

ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน

พงษ์พันธ์ พรหมพิพัทธ์¹, พงศกร ชิดชอบ^{1,*} และ ศุกรินทร์ คำสุวรรณ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: phongsagorn.chi@neu.ac.th โทรศัพท์: 081-4487015
(รับบทความ: 5 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 28 มกราคม 2569; ตอบรับบทความ: 3 กุมภาพันธ์ 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงผลของการกวนต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังหมักแบบสองขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิปานกลางที่ 35 องศาเซลเซียส โดยติดตั้งฮีตเตอร์แบบจุ่มเพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นเท่ากับ 8 โดยถังหมักแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักกรดขนาด 250 ลิตร จำนวน 1 ถัง ถังหมักก๊าซมีเทนขนาด 500 ลิตร จำนวน 2 ถัง และถังเก็บก๊าซจำนวน 1 ถัง ต่อกันแบบอนุกรม ใช้กรรมวิธีการเติมสารอินทรีย์ (กากมันสำปะหลังผสมกับน้ำ) แบบครั้งคราว (Batch Feeding) โดยกำหนดให้มีระยะเวลาพักเก็บสารอินทรีย์ 12 ชั่วโมง และมีของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่เข้าระบบ 20 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) คิดเป็นอัตราการบ่มสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 0.417 กรัมชีโอดี/ลิตร-วัน และมีการเพิ่มความถี่ของการกวนโดยเริ่มจากที่ไม่มีการกวนและมีการกวนด้วยความถี่ 0, 12, 8, 4 และ 2 ชั่วโมง/ครั้งละ 10 นาที พบว่า มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 140, 160, 190, 240 และ 280 ลิตร/วัน การใช้พลังงานไฟฟ้าในการกวนเฉลี่ย 0, 373, 1,119, 2,238 และ 4,470 วัตต์-ชั่วโมง/วัน พลังงานสุทธิที่ผลิตได้เฉลี่ย 898, 654, 100, -697 และ -2,672 วัตต์-ชั่วโมง/วัน

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ กากมันสำปะหลัง สภาวะไร้อากาศ การกวน ถังหมักแบบสองขั้นตอน

การอ้างอิงบทความ: พงษ์พันธ์ พรหมพิพัทธ์, พงศกร ชิดชอบ และ ศุกรินทร์ คำสุวรรณ, "ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 1-11, 2569.

Effect of Mixing on Biogas Production Rate in a Two-Stage Digester

Phongphan Promphiphak^{1,*}, Phongsagorn Chidchob¹ and Sukarin Kham-suwan¹

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University

*Corresponding Author: phongsagorn.chi@neu.ac.th, Tel: 081-4487015

(Received: October 5, 2025; Revised: January 28, 2026; Accepted: February 3, 2026)

Abstract

This study demonstrates the effect of stirring on the biogas production rate from cassava pulp under anaerobic conditions using a two-stage digester system which is operated in the mesophilic temperature range (35 °C). Immersion heaters were installed to control the temperature in both the acidogenic and methanogenic digesters, and the initial pH was adjusted to 8. The two-stage digestion system consisted of one acidogenic digester with a working volume of 250 liters, two methanogenic digesters with working volumes of 500 liters each, and one gas storage tank, all tanks are connected in series. The system was operated under batch feeding conditions using organic substrate prepared by mixing cassava pulp with water. The hydraulic retention time was set at 12 hours, and the total solids concentration of the solution was maintained at 20% (w/v), corresponding to an organic loading rate of 0.417 g COD L⁻¹day⁻¹. The stirring frequency was varied from no stirring to intermittent stirring at frequencies of 12, 8, 4, and 2 hours per cycle, with a stirring duration of 10 min per cycle. The results showed that the average biogas production rates were 140, 160, 190, 240, and 280 L day⁻¹, respectively. The average electrical energy consumption for stirring was 0, 373, 1,119, 2,238, and 4,470 Wh day⁻¹, respectively. The average net energy outputs were 898, 654, 100, -697, and -2,672 Wh day⁻¹, respectively.

Keywords: Biogas, Cassava Pulp, Anaerobic Conditions, Mixing. Two-Stage Digestion System

Please cite this article as: P. Promphiphak, P. Chidchob and S. Kham-suwan, "Effect of Mixing on Biogas Production Rate in a Two-Stage Digester," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 1-11, 2026.

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่แหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีอยู่อย่างจำกัดและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่งผลให้หลายประเทศหันมาให้ความสำคัญกับการพัฒนาพลังงานทดแทนที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นพลังงานทดแทนที่ผลิตได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณของเสียจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ในช่วงที่ผ่านมางานวิจัยด้านการผลิตก๊าซชีวภาพได้มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบถังหมัก การปรับปรุงคุณสมบัติของวัตถุดิบ การควบคุมสภาวะการหมัก เช่น อุณหภูมิ ค่า pH และอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ เพื่อให้การผลิตก๊าซมีความเสถียรและให้ผลผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้ การกวนผสมในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากช่วยเพิ่มโอกาสที่จุลินทรีย์จะสัมผัสกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างทั่วถึงแล้ว ยังส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น โดยเฉพาะในกรณีกากมันสำปะหลังจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก การกวนผสมสามารถลดการจับตัวกันเป็นก้อนของแป้ง ทำให้การย่อยสลายแป้งเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ การกวนผสมยังช่วยกระจายอุณหภูมิภายในถังหมักให้สม่ำเสมอ ลดการเกิดบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน และสามารถช่วยลดระยะเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยา (Hydraulic Retention Time: HRT) ได้ วิธีการกวนผสมสามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบ โดยการใช้ใบพัดกวนให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมด้วยการหมุนเวียนของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบ ทั้งนี้ การกวนผสมสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบเป็น

ช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) มีความไวต่อการกวนที่มีความรุนแรงสูง โดยเฉพาะการผสมแบบรวดเร็ว (Rapid Mixing) ที่มีค่า Velocity Gradient (G) มากกว่า 500 s^{-1} ซึ่งอาจทำให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบหรือถูกยับยั้ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงหรือทำให้ระบบหมักล้มเหลวได้ ดังนั้น การกำหนดอัตราและรูปแบบการกวนที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบ [1] นอกจากการกวนผสมแล้ว รูปแบบของระบบหมักก๊าซชีวภาพก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยระบบหมักแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Process) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ระบบดังกล่าวประกอบด้วยถังหมัก 2 ถังต่ออนุกรมกัน ได้แก่ ถังหมักกรด (Acidogenic Reactor) และถังหมักมีเทน (Methanogenic Reactor) ซึ่งสามารถลดขนาดของถังหมักมีเทนลงได้ประมาณครึ่งหนึ่งหรือรองรับปริมาณน้ำเสียได้เพิ่มขึ้นประมาณสองเท่า ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความต้องการสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน การแยกกระบวนการหมักออกเป็นสองขั้นตอนจึงช่วยให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการกวนผสมและระบบหมักแบบสองขั้นตอนต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ Paranjpe et al. [2] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว (Single-Stage Anaerobic Digestion: SSAD) และแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Anaerobic Digestion: TSAD) โดยใช้ขยะอาหารและน้ำเสียที่ไม่ได้รับการบำบัดเป็นวัตถุดิบพบว่า TSAD ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่า SSAD อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ

สะสม 1,914.8 มิลลิลิตร (ml) เมื่อเทียบกับ SSAD 1,349.4 ml และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 51% เป็น 75% อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ Volatile Solids (VS) และเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพรวมขึ้น 41.9% [2] Saipa et al. ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอน พบว่าการกวนทุก 6 และ 12 ชั่วโมง รอบละ 10 นาที ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 283.34 และ 240.63 ลิตรต่อวัน (L/d) ตามลำดับ และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน 0.688 และ 0.564 ลิตรก๊าซมีเทนต่อกรัมของ (Volatile Solids) ($\text{L CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ VS}$) แสดงให้เห็นว่าความถี่ของการกวนมีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพอย่างชัดเจน [3] Karim et al. [4] รายงานว่าผลของการกวนมีความสำคัญต่อการเกิดก๊าซมากขึ้นเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณของแข็งสูง โดยการหมักมูลวัวที่มีของแข็ง 10–15% ภายใต้การกวนสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 10–30% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีกวน [4] และงานวิจัยของ Callaghan et al. [5], Angelidaki et al. [6], Hernandez and Edyvean [7], Dinsdale et al. [8], และ Cho et al. [9] ต่างยืนยันว่าระบบถังหมักแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR) และระบบหมักแบบสองขั้นตอน ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนสูงกว่า โดยเฉพาะในกรณีของเสียที่มีความเข้มข้นสูงหรือมีสารยับยั้ง เช่น ฟีนอล ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกวนผสมและระบบหมักแบบสองขั้นตอนอย่างชัดเจน ซึ่งพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาผลของการกวนผสมหรือระบบหมักแบบสองขั้นตอนแยกจากกัน ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับผลของอัตราการกวนผสมในระบบหมักแบบสองขั้นตอน ยังมีจำกัด โดยเฉพาะในกรณีกากมันสำปะหลังจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีลักษณะเฉพาะด้านการจับตัวของแป้ง และยังขาดแนวทางเชิงวิศวกรรมในการกำหนดอัตราการกวนที่เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มผลผลิต

ก๊าซชีวภาพโดยไม่ส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน

ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการกวนผสมต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน โดยใช้กากมันสำปะหลังจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราการกวนในระบบหมักแบบสองขั้นตอน ผู้วิจัยหวังว่าผลการศึกษานี้จะช่วยพัฒนาแนวทางการออกแบบและควบคุมระบบหมักก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ลดความเสี่ยงของความไม่เสถียรของระบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม อันจะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการของเสียและการผลิตพลังงานทดแทนจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังในอนาคตต่อไป

2. วิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

ใช้กากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตแป้งมันโดยนำกากมันสำปะหลังสดมาผสมกับน้ำที่ค่า TS (Total Solids) = 20% (ของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่เข้าระบบ 20%) จำนวน 140 ลิตร (L) ผสมกันในถังผสมดังแสดงในรูปที่ 1 การคำนวณค่า TS ของกากมันผสมน้ำดังสมการที่ (1)

$$TS\% = \frac{W_d - W_c}{W_w - W_c} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

W_c = น้ำหนักภาชนะเปล่า (g)

W_w = น้ำหนักภาชนะ + ตัวอย่างเปียก (g)

W_d = น้ำหนักภาชนะ + ตัวอย่างหลังอบแห้ง (g)

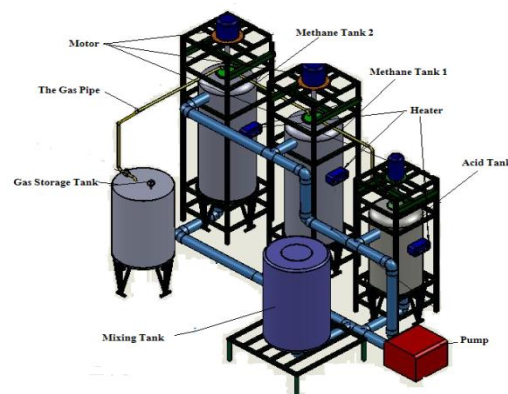
V = ปริมาตรตัวอย่าง (ml)

การเริ่มต้นทดลองวัตถุดิบตั้งต้นจะใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังจำนวน 40 ลิตร โดยทำการเก็บรักษาจากมันสำปะหลังสดไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ (0 – 4 องศาเซลเซียส) และก่อนนำไปใช้งานมีการวิเคราะห์กากมันสำปะหลังที่ผสมกับน้ำให้ได้ค่า TS = 20% ก่อนทำการทดลองทุกครั้ง โดยมีค่า COD 5,011 มิลลิกรัมต่อลิตร (m/L) โดยวิเคราะห์ค่าด้วยวิธีไทเทรตและปรับ pH เริ่มต้น เท่ากับ 8 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่า และวัดค่าด้วย pH meter [10]

2.2 การออกแบบระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน

ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน มีถังผสมกากมันสำปะหลังกับน้ำจำนวน 1 ถัง ขนาด 330 L ทำจากพลาสติก ถังหมักกรดจำนวน 1 ถัง ขนาด 250 L ทำจากสแตนเลส ถังหมักมีเทนจำนวน 2 ถัง ขนาด 500 L ทำจากสแตนเลส และถังเก็บก๊าซสำหรับนำไปใช้งานจำนวน 1 ถัง โดยในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน จะมีการติดตั้งใบกวนและเพลาทำจากสแตนเลสกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า (hp) ผ่านชุดเฟืองทดขนาด 1:20 รอบต่อนาที (rpm) และมีการควบคุมอุณหภูมิภายในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน 1, 2 ที่ 35 °C โดยใช้ Heater แบบจุ่ม ขนาด 2,450 วัตต์ (W) เป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำในถังหมักจำนวน 5 ตัว โดยติดตั้งที่ถังหมักกรด 1 ตัว และติดตั้งที่ถังหมักมีเทนจำนวน 2 ถัง ถังละ 2 ตัว ควบคุมอุณหภูมิด้วย Temperature Control โดยตั้งค่าไว้ที่ 35 °C และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวเซนเซอร์จับอุณหภูมิภายในถังหมัก แต่ละถังวางลวเก็บตัวอย่างมีการวัดระดับน้ำและช่องทางการถ่ายเทของเหลวโดยใช้ปั๊มสูบน้ำขนาด 1 hp เพื่อที่จะสูบจาก ถังหมักกรดไปยังถังหมักมีเทนถังที่ 1 และสูบจากถังหมักมีเทนถังที่ 1 ไปยังถังหมักมีเทนถังที่ 2 ถังหมักมีเทนถังที่ 2 จะมีท่อปล่อยน้ำทิ้งออกสู่ระบบนิเวศโดยน้ำที่ออกไปได้รับการบำบัดแล้ว ลักษณะของถังหมักก๊าซชีวภาพ

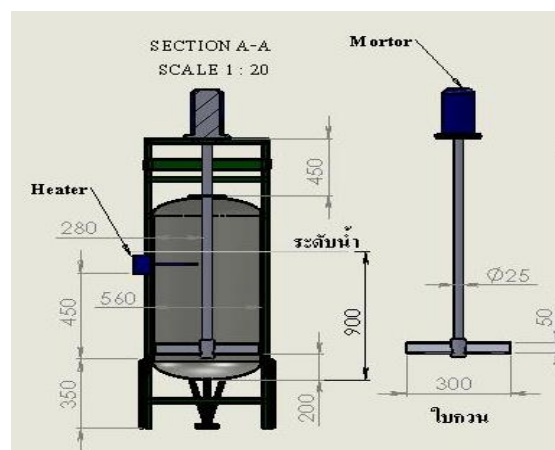
แบบสองขั้นตอน และลักษณะของใบกวนในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนแสดงดังรูปที่ 1, 2, 3 และ รูปที่ 4



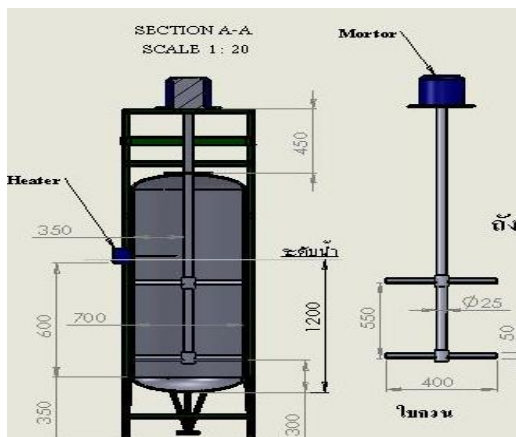
รูปที่ 1 ลักษณะแบบของถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน



รูปที่ 2 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน



รูปที่ 3 ลักษณะของใบกวนที่ถังหมักกรด



รูปที่ 4 ลักษณะของใบกวนที่ถังหมักมีเทน

2.3 การทำงานของระบบ

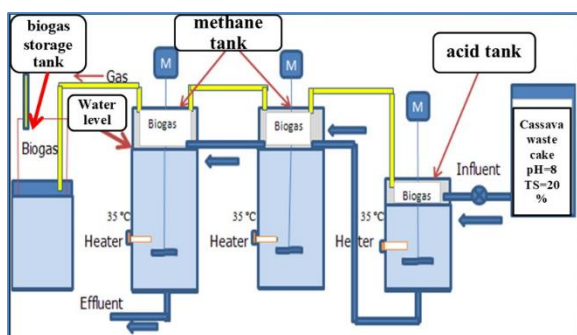
การทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมวัตถุดิบ โดยนำกากมันสำปะหลังผสมกับน้ำในอัตราส่วนกากมันสำปะหลัง 10 กิโลกรัม (Kg) ต่อน้ำ 160 L จากนั้นปรับค่า pH ของส่วนผสมให้เท่ากับ 8 และทำการกวนในถังผสมจนเกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2) เมื่อเตรียมวัตถุดิบเรียบร้อยแล้วจึงป้อนส่วนผสมเข้าสู่ถังหมักกรดในปริมาตร 140 L ภายในถังหมักกรดมีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ได้จากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังในปริมาตร 40 L พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่ 35 °C และติดตั้งระบบกวนแบบใบพัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับสารอาหาร โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บในถังหมักกรดเท่ากับ 4 วัน เมื่อครบระยะเวลากักเก็บ มวลน้ำจากถังหมักกรดจะถูกปั๊มเข้าสู่ถังหมักมีเทนถังที่ 1 ในขณะเดียวกันจะมีการเตรียมวัตถุดิบชุดใหม่ในถังผสมและป้อนเข้าสู่ถังหมักกรดเพื่อทดแทนปริมาตรที่ถูกส่งออกไป ทำให้ระบบสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง ถังหมักมีเทนถังที่ 1 มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C และติดตั้งระบบกวนแบบใบพัดเช่นเดียวกับถังหมักกรด จากนั้นมวลน้ำจากถังหมักมีเทนถังที่ 1 จะถูกปั๊มต่อไปยังถังหมักมีเทนถังที่ 2 ซึ่งเชื่อมต่อกันในลักษณะแบบอนุกรม โดยถังหมัก

มีเทนถังที่ 2 มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C และติดตั้งระบบกวนแบบใบพัดเช่นเดียวกัน ระบบจะใช้ระยะเวลาประมาณ 24 วัน เพื่อให้มวลน้ำไหลผ่านและเติมเต็มถังหมักมีเทนทั้งสองถังครบถ้วน เมื่อระบบดำเนินการครบวงจร มวลน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจากถังหมักมีเทนถังที่ 2 จะถูกปล่อยออกจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม การดำเนินงานของระบบจะทำให้เข้าใจในลักษณะดังกล่าวจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการเก็บข้อมูลการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 2)

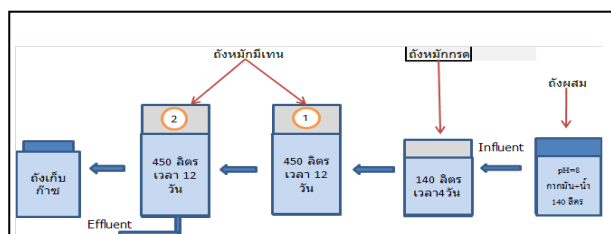
2.4 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

ระบบการทดลองประกอบด้วยถังหมักกรดขนาด 250 L จำนวน 1 ถัง และถังหมักมีเทนขนาด 500 L จำนวน 2 ถัง โดยกำหนดอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.0375 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (m^3/d) วัตถุดิบที่ใช้คือกากมันสำปะหลัง 10 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ 160 ลิตร และมีการปรับค่า pH ก่อนเข้าสู่ระบบให้เท่ากับ 8 ทุกครั้ง การทดลองนี้กำหนดตัวแปรควบคุม 2 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิภายในถังหมักที่ 35 °C โดยติดตั้งฮีตเตอร์แบบจุ่ม เพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน และค่า pH เท่ากับ 8 ขณะที่ตัวแปรต้นคือความถี่ของการกวนผสม โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บรวมของระบบ (Hydraulic Retention Time: HRT) เท่ากับ 12 วัน ทั้งในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน ระบบจะดำเนินการป้อนวัตถุดิบและถ่ายเทมวลน้ำระหว่างถังหมักที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมอย่างต่อเนื่อง จนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการบันทึกผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ระบบควบคุมอุณหภูมิจะทำงานตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยระบบทำความร้อนจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในถังถึง 35 °C และจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าค่าที่กำหนด ส่วนระบบกวนผสมใช้มอเตอร์ร่วมกับชุดเกียร์ทดรอบและชุดควบคุมมอเตอร์ โดยกำหนดความถี่

ของการกวนเป็น 0, 1, 3, 6 และ 12 ครั้ง/วัน ครั้งละ 10 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการกวนทุก ๆ 0, 24, 8, 4 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ การเก็บข้อมูลดำเนินการเป็นระยะเวลา 4 วัน ต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง โดยทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงเวลาเดียวกันของทุกวัน และดำเนินการทดลองจนครบทุกระดับความถี่ของการกวน รวมระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทั้งหมด 20 วัน ดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ ในระหว่างการทดลองยังมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ Biogas Check และ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ GC-8A (ใช้วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ) ควบคู่ไปด้วย



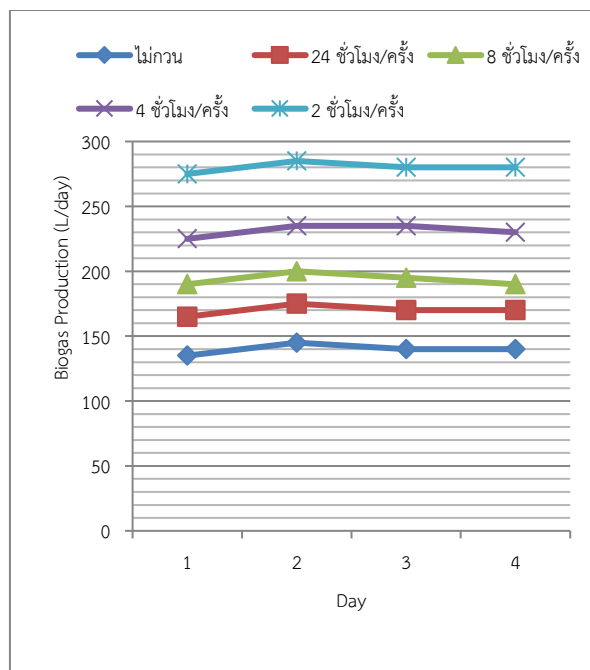
รูปที่ 5 การทำงานของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 6 Flowchart ของระบบหมักก๊าซชีวภาพแบบ
สองขั้นตอน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

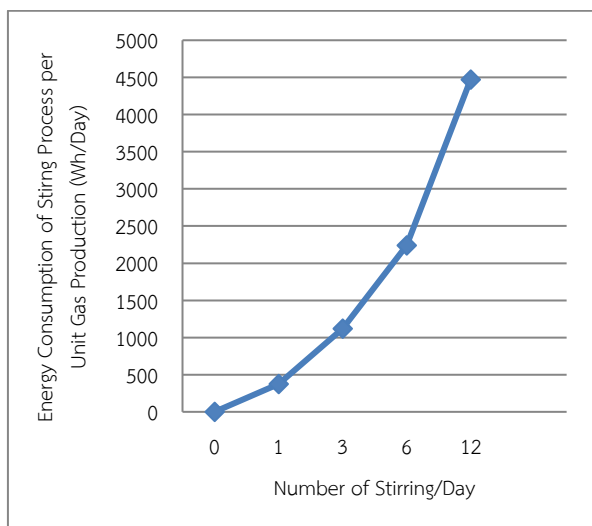
3.1 ผลการวิจัย



รูปที่ 7 ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ
ต่อวัน

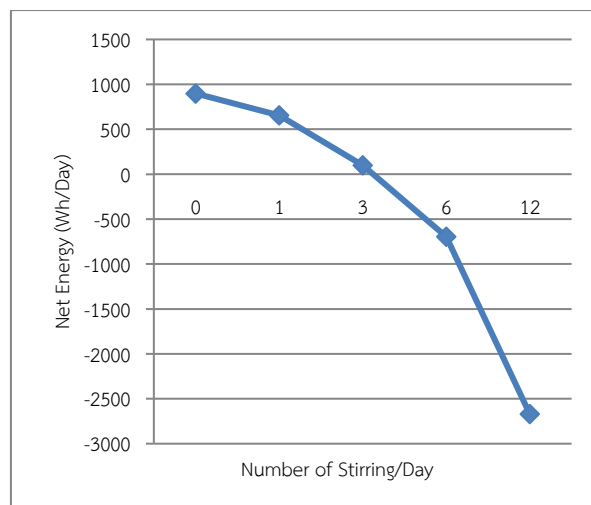
จากกราฟรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ายังมีการกวนมากเท่าไร้อัตรากาเกิดก๊าซชีวภาพก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นจากที่ไม่มีการกวนและเริ่มมีการกวนด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240, และ 280 L/d โดยจากการที่ไม่มีการกวนมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 140 L/d เมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 24 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 1 ครั้ง/วัน พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 12.5% มีการกวนด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 3 ครั้ง/วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 26.3% มีการกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 6 ครั้ง/วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 41.6% และมีการกวนด้วยความถี่

2 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 12 ครั้ง/วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 50%



รูปที่ 8 ผลของการกวนต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากกราฟรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่ายิ่งมีการกวนมากเท่าไรการใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น จากที่ไม่มีการกวนและเริ่มมีการกวนด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 1, 6, 8, และ 12 ครั้ง/วัน พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ย 0, 373, 1,119, 2,238 และ 4,470 วัตต์-ชั่วโมง/วัน Wh day^{-1} โดยจากการที่ไม่มีการกวนก็ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า และเมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 24 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้า $0.373 \text{ Wh day}^{-1}$ เมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 66.6% มีการกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 83.3% มีการกวนด้วยความถี่ 2 ชั่วโมง/ครั้ง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 91.6% ซึ่งได้ทำการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูลในการใช้พลังงาน



รูปที่ 9 ผลของการกวนต่อพลังงานสุทธิที่ได้รับ

จากกราฟรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ายิ่งมีการกวนด้วยความถี่มากเท่าไรพลังงานสุทธิที่ได้รับก็จะยิ่งลดน้อยลง จากที่ไม่มีการกวนและเริ่มมีการกวนด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่าพลังงานสุทธิที่ได้รับโดยเฉลี่ย 898, 654, 100, -697 และ $-2,672 \text{ Wh day}^{-1}$ โดยจากการที่ไม่มีการกวนพบว่า พลังงานสุทธิที่ได้รับ 898 Wh day^{-1} และเมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 24 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่าพลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 27.1% มีการกวนด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง พลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 88.8% มีการกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง พลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 177.6% มีการกวนด้วยความถี่ 2 ชั่วโมง/ครั้ง พลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 397.5%

3.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยใช้กากมันสำปะหลังเป็น Substrate (กากมันสำปะหลังผสมกับน้ำ) ในการทดลอง และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อมีการกวนด้วยความถี่ที่มากขึ้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพก็เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อมีการกวนมากเท่าไรก็ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปในระบบผสมการผสม

สามารถเลือกรูปแบบได้ทั้งการผสมแบบต่อเนื่องและ
เป็นช่วงเวลา ซึ่งถ้ามีการกวนตลอดเวลาบางที่อาจจะ
ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น เช่นในการกวน
ที่ความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง เกิดก๊าซชีวภาพ 190 L/d
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า $1,119 \text{ Wh day}^{-1}$ เทียบกับ
การกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง เกิดก๊าซชีวภาพ
240 L/d อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า $2,238 \text{ Wh day}^{-1}$
ซึ่งจะมีผลต่อค่าพลังงานสุทธิ ค่าพลังงานสุทธิ =
(พลังงานที่ได้รับ - พลังงานที่ใช้) โดยพลังงานที่ได้รับ
คือ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ คูณด้วย ค่าความร้อน
ของก๊าซ (HV) ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบก๊าซ
ชีวภาพ มีก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 53.8-54.3%
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ประมาณ 24.6% และ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ 148 ppm
และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงถึง
98.87% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความถี่ใน
การกวนเพิ่มขึ้น 50% อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ
เพิ่มขึ้นแค่ 20.8% และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า
เพิ่มขึ้น 50% ซึ่งเมื่อดูจากผลการวิจัยแล้วเปอร์เซ็นต์
อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อย เมื่อ
เทียบกับเปอร์เซ็นต์ความถี่ของการกวน และ
เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจาก
Substrate (กากมันสำปะหลังผสมน้ำ) มีโปรตีนน้อย
และ มีค่า COD ขาเข้าเพียง 5,011 m/L ซึ่งถือว่ามีความ
ค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากโรงงาน
อุตสาหกรรม เนื่องจากถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสอง
ขั้นตอนมีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีมีค่าสูงถึง 98.87%
จะเห็นได้ว่าการกวนผสมด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง
เป็นความถี่ที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของความคุ้มค่าทาง
พลังงาน และมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับ
ระบบที่มีค่า COD ขาเข้าสูงในระดับอุตสาหกรรมเพื่อ
เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในอนาคต

4. สรุป

การศึกษาผลของการกวนต่ออัตราการผลิตก๊าซ
ชีวภาพ จากกากมันสำปะหลังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
โดยใช้ถังหมักแบบสองขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง
(Mesophilic Range) ที่ 35°C และปรับค่า pH เริ่มต้น เท่ากับ 8 โดยมีการเพิ่มความถี่
ของการกวนโดยเริ่มจากไม่มีการกวนและมีการกวน
ด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง ครั้ง
ละ 10 นาที/วัน พบว่า มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ
โดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240 และ 280 ลิตร/วัน
การใช้พลังงานไฟฟ้าในการกวนโดยเฉลี่ย 0, 373,
1,119, 2,238 และ $4,470 \text{ Wh day}^{-1}$ พลังงานสุทธิ
ที่ผลิตได้โดยเฉลี่ย 898, 654, 100, -697 และ -2,672
 Wh day^{-1} โดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 53.8-
54.3% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ประมาณ
24.6% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ
148 ppm และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าสูง
ถึง 98.87%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัย และพัฒนา
พลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความ
อนุเคราะห์ทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น และมหาวิทยาลัยภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และ
เวลาในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาจุลชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความ
อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการ และ
สถานที่ในการทดสอบ รวมทั้งให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง
National starch and Chemical (Thailand) Limited
ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Srivichai and C. Rodsrida, "Factors affecting anaerobic digestion efficiency to produce biogas," *RMUTI Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 162-175, 2020. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/229891>.
- [2] A. Paranjpe, S. Saxena, and P. Jain, "Biogas yield using single and two stage anaerobic digestion: An experimental approach," *Energy for Sustainable Development*, vol. 74, pp. 6-19, 2023. DOI: 10.1016/j.esd.2023.03.005.
- [3] S. Saipa, T. Chuenban, N. Homduang, J. Chanathawon, and R. Niransilp, "A study of mixing time and sludge recirculation affecting biogas production from sweet corn residues by dry anaerobic digestion," *Journal of Chulachomklao Royal Military Academy*, vol. 18, no. 1, pp. 87-105, 2020. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/crma-journal/article/view/243159>.
- [4] K. Karim, R. Hoffmann, T. Klasson, and M. H. Al-Dahhan, "Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing," *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 16, pp. 1771-1781, 2005. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405000738>.
- [5] F. J. Callaghan, D. A. J. Wase, K. Thayanithy, and C. F. Forster, "Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 1, pp. 71-77, 2002. DOI: 10.1016/S0961-9534(01)00057-5.
- [6] I. Angelidaki, X. Chen, J. Cui, P. Kaparaju, and L. Ellegaard, "Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactors," *Water Research*, vol. 40, no. 12, pp. 2621-2628, 2006. DOI: 10.1016/j.watres.2006.05.015.
- [7] J. E. Hernandez and R. G. J. Edyvean, "Comparison between a two-stage and single-stage digester when treating a synthetic wastewater contaminated with phenol," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 108, no. 5, pp. 1003-1012, 2011. DOI: 10.1002/bit.23015.
- [8] R. M. Dinsdale, G. C. Premier, F. R. Hawkes, and D. L. Hawkes, "Two-stage anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters," *Bioresource Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 159-168, 2000. DOI: 10.1016/S0960-8524(99)00105-4.
- [9] J. K. Cho, S. C. Park, and H. N. Chang, "Biochemical methane potential and solid-state anaerobic digestion of Korean food wastes," *Bioresource Technology*, vol. 52, no. 3, pp. 245-253, 1995. DOI: 10.1016/0960-8524(95)00031-9.

- [10] P. Promphiphak and T. Wongwuttanasatian, "Biogas production from cassava waste cake in a two-stage anaerobic digestion system," *Advanced Materials Research*, vol. 512-515, pp. 351-355, 2012. Available: <https://www.scientific.net/AMR.512-515.351>.