Research Article

Received: October 12, 2020; Accepted: February 5, 2021

ผลของการปรับสภาพทางชีวภาพต่อความสามารถในการย่อยสลายเริ่มต้นของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

Effect of Biological Pretreatment on Initial Decomposability for *Pennisetum purpureum* Pak Chong 1

เจษฎาปกรณ์ คนสอาด

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

พฤกษ์ อักกะรังสี*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Jedsadapagon Konsaard

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

Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai 50200

Pruk Aggarangsi*

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

Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เป็นวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบหลักในเซลล์ของพืช ปัจจุบันชีวมวลลิกโนมีความสำคัญมากเพราะเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับการผลิตพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซชีวภาพ เอทานอล ไฮโดรเจน เป็นต้น ดังนั้นการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสจึงมีความจำเป็นกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ผสมกับมูลวัว ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ (37 และ 55 °C) และอัตราการเติมอากาศ (0, 0.18 และ 0.36 L/min) ต่อประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้น โดยที่อุณหภูมิ 55 °C ส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลสมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 12.4 % และสัดส่วนลิกนินลดลง 15.60 % ให้ผลของ

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** pruk.a@cmu.ac.th

น้ำตาลเป็น 17.11 % ต่อมาศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 55 ºC และมีอัตราการเติมอากาศ 0.36 L/min มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุด เป็น 0.216 Nm^3CH_4/gVS_{added} โดยมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.90 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (0.112 Nm^3CH_4/gVS_{added})

คำสำคัญ : ลิกโนเซลลูโลส; เซลลูโลส; เฮมิเซลลูโลส; ลิกนิน; น้ำหนักที่สูญเสีย

Abstract

The research aims to study the effects of biomass lignocellulose as a material contained in nature. It is mainly composed of cellulose, hemicellulose, and lignin, an organic compound of carbohydrates that is the main component in plant cells. However, the physical structure and chemical composition of the lignocellulose material is complex and crystalline. Therefore, the normalization of lignocellulose materials is necessary for the biogas production process to increase biogas production efficiency. They were mixed with cow manure under temperature conditions (37 and 55 ºC) and filling air rate (0, 0.18 and 0.36 L/min) on the preliminary conditioning efficiency of Napier Pak Chong 1. According to the study, the temperature was the most important factor in the effectiveness of the preliminary conditioning, at 55 ºC, the adding rate of 0.36 L/min. The efficiency of the preliminary conditioning of Napier Pak Chong 1 grass temperature was an important factor for the efficiency of the primary conditioning. The temperature of 55 ºC resulted in the highest percentage of cellulose. The value increased by 12.4 %, and the proportion of lignin decreased by 15.6 %, yielding sugar to 17.11 %. The methane production potential of Napier Pak Chong 1 grass was later studied. It was found that in the experiment at 55 ºC and an aeration rate of 0.36 L/min, the highest potential of methane production was 0.216 Nm^3CH_4/gVS_{added}. This increased 1.9 times compared to the methane production potential of Napier Pak Chong 1 untreated (0.112 Nm^3CH_4/gVS_{added}).

Keywords: lignocellulose; cellulose; hemicellulose; lignin; lost weight

1. บทนำ

ปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวภาพมีบทบาทเพิ่มมากขึ้น ทั้งด้านการศึกษาการวิจัยและพัฒนา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและเพิ่มมูลค่าของผลผลิตจากการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานปิโตรเลียมที่มีอยู่อย่างจำกัดและมีแนวโน้มราคาที่สูงขึ้น กระทรวงพลังงานของประเทศไทยได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน โดยมีการผลักดันให้จัดตั้งโรงไฟฟ้าชุมชนเพื่อเศรษฐกิจฐานราก ซึ่งได้ให้ความสำคัญและสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากพืชพลังงาน [1] เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหญ้าและพื้นที่ทุ่งหญ้าสาธารณะสำหรับ

พืชอาหารสัตว์ประมาณ 3.4 ล้านไร่ [2] การสำรวจพบพืชตระกูลหญ้า 501 ชนิด แต่พบที่มีคุณประโยชน์ในด้านอาหารสัตว์เพียง 30 ชนิด ส่วนหญ้าพื้นเมืองแม้ว่าจะปรับสภาพได้ดี แต่มีข้อจำกัดในด้านผลผลิตที่ค่อนข้างต่ำ เพราะมีการแตกกอและสะสมไฟเบอร์เร็ว ทำให้คุณค่าของอาหารลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับหญ้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศเพื่อปลูกเป็นอาหารสัตว์โดยตรง [3] ปัจจุบันมีหญ้าที่กรมปศุสัตว์แนะนำให้เกษตรกรเพาะปลูกเพื่อใช้เป็นอาหารแก่ปศุสัตว์ ได้แก่ กินนีสีม่วง อะตราตัม แพงโกล่า โร้ด รูซี่ พลิแคทูลั่ม และหญ้าเนเปียร์ โดยเฉพาะหญ้าเนเปียร์จะให้ผลผลิตต่อไร่สูงสุด การนำหญ้าที่มีปริมาณสารอาหารสูงมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีข้อดีและข้อเสียหลายประการ ข้อดีหญ้าเนเปียร์เป็นพืชที่เจริญเติบโตง่าย ไม่ต้องการดูแลมาก อีกทั้งยังให้ผลผลิตสูง เก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลายครั้งต่อปี ส่วนข้อเสียของหญ้าเนเปียร์ คือ มีจำนวนสันใยมาก ลำต้นแข็ง ไม่ทนต่อสภาพน้ำขัง

การวิจัยที่ผ่านมาทำให้รู้ว่าหญ้าเนเปียร์มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และพบว่าสายพันธุ์ลูกผสมให้ผลผลิตต่อไร่สูง เช่น เนเปียร์ ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* cv. Pak Chong 1) [4] จึงจัดเป็นพืชพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพืชสายพันธุ์หนึ่งที่กรมปศุสัตว์ส่งเสริมและเป็นที่นิยมปลูกกันอย่างกว้างขวาง ให้ผลผลิต 3.0-4.0 ตันน้ำหนักแห้งต่อไร่ต่อปี ปลูกง่าย เจริญเติบโตเร็ว ปลูกได้ในหลายสภาพแวดล้อม และมีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง อีกทั้งยังอุดมไปด้วยสารประกอบคาร์บอน โดยการผลิตก๊าซชีวภาพที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ควรปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 เบื้องต้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต โดยวัสดุลิกโนเซลลูโลสเหมาะเป็นสารตั้งต้น เพราะง่ายต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ [4] โดยงานวิจัยของ Pham [5] ศึกษาการปรับสภาพต้นขาวโพดด้วยการใช้แบคทีเรีย *Bacillus* sp. ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 48 hr. สามารถย่อยสลายลิกนิน 18.6 % และงานวิจัยของ Kampha [6] ศึกษาการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยรา *A. retinae* 2 สภาวะ คือ ไม่มีการเติมอากาศ และเติมอากาศ 1 m^3/min พบว่าการปรับสภาพสามารถช่วยเพิ่มจำนวนเซลลูโลสขึ้นเป็น 13 % และลดสารประกอบลิกนินลง 13 %

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 มาผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าและใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกในอนาคต โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ด้วยการใช้มูลวัวในถังกวนแบบเติมอากาศ ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพ ผลกระทบของปริมาณอากาศในใช้ในการปรับสภาพ และการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับระบบการผลิตก๊าซมีเทนที่มีอยู่เดิม และเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมาเป็นพลังงานทดแทน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

2.1.1 หญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากจังหวัดลำพูน นำมาบดด้วยเครื่องบดหยาบ เพื่อลดขนาดให้มีขนาด 2-3 เซนติเมตร

2.2.2 มูลวัวสดได้มาจากฟาร์มวัวนมในจังหวัดเชียงใหม่

วิเคราะห์ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้ของชีวมวลทั้งสอง รวมทั้งวิเคราะห์ความชื้นและปริมาณเถ้าในตัวอย่างชีวมวลด้วยวิธีน้ำหนักสูญเสีย

2.2 การปรับสภาพเบื้องต้น

นำหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ผสมกับมูลวัวสด โดยควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid) เท่ากับร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักเปียก) ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 1) โดยมีการกวนผสมตลอดเวลา เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง การปรับสภาพเบื้องต้นจะศึกษาผลของอุณหภูมิ (37 และ 55 °C) และอัตราการเติมอากาศ (0, 0.18 และ 0.36 L/min) ต่อลักษณะสมบัติของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน น้ำตาล และลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ก่อนและหลังการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เบื้องต้น

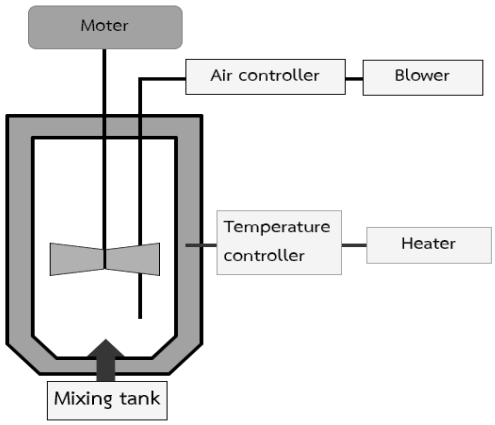

Figure 1 The reactor is used as aeration.

2.3 การวิเคราะห์ผลของการปรับสภาพเบื้องต้น

นำของเหลวที่กรองแยกได้ภายหลังการปรับสภาพเบื้องต้นและการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลมากรองผ่านตัวกรองขนาด 0.4 ไมโครเมตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาลด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatograph, HPLC) ขนาด 7.8 mm ยาว 300 mm วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NREL [6] สำหรับชนิดตัวพาที่ใช้ คือ กรดซัลฟิวริก 0.005 mol/L ตัวตรวจจับสัญญาณเป็น refractive index detector และ UV detector สำหรับการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาลและตัวยับยั้งตามลำดับ ของแข็งที่ได้ภายหลังการปรับสภาพนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยได้ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินด้วยวิธีที่ประยุกต์จากวิธีของ van Soest อีกส่วนหนึ่งจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของชีวมวลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลของร้อยละการสูญเสียของน้ำหนัก โดยคำนวณได้จากสมการดังนี้

weight loss (%) = (weight of missing element ÷ element weight initial biomass) x 100 (1)

total glucose (%) = (weight of glucose in fluid ÷ weight of dry biomass) x 100 (2)

2.4 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (biochemical methane potential, BMP) ด้วยวิธีการประยุกต์ VDI [Verein Deutscher Ingenieure (German Standard Method, VDI 4630, Batch Test)] [7] กำหนดค่าอัตราส่วนของวัตถุดิบตั้งต้นต่อปริมาณจุลินทรีย์ (F/M) เป็น 0.5 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหย) ที่ปริมาตรการหมัก 400 mL และกำหนดให้ในขวดหมักมีเชื้อตั้งต้นร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของของแข็งระเหย พร้อมทั้งทดลองชุดควบคุม (ทดลองเฉพาะเชื้อตั้งต้น) ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 37 °C บันทึกปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพทุกวันจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองหรือไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างในพารา

มิเตอร์ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยทั้งหมด (VS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่ากรดไขมันระเหย (VFA)

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะสมบัติของวัตถุดิบ

ลักษณะสมบัติของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (คิดเป็นร้อยละ 36.72 โดยน้ำหนักแห้ง) รองลงมา คือ เฮมิเซลลูโลส (คิดเป็นร้อยละ 26.02 โดยน้ำหนักแห้ง) ลิกนิน และเถ้า (คิดเป็นร้อยละ 12 และ 17 ตามลำดับ) มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kampha [6] ที่ศึกษาการหมักหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 กับของเสียจากฟาร์มสุกร โดยมีเซลลูโลสร้อยละ 38.2 โดยน้ำหนักแห้ง สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของมูลวัวพบว่ามีความแตกต่างจากหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 โดยองค์ประกอบหลักในมูลวัวเป็นพวกลิกนินถึงร้อยละ 62.29 โดยน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 1) และยังแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลผสมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 (โดยน้ำหนักแห้ง) พบว่าค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณร้อยละเฉลี่ยของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 และมูลวัว

3.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการเติมอากาศต่อการปรับสภาพเบื้องต้น

รูปที่ 2 แสดงร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวลภายหลังผ่านการปรับสภาพ อุณหภูมิมีผลต่อการปรับสภาพเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 มากกว่าอัตราการเติมอากาศ เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการปรับสภาพมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้น้ำหนักที่สูญเสียของแต่ละองค์ประกอบ โดยพิจารณาถึงร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของลิกนิน พบว่าการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 55 ºC และเติมอากาศที่ 0.36 L/min น้ำหนักของลิกนินที่สูญเสียมีค่าสูงถึงร้อยละ 15.66 มีการย่อยสลายมากกว่าที่อุณหภูมิ 37 ºC และเติมอากาศที่ 0.36 L/min น้ำหนักของลิกนินที่สูญเสียมีค่าสูงถึงร้อยละ 15.66 แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 55 ºC ในการเติมอากาศ 0 และ 0.18 L/min น้ำหนักของลิกนินที่สูญเสียมีค่าร้อยละ 7.32 และ 8.25 ตามลำดับ ซึ่งผลของการเติมอากาศมีผลต่อการปรับสภาพน้อยกว่า เนื่องจากอุณหภูมิการปรับสภาพเป็นอุณหภูมิสูงทำให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในชีวมวลเกิดการสลายตัวและเริ่มเกิดดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization) จนกระทั่งเกิดการสลายตัวผสมในน้ำ [8] และน้ำหนักที่สูญเสียของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พบว่าร้อยละ

Table 1 Properties of Napier grass Pak Chong 1 and cow dung

Parameters	Napier grass (NP)	Cow dung (CD)	NP + CD
Total solids (mg/L)	144,414	477,017	99,625
Volatile solids (mg/L)	112,329	316,807	89,087
Cellulose (% air dry basic)	36.72	n/a	27.05
Hemicellulose (% air dry basic)	26.02	21.50	21.52
Lignin (% air dry basic)	3.21	62.29	20.94
Ashes (% air dry basic)	11.22	21.07	14.8
Other (% air dry basic)	7.93	58.45	43.74

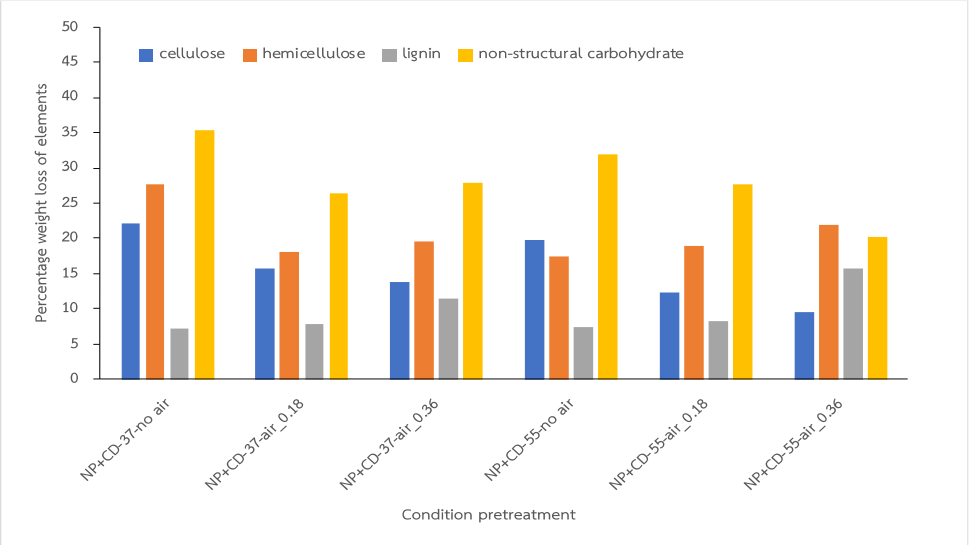

Figure 2 Percentages of weight loss of components in the mixture during pretreatment for 72 hours

ของน้ำหนักที่สูญเสียขององค์ประกอบทั้งสองยังมีค่าไม่สูง การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 5 °C ซึ่งการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปมากดังนี้ เฮมิเซลลูโลส < เซลลูโลส < ลิกนิน [9] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้ชีวมวลผสมระหว่างหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 และมูลวัว ต่างจากงานวิจัยอื่นที่ใช้หญ้าเปียร์อย่างเดียว เนื่องจากโครงสร้างของแป้งในหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 มีการจับตัวกันอย่างไม่มีรูปแบบ และโมเลกุลเกาะกันแบบหลวม ๆ รูปที่ 2 เห็นว่าร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เส้นใยในชีวมวลมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 20.24 ณ การปรับสภาพที่อุณหภูมิ 55 °C และอัตราการเติมอากาศที่ 0.36 L/min

การวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในวัตถุผสมหลังการปรับสภาพเพื่อศึกษาการเปลี่ยนของการปรับสภาพในสภาวะต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3 โดยเปรียบเทียบร้อยละของเซลลูโลสในวัตถุผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ก่อนการปรับสภาพมีค่าเซลลูโลสมีค่าร้อยละ 54.53 พบว่าหลังการปรับสภาพเบื้องต้นทำให้ร้อยละของเซลลูโลสในวัตถุผสมลดลง มีค่า 37.12-43.81 % air dry basic โดยการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 55 °C การเติมอากาศ 0.36 L/min มีปริมาณเซลลูโลสที่เหลืออยู่ 43.81 % air dry basic ส่วนการการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 37 °C การเติมอากาศ 0.36 L/min ปริมารปริมาณเซลลูโลสที่เหลืออยู่ 39.82 % air dry basic ซึ่งการที่ชีวมวลหลังการปรับสภาพเบื้องต้นมีสัดส่วนของเซลลูโลสลดลงเนื่องจากผลของการกำจัดลิกนินในชีวมวลตั้งต้นออกมาอยู่ในส่วนของของเหลว และความสามารถในการสลายตัวขององค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการเติมอากาศของการปรับสภาพเบื้องต้น ดังนั้นร้อยละของเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในชีวมวลภายหลังการปรับสภาพจึงมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิและอัตราการเติมอากาศ ซึ่งการปรับสภาพวัสดุผสมด้วยภาวะที่ให้อุณหภูมิการปรับสภาพ คือ 55 °C และอัตราการเติมอากาศ 0.36 L/min ร้อยละของเซลลูโลสในชีวมวลมีค่า 43.81 โดยมีค่าน้อยกว่าชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นประมาณร้อยละ 10.72 การปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะอื่นร้อยละของเซลลูโลสในชีวมวลมีค่า 12.7-15.39

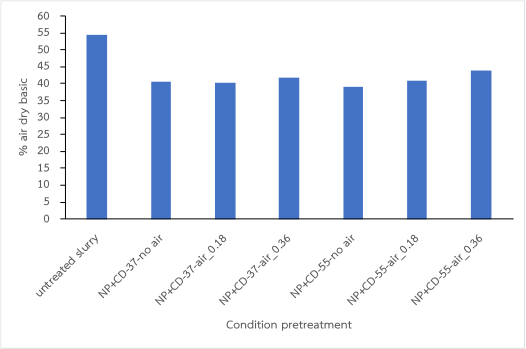

Figure 3 Percentages of cellulose in biomass after preliminary pretreatment at different conditions

3.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายให้น้ำตาล

การปรับสภาพจะเกิดการย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และคาร์โบไฮเดรตในหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ให้เป็นน้ำตาล รูปที่ 4 แสดงร้อยละผลของน้ำตาลทั้งหมด พบว่าชีวมวลที่นำมาเปลี่ยนเป็นน้ำตาลโดยไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นให้ประสิทธิภาพการย่อยต่ำ เพราะความซับซ้อนและแข็งแรงขององค์ประกอบของชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเซลลูโลสถูกปกคลุมด้วยเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน นอกจากนี้การเปลี่ยนหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพนั้น จะให้น้ำตาลมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเปลี่ยนชีวมวลผสมระหว่างหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และมูลวัวสดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นน้ำตาลเป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุผสมที่ผสมหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 กับมูลวัวสด และมีการกวนผสมกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำมีจุลินทรีย์จำพวก *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Rhizobium* sp. และ *Clostridium* sp. ที่อยู่ในมูลวัวนั้นให้โครงสร้างของชีวมวลอ่อนตัวลงระดับหนึ่ง [10] และส่งผลให้การย่อยได้ดีขึ้น สำหรับการเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลของชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วค่าร้อยละผลของน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการปรับสภาพที่ โดยการปรับสภาพอุณหภูมิ 55 °C และอัตราการเติมอากาศ 0.36 L/min ร้อยละผลได้ของน้ำตาลทั้งหมดมีค่า 24.34 ซึ่งมาจากความสามารถในการสลายตัวออกมาของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินแปรผันตรงกับการปรับสภาพการ การกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในชีวมวลทำให้ความสามารถในการเข้าถึงของเอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลมากขึ้น นอกจากนี้การสลายตัวออกมาของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินยังส่งผลให้เกิดรูพรุนที่พื้นผิวของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลดีต่อการเข้าถึงของเอนไซม์เซลลูเลส [11] สามารถเห็นได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของชีวมวลภายหลังการปรับสภาพที่ภาวะต่าง ๆ รูปที่ 5a จะเห็นว่าหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีลักษณะพื้นผิวเรียบ เส้นใยยึดกันอย่างหนาแน่น แต่เมื่อปรับสภาพเส้นใยในหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 จะถูกทำลายให้แตกและเกิดรูพรุนบริเวณพื้นผิวช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 รูปที่ 5b ขั้นตอนการเตรียมวัตถุผสมขณะที่กวนผสมได้เกิดการย่อยสลายในระดับหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการปรับสภาพในรูป 5c และ 5e โดยการปรับสภาพที่ 55 °C มีการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสได้มากกว่าที่การปรับสภาพที่ 37 °C และเมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมอากาศการปรับสภาพในรูป 5d และ 5e แสดงให้เห็นปัจจัยในการย่อยสลายของการเติมอากาศมีผลกระทบต่อการย่อยสลายลิโนเซลลูโลสน้อยกว่าผลของอุณหภูมิ ซึ่งการย่อยสลายทั้งสองปัจจัยส่งผลดีต่อการย่อยของเอนไซม์เซลลูเลส อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละผลที่ได้ของน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเพียง 1 ใน 3 เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละผลได้ของน้ำตาลทั้งหมด ตามทฤษฎีมีค่า 58.02 เนื่องจากภาวะการปรับสภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องไม่สามารถทำให้เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

ที่มีอยู่ในหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 สลายตัวอย่างสมบูรณ์

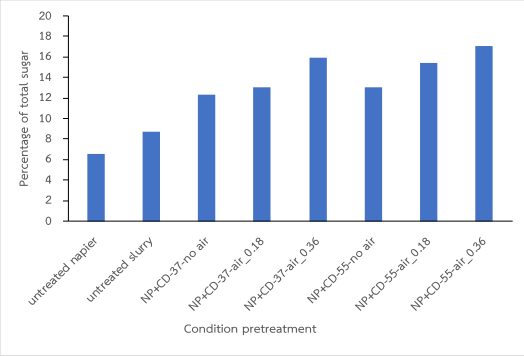

Figure 4 Percentages of total sugar in liquid at different conditions

3.4 การทดสอบหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยมูลวัว

เมื่อศึกษาผลของการปรับสภาพแล้วจึงนำตัวอย่างของแต่ละการทดลองมาศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน โดยศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนใช้เวลาทั้งหมด 30 วัน พบว่าการทดลองที่ได้ผลของก๊าซมีเทนสะสมมากที่สุด คือ หญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยมูลวัวที่อุณหภูมิ 55 °C อัตราการเติมอากาศที่ 0.36 L/min ผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.216 Nm^3CH_4/gVS_{added} และมีองค์ประกอบของมีเทนร้อยละ 57.8 โดยใช้ระยะเวลาการหมักย่อยทั้งหมด 26 วัน รองลงมา คือ การปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 37 °C อัตราการเติมอากาศที่ 0.36 L/min สามารถผลิตก๊าซมีเทน 0.192 Nm^3CH_4/gVS_{added} มีองค์ประกอบของมีเทนร้อยละ 55.6 และการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 55 °C อัตราการเติมอากาศที่ 0.18 L/min สามารถผลิตก๊าซมีเทนเป็น 0.190 Nm^3CH_4/gVS_{added} มีองค์ประกอบของมีเทนร้อยละ 54.2 โดยใช้ระยะเวลาการหมักย่อยทั้งหมด 25 วัน เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 สภาวะนี้ มีค่าการผลิตก๊าซมีเทนใกล้เคียงกัน โดยที่ค่า α เป็น 0.05 ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าอุณหภูมิการปรับสภาพ 55 °C เหมาะสมกว่าที่อุณหภูมิ 37 °C การปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ก่อนการผลิตก๊าซมีเทนเห็นได้ดังรูปที่ 6 แสดงปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสมของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1

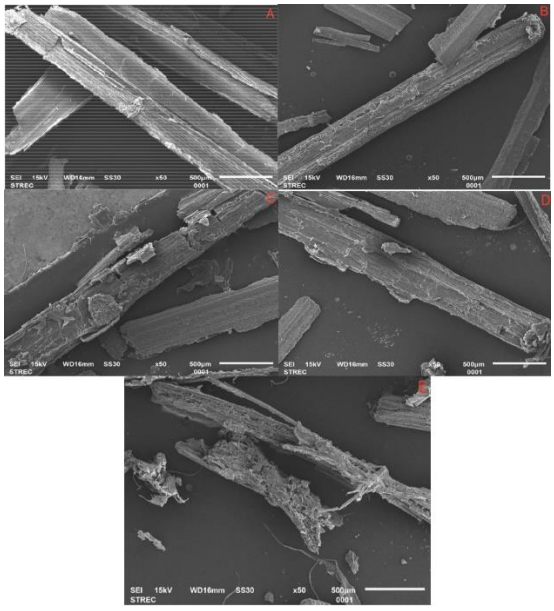

Figure 5 The surface structures of the untreated and post-treated pear grass extends 50x (a) untreated Napier grass, (b) untreated composite, (c) mixed pretreated at 37 °C, aerated at 0.36 L/min, (d) pretreated at 55 °C, aerated at 0.18 L/min, (e) pretreated at 55 °C, aerated at 0.36 L/min

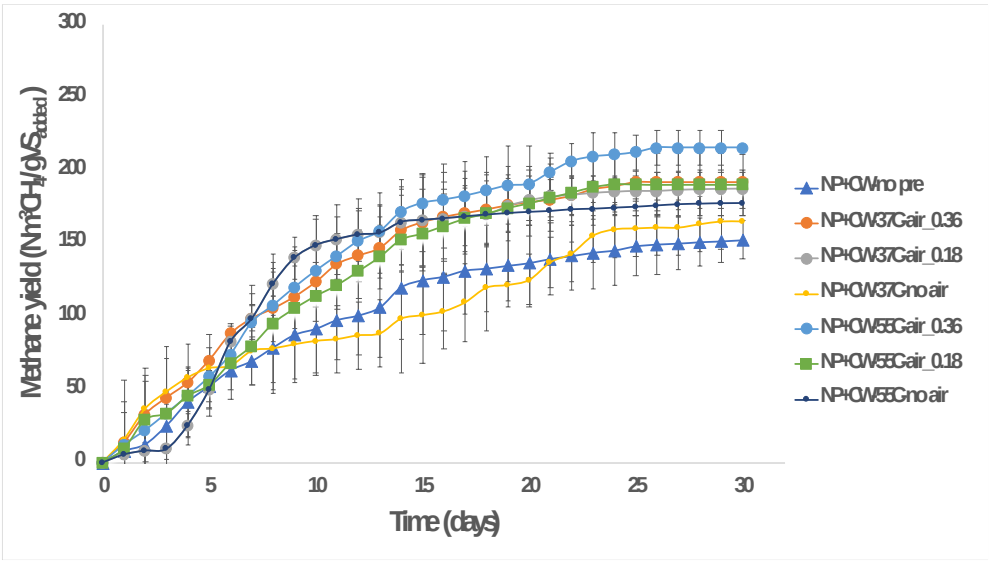

Figure 6 Accumulated methane content of Napier Pak Chong 1 grass in different conditions

Table 2 The amount of methane volume

Types	Accumulated methane content (Nm^3CH_4/gVS_{added})	Composition of methane (% CH_4)
Napier grass [9]	0.158	52.7
Napier grass Pak Chong 1 [10]	0.229	50.4
Napier grass Pak Chong 1 (this study)	0.112	52.5
Napier grass Pak Chong 1 that has been treated as a non-aeration. (this study)	0.177	55.2
Napier grass Pak Chong 1 pretreated with aerated cow dung (this study)	0.216	57.8

ส่วนการทดลองการปรับสภาพแบบไม่เติมอากาศของการทดลองทั้ง 2 สภาวะ ให้ผลของปริมาณก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 55°C เป็น 0.177 Nm^3CH_4/gVS_{added} และที่อุณหภูมิ 37°C เป็น 0.165 Nm^3CH_4/gVS_{added} ซึ่งที่สภาวะอุณหภูมิที่ 55°C ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองที่ไม่ผ่านปรับสภาพที่ให้ผลของปริมาณก๊าซมีเทนเป็น 0.153 Nm^3CH_4/gVS_{added} แต่ผลขององค์ประกอบก๊าซมีเทนเป็น 55.2 และ52.7% และใช้ระยะเวลาการหมักย่อยทั้งหมดเป็น 28 และ 30 วัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์กับงานวิจัยอื่นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันตาม ตารางที่ 2 โดยมีการเปรียบเทียบโดยใช้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และเนเปียร์ปากช่อง 1ที่ผ่านการปรับสภาพ มาเปรียบเทียบกัน

4. สรุป

การศึกษาของการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 พบว่าที่อุณหภูมิ 55 ºC ให้อัตราการเติมอากาศเป็น 0.36 L/min ให้ผลของการปรับสภาพดีที่สุด โดยมีการย่อยสลายลิกนินร้อยละ 15.66 และมีปริมาณเซลลูโลสที่เหลืออยู่ 43.81 % air dry basic เหลือปริมาณของเซลลูโลสมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 37 ºC อัตราการเติมอากาศเป็น 0.36 L/min และอุณหภูมิ 55 ºC อัตราการเติมอากาศเป็น 0.18 L/min เหลือสารประกอบเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 39.82 และ 40.36 ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละของน้ำตาลทั้งหมดในการทดอลงการปรับสภาพที่ดีที่สุดสูงกว่าหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพประมาณ 2.6 ขณะที่ตัวยับยั้งที่เกิดขึ้นในของเหลวภายหลังการปรับสภาพมีปริมาณที่ต่ำ เนื่องจากน้ำตาลละลายอยู่ในของเหลวหลังจากการปรับสภาพไม่อยู่ในรูปโมเลกุลเดี่ยว แต่ยังคงรูปสายเป็นโซ่พอลิเมอร์ของน้ำตาล หลังจากการปรับสภาพแล้วนำมาผลิตเป็นก๊าซมีเทน การทดลองที่อุณหภูมิ 37 และ 55 ºC อัตราการเติมอากาศเป็น 0.36 L/min ให้ปริมาณก๊าซมีเทน 0.192 และ 0.216 Nm^3CH_4/gVS_{added} องค์ประกอบของมีเทนร้อยละ 55.6 และ 57.8 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิ 55 ºC ให้อัตราการเติมอากาศเป็น 0.18 และ 0.36 L/min ผลของปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ในการทดลองที่เติมอากาศในการปรับสภาพมากกว่าให้ปริมาณก๊าซมีเทนมากกว่า โดยการทดลองที่อุณหภูมิ 55 ºC อัตราการเติมอากาศเป็น 0.18 L/min ให้ปริมาณก๊าซมีเทน 0.190 Nm^3CH_4/gVS_{added} มีองค์ประกอบของมีเทนร้อยละ 54.2 ส่งผลทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกลุ่มเมทาโนเจนให้เป็นก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพมากกว่าที่อุณหภูมิ 55 ºC และการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ก่อนนำมาผลิตก๊าซมีเทนสามารถเพิ่มปริมาณของก๊าซมีเทนถึง 1.9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์ ปากช่อง 1 ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (0.112 Nm^3CH_4/gVS_{added})

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนวิจัยภายในจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

6. References

[1] Nanakorn, W., 2001, Species Enumeration of Thai Gramineae, Queen Sirikit Botanic Garden, Chiang Mai, 125 p. (in Thai)

[2] Pawarit, P, 2012, Guidelines for the Production of Biogas for Thailand, Water Quality Management Bureau, Pollution Control Department, Bangkok. (in Thai)

[3] Agus, H., Udin, H., Chandra, A. and Iskandar, Z., 2018, Biogas production from anaerobic codigestion of cow dung and elephant grass (*Pennisetum purpureum*) using batch digester, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 141(1): 012011

[4] Goering, H.K. and van Soest, P.J., 1970, Forage Fiber Analyses (Apparatus, Reagents, Procedures, and Some Applications) Agric, Handbook No. 379, ARS-USDA, Washington, DC.

[5] Pham, C.H. and Triolo, J.M., 2013, Validation and recommendation of methods to measure biogas production

potential of animal manure, Asian Aust. J. Anim. Sci. 26: 864-873.

[6] Kampha, N., Chuenbal, T., Chuenban, S. and Srikalyanukul, M., 2016, A study of the optimum ratio of pig farm wastes and Napier grass silage in production process biogas, pp. 447-458, 2nd National Academic Conference on Industrial Technology and Engineering, Ubon Ratchathani Rajabhat University, Ubon Ratchathani. (in Thai)

[7] Rekha, B.N. and Aniruddha, B.P., 2013, Performance enhancement of batch anaerobic digestion of Napier grass by alkali pre-treatment, Int. J. ChemTech Res. 5: 558-564.

[8] Wilawan, W., Pholchan, P. and Aggarangsi, P., 2014, Biogas production from co-digestion of *Pennisetum pururem* cv. Pakchong 1 grass and layer chicken manure using completely stirred tank, Energy Proc. 52: 216-222.

[9] Weil, J., Brewer, M., Hendrickson, R., Sarikaya, A. and Ladisch, M., 1998, Continuous pH monitoring during pretreatment of yellow poplar wood sawdust by pressure cooking in water, Appl. Biochem. Biotechnol. 68: 21-40.

[10] Sanchez, G., Pilcher, L., Roslander, C., Modig, T., Galbe, M. and Liden, G., 2004, Dilute-acid hydrolysis for fermentation of the Bolivian straw material Paja Brava, Biores. Technol. 93: 249-256.

[11] Mosier, N., Ho, N., Hendrickson, R., Sedlak, M. and Ladisch, M.R., 2005, Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover, Biores. Technol. 96: 1986-1993.

[12] Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M. and Ladisch, M., 2005, Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass, Biores. Technol. 96: 673-686.