

การปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน

A Water Treatment Process by Electrocoagulation

บรรดาด เจริญศิริ^{1*}, กรกต วัฒนัสัจจานุกุล², ศราวุธ กระสาย³

จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร⁴, กนกพงษ์ ศรีเที่ยง⁵, วิเชษฐ์ ทิพย์ประเสริฐ⁶ และ นพพร พัชรประภิติ⁷

Bandan Charoensiri^{1*}, Korakot Wattanasatlanukul², Sarawoot Krasai³

Jirapatpong Senabut⁴, Kanokpong Sritieng⁵, Wichet Tippasert⁶ and Nopporn Patcharaprakiti⁷

1,2,3,6,7 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

4,5 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

1,2,3,6,7 Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai

4,5 Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai

*Corresponding author e-mail: Bandan_ch37@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอ การบำบัดและปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้อุปโภค จาก อ่างเก็บน้ำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล เชียงราย ซึ่งน้ำที่ส่งใช้ระบบบำบัดดั้งเดิมที่ผ่านการบำบัดแล้ว ยังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง เนื่องจากระยะเวลาในการบำบัดไม่เพียงพอ โดยเทคนิคที่นำเสนอประกอบด้วย กระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า อิเล็กโทรโคแอกูเลชัน โดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด จะใช้เป็นแผ่นอลูมิเนียม เพื่อลดค่า BOD และสารแขวนลอย โดยน้ำที่นำมาบำบัดนำมาจาก อ่างเก็บน้ำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล เชียงราย ซึ่งได้นำมาทดสอบบำบัดระบบดังกล่าวและทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน, ความเป็นกรดต่าง, สภาพความนำไฟฟ้า, Total Dissolved Solid(TDS), Dissolved Oxygen(DO), Biochemical Oxygen Demand(BOD) และอุณหภูมิ ผลการทดลอง พบว่า น้ำที่ผ่านกระบวนการวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน มีค่า DO สูงขึ้น ค่า BOD, TDS ลดลง และน้ำที่ได้มีสีที่ใสขึ้น

คำสำคัญ: น้ำเสีย, อิเล็กโทรโคแอกูเลชัน

Abstract

This paper proposes technique of water treatment by using electro-coagulation Method. This system is composed of electric DC Source 200 V 30 A connect to the Anode and Cathode Terminal. The sample water from reservoir in Rajamangala University of Technology Chiang Rai Campus is flow into the system in order to improve quality. The water treatment experimental has implemented and parameter of electro-coagulation and water quality parameter are collected such as electric voltage, electric current, pressure, pH, conditions Conductivity, Total Dissolved. Solid (TDS), Dissolved Oxygen (DO), Biochemical Oxygen Demand (BOD) and temperature. The result found that the water quality has improved such DO higher and BOD, TDS, SS is reduced and more clearness water is received.

Keywords: Wastewater, Electro-coagulation

บทนำ

จากการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงราย เป็นอ่างเก็บน้ำใช้สำหรับอุปโภค ภายใน มหาวิทยาลัย ในการนำน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมาผ่านกระบวนการผลิตเป็นน้ำประปา ซึ่งมีการใช้เครื่องปั้มน้ำจำนวน 3 ตัว ขนาดมอเตอร์ 3 เฟส 380/660V 7.5/10Kw ใช้งานประมาณ 15 ชั่วโมง/วัน ซึ่งจะเสียค่าใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก แต่เนื่องจากการผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัย เป็นระบบถังหมักเพื่อตกตะกอน เติมสาร และ บ่อเติมอากาศ จำเป็นต้องใช้เวลาและพื้นที่จำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและนำการบำบัด น้ำโดยวิธีอีเล็กโทรโคแอกกูเลชัน มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากวิธีการบำบัดน้ำด้วยอีเล็กโทรโคแอกกูเลชัน เป็นวิธีที่ใช้พื้นที่น้อยและระยะเวลาในการบำบัดน้อย และยังสามารถทำให้ตะกอนลอยขึ้นสู่น้ำได้เร็วกว่าเพื่อลดค่าใช้จ่ายสารเคมี สามารถแยก ตะกอนแล้วกำจัดสารแขวนลอยได้หลายชนิด เช่น ไขมัน, โปรตีน, โลหะหนักชนิดต่างๆ, สารแขวนลอยชนิดต่างๆ, เชื้อโรค, แบคทีเรียหรือไวรัส โดยไม่ต้องใช้สารเคมี

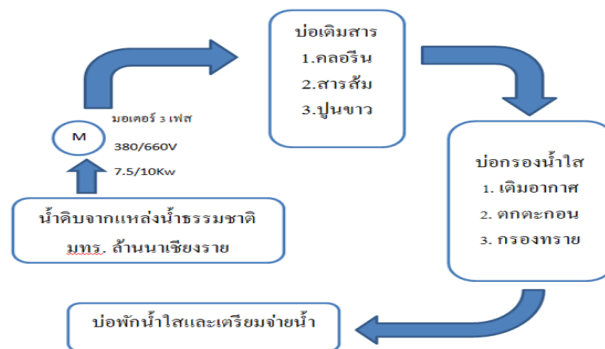
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงน้ำด้วยวิธีการอีเล็กโทรโคแอกกูเลชัน
2. เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบปรับปรุงน้ำและหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุง

ทฤษฎีและหลักการทํางาน

1. ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ (การประปาส่วนภูมิภาค , 2550)

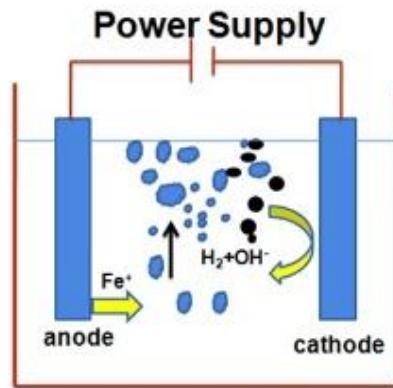
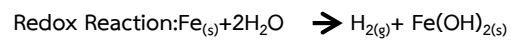
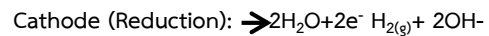
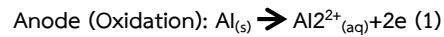
น้ำดิบที่ผ่านการตรวจสอบ จะถูกสูบเข้าสู่ถังเก็บน้ำดิบและจะถูกผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาวตามสัดส่วนที่ตรวจสอบได้เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ น้ำที่มีความขุ่นมากจะใช้สารละลายสารส้มช่วยให้มีการตกตะกอน ได้ดียิ่งขึ้นและใช้สารละลายปูนขาว ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำซึ่งมีมากในฤดูฝน บางครั้งจะมีการเติมคลอรีนเพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นต้นนี้ก่อน น้ำดิบที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอนต่อไป



ภาพที่ 1 ระบบประปาของ มทร. ล้านนาเชียงราย

2. หลักการทำงานของอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน หลักการทำงานของกระบวนการการรวมตะกอนทางไฟฟ้า ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าในถังปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ ขั้วบวก (anode) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ โดยน้ำจะแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ดังแสดงใน สมการที่ 1 เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดกลุ่ม ตะกอนของ

เฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออน ในรูปของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไดออกไซด์ ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ในน้ำเสียและสิ่งสกปรกได้ ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะเกาะติดกับตะกอนและลอยขึ้นสู่น้ำ (Electro floatation) กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันแสดงดังรูปที่ 1



ภาพที่ 2 การแยกตะกอนน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน(สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2551)

โดยความหนาแน่นกระแส J อัตราส่วนของกระแสต่อหนึ่งหน่วย ดัง สมการที่ 2

$$J = I/A \quad (2)$$

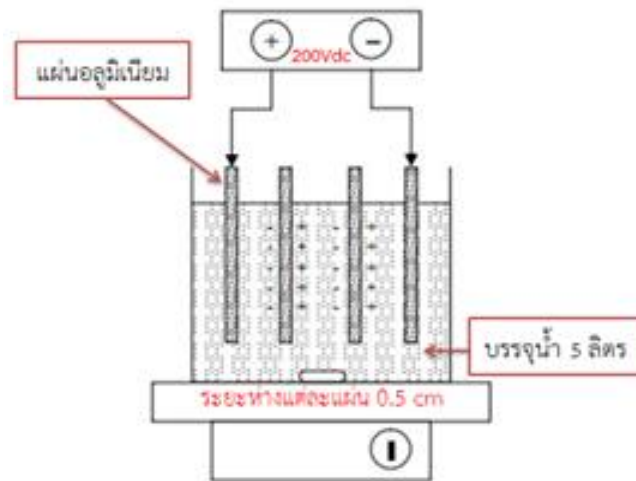
โดย A เป็นพื้นที่หน้าตัด (ตร.ม.) I เป็นกระแส (A) เมื่อใดที่เกิดความต่าง ศักย์ระหว่างขั้วของตัวนำ จะเกิดความหนาแน่นกระแส และสนามไฟฟ้า ตามสมการที่ 3

$$J = \sigma E \quad (3)$$

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า E คือแรงดันไฟฟ้า

3. ลักษณะการต่อขั้วอิเล็กโทรด

การวางขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้า ระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวาง ขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี พาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอน ควรวางขั้วไฟฟ้าใน แนวนอน โดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง



ภาพที่ 3 การชุบขี้เหล็กโทรด (วรวุฒิ ยาวีเลียง และ อรรถชัย ปวงจันทร์)

4. ขี้เหล็กโทรด

อะลูมิเนียม เป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก โดยมีลักษณะเป็นสีขาว น้ำหนักเบา และแข็งแรง แต่ไม่เปราะ จึงสามารถ ทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ อะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับโลหะ ตัวอื่นๆ ได้อย่างรวดเร็ว มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 และ Al+3 อยู่ในน้ำจะ สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิสขึ้นได้ สแตนเลส หรือ เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนัก มีส่วนผสมของของโครเมียม อย่างน้อย 10.5% มีจุดหลอมเหลวสูง และมีค่าน้ำความร้อนระดับปานกลาง

5. การคำนวณหาค่า DO, BOD TDS และ EC

5.1 วิธีโดยตรง หาได้จากสมการที่ 4

$$\text{BOD (mg/L)} = \text{DO0} - \text{DO5} \quad (4)$$

DO0 คือ ค่า DO ของตัวอย่างที่ไตเตรตวันแรก

DO5 คือ ค่าเฉลี่ย DO ของตัวอย่างที่ไตเตรตได้หลังจากเก็บใน incubator 5 วัน

5.2 วิธีทำให้เจือจาง หาได้จากสมการที่ 5

$$\text{BOD (mg/L)} = [(\text{DO0}-\text{DO5})-(\text{B1}-\text{B2})f] \times 100P \quad (5)$$

เมื่อ DO0 คือ ค่า DO ของตัวอย่างที่ไตเตรตได้วันแรก DO5 ค่าเฉลี่ย DO ของตัวอย่างที่ไตเตรตได้หลังจากเก็บใน incubator 5 วัน P คือเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างที่ใช้ (เช่น 5%, 10%) B1 คือค่า DO ของ seed control ที่ทำการเจือจางในวันแรก B2 ค่าเฉลี่ย DO ของ seed control ที่ทำการเจือจางเก็บใน incubator 5 วัน f คืออัตราส่วนน้ำเชื้อ (seed) ใน ตัวอย่างต่อ seed control และ $f = \frac{\% \text{น้ำเชื้อใน DO0}}{100}$

ค่า EC สามารถนำไปคำนวณเป็นค่า TDS ได้จาก สมการด้านล่าง (ค่าโดยประมาณ)

$$\text{TDS (ppm)} = 0.64 \times \text{EC } (\mu\text{S/cm}) = 640 \times \text{EC (dS/m)}$$

โดย dS/m : deciSiemens/m คือ $1 \text{ dS/m} = 1000 \text{ uS/cm}$

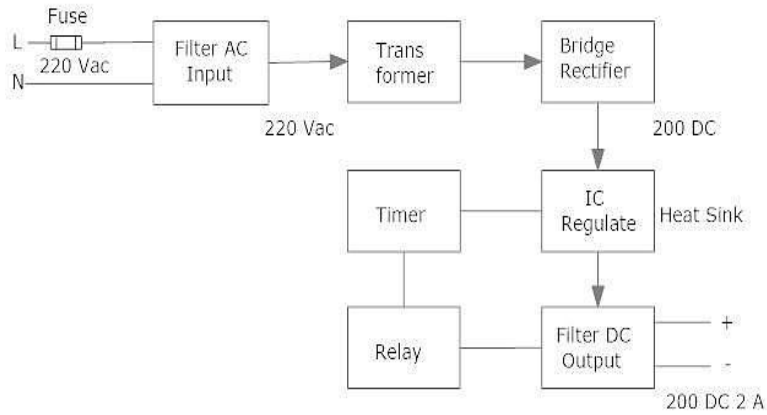
การดำเนินงาน

1. การสลับขั้วไฟฟ้าและสมมติฐานการวิจัย (ณัฐ จันท์ครบ และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี, 2554)

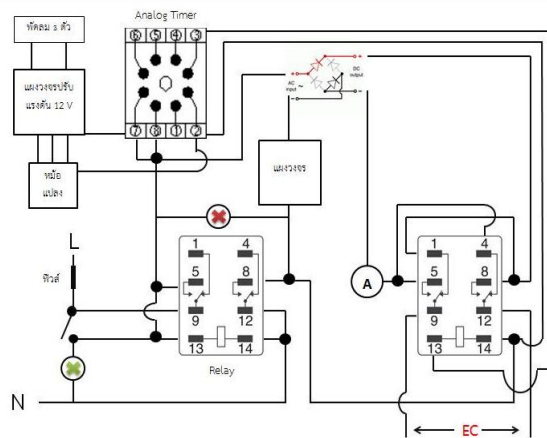
การสลับขั้วไฟฟ้าเพื่อสลับเปลี่ยนการเป็นแคโทด/แอโนด ของอิเล็กโทรดใช้งานอยู่ ผลดังกล่าว

ทำให้อิเล็กโทรดแต่ละตัวมี การจ่ายอิเล็กตรอนเมื่อ เป็นแอโนดและรับอิเล็กตรอนเมื่อเป็น แคโทด สลับกัน ทำให้ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการมี โอกาสสลับขั้วหลุดร่วงออกจากแผ่นอิเล็กโทรดได้

และด้วยแผ่น อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นโลหะต่างชนิด กันการจับตัวยึดติดกันของไฮดรอกไซด์ก็จะน้อยลง ส่งผลต่อการสัดให้หลุดร่วงออกได้ง่ายยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมวงจรไฟสลับขั้ว



ภาพที่ 5 วงจรแหล่งจ่ายให้กับแผ่นอิเล็กโทรด

2. ขั้นตอนการทำการบำบัดน้ำเสีย

นำน้ำที่ได้จากอ่างน้ำของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ล้านนาเชียงราย มาทำการปรับปรุงโดย จะใช้แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 200 Vdc โดยใช้ขั้ว อิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือ แคโทด และ แอโนด ขนาด ของ ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ ขนาดอยู่ที่ 20 cm x 40 cm ขั้วอิเล็กโทรดจะวางสลับกันเริ่มจากขั้วแคโทด

แล้วต่อด้วยขั้วแอโนด สลับกันไป โดยระยะห่าง ระหว่างขั้วแต่ละขั้วมี 0.5 cm. ทำการทดลองกับน้ำ 10 ลิตร ในระหว่างการทดลองจะทำการเก็บค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของน้ำ และ ตัวอย่างน้ำที่ทำกรบำบัด (เก็บตัวอย่างน้ำทุก 10 นาที) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 6 ลักษณะและการวางขั้วอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 7 เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นทำให้เกิดฟองลอยขึ้นมาพร้อมกับตะกอนที่แยกตัวออกจากน้ำ

ทำการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ อุณหภูมิ และ ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด ทุกๆ 10 นาที ในขณะที่ทดลองเมื่อเวลาผ่านไปซักพักในชุด

บำบัดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ทำให้เกิดฟองลอย ขึ้นมาพร้อมกับตะกอนที่แยกตัวออกจากน้ำ



ภาพที่ 8 เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง มีตะกอนจำนวนมากลอยอยู่บนผิวน้ำ

จากภาพที่ 7 และภาพที่ 8 สังเกตได้ว่ามี ตะกอนที่แยกตัวออกจากน้ำเพิ่มขึ้นจำนวนมาก แสดงว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้แรงดันที่ 200Vdc

ใช้บำบัดน้ำเสียได้ดีมากหลังจากบำบัดน้ำที่ผ่านการ บำบัดแล้วมีสีที่ใสขึ้นมาก



ภาพที่ 9 น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีสีที่ใสขึ้นมาก



ภาพที่ 10 ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว เนื่องจาก น้ำก่อนบำบัดและ หลังบำบัด 10-60 นาที

ผลการทดลอง

ผลการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันแรงดันต่ำกระแสตรง 200 Vdc. จากการทดลองพบว่า ได้ค่าต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ หาความแตกต่าง ตามระยะการวางแผ่นเพลท ที่ 0.5cm, 1cm, 1.5cm, และ 2cm. เพื่อจะทดสอบว่าระยะห่างที่เท่าไรจะเหมาะสมกับการบำบัดน้ำและ

การประหยัดการใช้ไฟฟ้ามากที่สุด ในการทดสอบจะใช้เครื่องพารามิเตอร์ต่างๆ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน, ความเป็นกรดต่าง, สภาพความนำไฟฟ้า, Total Dissolved Solid (TDS), Dissolved Oxygen(DO), Biochemical Oxygen Demand (BOD) และ อุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ค่ากระแสไฟฟ้า

ค่า กระแสไฟฟ้า (A)				
ระยะ เวลา (min)	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0	0	0	0	0
10	1.33	0.9	0.6	0.8
20	1.45	0.9	0.6	0.7
30	1.50	0.8	0.5	0.9
40	1.67	1	0.7	0.9
50	1.73	0.8	0.6	0.9
60	1.80	0.9	0.6	1

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ ซึ่งในแต่ละระยะของการวางแผ่นเพลท ก็จะต่างกันออกไป ระยะห่าง 0.5 cm. จะมีกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าระยะอื่นอย่างเห็นได้ชัด เพราะค่าความนำไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าปกติ

จึงทำให้กระแสมากกว่าระยะอื่น ๆ กระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด ถ้ายิ่งใกล้กัน กระแสก็จะสูง ค่าความนำไฟฟ้าก็เป็นค่าที่มีส่วนทำให้กระแสไฟฟ้ามีมากหรือน้อย ยิ่งค่าความนำไฟฟ้ามีมาก ก็จะทำให้กระแสมากขึ้นตาม

ตารางที่ 2 ค่าอุณหภูมิ

ค่า อุณหภูมิ (°C)				
ระยะ เวลา (min)	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0	27	29	30	30
10	31	29	30	31
20	34	29	31	31
30	37	30	30	31
40	41	31	31	31
50	45	31	31	31
60	49	31	31	32

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการบำบัดนาน จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ใช้ อุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับเวลา และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ถ้ากระแสไฟฟ้ามากจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วน

ระยะการวางแผ่นเพลทก็มีส่วนกับอุณหภูมิเช่นกัน ซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจากกระแสที่มีมากหรือน้อยในแต่ละระยะของการวางแผ่นเพลท

ตารางที่ 3 positive potential of the hydrogen ions (pH)

ค่า pH				
ระยะ เวลา (min)	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0	7.2	7.4	7.2	7.3
10	7.3	7.5	7.5	7.4
20	7.4	7.5	7.3	7.5
30	7.5	7.6	7.4	7.5
40	7.5	7.7	7.4	7.6
50	7.5	7.3	7.4	7.6
60	7.6	7.4	7.5	7.5

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่า เวลา และ กระแสไฟฟ้า มีผลต่อค่า pH เมื่อเวลาผ่านไปค่า pH มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในแต่ละระยะจะค่าจะไม่ขึ้น ขึ้น ๆ ลง ๆ ตามเวลาที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการบำบัด

เป็นแบบน้ำไหลผ่านตลอดเวลา จึงทำให้ค่าที่ได้ไม่นิ่งเท่าที่ควร แต่จากการหาข้อมูลแล้วพบว่าค่า pH มาตรฐานจะอยู่ที่ 7 – 7.5 ซึ่งค่าที่ทำการบำบัดออกมา ก็อยู่ในมาตรฐาน

ตารางที่ 4 Electrical Conductivity (EC)

		ค่า EC (mS/cm)			
ระยะเวลา (min)	ระยะ	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0		0.180	0.208	0.204	0.206
10		0.172	0.194	0.198	0.198
20		0.162	0.170	0.188	0.195
30		0.160	0.166	0.170	0.190
40		0.142	0.154	0.192	0.186
50		0.138	0.156	0.188	0.184
60		0.128	0.178	0.186	0.174

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงตามระยะเวลาที่ 0-60 นาที ในระยะที่ 0.5 cm. เป็นระยะที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงได้มากกว่าระยะอื่น ๆ เนื่องจาก ค่า EC ลดลงแสดงว่า

น้ำนั้นมีความบริสุทธิ์มากขึ้นและจากการเปรียบเทียบในแต่ละระยะทำให้ระยะที่ 0.5 cm มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมากที่สุด

ตารางที่ 5 Dissolved Oxygen (DO)

		ค่า DO (mg/L)			
ระยะเวลา (min)	ระยะ	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0		6	6	6	6
10		8	7.2	3	5.3
20		8	8	5.1	3
30		8.2	8.5	5.2	4.6
40		13.3	7	3.7	5
50		13.3	7	6.7	4.2
60		13.5	7	4.8	4.2

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่า ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ DO (ประมาณ 5 -8 mg/L) ในระยะ 0.5 cm. กับ 1 cm อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและระยะที่

0.5 cm จะมีปริมาณออกซิเจนมากกว่าระยะอื่นจึงทำให้ระยะ 0.5 cm ดีที่สุด และระยะที่ 1.5 cm กับ 2 cm อยู่ในเกณฑ์เป็นบ้างในช่วงเวลา

ตารางที่ 6 Biochemical Oxygen Demand (BOD)

ค่า BOD (mg/L)				
ระยะเวลา (min) \ ระยะ	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0	0	0	0	0
10	0	0.7	0	0.3
20	0	2.5	0.6	0
30	0	2.5	0	0.1
40	6.3	0	0	0
50	4.3	2	0.7	0
60	3.5	2	0	0

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่า ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD) ของน้ำหลังจากบำบัดเรียบร้อยแล้ว มีความแตกต่าง

กันเพราะว่าระบบการบำบัดเป็นแบบน้ำผ่านจึงทำให้ค่าที่ได้ออกมาจะไม่เท่ากันแล้วค่า BOD สูงจะทำให้คุณภาพน้ำต่ำ

ตารางที่ 7 ค่า Total Dissolved Solid (TDS)

ค่า TDS (mg/L)				
ระยะเวลา (min) \ ระยะ	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
0	91	103	93	97
10	86	97	92	95
20	73	89	86	88
30	73	87	89	90
40	66	85	95	95
50	65	84	94	93
60	63	90	93	88

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่า ในแต่ละระยะห่างของแผ่นเพลทจาก 0.5 cm. ถึง 2 cm. มีความแตกต่างกัน ค่า TDS ลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในระยะ 0.5 cm. มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุดค่าที่ได้อยู่ในมาตรฐาน ค่ามาตรฐานที่ถูกระบุโดยข้อกำหนดของ สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency -EPA) ระบุว่า ค่าสูงสุดของสิ่งเจือปนในน้ำ หรือ ค่า TDS ไม่

ควรเกิน 500 mg/L หรือ 500 ppm ซึ่งโดยส่วนใหญ่ในระบบน้ำจะมีค่า TDS เกิน 500 mg/L แต่หากค่า TDS เกิน 1000 mg/L จะเป็นน้ำที่ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในชีวิตประจำวัน เพราะค่า TDS ที่สูง จะบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ของสิ่งเจือปนที่อันตราย และต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติม

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบกับมาตรฐาน

พารามิเตอร์	หน่วย	มาตรฐาน	ระบบเดิม	เฉลี่ย EC
pH	-	6.5-8.5	7.4	7.45
EC	(us/cm)	0.24-0.28	0.47	0.18
BOD	(mg/L)	ไม่เกิน 6	5	1.86
DO	(mg/L)	5-8	5.9	5.6
TDS	(mg/L)	ไม่เกิน 600	238	92.13

จากตารางที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค(WHO) ปี2011 จะเห็นได้ว่า ค่า pH, BOD, DO และ TDS อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแต่มี ค่า EC นั้นต่ำกว่าเกณฑ์นั้นเพราะว่า ตะกอนในน้ำน้อยลงจึงทำให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงถ้าตะกอนมากจะทำให้ค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม ตารางที่ 4

สรุปผลการทดลอง

การทดสอบเครื่องบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน เมื่อใช้เวลานานจะทำให้กระแสไฟฟ้าสูงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆและอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและกระแสไฟฟ้าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 200 Vdc เมื่อเวลาผ่านไปจะจะไปจะทำให้แรงดันไฟฟาลดลง กระแสไฟฟ้ามีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าสูงก็จะทำให้ตะกอนจับตัวกันเร็วและลอยขึ้นเร็วแต่ข้อเสียคือจะทำให้ อุณหภูมิสูง เวลาที่ใช้บำบัดได้ค่าที่ดีและผ่านมาตรฐานของแต่ละค่ามีเวลาที่ไม่เท่ากันเช่นค่า pH ที่เป็นกลางที่สุดคือ 7 น้ำที่มีค่าความนำไฟฟ้ามากจะมีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากตาม เมื่อกระแสไฟฟ้ามากจะทำให้อุณหภูมิของน้ำมากขึ้นด้วย น้ำที่ผ่านผ่านกระบวนการบำบัดโดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน จะสามารถปล่อยลงสู่ธรรมชาติ จะต้องมียค่า DO , BOD , TDS , PH , EC ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง โดยใช้เครื่องวัดพารามิเตอร์ต่างๆวัดค่าว่าได้มาตรฐาน

หรือไม่ แต่เครื่องบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน แรงดัน 200 Vdc สามารถบำบัดน้ำเสียได้ค่าตามมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้

จุดเด่นของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันคือสามารถบำบัดต่อเนื่องได้ และยังสามารถปรับความเร็วการไหลของน้ำได้ น้ำที่ผ่านการบำบัดจะสามารถปล่อยลงสู่ธรรมชาติได้เลยทันที ซึ่งดีกว่าการบำบัดแบบแช่ทิ้งไว้ซึ่งใช้เวลานาน และใช้พื้นที่กว้างจำนวนมาก ค่าที่ได้หลังจะการบำบัดไม่ค่อยจะน่าพอใจเท่าไร

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันแต่ละครั้ง ใช้ปริมาณน้ำเพียง 10 L – 30 L ควรเพิ่มปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดให้มากขึ้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเดิมและขยายระบบให้บำบัดน้ำเสียได้มากขึ้นกว่าเดิม
2. ควรเพิ่มขั้วอิเล็กโทรดหรือเพิ่มขนาดขั้วอิเล็กโทรด และทดลองเปลี่ยนชนิดขั้วอิเล็กโทรดเพื่อหาว่าชนิดไหนได้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่า เพราะแต่ละขั้วมีค่าการนำไฟฟ้าไม่เท่ากัน ค่าการนำไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อเวลาในการบำบัดน้ำเสีย
3. ทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันโดยอาจใช้แรงดันไฟฟ้าหลายระดับ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ

เพราะการควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อเวลาในการทดลอง ยิ่งแรงดันมากขึ้นก็จะใช้เวลาบำบัดน้ำเสียน้อยลง และยิ่งแรงดันเพิ่มขึ้นจะได้ขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้นด้วย

4. การทดลองครั้งต่อไป ควรวัดค่า COD เพิ่ม เพราะค่า COD ก็มีผลในการวัดคุณภาพน้ำเพื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ค่า COD คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต้องมีค่าไม่เกิน 120 mg/L

5. แหล่งจ่ายในการปรับค่าแรงดันชำระ ควรจัดซื้อหรือซ่อมบำรุง เพราะการทดลองสามารถปรับค่าได้สูงสุด ซึ่งยังไม่พอสำหรับความต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา ที่สนับสนุนและให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- การประปาส่วนภูมิภาค.(2550). **เรื่องมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค.** เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2550 ต่อท้ายบันทึกข้อความของ กคน. ที่ มท 55702-2/258 ลงวันที่ 11 กรกฎาคม 2550.
- ณัฐ จันท์ครบ และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี. (2554). การพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันโดยใช้การสลับขั้วไฟฟ้าแบบไม่สมมาตรและคู่อิเล็กโทรดที่เหมาะสม. ใน **การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554, 709-712.**
- วรวิภา ยาวิน และ อรรถชัย ปวงจันทร์. (2015). การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการล้างผลไม้ด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันร่วมกับโอโซนชั้น. ใน **การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7 ECTI-CARD 2015, หน้า 148-151.**
- สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. (2551). **กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation).** สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. วิทยาลัยรังสิต.

การออกแบบชุดป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบมัลติฟังก์ชัน

Design of Multi-Function Protection System for Three Phase Induction Motor

ชินอิจิ อุเอะดะ¹, อรุณชัย นามสร², วิวัฒน์ ทิพจร³ และ อนุสรณ์ ยอดใจเพชร^{4*}
Shinichi Ueda¹, Arunchai namsorn², Wiwat Tippachon³ and Anusorn Yodjaiphet^{4*}

^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3,4} Department of Electrical Engineering Faculty of Engineer Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

*Corresponding author E-mail: Anusorn@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์สามเฟสแบบมัลติฟังก์ชัน โดยใช้การตรวจจับค่าของกระแสและแรงดันที่มีความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่ส่งผลทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ในการควบคุมวงจรฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ในส่วนของซอฟต์แวร์ใช้โปรแกรม Matlab/Simulink พัฒนาบล็อกโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของบอร์ดทำให้การทำงานเป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์ตามที่ต้องการได้ง่าย เครื่องป้องกันมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีฟังก์ชันการทำงานทั้งหมด 6 ฟังก์ชัน ซึ่งจะครอบคลุมความผิดปกติในการทำงานของมอเตอร์ที่สามารถตรวจจับได้จากกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ได้ทั้งหมด และจากผลการทดลองพบว่าการป้องกันความเสียหายระหว่างการทำงานของมอเตอร์นั้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC ตามที่ได้ออกแบบไว้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ยังมีประโยชน์ในด้านการลดการนำเข้าอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์แบบครบฟังก์ชันจากต่างประเทศที่มี ราคาแพง เนื่องจากออกแบบและพัฒนาฟังก์ชันตามความจำเป็น ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย ลดต้นทุนในการผลิต และยังเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย

คำสำคัญ: ระบบป้องกันมอเตอร์, การตรวจจับ, มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This article presents a method for the design and construction of a three-phase multifunction motor protection. By detecting the voltage and current of an abnormal electrical system that could cause motor damage. This research applies the STM32F4 Discovery microcontroller board to control the hardware circuits. The software will developed by use the Matlab / Simulink program to control the microcontroller board and to make it work according to mathematical equations as required. The motor protector has six protection functions and it can detect the fault input current or voltage to stop the motor working. The results showed that the preventing damage during operation of the motor that is compliant with IEC Curve as designed as well. This research is useful in reducing imports of the full function motor protection from abroad that is expensive. This research saves the cost. Reduce the cost of production and also most advanced technology.

Keywords: Motor protection system, Inspection, 3-Phase induction motors, Microcontroller

บทนำ

ในระบบงานอุตสาหกรรม มอเตอร์เป็นต้นกำลังหลักในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆให้ทำงานอย่างเป็นระบบตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในโรงงานนั้นอาจมีเครื่องจักรที่มีมอเตอร์อยู่มากกว่าหนึ่งเครื่อง การทำงานของมอเตอร์ที่เป็นจังหวะตามลำดับและการตัดต่อไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้แก่เครื่องจักรเริ่มทำงานอาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้ากระชากระหว่างที่มีการสลับภาระโหลดของมอเตอร์ ทำให้ระดับแรงดันในโรงงานอาจสูงหรือต่ำกว่าปกติได้ และในบางกรณีอาจส่งผลให้ระดับแรงดันของไฟฟ้าสามเฟสมีความแตกต่างกันมากได้เช่นกัน โดยเหตุการณ์ทั้งหมดนี้ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติและอาจเสียหายได้ ผลพวงต่อมาคือทำให้โรงงานต้องสูญเสียต้นกำลังและกระบวนการต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมก็จะหยุดทำงานตามไปด้วย โดยมูลค่าการสูญเสียที่ทางโรงงานนั้นๆได้รับจะเท่ากับการเริ่มต้นลงทุนในด้านที่เสียไปอีกครั้ง ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงสำคัญที่ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์จากความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยภายนอกมอเตอร์ ทั้งการป้องกันมอเตอร์จากความผิดปกติทางแมคคานิค และจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

จากการค้นคว้าของ ปันดดา ศรีจันทรา (2556) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลของมอเตอร์ไฟฟ้าแล้วพบว่าเมื่อแรงดันที่จ่ายให้แก่มอเตอร์นั้นสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานของสมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแห่งชาติสหรัฐ (NEMA) มีผลต่อทั้งแรงบิดเริ่มต้น, แรงบิดสูงสุด, เปอร์เซนต์สลลิป, กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์, การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และประสิทธิภาพขณะโหลดเต็มพิกัด โดยผลกระทบทั้งหมดนี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้มอเตอร์เสียหายได้

ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันไม่ไห้มอเตอร์เสียหายจึงได้มีการออกแบบและพัฒนาวงจรเครื่องป้องกันมอเตอร์ขึ้นมา โดยในช่วงแรกจะเป็นการออกแบบวงจรที่เป็นวงจรแอนะล็อกทั้งหมด โดยฟังก์ชันการ

ป้องกันจะเป็นการป้องกันกระแสเกินเป็นหลัก ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีมีการพัฒนามากขึ้น วงจรป้องกันมอเตอร์ได้ถูกปรับปรุงให้สามารถควบคุมด้วยระบบดิจิทัล ทำให้ขนาดของตัวเครื่องเล็กลงและสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้ง่ายมากขึ้น เครื่องป้องกันมอเตอร์เสียหายแบบดิจิทัลก็ได้แพร่หลายตามไปด้วย

ในปัจจุบันงานวิจัยและสินค้าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องป้องกันความเสียหายของมอเตอร์ในปัจจุบันนี้มากมายหลายชนิด ชนิดต้นทุนสูงก็จะเป็นชนิดดิจิทัลที่สามารถป้องกันความเสียหายได้หลากหลายชนิดทั้งกระแสและแรงดันที่ผิดปกติ ส่วนในเครื่องที่ราคาต่ำลงส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องชนิดแอนะล็อกที่มีฟังก์ชันการทำงานตายตัว การเลือกซื้อก็ต้องเลือกให้เข้ากับการใช้งานมอเตอร์นั้นๆ ไม่สามารถปรับโปรแกรมเพื่อให้เข้ากับสภาวะการใช้งานอื่นๆได้

จากที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากความผิดปกติภายนอกในโรงงานอุตสาหกรรมที่ส่งผลต่อมอเตอร์ให้เสียหายนั้นมีหลายสาเหตุ ทั้งทางด้านของระบบไฟฟ้าที่ไม่เสถียร หรือทางด้านตัวเครื่องจักรที่อาจมีความผิดพลาดในระบบทำให้เกิดการติดขัดไม่สามารถบอกได้ว่าจะเกิดความผิดปกติแบบไหนขึ้น ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้มีแนวคิดออกแบบเครื่องป้องกันความเสียหายแก่มอเตอร์ระบบดิจิทัลที่มีฟังก์ชันการป้องกันความผิดพลาดได้หลายกรณีทั้งทางด้านแรงดันหรือกระแสสูงเกินปกติ และทางด้านการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดจากการติดขัดทางแมคคานิค

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ต้องการออกแบบและสร้างระบบป้องกันความเสียหายต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดสามเฟสที่ประยุกต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการตรวจวัดความผิดปกติของทั้งกระแสและแรงดันที่มอเตอร์ขณะทำงาน โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถหาได้ภายในประเทศเพื่อลดต้นทุนและลดการนำเข้าอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์เสียหายจากต่างประเทศ

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาความเสียหายของมอเตอร์ที่มาจากปัจจัยภายนอกนั้นมีหลายปัจจัยโดยงานวิจัยที่ได้ศึกษาปัญหาที่ส่งผลให้มอเตอร์เสียหายนั้น ได้แก่ งานวิจัยของ C.W. Kuhn (1937) สรุปว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับจะไม่สามารถทนความร้อนสูงที่เกิดจากการทำงานขณะกระแสไหลตกเกินได้ การป้องกันด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Curve ที่เป็นการเปรียบเทียบและแสดงให้เห็นว่ากราฟในช่วงเวลาที่มอเตอร์มีอุณหภูมิที่สูงจะให้ความปลอดภัยต่อความเสียหายที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าสูงเกินปกติได้

งานวิจัยของ พูนศรี วรรณการ (2551) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกลงเกิดขึ้น ถึงแม้จะเกิดแรงดันตกเป็นช่วงสั้นๆ ตั้งแต่ 5-20 ครั้งของลูกคลื่นไซน์และค่าแรงดันลดต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติก็สามารถที่จะทำให้การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับทำงานผิดพลาดได้และส่งผลทำให้มอเตอร์ดึงเอาแรงดันจากเฟสที่เหลือมาใช้งานจนเกิดความร้อนสะสมในขดลวด ประกอบกับงานวิจัยของ Jakov and Richard (2011) ที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุของการเสียหายของมอเตอร์เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูง ได้ส่งผลให้มอเตอร์มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้น อุณหภูมิของมอเตอร์จะสูงขึ้นตามไปด้วย ในสภาวะการทำงานแบบนี้จะทำให้การเริ่มทำงานของมอเตอร์เกิดการกระชากเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้การทำงานของมอเตอร์นั้นเกิดความร้อนสูงขึ้นทันที และเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงหรือแรงดันต่ำกว่าปกติ (Under Voltage) ก็จะทำให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ได้เช่นกัน

จากสาเหตุของความเสียหายของมอเตอร์แบบต่างๆที่ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ก็ได้มีงานวิจัยที่ได้การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆกันไป ได้แก่งานวิจัยของ

Ying (2009) ได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์แรงดันต่ำที่มีการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายผ่านระบบบัส RS-485 โดยส่วนการตรวจจับความผิดปกติในแต่ละมอเตอร์ในเครือข่ายจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM เบอร์ LPC2136 ทำหน้าที่ควบคุมอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ ตรวจจับแรงดันและกระแสที่ผิดปกติที่มอเตอร์ มีฟังก์ชันการตรวจจับความผิดปกติอยู่ 7 รูปแบบ วิธีการตัดการทำงานของมอเตอร์ใช้วิธีการตั้งค่าระดับที่กำหนดและใช้การหน่วงเวลา จากผลการทดลองพบว่าการควบคุมการตัดการทำงานของมอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพและยังสามารถบันทึกค่าความผิดปกติไว้วิเคราะห์ภายหลังได้อีกด้วย

ต่อมา Gagan and Amrita (2012) ได้พัฒนาประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ATMEGA32 เพื่อสร้างอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ โดยควบคุมมอสเฟส (MOSFET), รีเลย์ (Relay), หม้อแปลงกระแส (Current Transformer : CT) และ หม้อแปลงแรงดัน (Potential-Transformer : PT) โดยเมื่อมอเตอร์เกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าจากแรงดันไม่สมดุล หรือแรงดันลดลงจากการลัดวงจร PT และ CT ที่ตรวจวัดความผิดปกติได้จะถูกประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA32 และส่งสัญญาณไปควบคุมรีเลย์ให้ตัดการจ่ายไฟฟ้าเพื่อหยุดทำงานของมอเตอร์ก่อนได้รับความเสียหาย งานวิจัยนี้เน้นที่การออกแบบวงจรพื้นฐานที่ง่ายและมีราคาต้นทุนในการสร้างน้อย เช่น การตัดต่อได้ออกแบบให้ใช้มอสเฟสทดแทน ไอจีบีที (Insulated-Gate Bipolar Transistor : IGBT) ที่มีราคาแพง มีการฟังก์ชันการทำงานที่เพียงพอไม่หลากหลายเพียง 4 ฟังก์ชันเท่านั้น

ในประเทศไทย นักวิจัยก็ตระหนักถึงความจำเป็นของเครื่องป้องกันความเสียหายของมอเตอร์เช่นกันจึงได้มีหลายงานวิจัยที่พัฒนาเครื่องป้องกันความเสียหายแก่มอเตอร์ ขึ้นเองในประเทศไทย ได้แก่ งานวิจัยของ กมลชัย กี่ชนสมบัติ และชนกานต์ อินทร์ขำ (2556) ได้ออกแบบและพัฒนาระบบป้องกันมอเตอร์เสียหายที่มี

สาเหตุมาจากความผิดปกติของแหล่งจ่ายที่ทำให้เกิดกระแส/แรงดันต่ำหรือสูงกว่าปกติที่ได้ประยุกต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ STM32F4 Discovery มาควบคุมการตัดการทำงานของมอเตอร์แต่องานวิจัยนี้ยังมีจุดด้อยตรงที่จะทำงานเพียงแค่ฟังก์ชันใดฟังก์ชันหนึ่งไม่ครอบคลุมทุกฟังก์ชัน ต่อมาได้มีงานวิจัยของกิตินันท์ ค่ายอด, ทวีศักดิ์ แซ่มัว และวิวัฒน์ ทิพจร (2558) ได้พัฒนาระบบให้ป้องกันความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าที่สูงผิดปกติที่เกิดจากสาเหตุการติดขัดทางด้านแมคคานิค (Mechanical jam) เพียงฟังก์ชันเดียวโดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ทั้งสองงานวิจัยนี้จะใช้วงจรการตรวจจับกระแสที่คล้ายเคียงกันเนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้หาซื้อได้ในประเทศเหมือนกัน

จากทั้งวิจัยที่มีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาเครื่องป้องกันความเสียหายของมอเตอร์ที่ผลิตในประเทศไทยนี้ ผู้ทำวิจัยได้มีแนวคิดที่จะนำวัสดุอุปกรณ์ที่มีอยู่ในประเทศไทยมาพัฒนาเป็นชุดป้องกันมอเตอร์แบบหลายฟังก์ชันโดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมระบบ เพื่อประโยชน์ในการลดการนำเข้าชุดป้องกันมอเตอร์ที่มีราคาสูงและเพิ่มเติมประสิทธิภาพให้มีความสามารถในการป้องกันที่หลากหลายมากขึ้น โดยฟังก์ชันการทำงานนั้นจะมีครบทั้งการตรวจจับแรงดันและกระแสที่ต่ำหรือสูงเกินไป สามารถตรวจจับและตัดการทำงานอันเนื่องมาจากสาเหตุจากการติดขัดทางแมคคานิคได้ และฟังก์ชันการตัดการทำงานของมอเตอร์นี้จะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC Curve ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันมอเตอร์

ปัจจัยที่ส่งผลให้มอเตอร์เสียหายได้ในขณะที่กำลังทำงานอยู่ อันเนื่องมาจากคุณภาพของไฟฟ้า (<http://www.silic.co.th/power%20quality.html>) และอื่นๆ แบ่งได้เป็น 4 สาเหตุ ดังนี้

1) แรงดันเกินพิกัด (Over Voltage) คือแรงดันอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square : RMS) ที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 10% 1.1-1.2 pu. เป็นเวลานานกว่า 1 นาที โดยอาจจะมีสาเหตุมาจากการที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าได้มีการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือหม้อ

แปลงไฟฟ้ามีการปรับอัตราส่วนของแทปที่ไม่เหมาะสมกับระบบส่งผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงดันเกิน

2) แรงดันต่ำกว่าพิกัด (Under Voltage) คือค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ลดลงระหว่าง 10% 0.8-0.9 pu. เป็นเวลานานกว่า 1 นาที โดยอาจมีสาเหตุเกิดขึ้นจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีสูงมากขึ้น, การที่มอเตอร์อยู่ช่วงปลายทางของแหล่งจ่ายไฟฟ้า, การต่อภาระโหลดขนาดใหญ่เข้ากับระบบ หรือแม้กระทั่งมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ

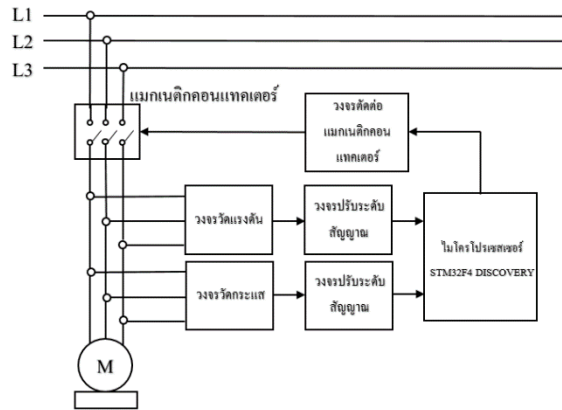
3) แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) คือแรงดันอาร์เอ็มเอสของระบบไฟฟ้า 3 เฟสมีความแตกต่างกัน 0.5-2% หรือมีมุมมองคาของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสเปลี่ยนไปจาก 120 องศา โดยสาเหตุความผิดปกติแบบนี้มีผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ และหม้อแปลงมีอายุการใช้งานลดน้อยลงเนื่องจากผลความร้อนที่เกิดขึ้น ในส่วนของกระแสไม่สมดุล (Current Unbalance) ที่เกิดขึ้นในระบบ 3 เฟสก็ส่งผลทำให้เกิดความร้อนสะสมเช่นกัน

4) การติดขัดทางแมคคานิค (Mechanical jam) คือ การติดขัดของโหลดหรือการขับเคลื่อนเกิดความผิดปกติกะทันหัน ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสที่สูงขึ้นเกินปกติ ทำให้เกิดความร้อนสะสมได้

วิธีการวิจัย

การออกแบบทางด้านฮาร์ดแวร์

การตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ระหว่างที่ยังทำงานอยู่จะใช้หลักการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสามเฟสและวัดกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์แล้วนำเข้ามาประมวลผลหาความผิดปกติทั้ง 5 รูปแบบดังได้กล่าวไว้ก่อนหน้าในส่วนที่ 3 ดังนั้นการออกแบบฮาร์ดแวร์จึงได้มีการออกแบบวงจรออกเป็น 5 ส่วนดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 1) วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2) วงจรวัดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3) วงจรปรับระดับสัญญาณไฟฟ้า 4) ส่วนประมวลผลความผิดปกติของมอเตอร์ 5) ส่วนตัดต่อการทำงานของมอเตอร์



ภาพที่ 1 ระบบการทำงานของชุดป้องกันมอเตอร์

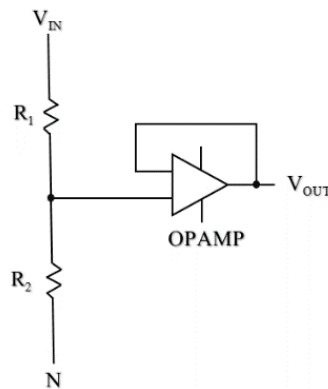
1) วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

เนื่องจากบอร์ดทดลอง STM32F4 Discovery นั้นไม่สามารถวัดแรงดันจากแหล่งจ่ายที่มีแรงดันสูงเกิน 3.3 โวลต์ได้ จึงต้องมีวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ให้แรงดันลดลง จากวงจรรูปที่ 2 วงจรจะทำการลดแรงดันลงด้วยอัตราส่วนตามสมการที่ (1) คือ

$$V_{out} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} V_{in} \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ R_1 เท่ากับ $1 \text{ M}\Omega$ และ R_2 เท่ากับ $36 \text{ k}\Omega$

ดังนั้นอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุตคือ $28.78 : 1$



ภาพที่ 2 วงจรแบ่งแรงดัน

ตรงส่วนของวงจรรออปแอมป์ในรูปที่ 2 นี้ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่แยกไม่ให้เกิดกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเข้ามารบกวนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

2) วงจรวัดกระแสไฟฟ้า

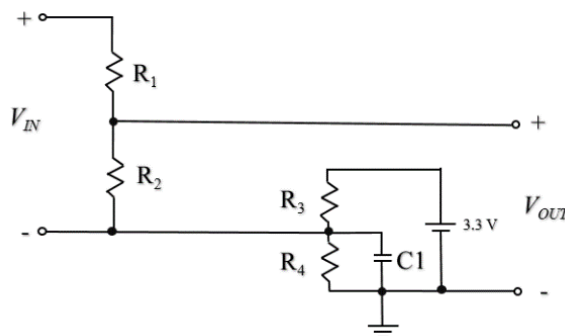
จะประยุกต์ใช้หม้อแปลงกระแสเหนี่ยวนำกระแสที่ขาแรงดันอินพุตแต่ละเส้นแล้วลดทอนอัตราส่วนของกระแส จากรูปที่ 3 เป็นหม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วนของกระแส 100 แอมป์ต่อ 50 มิลลิแอมป์ เป็นชนิดแยกแกน (Split - Core)



ภาพที่ 3 หม้อแปลงกระแส

3) วงจรปรับระดับสัญญาณ
เนื่องจากสัญญาณที่ได้รับมาจากทั้งวงจรวัดแรงดัน
และวงจรวัดกระแสยังเป็นสัญญาณที่ยังเป็นไฟฟ้า

กระแสลบที่อยู่ในช่วงบวกและลบอยู่ดังนั้นจึงต้อง
ปรับระดับสัญญาณให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่
มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0 – 3.3 โวลต์ ดังรูปที่ 4



ภาพที่ 4 วงจรปรับระดับสัญญาณ

4) ส่วนประมวลผลความผิดปกติของมอเตอร์
ในส่วนประมวลผลข้อมูลได้ใช้บอร์ดทดลอง
ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VGT6 เป็น
หน่วยประมวลผล โดยมีสถาปัตยกรรมเป็น ARM

Cortex-M4 32 บิต ทำงานที่ 168 MHz, 1 MB
Flash, 192+4KB RAM และมี 3 Analog to digital
converter (ADC) โดยแต่ละ ADC มี 8 อินพุต โดย
ลักษณะบอร์ดทดลองจะเป็นดังรูปที่ 5

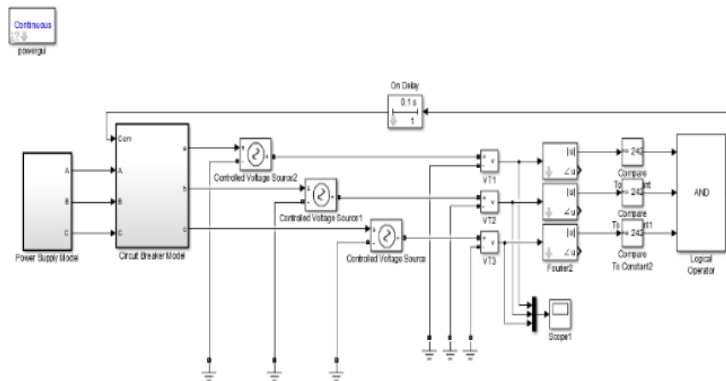


ภาพที่ 5 บอร์ดทดลอง STM32F4 Discovery

(<http://www.ett.co.th/prod2012/stm32/STM32F4-DISCOVERY.html>)

โดยสัญญาณแรงดันที่รับเข้ามาจะถูกส่งไปยังส่วนโมดูลแปลงข้อมูลแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital : ADC) แล้วนำข้อมูลดิจิทัลที่ได้นี้ไปคำนวณและวิเคราะห์การทำงานตลอดเวลา นอกจากนี้ประสิทธิภาพที่สูงของบอร์ดนี้แล้ว อีกสาเหตุหนึ่งที่เลือกใช้บอร์ดทดลองนี้คือสามารถพัฒนา

โปรแกรมควบคุมบอร์ดทดลองได้ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink สามารถลดความยุ่งยากในการพัฒนาโปรแกรมให้ทำงานเป็นไปตามทฤษฎีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้มาก ดังตัวอย่างการพัฒนาโปรแกรมด้วย Matlab/Simulink ในรูปที่ 6



ภาพที่ 6 ตัวอย่างการพัฒนาโปรแกรมด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

5) ส่วนควบคุมการทำงานของมอเตอร์

วงจรควบคุมการตัดต่อการทำงานของมอเตอร์นี้จะเป็นการควบคุมการเปิด-ปิดแมกเนติกคอนแทคเตอร์ผ่านรีเลย์ที่ได้รับสัญญาณสั่งการจากขาดิจิตอลเอาต์พุตจากบอร์ด STM32 เข้ามา

การพัฒนาทางด้านซอฟต์แวร์

เนื่องจากบอร์ด STM32 Discovery นั้นนอกจากจะพัฒนาโปรแกรมได้ด้วยภาษาซีแล้วยังสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรม Matlab/Simulink ได้อีกด้วย จึงทำให้การพัฒนาโปรแกรมเป็นไปได้ง่าย มีบล็อกฟังก์ชันทางวิศวกรรมให้ใช้หลากหลาย และยังสามารถพัฒนาโค้ดคำสั่งในบล็อกฟังก์ชันต่างๆ เพื่อนำไปส่งอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่างๆเพิ่มเติมได้เช่นกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงพัฒนาโปรแกรมด้วย Matlab/Simulink ที่ออกแบบมาตรวจวัดความผิดปกติของสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ตามความผิดปกติ ทั้ง 5 แบบตามหัวข้อที่ 3.2 โดยจะมีการสร้างบล็อกฟังก์ชันทั้งหมด 6 โปรแกรมฟังก์ชัน คือ

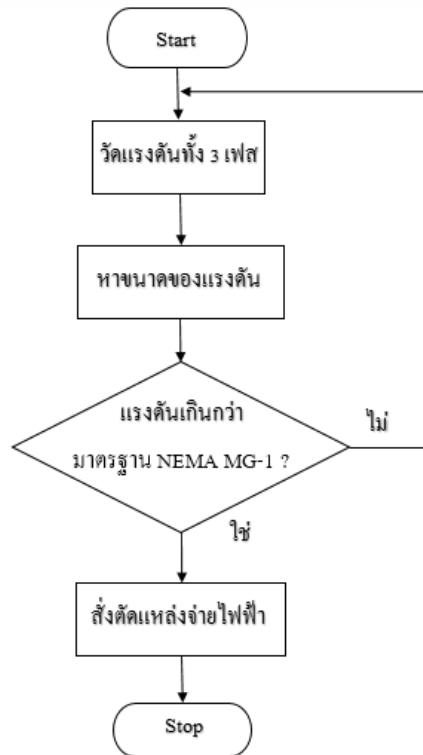
- 1) โปรแกรมตรวจจับ Over Voltage
 - 2) โปรแกรมตรวจจับ Under Voltage
 - 3) โปรแกรมตรวจจับ Voltage Unbalance
 - 4) โปรแกรมตรวจจับ Mechanical Jam
 - 5) โปรแกรมตรวจจับ Over Current
 - 6) โปรแกรมตรวจจับ Current Unbalance
- การทำงานของแต่ละโปรแกรมจะเป็นไปตามหลักการดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมตรวจจับ Over Voltage

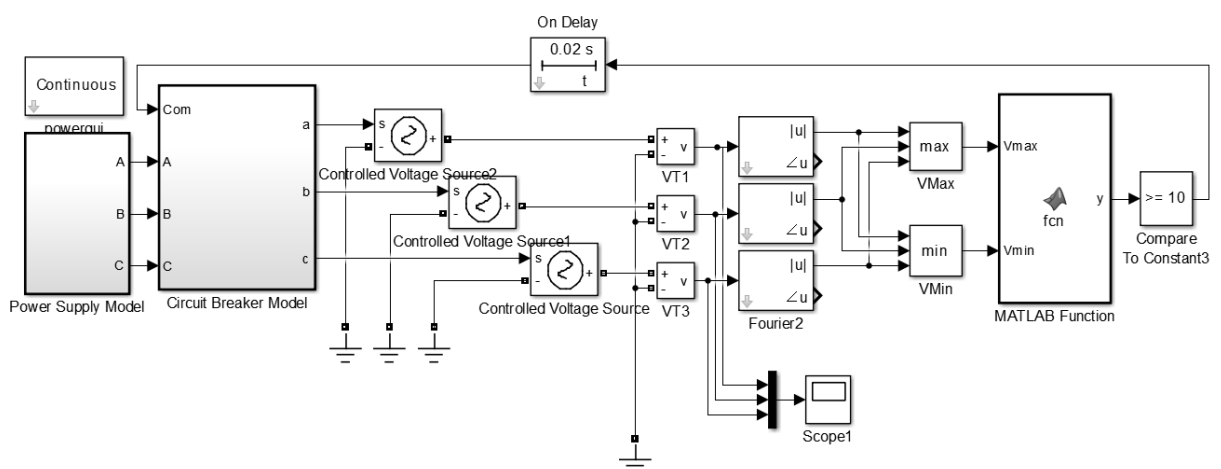
การทำงานจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 7 คือ จะรับแรงดันเข้ามาแล้วตรวจเช็คค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานของ NEMA MG1 หรือไม่ ถ้าไม่ก็จะทำงานต่อไป แต่ถ้าเกินกว่าก็จะสั่งตัดการทำงาน ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมด้วย Matlab/Simulink จะพัฒนาได้ออกมาดังรูปที่ 8 โดยเริ่มจากรับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟสด้วยบล็อก Voltage Measurement จะเป็นตัววัดค่าของแรงดันไฟฟ้า จากนั้นส่งต่อเข้ามายังบล็อกฟังก์ชันแปลง Fourier

Transform เพื่อหาขนาดและมุมของแรงดันในแต่ละเฟส แล้วใช้บล็อก Compare to Constant เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดเข้ามาโดยค่าที่ตั้งไว้เป็น 242 โวลต์หรือมีการเพิ่ม 10 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานของ NEMA MG1 (1993) โดยจะตรวจเช็ค

แรงดันในแต่ละเฟส ถ้ามีแรงดัน 220 โวลต์ ระบบจะทำงานปกติ แต่ถ้าแรงดันเพิ่มเป็น 242 โวลต์ บล็อก Compare to Constant จะสั่งให้ลอจิกที่ขาเอาต์พุตที่ควบคุมชุดตัดต่อรีเลย์ออกมาเป็น 1 เพื่อสั่งให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ตัดการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับมอเตอร์



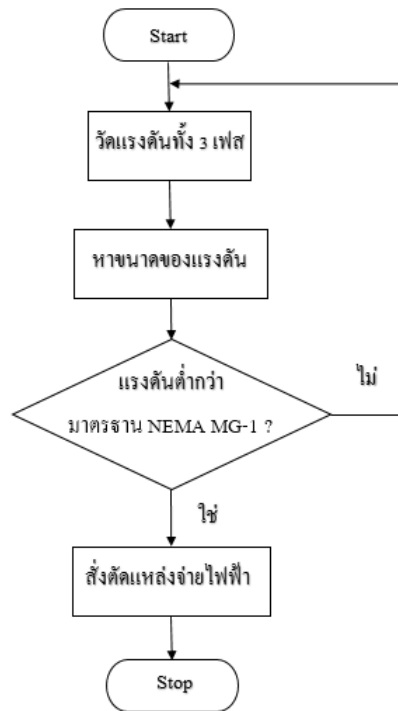
ภาพที่ 7 โฟลชาร์ตโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิด Over Voltage



ภาพที่ 8 บล็อกโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิดความผิดปกติของแรงดัน

2. โปรแกรมตรวจจับ Under Voltage
 การทำงานของโปรแกรมจะเป็นไปตามรูปที่ 9 คือ
 ทำการตรวจสอบว่าแรงดันต่ำกว่ามาตรฐานของ
 NEMA MG1 หรือไม่ ถ้าต่ำกว่าก็จะตัดไฟที่จ่ายให้กับ

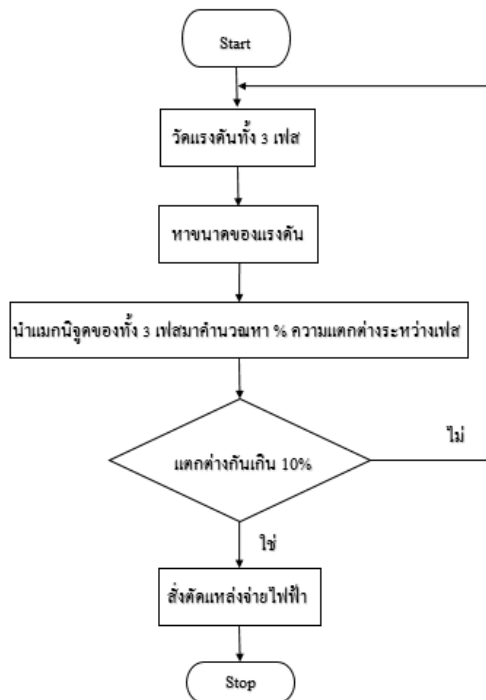
มอเตอร์แต่ถ้าไม่ก็จะวนทำงานต่อไป ในส่วนของการ
 พัฒนาโปรแกรม Simulink นั้นจะต่างจาก Over
 Voltage ตรงกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดเข้ามานั้น
 ต้องให้มีแรงดันน้อยกว่า 198 โวลต์



ภาพที่ 9 โฟลชาร์ตโปรแกรมการป้องกันความเสียหาย
 จากการเกิด Under Voltage

3. โปรแกรมตรวจจับ Voltage Unbalance
 หลักการทำงานจะเป็นไปตามรูปที่ 10 คือ
 คำนวณหาค่าแมกนิจูดที่มีค่ามากและน้อยสุดของ
 ไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ โดยทำการ
 คำนวณทั้งสามเฟส เพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความ

แตกต่างระหว่างเฟสว่ามีค่าที่เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้
 เท่ากับ 10% หรือไม่ถ้าน้อยกว่าระบบจะทำงาน
 ตามปกติถ้ามากกว่าก็จะสั่งให้ตัดการทำงานของ
 แหล่งจ่ายไฟ



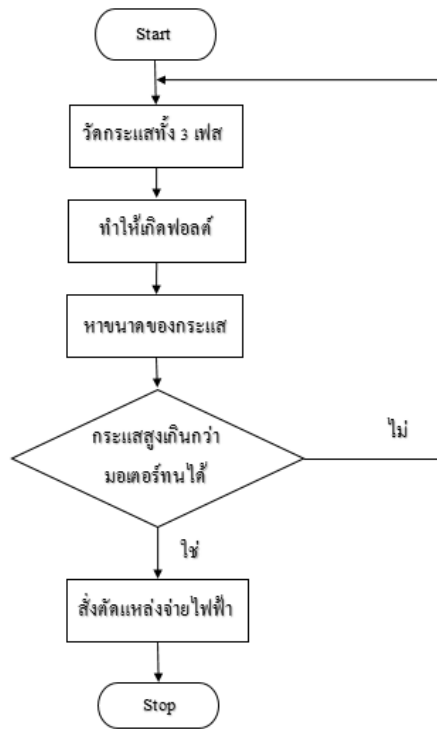
ภาพที่ 10 โฟลชาร์ตโปรแกรมการป้องกันความเสียหาย
จากการเกิด Voltage Unbalance

4. โปรแกรมตรวจจับ Mechanical Jam

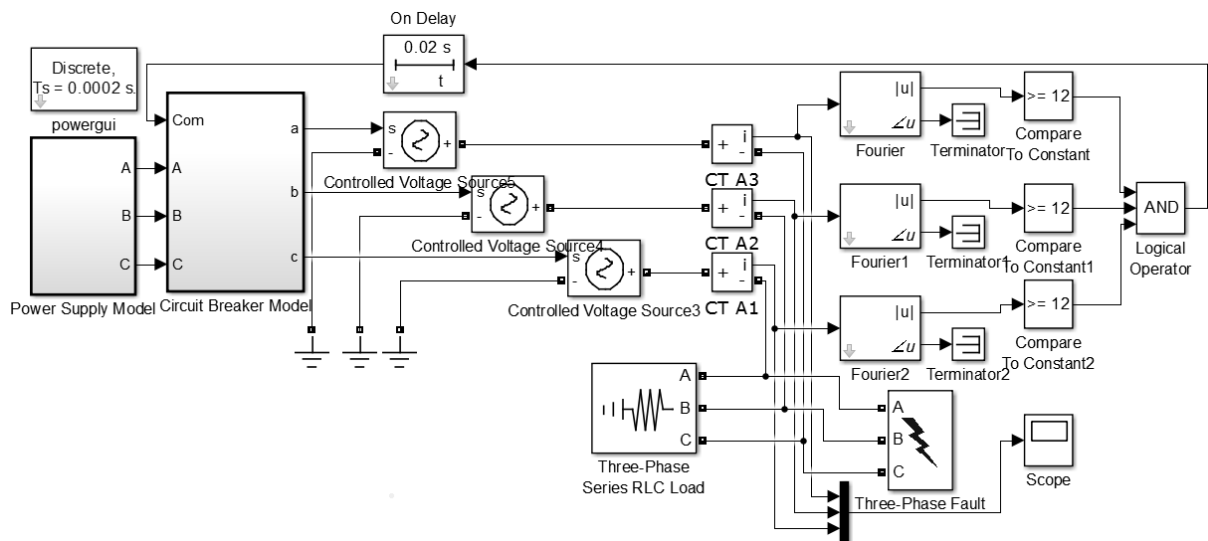
การทำงานของโปรแกรมจะเป็นไปตามรูปที่ 11 คือเริ่มจากการอ่านค่ากระแสทั้งสามเฟสเข้ามา จากนั้นกำหนดขนาดของกระแสสูงสุดที่มอเตอร์รับได้ เมื่อเกิดการล๊อคโรเตอร์ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ที่สามารถทนกระแสได้ 12 แอมป์ จึงกำหนดค่านี้เป็นกระแสสูงสุด เมื่อมอเตอร์มีกระแสไหลเข้าสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ระบบก็จะสั่งให้ ตัดการจ่ายไฟให้แก่ มอเตอร์ ส่วนการพัฒนาโปรแกรมด้วย Matlab/Simulink ก็ได้แสดงไว้ในรูปที่ 12

5. โปรแกรมป้องกันกระแสเกิน

เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงเกินปกติก็จะนำมาคำนวณหา ค่าเวลาในการตัดวงจรซึ่งจะเป็นไปตามกราฟ IEC Curve ตามโฟลชาร์ตในรูปที่ 13 โดยผู้วิจัยได้ออกแบบให้สามารถตั้งได้ว่าจะให้เป็นไปตามกราฟ standard, vary หรือ extremely โดยการพัฒนาโปรแกรมด้วย Matlab/Simulink ก็ได้แสดงไว้ในรูปที่ 14



ภาพที่ 11 โฟลชาร์ตโปรแกรมการป้องกันความเสียหาย
จากการเกิด Mechanical Jam



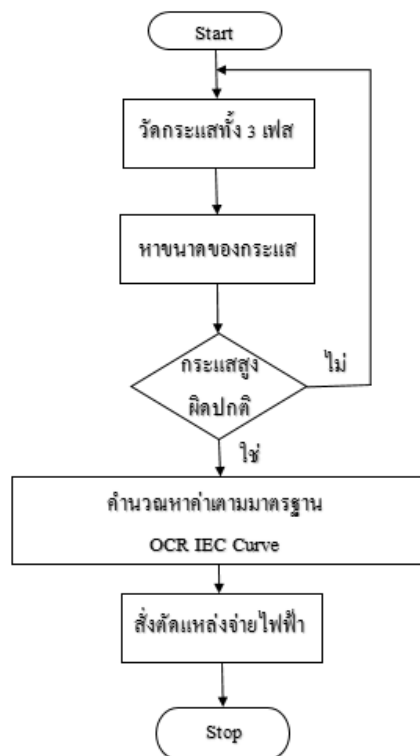
ภาพที่ 12 บล็อกโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิด Mechanical Jam

6. โปรแกรมตรวจจับ Current Unbalance

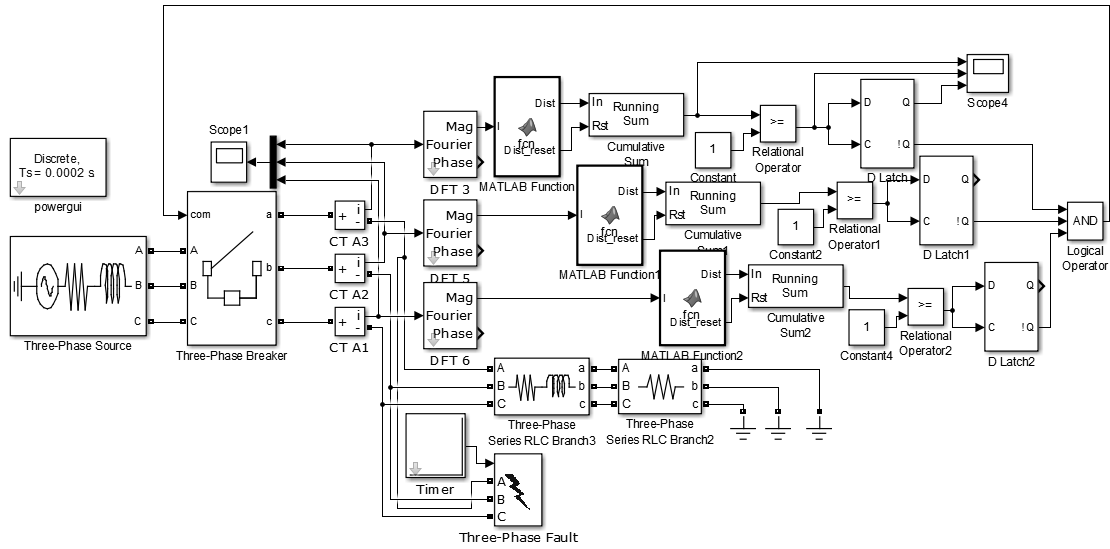
หลักการการทำงานจะเป็นไปตามรูปที่ 15 คือจะคำนวณหาค่าแมกนิจูดของกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากและน้อยสุดของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ โดยจะคำนวณทั้งสามเฟส เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างเฟสว่ามีค่าที่เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้เท่ากับ 10% หรือไม่ถ้าน้อยกว่าระบบจะทำงานตามปกติถ้ามากกว่าก็จะสั่งให้ตัดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ ส่วนการพัฒนาโปรแกรมจะสร้างตามรูปที่ 16

มอเตอร์และชุดป้องกันมอเตอร์

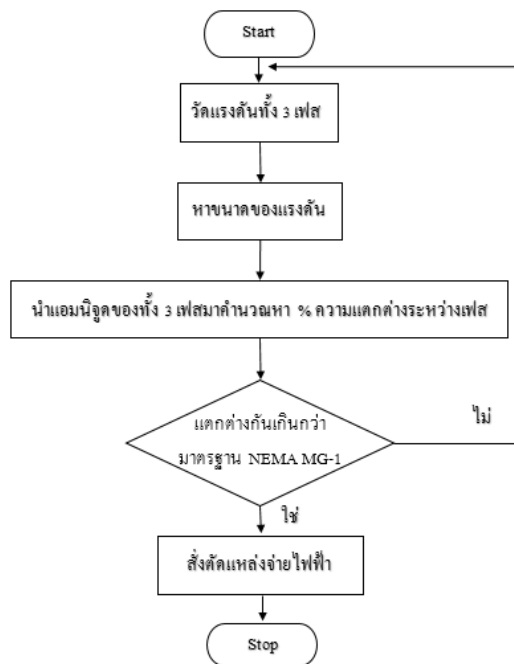
มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อดังจรขับมอเตอร์แบบสตาร์ พิกัดของกระแส 2.7 แอมป์ 50 เฮิร์ต กระแสสูงสุดของมอเตอร์ 12 แอมป์ ที่ติดตั้งชุดเบรคสำหรับทดสอบ Mechanical Jam และอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ที่ได้ออกแบบมา จะแสดงในรูปที่ 17



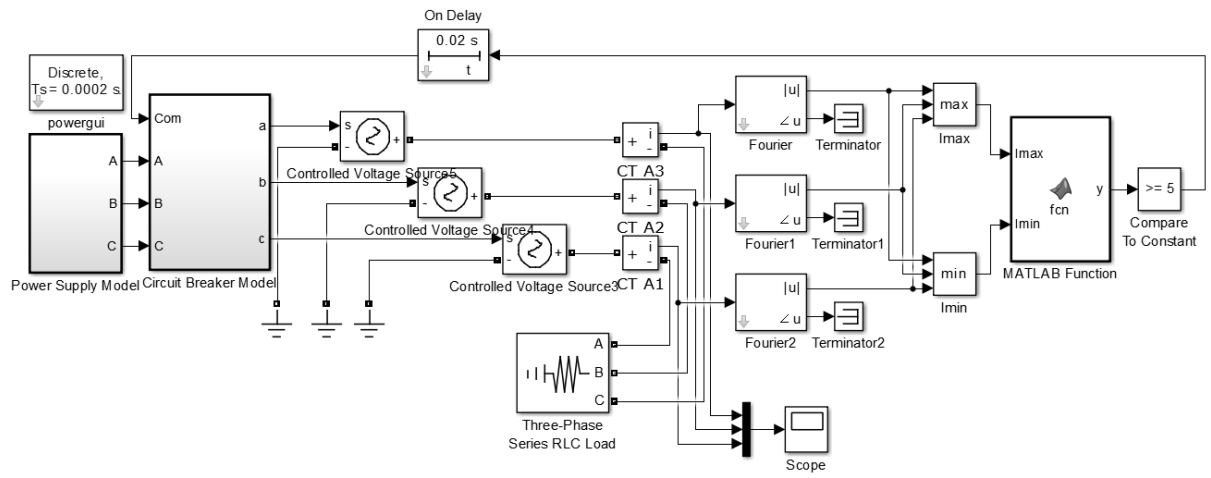
ภาพที่ 13 โฟลชาร์ตโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิดกระแสเกิน



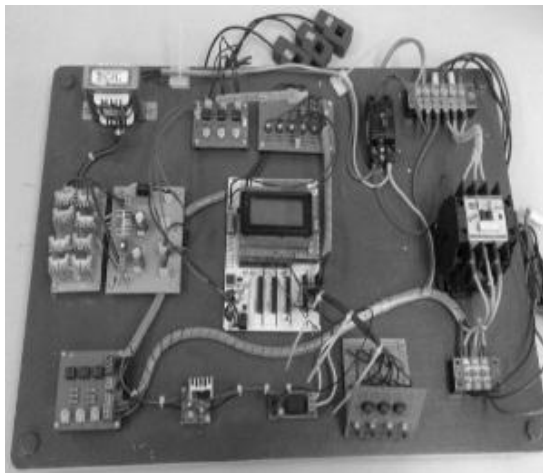
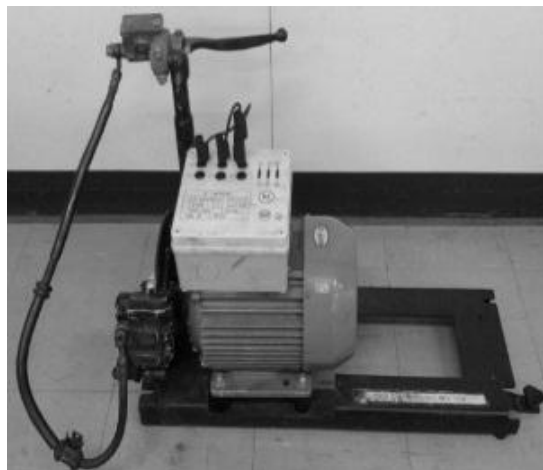
ภาพที่ 14 บล็อกโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิดกระแสเกิน



ภาพที่ 15 โฟลชาร์ตโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิด Current Unbalance



ภาพที่ 16 บล็อกโปรแกรมการป้องกันความเสียหายจากการเกิด Current Unbalance



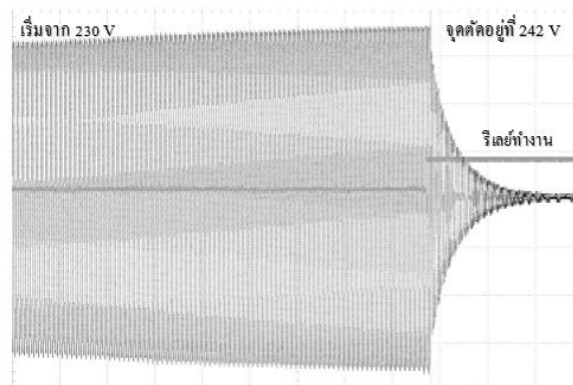
ภาพที่ 17 มอเตอร์และชุดป้องกันมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง

ผลการวิจัย

ผลการทดลองการป้องกัน Over Voltage

ในรูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นมอเตอร์อยู่ในสภาวะปกติ แรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ 230 โวลต์และสัญญาณสั่งตัดการทำงานยังปกติคือเป็นลอจิกศูนย์หรือมีแรงดันศูนย์โวลต์ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้มากขึ้นจนถึง 242 โวลต์

หรือมากกว่า 10% ของแรงดันปกติ จะเห็นได้ว่าชุดป้องกันจะสั่งให้รีเลย์ทำงานโดยส่งสัญญาณลอจิกหนึ่งหรือแรงดัน 3.3 โวลต์ ไปควบคุมแมกเนติกคอนแทคเตอร์ เพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์ทันที จากรูปสัญญาณทางด้านขวาพบว่า เมื่อถูกสั่งตัดการจ่ายไฟเลี้ยงแรงดันก็มีค่าลงจนเป็นศูนย์โวลต์

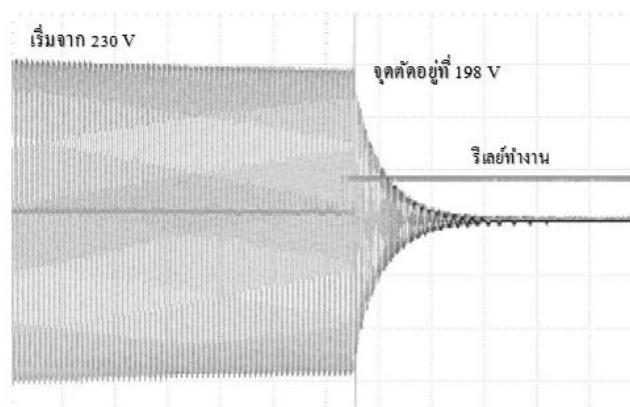


ภาพที่ 18 รูปสัญญาณแรงดันรวมแต่ละเฟสของการเกิด Over Voltage

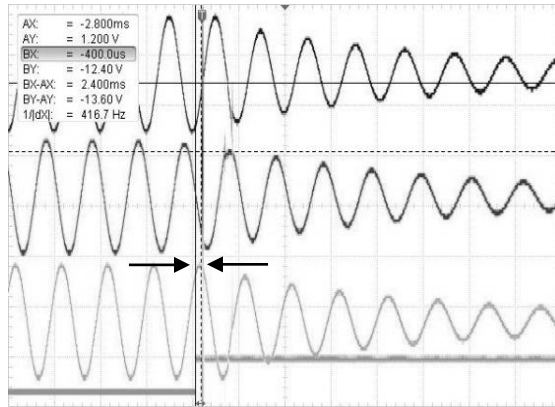
ผลการทดลองป้องกัน Under Voltage

ในรูปที่ 19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์อยู่ที่ 230 โวลต์มอเตอร์จะอยู่ในสภาวะปกติและเมื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายลงมาถึงระดับ 198 โวลต์ ชุดป้องกันจะสั่งลอจิกหนึ่งเพื่อให้หยุดการทำงานของมอเตอร์ทันที

ช่วงระยะเวลาในการตัดการทำงานของมอเตอร์ของทั้ง Over Voltage และ Under Voltage จะใช้เวลาในการประมวลผลที่ 2.4 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 20



ภาพที่ 19 รูปสัญญาณแรงดันรวมแต่ละเฟสของการเกิด Under Voltage

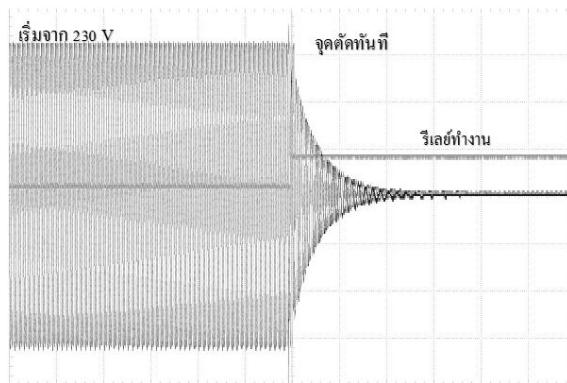


ภาพที่ 20 ช่วงเวลาในการตรวจพบความผิดปกติ จนถึงสั่งตัดของการป้องกัน Over Voltage

ผลการทดลอง Voltage Unbalance

จากรูปที่ 21 ในช่วงเริ่มต้นมอเตอร์อยู่ในสภาวะปกติ แรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ 230 โวลต์ จากนั้นจะทำให้

การปลดไฟเลี้ยงออกไปหนึ่งเฟสเพื่อให้ชุดป้องกันตรวจสอบเจอแรงดันผิดปกติ จะพบว่าบอร์ดได้สั่งให้หยุดการทำงานของมอเตอร์ทันที

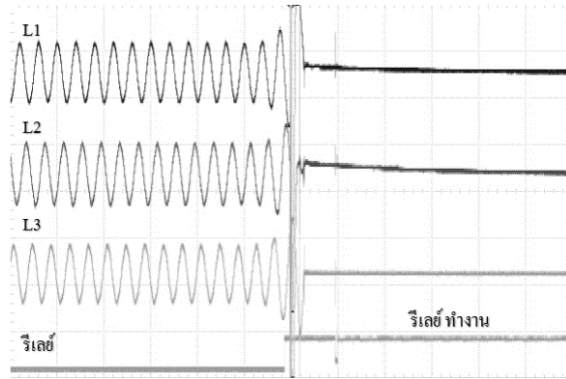


ภาพที่ 21 รูปสัญญาณแรงดันรวมแต่ละเฟส ของการเกิด Voltage Unbalance

เนื่องจากข้อจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานได้ที่ละคำสั่งตามลำดับการตรวจเช็คที่ละสัญญาณ ดังนั้นช่วงระยะเวลาการตัดการทำงานของไฟกระแสลบในแต่ละเฟสของ Voltage Unbalance จะตัดการทำงานในระยะเวลาที่ต่างกัน โดยไฟฟ้าเฟสที่ 1 ระยะเวลาในการสั่งตัดการทำงานจะอยู่ที่ 8.8 มิลลิวินาที ไฟฟ้าเฟสที่ 2 ระยะเวลาในการตัดจะเร็วขึ้นที่ 5.2 มิลลิวินาทีและไฟฟ้าเฟสที่ 3 ระยะเวลาในการตัดอยู่ที่ 4.8 มิลลิวินาที

ผลการทดลอง Mechanical Jam

จากรูปสัญญาณของกระแสในรูปที่ 22 กำหนดให้มอเตอร์หมุนปกติโดยที่จะใช้กระแสประมาณ 2 แอมป์ แต่เมื่อได้ทำการล็อคมอเตอร์กะทันหันจำลองการเกิด Mechanical Jam จะทำให้กระแสพุ่งสูงเกินกว่าปกติ พบว่าชุดป้องกันมอเตอร์ได้สั่งให้หยุดการทำงานของมอเตอร์ทันที โดยช่วงระยะเวลาตั้งแต่กระแสเริ่มพุ่งสูงขึ้นเกินปกติจนกลับมาเป็น 0 แอมป์ ทั้งสามเฟสนั้น ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 2.5 มิลลิวินาที

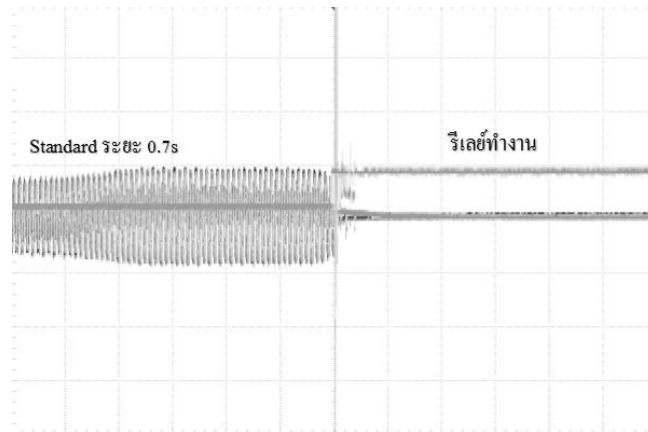


ภาพที่ 22 รูปสัญญาณกระแสรวมแต่ละเฟส
ของการเกิด Mechanical Jam

ผลการทดลองการเกิดกระแสเกิน

การทดลองจะเริ่มต้นจากให้มอเตอร์ในสภาวะปกติ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์จะอยู่ที่ 2 แอมป์ จากนั้นจะบังคับเบรกให้มอเตอร์ต้องดึงกระแสเกิน

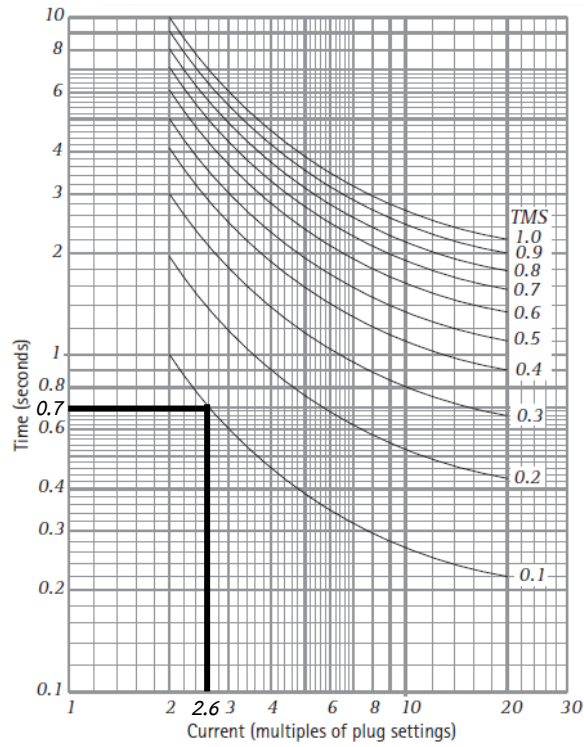
พิกัดที่รับได้ ในการทดลองนี้กำหนดให้กระแสเกินอยู่ที่ 2.6 แอมป์ พบว่ามอเตอร์ยังทำงานต่อไปได้เป็นระยะเวลาประมาณ 0.7 วินาที จากนั้นชุดป้องกันก็ได้สั่งตัดการทำงานของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 23



ภาพที่ 23 รูปสัญญาณกระแสแสดงเวลาการตัด
การทำงานของมอเตอร์เนื่องจากกระแสเกิน

เมื่อนำกราฟ Over Current IEC Curve มาเลือก เป็นโหมด standard ค่า TMS เท่ากับ 0.1 และพิกัด กระแสที่เกินมีค่าเท่ากับ 2.6 แอมป์ เมื่อทำการ

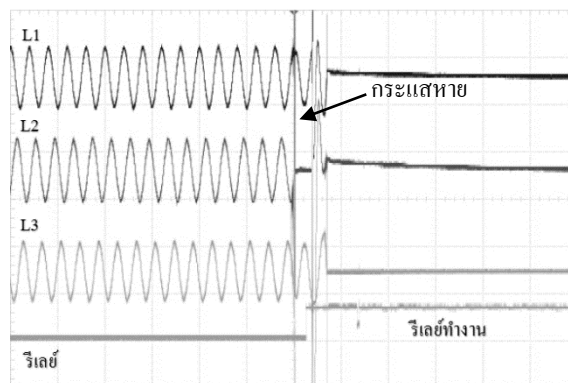
ลากเส้นตัดตามรูปที่ 24 จะพบว่าระยะเวลาในการสั่ง ตัดการทำงานของมอเตอร์เท่ากับ 0.7 วินาที ซึ่งตรงกับผลการทำงานในรูปที่ 23



ภาพที่ 24 กราฟ Standard IDMT relay
(Network Protection & Automation Guide. (p.9-6), 2011.)

ผลการทดลอง Current Unbalance
จากการทำงานของมอเตอร์ในสภาวะปกติ
กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ จะอยู่ที่ 2 แอมป์ เมื่อเกิด

กระแสไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งหายไป ดังในรูปที่ 25 ได้
บังคับตัดการจ่ายไฟเลี้ยงที่เฟสที่ 2 ชุดป้องกันมอเตอร์
ก็ได้สั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ทันที



ภาพที่ 25 รูปสัญญาณกระแสเมื่อเกิดความผิดปกติ
กรณี Current Unbalance

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้ง 6 ฟังก์ชันอันได้แก่ Over Voltage, Under Voltage, Voltage Unbalance, Mechanical Jam, Over Current Relay IEC Curve และ Current Unbalance พบว่าชุดป้องกันมอเตอร์ได้ทำงานตามวัตถุประสงค์ของแต่ละฟังก์ชันเป็นอย่างดี ฟังก์ชันทั้ง 6 นี้แยกกันทำงานอย่างอิสระปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกัน แต่เนื่องจากข้อจำกัดของส่วนประมวลผลกลางที่มีหน่วยประมวลผลเพียงหนึ่งเดียว ระบบจึงต้องทำงานตามลำดับขั้นตอนไม่สามารถทำงานหลายคำสั่งหรือประมวลผลสัญญาณหลายสัญญาณพร้อมกันได้ ส่งผลให้ไม่สามารถต่อต่อการทำงานได้ทันทีตามผลของ Voltage Unbalance และ Current Unbalance

สรุป

อุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์แบบมัลติฟังก์ชันนี้สามารถป้องกันความเสียหายของมอเตอร์ได้เป็นที่น่าพอใจ สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแรงดันและกระแส โดยอุปกรณ์นี้จะทำงานป้องกันความเสียหายต่อมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEC Curve ทำให้การป้องกันความเสียหายมีประสิทธิภาพสูงและด้วยการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาดในประเทศไทย อันได้แก่ เซนเซอร์วัดกระแสและบอร์ดทดลอง STM32F4 Discovery ที่มีราคาถูกส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิตได้มาก

ในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปผู้วิจัยจะทำการปรับปรุงชุดป้องกันมอเตอร์แบบมัลติฟังก์ชันให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการปรับปรุงให้สามารถตรวจจับและประมวลผลสัญญาณได้ทั้งกระแสและแรงดันพร้อมกันทั้งสามเฟส หกสัญญาณ นอกจากนี้ยังจะปรับปรุงวงจรและตัวเครื่องให้สามารถทำการติดตั้งและใช้งานได้ง่ายมากขึ้น

สามารถนำไปต่อยอดทางธุรกิจเพื่อที่จะผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ขายได้จริง ลดการนำเข้าอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ และลดการสูญเสียของมอเตอร์ในภาคอุตสาหกรรมได้มากขึ้นไป

เอกสารอ้างอิง

กมลชัย กี่ชนสมบัติ, และชนกานต์ อินทร์จำ. (2556).

อุปกรณ์ตรวจจับและป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วย

เซ็นเซอร์. (ปริญญาานิพนธ์ ไม่ได้ตีพิมพ์) มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย. เชียงราย.

กิตินันท์ ค่ายอด, ทวีศักดิ์ แซ่มัว และวิวัฒน์ ทิพจร.

(2558). การตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ 3

เฟสแบบ Mechanical jam. The 1st RMUTL

Chiangrai National Conference 2015.

(RCCON2015).

ปนัดดา ศรีจันทร์. (2556). ปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่

สมดุลของมอเตอร์ไฟฟ้า. สืบค้นจาก

http://thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=19268.

พูนศรี วรรณการ. (2551). การแก้ปัญหาแรงดันตกใน

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.

(ปริญญาานิพนธ์ ไม่ได้ตีพิมพ์) มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

C.W. KUHN. (1937). A-C Motor Protection.

Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 56(5), 589 – 593.

Gagan Garg and Amrita Sinha. (2014). An

Improved Method for Protection of Three Phase Induction Motor using

Microcontroller. International Conference on Power. Control and Embedded

Systems (ICPCES). 2014, 1-6.

Jakov Vico. and Richard Hunt. (2011).
Principles in motor protection. **IEEE
Industry Applications Magazine**. 17(6),
52-61.
Network Protection & Automation Guide.
(2011). **Alstom Grid Worldwide Contact
Centre**.

Silic Stable Service Co.,Ltd. คุณภาพไฟฟ้า. สืบค้น
จาก [http://www.silic.co.th/power%20
quality.html](http://www.silic.co.th/power%20quality.html).

Ying Tang. (2009). The design of new low –
voltage motor protection controller based
on ARM technology. Applied
Superconductivity and Electromagnetic
Devices, 2009. ASEMD 2009. **International
Conference**, 183-185.

ปั๊มน้ำระบบไฮบริดที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ควบคู่กับไฟฟ้าระบบจำหน่าย

The Water Pump Hybrid System Using Solar Energy Coupled with The Electrical Distribution System

สุภกิจ บุญธรรม¹, อนุสรณ์ กมลเรืองวานิช², วิวัฒน์ ทิพจร³ และ อนุสรณ์ ยอดใจเพชร⁴

Suphakit Boontham¹, Anusorn Kamoroungwanich², Wiwat Tippachon³ and Anusorn Yodjaiphet⁴

^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3,4} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

* Corresponding author e-mail: Anusorn@mutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบ ในการพัฒนาระบบควบคุมได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อความสะดวกและรวดเร็ว โดยระบบปั๊มน้ำนี้ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าควบคู่กัน 2 ระบบ คือ ไฟฟ้าจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์และไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปั๊มน้ำกระแสตรงขนาด 12 โวลต์ 180 วัตต์ ที่มีอัตราการจ่ายน้ำได้สูงสุด 1,020 ลิตร/ชั่วโมง ระบบจะมีการตรวจวัดกระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า ระดับน้ำที่คงเหลือในถังเก็บน้ำ และมีการแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเหล่านี้จะบันทึกลงใน SD Card เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบข้อมูล พฤติกรรมการใช้น้ำและไฟฟ้าในภายหลังได้ อย่างไรก็ตามเมื่อไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลครบปั๊มน้ำไม่เพียงพอระบบจะเปลี่ยนไปใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายแทนโดยอัตโนมัติ

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, ปั๊มน้ำ, ระบบควบคุม, ไมโครคอนโทรลเลอร์, เซ็นเซอร์

Abstract

This paper presents the water pump system that using the solar energy and the electrical distribution systems. We use a microcontroller to control this system. The control system software development by using MATLAB/Simulink program. The water pump system using the parallel power supply. The energy was received from the solar panels and the electric distribution systems. In this research, we select the 12 volt DC water pump, 180 Watts power and the maximum water supply rate are 1,020 liters per hour. This system measures the current, voltage, power and the water remaining in the tank. It was displaying these values via the LCD. The electricity consumption was saved in SD Card and we can check the data. However, when the water pump receives energy from the solar system, the power is not sufficient. The system will switch to use the electric distribution system instead automatically.

Keywords: Solar energy, Water pump, Control systems, Microcontroller, Sensor

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานถือว่าเป็นสิ่งสำคัญและมีความจำเป็นอันดับต้นๆในการดำรงชีวิตของมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตบนโลกใบนี้ และพลังงานถูกนำมาใช้เป็นประโยชน์มากมาย เพราะสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะใช้ทรัพยากรจากแหล่งกำเนิดพลังงานฟอสซิล ซึ่งได้แก่ แก๊สธรรมชาติ ปิโตรเลียม และถ่านหิน เป็นต้น แต่ในปัจจุบันพบว่าแหล่งพลังงานจากสารฟอสซิล ได้ลดลงและจะหมดไปในไม่ช้า ดังนั้นมนุษย์จึงเล็งเห็นถึงปัญหาเหล่านี้จึงคิดหาทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการสนับสนุนให้ใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นพลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อลดการใช้สารฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้า (พงศกร อมรพิทักษ์ และนรารักษ์ หลีสกุล, 2546)

ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง และได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ ระบบไฟฟ้าแบบอิสระและระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย หรือระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับกริด ระบบไฟฟ้าแบบอิสระนั้นยังแบ่งได้ออกเป็น 3 ระบบ คือระบบอิสระแบบไม่มีแบตเตอรี่ประกอบ ระบบอิสระแบบมีแบตเตอรี่ประกอบ และระบบอิสระแบบผสมผสาน ระบบอิสระที่มีแบตเตอรี่ประกอบจะนิยมใช้มากกว่าระบบอิสระแบบไม่มีแบตเตอรี่ประกอบ ส่วนระบบอิสระแบบผสมผสานจะมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆต่อเข้าร่วมกับระบบ เพื่อช่วยกันผลิตไฟฟ้า ทำให้ความสามารถในการผลิตไฟฟ้ามีสูงขึ้น และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ดีกว่า (นภัทร วัจนเทพินทร์, 2553, น.32)

ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับกริด (เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย) เป็นระบบที่ใช้ในพื้นที่ที่มีระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าเข้าถึง ระบบนี้

จะมีความคุ้มค่ามากกว่าและเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ และระบบเชื่อมต่อกับกริดที่ไม่มีแบตเตอรี่ประกอบ จะถูกกว่าระบบเชื่อมต่อกับกริดที่มีแบตเตอรี่ประกอบ (นภัทร วัจนเทพินทร์, 2553, น.38)

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีแบตเตอรี่ ผลงานวิจัยมุ่งลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกรที่จำเป็นต้องผันน้ำจากแหล่งน้ำเข้าสู่บ่อพักน้ำหรือที่การเพาะปลูก จุดเด่นจะอยู่ที่ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุดในช่วงแสงของวัน และการนำเทคนิคการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีแบตเตอรี่ โดยมีวงจรปรับแรงดัน (Energy extraction) ร่วมกับอัลกอริทึมการหาจุดที่มีกำลังงานสูงสุด (Advanced MPPT) จึงทำให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไฟฟ้าได้สูงสุดในช่วงแสงของวัน เพื่อลดจำนวนการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้น้อยกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์ทั่วไปที่ขายในท้องตลาด และยังไม่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง จึงประหยัดค่าใช้จ่ายลง เพียงแต่งานวิจัยนี้ระบบไม่สามารถทำงานได้ขณะที่ไม่มีแสงแดดตกกระทบ (สุทัศน์ ปฐมนุพงศ์, 2557)

จากจุดเด่นของงานวิจัยก่อนหน้านี้ทำให้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องปั้มน้ำพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยไม่มีแบตเตอรี่ประกอบและใช้ไฟฟ้าร่วมกับไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย เพื่อให้ระบบปั้มน้ำสามารถทำงานได้ตลอดเวลา ไม่ว่าแสงอาทิตย์จะมีความเข้มเพียงพอหรือไม่ก็ตามเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบให้ทำงานตัดต่อระบบไฟฟ้าได้อัตโนมัติ ทั้งยังมีการตรวจสอบค่าความเข้มแสงเพื่อให้ปั้มน้ำทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และแสดงผลการใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น แรงดันกระแส และกำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้

วัตถุประสงค์

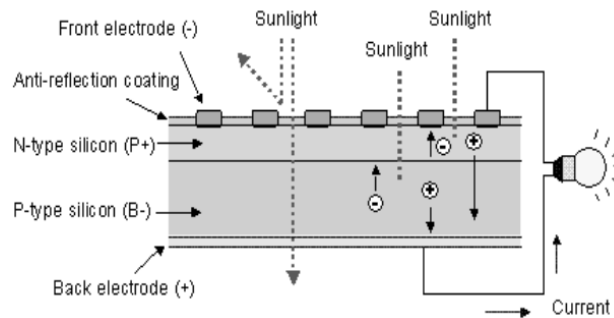
1. เพื่อออกแบบและสร้างป้อนน้ำระบบไฮบริดที่ทำงานควบคู่กันระหว่างไฟฟ้าระบบจำหน่ายและพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีแบตเตอรี่ประกอบในระบบ

2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบป้อนน้ำราคาถูกที่สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็น จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)



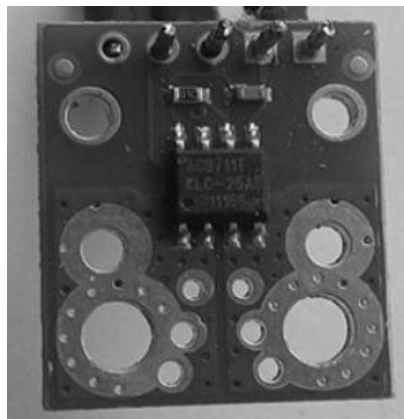
ภาพที่ 1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

- ตัวตรวจวัดกระแส (Current sensor)

เป็นส่วนที่ใช้ในการวัดกระแส โดยค่าเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์กระแสตัวนี้จะเป็นสัญญาณอนาล็อก 66mV/A สามารถหาค่ากระแสจริงได้ดังสมการที่ 1

$$X_{AMP} = \left(\frac{1 \text{ A}}{66 \text{ mV}} \right) V_{in} \quad (1)$$

X_{Amp} คือ กระแสที่ที่คำนวณได้จริง

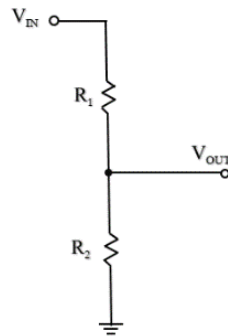


ภาพที่ 2 Current sensor

- วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)

เนื่องจากบอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery นั้นสามารถรับแรงดันได้เพียง 3.3 โวลต์ แต่ว่าบางส่วนของระบบนั้นแรงดันเกินกว่า

3.3 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีการลดทอนแรงดันลงเพื่อให้สามารถวัดแรงดันได้ดังภาพที่ 3 แรงดันที่ลดทอนลงคำนวณได้ตามสมการที่ (2)



ภาพที่ 3 วงจรแบ่งแรงดัน

$$V_{out} = \left(R_2 / (R_1 + R_2) \right) V_{in} \quad (2)$$

- อัลตราโซนิก (Ultrasonic)

เป็นเซนเซอร์ที่นำมาใช้วัดระดับน้ำเพื่อส่งไปให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลตามรูปที่ 4 โดยเซนเซอร์นี้สามารถวัดระยะทางได้ตั้งแต่ 2 ถึง

400 เซนติเมตร โดยเซนเซอร์มีหลักการคือส่งคลื่นอัลตราโซนิกออกไปและรับกลับมาเพื่อคำนวณระยะทางตามความเร็วเสียงคือ 29 ไมโครวินาทีต่อเซนติเมตร



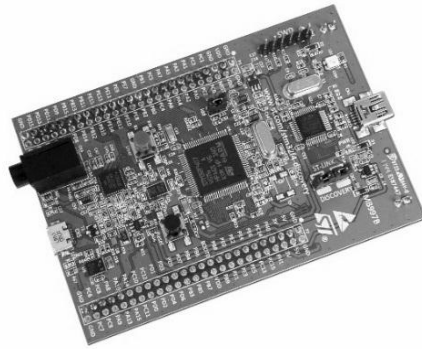
ภาพที่ 4 อัลตราโซนิก

- วงจรสวิตช์แสง

ใช้ในการตรวจวัดแสงเพื่อที่จะสามารถเลือกใช้แหล่งจ่ายได้ถูกต้องและจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลด มีประสิทธิภาพมากที่สุด รวมทั้งลดปัญหาการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาเดียวกันและไม่ให้อุปกรณ์ตัดต่อทำงานในระยะติดต่อกัน

- บอร์ดทดลอง STM32F4 Discovery

เป็นบอร์ดทดลองที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VGT6 เป็นหน่วยประมวลผลโดยมีสถาปัตยกรรมเป็น ARM Cortex-M4 32 บิตทำงานที่ 168 MHz, 1 MB Flash, 192+4KB RAM และมี 3 Analog to digital convertor (ADC) โดยแต่ละ ADC มี 8 อินพุต โดยลักษณะบอร์ดทดลองจะเป็นดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 บอร์ดทดลอง STM32F4 Discovery

- Waijung Blockset สำหรับ

Matlab/Simulink

Waijung Blockset เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานร่วมกับ Matlab/Simulink ที่พัฒนาโดยบริษัท เอ็มเมจิ้น จำกัด เป็นบริษัทของประเทศไทยที่พัฒนาให้บอร์ดทดลองนี้สามารถเชื่อมต่อ คำนวณและสามารถควบคุมทรัพยากรต่างๆของบอร์ดทดลองได้ตามต้องการ และเนื่องจากเป็นการพัฒนาโปรแกรมบน Matlab/Simulink จึงง่ายและสะดวกในการพัฒนาให้สามารถควบคุมการทำงานของฟังก์ชันให้ทำงานตามการทางคณิตศาสตร์ได้ง่าย

- ปั้มน้ำไฟฟ้ากระแสตรง

ปั้มน้ำไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นรุ่น SEFLO-40 ขนาด 12 โวลต์ 180 วัตต์ สามารถต่อใช้ไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ได้โดยตรง โดยที่ไม่ต้องมีอุปกรณ์ของระบบโซลาร์เซลล์มาประกอบ เช่น อินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ เป็นต้น ประสิทธิภาพการทำงานของปั้มน้ำจะแปรผันตามความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ได้รับ สามารถปั้มน้ำได้มากที่สุดถึง 1,020 ลิตรต่อชั่วโมง

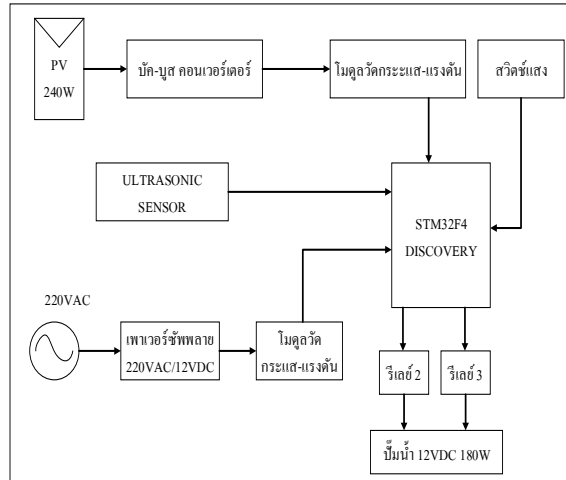


ภาพที่ 6 ปั้มน้ำไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น SEFLO-40

วิธีการวิจัย

จากภาพที่ 7 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบปั้มน้ำโดยรวมทั้งหมด และแสดงส่วนของการรับอินพุต เช่น อินพุตจากสวิทช์แสง Ultrasonic sensor และแหล่งจ่ายทั้งสองระบบ ส่วนเอาต์พุต จะ

มีเอาต์พุตจากรีเลย์ 2 ตัว รีเลย์ตัวที่ 2 จะจ่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และตัวที่ 3 จะจ่ายไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย และใช้บอร์ด STM32F4 Discovery ในการประมวลผลและบันทึกพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าลงใน SD Card



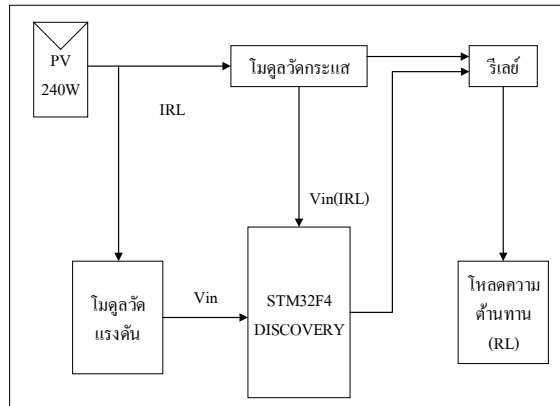
ภาพที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของปั้มน้ำระบบไฮบริดจ์

- การวัดค่ากำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 8 จะเป็นการวัดกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อตรวจสอบเช็คกำลังไฟฟ้าที่ได้รับมาและนำไปใช้ในเงื่อนไขในการเลือกใช้ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์หรือจากระบบจำหน่าย โดยจะใช้โหลด

ความต้านทานมาต่อเพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้า ดังสมการที่ (3)

$$\text{Power} = V_{in} \times X_{AMP} \quad (3)$$



ภาพที่ 8 บล็อกไดอะแกรมการวัดกระแส-แรงดัน เพื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า

- การหาขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (อนนท์ นำอิน, 2559)

โหลดปั้มน้ำกระแสตรงขนาด 180W ทำงานที่ 4 ชั่วโมง/วัน ดังนั้นกำลังวัตต์คือ

$$Wh_{Load} = 180 W \times 4 hr = 720 Wh$$

งานวิจัยนี้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยวจำนวน 48 เซลล์ $I_{MP} = 4.98$ แอมป์ และ $V_{MP} = 24.1$ แอมป์ ประสิทธิภาพแผงที่อุณหภูมิ $25^{\circ}C = 16\%$ การเปลี่ยนกำลังงานตามอุณหภูมิเท่ากับ $0.43\% / ^{\circ}C$ (๘) แต่แผงมีอุณหภูมิขณะทำงานที่ $68^{\circ}C$ ดังนั้นจะสามารถหาได้จากสมการ (4)

$$\eta_M(T2) = \eta_M(STC) \times (1 - \delta \Delta T) \quad (4)$$

แทนค่าในสมการที่ (4)

$$\eta_M(68^\circ\text{C}) = 16\% \left(1 - \frac{0.43\%}{^\circ\text{C}}\right) \times ((68 - 25)^\circ\text{C})$$

$$\eta_M(68^\circ\text{C}) = 0.13$$

เมื่อแผงอุณหภูมิขณะทำงานเป็น 68°C ประสิทธิภาพลดลงจากปกติ 16% คงเหลือ 13% จึงหาได้จากสมการที่ (5)

$$Wh_{PV} = \eta_M \times Wh_{SUN(WM)} \quad (5)$$

แทนค่าในสมการที่ (5)

$$Wh_{SUN(WM)} = \frac{Wh_{PV}}{\eta_M} = \frac{720 \text{ Wh}}{13\%} = 5,538.46 \text{ Wh}$$

จากข้อมูลทางสถิติตั้งแต่ปี พ.ศ.2545-2553 จังหวัดเชียงรายจะได้รับแสงแดดต่ำสุดในเดือนธันวาคม ที่ความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ $I_{\text{worst Mount}} = 4.04 \text{ [kWh/m}^2\text{-day]}$ จำนวนชั่วโมงแสงอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ เทียบได้ 4.07 ชั่วโมง หาพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากสมการที่ (6)

$$PV_{\text{Area}} = \frac{Wh_{\text{sun}}}{I_{\text{worstMount}}} \quad (6)$$

$$= \frac{5,538.46 \text{ Wh}}{4,070 \text{ Wh / (m}^2\text{-day)}} = 1.36 \text{ m}^2$$

ในการเลือกซื้อใช้ข้อมูลที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน มาพิจารณาเลือกซื้อคือ ค่าประสิทธิภาพแผง 16% ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ ดังนั้นพิกัดพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเท่ากับ

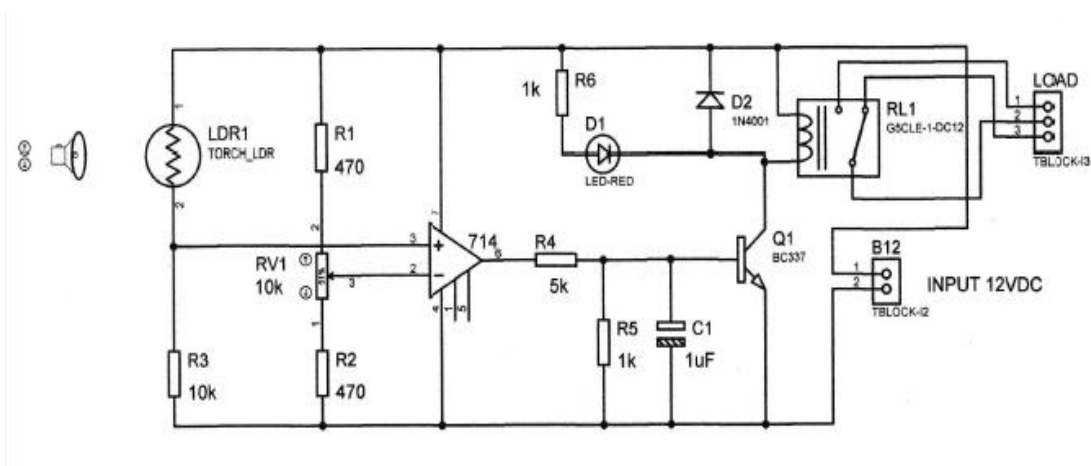
$$PV_{\text{Power}} = \frac{1000}{\text{m}^2} \times 16\% \times 1.36 \text{ m}^2 = 217.6 \text{ W}$$

ดังนั้นจึงควรใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดไม่ต่ำกว่า 217.6 วัตต์

- สวิตช์แสง

จากภาพที่ 9 เป็นวงจรสวิตช์แสงที่ประยุกต์ใช้ LDR เป็นตัวรับแสงและใช้อุปกรณ์เป็นตัว

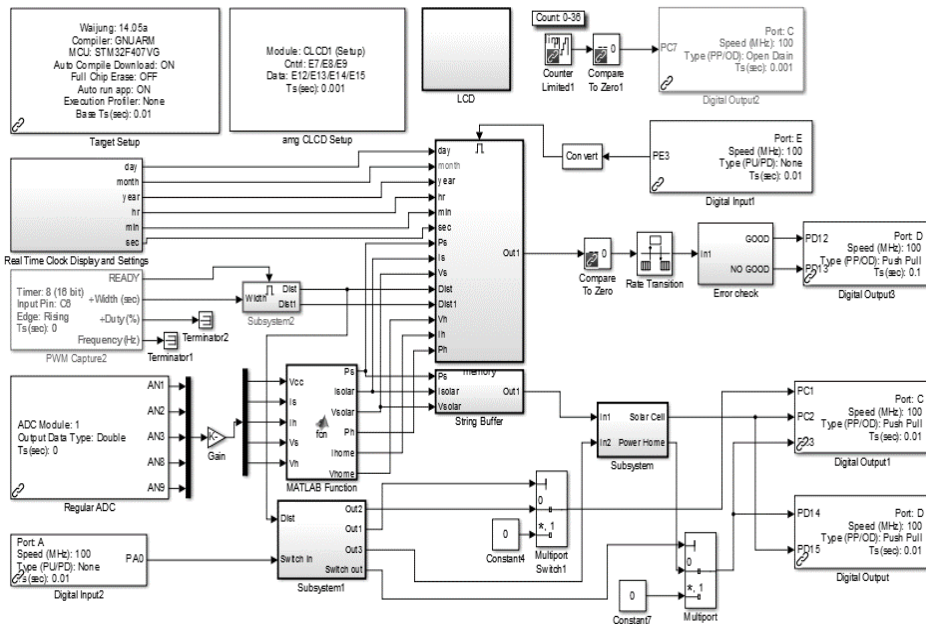
เปรียบเทียบแรงดันขาเข้าวงจร สามารถปรับค่าความเข้มของแสงได้ตามต้องการโดยการปรับค่าความต้านทาน RV1



ภาพที่ 9 วงจรสวิตช์แสง

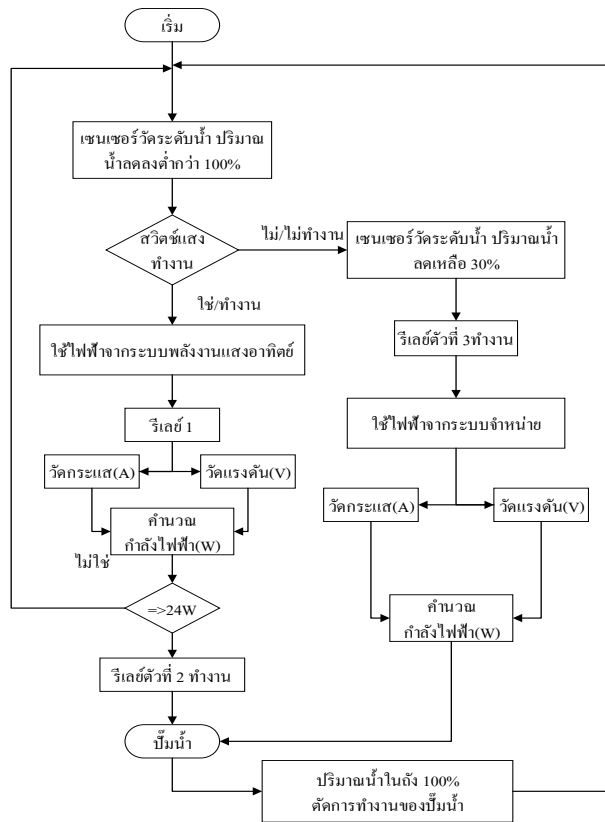
- การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงาน จะเป็นการพัฒนาโปรแกรมในลักษณะของบล็อกไดอะแกรมโดยใช้ซอฟต์แวร์ Matlab/

Simulink ที่ประยุกต์ใช้ Waijung Blockset เป็นฟังก์ชันตัวกลางในการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 บล็อกไดอะแกรมควบคุมการทำงานของระบบ

จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 10 สามารถอธิบายการทำงานของโปรแกรมได้ดังภาพที่ 11



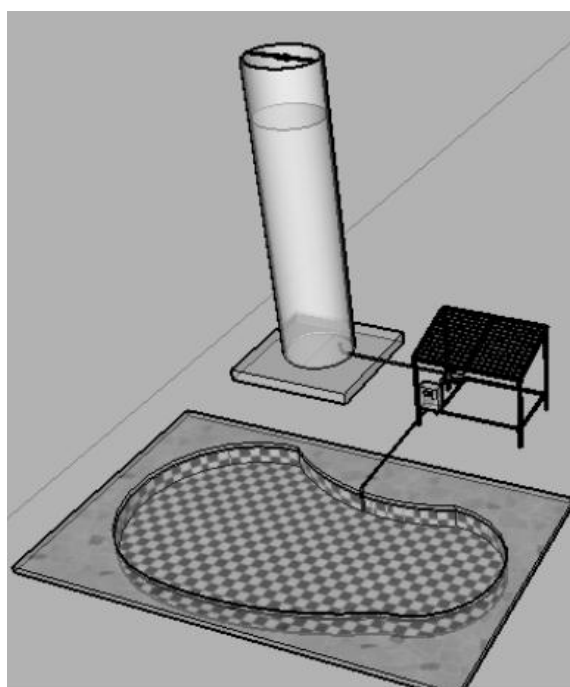
ภาพที่ 11 การทำงานของโปรแกรม

ผลการวิจัย

ระบบปั้มน้ำพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับไฟฟ้าระบบจำหน่าย ได้ทำการทดลองทั้งหมด 2 แบบ คือ การทดลองปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และการทดลองปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย แล้วนำผลการทดลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน

- ผลการทดลองปั้มน้ำจากไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย

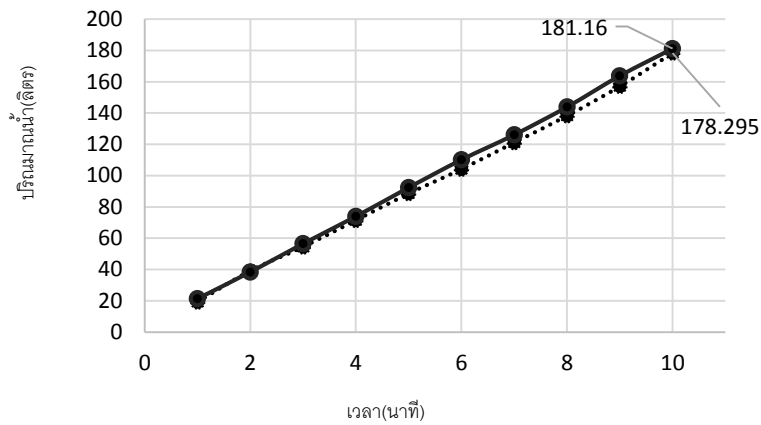
ในการทดลองปั้มน้ำระบบพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยมีความสูงของถังน้ำที่ 2.50 เมตร และความลึกของบ่อน้ำอยู่ที่ 3 เมตร ณ ติ๊กวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย ลักษณะการติดตั้งการทดลองของระบบดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ลักษณะการติดตั้งระบบปั้มน้ำเพื่อทำการทดลอง

จากรูปที่ 13 แสดงผลจากการทดลองปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าทั้งสองระบบจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถปั้มน้ำได้ที่ 17.82 ลิตร/นาที่ เมื่อใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายจะปั้มน้ำได้ 18.11 ลิตร/นาที่ ทั้งนี้การใช้ไฟฟ้าจากระบบพลังงาน

แสงอาทิตย์จะได้รับพลังงานไฟฟ้าเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ได้รับ ถ้าได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากจะส่งผลให้ได้รับพลังงานไฟฟ้ามาก ปั้มน้ำก็จะทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เมื่อปั้มน้ำทำงานได้เต็มประสิทธิภาพปริมาณน้ำก็ได้มาก

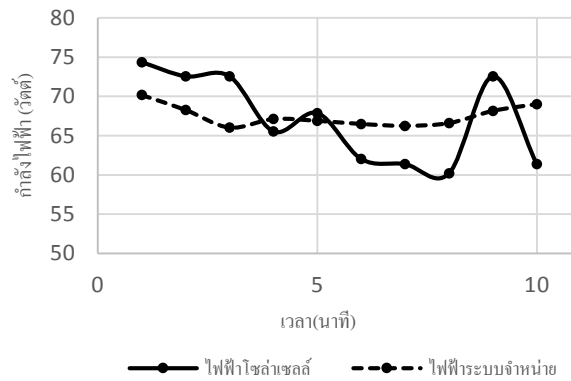


..... ปริมาณน้ำ(ลิตร)ใช้ไฟฟ้าโซล่าเซลล์ —●— ปริมาณน้ำ(ลิตร)ใช้ไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ภาพที่ 13 กราฟทดสอบประสิทธิภาพมอเตอร์ในการสูบน้ำ

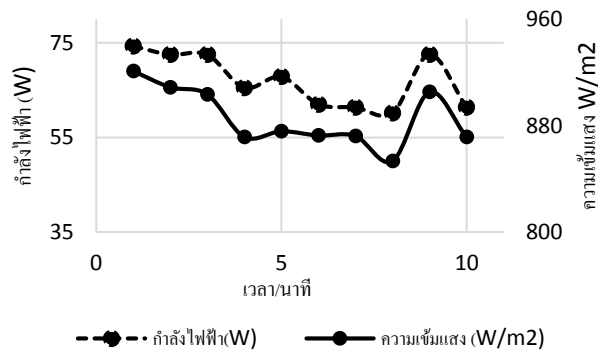
จากภาพที่ 14 แสดงให้เห็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ปั๊มน้ำจากไฟฟ้าระบบจำหน่ายและไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายจะแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นเส้นค่อนข้างอยู่ในระดับ

เรียบต่างจากการใช้ไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากการได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่สมดุลจึงทำให้ค่าพลังงานที่ได้รับไม่สมดุล



—●— ไฟฟ้าโซล่าเซลล์ - - - ● - - - ไฟฟ้าระบบจำหน่าย

ภาพที่ 14 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้

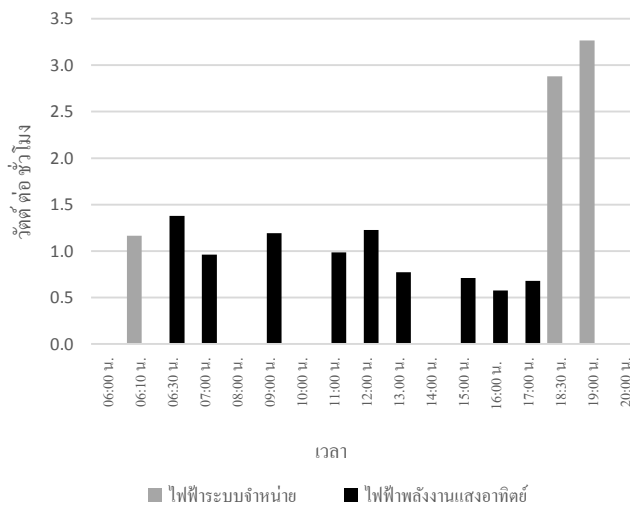


ภาพที่ 15 กราฟค่าความเข้มของแสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้า

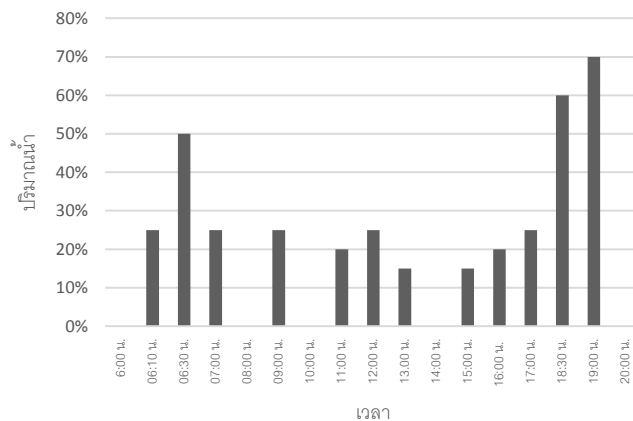
จากภาพที่ 16 พบว่ามีการใช้ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย โดยเริ่มมีใช้ไฟฟ้าโซล่าเซลล์ในช่วงเวลาเวลา 6:30 น.-17:00 น. และใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายที่เวลา 6:10 น. และ 18:30 น. ถึง 19:00 น. และช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำก็สัมพันธ์กับปริมาณการใช้น้ำที่แสดงไว้ในภาพที่ 17

จากภาพที่ 18 กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการปั้มน้ำ ณ บ้านหลังหนึ่งโดยทำการทดลองที่เวลา 6:00

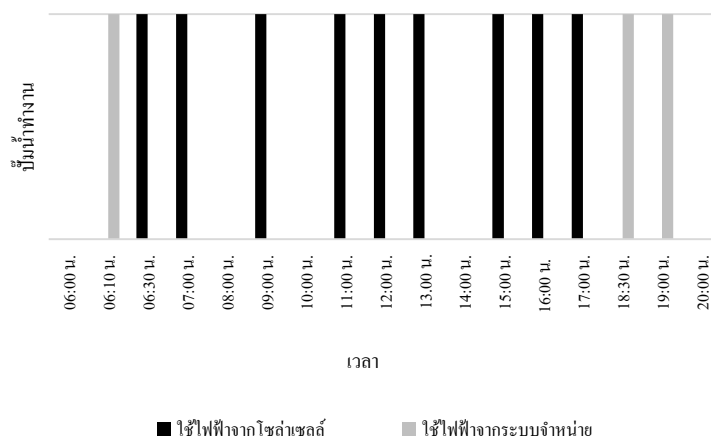
น. - 20:00 น. จากการทดลองจะได้กำลังไฟฟ้าจากการใช้ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 8.49 วัตต์/ชั่วโมง และได้กำลังไฟฟ้าจากการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายทั้งหมด 7.31 วัตต์/ชั่วโมง ดังนั้นการใช้ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมากกว่าการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย 1.17 วัตต์/ชั่วโมง หรืออัตราส่วนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต่อการใช้พลังงานจากระบบจำหน่ายคือ 54% ต่อ 46 % ทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไปถึงครึ่งหนึ่ง



ภาพที่ 16 กราฟการใช้ไฟฟ้าระหว่างแผงโซล่าเซลล์และไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย



ภาพที่ 17 กราฟปริมาณการสูบน้ำ



ภาพที่ 18 แหล่งพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้สูบน้ำ

อภิปรายผลการวิจัย

จากการทดลองปั้มน้ำระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยการทดลองปั้มน้ำมี 2 การทดลอง คือ 1.การทดสอบปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และ 2. การทดสอบปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย จากการทดลองทั้ง 2 แบบ โดยใช้ปั้มน้ำกระแสตรง 12 โวลต์ 180 วัตต์ ความลึกของบ่อน้ำ 3 เมตร และความสูงของถังเก็บน้ำ 2.50 เมตร

จากการทดลองการปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายจะปั้มน้ำได้ปริมาณน้ำที่ 18 ลิตร/นาท

ถ้าปั้มน้ำใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถปั้มน้ำได้ 17 ลิตร/นาท ทั้งนี้ การปั้มน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะไม่สามารถปั้มน้ำได้คงที่ตลอดเวลาเพราะว่าการปั้มน้ำจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ได้รับ ถ้าความเข้มแสงที่ได้รับมากปั้มน้ำก็จะสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ในการทดลองหาค่าความคุ้มค่าของระบบ โดยการนำไปติดตั้ง ณ บ้านหลังหนึ่ง แล้วบันทึกผลการทดลองช่วงเวลา 6:00 น. – 20:00 น. พบว่าสามารถประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายได้ถึง 50%

สรุป

การออกแบบและสร้างระบบปั๊มน้ำพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีแบตเตอรี่ประกอบที่ทำงานร่วมกับไฟฟ้าระบบจำหน่าย โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโปรแกรม Matlab/ Simulink สามารถควบคุมระบบปั๊มน้ำได้ทั้งหมด ทั้งการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งการใช้เทคนิค การเขียนโปรแกรมแบบบล็อกไดอะแกรมนี้สามารถพัฒนาได้ง่าย ระบบปั๊มน้ำไฮบริดนี้มีต้นทุนในการสร้างค่อนข้างต่ำเนื่องจากจะไม่มีอุปกรณ์ของระบบโซลาร์เซลล์อื่นๆเข้ามาประกอบ ทั้งอินเวอร์เตอร์และแบตเตอรี่

ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้ระบบนี้ ควรเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบภาคอินพุตชนิดที่ดีที่สุด เช่น ตัวต้านทานที่มีความผิดพลาด 0.1 เปอร์เซ็นต์ เพราะค่าความผิดพลาดของตัวอุปกรณ์มีผลกระทบต่อความผิดพลาดของการวัด และปัญหาที่พบบ่อยคือ เมื่อเขียนโปรแกรมให้บอร์ดประมวลผลมากเกิดไป ทำให้ความสามารถในการประมวลผลลดลง และตัวเลขที่อ่านได้ทางหน้าจอ LCD อาจมีค่าผิดพลาดไปจากค่าจริง เนื่องจากการแสดงผลที่ไม่นิ่ง ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดตามมา

เอกสารอ้างอิง

การใช้งานบอร์ดทดลอง STM32F4 Discovery.

สืบค้นจากเว็บไซต์ของบริษัท เอ็มเมจิน จำกัด
www.Aimagin.com.

นภัทร วัจนเทพินทร์. (2553). การติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตนเอง. ปทุมธานี. สกายบุ๊กส์.

พงศกร อมรพิทักษ์ และนรารักษ์ หลีสกุล. (2546).

พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์. วารสารสงขลานครินทร์. ฉบับที่25.

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์. สืบค้นจากเว็บไซต์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
www.egat.co.th.

สุทัศน์ ปฐมนุพงศ์. (2557). โซลาร์ปั๊มวิจัยได้จริงปั๊มสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่มีแบตเตอรี่. กรุงเทพมหานคร.

อนนท์ นำอินทร์. (2558). การประมาณการขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับครัวเรือน. เอกสารประกอบการสอนวิชาการระบบโพลีโวลตาอิก. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาล้านนา เชียงราย. ปีการศึกษา 2558, หน้า 344.

เครื่องผลิตน้ำดื่มจากอากาศด้วยวิธีควบแน่นจากคอมเพรสเซอร์กระแสตรง พลังงานแสงอาทิตย์

A Drinking Water Production Machine by Condensation from Solar DC Compressor

ปิยวัฒน์ ยาใจ¹, พีรวัฒน์ เหมืองสาม² และ นพพร พัชรประภิต^{3*}
Piyawat Yajai¹, Peerawat Maungsam² and Nopporn Patcharaprakiti^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

*Corresponding author E-mail: ppiyawat.yajai@gmail.com, pnopporn@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีนำเสนอเครื่องผลิตน้ำสะอาดจากอากาศ โดยน้ำที่ได้จากกระบวนการจะสามารถนำไปใช้เป็นน้ำดื่มสำหรับในบริเวณสถานที่ที่มีปัญหาการขาดแคลนน้ำดื่มของประชากรเช่นในพื้นที่ห่างไกลบนภูเขาหรือตามเกาะ หลักการผลิตน้ำใช้วิธีการควบแน่นของความชื้นจากไอน้ำในอากาศ โดยการดึงเอาโมเลกุลอากาศที่มีอยู่ทั่วไปเข้าไปผ่านกรองอากาศ (Air Filter) ก่อนเพื่อกรองฝุ่นควัน และสิ่งสกปรกเบื้องต้นและสร้างความเย็นจากคอมเพรสเซอร์ให้ถึงจุดน้ำค้าง (Dew point) เพื่อทำการควบแน่นไอน้ำให้กลายเป็นหยดน้ำ ซึ่งคอมเพรสเซอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ชนิดกระแสตรง ไร้แปรงถ่าน ขนาด 24 โวลต์ ขนาด ¼ แรงม้า รุ่น QDZH30G ที่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ จากนั้นน้ำที่ผลิตได้จะเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ได้ตามมาตรฐานน้ำดื่ม ผลการทดสอบพบว่า สามารถผลิตน้ำดื่มได้ในอัตรา 1 ลิตร/วัน และมีอัตราการใช้พลังงาน 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลิตร คิดเป็นต้นทุนน้ำจากค่าพลังงาน 3 บาท/ลิตร กรณีใช้พลังงานไฟฟ้า และค่าใช้ระบบ รวมถึงแผงแสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์ มูลค่า 20,000 บาท และจะใช้มีระยะเวลาคืนทุน 8 ปี และผลตอบแทนทางสังคม คือ ทำให้ประชากรมีน้ำสะอาดดื่ม เป็นการมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

คำสำคัญ: การควบแน่น, จุดน้ำค้าง, ปรับปรุงคุณภาพน้ำ, พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

This paper proposes method of drinking water production machine from atmospheric air. The water from the machine can be used for water shortage area which lack of drinking such rural or the island. The principle of water production is based on condensation method of steam or moisture content of water in the air. The process of production start from intake the atmospheric air into air filter in order to clean and remove smoke, dust and any particle. The second stage is to create the cold air for heat exchanger with atmospheric air until the dew point for condenses the drop of water. The cool air is made from DC Compressor rotary brushless motor ¼ hp 24 Volt type QDZH30G which can use solar energy. The final stage of water production is Reverse Osmosis (RO) water treatment by using drinking water standard. The result found that the water production rate is 1 liter/day and energy consumption for water production is 1 kWh/liter or electricity cost 3 Baht/liter. The cost of system including solar cell 120 W is 20,000 Bath. The economic analysis by using payback period is 8 years. The social beneficial is to make a better life for people in the rural area.

Keywords: Condensation, Dew point, Improve water quality, Solar Energy

บทนำ

น้ำ เป็นสารประกอบเคมีชนิดหนึ่ง มีสูตรเคมีคือ H_2O โมเลกุลของน้ำประกอบด้วยออกซิเจน 1 อะตอมและไฮโดรเจน 2 อะตอมเชื่อมติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ น้ำเป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน แต่พบบนโลกที่สถานะของแข็ง สถานะแก๊ส และของเหลว น้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อชีวิตบนโลก และปกคลุมถึง 70% บนพื้นผิวโลก แบ่งเป็นเป็นน้ำเค็ม 97.5% พื้นที่น้ำจืด เพียงประมาณ 2.5% น้ำจืด 2.5% นี้ แบ่งเป็นน้ำแข็งขั้วโลกเหนือ-ใต้ และบนเทือกเขาสูง 68.9% น้ำใต้ดิน 30.8% และน้ำในแม่น้ำและทะเลสาบ หรือที่เรียกว่าน้ำบนผิวดิน เพียง 0.3% (ASTV ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย, 2547) น้ำดื่มที่สะอาดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ แม้ว่าน้ำจะไม่มีแคลอรีหรือสารอาหารที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ใดๆ การเข้าถึงน้ำดื่มสะอาดได้เปลี่ยนแปลงไปในช่วงหลายศตวรรษที่ผ่านมาในเกือบทุกส่วนของโลก แต่ประชากรประมาณ 1 พันล้านคนยังคงขาดแคลนน้ำดื่มสะอาด นักสังเกตบางคนประมาณไว้ว่าภายในปี ค.ศ. 2025 ประชากรโลกมากกว่าครึ่งหนึ่งจะประสบปัญหาความเสี่ยงที่เกี่ยวกับน้ำ (Charting Our Water Future: Economic frameworks to inform decision-making, สืบค้นเมื่อ 9 มิถุนายน 2559) รายงานจากองค์การสหประชาชาติ ภายในปี 2568 ประชากรกว่า 7 พันล้านคนจาก 60 ประเทศ จะประสบภาวะขาดแคลนน้ำรุนแรงพื้นที่ที่ประสบการขาดแคลนน้ำรุนแรงขั้นวิกฤติ จะมีอัตราใช้น้ำประมาณ 1,000 ลูกบาศก์เมตร/คน/ปี พื้นที่ขาดแคลนน้ำรุนแรงรองลงมา เฉลี่ย อัตราใช้น้ำประมาณ 1,000-1,700 ลูกบาศก์เมตร/คน/ปี

เมื่อปี ค.ศ. 2012 นักศึกษาทีม 5 ของวิทยาลัยแคลิฟอเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา (Ben Niewenhuis, Chris Shepperly, Ryan Van Beek and Eric Van Kooten, 2012) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบ

และพัฒนาต้นแบบของระบบทำความสะอาดน้ำดื่มจากอากาศโดยใช้พลังงานทดแทน ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน และซ่อมแซมปรับปรุงได้ง่าย โดยสามารถผลิตน้ำได้อย่างน้อยหนึ่งลิตรต่อวัน

ปี 2014 วารสารนานาชาติวิจัยในคอมพิวเตอร์ขั้นสูง ประเทศอินเดีย (Aditya Nandy, Sharmi Saha, Souradeep Ganguly and Sharmistha Chattopadhyay, 2014) ได้ตีพิมพ์งานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างน้ำจากอากาศด้วยวิธีผันความร้อนจากไฟฟ้าโดยให้อากาศผ่านท่อด้านที่มีความเย็นและไปสู่ท่อด้านที่มีความร้อนทำให้อากาศเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำขึ้นมา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเอาอากาศทั่วไปมาสร้างเป็นน้ำด้วยกระบวนการควบแน่น โดยดึงอากาศเข้ามายังห้องที่สามารถทำความเย็นจนถึงจุดอากาศเกาะตัวเป็นผลึกน้ำแข็ง จากนั้นใช้ลมเป่าเพื่อให้น้ำแข็งนั้นละลายเป็นน้ำเก็บไว้ในถังเก็บน้ำ และเมื่อต้องการใช้งานปั๊มจะดูดส่งผ่านไปยังไส้กรองที่ให้มี 4 ขั้นตอนคือ กรองหยาบเพื่อกรองตะกอน กรองคาร์บอน เพื่อกำจัดรสชาติ กลิ่น สี กรองเรซินเพื่อกรองหินปูน และ กรองเมมเบรน(Membrane) เพื่อกำจัดเชื้อโรคต่างๆซึ่งมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับอนุของน้ำให้ได้น้ำที่สะอาดพร้อมดื่มออกมา โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทำให้สามารถนำไปใช้ได้ทุกสถานที่ที่ไม่มีไฟฟ้า ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำคือ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

วัตถุประสงค์

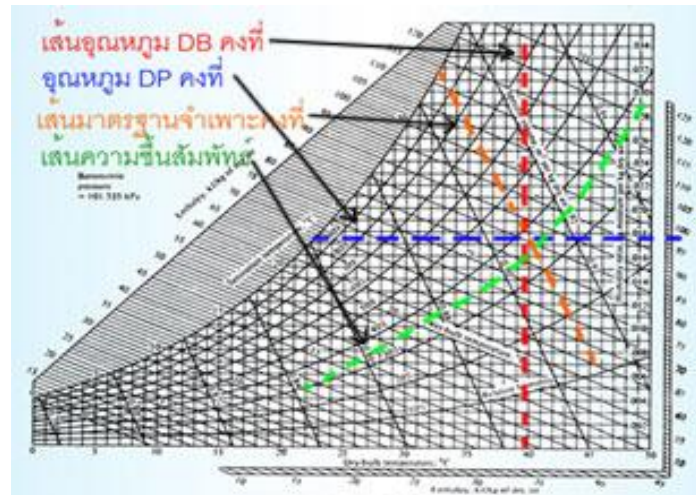
1. เพื่อสร้างเครื่องผลิตน้ำดื่มจากอากาศขึ้นมาโดยใช้วิธีให้ความเย็นกับอากาศจนถึงจุดที่อากาศนั้นสามารถเกาะตัวกันจนเป็นผลึกน้ำแข็ง
2. เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะและประสิทธิภาพเครื่องผลิตน้ำจากอากาศ

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติอากาศ

แผนภูมิไซโครเมตริกเป็นกราฟซึ่งแสดงคุณสมบัติของอากาศ ค่าที่กำหนดในแผนภูมิเป็นค่าที่

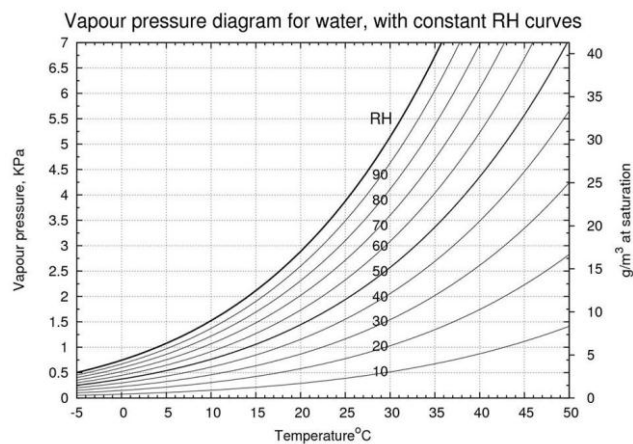
ได้จากอากาศมาตรฐานและที่ความกดของบรรยากาศ



ภาพที่ 1 แผนภูมิไซโครเมตริก ในองศาเซลเซียส

จากรูปที่ 1 จะแสดงถึงโครงสร้างทั่วไปของแผนภูมิไซโครเมตริกและคุณสมบัติพื้นฐานของอากาศคือ เส้นอุณหภูมิ DB คงที่ของแผนภูมิเป็นเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งคงที่(drybulb temperature) เส้นอุณหภูมิDP คงที่เป็นเส้นอุณหภูมิจุดน้ำค้างคงที่

(dew point temperature) และอัตราส่วนความชื้นคืออุณหภูมิที่อากาศสามารถควบแน่นเป็นน้ำได้ เส้นมาตรฐานจำเพาะคงที่เป็นเส้นปริมาตรจำเพาะคงที่และเส้นโค้งเป็นเส้นความชื้นสัมพัทธ์ (ภาควิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล, สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2558)



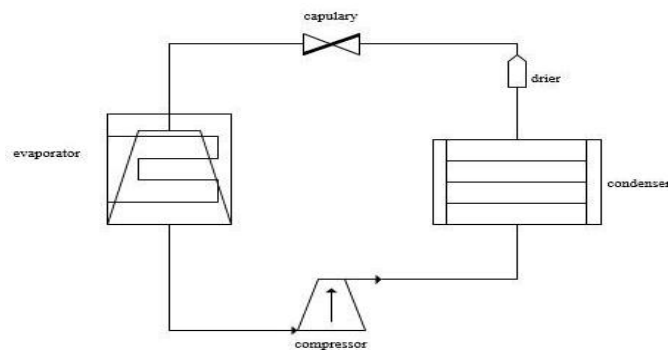
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่อากาศสามารถรับไว้ได้กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

จากรูปที่ 2 โดยแกนนอนเป็นอุณหภูมิจนในรูปขององศาเซลเซียส แกนตั้งด้านขวามือเป็นปริมาณไอน้ำที่มีในอากาศเป็นกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร แกนตั้งด้านซ้ายมือเป็นความดันไอ ส่วนแกนโค้งเป็นความชื้นสัมพัทธ์ จากแผนภูมิไซโครเมตริกในรูปที่ 1 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่อากาศสามารถรับไว้ได้กับอุณหภูมิจนและความชื้นสัมพัทธ์ในรูปที่ 2 สามารถสรุปได้ว่า อากาศเย็นมีความสามารถเก็บไอน้ำได้น้อยกว่าอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิจนของอากาศลดลงจนถึงจุดน้ำค้าง อากาศจะอิ่มตัวและไม่สามารถเก็บไอน้ำได้มากกว่านี้ หรืออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% หากอุณหภูมิจนยังคงลดต่ำไปอีก ไอน้ำจะควบแน่นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอย่างไรก็ตามนอกจากปัจจัยทางด้านอุณหภูมิจนและความกดอากาศแล้ว การควบแน่นของไอน้ำยังจำเป็นต้องมี “พื้นผิว” ให้หยดน้ำ เกาะตัว ยกตัวอย่าง เมื่ออุณหภูมิจนของอากาศบนพื้นผิวลดต่ำกว่าจุดน้ำค้าง ไอน้ำในอากาศจะควบแน่นเป็นหยดน้ำเล็กๆ เกาะบนใบไม้ใบหญ้าเหนือพื้นดิน บน

อากาศก็เช่นกัน ไอน้ำต้องการอนุภาคเล็กๆ ที่แขวนลอยอยู่ในอากาศเป็น แกนควบแน่น (Condensation nuclei) แกนควบแน่นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ (Hygroscopic) ได้แก่ ผุ่น ควัน เกสรดอกไม้ ไอเกลือ เป็นต้น ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.0002 มิลลิเมตร (LESA ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2558)

ระบบทำความเย็น

การทำความเย็น หมายถึง กระบวนการในการดึงความร้อนออกจากสิ่งใดสิ่งหนึ่งมีผลให้อุณหภูมิลดลงโดยปกติจะหมายถึง ขบวนการเก็บรักษาอาหารการขจัดความร้อนจากวัตถุในอุตสาหกรรมทางเคมี ปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และการทำความเย็นและการทำความเย็นในรูปแบบอื่นๆ ในวงการอุตสาหกรรม เช่น การแช่แข็ง เป็นต้น (ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง เครื่องทำความเย็น, สืบค้นจาก <http://webcache.googleusercontent.com/>)



ภาพที่ 3 วงจรเครื่องทำความเย็น

โดยมีหลักการทำความเย็นคือเริ่มต้นจากคอมเพรสเซอร์ จะทำหน้าที่ดูดน้ำยาที่เป็นไอจากเครื่องระเหย (Evaporator) หรือคอยล์เย็น (Cooling Coil) ไอสารทำความเย็นที่ดูดเข้ามาจะมีความดันต่ำ และมีอุณหภูมิต่ำด้วย ไอน้ำยาจะถูกดูดเข้าคอมเพรสเซอร์ทางท่อดูด (Suction Line) และตัวคอมเพรสเซอร์จะอัดน้ำยาที่เป็นไอให้มีความดัน

สูงขึ้น และขณะที่ไอมีความดันสูงขึ้นก็จะมีอุณหภูมิจนสูงขึ้น การที่ไอน้ำยาที่มีความดันสูงขึ้นนี้จะมีผลให้จุดเดือดสูงขึ้นด้วย จากนั้นไอน้ำยาจะถูกดันออกทางท่อทางส่ง (Discharge Line) และส่งผ่านไปยังคอนเดนเซอร์ (Condenser) ตัวคอนเดนเซอร์มีหน้าที่รับเอาไอน้ำยาไว้ และระบายความร้อนออกจากไอน้ำยาผ่านตัวกลางซึ่งปกติคืออากาศ ไอน้ำยา

จะมีอุณหภูมิต่ำลงจนควบแน่นเป็นของเหลวแต่ยังคงมีความดันสูง และอุณหภูมิสูง สารทำความเย็นเหลวจะถูกส่งไปอุปกรณ์ลดความดัน (Expansion Valve) ซึ่งมีหน้าที่ลดความดันน้ำยา ก่อนเข้าเครื่องระเหยมีผลให้สารทำความเย็น มีความดันต่ำ และมีอุณหภูมิต่ำ เมื่อไหลเข้าเครื่องระเหยก็จะรับความร้อนผ่านตัวกลาง ซึ่งปกติคืออากาศมีผลให้สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอ ไอสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหยจะมีความดันต่ำ และมีอุณหภูมิต่ำ และไหลกลับเข้าคอมเพรสเซอร์เพื่อทำการเพิ่มความดันต่อไป ระบบการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศจะทำงานวนเวียนเป็น วัฏจักรตลอดเวลาที่คอมเพรสเซอร์ ยังคงทำงานอยู่ และน้ำยาที่มีอยู่ในระบบจะไม่มี การสูญเสียไปไหนเลยนอกเสียจากว่าเกิดการรั่วซึม ที่ใดที่หนึ่งเท่านั้น เนื่องจากในระบบทำความเย็นเบื้องต้นนี้ มีทั้งน้ำยาที่อยู่ในสภาพความดันสูง และอุณหภูมิต่ำกับ ความดันต่ำอุณหภูมิต่ำ จึงมีการแบ่งออกเป็น 2 ทาง

1. ทางด้านสูง (High Side) ซึ่งจะเริ่มจากทางอัดของคอมเพรสเซอร์ ผ่านคอนเดนเซอร์จนถึงทางเข้าของอุปกรณ์ลดความดัน ส่วนนี้สารทำความเย็นจะมีทั้งความดัน และอุณหภูมิสูง

2. ทางด้านต่ำ (Low Side) ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ทางออกของอุปกรณ์ลดความดัน ผ่านเครื่องระเหยจนไปถึงทางเข้าของคอมเพรสเซอร์ส่วนนี้จะมีทั้งความดัน และอุณหภูมิต่ำ จึงเรียกว่าทาง Low Side ระบบปรับอากาศที่ใช้กันอยู่โดยทั่วๆ ไปจะทำงานเป็นวัฏจักร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

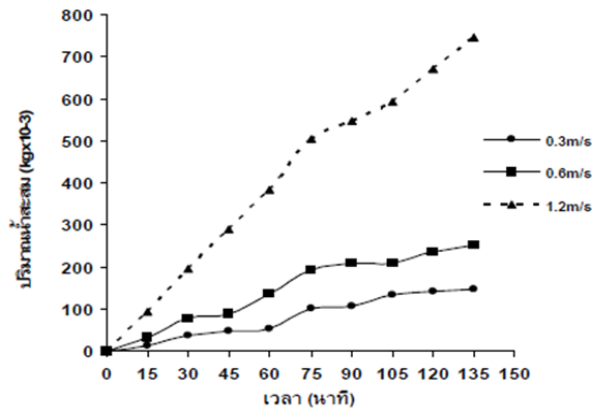
การผลิตน้ำจากอากาศ (นฤกร โล่อภิรักษ์กุล, บุษบา อมรพิสุทธิ์ และวิชชุ สุวรรณ, 2550) โดย โดยนักศึกษา ปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี พ.ศ. 2550 โดยวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบวิธีผลิตน้ำจากอากาศโดยให้ความร้อน กับให้ความเย็น และเปรียบเทียบความเร็วลมต่างๆ ที่จะมีผลกับการสร้างน้ำจากอากาศดังรูปที่ 4



ภาพที่ 4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การผลิตน้ำจากอากาศ

จากรูปที่ 4 เป็นการทดลองสร้างอุปกรณ์ให้ความเย็นโดยมีคอมเพรสเซอร์(Compressor 1/8 hp) คอยล์ร้อน(Condenser) และคอยล์เย็น(Evaporator) และมีเครื่องให้ความชื้น (รุ่น Sonic; input voltage:Ac 24โวลต์ ,500มิลลิแอมป์ ,12

วัตต์) และทดลองโดยใช้เวลา 3 ชั่วโมง ที่ความเร็วลมต่างๆ คือ 0.3, 0.6 และ 1.2 เมตรต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบความเร็วลมที่มีผลต่อการผลิตน้ำ มีผลสรุปได้ว่าความเร็วลมมีผลต่อการผลิตน้ำดังกราฟรูปที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมในระดับต่างๆ ในการผลิตน้ำจากอากาศ

จากรูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำจากอากาศ สรุปได้ว่าความเร็วลมนั้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่ได้ จะเห็นว่า

ความเร็วลมที่ 1.2 เมตรต่อวินาที จะสามารถผลิตน้ำได้ปริมาณที่มากกว่าความเร็วลม 0.6 เมตรต่อวินาที และ 0.3 เมตรต่อวินาที ในเวลาเดียวกัน

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบวิธีการผลิตน้ำระหว่างวิธีเพิ่มอุณหภูมิและ วิธีลดอุณหภูมิ

วิธีการทดลอง	ปริมาณน้ำที่ได้
ลดอุณหภูมิ	148g
เพิ่มอุณหภูมิ	102g

จากตารางที่ 1 มีการเปรียบเทียบการทดลองอยู่สองวิธีคือวิธีสร้างน้ำด้วยความร้อนคือการดูดอากาศเข้ามายังคอลล์ร้อน และเปรียบเทียบกับวิธีลด

อุณหภูมิ คือดูดอากาศเข้ามายังคอลล์เย็น ผลปรากฏว่าวิธีลดอุณหภูมิสามารถผลิตน้ำได้ในปริมาณที่มากกว่าวิธีเพิ่มอุณหภูมิ

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบระหว่างเปิดและไม่เปิดเครื่องทำความชื้น

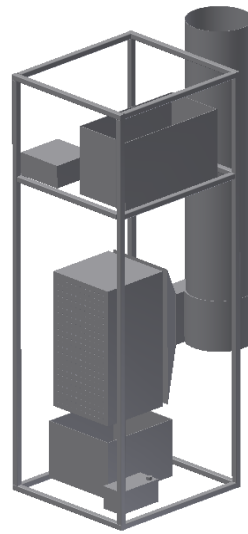
เครื่องทำความชื้น	ปริมาณน้ำที่ได้
เปิด	102g
ไม่เปิด	53g

จากตารางที่ 2 ทดลองการเปิดและไม่เปิดเครื่องทำความชื้น สรุปผลได้ว่าความชื้นในอากาศนั้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่ได้ โดยยิ่งความชื้นสูงจะได้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าจุดน้ำค้างจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความชื้น

สัมพัทธ์ดังรูปที่ 2 ยิ่งอากาศมีอุณหภูมิสูงจะสามารถเก็บน้ำไว้ได้มากโดยอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่จะเต็มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เมื่อเกินกว่านั้นน้ำอากาศจะไม่สามารถเก็บน้ำได้อีก และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดน้ำค้างไอน้ำที่มีก็จะกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ และกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง จากนั้น

ความเร็วลมจะมีผลคือเป่าให้น้ำแข็งนั้นละลาย กลายเป็นน้ำซึ่งพบว่าความเร็วลม อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ มีผลต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบของระบบทำความสะอาดน้ำดื่มจากอากาศโดยใช้พลังงานทดแทน (Ben Niewenhuis, Chris Shepperly, Ryan Van Beek and Eric Van Kooten, 2012) โดยนักศึกษาทีม 5 ของวิทยาลัยแคลิวิล ประเทศสหรัฐอเมริกา

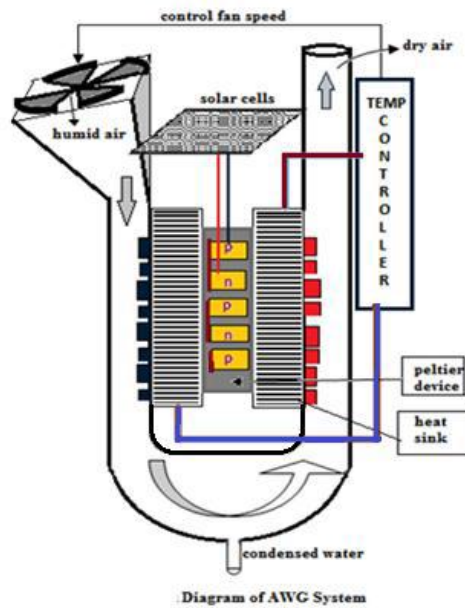


ภาพที่ 6 การออกแบบและพัฒนาต้นแบบของระบบทำความสะอาดน้ำดื่มจากอากาศโดยใช้พลังงานทดแทน

งานวิจัยนี้ออกแบบโดยใช้กังหันลมหมุนเทอร์บายเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้กระแสไฟฟ้าทำให้อากาศเย็น ส่งผลทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำจากไอน้ำจะกลายเป็นหยดน้ำโดยระบบในตัวเองและไม่จำเป็นต้องใช้การเชื่อมต่อจากภายนอก โดยมีวัสดุประสงค์คือน้ำที่ได้ผ่านมาตรฐานน้ำดื่มอนามัยโลก(WHO) มีความเรียบง่ายในการใช้งาน มีความสะดวกเรื่องพลังงานทั้งพลังงานลม และแสงอาทิตย์

อีกทั้งยังมีความสะดวกถึงการใช้งานและดูแลซ่อมแซม โดยผลที่ได้นั้นสามารถผลิตน้ำได้หนึ่งลิตรต่อวัน และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมระบบ

การสร้างน้ำจากอากาศด้วยวิธีผันความร้อนจากไฟฟ้า(Aditya Nandy, Sharmi Saha, Souradeep Ganguly and Sharmistha Chattopadhyay, 2014)



ภาพที่ 7 การสร้างน้ำจากอากาศด้วยวิธีผันความร้อนจากไฟฟ้า

จากรูปที่ 7 เป็นงานวิจัยที่สามารถสร้างน้ำจากอากาศได้โดยดูดอากาศเข้ามาผ่านพัดลมและไปยังท่อที่มีซิงค์ซึ่งด้านหนึ่งเย็น และอีกด้านหนึ่งมีความร้อน ดังนั้นอากาศจึงควบแน่นระหว่างตรงกลางทำให้น้ำหยดลงมา และใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์ แรงดัน 12 โวลต์ โดยมีการควบคุมด้วย PIC16F872 หรือ ATmega series microcontroller โดยสามารถผลิตน้ำได้สูงสุดหนึ่งลิตรในหนึ่งชั่วโมงก็

ต่อเมื่อมีความชื้นสูงมากขณะที่มีแสงอาทิตย์ให้พลังงานเพียงพอต่อระบบ

ในปี พ.ศ. 2554 นักศึกษาและอาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเมมเบรน(นักศึกษา และอาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554)



ภาพที่ 8 เครื่องกรองน้ำ ที่ออกแบบโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

จากรูปที่ 8 เป็นเครื่องกรองน้ำที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ได้ออกแบบมาโดยจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ ชนิดท่อเดี่ยว ชนิด 2 ท่อ และ ชนิด 3 ท่อ โดยชนิดท่อเดี่ยว จะมีเฉพาะไส้กรองเซรามิกเป็นส่วนประกอบ ส่วนชนิด 2 ท่อ และ ชนิด 3 ท่อนั้น จะเพิ่มสารกรองคาร์บอนเพื่อใช้กรองตะกอน กลิ่น สี คลอรีน สารอินทรีย์ และ สารกรองเรซิน เพื่อกรองหินปูน ลดความกระด้างในน้ำ และดูดซับสี ซึ่งมีขนาดเล็ก ง่ายต่อการพกพา อีกมีอายุการใช้งานที่นานกว่าไส้กรองปกติ

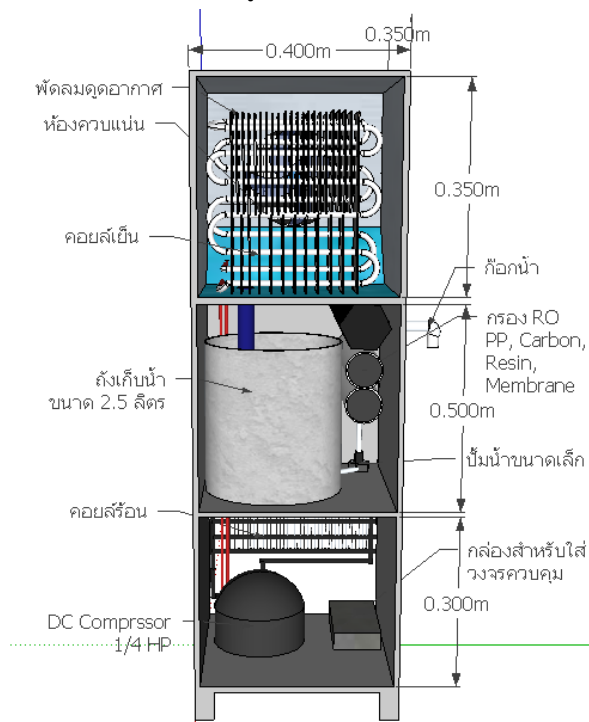
วิธีการทดลอง

ออกแบบโครงสร้างและหลักการทำงาน

ในการออกแบบโครงการงานการผลิตน้ำจากอากาศโดยแบ่งให้มี 2 ระบบคือ ระบบการผลิตน้ำจากอากาศหรือการควบแน่นอากาศ และระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยออกแบบดังนี้

ออกแบบชิ้นงานในส่วนแรกทำให้มีสามชั้นโดยชั้นบนสุดห้องควบแน่นมีขนาดกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.4 เมตร และสูง 0.35 เมตร โดยมีคอยล์เย็นวางอยู่

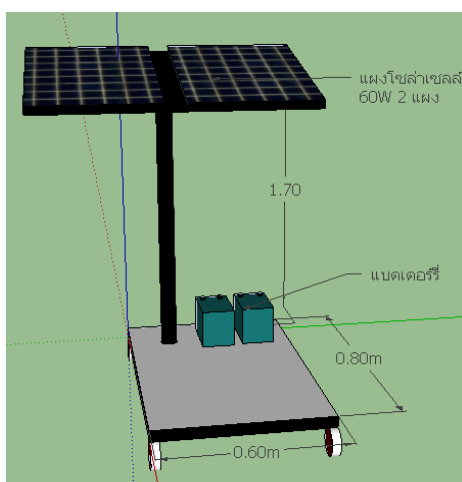
บนพื้นที่เอียง มีเจาะรูไว้เพื่อให้ไอน้ำไหลลงตามรู และมีพัดลมดูดอากาศขนานเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร 12 โวลต์ไฟกระแสตรง ไว้สำหรับดูดอากาศเข้ามาทำให้ผลึกน้ำแข็งละลาย และมีฟิลเตอร์ไว้สำหรับกรองอากาศก่อนที่จะเข้าไปยังส่วนควบแน่นด้วย จากนั้นส่วนที่สองตรงกลางมีขนาดกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.4 เมตร และสูง 0.5 เมตร ออกแบบไว้สำหรับใส่ถังเก็บน้ำใต้ห้องควบแน่น มีถังน้ำขนาด 2.5 ลิตร และมีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยใช้ระบบรีเวิร์ส ออสโมซิสซึ่งเป็นระบบกรองน้ำที่สะอาดมากที่สุดในปัจจุบัน โดยมีปั้มน้ำ 24 โวลต์ไฟกระแสตรงดูดน้ำ ด้วยความแรง 100 ปอนด์ มาผ่านกรองต่างๆ คือกรอง PP หรือกรองหยาบไว้สำหรับกรองตะกอนชิ้นใหญ่ต่างๆ จากนั้นกรองคาร์บอน ไว้สำหรับปรับรสชาติ น้ำ กลิ่น และสี จากนั้นกรองเรซิน เพื่อกรองหินปูนต่างๆ สุดท้ายจะเป็นกรองเมมเบรนซึ่งกรองเชื้อโรคและสิ่งต่างๆ ที่มีขนาดมากกว่าอนุของน้ำคือ 0.0001 ไมครอน ทำให้ได้น้ำที่สะอาดมากๆออกมาใช้สำหรับดื่มได้



ภาพที่ 9 ออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม sketchup

ส่วนล่างสุดเป็นสำหรับใส่คอมเพรสเซอร์ขนาด ¼ แรงม้า ไฟฟ้ากระแสตรง 12 ถึง 24 โวลต์ รุ่น QDZH30G เพื่อสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่

และพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้และมีกล่องสำหรับใส่ วงจรควบคุมทั้งหมดไว้

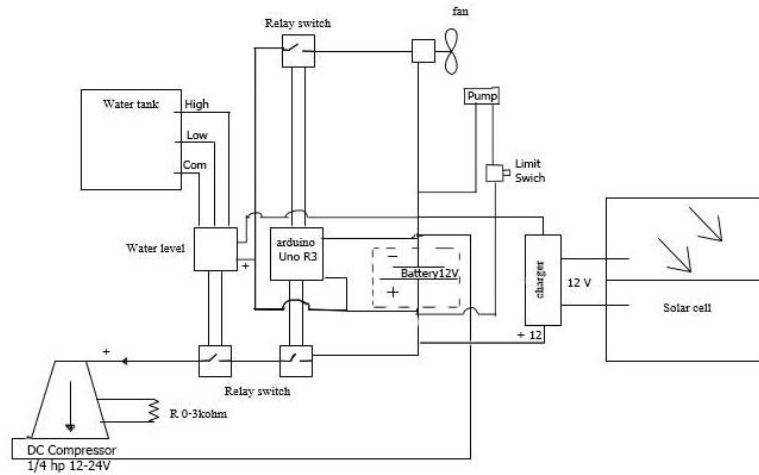


ภาพที่ 10 ออกแบบฐานวางพร้อมแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 10 ออกแบบฐานวางชิ้นงานที่มีความ กว้าง 0.6 เมตร ยาว 0.8 เมตร สูง 1.7 เมตร พร้อม ใส่แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 60 วัตต์ 2 แผง และมีช่องสำหรับใส่แบตเตอรี่ 2 ก้อน สำหรับใช้ นอกสถานที่ มีล้อสำหรับเคลื่อนย้ายสะดวก สามารถ ปรับมุมของแผงได้ และสามารถถอดเฉพาะชิ้นงาน เพื่อนำไปใช้งานภายในอาคารได้

ในรูปที่ 11 เป็นส่วนของวงจรควบคุม โดยเริ่ม จากใช้บอร์ด Arduino Uno R3 เป็นตัวควบคุมการ ทำงานของคอมเพรสเซอร์และพัดลมดูดอากาศโดย ใช้รีเลย์เป็นสวิตช์ตัดต่อโดยเขียนโค้ดโปรแกรม

ภาษาซีให้คอมเพรสเซอร์ทำงาน 20 นาทีเพื่อทำ ความเย็นให้เกิดการควบแน่นที่ห้องควบแน่นหาก เวลาน้อยเกินไปจะยังทำความเย็นไม่พอในการทำ ความเย็น แต่หากเวลามากเกินไปจะมีผลต่ออายุการ ใช้งานของคอมเพรสเซอร์ ดังนั้นจึงใช้ 20 นาทีให้ คอมเพรสเซอร์ทำงาน และ 10 นาทีให้พัดลมดูด อากาศทำงานเพื่อให้เป่าละลายผลึกน้ำแข็งที่เกาะกัน ภายในห้องควบแน่นจากนั้นอากาศเย็นที่ถู เป่าออก จะใส่ท่ออากาศเพื่อนำอากาศเย็นนั้นไประบายความ ร้อนให้คอมเพรสเซอร์อีกทีเพื่อให้ประหยัดพลังงาน ด้วย



ภาพที่ 11 วงจรควบคุม

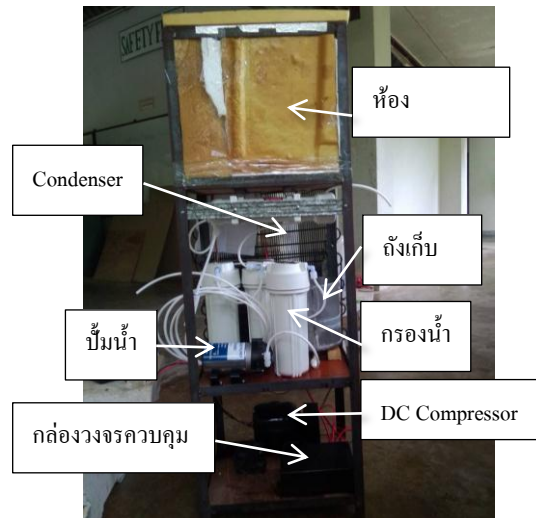
ส่วนเซนเซอร์ระดับน้ำ(Water level)จะมีอยู่ 3 ส่วนคือ Com, Low และ High จะติดตั้งหัวเซนเซอร์ไว้ที่ถังเก็บน้ำขนาด 2.5 ลิตร มีหลักการทำงานคือเมื่อผลิตน้ำได้จนถึงระดับ high วงจรจะตัดการทำงานของคอมเพรสเซอร์แต่เมื่อมีการใช้น้ำลดลงจนไปถึงระดับ low วงจรจะสั่งให้คอมเพรสเซอร์ทำงานอีกครั้งโดยที่บอร์ด Arduino ยังทำงานตลอด เพราะว่าถ้าหากระดับน้ำจาก high ถูกใช้จนถึงระดับ low ในเวลาอันสั้น คอมเพรสเซอร์จะไม่มีเวลาหยุดพักจึงอาจจะส่งผลต่ออายุการใช้งานได้ ดังนั้นจึงตั้งให้บอร์ด arduino สั่งงานตลอดเวลาเพื่อให้ระยะเวลาการทำงานเป็นปกติตลอดเวลา บั๊มน้ำขนาด 24โวลต์ โดยใช้น้ำเอาแบตเตอรี่อีกตัวมาต่ออนุกรมกับแบตเตอรี่ที่มีอยู่แล้วต่อเข้ากับบั๊มน้ำโดยผ่านลิมิตสวิตช์ เพื่อให้เวลาต้องการรดน้ำเหมือนตู้ต้นไม้

ทั่วไป ลิมิตสวิตช์จะสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานและดูน้ำจากถังเก็บน้ำผ่านไปยังกรองน้ำต่างๆและส่งมายังก๊อกน้ำทันที ส่วนตัวชาร์จเจอร์จะรับไฟจากแผงโซลาร์เซลล์และปรับแรงดันให้คงที่เพื่อชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่รีโนตอนกลางวันเพื่อเก็บไว้ใช้งานในช่วงเวลาที่ไม่มีแสง

ภายในห้องควบคุมชั้นบนสุดนั้นออกแบบโดยให้มีพื้นที่เอียงเพื่อให้ น้ำที่ได้นั้นไหลลงไปตามรูที่เจาะไว้สำหรับเก็บน้ำไว้ที่ละถังเก็บน้ำ ส่วนผนังของห้องนั้นใช้โฟมเป็นชั้นนอกสุดเพื่อเก็บความเย็นไว้ป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของน้ำนอกห้องควบคุมอาจส่งผลให้ส่วนอื่นๆเสียหายได้ จากนั้นใช้แผ่นสังกะสีเรียบเป็นชั้นในรองจากแผ่นโฟม แต่จะใช้เทปปะสังกะสีปิดไว้ทั้งหมดอีกที เพื่อป้องกันสนิมที่จะเกิดขึ้นกับสังกะสีข้างในได้ ดังรูปที่ 12



ภาพที่ 12 ภายในห้องควบคุม



ภาพที่ 13 ชิ้นงานจริงภายในเครื่อง



ภาพที่ 14 ชิ้นงานจริงที่เสร็จสมบูรณ์

เครื่องผลิตน้ำจากอากาศรุ่นต้นแบบนั้น มีการต่อท่ออากาศจากห้องควบแน่นลงมาเพื่อระบายความร้อนให้แก่คอมเพรสเซอร์ ใส่งឹอกน้ำและมีสวิตช์กักน้ำ โดยใช้ตัดต่อบั๊มน้ำเพื่อดูดน้ำจากถังเก็บน้ำมายังระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำและไปยังกឹอกน้ำดื่ม ห้องล่างสุดเป็นส่วนสำหรับใส่งឹอกน้ำและกล่องสำหรับใส่งจรรควบคุมทั้งหมด โดยต่อพลังงานจากแบตเตอรี่ทั้งสองก้อนที่วางอยู่ด้านข้าง

ส่วนแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 60 วัตต์ ทั้งสองแผงนั้นต่อขนานกันให้ได้กำลังไฟฟ้า 120 วัตต์เพื่อเพียงพอต่อการใช้งานทั้งกลางวันและกลางคืน ต่อมายังวงจรรีจเจอร์ก่อนเข้าแบตเตอรี่และระบบ โดย

แผงโซลาร์เซลล์นั้นสามารถปรับมุมองศาได้ตามต้องการเพื่อให้รับแสงได้เต็มที่

ผลการวิจัย

เริ่มต้นจากการทดลองเดินเครื่องไว้ที่สภาพอากาศต่างๆเป็นเวลา 10 วันและได้บันทึกผลการทดลอง ค่าต่างๆ มีทั้งตัวแปรจากธรรมชาติ และค่าที่คำนวณได้ คือ อุณหภูมิขณะทำการทดลอง ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แต่ไม่มากซึ่งจะนำค่าเฉลี่ยมาบันทึก ความชื้นสัมพัทธ์ในขณะทดลอง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน จึงนำค่าเฉลี่ยมาบันทึกผล จุดน้ำค้าง โดยทั้งสามค่านี้วัดจากเครื่องวัดอุณหภูมิและ

ความชื้น ปริมาณไอน้ำที่มีในอากาศเป็นกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร ดูได้จากกราฟ รูปที่ 2 โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ น้ำที่ผลิตได้ต่อชั่วโมง บันทึกค่าได้จากการทดลองโดยใช้ปั๊ปกเกอร์ น้ำที่ผลิตได้ต่อวัน ได้ค่าจากการคำนวณ และทดลอง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ในช่วงคอมเพรสเซอร์ทำงาน กระแสไฟฟ้าในช่วงพัดลมทำงาน ได้ค่าจากการวัดด้วยมัลติมิเตอร์ดิจิตอล กำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมง ได้จากการคำนวณด้วยสมการ

$$P(\text{Whr}) = \frac{(40\text{นาท} \times 12\text{V} \times I_{40\text{min}}) + (20\text{นาท} \times 12\text{V} \times I_{20\text{min}})}{60\text{นาท}} \quad (5.1)$$

$P(\text{Whr})$ คือค่ากำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมง

$I_{40\text{min}}, I_{20\text{min}}$ คือค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำงาน

กำลังไฟฟ้าต่อวันได้จากการคำนวณด้วยการเอากำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงคูณ 24 ชั่วโมง กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนึ่งลิตรได้ค่าจากการคำนวณโดยใช้สมการ

$$P_{\text{Litter}} = \frac{P_{\text{hr}} \times 1000}{\text{ปริมาณน้ำ}_{\text{g/hr}}} \quad (5.2)$$

P_{Litter} คือกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนึ่งลิตร

P_{hr} คือกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งชั่วโมง

ปริมาณน้ำ_{g/hr} คือปริมาณน้ำที่ได้ในหนึ่งชั่วโมง

ค่าไฟฟ้าต่อน้ำหนึ่งลิตร และค่าไฟฟ้าต่อหนึ่งวัน โดยค่าไฟหน่วยละ 3 บาท สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าไฟ} = \frac{E \times 3\text{บาท}}{1000\text{Wh}} \quad (5.3)$$

E คือ พลังงานไฟฟ้าต่อวันหรือต่อลิตร

คำนวณจุดคุ้มทุนโดยนำดีบรจขวดขนาดหนึ่งลิตรทั่วไปขายอยู่ที่ราคาขวดละ 10-12 บาท เราผลิตได้ที่หนึ่งลิตรในราคา 3 บาทต่อวัน ต้นทุนการทำวิจัยและสร้างชิ้นงานใช้งบประมาณ 20,000 บาท สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \frac{20,000 \text{ บาท}}{(10_{\text{ราคาขวด}} - 3_{\text{ต้นทุน}}) \times 365 \text{ วัน}} = 7.8 \text{ ปี} \quad (5.4)$$

จากการคำนวณจุดคุ้มทุนตามสมการที่ 5.4 โดยอ้างอิงราคาน้ำดื่มอยู่ที่ลิตรละ 10 บาท จะคุ้มทุนภายในเวลาประมาณ 8 ปี

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกผลการทดลอง

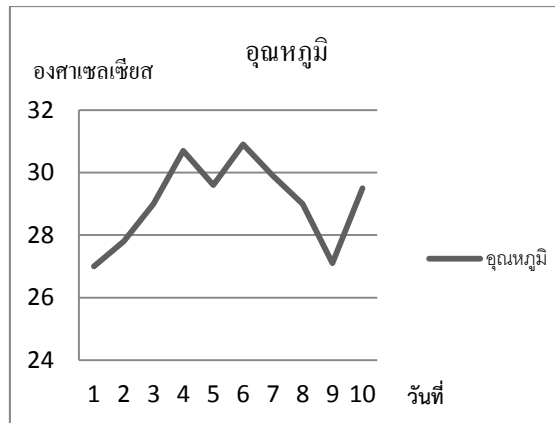
การทดลองครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)	ความชื้นสัมพัทธ์%RH (%)	จุดน้ำค้าง dew point (°C)	ปริมาณน้ำที่มีในอากาศ (g/m ³)	น้ำที่ผลิตได้ต่อชั่วโมง (g/hr)	น้ำที่ผลิตได้ต่อวัน(ลิตร/วัน)	แรงดันไฟฟ้า (v)	กระแสไฟฟ้า(A)		พลังงานไฟฟ้าต่อชั่วโมง(Wh)	พลังงานไฟฟ้าต่อวัน (Wh/Day)	พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยหนึ่งลิตร(Wh/L)	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย 1 ลิตร(บาท)	ค่าไฟฟ้าต่อวัน(บาท)
								เวลา 40 นาที	เวลา 20 นาที					
1	27	88	24.8	29	50	1.2	12	5.05	0.76	44	1056	880	2.64	3.168
2	27.8	76	23.1	25	50	1.2	12	6.84	0.75	58	1392	1160	3.48	4.176
3	29	74	22	25	50	1.2	12	7.07	0.75	60	1440	1200	3.6	4.32
4	30.7	64	23.5	23	40	0.96	12	6.4	0.75	54	1296	1350	4.05	3.888
5	29.6	70	23.4	23	40	0.96	12	6.5	0.76	55	1320	1375	4.13	3.96
6	30.9	66	23.8	23	40	0.96	12	5.9	0.76	50	1200	1250	3.75	3.6
7	29.9	68	23.4	23	40	0.96	12	6.3	0.8	54	1296	1350	4.05	3.888
8	29	78	24.5	26	50	1.2	12	6.2	0.76	53	1272	1060	3.18	3.816
9	27.1	88	24.8	29	50	1.2	12	6.15	0.76	53	1272	1060	3.18	3.816
10	29.5	75	23.1	25	50	1.2	12	6.31	0.76	54	1296	1080	3.24	3.888

จากตารางที่ 3 เห็นได้ว่ามีตัวแปรที่ไม่สามารถกำหนดได้คือ อุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวแปรที่สามารถลดได้คือค่ากำลังไฟฟ้า คือถ้าหากเอาลมเย็นเป่าเข้าที่คอมเพรสเซอร์ช่วยระบายความร้อนจะทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงมาส่วนหนึ่งซึ่งทำให้ค่าไฟฟ้าลดลงตามมาเช่นกัน และแรงดันไฟฟ้าใช้อยู่ที่ 12 โวลต์ตลอด ปริมาณน้ำที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเช่นกันถ้าหาก

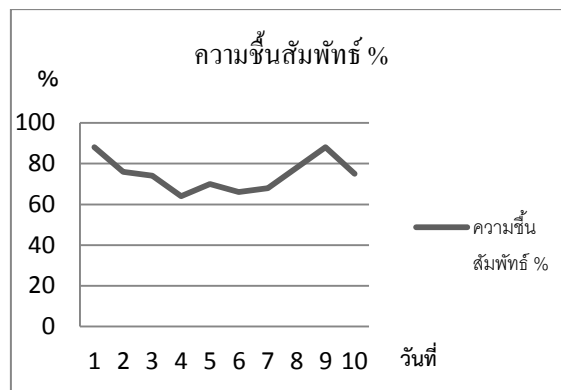
ความชื้นสัมพัทธ์มาก ปริมาณน้ำที่ผลิตได้ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

อภิปรายผลการวิจัย

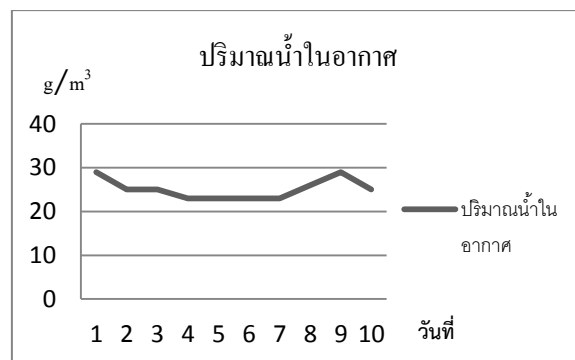
จากการบันทึกผลการทดลอง เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำที่ผลิตได้มาแสดงด้วยกราฟ จะเห็นแนวโน้มและความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 15-16



ภาพที่ 15 อุณหภูมิตในแต่ละวันขณะทดลอง



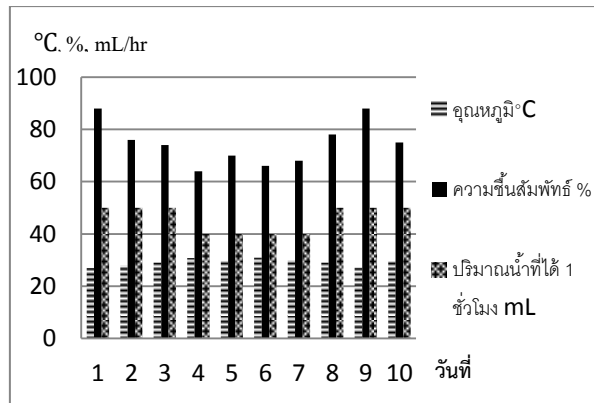
ภาพที่ 16 ความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละวันขณะทดลอง



ภาพที่ 17 ปริมาณน้ำในอากาศในแต่ละวันขณะทดลอง

จากกราฟรูปที่ 15 และ 16 แสดงถึงอุณหภูมิตในอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีในแต่ละวัน

ขณะทดลองส่งผลต่อปริมาณน้ำที่มีในอากาศดังกราฟรูปที่ 17 และสามารถสรุปได้ดังกราฟรูปที่ 18



ภาพที่ 18 ปริมาณน้ำที่ได้ต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

จากรูปที่ 18 แผนภูมิแสดงปริมาณน้ำที่ผลิตได้ต่อ อุณหภูมิในอากาศขณะทดลอง และความชื้นสัมพัทธ์ขณะทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามาก แสดงว่าไอน้ำที่อยู่ในอากาศ มีจำนวนมาก จะทำให้สามารถผลิตน้ำออกมาได้มากขึ้นตาม ยกตัวอย่างเช่นวันที่ 1 ของการทดลองมีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 88% เมื่อดูจากรูปที่ 2 แล้วจะมีไอน้ำในอากาศอยู่จำนวน 29 กรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร ดังนั้น ในหนึ่งชั่วโมงจึงสามารถผลิตน้ำได้ถึง 50 มิลลิเมตรในหนึ่งชั่วโมง และในวันที่ 4 ของการทดลองซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ 30.7 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 64% และมีไอน้ำในอากาศอยู่ที่ 23กรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตน้ำได้

จำนวน 40 มิลลิเมตรในหนึ่งชั่วโมง ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับวันที่ 1

การทดสอบคุณภาพของน้ำ

ทดสอบคุณภาพของน้ำดื่มที่ผลิตจากอากาศ ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยอ้างอิงมาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภคในภาชนะที่บรรจุปิดสนิท ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 256) พ.ศ. 2524 เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท(ฉบับที่ 4)(ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, ฉบับที่ 256 และน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท, ฉบับที่ 4) ทดสอบโดยห้องปฏิบัติการเคมี และอาจารย์ผู้เชี่ยวชาญด้านวิชาเคมี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆเบื้องต้น ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำ

ข้อมูล	มาตรฐาน	ก่อน	หลัง
ความเป็นกรด-ด่าง (PH)	6.5-8.5	6.70	7.8
ของแข็งแขวนลอย (TDS)	ไม่เกิน 1000 mg/L	128 mg/L	9.5 mg/L
ค่าการนำไฟฟ้า(EC)	0.005-0.05 S/m	0.2 S/m	0.04 S/m

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณภาพความสะอาดของน้ำเบื้องต้น ได้ผลการทดสอบว่า คุณภาพของน้ำที่ผลิตจากอากาศนั้น หลังจากผ่าน

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้ผ่านมาตรฐานการบริโภค

สรุป

จากการศึกษาและทดลองงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบผลิตน้ำสะอาด จากกระบวนการควบแน่น โดยใช้คอมเพรสเซอร์กระแสตรงทำความเย็นเพื่อทำให้น้ำลดต่ำกว่าจุดน้ำค้าง และเกิดหยดน้ำขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำที่ได้ออกมานั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัยมีทั้งทางกล ทางไฟฟ้า และสภาพแวดล้อมต่างๆเช่นขณะทดลอง มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม กำลังของคอมเพรสเซอร์ ขนาดพัดลมดูดอากาศ การควบคุมการระเหยของน้ำที่ควบแน่นก่อนที่จะกลายเป็นหยดน้ำ โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบการผลิตน้ำจากทั้งห้องควบแน่นให้มีพื้นที่ลาดเอียง พัดลมดูดอากาศในขนาดที่เหมาะสม รวมไปถึงกำลังอัดของคอมเพรสเซอร์ด้วยเช่นกันที่จะอัดสารทำความเย็นชนิด 134a เข้าไปยังระบบทำให้ห้องควบแน่นมีอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การผลิตน้ำจากอากาศออกมาให้ได้มากที่สุด และผลที่ได้ออกมานั้นเป็นน้ำสะอาดที่มีราคา 3-4 บาทต่อลิตร ใช้พลังงานประมาณ 1 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลิตร และยังสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงมาใช้งานทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ทุกที่ แต่ก็ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในที่นั้นๆว่าสามารถผลิตน้ำได้มากน้อยเพียงใด แต่หากเป็นสภาพแวดล้อมที่ขาดแคลนน้ำดื่ม พลังงานจำนวนนี้จะถือว่าเป็นพลังงานที่คุ้มค่ามาก

และจากการทดสอบวัดคุณภาพน้ำดื่มโดยห้องปฏิบัติการเคมี และอาจารย์ผู้เชี่ยวชาญด้านวิชาเคมี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย โดยอ้างอิงค่ามาตรฐานจากมาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภคในภาชนะที่บรรจุปิดสนิท ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 256) พ.ศ. 2524 เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท(ฉบับที่ 4) พบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพนั้นสะอาดผ่านมาตรฐาน และสามารถดื่มได้โดยไม่มีอันตรายใดๆ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงรายที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและทุนสนับสนุนการดำเนินโครงการ

เอกสารอ้างอิง

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง เครื่องทำความเย็น.

สืบค้นจาก <http://webcache.googleusercontent.com/>.

นฤกร โล่อภิรัชกุล, บุชบา อมรพิสุทธิ์ และวิชชุ

สุวรรณ. (2550). การผลิตน้ำจากอากาศ.

มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นักศึกษา และอาจารย์คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2554)

งานวิจัยเพื่อคุณภาพชีวิตชุมชนใช้เทคโนโลยีเมมเบรน ทำเครื่องกรองน้ำคุณภาพสูง-ราคาต่ำ.

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล. คณะครุศาสตร์

อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. สืบค้นเมื่อ

1 ธันวาคม 2558, จาก [http://mte.kmutt.](http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Refrigeration/Website/unit3_5.htm)

[ac.th/elearning/Refrigeration/Website/unit3_5.htm](http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Refrigeration/Website/unit3_5.htm).

มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภคในภาชนะที่บรรจุปิด

สนิท. **ประกาศกระทรวงสาธารณสุข.** (ฉบับที่

256). **น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท.**

(ฉบับที่ 4).

Aditya Nandy, Sharmi Saha, Souradeep

Ganguly and Sharmistha Chattopadhyay.

(2014). **A Project on Atmospheric Water**

Generator with the Concept of Peltier

Effect.

ASTV ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. (2547). ผู้จัดการ
ออนไลน์. สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2558, จาก
<http://astv.mobi/AOAQDWk>.

Ben Niewenhuis, Chris Shepperly, Ryan Van
Beek, Eric Van Kooten. (2012). **Team 5:
Water from Air**. Calvin College.

Charting Our Water Future: Economic
frameworks to inform decision-
making. สืบค้นเมื่อ 9 มิถุนายน 2559.

LESA ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์.
สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2558, จาก
[http://212/6/clouds/clouds_precip/
clouds_precip.html](http://212/6/clouds/clouds_precip/clouds_precip.html).

การศึกษาลักษณะเสื่อมสภาพฉนวนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างในระบบ 22 กิโลโวลต์

Study of Feature Deterioration of Insulator Metal-Oxide Surge Arrester in 22 kV System

วิชชฐ์ ทิพประเสริฐ^{1*}, จิตริน โกมล² และ วุฒิพงษ์ ตันหนองคู³

Wichet Thipprasert^{1*}, Jittarin Gomom² and Wutthipong Tonnongdo³

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

* Corresponding author e-mail: wichet_thip@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันในระบบจำหน่ายไฟฟ้านิยมนำกับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างหรือแบบใช้ยางซิลิโคนเป็นฉนวนโครงสร้างหุ้มภายนอกมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายแต่ยางซิลิโคนที่ใช้ทำฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็น เวลานานจึงเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ บทความนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาลักษณะเสื่อมสภาพฉนวนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างในระบบ 22 กิโลโวลต์ โดยทดสอบตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60099-4 เริ่มจากออกแบบและสร้างห้องทดสอบกับดักเสิร์จภายใต้การจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลายซึ่งประกอบไปด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ต หมอกไอเกลือ ฝนและความชื้น จากนั้นทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง 1,000 ชั่วโมง เพื่อวัดปริมาณกระแสรั่วไหลและวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ ผลการทดสอบพบว่าปริมาณกระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาทดสอบมากขึ้น การเสื่อมสภาพฉนวนยางซิลิโคนเกิดจากการได้รับผลกระทบจากความเครียดทางสนามไฟฟ้า สภาวะความเครียดต่าง ๆ ในการทดสอบและจากการเกิดดีสชาร์จเป็นเวลานาน นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างชิ้นส่วนของฉนวนยางซิลิโคนไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง พบว่ามีร่องรอยของการผุกร่อนบนพื้นผิวฉนวนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการสูญเสียคุณสมบัติฉนวนน้ำสิ้นและนำไปสู่การเสื่อมสภาพในที่สุด

คำสำคัญ: กับดักเสิร์จฟ้าผ่า, กระแสรั่วไหล, ลักษณะเสื่อมสภาพฉนวนยางซิลิโคน

Abstract

Presently, lightning surge arresters with silicone rubber housing are widely used in distribution systems. Silicone rubber is used to make insulating polymer made from organic materials. When it is operating under different environments for a long time, the deterioration of the insulation will occur. This paper presents the experimental deterioration study of silicone rubber housing material for 22 kV. Lightning surge arresters were tested under artificial accelerated ageing to provide based on IEC 60099-4 specifications. The test procedure starts by design and built a chamber to test a lightning surge arrester to provide conditions of stress. These conditions include the ultraviolet radiation, salt fog, rain and humidity, over 1000 hrs. The insulation was continuously tested to measure the leakage current and to analysis the deterioration of lightning surge arrester. The results showed that the amount of leakage current rose with the number of tests. The deterioration of the silicone rubber insulation affected by the electric field, stress conditions and long duration of discharges. Moreover, the analysis of the insulating silicone rubber reveals that there were traces of corrosion on the surface, which causes the loss of hydrophobic properties and ageing deterioration of the insulating silicone rubber.

Keywords: Lightning arrester, Leakage Current, Silicone rubber insulation feature deteriorate

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์และเกิดการขยายตัวตามความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การจำหน่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี ความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าคือปัจจัยความสำคัญ ระบบฉนวนเป็นส่วนหนึ่งของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าให้ได้ตามความต้องการใช้งานอย่างต่อเนื่องและไม่เกิดข้อผิดพลาด จึงต้องมีระบบป้องกันที่จะช่วยส่งเสริมความเป็นเสถียรภาพของการส่งจ่ายไฟฟ้าให้สม่ำเสมอและดียิ่งขึ้นในปัจจุบันและอนาคต

การป้องกันแรงดันเกินเสิร์จในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบมีโอกาสได้รับแรงดันเกินเสิร์จจากฟ้าผ่า แรงดันเกินเสิร์จสวิตชิง และแรงดันเกินชั่วขณะ การป้องกันจึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ ป้องกันเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องได้รับการป้องกัน

กับดักเสิร์จฟ้าผ่าเป็นอุปกรณ์ป้องกันชนิดหนึ่งที่ใช้ในงาน ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จที่จะเกิดขึ้น คุณสมบัติการทำงานในสถานะแรงดันใช้งานปกติจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง เมื่อมีกระแสเสิร์จเข้ามาในระบบเพิ่ม มากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ก็ลดลงเพื่อขจัดกระแสเสิร์จที่เข้ามาในระบบลงสู่พื้นดินได้อย่างสะดวกจะช่วยให้อุปกรณ์ที่อยู่ไม่ได้รับอันตรายและปลอดภัย

การนำกับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนพอลิเมอร์มาใช้งานมีข้อดี คือ แรงตึงผิวต่ำทำให้ผิวของฉนวนมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่น จึงมีสมรรถนะทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเปรอะเปื้อนและ สภาวะเปียกชื้น นอกจากนี้ยังมีอัตราส่วนความทนทานแรงกลต่อน้ำหนักสูงกว่าฉนวนแบบธรรมดา ซึ่งจะทำให้การ ออกแบบสร้างกะทัดรัดและง่ายต่อการบำรุงรักษาสายส่งระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าได้สะดวกรวดเร็วขึ้นอีกด้วย แต่ข้อเสียของกับดักเสิร์จ

ฉนวนพอลิเมอร์คือ ยางซิลิโคนทำมาจากสารอินทรีย์เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานานและมีอาร์กจากแถบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผิวฉนวนจะเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อใช้งานไปนาน ๆ อาจสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ป้องกันระบบสายส่งไฟฟ้า

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมเป็นสาเหตุสำคัญในการเสื่อมสภาพของกับดักฟ้าผ่าเสิร์จฉนวนพอลิเมอร์ที่ใช้งานในบริเวณที่มีปัญหาด้านมลภาวะแวดล้อมจึงเป็นสาเหตุที่มาของบทความวิจัย เพื่อศึกษาและทดสอบลักษณะเสื่อมสภาพฉนวนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างในระบบ 22 กิโลโวลต์ ภายใต้สภาพความเครียดต่าง ๆ ในการใช้งาน อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60099-4 (IEC 60099-4. Edition,2.1., 2006-7)

กับดักเสิร์จหรือกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าและแรงดันเกินเสิร์จสวิตชิง ใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอกเตอร์ หรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย จะต่อพร้อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน มีหน้าที่การป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจากโอเวอร์โวลต์เตจ ในระบบไฟฟ้าที่ทำงานตามปกติ (ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล, 2552) กับดักเสิร์จฟ้าผ่าจะต้องไม่มีผลใด ๆ กับระบบ เมื่อเกิดเสิร์จขึ้นในวงจรไฟฟ้าต้องทำงานและยังสามารถทนทานต่อแรงดันเกินได้โดยไม่เกิดความเสียหาย คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าจะมี 3 ประการ คือ

- 1) ในระหว่างที่มีเสิร์จเกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้า กับดักเสิร์จจะช่วยจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าจะทนทานได้
- 2) มีความสามารถในการเป็นตัวที่ดูดซับพลังงานที่ดีเพียงพอ สำหรับกับดักเสิร์จส่วนใหญ่ที่อาจเกิดขึ้นได้ เพื่อให้การทำงานของระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพ

3) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่มีความต้านทานสูง ในระหว่างที่ระบบไฟฟ้าทำงานตามปกติ เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดหรือผลเสียหายต่อการจ่ายไฟฟ้า

กับดักเสิร์จฟ้าผ่าจะประกอบด้วย ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (R_{non}) มี 2 ชนิด คือ ชนิดมีช่องว่างอากาศ (Gap Type, Passive Gap, Active Gap) คือกับดักเสิร์จชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และ ชนิดไม่มีช่องว่างอากาศ (Gapless Type) คือกับดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ (Metal Oxide Varistor: MOV) หรือออกไซด์สังกะสี (Zinc Oxide: ZnO) มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทรงกระบอก ประกอบตั้งอยู่ในกระบอกฉนวนได้แก่ พอร์ซเลนหรือยางซิลิโคน (สำรวย สังข์สะอาด, 2549)

ลักษณะเส้นแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จ โดยพิจารณา จากค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งชนิด ZnO และ SiC ที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่สามารถนำมาเขียนอยู่ในรูปสมการคือ

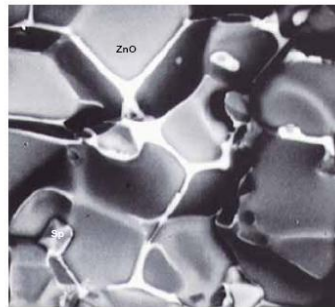
$$I = kV^\alpha \quad (1)$$

เมื่อ I คือค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของ R_{non}

$\alpha = 4-6$ สำหรับ SiC

$\alpha = 20-50$ สำหรับ ZnO

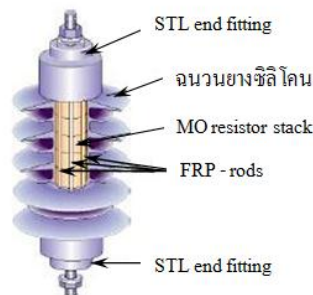
k คือค่าคงตัวขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของแกน R_{non} ถ้าแกนยิ่งเล็กความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูงขึ้นดังภาพ



ภาพที่ 1 โครงสร้างของฉนวนยางซิลิโคน (A. Haddad and D. Warne, 2004)

กับดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ หรือ ZnO จะใช้ค่า R_{non} ที่ทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกันบรรจุในกระบอกฉนวนดังรูปที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง ZnO จะเป็น ตัวกำหนดขนาดของกระแส หรือพลังงานเสิร์จที่ยอมให้ ผ่าน ส่วนความสูงจะเป็นตัวกำหนดแรงดัน

โครงหุ้มของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างทำจากพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีข้อได้เปรียบกว่าชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ คือสามารถกำจัดกระแสตามที่เกิดขึ้นหลักจากกระแส อิมพัลส์ได้ดีกว่าอีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมดีกว่า

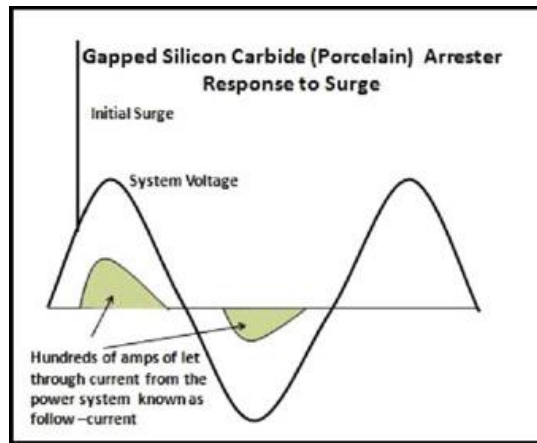


ภาพที่ 2 โครงสร้างของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคน (IEEE C62.1., 1989)

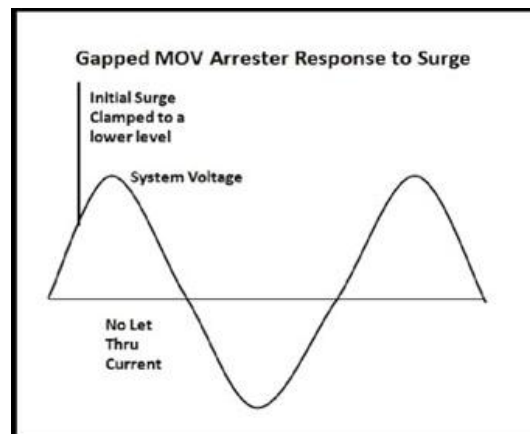
สมรรถนะทางไฟฟ้าของกับดักเสิร์จ

สมรรถนะของกับดักเสิร์จชนิด MOV เป็นการหาค่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางความร้อนของวาริสเตอร์ การเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานของกับดักเสิร์จชนิด SiC กับ MOV ซึ่งกับดักเสิร์จชนิด

MOV จะมีคุณลักษณะการทำงานการป้องกันที่ดีกว่าลดปัญหาด้านผลกระทบจากสิ่งประอะเปื้อนและไม่มีกระแสไหลตาม เมื่อแรงดันเสิร์จผ่านไปแล้ว ดังภาพที่ 3 [6-8]



(a)

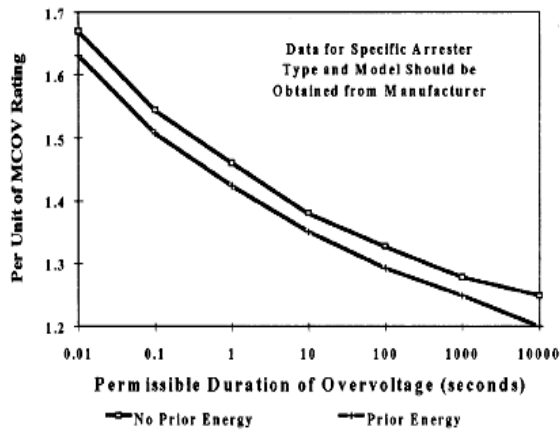


(b)

ภาพที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะการทำงานของกับดักเสิร์จ a) SiC b) ZnO ([8(C.A. Christodoulou, L.Ekonomoi, A.U. Mitropoulou, V.Vita and I.A.Stathopoulos, 2010)

กับดักเสิร์จแบบ MOV สามารถที่จะทำงานในช่วงเวลาจำกัดที่แรงดันความถี่กำลังซึ่งมีขนาดมากกว่าพิกัดแรงดันต่อเนื่องสูงสุดที่ความถี่กำลัง (Maximum Continuous Operating Voltage : MCOV) ขนาดของแรงดันเกินซึ่ง MOV สามารถที่จะทนอยู่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาซึ่งแรงดันเกินปรากฏอยู่ ดังรูปที่ 4 พิจารณาค่า TOV ของกับดักเสิร์จให้มีค่าที่เหมาะสมจะต้องทำการหาค่า TOV สูงสุดของ

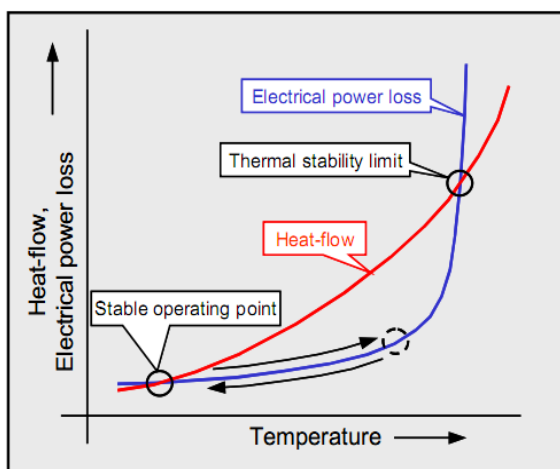
ระบบกำลังร่วมกับค่าเวลาสูงสุดซึ่งระบบจะต้องทำงานในสภาวะแรงดันที่ไม่ปกติสภาวะแรงดันที่ไม่ปกตินี้เป็นผลมาจากหลาย ๆ องค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ แรงดันเกินบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ในระหว่างการเกิดฟอลต์แบบเฟสกับดิน, แรงดันเกินการสับสวิตช์และเฟโอโรโรโซแนนซ์ เป็นต้น (IEEE Std. C62.11., 2005)



ภาพที่ 4 ค่าความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวของกัปกัปลีรจ
ไม่เคยไหลดและเคยไหลด (IEEE Std. C62.11., 2005)

เมื่อกัปกัปลีรจแบบ MOV ด้รับพลังงาน จะทำให้วาล์วอีลีเมนต์ของกัปกัปลีรจดูดซับพลังงานซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น ภายใต้สภาวะการทำงานปกติวาล์วอีลีเมนต์จะมีความสมดุลระหว่างความร้อนที่สร้างขึ้นโดยวาล์วอีลีเมนต์และความร้อนซึ่งแพร่กระจายออกไปจากกัปกัปลีรจโดยการนำพาและการแผ่รังสีเป็นผลใ้กัปกัปลีรจยังคงรักษาเสถียรภาพในการทำงานได้ แรงดันเกินคือเหตุการณ์ที่จะทำให้เสถียรภาพในการทำงานดังกล่าวเสียไปโดยที่จะทำให้วาล์วอีลีเมนต์ดูดซับพลังงานในระดับที่สูงขึ้นภายในช่วงเวลาี่แรงดันเกินยังอยู่ในระบบอุณหภูมิที่สูงขึ้นของวาล์วอีลีเมนต์ [4,9]

จากการดูดซับพลังงานมากเกินไปจะเป็นสาเหตุใ้กัปกัปลีรจเข้าไปอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Thermal Runaway ซึ่งเป็นสภาวะที่ความร้อนที่สร้างขึ้นมีค่ามากกว่าความร้อนที่กระจายออกไปเป็นสาเหตุใ้วาล์วอีลีเมนต์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์มีค่าในระดับที่สูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับวาล์วอีลีเมนต์ได้และผลที่ตามมาคือเกิดการเบรกดาวน์ทางไฟฟ้าขึ้นและการทำงานของกัปกัปลีรจก็จะล้มเหลวถ้าความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูงพอหรือถ้าการกระจายดังภาพที่ 5

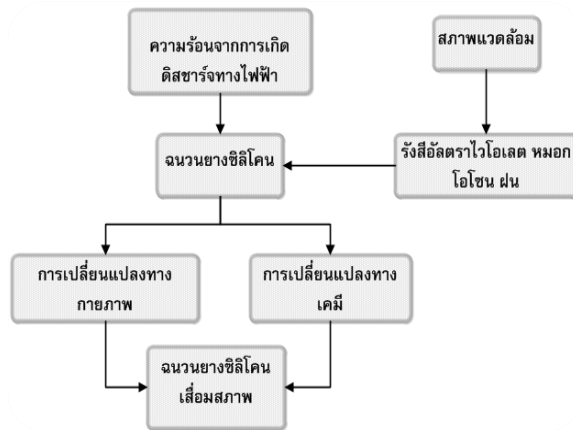


ภาพที่ 5 เสถียรภาพทางความร้อนของกัปกัปลีรจชนิด MOV (IEEE Std. C62.11., 2005)

ความหนาแน่นของพลังงานภายในวาล์วอีลีเมนต์เป็นแบบ Non-Uniform จะเป็นสาเหตุให้เกิดเกรเดียนต์ ของอุณหภูมิและจะทำให้เกิดการแตกร้าวของวาล์วอีลีเมนต์หรือ เกิดการเจาะทะลุได้ เหตุการณ์ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าการเพิ่มขึ้นของแรงดันทั้งหมดของวาล์วอีลีเมนต์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด Thermal Runaway พลังงานที่กักเก็บไว้สามารถที่จะดูดซับระหว่างการเกิดแรงดันเกินโดยที่ไม่ทำให้กักเก็บไว้เสียหายนั้นเรียกว่า “Energy Handling Capability” หรือ “Energy Withstand Capability” [4,9-11]

กับดักเสิร์จฟ้าผ่าฉนวนยางซิลิโคนเมื่อถูกนำมาใช้งานภายใต้สภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมแบบต่างๆ เป็นเวลานาน ฉนวนยางซิลิโคนทำจาก

สารอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนจะเกิดขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จากการศึกษาการเสื่อมอายุของฉนวนโครงหุ้มยางซิลิโคนสำหรับกับดักเสิร์จฟ้าผ่าภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ พบว่าสาเหตุมาจากการได้รับผลกระทบจากความเครียดทางสนามไฟฟ้า ความร้อน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากการดีสชาร์จ (W. Payakcho, J. Grasaesom, S. Thong-om and B.Marungsri, 2011) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เกิดการกัดกร่อน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำลื่น เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ ปัญหาการขัดข้องของระบบไฟฟ้า

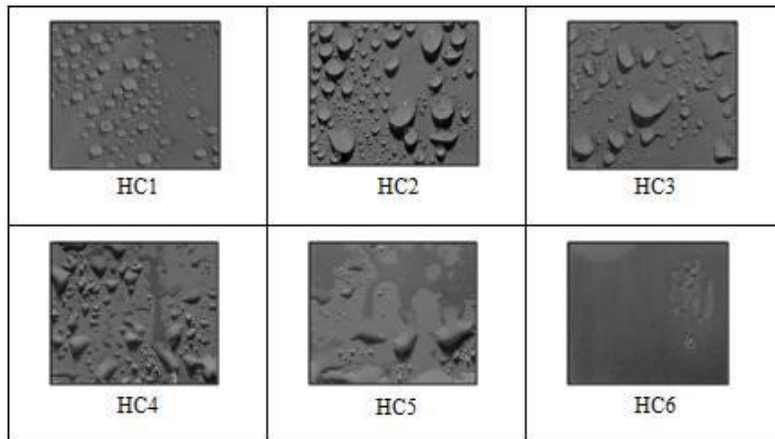


ภาพที่ 6 กระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคน (W. Payakcho, J. Grasaesom, S. Thong-om and B.Marungsri, 2011)

ยางซิลิโคนที่นำมาใช้เป็นฉนวนมีการเติมสารป้องกันยางซิลิโคนเสื่อม การเปรียบเทียบความต้านทานต่อการกัดกร่อนของยางซิลิโคนที่ไม่มีสารเติมแต่งและที่มีสารเติมแต่ง พบว่ายางซิลิโคนที่มีสารเติมแต่งมีความต้านทานที่ต่ำกว่ายางซิลิโคนที่ไม่มีสารเติมแต่ง สารที่เติมแต่งยังช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีให้มีอายุการใช้งานยาวนานและทนต่อสภาวะแวดล้อมได้มากขึ้น (Khan, Y. Z., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H., and Qureshi, M. I., 2006) แต่ฉนวนยางซิลิโคนมีค่า

ความเปราะเปื้อนและค่ากระแสรั่วไหลมากกว่า (Sundararajan, R., Soundarajan, E., Mohammed, A., and Graves, J., 2006)

คุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นบนพื้นผิวที่เปราะเปื้อนของลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีความเสียหายทางกายภาพมากกว่าลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ที่ทำจากยางซิลิโคนสังเกตได้จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นที่จำแนกตามมาตรฐานของ STRI [15,16] ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะตัวอย่างของคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นที่จำแนกตามมาตรฐานของ STRI HC 1-HC 6 (ระดับ HC 7 มีลักษณะ เป็นฟิล์มน้ำทั่วบริเวณพื้นผิว) (Li, C., Huang, X., and Zhao, L., 2008)

เมื่อสิ่งปนเปื้อนสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวนวน ยางซิลิโคนมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานต่ำลงส่งผลให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูง จึงทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จและมีขนาดของกระแสรั่วไหลมากเป็นระยะเวลานานย่อมต้องเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคน

เนื่องจากสภาวะอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้น จากผลการดีสชาร์จทางไฟฟ้า และสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานมีความสอดคล้องกับสาเหตุกระบวนการเสื่อมอายุของยางซิลิโคน

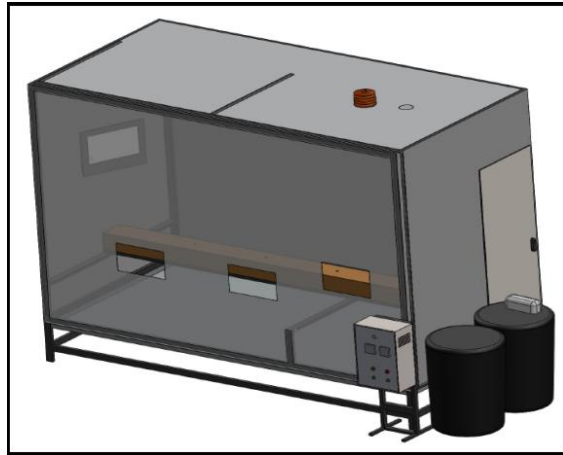
กระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนได้แสดงไว้ในภาพที่ 6

การศึกษาและทดสอบการเสื่อมอายุของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนเพื่อประเมินอายุการใช้งานพบว่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่าสูงอยู่ที่ 0.5 – 2 มิลลิแอมป์ โดยบางครั้งถ้ามีการเกิดดีสชาร์จขึ้นบนผิวนวนกระแสรั่วไหลจะมีค่าสูง 7 – 16 มิลลิแอมป์ เมื่อเทียบกับลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน กระแสรั่วไหลจะมีค่าอยู่ที่ 0.1 – 0.4 มิลลิแอมป์ และผลจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำให้สามารถมองเห็นการกัดกร่อนและร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟตามผิวได้อย่างชัดเจน (Cho, H-G., Han, S-W., and Lee, U-Y., 2002)

ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนเกิดจากความเครียดของสภาวะแวดล้อมและความเครียดทางไฟฟ้า (Kim, J., Park, C., Jung, Y., and Song, I., 2008) จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคน พบว่าผลกระทบจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ความชื้น ความเครียดทางไฟฟ้า อุณหภูมิ และหมอกไอเกลือ เป็นสาเหตุทำให้ลูกถ้วยฉนวนยางซิลิโคนเสื่อมสภาพการใช้งานไวขึ้น (Amin, M., Akbar, M., and Matsuoka, R., 2006)

การทดสอบลักษณะเสื่อมสภาพฉนวนกับดักเสิร์จ

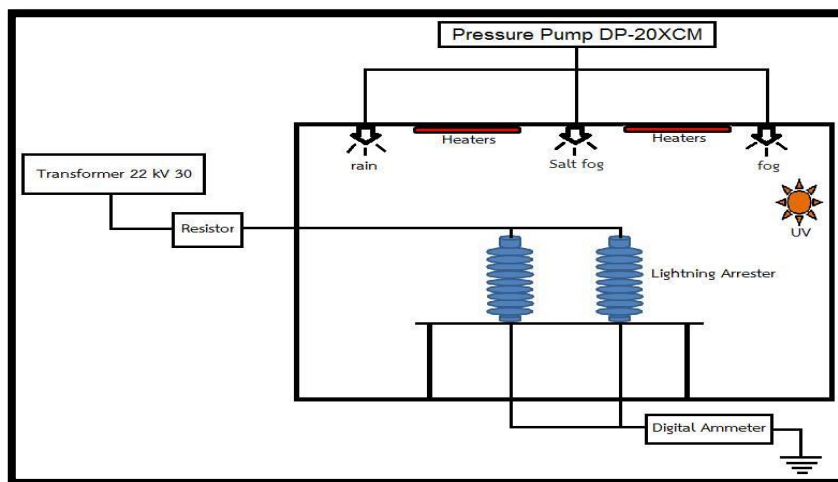
สำหรับการออกแบบได้นำถึงความแข็งแรงทางด้านโครงสร้างและความปลอดภัยในการใช้งานระหว่างทดสอบ แต่ทั้งนี้ ทดสอบต้องอ้างอิงโดยอาศัยมาตรฐาน IEC 61109 (IEC 61109., 1992) จึงได้ออกแบบห้องทดสอบมีปริมาตร 9 ลบ.ม. (ในมาตรฐานระบุไว้ไม่เกิน 10 ลบ.ม.) ซึ่งลักษณะห้องที่ใช้ทดสอบดังแสดงในภาพที่ 8 ภายในห้องทดสอบติดตั้งกับดักเสิร์จฟ้าผ่า 2 ตัว สำหรับใช้ในการทดสอบด้วย



ภาพที่ 8 แบบจำลองห้องทดสอบกับดักเสิร์จ

ตารางที่ 1 รอบการทดสอบลักษณะเสื่อมสภาพนวนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าด้วยการจำลองสภาวะความเครียดที่หลากหลาย ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60099-4

ช่วงระยะเวลา(ชั่วโมง)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
ทดสอบด้วยแรงดัน												
ฝน												
อุณหภูมิทดสอบสูงสุด50												
ความชื้น (95%)												
หมอกไอเกลือ												
แสงอัลตราไวโอเลต (UV)												



ภาพที่ 9 แผนผังการทดสอบลักษณะเสื่อมสภาพนวนของกับดักเสิร์จ

สำหรับวิธีดำเนินการทดสอบเป็นการจำลองสถานะ ความเครียดที่หลากหลายตามการติดตั้งในการใช้งานจริง โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60099-4 ในการทดสอบนี้ได้จำลองสภาพแวดล้อมต่างๆ ประกอบไปด้วย แสงอัลตราไวโอเลต ความร้อน ฝน หมอกไอสะอาด หมอกไอเกลือและจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทดสอบขนาด 17.96 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันเฟสของระบบ 22 กิโลโวลต์ ตามแผนผังการทดสอบในรูปที่ 9 เริ่มจากติดตั้งกับดักเสิร์จในห้องทดสอบเรียบร้อยแล้วจึงผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงในถังที่เตรียมไว้ตามความเข้มข้น

ที่กำหนดจากนั้นเปิดเครื่องควบคุมเวลาโดยจะทำงานตามเวลาที่กำหนดในแต่ละสถานะใน 24 ชั่วโมง หรือ 1 รอบการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 จะทำงานวนไปเรื่อย ๆ จนครบ 1000 ชั่วโมง โดยระหว่างทดสอบมีการเฝ้าสังเกตการณ์ ทำการบันทึกค่ากระแสรั่วไหล อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ ความชื้นในห้องทดสอบ และถ่ายภาพความร้อน ทุก 1 ชั่วโมง เมื่อทำการทดสอบครบตามเวลาที่กำหนด นำผลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

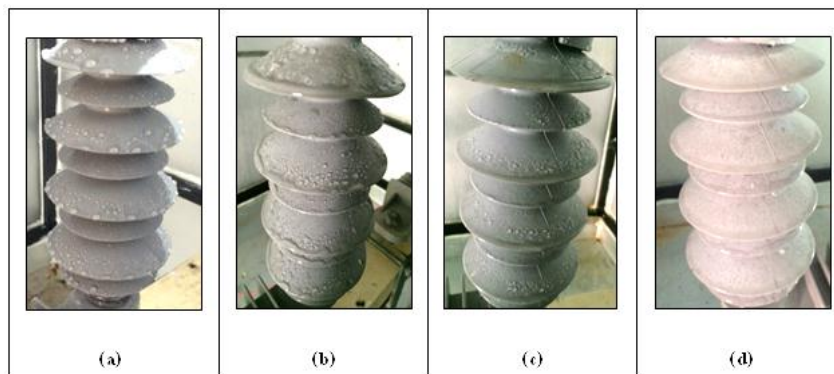
ตารางที่ 2 ข้อกำหนดในการทดสอบลักษณะเสื่อมสภาพฉนวน

ข้อกำหนดตามมาตรฐาน	การทดสอบจริง
ขนาดห้องทดสอบ	9 ลบ.ม.
ระยะเวลาในการทดสอบ	1000 ชั่วโมง
แรงดันที่ใช้ทดสอบ	17.96 กิโลโวลต์
อัตราการไหลของน้ำในการสร้างหมอก	0.5 ลิตร / ลบ.ม. / ชั่วโมง
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ	7 กิโลกรัม /1000 ลิตร
ขนาดของละอองหมอก	8 μ 3
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบ	45-55 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบ

1. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงผิวหยดน้ำสีนหลังจากการทดสอบลักษณะเสื่อมสภาพฉนวนยางซิลิโคนของกับดักเสิร์จฟ้าผ่าเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง

การจำแนกคุณสมบัติผิวหยดน้ำสีนบนพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนโดยจะเปรียบเทียบระหว่างฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบและยังไม่ผ่านการทดสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงผิวหยดน้ำสีน



ภาพที่ 10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงผิวหยดน้ำสีนของกับดักเสิร์จฉนวนยางซิลิโคนที่ใช้ทดสอบ

การเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวหยดน้ำของฉนวนยางซิลิโคนได้แบ่งออกเป็น 4 ช่วง ในรูป (a) เป็นลักษณะผิวหยดน้ำของกับดักเสิร์จฉนวนยางซิลิโคนก่อนทดสอบซึ่งมีคุณสมบัติผิวหยดน้ำที่ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงอยู่ในช่วง HC1 คือพื้นผิวจะไม่ชอบน้ำอย่างสมบูรณ์ เมื่อเริ่มการทดสอบฉนวนยางซิลิโคนด้วยการจำลองสภาวะความเครียดต่าง ๆ ตามการติดตั้งใช้งานจริง ช่วงระยะเวลา 300 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป (b) จากการสังเกตและเปรียบเทียบกับตัวอย่างลักษณะพื้นผิวหยดน้ำลื่นของฉนวนยางซิลิโคนจะเริ่มเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง HC2 ถึง HC3 คุณสมบัติหยดน้ำลื่นจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้าๆ และเมื่อผ่านการทดสอบช่วงระยะเวลา

600 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป (c) พบว่าพื้นผิวหยดน้ำลื่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนทดสอบซึ่งอยู่ในช่วง HC4 ถึง HC5 แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ หลังจากการทดสอบฉนวนยางซิลิโคนเป็นระยะเวลาครบ 1,000 ชั่วโมงแล้ว ลักษณะพื้นผิวหยดน้ำลื่นของฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง HC6 พื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนเสื่อมสภาพคุณสมบัติ หยดน้ำลื่นลดลงอย่างชัดเจนสามารถเปียกน้ำได้ง่าย ดังแสดงในรูป (d) โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวหยดน้ำของกับดักเสิร์จฉนวนยางซิลิโคนทั้ง 4 ช่วงได้ไว้ในรูปที่ 10

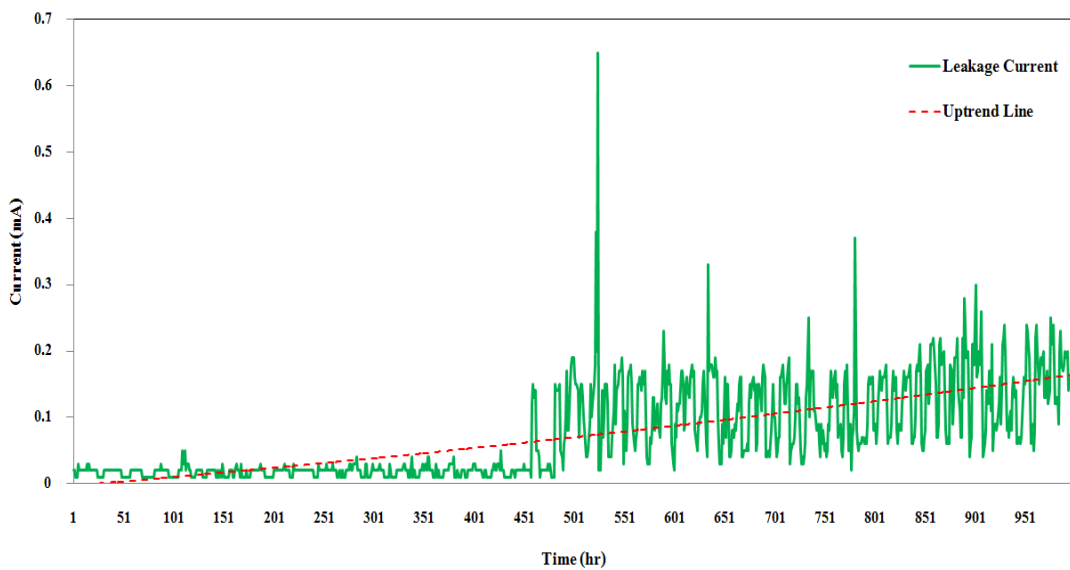
ตารางที่ 3 ตัวอย่างปริมาณกระแสรั่วไหลในแต่ละสัปดาห์

เวลา/ชั่วโมง	กระแสรั่วไหลในแต่ละสัปดาห์ (มิลลิแอมป์)					
	จำนวนสัปดาห์ที่ทดสอบ					
	1	2	3	4	5	6
1	0.01	0.01	0.06	0.08	0.09	0.14
2	0.01	0.02	0.07	0.08	0.08	0.15
3	0.02	0.02	0.1	0.07	0.12	0.16
4	0.02	0.02	0.17	0.09	0.17	0.14
5	0.02	0.02	0.08	0.08	0.15	0.15
6	0.02	0.02	0.08	0.12	0.14	0.15
7	0.01	0.02	0.15	0.11	0.16	0.24
8	0.01	0.02	0.18	0.15	0.16	0.22
9	0.02	0.03	0.19	0.16	0.16	0.24
10	0.03	0.03	0.19	0.16	0.17	0.21
11	0.02	0.02	0.19	0.04	0.18	0.09
12	0.02	0.02	0.16	0.04	0.06	0.11
13	0.02	0.02	0.15	0.05	0.06	0.11
14	0.01	0.01	0.15	0.05	0.07	0.12
15	0.03	0.02	0.14	0.05	0.07	0.14
16	0.02	0.01	0.15	0.06	0.09	0.2
17	0.01	0.01	0.14	0.11	0.14	0.23
18	0.02	0.01	0.14	0.16	0.17	0.18
19	0.01	0.03	0.14	0.07	0.14	0.17

20	0.03	0.02	0.14	0.15	0.16	0.18
21	0.02	0.01	0.15	0.15	0.08	0.2
22	0.01	0.01	0.05	0.04	0.06	0.19
23	0.01	0.01	0.04	0.04	0.09	0.19
24	0.01	0.01	0.02	0.05	0.08	0.2

2. การวัดค่ากระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จฟ้าผ่า ในการวิจัยนี้เป็นการจำลองสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ของ กัปดักเสิร์จฟ้าผ่าที่ติดตั้งตามการใช้งานจริงโดยทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับ 17.96 กิโลโวลต์ ในขณะที่ทดสอบได้มีการวัดปริมาณกระแสรั่วไหลที่ผ่านกัปดักเสิร์จฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินและบันทึกผลในทุก ๆ ชั่วโมง ตลอดระยะเวลาทดสอบ ดังแสดงในตารางกระแสรั่วไหล

ผลจากการทดสอบพบว่าเมื่อเริ่มทดสอบกัปดักเสิร์จมีปริมาณกระแสรั่วไหลอยู่น้อยมาก แต่เมื่อได้รับผลกระทบจากการทดสอบด้วยสภาวะความเครียดต่าง ๆ และแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ป้อนให้เป็นเวลานานจะเห็นว่าปริมาณกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา สามารถสังเกตได้จากเส้นกราฟแนวโน้มของกระแสรั่วไหลดังแสดงในภาพที่ 11

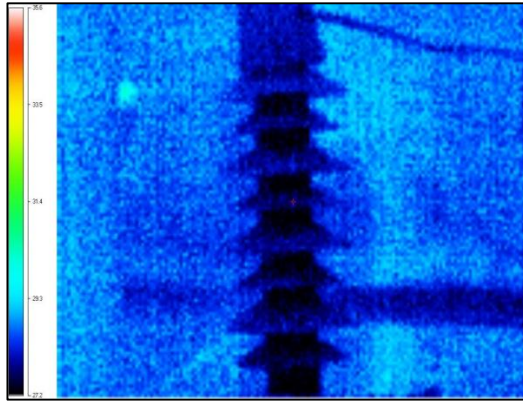


ภาพที่ 11 กราฟแสดงปริมาณกระแสรั่วไหล

3. การตรวจวัดความร้อนของกัปดักเสิร์จที่ใช้ทดสอบ

การถ่ายภาพความร้อนจะมองไม่เห็นภาพจริง แต่มันจะจับพลังงานรังสีอินฟราเรดที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุไปสู่สิ่งแวดล้อมและสร้างภาพแถบสีที่วัตถุที่ร้อนกว่าจะแสดงสีสว่างและวัตถุที่เย็นกว่าจะ

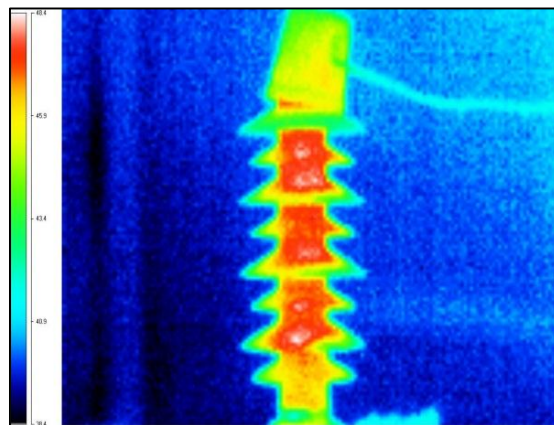
แสดงสีมืดกว่า พฤติกรรมคล้ายกับแสงสว่างที่มองเห็นซึ่งสามารถสะท้อนหักเห ดูดซับ และเปล่งแสง ซึ่งการทดสอบได้ถ่ายภาพความร้อนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ FLUKE รุ่น TI30 ถ่ายภาพตั้งแต่เริ่มทดสอบไปจนถึงหลังการทดสอบ



ภาพที่ 12 ภาพถ่ายความร้อนของกับทักเสิร์จขณะเริ่มทดสอบ

จากภาพที่ 12 ขณะที่เริ่มทดสอบกับทักเสิร์จยังมีอุณหภูมิความร้อนที่ต่ำอยู่จึงยังไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวฉนวนและเกิดการเปลี่ยนแปลงของกับทักเสิร์จ แต่เมื่อเวลาทดสอบมากขึ้นจึงเกิดการสะสมของสิ่งปนเปื้อนบริเวณปีกและลำตัวของกับทักเสิร์จส่งผลให้พลังงานความร้อนที่สะสมมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 13 เป็นผลกระทบจากการทดสอบด้วยสภาวะความเครียดที่หลากหลายและหมอกไอเกลือทำให้เกิดการเสื่อมสภาพฉนวนของกับทักเสิร์จ ถ้าความคงทนต่อ

ความเป็นฉนวนของอากาศบริเวณนั้นมีค่าน้อยกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งจะเกิดเบรกดาวนของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดอาร์คแถบแห้งและโคโรนาดีสชาร์จขึ้น ถ้าบริเวณพื้นที่แถบแห้งหลาย ส่วนอยู่ใกล้กันแล้วโอกาสที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนยางซิลิโคนจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย การเกิดวาบไฟตามผิวตกร่อมตลอดผิวฉนวนส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นมีความร้อนสูงขึ้นจึงเกิดเป็นร่องผิวเสื่อมสภาพ



ภาพที่ 13 ภาพถ่ายความร้อนของกับทักเสิร์จผ่านการทดสอบครบ 1,000 ชั่วโมง

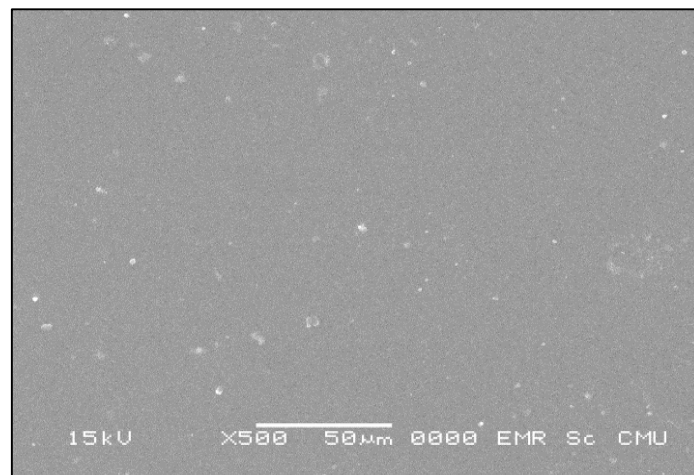
4. การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติ

ทางกายภาพที่ผิวของวัสดุ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายกราดไปยังพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ในการทดสอบได้นำชิ้นส่วนตัวอย่างของฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าพร้อมกับการจำลองสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ตามการติดตั้งใช้งานจริง เพื่อถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพถ่ายพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนเมื่อเปรียบเทียบกับผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

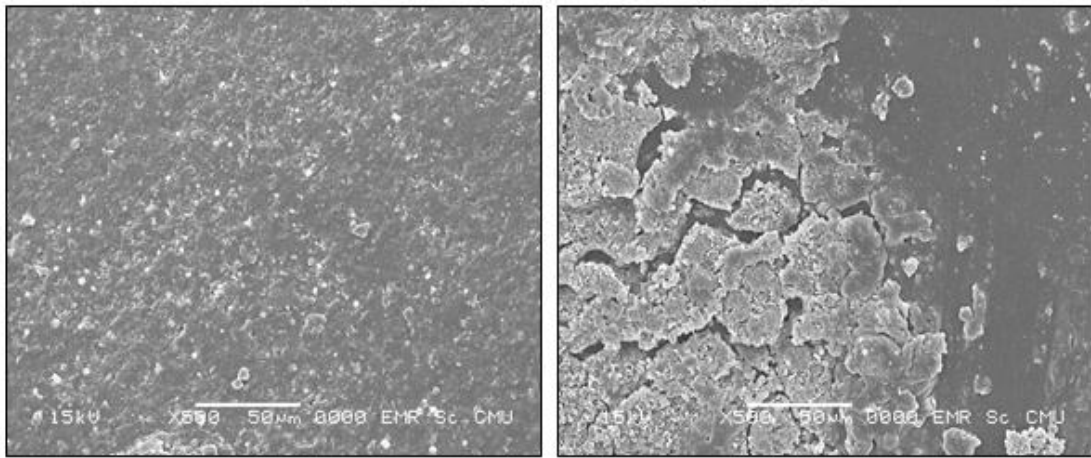
ส่องกราดระหว่างฉนวนยางซิลิโคนใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานหรือทดสอบใด ๆ กับฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบพบว่า ฉนวนยางซิลิโคนที่ยังไม่ผ่านการทดสอบดังรูปที่ 14 จะมีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบสังเกตได้จากจุดเล็ก ๆ ที่มีสีขาวบนผิวฉนวนยางทั่วถึงเรียกว่าสารเติมแต่งซึ่งเป็นสารที่เติมเข้าไปเสริมแรงยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสามารถเพิ่มค่าความต้านทานของแรงดึง แรงฉีกขาด และค่าความต้านทานการถูกกัดกร่อนของฉนวนยางซิลิโคน



ภาพที่ 14 ภาพถ่ายพื้นผิวฉนวนยางซิลิโคนก่อนการทดสอบ

แต่ในทางตรงกันข้ามฉนวนยางซิลิโคนที่ได้ผ่านการทดสอบการเสื่อมสภาพฉนวนยางซิลิโคนแล้วพบว่าสารเติมแต่งได้ลดลงและยังมีรอยของการผุกร่อนบนผิวฉนวนเกิดขึ้น ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ผลจากการถ่ายภาพแสดงให้เห็นลักษณะของการกัดกร่อนบนผิวฉนวนยางซิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ ร่องรอยที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องจากสภาวะความเครียดทางไฟฟ้าที่ใช้ในขณะที่ทดสอบและผลกระทบของการทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่ได้จำลองขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย แสงอัลตราไวโอเล็ต ความร้อน ฝน หมอกไอสะอาด หมอกไอเกลืออย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานทำให้เกิดการสะสม เมื่อถึงระยะเวลาการทดสอบมากขึ้นสิ่งปนเปื้อนจะสะสม

เพิ่มขึ้น ร่องรอยการกัดกร่อนก็จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่เกิดอาร์กแฉกจะเห็นร่องรอยของการเสื่อมสภาพของฉนวนยางซิลิโคนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากฉนวนพอลิเมอร์ทำจากสารอินทรีย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เกิดการกัดกร่อน การเกิดตัวของพอลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหยดน้ำสิ้น เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการขัดข้องของระบบไฟฟ้า (V.Podporokin Georgij, Yu Enkin Evgeniy, S, Kalakutsky Evgeniy, E. Pilshikov Vladimir and D. Sivaev Alexander, 2011)

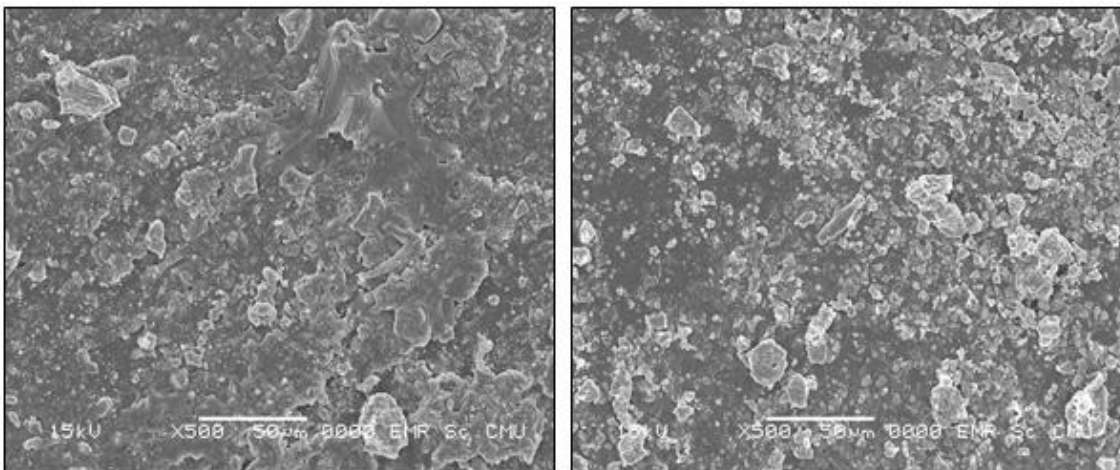


(a)

(b)

ภาพที่ 15 ภาพถ่ายพื้นผิวยางชิลิโคนผ่านการทดสอบ 500 ชั่วโมง

(a) ปีกเล็ก (b) ปีกใหญ่



(a)

(b)

รูปที่ 16 ภาพถ่ายพื้นผิวยางชิลิโคนผ่านการทดสอบ 1000 ชั่วโมง

(a) ปีกเล็ก (b) ปีกใหญ่

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะเสื่อมสภาพของ ก๊ับดักเสิร์จฟ้าผ่าชนิด ออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างในระบบ 22 กิโลโวลต์ ในสภาวะหมอกไอเกลือและสภาพแวดล้อมต่างๆ ฉนวนชิลิโคนที่ไม่ผ่านการทดสอบเปรียบเทียบกับฉนวนชิลิโคนที่ผ่านการทดสอบ พบว่าระหว่างทดสอบมีการลดลงของคุณสมบัติฉนวนน้ำขึ้นแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้เพราะยังไม่เป็นฟิล์มน้ำแต่

เมื่อทดสอบเสร็จพบว่าคุณสมบัติหยดน้ำลดลงอย่างชัดเจนพื้นผิวฉนวนยางชิลิโคนสามารถเปียกน้ำได้ง่าย

ผลจากการวัดปริมาณกระแสรั่วไหลพบว่าก๊ับดักเสิร์จที่ได้รับสภาวะความเครียดและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ตลอดเวลาเป็นเวลานานมีปริมาณกระแสรั่วไหลสูงขึ้น นอกจากนี้ ได้นำชิ้นส่วนตัวอย่างของฉนวนชิลิโคนไปถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีร่องรอยของการผุ

กร่อนบนพื้นผิวฉนวนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนยางซิลิโคนเกิดการสูญเสียคุณสมบัติผิวหยดน้ำลื่นและนำไปสู่การเสื่อมสภาพฉนวนยางซิลิโคนของกับดักเสิร์จ

เอกสารอ้างอิง

- ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล. (2552). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. **Technology Electrical & Electronics**. Vol.36, 206.
- สำรวย สังข์สะอาด. (2549). **หนังสือวิศวกรไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- A. G. Kanashiro, M. Zanotti Jr, P. F. Obase and W. R. Bacega. (2011). Diagnostic of Silicon Carbide Surge Arresters using Leakage Current Measurement. **IEEE Latin America Transactions**. 9, 761-766.
- A. Haddad and D. Warne. (2004). **Advances in High Voltage Engineering**. MPG Books Limited. Bodmin, Cornwall. UK.
- Abhinay, K.M. Kiran and B. Ravikumar. (2012). Investigation of Transient and Temporary Overvoltages in a Wind Farm. **the Power System Technology (POWER CON2012)**. Auckland. NewZealand .
- Amin, M., Akbar, M., and Matsuoka, R. (2006). Effect of UV-radiation, temperature and salt fog on polymeric insulators. **Conference on Properties and applications of Dielectric Materials**.
- Amin, S. Amin, M, and Sundrarajan, R. (2008). Comparative multi stress aging of thermoplastic elastomeric and silicone rubber insulators in Pakistan **Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena**, 293-296.
- C.A. Christodoulou, L.Ekonomoi, A.U. Mitropoulou, V.Vita and I.A.Stathopoulos. (2010). Surge Arrester Circuit Models review and their application to a Hellenic 150 kV Transmission line. **Simulation Modelling Practice and Theory** 18, 836-849.
- Cho, H-G., Han, S-W., and Lee, U-Y. (2002). Multi aging test technology for estimating long time performance of polymer insulators. **Conference on Properties and Applications of Dielectric Phenomena**, 232-236.
- IEC 60099-4. Edition, 2.1. (2006-7). **International Electro technical Commission**. Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.
- IEC 61109. (1992). **International Electrotechnical Commission**. Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V Definitions test methods and acceptance criteria.
- IEEE C62.1. (1989). IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Power Circuits. **IEEE Power Engineering Society**.
- IEEE Std. C62.11. (2005). IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV). **IEEE Power Engineering Society**.
- Khan, Y. Z., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H., and Qureshi, M. I. (2006). **Effect of thermo-electrical stresses and ultra-violet radiation on polymeric insulators**. King Saud University.

- Kim, J., Park, C., Jung, Y., and Song, I. (2008). An investigation of aging characteristics of polymer housed distribution surge arrester by accelerated aging test. **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.**
- Li, C., Huang, X., and Zhao, L. (2008). Image analysis on the surface hydrophobicity of polluted silicone rubber insulators. **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.**
- Sundararajan, R., Soundarajan, E., Mohammed, A., and Graves, J. (2006). Multistress accelerated aging of polymer housed surge arrester under simulated coastal Florida conditions. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation.** 13(1), 211-226.
- V.Podporkin Georgij, Yu Enkin Evgeniy, S, Kalakutsky Evgeniy, E. Pilshikov Vladimir, and D. Sivaev Alexander. (2011). Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters. **IEEE Trans. On Power Del.** 26, 214-221.
- V.Vita, A.D. Mitropoulou, L. Ekonomou, S. Panetsos and I.A. Stathopoulos. (2010). Comparison of metal Oxide surge arresters circuit model and implementation on high voltage transmission lines of the Hellenic network. **IET Generation, Transmission & Distribution 4,** 846-853.
- W. Payakcho, J. Grasaesom, S. Thong-om and B.Marungsri. (2011). Artificial accelerated aging test of silicone rubber housing material for lightning arrester. **World academy of science engineering and technology,** 80.

**การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและสร้างชุดต้นแบบ
การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า
The Study of Optimum Conditions and Biodiesel Production
from FishGut Oil Modrl Mamu Facturing by Electrochemical Process**

วรินทร์ กาทิบ¹, วศิน วงศ์ปิ่นตา², เพลิน จันท์สุยะ³ และ จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร^{4*}
Warunthon Katib¹, Wasin Wongpinta², Plearn Jansuya³ and Jirapatpong Senabut^{4*}

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

⁴ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} Electrical Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai.

⁴ Applied Materials Chemistry and Energy Technology Research (AMCET) Faculty of Agricultural Sciences and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai.

*Corresponding Author. E-mail: jirapatpong.amcet@gmail.com

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม และสร้างชุดต้นแบบการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ และสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ โดยได้เลือกตัวแปรที่นำมาใช้ในการศึกษาในการผลิตประกอบด้วย 4 ตัวแปรคือ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิก เตตระไฮโดรฟูแลน โซเดียมคลอไรด์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมีขอบเขตของแต่ละตัวแปรดังนี้ อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล 1:6, 1:12 และ 1:18 เตตระไฮโดรฟูแลน 0.1, 0.3 และ 0.5 โมลต่อลิตร และโซเดียมคลอไรด์ 0.3, 0.6 และ 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและศักย์ไฟฟ้า 20.0 โวลต์ จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและสร้างชุดต้นแบบการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล 1:18 เตตระไฮโดรฟูแลน 0.5 โมลต่อลิตร โซเดียมคลอไรด์ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำมันสูงสุด 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงอยู่ในส่วนกำหนดของมาตรฐานไบโอดีเซล ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าจากน้ำมันไส้ปลามีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิต

คำสำคัญ: อุณหภูมิ, อัตราส่วนสารเคมี, เวลา, และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

Abstract

The thesis is a study of biodiesel production by electrochemical technique from fish gut oil. The effect of the parameters on biodiesel properties was studied. Four parameters, molar ratio of fish gut oil to methanol, Tetrahydrofuran (THF), Sodium Chloride (NaCl) and reaction time were carried out. The range of each selected variable was as follows: molar ratio of oleic palm oil to methanol 1:6, 1:12 and 1:18, Tetrahydrofuran (THF) 0.1, 0.3 and 0.5 Sodium and Chloride (NaCl) 0.3, 0.6 and 0.9 %wt and reaction time 1 hr at constant temperature 60° C and electric potential 20.0 Volt. The results showed that the optimal conditions for were molar ratio of fish gut oil to methanol 1:18, Tetrahydrofuran (THF) 0.5 mol/lit, Sodium Chloride (NaCl) 0.3 %wt optimum temperature at 60° C and the highest methyl ester as 80.21 %wt and 120 reaction time. The fuel property of biodiesel production by electrochemical technique from oleic palm oil was shown that the process is simple and not using catalyst.

Keywords: Temperature, chemicals ratios, timing, and DC voltage.

บทนำ

ในชีวิตปัจจุบันต้องพึ่งแหล่งพลังงานและน้ำมันปิโตรเลียม ของพลังงานที่ต้องการใช้โดยเฉพาะการใช้ น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลกับยานพาหนะ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความพยายามค้นหาพลังงานอย่างอื่นมาทดแทนเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ จึงมีความพยายามในการพัฒนาการผลิตและใช้ประโยชน์พลังงานทดแทน มีความจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องหาพลังงานทดแทนน้ำมันซึ่งเป็นพลังงานหลักของโลกใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรและเครื่องยนต์ พลังงานชนิดใหม่ที่ได้เริ่มนำมาใช้กันในปัจจุบัน เชื้อเพลิงชีวภาพมาใช้กันมาก คือ ไบโอดีเซล (Biodiesel) ซึ่งใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซล (พลังงาน และทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย, 2542)

ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาด้านเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีจุดเด่นที่สามารถสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งลดขั้นตอนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเวลาในการผลิต เนื่องจากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่มีการผลิตในปัจจุบันเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนใช้สารเคมีเวลาในการผลิตที่มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง จึงได้มีความสนใจที่จะทำการศึกษาด้านการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าด้วยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแรงดันทางไฟฟ้าการใช้ชนิดขั้วไฟฟ้า อัตราส่วนของสารเคมีที่เหมาะสมเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาอีกทางเลือกหนึ่งและเป็นการพัฒนาชุดต้นแบบของเครื่องผลิตในระดับห้องปฏิบัติการต่อไป

วัตถุประสงค์

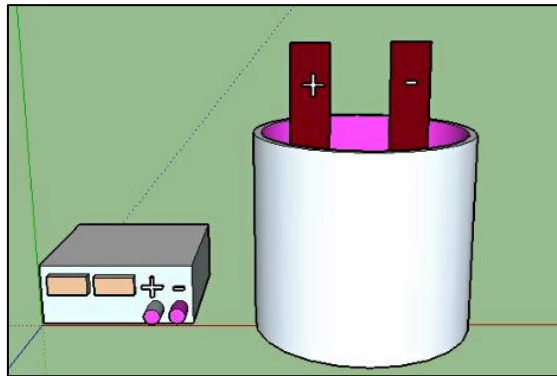
1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำมัน ไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า
2. เพื่อพัฒนาชุดต้นแบบการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากใส่ปลาด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าและเทคนิค

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) หมายถึง น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ ที่ใช้แล้วไปผ่านกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification) โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล, เอทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างน้ำมันจาก Triglyceride ให้เป็น โมโนอัลคิล เอสเตอร์ (Mono alkyl ester) ของกรดไขมัน ได้แก่ เมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl ester: FAMES) หรือเอทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid ethyl ester) และไดกลีเซอริน (Glycerine) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เนื่องจากเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันที่ได้นี้มีลักษณะคล้ายน้ำมันดีเซล ดังนั้นจึงเรียกเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันนี้ว่า ไบโอดีเซล

2. อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

คือใช้กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้า จากภายนอกเข้าไปใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ตัวอย่าง เช่น อิเล็กโทรลิซิส และการชุบกระบวนการที่ผ่านกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้า เรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลต์ หรือ อิเล็กโทรไลซิส แสดงดังรูปที่ 1



ภาพที่ 1 ชุดจำลองอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis)

3. พัฒนาการผลิตน้ำมัน (งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง)

1. วิชาเคมี เซลล์อิเล็กโทรไลต์ การแยกน้ำ ด้วยกระแสไฟฟ้ากระทรวงศึกษาธิการ และคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2556 (จักรพงษ์ ไชยบุรี, 2556)

2. นางสาวทิฆัมพร ทับวิธร และนางสาวศุทธหทัย สมิทธิ์ภินันท์ การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ปาล์มโอเลอิก ศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล 1:18 เติตระไฮโดรฟลูออแลน 0.5 โมลต่อลิตร โซเดียมคลอไรด์ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที 2554 (สุนทร แสงส่อง , 2556)

3. วัฒนา บัวภูมิ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วยในการผลิตไบโอดีเซล, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2550 (วีระชัยเลิศสถาพรสุข, รัตนชัยไพรินทร์ และ คณิต กฤษณังกูร, 2549)

4. วิธีการวิจัย

ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและสร้างชุดต้นแบบการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าโดยว่าวัตถุประสงค์ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้มาจากใส่ปลาที่เป็นของเสีย จากกระบวนการผลิตปลาส่งออกในเขตบริเวณพื้นที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย เนื่องจากปลาในพื้นที่มีการเพาะพันธุ์ปลานิลในการส่งออกขายในเขตพื้นที่ภาคเหนือทำให้เกิดอุตสาหกรรมปลาที่จะต้องส่งออกให้ทันต่อการบริโภค เนื่องจากว่าในการทำความสะอาดปลาจะมีของเสียจากการทำความสะอาด ได้แก่ เครื่องในปลา ซึ่งโดยส่วนมากเป็นใส่ปลา และส่งกลิ่นเหม็นรบกวนวิจัยจึงมีแนวคิด ที่จะนำใส่ปลาที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล ให้ใกล้เคียงมาตรฐานตามคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลมาทำการเคี้ยวเป็นน้ำมันดิบจากนั้นจึงหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากใส่ปลา

1. ปัจจัยในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากใส่ปลา

กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนสารเคมี เวลา และแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันปาล์ม

อัตราส่วน น้ำมัน : Methyl	Tetrahydrofuran (mol/dm ³)	Sodium chloride (g)	อุณหภูมิ (°C)	ศักย์ไฟฟ้า (V)	เวลา (hrs.)
1:6	0.1	0.3	50	10	1, 1.5, 2
			60	15	1, 1.5, 2
			70	20	1, 1.5, 2
1:12	0.3	0.6	50	10	1, 1.5, 2
			60	15	1, 1.5, 2
			70	20	1, 1.5, 2
1:18	0.5	0.9	50	10	1, 1.5, 2
			60	15	1, 1.5, 2
			70	20	1, 1.5, 2

2. กระบวนการผลิต

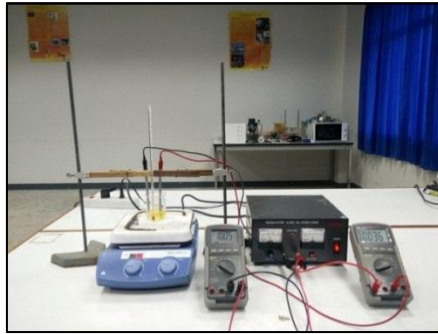


ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันปาล์ม

3. ขั้นตอนการทดลอง

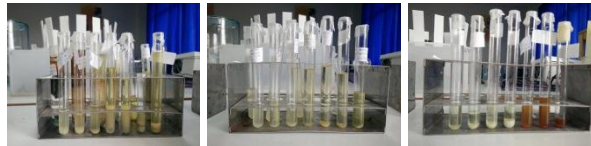
เตรียมน้ำมันที่สกัดจากไขมันปาล์ม และเมทิลเอสเตอ์ตามอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทิลเอสเตอ์ 1:6, 1:12 และ 1:18 ที่แรงดันไฟฟ้า 10, 15 และ 20 โวลต์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว เป็นอลูมิเนียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ระยะ

เวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมงเมื่อสารละลายเกิดการแยกชั้นที่ได้จากปฏิกิริยาผ่านกระบวนการล้างจำนวน 3 ครั้ง จนได้น้ำมันไบโอดีเซลแสดงดังรูปที่ 3 ชุดทดลองการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันปาล์ม และรูปที่ 4 การผลิตน้ำมันตามปัจจัยการทดลอง ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 3 เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

3.4 น้ำมันที่ทดลองในแต่ละอัตราส่วน



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4 การทดลองแต่ละอัตราส่วน

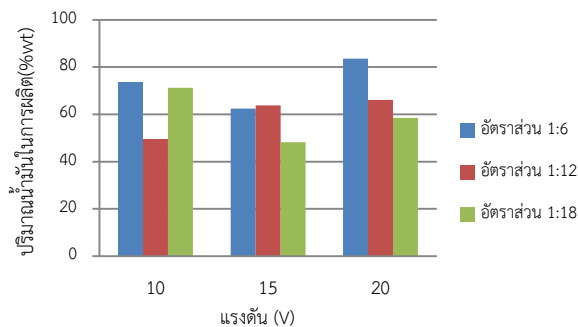
(ก) อัตราส่วน 1:6, (ข) อัตราส่วน 1:12, (ค) อัตราส่วน 1:18

ผลการวิจัย

อัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์มีผลต่อปริมาณผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่อัตราส่วน 1:6, 1:12 และ 1:18 โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ แรงดัน, อุณหภูมิ และอัตราส่วนของสารในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลอง พบว่า อัตราส่วน 1:18 ได้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุดเท่ากับ 67เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รองลงมาคืออัตราส่วน 1:12 ได้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซล 52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยอัตราส่วนมีโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ในการแตกตัวของไอออนมีปริมาณเตตระไฮโดรฟลูออแลน 0.5 โมลต่อลิตร เป็นตัวทำละลายร่วม แสดงผลการทดลองในรูปที่ 5

1. การผลิตน้ำมันต่อแรงดันและอัตราส่วน

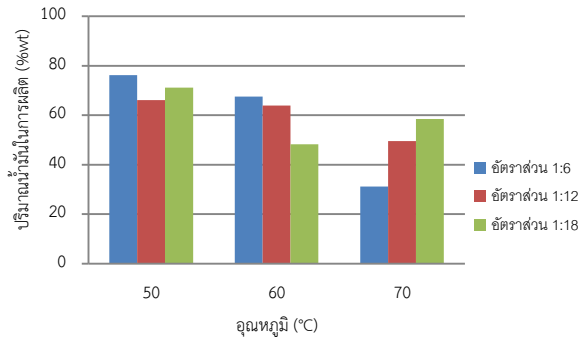


ภาพที่ 5 การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลตามและอัตราส่วน

จากผลของแรงดันไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ ให้ผลของปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 20 โวลต์ 82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับเป็นไปได้ว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น

ทำให้ตัวทำละลายและสารอิเล็กโทรไลต์เกิดการชนกัน (Collision) กับน้ำมันทำให้ปฏิกิริยาในการเปลี่ยนน้ำมันเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้สมบูรณ์มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการละลายของน้ำมันกับสารละลาย

2. ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล

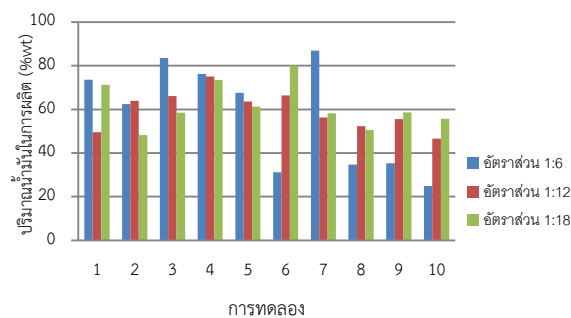


ภาพที่ 6 ผลของอุณหภูมิในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

จากผลในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้ค่าเฉลี่ยในกระบวนการผลิตแต่ละอุณหภูมิ และอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลมากที่สุดต่างที่อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ต่ำ เพราะอุณหภูมิมกเกินไปนั้นจะ

เร่งปฏิกิริยาทำให้ น้ำมันไบโอดีเซลเกิดฟอง หรือระเหย อยู่ที่ใช้เวลานานน้อยเพียงใด ถ้าเวลาที่เพิ่มมาก การผลิตนั้นจะได้ปริมาณน้ำมันออกมาต่ำตามอุณหภูมิ ในค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนี้จะใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

3. ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลในแต่ละการทดลอง



ภาพที่ 7 ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล

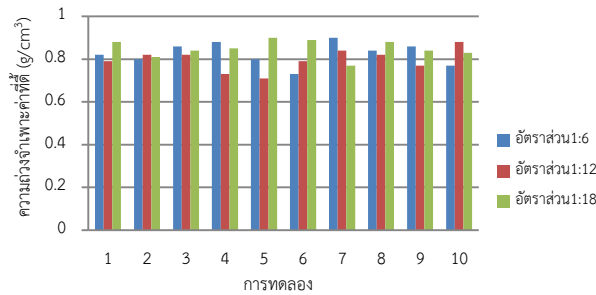
จากผลของปริมาณน้ำมันแต่ละการทดลองได้ผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุด ที่แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ในอัตราส่วน 1:6 ในการทดลองที่ 7 ใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

โดยใช้ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเตตระไฮโดรฟลูออเรน 0.1โมลต่อลิตรได้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล 86.86 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล 1:18 การทดลองที่ 7 ได้

ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล 58.11 เปอร์เซ็นต์โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติอัตราส่วน 1:18 จะมีค่าผ่านน้ำหนัก คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่น้ำมันต่อเมมาตรฐาน มาตราฐานทานอล จะมีค่ามากกว่าอัตราส่วน 1:6 ในการ

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

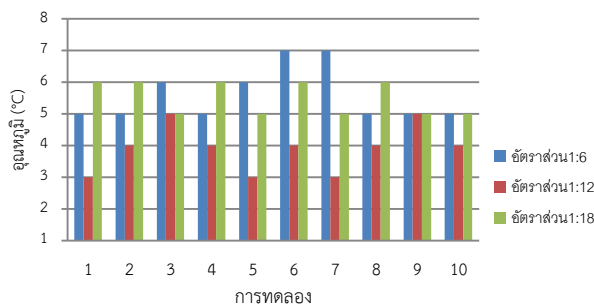


ภาพที่ 8 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จากผลทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซล พบว่ามีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของน้ำมันไบโอดีเซลจะอยู่ในช่วงที่ 0.71 ถึง 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.82 กรัม/ลูกบาศก์เมตรเมื่อทำ

การเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะมาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซลมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.81 ถึง 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

2) จุดขุ่น (Cloud point)

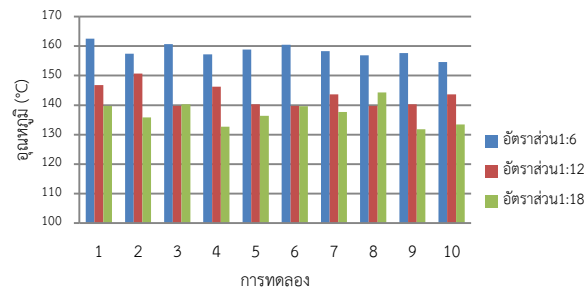


ภาพที่ 9 จุดขุ่น (Cloud point)

จากผลทดลอง ผลิตน้ำมันไบโอดีเซล พบว่า ในการทดลองที่ 1 , 5 และ 7 มีค่าจุดขุ่น (Cloud point) ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส โดยเป็นการทดลองที่อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอลในอัตราส่วน

1:12 และค่าของจุดขุ่นทุกอัตราส่วนการทดลองอยู่ในช่วง 3 ถึง 7 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส และเมื่อเทียบกับค่าจุดขุ่นมาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซลอยู่ในช่วง -3 ถึง 12 องศาเซลเซียส

3) จุดวาบไฟ (Flash point)

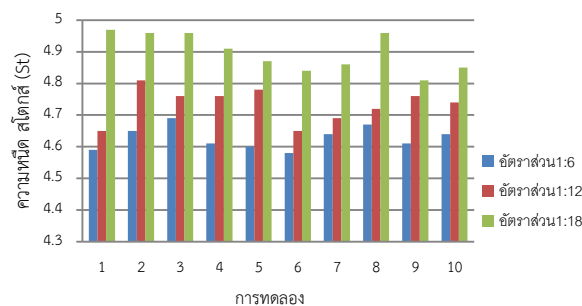


ภาพที่ 10 จุดวาบไฟ (Flash point)

จากผลทดลองในการทดสอบ จุดวาบไฟ (Flash point) กราฟน้ำมันไบโอดีเซลที่นำการทดสอบมีแนวโน้มลดลง ในการทดลองที่ อัตราส่วน 1:6 จุดวาบไฟจะอยู่ในจุดวาบไฟที่สูงมากจะมีผลต่อการจุดระเบิดหรือการเผาไหม้ของห้องเครื่องที่สูงมีผลต่อการจุดระเบิดที่นานกว่าจุดที่มีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่า และช่วงการทดลองที่ อัตราส่วน 1:18 เห็นว่าจุดวาบไฟนั้นมี

จุดที่ต่ำนั้นแสดงว่าการเผาไหม้ของห้องเครื่องได้ไวกว่าจุดวาบไฟที่สูง และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน 1:18 ของน้ำมันต่อเมทานอลอยู่ที่ 137 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลมีค่ามาตรฐานให้เกิน 120 องศาเซลเซียส

4) ความหนืด (Viscosity)

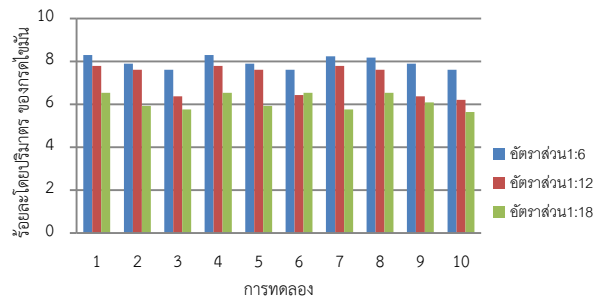


ภาพที่ 11 ความหนืด (Viscosity)

จากผลทดลองในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในการทดลองที่ อัตราส่วน 1:6, 1:12 เป็นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในค่าความหนืดของการทดลองนี้อยู่ในช่วงเฉลี่ย 4.68 สโตกส์ (St) ในน้ำมันไบโอดีเซล นั้นถ้ามี

ความหนืดที่น้อยจะมีผลต่อการหล่อลื่นและการสึกหรอของเครื่องยนต์และการทดลอง อัตราส่วน 1:18 นั้นมีค่าความหนืดเฉลี่ย 4.89 สโตกส์ (St) แต่ความหนืดนั้นไม่ควรเกิน 5.00 สโตกส์ (St) ของมาตรฐาน

5) กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)



ภาพที่ 12 กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)

จากผลทดลองในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนที่มีเมทานอลต่อน้ำมัน จะเห็นได้ว่าดังกราฟมีค่า กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ในน้ำมันไบโอดีเซลที่มีกรดไขมันอิสระที่สูง มีผลต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์แล้วกราฟการทดลองที่ อัตราส่วน 1:18 มีแนวโน้มดังลงจะอยู่ในช่วงกรดไขมันอิสระต่ำลง นั้นมีผลต่อการเผาไหม้ กรดไขมันในการทดลองที่ อัตราส่วน 1:18 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.12 ร้อยละโดยปริมาตร ของกรดไขมัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลมีค่ามาตรฐานไม่ต่ำกว่าไม่ให้เกิน 3.50 ถึง 7.00 ร้อยละโดยปริมาตรของกรดไขมัน

สรุปผลการทดลอง

สรุป และข้อเสนอแนะ

จากการสร้างชุดต้นแบบการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่น้ำมันใส่ปลา พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ ศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ อัตราส่วนโดยโมลน้ำมันต่อเมทานอล 1:18 เติตระไฮโดรฟลูออรีน 0.5 โมลต่อลิตร โซเดียมคลอไรด์ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ในการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงทดแทน โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์ เพื่อแนวคิดนี้ จึงอาจเป็นการส่งเสริมให้

เกิดอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถลดขบวนการผลิตลงได้เป็นอย่างดีช่วยในการลดเวลาในการผลิต และสามารถนำไปใช้ประโยชน์แก่ชุมชน หรือองค์กรที่ให้ความสนใจต่อไป

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบอุปกรณ์การควบคุมอุณหภูมิ ให้คงที่ตามต้องการเพื่อไม่อุณหภูมิมักจนเกิน ฉะนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้น้ำมันไม่เกิดกระบวนการขึ้นน้ำมันไบโอดีเซล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์สถานที่ทำการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์ จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การเกษตร ที่ดูแลและเป็นที่ปรึกษาในการทดลองทางเคมี และอาจารย์เพลิน จันทร์สุขะ ผศ.ดร.นพพร พชรประภิติ ที่เป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- เคยู ไบโอดีเซล. (2550). เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา. สืบค้นจาก <http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th>
- จักรพงษ์ ไชยบุรี. (2556). การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 18(2), 1-7.
- หิรัญพร ทับวิธร และ ศุภรหทัย สมิทธิ์ภินันท์. (2554). การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า.
- ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์. (2547). สืบค้นจาก <http://www.green.kmutt.ac.th/news/Question.asp?GID=94>.
- พลังงาน และทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย. (2542). สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ
- มณีชนก. (2552). ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- วัฒนา บัวภูมิ (2550) การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วยในการผลิตไบโอดีเซล วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- วิชาเคมี. (2556). เซลล์อิเล็กโทรไลต์การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า. กระทรวงศึกษาธิการ และคณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระชัยเลิศสถาพรสุข, รัตนชัยไพรินทร์, และ คณิต กฤษณังกูร. (2549). การใช้รังสีไมโครเวฟเร่งการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง และผลกระทบของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 kW. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. สุนทร แสงส่อง. (2556). จลนศาสตร์และการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการเติมตัวทำละลายร่วมคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Henry, J.B. and Shizuko (2008) H., Biodiesel production from crude *Jatropha Curuas* L. seed oil with a high content of free fatty acid. *Bioresource Technology*. Vol.99, 1716- 1721.

การพัฒนาวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์กลายเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน

The Development of Wireless Power Transfer using PCB Resonators

อนุพงษ์ ชัยชน¹, ธนาวุฒิ ปัญญาวงศ์² และเอกชัย ชัยดี^{3*}
Anupong Chayton¹, Tanawut Panyawong² and Ekkachai Chaidee^{3*}

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{1,2,3} electrical engineering Faculty of engineering Rajamangala University of Technology LannaChiangrai

*Corresponding author: Email: ekkachai@mutl.ac.th, ekkachai.ch799@gmail.com

บทคัดย่อ

การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดลวดทองแดงต่อกับคาปาซิเตอร์ภายนอกทำให้คาปาซิเตอร์รับแรงดันพิกัดสูงมีโอกาสเสียหายได้ง่าย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์กลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน มีข้อดีด้านความบางและน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับขดลวดทองแดง ได้ทำการออกแบบลายขดตัวนำพื้นฐานสี่รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยม วงกลม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม นำไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์พบว่ารูปแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ที่ดีที่สุด จึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมนำไปพัฒนาเป็นขดส่งและรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบสองด้าน จากนั้นจึงทำการทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายในแต่ละกรณีผลการศึกษาพบว่า 1) การปรับค่าความถี่สามารถทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีความถี่คงที่ 2) ผลการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์ พบว่ากรณีปรับค่าความถี่ให้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ความถี่คงที่ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้น้อยกว่าแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายสองด้าน เนื่องจากการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลผ่านขดตัวนำด้านส่งได้น้อยลง ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางการพัฒนาการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์กลายเป็นขดส่งและรับกำลังงานได้ต่อไป

คำสำคัญ: แผ่นวงจรพิมพ์, ความเหนี่ยวนำ, ความถี่เรโซแนนซ์, การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

Abstract

Conventional wireless power transfer using coil series with external capacitance during transfer power the capacitance is stress high voltage so the capacitance can be damage. The objective of this study is the development of wireless power transfer using PCB as transmitter and receiver. Advantage of using PCB are lightly and low weight comparison copper coils. Square, Circle, Hexagonal and Octagonal trace are designed. They were tested to identify scattering parameter (S21) by using Network Analyzer that show the octagonal trace obtained the best S21. So, the octagonal trace is chosen to design as transmitter and receiver on double side board of PCB. Power transfer experiments were performed. From study results found that 1) Adjustment of frequency can increase output power comparison with constant frequency 2) Increasing inductance by increasing amount of PCB, adjustment frequency can increase output power comparison with constant frequency however, the power output less than case using double layer PCB due to increasing inductance is cause increasing of impedance so input current flow in transmitter side is deceased. The study results can be used in development of wireless power transfer using PCB as transmitter and receiver.

Keywords: PCB, inductance, resonance frequency, wireless power transfer

บทนำ

เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้สายตัวนำ เป็นที่รู้จักครั้งแรกจากการทดลองของนิโคลาร์ เทสลา (S.Y.R. Hui et al, 2014) นิโคลาร์ เทสลา ใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศทำหน้าที่เป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน เรียกว่า ขดรีโซเนเตอร์ (Resonators) กลไกการส่งกำลังงานใช้สนามแม่เหล็กความถี่สูงคล่องระหว่างขดตัวนำ ซึ่งต่อมาหลักการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายจากการริเริ่มของนิโคลาร์ เทสลา ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในงานด้านพัฒนาเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในการส่งผ่านสนามแม่เหล็กจากฝั่งสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ ภายหลังจากยุคของนิโคลาร์ เทสลา เป็นต้นมา เทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายไม่ได้รับความสนใจในการพัฒนาเท่าที่ควร อาจเนื่องมาจากความก้าวหน้าด้านอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ไม่มีความก้าวหน้าเหมือนกับในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม พบว่าเทคโนโลยีการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายได้กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง ภายหลังจากบทความงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ในการประยุกต์ใช้ในระบบเตอรีไร้สายให้กับรถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์ขนาดเล็ก งานทางการแพทย์ เป็นต้น (F. Muavi et al, 2012 ; S. Jeong et al, 2015 ; J.C. Lin et al, 2013)

รูปแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ขดตัวนำพันบนแกนอากาศทำหน้าที่เป็นขดส่งและรับกำลังงานโดยใช้คาปาซิเตอร์ภายนอกต่อเข้ากับขดส่งเพื่อทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ในการทำงานนั้น คาปาซิเตอร์ดังกล่าวต้องทนต่อพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูง ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากวงจรส่งกำลังงาน โดยใช้ความถี่สูงทำให้แรงดันเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูงตาม ทำให้คาปาซิเตอร์มีโอกาสเสียหายได้ง่าย นอกจากนี้แล้วยังพบว่าการใช้ขดตัวนำเป็นขดส่งและรับกำลังงาน ในการประยุกต์ใช้งานบางอย่างยังมีข้อจำกัดด้านขนาดรูปร่าง

การแก้ปัญหาจากการรับพิกัดแรงดันสูงของคาปาซิเตอร์ดังกล่าว และการลดขนาดรูปร่างของขดตัวนำด้านส่ง และรับกำลังงาน แนวทางหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย เนื่องจากลักษณะขดลวดตัวนำมีค่าคาปาซิแตนซ์เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ (Parasitic capacitance) ทำให้ไม่ต้องต่อคาปาซิเตอร์ภายนอกเข้ากับขดส่ง และยังสามารถลดขนาดขดตัวนำได้โดยการใช้ความถี่สูง ประกอบกับแผ่นวงจรพิมพ์ลายมีลักษณะเบาบาง เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเนื่องจากขดรับกำลังงานจำเป็นต้องยึดติดกับอุปกรณ์ เช่น ไทรคัทที่มีมือถือขนาดเล็ก นอกจากนี้แล้วปัจจุบันลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์ลายยังมีแบบ 2 ด้านให้เลือกใช้งานทำให้สามารถเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของขดตัวนำได้โดยที่พื้นที่ขดตัวนำยังเท่าเดิม นอกจากนี้แล้วการใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์ลายยังสามารถลดปรากฏการณ์ทางผิวเมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดทองแดงที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการกับการประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลาย มีการพัฒนาหลายด้าน เช่น การพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงในระดับ MHz (Natthaphon et al,2013) การออกแบบขดลวดตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย (Claudia Pacurar et al,2012 ; Natthaphon et al,2013) และการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ลาย(Sunderarajan S. Mohan et al,1999) พัฒนาสมการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม (S. Raju et al, 2014) เป็นต้น

จากที่กล่าวมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ลายมุ่งให้ความสำคัญไปที่การลดขนาดขดตัวนำ โดยใช้ความถี่สูงในระดับ MHz ในการวิจัยในครั้งนี้จึงพัฒนาบนแผ่นวงจรพิมพ์ลายให้สามารถทดแทนการใช้ขดลวดทองแดงโดยใช้ความถี่ระดับ kHz และเปรียบเทียบรูปแบบแผ่นวงจรพิมพ์ลายในลักษณะต่างๆ เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม ได้

เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลาย 2 ด้านเนื่องจากสามารถเพิ่มความหนาแน่นโดยที่ขนาดพื้นที่เท่าเดิม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างวงจรส่งกำลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน

2. เพื่อศึกษาลักษณะขดลวดตัวนำที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลาย

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. วงจรไฟฟ้าในสถานะรีโซแนนซ์

เมื่อวงจรอยู่ในสถานะรีโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำ กระแสไหลผ่านวงจรได้มาก ความถี่รีโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

2. วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ นำมาใช้เป็น

วงจรขับให้กับวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย โดยทำงานที่ความถี่ในสถานะรีโซแนนซ์

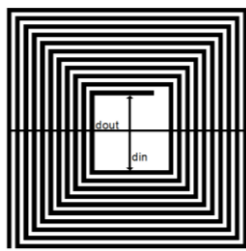
3. แผ่นวงจรพิมพ์หลาย

การประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายเป็นขดส่งและรับกำลังงาน มีข้อดีดังนี้ เนื่องจากรูปร่างบางและน้ำหนักเบาสามารถนำไปประกอบร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย สามารถลดผลของปรากฏการณ์ทางผิวเมื่อเทียบกับการใช้ขดทองแดงที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน แผ่นวงจรพิมพ์หลายมีค่าคาปาซิแตนซ์ภายในเกิดขึ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องต่อคาปาซิเตอร์ภายนอกเข้าไปในวงจรได้ การใช้วงจรพิมพ์หลาย 2 ด้านสามารถเพิ่มความหนาแน่นได้โดยที่ขนาดเท่าเดิม

วิธีการวิจัย

1. การศึกษาลักษณะขดลวดตัวนำบนแผ่นบนแผ่นวงจรพิมพ์หลาย

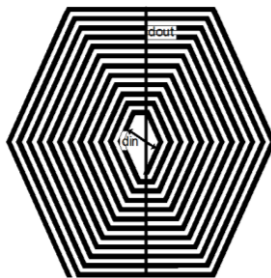
รูปแบบพื้นฐานของขดลวดตัวนำบนวงจรพิมพ์หลายมี 4 รูปแบบ คือ แบบสี่เหลี่ยม แบบวงกลม แบบหกเหลี่ยม และแบบแปดเหลี่ยม ลักษณะขดลวดตัวนำแต่ละแบบแสดงดังภาพที่ 1 ดังนี้



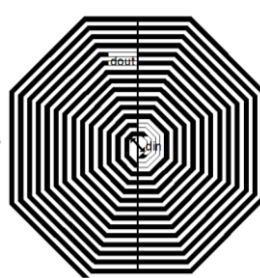
ก) แบบสี่เหลี่ยม



ข) แบบวงกลม



ค) แบบหกเหลี่ยม



ง) แบบแปดเหลี่ยม

ภาพที่ 1 ลักษณะตัวนำบนแผ่นบนแผ่นวงจรพิมพ์หลาย

การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำแต่ละแบบสามารถใช้สมการที่ (2) ดังนี้ (S.S. Mohan, 1999)

$$L = \frac{\mu^2 d_{avg} c_1}{2} (\ln(c_2 / \rho) + c_3 \rho + c_4 \rho^2) \quad (2)$$

$$d_{avg} = 0.5(d_{out} + d_{in}) \quad (3)$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (4)$$

เมื่อ d_{out} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก d_{in} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ส่วนค่า C แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของขดลวดตัวนำ

ลักษณะ	C1	C2	C3	C4
สี่เหลี่ยม	1.27	2.07	0.18	0.13
หกเหลี่ยม	1.09	2.23	0.00	0.17
แปดเหลี่ยม	1.07	2.29	0.00	0.17
วงกลม	1.00	2.46	0.00	0.20

ทำการออกแบบขดลวดตัวนำดังรูปที่ 1 โดยกำหนดให้ขนาดของขดลวดตัวนำเท่ากัน คำนวณ

ค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ (2) ได้ค่าความเหนี่ยวนำ และจำนวนรอบแสดงตามตารางที่ 2 ดังนี้

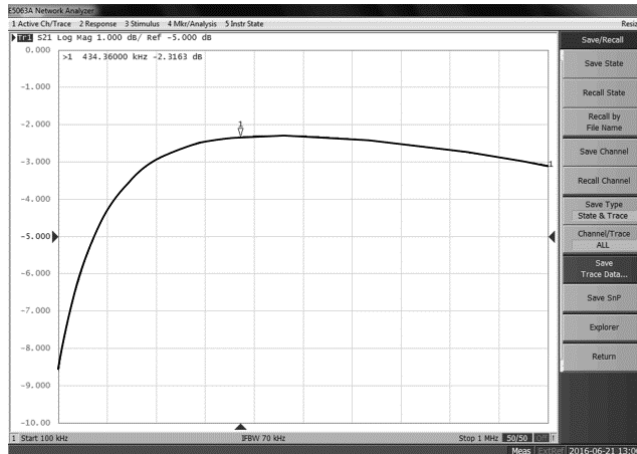
ตารางที่ 2 แสดงค่าความเหนี่ยวนำและจำนวนรอบ

	$L(\mu H)$	N(รอบ)	$d_{out}(m)$	$d_{in}(m)$
สี่เหลี่ยม	22.57	11	0.277	0.077
แปดเหลี่ยม	22.78	14	0.277	0.019
หกเหลี่ยม	21.65	13	0.277	0.032
วงกลม	22.34	14	0.277	0.012

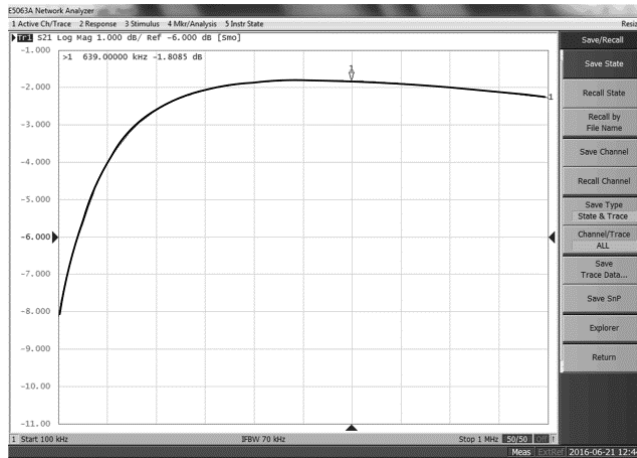
2. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ของขดลวดตัวนำ

ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) โดยใช้ Net Work Analyzer E5063A ใช้ความถี่

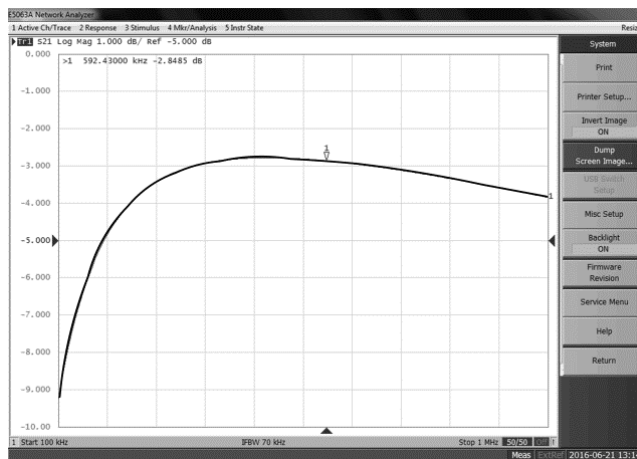
ทดสอบ 100 kHz – 1MHz ที่ระยะ 0-10 cm ผลการทดสอบของขดลวดตัวนำแต่ละแบบที่ระยะ 1 cm แสดงดังภาพที่ 2-5 ดังนี้



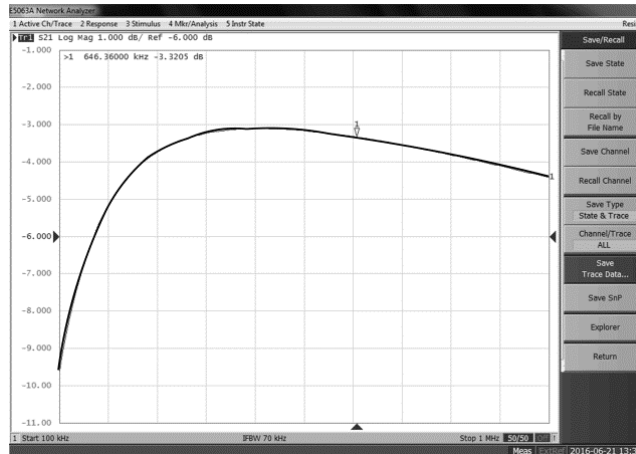
ภาพที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำแปดเหลี่ยม



ภาพที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำหกเหลี่ยม



ภาพที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านขดลวดตัวนำวงกลม

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ได้จากการทดสอบตามภาพที่ 2 – 5 ได้ค่าที่ดีที่สุดแสดงดังตารางที่ 3 ดังนี้

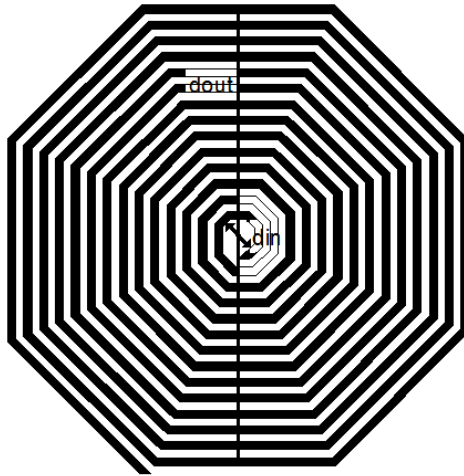
ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของขดลวดแต่ละแบบ

ลักษณะขดตัวนำ	S21 (dB)
สี่เหลี่ยม	-2.316
แปดเหลี่ยม	-1.805
หกเหลี่ยม	-2.840
วงกลม	-3.320

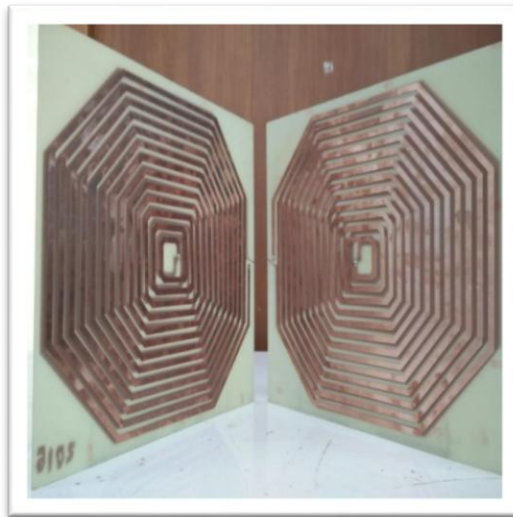
2.1 การออกแบบขดลวดตัวนำโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน

จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) แสดงตามตารางที่ 2 พบว่า ตัวนำแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าที่ดีที่สุด คือ -1.805 ดังนั้นจึงเลือกแบบแปดเหลี่ยม

นำมาพัฒนาเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน การออกแบบใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตาราง 2 โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ลายแบบ 2 ด้าน แต่ละด้านมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4 ลักษณะตัวนำแปดเหลี่ยมที่ได้ออกแบบตามภาพที่ 6 และ 7 ดังนี้



ภาพที่ 6 การออกแบบขดลวดตัวนำลักษณะแปดเหลี่ยมแบบ 2 ด้าน



ภาพที่ 7 ขดลวดตัวนำลักษณะแปดเหลี่ยมแบบ 2 ด้าน

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ขดลวดตัวนำแปดเหลี่ยม 2 ด้าน

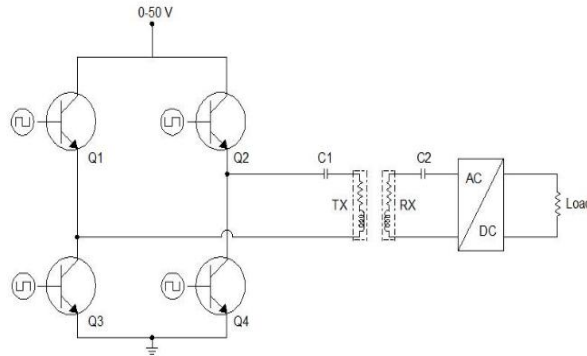
ขนาด	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2
ค่าความต้านทาน (R)	1.63Ω	1.66Ω
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	89.68μH	89.90μH
จำนวนรอบ (N)	28 รอบ	28 รอบ
ความกว้างขดตัวนำ (W)	5 mm.	5 mm.
ระยะห่างขดตัวนำ (g)	5 mm.	5 mm.

ทำการวัดค่าโดยใช้ R-L-C ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ส่วนคาปาซิแตนซ์คำนวณให้สัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ และความเหนี่ยวนำ ตามสมการ

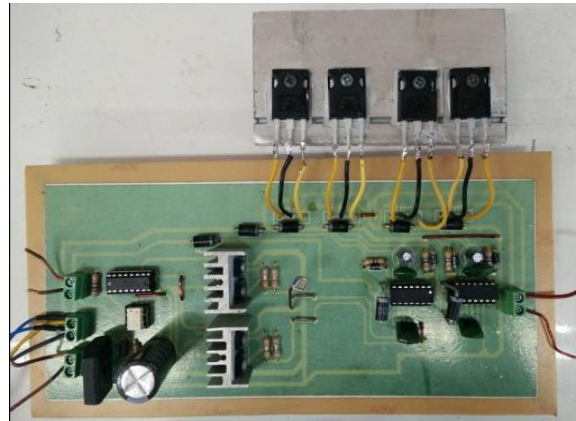
$$C = \frac{1}{(4\pi^2 \times f_r \times L)} \quad (5)$$

2.2 อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

ทำหน้าที่จ่ายกำลังให้กับขดส่งกำลังงาน ในย่านความถี่ระดับกิโลเฮิร์ต(KHz) พัฒนามาจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์แสดงดังภาพที่ 8



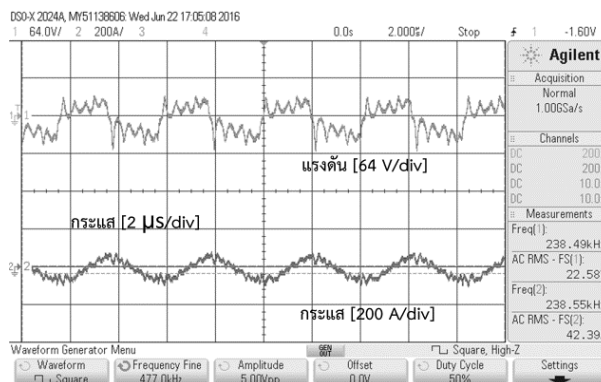
ก) ไดอะแกรมวงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย



ข) วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย

ภาพที่ 8 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ใช้วงจรขับแบบเต็มคลื่น

ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านขดส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด 25W ที่ความถี่ 238.4 kHz แสดงดังภาพที่ 9 ดังนี้



ภาพที่ 9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 5 อุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น

ส่วนประกอบของวงจร	อุปกรณ์
MOSFET N-Channel	IRFP 460
IC Drive	IR 2110
IC Splitter	CD 4017 BE

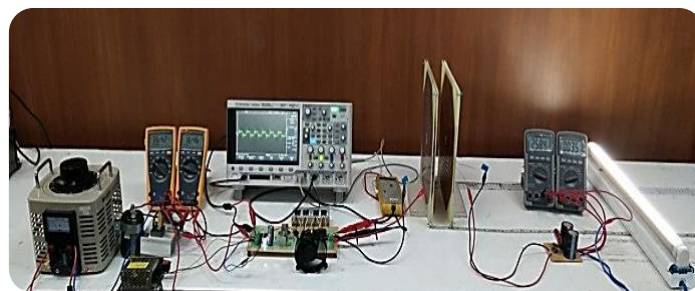
2.3 ออกแบบการทดลอง

ขดตัวนำแบบแปดเหลี่ยมบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้านที่ได้ออกแบบ ถูกนำมาทดสอบส่งกำลังไฟฟ้าวไรสายให้กับโหลดขนาด 1.2 k Ω (25W) ป้อนแรงดันกระแสตรงขาเข้า 25 V คงที่ตลอดการ

ทดลอง ใช้ความถี่ไซน์แชนซ์ 245 kHz ปรับระยะห่างระหว่างขดตัวนำตั้งแต่ 0 – 10 cm และทำการทดสอบปรับค่าความถี่ตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างขดตัวนำ แสดงการส่งกำลังไฟฟ้าวไรสายให้กับโหลดดังภาพที่ 10 และ 11 ดังนี้



ภาพที่ 10 การส่งกำลังไฟฟ้าวไรสายใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ขดตัวนำแบบแปดเหลี่ยม



ภาพที่ 11 การส่งกำลังไฟฟ้าวไรสาย โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

ผลการวิจัย

การทดลองทั้งหมดมี 2 กรณีใช้แรงดันกระแสตรงขาเข้า 25 V คงที่ตลอดการทดลอง ใช้ความถี่ไซน์แชนซ์ 245 kHz จ่ายกำลังงานให้กับโหลดโหลดได้ขนาด 1.2 k Ω (25W) โดยต่อค่าปาสิเตอร์ 4.7 nF ใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายแบบ 2 ด้าน จัดวางแสดงดังรูปที่ 10และใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายแบบ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม จัดวางแสดงดังรูปที่

11 ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าภาคกระแสตรง ด้านขาเข้า และขาออก นำค่าที่ได้ นำมาคำนวณ หากำลังไฟฟ้าวไรสาย และประสิทธิภาพการส่งกำลังงาน

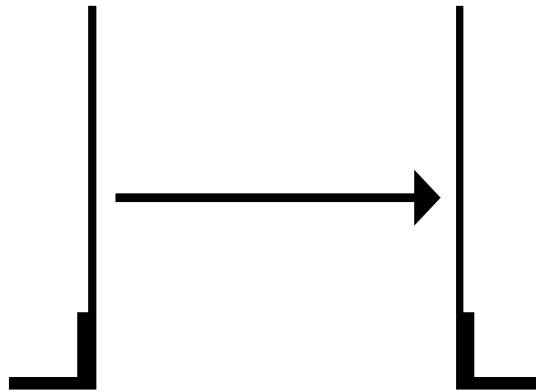
กรณีที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าวไรสายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

**การทดลองที่ 1.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้า
ไร้สายโดยคงที่ความถี่**

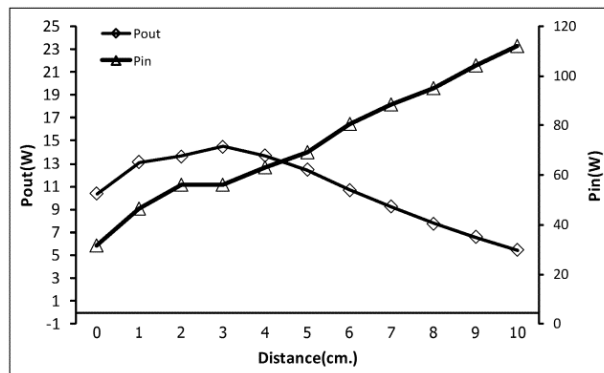
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะ
กำลังไฟฟ้าขาออก และประสิทธิภาพในแต่ละระยะ

ตั้งแต่ 0-10 cm โดยใช้ความถี่ที่ได้จากการคำนวณ
แสดงดังสมการที่ 1 แสดงการจัดวางตัวนำดังภาพที่
12 ดังนี้

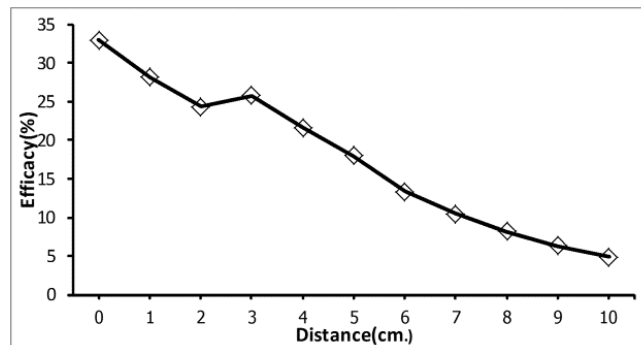


ภาพที่ 12 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยใช้ความถี่คงที่

ได้ลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพแสดง
ดังภาพที่ 13 และ 14 ดังนี้



ภาพที่ 13 กำลังไฟฟ้าขาออก และขาเข้า กรณีใช้ค่าความถี่ที่ตลอดการทดลอง

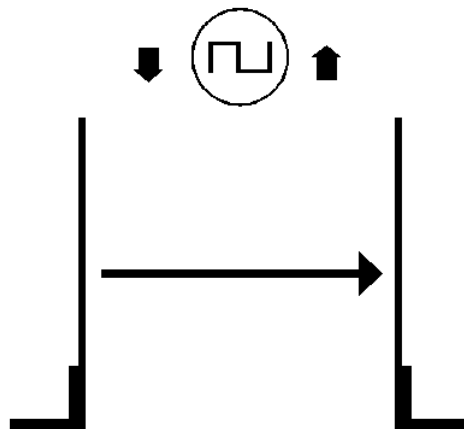


ภาพที่ 14 ประสิทธิภาพกรณีใช้ค่าความถี่คงที่

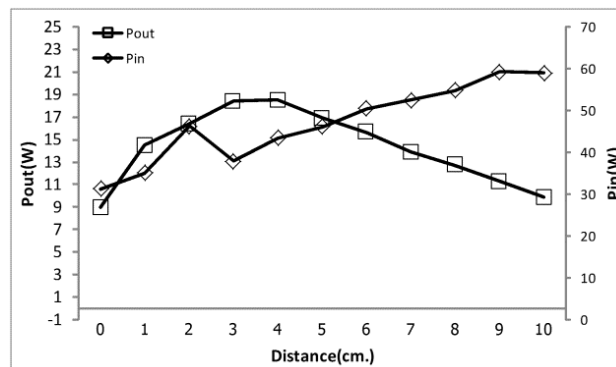
จากภาพที่ 13 และ 14 วงจรสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 15 W ที่ระยะ 3 cm โดยที่ระยะเดียวกันได้ค่าประสิทธิภาพ 25 % ในขณะที่ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้น 33% เมื่อตัวนำวางห่างกันน้อยที่สุด

การทดลองที่ 1.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

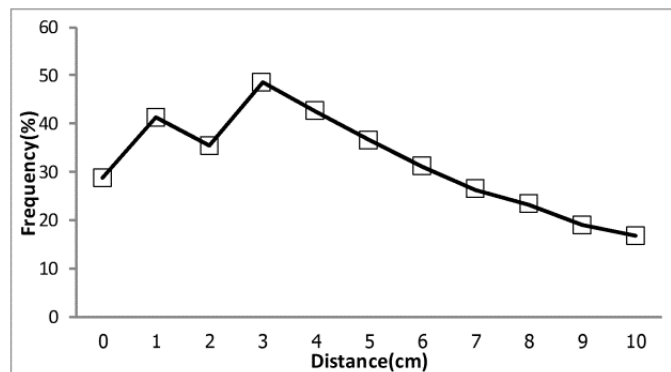
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถี่ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ โดยปรับความถี่ในแต่ละระยะตั้งแต่ 0-10 cm. แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่แต่ละระยะห่างได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 16-19 ดังนี้



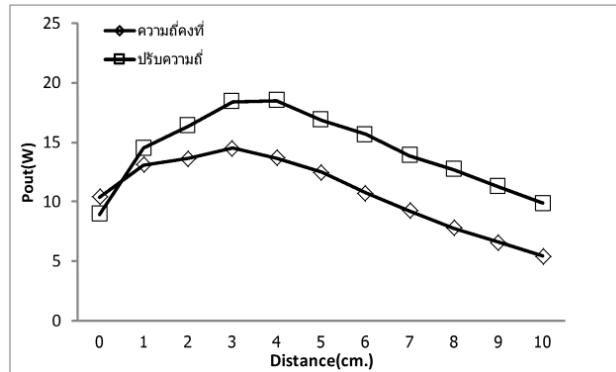
ภาพที่ 16 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออก กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



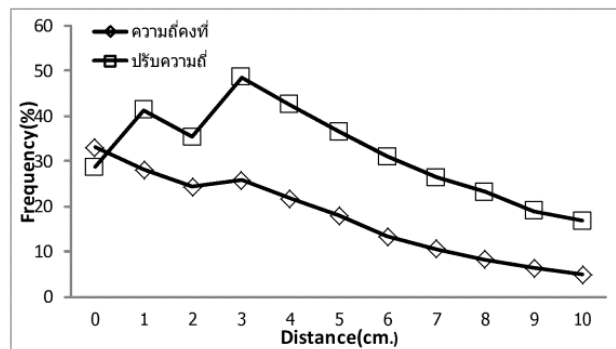
ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพ กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง

จากภาพที่ 16 และ 17 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 18.49W ที่ระยะ 4 cm ใช้ความถี่รีโซแนนซ์ 238.5

KHz ในขณะที่ระยะเดียวกันได้ประสิทธิภาพ 41% โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุด 48.55% เกิดขึ้นที่ระยะ 3 cm



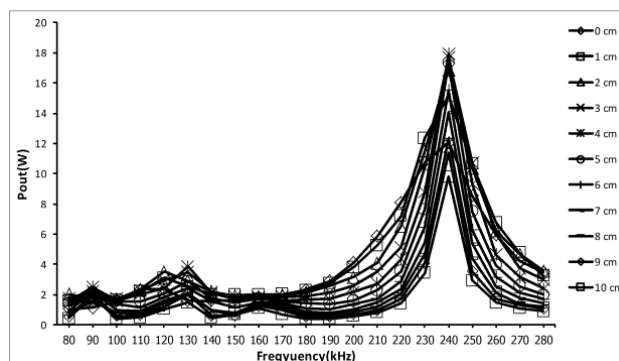
ภาพที่ 18 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าขาออก กรณีใช้ความถี่คงที่และปรับความถี่ แต่ละระยะห่าง



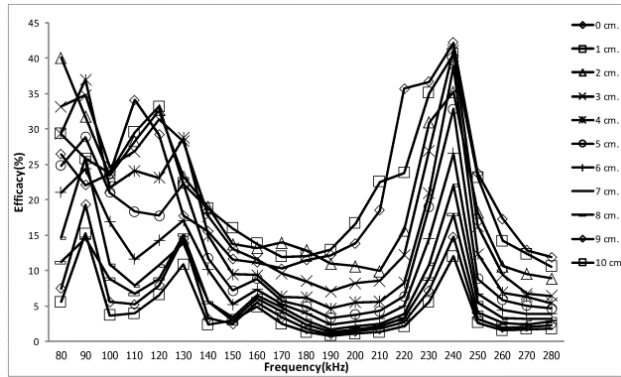
ภาพที่ 19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ กรณีความถี่คงที่และปรับความถี่ แต่ละระยะห่าง

เมื่อนำผลการทดลอง กรณีใช้ความถี่คงที่ เปรียบเทียบกับกรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง พบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกของการปรับความถี่เพิ่มขึ้น 21.53 % ที่ระยะห่าง 4 cm และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก 32.01 % ที่ระยะห่าง 3 cm

จากนั้นได้ทำการทดสอบปรับค่าความถี่แต่ละระยะ โดยใช้ค่าความถี่ตั้งแต่ 80 kHz – 280 kHz ได้ลักษณะกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ แสดงดังภาพที่ 20 – 21 ดังนี้



ภาพที่ 20 กำลังไฟฟ้าขาออกแต่ละระยะจากการปรับค่าความถี่



ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพแต่ละระยะจากการปรับค่าความถี่

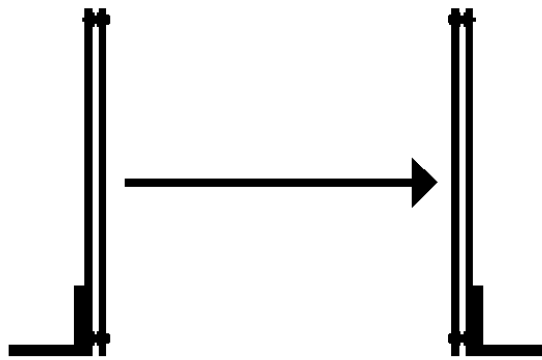
จากภาพที่ 20 และ 21 พบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าไม่ต่างจากการใช้ความถี่รีโซแนนซ์ที่ได้จากการคำนวณมากนัก กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด 17.92 W ระยะ 4 cm. ความถี่ 240 kHz ประสิทธิภาพที่ได้ 42.20 % ระยะ 0 cm. ความถี่ 240 kHz

กรณีที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบแปดเหลี่ยม 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่นต่อแบบอนุกรม

เมื่อนำแผ่นขดลวดตัวนำมาต่ออนุกรมทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่รีโซแนนซ์ลดลง

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้
การทดลองที่ 2.1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยคงที่ความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ เมื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้กับขดส่งและรับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0-10 cm. โดยใช้ความถี่ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังสมการที่ 1 การจัดวางตัวนำแสดงดังภาพที่ 22 ดังนี้

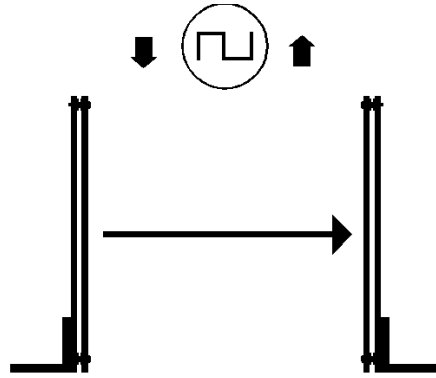


ภาพที่ 22 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายคงที่ความถี่

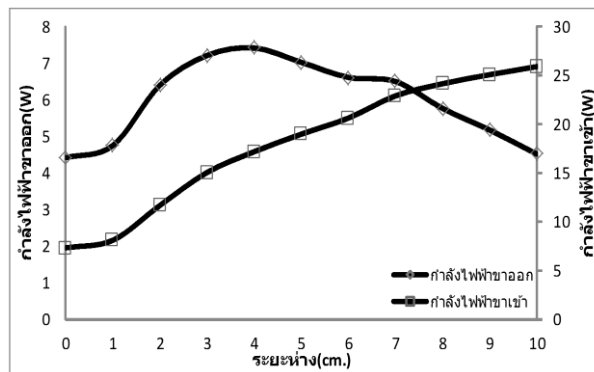
การทดลองที่ 2.2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความถี่ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพ โดย

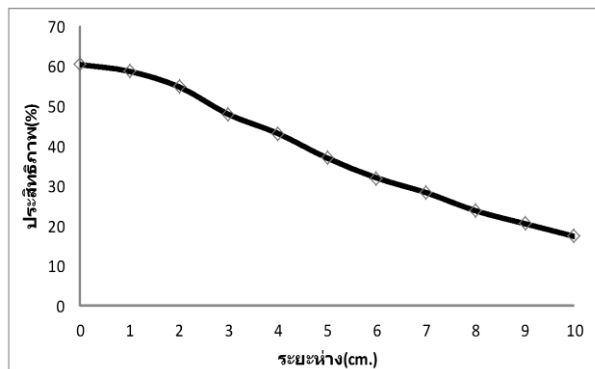
ปรับความถี่ในแต่ละระยะตั้งแต่ 0-10 cm การจัดวางตัวนำแสดงดังรูปที่ 23 ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 24 – 29 ดังนี้



ภาพที่ 23 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายโดยปรับความถี่



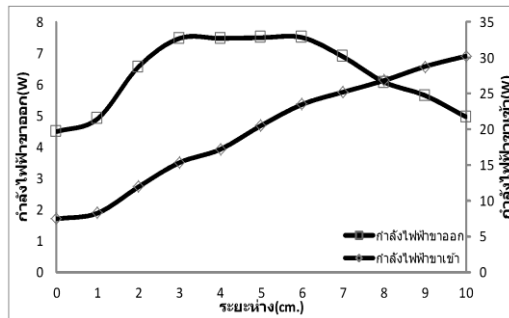
ภาพที่ 24 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกแบบคงที่ความถี่



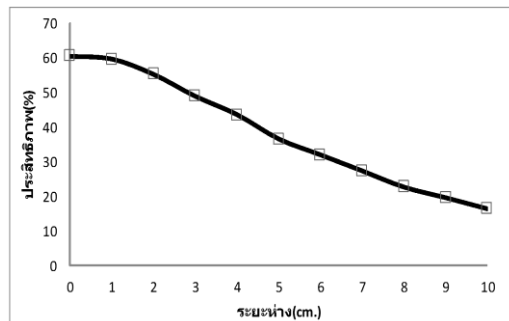
ภาพที่ 25 ประสิทธิภาพแบบคงที่ความถี่

จากภาพที่ 24 และ 25 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 7.41 W ที่ระยะ 4 cm ที่ระยะเดียวกับ

ประสิทธิภาพ 43 % โดยที่ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด 60.42% เมื่อขดตัวนำวางชิดกัน



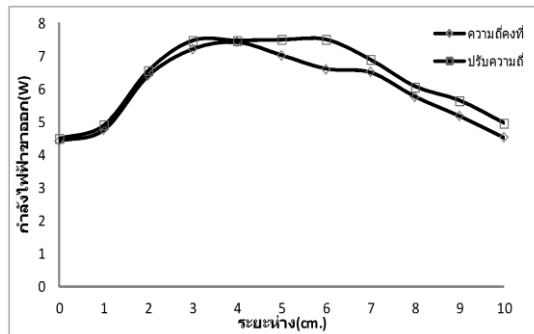
ภาพที่ 26 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกแบบปรับความถี่



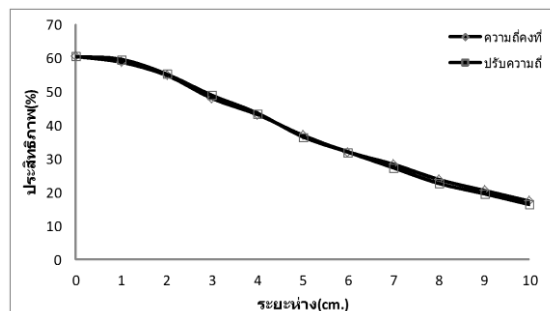
ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพแบบปรับความถี่

จากภาพที่ 26 และ 27 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 7.49W ที่ระยะ 6 cm ความถี่รีโซแนนซ์ 124.65

KHz ประสิทธิภาพที่ระยะเดียวกัน 32.05% ประสิทธิภาพสูงสุด 60.41 เมื่อย่างตัวนำชิดกัน



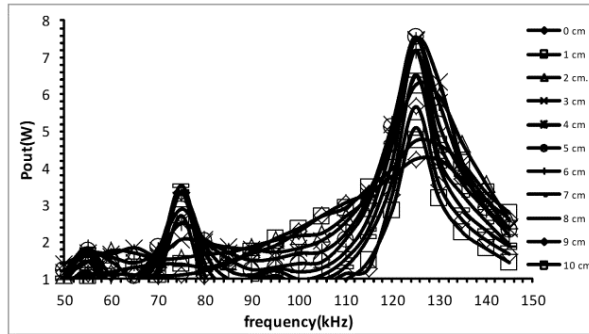
ภาพที่ 28 กำลังไฟฟ้าขาออกแบบคงที่และปรับความถี่



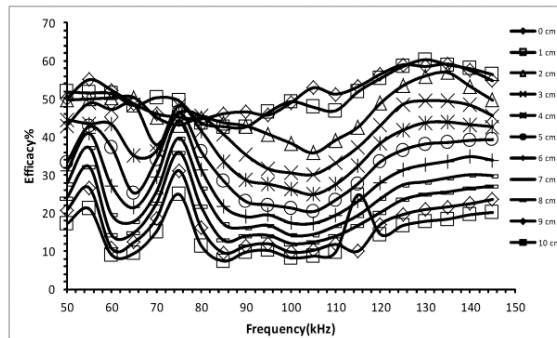
ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพแบบคงที่และปรับความถี่

เมื่อนำผลการทดลอง แบบคงที่ความถี่และปรับความถี่มาเปรียบเทียบกันพบว่า กำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้จากการปรับความถี่เพิ่มขึ้น 1.07% ที่ระยะ

6 cm และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก 0.56% เมื่อวางขดตัวนำชิดกัน เมื่อเทียบกับการคงที่ความถี่



ภาพที่ 30 กำลังไฟฟ้าขาออก กรณีปรับความถี่แต่ละระยะห่าง



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพ กรณีปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่าง

จากภาพที่ 30 และ 31 เมื่อทำการปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์ตั้งแต่ 50 kHz – 150 kHz ได้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ได้ 7.57 W ที่ระยะ 5 cm ใช้ความถี่ 125kHz ประสิทธิภาพที่ได้ 60.34% ระยะ 0 cm ความถี่ 130 kHz

อภิปรายผลการวิจัย

จากการนำลายขดลวดตัวนำแต่ละลักษณะไปทดสอบกับเครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์พบว่า ลักษณะที่มามีค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดคือ ลักษณะแปดเหลี่ยม

กรณีที่ 1 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน

เมื่อระยะห่างระหว่างขดตัวนำเปลี่ยนแปลงทำให้อัตราส่วนการคล้องของฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างขด

ส่งและขดรับกำลังงานลดลง มีผลทำให้ความเหนี่ยวนำรวมลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความถี่รีโซแนนซ์แต่ละระยะต่างกันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับค่าความถี่รีโซแนนซ์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่าการปรับค่าความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ความถี่คงที่

กรณีที่ 2 การทดลองส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้แผ่นวงจรพิมพ์ 2 ด้าน ด้านละ 2 แผ่น ต่อแบบอนุกรม

การเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์หลาย ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์มีค่าลดลงเป็นไปตามสมการความถี่รีโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับความถี่ทำกำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ

กรณีใช้ความถี่คงที่ อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่ได้ยังน้อยกว่ากรณีใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายแบบ 2 ด้าน ในการทดสอบกรณีที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้นทำให้กระแสทางด้านขาเข้าไหลผ่านวงจรขดส่งได้น้อย

สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองใช้แผ่นวงจรพิมพ์กลายเป็นขดส่งและขดรับกำลังงาน ได้ทำการออกแบบขดลวดตัวนำพื้นฐาน 4 รูปแบบ โดยออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากัน ผลการนำไปทดสอบกับเครื่อง เน็ตเวิร์คอนาไลเซอร์ พบว่ารูปแบบแปดเหลี่ยมให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ดีที่สุด จึงได้เลือกรูปแบบแปดเหลี่ยมมาพัฒนาเป็นขดส่งและขดรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายด้านละ 2 แผ่น ผลการทดสอบพบว่า การปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่างให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ความถี่คงที่ จากนั้นได้ทำการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มจำนวนขดส่งและขดรับกำลังงานโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์หลายด้านละ 2 แผ่น พบว่าการปรับค่าความถี่แต่ละระยะห่างสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าขาออกได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเหนี่ยวนำทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลผ่านขดส่งได้น้อยลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสนับสนุนการวิจัยจากโครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (HRS) ปี 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เอกสารอ้างอิง

- Claudia Pacurar et al. (2012). Inductance Calculation and Layout Optimization for Planar Spiral Inductors. **Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**, 2012 13 th International Conference. (pp. 225-232)
- F. Muavi, M. Edington, and W. Eberle. (2012). Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, 1804-1810.
- J.C. Lin. (2013). Wireless Power Transfer for Mobile Applications, and Health Effects. **IEEE Antennas Propagat. Mag.**, vol.55 (no.2), 250-253.
- P. Natthaphon et al. (2013). Wireless Power Transfer Based on MHz Inverter through PCB Antenna. **IEEE conference on Future Energy Electronics Conference (IFEEC) 1st International**, 126-130.
- S. Jeong, Y. Jes Jang, and D. Kum. (2015). Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle. **IEEE Trans. Power Electron.**, vol. 30, no. 11, (pp.6368-6377).
- S. Raju, R. Wu, M. Chan and C. Patrick Yue.(2014). Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Application. **IEEE Transection on power electronics**, vol.29. no.1.
- S. S. Mohan et al.(1999). Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol.34(no.10), 1419-1424.
- S.Y.R. Hui, W.Zhong, and C. K. Lee.(2014). critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. **IEEE Transection on Power Electronics**, vol.29, no.9, pp.4500-4511.

การผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหลาม

Compression Charcoal Fuel from Waste Materials in the Production of Khao-Larm.

กานต์ วิรุณพันธ์^{1*}, ธนารักษ์ สายเปลี่ยน² และ ภาคภูมิ ไชยมณี³
Kant Wirunphan^{1*}, Thanarak Saiplean² and Pakpoom Jaichompoo³

^{1,2,3} สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

^{1,2,3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

*Corresponding author E-mail: kant_wirunphan@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหลาม โดยจะนำเศษวัสดุประกอบไปด้วย กะลามะพร้าวและไม้ไผ่มาเผาเป็นถ่านและผ่านการบดให้ได้เป็นผงถ่าน จากนั้นนำมาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและใช้แป้งมัน 0.5 กิโลกรัมผสมน้ำ 3 ลิตร เป็นตัวประสาน การดำเนินงานวิจัยจะกำหนดส่วนผสมออกเป็น 11 สูตร นำผงถ่านที่ผ่านการผสมมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องแบบเกลียวอัดผ่านแม่พิมพ์รูปทรงห้าเหลี่ยม นำแท่งถ่านไปอบลดความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 238/2547) จากนั้นนำไปทดลองหาประสิทธิภาพทางความร้อนโดยทำการทดลองหาค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าพลังงานความร้อน การรับแรงกดอัดและปริมาณการสิ้นเปลืองในการต้มน้ำ 3 ลิตร ให้เดือดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลจากการวิจัยพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหลามคือสูตรที่ 3 โดยมีส่วนผสมของผงถ่านกะลามะพร้าว 8.55 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 0.95 กิโลกรัม โดยมีค่าความชื้นที่ 6.07 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเถ้าที่ 10.42 เปอร์เซ็นต์ มีค่าพลังงานความร้อนที่ 5,748.83 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม สามารถรับแรงกดอัดที่ 892.530 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และมีปริมาณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการต้มน้ำเดือดที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นปริมาณ 1.917 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง / ตัวประสาน / กะลามะพร้าว / ไม้ไผ่ / ค่าพลังงานความร้อน

Abstract

This research is the compression charcoal fuel production from waste materials in the production of khao-larm. The operate of research, will used charcoal powder from coconut shell and bamboo to burning and Milling. Next, find the appropriate ratio and use 0.5 kilogram of flour per 3 liters of water for binder to compression charcoal fuel production. In experiment, the mixture (coconut shell and bamboo powder) divide into 11 formula fuel ratio. Next, extrusion charcoal powder pass the hexagonal shape of mold by screw compression machine. Next, took a compression charcoal fuel to dehumidification on 8 percentages according to community product standard (TCPS. 238/2547). After that, took a compression charcoal fuel to experiment determine to moisture, ashes and thermal energy by auto bomb calorimeter, compressive stress and determine the quantity of consumption in actual use costive 3 liters of water boiling temperature at 80 degrees celsius. The result of experimental, It was found that the appropriate ratio on formula 3 (8.55 kilogram of coconut shell and 0.95 kilogram of bamboo powder) had efficiency highly more than 10 formula. It had 6.07 percentage of moisture, 10.42 percentage of ashes, 5748.83 kilocalories per kilogram of thermal energy, 892.530 newton per square millimeters of compressive stress, and 1.917 kilogram per hours of fuel consumption.

Keyword: Compression charcoal fuel /Binder/ Coconut Shell/ Bamboo/ Thermal energy efficiency.

บทนำ

จากการสำรวจข้อมูลในพื้นที่ชุมชนบ้านโป่งแค ตำบลวังประจบ อำเภอเมือง จังหวัดตาก พบว่ามีชาวบ้านกลุ่มหนึ่งซึ่งทำการประกอบอาชีพเผาข้าวหลามขายเป็นงานประจำ โดยกลุ่มผู้ประกอบการจะทำการเผาข้าวหลามในทุกๆวัน และจะมีปริมาณการเผาข้าวหลามเป็นจำนวนมากในช่วงฤดูหนาว เทศกาลเข้าพรรษาและเทศกาลปีใหม่ ในการเผาข้าวหลามนั้นจะใช้วัตถุดิบที่สำคัญหลาย ๆ อย่างได้แก่ ข้าวเหนียว มะพร้าว ไม้ไผ่และถ่านไม้เบญจพรรณ สำหรับเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในการเผาข้าว

หลาม จากการผลิตจะมีเศษวัสดุเหลือใช้หลังจากการเผาข้าวหลามเช่น กะลามะพร้าว ไม้ไผ่ ทางกลุ่มผู้ประกอบการจะทำการรวบรวมเศษวัสดุเหลือใช้เหล่านั้นกองรวมไว้แล้วทำการเผาทำลายทิ้งในที่แจ้ง ดังรูปที่ 1 ซึ่งจากการจัดเก็บเศษวัสดุและการเผาทำลายทำให้เกิดปัญหาในด้านต่างๆ เช่นกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์มีพิษ การเผาทำลายทำให้เกิดควันเขม่า ฝุ่นละออง ส่งผลเสียต่อสุขภาพร่างกาย เป็นการทำลายชั้นบรรยากาศและเป็นการทำลายทัศนียภาพอีกด้วย



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการเผาทำลายเศษวัสดุเหลือใช้จากการผลิตข้าวหลาม

จากปัญหาข้างต้นคณะผู้ดำเนินงานวิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญ ประโยชน์ของวัสดุเหลือใช้เหล่านั้นและผลกระทบจากปัญหาต่างๆ จึงได้มีแนวความคิดที่จะนำเศษวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เป็นประโยชน์แล้วนำกลับมาใช้ใหม่โดยการนำกะลามะพร้าว ไม้ไผ่มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากถ่านไม้เบญจพรรณอีกทางเลือกหนึ่งต่อไปในอนาคต จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า (เกศกนก จันทรมาศ, 2546)เกศกนก จันทรมาศ จากมหาวิทยาลัยมหาสารคามทำการศึกษาเรื่องการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากถ่านชีวภาพโดยศึกษาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำมาทำ

ถ่านชีวภาพโดยใช้มูลสัตว์เป็นตัวประสานในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองประกอบด้วยชุดการทดลองดังนี้ชานอ้อยเพียงอย่างเดียว ชานอ้อยผสมกับกากมะพร้าวในอัตราส่วน 1:1:1 ถึง 4:1:1 ชานอ้อยผสมลำต้นมันสำปะหลังในอัตราส่วน 1:1:1 ถึง 4:1:1 และนำวัสดุทั้งสามชนิดมาผสมกันแล้วนำมาอัดเป็นแท่งวัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ตามลำดับ อัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนเฉลี่ยมากที่สุดคือชานอ้อยผสมลำต้นมันสำปะหลังและอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนเฉลี่ยน้อยที่สุดคือชานอ้อยผสมลำต้นมันสำปะหลัง การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเมื่อพิจารณาผลการทดลองจากค่าความร้อนการต้มน้ำปริมาณคว้นและลักษณะของ

ถ่านพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิต คือ อัตราส่วน 2:1:1 ทั้งขานอ้อยผสมลำต้นมันสำปะหลัง และขานอ้อยผสมกาบมะพร้าว (วิไลพร ลักษมี วาณิชย์, กาญจนา สิริกุลรัตน์ และณัฐธัญญา บุญถึง, 2554) วิไลพร ลักษมี วาณิชย์, กาญจนา สิริกุลรัตน์ และณัฐธัญญา บุญถึง จากมหาวิทยาลัยราชภัฏ เชียงใหม่ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยอมรับถ่านอัดแท่งจากซังข้าวโพดผสมกะลามะพร้าวของชุมชน ตำบลช่างเคิ่ง อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ โดยการทนทานแรงกดอัด (Compressive Strength) ของถ่านอัดแท่ง การทดสอบทำได้โดยนำตัวอย่าง ถ่านอัดแท่งไปวางในเครื่องทดสอบแรงกดอัดที่ผลิต ขึ้นแล้วนำมาผลมาเป็นแรงกดอัดโดยเพิ่มแรงกดอัดขึ้น เรื่อย ๆ ที่ใช้ในการกดอัด คือ 5, 10, 50, 100, 500 กรัมตามลำดับ ทำการกดเพื่อหาค่าการทนแรงกดอัด ของถ่านอัดแท่งนั้นสังเกตผลจนกระทั่งถ่านแตก หรือหักโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ คือ ความเครียดและความแข็ง (กิตติพงษ์ ลาภูน, สมโภชน์ สุดาจันทร์ และ ชัยยันต์ จันทร์ศิริ, 2555) ดร.กิตติพงษ์ ลาภูน, ผศ.ดร.สมโภชน์ สุดาจันทร์ และ ผศ.ดร.ชัยยันต์ จันทร์ศิริ จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้ทำการ การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากผงถ่านวัสดุชีว มวล 3 ชนิดด้วยชุดเกลียวอัดถ่านอัดแท่ง โดย ความสามารถในการทำงานพบว่าที่อัตราส่วนผสม ของผงถ่านไม้รวมกับผงถ่านจากกะลามะพร้าว (0.50:0.50) ความเร็วรอบเกลียวอัด 145 รอบต่อ นาทีมีค่าความสามารถในการทำงานสูงสุดเฉลี่ย 131.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เนื่องจากความหนาแน่น รวมเริ่มต้นของผงถ่านแต่ละชนิดมีค่าต่างกัน โดยผง ถ่านกะลามะพร้าวมีค่าความหนาแน่นมากกว่าผง ถ่านไม้รวมและผงถ่านเหง้ามันสำปะหลัง โดย ความเร็วเกลียวอัดเพิ่มขึ้นจาก 115-145 รอบต่อนาที ทำให้ความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้นในทุกอัตรา ส่วนผสม มีค่าความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้น อย่างเป็นสัดส่วน พลังงานที่พบว่าเมื่อความเร็ว เกลียวอัดเพิ่มขึ้นจาก 115-145 รอบต่อนาที ทำให้

พลังงานจำเพาะที่ใช้ลดลงในทุกอัตราส่วนผสมมีค่า พลังงานจำเพาะที่ใช้ลดลงอย่างเป็นสัดส่วนและความ หนาแน่นของถ่านอัดแท่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็ว เกลียวอัดเพิ่มจาก 115-145 รอบต่อนาที ค่าความ หนาแน่นลดลงอย่างเป็นสัดส่วนและในทิศทาง เดียวกันทุกสัดส่วน โดยอัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้ รวมกับผงกะลามะพร้าว (0.50:0.50) ที่ความเร็ว เกลียวอัดคือ 115 รอบต่อนาทีและยังมีค่าความ หนาแน่นมากที่สุดมีค่าเป็น 698.7 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตรอย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นที่ได้มี ค่าความสูงกว่าที่สัดส่วนอื่น ๆ สาเหตุเนื่องจากผง ถ่านกะลามะพร้าวมีความหนาแน่นมากกว่าผงถ่าน ชนิดอื่นที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงของถ่านอัดแท่ง พบว่าเมื่อความเร็วเกลียวอัดเพิ่มจาก 115-145 รอบ ต่อนาทีความแข็งแรงลดลงอย่างเป็นสัดส่วนและใน ทิศทางเดียวกันทุกสัดส่วนผสมผงถ่าน โดยอัตรา ส่วนผสมผงถ่านไม้รวมกับผงถ่านกะลามะพร้าว (0.50:0.50) ที่ความเร็วเกลียวอัด 115 รอบต่อนาทีมี ค่าความแข็งแรงมากที่สุดมีค่า 0.235 เมกะปาสกาล และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งพบว่าความเร็ว เกลียวอัดไม่มีผลทำให้ค่าความร้อนแตกต่างกันทาง สถิติ แต่อัตราส่วนผสมที่ผสมผงถ่านกะลามะพร้าว เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความ ร้อนของผงถ่านกะลามะพร้าวมีค่าความร้อนสูง โดย ที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้รวมกับผงถ่าน กะลามะพร้าว (0.50:0.50) มีค่าความร้อนมากที่สุด คือ 5,527.3 แคลอรีต่อกรัมรองลงมาเป็นอัตรา ส่วนผสมของผงถ่านไม้รวมและผงของถ่าน กะลามะพร้าวที่อัตราส่วน 75 เปอร์เซ็นต์:25 เปอร์เซ็นต์มีค่าความร้อนเท่ากับ 5,240.8 แคลอรีต่อ กรัมและผงถ่านเหง้ามันสำปะหลังกับกะลามะพร้าว อัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์:50 เปอร์เซ็นต์มีค่าความ ร้อน คือ 5,041.22 แคลอรีต่อกรัมซึ่งได้ตาม มาตรฐานของถ่านอัดแท่ง การทดสอบค่าความร้อน โดยทำการทดสอบความร้อนด้วยการต้มน้ำพบว่า ประสิทธิภาพในการใช้งานจริงอยู่ที่ 27.79-29.56

เปอร์เซ็นต์ [8]อุกฤษฏ์ โชติศรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีถ่านอัดแท่ง ส่วนผสมของถ่านอัดแท่งผงถ่าน 10 กิโลกรัม แป้งมัน 0.5 กิโลกรัม น้ำ 3 ลิตร (ปริมาณน้ำสามารถปรับได้ขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุ) จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าการนำดินเหนียวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 มาผสมแทนแป้งมัน ไม่มีผลต่อคุณภาพแท่งถ่านมากนัก ซึ่งถือว่าการลดต้นทุนการผลิตได้มากและอัตราส่วนที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผงถ่าน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาแนวทางในการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ในการเผาข้าวหลาม

แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้
(มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.)เลขที่ 238/2547)

1. พลังงานสวะหรือพลังงานเขียวเป็นพลังงานหมุนเวียนที่เป็นสัดส่วนมากขึ้นเรื่อยๆ ในการใช้พลังงานควรจะเป็นไม้ฟืนและถ่านจึงควรจะเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่มาจากมูลสัตว์พลังงานที่ได้จากชีวมวลซึ่งได้จากเศษซากพืช ต้นไม้ พืชไร่ต่าง ๆ เช่น อ้อย มันสำปะหลัง แกลบ วัชพืช เช่น หญ้าไมยราบ ผักตบชวา รวมทั้งเศษขยะ โดยเฉพาะพลังงานจากชีวมวลนี้จะเป็นแหล่งพลังงานที่ควรจะทำให้ความสนใจและพัฒนาอย่างจริงจัง เนื่องจากเรามีทรัพยากรที่เหลือจากการประกอบอาชีพเผาข้าวหลามตามรูปที่ 2 ที่จะนำมาเป็นพลังงานได้อีกมากมายเทคโนโลยีในการผลิตพลังงานชีวมวลนี้ง่ายราคาไม่แพง ซึ่งประชาชนทุกคนสามารถผลิตและทำขึ้นได้ด้วยตัวเองตัวอย่างวัตถุดิบที่มีการพัฒนาขึ้นมาและมีการนำไปใช้กันบ้างแล้วก็คือ การทำแท่งเชื้อเพลิงจากเศษสวะ เช่น ชานอ้อย ผักตบชวา เศษหญ้าไมยราบ แกลบเป็นต้น แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากเศษพืชเหล่านี้เติมกันสามารถนำไปใช้หุงต้มทำอาหารในครัวเรือนรวมไปถึงนำไปใช้ในร้านอาหารหรืออุตสาหกรรมอาหารอื่นๆ ได้ ดังรูปที่ 2



ภาพที่ 2 เศษวัสดุที่เหลือใช้จากการเผาข้าวหลามสำหรับผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

2. ถ่านไม้หรือเศษไม้ถ่านบริสุทธิ์ เป็นวัตถุดิบ ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์โซเดียม โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ คาร์บอนแอคทีฟ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านไม้ที่มีค่าคาร์บอนสูงใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอีกหลากหลาย เช่น ใช้ในระบบกรองและบำบัด อุตสาหกรรมน้ำดื่ม ระบบผลิตน้ำประปา ระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์จากคาร์บอนในอุตสาหกรรมโลหะหรือใช้ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ให้แข็งตัวช้าและมีความแข็งแรงขึ้น เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง(แบบการอัดเปียก) เป็นการอัดโดยใช้เครื่องอัดแบบเกลียวหรือสกรูซึ่งจะสามารถทำได้ทั้งกับวัสดุสดและแห้ง (แต่ถ้าวัสดุมีความชื้นปานกลางจะอัดได้สะดวกและรวดเร็ว) และสามารถทำได้กับวัสดุชนิดต่าง ๆ อย่างกว้างขวางแต่ในโครงการนี้จะทดลองใช้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย สะดวก เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ดังนั้นโครงการนี้จึงเป็นเทคโนโลยีการอัดแท่งแบบง่าย ๆ สะดวกและไม่สร้างความยุ่งยากซับซ้อนให้กับชาวบ้านในท้องถิ่นซึ่งมีความสมดุลและน่าที่ที่เหมาะสมสำหรับชาวบ้านที่จะผลิตถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อใช้ในการหุงต้มตลอดจนใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ในครัวเรือน และรวมถึงในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก การอัดแท่งเชื้อเพลิงในลักษณะนี้ได้ถือกำเนิดมาจากการอัดแท่งถ่านเขียว (Green Charcoal) ของประเทศฟินแลนด์เมื่อ พ.ศ. 2523 ซึ่งค้นพบโดยมร.กอนซาโลคาแทน (Gonzalo O.Catan) และคณะโดยการนำเศษไม้ใบหญ้าไปหมักให้เน่าเปื่อยด้วยจุลินทรีย์บางชนิดแล้วจึงอัดโดยใช้ตัวเชื่อมประสานจากภายนอกช่วย

เครื่องอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

1. เครื่องอัดขึ้นรูปแบบเกลียวอัด ทำการอัดเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร โดยการบรรจุเศษวัสดุเหลือใช้ที่ต้องการอัดเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ในถัง(Hopper) ที่มี

ทางออกไปสู่กระบอบอัด(Extrusion Cylinder) ภายในกระบอบอัดมีเกลียวสกรูอัดชนิดเกลียวตัวหนอนซึ่งหมุนด้วยความเร็วประมาณ 270 รอบต่อนาที การขับเคลื่อนสกรูใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 3 แรงม้า ความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที ทดรอบด้วยสายพานมูเล่และสามารถทำการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งได้ไม่ต่ำกว่า 25 เมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 3

2. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้นมีตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญที่ทำให้คุณภาพของแท่งเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ได้แตกต่างกันคือ (1)ความชื้น ถ้าหากผงถ่านมีความชื้นมากเกินไปไอน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้แท่งเชื้อเพลิงถ่านระเบิดและแตกกร่อน แต่ถ้าหากว่าความชื้นน้อยเกินไปทำให้ผงถ่านเกาะกันเป็นแท่งได้ยากผิวของแท่งมีรอยแตกกร่อน (2)อุณหภูมิ ถ้าหากว่าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้ผิวหน้าของแท่งใหม่ถ่านเกิดการเกาะตัวกันไม่เป็นเนื้อแน่นดีเท่าที่ควรและถ้าหากว่าใช้อุณหภูมิต่ำความแข็งของแท่งถ่านที่ได้ก็จะต่ำด้วยเช่นกันที่สำคัญต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และการใช้เชื้อถ่านวนพันรอบเครื่องทำความร้อนจะช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศได้ (3)ความดัน ความดันในกระบอบอัดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเกลียวอัดความสูงของเกลียวความเร็วของสกรูตลอดจนระยะห่างระหว่างผนังกระบอบอัดกับสกรูเมื่อผงถ่านหมุนตันให้ติดกับกระบอบอัดซึ่งรับความร้อนมาจากเครื่องทำความร้อนจะทำให้เกิดการเกาะตัวกันและแรงเสียดทานระหว่างกระบอบอัดกับการเคลื่อนตัวของแท่งถ่านทำให้การอัดตัวแน่นยิ่งขึ้น (4)การใช้และบำรุงรักษาเครื่องอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เครื่องอัดชนิดนี้ทำงานด้วยการอัด (Pressure)หรือแรงดันจากมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 3 แรงม้า ที่ไปหมุนสกรูหรือเกลียว ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องที่ผลิตจากสแตนเลสแทนเหล็กทำให้มีความทนทานต่อการสึกกร่อนเพื่อขบวัสดุให้อัดแน่น

เป็นแท่งโดยรีดออกมาจากกระบอกรีต (Troat-ทำจากสแตนเลส)

3. วิธีการอัดแท่งเชื้อเพลิง (แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก) การอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำได้หลายรูปแบบเช่น การอัดเป็นเม็ด การอัดเป็นแท่งเล็ก การอัดเป็นลูกบาศก์ การอัดเป็นแท่งฟืน ในอุตสาหกรรมนิยมใช้การอัดเกลียวหรืออัดสกรู (Screw) การอัดแท่งด้วยเกลียวหรือสกรู (Screw) สามารถอัดได้ 2 แบบคือ (1) การอัดแท่ง คือวัสดุก่อนอัดจะต้องได้รับการบดละเอียดสม่ำเสมอในการบดกรณีที่เครื่องอัดมีแรงอัดสูงมากก็อาจไม่จำเป็นต้องบดก่อนเพราะเครื่องอัดจะทำหน้าที่บดและอัดในตัว ความชื้นของวัสดุที่บดแล้วก่อนทำการอัดควรมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 7-12 เปอร์เซ็นต์หากสูงกว่าหรือต่ำกว่าเกณฑ์อาจอัดไม่ได้ผล โดยใช้แรงอัดสูงตั้งแต่ 0.100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การบดอัดของวัสดุที่เกิดจากแรงขัดสีของวัสดุกับเกลียวโดยที่กระบอเกลียวจะมีการถูกทำให้เร็วตามความเหมาะสมและจะต้องมีร่องหรือสันเพื่อป้องกันการหมุนของวัสดุไปตามเกลียวที่หมุน ส่วนใหญ่การอัดต้องใช้ความร้อนจากภายนอกช่วยเพื่อทำให้ลักษณะของผนังเซลล์ละลายใช้เป็นตัวเชื่อมประสานขึ้นส่วนของวัสดุที่ถูกอัดเป็นแท่ง ดังนั้นความร้อนที่เกิดจากแรงขัดสีระหว่างขึ้นส่วนของวัสดุสกรูและกระบอเกลียวไม่เพียงพอที่จะทำให้ลักษณะที่อ่อนตัวดังนั้นความร้อนที่ใช้เพื่อให้ลักษณะที่อ่อนตัวประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส แท่งเชื้อเพลิงจะมีลักษณะเป็นแท่งฟืนบางที่เรียกว่า ฟืนเทียม (Extruded Log) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 มิลลิเมตร ความหนาแน่นประมาณ 100-1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเชื้อเพลิงจะถูกอัดให้เป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีลักษณะหนักแน่นและแข็ง ในบางกรณีอาจจะจำเป็นต้องเลือกใช้ตัวเชื่อมประสาน (Binding

Materials) จากภายนอกช่วยโดยส่วนใหญ่จะใช้กาวยหรือแป้งเปียก แท่งเชื้อเพลิงนั้นจุดติดไฟยากกว่าฟืนและมีควันมากจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการใช้ในครัวเรือนแต่เหมาะสมในงานอุตสาหกรรม (2)การอัดเปียก คือความชื้นก่อนอัดขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโดยทั่วไปจะมีความชื้นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ จะอัดได้ดีที่สุดแต่หากต่ำกว่านี้อาจจะอัดไม่ได้หรืออัดได้ไม่ดีเท่าที่ควรแต่สำหรับการลดความชื้นไปจนถึง 50 เปอร์เซ็นต์สำหรับวัสดุบางชนิดก็ยังอัดได้ดีอยู่ การอัดเปียกใช้แรงอัดต่ำกว่าการอัดแบบอัดแห้งอย่างมาก การอัดอาศัยแรงและความเหนียวของวัสดุจึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีการให้ความร้อนหรือระบายความร้อน วัสดุก่อนอัดจำเป็นต้องสับหรือบดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แต่ไม่ใช่ละเอียด เมื่อผ่านการอัดเป็นแท่งแล้วแท่งเชื้อเพลิงจะต้องนำไปตากแดดให้แห้งก่อนนำไปใช้ แท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นระหว่าง 600-800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื้อของแท่งเชื้อเพลิงจะถูกอัดเป็นเส้น ๆ หรือขึ้นการรวมตัวไม่แน่นหรือหลวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างการอัดแห้ง บางกรณีอาจใช้ตัวประสาน (Binding Materials) จากภายนอกช่วย การอัดทำได้ง่ายกว่า ประหยัดกว่าและทำได้เกือบทุกอย่างกว้างขวางกว่าการอัดแห้งแบบใช้ความร้อน

ตัวประสานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง

ตัวประสาน คือ สารที่ผสมลงไปในตัววัตถุดิบเพื่อทำให้วัตถุดิบนั้นเกาะติดกันได้ดีมากยิ่งขึ้นในการพิจารณาที่จะทำการอัดแท่งโดยใช้ตัวประสานนั้นจะต้องคำนึงถึง(1)ราคาต้องไม่แพงมากนัก (2) ต้องใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุดแต่ยังคงให้แท่งเชื้อเพลิงมีคุณภาพดี (3)จะต้องทนน้ำ (4)จะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงและสามารถจะปกคลุมพื้นที่ของวัตถุดิบที่บดได้ทั่วถึงเพื่อให้การยึดเหนี่ยวเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 3 เครื่องอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งแบบเกลียวอัด

การใช้ประโยชน์จากผลผลิตเชื้อเพลิงถ่าน

1. การใช้ประโยชน์จากผลผลิตถ่านสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าที่เข้าใจกันเพียงแต่นำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือนเท่านั้น ในประเทศจีน เกาหลีและญี่ปุ่น ซึ่งมีเทคโนโลยีการผลิตถ่านอย่างล้ำหน้าจะสามารถผลิตถ่านขาว (White Charcoal) เพื่อใช้ถ่านขาวในเชิงเพื่อสุขภาพ โดยเฉพาะ ใช้ถ่านขาวใส่ลงในกาต้มน้ำร้อนเพื่อทำน้ำแร่เพราะถ่านชนิดนี้จะละลายแร่ธาตุต่าง ๆ ออกมาเพิ่มคุณภาพและรสชาติของน้ำร้อนใช้ชงกาแฟหรือจะใช้ผสมเหล้าวิสกี้ก็จะได้รสชาติที่นุ่มละมุนนี้เป็นตัวอย่างการใช้ถ่านแบบพิเศษในต่างประเทศ ในบ้านเราผลผลิตถ่านส่วนใหญ่จะเป็นถ่านดำที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิต่ำซึ่งไม่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงปิ้งย่างอาหาร แต่ถ่านดำได้เปรียบกว่าถ่านบริสุทธิ์ตรงที่ผลิตได้จำนวนมาก ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ทำเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ไม่เป็นการประกอบอาหารโดยตรง เช่น ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิง ถ่านหินชนิดต่าง ๆ ซึ่งมักจะมีค่ามลพิษที่สูงมาก แต่อย่างไรก็ดีถ่านดำที่ผลิตด้วยอุณหภูมิสูงที่เราเรียกว่า ถ่านบริสุทธิ์ นั้นหากมีปริมาณผลผลิตที่มากพอและคงที่ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายทั้งในครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมได้ตามรายงานของชมรมสวนป่าผลิตภัณฑ์และพลังงานไม้คือ (1)การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ถ่านบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม

ผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ โซเดียมไฮยาไนด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์หรือถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านที่มีค่าคาร์บอนเสถียรสูง ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอีกหลากหลายอาทิ ใช้ในระบบกรองและบำบัดอุตสาหกรรมน้ำดื่ม ระบบผลิตน้ำประปา ระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์จากคาร์บอนในอุตสาหกรรมโลหะหรือใช้ซีเมนต์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ให้แข็งตัวช้าและมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น

2. การใช้ประโยชน์ในครัวเรือน คุณสมบัติในการดูดซับกลิ่นและความชื้นของถ่านเป็นที่รู้จักกันดีแล้ว แต่ในต่างประเทศอุตสาหกรรมผลิตเครื่องประดับจากถ่านเพื่อใช้ประโยชน์ในบ้านเรือนได้รับความนิยมมาก คนญี่ปุ่นเป็นตัวอย่างของผู้ที่มองเห็นคุณประโยชน์ของถ่านอย่างชัดเจนการใช้ถ่านเพื่อทำหน้าที่ลดกลิ่นในห้องปรับอากาศมีประสิทธิภาพที่ดีมากในห้องแอร์ที่ทำงานหรือในรถ โดยเฉพาะที่มีผู้สูบบุหรี่หรืออาจจะมีเชื้อจุลินทรีย์ควรนำถ่านไม้ไปวางดักไว้ที่ช่องดูดอากาศกับของเครื่องดูดอากาศรถยนต์และจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในถ่านไม้จะดูดซับกลิ่นและเชื้อโรคต่าง ๆ เอาไว้ช่วยลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้อย่างดีหรือจะใช้ถ่านเพื่อการบำบัดน้ำ

3. การใช้ประโยชน์ในการเกษตร ในภาคการผลิตเชิงเกษตรการนำถ่านไม้มาใช้ประโยชน์นับว่ามีคุณค่าที่น่าสนใจไม่น้อยเนื่องจากว่าถ่านมีคุณสมบัติที่

ไม่เป็นพิษภัยต่อพืชและสัตว์จึงสามารถใช้ทดแทนสารเคมีราคาแพงได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพไม่แพ้กันทีเดียว ใช้เป็นสารปรับปรุงดิน ถ่านไม้จะมีรูพรุนมากมายเพื่อใส่ถ่านป่นลงในดินจะช่วยปรับสภาพดินให้ร่วนซุยอุ้มน้ำได้ดีขึ้นส่งผลให้รากพืชขยายตัวอย่างรวดเร็วช่วยลดการใช้ปุ๋ย เพราะสมบัติต่าง ๆ ของจุลธาตุที่มีอยู่หลายชนิดในถ่านจะเป็นประโยชน์ให้แก่พืชที่ปลูกถ่านไม้ที่นำมาปรับปรุงดินควรเป็นเศษถ่านขนาดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร โดยอาจจะเป็นถ่านแกลบหรือถ่านขานอ้อยแต่ควรระวังเชื้อราซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างสูงเพราะพืชที่ไม่ชอบดินที่มีค่าเป็นด่างสูงควรรักษาความเป็นกรด-ด่างของดินไว้ที่ PH 6.0-6.8 ช่วยรักษาผลผลิตให้สดนานขึ้น ผัก และผลไม้จะมีกลิ่นหอม ก๊าซเอทิลีน (Ethylene) เพื่อทำให้ตัวเองสุกเราสามารถรักษาผลผลิตให้สดนานขึ้นโดยใส่ผงถ่านลงในกล่องบรรจุเพื่อดูดซับก๊าซดังกล่าวไว้ไม่ให้ออกฤทธิ์ผักผลไม้จะยังคงสดอยู่ได้ยาวนานถึง 17 วันโดยไม่เสียหายหรือสุกงอม ปัจจุบันได้มีการนำผง ถ่านกัมมันต์ผสมลงในกระดาษที่ใช้ทำกล่องบรรจุผลผลิต ถ่านแกลบใช้ทดแทนแกลบรองพื้นคอกสัตว์ซึ่งราคาถูกลงและหาง่ายพอ ๆ กันเพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนและก๊าซต่าง ๆ อันเป็นสาเหตุหนึ่งของอาการเครียดในสัตว์ส่งผลให้สุขภาพและผลผลิตจากปศุสัตว์มีคุณภาพดีขึ้น ใช้ผสมอาหารสัตว์นำผงถ่านผสมในอาหารสัตว์อัตราส่วนเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ถ่านจะช่วยดูดซับก๊าซในกระเพาะและลำไส้ช่วยลดอาการท้องอืดเนื่องจากปริมาณน้ำในอาหารสูงเกินโดยไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์ ปรับปรุงคุณภาพแหล่งน้ำนำถ่านไม้ใส่กระสอบ (ในปริมาณที่สอดคล้องกับปริมาณแหล่งน้ำ) ไว้ที่ก้นบ่อและจัดให้มีกรวยไหลเวียนน้ำบริเวณกระสอบถ่านน้ำเศษอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ในน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในรูพรุนของถ่านช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำในบ่อเลี้ยงปลาหรือกึ่งได้เช่นกันจากแหล่งเดียวกัน

ในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้ประโยชน์จากถ่านไม้อย่างกว้างขวางเป็นล่ำเป็นสันจนถึงว่าถ่านเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ดีเยี่ยมมีปริมาณการใช้ในภาคเกษตรไม่น้อยกว่าปีละ 50,000 ตัน

หลักการตรวจสอบเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งด้วยเครื่อง Auto Bomb Calorimeter และตัวอย่างการวิเคราะห์(ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน, ฝ่ายวิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม)

1. การทดสอบค่าความร้อนค่าคงตัวค่าของสารละลายของวัสดุ (1) การทดสอบลักษณะทั่วไป ภาชนะบรรจุให้ตรวจสอบและพิจารณาความสมบูรณ์ของภาชนะบรรจุ ภาชนะบรรจุต้องสะอาดแห้งและป้องกันเสียหายที่เกิดขึ้นกับถ่านได้และภาชนะบรรจุหรือฉลากอย่างน้อยต้องมีเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดเช่น ชื่อเรียก ผลิตภัณฑ์น้ำหนักสุทธิเดือนที่ทำ ข้อแนะนำในการใช้และการบำรุงรักษา (2) การทดสอบการใช้งาน ให้ทดสอบโดยการจัดตัวอย่างถ่านอัดแท่งแล้วตรวจพินิจ (3) การทดสอบความชื้นค่า ความชื้นของถ่านวิเคราะห์ตาม ASTM D 3173 โดยให้ความร้อนกับถ่าน 1 กรัมที่อุณหภูมิ 103-110 องศาเซลเซียสและคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักที่หายไป ค่านี้ถือว่าสำคัญมากโดยเฉพาะในด้านการซื้อขายโดยเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านที่แห้งดังนั้นจึงต้องจำเป็นใช้ค่าความชื้นนี้ไปคำนวณกับค่าอื่น ๆ ของถ่านให้อยู่ในสภาพตัวอย่างที่แห้ง (4) การทดสอบการวิเคราะห์ ปริมาณ ถ่าน ตาม ASTM D 3174 ทำโดยการเผาตัวอย่าง 1 กรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสและคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่ยังคงเหลืออยู่ (5) การทดสอบน้ำหนักสุทธิ ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสมจากข้อมูลเชิงลึกที่ได้ติดตามกันมาทำให้เราได้เห็นถึงประโยชน์อันมากมายของถ่านไม้ที่เคยดูเหมือนจะมีค่าแค่เพียงเป็นฟืนหุงข้าวของคนโบราณ แต่หากเรารู้จักการนำมาใช้อย่างสร้างสรรค์และเข้าใจถึงคุณประโยชน์ของถ่านไม้ที่ได้จากไม้พืชมืดที่มีอยู่มากมายในประเทศ

ไทยก็จะเป็นประโยชน์ต่อระบบการผลิตในหลาย

แขนง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าของสารระเหย ถ่านคองตัว ปริมาณเถ้า กำมะถัน พลังงานความร้อน

ตัวอย่าง	สารระเหย (เปอร์เซ็นต์)	ถ่านคองตัว (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณเถ้า (เปอร์เซ็นต์)	กำมะถัน (เปอร์เซ็นต์)	พลังงานความร้อน (แคลอรี/กรัม)
ซีเลื่อย	71.30	27.20	1.50	-	4,990
ซีกบ	72.40	25.10	2.50	-	4,990
กากอ้อย	73.90	17.60	8.50	-	4,440
ขานอ้อย	71.80	23.40	4.80	-	4,510
แกลบ	62.70	17.40	20.00	-	3,860
ฟางข้าว	74.40	18.90	7.30	-	4,300
ต้นมันสำปะหลัง	76.20	19.10	4.70	1.30	4,300
ซังข้าวโพด	76.10	21.80	2.10	-	4,540
กะลามะพร้าว	73.70	25.59	0.70	0.03	4,830
ไมยราบยักษ์	71.20	25.10	3.70	-	4,460
เส้นใยปาล์ม	71.50	23.10	5.40	-	4,820
ไม้อย่างพารา	74.9	23.0	2.10	-	4,560
ถ่านไม้อย่างพารา	17.5	79.1	3.40	-	7,650
น้ำมันเตา*	-	-	-	2.43	10,450
ถ่านหิน	42.80	49.50	7.70	1.73	5,860
ถ่านโค้ก	1.20	90.60	8.20	0.48	7,150

หมายเหตุ : คือพลังงานความร้อนที่สูงสุด

วิธีการวิจัย

การเตรียมวัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์

1. การเตรียมวัตถุดิบ สามารถดำเนินการตามขั้นตอนคือ (1) นำเศษกะลามะพร้าวและไม้ไผ่แล้วนำมาทำการเผาให้เป็นถ่านดังรูปที่ 5 (2) นำถ่านกะลามะพร้าวและถ่านไม้ไผ่มาตีย่อยด้วยเครื่องให้มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะสามารถนำไปอัดเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งได้ (3) ใช้ตะแกรงร่อนคัดแยกขนาดผงถ่านเมื่อทำการตีถ่านเสร็จให้นำถ่านที่ผ่านการตีไปร่อนใน

ตะแกรง (4) นำผงถ่านที่ผ่านการร่อนคัดแยกจากตะแกรงไปชั่งน้ำหนักตามที่กำหนดทั้ง 11 สูตร (5) ผสมผงถ่านกะลามะพร้าว ผงถ่านไม้ไผ่กับตัวประสานแต่ละสูตรที่ได้กำหนดทั้ง 11 สูตร เพื่อทำการคลุกเคล้าส่วนผสมวัตถุดิบให้เข้ากันดังรูปที่ 4 (6) นำผงถ่านที่ผ่านการผสมและคลุกเคล้ากันแล้วไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบเกลียวอัดผ่านแม่พิมพ์รูปทรงหน้าตัดห้าเหลี่ยม ดังรูปที่ 6



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 ลักษณะถ่านกะลามะพร้าวและถ่านไม้ไผ่
(ก) ถ่านกะลามะพร้าว (ข) ถ่านไม้ไผ่



ภาพที่ 5 การผสมผงถ่านกับตัวประสาน



ภาพที่ 6 การอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

เงื่อนไขการทดลอง

1. ผสมอัตราส่วนผสมกับตัวประสาน คือ แป้ง
มันและน้ำที่อัตราส่วน 9.5:0.5:3 (กิโลกรัม:กิโลกรัม:
ลิตร)

2. น้ำหนักของน้ำที่ใช้เป็นเพียงตัวผสมระหว่าง
ผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่กับแป้งมันเข้า
ด้วยกันเท่านั้น (ปริมาณน้ำสามารถปรับได้ขึ้นอยู่กับ

ความชื้นของวัตถุดิบที่เตรียมไว้) โดยไม่รวมน้ำหนักของน้ำในการคำนวณลดค่าความชื้น

3. ทำการอัดเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่าน กะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่ ในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 (ตัวอย่างสูตรที่ 3) จาก การคำนวณอัตราส่วน 100 เปอร์เซ็นต์โดยการแบ่งสัดส่วนทั้งสองให้ได้ 100 เปอร์เซ็นต์

ผงถ่านกะลามะพร้าว 90 เปอร์เซ็นต์

$$\frac{9.5 \times 90}{100} = 8.55 \text{ กิโลกรัม}$$

ผงถ่านไม้ไผ่ 10 เปอร์เซ็นต์

$$\frac{9.5 \times 10}{100} = 0.95 \text{ กิโลกรัม}$$

4. ตรวจสอบแท่งเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งโดยการสังเกตลักษณะที่ได้ตรงตามที่ต้องการหรือไม่

5. เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งทั้งหมดคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

6. นำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งทั้งหมดมาลดความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน มผช.238/2547 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.)เลขที่ 238/2547)

7. นำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่าน กะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่ นำมาทดสอบประสิทธิภาพและคุณภาพด้วยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter ซึ่งจะบอกค่าพลังงานความร้อน และปริมาณเถ้า

8. เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง เพื่อให้ทราบว่าอัตราส่วนผสมใดเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 2 สูตรในการหาอัตราส่วนผสมในการอัดแท่งเชื้อเพลิง

สูตรที่	ส่วนผสมของวัตถุดิบ(กิโลกรัม)	
	ถ่านกะลามะพร้าว	ถ่านไม้ไผ่
1	9.50	-
2	-	9.50
3	8.55	0.95
4	7.60	1.90
5	6.65	2.85
6	5.70	3.80
7	4.75	4.75
8	3.80	5.70
9	2.85	6.65
10	1.90	7.60
11	0.95	8.55

การทดสอบหาประสิทธิภาพและคุณภาพของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

1. การทดสอบหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง เพื่อตรวจวัดค่าพลังงานความ

ร้อนในเชื้อเพลิงของถ่านแต่ละสูตรโดยวิธีการต้มน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยการทำให้ในบริเวณที่ไม่มีอากาศถ่ายเท และในขนาดที่ต้มน้ำควรปิดฝาหม้อให้สนิทเพื่อเก็บข้อมูลและบันทึกผล

การทดลองสามารถทำได้โดย (1) นำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ผ่านการลดความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์มาชั่งให้ได้ 1 กิโลกรัมดังรูปที่ 7 (2) นำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ชั่งแล้วไปก่อไฟเพื่อทำการต้มน้ำโดยใช้น้ำปริมาณ 1.5 ลิตร (3) ทำการจับเวลาตั้งแต่เริ่มต้นตั้งหม้อต้มน้ำจนกระทั่งน้ำเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสขึ้นไป (4) นำเทอร์โมมิเตอร์มาวัดอุณหภูมิและทำการหยุดเวลา (5) นำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่เหลือจากการต้มหน้าเดือดมาทำการชั่ง เพื่อหาปริมาณคงเหลือหลังการต้มน้ำและทำการบันทึกผลการทดลอง

2. การทดสอบหาค่าปริมาณถ่าน ดังรูปที่ 8 โดยการนำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งไปทำการจุดไฟโดยใช้เตา

แก๊สเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน ทำการเผาเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเป็นเวลา 3 นาที ที่ความร้อนเท่ากันและปล่อยให้เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเผาไหม้จนเหลือแต่ถ่าน ทำการจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง

3. การทดสอบหาค่าความแข็งดังรูปที่ 9 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง และแรงกด (ยี่ห้อ HOUNSFIELD) เมื่อทำการอัดแท่งวัตถุดิบเสร็จเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดเพื่อตรวจวัดค่าความแข็งในเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเพื่อเก็บข้อมูลและบันทึกผล

4. การทดสอบหาค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter ดังรูปที่ 10



ภาพที่ 7 การลดความชื้นแก่เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง



ภาพที่ 8 การทดสอบหาค่าปริมาณถ่าน



ภาพที่ 9 การทดสอบหาค่าความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

และแรงกด (ยี่ห้อ HOUNSFIELD)



ภาพที่ 10 ชุดเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการลดค่าความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่

อัตราส่วนผสม(กิโลกรัม)		จำนวนวัน(วัน)	ค่าความชื้น(เปอร์เซ็นต์)					ค่าเฉลี่ย
ผงถ่านกะลามะพร้าว	ผงถ่านไม้ไผ่		ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ครั้ง 4	ครั้ง 5	
9.50	0.00	1	16.67	16.25	17.64	18.57	17.33	17.29
		2	13.33	13.43	14.28	14.03	12.90	13.59
		3	7.69	5.17	6.66	8.16	7.40	6.42
		4	5.00	4.54	5.35	5.55	6.38	5.36
0.00	9.5	1	15.00	13.75	14.12	12.75	13.25	13.77
		2	13.23	10.14	10.95	10.81	11.43	11.31
		3	6.78	8.06	7.69	7.57	9.68	7.95
		4	3.63	3.51	3.33	4.92	3.57	3.79
8.55	0.95	1	15.44	15.29	15.71	16.47	16.66	15.91
		2	11.84	11.11	11.86	11.26	12.80	11.77
		3	8.95	7.81	9.61	7.93	9.17	8.69
		4	4.91	5.08	6.38	6.89	7.07	6.07
7.60	1.90	1	14.67	15.49	14.86	15.71	16.00	15.35
		2	12.50	13.33	12.69	13.56	14.87	13.39
		3	10.71	11.54	10.91	11.76	12.65	11.51
		4	4.00	6.52	6.12	4.76	4.57	5.19
6.65	2.85	1	16.47	16.25	17.33	15.55	17.14	16.55
		2	12.67	13.43	12.90	14.47	13.79	13.45
		3	9.67	10.34	7.40	8.46	7.90	8.75
		4	7.14	8.65	6.50	7.56	6.51	7.27
5.70	3.80	1	14.44	13.97	14.58	13.68	14.55	14.24
		2	12.99	11.25	12.19	10.97	12.14	11.91
		3	7.46	9.86	8.33	8.22	7.23	8.22
		4	3.23	4.69	4.55	4.47	3.01	3.99
4.75	4.75	1	14.98	15.01	14.51	14.84	15.18	14.89
		2	11.21	12.72	11.92	11.57	12.58	12.00
		3	8.95	9.58	8.77	9.02	8.61	8.99
		4	4.71	5.86	4.23	4.59	5.11	4.90
3.80	5.70	1	13.75	14.92	13.98	14.54	14.67	14.37
		2	10.14	12.97	11.57	11.30	12.22	11.64

		3	8.06	8.96	9.06	9.41	9.17	8.93
		4	3.51	5.01	4.92	5.05	4.83	4.66
อัตราส่วนผสม(กิโลกรัม)		จำนวนวัน(วัน)	ค่าความชื้น(เปอร์เซ็นต์)					
ผงถ่านกะลามะพร้าว	ผงถ่านไม้ไผ่		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
2.85	6.65	1	17.09	16.29	17.53	16.00	17.61	16.90
		2	15.98	13.36	15.07	13.42	14.28	14.42
		3	8.15	11.03	10.71	9.54	8.53	9.59
		4	6.23	6.51	5.86	5.37	5.97	5.99
1.90	7.60	1	14.12	15.32	14.63	15.11	14.48	14.73
		2	12.33	13.15	11.29	12.75	11.51	12.21
		3	9.38	10.98	9.78	11.35	9.16	10.13
		4	3.45	4.74	5.09	4.82	5.20	4.66
0.95	8.55	1	15.72	16.37	16.87	16.90	15.66	16.30
		2	13.20	12.99	12.72	12.43	12.80	12.83
		3	9.96	10.21	10.56	10.77	10.28	10.36
		4	4.55	5.34	5.24	5.48	4.91	5.10

ตารางที่ 4 ผลการทดลองการหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

อัตราส่วนผสม (กิโลกรัม)		มวลที่เหลือ(กิโลกรัม)	สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (กิโลกรัม)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเฉลี่ย (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
ผงถ่านกะลามะพร้าว	ผงถ่านไม้ไผ่				
9.50	0.00	0.677	0.323	00:11:09	1.745
0.00	9.50	0.623	0.377	00:14:00	1.618
8.55	0.95	0.697	0.303	00:09:45	1.917
7.60	1.90	0.647	0.353	00:08:67	2.434
6.65	2.85	0.670	0.330	00:06:10	3.235
5.70	3.80	0.677	0.323	00:07:25	2.669
4.75	4.75	0.680	0.320	00:08:26	2.318
3.80	5.70	0.687	0.318	00:07:16	2.672
2.85	6.65	0.680	0.320	00:09:47	2.025
1.90	7.60	0.633	0.367	00:06:36	3.462
0.95	8.55	0.617	0.383	00:07:63	3.015

ตารางที่ 5 ผลการทดลองการหาปริมาณเถ้า

อัตราส่วนผสม(กิโลกรัม)		ปริมาณเถ้า(เปอร์เซ็นต์)
ผงถ่านกะลามะพร้าว	ผงถ่านไม้ไผ่	
9.50	0.00	9.75
0.00	9.50	13.92
8.55	0.95	10.42
7.60	1.90	10.64
6.65	2.85	10.95
5.70	3.80	11.24
4.75	4.75	11.85
3.80	5.70	12.37
2.85	6.65	12.95
1.90	7.60	13.42
0.95	8.55	13.87

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการหาค่าพลังงานความร้อน

อัตราส่วนผสม(กิโลกรัม)		ค่าพลังงานความร้อน(แคลอรีต่อกรัม)
ผงถ่านกะลามะพร้าว	ผงถ่านไม้ไผ่	
9.50	0.00	6,388.05
0.00	9.50	6,041.00
8.55	0.95	5,748.83
7.60	1.90	5,699.97
6.65	2.85	5,624.34
5.70	3.80	5,813.98
4.75	4.75	5,677.81
3.80	5.70	5,630.47
2.85	6.65	5,576.46
1.90	7.60	5,446.69
0.95	8.55	5,363.08

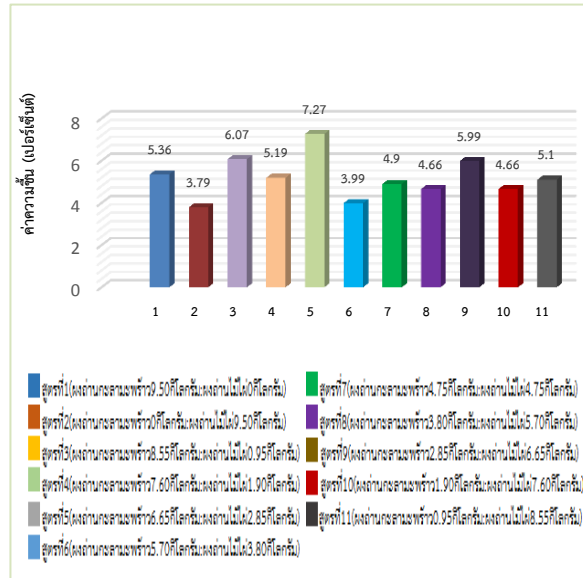
ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่ กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547)

อัตราส่วนผสม(กิโลกรัม)		ค่าต่าง ๆ จากผลการทดลอง					
ผงถ่าน กะลามะพร้าว	ผงถ่านไม้ ไผ่	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิง (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	ปริมาณเถ้า (เปอร์เซ็นต์)	พลังงานความ ร้อน (แคลอรี/กรัม)	การรับแรงกด (นิวตัน)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์ เมตร)
9.50	0.00	5.36	1.745	9.75	6,388.05	1,427.333	696.39
0.00	9.50	3.79	1.618	13.92	6,041.00	541.430	794.28
8.55	0.95	6.07	1.917	10.42	5,748.83	892.530	737.14
7.60	1.90	5.19	2.434	10.64	5,699.97	969.460	639.25
6.65	2.85	7.27	3.235	10.95	5,624.34	310.430	754.28
5.70	3.80	3.99	2.669	11.24	5,813.98	288.760	888.57
4.75	4.75	4.90	2.318	11.85	5,677.81	385.730	894.28
3.80	5.70	4.66	2.672	12.37	5,630.47	71.130	817.14
2.85	6.65	5.99	2.025	12.95	5,576.46	385.560	751.43
1.90	7.60	4.66	3.462	13.42	5,446.69	188.560	854.28
0.95	8.55	5.10	3.015	13.87	5,363.08	601.400	753.54
ถ่านไม้เบญจพรรณ (นิภาพรรณ นัน-ดาวงศ์:2553)		3.692	2.25	3.86	6,748.97	-	-
มาตรฐานถ่าน-อัดแท่ง(มผช. 238/2547)		ไม่เกินเกิน 8 เปอร์เซ็นต์	-	-	ไม่น้อย กว่า 5,000	-	-

ผลการวิจัย

ผลการลดค่าความชื้น

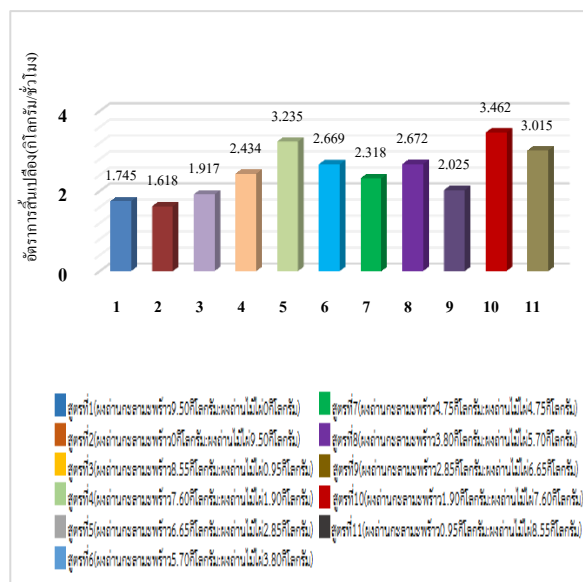
ผลการลดค่าความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งค่าความชื้นเริ่มต้น 100 เปอร์เซ็นต์ บันทึกผลการทดลองหลังการอบทุก 24 ชั่วโมง โดยการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสระยะเวลา 4 วัน ดังรูปที่ 11



ภาพที่ 11 กราฟค่าความชื้นของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

ผลการทดลองหาค่าอัตราการสิ้นเปลือง

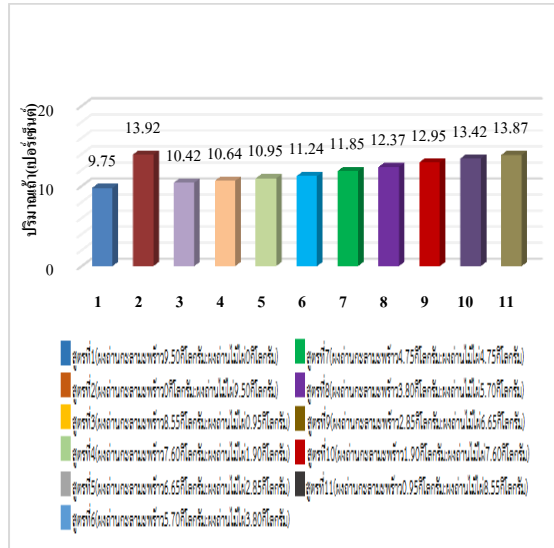
ผลการทดลองหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งมวลที่ใช้ในการทดลอง 1 กิโลกรัมโดยการต้มน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12



ภาพที่ 12 อัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

จากผลการทดลองหาปริมาณเถ้า

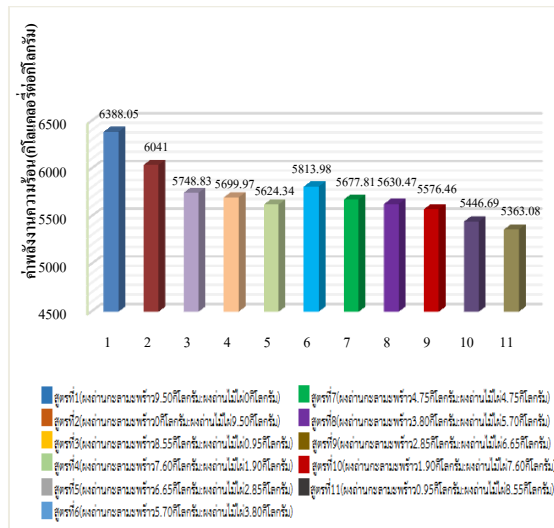
การทดลองหาปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งดังรูปที่ 13



ภาพที่ 13 ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

ผลการทดลองการหาค่าพลังงานความร้อน

จากผลการทดลองการหาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งด้วยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter ดังรูปที่ 14



ภาพที่ 14 ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งด้วยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter

อภิปรายผลการวิจัย

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 11 ผลการทดลองการลดค่าความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่โดยการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสระยะเวลา 4 วันโดยการเปรียบเทียบตามคุณลักษณะที่ต้องการของ มผช.238/2547 พบว่าเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่ในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความชื้นเฉลี่ยไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความชื้นในส่วนผสมของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งสามารถระเหยออกสู่บรรยากาศจากการได้รับความร้อนในการอบ และได้ค่าตรงตามคุณลักษณะที่ต้องการของ มผช.238/2547 กำหนดไว้

จากตารางที่ 4 และรูปที่ 12 ผลการทดลองการหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่เผาไหม้ได้ดีติดไฟได้ยากแต่เมื่อติดอยู่ได้นานจนกลายเป็นเถ้าใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้นาน และการเผาไหม้ได้ไม่ดีหรือเผาไหม้ไม่หมดจะติดไฟง่ายแต่ดับไวใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้น้อย จะว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเฉลี่ยมากที่สุด คือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 10 ผงถ่านกะลามะพร้าว 1.90 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 7.60 กิโลกรัม มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง 3.462 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 3 ผงถ่านกะลามะพร้าว 8.55 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 0.95 กิโลกรัม มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง 1.917 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

จากตารางที่ 5 และรูปที่ 13 ผลการทดลองหาปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่าน

กะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่ ซึ่งปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง เมื่อมีปริมาณเถ้ามากค่าพลังงานความร้อนก็ลดลงแต่ถ้ามีปริมาณเถ้าน้อยค่าพลังงานความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นและเป็นภาระในการจัด จะพบว่าปริมาณเถ้าสูงสุดคือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 11 ผงถ่านกะลามะพร้าว 0.95 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 8.55 กิโลกรัม มีปริมาณเถ้า 13.87 เปอร์เซ็นต์และปริมาณต่ำสุดคือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 3 ผงถ่านกะลามะพร้าว 8.55 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 0.95 กิโลกรัม มีปริมาณเถ้า 10.42 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 6 และรูปที่ 14 ผลการทดลองการหาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ไผ่ ซึ่งเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ได้ให้ความร้อนสูงสม่ำเสมอและทนทานใช้งานได้แต่สูตรมีผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ได้แตกต่างกัน จะพบว่าค่าพลังงานความร้อนสูงสุดคือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 6 ผงถ่านกะลามะพร้าว 5.70 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 3.80 กิโลกรัม มีค่าพลังงานความร้อน 5,813.98 แคลอรีต่อกรัมและค่าพลังงานต่ำสุดคือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 11 ผงถ่านกะลามะพร้าว 0.95 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 8.55 กิโลกรัม มีค่าพลังงานความร้อน 5,363.08 แคลอรีต่อกรัม

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวและไม้ไผ่กับมาตรฐานถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) จากตารางที่ 7 พบว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการเผาข้าวหลามที่ค่าต่างๆผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) คือ อัตราส่วนผสมในสูตรที่ 3 ผงถ่านกะลามะพร้าว 8.55 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 0.95 กิโลกรัม มีค่าความชื้น 6.07 เปอร์เซ็นต์ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.917 กิโลกรัมต่อชั่วโมงปริมาณเถ้า

10.42 เปอร์เซ็นต์ ค่าพลังงานความร้อน 5,748.83 แคลอรีต่อกรัม ค่าความแข็ง 892.530 นิวตัน และ 737.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สรุป

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการเผาข้าวหลาม คือ สูตรที่ 3 ผงถ่านกะลามะพร้าว 8.55 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 0.95 กิโลกรัม มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง 1.917 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้ 00:09:45 ชั่วโมง การลดความชื้นของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง 6.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามค่าความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) ปริมาณเถ้า 10.42 เปอร์เซ็นต์ ค่าพลังงานความร้อน 5,748.83 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งเป็นไปตามค่าพลังงานความร้อนต้องไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) ค่าความหนาแน่น 737.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความแข็ง คือ 892.530 นิวตัน แสดงให้เห็นว่าผงถ่านกะลามะพร้าวมากกว่าผงถ่านไม้ไผ่ เมื่อติดไฟแล้วจะดับได้ยากจะเผาไหม้จนกว่าจะกลายเป็นขี้เถ้า ทำให้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งน้อยสุดใช้งานได้นานและประหยัด เนื่องจากเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งมีความแข็งมากจึงทำให้ไม่เปราะและไม่แตกหักได้ง่าย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้การดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณคุณคุณธีรพัฒน์ อำพาศ คุณบุษยมาศ นันใจยะ คุณชินานาง ชื่นหมี่ และคุณภัทรา จันทร์กระจ่าง สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ที่ช่วยสืบค้นและจัดหาข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- เกศกนก จันทรมาศ. (2546). การศึกษาเรื่องการเปรียบเทียบค่าความร้อนจากถ่าน. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- วิไลพร ลักขมีวาณิชย์, กาญจนา สิริกุลรัตน์ และณัฐชนันญา บุญถึง. (2554). พฤติกรรมการยอมรับถ่านอัดแท่งจากซังข้าวโพดผสมกะลามะพร้าวของชุมชนตำบลช่างเคิ่ง. อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ โดยการทนทานแรงกดอัด (Compressive Strength) ของถ่านอัดแท่ง. สาขาวิชาฟิสิกส์. ภาควิชาวิทยาศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- กิตติพงษ์ ลาลุน, สมโภชน์ สุดาจันทร์ และ ชัยยันต์ จันทร์ศิริ.(2555). การผลิตถ่านอัดแท่งจากผงถ่านวัสดุชีวมวล 3 ชนิดด้วยชุดเกลียวอัดถ่านอัดแท่ง. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2552). **กระทรวงพลังงาน**. Available from http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68&lang=th,
- แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก**, Available from <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>,2555-2564.
- ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน ฝ่ายวิจัยพลังงาน และสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. Available from <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/hot.php>.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.)เลขที่ 238/2547 เป็นมาตรฐานเกี่ยวกับเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง http://tcps.tisi.go.th/pub%5Ctcps238_47.pdf.

การออกแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงต้นทุนต่ำสำหรับการเคลือบผิววัสดุ

Design of low-cost DC magnetron sputtering for thin films deposition

จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร^{1*}, วรวัฒน์ ตาลำ², สิทธิพล แสนสม³ และ เพลิน จันทรสุยะ⁴
Jirapatpong Senabut^{1*}, Worawat Talam², Sitthiphon Saensom³ and Plearn Jansuya⁴

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

^{2,3,4} สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

¹ Faculty of Agricultural Sciences and Technology Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai

^{2,3,4} Electrical Engineering of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Rai

* Corresponding Author. E-mail: jirapatpong.amcet@gmail.com

บทคัดย่อ

เครื่องเคลือบฟิล์มบางต้นทุนต่ำถูกพัฒนาสำหรับการเคลือบผิววัสดุและลดการนำเข้าอุปกรณ์ราคาแพงจากต่างประเทศวัสดุที่เลือกใช้คำนึงจากราคาที่ต้องไม่สูง และสามารถหาซื้อได้ง่าย โดยเลือกเป้าสารเคลือบที่ใช้เป็นเป้าทองแดง มีอัตราการเคลือบ 155.89 นาโนเมตรต่อชั่วโมง ฟิล์มบางของทองแดงจะทำการปรับระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าสารเคลือบที่ 2 เซนติเมตร ค่ากระแสไฟฟ้าในการกระบวนการเคลือบฟิล์มอยู่ที่ 200, 300, 400 และ 500 มิลลิแอมแปร์ พบว่า ความหนาของฟิล์ม และค่ากระแสไฟฟ้า มีค่าสูงสุด เท่ากับ 132.75 นาโนเมตร ที่ 500 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลา 0.75 ชั่วโมง ตามลำดับ

คำสำคัญ: สปัตเตอร์ริง, ฟิล์มบาง, ดิสชาร์จ

Abstract

The low-cost DC magnetron sputtering was devised to thin film deposited development and also aimed at reduction of costly apparatuses from foreign country. The materials used in these devices were selected due to their lower cost and easy to acquire. The bulk copper was used as a cathode target. The coating rate is 155.89 nm/h. The film's thickness with varied of the substrate-target distance at 2 cm. Current values of thin film deposition procedure were 200, 300, 400 และ 500 mA and the result found that the most of film thickness and current were 132.75 nm at 500 mA and coating time 0.75 hrs, respectively.

Keywords: Sputtering, thin film, glow discharge

บทนำ

การเคลือบผิววัสดุและการเคลือบชิ้นงานโลหะในอุตสาหกรรม ในปัจจุบันสามารถแบ่งการเคลือบผิวได้ออกเป็น 2 แบบ คือ การเคลือบเพื่อความสวยงามและการเคลือบเพื่อเปลี่ยนแปลงผิววัสดุให้มีความแข็งแรงหรือกันสนิมการเคลือบเครื่องประดับเพื่อความสวยงามสำหรับใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น แหวนสร้อยคอ สายนาฬิกา ปลอกปากกา และการชุบแข็งเพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น เช่นการเคลือบแม่พิมพ์โลหะเพื่อให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนิยมใช้กระบวนการเทคนิคสปีดเตอริงโดยหลักการเคลือบในระบบสุญญากาศโดยอาศัยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าทำให้อิออนของแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน ทำให้อิออนของแก๊สที่ถูกเร่งด้วยไฟฟ้าศักย์สูงพุ่งชนเป้าสารเคลือบส่งผลให้อะตอมของเป้าที่เป็นสารเคลือบหลุดออกจากผิวเป้าไปเกาะจับตัวกันเป็นชั้นบนผิววัสดุชิ้นงานการเคลือบโดยวิธีนี้ต้องเตรียมชิ้นงานด้วยการทำความสะอาดชิ้นไม่ให้มีคราบสกปรกผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาออกแบบและสร้างชุดเคลือบด้วยเทคนิคสปีดเตอริงต้นทุนต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานในการเคลือบผิววัสดุเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดในปัจจุบันเครื่องยังมีราคาสูงต้นทุนสูงดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกหาวัสดุ อุปกรณ์ในการสร้างชุดเคลือบที่มีราคาถูกหาได้ง่ายมาใช้ในการสร้างชุดเคลือบแบบเทคนิคสปีดเตอริงสารเคลือบที่ใช้เป็นเป้า คือ ทองแดงมาตรฐานเกรด C1100 ความบริสุทธิ์ 99.90 % ระยะห่างการวางกระจกสไลด์ อยู่ที่ 2 เซนติเมตร ใช้แหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้าที่ 200 300 400 และ 500 มิลลิแอมป์วัดความหนาของมวลฟิล์มที่เคลือบบนผิวกระจก เพื่อศึกษาเป็นแนวทางต้นแบบในการพัฒนาชุดเคลือบที่มีประสิทธิภาพในอนาคตข้างหน้าต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและสร้างชุดสปีดเตอริงต้นทุนต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานในการเคลือบผิววัสดุขนาดเล็ก

ทบทวนวรรณกรรม

อารีรัตน์ และคณะ (2012) ได้ศึกษาการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในไตรดที่เคลือบด้วยวิธีอีพ็อกซีที่พีดีซีคอนบอลานซ์แมกนีตรอนสปีดเตอริง ผลของกระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอริงเป้าไทเทเนียม (ITI) ต่อโครงสร้างผลึกลักษณะพื้นผิวและความหนา ในช่วง 300 - 900 มิลลิแอมป์ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหนา ศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) และอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป (Atomic Force Microscope; AFM) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอริงเป้าไทเทเนียมมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม โดยฟิล์มที่เคลือบได้แสดงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมออกไซด์ในไตรดระนาบ (111) (200) และ (220) ความหนาและความหนาของฟิล์มที่ได้มีค่าในช่วง 147 - 252 นาโนเมตร และ 1.4 - 3.1 นาโนเมตร

คมกฤษ และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของกำลังสปีดเตอริงต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรดที่เคลือบด้วย เทคนิคอีพ็อกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ศึกษาผลของกำลังสปีดเตอริงในช่วง 130 ถึง 270 วัตต์ ต่อโครงสร้างฟิล์ม โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มศึกษาด้วยเทคนิค XRD ความหนาและลักษณะพื้นผิวศึกษาด้วยเทคนิค AFM ผลการศึกษาพบว่า การเกิดของฟิล์มที่เคลือบได้จะแปรไปตามกำลังสปีดเตอริงจาก สีม่วง เป็น สีทอง และ สีน้ำตาลฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึก 2 แบบเพชเชนเตอร์คิวบิก (fcc) ระนาบ (111), (200) (220) และ (311) เมื่อกำลังสปีดเตอริงเพิ่มขึ้น พบว่า ขนาดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 21.9 นาโนเมตร เป็น 39.8 นาโนเมตร

ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 331 นาโนเมตร เป็น 1113 นาโนเมตร ขณะที่ความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.5 นาโนเมตร เป็น 21.5 นาโนเมตร

ภัททิรา และคณะ (2014) ได้ศึกษาผลของความดันย่อยไนโตรเจนต่อสมบัติทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมทั้งสแตนไนไตรด์ ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบสุญญากาศถูกปรับให้มีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 9% ของปริมาณแก๊สทั้งหมด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างของผลึกและความต้านทานแผ่น เอกเซอร์เรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงานแสดงสัดส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มโดยสัดส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน สัดส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มมีค่าสูงสุดที่ 19%โดยอะตอมเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป็นลูกบาศก์แบบกลางหน้าของสารละลายของแข็ง Ti₂WYNZ ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มไทเทเนียมทั้งสแตนไนไตรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน โดยค่าความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 5.3 โอห์ม/ตาราง ถึง 11.0 โอห์ม/ตาราง

นิรันดร์ และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของความต่างศักย์ต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีสปัตเตอริงและการเกิดไฮดรอกซีอะ-ปาไทท์ ความต่างศักย์ในช่วง 0 โวลต์ ถึง 150 โวลต์ พบว่า เมื่อความต่างศักย์ต่ำฟิล์มที่ได้จะมีเฟสรูไทล์อยู่ที่ระนาบ (110) และเปลี่ยนเป็นระนาบ (101) เมื่อความต่างศักย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น พบว่าขนาดผลึกมีค่าอยู่ในช่วง 4.2 - 5.9 นาโนเมตร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนไปตามความต่างศักย์ ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วง 80 - 89 นาโนเมตร และ 0.9 - 2.9 นาโนเมตร ตามลำดับ หลังการแช่ชิ้นงานในสารละลาย SBF เป็นเวลา 7 วัน ตรวจพบไฮดรอกซีอะ-ปาไทท์บนผิวหน้าของฟิล์มทุกเงื่อนไขการเคลือบ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

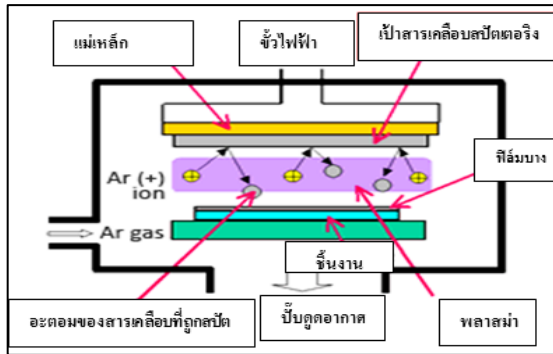
EDS พบว่าอัตราส่วนของ Ca/P ของไฮดรอกซีอะ-ปาไทท์บนฟิล์มทั้งหมดมีค่าประมาณ 1.41 - 1.48

สิทธิวัฒน์ และคณะ (2014) ได้ศึกษาการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีพอกซีสปัตเตอริง โคสปีดเตอริง ด้วยกระแสไฟฟ้าในการสปัตเตอริงเข้าวาเนเดียมเท่ากับ 400 มิลลิแอมป์ ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเม็ดกระจายทั่วผิวหน้าของฟิล์มส่วนฟิล์ม ที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสปัตเตอริงเข้าวาเนเดียมเท่ากับ 600 มิลลิแอมป์ สารเคลือบเริ่มเกาะกลุ่มกันมีขนาดใหญ่ขึ้น และฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสปัตเตอริงเข้าวาเนเดียมเท่ากับ 800 มิลลิแอมป์ ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะ การก่อตัวของโลหะทั่วผิวหน้าฟิล์ม โดยฟิล์มที่เคลือบได้ มีค่าความหยาบผิว (Rrms) ในช่วง 3.75-4.96 นาโนเมตร เมื่อกระแสไฟฟ้าการสปัตเตอริงเข้าวาเนเดียมเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มเพิ่มจาก 883 นาโนเมตร เป็น 1048 นาโนเมตร

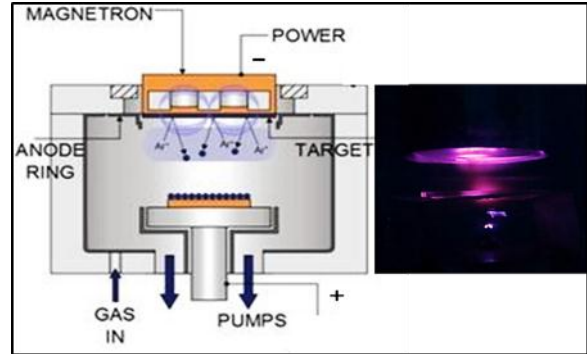
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สปัตเตอริง (Sputtering)

สปัตเตอริง เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์อย่างหนึ่งด้วยอาศัยหลักการเคลือบผิวชิ้นงานภายใต้สภาวะสุญญากาศที่เกิดขึ้นในสภาวะเมื่อผิวหน้าของวัสดุที่เป็นเป้าสารเคลือบถูกชนกระแทกด้วยไอออนของก๊าซที่ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าพลังงานสูงจนทำให้อะตอมของผิวหน้าของวัสดุที่ใช้เป็นเป้าสารเคลือบเกิดการหลุดออกมากระบวนการนี้จะเกิดลำแสงสีม่วงน้ำเงินออกบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบเกิดจากการ ดิสชาร์จทางไฟฟ้าสภาวะที่ทำให้ไอออนออกซิเจนพลังงานสูงระดมยิงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดกระเจิงออกมาปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า สปัตเตอริง และอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของเป้าสารเคลือบ จะไปก่อตัวบนผิวกระเจกเป็นชั้นฟิล์มบาง



ภาพที่ 1 กระบวนการสปีดเตอริง



ภาพที่ 2 กระบวนการเกิดดิสชาร์จ

ดิสชาร์จ

กระบวนการดิสชาร์จของก๊าซ คือ กระบวนการคายประจุไฟฟ้าของระบบที่ประกอบด้วยแก๊สซึ่งในกระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีการเรืองแสงของแก๊สและศักย์ไฟฟ้า ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าลดลงแต่กระแสไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ในสภาวะการกระตุ้นระหว่างไอออนกับอิเล็กตรอนภายในระบบสุญญากาศโดยเมื่อเริ่มให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระในระบบซึ่งเกิดจากอะตอมไฟฟ้าทำอันตรกริยากับรังสี ที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่ภายใต้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าทำให้การชนอะตอมของแก๊สบางส่วนทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนเมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจนถึงศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งจะถูกเร่งให้มีพลังงานจลน์สูงขึ้นทำให้อะตอมของก๊าซมีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้น และไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนขั้วแคโทดและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนรวมภายในระบบมากขึ้น เป็นผลให้ระบบช่วงนี้จะสามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จไว้ได้ เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับระบบหลังจากที่การชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด ของผิวส่วนหน้าคาโทดและทำให้ศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2

กระบวนการดิสชาร์จ ประกอบด้วยกระบวนการในระดับจุลภาค 2 กระบวนการ คือ การชนกันของอนุภาคภายในระบบ และการเกิดอิเล็กตรอนในภาชนะสุญญากาศภายในสภาวะของสนามแม่เหล็ก ซึ่งทั้งสองกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อการรักษาเสถียรภาพของดิสชาร์จ และทำให้เกิดกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางสุญญากาศโดยเลือกใช้วัสดุราคาไม่สูง
2. ทดสอบระบบการเคลือบใช้เป้าทองแดง ดำเนินการเคลือบฟิล์มบางภายใต้แก๊สอาร์กอนอัตราไหล ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศใช้ความต่างศักย์ 0-1.3 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.3 ถึง 0.5 แอมแปร์ และใช้กระจกขนาด 2x5 เซนติเมตร เป็นสไลด์รองรับ
3. หาอัตราการเคลือบของเครื่อง โดยแสดงในหน่วยนาโนเมตรต่อชั่วโมง

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและข้อมูลงานวิจัย กระบวนการเทคนิคสปีดเตอริงค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง และรูปแบบวงจรการทำงานของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง สำหรับการพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการเคลือบผิวชิ้นงาน และมืองค์ประกอบหลัก คือ ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 500 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 0.2 ถึง 0.5

แอมแปร์ ใช้แก๊สอาร์กอน (99.99%) สภาวะสุญญากาศที่ 0.05 มิลลิบาร์ (mbar) การออกแบบสร้างเครื่องสปีดเตอริงทำการศึกษาระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงจากงานวิจัยอื่น ระบบเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงที่ออกแบบและสร้างขึ้นมามีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ

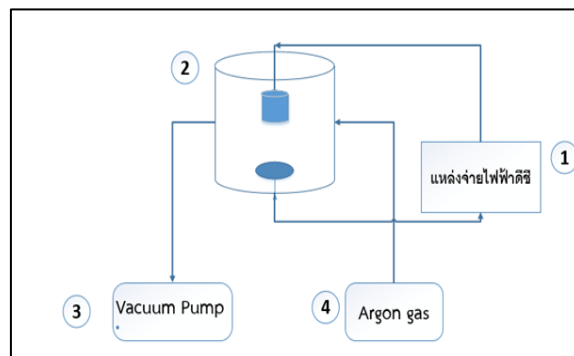
1. ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
2. ภาชนะสุญญากาศ

3. ระบบปั๊มสุญญากาศ

4. แก๊สอาร์กอน

การออกแบบสร้างเครื่องสปีดเตอริง

ทำการศึกษาระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงด้วยการออกแบบและสร้างขึ้นระบบสำหรับการเคลือบผิววัสดุ แสดงในรูปที่ 3



ภาพที่ 3 ระบบการทำดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

1. ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูงที่แรงดัน 0 ถึง 2 กิโลโวลต์ ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เกิดความต่างศักย์การดีสชาร์จในกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

2. ภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่ในการรักษา สภาวะสุญญากาศลักษณะทำมาจากแก้วทรงกระบอก ประกอบด้วยฝาปิดด้านล่าง ภายในประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ แคโทด (-) แอโนด (+) และแท่นวางชิ้นงานกระจก

3. ระบบปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่ในการดูด อากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่ออยู่ระบบ สุญญากาศโดยมีแรงดันแรงดันปั๊มเท่ากับ 5×10^{-3} บาร์

4. แก๊สอาร์กอน เป็นแก๊สเฉื่อยการที่แก๊สเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นในกระบวนการดีซีแมกนีตรอน

สปีดเตอริงภายใต้ความดันต่ำไอออนของแก๊สอาร์กอน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าศักย์สูงเข้าไป จะทำให้ไอออนมี พลังงานสูงพุ่งชนเข้ากับเป้าสารเคลือบหลังจากนั้น ไอออนของเป้าสารเคลือบหลุดออกไปจับตัวบน ผิวชิ้นงานกระบวนการนี้จะเกิดแสงสีม่วงน้ำเงิน

ทำการทดสอบกระบวนการสปีดเตอริง

ทำการทดสอบระยะห่างขั้วไฟฟ้ากระบวนการดี ซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงการทดสอบระยะห่างของ ขั้วไฟฟ้าระยะที่ 5 เซนติเมตรทำการดูดอากาศ ออกเป็นเวลา 5 นาทีให้ได้ความดันที่สุญญากาศที่ 5×10^{-3} บาร์ ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 0-1.3 โวลต์ จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบดีซีแมกนี ตรอนสปีดเตอริง

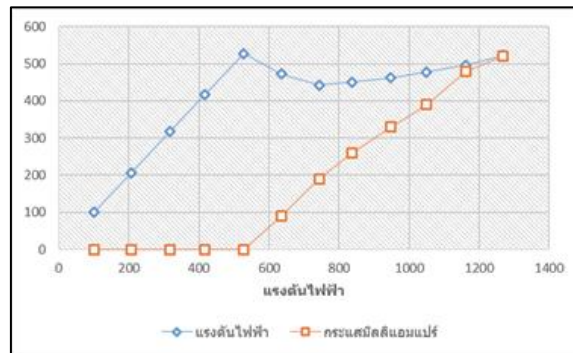


ภาพที่ 4 เครื่องดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ตารางที่ 1 ผลสภาวะการทดลองของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

สภาวะของระบบ	ค่าสภาวะการทดลอง
ขนาดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	1.3 kV
ค่าแรงดันของปั๊ม/เวลา	0.05 mbar /5 นาที
ค่ากระแสที่ขั้วแคโทด	0 ถึง 600 mA
ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า	2 cm

ทำการทดสอบระยะห่างขั้วไฟฟ้ากระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า

จากการทดสอบค่าแรงไฟฟ้าทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของขั้วของแคโทดหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยที่การแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุโดยพลังงานของประจุจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า จึงทำให้ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ของขั้วไฟฟ้า มีแรงดัน

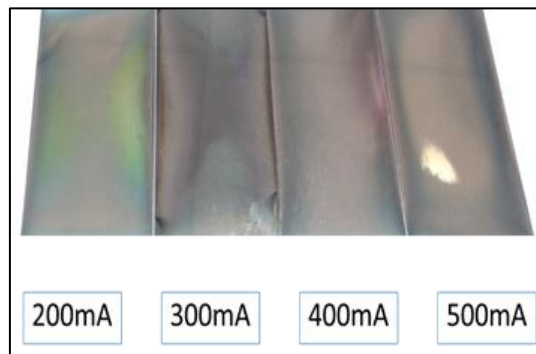
สูงขึ้นตามลำดับจากการทดสอบ พบว่า กระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเกิดดีสชาร์จที่แรงดันไฟฟ้า 600 โวลต์ทำให้มีแรงดันไฟฟาลดลงและมีกระแสเพิ่มขึ้นตามค่าของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเกิดจากกระบวนการคายประจุไฟฟ้าของระบบที่ประกอบด้วยแก๊สซึ่งในกระบวนการที่เกิดขึ้นจะมีการเรืองแสงของ

แก๊สและศักย์ไฟฟ้า ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าลดลงแต่กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากและผลการทดสอบการเคลือบฟิล์มจากการเพิ่มกระแสต่อการ

เคลือบพบว่าค่าฟิล์มบางเพิ่มขึ้นตามจากการทดสอบ



ภาพที่ 6 กระแสไฟฟ้าอัตราการเคลือบฟิล์ม



ภาพที่ 7 ฟิล์มบางทองแดง

การห้อัตราการเคลือบของเครื่องเคลือบ

สุญญากาศต่อความหนาของฟิล์ม

1. วัดความกว้างและความยาวของชิ้นงานด้วยเวอร์เนียร์แคลิเปอร์แล้วนำไปล้างด้วย อะซิโตน (Acetone) เพื่อทำความสะอาดของชิ้นงานให้สะอาด แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดความชื้นก่อนชั่งน้ำหนักก่อนเคลือบฟิล์ม หลังจากทำการเคลือบฟิล์มแล้วทำการชั่งชิ้นงานอีกครั้งด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด

2. เมื่อทำการเคลือบชิ้นงานสามารถคำนวณหา ค่าความหนา (Th) ของฟิล์มที่เคลือบได้จากสมการ

$$Th = \frac{m_2 - m_1}{a \times b \times \rho_{Cu}}$$

โดย

- Th คือ ความหนาของฟิล์ม
- m_1 คือ มวลของชิ้นงานก่อนทำการเคลือบผิว
- m_2 คือ มวลของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว
- a คือ ความกว้างของชิ้นงาน
- b คือ ความยาวของชิ้นงาน
- ρ_{Cu} คือ ความหนาแน่นของทองแดงมีค่าเท่ากับ 8960 kg/m^3

ขนาดพื้นที่ของชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม
บางทองแดง กว้าง X ยาว เท่ากับ 10 X 10 mm.
ขนาดพื้นที่เท่ากับ 100 mm²

$$R = \frac{Th}{t}$$

โดย

t คือ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ

Th คือ ความหนาของฟิล์ม

3. อัตราการเคลือบฟิล์ม (R) คำนวณได้จาก
สมการ

ผลการวิจัย

ผลการหาอัตราการเคลือบของเครื่องเคลือบสุญญากาศการวิจัยนี้ใช้วิธีการชั่งมวลเพื่อคำนวณหาความหนาของฟิล์มตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 2 พื้นที่ของกระจกที่ใช้ในการศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง

ชั่วโมงเคลือบ	ความกว้างกระจก a (mm.)					ความยาวกระจก b (mm.)					พื้นที่ (10 ⁻⁶ m ²)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	เฉลี่ย	
0.25	25.80	25.70	25.50	25.70	25.67	76.30	76.10	76.25	76.20	76.21	1956
0.50	25.50	25.58	25.40	25.90	25.59	76.75	76.35	76.60	76.50	76.55	1959
0.75	25.00	25.10	25.30	25.40	25.20	76.10	76.20	76.10	76.20	76.90	1912

ตารางที่ 3 มวลของกระจกก่อนและหลังการเคลือบฟิล์มบางทองแดง

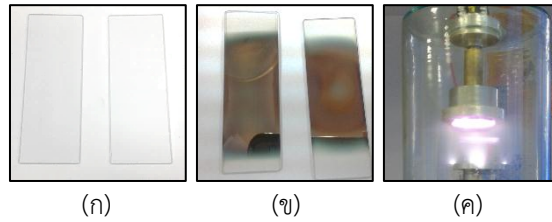
ชั่วโมงเคลือบ	มวลก่อนเคลือบ (10 ⁻³) kg					มวลหลังเคลือบ (10 ⁻³) kg					มวลฟิล์ม (10 ⁻³ kg)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	เฉลี่ย	
0.25	5.0309	5.0321	5.0495	5.0457	5.0395	5.0313	5.0329	5.0499	5.0463	5.0401	0.0006
0.50	5.1291	5.0325	5.0783	5.0928	5.0831	5.1305	5.0340	5.0798	5.0942	5.0846	0.0015
0.75	5.1500	5.0970	5.0554	5.1597	5.1110	5.1526	5.0814	5.0574	5.1618	5.1133	0.0023

ตารางที่ 4 มวลฟิล์มบางทองแดงทองแดงต่อพื้นที่และอัตราการเคลือบฟิล์มบางทองแดง

ชั่วโมงเคลือบ (h)	มวลฟิล์มบางทองแดงต่อพื้นที่ (x10 ⁻⁵ kg/m ²)	ความหนาฟิล์ม (nm)	อัตราการเคลือบ (nm/h)	อัตราการเคลือบเฉลี่ย (nm/h)
0.25	30.67	31.37	125.48	
0.50	76.57	82.59	165.19	155.89
0.75	120.29	132.75	177	

จากตารางที่ 4 พบว่าจากการทดสอบการเคลือบแต่ละครั้งการเคลือบมีค่าอัตราการเคลือบเฉลี่ยอยู่ที่ 155.89 นาโนเมตรต่อชั่วโมง และมวลความหนาของฟิล์ม เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เคลือบ และในอัตราการ

การเคลือบที่มากได้ความหนาของฟิล์มที่ 132.75 นาโนเมตร อัตราการเคลือบอยู่ที่ 177 นาโนเมตร คิดอัตราการเฉลี่ยการเคลือบ ทั้งหมดอยู่ 155.89 นาโนเมตร



ภาพที่ 8 การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยเทคนิคสปีดเตอริง

(ก) ชิ้นงานก่อนเคลือบ

(ข) ชิ้นงานหลังเคลือบ

(ค) กระบวนการเกิดโกลดิสซาร์จ

อภิปรายผลการวิจัย

การสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางทองแดงบนผิววัสดุขนาดเล็กแบบสปีดเตอริงต้นทุนประหยัดการทดลองระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบชิ้นงาน พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเคลือบชิ้นงานที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ 500 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 300 mA การทดลองครั้งนี้

สรุป

จากการศึกษา และสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงโดยใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ พบว่า สามารถเคลือบฟิล์มบางได้โดยมีอัตราการเคลือบ 155.89 นาโนเมตรต่อชั่วโมง เมื่อนำฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบ 0.75 ชั่วโมง หรือที่ความหนา 132.75 นาโนเมตร จากข้อมูลการทดลองผลแสดงให้เห็นว่าเครื่องเคลือบสูญญากาศที่สร้างขึ้นสามารถเคลือบฟิล์มบางได้ และเคลือบชิ้นงานขนาดเล็กได้ ในระดับหนึ่งแต่ยังต้องปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างประสิทธิภาพแตกต่างจากใน

อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีต้นทุนมากกว่ายังไม่สามารถเทียบเครื่องเคลือบราคาสูงจากต่างประเทศได้

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบเคลือบฟิล์มบางที่สร้างขึ้นทำงานในสภาวะความดันต่ำ แต่ไม่สามารถระบุความดันที่แน่นอนขณะดำเนินการได้ เนื่องจากเครื่องวัดความดันในสภาวะที่ความดันต่ำ
2. เป้าสารเคลือบสามารถเปลี่ยนเป็นสารอื่นได้ โดยทำการเปลี่ยนและติดตั้งที่ขั้วแคโทด แล้วเป้าสารเคลือบที่เลือกใช้จะต้องนำไฟฟ้าได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์สถานที่ทำการทดลอง ขอพระคุณอาจารย์ จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่ดูแลและเป็นพี่ปรึกษาในการทดลองทางเคมี และอาจารย์เพลิน จันทรสุยะ ที่เป็นพี่ปรึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

คมกฤษ สายเสรีภาพ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, อติศร

บูรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ. (2555) ผลของกำลังสปัตเตอร์ต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์. ใน การประชุมวิชาการแห่งชาติครั้งที่ 9: 475-481.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สุรสิงห์ ไชยคุณ, พัฒนะ รักความสุข, พิเชษฐ ลีมสุวรรณ. (2551). การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์แบบคาโทดคู่. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 13: 14-25.

ภัททิรา หอมนวน, จิราภรณ์ พงษ์ไสภา, กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล. (2557) ผลของความดันย่อยไนโตรเจนต่อสมบัติทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมทั้งสแตนไนไตรด์ . วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 6, 318-327.

สิทธิวัฒน์ อุ่นจิตร, อติศร บูรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ. (2557). การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนโคสปัตเตอร์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 6, 78-86.

สุชาติ สุวรรณทัศน์, ธงชัย หอมวันทา, อุดมเดช ภัคดี, สุรศักดิ์ เชียงกา. การพัฒนาเครื่องเคลือบฟิล์มบางต้นทุนต่ำ และการวิเคราะห์ฟิล์มบางทองแดง. วารสารบทความของกลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.การประชุมวิชาการ และนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ. 6, 535-545.

อารีรัตน์ สมหวังสกุล, อติศร บูรณวงศ์, นิรันดร์, วิทิตอนันต์, สุรสิงห์ ไชยคุณ. การเตรียมและศึกษา ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์บนไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีโคอันบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอร์. การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, 482-489. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

การหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนของของเสียผสม เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

Two-stage Anaerobic Digestion of Mixed Waste for Biogas Production

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง^{1*}, ศรายุทธ กันธิยะ², สาวิตรี นันทา³

สิงขร จิตเมตตาคารม⁴ และ อานนท์ ศิริภัทรนุกูล⁵

Klinpratoom Panyaping^{1*}, Sarayut Kantiya², Sawitree Nanta³,

Singkhon Jitmettatum⁴, and Amon Siripattaranukool⁵

^{1,2,3,4,5} สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

^{1,2,3,4,5} Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

*Corresponding Author. E-mail: klin41@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 0898557695 09544374339

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้ของเสียผสมต่างชนิดกัน เพื่อทำให้เกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบสองขั้นตอน รวมทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักที่สูง คือ 3:2 ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นจากฟาร์มสุกรทำการทดลองในถังหมักขนาด 20 ลิตร รวม 3 ชุดชุดละ 2 ชั่วโมง

ผลการศึกษาพบว่า การหมักย่อยสลายแบบสองขั้นตอนของของเสียผสมต่างชนิด ได้แก่ เศษก้านและใบไม้รวม เศษก้านและใบลำไยและเศษอาหาร สามารถให้ก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณที่ต่างกัน ชุดทดลองTR1 ซึ่งใช้วัสดุหมักรวมหลายชนิดให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด(136.2 ลิตร) ใช้ระยะเวลาพักเก็บนาน15 วันและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปTS VS และ COD สูงสุด (83% 84% และ 84%) ส่วนชุดทดลอง TR3 ซึ่งใช้วัสดุหมักคือ เศษอาหารเพียงอย่างเดียว ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพต่ำสุด(22.90ลิตร) ใช้ระยะเวลาการย่อยสลายพักเก็บนาน15 วันเท่ากันและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปTS VS และ COD ต่ำสุด(37% 50% และ 58%) ดังนั้นการหมักย่อยสลายของเสียผสมต่างชนิดกันที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักสูง ควรนำเทคโนโลยีการหมักแบบสองขั้นตอนไปใช้งานเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ของเสียผสมก๊าซชีวภาพการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

Abstract

The purpose of this study was to investigate the use of different type of mixed waste in two-stage anaerobic digestion to generate biogas and organic removal efficiency at the high mixture ratio 3:2 mixed with the starter from pig farm in digester size 20 l. All experiments were 3 sets. Each set was duplicate.

It was found that two stage anaerobic digestion of different type of mixed waste; mixed leaves and petioles waste, leaves and petioles waste of longan, and food waste could provide different biogas. TR1, which consisted of several type of mixed wastes, provided the maximum biogas (136.2 L) with the hydraulic retention time 16 days. It provided the highest organic removal efficiency in terms of TS, VS, and COD (83%, 84%, and 84%). TR3, which consisted of only food waste, provided the minimum biogas (22.90 L) with the same hydraulic retention time 16 days. It provided the lowest organic removal efficiency in terms of TS, VS, and COD (37%, 50%, and 58%). Therefore, it is recommended to apply the two-stage anaerobic digestion technology for different type of high mixed waste ratio in order to increase the biogas quantity.

Keywords: mixed waste biogas two-stage anaerobic digestion

บทนำ

จากประเด็นปัญหาหมอกควันจากการเผาไหม้ในที่แจ้ง ในเขตภาคเหนือตอนบน โดยเฉพาะการเผาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวและตัดแต่งกิ่ง ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เศรษฐกิจ และสังคมในบรรดาผลผลิตทางการเกษตรจากพืชสวน และอื่น ๆ เช่นลำไยมะม่วง ลิ้นจี่ ซึ่งจัดเป็นพืชเศรษฐกิจ ที่มีการเผาปลุกกันมากในภาคเหนือและมักมีการเผาทิ้งเป็นประจำนอกจากนี้ยังมีพืชอื่น ๆ ที่ปลุกกันทั่วไป และมีเศษเหลือทิ้งที่ถูกทำลาย รวมทั้งเศษอาหารจากแหล่งต่าง ๆ ถูกทิ้งเศษวัสดุเหล่านี้ควรถูกนำมาใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานทดแทนและผลพลอยได้อื่น โดยการบำบัดในสภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ เช่น การหมักย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวของเศษก้านและใบลำไย สามารถให้ก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้ในรูปแบบปุ๋ยน้ำหมัก (กลิ่นประทุม และคณะ, 2555)

การใช้การหมักย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียว อาจมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่พอเพียงสำหรับของเสียผสมหลายชนิด เนื่องจากการใช้ถังหมักเพียงถังเดียว มีปฏิริยาย่อยสลายสาร อินทรีย์เกิดขึ้นทั้งขั้นตอนการเกิดกรดอินทรีย์และก๊าซมีเทนภายในถังเดียวกัน ทำให้เกิดข้อจำกัดหลายประการ เช่น ระยะเวลาที่เก็บ และการเกิดขึ้นของของแข็งที่มีระดับการลอยตัวที่มีผลต่อการกวนผสมและใบพัดของระบบ จำเป็นต้องใช้เวลานานกว่าและมีการกำจัดออก ซึ่งมีส่วนทำให้ปริมาณก๊าซลดลง เป็นต้น (ArchanaParajpe et al., 2012) ในการศึกษาครั้งนี้ จึงทดลองเลือกใช้การหมักย่อยสลายแบบสองขั้นตอนจากการศึกษาที่ผ่านมา (Azbar and Speece, 2001, ArchanaParajpe et al., 2012) พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอนเป็นการแยกขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์และขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยช่วยให้เชื้อจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดอินทรีย์และกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนมีการเจริญเติบโตที่เหมาะสม ทำให้ได้ปริมาณ

ก๊าซเพิ่มขึ้น และการแยกถังหมักหรือถังปฏิริยาสามารถปรับคุณสมบัติของเหลวหรือวัตถุดิบที่เข้าระบบให้เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ บทความนี้ จึงได้นำเสนอการศึกษาการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนของของเสียที่มีอัตราส่วนของวัสดุหมักสูง ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสต่ำเช่นเศษอาหาร และมีเซลลูโลสมาก เช่น เศษก้านและใบไม้ เพื่อทราบปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายที่ได้จากหมักย่อยแบบสองขั้นตอน ก่อนนำไปขยายผลและเลือกใช้งานให้เหมาะสมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ประกอบด้วย ตัวอย่าง วิธีเก็บตัวอย่าง พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ส่วนผสมและชุดทดลองหมักย่อยการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักระหว่างเศษก้านและใบไม้และเศษอาหารสูง 3:2 โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากมูลสุกรเป็นเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ทำการทดลองในถังหมัก ขนาด 20 ลิตร รวมจำนวน 3ชุด ชุดละ 2 ซ้ำ

- ตัวอย่างและอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้ได้แก่ เศษก้านใบไม้มะม่วง ไทร และลิ้นจี่ อัตราส่วนสด:แห้ง 3:1ซึ่งได้จากการศึกษาของกลิ่นประทุม และคณะ (2555) เศษก้านและใบไม้เหล่านี้ ได้จากบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเศษก้านและใบลำไย ซึ่งเก็บมาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการจัดการของเสียหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตและการแต่ง เศษวัสดุทางการเกษตรเหล่านี้ถูกนำมาผ่านการบดย่อยให้มีขนาด 0.1-0.5 มม. ด้วยเครื่องหั่นและบดย่อยใบไม้เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ซึ่งเก็บตัวอย่างแบบจ้วงจากฟาร์มสุกรดอนแก้ว ตำบลดอนแก้ว อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ เศษอาหารจากร้านอาหารในตลาดเทพมงคลที่ตั้งอยู่ในชุมชนช่างเคียนตำบลช่างเผือก อำเภอเมือง

จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งผ่านการบดย่อยให้มีขนาดเล็ก ไม่เกิน 0.5 มม. ด้วยเครื่องบดเศษอาหารทำการสูมตัวอย่างเศษวัสดุแบบแบ่งเป็นส่วนและชั่งน้ำหนักหรือปริมาตรให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนด ถึงหมักหรือถึงปฏิกิริยาทำจากพลาสติก ขนาด 20 ลิตร สารโซเดียมไบคาร์บอเนต(NaHCO₃)1 Nที่ใช้ปรับ pH

-พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์
ได้แก่ อุณหภูมิ pH , Chemical Oxygen Demand; COD, Total Solid; TS, Volatile Solid; VS ทั้งก่อนและหลังการเดินระบบหมัก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย(APHA, AWWA and WPCF, 2005)

-ส่วนผสมและชุดทดลองที่ใช้ในการเดินระบบหมัก

วัสดุหมักที่ผ่านการเตรียมตัวอย่าง ที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักผสมสูง 3:2 ถูกลำมาผสมให้เข้ากันในถังหมักก่อนนำมาแยกบรรจุแต่ละซ้ำของชุดทดลองและทำการปรับสภาพ pH ให้เป็นกลางทุกชุดทดลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

-ชุดทดลองTR1 ประกอบด้วย เศษก้านและใบไม้รวม 600 กรัม+ เศษอาหาร 400 กรัม: เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตร

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก

ตัวอย่าง	pH	COD (mg/l)	TS (mg/l)	VS (mg/l)
เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น	6.99	70,658	34,573	37,173
เศษก้านและใบไม้รวม	6.66	27,250	23,162	41,984
เศษก้านและใบลำไย	5.51	27,250	23,162	41,984
เศษอาหาร	4.60	172,025	159,598	164,000

จากตารางที่ 1 พบว่าวัสดุหมักของเสียผสมที่ใช้คือเศษอาหารมีค่าความเป็นกรดมาก มีค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ค่าของแข็งระเหย (VS) และปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ

-ชุดทดลองTR2ประกอบด้วย เศษก้านและใบลำไย 600 กรัม+ เศษอาหาร 400กรัม: เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตร

-ชุดทดลองTR3ประกอบด้วย เศษอาหาร 400 กรัม: เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตร โดยแต่ละชุด แยกเป็นถังหมักกรด และถังหมักก๊าซ ซึ่งแต่ละถังบรรจุเชื้อจุลินทรีย์อย่างละ 5 ลิตร และมีการทำ Blank ที่มีเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์เป็นชุดควบคุมทำการเดินระบบหมักโดยไม่มีการป้อนอาหารเพิ่มแบบรายครั้งในระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยถังหมักกรดและถังหมักก๊าซขนาด 20 ลิตร และหาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่ในน้ำ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากวัสดุหมัก

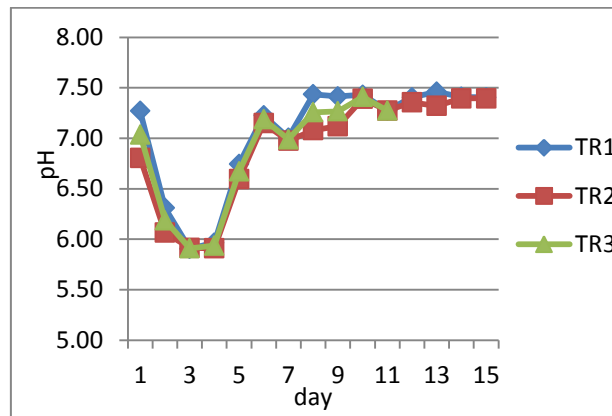
ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุหมักที่เป็นของเสียผสมซึ่งประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้รวม เศษก้านและใบลำไย เศษอาหารและเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นก่อนนำมาผสมกันเพื่อใช้เดินระบบหมัก มีลักษณะสมบัติดังตารางที่ 1

COD มากกว่าเศษก้านและใบไม้รวมและเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น วัสดุหมักเหล่านี้ มีปริมาณสารอินทรีย์สูง จึงเหมาะกับการนำมาหมักย่อยสลายเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่เกิดจากการหมัก ย่อยในระบบ

ค่า pH ที่ได้จากการทดลอง มีความสำคัญต่อ
การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักและแสดงถึงการ

เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักย่อย ดังแสดงใน
รูปที่ 1



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลง ค่า pH ระหว่างการหมักย่อย

จากรูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่
เกิดขึ้นระหว่างการหมักย่อยของทุกชุดทดลอง ส่วน
ใหญ่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-8 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายกรด
อินทรีย์และก๊าซ (Metcalf & Eddy, Inc., 2008)
โดยเฉพาะในช่วง 3 วันแรกเมื่อเกิดการย่อยสลาย
สารอินทรีย์ในถังหมักกรดของชุดทดลอง TR1 และ
TR2 ทำให้ค่า pH ลดต่ำลงอย่างชัดเจน แสดงว่ามีการ
ย่อยสลายเป็นกรดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว จึงทำการ
ถ่ายถังจากถังหมักกรด (เศษก้านและใบไม้รวม หรือใบ
ลำไย 600 กรัม เศษอาหาร 400 กรัม และ
เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 5 ลิตร) สู่อ่างหมักก๊าซ
(เชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักก๊าซ 5 ลิตร) ในวันที่ 4 ของ
การทดลอง หลังจากทำการถ่ายถังแล้วจุลินทรีย์ในถัง
หมักจึงเริ่มทำงาน ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นระหว่างวันที่
5-13 และลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง ยกเว้น TR3 ซึ่งมี
ค่าเพิ่มเล็กน้อยและค่อย ๆ ลดลง จนเข้าสู่สภาวะ
ความเป็นกลาง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะทำการเดิน ระบบหมัก

ค่าอุณหภูมิห้อง ขณะทำการเดินระบบหมัก มีค่า
อยู่ระหว่าง 40 - 42°C เนื่องจากทำการทดลองในช่วง
ฤดูร้อนซึ่งสันทัด(2549) กล่าวว่าอุณหภูมิในถังหมักมี
ค่าสูงกว่า 3-5°C ค่าอุณหภูมิในถังอยู่ประมาณ 40 -
42°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต
ของแบคทีเรียกลุ่ม mesophilic ที่ทำงานได้ดีระหว่าง
อุณหภูมิ 25-45°C (David, M.L, and Cornwell,
D.A, 2008)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อย ของเสียผสม

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ตรวจวัดได้
จากการหมักย่อยสลายของเสียผสมเมื่อเริ่มทำการเดิน
ระบบและสิ้นสุดการเดินระบบมีรายละเอียดดังตาราง
ที่ 2-3

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมักก่อนเดินระบบ

ชุด	pH	VS (mg/l)	TS (mg/l)	VS/TS	COD (mg/l)
TR1	6.80	101,507	136,640	0.74	134,480
TR2	7.27	142,315	194,590	0.73	127,920
TR3	7.89	37,657	63,690	0.59	60,125

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดระบบ

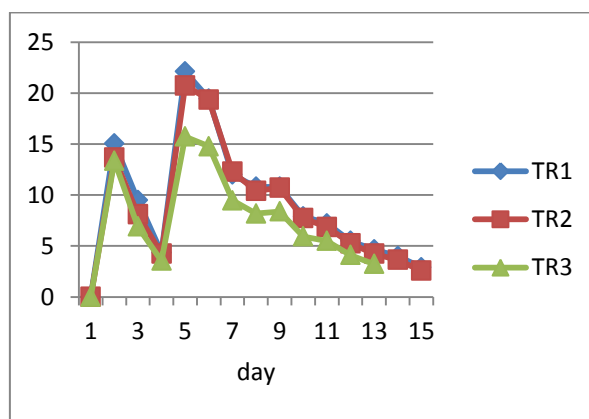
ชุด	pH	VS (mg/l)	TS (mg/l)	VS/TS	COD (mg/l)
TR1	7.40	15965	23055	0.69	21688
TR2	7.49	35230	48345	0.72	35150
TR3	7.58	18857	40207	0.47	25007

จากตารางที่ 2-3ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน เมื่อสิ้นสุดระบบ มีค่า pH เป็นกรดอ่อนถึงเป็นกลาง (6.8-7.89) ค่า TSVS VS/TS และปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ของทุกชุดทดลองมีค่าลดลง ชุดทดลองTR1 มีค่าต่างๆ ลดลงมากที่สุด แสดงว่า

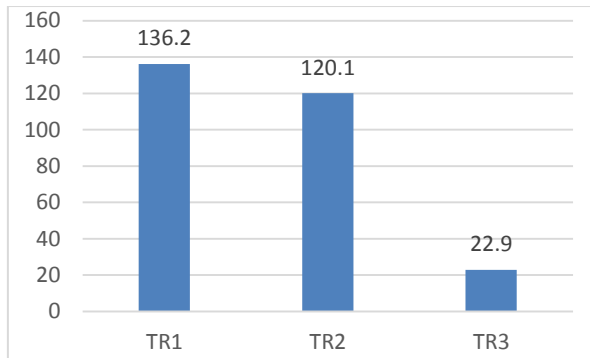
ระหว่างการเดินระบบหมัก มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ของวัสดุหมักย่อยได้แตกต่างกันส่วนชุดควบคุมที่มีเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์อย่างเดียวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและเกิดก๊าซเพียงเล็กน้อย (0-2 ลิตร) เนื่องจากไม่มีอาหารให้จุลินทรีย์เจริญเติบโต

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักย่อยของเสียผสมในระบบหมัก มีรายละเอียดดังรูปที่ 2-3



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซแต่ละวันที่เกิดจากการหมักย่อย(ลิตร)



ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่ผลิตจากการหมักย่อย(ลิตร)

จากรูปที่ 2-3 พบว่าการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนในช่วงแรก มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงทุกซ้ำ ทั้ง 3 ชุดทดลองและมีค่าต่ำสุดในวันที่ 4 ของการเดินระบบ สอดคล้องกับค่า pH ที่วัดได้ จึงทำการถ่ายถังจากถังหมักกรด (เศษก้านและใบไม้รวมหรือใบลำไย 600 กรัม เศษอาหาร 400 กรัม และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 5 ลิตร) ในวันที่ 4 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักเริ่มทำงาน ทำให้มีค่า pH และปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้น จากการย่อยกรดให้กลายเป็นก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์สร้างมีเทน สอดคล้องกับทฤษฎีการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน (David, M.L, and Cornwell, D.A, 2008) ดังนั้นในวันที่ 5 จึงมีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นสูงสุดและค่อยๆ ลดลงต่อเนื่อง จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบในวันที่ 15 ของการทดลอง เนื่องจากกรดอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลาย จนปริมาณก๊าซอยู่ในระดับที่คงที่ กล่าวคือ มีจำนวนไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่วัดได้และระบบหยุดการทำงานเมื่อไม่มีก๊าซเกิดขึ้นอีกชุด TR1 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด

(136.2 ลิตร) ใช้ระยะเวลาเก็บกักนาน 16 วัน ส่วน TR3 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด (22.9 ลิตร) ใช้ระยะเวลาเก็บกักน้อยกว่าคือ 9 วัน เนื่องจาก TR1 มีวัสดุหมักที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไนโตรเจน ซึ่งได้จากทั้งเศษก้านและไม้หลายชนิดและเศษอาหารสามารถย่อยสลายได้ สมดุลกว่า จึงทำให้เกิดการย่อยสลายให้ก๊าซชีวภาพมากที่สุด ส่วน TR3 ซึ่งมีเศษอาหารอย่างเดียว ทำให้สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไนโตรเจน มีความสมดุลน้อยกว่า มีผลทำให้ได้ก๊าซน้อยที่สุด และใช้ระยะเวลาเก็บกักสั้นกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hills, D.J, and Roberts, D.W, 1981 และ Lehtomuki, et al., 2007

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งได้จากผลวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุหมัก ก่อนและหลังการเดินระบบทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการย่อยสลาย ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ

ชุด	ประสิทธิภาพการกำจัด VS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัด TS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัด COD (%)
RT1	84	83	84
RT2	75	75	73
RT3	50	37	58

จากตารางที่ 4 เมื่อใช้วัสดุหมักที่เป็นของเสียผสมจำนวนมากชนิดที่สุด ชุดทดลอง TR1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป TS VS และ COD มากที่สุด (83-84%) ส่วนชุดทดลอง TR2 ซึ่งใช้วัสดุหมักที่เป็นของเสียผสมจำนวนน้อยชนิดกว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์รองมา (73-75%) และชุดทดลอง TR3 ซึ่งใช้วัสดุหมักคือเศษอาหารเท่านั้นมีประสิทธิภาพกำจัดสารอินทรีย์น้อย

ที่สุด (37-58%) ค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้สอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เนื่องจากการหมักแบบสองขั้นตอน มีส่วนช่วยให้จุลินทรีย์ในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซทำงานได้ดีขึ้น และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ดีกว่าการหมักในสภาวะไร้ออกซิเจนที่ใช้ถังหมักเป็นถังปฏิกริยาเพียงถังเดียว ซึ่งจุลินทรีย์มีโอกาสสัมผัสไม่ทั่วถึงกับสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยในแต่ละขั้นตอนของปฏิกริยา(สันทัด, 2549) โดยเฉพาะการหมักของเสียผสม ซึ่งมีวัสดุหมักที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น เศษก้านและใบไม้ ควรใช้การหมักแบบสองขั้นตอน เพื่อให้สารอินทรีย์มีโอกาสสัมผัสและถูกย่อยโดยจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในถังหมักเพิ่มขึ้นแสดงว่าองค์ประกอบของของเสียผสมที่หลากหลายชนิด มีส่วนทำให้เกิดการหมักย่อยสลายได้ดีขึ้น

สรุป

ลักษณะสมบัติทางเคมีของของเสียผสมที่ประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้รวม เศษอาหาร และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นมีปริมาณสารอินทรีย์สูง สามารถใช้หมักย่อยได้ผลการเปลี่ยนแปลงสภาวะการหมักย่อยแบบสองขั้นตอนที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักผสม 3:2 พบว่าระบบทำงานในสภาวะเหมาะสมที่มี pH ค่อนข้างเป็นกลางถึงด่างอ่อน (6.8-7.89) อุณหภูมิในระบบอยู่ระหว่าง 40 -42°C ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่ม mesophilic ชุดทดลอง TR1 ซึ่งมีเศษวัสดุหมักหลายชนิดให้ปริมาณก๊าซสูงสุด (136.2 ลิตร) ใช้ระยะเวลาพักเก็บ 15 วัน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์มากที่สุด (TS 83% VS 84% และ COD 84%) TR2 ซึ่งมีเศษวัสดุหมักเฉพาะเศษก้านและใบไม้ ให้ปริมาณก๊าซและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์รองมา และ TR3 ซึ่งมีเพียงเศษอาหาร ให้ปริมาณก๊าซและมีประสิทธิภาพกำจัดสารอินทรีย์น้อยที่สุด จึงมีข้อเสนอแนะว่า ควรใช้การหมักย่อยแบบสองขั้นตอนสำหรับวัสดุหมักที่เป็นของเสียหลายชนิดซึ่งย่อยสลายได้ยากเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพและมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่ให้ทุนวิจัย ภายใต้โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน เพื่อสนับสนุนการศึกษาคั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, นภารัตน์ สุทธิรัตน์, ปิยะนันท์ รัตน์ไชย และ อุกฤษฏ์ เมืองขวัญใจ.(2555). การพัฒนาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้. **วารสารวิจัยมข.** 17(4): 543-555.

สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์.(2549).ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. สำนักพิมพ์ท็อป. กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA, and WPCE. (2005). **Standard method for the examination of water and wastewater**, 21sted. US.

Azbar, N. and Speece, E.R. (2001). Two-phase, Two-stage, and Single-stage Anaerobic Process Comparison. **J. Environmental Engineering.** 3(127), 240-248.

ArchanaParanjpe, Abhay Kumar Sharma, R.K. Ranjan, andParulTripathi. (2012). Current status and future challenges of two stage anaerobic digestion.**International Journal Current Research.** 4(07), 081-085.

David, M.L., and Cornwell, D.A.(2008).

Introduction to Environmental Engineering. 4th ed : McGraw-Hill Book Company. US.

Hills, D.J, and Roberts, D.W. (1986). Anaerobic digestion of dairy manure and field crops residues. **Agric Wastes.** 3,179-189.

Lehtomaki, A, Huttunen, S, and Rintala, J. A. (2007). Laboratory investigation on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: effect of crop to manure ratio. **Resour ConservRecycl.** 51, 591-609.

Metcalf & Eddy Inc., Revised by

Tchobanoglous, G., et al, (2008).

Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th ed. McGraw-Hill Book Company. US.

ผลของอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลาย เศษวัสดุทางการเกษตรและเศษอาหาร

Effect of Food and Microorganism Ratio to Biogas Generation from Anaerobic Digestion of Agricultural Waste and Food Waste

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง^{1*}, พิทวัส ณะคำปา² และภัทรา วงษ์พันธ์กุล³
Klinpratoom Panyaping^{1*}, JedsadaWamta² and PattraWongpankamol³

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

^{1,2,3} Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

* Corresponding author E-mail: klin41@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งประสิทธิภาพของการหมักย่อยสารอินทรีย์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนของเศษวัสดุทางการเกษตรและเศษอาหาร ที่อัตราส่วน 2:3 ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นจากฟาร์มสุกร โดยการใช้ค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ (F/M) 0.1 และ 0.4 ตามลำดับ ทำการทดลองรวมจำนวน 4 ชุด ชุดละ 2 ซ้ำ

ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดลอง SR2 ซึ่งเป็นชุดทดลองที่มีเศษวัสดุหมักทางการเกษตรและเศษอาหาร ที่ค่าอัตราส่วน F/M 0.4 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพ (202.6 ลิตร) มากกว่าชุดทดลอง SR1 ซึ่งเป็นชุดทดลองที่มีเศษวัสดุหมักทางการเกษตรและเศษอาหาร ที่ค่าอัตราส่วน F/M 0.1 (171.7 ลิตร) มีระยะเวลาที่เก็บเท่ากัน (18 วัน) และชุดทดลอง SR2 มีค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในรูปของ TS VS และ COD (72.9% 67.5% และ 75%) สูงกว่าชุดทดลอง SR1 (70.2% 65.5% และ 71.4%) การเปลี่ยนแปลงสภาวะการหมักย่อยสลายเกิดขึ้นจากการทำงานของแบคทีเรียแบบมีไซโตฟิลิกโดยมีอุณหภูมิ อยู่ระหว่าง 31-46 °C และมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.98-7.73 ซึ่งจัดว่าระบบมีสภาวะการทำงานอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงมีข้อเสนอแนะเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพและมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุดว่า ควรใช้ค่า F/M ที่ต่างกัน ในการหมักย่อยเศษวัสดุทางการเกษตรและเศษอาหารด้วยการหมักแบบหลายขั้นตอน ซึ่งให้ปริมาณก๊าซที่มากกว่าและใช้เวลากักเก็บนานกว่า

คำสำคัญ: เศษวัสดุทางการเกษตร เศษอาหาร ค่าอัตราส่วน F/M ก๊าซชีวภาพ การหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน

Abstract

The objective of this study was to determine generated biogas quantity, and the organic removal efficiency that obtained from the change of anaerobic digestion of agricultural waste and food waste at the ratio 2:3 mixed with the starter from pig farm by using the feed and microorganism (F/M) ratio 0.1 and 0.4, respectively. All experiments were 4 sets. Each experiment consisted of duplicate.

It was found that SR2, which was the set of experiment that contained agricultural waste and food waste at F/M 0.4, provided higher biogas quantity (202.6 l) than that of SR1 (171.7 l) in the same hydraulic retention time (18 days). SR2 also provided higher organic removal efficiency in terms of TS, VS, and COD (72.9%, 67.5%, and 75%) than that of SR1 (65.5%, 70.2%, and 71.4%). The change of anaerobic digestion was due to the performance of mesophilic bacteria at temperature 31-46 °C, and pH 6.98-7.73, which were in the optimum operational conditions. In order to maximize biogas quantity as well as organic removal efficiency, it is recommended that the use of different F/M ratio for agricultural waste and food waste should be applied by multi-stage digestion, which provides higher biogas and the longer retention time.

Keywords: Agricultural waste food waste F/M ratio biogas anaerobic digestion

บทนำ

ของเสียประเภทสารอินทรีย์ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตรจำพวกเศษก้านและใบไม้ และเศษอาหาร นับเป็นของเสียอินทรีย์ที่หาง่าย และมีจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยการเปลี่ยนรูปของเสียให้เป็นพลังงาน (Lema and Omil, 2001; Lettinga, 2001) ได้แก่ ก๊าซชีวภาพ การผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยเทคโนโลยีชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน เป็นการบำบัดของเสียในรูปสารอินทรีย์ที่มีผลทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม (Lema and Omil, 2001; Barton, et al., 2008) สามารถลดปริมาณของเสียและมลพิษทางอากาศ ดินและน้ำใต้ดิน รวมทั้งทำให้เกิดผลพลอยได้ต่าง ๆ เช่นปุ๋ยน้ำและวัสดุหมักตั้งต้นซึ่งใช้ในการทำปุ๋ยหมัก (Tambone et al., 2009; Rehl and Muller, 2011, กลิ่นประทุม และคณະ, 2555) เหมาะกับการนำไปใช้ในพื้นที่ที่ขาดแคลนพลังงานที่ยั่งยืน ทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา (Bekkering et al., 2010) เทคโนโลยีดังกล่าวถูกศึกษาโดยกลุ่มวิจัยในสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ปี.ศ. 2551 โดยเริ่มจากการศึกษาของเสียพวกเศษอาหารและภายหลังจากเกิดปัญหาวิกฤติหมอกควันในเขตภาคเหนือตอนบน ซึ่งมีสาเหตุหนึ่งมาจากการเผาทำลายเศษมูลฝอยและเศษวัสดุทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวและ แดงกิ่ง โดยเฉพาะพืชที่มีการเพาะปลูกกันมากและหาได้ง่ายในพื้นที่ จึงได้ทดลองทำการศึกษาศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบลำไย ที่สภาวะการหมักย่อยต่างกัน รวมทั้งศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบไม้รวม (จุฑามาส และคณະ, 2552, กลิ่นประทุม และคณະ, 2555) เพื่อการใช้ประโยชน์ที่มีมูลค่าเพิ่ม และช่วยลดปัญหาหมอกควันและมลพิษสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

การผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการทางชีววิทยา ขึ้นกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

หลายปัจจัย (Mata-Alvarez et al., 2000) เช่น อุณหภูมิ pH สารอาหาร ค่าอัตราส่วน C/N ลักษณะของวัสดุหมัก และขนาดของวัสดุหมัก เป็นต้น ส่วนองค์ประกอบของก๊าซและปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ ชนิดของระบบหมัก และระยะเวลาที่เก็บ (Braun, 2007) เท่าที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการบำบัดของเสียอินทรีย์ทั้งชนิดที่เป็นของแข็งและของเหลวร่วมกัน เช่นเศษวัสดุทางการเกษตรพวกพืชพลังงาน และมูลสัตว์ ของเสียเหล่านี้มีความแตกต่างกันตามธรรมชาติ และแหล่งที่มาของของเสีย (Weiland, P., 2010; Espito, G., et al., 2012) การหมักร่วมกันมีข้อดีหลายประการ เช่นช่วยในการปรับสภาพ pH และเพิ่มการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบเป็นคาร์โบไฮเดรตและเจือจางสารประกอบที่มีศักยภาพให้ความเป็นพิษของวัสดุหมัก ซึ่งมีผลดีต่อการปรับปรุงเสถียรภาพ และสภาวะการทำงานของระบบหมัก อย่างไรก็ตาม สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบหมัก ไม่สามารถระบุได้ชัดเจน ขึ้นกับการศึกษาเฉพาะกรณี เช่น การหมักย่อยมันสำปะหลังกับเชื้อจุลินทรีย์จากมูลสัตว์และน้ำเสีย (10%) ในถังหมักขนาด 5 ลิตร แบบบราเยอร์ ใช้ระยะเวลาที่เก็บนาน 22 วัน ที่อุณหภูมิห้อง 30°C ให้ปริมาณก๊าซ 0.356 ลบม./ลบม./วัน (Anunputtikul and Rodtong, 2004) การหมักย่อยสลายกล้วยกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในถังหมักขนาด 10 ลิตร แบบบราเยอร์ ที่อุณหภูมิห้อง 32-35°C ให้ปริมาณก๊าซ 0.013 ลบม./ลบม./วัน (Hori, et al., 2007) การหมักย่อยเศษผักและผลไม้พวกแครอท มะเขือเทศ มันเทศ ผักสีเขียว ผักกาด ลูกแพร์ แอปเปิ้ลและส้มในถังหมักขนาด 2 ลิตร แบบบราเยอร์ ใช้ระยะเวลาที่เก็บ 20 วัน ที่อุณหภูมิควบคุม 35±2°C ให้ปริมาณก๊าซ 0.83-1.5 ลิตร/วัน (Bouallagui, et al., 2009) สำหรับการศึกษาครั้งนี้เป็นการหมักย่อยเศษก้านและใบไม้ร่วมกับเศษอาหารที่อุณหภูมิห้องในถังขนาด 20 ลิตร แบบบราเยอร์ ด้วย

เชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกร มุ่งเน้นการใช้ค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ (F/M) ที่แสดงน้ำหนักของสารอินทรีย์และความเข้มข้นของจุลินทรีย์ ค่าสูงหมายถึงปริมาณสารอินทรีย์ถูกป้อนเข้าระบบมากกว่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลาย ค่าต่ำหมายถึงความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบมีมากกว่าน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ป้อน ค่า F/M นับเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการควบคุมและออกแบบระบบบำบัด ที่ช่วยรักษาสมดุลในการทำงานระหว่างสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยและการเกิดชีวมวล (Misho, G.L., 1999)

บทความนี้ จึงได้นำเสนอการศึกษาประเด็นการใช้ค่า F/M 0.1 และ 0.4 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของระบบบำบัดทั่วไปหรือแบบขั้นตอนเดียว เพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการหมักย่อยในระบบ

อุปกรณ์และวิธีการ

ประกอบด้วย ตัวอย่าง วิธีเก็บตัวอย่าง พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ส่วนผสมและสภาวะการหมักย่อยของชุดทดลอง การตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทำการหมักโดยการเติมเศษอาหารที่มีค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ (F/M) 0.1 และ 0.4 ตามลำดับโดยมีตะกอนจุลินทรีย์จากน้ำเสียในถัง Fixed Dome ของฟาร์มสุกรเป็นเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นในถังหมักแบบมีการกวนขนาด 20 ลิตร ทำการทดลองทั้งหมดรวม จำนวน 4 ชุด ชุดละ 2 ชั่วโมง ในระหว่างเดือนกรกฎาคมปีพ.ศ. 2558 ถึงกรกฎาคมปีพ.ศ. 2559 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตัวอย่างและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่าง

เศษวัสดุการเกษตรที่ประกอบด้วย เศษก้านและใบไม้รวมทั้งสดและแห้ง (สด:แห้ง 3:1) ของมะม่วง ไทร และลิ้นจี่ ซึ่งเป็นเศษก้านและใบไม้ที่ได้จากบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เชียงใหม่เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งได้จากน้ำเสียที่เก็บตัวอย่างแบบจ้วงจากฟาร์มสุกรตอนแก้ว ตำบลตอนแก้ว อำเภอแมริม จังหวัดเชียงใหม่ เศษอาหารจากร้านอาหารในตลาดเทพมงคล หลังมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา โดยเศษวัสดุข้างต้นถูกบดย่อย ให้มีขนาด 0.1-0.5 มม. ถึงหมักแบบมีการกวน ขนาด 20 ลิตร เครื่องบดย่อยเศษอาหาร และเครื่องหั่นย่อยใบไม้ รวมทั้งสารเคมีโซดาไฟ (NaOH) 2N ที่ใช้ปรับ pH

พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์

ได้แก่ อุณหภูมิ pH Chemical Oxygen Demand; COD Total Solid; TS Volatile Solid; VS ทั้งก่อนและหลังการเดินระบบรวมทั้งค่า Mixed Liquor Volatile Suspended Solids; MLVSS ของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (APHA, AWWA and WPCE, 2005)

ส่วนผสมและสภาวะการหมักย่อย

ประกอบด้วยชุดการทดลองทั้งหมด จำนวน 4 ชุด ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในแต่ละชุดทดลองถูกบรรจุไว้ในถังหมักแบบมีการกวน ขนาด 20 ลิตร จำนวนรวม 4 ชุด ชุดละ 2 ชั่วโมง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

-ชุดทดลอง 2 ชุดซึ่งใช้เศษวัสดุหมักทั้งทางเกษตรและเศษอาหาร คือ SR1 เมื่อใช้ค่า F/M 0.1 และ SR2 เมื่อใช้ค่า F/M 0.1 ที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักระหว่างเศษก้านและใบไม้รวมและเศษอาหาร 2:3 เท่ากัน ซึ่งประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้รวม (สด:แห้ง 3:1) 400 กรัม:เศษอาหาร 600 กรัม ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตร ชุดควบคุม 2 ชุด ซึ่งใช้วัสดุหมักเฉพาะเศษอาหาร คือ CSR1 เมื่อใช้ค่า F/M 0.1 และ CSR2 เมื่อใช้ค่า F/M 0.4 ที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักระหว่างเศษก้านและใบไม้รวม (สด:แห้ง 3:1) และเศษอาหาร 2:3 เหมือนกัน ซึ่งประกอบด้วย เศษอาหาร 600 กรัมเพียงอย่างเดียว ไม่มีเศษก้านและใบไม้รวม ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตรโดยทุกๆ 2 วัน ทำการป้อนสารอินทรีย์ คือเศษอาหาร เข้าสู่

ระบบต่างกัน ตามค่า F/M จำนวน 4 ครั้งทุกชุดทดลอง และมีการทำblank ของชุดทดลอง ซึ่งใช้หาปริมาณก๊าซที่เกิดจากการหมักย่อยสลายของจุลินทรีย์เท่านั้น สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ทำการตรวจวัดปริมาณรวมในแต่ละวันทุกวัน โดยอาศัยการแทนที่ในน้ำ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดสอบทางสถิติโดยวิเคราะห์หาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซและประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่ค่า F/M ต่างกัน โดยใช้ค่า Pearson Correlation และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง ที่ค่า F/M

ต่างกัน โดยกำหนดให้ค่า F/M 0.1 และ 0.4 เป็นตัวแปรต้น และค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่วัดได้ของแต่ละค่า F/M เป็นตัวแปรตาม โดยใช้ค่าสถิติแบบ T-test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากวัสดุหมัก

ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุหมักที่เป็นเศษวัสดุการเกษตรซึ่งประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้รวม และเศษอาหารและเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นก่อนนำมาผสมกันเพื่อใช้ในการเดินระบบมีลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของวัสดุหมัก

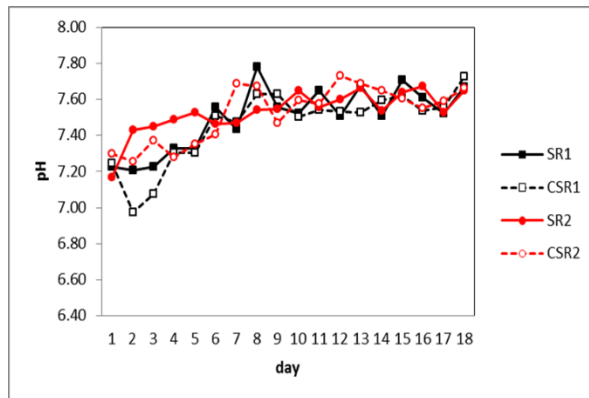
ตัวอย่าง	pH	COD (mg/l)	TS (mg/l)	VS (mg/l)	MLVSS (mg/l)
เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น	7.19	60480	32750	49399	19420*
เศษอาหาร	4.45	153120	135088	91395	-
เศษก้านและใบไม้รวม	6.66	34640	61800	44857	-

หมายเหตุ * ค่า MLVSS วิเคราะห์หาเฉพาะของจุลินทรีย์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบหมัก เมื่อใช้ค่า F/M ต่างกัน

จากตารางที่ 1 พบว่าวัสดุหมักที่ใช้ คือเศษอาหารมีค่า pH เป็นกรดมากกว่าวัสดุหมักอื่นๆ ค่า TS VS และปริมาณสารอินทรีย์ในรูปแบบ COD มีค่าสูงมากกว่าเศษก้านและใบไม้รวมและเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นโดยรวมวัสดุหมักเหล่านี้ มีปริมาณสารอินทรีย์สูง จึงเหมาะสมกับการนำไปหมักย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพ

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่เกิดจากการหมักย่อยในระบบ

ค่า pH ที่ได้จากการทดลอง มีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักและทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักย่อย ดังรูปที่ 1



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ระหว่างการหมักย่อย

พบว่าชุดทดลอง SR1 และ CSR1 ซึ่งใช้ค่า F/M 0.1 และชุดทดลอง SR2 และ CSR2 ซึ่งใช้อัตราส่วน F/M 0.4 มีค่า pH ใกล้เคียงกันคือ ค่อนข้างมีความเป็นกลางอยู่ระหว่าง 6.98-7.73 และ 7.17-7.73 ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาพักเก็บนาน 18 วัน เท่ากัน ค่า pH ของระบบถูกปรับสภาพด้วยสารเคมีโซดาไฟ เพื่อให้ระบบมีสภาพการทำงานที่เหมาะสม กล่าวคือ มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-8 (David, M.L, and Cornwell, D.A, 2008)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะทำการเดินระบบหมัก

ค่าอุณหภูมิห้อง ขณะทำการเดินระบบหมัก มีค่าอยู่ระหว่าง 34-41 °C เนื่องจากทำการทดลองในช่วงฤดูร้อน อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์หรือถังหมัก ถูก

ประมาณว่ามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้อง 3-5°C (สันทัด, 2549) แสดงว่าระบบหมักมีอุณหภูมิระหว่าง 31-46°C ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่ม Mesophilic ซึ่งทำงานได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 25-45°C (สันทัด, 2549 และ David, M.L, and Cornwell, D.A, 2008)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยของเสียผสม

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ตรวจวัดได้จากการหมักย่อยของวัสดุหมัก ก่อนและหลังทำการเดินระบบหรือสิ้นสุดการเดินระบบ มีรายละเอียดดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก ก่อนทำการเดินระบบ

ชุดทดลอง	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี				
	pH	VS (mg/l)	TS (mg/l)	VS/TS	COD _T (mg/l)
SR1 และSR2	8.14	134,741	103,733	0.77	164,220
CSR1 และCSR2	8.15	75,690	57,225	0.76	56,894

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก หลังหรือสิ้นสุดการเดินระบบ

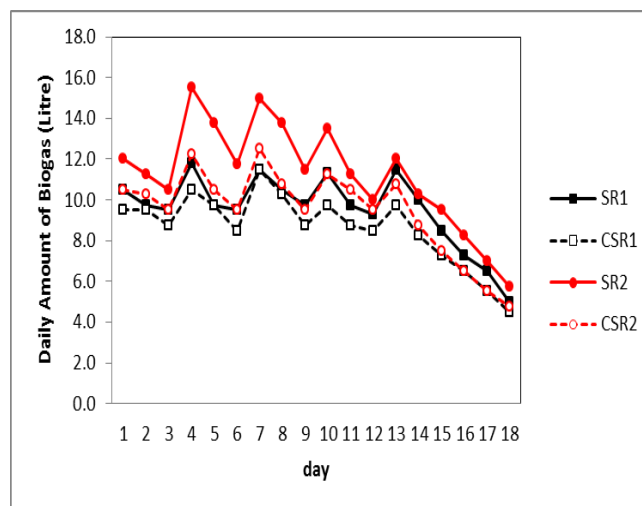
ชุด	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี					
	pH	VS (mg/l)	TS (mg/l)	VS/TS ก่อน	VS/TS หลัง	COD _T (mg/l)
SR1	7.66	47,991	30,725	0.77	0.65	43,904
CSR1	7.73	36,146	24,922	0.76	0.69	33,896
SR2	7.53	43,788	28,152	0.77	0.64	37,776
CSR2	7.71	33,908	22,386	0.76	0.66	30,800

จากตารางที่ 2-3 พบว่าก่อนทำการเดินระบบ ชุดทดลอง SR1 และSR2 มีลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมือนกัน เนื่องจากเป็นวัสดุหมักที่เตรียมด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตรที่เท่ากัน และยังไม่มีการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักด้วยค่า F/M ต่างกัน เช่นเดียวกับชุดควบคุม CSR1 และ CSR2 ในระหว่างทำการเดินระบบ พบว่าค่า pH มีความเป็นกลางถึงด่างอ่อน(7.32-7.73) เนื่องจากมีการปรับสภาพ pH ให้เป็นกลางอยู่เสมอ จนสิ้นสุดระบบ ทำให้

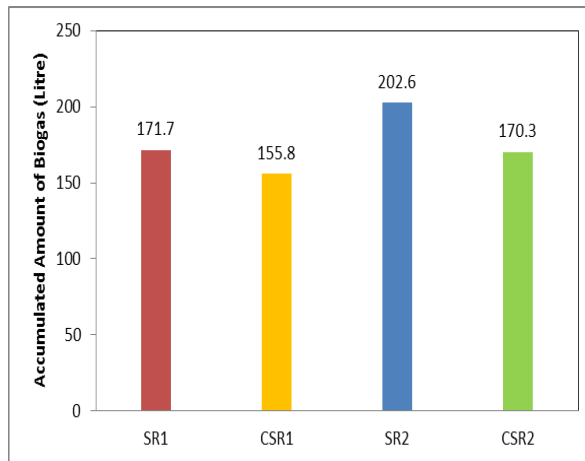
ค่าปริมาณ TS VS และCOD รวมทั้งค่า VS/TS เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบของทุกชุดทดลอง มีค่าลดลงทั้งหมด แสดงว่ามีการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นทุกชุดการทดลอง

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักย่อยของเสียผสมในระบบหมัก มีรายละเอียดดังรูปที่ 2-3



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซเฉลี่ยแต่ละวันที่เกิดจากการหมักย่อย



ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซเฉลี่ยสะสมที่เกิดจากการหมักย่อย

จากรูปที่ 2-3 พบว่าปริมาณก๊าซเฉลี่ยแต่ละวันที่เกิดจากการหมักย่อยของทุกชุดทดลอง มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกป้อน เนื่องจากการป้อนสารอินทรีย์คือเศษอาหารเข้าสู่ระบบ มีความแตกต่างกันตามค่า F/M โดยมีจำนวนครั้งในการป้อนเท่ากัน รวม 4 ครั้ง ทุก ๆ 2 วัน คือในวันที่ 3 6 9 และ 12 ของการเดินระบบ หลังจากนั้นปริมาณก๊าซค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งสิ้นสุดระบบ ชุดทดลอง SR2 ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วน F/M 0.4 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด (202.6ลิตร) และมากกว่าชุดทดลอง SR1 ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วน F/M 0.1 ที่ให้ปริมาณก๊าซน้อยกว่า (171.7 ลิตร) ใช้ระยะเวลาที่กักเก็บนาน 18 วัน เท่ากัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Augus Hadiyanto et al. (2015) ซึ่งพบว่าการใช้ค่า F/M ต่างกัน ในการหมักย่อยเศษปลา มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ส่วนชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด (CSR1 และ CSR2) มีค่าต่ำกว่าชุดทดลองทุกค่าอัตราส่วน F/M ที่ใช้ เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากวัสดุหมัก ซึ่งมีเฉพาะเศษอาหารผสมกับเชื้อจุลินทรีย์เท่านั้น จึงทำให้ได้ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายต่ำกว่า และปริมาณสารอินทรีย์ในระบบที่ใช้ค่า F/M สูง มีปริมาณมากกว่าในระบบที่ใช้ค่า F/M ต่ำกว่า แสดงว่า การใช้ค่า F/M ที่ต่างกัน มี

ส่วนต่อการเกิดปริมาณก๊าซ สอดคล้องกับผลการทดสอบทางสถิติที่ว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น มีความสัมพันธ์กับการใช้ค่า F/M ที่ต่างกัน (Pearson correlation 0.67, $p < 0.05$) ส่วนผลการทดสอบทางสถิติด้วยค่า T-test พบว่า การใช้ค่า F/M ที่ต่างกัน ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่า F/M ต่างกัน จากเศษวัสดุทางการเกษตรและเศษอาหารซึ่งมีองค์ประกอบสารอินทรีย์เป็นเซลลูโลสอยู่ร่วมกับคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ ควรเลือกใช้ชนิดของระบบหมักที่มีระยะเวลาในการย่อยสลายหรือกักเก็บนานกว่า เช่นระบบหมักแบบหลายขั้นตอน เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก ก่อนและหลังการเดินระบบ ทำให้ทราบถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบหมัก ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ

ชุดทดลอง	ประสิทธิภาพการกำจัด VS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัด TS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัด COD (%)
SR1	65.5	70.2	71.4
CSR1	53.5	60.3	41.2
SR2	67.5	72.9	75.0
CSR2	55.2	60.9	46.6

พบว่าชุดทดลอง SR2 ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วน F/M 0.4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดในรูป TS VS และ COD 72.9% 67.5% 75% และมากกว่าชุดทดลอง SR1 ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วน F/M 0.1 ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป TS VS และ COD 70.2% 65.5% และ 71.4% ตามลำดับ ส่วนชุดทดลอง CSR1 และ CSR2 มีประสิทธิภาพต่ำกว่าชุดทดลอง SR1 และ SR2 เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากวัสดุหมัก คือเศษอาหารเท่านั้น ผลจากการใช้ค่าอัตราส่วน F/M ที่สูงกว่าทำให้มีสารอินทรีย์จำนวนมากกว่าถูกป้อนเข้าสู่ระบบและถูกย่อยสลายได้มากกว่าการใช้ค่าอัตราส่วน F/M ที่ต่ำ ซึ่งสารอินทรีย์ถูกป้อนเข้าสู่ระบบน้อยกว่า สอดคล้องกับค่า F/M ตามทฤษฎีประการสำคัญ สารอินทรีย์ที่เป็นเศษวัสดุทางการเกษตรมักถูกย่อยสลายได้ช้ากว่าเศษอาหาร เนื่องจากมีองค์ประกอบที่ย่อยสลายยากกว่า เช่น เซลลูโลส ดังนั้นการใช้ค่าอัตราส่วน F/M ที่ต่างกัน มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลการทดสอบทางสถิติแสดงว่าค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป TS VS และ COD มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Pearson correlation 0.992-0.999, $p < 0.01$) และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นยังสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป TS VS และ COD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Pearson correlation 0.792-0.802, $p < 0.05$)

สรุป

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี ของเศษวัสดุทางการเกษตร ได้แก่เศษก้านและใบไม้รวม เศษอาหาร และ เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์สูง สามารถ ใช้หมักย่อยเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้

ผลการเปลี่ยนแปลงสภาวะการหมักย่อยที่ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักระหว่างเศษก้านและใบไม้รวมและเศษอาหาร 2:3 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ (F/M) ต่างกัน พบว่าระบบหมักทำงานในสภาวะที่เหมาะสม มีค่า pH เป็นกลางถึงด่างอ่อน (6.98-7.73) ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในระหว่างการเดินระบบ (32-43 °C) แสดงว่าจุลินทรีย์ที่ทำงานในระบบคือแบคทีเรียกลุ่ม Mesophilic ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่าชุดทดลอง SR2 ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วน F/M 0.4 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด (202.6 ลิตร) ใช้ระยะเวลาแก๊สเก็บนาน 18 วัน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป TS VS และ COD มากที่สุด ส่วนชุดทดลอง SR1 ซึ่งใช้ค่า F/M 0.1 ให้ปริมาณก๊าซและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์น้อยกว่า

ค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันและสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซ แต่การใช้ค่า F/M ที่ต่างกัน ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงมีข้อเสนอแนะเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพและ

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุดว่า ควรใช้ค่า F/M ที่ต่างกัน ในการหมักย่อยเศษวัสดุทางการเกษตรและเศษอาหาร ด้วยวิธีการหมักแบบหลายขั้นตอน ซึ่งให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าและใช้ระยะเวลาที่เก็บนานกว่าการหมักย่อยแบบขั้นตอนเดียว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่ให้ทุนวิจัย ภายใต้โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน เพื่อสนับสนุนการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง วรวิฑูร์ กันอิน สรรนุรักษ์ แสนพรหม และเอกราช คำปัญญา. (2554). ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด. **วารสารการวิจัยพัฒนาเพื่อชุมชน**. 5(1):64-73.

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, นภารัตน์ สุทธินันท์, ปิยะนันท์ ธนไชย และอุกฤษฏ์ เมืองขวัญใจ. (2555). การพัฒนาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้. **วารสารวิจัย มข**. 17(4): 543-555.

จุฑามาส รัตนพรหม อาภาภรณ์ ประระดี และกลิ่นประทุม ปัญญาปิง. (2552). ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนจากก้านและใบลำไยในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน. **เอกสารการประชุมวิชาการประจำปี 2554**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 1-2 ธันวาคม 2554.

สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). **ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา**. สำนักพิมพ์ท็อป. กรุงเทพฯ.

Anunputtikul,W ,and Rodtong, S. (2004). Laboratory scale Experiments for biogas production from Cassava tubers. The joint Int. Conf. on **Sustainable Energy and Environemnt (SEE)**. Hua-Hin, 238-243.

APHA, AWWA, and WPCE. (2005). **Standard method for the examination of water and wastewater**, 21sted. US.

Augus Hadiyanto, Budiyono1, Seno Johari, Indra Hutama, and Wahid Hasyim. (2015). The effect of F/M ratio to the anaerobic decomposition of biogas production from fish offal waste. **Waste Technology**, 3(2)2015:58-62.

Barton, J.R, Issaias I, and Stentiford, E.I. (2008). Carbon make the right choice in developing countries. **Waste Manage**. 28:69-76.

Bekkering, J, Broekhuis, A.A, VAN Gemert W.J.T. (2010). Optimization of a green supply chain-a review. **Bioresour Technol**. 101:450-456.

Bouallagul, H, Lahdhab, H, Ben Romdan E, Rachdi, B., Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. **J. Environ Manage**. 90:1844-1849.

Braun, R. (2007). **Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development**. In: Ranali, P. (ed) Improvement of crop plants for industrial end uses. Springer, Dordrecht. 335-415.

- David, M.L., and Cornwell, D.A. (2008). **Introduction to Environmental Engineering**. 4th ed. McGraw-Hill Book Company. US.
- Espito, G, Frunzo, L, Giordano, Liotta, F, Panico, A, and Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. **Rev Environ Sci Biotechnol**. 11:325-341.
- Lema, J.M, and Omil, F. (2001). Anaerobic treatment a key technology for a sustainable management of wastes in Europe. **Water Sci Technol**. 44: 133-140.
- Lettinga, G. (2001). Digestion and degradation, air for life. **Water Sci Technol**. 44: 157-176.
- Mata-Alvarez, J, Mace, S, Liabres, P, Astlas, S. (2000). Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling. **Crit Rev Biotechnol** 31:99-111.
- Metcalf & Eddy Inc., Revised by Tchobanoglous, G., et al. (2008). **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse**. 4th ed., McGraw-Hill Book Company. US.
- Misho, G.L. (1999). F/M ratio and the operation of an activated sludge process. **Florida Water Resources Journal**. March: 20-21.
- Rehl, T, and Muller, J. (2011). Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. **Resour Conserve Recycl**. 56:92-104.
- Tambone, F, Genevini, P, D'Imporzano, G, Adani, F. (2009). Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. **Bioresour Technol**. 100:3140-3142.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. **Appl Microbiol Biotechnol**. 85:849-860.

การหมักย่อยของเสียผสมในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้การป้อนที่ต่างกัน เพื่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

Anaerobic Digestion of Mixed Waste by Using Different Feeding For Biogas Production

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง^{1*}, เจษฎา วามตา² และภัทรา วงษ์พันธ์กุล³
Klinpratoom Panyaping^{1*}, Jedsada Wamta² and Pattra Wongpankamol³

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

^{1,2,3} Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

* Corresponding author e-mail: klin41@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพ รวมทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนของของเสียผสมระหว่างเศษก้านและใบไม้และเศษอาหารที่ค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ (F/M ratio) 0.40 ในถังหมักที่มีการกวนขนาด 20 ลิตรเมื่อใช้วิธีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบด้วยจำนวนวันที่ต่างกัน คือ วันเว้นวันและสองวันครั้ง ตามลำดับ ทำการทดลองรวมจำนวน 4 ชุด ชุดละ 2 ซ้ำ

ผลการหมักย่อยพบว่าชุดทดลอง SR1 มีการป้อนสารอินทรีย์แบบวันเว้นวันให้ปริมาณก๊าซสูงสุด (255 ลิตร) ใช้ระยะเวลาแก๊กเก็บ 18 วันและมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงสุดในรูป COD VS และ TS อยู่ระหว่าง 68.14% -77.71% และมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุด 91% ส่วนชุดทดลองทั้ง 2 ชุด (SR2 และ CSR2) ที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบสองวันครั้ง พบว่าให้ปริมาณก๊าซใกล้เคียงกัน (169.55-174.05 ลิตร) ใช้ระยะเวลาแก๊กเก็บนาน 18 วันเท่ากัน และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป COD VS และ TS อยู่ระหว่าง 46.65-75% และมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ อยู่ระหว่าง 64-88% ผลการทดสอบค่าทางสถิติพบว่าค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปต่างๆและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biodegradability) มีสหสัมพันธ์กัน แต่การใช้การป้อนสารอินทรีย์ที่ต่างกันในการหมักย่อยสลายให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

คำสำคัญ: ของเสียผสม การป้อนสารอินทรีย์ ก๊าซชีวภาพ การหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน

Abstract

The purpose of this study was to determine the quantity of biogas, and organic removal efficiency, as well as biodegradability obtained from anaerobic digestion of mixed waste; leaves and petioles waste and food waste at the ratio 2:3, and F/M ratio 0.4 in stirred digester size 20 L by different feeding; every other day, and every second day feeding, respectively. All experiments were 4 sets. Each experiment consisted of duplicate.

It was found that SR1, which was the every other day feeding, provided the highest biogas (255 L) with the hydraulic retention time 18 days, and the highest removal efficiency of COD VS, and TS in the range of 68.14% -77.71%, and the highest biodegradability (91%). Both SR2 and CSR2, which were the every second day feeding, provided biogas quantity in the closed range (169.55-174.05 L) with the same hydraulic retention time 18 days, and removal efficiency of COD VS, and TS in the range of 46.65-75%, and high biodegradability (88%). The result of statistical value test indicated that various types of organic removal efficiency and biodegradability were correlated. However, the use of different feeding did not provide different biogas quantity at the statistical level 0.05.

Keywords: mixed waste feeding biogas anaerobic digestion

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีของเสียจำพวกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการผลิตภาคเกษตรและการบริโภคในภาคครัวเรือนที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร ของเสียเหล่านี้มีอยู่หลายชนิดได้แก่ เศษวัสดุการเกษตรจำพวกเศษก้านและใบ ไม้และเศษอาหาร เป็นต้น โดยเฉพาะของเสียดังกล่าว ที่อยู่ในเขตภาคเหนือตอนบนของไทย มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาวิกฤติหมอกควันพิษเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 เป็นต้นมาซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการเผาไหม้วัสดุเหลือทิ้งต่างๆจากภาคการเกษตรและครัวเรือนในท้องถิ่น ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศและขยะมูลฝอย เป็นต้น ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อมรวมทั้งก่อให้เกิดผลเสียหายต่อเศรษฐกิจของประเทศ

การบำบัดของเสียโดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพซึ่งเป็นการบำบัดของเสียในรูปสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนได้ทำการศึกษาค้นคว้าโดยกลุ่มวิจัยในสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2551 จนถึงปัจจุบัน มีปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการหมักย่อยหลายประการ (สันทนต์,2549) นอกจากการเลือกใช้ค่าอัตราส่วนวัสดุหมักและอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการหมักแล้ว วิธีการป้อนวัสดุหมักนั้นว่ามีความสำคัญในแง่ของปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบ ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ดังนั้นในบทความนี้ จึงได้นำเสนอประเด็นการป้อนวัสดุหมักแบบวันเว้นวันและสองวันครั้งในการหมักย่อยของเสียผสมในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อทราบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการหมักย่อย ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการกำจัดของเสียอินทรีย์ ที่ช่วยลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและเพิ่มทางเลือกในการจัดการของเสียและพลังงานทดแทน

อุปกรณ์และวิธีการ

ประกอบด้วย ตัวอย่าง วิธีเก็บตัวอย่าง พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ส่วนผสมและสภาวะการหมักย่อยของชุดการทดลองการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ทำการหมักโดยการป้อนสารอินทรีย์ คือ เศษอาหาร ที่ค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ (F/M) 0.4 ด้วยจำนวนครั้งการป้อนเศษอาหารวันเว้นวันครั้ง และสองวันครั้ง จำนวนอย่างละ 4 ครั้ง ทุก ๆ 2 วัน โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกรเป็นเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ทำการทดลองในถังหมักแบบที่มีการกวน ขนาด 20 ลิตร จำนวนรวม 4 ชุด ชุดละ 2 ข้ำ

- ตัวอย่างและอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ของเสียผสม ประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้รวมของมะม่วง ไทร และลิ้นจี่ ที่อัตราส่วนสด: แห้ง 3:1 ซึ่งได้จากการศึกษาของกลิ่นประทุม และคณะ (2555) เศษก้านและใบไม้เหล่านี้ หาได้จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและผ่านการบดย่อยให้มีขนาด 0.1-0.5 มม.ด้วยเครื่องปั่นและบดย่อยใบไม้และเศษอาหารจากร้านอาหารในตลาดเทพมงคล หลังมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นำมาผ่านการบดย่อยให้มีขนาด 0.1-0.5 มม. ด้วยเครื่องปั่นเศษอาหาร ทำการสุ่มตัวอย่างเศษวัสดุแบบแบ่งเป็นส่วนและชั่งน้ำหนักหรือปริมาตรให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนดในอัตราส่วน 2:3 และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ซึ่งเก็บตัวอย่างแบบจ้วง จากฟาร์มสุกรดอนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่ ถังหมักพลาสติก แบบมีการกวน ขนาด 20 และสารเคมีโซดาไฟ (NaOH) 2N ที่ใช้ปรับ pH

-พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์
ได้แก่ อุณหภูมิ pH, Chemical Oxygen Demand; (COD_T, COD_M), Mixed Liquor Volatile Suspended Solids; MLVSS เฉพาะของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น, Total Solid; TS Volatile Solid; VS ทั้งก่อนและหลังเดินระบบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตาม

มาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (APHA, AWWA, WPCE, 2005)

-ส่วนผสมและสถานะการหมักย่อย

วัสดุหมักที่อัตราส่วน 2:3 ถูกนำมาผสมให้เข้ากัน ในถังหมักก่อนนำมาแยกบรรจุในแต่ละซ้ำของชุดทดลองและทำการปรับสภาพ pH ให้เป็นกลางทุกชุดทดลอง ดังนี้

-ชุดทดลอง (SR1 SR2) ประกอบด้วย เศษก้านและใบไม้รวม 400 กรัม: เศษอาหาร 600 กรัม: เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตร

-ชุดควบคุม (CSR1 CSR2) ประกอบด้วย เศษอาหาร 600 กรัม: เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 10 ลิตร ทำการเดินระบบหมัก โดยมีการป้อนสารอินทรีย์แบบวันเว้นวัน (ชุดทดลอง SR1 และ CSR1) และแบบสองวันครั้ง (ชุดทดลอง SR2 และ CSR2) และมีการทำ Blank ที่มีเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก

ตัวอย่าง	pH	COD (mg/l)	TS (mg/l)	VS (mg/l)	MLVSS (mg/l)
เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น	7.19	60,480	32,750	49,399	19,420
เศษอาหาร	4.45	153,120	135,088	91,395	-
เศษก้านและใบไม้รวม	6.66	34,640	61,800	44,857	-

จากตารางที่ 1 พบว่าวัสดุหมักของเสียผสมที่ใช้คือเศษอาหารมีค่าความเป็นกรดมากมีค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป VS TS และ COD มากกว่าเศษก้านและใบไม้รวมและเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น วัสดุหมักข้างต้นมีสารอินทรีย์สูง จึงเหมาะกับการนำมาหมักย่อย

-การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้ค่า T-test เพื่อหาความแตกต่างของการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการป้อนสารอินทรีย์ต่างกัน โดยกำหนดให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเป็นตัวแปรตามและการป้อนสารอินทรีย์ต่างกันเป็นตัวแปรต้น และใช้ค่า Pearson correlation ในการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์

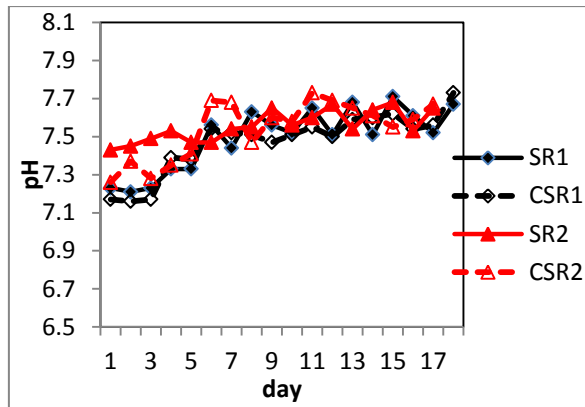
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากวัสดุหมัก

ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุหมักของเสียผสมซึ่งประกอบด้วย เศษก้านและใบไม้รวม เศษอาหาร และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นมีลักษณะสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่เกิดจากการหมักย่อยในระบบ

ค่า pH ที่ได้จากการทดลอง มีส่วนสำคัญต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักและทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะหมักย่อย ดังแสดงในรูปที่ 1



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลง ค่า pH ระหว่างการหมักย่อย

จากรูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักย่อยมีค่าอยู่ในช่วง 7.16-7.73 ซึ่งเป็นผลจากการปรับสภาพ pH ให้มีความเป็นกลางเพื่อให้จุลินทรีย์มีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะทำการเดินระบบหมัก

ค่าอุณหภูมิห้อง ขณะทำการเดินระบบหมัก มีค่าอยู่ระหว่าง 28-41°C เนื่องจากทำการทดลองในช่วงระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝน ค่าอุณหภูมิห้องดังกล่าว จะทำให้อุณหภูมิในระบบหมักมีค่าสูงกว่าประมาณ 3-5°C (สันทัด, 2549) แสดง ว่าระบบหมักมีอุณหภูมิ

ระหว่าง 31-44 °C ซึ่งอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ แบคทีเรียกลุ่ม mesophilic ซึ่งทำงานได้ดีระหว่างอุณหภูมิ 25-45°C (David, M.L.และ Cornwell, D.A., 2008)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยของเสียผสม

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ตรวจวัดได้จากการหมักย่อยสลายของเสียผสม เมื่อเริ่มทำการเดินระบบและสิ้นสุดระบบ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมักก่อนเดินระบบ

ชุด	pH	VS (mg/l)	TS (mg/l)	COD ₅ (mg/l)	COD _p (mg/l)
SR1	8.13	104,915	136,271	66,320	102,280
CSR1	8.07	54,615	75,190	28,160	27,776
SR2	8.14	103,733	134,741	58,736	105,484
CSR2	8.15	57,225	75,690	30,214	26,680

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก เมื่อสิ้นสุดระบบ

ชุด	pH	VS (mg/l)	TS (mg/l)	COD ₅ (mg/l)	COD _p (mg/l)
SR1	7.7	28,747	45,014	28,160	9,424
CSR1	7.56	24,173	36,146	14,080	19,270
SR2	7.53	28,152	43,788	25,650	12,126
CSR2	7.71	22,386	33,908	21,090	9,710

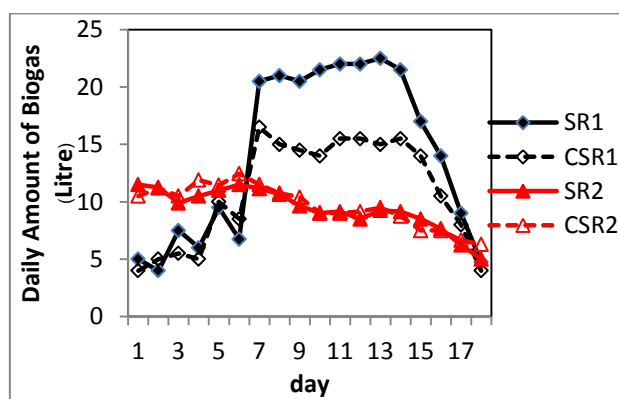
หมายเหตุ: SR1 ชุดทดลองที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบวันเว้นวัน
 CSR1 ชุดควบคุมที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบวันเว้นวัน
 SR2 ชุดทดลองที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบสองวันครั้ง
 CSR2 ชุดควบคุมที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบสองวันครั้ง

จากตารางที่ 2-3 ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน โดยมีค่า pH เป็นกลาง (7.18-7.71) ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป VS TS และ COD ของทั้งชุดทดลองและชุดควบคุม มีค่าลดลงทั้งหมด เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของวัสดุหมักเกิดขึ้น ค่า pH ของระบบจัดว่าอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ระหว่าง 6-8 (สันทัด, 2549 และ Metcalf & Eddy, Inc., 2008) และพบว่าการป้อนสารอินทรีย์แบบวันเว้นวัน ซึ่งมีปริมาณการป้อนสูงกว่ามีการย่อยสลายสารอินทรีย์

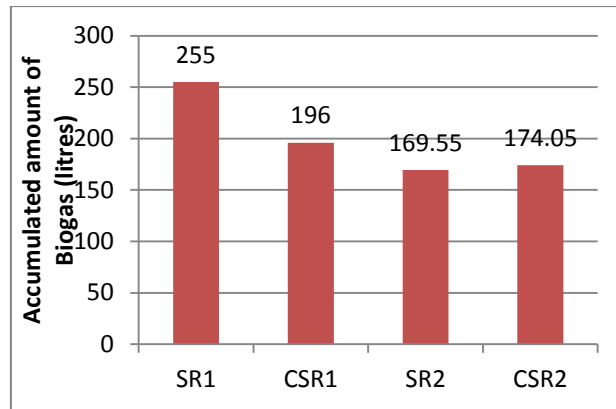
ในรูป COD_p ซึ่งอยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ เกิดได้เข้าสู่ตลอดกับค่า COD_p เมื่อสิ้นสุดระบบของการป้อนแบบวันเว้นวัน ที่มีค่ามากกว่าการป้อนแบบสองวันครั้ง

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักย่อยของเสียผสมในระบบหมัก มีรายละเอียดดังรูปที่ 2-3



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซเฉลี่ยแต่ละวันที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อย



ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซเฉลี่ยสะสมที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อย

จากรูปที่ 2-3 พบว่าการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจนในการป้อนสารอินทรีย์แบบวันเว้นวันครั้ง และสองวันครั้ง มีลักษณะและปริมาณการเกิดก๊าซที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การป้อนแบบวันเว้นวัน สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นจากการป้อนที่บ่อยครั้งและมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่า ทำให้ปริมาณก๊าซค่อย ๆ เกิดเพิ่มขึ้นและเกิดได้มากที่สุดในช่วงระหว่างวันที่ 7-13 หลังจากนั้นปริมาณก๊าซค่อย ๆ ลดลง จนสิ้นสุดระบบในวันที่ 18 ทั้งชุดทดลอง SR1 และชุดควบคุม CSR2 แต่ชุดควบคุม CSR2 ที่มีเฉพาะเศษอาหาร มีปริมาณการเกิดก๊าซที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน ในขณะที่ชุดทดลองมีก๊าซเกิดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนการป้อนแบบสองวันครั้ง ในช่วงแรก (2-3 วัน) มีการย่อยสลายให้ก๊าซชีวภาพได้มากกว่าการป้อนแบบวันเว้นวัน เนื่องจากมีการป้อนอาหารซ้ำกว่า แต่มีวัสดุหมักเริ่มต้นในปริมาณเดียวกัน จึงมีส่วนทำให้จุลินทรีย์มีระยะเวลาในการทำงานได้ดีกว่า แต่การป้อนสารอินทรีย์ที่ซ้ำกว่า อาจไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งอยู่ในถังหมักที่มีปริมาตรเท่ากัน มีส่วนให้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่าง วันที่ 7-13 มี

ปริมาณลดลง หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดระบบ และเนื่องจากการป้อนอาหารที่ทิ้งช่วงนานกว่ามีส่วนทำให้การหมักย่อยในชุดทดลอง SR2 และ CSR2 แบบสองวันครั้ง เกิดขึ้นน้อยกว่า ส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ต่ำกว่า โดยชุดทดลอง SR1 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด (255 ลิตร) ใช้ระยะเวลาที่เก็บนาน 18 วัน ดังนั้นการป้อนสารอินทรีย์ที่ต่างกัน ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าระบบ มีความเข้มข้นต่างกัน และมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ต่างกันด้วย จึงมีส่วนต่อการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพ สอดคล้องกับที่ Weiland (2010) กล่าวไว้ว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุหมักที่ต่างกัน ขึ้นกับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก แหล่งที่มาของวัสดุ และชนิดของวัสดุหมัก

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ

ประสิทธิภาพและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ระหว่างการเดินระบบ ซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก ก่อนและหลังเดินระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ

ชุด	ประสิทธิภาพการกำจัด VS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัด TS (%)	ประสิทธิภาพการกำจัด COD (%)	อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (%)
SR1	73.53	68.14	77.71	91
CSR1	60.77	52.79	40.38	31
SR2	72.86	67.52	75.00	88
CSR2	60.88	55.20	46.65	64

จากตารางที่ 4 เมื่อทำการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบแบบวันเว้นวัน ชุดทดลอง SR1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป VS TS และ COD มากที่สุด และมีอัตราการย่อยสลายสูงสุด (91%) เพราะมีส่วนผสมของเศษก้านและใบไม้ ซึ่งมีส่วนช่วยเร่งให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี ส่วนการป้อนสารอินทรีย์แบบสองวันครั้ง ชุดทดลอง SR2 มีประสิทธิภาพกำจัดสารอินทรีย์ในรูปต่าง ๆ และมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยกว่า (88%) สอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ค่าอัตราการย่อยสลายที่ได้แสดงว่าชุดทดลอง SR1 และ SR2 มีสถานะการย่อยสลายได้ดีมากและดีกว่าชุดควบคุม CSR1 และ CSR2 และจากผลการทดสอบทางสถิติโดยการหาค่าสหสัมพันธ์แบบ Pearson correlation พบว่าค่าอัตราการย่อยสลาย มีความสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป TS VS และ COD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การป้อนที่ต่างกัน ให้ปริมาณก๊าซที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

สรุป

สมบัติทางกายภาพและเคมีของเสียผสม ที่ประกอบด้วยเศษก้านและใบไม้รวม เศษอาหาร และเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น มีค่าปริมาณสารอินทรีย์สูงสามารถใช้หมักย่อยเพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพได้ ผลการเปลี่ยนแปลงสถานะการหมักย่อยที่ค่าอัตราส่วนอาหารต่อเชื้อจุลินทรีย์ 0.4 และที่อัตราส่วนวัสดุหมัก

ผสม 2:3 พบว่าระบบมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสม มีค่า pH เป็นกลางถึงด่างอ่อน อยู่ระหว่าง 7.16-7.73 แยกที่เรียกกลุ่ม Mesophilic เป็นจุลินทรีย์ที่ทำงานในระบบ พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เมื่อใช้การป้อนแบบวันเว้นวัน ชุดทดลอง SR1 ให้ปริมาณก๊าซมากที่สุด (255 ลิตร) ใช้ระยะเวลาที่เก็บนาน 18 วัน และมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป VS TS และ COD มากที่สุด รวมทั้งมีค่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุด (91%)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ทุนวิจัย ภายใต้งานวิจัยระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน เพื่อสนับสนุนการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, นภารัตน์ สุทธินันท์, ปิยะนันท์ ธนันไชย และอุกฤษฏ์ เมืองขวัญใจ. (2555). การพัฒนาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และผลพลอยได้. วารสารวิจัย มช. 17(4), 543-555.
- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2549). ระบบบำบัดน้ำเสีย: การเลือกใช้การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. สำนักพิมพ์ท้อป. กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA, and WPCF. (2005). **Standard method for the examination of water and wastewater**. 21st ed. US.

David, M.L., and Cornwell, D.A. (2008). **Introduction to Environmental Engineering**. 4th ed: McGraw-Hill Book Company. US.

Metcalf & Eddy Inc., Revised by Tchobanoglous, G., et al, (2008). **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse**. 4th ed., McGraw-Hill Book Company. US.

Weiland, P. Biogas production: current state and perspectives. **Appl Microbiol Biotechnol**. 85, 849-860.