

การผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงจากหญ้าเนเปียร์ที่มีการปรับสภาพ

ธีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย¹ ชัยภพ ศิระวรกุล¹ ชนิกันต์ ทองปาน² น้ำทิพย์ วันดี² พิรวัส สุยะทา²
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110
และ ภัทรมาศ เทียมเงิน^{3*}
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

* Corresponding Author: phattharamat.t@rmutsb.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 4 เมษายน 2565

แก้ไข : 14 กุมภาพันธ์ 2566

ตอบรับ : 3 มีนาคม 2566

DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.4

คำสำคัญ : เอทานอล / หญ้าเนเปียร์ / แแซคคาโรมายซิส ชิริวิลีอี / ครูดเอนไซม์ / โมเลกุลาร์ซีฟ

งานวิจัยนี้ใช้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum x Pennisetum americanum*) เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล โดยใช้เชื้อรา *Trichoderma reesei* TISTR3080 และเอนไซม์เซลลูเลส ในการไฮโดรไลซิส และใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR5606 สำหรับการหมัก จากนั้นแยกเอทานอลออกจากน้ำหมักด้วยกระบวนการกลั่นแบบสุญญากาศที่ความดัน -80 kPa และใช้กระบวนการดูดซับน้ำเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้สูงที่สุด ทั้งนี้ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของยีสต์ *S. cerevisiae* (2, 4, 6, และ 8 โคลินี่) ต่อเชื้อรา *T. reesei* 1 เพลท และเอนไซม์เซลลูเลส 1.50 มิลลิลิตรต่อกรัมหญ้า พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* 4 โคลินี่ต่อเชื้อรา *T. reesei* 1 เพลท ได้ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 12.34 โดยปริมาตร กระบวนการกลั่นแบบสุญญากาศสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้เป็นร้อยละ 95.06 โดยปริมาตร ในส่วนของกระบวนการดูดซับน้ำโดยใช้ โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A ที่บรรจุในคอลัมน์จำนวน 190 กรัม อุณหภูมิการระเหย 80°C อุณหภูมิคอลัมน์ 85°C ความดัน 1 บรรยากาศ ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 95.06 โดยปริมาตร เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการป้อนเป็น 2.50 5.00 7.50 และ 10.00 มิลลิลิตรต่ออนาที พบว่า สภาวะที่ดีที่สุด ได้แก่ โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล-น้ำ 2.50 มิลลิลิตรต่ออนาที สามารถดูดซับน้ำจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดได้เป็นร้อยละ 99.43 โดยปริมาตร

Production of Anhydrous Ethanol from Pretreated Napier Grass

Thirawat Mueansichai¹, Chaipayop Siraworakul¹, Chanikan Thongpan²,
Namthip Wandee², Peerawat Suyatar²

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Khlong Luang, Phthum Thani 12110

and Phattharamat Thiamngoen^{3*}

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suanyai, Nonthaburi, 11000

* Corresponding Author: phattharamat.t@rmutsb.ac.th

¹ Assistant Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

² Student, Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

³ Lecturer, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: April 4, 2022

Revised: February 14, 2023

Accepted: March 3, 2023

DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.4

Keywords: Ethanol /

Napier Grass / Saccharo-

myces Cerevisiae / Crude

Enzyme / Molecular Sieve

Napier grass Pakchong 1 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum americanum*) was used as a raw material for the production of ethanol. *Trichoderma reesei* TISTR3080 and cellulase enzyme were used for the hydrolysis, while *Saccharomyces cerevisiae* TISTR5606 was used for the fermentation. Ethanol was separated from the liquid hydrolysate by vacuum distillation at -80 kPa. Adsorption of the ethanol-water mixture was performed to increase the purity of ethanol. Optimal condition for the production of ethanol was also determined, with the ratio of *S. cerevisiae* (2, 4, 6, and 8 colonies) to 1 plate of *T. reesei* and cellulase enzyme (1.50 mL/g substrate) as the parameters. Optimal condition was noted when using 4 colonies of *S. cerevisiae* of to 1 plate of *T. reesei*. At such condition, ethanol at the concentration of 12.34% by volume was obtained. The vacuum distillation process was able to increase the ethanol concentration to 95.06% by volume. For adsorption of the ethanol-water mixture, molecular sieves types 3A and 4A were loaded at 190 g into a column; evaporation temperature of 80 °C, column temperature of 85 °C at 1 atm and the feed concentration of 95.06% by volume were used. When the feed flow rate was varied at 2.50 5.00 7.50 and 10.00 mL/min, the best condition was noted when using molecular sieve type 3A at a feed flow rate of 2.50 mL/min. The highest achievable ethanol concentration was 99.43% by volume.

1. บทนำ

พลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานและการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของโลก กระทรวงพลังงานได้ให้ความสำคัญใน 3 ด้านประกอบด้วย (1) ด้านความมั่นคงทางพลังงาน (Security) (2) ด้านเศรษฐกิจ (Economy) (3) ด้านสิ่งแวดล้อม (Ecology) [1] ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดวิกฤตทางพลังงานคือ การบริโภคมากเกินไป ทำให้ความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นในขณะที่พลังงานไม่ได้ถูกใช้อย่างเหมาะสมและใช้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เพื่อจัดการปัญหาการขาดแคลนพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการขั้นพื้นฐานของมนุษย์ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีศักยภาพสามารถผลิตพลังงานทดแทนจากพืชทางการเกษตรได้ ซึ่งพลังงานที่ผลิตได้นั้นเป็นพลังงานทดแทนการใช้พลังงานน้ำมันจากฟอสซิล นั่นคือ ไบโเอทานอล เป็นพลังงานสะอาดและปราศจากมลพิษ [2]

เชื้อเพลิงเอทานอล หรือ Ethyl Alcohol คือ แอลกอฮอล์ที่แปรรูปมาจากพืชจำพวกแป้งและน้ำตาล รวมทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ผลิตเอทานอล เช่น อ้อย ข้าว ข้าวฟ่าง ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น [3] แต่อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบดังกล่าวอาจไม่เพียงพอต่อการผลิตเอทานอลในระยะข้างหน้า เนื่องจากการนำเอาพืชอาหารมาใช้ในการผลิตเอทานอลซึ่งอาจส่งผลให้ราคาสินค้าอาหารภายในประเทศปรับสูงขึ้นปัจจุบันในหลายประเทศมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบ ประเภทอื่น เช่น เซลลูโลส ซึ่งได้จากพืช [3] จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีแนวคิดในการผลิตพลังงานทดแทนในรูปไบโเอทานอลจากหญ้า ซึ่งจัดเป็นสารประกอบพอลิโนเซลลูโลส (lignocellulose) มีองค์ประกอบคือ ลิกนินร้อยละ 30.18 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 20.05 และเซลลูโลสร้อยละ 48.56 [4] สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum x Pennisetum americanum*) ซึ่งเป็นหญ้าพลังงานและทนต่อสภาพอากาศจึงสามารถให้ผลผลิตได้ทั้งปี

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตไบโเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 โดยทำการเปรียบเทียบ

ปริมาณเอทานอลจาก 3 กระบวนการ ได้แก่ 1. กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้เชื้อรา *T. reesei* และใช้กรดเอนไซม์เซลลูเลส ในการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาล 2. กระบวนการหมักโดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* และ 3. กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคซิเดสหมักโดยใช้เชื้อรา *T. reesei* เนื่องจากในปัจจุบันมีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ ซึ่งเป็นพืชที่หาง่าย ต้นทุนการปลูกต่ำ งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักหญ้าเนเปียร์และหาสภาวะของกระบวนการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ต่อกระบวนการดูดซับ

2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.1 วัสดุ

2.1.1 เชื้อรา *T. reesei* TISTR3080 และยีสต์ *S. cerevisiae* TISTR5606 (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)

2.1.2 เอนไซม์เซลลูเลสสำเร็จรูปจากเชื้อ *Aspergillus niger* ค่า Activity 100,000 CU/g (Shaanxi Jintai Biological Engineering Co., Ltd., ประเทศจีน)

2.1.3 เอนไซม์กลูโคซิเดส ค่า Activity 4,000 U/ml (Xi'an Lyphar Biotech Co., Ltd., ประเทศจีน)

2.1.3 หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 จากหมู่บ้านข้างเขื่อนลพพอง ต.สวนพริก อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา

2.1.4 โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A (ห้างหุ้นส่วนจำกัด ทีทีไบนทีไบน)

2.2 อุปกรณ์

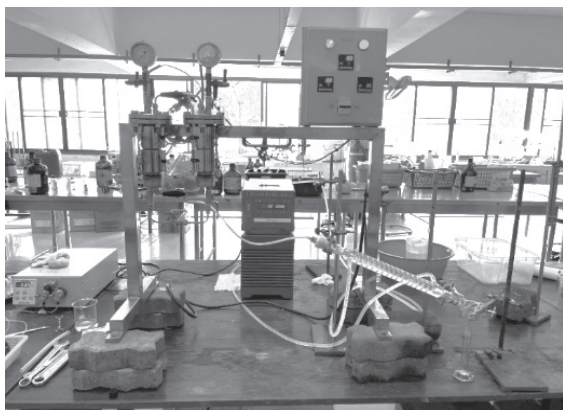
2.2.1 Spectrophotometer (รุ่น UV 5100) (บริษัท ชายนันลูชั่น จำกัด)

2.2.2 ชุดการกลั่นแบบสุญญากาศประกอบด้วย

- 1) ชุดอุปกรณ์การกลั่น
- 2) บีมสุญญากาศ (Vacuum Pump)
- 3) เครื่องทำน้ำเย็น (Cooling)
- 4) เครื่องให้ความร้อน (Heater)
- 5) กระบอกตวงปริมาตร 100 ml.
- 6) ขวดแก้วไวสำหรับเก็บเอทานอล ปริมาตร 750 ml.

2.2.3 ชุดการดูดซับ (บริษัท ซาริรัค อินดัสตรีส์ จำกัด) ประกอบด้วย

- 1) ชุดอุปกรณ์กระบวนการดูดซับ
- 2) หม้อต้ม (boiler)
- 3) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
- 4) โมเลกุลลาร์ซีฟ
- 5) เครื่องทำน้ำเย็น (cooling)
- 6) โถดูดความชื้น
- 7) ขวดเก็บปริมาตร



รูปที่ 2.1 ชุดการดูดซับ

3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 การเตรียมหัวเชื้อรา *T. reesei* ตั้งต้น

เตรียมอาหารแข็งสำหรับเลี้ยงเชื้อสูตร PDA นำอาหารเลี้ยงเชื้อ และจานเพาะเชื้อไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที นำเชื้อรา *T. reesei* มาเลี้ยงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็งนำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 วัน

3.2 การเตรียมหัวเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* ตั้งต้น

เตรียมอาหารแข็งสำหรับเลี้ยงเชื้อสูตร YMA นำอาหารเลี้ยงยีสต์ และจานเพาะยีสต์ไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที นำยีสต์ *S. cerevisiae* มาเลี้ยงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็ง โดยเลือกส่วนที่เป็นโคลนมาเลี้ยงบนจานเพาะยีสต์ นำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2-3 วัน

3.3 การปรับสภาพภ्ูयानเปียร์ ปากช่อง 1

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 น้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีอัตราส่วนภ्ูयानเปียร์ต่อสารละลายเป็น 1:6 ใส่ภ्ูयानเปียร์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ลงในสารละลายที่เตรียม ฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที นำมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำเปล่า และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [5]

3.4 การไฮโดรไลซิส

สำหรับการไฮโดรไลซิสด้วยเชื้อรา *T. reesei* เตรียมอาหารเหลว LM pH 5 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และภ्ูयानเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วปริมาณ 25 กรัม ไปผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ใส่เชื้อรารจำนวน 1 เพลท ต่ออาหารเหลว ปริมาตร 500 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่เครื่องเขย่า ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

สำหรับการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสเตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตรทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ pH 4.8 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำสารละลายโซเดียมอะซิเตรทบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้เทลงในขวดรูปชมพู่ที่มีภ्ูयानเปียร์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ปริมาตร 25 กรัม ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมเอนไซม์อัตราส่วน 1.5 มิลลิลิตรของเอนไซม์ต่อภ्ูयानเปียร์ 1 กรัม

3.5 การหมัก

การหมักเริ่มในวันที่ 2 ของการผลิตเอทานอลโดยเติมยีสต์อายุ 7 วันปริมาณ 2 4 6 และ 8 โคลนีนี จากนั้นนำพรอยด์มาปิดปากขวดและนำไปเขย่าที่เครื่องเขย่าความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เก็บน้ำหมักตัวอย่างมาวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์และความเข้มข้นของเอทานอล ตั้งแต่วันแรกจนถึงการหมักในวันที่ 7

3.6 วิธีการผลิตเอทานอลจากภ्ูयानเปียร์ปากช่อง 1 โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคซิเดส ในการไฮโดรไลซิส

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 น้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีอัตราส่วนภ्ูयानเปียร์ต่อสารละลายเป็น 1:10 ใส่ภ्ูयानเปียร์ที่ผ่านตะแกรงขนาด

100 เมช ลงไปในสารละลายที่เตรียม ข่าเชื่อมด้วยหม้อหนึ่ง ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้อัตราความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 60 นาที นำมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำเปล่า และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งหญ้าแห้งที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเป็นปริมาณ 2 กรัมต่อสารละลายโซเดียมอะซิเตทพบเพอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยกำหนดค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 4.8 ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสต่อเอนไซม์กลูโคซิเดสที่ 2:1 (ผลจากการทดลองหาสัดส่วนปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมโดยใช้ค่าการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส 1,000 U/g min และเอนไซม์กลูโคซิเดส 4,000 U/g min เก็บผลทุก ๆ 12 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 4 วัน) หลังจากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงอัตโนมัติที่ 3000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที เมื่อได้ นำส่วนใส 100 ml ใส่ในขวดดูเรนขนาด 250 มล. เติมอาหารตามสูตรคือ ยีสต์ 3 กรัม มอลต์ 3 กรัม และเปปโทน 5 กรัม ต่อ 1000 มล. โดยไม่ต้องเติมกลูโคสเพิ่ม ทำการข่าเชื่อมด้วยหม้อหนึ่งไอน้ำที่ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการปิเปตยีสต์ *S. cerevisiae* TISTR5606 5 มล. (ได้จากการเตรียมเชื้อเป็นเวลา 18 ชั่วโมง) ใส่ในตัวอย่าง บ่มที่อุณหภูมิห้อง เชย้าที่ 150 รอบต่อนาที เก็บผลทุก ๆ 1 วัน เป็นเวลา 8 วัน

3.7 วิธีการกลั่นเอทานอลภายใต้สภาวะสุญญากาศ

ตวงน้ำหมักหญ้าเนเปียร์ 350 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดกันกลมสำหรับกลั่น เปิดปั๊มสุญญากาศปรับความดันให้ได้ -80 kPa เปิดเครื่องให้ความร้อนกับขวดกันกลมที่มีน้ำหมักอยู่ภายใน บนที่อุณหภูมิ และปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้ในขวดรับผลิตภัณฑ์ทุก 5 นาที วัดความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้ในขวดรับผลิตภัณฑ์ทุก 60 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [6]

3.8 วิธีการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับน้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ

เตรียมโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสประมาณ 3 ชั่วโมง บรรจุโมเลกุลาร์ซีฟที่ผ่านการเตรียม ลงในคอลัมน์ ปริมาณ 190 กรัม ตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่องระเหย 80 องศา

เซลเซียสและคอลัมน์ดูดซับ 85 องศาเซลเซียส เพื่ออบคอลัมน์ดูดซับเป็นการไล่ไอน้ำ 1 ชั่วโมง ทำการเตรียมสารผสมเอทานอล-น้ำที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95.00 โดยปริมาตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เปิดปั๊มที่อัตราการไหล 2.50 5.00 7.50 และ 10.00 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อสูบลำเข้าเครื่องระเหยเก็บตัวอย่างเอทานอลที่ได้ไปวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ทุก 3 นาที หลังหยุดแรกของสารผลิตภัณฑ์ [14]

3.9 เวลาเบรคทुरु

งานวิจัยนี้กำหนดเวลาเบรคทुरुที่อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.35 หรือความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ขาออกน้อยกว่าร้อยละ 97.80 โดยปริมาตร โดยเวลาเบรคทुरुหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้น (C/C_0) กับเวลาในการดูดซับ [16]

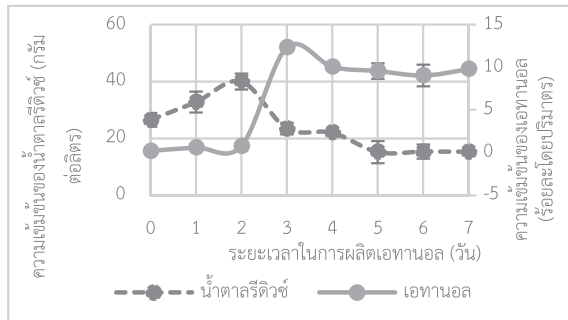
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 การผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ โดยใช้เชื้อรา *T. reesei* ในการไฮโดรไลซิส

เชื้อรา *T. reesei* ต่อยีสต์ *S. cerevisiae* ที่ความเข้มข้น 2 4 6 และ 8 โคโลนี พบว่าในวันที่ 2 ของการผลิตเอทานอล มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 39.90 40.00 40.25 และ 40.90 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 2 เนื่องจากเป็นกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้เชื้อราเข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ งานวิจัยของ อนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา [7] เกิดการลดลงอย่างเห็นได้ในวันที่ 2 เพราะยีสต์เข้าไปเปลี่ยนน้ำตาลรีดิวซ์ให้เป็นเอทานอล [8] ปริมาณเอทานอลเกิดการเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ระยะเวลาในการผลิตเอทานอลวันที่ 3 ได้ความเข้มข้นเอทานอลเท่ากับร้อยละ 11.60 12.34 12.39 และ 12.56 โดยปริมาตร ตามลำดับ รูปที่ 4.1 แสดงผลการผลิตเอทานอลโดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* ปริมาณ 4 โคโลนี ต่อเชื้อรา *T. reesei* 1 เฟลท หญ้าเนเปียร์ที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ปริมาณหญ้า 25 กรัม อาหารเหลว 500 มิลลิลิตร และใช้

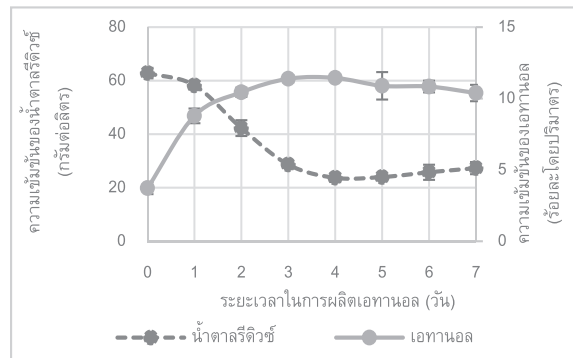
เวลาในการหมัก 3 วัน สามารถผลิตเอทานอลได้ความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 12.34 โดยปริมาตร หรือ 1.95 กรัมต่อกรัมสับสเตรท



รูปที่ 4.1 ผลการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ โดยใช้เชื้อรา 1 เพลทต่อยีสต์ 4 โคโลนี

4.2 การผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส ในการไฮโดรไลซิส

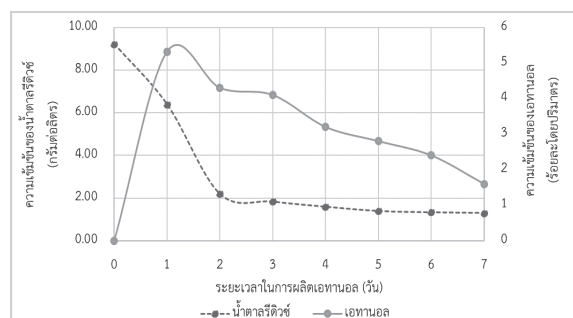
โดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* ที่ความเข้มข้น 2 4 6 และ 8 โคโลนี พบว่าในวันแรกของการหมักสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้สูงสุดที่ 61.84 62.83 62.62 และ 62.73 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณลดลงทุกวัน เนื่องจากมีการทำงานของยีสต์ที่เข้าไปเปลี่ยนน้ำตาลรีดิวซ์ให้เป็นเอทานอล ในวันที่ 4 ของการผลิตเอทานอล พบว่าสามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 10.88 11.44 11.55 และ 11.39 โดยปริมาตร สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลคือ ปริมาณหญ้า 25 กรัม สารละลายโซเดียมอะซิเตรทบัฟเฟอร์ 10 มิลลิตรต่อหญ้า 1 กรัม เอนไซม์ 1.5 มิลลิตร ต่อหญ้า 1 กรัม ยีสต์ *S. cerevisiae* ปริมาณ 4 โคโลนี ระยะเวลาในการหมัก 4 วัน สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 11.44 โดยปริมาตร หรือ 1.80 กรัมต่อกรัมสับสเตรท แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส 1.5 มิลลิตร ต่อหญ้า 1 กรัม ต่อยีสต์ 4 โคโลนี

4.3 การผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับกลูโคซิเดส ในการไฮโดรไลซิส

จากการหมักหญ้าเนเปียร์โดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสต่อกลูโคซิเดสที่ 2:1 โดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* TISTR5606 5 มล. (ได้จากการเตรียมเชื้อเป็นเวลา 18 ชั่วโมง) พบว่าในวันแรกของการหมักความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด 9.23 กรัมต่อลิตร จากนั้นความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์จะลดลงตามลำดับ เนื่องจากยีสต์เปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล โดยเอนไซม์เซลลูเลสจะย่อยเซลลูโลสโครงสร้างผลึกให้เป็นเซลลูบิโอส และเอนไซม์กลูโคซิเดสจะย่อยเซลลูบิโอสให้เป็นกลูโคส [10] จากผลการทดลองความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดที่ได้เท่ากับร้อยละ 5.32 แสดงดังรูปที่ 4.3 ปริมาณเอทานอลที่ได้ต่ำเนื่องจากความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จึงน้อยและส่งผลต่อเนื่องไปยังกระบวนการหมักเอทานอล



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์กลูโคซิเดสที่อัตราส่วน 2:1

4.4 ผลผลิตเอทานอล (Ethanol yield)

ผลผลิตเอทานอลสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์เอทานอล (กรัม) ต่อ น้ำหนักของสับสเตรท (กรัม) [9] แสดงดังสมการที่ 1

$$\text{ผลผลิตเอทานอล} = \frac{\text{ผลิตภัณฑ์เอทานอล (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของสับสเตรท (กรัม)}}$$

ผลผลิตเอทานอล จากงานวิจัยของผ่องศรี ศิวราศักดิ์ ศึกษาการหมักเอทานอลจากฟางข้าวโดยใช้เชื้อรา *T. reesei* ในการไฮโดรไลซิส และหมักร่วมโดยใช้ยีสต์ พบว่ามีผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.013 [11] และงานวิจัยการผลิตลิโนเซลลูโลสจากเอทานอลจากสารละลายที่ได้จากการย่อยลำต้นมันสำปะหลังด้วยวิธีการหมักแบบกะด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* TISTR 5048 [12] พบว่ามีผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.063 โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการไฮโดรไลซิสหญ้าเนเปียร์ด้วยเชื้อราและเอนไซม์เซลลูเลส หมักร่วมโดยใช้ยีสต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าหญ้าเนเปียร์ให้ผลผลิตเอทานอลที่มากกว่าฟางข้าว และการไฮโดรไลซิสหญ้าเนเปียร์ด้วยเชื้อราและหมักร่วมโดยใช้ยีสต์ มีผลผลิตเอทานอลมากที่สุดจึงเลือกเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอล จากงานวิจัยของ Kongkeitkajorn และคณะ ได้เปรียบเทียบการศึกษาการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์พบว่า ผลผลิตมีค่าตั้งแต่ 0.03-0.298 ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการผลิต โดยค่าสูงสุดที่ 0.298 เป็นงานวิจัยของ Kongkeitkajorn และคณะ [15]

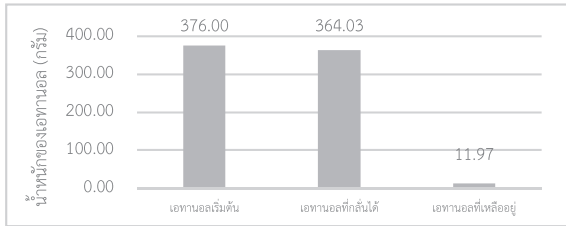
4.5 การกลั่นเอทานอลภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน -80 kPa

ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นมีผลต่อการกลั่น โดยความเข้มข้นเริ่มต้นน้อย ๆ ต้องทำการกลั่นหลายรอบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ความเข้มข้นสูงสุด [13] เนื่องจากหอกลิ้นขนาดเล็กสำหรับการทดลอง มีจำนวน Tray ทั้งหมด 4 Tray โดยใช้หมักที่สภาวะที่ดีที่สุด นำมากลั่นให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงที่สุด ใน 1 รอบ สามารถกลั่นเอทานอลได้ความเข้มข้นสูงสุดที่ร้อยละ 69.82 โดยปริมาตร ที่ปริมาตร

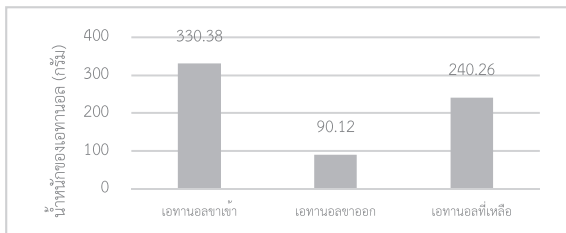
60 มิลลิลิตร จากนั้นนำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 69.82 โดยปริมาตร กลั่นซ้ำอีก 1 รอบ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้ได้ร้อยละ 95.06 โดยปริมาตร รูปที่ 4.4 แสดงน้ำหนักของเอทานอลที่ตอนเริ่มต้น น้ำหนักของเอทานอลที่กลั่นได้ และน้ำหนักเอทานอลเหลืออยู่ สำหรับการกลั่นแบบสุญญากาศ โดยใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 12.34 โดยปริมาตร เนื่องจากหอกลิ้นมีขนาดเล็กจึงต้องแบ่งสารเพื่อทำการกลั่นทั้งหมด 11 ครั้ง พบว่าสามารถแยกเอทานอลได้เท่ากับ 364.03 กรัม มีเอทานอลคงเหลือที่ไม่สามารถแยกได้เท่ากับ 11.97 กรัม ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าน้อยส่งผลให้สามารถกลั่นได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดเพียงร้อยละ 69.82 โดยปริมาตร รูปที่ 4.5 แสดงน้ำหนักของเอทานอลที่ตอนเริ่มต้น น้ำหนักของเอทานอลที่กลั่นได้และน้ำหนักของเอทานอลเหลืออยู่ สำหรับการกลั่นแบบสุญญากาศครั้งที่ 2 โดยใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 69.82 โดยปริมาตร ซึ่งต้องแบ่งสารที่กลั่นได้จากครั้งที่ 1 เพื่อทำการกลั่นครั้งที่ 2 ทั้งหมด 2 ครั้ง สามารถแยกเอทานอลได้เท่ากับ 90.12 กรัม ที่ความเข้มข้นร้อยละ 95.06 โดยปริมาตร มีเอทานอลคงเหลือที่ไม่สามารถแยกได้เท่ากับ 240.00 กรัม ที่ความเข้มข้นร้อยละ 65.42 โดยปริมาตร พบว่ามีปริมาณเอทานอลคงเหลือที่มากซึ่งสามารถนำมากลั่นเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้ได้ปริมาณเพิ่มขึ้นอีก

4.6 การดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A

จากผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล-น้ำกับเวลาในการดูดซับของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A ที่ อัตราการไหล 2.50 5.00 7.50 และ 10.00 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสามารถดูดซับน้ำออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำ ได้ค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.43 98.85 98.75 และ 98.27 โดยปริมาตร ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถดูดซับน้ำได้เอทานอลความเข้มข้นสูงกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ เนื่องจาก



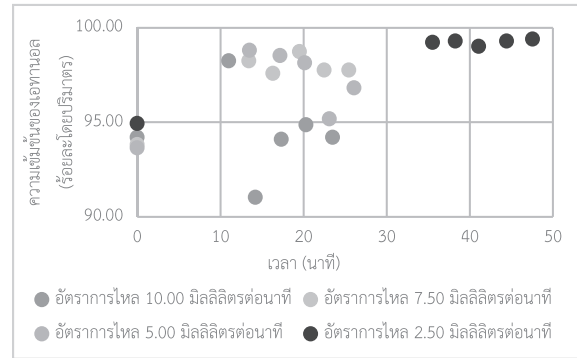
รูปที่ 4.4 น้ำหนักของเอทานอลที่ตอนเริ่มต้น ที่กลั่นได้ และเหลืออยู่ สำหรับการกลั่นแบบสุญญากาศ โดยใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 12.34 โดยปริมาตร



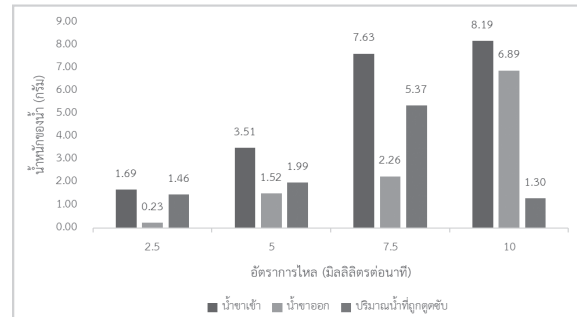
รูปที่ 4.5 น้ำหนักของเอทานอลที่ตอนเริ่มต้น ที่กลั่นได้ และเหลืออยู่ สำหรับการกลั่นแบบสุญญากาศ โดยใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 69.82 โดยปริมาตร (กลั่นครั้งที่ 2)

ที่อัตราการไหลต่ำทำให้เวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมากขึ้น การดูดซับน้ำจึงเกิดได้ดีกว่าที่อัตราการไหลสูง ๆ [13] รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ พบว่าน้ำหนักของน้ำที่เข้าสู่ระบบ และน้ำหนักของน้ำที่ออกจากระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ของการดูดซับน้ำเท่ากับ 86.39 56.69 70.38 และ 15.87 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนของการดูดซับน้ำ พบว่าที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับที่มากที่สุด แสดงถึงที่อัตราการไหลต่ำ ๆ สามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าอัตราการไหลสูง ๆ รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ จากการเปรียบเทียบพบว่าที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณเอทานอลที่สูญหายน้อยที่สุด แสดงให้เห็นถึงที่อัตราการไหลต่ำ ๆ มีปริมาณของเอทานอลที่สูญหายน้อยกว่าการดูดซับน้ำที่อัตราการไหลสูง ๆ โดยปริมาณของเอทานอลที่สูญหายเกิดขึ้นจากการควบแน่นไม่หมดของสารผลิตภัณฑ์ เกิดสารค้างท่อ และการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์

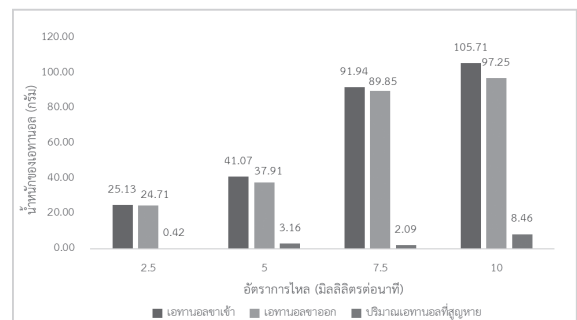
ที่ได้จากการดูดซับเป็นการเก็บแบบเปิดสู่บรรยากาศ จึงทำให้เอทานอลของผลิตภัณฑ์สามารถระเหยก่อนนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้น



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล-น้ำ กับเวลาในการดูดซับของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A ที่อัตราการไหลต่าง ๆ



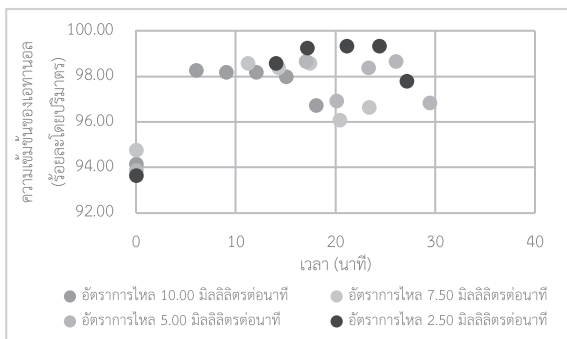
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ ของการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A



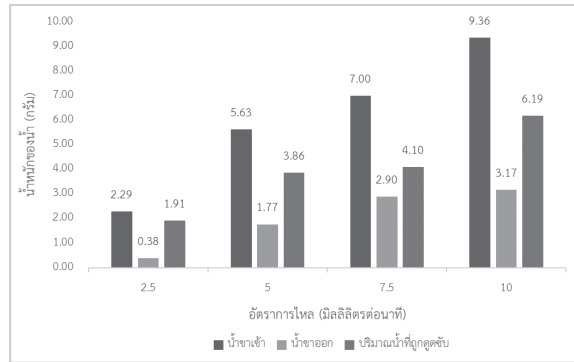
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของเอทานอลกับอัตราการไหลต่าง ๆ ของการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A

4.7 การดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A

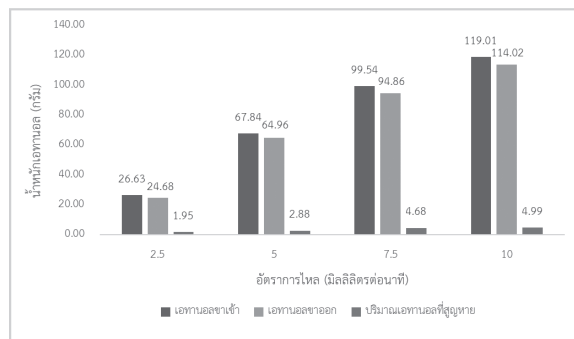
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล-น้ำกับเวลาในการดูดซับ ที่อัตราการไหล 2.50 5.00 7.50 และ 10.00 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสามารถดูดซับน้ำออกจากเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.33 98.65 98.56 และ 98.27 โดยปริมาตรตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบอัตราการไหลทั้ง 4 อัตราการไหล พบว่าที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการดูดซับนานกว่า และสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ พบว่าเมื่ออัตราการไหลลดลง ปริมาณของน้ำที่เข้าสู่ระบบ ปริมาณน้ำที่ออกจากระบบ และปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับลดลงด้วย ที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับน้ำมากที่สุดเท่ากับ 83.40 จึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ พบว่าเมื่ออัตราการไหลลดลงปริมาณเอทานอลที่เข้าสู่ระบบ และปริมาณเอทานอลที่สูญหายมีค่าลดลงด้วย จะเห็นว่าน้ำหนักของเอทานอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ขาออกน้อยกว่าที่เข้าสู่ระบบ เนื่องจากมีการสูญเสียภายในระบบ



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล-น้ำกับเวลาในการดูดซับ ที่อัตราการไหลต่าง ๆ โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ ของการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 4A

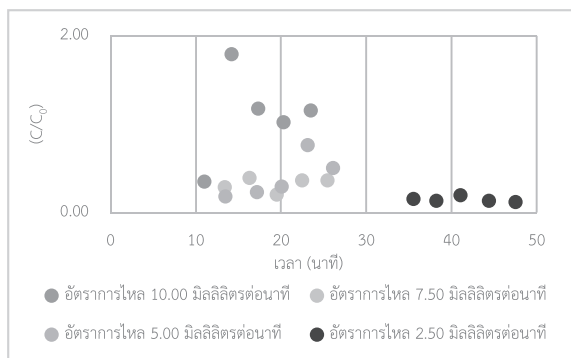


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำกับอัตราการไหลต่าง ๆ ของการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 4A

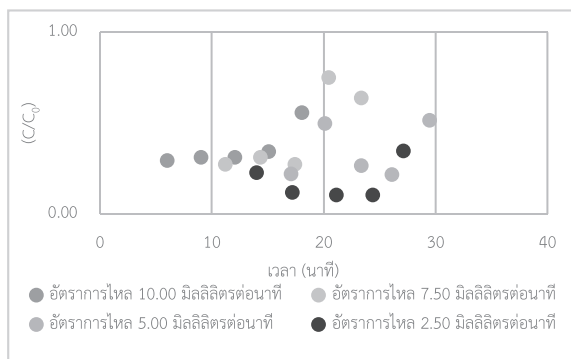
4.8 เวลาเบรคทฤษฎี

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้นกับเวลาในการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A ที่อัตราการไหล 2.50 5.00 7.50 และ 10.00 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่ามีเวลาเบรคทฤษฎี มากกว่า 47.54 21.40 22.00 และ 11.20 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที ยังหาเวลาเบรคทฤษฎีไม่ได้ เนื่องจากหยุดทำการทดลองก่อนถึงเวลาเบรคทฤษฎี และที่อัตราการไหล 10.00 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้น มีมากกว่า 1.00 เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์เกิดความคาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 4 อัตราการไหล พบว่าอัตราการไหลมีผลต่อเวลาเบรคทฤษฎี เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาเบรคทฤษฎีลดลง [14] เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีปริมาณของตัวถูกดูดซับมากจึง

ส่งผลทำให้ตัวดูดซับอิ่มตัวเร็ว และที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที มีเวลาในการในดูดซับที่ยังไม่ถึงเวลาเบรคทรูนานกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้นกับเวลาในการดูดซับ (C/C_0) โดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A ที่อัตราการไหล 2.50 5.00 7.50 และ 10.00 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่ามีเวลาเบรคทรูที่ 27.14 28.00 18.00 และ 25.09 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้นกับเวลาในการดูดซับ (C/C_0) โดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A ที่อัตราการไหลต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้นกับเวลาในการดูดซับ (C/C_0) โดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A ที่อัตราการไหลต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของทั้ง 4 อัตราการไหล พบว่าที่อัตราการไหล 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้เวลาเบรคทรูที่นานกว่าอัตราการไหลอื่น ๆ

จากตารางที่ 4.1 เวลาเบรคทรูที่อัตราการป้อนสารผสมเอทานอล-น้ำเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A พบว่าที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 2.50 มิลลิลิตรต่อนาที ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด ให้เวลาเบรคทรูที่ยาวนานกว่าอัตราการไหลของสารป้อนอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบการหาเวลาเบรคทรูของการดูดซับ เวลาในการดูดซับที่ยังไม่ถึงเวลาเบรคทรูของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A มีเวลานานกว่าเวลาเบรคทรูของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A ซึ่งหมายถึงตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A เกิดการอิ่มตัวของตัวดูดซับน้ำช้ากว่าตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A งานวิจัยนี้จึงเลือกการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A เนื่องจากไม่ต้องทำการ Regenerate บ่อยครั้ง

ตารางที่ 4.1 เวลาเบรคทรูที่อัตราการป้อนเอทานอลเริ่มต้นต่าง ๆ โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A

สถานะที่	ชนิดตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ	อัตราการไหลของสารป้อน(มิลลิลิตร/นาที)	เวลาเบรคทรู(นาที)
1	3A	2.50	> 47.54
2		5.00	21.40
3		7.50	22.00
4		10.00	11.20
5	4A	2.50	27.14
6		5.00	28.00
7		7.50	18.00
8		10.00	15.09

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการผลิตเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ยีสต์ *S. cerevisiae* 4 โคลนีสต่อเชื้อรา *T. reesei* 1 เพลท สามารถผลิตเอทานอลได้ความเข้มข้นร้อยละ 12.34 โดยปริมาตร จากการกลั่นแบบสุญญากาศที่ความดัน -80 kPa ได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95.06 โดยปริมาตร

เพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A และ 4A พบว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้ถึงร้อยละ 99.43 โดยปริมาตร และเวลาเบรคทรูมากกว่า 47.54 นาที ซึ่งสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าและมีเวลาเบรคทรูที่ยาวนานกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้ให้โอกาสและให้ทุนสนับสนุน งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2563 (สัญญาเลขที่ SRI63D0717E.3) ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณวังช้างอยุธยา แลเพนียดที่ให้การสนับสนุนในการให้ข้อมูลและวัสดุที่ใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2015, Alternative Energy Development Plan (AEDP2015), p. 1. (In Thai)
2. Poudyal, R., Loskot, P., Nepal, R., Parajuli, R. and Krishna, S., 2019, Mitigating the Current Energy Crisis in Nepal with Renewable Energy Sources, Australia, p. 1.
3. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2009, Feasibility Study on Cellulosic Ethanol Production in Commercial Scale, pp. 2-3. (In Thai)
4. Tongpoothorn, W., Chuabsap, N. and Siphiphak, C., 2018, "The Study of Effective Method to Enhance Reducing Sugar Content for Bioethanol Production from Napier Grass Stem," *Journal of Ramkhamhaeng University*, 21 (2), p. 48. (In Thai)
5. Phitsuwan, P., Sakka, K. and Ratanakhanokchai, K., 2016, "Structural Changes and Enzymatic Response of Napier Grass (*Pennisetum purpureum*)

Stem Induced by Alkaline Pretreatment," *Biore-source Technology*, p. 248.

6. Mueansichai, T., Thiamngoen, P., Siraworakun, C., Klanvaree, T., Sitthikwa, S. and Assabumrungrat, S., 2021, "Bioethanol Production Process from Napier Grass," *TICHE2021, Suranaree University of Technology*, p. 1055.

7. Thanapimmetha, A., Tiyanusorn, S., Srino-phakun, P. and Saisriyoot, M., 2018, "Reducing Sugar Production from Empty Fruit Bunches with Enzyme Cellic ctec2," *Journal of KMUTNB*, 28 (2), pp. 228-229. (In Thai)

8. Jantarawattana, A. and Kullamethee, P., 2016, "The Feasibility Study of Ethanol Feather Pennisetum Grass (*pennisetum pedicellatum Trin.*) and Residual Bamboo Shoot," *Journal of KMUTNB*, 26 (1), p. 101. (In Thai)

9. Islam, Z., Hossain, T., Asad, M.A. and Paul, S.C., 2019, "Bioethanol Production from Banana Pseudostem by Using Separate and Cocultures of Cellulase with *Saccharomyces Cerevisiae*," *Journal of Environmental Science and Technology*, 12 (4), pp. 157-163.

10. Niwadwong, Ch. and Reungwiriyaichai, Ch., 2012, "Production of Cellulosic Ethanol in Thailand," *KKU Science Journal*, 40 (4), pp. 1073-1088. (In Thai)

11. Siwarasak, P., 2003, "The Study of Ethanol Fermentation from Reducing Sugar of Rice Straws by Enzymatic Hydrolysis with *T. reesei*," *Journal of Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, 2 (3), pp. 1-9. (In Thai)

12. Mahawichat, S. and Reungwiriyaichai, C., 2012, "Lignocellulosic Ethanol Production from Hydrolysate of Cassava Stems via Batch Fermentation with *Saccharomyces Cerevisiae* TISTR 5048," *Veridian E-Journal*, 5 (3), p. 429. (In Thai)

13. Yimwaree, N. and Triratnasirichai, K., 2011, "Distillation Ethanol From Sweet Sorghum by Reflux Distillation," *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 11 (4), p. 25. (In Thai)
14. Hayook, C. and Teppitoo, W., 2004, "Ethanol-Water Mixture Separation by Adsorption," *The 42nd Conference of Kasetsart University*, Kasetsart University, pp. 351-358. (In Thai)
15. Kongkeitkajorn, M.B., Sae-Kuay, C. and Reungsang, A., 2020, "Evaluation of Napier Grass for Bioethanol Production through a Fermentation Process," *Processes*, 8 (5), p. 567.
16. Mekala, M., Neerudi, B., Are, P.R., Surakasi, R., Manikandan, G., Kakara, V.R. and Dhumal, A.A., 2022, "Water Removal from an Ethanol-Water Mixture at Azeotropic Condition by Adsorption Technique," *Adsorption Science and Technology*, 2022 (8374471), 10 p.