in the charcoal production process utilizing a three-step production unit. The study utilized three different types of biomasses: bamboo, longan wood, and corncob, weighing 40 kg, 40 kg, and 35 kg, respectively. The equipment included a 200 L cylindrical charcoal kiln, a wood vinegar distillation unit, and a biomass kiln for burning smoke to reduce pollution emissions. The raw wood vinegar products from corncob charcoal, longan wood charcoal, and bamboo charcoal weighed 9.03±0.57 kg, 11.07±0.51 kg, and 11.13±0.31 kg, respectively. The pH values ranged from 3.27 to 3.40, while the specific gravities ranged from 1.0089 to 1.0091. The raw wood vinegar was transformed into pure wood vinegar by a settling process. The liquid was noted to be homogenous, with a smoky scent, and had a clear reddish brown or yellowish brown color, with pH values ranging from 3.62 to 3.89 and specific gravities between 1.0052 and 1.0072. The average charcoal yield from the three-step charcoal kiln was: longan wood 9.8 kg, bamboo 9.6 kg, and corncobs 8.7 kg. The calorific values of longan wood charcoal, bamboo charcoal, and corncob charcoal were

Received: October 3, 2023

Revised: November 10, 2023

Accepted: November 10, 2023

Available online: March 16, 2024

6,923 Cal g⁻¹, 7,381 Cal g⁻¹, and 7,632 Cal g⁻¹, respectively. Bamboo is the most effective biomass to produce charcoal and wood vinegar.

Keywords: Wood vinegar, Charcoal, Biomass

1 บทนำ

ถ่านถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนมาเป็นระยะเวลามากกว่าสิบศตวรรษ โดยริเริ่มมาจากกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออก เช่น ประเทศจีน และญี่ปุ่น (Bhattacharya et al. 2003) ซึ่งในกระบวนการผลิตถ่านแบบดั้งเดิมนั้นก่อให้เกิดมลพิษ (Naruethanan et al. 2022) เพื่อลดปัญหาที่กล่าวมานั้น จึงมีการศึกษาการออกแบบเตาเผาให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เพื่อลดมลพิษที่ปล่อยออกมาสู่สภาพแวดล้อมด้วยวิธีการเผาถ่านในพื้นที่อับอากาศ (Somporn et al. 2020; Srisophon et al. 2020; Petchaihan et al. 2020; Panyoyai et al. 2019; Sittioad et al. 2022; Intagun et al. 2018) นอกจากนี้ทำให้ได้น้ำส้มควันไม้และผลผลิตน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากกระบวนการจะมีคุณภาพที่สูง โดยใช้เตาเผาชีวมวลแบบถัง 200 L (ชัยพร และคณะ, 2565) นอกจากนี้ยังได้มีการประยุกต์ใช้ถ่านในงานด้านการเกษตร เช่น การช่วยปรับปรุงดินให้ร่วนซุย ใช้เพื่อเพิ่มสารอาหารให้แก่พืช ใช้ผสมในปุ๋ยหมัก และใช้เพื่อยืดอายุผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว โดยถ่านจะช่วยดูดซับแก๊สเอทิลีนที่ถูกคายออกมา

น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีน้ำตาลใสและมีกลิ่นควันไฟ ได้จากการควบแน่นของควันที่เกิดจากการเผาถ่านในช่วงที่ไม่กำลังเปลี่ยนเป็นถ่าน (wood carbonization) (บุศรา และคณะ, 2562) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านไม้ ประกอบด้วยกรดอินทรีย์ ฟีนอล แอลกอฮอล์ สารประกอบคาร์บอนิล สารอื่น ๆ อีกมากกว่า 200 ชนิด ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ทั้งในด้านการเกษตรและปศุสัตว์ (ณัฐิมา และคณะ, 2556) เช่น เป็นสารช่วยเร่งการเจริญเติบโตของพืช หรือเร่งการงอกของเมล็ดพืช อีกทั้งยังเป็นสารป้องกันรักษาเนื้อไม้ให้คงทน ป้องกันการทำลายจากมด แมลง รวมถึงเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคพืช และใช้เป็นสารลดกลิ่นและแมลงในฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น (จันทิมา และคณะ, 2563)

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการทดสอบผลิตภัณฑ์จากเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน โดยการทดลองผลิตถ่านจากซังข้าวโพด ไม้ลำไย และไม้ไผ่ ซึ่งมีเป็นปริมาณมากในภาคเหนือ ประกอบกับสมบัติที่ดีจึงทำให้ได้ถ่านที่ได้มีค่าพลังงานความร้อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ไผ่ที่มีค่าความร้อน 6,178 Cal g⁻¹ (งานพัฒนาพลังงานจากไม้, 2550; วีรภูธร, 2563) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มากขึ้นเป็นประโยชน์มากแก่พืช และน้ำส้มควันไม้ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 659/2547) งานวิจัยของ (นิคม และอัจฉริยะ, 2565) พบว่าน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.006-1.016 ค่า pH อยู่ระหว่าง 2.72-4.68 งานวิจัยของ (จารุวรรณ, 2563) พบว่าน้ำส้มควันไม้จากต้นข้าวโพดมี

องค์ประกอบทางเคมีเช่น กรดฟอร์มิก (*Formic acid*) 4.02% กรดอะซิติก (*Acetic acid*) 53.72% ฟีนอล (*Phenol*) 2.18% และสารอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำไปใช้เป็นสารออกฤทธิ์ต้านเชื้อรา แบคทีเรีย หรือนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ดังนั้นโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน ได้แก่ ค่าความร้อน สมบัติของถ่าน และสมบัติน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากกระบวนการผลิตจากเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุและขั้นตอนการเผาชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือ ไม้ไผ่ ไม้ลำไย และซังข้าวโพด ในการทดลองชีวมวลควบคุมความชื้นให้มีปริมาณต่ำกว่า 10% w.b. นำชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ไม้ไผ่ ไม้ลำไย และซังข้าวโพด ปริมาณ 40 40 และ 35 kg ตามลำดับ ที่ใช้ในการทดลองใส่ในเตาเผาถ่านขนาด 200 L ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลอัดแท่งจำนวน 2.5 kg experiment⁻¹ แล้วเติมน้ำลงในชุดกลั่นน้ำส้มควันไม้จนเต็ม ในกระบวนการกลั่นน้ำส้มควันไม้จะใช้พัดลมแบบหอยโข่งในการดึงควันจากเตาเผาถ่านไปยังชุดท่อภายในเพื่อทำการควบแน่นกับน้ำภายในชุดกลั่นน้ำส้มควันไม้ จากนั้นน้ำส้มควันไม้ที่ถูกควบแน่นแล้วจะไหลออกมาจากปลายท่อทำการเก็บตัวอย่างลงภาชนะบรรจุพลาสติก PPE ทำการชั่งปริมาณน้ำส้มควันไม้ด้วยตราชั่งแบบดิจิทัลที่ได้ออก 1 การทดลอง สังเกตสีของน้ำส้มควันไม้เบื้องต้นด้วยสายตา และทำการบันทึกผล หลังจากนั้นนำขวดบรรจุน้ำส้มควันไม้หุ้มด้วยฟอยล์ ตั้งไว้ในที่พ้นจากแสงแดดเป็นเวลา 6 เดือนและเก็บตัวอย่างบางส่วนเพื่อรองและทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำส้มควันไม้ดิบ และค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ดิบ

ในการผลิตถ่านจะทำการเก็บค่าอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์ Datalogger ยี่ห้อ Wisco รุ่น AI210 เก็บข้อมูลอุณหภูมิในการผลิตทุกๆ 5 min โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 700-800°C เมื่อจบกระบวนการผลิตถ่านทิ้งไว้จนอุณหภูมิภายในเตาเผาถ่านต่ำกว่า 70°C จึงนำถ่านออก จากนั้นเก็บตัวอย่างถ่านทั้งหมดเพื่อบันทึกผลปริมาณถ่านที่ได้ต่อการทดลอง และสุ่มเก็บตัวอย่างลงในถุงซิปล็อกเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป และทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้ง

โครงสร้างเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอนประกอบด้วย เตาเผาถ่าน ชุดกลั่นน้ำส้มควันไม้ และเตาเผาชีวมวลสำหรับเผาถ่านซ้ำ แสดงดังภาพที่ 1

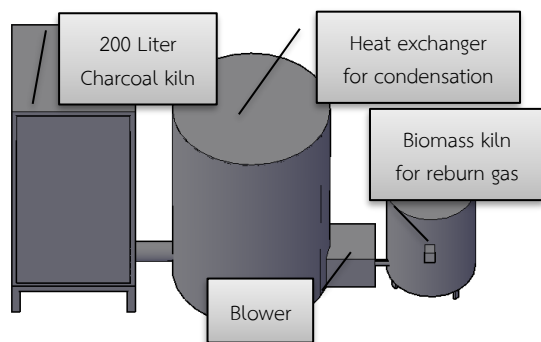


Figure 1 3-step charcoal kiln.

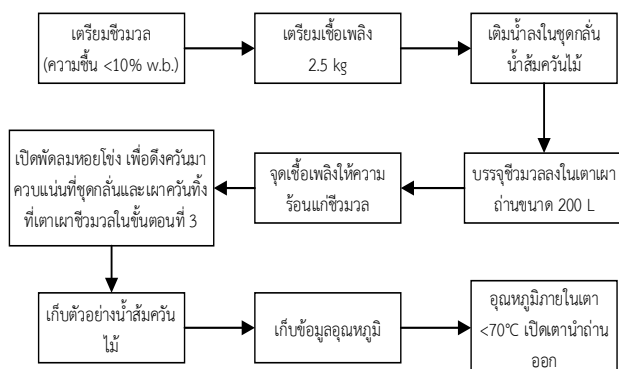


Figure 2 Working principle of 3-step charcoal kiln.

2.2 วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านต้องทำการเตรียมตัวอย่าง โดยนำถ่านแต่ละชนิดมาลดขนาดให้เป็นผงแล้วจึงนำตัวอย่างแต่ละชนิดทดสอบค่าความร้อนด้วยเครื่องหาค่าความร้อน (Bomb Calorimeter) รุ่น Ballistic ยี่ห้อ Gallenkamp ประเทศอังกฤษ โดยการใช้ตัวอย่างปริมาณ 1 g ตามมาตรฐาน ASTM D 5865 หลังจากนั้นนำตัวอย่างถ่านทั้ง 3 ชนิดทดสอบปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนด้วยวิธี In-house method based on AOAC and OMAF

ในการหาค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ โดยใช้พิกโนมิเตอร์ ซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C จากนั้นทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ซึ่งน้ำหนักพิกโนมิเตอร์เปล่า จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในพิกโนมิเตอร์ที่ชั่งน้ำหนักขวดเปล่าแล้ว เช็ดให้แห้งและนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกผลและบันทึกอุณหภูมิ น้ำ (y) คำนวณความหนาแน่นน้ำกลั่น (w) โดยนำน้ำหนักพิกโนมิเตอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นมาลบด้วยน้ำหนักพิกโนมิเตอร์เปล่า และทำเช่นเดียวกันกับน้ำส้มควันไม้ซ้ำอีก 1 ครั้ง นำน้ำหนักพิกโนมิเตอร์ที่บรรจุน้ำส้มควันไม้มาลบด้วยน้ำหนักพิกโนมิเตอร์เปล่า จะสามารถคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ได้จากสมการที่ 1 โดยที่ x คืออุณหภูมิของน้ำส้มควันไม้ y คืออุณหภูมิของน้ำกลั่น s คือความหนาแน่นของน้ำส้มควันไม้ w คือความหนาแน่นของน้ำกลั่น

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิ } x/y \text{ องศาเซลเซียส} = \frac{s}{w} \quad (1)$$

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำส้มควันไม้ ทำการทดลองด้วยเครื่อง pH meter รุ่น 713 ยี่ห้อ Metrohm ประเทศ Switzerland

สถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตริเตอร์ (GC-MS) กำหนดรายละเอียดดังตารางที่ 1

Table 1 Conditions used for chemical analysis of wood vinegar using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS).

Parameter	Condition
GC Conditions	
Gas Chromatograph	6890N (Agilent Technologies, USA)
Column	DB-FFAP: 30 m × 0.25 mm i.d. × 0.50 μm capillary column (J&W scientific, USA)
Temperature program	Inject temperature: 100 °C. Oven temperature: 40°C (initial temperature) at 40°C for 5 mins, then increased from 40°C to 200°C at 20°C min ⁻¹ , holding at 200°C for 25 mins. Detector temperature: 230°C
Injection mode	Split ratio 100:1
Helium carrier gas	Flow rate 10 ml min ⁻¹
Mass Spectrometer Conditions	
Detector	Mass spectrometer 5973N (Agilent Technologies, USA)
MS mode	El mode
Mass range / scan speed	30 – 500 amu sec ⁻¹ .
Transfer line temperature	200°C
Filament / multiplier delay	3 mins.

3 ผลและวิจารณ์



Figure 3 Characteristics of charcoal produced using 3-step charcoal kiln (A) Bamboo charcoal (B) Longan wood charcoal (C) Corn cob charcoal.

การทดสอบเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน โดยใช้วัสดุทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ช้างข้าวโพด ไม้ลำไย และไม้ไผ่ เฉลี่ยมีการใช้ช้างข้าวโพดใส่เตาเผาถ่านน้ำหนัก 35 kg ไม้ลำไย 40 kg และไม้ไผ่ 40 kg ใช้ชีวมวลอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงในการเริ่มต้นเผาถ่านน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 kg ระยะเวลาที่ใช้การให้ความร้อนแก่เตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน ในช้างข้าวโพด 340 min ไม้ลำไย 245 min และไม้ไผ่ 298 min ปริมาณการกลายเป็นถ่านเฉลี่ยที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน ช้างข้าวโพด 24.86% ไม้ลำไย 24.50% และไม้ไผ่ 24.00% นำถ่านทั้ง 3 ชนิดไปทดสอบค่าความร้อนและสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 Characteristics of charcoal from 3 types of biomasses.

Type of charcoal	Characteristic	Moisture content (%)	Heating Value (Cal g ⁻¹)	C/N
Bamboo charcoal	The wood is evenly blackened, with some breakage, but no unburned wood.	≤10	7,381	11:1
Longan wood charcoal	The wood is evenly blackened, with a maintained shape, no breakage, and no unburned wood.	≤10	6,923	3:1
Corn cob charcoal	The wood is evenly blackened, with a maintained shape, with no unburned wood.	≤10	7,632	5:1
Boiling charcoal	The wood is evenly blackened, with no soil or unburned wood.	≤10	≥6,000	
Grilling charcoal	The wood is evenly blackened, with no soil or unburned wood.	≤8	≥7,000	

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของถ่านช้างข้าวโพด ถ่านไม้ลำไย และถ่านช้างข้าวโพด พบว่าถ่านช้างข้าวโพดมีค่าความร้อน 7,632 Cal g⁻¹ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 5:1 ถ่านไม้ลำไยมีค่าความร้อน 6,923 Cal g⁻¹ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3:1 และถ่านไม้ไผ่มีค่าความร้อน 7,381 Cal g⁻¹ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 11:1 ค่าความร้อนในถ่านแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของแต่ละชีวมวลมีความแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าถ่านช้างข้าวโพดมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุด และถ่านไม้ไผ่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงสุด 11:1 ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีความสอดคล้องกับงานของ (Wongsiriamnuay et al. 2019) เนื่องจากการรักษาเวลาอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละชีวมวลที่ไม่เท่ากันส่งผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในถ่านแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน (กันยาพร และสิทธิบุรณ, 2559) จากงานวิจัยของ (ชีษณุชา และขวัญฤทัย, 2559) พบว่าถ่านช้างข้าวโพดมีค่าความร้อน 5,755 Cal g⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน สามารถเพิ่มค่าความร้อนได้สูงกว่าถึง

32.62% ถ่านไม้ไผ่จากเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอนสามารถเพิ่มค่าความร้อนของถ่านสูงขึ้นถึง 19.47% เมื่อเทียบกับถ่านไม้ไผ่จากงานวิจัยของกรมป่าไม้ที่มีค่าความร้อน 6,178 Cal g⁻¹ (งานพัฒนาพลังงานจากไม้, 2550) ถ่านไม้ลำไยจากเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอนสามารถเพิ่มค่าความร้อนได้สูงถึง 25.64% เมื่อกับถ่านอัดแท่งไม้ลำไยจากงานวิจัยของ (กฤษฎา และนิลบล, 2563) ที่มีค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งไม้ลำไย ที่ 5,510 Cal g⁻¹

ถ่านทั้ง 3 ชนิดให้ค่าความร้อนอยู่ในมาตรฐานถ่านหุงต้มที่จะมีค่าความร้อนมากกว่า 6,000 Cal g⁻¹ ถ่านที่ได้จากการผลิตด้วยเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้ม มพช. 657/2547 เนื่องจากถ่านสามารถใช้ประโยชน์ได้มากกว่าการเป็นเชื้อเพลิง ยังสามารถใช้ในการเกษตรได้ ด้วยวิธีการบดเป็นผงผสมลงในดินปลูกสามารถเพิ่มสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช คือ คาร์บอนและไนโตรเจน และยังสามารถใช้ใส่อุตสาหกรรมกระบวนการผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ การลดการแข็งตัวในปูนซีเมนต์ จากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ถ่านไม้ไผ่ในการเพิ่มคาร์บอนที่ผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำของ

ถ่านไม้ชนิดต่าง ๆ พบว่าถ่านไม้สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนในผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำได้ (ณรงค์ศักดิ์ และคณะ, 2557)

จากการทดสอบเตาเผาถ่านแบบ 3 ขั้นตอน ในการผลิตถ่านทั้ง 3 ชนิดมีการผลิตน้ำส้มควันไม้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำส้มควันไม้ดิบจากถ่านซังข้าวโพด ถ่านไม้ลำไย และถ่านไม้ไผ่โดยคิดเป็น

28.80% 27.68% และ 27.83% ตามลำดับ ซึ่งยังเป็นน้ำส้มควันไม้ดิบ มีลักษณะของน้ำส้มควันไม้ใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชนิด เป็นสีน้ำตาลเข้มอมดำ เนื่องจากเก็บตัวอย่างของน้ำส้มควันไม้ในช่วงที่มีอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงกว่า 425°C ส่งผลให้น้ำมันดินปนเปื้อน

Table 3 Physical properties of raw and purified wood vinegar.

Type of wood vinegar	Physical Characteristic		pH Value			Specific Gravity		
	Raw wood vinegar	Purified wood vinegar	Raw wood vinegar	Purified wood vinegar	Community product standards	Raw wood vinegar	Purified wood vinegar	Community product standards
Bamboo charcoal	Clear brown with tar mixture	Light brown clear	3.27	3.62		1.0091	1.0069	
Longan wood charcoal	Dark brown clear with tar mixture	Clear brown	3.40	3.78	1.5-2.8 (Distillation) 2.8-3.7 (Raw)	1.0095	1.0072	>1.001
Corn cob charcoal	Dark brown clear with tar mixture	Clear red brown	3.32	3.89		1.0089	1.0052	

จากตารางที่ 3 เมื่อน้ำส้มควันไม้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้วด้วยวิธีการตกตะกอนและกรองแล้ว เมื่อพิจารณา ลักษณะทางกายภาพของน้ำส้มควันไม้ พบว่าน้ำส้มควันไม้บริสุทธิ์จะมีลักษณะที่เปลี่ยนไปคือ ไม่มีน้ำมันดินผสมอยู่แล้ว และลักษณะของสีน้ำส้มควันไม้จากถ่านทั้ง 3 ชนิดมีความใสขึ้นจากน้ำส้มควันไม้ดิบที่มีน้ำมันดินผสมอยู่จำนวนหนึ่ง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ พบว่าเมื่อน้ำส้มควันไม้ดิบถูกทิ้งให้ตกตะกอนและผ่านการกรองแล้วจะมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value < 0.05) และมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของ มผช. 659/2547

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้พบว่า เมื่อน้ำส้มควันไม้ถูกทำให้บริสุทธิ์แล้วจะมีค่าความเป็นด่างสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value < 0.05) ระหว่างน้ำส้มควันไม้ดิบและน้ำส้มควันไม้บริสุทธิ์ของถ่านทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้น้ำส้มควันไม้บริสุทธิ์มีค่า pH ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน มผช. 659/2547 เนื่องจากกระบวนการทำน้ำส้มควันไม้บริสุทธิ์ในงานวิจัยนี้คือปล่อยให้ตกตะกอนและกรองน้ำส้มควันไม้ออกจากน้ำมันดิน ซึ่งไม่ผ่านกระบวนการกลั่นให้ได้น้ำส้มควันไม้กลั่น

ผลการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้ด้วยเครื่อง GC-MS แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้จากการผลิตถ่านทั้ง 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก สารประกอบฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yasuhara and Sugiura, 1987) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นประโยชน์แก่พืชในการยับยั้งการเกิดเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคพืชได้ (จันทิมา และคณะ, 2563) จากตารางที่ 4 พบว่าปริมาณฟีนอลในน้ำส้มควันไม้จากถ่านซังข้าวโพดมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ จากถ่านไม้ไผ่ และถ่านไม้ลำไย ตามลำดับ และพบกรดอะซิติกสูงสุดในน้ำส้มควันไม้จากถ่านไม้ลำไย รองลงมาคือ จากถ่านไม้ไผ่ และถ่านซังข้าวโพด สารประกอบในน้ำส้มควันไม้เกิดจากการคาร์บอนเซชันของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส (Amen-Chen et al. 2001) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในชีวมวล ดังนั้นชนิดของชีวมวลที่นำมาผลิตน้ำส้มควันไม้จึงส่งผลต่อคุณภาพของสารประกอบในน้ำส้มควันไม้

จากงานวิจัยของ (พรรณี และคณะ, 2565) พบว่าน้ำส้มควันไม้ที่ได้รับมีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.78-4.41 และมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.995-1.016 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้รับมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันในชีวมวลทั้ง 3 ชนิด

และจากงานวิจัยของ (บุศรา, 2561) พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกันโดยพบสารประกอบกลุ่ม *Organic acid* สูงถึง 46.85% และสารประกอบกลุ่ม *Phenol* สูงถึง 63.87% เมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่ามีความสอดคล้องกันโดยพบสารประกอบกลุ่ม *Organic acid* สูงสุด 50.52% ในน้ำส้มควันไม้จากถ่านไม้ลำไย และ 46.06% ในน้ำส้มควันไม้จากถ่านไม้ไผ่ ซึ่ง

สารประกอบกลุ่ม *Organic acid* ช่วยในการฆ่าและยับยั้งการเกิดเชื้อโรค เชื้อราในพืชได้ และสารประกอบกลุ่ม *Phenol* สูงสุด 42.79% ในน้ำส้มควันไม้จากถ่านซังข้าวโพด รองลงมา 24.71% ในน้ำส้มควันไม้จากถ่านไม้ไผ่ สารประกอบกลุ่ม *Phenol* ออกฤทธิ์ในการช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของพืชและยับยั้งการเกิดเชื้อรา

Table 4 Chemical Components of wood vinegar.

Chemical Component	Corn cob		Longan wood		Bamboo	
	Relative quantity (%)	Quality (%)	Relative quantity (%)	Quality (%)	Relative quantity (%)	Quality (%)
<i>Acetic acid</i>	13.4	91	45.53	80	37.5	86
<i>Propanoic acid</i>	4.01	91	3.89	94	6.53	89
<i>Butanoic acid</i>	2.17	95	1.1	95	2.03	93
<i>Acetone</i>	2.73	80	1.17	80	1.72	80
<i>Cyclopentanone</i>	1.08	90	0.62	91	1.18	90
<i>2-Butanone</i>	0.77	86	N/A	N/A	N/A	N/A
<i>2-Cyclopenten-1-one</i>	9.17	91	2.71	91	1.44	89
<i>1-Hydroxy-2-butanone</i>	1.03	80	N/A	N/A	N/A	N/A
<i>2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one</i>	2.16	90	1.55	95	1.98	96
<i>2-Furancarboxaldehyde</i>	0.99	94	N/A	N/A	N/A	N/A
<i>1-(2-Furyl) ethenone</i>	3.08	91	1.91	90	2.98	90
<i>2-Furanmethanol</i>	7.72	95	N/A	N/A	3.76	95
<i>Phenol</i>	42.79	94	16.72	95	24.71	95
<i>2-Methoxy-4-ethylphenol(guaiacol)</i>	1.91	97	3.65	97	1.56	94
<i>Benzene methanol</i>	3.79	97	0.78	97	1.7	97
<i>2-Formyl-5-methylfuran</i>	N/A	N/A	2.11	94	N/A	N/A
<i>4-Ethyl-2-methoxyphenol(guaiacol)</i>	N/A	N/A	2.05	91	N/A	N/A
<i>2-Methyl-4-propyl imidazole</i>	N/A	N/A	0.4	90	N/A	N/A
<i>2-Methyl-2-cyclopenten-1-one</i>	N/A	N/A	1.76	91	2.58	92
<i>Furfural</i>	N/A	N/A	8.78	95	N/A	N/A
<i>3-Methyl-2-cyclopenten-1-one</i>	N/A	N/A	0.92	94	1.13	90
<i>3,4-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one</i>	N/A	N/A	N/A	N/A	0.37	90
<i>4,5-Dimethyl-4-hexen-3-one</i>	N/A	N/A	N/A	N/A	0.23	83
<i>1-Hydroxy-2-methoxy-4-methylbenzene</i>	N/A	N/A	N/A	N/A	2.06	97

4 สรุป

จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ ไม้ไผ่ เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูงและองค์ประกอบทางเคมีของ น้ำส้มควันไม้ที่ดี ซึ่งพบ *Acetic Acid* 37.5% *Propanoic* 6.53% *Butanoic acid* 2.03% และ *Phenol* 24.71% ช่วยในการยับยั้ง การเจริญเติบโตของเชื้อราในพืชได้

เตาเผาถ่านแบบ 3 ชั้นตอนผลิตถ่านให้มีสมบัติเป็นไปตาม มาตรฐาน มผช. 657/2547 สามารถนำไปใช้หุงต้มได้อย่าง ปลอดภัย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนของถ่านไม้ไผ่ พบว่าเตาเผาถ่านแบบ 3 ชั้นตอนสามารถเพิ่มค่าความร้อนของ ถ่านสูงขึ้นถึง 19.47% เมื่อเทียบกับถ่านไม้ไผ่จากงานวิจัยของ กรมป่าไม้ที่มีค่าความร้อน $6,178 \text{ Cal g}^{-1}$ (งานพัฒนาพลังงาน จากไม้, 2550) เนื่องจากในการทดลองด้วยเตาเผาถ่านแบบ 3 ชั้นตอนสามารถทำอุณหภูมิภายในเตาได้สูงสุดถึง 800°C โดย อุณหภูมิในการผลิตถ่านส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นเช่นเดียวกัน (กันยาพร และสิทธิบุรณ์, 2559)

สมบัติน้ำส้มควันไม้จากการวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH value) ยังไม่เป็นไปตาม มาตรฐาน มผช. 659/2547 และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำส้มควันไม้จากการผลิตถ่านทั้ง 3 ชนิดพบส่วนใหญ่เป็นประโยชน์ต่อการเกษตร เช่น *Acetic acid* และ *Phenol* เป็นต้น แต่ยังคงพบสารที่ก่อให้เกิดอันตรายแก่ มนุษย์อยู่ เช่น *Furfural* *Benzene* *methanol* และสารประกอบ คาร์บอนิล เป็นต้น สารเหล่านี้ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบ ทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ และมะเร็ง (จารุวรรณ, 2563)

5 ข้อเสนอแนะ

ทางผู้วิจัยขอเสนอแนะว่าหลังจากปล่อยตกตะกอนและกรอง น้ำส้มควันไม้แล้ว ควรผ่านกระบวนการกลั่นอีกครั้งเพื่อให้ได้ น้ำส้มควันไม้กลั่นตามมาตรฐานของ มผช. 659/2547

6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และคณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่อำนวยความสะดวกพื้นที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

7 เอกสารอ้างอิง

กฤษฎา บุญชม, นิรุบล ไชยสมปาน. 2559. การศึกษาถ่านอัดแท่งจากไม้ลำไย. วารสารนเรศวรพะเยา 13(2), 51-56.
กันยาพร ไชยวงศ์, สิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย. 2559. การวิเคราะห์ พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดด้วย กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23(1), 85-92.
งานพัฒนาพลังงานจากไม้. 2550. รวมบทคัดย่องานวิจัย พ.ศ. 2525-2550. กลุ่มงานพัฒนาผลผลิตป่าไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้.

จันทิมา ช้างสิริพร, พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า, กาญจนา ชันทะพันธ์, นิรนา ชัยฤกษ์. 2563. การใช้น้ำส้มควันไม้ต่อการยับยั้งเชื้อราบนยางแผ่นธรรมชาติ. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 38(3), 351-355.

จารุวรรณ วิโรจน์. 2563. คุณสมบัติของน้ำส้มควันจาก ต้นสะเดา ต้นยูคาลิปตัส ต้นข้าวโพด และใบมะม่วง. วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 39(1), 136-143

ชัยพร มณีชัย, ทิพาพร คำแดง, นำพร ปัญญาใหญ่, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอานวย, ประชา ยืนยงกุล. 2565. คุณลักษณะทาง ความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาและปัจจัยที่ ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 7(2), 1-9.

ซิณุชา แซ่ม้า, ขวัญฤทัย ทองบุญฤทธิ์. 2559. การศึกษา ประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งจากขี้ข้าวโพดและเหง้ามันสำปะหลัง. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราช ภัฏกาแพงเพชร ครั้งที่ 3 ประจำปี 2559, 608-613. กำแพงเพชร:มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร 22 ธันวาคม 2559, กำแพงเพชร.

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, วรรณ หอมจะบก, นฤดม ทาดี. 2557. ประสิทธิภาพการเพิ่มคาร์บอนที่ผิวในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ของถ่านไม้ชนิดต่าง ๆ ในกระบวนการแปรรูปการเบรคชิง. วารสารวิศวกรรมสาร มช. 41(3), 383-391.

ณัฐมา เกลิมแสน, บุญชู นาวานนุเคราะห์, อรรถพล ต้นไสว, ณรงค์ นันตะจันทร์, ธัญรัตน์ จารี, พรพล บุญตา. 2556. ผลของการ เสริมน้ำส้มควันไม้ดิบ และน้ำส้มควันไม้กลั่นในอาหารไก่เนื้อ. วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต 1(2), 111-21.

นิคม แหล่มสัก, อัจฉริยะ โชติจันทร์. 2565. การผลิตและสมบัติ ของน้ำส้มควันไม้และถ่านจากไม้ไผ่และไม้ตัดขยายระยะที่ สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง โดยใช้เตาเผาถ่านไทย-อิวาเตะ. วารสารวนศาสตร์ 26(ฉบับพิเศษ), 75-82.

บุศรา ศรีชัย, ภิญญาภรณ์ ดุงโคกกรวด, ศิริรัตน์ ดีศีลธรรม. 2562. การผลิตน้ำส้มควันไม้จากเปลือกหมาก. วารสารวิชาการสาธารณสุขชุมชน 5(1), 29-44.

บุศรา ศรีชัย. 2561. การผลิตน้ำส้มควันไม้จากเปลือกหมาก. วิทยานิพนธ์สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต. มหาสารคาม: ต้องใส่คณะเหมือนเทมเพลตรีเปล่าคะ, มหาวิทยาลัย มหาสารคาม.

พรรณี เค้นรุ่งเรือง, มยุรี จิตต์แก้ว, ศศิธร สุขสบาย, ปัทมา สีดาทอง. 2565. คุณสมบัติน้ำส้มควันไม้จากการเผาถ่านด้วยเตา ก่อแบบชาวบ้าน. วารสารวนศาสตร์ 26(ฉบับพิเศษ), 1-7.

วีรุธ เลพล. 2563. การจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งจากหัตถกรรมจักสานไม้ไผ่สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยใช้เตาเผาถ่าน ขนาด 200 ลิตร (แบบตั้ง). วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 13(2), 46-52.

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม. มผช. 657/2547. 2546; 1-3.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำส้มควันไม้ดิบ. มผช. 659/2547. 2546; 1-3.
- Amen-Chen, C., Pakdel, H., Roy, C. 2001. Production of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: a review. *Bioresource Technology* 79, 277-299.
- ASTM D 5865. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. PA 19428-2959.
- Bhattacharya, S., Abdul, S., Pham, P., Hoang, L., Ravindranath, N.H. 2003. Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries. *Biomass and Bioenergy*. 25, 471-482.
- Intagun, W., Khamdaeng, T., Prom-Ngarm, P., Panyoyai, N. 2018. Effect of core puncture diameter on biochar kiln efficiency. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 12(11), 435-439.
- Naruethanan, T., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Tippayawong, N., Panyoyai, N. 2022. Energy Efficiency and Economic Analysis of a Biochar Production System. *AIP Conference Proceedings*, 2681(1). Chiang Mai: Chaing Mai University. 18-20 November 2021, Mueang Chiang Mai, Chiang Mai.
- Panyoyai, N., Petchaihan, L., Wongsiriamnuay, T., Hirsantiporn, B., Khamdaeng, T. 2019. Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types. *Engineering Access* 5(2), 59-64.
- Petchaihan, L., Panyoyai, N., Khamdaeng, T., Wongsiriamnuay, T. 2020. Test of a modified small-scale biochar kiln. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 463(1), 012004. Bangkok: Millennium Hilton Bangkok. 11-14 December 2019, Khlong San, Bangkok.
- Sittioad, C., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Tippayawong, N., Panyoyai, N. 2022. Temperature Distribution and Properties of Biochar from a Two-Heating-Stage Kiln. *AIP Conference Proceedings* 2681(1). Chiang Mai: Chaing Mai University. 18-20 November 2021, Mueang Chiang Mai, Chiang Mai.
- Somporn, W., Panyoyai, N., Khamdaeng, T., Tippayawong, N., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T. 2020. Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 463(1), 012005. Bangkok: Millennium Hilton Bangkok. 11-14 December 2019, Khlong San, Bangkok.
- Srisophon, M., Khamdaeng, T., Panyoyai, N., Wongsiriamnuay, T. 2020. Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 463(1), 012079. Bangkok: Millennium Hilton Bangkok. 11-14 December 2019, Khlong San, Bangkok.
- Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Panyoyai, P., Sutassanamarlee, N., Klinkajorn, P., Panyoyai, N. 2019. Thermal Properties and Agricultural Products of Biochar Production. *The 11th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being*, 61-66. Johor: Universiti Teknologi Malaysia. 29 July – 1 August 2019, Skudai, Johor.
- Yasuhara, A., Sugiura, G., 1987. Volatile Compounds in Pyrolygneous Liquids from Karamatsu and Chishima-sasa. *Agricultural and Biological Chemistry* 51, 3049-3060.



Comparative Analysis between Electrified Tractor and Diesel Powered Tractor

Abhisek Karki¹, Bim Shrestha², Prashant Paudyal Sharma^{1*}, Daniel Tuladhar², Subarna Basnet³

¹Abhyantriki Karmashala, Bhaktapur, Nepal

²Department of Mechanical Engineering, Kathmandu University, Kavre, Nepal

³Design Science, Technology & Innovation Massachusetts Institute of Technology, MIT International Design Center Cambridge, MA USA

*Corresponding author: Tel.: +977-9840030309, E-mail: paudyalprashant98@gmail.com

Abstract

The agriculture sector faces increasing pressure to transition towards sustainable practices amidst concerns over climate change and environmental degradation. Electric tractors are emerging as a promising alternative to traditional diesel-powered tractors, offering potential benefits in terms of reduced greenhouse gas emissions, lower operating costs, and enhanced operational efficiency. This study presents a comparative analysis between a 35 HP diesel tractor and its converted electric version equipped with a 40 HP motor from a sustainability perspective in the context of Nepal. Our findings reveal that electric tractors demonstrate significant potential to mitigate environmental impacts associated with agricultural operations, particularly in terms of reducing greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels. Moreover, it has been found that electric tractor offer long-term cost savings through lower fuel and maintenance costs, despite higher initial investment costs. This comparative analysis provides valuable insights for farmers, policymakers, and agricultural stakeholders seeking to make informed decisions regarding tractor technology investments and sustainability strategies. By highlighting the strengths and limitations of electric tractors relative to diesel tractors, this study contributes to the ongoing dialogue on sustainable smart agriculture and the transition towards clean energy technologies in the farming sector.

Keywords: Sustainability, Smart Agriculture, Electric Conversion, Battery Technology, Performance, Operational Considerations.

1 Introduction

In recent years, the automotive industry has witnessed a growing interest in transitioning from ICE to electric propulsion, so the vehicles used in agricultural field are shifting to electric as an alternative propulsion (Vogt et al. 2021). This shift is primarily driven by the urgent need to reduce carbon emissions, improve energy efficiency, and address environmental concerns associated with fossil fuel usage (Adam and Piotr, 2017). As the world focuses on sustainability and seeks innovative solutions to combat climate change, the adoption of electric tractors represents a pivotal step towards greener farming practices.

The significance of comparing diesel and electric tractors lies in understanding their respective

capabilities, advantages, and limitations within the context of modern agricultural operations. While diesel tractors have long been the industry standard due to their power, reliability, and widespread availability of fueling infrastructure, electric tractors offer compelling benefits such as zero tailpipe emissions, lower operating costs, and potential for renewable energy integration (Dhond et al. 2021; Vogt et al. 2021). However, challenges such as limited range, charging infrastructure, and upfront costs must be carefully evaluated to determine the feasibility and practicality of electric tractors in different farming scenarios (Alanazi, 2023).

1.1 Objectives of the Comparative Analysis

The primary objectives of this research on comparative analysis are as follows:

Received: April 4, 2024

Revised: April 6, 2024

Accepted: April 6, 2024

Available online: April 7, 2024

1. Performance Evaluation: Assessing the power output, torque characteristics, speed, acceleration, and overall performance of diesel and electric tractors to determine their suitability for various agricultural tasks and conditions.

2. Cost Analysis: Comparing the initial purchase cost, operating expenses, maintenance requirements, and total cost of ownership (TCO) over the lifespan of diesel and electric tractors to identify the most cost-effective option for farmers and agricultural enterprises.

3. Environmental Impact Assessment: Analyzing the emissions profile, energy consumption, environmental footprint, and sustainability implications of diesel and electric tractors to understand their contributions to air quality, greenhouse gas emissions, and overall environmental health.

4. Operational Considerations: Examining factors such as range, endurance, charging infrastructure availability, adaptability to different farming practices, and overall operational efficiency of diesel and electric tractors to determine their practicality and convenience in real-world farming operations.

2 Methodology

This study conducted a comparative analysis between a traditional diesel-powered tractor, the Farmtrac 435 (data collected from same tractor before conversion and also from few of similar tractors), and its electric version, focusing on workability, economic implications, and fuel efficiency.

2.1 Data Collection:

Technical specifications for both tractor versions were collected, including engine details, transmission, power take-off, fuel tank, and wheels and tyres.

Literature: Data were taken from the literature review. (Fathollahzadeh et al. 2010) performed a study on the calculation of fuel consumption of a tractor during ploughing. The result represents that operating the moldboard plough required 27.446, 30.096 and 34.06 L of fuel hectare⁻¹ in depths of 0.15, 0.25 and 0.35 m, respectively. (Adam and Piotr, 2017) performed an emission test on a diesel tractor finding the emission for 12.2 kg of fuel as 35 kg of CO₂ 0.4 kg of NO_x and 0.04 kg of HC.

Farmer: We collected data about the area a tractor can plough in an hour. Along with the cost of diesel available to them, their yearly revenue and, total months used in a year.

2.2 Analysis Framework:

Workability was assessed based on the specifications related to engine power, transmission, and fuel battery⁻¹.

Economic Impact evaluation involved calculating the operational costs, including fuel or electricity consumption, maintenance, and initial purchase cost.

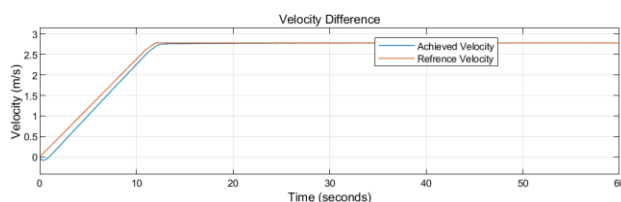
Fuel Efficiency analysis for the diesel version was based on fuel consumption rates, while for the electric version, the focus was on battery capacity and energy consumption.

Environment and Sustainability analysis was performed to visualise the environmental impact reduced after electric conversion.

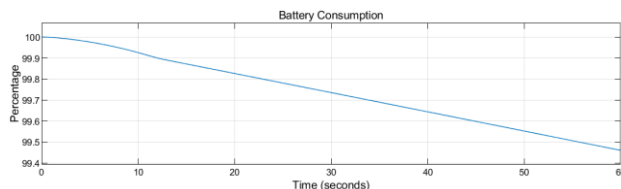
3 Results

3.1 Performance Estimation

Based on the power prescribed by the manufacturer, a 30 kW motor was used and coupled with the default transmission system. To evaluate its performance, the vehicle underwent testing under a specific drive cycle as mentioned in Figure 1 (a) in Simulink, maintaining a constant velocity of 2.78 m s⁻¹ while subjected to a traction load of 1500 N, over 3 hr. Figure 1 (b) showcases the battery drain during the first 60 s of operation, illustrating a 0.54% depletion. This rate of discharge translates to 4.86 kWh per hour, cumulating to the required 14.5 kWh over 3 hr. So, a 15 kWh battery was used in the electric version and tested for successful 3 hr.



(a)



(b)

Figure 1 (a) Tractor range testing drive cycle and (b) State of charge (SOC) of the battery during the Simulink test.

3.2 Technical Comparison

The Original Tractor (Farmtrac 435) is characterised by:

- 1) A 35 HP engine with a 2146 CC capacity, operating at 2200 RPM.
- 2) A cooling system that is water-cooled and an oil bath-type air filter.
- 3) Net weight of 1914 kg.
- 4) The transmission includes 8 forward and 2 reverse gears, with a single clutch.
- 5) Power Take-Off (PTO) at 540 RPM at 1800 RPM.
- 6) Fuel tank capacity of 50 L.
- 7) The Electric Version offers:
- 8) A maximum power of 40 HP from a 30 kW, 96V-300A permanent magnet synchronous motor (PMSM).
- 9) A 15 kWh, 96V-150Ah Lithium Ferrous Phosphate battery pack, maintaining the same mechanical transmission as the original.
- 10) 1900 kg of net weight after conversion.
- 11) Utilizes the existing chassis, steering, and hydraulics system, ensuring similar workability with a sustainable energy source.

3.3 Economic and Fuel Analysis

The diesel-powered Farmtrac 435's operational efficiency and costs were evaluated against the electric version. For 0.35 m depth ploughing, the diesel tractor consumes an average of 41.2 L of diesel per day, costing approximately 50 USD in the context of Nepal. In

contrast, the electric version, with a 15 kWh battery pack, could plough an equal depth and equal area of land as 41.2 L of diesel and consume only 1.24 USD of electricity as per electricity price in Nepal, presenting a significant reduction in daily operational costs. The tractor runs for 6 months in a year and 25 days in a month so annual savings from using the electric version were calculated to be approximately 7218 USD year⁻¹, highlighting the economic advantage of electric tractors.

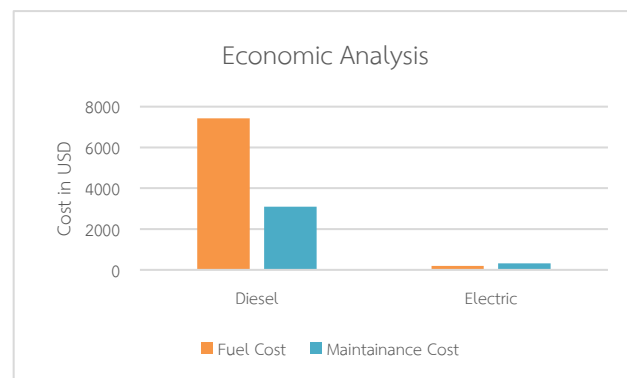


Figure 2 Annual cost comparison of Diesel and Electric tractor.

3.4 Emission Analysis

From the literature review, a tractor consumes 12.2 kg of fuel to form 35 kg of CO₂, 0.4 kg of NO_x and 0.04 kg of HC. In the context of Nepal, 41 L or 35 kg of fuel is consumed in a day by a tractor. Maintaining the proportion of fuel added, 35 kg of fuel produces 100.46 kg of CO₂, 1.15 kg of NO_x and 0.115 kg of HC per day.

In comparing diesel and electric tractors, diesel variants stand out for their superior endurance and broad speed range, making them ideal for heavy-duty tasks and long-distance operations. Electric tractors, however, boast advantages in efficiency and acceleration, with their instant torque delivery potentially surpassing diesel in low-speed applications, despite facing speed and endurance limitations under heavy loads (Malik and Kohli, 2020; Mocera and Somà, 2020). Moreover, electric tractors demonstrate a higher energy conversion efficiency, resulting in lower operating costs and reduced energy consumption (Alanazi, 2023). Productivity levels between the two can be comparable, influenced by maintenance downtime, refuelling/recharging¹ times, and overall system reliability, positioning electric tractors as a competitive

alternative for specific agricultural needs (Scolaro et al. 2021).

4 Discussion

The comparative analysis between the traditional diesel-powered Farmtrac 435 and its electric counterpart has revealed insightful revelations that are crucial for guiding the agricultural sector towards a more sustainable future. In this discussion, we'll outline the nuanced advantages, practical considerations, and broader implications of adopting electric tractor technology over conventional diesel tractors.

4.1 Workability

Both tractor variants demonstrate competent workability across a range of agricultural tasks. However, the electric version distinguishes itself with its immediate torque delivery and quieter operation, which could enhance operator comfort and efficiency. Although there are concerns regarding the electric tractor's speed, range and endurance, our findings suggest that these limitations do not significantly impede performance for most farming operations. The electric tractor's ability to maintain high torque at lower speeds is particularly beneficial for tasks requiring substantial pulling power. Moreover, with cheap electricity and grid charging facilities, farmers can easily charge their vehicles during night and can perform 3 hr of ploughing the next day without compromising their objectives. The installation of a fast charging system in both tractor and charging stations can lead to better workability of the electric tractor.

4.2 Economic Benefits

The analysis supports the economic viability of electric tractors primarily through the lens of operational cost savings. While the initial conversion price of electric tractors can be a hurdle, the substantial reductions in fuel and maintenance expenses emerge as a compelling argument for their long-term financial advantage. This economic incentive is crucial for encouraging farmers and agricultural enterprises to invest in electric technology, despite the upfront cost barrier.

4.3 Sustainability and Fuel Efficiency

Perhaps the most compelling argument for the shift towards electric tractors is their alignment with global

sustainability goals. The significant reduction in greenhouse gas emissions from electric tractors directly contributes to mitigating the agricultural sector's environmental footprint. However, the transition's success is contingent upon the availability of renewable energy sources for electricity generation, highlighting the need for integrated efforts in enhancing the clean energy infrastructure.

5 Conclusion

This study has demonstrated that electric tractors present a viable and sustainable alternative to traditional diesel tractors, aligning with the urgent need for more environmentally friendly farming practices. By comparing the performance, cost, and environmental impact of diesel and electric tractors, it's clear that electric tractors offer significant benefits, including lower greenhouse gas emissions, reduced operating costs, and comparable performance levels.

Despite the higher initial investment, the long-term savings on fuel and maintenance, coupled with the environmental advantages, make electric tractors an attractive option for the future of agriculture. This transition not only supports global sustainability goals but also provides practical economic benefits to farmers and agricultural stakeholders.

In summary, electric tractors represent a promising step towards achieving sustainable smart agriculture. With continued research and development, along with supportive policies, the adoption of electric tractors can be accelerated, leading the agricultural sector towards a greener, more sustainable future.

6 References

- Koniuszy, A., Kostencki, P. 2017. Exhaust Emission from Agricultural Farm Tractor in The Course of Ploughing. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 62, 91-99.
- Alanazi, F. 2023. Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences* 13, 6016.
- Dhond, R., Srivastav, U., Patil, B., Vaishnav, H. 2021. Comparative Study of Electric Tractor and Diesel Tractor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1168, 012003. 20 February 2021, Greater Noida, India.

- Fathollahzadeh, H., Hossein, M., Rajabipour, A., Minaee, S., Jafari, A., Tabatabaie, H. 2010. Average and instantaneous fuel consumption of iranian conventional tractor with moldboard plow in tillage. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 5(2), 30-35.
- Malik, A., Kohli, S. 2020. Electric tractors: Survey of challenges and opportunities in India. Materials Today: Proceedings 28, 2318-2324.
- Mocera, F., Somà, A. 2020. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications. Energies 13(12), 3055.
- Scolaro, E., Beligoj, M., Estevez, M. P., Alberti, L., Renzi, M., Mattetti, M. 2021. Electrification of agricultural machinery: A review. IEEE Access 9, 164520-164541.
- Vogt, H. H., de Melo, R. R., Daher, S., Schmuelling, B., Antunes, F. L. M., dos Santos, P. A., Albiero, D. 2021. Electric tractor system for family farming: Increased autonomy and economic feasibility for an energy transition. Journal of Energy Storage 40, 102744.



การออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นน้ำปลาโซเดียมต่ำสำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำปลาโบราณ

Design and Development Low Sodium Fish Sauce Distillation Machine for Traditional Fish Sauce Product

ภัทรพร สัญชาตเจตน์¹, อมรรัตน์ โมราราช², สุธัญญา พรหมสมบุญ³, มาโนช รัตนคุณ^{3*}

Pattaraporn Sanchatjate¹, Amonrut Morarach², Sutunya Promsomboon³, Manoch Ratanacoon^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, ชลบุรี 20110

¹Department of Agricultural Engineering, School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chon Buri 20110

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, ชลบุรี 20110

²Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chon Buri 20110

³สาขาวิชาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและความงาม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, ชลบุรี 20110

³Department of Products for Health and Beauty, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chon Buri 20110

*Corresponding author: Tel.: +66-8-6316-5463, E-mail: manoch_ra@mutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นน้ำปลา เป็นทางเลือกในการผลิตน้ำปลาโซเดียมต่ำด้วยวิธีทางกายภาพ โดยใช้เครื่องมือที่มีราคาไม่แพง และมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน สำหรับใช้กลั่นน้ำปลาโบราณป่าติ จากกลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลบ้านตลาดล่าง ตำบลบางพระ อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยคุณลักษณะของเครื่องกลั่นน้ำปลา ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ ถังต้มน้ำปลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 280 mm สูง 240 mm หัวแยกไอน้ำทรงกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฐานกรวย 33.4 mm ปิดด้วยแผ่นสแตนเลสสตีล และต่อท่อแยกไอน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.3 mm ยาว 50 mm จำนวน 4 ท่อ และท่อควบแน่นทรงกระบอกปลายปิดทั้งสองด้าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 114.3 mm ยาว 1300 mm ภายในท่อควบแน่นติดตั้งท่อนำไอน้ำ 4 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.3 mm ยาว 1400 mm ต่อทะลุผ่านท่อควบแน่นทั้งสองด้าน ทดสอบสมรรถนะเครื่องกลั่น โดยกลั่นน้ำปลาปริมาตร 2,500 ml ที่เตาให้ความร้อนควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ที่ 150°C เครื่องกลั่นน้ำปลาที่ออกแบบและสร้างขึ้นใช้เวลาในการกลั่นเฉลี่ย 286.67 min สามารถลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำปลาได้ น้ำปลาที่ผ่านการกลั่นมีลักษณะสีน้ำตาลแกมแดง ค่าความสว่างของสี (L^*) เท่ากับ 0.49 ± 0.06 ค่าความเป็นสีแดง-เหลือง (a^*) เท่ากับ 2.89 ± 0.20 และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) เท่ากับ -0.67 ± 0.13 มีสีเข้มกว่าน้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่น ซึ่งมีค่าความสว่างของสี (L^*) เท่ากับ 26.45 ± 0.11 ค่าความเป็นสีแดง-เหลือง (a^*) เท่ากับ 39.54 ± 0.04 และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) เท่ากับ -45.27 ± 0.14 น้ำปลาที่ผ่านการกลั่นมีความเค็มเฉลี่ยสูงสุด $17.57 \pm 0.25\% \text{ w w}^{-1}$ มีความเค็มน้อยกว่าน้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่นเท่ากับ $8.17\% \text{ w w}^{-1}$ สำหรับน้ำที่กลั่นได้มีลักษณะสีใสคล้ายน้ำเปล่า และความเค็มเฉลี่ยเท่ากับ $0.26 \pm 0.00\% \text{ w w}^{-1}$ และเกลือที่ตกผลึกหลังผ่านกระบวนการกลั่นมีลักษณะเป็นตะกอนสีน้ำตาล มีความเค็มเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $62.56 \pm 3.49\% \text{ w w}^{-1}$

คำสำคัญ: น้ำปลา, การกลั่น, โซเดียมคลอไรด์

Abstract

The objective of this research is to design and construct a fish sauce distillation apparatus as an alternative for low-sodium fish sauce production using a physical method, employing inexpensive tools and a straightforward working principle. We intend to use the apparatus to distill traditional fish sauce from the seafood processing group at Ban Talat Lang, Bang Phra, Sriracha, and Chonburi. The fish sauce distillation apparatus consists of three main components. Firstly, there is a fish sauce boiling tank with a diameter of 280 mm and a height of 240 mm. Secondly,

Received: August 8, 2023

Revised: November 30, 2023

Accepted: October 29, 2023

Available online: April 29, 2024

there is a conical steam separator with a diameter of 33.4 mm at the base of the cone, as well as a stainless-steel lid. Lastly, there are four pipes for steam separation, each with a diameter of 10.3 mm and a length of 50 mm. The apparatus also includes two double-ended capped pipes with a diameter of 114.3 mm and a length of 1300 mm, and inside these pipes are four steam-carrying pipes with a diameter of 10.3 mm and a length of 1400 mm, passing through both ends of the capped pipes. We tested the distillation efficiency by distilling 2,500 ml of fish sauce at a controlled heating temperature of 150°C. The average time required for the distillation process using the designed and constructed fish sauce distillation apparatus was 286.67 min. The distilled fish sauce has a darker reddish-brown color compared to the non-distilled fish sauce. The color characteristics are as follows: The color brightness (L^*) has a value of 0.49 ± 0.06 , the redness-yellowness (a^*) has a value of 2.89 ± 0.20 , and the yellowness-blueness (b^*) has a value of -0.67 ± 0.13 . This is in contrast to the non-distilled fish sauce, which has the following color characteristics: The color brightness (L^*) has a value of 26.45 ± 0.11 , the redness-yellowness (a^*) has a value of 39.54 ± 0.04 , and the yellowness-blueness (b^*) has a value of -45.27 ± 0.14 . The distilled fish sauce had a maximum average salt content of $17.57 \pm 0.25\% \text{ w w}^{-1}$, which is lower than the salt content of the non-distilled fish sauce, which is $8.17\% \text{ w w}^{-1}$. The distilled water obtained had a clear appearance similar to regular water, with an average salt content of $0.26 \pm 0.00\% \text{ w w}^{-1}$. Furthermore, the residue left after distilling the saltwater solution had a clumpy brown appearance and a maximum average salt content of $62.56 \pm 3.49\% \text{ w w}^{-1}$.

Keywords: fish sauce, distillation, sodium chloride

1 บทนำ

น้ำปลา หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวรสเค็มใช้ปรุงแต่งกลิ่นรสของอาหาร เป็นเครื่องปรุงรสที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 203 พ.ศ.2543 เรื่องน้ำปลา สามารถแบ่งคุณภาพของน้ำปลาที่ผลิตเพื่อการจำหน่าย ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปลาแท้ น้ำปลาที่ทำจากสัตว์อื่น และน้ำปลาผสม โดยลักษณะของน้ำปลาจะต้องใส ไม่มีตะกอน และในน้ำปลาจะต้องมีส่วนผสมของโซเดียมคลอไรด์ ไม่ต่ำกว่า 200 g l^{-1} ซึ่งเปรียบเทียบกับได้เท่ากับ $20\% \text{ w v}^{-1}$ (กระทรวงสาธารณสุข, 2543) จากการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในผลิตภัณฑ์น้ำปลาไทย พบว่า มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในตัวอย่างน้ำปลาแท้ประมาณ $20\text{-}39.5\% \text{ w v}^{-1}$ ส่วนน้ำปลาผสมมีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในตัวอย่างประมาณ $26\text{-}45\% \text{ w v}^{-1}$ (เมธาพร และคณะ, 2563) สำหรับน้ำปลาพื้นบ้าน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักปลาหรือส่วนของปลากับเกลือ หรือหมักจากปลาที่เกลือกับน้ำเกลือตามกรรมวิธีการทำน้ำปลา อาจเติมส่วนผสมอื่นเพื่อเร่งการหมัก เช่น สับปะรด และอาจปรุงแต่งกลิ่นรสด้วยอ้อย น้ำตาล หรือได้จากการนำน้ำปลาที่ได้จากการหมักมาเจือจางและปรุงแต่งกลิ่นรส จะใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำปลาพื้นบ้าน มผช.673/2547 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.), 2547) น้ำปลาโบราณป่าบัต เป็นสินค้าโอท็อป (OTOP) ของกลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลบ้านตลาดล่าง ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ทำจากปลาเกลือ และปลากะตัก โดยกรรมวิธีการผลิตน้ำปลาเริ่มจากนำปลามาคลุกเคล้ากับเกลือให้มีสัดส่วนของน้ำหนักปลากับเกลือเท่ากับ 3:1 หมักในบ่อหมักเป็นระยะเวลา 1 year ในระหว่างการหมักจะมีการกวนส่วนผสมทุก ๆ 2 month เพื่อให้ปฏิกิริยาใน

การหมักเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นนำมากรองเพื่อให้ได้น้ำปลาที่ใสและบรรจุใส่ขวดต่อไป (สุธัญญา และคณะ, 2563) ทั้งนี้รสชาติของน้ำปลาจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปลา กรรมวิธีการหมัก สิ่งที่เคยลงไปเพื่อช่วยให้น้ำปลาน้ำมีสี กลิ่น และรสชาติดีขึ้น (อรรธรณ, 2553)

จากการสำรวจข้อมูลการบริโภคโซเดียมคลอไรด์ (*Sodium chloride, NaCl*) หรือเกลือของประชากรไทยในปี 2550 โดยกรมอนามัยร่วมกับมหาวิทยาลัยมหิดล พบว่าประชากรไทยได้รับโซเดียมจากอาหารที่บริโภคสูงถึง $4,351.7 \text{ mg day}^{-1}$ ซึ่งมากกว่าปริมาณที่องค์การอนามัยโลกกำหนดถึง 2 เท่า (ปริมาณแนะนำ $2,000 \text{ mg day}^{-1}$) นอกจากนี้รายงานการสำรวจสุขภาพประชากรไทยโดยสถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข พบว่า ค่าเฉลี่ยของการบริโภคโซเดียมอยู่ที่ $3,264 \text{ mg day}^{-1}$ (กระทรวงสาธารณสุข กรมควบคุมโรค สำนักโรคไม่ติดต่อ, 2556) แสดงให้เห็นว่าประชากรไทยได้รับโซเดียมในปริมาณที่สูงกว่าความต้องการต่อวัน ซึ่งการบริโภคเกลือในระดับที่มากเกินไปก่อให้เกิดความต้องการของร่างกายเป็นสาเหตุของการเกิดโรคเรื้อรังหลายประเภท ได้แก่ โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจ โรคไต ฯลฯ โดยในปัจจุบันมีความพยายามในการลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์หลายวิธี ภัทร (2549) ได้ทดลองแยกเกลือในน้ำปลาด้วยกระบวนการไดอะลิซิสโดยใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน สุธัญญา และคณะ (2563) ได้นำน้ำปลาผ่านคอลัมน์โครมาโทกราฟีที่บรรจุเรซินผสมชนิดประจุบวกและประจุลบ Amberlite mixed bed-20 H/OH นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอิเล็กโทรไดอะลิซิส หรือการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย โดยใช้หลักการแยกด้วยประจุแทนการแยกด้วยขนาดของรูพรุน (สักรณ, 2554) แต่เทคนิคอิเล็กโทรไดอะลิซิสนี้ไม่เพียงแต่ลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ออกจาก

น้ำปลาเท่านั้นแต่ยังทำให้สูญเสียสารประกอบกลิ่นหอมและอะมิโนที่สำคัญอีกด้วยเมื่อลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในตัวอย่างน้ำปลาจนเหลือ 18% w w⁻¹ (Nathamol et al. 2011) อย่างไรก็ตามก็มีการดึงโซเดียมคลอไรด์ออกจากน้ำปลาด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากมีต้นทุนทั้งด้านเครื่องจักรและต้นทุนด้านสารต่าง ๆ ที่ต้องนำมาใช้ในกระบวนการแยกสาร Ettouney, H. (2009); จิตรัตน์ (2559) ได้กล่าวถึงกระบวนการกลั่นน้ำทะเล ซึ่งเป็นการทำให้น้ำทะเลเกิดการระเหยด้วยความร้อน จากนั้นไอน้ำจะไหลผ่านท่อหล่อเย็น และจะถูกควบแน่นออกมาเป็นน้ำบริสุทธิ์ เมื่อกระบวนการกลั่นเกิดขึ้น น้ำทะเลจะมีความเข้มข้นสูงขึ้นและเริ่มตกตะกอนออกมา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นน้ำปลา เป็นทางเลือกในการผลิตน้ำปลาโซเดียมต่ำด้วยวิธีทางกายภาพ โดยใช้เครื่องมือที่มีราคาไม่แพง และมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน สมาชิกในกลุ่มสามารถมีส่วนร่วมในระหว่างกระบวนการผลิตได้ นำไปสู่แนวทางการพัฒนาสินค้าน้ำปลาโบราณบำบัด ของกลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลบ้านตลาดล่าง ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

2 อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาการลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำปลาด้วยการกลั่น ใช้ตัวอย่างน้ำปลาโบราณบำบัด จากกลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลบ้านตลาดล่าง ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี สำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นน้ำปลามีวิธีการดังนี้

2.1 การทดสอบกลั่นน้ำปลาเบื้องต้น

ทดสอบกลั่นน้ำปลาโดยใช้ชุดกลั่นมาตรฐาน ดัง Figure 1 กลั่นน้ำปลาปริมาตร 250 ml โดยควบคุมอุณหภูมิที่เตาให้ความร้อนให้มีอุณหภูมิอยู่ที่ 150°C ทำการทดลองกลั่นที่เวลา 30 40 50 และ 60 min ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง บันทึกผลการทดลองทุก ๆ 5 min โดยเก็บข้อมูลปริมาตรของน้ำที่กลั่นได้ ปริมาตรของน้ำปลาเข้มข้น และน้ำหนักของเกลือที่ตกตะกอนเมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำปลา



Figure 1 Distillation of fish sauce using a standard distillation set.

2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นน้ำปลา

คุณลักษณะของเครื่องกลั่นน้ำปลา ดัง Figure 2 ผลิตจากสแตนเลสสตีล (stainless steel 304) สามารถถอดล้างทำความสะอาดได้ง่าย ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน คือ ถังต้มน้ำปลา หัวแยกไอน้ำ และท่อควบแน่น

ถังต้มน้ำปลา เป็นถังที่สามารถเปิดฝาด้านบนเพื่อเติมน้ำปลาได้ มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 280 mm สูง 240 mm ที่ฝาถังมีท่อระบายไอน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 33.4 mm สำหรับต่อสายยางซิลิโคนทนความร้อนเข้ากับหัวแยกไอน้ำ และติดตั้งเกจวัดอุณหภูมิสำหรับวัดอุณหภูมิภายในถังต้มน้ำปลา ถังต้มน้ำปลาปิดประกับซิลิโคนทนความร้อน และมีตัวล็อกระหว่างถังต้มน้ำปลาและฝาถัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วของไอน้ำระหว่างกระบวนการกลั่น

หัวแยกไอน้ำ มีลักษณะเป็นทรงกรวยปิดที่ยอดกรวยมีท่อสำหรับรับไอน้ำจากถังต้มน้ำปลา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฐานกรวย 33.4 mm ปิดด้วยแผ่นสแตนเลสสตีล และต่อท่อแยกไอน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.3 mm ยาว 50 mm จำนวน 4 ท่อ เพื่อส่งไอน้ำไปยังท่อควบแน่นผ่านสายยางซิลิโคนทนความร้อน

ท่อควบแน่น ดัดแปลงจากท่อควบแน่นของชุดกลั่นมาตรฐานที่ภายในเป็นท่อตรง ซึ่งเหมาะสมกับการนำมากลั่นน้ำปลา เนื่องจากสามารถทำความสะอาดคราบโปรตีนภายในท่อน้ำไอน้ำได้ง่าย แต่ปรับเปลี่ยนรูปทรงภายในโดยการเพิ่มจำนวนท่อน้ำไอน้ำเป็น 4 เส้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวหล่อเย็นสำหรับการควบแน่น โดยจะมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกปลายปิดทั้งสองด้าน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 114.3 mm ยาว 1300 mm ภายในท่อควบแน่นติดตั้งท่อน้ำไอน้ำ 4 ท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.3 mm ยาว 1400 mm ต่อทะลุผ่านท่อควบแน่นทั้งสองด้าน ออกมาด้านละ 50 mm ที่ผิวท่อควบแน่นด้านล่างถูกเชื่อมต่อกับขาตั้งสแตนเลสสตีล โดยให้ความสูงของจุดศูนย์กลางท่อทั้ง 2 ด้าน ต่างกัน 50 mm และที่ผนังท่อควบแน่นด้านบนทั้ง 2 ด้าน ต่อท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 21.3 mm สำหรับต่อสายยางน้ำหล่อเย็น โดยให้ทางเข้าน้ำหล่อเย็นอยู่ด้านต่ำ และออกทางด้านสูงของท่อหล่อเย็น

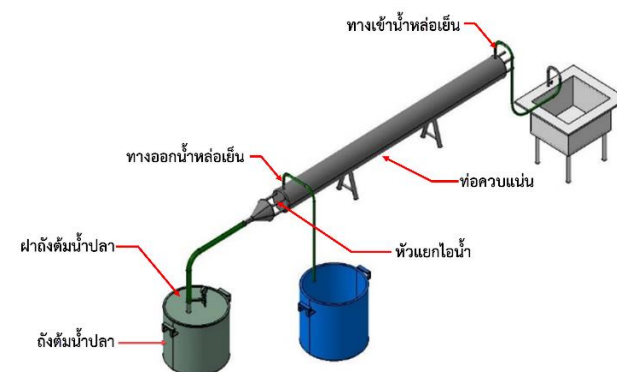


Figure 2 Schematic of fish sauce distillation machine.

2.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องกลั่นน้ำปลา

การทดสอบสมรรถนะเครื่องกลั่นน้ำปลา ดัง Figure 3 โดยกลั่นน้ำปลาปริมาตร 2,500 ml โดยควบคุมอุณหภูมิที่เตาให้ความร้อนให้มีอุณหภูมิอยู่ที่ 150°C (หยุดการกลั่นเมื่อน้ำที่กลั่นได้มีปริมาตรเท่ากับ 34.30% ของปริมาณน้ำปลาเริ่มต้น จากการทดลองเบื้องต้น) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ บันทึกผลการทดลองทุก 15 min โดยเก็บข้อมูลปริมาตรของน้ำที่กลั่นได้ ปริมาตรของน้ำปลาเข้มข้น และน้ำหนักของเกลือที่ตกตะกอน เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำปลา



Figure 3 Distillation of fish sauce using a fish sauce distillation machine.

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำปลา

การวิเคราะห์ปริมาณเกลือโดยวิธีของ Mohr เป็นการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต (เมธาพร และคณะ, 2563) เริ่มจากการหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต จากนั้นหาปริมาณเกลือในตัวอย่างน้ำปลา เกลือ และน้ำที่กลั่นได้ ดัง Figure 4 นำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด อย่างละ 5 g ใส่ลงในปิกรเกอร์ขนาด 100 ml เติมน้ำร้อน 30 ml จากนั้นคนให้เข้ากันแล้วถ่ายตัวอย่างใส่ในขวดปริมาตรขนาด 250 ml ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และเติมให้ถึงจุดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น



Figure 4 Examples obtained from distillation (a) fish sauce, (b) distilled water, and (c) salt.

หลังจากนั้นปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 ml เติมสารละลายโพแทสเซียมโครเมต ความเข้มข้น 5% ลงไป 1 ml ไตรเตรทสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 0.05% จนถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีแดงส้ม ซึ่งคงตัวอยู่นาน 30 s (สุริยงญา และคณะ, 2563) ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ บันทึกค่าความเข้มข้น

และปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้ในการไตรเตรตนำคำนวณหาปริมาณเกลือได้จากสมการ (1)

$$\% \text{Salt NaOH} = \frac{N_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3} \times 5.85 \times 25}{\text{g of Sample}} \quad (1)$$

โดยที่ %Salt NaOH คือ ปริมาณเกลือ

N_{AgNO_3} คือ ความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต

V_{AgNO_3} คือ ปริมาตรของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต

g of Sample คือ มวลของตัวอย่าง

วิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างตัวอย่างน้ำปลา เกลือ และน้ำที่กลั่นได้ ด้วยเครื่องวัดสี Spectrophotometer ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CM-3500d ดัง Figure 5 บันทึกค่า L^* , a^* และ b^* ของทั้ง 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

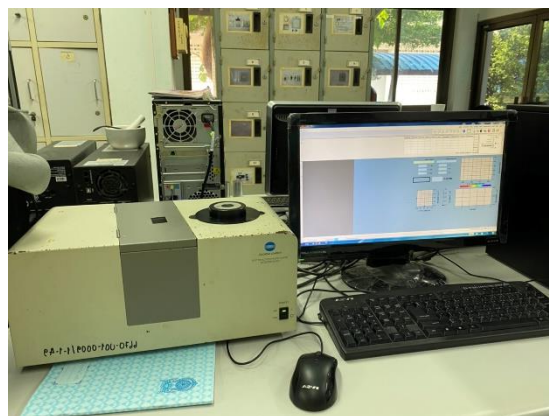


Figure 5 Color measurement of sample using a Spectrophotometer.

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบกลั่นน้ำปลาเบื้องต้น

ผลการทดลองกลั่นน้ำปลาเบื้องต้น พบว่าที่เวลาการกลั่น 30 40 50 และ 60 min มีปริมาณน้ำที่กลั่นได้เท่ากับ 45.64 59.50 85.76 และ 92.07 ml ตามลำดับ ปริมาณผลึกเกลือที่กรองได้เท่ากับ 51.20 56.43 70.20 และ 88.47 g ตามลำดับ และเหลือปริมาณน้ำปลาเข้มข้นอยู่ที่ 116, 124. 33 และ 43 ml ตามลำดับ แต่น้ำปลาเข้มข้นที่การกลั่นด้วยเวลา 60 min เกิดการไหม้ติดกันภาชนะไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ เมื่อนำน้ำปลาเข้มข้นมาหาความเค็มโดยการวิเคราะห์ปริมาณเกลือด้วยวิธีของ Mohr พบว่าที่เวลาการกลั่น 30, 40, 50 และ 60 min มีค่าความเค็ม เท่ากับ 29.40 26.85 25.05 และ 25.25% w w⁻¹ ตามลำดับ การกลั่นน้ำปลาที่อุณหภูมิเตาให้ความร้อน 150°C เป็นเวลา 50 min มีค่าความเค็มน้อยที่สุด ดังนั้นจึงใช้ผลการทดลองกลั่นน้ำปลาเบื้องต้นคำนวณหาเวลาในการหยุดกลั่นโดยการเทียบ

สัดส่วนของปริมาณน้ำปลาเริ่มต้นกับปริมาณน้ำที่กลั่นได้ โดยจะต้องหยุดการกลั่นเมื่อปริมาณน้ำที่กลั่นได้มีค่าเท่ากับ 34.30 ml

3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องกลั่นน้ำปลา

ผลการกลั่นน้ำปลาปริมาตร 2,500 ml ที่อุณหภูมิเตาให้ความร้อน 150°C และหยุดกลั่นน้ำปลาเมื่อปริมาตรน้ำที่กลั่นได้เท่ากับ 857.5 ml โดยอ้างอิงจากผลการทดลองเบื้องต้น พบว่าเวลาที่ใช้ในการกลั่นครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 เท่ากับ 300 300 และ 260 min ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของเวลากลั่นน้ำปลา เท่ากับ 286.67 min ปริมาณผลึกเกลือที่กรองได้เท่ากับ 551.77 510.56 และ 568.69 g ค่าเฉลี่ยของปริมาณผลึกเกลือ เท่ากับ 543.67 g และเหลือปริมาณน้ำปลาเหลืออยู่ที่ 1,150 1,260 และ 1,135 ml มีค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำปลาที่เหลือ เท่ากับ 1,181 ml

เมื่อนำน้ำปลาที่เหลือจากการกลั่น เกลือ และน้ำที่กลั่นได้ไปวัดสีด้วยเครื่องวัด Spectrophotometer มีค่า L^* , a^* และ b^* และหาปริมาณโซเดียมคลอไรด์โดยการวิเคราะห์ปริมาณเกลือด้วยวิธีของ Mohr เปรียบเทียบกับน้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่น ผลแสดงดัง Table 1

จากตารางแสดงผลการวัดสีและหาความเค็มของผลการทดลอง น้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่นวัดค่าสี L^* , a^* , b^* ค่าสีใกล้เคียงกันมีลักษณะสีน้ำตาลแดงใส น้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่นมีความเค็มเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $25.74 \pm 0.26\% \text{ w w}^{-1}$ ส่วนน้ำปลาที่ผ่านการกลั่นมีลักษณะสีน้ำตาลแกมแดงสีเข้มกว่าน้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่น มีความเค็มเฉลี่ยสูงสุด $17.57 \pm 0.25\% \text{ w w}^{-1}$ ดังนั้นการเปรียบเทียบระหว่างน้ำปลาที่ไม่ผ่านการกลั่นกับน้ำปลาที่ผ่านการกลั่นแล้วมีลักษณะสีที่แตกต่างกันและมีความเค็มมากกว่าน้ำปลาที่ผ่านการกลั่นเท่ากับ $8.17\% \text{ w w}^{-1}$ สำหรับน้ำที่กลั่นได้

Table 1 The results of color measurement and salt content determination of distilled and non-distilled fish sauce.

Sample	Parameter (unit)			salt content (% w w^{-1})
	L^*	a^*	b^*	
non-distilled fish sauce	26.45 ± 0.11	39.54 ± 0.04	45.27 ± 0.14	25.74 ± 0.26
distilled fish sauce	0.49 ± 0.06	2.89 ± 0.20	0.67 ± 0.13	17.57 ± 0.25
distilled water	99.69 ± 0.10	-0.53 ± 0.07	2.94 ± 0.35	0.26 ± 0.00
salt	40.43 ± 2.25	5.87 ± 0.66	11.98 ± 1.34	62.56 ± 3.49

มีลักษณะสีใสคล้ายน้ำเปล่า และความเค็มเฉลี่ยเท่ากับ $0.26 \pm 0.00\% \text{ w w}^{-1}$ และเกลือที่ตกผลึกหลังผ่านกระบวนการกลั่นหลังกรองเพื่อแยกน้ำปลาออกแล้ว พบว่าสีของเกลือที่ตกผลึกจะมีลักษณะคล้ายกัน เป็นตะกอนสีน้ำตาล จึงทำให้เกลือที่ตกผลึกมีความเค็มเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $62.56 \pm 3.49\% \text{ w w}^{-1}$

4 สรุป

จากการศึกษาการลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำปลาโบราณป่าบัต เครื่องกลั่นน้ำปลาที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในน้ำปลาได้ $8.17\% \text{ w w}^{-1}$ จากการกลั่นน้ำปลาปริมาตร 2,500 ml ใช้เวลาในการกลั่นเฉลี่ย 286.67 min นอกจากนี้วัสดุอุปกรณ์ที่สัมผัสกับน้ำปลา ได้ออกแบบโดยใช้หลักสุขอนามัย (hygienic design) สามารถถอดล้างทำความสะอาดได้ง่าย มีขั้นตอนการใช้งานไม่ซับซ้อน ตัวถังต้มสามารถใช้กับเตาในครัวเรือนได้ทุกชนิด เป็นทางเลือกในการผลิตน้ำปลาโซเดียมต่ำด้วยวิธีทางกายภาพ โดยใช้เครื่องมือที่มีราคาไม่แพง สมาชิกในกลุ่มสามารถมีส่วนร่วมในระหว่างกระบวนการผลิตได้นำไปสู่แนวทางการพัฒนาสินค้าน้ำปลาโบราณป่าบัต ของกลุ่มผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลบ้านตลาดล่าง ตำบลบางพระ อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มงคลตะวันออก ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข กรมควบคุมโรค สำนักโรคไม่ติดต่อ. 2556. รายงานผลการทบทวน รูปแบบการดำเนินงานป้องกันการเกิดโรคไม่ติดต่อในวิถีชีวิตด้วยการลดการบริโภคเกลือ. แหล่งข้อมูล: <http://thaincd.com/2016/media-detail.php?id=8624&tid=30,1-001-003&gid=1-026>. เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2562.
- กระทรวงสาธารณสุข. 2543. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 203 (พ.ศ. 2543) เรื่อง น้ำปลา. แหล่งข้อมูล: http://fic.nfi.or.th/law/upload/file1/TH_97.pdf. เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2562.
- ธิดารัตน์ บุญศรี. 2559. การแยกเกลือออกจากน้ำด้วยกระบวนการดูดซับไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการลดความกระด้าง. แหล่งข้อมูล: <https://www.nstda.or.th/nac/2016/wp-content/uploads/2016/02/Thidarath.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2562.
- ภัทร ศักดิ์เพชร. 2549. การแยกเกลือในน้ำปลาด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร). สงขลา: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.). 2547. น้ำปลาพื้นเมือง (มผช. ๖๗๓/๒๕๔๗). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

เมธาวร ขจรจรัสกุล, ขนิษฐา หาญวงษ์, วิทยาลัยศา ศรีทองกลาง, กอบเกียรติ สอนใจ, กมลทิพย์ เสรีนันทชัย. 2563. การวิเคราะห์ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในผลิตภัณฑ์น้ำปลาไทย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 28(2), 208-218.

ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2554. การพัฒนาและศึกษากระบวนการผลิตน้ำปลาโซเดียมต่ำโดยวิธีการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (รายงานวิจัย). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุธัญญา พรหมสมบูรณ์, ภัทราพร สัตยชาติเจตน์, มาโนช รัตนคุณ, เพียงขวัญ เครือภู, วรวิมล รัตนสสัย, พัทธนี บุญธกานนท์, อมรรัตน์ โมรราราช, จินตนา เพชรมณีโชติ, ภาณุมาศ บุญผดุง, ปราณี นิมิบุตร, สุธีรา อานามวงษ์, ปภากร ศรีสอน, อนงค์ นาฏ โสภณางกูร, สุภัทลยา ชาญสมร, อรรถนิตติ วงศ์จักร, พงษ์พัฒน์ สิงห์ศรี, ศรีชล ภิรมย์ลาภ. 2563. เทคโนโลยีการผลิตน้ำปลาเกลือต่ำชนิดผงเพื่อสุขภาพสู่การจำหน่ายในระบบตลาดออนไลน์ (รายงานวิจัย). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก.

อรรวรรณ คงพันธุ์. 2553. การผลิตน้ำปลาด้วยวิธีการหมักแบบธรรมชาติ. นนทบุรี: บริษัท คุณาไทย จำกัด.

Chindapan, N., Devahastin, S., Chiewchan, N., Sablani, S. S. 2011. Desalination of fish sauce by electrodialysis: effect on selected aroma compounds and amino acid compositions. Journal of food science 76(7), S451-S457.

Ettouney, H. 2009. Conventional Thermal Processes. In: Micale, G., Rizzuti, L., Cipollina, A. (Eds.), Seawater Desalination (p. 17-40). Green Energy and Technology: Springer.



การวิจัยและพัฒนาเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

Research and Development of an Automatic Fertilizer Applicator for Small Four-Wheel Tractors

ธนพงศ์ แสนจุ่ม^{1*}, ขนิษฐ หว่านณรงค์¹, วิโรจน์ โหระสาตร์¹, สราวุธ ปานทน², สโรชา ถึงสุข³, อานนท์ สายคำฟู¹, เอกภาพ ปานภูมิ⁴, อาร พรบุญ¹, อุทัย ธาณี¹

Tanapong Sanchum^{1*}, Khanit Wannaronk¹, Wirot Horasart¹, Sarawuth Parnthon¹, Sarocha Thuengsuk², Arnon Saicomfu¹, Akkaphap Panpoom¹, Artorn ponboon¹, Uthai Tanee¹

¹สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม, กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ 10900

¹Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Bangkok 10900

²ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมสุราษฎร์ธานี, กรมวิชาการเกษตร, สุราษฎร์ธานี 84170

²Surat Thani Agricultural Engineering Research Center, Department of Agriculture, Surat Thani 84170

³ศูนย์วิจัยและการเกษตรเพชรบูรณ์, กรมวิชาการเกษตร, เพชรบูรณ์ 67000

³Phetchabun Agricultural Research and Development Center, Department of Agriculture, Phetchabun 67000

⁴ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น, กรมวิชาการเกษตร, ขอนแก่น 40000

⁴Khon Kaen Agricultural Engineering Research Center, Department of Agriculture, Khon Kaen 40000

*Corresponding author: Tel.: +66-8-6935-4569, Fax: +66-25-792-757, E-mail: tanapong_bb@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนาเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก เพื่อให้ใส่ปุ๋ยได้แม่นยำตามที่ต้องการ ลดการสูญเสียปุ๋ยจากวิธีการหว่าน ทำให้การใส่ปุ๋ยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด การทำงานของเครื่องชุดหัวเจาะ ทำโดยเจาะหลุมดินกว้าง 10 cm ลึกประมาณ 15 cm หลังจากเจาะหลุม ปุ๋ยจากถังปุ๋ยจะไหลลงท่อที่ติดอยู่ที่ชุดเจาะและถูกปล่อยลงหลุม จากนั้นมีชุดกลบ ระบบควบคุมอัตราหยอดและการจ่ายปุ๋ย โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 V 250 W สำหรับควบคุมการจ่ายปุ๋ยตามอัตราที่กำหนด ดำเนินการทดสอบการเจาะหลุม หยอดปุ๋ย และกลบหลุม 8 หลุมรอบโคนต้น พบว่า เครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติสามารถใส่ปุ๋ยได้อย่างแม่นยำ (กำหนดปริมาณปุ๋ยที่ 1 kg plant⁻¹ อัตราหยอดปุ๋ย 125 g hole⁻¹ มีความสามารถในการทำงาน 1.07 rai hr⁻¹ อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.65 L rai⁻¹ ที่ความชื้นดิน 15.03% w.b. และความหนาแน่นดินสภาพแห้ง 2.13 g cm⁻³ เครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 420.35 rai year⁻¹

คำสำคัญ: เครื่องฝังปุ๋ย, เครื่องชุดหลุม, การเกษตรแบบแม่นยำ

Abstract

This research aims to develop an automatic fertilizer applicator for small tractors. In order to apply fertilizer precisely as desired, Reduce fertilizer loss from sowing methods. This ensures the most efficient utilization of fertilizer. Working of the drill bit machine the drill bit machine creates a hole in the ground that is 10 cm wide and roughly 15 cm deep. After drilling the hole, fertilizer from the fertilizer tank flows into a pipe attached to the drilling unit and is released into the hole. Then comes the cover set. The system controls the rate of fertilizer application and distribution. Using a microcontroller to control the speed of a 12 V 250 W DC motor for controlling the fertilizer distribution at the specified rate. We carried out an experiment where we drilled eight holes around the tree's base, applied fertilizer to them, and covered them. It was found that the automatic fertilizer applicator was able to apply fertilizer precisely. The fertilizer amount was set at 1 kg plant⁻¹, the fertilizer application rate was 125 g hole⁻¹, the work capacity was 1.07 rai hr⁻¹, the fuel consumption rate was 2.65 L rai⁻¹, the soil moisture was 15.03%

Received: August 5, 2022

Revised: August 4, 2023

Accepted: December 8, 2023

Available online: June 10, 2024

w.b., and the dry bulk densities was 2.13 g cm^{-3} . Automatic fertilizer applicators for small tractors have a break-even point of 420.35 rai year⁻¹.

Keywords: Fertilizer applicator, Pit digging machine, Precision farming

1 บทนำ

ปัจจุบัน ต้นทุนในการผลิตพืชสวนของเกษตรกรสูงขึ้นทุกปี ซึ่งต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นค่าปัจจัยการผลิตและค่าแรงงาน จากสถานการณ์ปัจจุบันที่ปุ๋ยเคมีที่มีราคาแพงขึ้นมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เกษตรกรจำเป็นต้องมีการวางแผนการผลิตให้ดีเพื่อลดต้นทุนการผลิต การใช้ปัจจัยการผลิต (ปุ๋ย) ต้องให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินที่มีความแม่นยำสูงและมีความเจาะจงกับพื้นที่ดิน หรือการใช้วิธีผสมปุ๋ยเอง ก็จะสามารถลดต้นทุนค่าปุ๋ยได้ประมาณ 30-50% (สถาบันวิจัยพืชสวน, 2559)

วิธีการใส่ปุ๋ยไม่ผล ดั้งเดิมของเกษตรกร การใส่ปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยอินทรีย์ จะใช้วิธีหว่านกระจายทั่วรอบต้น โดยใช้แรงงานคนเป็นหลัก และยังมีการใช้เครื่องใส่ปุ๋ย ใช้งานภายในประเทศอยู่บ้าง แต่ส่วนใหญ่จะเป็นแบบพ่นหว่านที่ใช้ในนาข้าว สำหรับเครื่องใส่ปุ๋ยไม่ผล สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมได้วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยเคมีกึ่งอัตโนมัติแบบโรยตามแนวปลายทรงพุ่ม (บัณฑิต, 2563) เป็นการโรยปุ๋ยตามแนวปลายทรงพุ่ม การให้ปุ๋ยด้วยวิธีการหว่าน จะมีข้อดี คือ สะดวก แต่ข้อเสียที่สำคัญ คือ สูญเสียเนื้อปุ๋ยที่จะหมดไปกับการระเหยไปในอากาศ ลม แสงแดด และเมื่อฝนตกหนักๆ หรือการใช้น้ำที่มากเกินไป ปุ๋ยจะละลายและไหลไปกับน้ำอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการสูญเสียปุ๋ย ทำให้พืชได้รับอาหารลดลง จากปัญหาดังกล่าวจะมีการให้ปุ๋ยอีกวิธีหนึ่งคือ การฝังกลบปุ๋ย การใส่ปุ๋ยวิธีนี้ ต้องขุดหลุมบริเวณทรงพุ่ม แล้วฝังกลบเป็นการใส่ปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการหว่าน การให้ปุ๋ยแบบฝังกลบในยางพาราพบว่าให้ผลผลิตน้ำยางสูงกว่าแบบหว่าน (ประพันธ์, 2564) และการฝังปุ๋ยในพืชไร่อย่างเช่น การปลูกอ้อย การใส่ปุ๋ยโดยมีการฝังกลบ มีการเจริญเติบโตในด้านความสูงดีกว่าอ้อยที่ใส่ปุ๋ยโดยการหว่าน (อรรถสิทธิ์, 2551) แต่จะเป็นการเพิ่มทั้งต้นทุนและแรงงานต้องขุดหลุม

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดแบบอัตโนมัติสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก เครื่องฝังปุ๋ย จะติดตั้งกับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กเป็นต้นกำลังในการทำงานของเครื่อง โดยเครื่องสามารถป้องกันอัตราการใส่ปุ๋ยต่อหลุม ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการใส่ปุ๋ยได้อย่างแม่นยำ ลดภาระการใช้แรงงานคน ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ย และยังสามารถนำเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติไปประยุกต์ใช้กับไม้ยืนต้นที่ต้องการฝังปุ๋ย เช่น ยางพารา, ปาล์มน้ำมันและไม้ผล เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังเป็นการทำเกษตรแบบแม่นยำ ก้าวไปสู่ในยุคการเกษตร 4.0 โดยเปลี่ยนจากการเกษตรแบบดั้งเดิมในปัจจุบัน ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่ที่เน้นการบริหารจัดการและเทคโนโลยี

2 อุปกรณ์และวิธีการ

กรอบแนวคิดการออกแบบ

แนวคิดการออกแบบ หลักการทำงานของเครื่อง เมื่อรถแทรกเตอร์ทำงานจะมีชุดหัวขุด ขุดดินเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ลึกประมาณ 15-20 cm ขณะเดียวกันปุ๋ยจากถังไหลลงที่ขาที่ติดอยู่ที่ชุดขุดและถูกปล่อยลงหลุม ควบคุมอัตราการหยอดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นมีชุดกลบ ดันดินกลบหลุม ได้ออกแบบเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติ มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ เครื่องฝังปุ๋ย และ ระบบควบคุมและประมวลผล

2.1 ออกแบบและสร้างเครื่องฝังปุ๋ย

ออกแบบส่วนประกอบที่สำคัญคือ ถังบรรจุปุ๋ย ชุดลูกหยอดปุ๋ย ชุดหัวขุดดินควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก

2.1.1 ถังปุ๋ยสำหรับบรรจุปุ๋ยเคมี ถังบรรจุปุ๋ย มีปริมาตร 0.072 m^3 ซึ่งสามารถบรรจุปุ๋ยได้ไม่น้อยกว่า 40 kg

2.1.2 ชุดลูกหยอดปุ๋ยถังมีลูกหยอด 2 ชุด ชุดลูกหยอดขับปุ๋ย ทำจากซูเปอร์สแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm เลือกใช้ลูกหยอดแบบร่องเฉียง โดยร่องจะวางตัวในแนวเฉียงทำมุม 30° กับแนวระนาบ ดังแสดงใน Figure 1 ข้อดีของการวางร่องเฉียงจะลดการติดขัดของปุ๋ยระหว่างลูกหยอดกับถังบรรจุปุ๋ยได้ (ชนิษฐ์, 2560) จะทำให้อัตราการหยอดปุ๋ยมีความแม่นยำขึ้น



Figure 1 Fertilizer metering roller.

2.1.3 ชุดชุดดินของเครื่องฝังปุ๋ย ชุดหัวชุดดินควบคุมด้วยระบบไฮโดรลิก ประกอบด้วย ปัมไฮโดรลิก โดยใช้ต้นกำลังจากเพลา PTO, มอเตอร์ไฮโดรลิก, สว่านเจาะดิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ยาว 25 cm ควบคุมการทำงานของชุดชุดดินโดยวาล์วมือโยก (Hand valve) สำหรับควบคุมการขึ้น-ลง ของสว่านเจาะดิน โดยจะมี 2 ชุด สำหรับการเจาะดิน 1 ครั้ง จะได้จำนวน 2 หลุม ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 Driller.

หลักการทำงานของเครื่อง เมื่อรถแทรกเตอร์ทำงานจะมีชุดหัวชุดหลุมดินเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ลึกประมาณ 15-20 cm ขณะเดียวกันปุ๋ยจากถังไหลลงที่ขาที่ติดอยู่ที่ชุดชุดและถูกปล่อยลงหลุม จากนั้นมีชุดกลบดินกลบหลุมเมื่อรถเคลื่อนต่อไป



Figure 3 Prototype of fertilizer applicator machine.

2.2 ออกแบบระบบควบคุมและประมวลผล (Electronic control system)

จากที่สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม ได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องให้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย (ชนิษฐ์, 2560) ซึ่งระบบสามารถกำหนดความแม่นยำของอัตราการหยอดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้อัตราการหยอดปุ๋ยมีความแม่นยำขึ้นและช่วยลดการสูญเสียจากการใส่ปุ๋ยที่มากเกินไป

ในงานวิจัยนี้ การควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยนี้ได้ ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ยี่ห้อ Arduino รุ่น Mega2560 ส่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ผ่านชุดขับเคลื่อน

(DC) motor drive) เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 V 250 W และใช้โปรแกรม Arduino IDE สำหรับการเขียนสมการ เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมการจ่ายปุ๋ยตามอัตราที่กำหนด

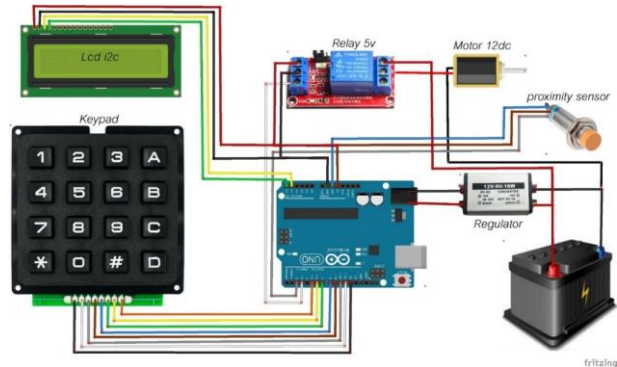


Figure 4 Wiring diagram of controller system.

การทำงานของ ระบบควบคุมและประมวลผล โดยจะป้อนค่าเวลา (s) ใส่แป้นพิมพ์ (Keypad Module) ดังแสดงใน Figure 5 โดยค่าเวลา (s) จะเป็นค่าสำหรับอัตราปุ๋ยที่ต้องการใส่ต่อหลุม จะเป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบปุ๋ย (Calibration) หลังจากการทำงานชุดชุดหลุมแล้ว ในของชุดสว่านชุดดินเคลื่อนที่ขึ้นจากหลุมดิน Proximity sensor จะส่งสัญญาณไปยังชุดประมวลผลและสั่งการไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ของถังปุ๋ย ให้ทำงานหยอดปุ๋ยเป็นไปตามอัตราที่กำหนด ปุ๋ยจากถังจะถูกปล่อยลงท่อที่ติดอยู่ที่ชุดชุดลงไปสู่หลุมดิน



Figure 5 Inputting fertilizer rate via keypad on control panel.

2.3 การทดสอบชุดควบคุมอัตราหยอดและการปล่อยปุ๋ยในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเพื่อสอบเทียบอัตราการหยอดปุ๋ย โดยเลือกอัตราการใส่ปุ๋ยไม้ผล ในอัตรา 1 kg plant⁻¹ หากต้องการฝังปุ๋ยจำนวน 8 หลุมรอบต้น ปริมาณปุ๋ยต่อหลุมที่ต้องใช้คือ 125 g hole⁻¹ การทดสอบเพื่อสอบเทียบอัตราการหยอดปุ๋ย โดยกำหนดความเร็ว

รอบหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนหอยด ที่ 60 rpm และเปรียบเทียบ
เฟืองขับเคลื่อน 2 ขนาด คือ เฟืองขนาด 15 ฟัน และ 30 ฟัน
เพื่อให้ได้ปริมาณปุ๋ยต่อหลุมที่ต้องการคือ 125 g hole⁻¹

2.4 การทดสอบความสามารถในการทำงาน

การทดสอบการทำงานของต้นแบบเครื่องฝังปุ๋ยแบบหอยด
อัตโนมัติ ติดตั้งพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น B2420
ขนาด 24 hp ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ดำเนินการ
ทดสอบการเจาะหลุม หยอดปุ๋ยและกลบ 8 หลุมรอบต้นไต้ทรง
พุ่ม แนวการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงใน Figure 7
เมื่อทำการเก็บข้อมูลในแปลงทดสอบ เพื่อหาสมบัติทางกายภาพ
ของดิน เช่น ความชื้นของดิน ความหนาแน่นดินสภาพแห้ง (Bulk
density) และดำเนินการทดสอบความสามารถในการทำงานจริง
ในแปลง ดังสมการ (1) และความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง โดย
วัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้อุปกรณ์กระบอกตวงวัดปริมาตร
สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง ขนาด 500 ml

สมการหาความสามารถในการทำงาน

$$C_A = \frac{A}{T_t} \quad (1)$$

เมื่อ C_A คือ ความสามารถในการทำงานจริง
(rai hr⁻¹)

A คือ พื้นที่การทำงาน (rai)

T_t คือ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด (hr)

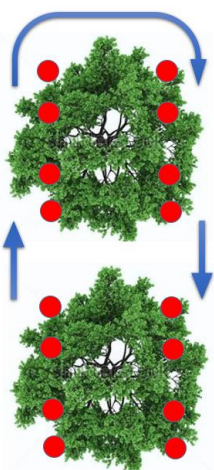


Figure 6 Drilling and applying fertilizer in 8 holes per plant.

2.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายและหา
จุดคุ้มทุนในการลงทุนเครื่องจักรกลเกษตร และคิดค่าเสื่อมราคา
ของรถแทรกเตอร์และเครื่อง จะทำการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเพื่อ
เป็นข้อมูลในการเลือกใช้ การลงทุนซื้อ การรับจ้าง หรือเพื่อการ
แนะนำส่งเสริมของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถหาได้จาก
ผลรวมของต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยมีรายละเอียดดังนี้

ต้นทุนคงที่ แต่ในที่นี้คิดต้นทุนคงที่เฉพาะค่าเสื่อมราคาและค่า
ดอกเบี้ย โดยต้นทุนคงที่ที่สามารถคำนวณจากสมการ (2)

$$\text{ต้นทุนคงที่} = \text{ค่าเสื่อมราคา} + \text{ดอกเบี้ย} \quad (2)$$

ในส่วนของค่าเสื่อมราคาและค่าดอกเบี้ยสามารถหาได้จาก
สมการที่ 3 และ 4

$$D_i = \frac{P_i - S_i}{L_i} \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{2} (P_i + S_i)i \quad (4)$$

เมื่อ D_i คือ ค่าเสื่อมราคา (Baht year⁻¹)

I คือ ค่าดอกเบี้ย (Baht year⁻¹)

P_i คือ ราคาแรกซื้อ (Baht)

S_i คือ ราคาเมื่อหมดอายุการใช้งานหรือขายต่อ
(Baht) (10% P)

L_i คือ อายุการใช้งาน (year)

i คือ อัตราดอกเบี้ย (%)

ต้นทุนผันแปร คือ ค่าใช้จ่าย ที่ขึ้นอยู่กับการทำงาน
ประกอบด้วย ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าน้ำมันหล่อลื่น ค่าซ่อมบำรุง
ค่าแรงงานของคนขับ เป็นต้น

ต้นทุนต่อปีในการใช้งาน (Baht Rai⁻¹) = ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนผันแปร
(5)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลทดสอบชุดควบคุมอัตราหอยดและการปล่อยปุ๋ยใน ห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเพื่อสอบเทียบอัตราการหอยดปุ๋ย โดยปริมาณปุ๋ย
ต่อหลุมที่ต้องใช้คือ 125 g hole⁻¹ การทดสอบเพื่อสอบเทียบ
อัตราการหอยดปุ๋ย โดยกำหนดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อน
หอยดที่ความเร็วรอบ 60 rpm และเปรียบเทียบเฟืองขับเคลื่อน
หอยด 2 ขนาด คือ เฟืองขนาด 15 ฟัน และ 30 ฟัน เพื่อให้ได้
ปริมาณปุ๋ยที่ช่องซ้าย และขวาตามที่กำหนด

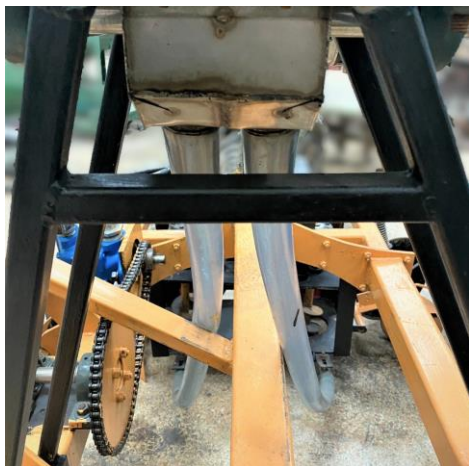


Figure 7 Fertilizer pipe.

จากผลการทดสอบการสอบเทียบอัตราการหยอดปุ๋ย พบว่า ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อน 60 rpm ขนาด เพื่อขับเคลื่อน 15 ฟัน และเวลาหมุนของมอเตอร์ควบคุมการ จ่ายปุ๋ย 5 s ควบคุมอัตราการหยอดได้อย่างแม่นยำ ได้ปริมาณปุ๋ย ที่ช่องซ้าย และขวาเฉลี่ยที่ 126.55 g และ 124.12 g ซึ่งใกล้เคียง กับปริมาณปุ๋ยต่อหลุมที่ต้องการคือ 125 g hole⁻¹ จึงเลือกใช้ ขนาดเพื่อขับเคลื่อน 15 ฟัน ดังแสดงใน Table 1 และเลือก เวลาหมุนของมอเตอร์ควบคุมการจ่ายปุ๋ย 5 s สำหรับการป้อนค่า เวลา (s) ให้กับชุดควบคุมการหยอดปุ๋ย

Table 1 Results of calibrating fertilizer application tests.

Rotation time of control motor for the fertilizer (s)	Fertilizer weight (g)	
	Average left side	Average right side
2	54.27	51.26
3	69.78	67.39
4	103.42	100.65
5	126.55	124.12
6	147.41	143.35
7	200.87	193.34
8	256.28	210.03

3.2 การทดสอบความสามารถการทำงาน

จากผลการทดสอบในแปลงไม้ผลที่ระยะปลูก 4x4 m จำนวน 40 ต้นต่อไร่ ในแปลงที่มีความชื้นดินต่างกัน คือ แปลงที่มีความชื้นดิน 2.61% w.b. และความชื้นดิน 15.03% w.b. พบว่า ความชื้นในดินมีผลต่อการทำงานของเครื่อง โดยในแปลงที่มีความชื้นดินสูงกว่า จะมีความสามารถในการทำงานมากกว่า และมีอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าแปลงที่มีความชื้นดิน ต่ำ โดยแปลงที่มีความชื้นดิน 15.03% w.b. มีความสามารถการ

ทำงาน 1.07 Rai hr⁻¹ อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.65 L Rai⁻¹ และมีเวลาเฉลี่ยในการเจาะหลุมและหยอดปุ๋ยต่อครั้ง (2 หลุม) ที่ 20.47 s ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Results of field capacity testing.

	Plant 1	Plant 2
Soil Moisture (% w.b.)	2.61	15.03
Soil Density (g cm ⁻³)	2.30	2.13
Time of drilling and applying fertilizer (s)	23.82	20.47
Capacity (rai hr ⁻¹)	0.97	1.07
Fuel Consumption (l Rai ⁻¹)	2.86	2.65



Figure 8 Field testing of the prototype.

3.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินค่าใช้จ่าย ต่างๆของเครื่อง แล้วนำมาวิเคราะห์ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ หาจุดคุ้มทุน (Break-even Point, BEP) โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

Table 3 Cost analysis of the prototype.

Description	Cost (Baht)
1. Tractor (24 HP)	320,000
2. Fertilizer Applicator Machine	
- Structure	8,000
- Fertilizer Tank and Fertilizer	7,000
Metering Roller	
- Driller and Hydraulic System	30,000
- Machine Building Wage	15,000
3. Control Panel	10,000
Total	385,000

กำหนดให้ราคาของรถแทรกเตอร์ขนาด 24 hp ราคา 320,000 Baht และการใช้งานรถแทรกเตอร์เพื่อใส่ปุ๋ยประมาณ 25% ของการใช้งานทั้งหมด เครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติ

ราคา 65,000 Baht รวมราคาทั้งหมด 385,000 Baht โดยใช้งานรถแทรกเตอร์ 10 year และอุปกรณ์ 8 year และ ราคาแรงงานรับจ้างใส่ปุ๋ย 180 Baht Rai⁻¹

ต้นทุนคงที่ ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรกลเกษตร และค่าดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาสของเงินทุน

ต้นทุนผันแปร ประกอบด้วย ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าแรงงาน

ข้อมูลสำหรับคำนวณต้นทุนของรถแทรกเตอร์

1.ราคารถแทรกเตอร์,P	320,000	Baht
2.ราคาซาก,S 25% P ₁	80,000	Baht
3.อายุการใช้งาน,N	10	year
4.อัตราดอกเบี้ยเงินฝาก, i	5.5	% year ⁻¹
5.ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล	28.84	Baht L ⁻¹
6.ค่าน้ำมันหล่อลื่นร้อยละ	10 (ร้อยละของค่าน้ำมันเชื้อเพลิง)	
7.ค่าแรงคนขับรถ	300	Baht day ⁻¹
8.ค่าบำรุงรักษารถแทรกเตอร์ร้อยละ	0.5	

(ร้อยละของราคารถแทรกเตอร์ต่อการทำงาน 100 hr)

ข้อมูลสำหรับคำนวณต้นทุนของเครื่องใส่ปุ๋ย

1.ราคาเครื่องใส่ปุ๋ย, P	65,000	Baht
2.ราคาซาก,S 10% P	6,500	Baht
3.อายุการใช้งาน,N	8	year
4.อัตราดอกเบี้ยเงินฝาก, i	5.5%	per year
5.ค่าบำรุงรักษาเครื่องใส่ปุ๋ย 0.2%P/100 hr		Baht hr ⁻¹
6.อัตราการทำงานเฉลี่ย (Table2)	1.07	Rai hr ⁻¹

ต้นทุนคงที่

รถแทรกเตอร์

1. ค่าเสื่อมราคา

$$(320,000-80,000)/10 = 24,000 \text{ Baht year}^{-1}$$

2. ดอกเบี้ยในการลงทุน

$$(320,000+80,000)/2 \times (5.5/100) = 11,000 \text{ Baht year}^{-1}$$

3. รวมต้นทุนคงที่ของรถแทรกเตอร์ 35,000 Baht year⁻¹

4. ต้นทุนคงที่ในการเป็นต้นกำลังของเครื่องใส่ปุ๋ย

$$\text{คิดที่ 25\% ของค่าใช้จ่ายคงที่รวม} = 8,750 \text{ Baht year}^{-1}$$

(การใช้งานรถแทรกเตอร์เพื่อใส่ปุ๋ยประมาณ 25% ของการใช้งานทั้งหมด)

เครื่องฝังปุ๋ย

1.ค่าเสื่อมราคา (65,000-6,500)/8 = 7,312.50 Baht year⁻¹

2. ดอกเบี้ยในการลงทุน (65,000+6,500)/2 × (5.5/100)

$$= 1,966.25 \text{ Baht year}^{-1}$$

3.รวมต้นทุนคงที่เครื่องใส่ปุ๋ย 9,278.75 Baht year⁻¹

รวมต้นทุนคงที่ทั้งหมด 18,028.75 Baht year⁻¹

ต้นทุนผันแปร

รถแทรกเตอร์

ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	81.75	Baht hr ⁻¹
ค่าน้ำมันหล่อลื่น	8.18	Baht hr ⁻¹
ค่าแรงคนขับรถแทรกเตอร์	37.50	Baht hr ⁻¹
ค่าบำรุงรักษา	16	Baht hr ⁻¹

รวมต้นทุนผันแปรของรถแทรกเตอร์ 143.45 Baht hr⁻¹

เครื่องฝังปุ๋ย

ค่าบำรุงรักษา	3.25	Baht hr ⁻¹
รวมต้นทุนผันแปร	146.70	Baht hr⁻¹
อัตราการทำงานเฉลี่ย	1.07	rai hr ⁻¹

ต้นทุนผันแปรต่อพื้นที่ 137.11 Baht rai⁻¹

ความสัมพันธ์ของต้นทุนต่อปีในการใช้เครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถึงปุ๋ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (A) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ต้นทุนต่อปีในการใช้เครื่องเครื่องฝังปุ๋ย, Baht rai⁻¹

$$= \text{ต้นทุนคงที่} + \text{ต้นทุนผันแปร}$$

$$= (18,028.75/A) + 137.11$$

เมื่อ $A = \text{rai} \cdot \text{year}^{-1}$

จุดที่ต้นทุนของเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติ สามารถคำนวณได้เมื่อต้นทุนในการใช้งานเครื่องฝังปุ๋ยเท่ากับราคาแรงงานรับจ้างใส่ปุ๋ยในปัจจุบันที่ 180 Baht.ra⁻¹

ต้นทุนในการใช้งานเครื่องใส่ปุ๋ย = ค่ารับจ้างฝังปุ๋ย

$$(18,028.75/A) + 137.11 = 180$$

$$A = 420.35 \text{ rai year}^{-1}$$

จากการคำนวณสามารถเขียนกราฟแสดงความความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายในการใช้งานเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติกับการใช้แรงงานคนฝังปุ๋ยได้ดังแสดง Figure 9

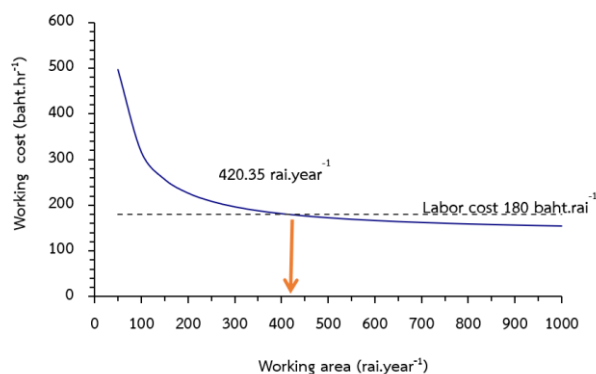


Figure 9 Break-even point (BEP) of the prototype.

การใช้งานเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติมีจุดคุ้มทุน (Break-even Point, BEP) เท่ากับ 420.35 rai year⁻¹ กล่าวคือ เกษตรกรที่จะซื้อเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดอัตโนมัติ ไปใช้งานหรือนำไปรับจ้างในการฝังปุ๋ยในแปลงไม้ผลควรมีพื้นที่การใช้งานไม่น้อยกว่า 420.35 rai year⁻¹ และใช้งานอย่างน้อยเป็นระยะเวลา 8 years จึงจะคุ้มในการใช้งานหรือการนำไปรับจ้างในการฝังปุ๋ย

4 สรุป

เครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดแบบอัตโนมัติสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก จากผลการทดสอบการทำงานในแปลงที่มีความชื้นดินต่างกัน คือ แปลงที่มีความชื้นดิน 2.61 % w.b. ความหนาแน่นดินสภาพแห้ง 2.30 g cm^{-3} พบว่า มีเวลาเฉลี่ยในการเจาะหลุมและหยอดปุ๋ยต่อครั้ง (2 hole) ที่ 23.82 s มีความสามารถในการทำงาน 0.97 rai hr^{-1} อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง $2.86 \text{ liter rai}^{-1}$ และแปลงที่มีความชื้นดิน 15.03% w.b. ความหนาแน่นดินสภาพแห้ง 2.13 g cm^{-3} พบว่า มีเวลาเฉลี่ยในการเจาะหลุมและหยอดปุ๋ยต่อครั้ง (2 หลุม) ที่ 20.47 s มีความสามารถในการทำงาน 1.07 rai hr^{-1} อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง $2.65 \text{ liter rai}^{-1}$ จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จุดคุ้มทุน (Break-even Point, BEP) ของเครื่องฝังปุ๋ยแบบหยอดแบบอัตโนมัติสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก โดยเกษตรกรที่จะซื้อรถแทรกเตอร์พร้อมเครื่องไปใช้งานหรือนำไปรับจ้างควรมีพื้นที่การใช้งานไม่น้อยกว่า $420.35 \text{ rai year}^{-1}$ และใช้งานอย่างน้อยเป็นระยะเวลา 8 years จึงจะคุ้มในการใช้งานหรือนำไปรับจ้างในการฝังปุ๋ย ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการใส่ปุ๋ย สามารถทดแทนการใช้แรงงานคนได้ และเป็นการก้าวไปสู่การทำเกษตรแบบแม่นยำ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชได้

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการ ข้าราชการ ลูกจ้างประจำ และพนักงานราชการ ของสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จและคล่อง นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการที่ปรึกษาด้านวิชาการทั้งของสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม และสถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ทำให้โครงการวิจัยนี้ดำเนินการจนบรรลุวัตถุประสงค์ ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6 เอกสารอ้างอิง

ชนิษฐ์ หว่านณรงค์, อัศพล เสนาณรงค์, เวียง อากรชี, สราวุฒิปานทน, ธนพงศ์ แสนจุ่ม, วีระ สุขประเสริฐ, อุทัย ธานี, อาร พรบุญ. 2560. วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ประจำปี 2560. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

บัณฑิต จิตรจันทน์, พกตร์วิภา สุทธิวาริ, กิตติศักดิ์ กิตติรัตน์, พิระพงษ์ ชมภู, ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์, ชนิษฐ์ หว่านณรงค์, อุทัย ธานี, จันทรเพ็ญ วิจิตร, ปิยะมาศ โสมภีร์, กมลภัทร ศิริพงษ์. 2563. วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยเคมีกึ่งอัตโนมัติแบบโรยตามแนวปลายทรงพุ่มสำหรับสวนทุเรียนโดยใช้ต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก. รายงานวิจัยฉบับ

สมบูรณ์ประจำปี 2563. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

ประพันธ์ สุวรรณามูล, ธีรธาดา แสงนรินทร์ เหมจินดา. 2564. ผลของรูปแบบการให้ปุ๋ยต่อการคงเหลือของธาตุอาหารในดินและผลผลิตของน้ำยางพารา. รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 59. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 10-12 มีนาคม 2564. กรุงเทพฯ.

ราคาน้ำมัน. 2564. ราคาขายปลีกประจำปี 2564. แหล่งข้อมูล: https://www.pttor.com/th/oil_price. เข้าถึงเมื่อ 12 มิถุนายน 2565.

สถาบันวิจัยพืชสวน. 2559. การลดต้นทุนการผลิตพืชสวน (พืชสวนอุตสาหกรรม). กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

อรรถสิทธิ์ บุญธรรม, วัฒนศักดิ์ ชมภูนิช. 2551. ศึกษาวิธีการใส่ปุ๋ยอ้อยอย่างมีประสิทธิภาพ. รายงานผลงานวิจัยและพัฒนา ด้านพืชและเทคโนโลยีการเกษตร ประจำปี 2551. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.



การประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมันโดยใช้ค่าสีร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง: กรณีศึกษาการเปรียบเทียบระบบสี

Chlorophyll Assessment of Oil Palm Leaves using Color Attributes Combined with Machine Learning: A Case Study of Color Space Comparison

กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์¹, จิราพร อ่อนมั่นคง^{2*}

Kittisak Phetpan¹, Jiraporn Onmankhong^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon 86160, Thailand

²ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพฯ 10520

²Department of Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

*Corresponding author: Tel.: +66-957-089-409, E-mail: jiraporn.on@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมันโดยใช้ค่าสีร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง ตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันรวมทั้งหมด 66 ตัวอย่าง ถูกสุ่มเก็บเพื่อวัดค่าคลอโรฟิลล์และวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ จากนั้นค่าสีถูกแปลงเป็นค่าระบบสี RGB และ HSV จะได้ค่าระบบค่าสีที่แตกต่างกันทั้งหมด 16 รูปแบบ ได้แก่ $L^*a^*b^*$, L^* , a^* , b^* , RGB, R, G, B, HSV, H, S, V, $L^*a^*b^* + \text{RGB}$, $L^*a^*b^* + \text{HSV}$, $\text{RGB} + \text{HSV}$ และ $L^*a^*b^* + \text{RGB} + \text{HSV}$ เพื่อทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้ค่าคลอโรฟิลล์และระบบค่าสีด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Linear Regression Analysis, SLR) และซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (Support Vector Regression, SVR) โดยใช้วิธีการพิสูจน์แบบไขว้ (Cross Validation) จากนั้นเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดทั้งหมด 3 อันดับแรก ผลจากการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนาย พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าจริงและค่าทำนายจากทั้ง 3 แบบจำลอง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และพบว่าค่าความแตกต่างของความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลอง 3 อันดับแรก ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดถูกพัฒนาจาก $L^*a^*b^*$ ซึ่งใช้วิธี SLR โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.59 และมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของการทำนายแบบไขว้ (RMSECV) เท่ากับ 5.22 SPAD

คำสำคัญ: ปาล์มน้ำมัน, คลอโรฟิลล์, เครื่องวัดสี

Abstract

This research aims to assess the chlorophyll content of oil palm leaves using color values combined with machine learning. A total of 66 oil palm leaf samples were randomly collected to measure chlorophyll content and $L^*a^*b^*$ color values. The $L^*a^*b^*$ values were converted to RGB and HSV color systems, resulting in 16 different colorimetric features: $L^*a^*b^*$, L^* , a^* , b^* , RGB, R, G, B, HSV, H, S, V, $L^*a^*b^* + \text{RGB}$, $L^*a^*b^* + \text{HSV}$, $\text{RGB} + \text{HSV}$, and $L^*a^*b^* + \text{RGB} + \text{HSV}$. To build the model, Stepwise Linear Regression Analysis (SLR) and Support Vector Regression (SVR) were used with Cross Validation. The best models were selected from all 3 models. The results showed that the average of actual and predicted values from all 3 models did not differ significantly at the 95% confidence level, and the average difference of error of the 3 models did not differ significantly at the 95% confidence level. The most suitable model was developed from $L^*a^*b^*$ using the SLR method, with a coefficient of determination (R^2) of 0.59 and a root mean square error of cross validation (RMSECV) of 5.22 SPAD.

Received: March 29, 2024

Revised: May 30, 2024

Accepted: May 30, 2024

Available online: June 30, 2024

L*a*b*+ RGB + HSV. Calibration models were developed using chlorophyll content and colorimetric variables with stepwise linear regression analysis (SLR) and support vector regression (SVR) based on cross-validation. The top three models were selected. Based on the hypothesis test for a difference between means, the means of the predicted values and the actual values of all those 3 models were not statistically different at the 95% confidence level. Additionally, the mean errors of the top 3 models were not statistically different at the 95% confidence level. Among those 3 models, the suitable one having a coefficient of determination (R^2) of 0.59 and a root mean square error of cross-validation (RMSECV) of 5.22 SPAD was developed from the L*a*b* color features using SLR approach.

Keywords: Oil palm, Chlorophyll, Color meter

1 บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพในการแข่งขันสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้น (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2563ก) ในปี 2566 ประเทศไทยมีผลผลิตจากปาล์มน้ำมันกว่า 19 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2565 ร้อยละ 4.37 (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2566) ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ต้องการธาตุอาหาร (ปุ๋ย) ในปริมาณสูง ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับต้นปาล์มน้ำมัน เพื่อให้มีการเจริญเติบโตที่เหมาะสมและผลผลิตสูง ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) (Amirruddin et al., 2022) ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารในกลุ่มที่ปาล์มน้ำมันต้องการมากที่สุด ซึ่งไนโตรเจนส่งผลต่อพื้นที่ใบ สีของใบ อัตราการเกิดใบใหม่ และการดูดซึมธาตุอาหาร (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2554) ทำให้เกษตรกรมีความจำเป็นต้องให้ไนโตรเจนในปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของต้นปาล์มน้ำมัน (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2554) อย่างไรก็ตามต้นทุนในการดูแลรักษาสวนปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 50 เป็นเรื่องของค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปุ๋ย ดังนั้นหากมีการจัดการปุ๋ยที่ถูกต้องเหมาะสมและมีประสิทธิภาพก็สามารถเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนในการผลิตปาล์มน้ำมันให้แก่เกษตรกรได้

ในปัจจุบันกรมวิชาการเกษตร แนะนำให้เกษตรกรเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความต้องการปูน (Lime Requirement) อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) และความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เพื่อประกอบการจัดการดิน การวางแผนปรับปรุงดิน ตลอดจนกำหนดชนิดและวิธีการใส่ปุ๋ย นอกจากนั้นกรมวิชาการยังแนะนำให้เก็บตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันเพื่อวิเคราะห์ธาตุอาหารที่จำเป็น

ต่อปาล์มน้ำมัน ได้แก่ N P K Mg และ Ca ค่าเหล่านี้สามารถใช้ประกอบการพิจารณาการใส่ปุ๋ยของเกษตรกร เพื่อเกษตรกรจะได้ให้ปุ๋ยต้นปาล์มน้ำมันที่มีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และใช้เวลานาน (กรมวิชาการเกษตร, 2566) ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับปาล์มน้ำมันทั้ง 5 ชนิดนี้ พบว่าไนโตรเจนมีความจำเป็นสำหรับปาล์มน้ำมันมากที่สุด ดังนั้นหากมีเครื่องมือวัดที่สามารถตรวจสอบการขาดไนโตรเจนของต้นปาล์มน้ำมันได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ ไม่ยุ่งยากจะเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาเหล่านี้

เทคนิคการประยุกต์ใช้ค่าสีเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องด้วยอาการขาดไนโตรเจนสามารถสังเกตได้จากสีของใบปาล์มน้ำมันจะมีสีเหลืองซีดหรือสีเขียวอมเหลือง (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2563ข) การเปลี่ยนสีของใบต้นปาล์มน้ำมันเรียกได้อีกอย่างว่า “ภาวะพร่องคลอโรฟิลล์” (รัฐพงษ์ และคณะ, 2564) ซึ่งปริมาณคลอโรฟิลล์มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณไนโตรเจนทางใบพืชอีกด้วย (Evans, 1989; Liu et al., 2012) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์และไนโตรเจนในใบพืช Křizová et al. (2022) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ค่าสี RGB จากรูปภาพดิจิทัลเพื่อประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของใบต้นเรพซิด จากการศึกษาพบว่าค่าสีน้ำเงินและแดงเหมาะสมที่สุดในการสร้างแบบจำลองทำนายค่าคลอโรฟิลล์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.81 โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยอย่างง่าย (Simple Linear Regression) Lima et al. (2017) ได้ศึกษาผลกระทบของสีใบองุ่นจากการต้ม เมื่อนำใบองุ่นไปต้มทำให้สีเขียวของใบองุ่นลดลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล และพบว่าการลดลงของสีเขียวนี้ทำให้คลอโรฟิลล์ของใบองุ่นลดลงตามไปด้วย และยังรายงานอีกว่าการนำไปต้มนั้นทำให้ความสว่าง (L^*) และสีเขียว (a^*) ของใบองุ่นลดลง Berg and Perkins (2004) ได้ศึกษาการประเมินความสามารถของเครื่องมือวัดปริมาณคลอโรฟิลล์เพื่อ

ประเมินการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์และไนโตรเจนในใบชูการ์เมเปิ้ล จากการศึกษาพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์กับไนโตรเจนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยหลายงานวิจัยใช้เครื่องวัดคลอโรฟิลล์ เป็นวิธีการแบบไม่ทำลายในการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์และประมาณค่าไนโตรเจนของพืชผลทางการเกษตร (Vesali et al, 2015) จากงานวิจัยข้างต้นสังเกตได้ว่าค่าสีมีผลต่อการค่าคลอโรฟิลล์และไนโตรเจน ปริมาณคลอโรฟิลล์ส่งผลต่อค่าสีของใบไม้ ซึ่งการได้มาของค่าสีเป็นเครื่องมือต้นทุนต่ำเนื่องจากเป็นช่วงที่สายตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ จึงถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าไนโตรเจนด้วย อย่างไรก็ตาม มาตรฐานค่าสีมีหลากหลายระบบ โดยระบบซึ่งเป็นที่ยอมรับและถูกใช้เพื่อการศึกษาวิจัยทางด้านการวิเคราะห์งานเกษตรประกอบด้วยระบบสี CIELAB color space ($L^*a^*b^*$), ระบบสี RGB (Red, Green, Blue) color space และระบบสี HSV (Hue, Saturation, Value) color space (ธีรชัย, 2565) (Kerkech et al., 2018) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการประยุกต์ใช้ค่าสีร่วมกับการสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมัน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของระบบสีที่แตกต่างกันที่มีต่อสมรรถนะของแบบจำลอง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่างใบปาล์มน้ำมัน

ตัวอย่างใบปาล์มน้ำมัน จำนวน 66 ตัวอย่าง ถูกสุ่มเก็บจากทางใบที่ 17 จำนวน 66 ต้น จากแปลงปาล์มน้ำมันของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร โดยครอบคลุม 4 ช่วงอายุของต้นคือ 5 10 15 และ 20 ปี เพื่อให้มีความครอบคลุมความแปรปรวนความอุดมสมบูรณ์ของระดับธาตุอาหาร แต่ละตัวอย่างใช้ใบปาล์มน้ำมัน จำนวน 1 ใบ ซึ่งถูกตัดให้มีขนาดความยาวประมาณ 10 cm (เลือกส่วนกลางตามความยาวของใบ) ตามคำแนะนำตามหลักวิชาการในการสุ่มเก็บทางใบเพื่อตรวจสอบความต้องการธาตุอาหารของต้นปาล์มน้ำมัน การเลือกสุ่มเก็บตัวอย่างจากทางใบที่ 17 เพราะเป็นตำแหน่งทางใบที่ปริมาณธาตุอาหารมีความสัมพันธ์กับการให้ผลผลิตของปาล์มน้ำมัน และได้ถูกใช้เป็นหลักวิชาการในการสุ่มเก็บทางใบเพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในใบปาล์มน้ำมัน ซึ่งตำแหน่งทางใบที่ 17 นับจากใบยอดที่คลี่เต็มที่แล้วเป็นใบที่ 1 (ธีรพงศ์, 2556; Chungcharoen et al., 2022)

2.2 การวัดค่าสีและระดับคลอโรฟิลล์

ตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันแต่ละตัวอย่างถูกนำมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Minolta CR-000 colorimeter, Minolta Inc., USA) จำนวน 10 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ซ้ำ และนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนค่าสีของตัวอย่าง โดยกระบวนการวัดประกอบด้วยการใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 ที่ 2° observer และบันทึกค่าสีในระบบ CIE L^* , a^* , และ b^* จากนั้นตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันถูกวัดระดับคลอโรฟิลล์ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ (Chlorophyll meter, SPAD-502Plus, Konica Minolta, Japan) ในตำแหน่งและเงื่อนไขเดียวกับการวัดค่าสีเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนค่าคลอโรฟิลล์ของตัวอย่างใบปาล์มน้ำมัน

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ก่อนการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินระดับคลอโรฟิลล์ด้วยค่าสี ค่าระดับคลอโรฟิลล์ถูกทดสอบตัวอย่างนอกกลุ่ม (Outlier) โดยใช้สมการที่ (1) (Posom et al., 2016)

$$\frac{(X_i - \bar{X})}{SD} \geq \pm 3 \quad (1)$$

เมื่อ X_i คือ ค่าคลอโรฟิลล์ที่วัดจริง

$\bar{X}$ คือ ค่าคลอโรฟิลล์เฉลี่ย

SD คือ ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โดยหากผลการคำนวณได้ค่าอยู่นอกช่วง -3 ถึง +3 แสดงว่าเป็นตัวอย่างนอกกลุ่ม (Posom et al., 2016)

ค่าสีจากตัวอย่างใบปาล์มน้ำมัน $L^*a^*b^*$ ถูกแปลงเป็นค่าสี RGB และ HSV โดยใช้ฟังก์ชัน lab2rgb และ rgb2hsv ในโปรแกรม Matlab สำหรับแปลงค่าสี ซึ่งค่าสีเหล่านี้เป็นตัวแปรต้น และค่าคลอโรฟิลล์เป็นตัวแปรตาม งานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรต้นเพื่อการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบทั้งหมด 16 ตัวแปร ประกอบด้วย $L^*a^*b^*$, L^* , a^* , b^* , RGB, R, G, B, HSV, H, S, V, $L^*a^*b^* + RGB$, $L^*a^*b + HSV$, $RGB + HSV$ และ $L^*a^*b^* + RGB + HSV$ โดยที่ $L^*a^*b^*$ เป็นการกำหนดค่าสีโดยใช้หลักการตามทฤษฎีคู่ตรงข้าม ซึ่งมีอยู่ 3 คู่ คือ สีแดงกับสีเขียว สีเหลืองกับสีน้ำเงิน และสีชาวกับสีดำ โดยค่าความสว่าง (L^*) เป็นค่าบอกความสว่างของสีมีตั้งแต่ 0 ถึง 100 ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a^*) มีค่าตั้งแต่ -120 ถึง 120 (ค่าเป็นบวกคือสีแดง ค่าเป็นลบคือสีเขียว) ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) มีค่าตั้งแต่ -120 ถึง 120 (ค่าเป็นบวกคือสีเหลือง ค่าเป็นลบคือสีน้ำเงิน) (ศศิภา, 2554) RGB แสดงถึง สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ HSV เป็นการพัฒนาศีโดยใช้ Hue

Saturation และ Value ซึ่ง Hue คือค่าสีของสีหลัก (แดง เขียว และน้ำเงิน) ในทางปฏิบัติจะอยู่ระหว่าง 0 และ 255 ซึ่งถ้า Hue มีค่าเท่ากับ 0 จะแทนสีแดงและเมื่อ Hue มีค่าเพิ่มขึ้นสีก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามสเปกตรัมของสีจนถึง 256 Saturation คือ ความบริสุทธิ์ของสี ถ้า Saturation มีค่าเท่ากับ 0 แล้วสีที่ได้จะไม่มี Hue และจะเป็นสีขาวล้วนแต่ถ้าหาก Saturation มีค่าเท่ากับ 255 แสดงว่าจะไม่มีแสงสีขาวผสมอยู่เลย Value คือ ความสว่างของสี ซึ่งสามารถวัดได้โดยค่าความเข้มของความสว่างของแต่ละสี (วัชรพงษ์, 2561)

แบบจำลองการประเมินค่าระดับคลอโรฟิลล์ของใบปาล์ม น้ำมัน ถูกพัฒนาจากการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Linear Regression Analysis, SLR) และซัพพอร์ตเวกเตอร์เรเกรสชัน (Support Vector Regression, SVR) ซึ่งทั้งสองอัลกอริทึมมีจุดเด่นที่แตกต่างกัน คือ SLR เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้คัดเลือกตัวแปรต้นสำหรับการสอบเทียบ โดยเลือกกลุ่มคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวแปรตามในชุดตัวอย่างมากที่สุด (Ciurczak et al., 2021) วิธีการนี้ทำได้โดยการนำตัวแปรต้นที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเข้าไปทีละ 1 ตัวก่อน จากนั้นทำการคัดตัวแปรต้นที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเข้าไปเป็นตัวแปรตัวที่สอง แล้วใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบถดถอยหลัง (Backward) ตรวจสอบว่าตัวแปรที่เข้าไปอยู่ในตัวแบบพร้อมกันแล้ว ตัวแปรใดควรคัดออก การคัดเลือกตัวแปรทั้งสามข้างต้นใช้เกณฑ์การคัดเลือกโดยการทดสอบทางสถิติทดสอบเอฟ (F-test Statistic) สมการที่นำมาพิจารณาต้องเป็นสมการความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) การที่ตัวแปรต้นมีจำนวน 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัว โดยมีข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับตัวแปรต้นแต่ละตัว คือ ตัวแปรต้นจะต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (Intercolinearity หรือ เกิด Multicollinearity) ในทางปฏิบัติ หากตัวแปรต้นใดมีค่า (Variance Inflation Factor, VIF) ในช่วง 5 ถึง 10 หรือมากกว่า จะแสดงถึงปัญหาการเกิด Multicollinearity และเป็นการบ่งชี้ว่าตัวแปรนั้นไม่ควรอยู่ในสมการ (พจนาน, 2547) สำหรับ SVR เป็นเทคนิคที่ใช้วิธีการวิเคราะห์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) เป็นตัวจำแนกเชิงเส้น (Linear Classifier) แบบไบนารี (Binary) การใช้ฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel Function) ช่วยให้สามารถจำแนกข้อมูลที่มีความคลุมเครือได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการของ SVM คือการหา Hyperplane ที่สามารถแบ่งจุดข้อมูลออกเป็น 2 Class ด้วยระยะห่างที่มากที่สุด (Maximum Margin) ในขณะเดียวกันก็

สามารถแบ่งจุดข้อมูลได้อย่างถูกต้องมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (รัสรินทร์, 2565) นอกจากนั้น SVM สามารถสร้างแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) และได้สมรรถนะที่ดีแม้ว่าข้อมูลมีขนาดเล็กก็ตาม (Alves et al., 2013; Malegori et al., 2017)

จากนั้นแบบจำลองใช้วิธีการพิสูจน์แบบไขว้ (Cross Validation) ด้วยเทคนิค 5-fold Cross Validation สำหรับการประเมินความถูกต้อง และเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนายแบบไขว้ (Root Mean Square Error of Cross Validation, RMSECV) การวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดในงานวิจัยนี้ใช้ โปรแกรม MATLAB (Version R2022b, The MathWorks, Natick, MA, USA)

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการทางสถิติ ด้วยวิธีการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับข้อมูลสองกลุ่ม (Paired Sample T-Test) ได้แก่ ค่าจริงและทำนายของคลอโรฟิลล์จากแบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรกที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% นอกจากนั้นยังใช้วิธีการทางสถิติหาค่าความแตกต่างของความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) การวิเคราะห์ทางสถิติของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics (Version 29.0.0.0, IBM, New York)

3 ผลและวิจารณ์

Table 1 แสดงข้อมูลทางสถิติของค่าสีและค่าคลอโรฟิลล์ของตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันสำหรับการสร้างแบบจำลอง โดยมีรูปตัวอย่างใบที่มีค่าปริมาณคลอโรฟิลล์สูงสุดและต่ำที่สุดดังแสดงใน Figure 1 จากรูปตัวอย่างใบที่มีค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำที่สุดสามารถสังเกตได้ว่ามีจุดสีเหลืองอมน้ำตาลอยู่ทั่วทั้งใบ ในทางกลับกันตัวอย่างใบที่มีค่าปริมาณคลอโรฟิลล์สูงที่สุดไม่มีจุดสีเหลืองอมน้ำตาลและยังพบว่าใบมีสีเขียวเข้ม ซึ่งแสดงคุณสมบัติของใบปาล์มน้ำมัน Table 2 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการประเมินค่าคลอโรฟิลล์ด้วยค่าสีจากตัวแปรต้นทั้งหมด 16 รูปแบบ โดยพัฒนาแบบจำลองด้วยวิธี SLR และ SVR และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่า R^2 และ RMSECV เพื่อหาชุดตัวแปรต้นและวิธีการพัฒนาแบบจำลองที่ดีที่สุด ซึ่งพิจารณาจากรูปแบบตัวแปรต้นใดที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า RMSECV ต่ำที่สุดจะถูกพิจารณาให้เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุด จากผลการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองที่

ดีที่สุดอันดับที่ 1 ถูกพัฒนาจาก SVR จากตัวแปรระบบสี $L^*a^*b^*+HSV$ ซึ่งมีค่า R^2 และ RMSECV เท่ากับ 0.61 และ 4.98 SPAD ตามลำดับ นอกจากนี้แบบจำลองที่ดีที่สุด อันดับที่ 2 และ 3 มีสมรรถนะใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ดีที่สุดอันดับที่ 1 ได้แก่ แบบจำลองที่ถูกพัฒนามาจากระบบสี HSV และ $L^*a^*b^*$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.60 และ 0.59 ตามลำดับ และมีค่า RMSECV เท่ากับ SPAD 5.11 และ 5.22 SPAD ซึ่งถูกพัฒนาจาก SVR และ SLR ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า $L^*a^*b^*$ และ HSV มีผลต่อการทำนายค่าคลอโรฟิลล์ในใบปาล์มน้ำมันมากกว่าค่า RGB ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2014) ได้มีรายงานหาค่า $L^*a^*b^*$ มีความความสัมพันธ์สูงค่าคลอโรฟิลล์รวมไปถึงค่าไนโตรเจนในใบข้าวอีกด้วย นอกจากนี้สังเกตได้ว่าตัวแปรต้นที่ประกอบด้วยค่าสีเดียวให้ค่า R^2 ต่ำกว่าตัวแปรต้นที่ประกอบด้วยค่าสีหลายตัวแปร รวมไปถึงค่า RMSECV สูงอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าสีเดียวเป็นตัวแปรต้นไม่มีอิทธิพลเพียงพอในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงระดับคลอโรฟิลล์ในใบปาล์มน้ำมันได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของ Hu et al. (2010) ที่ได้รายงานหาค่าตัวแปรค่าสีเดียวมีความสัมพันธ์ที่ต่ำกับคลอโรฟิลล์ที่สกัดได้ และปริมาณคลอโรฟิลล์ที่วัดได้จากใบข้าวบาร์เลย์ด้วยเครื่องวัดคลอโรฟิลล์

จากการทดสอบสมมติฐานทางสถิติของแบบจำลองทั้ง 3 อันดับแรกพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าทำนายและค่าจริงของคลอโรฟิลล์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยแบบจำลองอันดับที่ 1 ($p = 0.333 > 0.05$) อันดับที่ 2 ($p = 0.236 > 0.05$) และอันดับที่ 3 ($p = 0.500 > 0.05$) ยิ่งไปกว่านั้นค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของแบบจำลองอันดับ 1, 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.433 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะเลือกแบบจำลองใดใน 3 อันดับนี้ ค่าการทำนายของค่าคลอโรฟิลล์จะไม่แตกต่างกัน ดังนั้นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจาก 3 อันดับแรก คือ แบบจำลองอันดับที่ 3 ซึ่งถูกสร้างจากตัวแปรค่าสี $L^*a^*b^*$ โดยใช้อัลกอริทึม SLR Figure 2 แสดงกราฟการกระจายของค่าทำนายและค่าจริงของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากแบบจำลองนี้ ซึ่งค่าสีที่ใช้นี้ไม่จำเป็นต้องผ่านการแปลงและสามารถรับค่าได้โดยตรงจากเครื่องวัดสี อีกทั้ง อัลกอริทึม SLR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี SVR ทำให้สามารถช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลได้อีกด้วย

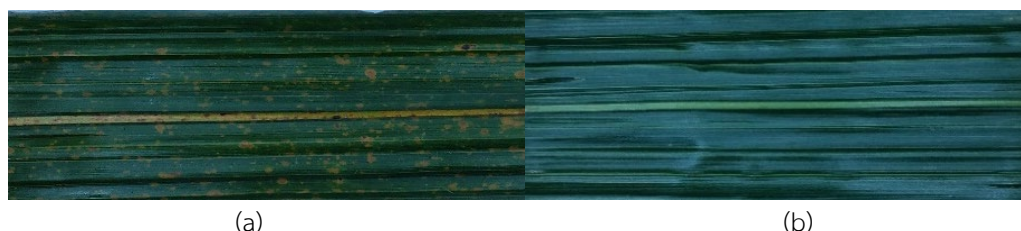


Figure 1 Oil palm leaf samples representing lowest (a) and highest chlorophyll contents in this study.

Table 1 Statistical summary of chlorophyll and color values.

Parameters	Chlorophyll (SPAD)	L^*	a^*	b^*	R	G	B	H	S	V
Minimum	46.16	24.5	-11.80	4.44	55.00	60.0	52.00	0.20	0.14	0.24
Maximum	81.07	38.63	-4.06	21.90	88.00	95.00	62.00	0.28	0.43	0.37
Mean	67.76	31.96	-8.54	11.85	68.73	78.64	56.30	0.26	0.28	0.31
SD	8.00	3.59	1.99	4.31	7.80	9.07	2.47	0.02	0.10	0.04

Table 2 The results of the models for prediction of chlorophyll of oil palm leaves.

Variable	SLR		SVR	
	R ²	RMSECV	R ²	RMSECV
L*a*b*	0.59	5.22	0.56	5.28
L*	0.31	6.69	0.41	6.18
a*	0.27	7.06	0.27	7.05
b*	0.46	5.89	0.07	7.92
RGB	0.55	5.42	0.56	5.32
R	0.40	6.36	0.43	6.02
G	0.28	6.90	0.43	6.10
B	0.00	8.20	0.03	7.90
HSV	0.53	5.47	0.60	5.11
H	0.37	6.35	0.44	5.99
S	0.48	5.96	0.51	5.66
V	0.29	6.81	0.42	6.07
L*a*b*+ RGB + HSV	0.43	6.04	0.57	5.32
L*a*b* + RGB	0.47	5.98	0.56	5.30
L*a*b + HSV	0.52	5.64	0.61	4.98
RGB + HSV	0.43	6.04	0.57	5.27

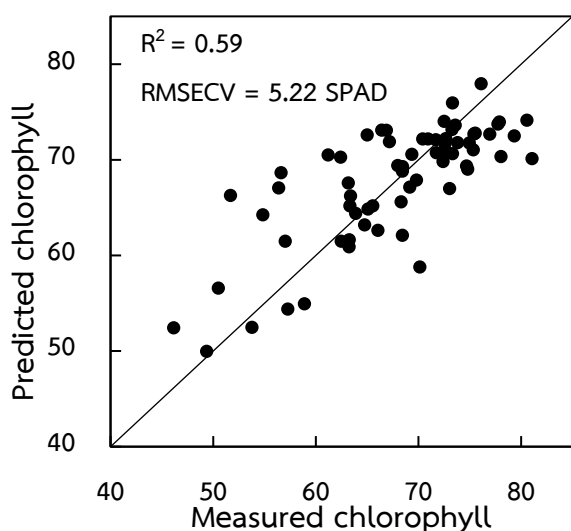


Figure 2 Scatter plots of the predicted chlorophyll values versus the measured chlorophyll values.

4 สรุป

ผลจากงานวิจัยนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ค่าสีสำหรับการประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมัน จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองที่ดี

ที่สุดถูกพัฒนามาจากตัวแปรต้น L*a*b* ด้วยวิธี SLR โดยมีค่า R² และ RMSECV เท่ากับ 0.59 และ 5.22 SPAD ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามยังให้ผลการประเมินได้ไม่ดีเพียงพอ ซึ่งอาจต้องได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้สามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมัน ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ในอนาคตสำหรับการสร้างแบบจำลองการทำนายค่าคลอโรฟิลล์ คือ งานวิจัยนี้ควรมีการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมันด้วยวิธีมาตรฐาน จากนั้นสร้างแบบจำลองการทำนายจากค่าคลอโรฟิลล์ด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อให้ค่าทำนายถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้น ควรใช้ภาพถ่ายใบปาล์มน้ำมันแทนการใช้เครื่องวัดสีเนื่องจากสีของใบปาล์มน้ำมันไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ข้อมูลที่เก็บมาจากเครื่องวัดสีเป็นข้อมูลเพียงจุดเดียว ทำให้ข้อมูลที่ได้อาจไม่เพียงพอต่อการทำนายค่าคลอโรฟิลล์

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาพื้นที่ (บพท.) ประจำปีงบประมาณ 2563 ภายใต้แผนงาน “การยกระดับคุณภาพชีวิตด้วยการพัฒนา

เศรษฐกิจการท่องเที่ยวชุมชน และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน”

6 เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2566. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยปาล์มน้ำมันตามค่าวิเคราะห์ใบ. แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th//fc/palmsurat/wpcontent/uploads/2020/06/5-1.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2566.

ธีระชัย ปรมาศิรวัฒน์. 2565. การพัฒนากระบวนการแปรรูปมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้โดยใช้พลาสมาเย็น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. เชียงใหม่: สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ธีระพงศ์ จันทนิมม. 2556. เอกสารเผยแพร่ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตปาล์มน้ำมัน. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พจนา แวสวัสดิ์. 2547. เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับความถดถอยเชิงเส้น. วารสารศรีปทุมปริทัศน์ 4(1), 5-20.

รัฐพงษ์ สุวลักษณ์, พงศกร ปงใจดี, สิทธิโชค เชื้อมั่ง, อนุชา บรรดาศักดิ์, กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์. 2564. การศึกษาความเป็นไปได้ในการประเมินระดับคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมันโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายจากกล้องสมาร์ตโฟน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 27(2), 1-6.

รสรินทร์ เมธาเฉลิมพัฒน์. 2565. การประยุกต์ใช้ Machine Learning กับงานในภาคอุตสาหกรรม ตอนที่ 1 กลุ่มวิจัยไอโอทีและระบบอัตโนมัติสำหรับงานอุตสาหกรรม (IIARG). ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC).

วัชรพงษ์ แจ่มสว่าง. 2561. โครงการการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณยา Rifampin ในเม็ดยาโดยการเทียบด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปี 2561. มหาวิทยาลัยบูรพา.

ศศิภา เต็กอวยพร. 2554. การพัฒนาระบบวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายเพื่อตรวจติดตามคุณภาพของผลผลิตมันฝรั่งรอบ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. นครปฐม : ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. 2554. คู่มือปาล์มน้ำมันชุดที่ 1. ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 7 กรมวิชาการเกษตร.

ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. 2563ก. ข่าวสารปาล์มน้ำมัน.

แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/fc/palmsurat/wp-content/uploads/2020/07/ข่าวสารปาล์มน้ำมัน-20763.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2566.

ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. 2563ข. นวัตกรรมปาล์มน้ำมัน.

แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th//fc/palmsurat/wp-content/uploads/2020/06/เอกสารนวัตกรรมปาล์มน้ำมัน.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2566.

สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. กรม.ได้รับทราบโครงการผลักดันการส่งออกน้ำมันปาล์ม. แหล่งข้อมูล: <https://www.oae.go.th/view/1/รายละเอียดข่าว/ข่าว%20สศก/41752/TH-TH>. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2566.

Alves, J. C. L., Poppi, R. J. 2013. Biodiesel content determination in diesel fuel blends using near infrared (NIR) spectroscopy and support vector machines (SVM). Talanta 104, 155-161.

Amirruddin, A. D., Muharam, F. M., Ismail, M. H., Tan, N. P., Ismail, M. F. 2022. Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) and Logistic Model Tree (LMT)-Adaptive Boosting algorithms for classifying imbalanced datasets of nutrient and chlorophyll sufficiency levels of oil palm (Elaeis guineensis) using spectroradiometers and unmanned aerial vehicles. Computers and Electronics in Agriculture 193, 106646.

Berg, A. K., Perkins, T. D. 2004. Evaluation of a portable chlorophyll meter to estimate chlorophyll and nitrogen contents in sugar maple (Acer saccharum Marsh.) leaves. Forest Ecology and Management 200, 113-117.

Chungcharoen, T., Donis-Gonzalez, I., Phetpan, K., Udompetakul, V., Sirisomboon, P., Suwalak, R. 2022. Machine learning-based prediction of nutritional status in oil palm leaves using proximal multispectral images. Computers and Electronics in Agriculture 198, 107019.

Ciurczak, E. W., Igne, B., Workman Jr, J., Burns, D. A. 2021. Handbook of near-infrared analysis. CRC press.

- Evans, J.R. 1989. Partitioning of nitrogen between and within leaves grown under different irradiances. *Functional Plant Biology* 16, 533-548.
- Hu, H., Liu, H., Zhang, H., Zhu, J., Yao, X., Zhang, X., Zheng, K. 2010. Assessment of chlorophyll content based on image color analysis, comparison with SPAD-502. 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science 2010, 476-478. Wuhan, China. 25-26 December 2010, Wuhan, China.
- Kerkech, M., Hafiane, A., Canals, R. 2018. Deep leaning approach with colorimetric spaces and vegetation indices for vine diseases detection in UAV images. *Computers and electronics in agriculture* 155, 237-243.
- Křížová, K., Kadeřábek, J., Novák, V., Linda, R., Kurešová, G., Šařec, P. 2022. Using a single-board computer as a low-cost instrument for SPAD value estimation through colour images and chlorophyll-related spectral indices. *Ecological Informatics* 67, 101496.
- Lima, A., Pereira, J. A., Baraldi, I., Malheiro, R. 2017. Cooking impact in color, pigments and volatile composition of grapevine leaves (*Vitis vinifera* L. var. Malvasia Fina and Touriga Franca). *Food chemistry* 221, 1197-1205.
- Liu, Z. A., Yang, J. P., Yang, Z. C. 2012. Using a chlorophyll meter to estimate tea leaf chlorophyll and nitrogen contents. *Journal of soil science and plant nutrition* 12(2), 339-348.
- Malegori, C., Marques, E. J. N., de Freitas, S. T., Pimentel, M. F., Pasquini, C., Casiraghi, E. 2017. Comparing the analytical performances of Micro-NIR and FT-NIR spectrometers in the evaluation of acerola fruit quality, using PLS and SVM regression algorithms. *Talanta* 165, 112-116.
- Posom, J., Shrestha, A., Saechua, W., Sirisomboon, P. 2016. Rapid non-destructive evaluation of moisture content and higher heating value of *Leucaena leucocephala* pellets using near infrared spectroscopy. *Energy* 107, 464-472.
- Vesali, F., Omid, M., Kaleita, A., Mobli, H. 2015. Development of an android app to estimate chlorophyll content of corn leaves based on contact imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* 116, 211-220.
- Wang, Y., Wang, D., Shi, P., Omasa, K. 2014. Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. *Plant Methods* 10, 36.



การคัดแยกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ

Isolation of Microalgae Strains for Absorbing Carbon Dioxide to Improve Biogas Quality

ปฐมพร พูลสวัสดิ์¹, วชิร กัลยาณัง¹, นันทนิต โต้ะปอง^{1*}

Patomporn Pulsawad¹, Watcharee Kunyalung¹, Nantanit Tohpong^{1*}

¹สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, จังหวัดปทุมธานี 12120, ประเทศไทย

¹Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author: Tel.: +66-8-55648289, E-mail: patomporn@tistr.or.th

บทคัดย่อ

การนำสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) มาใช้ประโยชน์ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพเป็นทางเลือกในการใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพมาปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 40-75% และสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 25-50% ในกระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็กเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่ส่งผลให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (biomethane) มีสัดส่วนที่สูงขึ้น เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนให้กับเซลล์ ปัจจัยที่สำคัญในการส่งเสริมการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ ช่วงเวลาเวลาในการรับแสง สารอาหารที่จำเป็น รูปแบบของชุดปฏิกรณ์ชีวภาพ รวมทั้งสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างสาหร่ายขนาดเล็กในพื้นที่ที่มีการเกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งได้แก่ ฟาร์มเลี้ยงสุกรและบ่อฝังกลบขยะที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ทำการคัดแยกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพและรวมถึงการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ตามศักยภาพของสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กชนิดนั้น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ, การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ, ความหลากหลายของสายพันธุ์สาหร่าย, การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Abstract

Utilizing microalgae for the purpose of absorbing carbon dioxide from bio-based gas is an alternative approach in using biotechnology to enhance the quality of bio-based gas. Generally, the composition of biogas is approximately 40-75% of methane (CH_4) and 25-50% of carbon dioxide (CO_2). In microalgae's uptake process, carbon dioxide is a biochemical reaction that occurs inside the cell, resulting in a higher proportion of methane in the biogas, since microalgae can use carbon dioxide as a carbon source for the cells. The important factors in promoting carbon dioxide uptake of microalgae are microalgae species, CO_2 /Air feed rates, Light intensity and Light/Dark photoperiod, Nutrients required, bioreactor type and environmental conditions in culture. This research explored and collected microalgae samples in biogas-producing areas, such as pig farms and biogas-producing

Received: August 7, 2023

Revised: March 5, 2024

Accepted: March 11, 2024

Available online: June 30, 2024

landfills to generate electricity in order to screen algae species for use in absorbing carbon dioxide in biogas and further development for the use of microalgae in other areas according to the potential of that algae species.

Keywords: biogas, biogas upgrading, Biodiversity of microalgae, Carbon dioxide absorption

1 บทนำ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นก๊าซผสมที่มีองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 30-40 % เป็นก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ถึง 25 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซมีเทน (Zhou et al., 2017) การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซีโอไลท์ (Zeolite) โซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) (Li et al., 2008; Hunt et al., 2010; Pires et al., 2011) รวมทั้งการประยุกต์ใช้ องค์ประกอบของโลหะอินทรีย์ช่วยในการดูดซับ (Lin et al., 2017) การใช้สารเคมีก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อเป็นตัวทำลาย ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น Monoethanolamine (MEA), เอมีน (Amine) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Kittel et al., 2009; Pires et al., 2011) นอกจากการใช้สารเคมี แล้วเทคโนโลยีเมมเบรนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำหน้าที่เป็นตัวกรองด้วยคุณสมบัติการเป็นตัวเลือกผ่าน เช่น เยื่อโพลีเมอร์ (Scholes et al., 2009; Pires et al., 2011) อย่างไรก็ตามวิธีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการแช่แข็ง (Cryogenic separation) ก็ได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 99.9% แต่มีต้นทุนสูง เสี่ยงพลังงานและค่าใช้จ่ายอย่างมากในการลดอุณหภูมิและเพิ่มอุณหภูมิเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Tuinier et al., 2010) นอกจากนี้ขบวนการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ใต้ชั้นเปลือกโลกที่ลึกมากหรือใต้มหาสมุทร (Carbon storage) เป็นงานวิจัยแนวคิดใหม่ที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง (Kovscek and Cakici, 2005; Kita and Ohsumi, 2004) จากวิธีทางเคมีและทางกายภาพต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว วิธีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยขบวนการทางชีวภาพกำลังเป็นงานวิจัยที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยอาศัยหลักการของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของพืชเพื่อประโยชน์ในการสังเคราะห์แสงและเพิ่มชีวมวลในการเจริญเติบโตของต้นไม้ รวมทั้งเป็นธาตุอาหารของแพลงตอนพืชน้ำจืดและน้ำเค็ม (Williamson et al., 2012) ซึ่งหลักการเดียวกันนี้ได้เป็นแนวคิดของศึกษาวิจัยและพัฒนางานวิจัยการนำสาหร่ายขนาดเล็ก

(Microalgae) สายพันธุ์ต่างๆ มาใช้ประโยชน์ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากความหลากหลายและคุณสมบัติของแต่ละสายพันธุ์ของสาหร่าย อายุการเจริญเติบโตพร้อมระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่สั้นรวมทั้งมวลชีวภาพต่อหน่วยการผลิตที่มีปริมาณสูง มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในกรณีการใช้ประโยชน์จาก Microalgae เช่นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella* sp. ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบไร้อากาศโดยตรง (ครรชิต และคณะ, 2559) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ไฮยาโนแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างๆ เพื่อดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ ได้แก่ *Anabaena cylindricall* และ *Spirulina platensis* เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติ (Bose et al., 2019)

เทคโนโลยีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเทคโนโลยีการเพิ่มคุณภาพและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการดั้งเดิมได้แก่การใช้ระบบดักจับด้วยน้ำ ยังคงนิยมใช้และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (ชนมนและสุวรรณ, 2559) ด้วยเหตุผลของค่าใช้จ่ายในการดูแลจัดการที่ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบสูง รวมทั้งมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน (Xiao et al., 2014) อย่างไรก็ตามน้ำจากระบบดังกล่าวนี้พบว่ามีไบคาร์บอเนตจากการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งส่งผลให้น้ำมีระดับค่าพีเอชต่ำ มีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมในการปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ จึงต้องทำการเวียนน้ำหลังผ่านการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นำกลับมาใช้ใหม่ โดยต้องมีขบวนการปรับความเป็นกรดของน้ำเพื่อให้มีค่าพีเอชที่เหมาะสมก่อนเวียนน้ำกลับเข้าระบบบำบัดแบบไร้อากาศซึ่งเป็นการเพิ่มขั้นตอนการปฏิบัติงานและเพิ่มค่าใช้จ่าย ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดการนำน้ำหลังการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มาบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยการดักจับด้วย Microalgae ซึ่งสามารถเป็นแหล่งคาร์บอนของกระบวนการสังเคราะห์แสงและเป็นการเพิ่มมูลค่าและสร้างผลิตภัณฑ์จากสาหร่ายขนาดเล็ก

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสาหร่ายกำลังมีแนวโน้มที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างกว้างขวางเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของสาหร่าย รวมทั้งเป็นขบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการเวียนกลับ

เอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มโดยไม่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานต่ำ ช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีและค่าใช้จ่ายด้านการจัดการ (Tippayawong and Thanompongchart, 2010) ดังนั้นความชัดเจนในการเลือกใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กในการพัฒนาในเชิงพาณิชย์จะเป็นการลดต้นทุนการผลิต สามารถกำหนดทิศทางการวางแผนทางการตลาดในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม การเจาะจงสายพันธุ์ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ซึ่งเป็นเป้าหมายของงานวิจัยนี้โดยจะดำเนินการศึกษาเพื่อหาสายพันธุ์ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศ รวมทั้งมีความทนทานต่อคุณลักษณะของน้ำหลังผ่านระบบดักจับที่มีพีเอชต่ำ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การสำรวจและเก็บตัวอย่างในพื้นที่

พื้นที่เก็บตัวอย่างสาหร่ายเป็นพื้นที่ที่เกิดก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ฟาร์มสุกรในจังหวัดฉะเชิงเทรา 3 ตำแหน่ง และบ่อฝังกลบขยะขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี 4 ตำแหน่ง

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างน้ำ

การเก็บรวบรวมตัวอย่างน้ำในพื้นที่ดังกล่าวข้างต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ (pH, DO, Turbidity, BOD, COD, Total solid, Total Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Calcium, Copper, Magnesium, Manganese, Zinc และ Iron) โดยวิธีการวิเคราะห์ที่อ้างอิงตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (Rodge et al., 2017)

2.3 การคัดแยกและเก็บรวบรวมสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็ก

1. การเก็บรวบรวมสายพันธุ์สาหร่ายที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่เกิดก๊าซชีวภาพเพื่อนำมาระบุสายพันธุ์สาหร่าย

2. คัดแยกและระบุสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กเบื้องต้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ กำลังขยาย 40 เท่า

3. การคัดเลือกสาหร่ายขนาดเล็ก โดยการนำตัวอย่างน้ำหรือตัวอย่างดินที่เก็บจากธรรมชาติมาเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 โดยเลี้ยงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml ปริมาตรอาหาร 100 ml บนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 100 rpm บ่มภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความเข้มแสง $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ $28 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 21-day ทำการแยกให้ได้สายพันธุ์สาหร่ายบริสุทธิ์เดี่ยวๆ

4. เก็บรักษาสาหร่ายขนาดเล็กที่คัดแยกได้ไว้ที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านสาหร่าย ของศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไป

3 ผลและวิจารณ์

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำในบริเวณที่เกิดก๊าซชีวภาพในบริเวณฟาร์มหมูซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



Figure 1 The wastewater from a swine farming. (sample collection pond No. 2, 3 and 4).

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลพบว่า ฟาร์มเลี้ยงสุกร ได้มีการจัดทาระบบหมักแบบไร้อากาศเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย แต่เนื่องจากสภาวะโรคระบาดที่เกิดขึ้นกับสุกร จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณของเสียที่จะเข้าระบบน้อยลง จึงหันมาใช้บ่อฝังธรรมชาติในการกำจัดน้ำเสียและของเสียที่ออกมาจากฟาร์ม โดยมีบ่อรองรับน้ำเสียทั้งหมด 4 บ่อก่อนที่จะปล่อยลงสู่บ่อกักเก็บเพื่อใช้น้ำสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้ง ลักษณะบ่อรองรับน้ำทิ้งทั้ง 4 บ่อมีลักษณะเป็นบ่อน้ำนิ่งที่มีการกักเก็บน้ำอยู่ช่วงเวลาหนึ่งก่อนปล่อยจากบ่อที่ 1 ไปยังบ่อที่ 2 และบ่อถัดๆ ไป โดยบ่อที่ 1 มีลักษณะเหนียวข้นลักษณะน้ำเป็นสีเข้ม ส่วนในบ่อที่ 2, 3 และบ่อที่ 4 ลักษณะทางกายภาพสีของน้ำมีความจางลงนอกจากนี้ในบ่อที่ 4 ยังพบสาหร่ายสีเขียวลอยอยู่ผิวหน้าของน้ำ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำ (แสดงดังตารางที่ 1) พบว่าค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ทั้ง 3 บ่อมีความเป็นกลางถึงด่างอ่อน ๆ อยู่ที่ประมาณ 7.16-7.78 ความขุ่นของน้ำจะพบว่า บ่อที่ 4 มีความขุ่นน้อยที่สุดซึ่งเป็นสภาวะที่แสงแดดสามารถส่องผ่านส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ตรวจพบได้ในบ่อน้ำทิ้งที่ 4 บ่อสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำเข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้ง อย่างไรก็ตามปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) และธาตุอาหารรองมีผลต่อ

การเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้น ตรวจพบในบ่อบำบัดน้ำเสียทั้ง 3 บ่อ

ในการสำรวจและเก็บตัวอย่างน้ำและสาหร่าย ในบริเวณของ บ่อฝักรบขยะอบจ. จังหวัดนนทบุรี ซึ่งเป็นมีพื้นที่ของหลุมฝังกลบขยะประมาณ 120 Rai ภาระบรรจุปริมาณขยะได้ 5×10^6 Ton สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 6.2 MW day^{-1} ในบริเวณ 4 จุด แสดงดังรูปที่ 2, 3 และ 4



Figure 2 The wastewater (pond No. 1) from landfill of the Nonthaburi Provincial Administrative Organization. (sample collection points 1 and 2).



Figure 3 The wastewater (pond No. 2) of the landfill of the Nonthaburi Provincial Administrative Organization. (sample collection points 3).



Figure 4 The wastewater (pond No. 3) of landfill of the Nonthaburi Provincial Administrative Organization. (sample collection point 4).

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำในบ่อ ฝักรบขยะ อบจ. นนทบุรี พบว่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ค่อนข้างเป็นกลางถึงด่างอ่อนๆ อยู่ระหว่าง 7.04 - 8.51 ความขุ่นของน้ำในแต่ละจุดค่อนข้างแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 34.6 - 118 เอ็นทียู (NTU) และตรวจพบการละลายของออกซิเจนในน้ำต่ำมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ ($0.0 \text{ mg}_{\text{O}_2} \text{ ml}^{-1}$) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำมีปริมาณค่อนข้างสูงรวมทั้งยังตรวจพบธาตุอาหารหลัก N, P, K รวมทั้งธาตุอาหารรองต่าง ๆ ที่มีส่วนสำคัญในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กด้วย ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1

ตัวอย่างสาหร่ายที่เก็บได้จากบริเวณฟาร์มสุกรและแหล่งน้ำบริเวณบ่อฝักรบขยะอบจ. นนทบุรี เพื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อขึ้นไปถึงสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็ก พบถึงความหลากหลายของสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่สามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณดังกล่าวถึง 39 Isolate ที่แตกต่างกัน (ดังรูปที่ 5) แม้ว่าผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้งสองแหล่งจะระบุถึงปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้น้อยจนไม่สามารถตรวจพบ (ดังตารางที่ 1) โดยปริมาณออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ซึ่งเป็นขบวนการในการสร้างอาหารให้กับเซลล์ ส่งเสริมการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตและสาหร่ายขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามสาหร่ายที่เก็บรวบรวมได้เป็นสาหร่ายขนาดเล็กที่มีการเจริญเติบโตบริเวณผิวหน้าของแหล่งน้ำ ดังนั้นสาหร่ายขนาดเล็กในบริเวณดังกล่าวจึงสามารถดึงออกซิเจนจากอากาศมาใช้ในขบวนการสังเคราะห์แสงและปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ได้ นอกจากนี้ความขุ่นของน้ำ (Turbidity) ไม่ได้เป็นอุปสรรคในการกีดขวางแสงแดด ของสาหร่ายขนาดเล็กที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานในขบวนการสังเคราะห์แสง รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีของแหล่งน้ำดังกล่าวที่ระบุถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่สาหร่ายนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงเป็นสาเหตุที่สำคัญในการตรวจพบความหลากหลายของสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กถึง 39 Isolate อย่างไรก็ตามวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่เก็บรวบรวมได้ในบริเวณที่มีการเกิดก๊าซชีวภาพ เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพและศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลต่อการสร้างหรือผลิตก๊าซมีเทนค่าเพิ่มและเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมต่อไป ด้วยเหตุนี้จึงคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กจากทั้งฟาร์มเลี้ยงสุกรและบ่อฝักรบขยะ อบจ. นนทบุรี เพื่อหาสายพันธุ์ที่มีศักยภาพได้ทั้งหมดจำนวน 13 Isolate (ดังตารางที่ 2) เพื่อทำการศึกษาวิจัยต่อไป และจาก

การศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กได้มีระบุถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้แก่ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ผลของสารอาหาร ผลของแสง (Light intensity) ผลของอุณหภูมิ (Temperature) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) และอัตราการไหลของก๊าซและการกวน

Table 1 Water quality in the sampling area to isolate microalgae.

Parameter (unit)	Wastewater from a pig farm			Wastewater from landfill of the Nonthaburi Provincial Administrative Organization			
	Pond 2	Pond 3	Pond 4	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
pH	7.16	7.37	7.78	8.51	8.43	7.03	7.40
Turbidity (NTU)	275	143	107	98.7	118	61.9	34.6
DO (mg O ₂ mL ⁻¹)	ND	ND	4.0	ND	ND	ND	ND
BOD (mg L ⁻¹)	366	483	110	366	400	1500	716
COD (mg L ⁻¹)	11,899	7,283	4,205	13,232	12,720	14,771	17,849
TS (mg L ⁻¹)	2,484	2,205	2,332	13,336	12,996	11,078	15,454
TNK (mg L ⁻¹)	439	360	315.1	223.9	218.9	1,159.3	1,203.4
P (mg L ⁻¹)	236	218	139	6.20	7.40	19.10	25.00
Ca (mg L ⁻¹)	79.3	66.7	67.4	80.2	76.8	66.4	51.2
Cu (mg L ⁻¹)	0.320	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K (mg L ⁻¹)	193.0	181.0	183.0	1,178	1,231	1,037	1,119
Mg (mg L ⁻¹)	94.3	69.1	67.5	201	196	79.6	87.3
Mn (mg L ⁻¹)	0.996	0.253	0.193	0.780	0.747	1.58	1.18
Zn (mg L ⁻¹)	0.414	0.039	0.031	0.056	0.037	0.105	0.117
Fe (mg L ⁻¹)	2.02	0.288	0.351	1.35	1.15	2.39	5.45

^a อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 32-34 องศาเซลเซียส

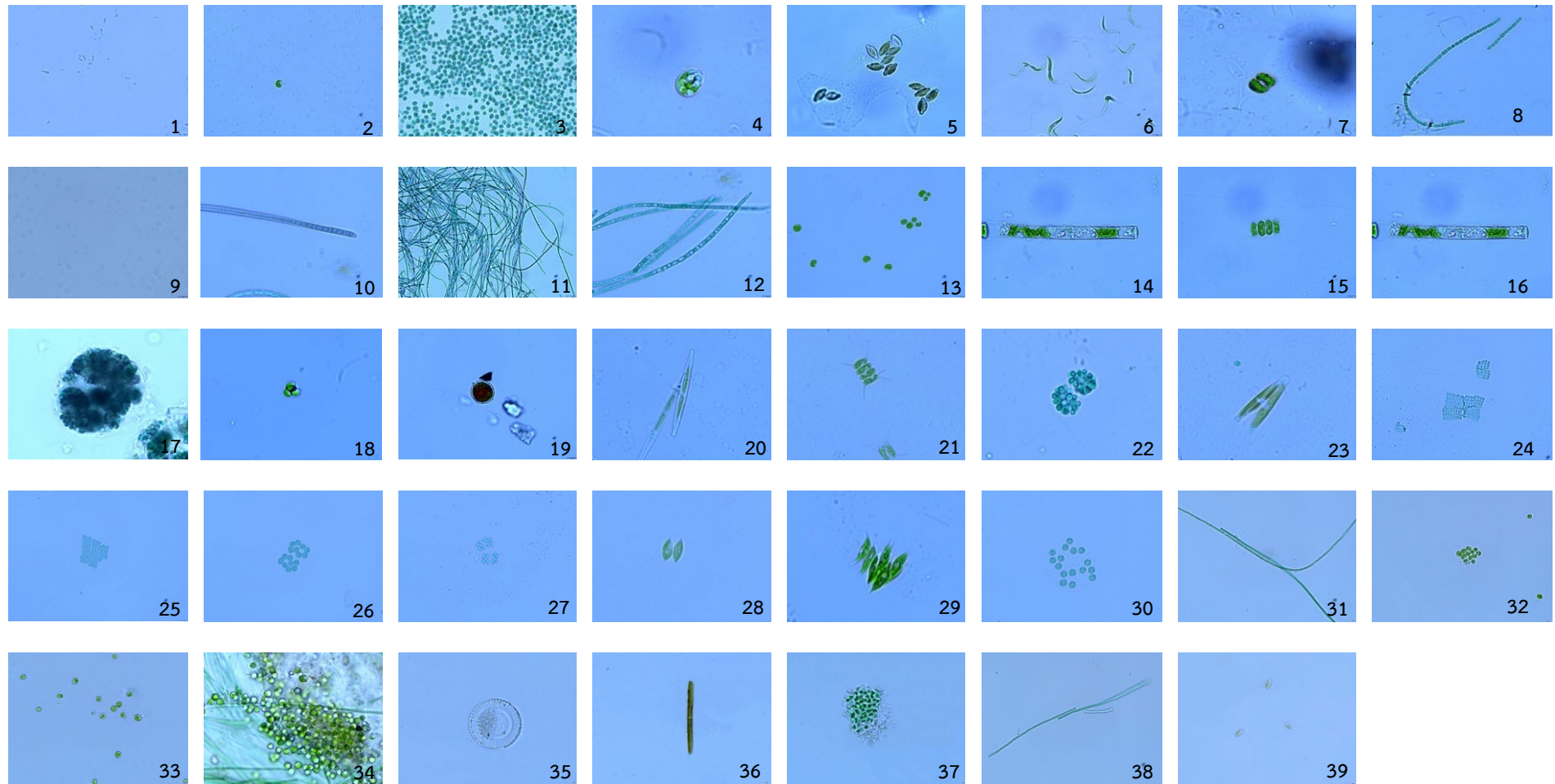


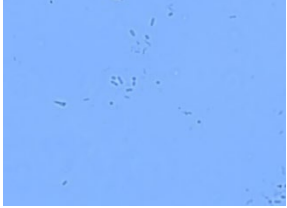
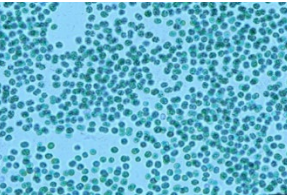
Figure 5 Characteristics of 39 strains microalgae isolated from swine farm and landfills. (1) *Synechococcus* sp. (2) *Chlorella* sp. (3) *Microcystis aeruginosa* (4) *Chlamydomonas* sp. (5) *Navicula* sp. (6) *Monoraphidium* sp. (7) *Didymocystis* sp. (8) *Pseudanabaena* sp. (9) *Synechocystis* sp. (10) *Oscillatoria* sp. (11) *Plectonema* sp. (12) *Raphidiopsis* sp. (13) *Tetrachlorella* sp. (14) *Scytonema* sp. (15) *Scenedesmus* sp. (16) *Oedogonium* sp. (17) *Gloeocapsa* sp. (18) *Coelastrella* sp. (19) *Haematococcus* sp. (20) *Nitzschia* sp. (21) *Scenedesmus* spp. (22) *Chlorogloeopsis fritschii* (23) *Navicula* spp. (24) *Merismopidia* spp. (25) *Merismopidia* sp. (26) *Coelomorion* sp. (27) *Crucigenia* sp. (28) *Acutodesmus*

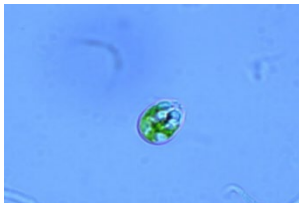
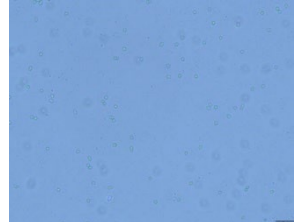
sp. (29) *Acutodesmus* spp. (30) *Microcystis* sp. (31) *Geitlerinema* sp. (32) *Chlorokybus* sp. (33) *Bracteacoccus* sp. (34) *Chlorococcum* sp. (35) *Cyclotella* sp. (36) *Bacillaria* sp. (37) *Aphanocapsa* sp. (38) *Pseudanabaena limnetica* และ (39) *Pseudococcomyxa* sp.

การเก็บตัวอย่างสาหร่ายขนาดเล็กจากฟาร์มหมูและบ่อฝังกลบขยะ อบจ. นนทบุรี พบความหลากหลายของสายพันธุ์สาหร่ายถึง 39 ไอโซเลท (แสดงดังรูปที่ 5) ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่สำรวจเจอในบริเวณที่มีการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยขั้นตอนการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์มีแนวทางและหลักการในการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายที่มีศักยภาพเพื่อนำไปศึกษาต่อแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ใหญ่ๆ (แสดงดังรูปในตารางที่ 2)

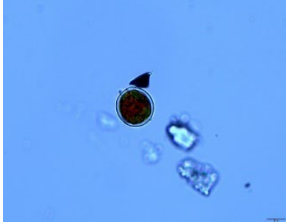
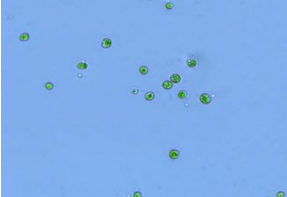
1. ประโยชน์ในการผลิตเป็นอาหารสุภาพและเวชสำอาง ได้แก่ สาหร่ายที่มีศักยภาพในการผลิตสารสีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ รวมทั้งเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำด้านสิ่งแวดล้อม
2. ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน
3. ประโยชน์เพื่อผลิตโพลิเมอร์และพลาสติกชีวภาพ

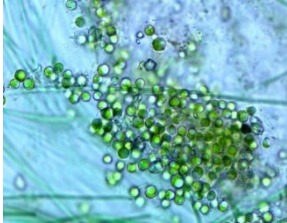
Table 2 Characteristics, properties, and potential uses of microalgae isolated from swine farms and landfills.

No.	Microalgae strains	Selection criteria			Properties and applications
		1	2	3	
1	<i>Synechococcus</i> sp. 	✓	✓		สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน พบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เปลี่ยน CO ₂ เป็นมวลชีวภาพ (biomass) (Włodarczyk et al., 2020) สามารถทนต่อสภาวะกำมะถันที่ทำปฏิกิริยา (Reactive sulfur species) เช่น ซัลไฟด์และซัลเฟนซัลเฟอร์ สามารถใช้ Peroxiredoxin (เอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ) เพื่อลด Sulfane sulfur ได้ (Liu et al., 2022) และยิ่งไปกว่านั้น ได้มีการศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์จาก <i>Synechococcus</i> sp. ในการผลิตเป็นพลังงานพร้อมใช้เช่น แบตเตอรี่ (Bombelli et al., 2022)
2	<i>Chlorella</i> sp. 	✓	✓		สาหร่ายสีเขียว พบในน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำเสีย มีโปรตีนสูง มีไขมันสูง มีความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของ CO ₂ (แหล่งคาร์บอน) และอุณหภูมิที่สูง สามารถผลิตมวลชีวภาพและไขมันสูง (High biomass and lipid production) เพื่อผลิตไบโอดีเซล (Chi et al., 2019) ผลิตไบโอไฮเทน (bio-hythane production) (Lunprom et al., 2019) ผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production) (Giang et al., 2019) และผลิตไบโอเอทานอล (bio-ethanol production) (Ngamsirisomsakul et al., 2019) กำจัดสารก่อมลพิษ (Pollutant removal) ได้แก่ Total nitrogen Total phosphate และโลหะหนักได้แก่ Cr (Santhosh et al., 2020) บำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเครื่องหนัง (bioremediation) (Kandasamy et al., 2021)
3	<i>Microcystis aeruginosa</i> 	✓			สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เป็นสาหร่ายที่สร้างสารพิษสามารถพบได้พบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งในน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย โดยจะผลิตสารกลุ่ม Microcystin คือสารพิษในกลุ่มที่มีพิษต่อตับ (สารพิษไมโครซิสตินมีคุณสมบัติเป็นสารส่งเสริมการเกิดมะเร็ง (tumor promotor) กลไก ความเป็นพิษต่อตับของไมโครซิสตินเกิดขึ้นเมื่อสารพิษถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดโดยมี Bile salt เป็นตัวพาเข้าสู่เซลล์ตับ มีผลให้เซลล์ตับเหี่ยวลง เซลล์ตับปกติที่เคยอยู่ติดกันจะแยกออกจากกันและยังทำให้เซลล์บุหลอดเลือดฝอยที่เข้าสู่ตับแยกตามไปด้วย ผลคือเลือดซึมออกมาที่เนื้อเยื่อตับและอาจ ส่งผลให้เกิดภาวะการช็อกได้ การได้รับไมโครซิสตินในปริมาณสูง สามารถก่อให้เกิดภาวะตับอักเสบได้ (นพรัตน์, 2556)

No.	Microalgae strains	Selection criteria			Properties and applications
		1	2	3	
4	<i>Chlamydomonas sp.</i> 	✓	✓		สาหร่ายสีเขียว ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater remediation) (Behl et al., 2020) เช่น ดูดซับสีย้อมจากผ้าทอที่ปนเปื้อนในน้ำ บำบัดน้ำเสีย ที่ปนเปื้อนด้วย NH_4^+ -N จากโรงงานผลิตธาตุหายาก (rare earth elements, REEs) น้ำเสียจากฟาร์มหมู (Zhou et al., 2023) และเป็นตัวดูดซับของแข็งที่ละลายในน้ำ ได้แก่ โครเมียม (Cr(VI)-DS) (Ayele et al., 2021) ผลิตไฟฟ้าชีวภาพ (Bioelectricity generation) (Nadzri et al., 2023) สามารถตรึง CO_2 (CO_2 fixation) และผลิตไขมันเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil production) (Mondal et al., 2016) นอกจากนี้ยังสามารถผลิตลูทีน (Lutein production) เป็นรงควัตถุหรือ สารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) มีส่วนช่วยบำรุงสุขภาพดวงตาและป้องกันโรคตาบางชนิด (Ma et al., 2019)
5	<i>Monoraphidium sp.</i> 	✓	✓		สาหร่ายสีเขียว สามารถตรึง CO_2 (CO_2 fixation) ผลิต Lipid เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil production) และไบโอดีเซล (Biodiesel production) (Namitha et al., 2021) ใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงไรแดง สามารถทนต่อ COD ได้สูงถึง 2,000 มก./ลิตร (Boonma et al., 2015) มีการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมัน และยังสามารถผลิตสารพิษจากพืช (Phytochemicals) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบเฉพาะในพืช ได้แก่ Chloroacetic acid และ 2, 4- di tert butylphenol มีฤทธิ์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในพืช (Phytopathogens) มีงานวิจัยการนำสารดังกล่าวไปผลิตสารกำจัดศัตรูพืชทางชีวภาพทดแทนสารกำจัดศัตรูพืชสังเคราะห์ ซึ่งสามารถยับยั้งเชื้อ Xanthomonas oryzae และ Pantoea agglomerans ที่ก่อโรคในข้าวได้ (Mohanty et al., 2023)
6	<i>Synechocystis sp.</i> 	✓			สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน พบได้ในน้ำจืด สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel production) ผลิตไกลซีนบีเทน (Glycinebetaine production) ซึ่งใช้เป็นสารเติมแต่ง (Ingredient) ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นสารให้ความชุ่มชื้นในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางเป็นที่รู้จักกันดีในทางการค้าซึ่งมีชื่อเรียกว่า ไตรเมทิลไกลซีน (Trimethylglycine) หรือ TMG นอกจากนี้มีงานวิจัยที่พบว่า ไกลซีนบีเทนจะช่วยลดระดับโฮโมซิสทีน (Homocysteine) ในร่างกาย หากระดับโฮโมซิสทีนในเลือดสูงจะเสี่ยงเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจตีบตันได้ (ฤทัยรัตน์ และ เพ็ชร, 2563)

No.	Microalgae strains	Selection criteria			Properties and applications
		1	2	3	
7	<i>Oscillatoria sp.</i> 	✓			สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ลักษณะเซลล์จะเรียงต่อกันเป็นเส้นสายเดี่ยว พบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเครื่องหนัง (bioremediation) พบว่าสามารถย่อยสลายโครเมียมและแมกนีเซียมได้ 60-80% ของโลหะทั้ง 2 ชนิด (Santhosh et al., 2020) สามารถผลิต Biobutanol สามารถสังเคราะห์ Silver nanoparticles (Biosynthesis) (Adebayo-Tayo et al., 2019) ผลิต Fatty acid, amino acid derivative, indolizine derivative, ether derivative, cinchoninic acid, phenol, pyridine derivative, benzyl alcohol derivative and triazine derivative (Bioactive compounds) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านแบคทีเรียต่อแบคทีเรียก่อโรคแกรมบวกชนิดต่างๆ (<i>S. aureus</i> และ <i>B. subtilis</i>) และแกรมลบ (<i>P. aeruginosa</i> และ <i>E. coli</i>) (Bhuyar et al., 2020) และสามารถผลิต Phycobiliprotein Accumulation (ไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliproteins, PBPs) คือรงควัตถุรอง (Accessory pigment) ที่พบในไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายสีแดงหลายชนิด ทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงที่คลอโรฟิลล์ดูดกลืนไม่ได้ เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีและนำไปใช้ในการสร้างอาหารภายในเซลล์ ปัจจุบัน PBPs ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารสีในอาหาร เครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เครื่องสำอาง รวมถึงใช้เป็นสารออกฤทธิ์เภสัชกรรมเนื่องจากมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ยับยั้งการเจริญของเชื้อไวรัส ป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระ เสริมสร้างการทำงานของเซลล์ตับและเซลล์ประสาท (Zuorro et al., 2021)
8	<i>Scenedesmus sp.</i> 	✓	✓	✓	สาหร่ายสีเขียว มีโปรตีนและไขมันสูง ตรึง CO₂ (CO₂ fixation) ผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil production) (Boonma et al., 2015) ผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและโภชนาเภสัช (Biological active compounds and nutraceuticals) เช่น alkaloids, flavonoids, glycosides, phenols, lignin's, saponins, sterols, tannins, anthraquinone และ reducing sugar ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านเบาหวาน สารต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ และฤทธิ์ต้านจุลชีพ ซึ่งพบว่าสามารถฤทธิ์สามารถต้านแบคทีเรียได้แก่ <i>E.coli</i>, <i>S. typhi</i>, <i>C. perfringens</i> และ <i>B. subtilis</i> และราได้แก่ <i>A. niger</i> และ <i>C. albicans</i> ได้ (Patil et al., 2019) และยังสามารถกำจัดสารก่อมลพิษ (pollutant removal) ที่ปนเปื้อน ได้แก่ NH₄⁺, NH₃, N, P, และ PO₄³⁻ โลหะหนักได้แก่ Cr, Cu, Pb และ Zn และยังสามารถใช้เป็นตัวดูดซับผลิตพลาสติกชีวภาพ (Bio-plastic) โดยใช้ biomass ผสมกับ plasticizer (สารเติมแต่งที่ใส่ไปในกระบวนการผลิตพลาสติก) ให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปขึ้นรูป เพื่อให้มีคุณสมบัติการทนต่อความร้อน การดูดซับน้ำและแรงดึง (Kandasamy et al., 2021)

No.	Microalgae strains	Selection criteria			Properties and applications
		1	2	3	
9	<i>Haematococcus sp.</i> 	✓			<i>Haematococcus</i> เป็นสกุลของสาหร่ายในวงศ์ <i>Haematococcaceae</i> สมาชิกของกลุ่มนี้เป็นสาเหตุทั่วไปของสีชมพูที่พบในอ่างน้ำนก ฮีมาโตคอคคัสชนิดที่โดดเด่นที่สุดชนิดหนึ่งคือ <i>H. pluvialis</i> ซึ่งใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางเนื่องจากการผลิตแอสตาแซนธิน ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะความเครียด สามารถผลิตแอสตาแซนธิน (Astaxanthin production) (Cheirsilp et al., 2020) ซึ่งเป็นสารประเภทแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) จากธรรมชาติ ที่มีคุณสมบัติช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ ผลิตสารสี ได้แก่ แคโรทีนอยด์ และคลอโรฟิลล์ ผลิตไขมัน (Lipid production) และผลิตโปรตีน (Protein production) (Yap et al., 2022)
10	<i>Acutodesmus sp.</i> 	✓	✓		สาหร่ายสีเขียว เป็น Taxonomically accepted species of Scenedesmus มี acute cell poles มีโปรตีนสูง (>40%) สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนสูงได้ สามารถตรึง CO ₂ (CO ₂ Fixation) และผลิตไขมันเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil Production) ไปพร้อมกัน สามารถผลิตสารสี (Pigment) ได้แก่ ลูทีน (Lutein) (Zhu et al., 2022), แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) (Grama et al., 2014) และใช้ในการบำบัดของเสีย (Kim et al., 2019)
11	<i>Bracteacoccus sp.</i> 	✓	✓		สาหร่ายสีเขียว ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการเป็นตัวกำจัดทางชีวภาพ (Bioremoval) สามารถกำจัด Methylene Blue ที่ละลายอยู่ในน้ำ (Al-Fawwaz et al., 2023) สามารถผลิต Biomass, carotenoids และ lipids ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล และการใช้ประโยชน์ในการเป็นบ่งชี้ทางชีวภาพ (Bioindication) และการทดสอบทางชีวภาพสำหรับความเป็นพิษของโลหะหนัก (Biotesting of toxicity of heavy metals) ได้แก่ Zn และ Mn (Maltsev et al., 2021)

No.	Microalgae strains	Selection criteria			Properties and applications
		1	2	3	
12	<i>Chlorococcum sp.</i> 	✓	✓		เป็นสาหร่ายสีเขียว อยู่ในวงศ์ Chlorococcaceae สามารถตกตะกอนไขมันในน้ำเสียได้ สามารถผลิตไขมันเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล ผลิตไขมันที่สามารถออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive Lipids) ได้แก่ Sulfoquinovosyl diacylglycerols (SQDG), HexCer-t36:2 (t18:1/18:1 and 18:2/18:0) cerebrosides with a phytosphingosine (4-hydrosphinganine) base, phosphatidylcholine (PC) และ phosphatidylethanolamine (PE) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านการอักเสบและต้านการเกิดลิ่มเลือด (Anti-Inflammatory and Anti-Thrombotic Activities) (Shiels et al., 2021) และสามารถผลิตกิจกรรมเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant enzyme activities) ซึ่งได้แก่ Malondialdehyde (MDA), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) และ catalase (CAT) โดยการกระตุ้นด้วย Cu^{2+} หรือ Cd^{2+} ที่มีความเข้มข้นต่างกัน (Qiu et al., 2022)
13	<i>Pseudococcomyxa sp</i> 	✓			ผลิตสาร Mycosporine-like amino acids (MAAs) กรดอะมิโนคล้ายมัยโคสปอรินเป็นสารทุติยภูมิขนาดเล็กที่ผลิตโดยสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีแสงแดดส่องถึงปริมาณมาก เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งสารที่ถูกสร้างนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาที่ได้รับแสง (Photoperiod) ความเข้มแสง (Light intensity) ช่วงคลื่นแสง (Wavelength) อุณหภูมิ (Temperature) สารอาหารที่ใช้เลี้ยง (Nutrients) ถังหมัก (Bioreactors) และระยะของการเจริญเติบโตเมื่อเก็บเกี่ยว ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายขนาดเล็กทั้งสิ้นทำให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สกัดจากสาหร่ายมีคุณสมบัติและประโยชน์ที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ครีมนันแดด สารให้ความชุ่มชื้น สารเพิ่มความขาว ต้านการอักเสบ (Antiinflammatory) สารเพิ่มความหนา (Thickening) และสารทำให้ไวต่อการกระตุ้นอาการแพ้ทางผิวหนัง (Skin sensitizer) (Karsten et al., 2005)

4 สรุป

การแยกสาหร่ายจากฟาร์มสุกรและบ่อฝึกลบขยะ สาหร่ายขนาดเล็ก 39 Isolate เมื่อทำการวิเคราะห์และระบุได้สายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่มีศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดเชิงธุรกิจ จากฟาร์มเลี้ยงสุกรพบว่ามี 10 Isolate ได้แก่ *Monoraphidium* sp. *Scenedesmus* sp. *Chlorella* sp. *Synechococcus* sp. *Chlamydomonas* sp. *Synechocystis* sp. *Haematococcus* sp. *Oscillatoria* sp. *Microcystis aeruginosa* และ *Acutodesmus* sp. และจากหลุมฝึกลบขยะขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรีพบว่ามี 3 Isolate ได้แก่ *Bracteacoccus* sp. *Chlorococum* sp. และ *Pseudococcomyxa* sp. ซึ่งจะนำไปทำการศึกษาวิจัยต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนโครงการวิจัย ขอบคุณฟาร์มสุกรคุณบรรพต อเนกสุวรรณกุลและองค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ที่อนุเคราะห์ให้เข้าพื้นที่และเก็บตัวอย่างมาทำการวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

ครรชิต เงินคำคง, นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์, สิทธิศักดิ์ แก้วหนัก, ฤชณฉัตร เมืองใจ, นิตยา ต้นติ้ว, นันทน์ภัส มโนนนท์, พิสิฐ ศรีสุริยจันทร์. 2559. ประสิทธิภาพของสาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8432 ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 1(1), 51-58.

ชนมน จันทนา, สุวรรณ หอมพล. 2559. การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพจากมูลโคด้วยวิธีดักจับด้วยน้ำที่ความดันต่ำ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1), 51-60.

นพรัตน์ สิทธิวงศ์. 2556. การติดตามตรวจสอบสาหร่ายที่สร้างสารพิษสีเขียวแกมน้ำเงินและสารพิษไมโครซิสตินในหนองหาร จังหวัดสกลนคร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ฤทัยรัตน์ สุทธิสุวรรณ, เพ็ชร สุธิภรณ์. 2564. การหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไกลซีนบีเทนภายใต้ความเครียดจากเกลือโดยไซยาโนแบคทีเรียชนิดเซลล์เดี่ยว

Synechococcus sp. MH 393765. วารสารวิจัยมทร. กรุงเทพฯ 15(1), 110-121.

Adebayo-Tayo, B., Salaam, A., Ajibade, A. 2019. Green synthesis of silver nanoparticle using *Oscillatoria* sp. extract, its antibacterial, antibiofilm potential and cytotoxicity activity. *Heliyon* 5(10), e02502.

Ayele, A., Suresh, A., Benor, S., Konwarh, R. 2021. Optimization of chromium (VI) removal by indigenous microalga (*Chlamydomonas* sp.) - based biosorbent using response surface methodology. *Water Environment Research* 93(8), 1276-1288.

Behl, K., Sessa Charan, P., Joshi, M., Sharma, M., Mathur, A., Kareya, M. S., Nigam, S. 2020. Multifaceted applications of isolated microalgae *Chlamydomonas* sp. TRC-1 in wastewater remediation, lipid production and bioelectricity generation. *Bioresource technology* 304, 122993.

Bhuyar, P., Rahim, M. H. A., Maniam, G. P., Ramaraj, R., Govindan, N. 2020. Exploration of bioactive compounds and antibacterial activity of marine blue-green microalgae (*Oscillatoria* sp.) isolated from coastal region of west Malaysia. *SN Applied Sciences* 2, 1-10.

Bombelli, P., Savanth, A., Scarampi, A., Rowden, S. J., Green, D. H., Erbe, A., Howe, C. J. 2022. Powering a microprocessor by photosynthesis. *Energy and Environmental Science* 15(6), 2529-2536.

Boonma, S., Chaiklangmuang, S., Chaiwongsar, S., Pekkoh, J., Pumas, C., Ungsethaphand, T., Peerapornpisal, Y. 2015. Enhanced carbon dioxide fixation and bio-oil production of a microalgal consortium. *CLEAN-Soil, Air, Water* 43(5), 761-766.

Bose, A., Lin, R., Rajendran, K., O'Shea, R., Xia, A., Murphy, J.D. 2019. How to optimise photosynthetic biogas upgrading: a perspective on system design and microalgae selection. *Biotechnology advances* 37(8), p.107444.

Cheirsilp, B., Wantip, K., Chai-issarapap, N., Maneechote, W., Pekkoh, J., Duangjan, K., Srinuanpan, S. 2022.

- Enhanced production of astaxanthin and co-bioproducts from microalga *Haematococcus* sp. integrated with valorization of industrial wastewater under two-stage LED light illumination strategy. *Environmental Technology and Innovation* 28, 102620.
- Chi, N. T. L., Duc, P. A., Mathimani, T., Pugazhendhi, A. 2019. Evaluating the potential of green alga *Chlorella* sp. for high biomass and lipid production in biodiesel viewpoint. *Biocatalysis and agricultural biotechnology* 17, 184-188.
- Giang, T. T., Lunprom, S., Liao, Q., Reungsang, A., Salakkam, A. 2019. Enhancing hydrogen production from *Chlorella* sp. biomass by pre-hydrolysis with simultaneous saccharification and fermentation (PSSF). *Energies* 12(5), 908.
- Grama, B. S., Chader, S., Khelifi, D., Stenuit, B., Jeffryes, C., Agathos, S. N. 2014. Characterization of fatty acid and carotenoid production in an *Acutodesmus* microalga isolated from the Algerian Sahara. *biomass and bioenergy* 69, 265-275.
- Hellebust, J. A. 1985. Mechanisms of response to salinity in halotolerant microalgae. *Biosalinity in Action: Bioproduction with Saline Water* 89, 69-81.
- Hunt, A.J., Sin, E.H., Marriott, R., Clark, J.H. 2010. Generation, capture, and utilization of industrial carbon dioxide. *ChemSusChem* 3(3), 306-322.
- Kandasamy, S., Narayanan, M., He, Z., Liu, G., Ramakrishnan, M., Thangavel, P., Carvalho, I. S. 2021. Current strategies and prospects in algae for remediation and biofuels: An overview. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 35, 102045.
- Kim, D. G., Lee, C., Yun, Y. S., Hong, C. H., Choi, Y. E. 2019. Recycling waste nutrient solution originating from the plant factory with the cultivation of newly isolated *Acutodesmus* species. *Journal of biotechnology* 289, 15-25.
- Kita, J., Ohsumi, T. 2004. Perspectives on biological research for CO₂ ocean sequestration. *Journal of oceanography* 60(4), 695-703.
- Kittel, J., Idem, R., Gelowitz, D., Tontiwachwuthikul, P., Parrain, G. Bonneau, A. 2009. Corrosion in MEA units for CO₂ capture: pilot plant studies. *Energy Procedia* 1(1), 791-797.
- Kovscek, A.R. Cakici, M.D. 2005. Geologic storage of carbon dioxide and enhanced oil recovery. II. Cooptimization of storage and recovery. *Energy conversion and Management* 46(11-12), 1941-1956.
- Li, G., Xiao, P., Webley, P., Zhang, J., Singh, R. Marshall, M. 2008. Capture of CO₂ from high humidity flue gas by vacuum swing adsorption with zeolite 13X. *Adsorption* 14(2-3), 415-422.
- Lin, Y., Kong, C., Zhang, Q., Chen, L. 2017. Metal-organic frameworks for carbon dioxide capture and methane storage. *Advanced Energy Materials* 7(4), 1601296.
- Liu, D., Chen, J., Wang, Y., Meng, Y., Li, Y., Huang, R. Liu, J. 2022. *Synechococcus* sp. PCC7002 Uses Peroxiredoxin to Cope with Reactive Sulfur Species Stress. *Mbio* 13(4), e01039-22.
- Lunprom, S., Phanduang, O., Salakkam, A., Liao, Q., Imai, T., Reungsang, A. 2019. Bio-hythane production from residual biomass of *Chlorella* sp. biomass through a two-stage anaerobic digestion. *International Journal of Hydrogen Energy* 44(6), 3339-3346.
- Ma, R., Zhao, X., Xie, Y., Ho, S. H., Chen, J. 2019. Enhancing lutein productivity of *Chlamydomonas* sp. via high-intensity light exposure with corresponding carotenogenic genes expression profiles. *Bioresource technology* 275, 416-420.
- Mohanty, S. S., Mohanty, K. 2023. Production of a wide spectrum biopesticide from *Monoraphidium* sp. KMC4 grown in simulated dairy wastewater. *Bioresource Technology* 374, 128815.
- Mondal, M., Ghosh, A., Sharma, A. S., Tiwari, O. N., Gayen, K., Mandal, M. K., Halder, G. N. 2016. Mixotrophic cultivation of *Chlorella* sp. BTA 9031 and

- Chlamydomonas* sp. BTA 9032 isolated from coal field using various carbon sources for biodiesel production. *Energy Conversion and Management* 124, 297-304.
- Nadzri, N. A. A., Yasin, N. H. M., Bakar, M. H. A., Thanakodi, S., Salehmin, M. N. I., Takriff, M. S., Maeda, T. 2023. Photosynthetic microbial desalination cell (PhMDC) using *Chlamydomonas* sp. (UKM6) and *Scenedesmus* sp. (UKM9) as biocatalysts for electricity production and water treatment. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(31), 11860-11873.
- Namitha, B., Sathish, A., Kumar, P. S., Nithya, K., Sundar, S. 2021. Micro algal biodiesel synthesized from *Monoraphidium* sp., and *Chlorella sorokiniana*: Feasibility and emission parameter studies. *Fuel* 301, 121063.
- Ngamsirisomsakul, M., Reungsang, A., Liao, Q., Kongkeitkajorn, M. B. 2019. Enhanced bio-ethanol production from *Chlorella* sp. biomass by hydrothermal pretreatment and enzymatic hydrolysis. *Renewable Energy* 141, 482-492.
- Patil, L., Kaliwal, B. B. 2019. Microalga *Scenedesmus bajacalifornicus* BBKLP-07, a new source of bioactive compounds with in vitro pharmacological applications. *Bioprocess and biosystems engineering* 42(6), 979-994.
- Pires, J.C.M., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M. Simões, M. 2011. Recent developments on carbon capture and storage: an overview. *Chemical engineering research and design* 89(9), 1446-1460.
- Rodge, B.B., Andrew, D.E. Eugene, W.R. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol. 23). Washington, DC: American public health association.
- Santhosh, S., Rajalakshmi, A. M., Navaneethakrishnan, M., Jenny Angel, S., Dhandapani, R. 2020. Lab-scale degradation of leather industry effluent and its reduction by *Chlorella* sp. SRD3 and *Oscillatoria* sp. SRD2: a bioremediation approach. *Applied Water Science* 10(5), 1-11.
- Scholes, C.A., Kentish, S.E. Stevens, G.W. 2009. The effect of condensable minor components on the gas separation performance of polymeric membranes for carbon dioxide capture. *Energy Procedia* 1(1), 311-317.
- Tippayawong, N. Thanompongchart, P. 2010. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy* 35(12), 4531-4535.
- Tuinier, M.J., van Sint Annaland, M., Kramer, G.J. Kuipers, J.A.M. 2010. Cryogenic CO₂ capture using dynamically operated packed beds. *Chemical Engineering Science* 65(1), 114-119.
- Williamson, P., Wallace, D.W., Law, C.S., Boyd, P.W., Collos, Y., Croot, P., Denman, K., Riebesell, U., Takeda, S. Vivian, C. 2012. Ocean fertilization for geoengineering: a review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Safety and Environmental Protection* 90(6), 475-488.
- Włodarczyk, A., Selão, T. T., Norling, B., Nixon, P. J. 2020. Newly discovered *Synechococcus* sp. PCC 11901 is a robust cyanobacterial strain for high biomass production. *Communications Biology* 3(1), 215.
- Xiao, Y., Yuan, H., Pang, Y., Chen, S., Zhu, B., Zou, D., Ma, J., Yu, L. Li, X. 2014. CO₂ removal from biogas by water washing system. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 22 (8), 950-953.
- Yap, S. M., Lan, J. C. W., Kee, P. E., Ng, H. S., Yim, H. S. 2022. Enhancement of protein production using synthetic brewery wastewater by *Haematococcus pluvialis*. *Journal of Biotechnology* 350, 1-10.
- Zhou, K., Chaemchuen, S. Verpoort, F. 2017. Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO₂ capture. *Renewable and sustainable energy reviews* 79, 1414-1441.

- Zhou, Y., He, Y., Guo, X., Dai, J., Lai, X., Hong, B., Wang, M. 2023. Pilot-scale remediation of rare earth elements ammonium wastewater by *Chlamydomonas* sp. YC in summer under outdoor conditions. *Bioresource Technology* 372, 128674.
- Zhu, L., Gao, H., Li, L., Zhang, Y., Zhao, Y., Yu, X. 2022. Promoting lutein production from the novel alga *Acutodesmus* sp. by melatonin induction. *Bioresource Technology* 362, 127818.
- Zuorro, A., Leal-Jerez, A. G., Morales-Rivas, L. K., Mogollón-Londoño, S. O., Sanchez-Galvis, E. M., García-Martínez, J. B., Barajas-Solano, A. F. 2021. Enhancement of Phycobiliprotein Accumulation in Thermotolerant *Oscillatoria* sp. through Media Optimization. *ACS omega* 6(16), 10527-10536.
- Al-Fawwaz, A. T., Al Shra'ah, A., Elhaddad, E. 2023. Bioremoval of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Green Algae (*Bracteacoccus* sp.) Isolated from North Jordan: Optimization, Kinetic, and Isotherm Studies. *Sustainability* 15(1), 842.
- Maltsev, Y., Maltseva, A., Maltseva, S. 2021. Differential Zn and Mn sensitivity of microalgae species from genera *Bracteacoccus* and *Lobosphaera*. *Environmental Science and Pollution Research* 28(40), 57412-57423.
- Shiels, K., Tsoupras, A., Lordan, R., Nasopoulou, C., Zabetakis, I., Murray, P., Saha, S. K. 2021. Bioactive lipids of marine microalga *Chlorococcum* sp. SABC 012504 with anti-inflammatory and anti-thrombotic activities. *Marine drugs* 19(1), 28.
- Qiu, C., Wang, W., Zhang, Y., Zhou, G. J., Bi, Y. 2022. Response of antioxidant enzyme activities of the green microalga *Chlorococcum* sp. AZHB to Cu²⁺ and Cd²⁺ stress. *Sustainability* 14(16), 10320.
- Karsten, U., Friedl, T., Schumann, R., Hoyer, K., Lembecke, S. 2005. Mycosporine-like amino acids and phylogenies in green algae: prasiola and its relatives from the *trebouxiophyceae* (chlorophyta) 1. *Journal of Phycology* 41(3), 557-566.