Research Article

Received: March 20, 2018; Accepted: April 9, 2018

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

Factors Affecting the Bio-hydrogen Production from Corn Cob by Dark Fermentation

ณหทัย มหาเทพ*

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

บัณฑิตา เพ็ญศรี

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตำบลแม่เหียะ อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50100

พฤกษ์ อักกะรังสี

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Nahatai Mahatep*

Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,

Suthep, Muang, Chiang Mai 50200

Bunthita Pensri

Energy Research and Development Institute - Nakornping, Chiang Mai University,

Mae Here, Muang, Chiang Mai 50100

Pruk Aggarangsi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,

Suthep, Muang, Chiang Mai 50200

บทคัดย่อ

ภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่ มักประสบปัญหาในการกำจัดชีวมวลด้วยวิธีการเผา โดยเฉพาะซังข้าวโพด ซึ่งนอกจากจะเป็นการทำลายความอุดมสมบรูณ์ของดินแล้ว ยังเกิดปัญหาเรื่องหมอกควัน ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดที่เป็นแหล่งของเซลลูโลส ซึ่งสามารถย่อยสลายเป็นน้ำตาล แล้วนำไปใช้ในกระบวนการหมักได้ งานวิจัยนี้ได้หมักไบโอไฮโดรเจน

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** khim.nahatai@gmail.com **doi:** 10.14456/tstj.2019.44

จากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรเป็นเชื้อตั้งต้นในการหมักไบโอไฮโดรเจน ก่อนการหมักซังจะปรับสภาพของข้าวโพดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (5 %w/v) แล้วย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เพื่อให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการหมักไบโอไฮโดรเจน โดยหมักแบบแบตซ์ที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยผันแปรปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (5-40 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) ค่าความเป็นกรดด่าง (4-8) และระยะเวลาการหมัก (96-192 ชั่วโมง) ซึ่งได้จำนวน 20 การทดลอง ผลของงานวิจัยพบว่าสภาวะที่ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนสูงสุด คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น 22.2 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ระยะเวลาการหมัก 223±1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนเฉลี่ย 101.2 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ นอกจากนี้ยังทราบว่าการหมักที่สภาวะความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าความเป็นกรดที่สูงเกินไปจะส่งผลให้ไม่เกิดการผลิตไบโอไฮโดรเจนขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาวะที่ความเข้มข้นที่สูงจนเกินไป (ความเข้มข้นสารตั้งต้นมากกว่า 40 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) และสภาวะที่มีความเป็นกรดสูงจนเกินไป (pH น้อยกว่า 3)

คำสำคัญ : ซังข้าวโพด; ไบโอไฮโดรเจน; กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง; ความเข้มข้นสารตั้งต้น; ค่าความเป็นกรดด่าง; ระยะเวลาในการหมัก

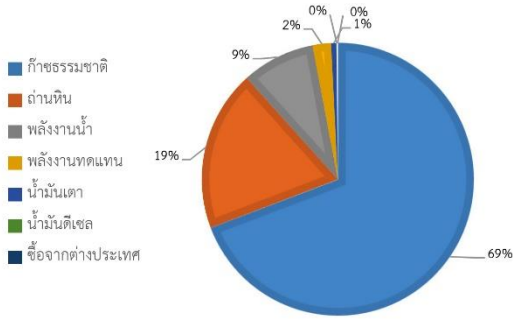
Abstract

The north of Thailand, especially Chiang Mai province, most likely the problem is eliminated biomass by burning method, especially corn cob. In addition to destroying the soil fertility. There is also a problem with air pollution. The aim of this research is to study the factors of bio-hydrogen production from corn cob, that the source of cellulose that can be hydrolyzed into sugar in the fermentation process. This work evaluated the bio-hydrogen production from corn cob by dark fermentation, using anaerobic seed obtained from the existing bio-gas plant as initial inoculum. Before fermentation the corncob was pretreated with Potassium hydroxide (5 %w/v) and then was hydrolyzed by cellulase enzymes to obtain reducing sugar. The released sugar is used as substrate to produce bio-hydrogen by dark fermentation, the process conducted in batch reactor, working volume 500 mL, fermentation temperature is 35 degree Celsius. Parameter variation includes substrate concentration (5-40 g-RS/L), the pH value (4-8) and Duration time (96-192 hours), which has 20 experiments. The result could be found that the conditions for maximum bio-hydrogen fermentation is the substrate concentration of 22.2 g-sugar/L, pH-value 6 and 233±1 hours, which can produce bio-hydrogen yield of 101.2 mL-H_2/g-RS. Also, this research was found the substrate concentration and too high acid value were not detecting the bio-hydrogen production. Because microorganisms unable to be live in high substrate concentrations (more than 40 g_{rs}/L) and very high acidic value conditions (less than 3).

Keywords: corncob; bio-hydrogen; dark fermentation process; substrate; pH value; duration time

1. บทนำ

การใช้พลังงานของประเทศไทยนั้น มีความต้องการพลังงานสูงมากขึ้น ทราบได้จากสถิติของการจัดหาปริมาณน้ำมันดิบ [1] ให้เพียงพอในแต่ละวันของช่วงปี พ.ศ. 2554-2557 การใช้พลังงานนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในเชิงสถิติ ทำให้สามารถประมาณการได้ว่าแนวโน้มการใช้พลังงานในประเทศนั้นอาจสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 นั้นมีการใช้เชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้า โดยสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงนั้นประกอบด้วยก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน พลังน้ำ พลังงานทดแทน น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล และซื้อต่างประเทศ [2] ซึ่งมีปริมาณสัดส่วนการใช้ดังแสดงในรูปที่ 1

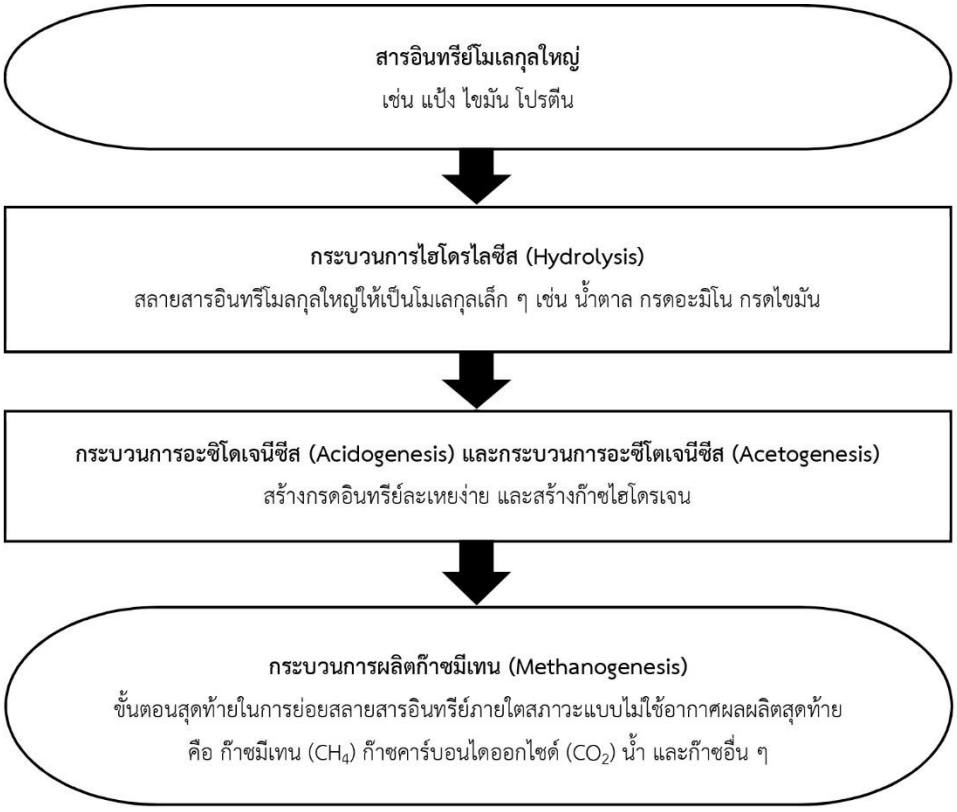


รูปที่ 1 สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558

จากข้อมูลข้างต้น ถ้าหากยังมีการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาจทำให้เกิดปัญหาวิกฤตพลังงานขึ้นได้ เนื่องจากพลังงานหลักที่ใช้กันในปัจจุบันนั้นส่วนใหญ่ คือ เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ด้วยสาเหตุนี้จึงเกิดการคิดค้นพลังงานทดแทนมาใช้ประโยชน์มากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล เป็นต้น พลังงานดังกล่าวถือเป็นพลังงานที่สะอาด ซึ่งทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้เห็นเล็งถึงความสำคัญของพลังงานทดแทน จึงสนับสนุนให้มีการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พืชพลังงานและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน จากงานวิจัยที่ผ่านมาทราบว่ามีการประเมินสถานะภาพและศักยภาพของเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศไทย พบว่าประเทศไทยมีแหล่งชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานก๊าซชีวภาพประมาณ 2,100 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และนำมาใช้ประโยชน์แล้ว 18 % ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 380 ล้านลูกบาศก์เมตร [3] จากงานวิจัยที่กล่าวมาทำให้พอทราบว่าก๊าซชีวภาพนั้นมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ในอนาคต

งานวิจัยนี้จึงได้นำซังข้าวโพด (corn cob) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่มีปริมาณมากในเขตภาคเหนือของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2557-2558 มีพื้นที่เพาะปลูกซังข้าวโพดประมาณ 7.29 ล้านไร่ ผลผลิตของข้าวโพดอยู่ที่ประมาณ 4.8 ล้านตัน [4] ด้วยปริมาณผลผลิตดังกล่าวทำให้มีการประมาณการปริมาณซังข้าวโพดเหลือทิ้งประมาณ 1,152,000 ตันต่อปี หากจัดการซังข้าวโพดโดยการเผา หรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง ก็จะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศในภาคเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีความสำคัญด้านการท่องเที่ยว อาจได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง และมีผลต่อสุขภาพโดยร่วมของประชากรด้วย โดยทั่วไปซังข้าวโพดจะมีค่าความร้อนประมาณ 9.62 เมกะจูลต่อกิโลกรัม คิดเป็นพลังงานเปรียบเทียบกับน้ำมันดิบเท่ากับ 27.64 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) หรือพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 64.67 จิกะวัตต์ชั่วโมง [5] ดังนั้นการนำซังข้าวโพดมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง จึงช่วยในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งในกระบวนการทางชีวภาพส่วนใหญ่ ไฮโดรเจนจะเกิดจาก

กระบวนการย่อยสลายน้ำตาลแบบไม่ใช้ออกซิเจน ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศอาศัยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 2 แผนผังแสดงการเกิดก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 2 แสดงขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ ในกระบวนการการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ (1) ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซีส (hydrolysis) เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นต้น ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะทำให้ได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น (2) ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจนีซีส (acidogenesis) และกระบวนการอะซีโตเจนีซิส (acetogenesis) เป็นกระบวนการหมักโดยย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลโครงสร้างขนาดเล็ก (monomer) ให้เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ หรือกรดละเหยง่าย (volatile fatty acid) โดยการเกิดกระบวนการนี้เกิดได้อย่างรวดเร็ว

ด้วยแบคทีเรียที่ทำปฏิกิริยานี้มีชื่อว่าอะซิโดเจนิกแบคทีเรีย และกระบวนต่อมาที่เกิดขึ้น คือ กระบวนการการอะซีโตเจนีซิส ซึ่งจะเปลี่ยนกรดละเหยง่ายให้เป็นกรดอะซิตริกหรือเกลืออะซิเตรท โดยแบคทีเรียอะซิโตเจนิกที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ ซึ่งจะมีก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เกิดขึ้นในปฏิกิริยา และ (3) ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (methanogenesis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนกรดอะซิตริกให้เป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะได้ก๊าซมีเทน (CH_4 50-70 %) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 30-40 %) และส่วนที่เหลือคือก๊าซอื่น ๆ ได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟต์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ

กระบวนการหมักนี้เกิดภายใต้การหมักแบบไม่ใช้แสงในการผลิตไบโอไฮโดรเจนโดยการนำซังข้าวโพดไปปรับสภาพแล้วเข้าสู่กระบวนการหมักโดยไม่ใช้แสง เมื่อใช้น้ำตาลกลูโคส 1 โมล เป็นสารตั้งต้น จะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุด 4 โมล แต่ในทางปฏิบัติการผลิตไฮโดรเจนสูงสุด 4 โมลต่อ 1 โมลกลูโคส ไม่สามารถเกิดได้จริง เนื่องจากกลูโคสจะถูกเปลี่ยนเป็นชีวมวลของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงนั้นแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม facultative anaerobic เช่น *Escherichia coli*, Enterobacter, Citrobacter และแบคทีเรียกลุ่ม strict anaerobic เช่น Clostridia และ Rumen bacteria โดยสามารถใช้จุลินทรีย์ในรูปสายพันธุ์เดี่ยวและกลุ่มจุลินทรีย์มาผลิตไฮโดรเจน ข้อดีของการใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์เดี่ยว คือ มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจน แต่ข้อจำกัด คือ จำเป็นที่จะต้องรักษาสภาวะปลอดเชื้อระหว่างการผลิต โดยแบคทีเรียพวก Clostridium และ Enterobacter นิยมนำมาใช้ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ส่วนของการใช้กลุ่มจุลินทรีย์ในการผลิตไบโอไฮโดรเจนนั้นไม่จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ ซึ่งสามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนในปริมาณที่สูง แต่ในกลุ่มจุลินทรีย์นั้นอาจมีจุลินทรีย์ผลิตมีเทนปะปนอยู่ ซึ่งทำให้นำไฮโดรเจนไปใช้ในการผลิตมีเทนได้ จึงต้องมีการกำจัดจุลินทรีย์พวกนี้ก่อนนำมาเป็นหัวเชื้อผลิตไฮโดรเจน [6] วิธีที่ทำให้การผลิตไบโอไฮโดรเจนเกิดได้ดีที่สุด คือ วิธีการหมักแบบไม่ใช้แสงในสภาวะที่ไม่ใช้อากาศ โดยไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ เมื่อสารอินทรีย์เป็นคาร์บอนและแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวสำหรับการเผาผลาญพลังงานกระบวนการนี้จึงเรียกว่ากระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง [7]

การวิจัยนี้ได้ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ในการวิเคราะห์ ซึ่งวิธี RSM เป็นการนำเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง โดยผลตอบสนองที่สนใจมีหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (response optimize) ของผลตอบสนอง ดังสมการ $Y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$ (สมการที่ 1) โดยกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ด้วยค่า x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง Y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ จะสามารถเขียนสมการพื้นผิวดังสมการ $\eta = f(x_1, x_2)$ (สมการที่ 2) เรียกว่าพื้นผิวตอบสนอง (response surface) ส่วนใหญ่มักแสดงพื้นผิวตอบสนองรูปกราฟ โดย η จะพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นจะใช้กราฟคอนทัวร์ร่วมกับกราฟพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งปัญหาของแบบจำลองนี้ไม่สามารถประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางหรือวิธีเซ็นทัลคอมโพสิท (central composite design, CCD) เพื่อช่วยในการหาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ CCD นี้

เป็นการทดลองที่ 5 ระดับ (-α, -1, 0, +1, +α) โดยมีการปรับเปลี่ยนปัจจัย 5 ระดับ แต่ไม่ปรับแบบครบทั้งหมดทุกการทดลอง จะเลือกปรับบางการทดลองหรือบางสภาวะที่จำเป็น เพื่อให้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดยสมการทางสถิติ (model) ที่ได้ยังคงมีผลกระทบหลัก (main effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เกิดขึ้น ส่วนการมีปฏิกิริยาต่อกัน (interaction) เป็นอิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน และการสร้างสมการกำลังสอง (quadratic term) โดยไม่ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรมากเกินความจำเป็น ในส่วนของการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Minitab ในการออกแบบ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการผลิตไบโอไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เพราะฉะนั้นจึงปรับสภาพจุลินทรีย์เพื่อกำจัดจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพ โดยการศึกษาการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง โดยใช้ปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (substrate; 5-40 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH-value; 4-8) และระยะเวลาในการหมัก (duration time; 96±1 ถึง 192±1 ชั่วโมง) เพราะทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญแก่การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักไบโอไฮโดรเจน โดยวิธีที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล คือ วิธี RSM การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี CCD ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพด เพื่อให้สามารถประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพด และเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคต และลดมลพิษทางอากาศอันเกิดจากการเผาทำลายซังข้าวโพดและชีวมวลของเกษตรกรในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

2. วิธีการวิจัย

2.1 การปรับสภาพซังข้าวโพดและจุลินทรีย์

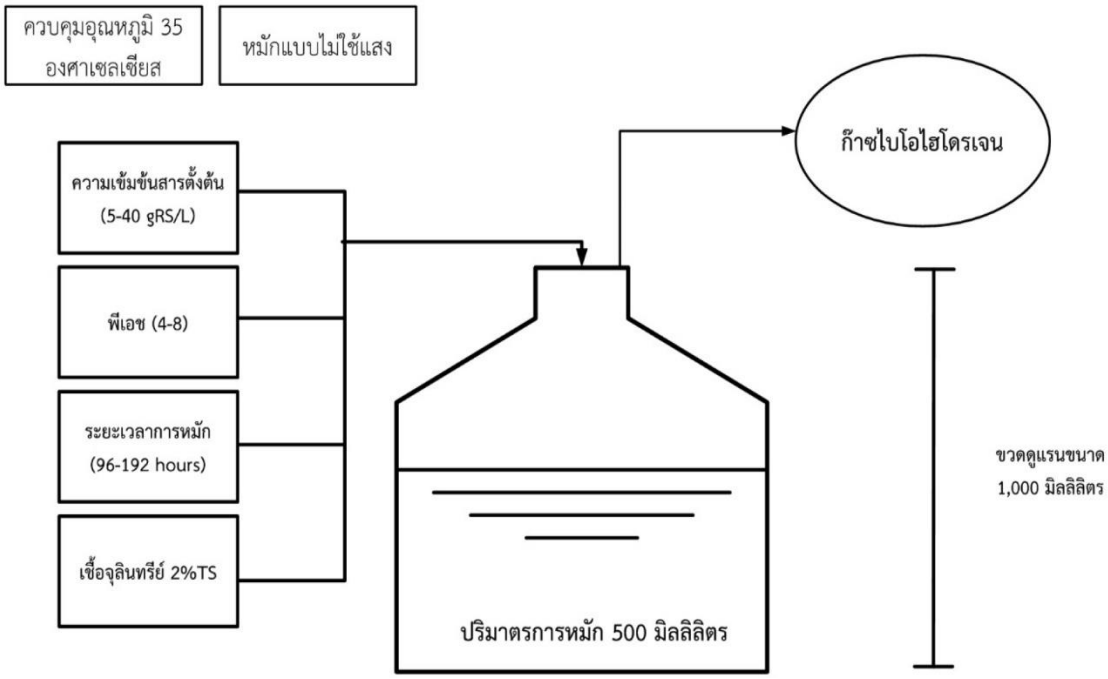
นำซังข้าวโพดที่ควบคุมความชื้นที่ 15 % จากหมู่บ้านสหกรณ์ 5 ตำบลแม่ออน อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ มาบดเพื่อลดขนาด (1 มิลลิเมตร) ด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง แล้วนำไปปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH 5 %w/v) ใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่ 1 : 10 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปล้างด้วยน้ำให้สะอาดจนค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเป็นกลาง (pH 7) แล้วนำไปอบให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซังข้าวโพดปรับสภาพด้วยด่างแล้วจะนำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ที่สภาวะของแข็งต่อของเหลว 1 : 10 ปริมาณเอนไซม์ 20 FPU ต่อกรัมสารตั้งต้น บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้ซิเตรทบัฟเฟอร์ (pH 4.8) ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยซังข้าวโพดด้วยวิธีวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้สาร dinitrosalicylic acid (DNS-method)

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักไบโอไฮโดรเจนนั้นใช้กลุ่มจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยนำมาจากฟาร์มสุกร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ การปรับสภาพจุลินทรีย์นั้นทำโดยวิธีการให้ความร้อน [8] ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนในระบบการหมักก๊าซไบโอไฮโดรเจน

2.2 การหมักไบโอไฮโดรเจน

การหมักไบโอไฮโดรเจนนั้น ทำได้ดังรูปที่ 3

โดยนำสารตั้งต้นที่ได้จากการปรับสภาพซังข้าวโพด คือ น้ำตาลรีดิวซิ่ง หมักในขวดดูแรน โดยใช้ปริมาตรการหมักที่ 500 มิลลิลิตร และเติมจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตไบโอไฮโดรเจน โดยใช้ที่ปริมาณ 2 %TS (total solid) [9] แล้วนำไปบ่มในสภาวะไร้อากาศ และไม่ใช้แสง โดยควบคุมอุณหภูมิในการหมัก 35 องศาเซลเซียส [7] ส่วนการวิเคราะห์ผลใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface method, RSM) และออกแบบการทดลองด้วยวิธีเซนทัลคอมโพสิต (central composite design, CCD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักไบโอไฮโดรเจน ใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ โดยปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นสารตั้งต้น (5-40 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) ค่าความเป็นกรดด่าง (4-8) และระยะเวลาการหมัก (96±1 ถึง 192±1 ชั่วโมง) โดยทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง มีการทดลองที่ factorial point 8 การทดลอง ซึ่งใช้ค่าความเข้มข้นที่ 5 และ 40 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 4 และ 8 ระยะเวลาในการหมัก 96±1 ถึง 192±1 ชั่วโมง (การทดลองที่ 1-8 ในตารางที่ 1) โดยทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลางที่ central point 4 การทดลอง ใช้ค่าความเข้มข้นที่ 22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 และระยะเวลาในการหมัก 144±1 ชั่วโมง (การทดลองที่ 9-12 ในตารางที่ 1) และมีการทดลองที่จุด axial point 8 การทดลอง ใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0, 22.5, 51.9 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 2.6, 6 และ 9.3 และระยะเวลาในการหมัก 63±1, 144±1 และ 223±1 ชั่วโมง (โดยในการทดลองที่ axial point นั้นมีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางอีก 2 การทดลอง) (การทดลองที่ 13- 20 ในตารางที่ 1) ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง และหมักไบโอไฮโดรเจนโดยการสุ่มลำดับการทดลองต่าง ๆ ตามสภาวะที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 3 ระบบการหมักก๊าซไบโอไฮโดรเจนด้วยถังปฏิกรณ์แบบแบตช์

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบ CCD

การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (กรัมน้ำตาลต่อลิตร)	ค่าความเป็นกรดด่าง	ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	ส่วนของการทดลอง
1	5.0	4.0	96±1	factorial point
2	40.0	4.0	96±1	
3	5.0	8.0	96±1	
4	40.0	8.0	96±1	
5	5.0	4.0	192±1	
6	40.0	4.0	192±1	
7	5.0	8.0	192±1	
8	40.0	8.0	192±1	
9	22.5	6.0	144±1	center point
10	22.5	6.0	144±1	
11	22.5	6.0	144±1	
12	22.5	6.0	144±1	
13	0.0	6.0	144±1	axial point
14	51.9	6.0	144±1	
15	22.5	2.6	144±1	
16	22.5	9.3	144±1	
17	22.5	6.0	63±1	
18	22.5	6.0	223±1	
19	22.5	6.0	144±1	
20	22.5	6.0	144±1	

2.3 วิธีการตรวจวัด

2.3.1 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเป็นกรดด่างของสภาวะต่าง ๆ ในการทดลอง ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง ยี่ห้อ S220 SevenCompact™ pH/Ion

2.3.2 อุปกรณ์สำหรับวัดความดันก๊าซชีวภาพ ใช้เครื่อง manometer ยี่ห้อ KIMO รุ่น MP112

2.3.3 อุปกรณ์สำหรับวัดองค์ประกอบก๊าซ ใช้เครื่องก๊าซโครมาโทรกราฟี (gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A ส่วนประกอบหลักของเครื่องก๊าซโครมาโทรกราฟี ได้แก่ ส่วนที่ใช้ในการฉีดเข้า (injection) อุณหภูมิที่ใช้ คือ 120 องศาเซลเซียส oven อุณหภูมิที่ใช้ คือ 150 องศาเซลเซียส คอลัมน์ของก๊าซโครมาโทรกราฟี ที่ใช้ในการแยกก๊าซใช้ 2 คอลัมน์ คือ Molecular sieves 5A 60/80 for the separation of H_2, O_2, N_2, CH_4 and CO และ HayeSep Q 80/100 in separation of CO_2 ส่วนของการตรวจวัดก๊าซถาวรที่ TDC อุณหภูมิที่ใช้ คือ 250 องศาเซลเซียส ก๊าซพา (carrier gas) คือ He (UHP

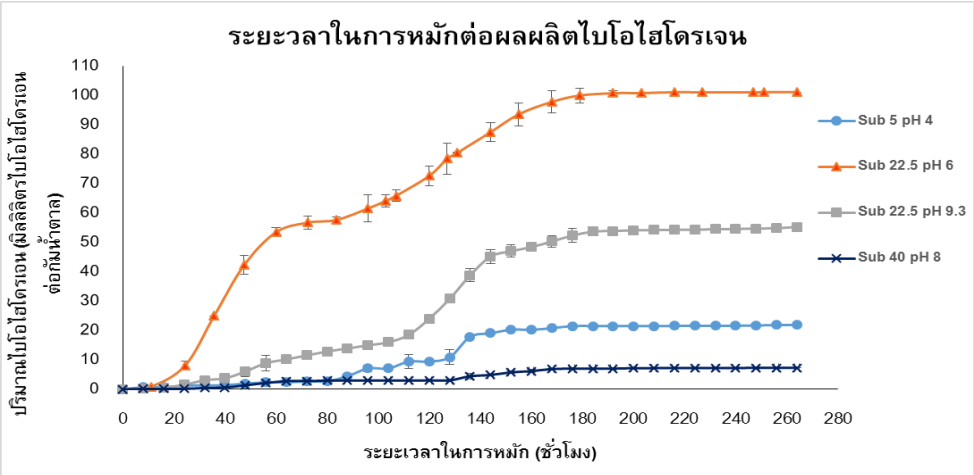
grade) อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

2.3.4 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ คือ เทอร์โมมิเตอร์

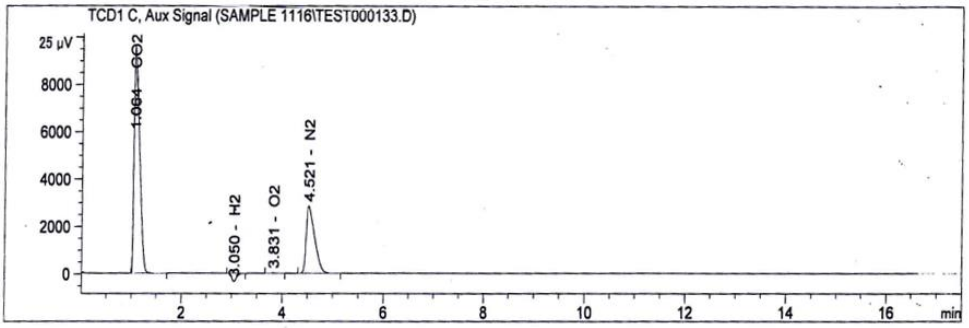
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลจากการทดลอง

การหาสภาวะที่เหมาะสมได้ใช้โปรแกรม Minitab ออกแบบและกำหนดลำดับการทดลองสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) และวิธีออกแบบเซ็นทัลคอมโพสิท (central composite design, CCD) ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ค่าความเป็นกรดด่าง และระยะเวลาในการหมัก โดยหมักไบโอไฮโดรเจนโดยการสุ่มลำดับการทดลองต่าง ๆ ตามสภาวะที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 1 และผลที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 2 โดยผลการหมักไบโอไฮโดรเจน ได้นำค่าของผลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ มาแสดงผลในรูปแบบของกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบผลผลิตไบโอไฮโดรเจนในแต่ละการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าสภาวะที่ผลิตไบโอไฮโดรเจนได้สูงสุด คือ สภาวะความเข้มข้นของสารตั้งต้น 22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ระยะเวลา ในการหมัก 223±1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนเฉลี่ย 101.2 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ รองลงมา คือ สภาวะความเข้มข้นของสารตั้งต้น 22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ระยะเวลาหมัก 144±1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 84.0 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ และความเข้มข้น 22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 9.3 ระยะเวลาการหมัก 144±1 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนเฉลี่ย คือ 51.2 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ ส่วนสภาวะความเข้มข้นสารตั้งต้น 5 ค่า ความเป็นกรดด่าง 8 ความเข้มข้นสารตั้งต้น 40 ค่าความเป็นกรดด่าง 8 ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0 ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ความเข้มข้นสารตั้งต้น 51.9 ค่าความเป็นกรดด่าง 6 และความเข้มข้นสารตั้งต้น 22.5 ค่าความเป็นกรดด่าง 2.6 นั้นไม่สามารถตรวจวัดปริมาณไบโอไฮโดรเจนได้ หลังจากนั้นก๊าซไบโอไฮโดนเจนที่ผลิตได้จะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography ซึ่งตัวอย่างการวิเคราะห์ก๊าซไบโอไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักไบโอไฮโดรเจนต่อปริมาณไบโอไฮโดรเจน



รูปที่ 5 ตัวอย่าง chromatogram ที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซไบโอไฮโดรเจน

ตารางที่ 2 ผลการหมักไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

การทดลองที่	ปัจจัย			ผลผลิตไบโอไฮโดรเจน (มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์)	ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนจากสมการ (มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (กรัมน้ำตาลต่อลิตร)	ค่าความเป็นกรดด่าง	ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)			
1	5.0	4.0	96±1	6.0	5.0	0.6
2	40.0	4.0	96±1	0.0	5.0	2.9
3	5.0	8.0	96±1	0.0	5.0	2.9
4	40.0	8.0	96±1	3.0	5.0	1.1
5	5.0	4.0	192±1	19.0	18.4	0.3
6	40.0	4.0	192±1	0.0	18.4	10.6
7	5.0	8.0	192±1	0.0	18.4	10.6
8	40.0	8.0	192±1	7.0	18.4	6.6
9	22.5	6.0	144±1	86.6	87.1	0.3
10	22.5	6.0	144±1	77.8	87.1	5.4
11	22.5	6.0	144±1	95.4	87.1	4.8
12	22.5	6.0	144±1	89.7	87.1	1.5
13	0.0	6.0	144±1	0.0	29.1	16.8
14	51.9	6.0	144±1	0.0	-12.1	7.9
15	22.5	2.6	144±1	0.0	-5.9	3.4
16	22.5	9.3	144±1	13.0	-4.6	10.2
17	22.5	6.0	63±1	54.2	54.2	0.0
18	22.5	6.0	223±1	101.2	77.5	13.7
19	22.5	6.0	144±1	83.1	87.1	2.3
20	22.5	6.0	144±1	70.4	87.1	9.6

3.2 ผลการสร้างสมการทำนายผลผลิตการหมักไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

นำผลที่ได้จากการทดลองในตางรางที่ 2 มาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการทำนายผลผลิตการหมักไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง โดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของผลผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดในตารางที่ 3 มาเขียนสมการได้สมการที่ 3 ดังนี้

$$H_2\text{yield} = 87.09 - 6.72\bullet\left(\frac{\text{time}-144}{48}\right) - 35.06\bullet\left(\frac{\text{Sub}-22.5}{17.5}\right)^2 - 32.76\bullet\left(\frac{\text{pH}-6}{2}\right)^2 - 7.59\bullet\left(\frac{\text{time}-144}{48}\right)^2$$

โดย Sub คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (กรัมน้ำตาลต่อลิตร); pH คือ ค่าแสดงความเป็นกรด-เบส; time คือ ระยะเวลาในการหมักไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพด (ชั่วโมง)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการหมักไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

Source	DF	SS	MS	F-value	P-Value	
model	9	62080.7	6897.9	40.97	0.000	significant
Sub	1	14.5	14.5	0.09	0.771	
pH	1	35.6	35.6	0.21	0.649	
time	1	2218.9	2218.9	13.18	0.001	significant
Sub^2	1	35456.1	35456.1	210.60	0.000	significant
pH^2	1	30960.4	30960.4	183.90	0.000	significant
$time^2$	1	1732.6	1732.6	10.29	0.003	significant
Sub*pH	1	158.1	158.1	0.94	0.340	
Sub*time	1	41.9	41.9	0.25	0.621	
pH*time	1	41.9	41.9	0.25	0.621	
Lack of fit	5	4282.9	856.6	27.89	0.000	
Pure error	25	767.8	30.7			
Total	39	617131.5				

R-sq 92.48 %; R-sq (adj) 90.22 %; R-sq (Pred) 84.73 %

จากตารางที่ 3 สมการมีความน่าเชื่อถือ (model; p = 0.000) โดยที่ค่าที่สามารถนำมาสร้างสมการกำลังสอง ได้แก่ ระยะเวลาในการหมัก (time; p = 0.001) ความเข้มข้นของสารตั้งต้นกำลังสอง (Sub^2; p = 0.000) ค่าความเป็นกรดด่างกำลังสอง (pH^2; p = 0.000) และระยะเวลาในการหมักกำลังสอง

($time^2$; p = 0.003) ที่ระดับค่าความเชื่อมั่น 95 % (p = 0.05) จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองสำหรับพื้นผิวตอบสนองกำลังสองดังสมการที่ 3 และได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ (R-Sq) มีค่า 92.48 % และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว [R-Sq (adj)] มีค่า 90.22 % ซึ่งจากผลการศึกษาของ Ruguo [10] สมการที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นที่นำไปใช้ได้ควรมีค่า R-Sq อย่างน้อย 75 % และหากค่า R-sq (adj) 64 % ซึ่งการวิจัยนี้มีค่า R-sq 92.48 % ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถนำไปขยายขนาดการทดลอง

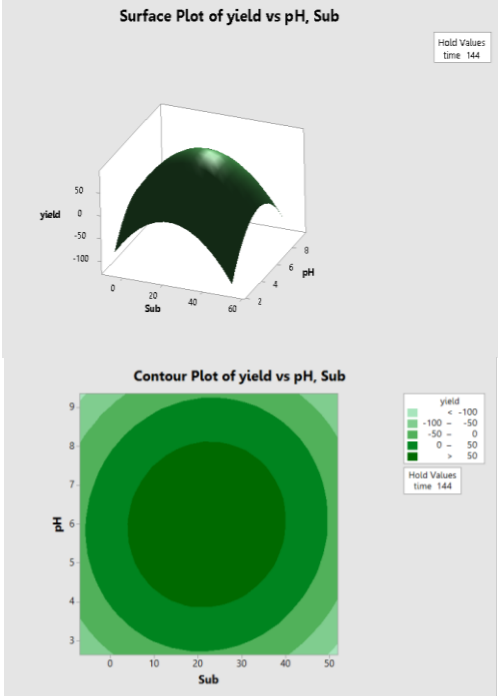
3.3 ผลการสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณผลผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

การออกแบบการทดสอบที่โปรแกรมได้ออกแบบไว้ เมื่อทดสอบจริงตามสภาวะการทดลองดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และสร้างรูปร่างของกราฟพื้นผิวตอบสนองโดยพล็อตกราฟคอนทัวร์ของพื้นผิวตอบสนอง [11] ซึ่งได้กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองและกราฟคอนทัวร์ของผลผลิตไบโอไฮโดรเจนต่อทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ค่าความเป็นกรดด่าง และระยะเวลาในการหมักไบโอไฮโดรเจนดังรูปที่ 6-8

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและค่าความเป็นกรดด่างในการผลิตไบไฮโดรเจน กำหนดระยะเวลาในการหมักที่ค่ากลาง (144±1 ชั่วโมง) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นประมาณ 20-25 กรัมน้ำตาลต่อลิตร และค่าความ

ก

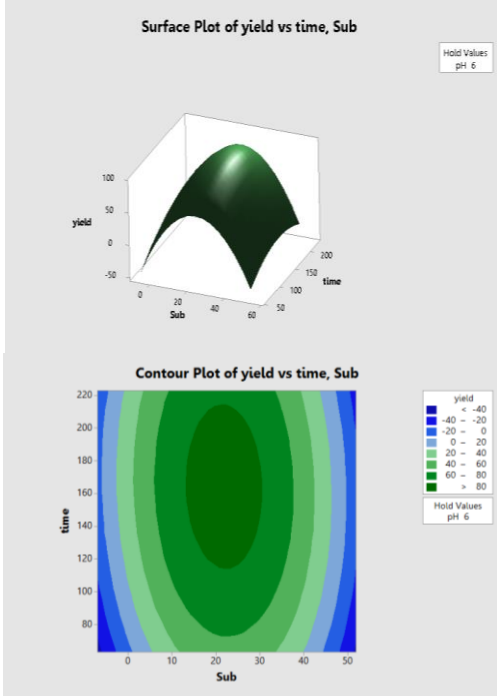
ข



รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและค่าความเป็นกรดด่างต่อการผลิตไบโอไฮโดรเจน

ค

ง



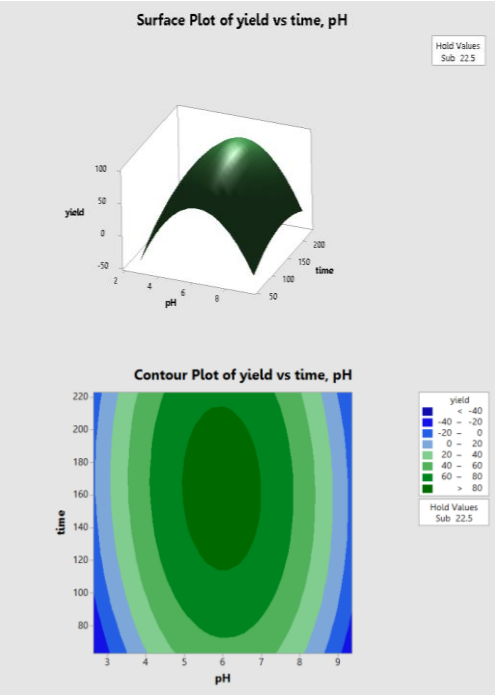
รูปที่ 7 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ค) และกราฟคอนทัวร์ (ง) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารตั้งต้น และระยะเวลาในการหมักต่อการผลิตไบโอไฮโดรเจน

เป็นกรดด่างประมาณ 5.5-6.5 ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตไบโอไฮโดรเจนสูงสุดประมาณ 50-60 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและระยะเวลาในการหมักไบโอไฮโดรเจน โดยกำหนดค่าความเป็นกรดด่างที่ค่ากลาง (pH 6) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นประมาณ 20-25 กรัมน้ำตาลต่อลิตร และระยะเวลาประมาณ 140±1 ถึง 180±1 ชั่วโมง คือ ช่วงที่สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนได้สูงสุด คือ ประมาณ 80 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ ขึ้นไป

จ

ฉ



รูปที่ 8 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (จ) และกราฟคอนทัวร์ (ฉ) แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการหมักและค่าความเป็นกรดด่างต่อการผลิตไบโอไฮโดรเจน

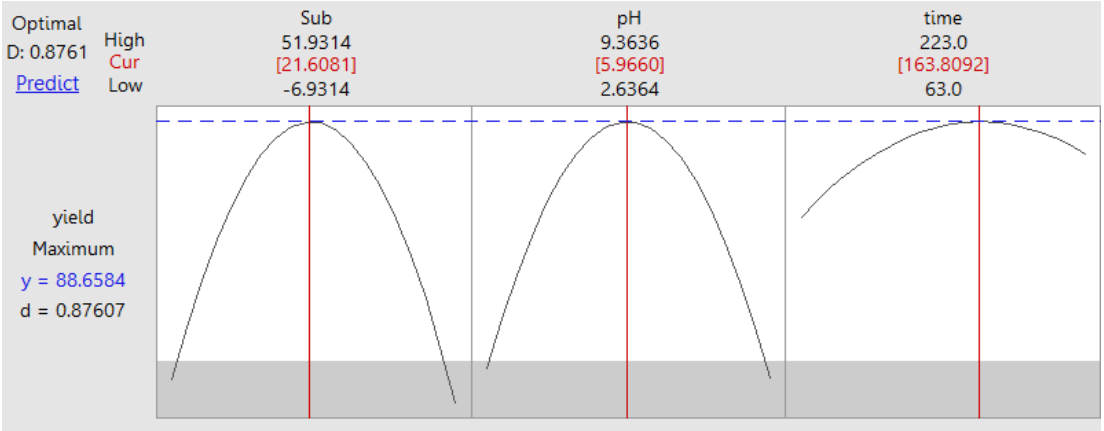
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดด่างและระยะเวลาในการหมักไบโอไฮโดรเจน โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ค่ากลาง (22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) พบว่าที่ค่าความเป็นกรดด่าง 6 และระยะเวลาประมาณ 140±1 ถึง 180±1 ชั่วโมง คือ ช่วงที่สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนได้สูงสุด คือ ประมาณ 80 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นไป

การอ่านค่าที่ได้จากกราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟคอนทัวร์ในรูปที่ 4-6 สามารถทราบได้ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่น้อยหรือมากเกินไป (น้อยกว่า 5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร และมากกว่า 40 กรัมน้ำตาลต่อลิตรขึ้นไป) ไม่สามารถได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนที่สูงที่สุด ส่วนค่าความเป็นกรดด่างที่ต่ำจนเกินไปหรือสูงจนเกินไป (น้อยกว่า 3 และมากกว่า 9) ก็ไม่สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจน ควรมีค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น (ความเข้มข้นสารตั้งต้นในช่วง 15-25 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) และค่าความเป็นกรดด่างที่เป็นค่ากลาง ๆ (pH 6-8) แต่ระยะเวลาในการหมักที่ยาวนานนั้นส่งผลต่อปริมาณผลผลิตไบโอไฮโดรเจนได้

3.4 ผลการทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

จากผลข้อที่ 3.3 ยังไม่สามารถทราบชัดเจนว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการหมักไบโอไฮโดรเจนเป็นสภาวะใด ดังนั้นจึงทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (response optimize) ในการหมักไบโอไฮโดรเจนเพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมากที่สุด ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทำนายในการหมักไบโอไฮโดรเจน คือ ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 22 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 และระยะเวลาในการหมัก 164±1 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลผลิตไบโอไฮโดรเจนที่ได้จากการทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดประมาณ 89 มิลลิลิตร

ไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (composite desirability, D) เท่ากับ 0.88 ดังแสดงในรูปที่ 9 ระดับความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [12]



รูปที่ 9 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

4. สรุปผลและวิจารณ์ผล

การทดลองพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นของสารตั้งต้น 22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ระยะเวลาการหมัก 223±1 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนได้สูงสุดโดยเฉลี่ย คือ 101.2 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ โดยปริมาณไบโอไฮโดรเจนที่ผลิตได้นั้นสามารถนำมาคิดเป็นค่าความร้อนได้ประมาณ 21 กิโลจูล มีค่าเทียบเท่าไฟฟ้า 0.0058 กิโลวัตต์ชั่วโมง รองลงมา คือ ที่สภาวะความเข้มข้นสารตั้งต้น 22.5 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ระยะเวลาหมัก 144±1 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนโดยเฉลี่ยประมาณ 84.0 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์ นำมาคิดเป็นค่าความร้อนได้ประมาณ 15.4 กิโลจูล เทียบเท่าไฟฟ้าประมาณ 0.0043 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมมีความสอดคล้องกับ Zhang [13] แล้วยังพบว่าสภาวะที่ใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากเกินไป (ความเข้มข้นสารตั้งต้นน้อยกว่า 4 กรัมน้ำตาลต่อลิตร และมากกว่า 40 กรัมน้ำตาลต่อลิตร) และค่าความเป็นกรดด่างที่สูงหรือต่ำจนเกินไป (pH น้อยกว่า 3 และมากกว่า 9) นั้นไม่สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจนได้ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแตกตัวของเซลล์จุลินทรีย์ที่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นที่มากเกินไป และหากมีปริมาณสารตั้งต้นที่น้อยเกินไปอาจไม่เพียงพอในการเป็นสารอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อการผลิตไบโอไฮโดรเจน ส่วนความเป็นกรด-ด่างหากมีค่ามากหรือน้อยเกินไป อาจทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถมีชีวิตและไม่สามารถผลิตไบโอไฮโดรเจน และจากทำนายการสภาวะที่เหมาะสม (พ response optimize) โดยวิธีทางสถิติพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นของสารตั้งต้น 22 กรัมน้ำตาลต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ระยะเวลาในการหมัก 164±1 ชั่วโมง สามารถทำนายผลผลิตไบโอไฮโดรเจน ได้ประมาณ 89 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมน้ำตาลรีดิวซ์

เมื่อพิจารณาในส่วนของผลผลิตไบโอไฮโดรเจน

ที่ผลิตได้จากการทดลองแล้ว พบว่าปริมาณไบโอไฮโดรเจนที่ได้มีความสอดคล้องกับ Honghui และคณะ [14] ที่ได้หมักไบโอไฮโดรเจนจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเทียบกับกระบวนการหมักแบบใช้แสง โดยการหมักแบบไม่ใช้แสงมีประสิทธิภาพการผลิตไบโอไฮโดรเจนที่ดีกว่าการหมักแบบใช้แสง และงานวิจัยของ Hawkes [15] ที่ผลิตไบโอไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพสามารถเกิดไบโอไฮโดรเจนได้ดังสมการที่ 4 คือ $C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$ เมื่อมีกรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์หลัก และเมื่อกรดบิวทีริกเป็นผลิตภัณฑ์หลักปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตามสมการที่ 5 คือ $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$ โดยทราบว่าการผลิตไบโอไฮโดรเจนสามารถทำได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ แต่ปริมาณไบโอไฮโดรเจนที่ผลิตได้จริงนั้นเกิดปริมาณไฮโดรเจนไม่เท่ากับในสมการที่ 4 และสมการที่ 5 เนื่องจากสารตั้งต้นบางส่วนนั้นจุลินทรีย์จะนำไปใช้เป็นพลังงานให้แก่ตัวจุลินทรีย์เอง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่เป็นผู้สนับสนุนทุนวิจัยนี้ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนสถานที่ในการวิจัยและรวมทั้งด้านอื่น ๆ และขอขอบคุณหมู่บ้านสหกรณ์ 5 ตำบลแม่ออน อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ที่สนับสนุนซังข้าวโพดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

6. รายการอ้างอิง

[1] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, สถานการณ์พลังงาน, แหล่งที่มา : http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/energy-status/year?orders[publishUp]=publishUp&issearch=1, 23 ตุลาคม 2560.

[2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2558, แหล่งที่มา : https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=579&Itemid=116, 15 พฤจิกายน 2560.

[3] ประทิน กุลละวณิชย์, นันทิยา เปปะตัง, อรอมล เหล่าปิตินันท์, อรรณพ นพรัตน์, ภาวิณี ชัยประเสริฐ และวรินธร สงคศิริ, 2550, ภาพรวมเชิงสถานภาพและศักยภาพของเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศไทย, ว.วิจัยและพัฒนา มจธ. 30: 693-700.

[4] สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2558, สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2559, เอกสารวิชาการ, สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 241 น.

[5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, ข้อมูลทั่วไป (ชีวมวล), แหล่งที่มา : http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html, 23 ตุลาคม 2560.

[6] ขนิษฐา หมู่โสภิญ, 2553, ไบโอไฮโดรเจนพลังงานทางเลือกใหม่, ว.ศูนย์บริการวิชาการ 3-4: 15-20.

[7] Lui, D., 2008, Bio-hydrogen Production by Dark Fermentation from Organics Waetes and Residues, Technical Information Center of Denmark, Denmark, 46 p.

[8] Zhang, K., Ren, N.Q. and Wang, A.J., 2014, Enhance biohydrogen production from corn stover hydrogen by pretreatment of

two typical seed sludges, Int. J. Hydrogen Energy 39: 14653-14662.

[9] VDI 4630, 2006, Fermentation of Organic Materials Characterization of the Substrate, Sampling, Collection of Material Dara, Fermentation Test, Germany, 91 p.

[10] Hu, R., 1999, Food Product Design: A Computer Aided Statistic Approach, CRC Press, USA, 240 p.

[11] สันติ พุ่มกระจ่าง, 2552, การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 102 น.

[12] ดาริกา อวะภาค, นพรัตน์ มะเห และดลฤดี พิชัยรัตน์, 2556, การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากสาหร่ายผมนางโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง, ว.วิทย. มข. 41(2): 414-430.

[13] Zhang, T., Liu, H. and Fang, H.H., 2003, Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic condition, J. Environ. Manage. 68: 149-156.

[14] Yang, H., Guo, L. and Liu, F., 2010, Enhance bio-hydrogen production from corncob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation, Biores. Technol. 101: 2049-2052.

[15] Hawkes, F.R., Dinsdale, R., Hawkes, D.L. and Hussy, I., 2002, Sustainable fermentative hydrogen production: Challenges for process optimization, Int. J. Hydrogen Energy 27: 1339-1347.