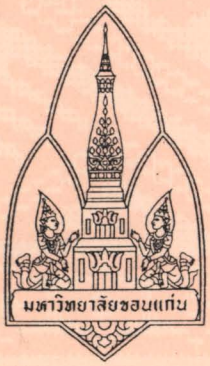
ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248110



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การผลิตเอทานอลจากแก่นตะวันโดยใช้ *Zymomonas mobilis* ด้วยวิธีการหมักแบบกะ

(Ethanol production from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) by *Zymomonas mobilis* using batch fermentation)

คณะผู้วิจัย

รศ. ดร. พรเทพ ถนนแก้ว

ดร. สุดารัตน์ ถนนแก้ว

หน่วยงานต้นสังกัด

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย ประเภทอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

b0025712 248110

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248110

รายงานการวิจัย

เรื่อง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

การผลิตเอทานอลจากแก่นตะวันโดยใช้ *Zymomonas mobilis* ด้วยวิธีการหมักแบบกะ

(Ethanol production from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) by *Zymomonas mobilis* using batch fermentation)

คณะผู้วิจัย

รศ. ดร. พรเทพ ถนนแก้ว

ดร. สุดารัตน์ ถนนแก้ว

หน่วยงานต้นสังกัด

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย ประเภทอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง "การผลิตเอทานอลจากแก่นตะวันโดยใช้ *Zymomonas mobilis* ด้วยวิธีการหมักแบบกะ" สำเร็จลุล่วงลงได้ คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย ประเภทอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 และใคร่ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ และศูนย์วิจัยการหมักเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ และเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการทดลองและการวิเคราะห์ทางเคมีด้านต่างๆ

โครงการวิจัยเรื่องนี้ได้ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ของ นางสาวทัชชา อ่อนสร้อย นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ นางสาวทัชชา อ่อนสร้อย ไว้ ณ โอกาสนี้ ที่ได้ช่วยเหลือในการทำงานวิจัยเรื่องนี้ให้สำเร็จลุล่วงลงได้ และขอขอบคุณนายนวพรต กีรติเรขา และนายสุบิน ศรีวิชัย นักศึกษาภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้กรุณาช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ช่วยเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลอง จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงลงได้

สุดท้ายคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาของภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ และศูนย์วิจัยการหมักเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และใคร่ขอขอบคุณผู้ที่มีอุปการคุณทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และให้คำแนะนำอันมีค่าสำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

กรกฎาคม 2554

บทคัดย่อ

248110

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน โดยใช้ *Zymomonas mobilis* TISTR 548 ด้วยวิธีการหมักแบบกะ จากการศึกษาการเจริญของ *Z. mobilis* TISTR 548 ในอาหารสูตร YPG และน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันพร้อมหมักและติดตามผลการเจริญเติบโตด้วยวิธีการนับจำนวนเซลล์โดยตรงพบว่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ_{max}) ของ *Z. mobilis* TISTR 548 ในอาหาร YPG มีค่าเท่ากับ 0.84 และในน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันมีค่าเท่ากับ 1.12 ซึ่งแสดงว่าแบคทีเรีย *Z. mobilis* TISTR 548 สามารถใช้น้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโตได้ จากการศึกษาถึงองค์ประกอบในหัวแก่นตะวันพบว่ามีความชื้น 76.2 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันพบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 5.2-5.6 ซึ่งเป็นค่า pH ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของแบคทีเรีย *Z. mobilis* มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 16.47 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 186.21 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตส 34.0 กรัมต่อลิตร น้ำตาลกลูโคส 4.4 กรัมต่อลิตร น้ำตาลซูโครส 5.2 กรัมต่อลิตร ปริมาณของอินูลิน 168 กรัมต่อลิตร ปริมาณของฟีนอลลิก 0.719 กรัมต่อลิตร มีแร่ธาตุ ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 0.238 น้ำหนักต่อปริมาตร ฟอสฟอรัส (P) ร้อยละ 0.018 น้ำหนักต่อปริมาตร โพแตสเซียม (K) ร้อยละ 0.262 น้ำหนักต่อปริมาตร แคลเซียม (Ca) ร้อยละ 0.007 น้ำหนักต่อปริมาตร แมกนีเซียม (Mg) ร้อยละ 0.034 น้ำหนักต่อปริมาตร ซัลเฟอร์ (S) ร้อยละ 0.01 น้ำหนักต่อปริมาตร โซเดียม (Na) ร้อยละ 0.026 น้ำหนักต่อปริมาตร เหล็ก (Fe) 14.4 ppm แมงกานีส (Mn) 1.284 ppm คอปเปอร์ (Cu) 0.584 ppm สังกะสี (Zn) 2.054 ppm ในการศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันโดยใช้ *Z. mobilis* ด้วยวิธีการหมักแบบกะในระดับฟลาสก์ พบว่าน้ำสกัดที่ผ่านการย่อยด้วยกรด หรือเอนไซม์อินูลิเนสแล้วจะมีปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น เมื่อนำวัตถุดิบนี้ไปทดสอบการหมักพบว่าน้ำสกัดจาหัวแก่นตะวันที่ผ่านการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 80°C มีประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลดีที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำสกัดที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ หรือที่ผ่านการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60°C และ 100°C โดยให้ผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.45 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ อัตราผลผลิตของเอทานอล 0.64 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลในทางทฤษฎีเท่ากับ 88.66 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสูตรอาหารที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล และปริมาณเชื้อเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) พบว่าน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ปรับให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 5.0 ร่วมกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลสูงสุดโดยมีผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.47 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ อัตราผลผลิตของเอทานอล 1.30 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และมีผลได้ของเอทานอลในทางทฤษฎีเท่ากับ 90.77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 และ 7.0 และการใช้ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากการศึกษาหาปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันพบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้สูงที่สุด มีค่าผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.41 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ มีอัตราผลผลิตเอทานอล 0.95 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎีเท่ากับ 80.06 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมแหล่งไนโตรเจนเสริม คือ ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต หรือแอมโมเนียมไนเตรท ช่วยให้การผลิตเอทานอลโดย *Z. mobilis* เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเสริมแหล่งไนโตรเจน โดยความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้เมื่อใช้ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต

หรือแอมโมเนียมไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจนในความเข้มข้น 0.50 กรัมต่อลิตร คือ 95.6-95.9 กรัมต่อลิตร เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลที่ได้จากการศึกษาในระดับฟลาสก์ไปทดสอบการผลิตเอทานอลในระดับถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 5 ลิตร โดยเลือกใช้น้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปรับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250 กรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเป็น 5.0 และเลือกใช้กล้าเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำการหมักโดยมีปริมาตรทำงาน (working volume) เท่ากับ 4 ลิตร และกำหนดอัตราการกวนที่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าให้ผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.39 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ อัตราผลผลิตของเอทานอล 1.31 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 75.07 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

248110

The aim of this research was to study the possibility of producing ethanol from Jerusalem artichoke tubers extracted by *Zymomonas mobilis* TISTR548 using batch fermentation. Growth of *Z. mobilis* TISTR 548 in YPG medium and Jerusalem artichoke tubers extracted was investigated by direct plate count technique and the results found that this bacterium gave the maximum specific growth rate of 0.84 and 1.12 in YPG medium and Jerusalem artichoke tubers extracted, respectively. These results suggested that the *Z. mobilis* TISTR548 can utilized the Jerusalem artichoke tubers extracted as a carbon source for its growth. Jerusalem artichoke tubers contained 76.2% moisture. Composition analysis of the juice extracted from Jerusalem artichoke tubers revealed that its composed of 16.47 °Brix total soluble solid, 186.21 g/l total sugars, 34.0 g/l fructose, 4.4 g/l glucose, 5.2 g/l sucrose, 168 g/l inulin, 0.719 g/l phenolic compound, and some minerals such as nitrogen (0.238 % w/v), phosphorus (0.018 % w/v) potassium (0.262 % w/v) calcium (0.007% w/v), magnesium (0.034% w/v), sulfer (0.01% w/v), sodium (0.026% w/v), ferrous (14.4 ppm), manganese (1.284 ppm), copper (0.584 ppm) and zine (2.054 ppm). A pH of the juice extracted from tubers was 5.2-5.6 which is in the optimal pH range for growth of *Z. mobilis*. Factors that affect the ethanol production from juice extracted from Jerusalem artichoke tubers by *Z. mobilis* TISTR548 using batch fermentation was investigated in flask scale and the results showed that the juice that has been treated with concentrate sulfuric acid or inulinase enzyme had higher reducing sugars content than those without treated. The treated juice with sulfuric acid at 80°C showed the best ethanol fermentation efficiency with 0.45 g ethanol/g sugar utilized ethanol yield, 0.64 g/l.h ethanol productivity and 88.66% theoretical ethanol yield, as compared to those treated with inulinase enzyme or acid at 60 or 100°C. An initial pH of ethanol production medium and inoculum size of 5.0 and 10% by vol, respectively, were found to give the maximum ethanol fermentation efficiency with 0.47 g ethanol/g sugar utilized ethanol yield, 1.30 g/l.h ethanol productivity and 90.77% theoretical ethanol yield, which is higher than those at the pH 6.0 and 7.0 or inoculum size of 1 or 5% by vol. Initial sugar concentration of 250 g/l gave highest ethanol fermentation efficiency with 0.41 g ethanol/g sugar utilized ethanol yield, 0.95 g/l.h and 80.06% theoretical ethanol yield. Supplementation of nitrogen source enhanced ethanol production by *Z. mobilis*. Diammonium phosphate and ammonium nitrate were found to be the best nitrogen source and the maximum ethanol concentration obtained when these nitrogen sources were used was 95.6-96.9 g/L. The ethanol production in 5-l bioreactor with the working volume of 4-l was evaluated using the optimum ethanol production conditions obtained in the flask scale, i.e., juice treated with acid at 80°C as a carbon source, initial sugar concentration of 250 g/l, initial pH of 5.0 and 10% inoculum size. An agitation speed of the reactor was set at 100 rpm and the temperature was controlled at 30oC. The maximum ethanol yield and ethanol productivity obtained in the bioreactor scale were 0.39 g ethanol/g sugar utilized and 1.31 g/l.h, respectively, with the theoretical ethanol yield of 75.07%.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)	ง
สารบัญเรื่อง	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เอทานอล	4
2.2 แบคทีเรีย *Zymomonas mobilis*	17
2.3 แก่นตะวัน	22
2.4 อินูลิน	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเอทานอลจากอินูลิน	26
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1 จุลินทรีย์และวัตถุดิบ	28
3.2 อุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์และสารเคมี	29
3.3 อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์	30
3.4 วิธีเก็บรักษาจุลินทรีย์	30
3.5 วิธีเตรียมน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล	30
3.6 วิธีการทดลอง	30
3.7 วิธีการคำนวณ	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 การหาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน	35
4.2 การศึกษาการเจริญของ Z. mobilis TISTR548 ในอาหารสูตร YPG และน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน	36
4.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน	37
4.3.1 การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการหมัก	37
4.3.2 การศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณเชื้อเริ่มต้นของสูตรอาหารที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล	43
4.3.3 การศึกษาหาปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันในการผลิตเอทานอล	49

4.3.4 การศึกษาแหล่งของไนโตรเจนและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล 53
4.4 การศึกษาการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันโดยใช้ Z. mobilis ในถังหมักปฏิกรณ์ชีวภาพ ขนาด 5 ลิตร ด้วยวิธีการหมักแบบกะ 54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการทดลอง 57
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต 58
เอกสารอ้างอิง 59
ภาคผนวก 62

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงการเรียกชื่อสารบางตัวในกลุ่มแอลกอฮอล์	4
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบการหมักเพื่อผลิตเอทานอลโดยแบคทีเรีย *Z. mobilis* และ *S. uvarum*	21
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบของน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวัน	35
ตารางที่ 4.2	ค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของ Z. mobilis TISTR548 เมื่อเลี้ยงในอาหารเหลว YPG และในน้ำสกัดหัวแก่นตะวันพร้อมหมัก	37
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบของน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวัน ก่อนและหลังผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ	39
ตารางที่ 4.4	องค์ประกอบและ พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ด้วยเชื้อ *Z. mobilis*	42
ตารางที่ 4.5	องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นแตกต่างกัน	47
ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มี ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร	52
ตารางที่ 4.7	องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่แปรผันชนิดและความเข้มข้นของแหล่งไนโตรเจนที่ระดับต่างๆ กัน	54
ตารางที่ 4.8	องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 ปรับให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นเป็น 5.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	55

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอล	4
ภาพที่ 2.2	การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาการเติมน้ำให้กับเอทธิลีน	5
ภาพที่ 2.3	การสังเคราะห์เอทานอลโดยการเติมไฮโดรเจนให้กับอัลดีไฮด์	6
ภาพที่ 2.4	การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาดักชันของสารเอทานอลด้วยไฮโดรด์	6
ภาพที่ 2.5	การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลกับกรีญาร์รีเอเจนต์	6
ภาพที่ 2.6	การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาไฮโดรโบเรชันของเอทิลีน	7
ภาพที่ 2.7	การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสของเอทิลเฮไลด์	7
ภาพที่ 2.8	การสลายน้ำตาลกลูโคสโดยวิถีไกลโคไลซิสเพื่อเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสไปเป็นกรดไพรูวิก แล้วกรดไพรูวิกถูกสลายต่อเปลี่ยนไปเป็นเอทานอลและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	8
ภาพที่ 2.9	กลไกในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสไปเป็นเอทานอลภายในเซลล์จุลินทรีย์	10
ภาพที่ 2.10	ขั้นตอนการเปลี่ยนไพรูวิกไปเป็นเอทานอล	10
ภาพที่ 2.11	ลักษณะการเจริญของยีสต์เมื่อเพาะเลี้ยงแบบกะ	11
ภาพที่ 2.12	ลักษณะของกระบวนการหมักแบบ A) Batch culture, B) Fed-batch culture, C) semi-continuous culture, D) continuous culture	13
ภาพที่ 2.13	การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักด้วยยีสต์	13
ภาพที่ 2.14	ปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลซูโครสไปเป็นเอทานอล	14
ภาพที่ 2.15	ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแป้งไปเป็นเอทานอล	15
ภาพที่ 2.16	ไดอะแกรมแสดงกระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล	16
ภาพที่ 2.17	ไดอะแกรมแสดงกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง	17
ภาพที่ 2.18	ลักษณะเซลล์แบคทีเรีย *Zymomonas* ภายใต้กล้องจุลทรรศน์	18
ภาพที่ 2.19	Entner-Doudoroff pathway	20
ภาพที่ 2.20	ลักษณะลำต้นและดอกของแก่นตะวัน	23
ภาพที่ 2.21	ลักษณะของหัวแก่นตะวัน	23
ภาพที่ 2.22	แผนผังการผลิตเอทานอลจากแก่นตะวัน	25
ภาพที่ 2.23	โครงสร้างของอินูลิน	26
ภาพที่ 3.1	หัวแก่นตะวันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล	28
ภาพที่ 4.1	กราฟการเจริญของเชื้อ *Z. mobilis* TISTR548 ในอาหารเหลวสูตร YPG น้ำคั้นจากหัวแก่นตะวัน โดยวิธีการนับจำนวนเซลล์โดยตรง	37
ภาพที่ 4.2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○), 80 องศาเซลเซียส (▼) และ 100 องศาเซลเซียส (△)	37
ภาพที่ 4.3	การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่าน	40

	การปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)	
ภาพที่ 4.4	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)	40
ภาพที่ 4.5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)	41
ภาพที่ 4.6	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)	41
ภาพที่ 4.7	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	45
ภาพที่ 4.8	การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	45
ภาพที่ 4.9	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	46
ภาพที่ 4.10	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	46
ภาพที่ 4.11	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	47
ภาพที่ 4.12	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร	50
ภาพที่ 4.13	การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร	50
ภาพที่ 4.14	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการ	51

แปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร 51
ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร 52
ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความเข้มข้นของเอทานอลในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันเพื่อผลิตเอทานอลในถังหมักขนาด 5 ลิตร โดยให้มีปริมาตรการทำงานเท่ากับ 4 ลิตร อัตราการกวนที่ 100 รอบต่อนาที 55