บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การหาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน

น้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันมีองค์ประกอบเบื้องต้นดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 5.2-5.6 ซึ่งเป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญของแบคทีเรีย *Z. mobilis* มีความชื้น 76.2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 16.47 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 186.21 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลรีดิ๊วซ์ 17.52 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตส 139.00 กรัมต่อลิตร น้ำตาลกลูโคส 11.7 กรัมต่อลิตร น้ำตาลซูโครส 6.3 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 (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวัน

พีเอช (pH)	5.45 ± 0.19
ความชื้น	76.2 ± 2.0 (%)
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids)	16.47 ± 0.34 (°Brix)
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugars)	186.21 ± 31.79 (g/l)
ปริมาณน้ำตาลรีดิ๊วซ์ (Reducing sugars)	17.52 ± 0.28 (g/l)
ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตส (Fructose)	139.00 (g/l)
ปริมาณน้ำตาลกลูโคส (Glucose)	11.7 (g/l)
ปริมาณน้ำตาลซูโครส (Sucrose)	6.3 (g/l)
ปริมาณของอินูลิน (Inulin content)	168 ± 31.87 (g/l)
ปริมาณของฟีนอลลิก (Phenolic compound)	0.719 ± 0.36 (g/l)
ไนโตรเจน (N)	0.238 ± 0.113 (%)
ฟอสฟอรัส (P)	0.018 ± 0.014 (%)
โพแตสเซียม (K)	0.262 ± 0.081 (%)
แคลเซียม (Ca)	0.007 ± 0.0004 (%)
แมกนีเซียม (Mg)	0.034 ± 0.011 (%)
ซัลเฟอร์ (S)	0.010 ± 0.001 (%)
โซเดียม (Na)	0.026 ± 0.001 (%)
เหล็ก (Fe)	14.4 ± 3.911 (ppm)
แมงกานีส (Mn)	1.284 ± 0.034 (ppm)
คอปเปอร์ (Cu)	0.584 ± 0.091 (ppm)
สังกะสี (Zn)	2.054 ± 0.244 (ppm)

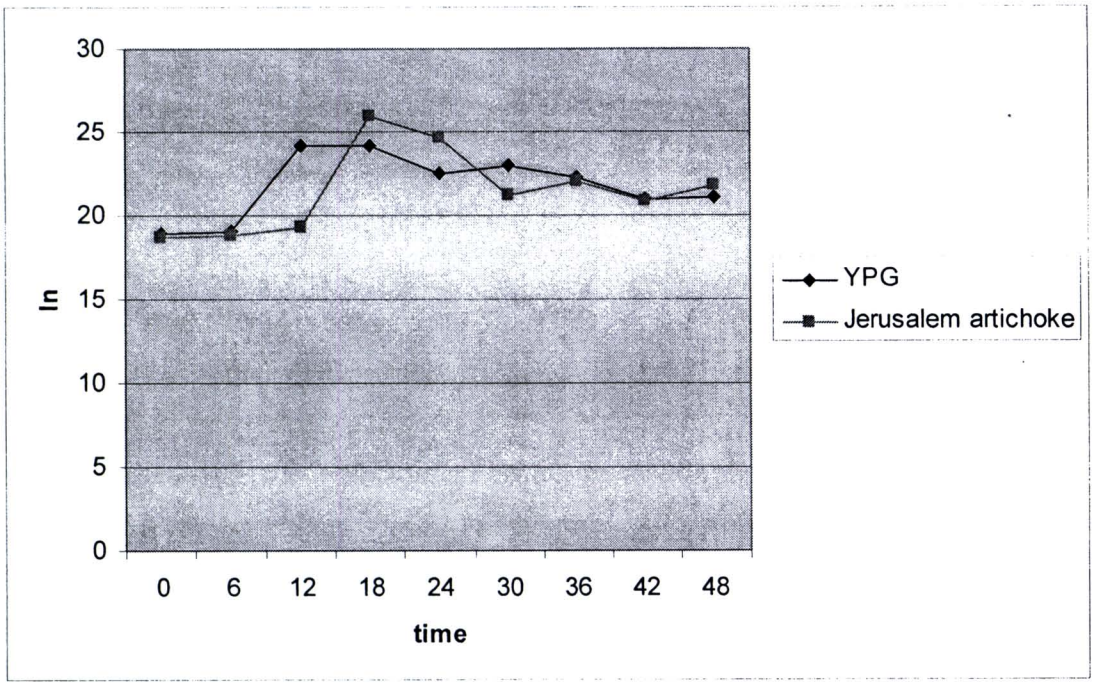
จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันมีค่าความเป็นกรดด่าง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลของเชื้อแบคทีเรีย *Z.mobilis* สำหรับปริมาณของอินูลินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลฟรุคโตสและกลูโคส เชื้อไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงจำเป็นต้องย่อยสลายให้กลายเป็นน้ำตาลที่สามารถหมักได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ซึ่งเชื้อสามารถใช้ได้โดยตรง จากข้อมูลนี้นำมาซึ่งการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบก่อนการหมักเอทานอลโดยเชื้อ *Z.mobilis* TISTR 548 ต่อไป

4.2 การศึกษาการเจริญของ *Z. mobilis* TISTR 548 ในอาหารสูตร YPG และน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน

เมื่อเลี้ยง *Z. mobilis* TISTR 548 ในอาหารสูตร YPG และน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันพร้อมหมักและติดตามผลของการเจริญเติบโตด้วยวิธีการนับจำนวนเซลล์โดยตรง พบว่า *Z. mobilis* TISTR 548 ที่เลี้ยงในอาหารสูตร YPG มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 ถึงชั่วโมงที่ 30 ซึ่งเป็นระยะที่มีการเจริญเติบโตสูงสุด (exponential phase) หลังจากชั่วโมงที่ 30 การเจริญเริ่มลดลงซึ่งเป็นระยะที่มีการตายของเซลล์เกิดขึ้น (dead phase) เนื่องจากเป็นระยะที่ถูกจำกัดด้วยปริมาณของสารอาหารหรือการสะสมของสารเมทาบอไลท์ต่างๆ ที่อาจทำให้อัตราการเจริญของเซลล์ลดลง ส่วน *Z. mobilis* TISTR 548 ที่เลี้ยงในน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันพร้อมหมักพบว่าแบคทีเรียมีระยะการปรับตัว (lag phase) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 ถึงชั่วโมงที่ 12 ซึ่งเป็นระยะที่แบคทีเรียมีการปรับสภาพให้เข้ากับแหล่งอาหารใหม่ หรือน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน เนื่องจากกล้าเชื้อตั้งต้นถูกเลี้ยงใน YPG มาก่อน แบคทีเรียที่เลี้ยงใน YPG ไม่พบระยะการปรับตัวนี้เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการปรับตัวให้เข้ากับแหล่งอาหารใหม่ หลังจากชั่วโมงที่ 12 แบคทีเรียที่เลี้ยงในน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 30 หลังจากนั้นการเจริญเติบโตของเซลล์เริ่มลดลง (ภาพที่ 4.1)

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ_{max}) ของ *Z. mobilis* TISTR 548 ในอาหาร YPG มีค่าเท่ากับ 0.84 (คิดที่ 18 ถึง 24 ชั่วโมง) และในน้ำสกัดจากแก่นตะวันมีค่าเท่ากับ 1.12 (คิดที่ 18 ถึง 24 ชั่วโมง) จากค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดสามารถใช้เป็นแนวทางในการคำนวณหาอัตราการเจือจางของเชื้อแบคทีเรียตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการหมักต่อไป

เมื่อทำการวัดการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Z. mobilis* TISTR 548 ด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสง(A_{550}) ในอาหารสูตร YPG และน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันพร้อมหมักพบว่า *Z. mobilis* TISTR 548 ที่เลี้ยงในอาหารสูตร YPG มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง สำหรับ *Z. mobilis* TISTR 548 ที่เลี้ยงในน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันไม่สามารถวัดการเจริญและหาอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ_{max}) ด้วยวิธีนี้ได้เนื่องจากในน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันมีสารแขวนลอยอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีผลกระทบต่อการวัดค่าการดูดกลืนแสงทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงจึงใช้เฉพาะวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์โดยตรง



ภาพที่ 4.1 กราฟการเจริญของเลี้ยง *Z.mobilis* TISTR 548 ในอาหารเหลวสูตร YPG (■) น้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน (◆) โดยวิธีนับจำนวนเซลล์โดยตรง (plate count)

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ) ของ *Z.mobilis* TISTR 548 เมื่อเลี้ยงในอาหารเหลวYPG และในน้ำสกัดหัวแก่นตะวันพร้อมหมัก

อาหารเพาะเลี้ยง	ค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด
YPG	0.84
น้ำสกัดหัวแก่นตะวันพร้อมหมัก	1.12

4.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน

4.3.1 การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการหมัก

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ น้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส น้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับน้ำคั้นที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของน้ำคั้นที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 17.8 องศาบริกซ์ ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 19.5, 21.5, 22.3 และ 21.7 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับสภาพน้ำคั้นมีส่วนช่วยให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 195 - 209 กรัมต่อลิตร การที่ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่ามากหรือน้อยกว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (เมื่อเปรียบเทียบในหน่วยกรัมต่อลิตร) เนื่องมาจากสีของน้ำคั้น

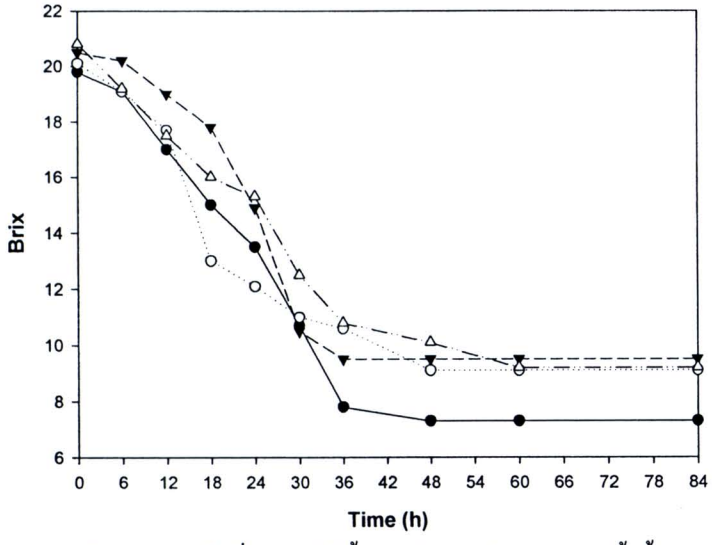
แก่นตะวันสามารถดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับที่ใช้วัดปริมาณน้ำตาลทั้งหมด จึงทำให้ค่าน้ำตาลที่วัดได้ทั้งหมดถูกรบกวน

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำคั้นที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ (น้ำตาลรีดิวส์ มีค่าเท่ากับ 34.08 กรัมต่อลิตร) และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ใกล้เคียงกันคือ 141.08 และ 140.77 กรัมต่อลิตร และมีค่ามากกว่าน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (มีค่าเท่ากับ 123.08 กรัมต่อลิตร) และเอนไซม์อินูลิเนส (มีค่าเท่ากับ 49.85 กรัมต่อลิตร) ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Szambelan และคณะ (2004) กล่าวคือการปรับสภาพน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันด้วยเอนไซม์อินูลิเนสให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมาน้อยกว่าการปรับสภาพน้ำคั้นด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น โดยน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 162.4-182.1 กรัมต่อลิตร และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนสให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 73.5-85.6 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้แล้วการปรับสภาพน้ำคั้นยังส่งผลให้ปริมาณของอินูลินลดลงด้วย น้ำคั้นที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณของอินูลินเท่ากับ 131.52 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดหรือเอนไซม์มีปริมาณของอินูลินลดลงเหลือ 21.36-119.71 กรัมต่อลิตร เนื่องจากการปรับสภาพน้ำคั้นไปช่วยให้โครงสร้างของอินูลินถูกเปลี่ยนสภาพไปอยู่ในรูปของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น

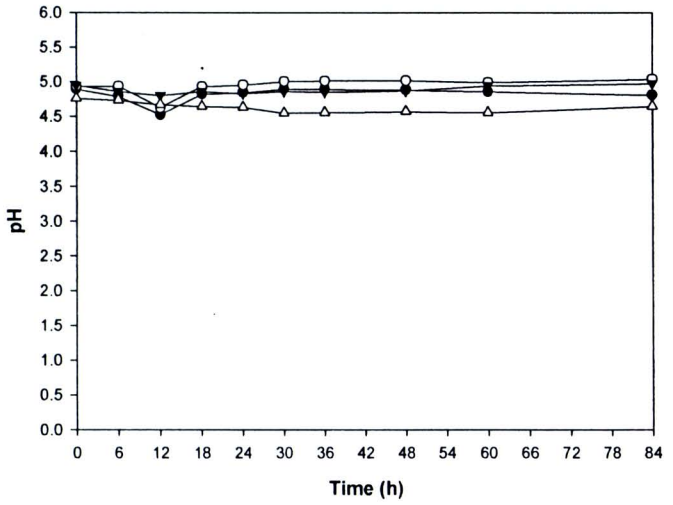
เมื่อนำน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพแต่ละสภาวะไปทดสอบการหมักเพื่อผลิตเอทานอลด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Z.mobilis* TISTR 548 โดยกำหนดให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นเท่ากับ 5.0 ปริมาณเชื้อเริ่มต้น (inoculum size) 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และติดตามการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมัก พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาในการหมักเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 36 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-ด่างในระหว่างการหมักอยู่ในช่วง 4.65-4.97 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ตั้งแต่เริ่มกระบวนการหมักและเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 30-36 ชั่วโมงจนสิ้นสุดกระบวนการหมัก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ตั้งแต่เริ่มการหมักและเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 36 ชั่วโมง และความเข้มข้นของเอทานอลในระหว่างกระบวนการหมักค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นและเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 36 ชั่วโมง โดยน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผลิตเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 53.96 กรัมต่อลิตร ที่เวลาการหมัก 84 ชั่วโมง รองลงมาคือน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (53.56 กรัมต่อลิตร) น้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (32.35 กรัมต่อลิตร) และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (22.44 กรัมต่อลิตร) ตามลำดับ (ภาพที่ 4.2 - 4.6)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวัน ก่อนและหลังผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ

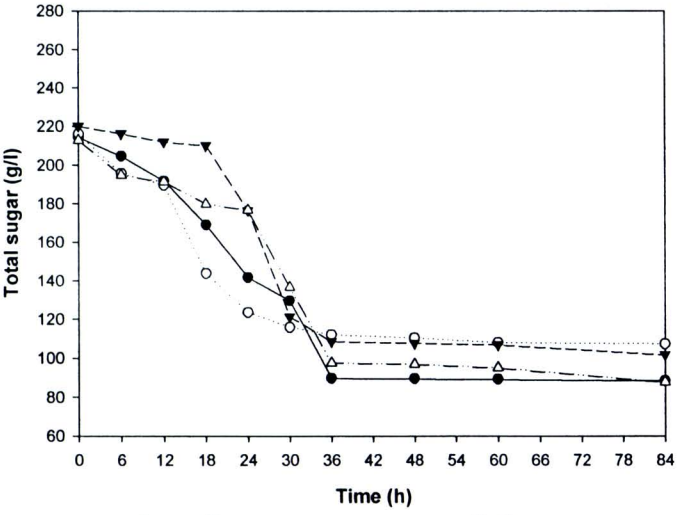
องค์ประกอบของน้ำคั้นแก่นตะวัน	ไม่ปรับสภาพ	สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำคั้นแก่นตะวัน			
		เอนไซม์อินูลิเนส	กรดที่อุณหภูมิ 60°C	กรดที่อุณหภูมิ 80°C	กรดที่อุณหภูมิ 100°C
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	17.8±0.28	19.5±0.71	21.5±0.71	22.3±0.42	21.7±0.99
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	198.75±0.37	202.92±9.94	206.82±0.74	209.43±1.47	195.10±3.31
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	34.08±4.46	49.85±2.83	123.08±2.18	141.08±2.39	140.77±4.57
ปริมาณอินูลิน (กรัมต่อลิตร)	131.52±4.11	119.71±6.62	50.19±1.48	34.67±0.99	21.36±1.42
ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (กรัมต่อลิตร)	1.06±0.02	1.70±0.14	1.12±0.29	1.20±0.26	1.24±0.05



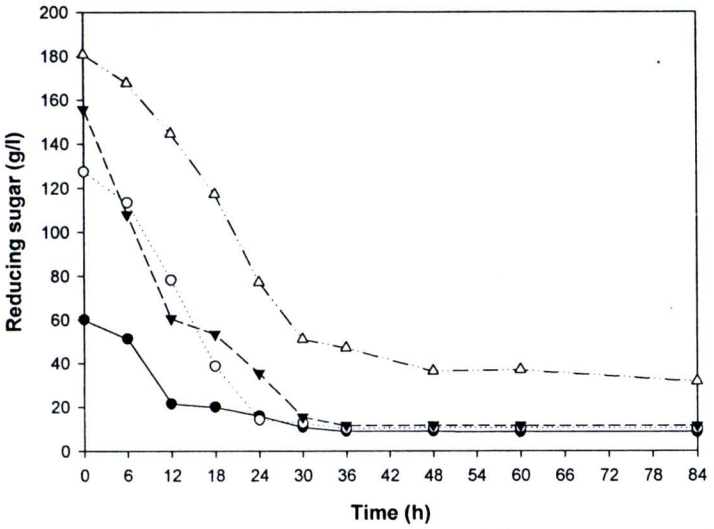
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○), 80 องศาเซลเซียส (▼) และ 100 องศาเซลเซียส (△)



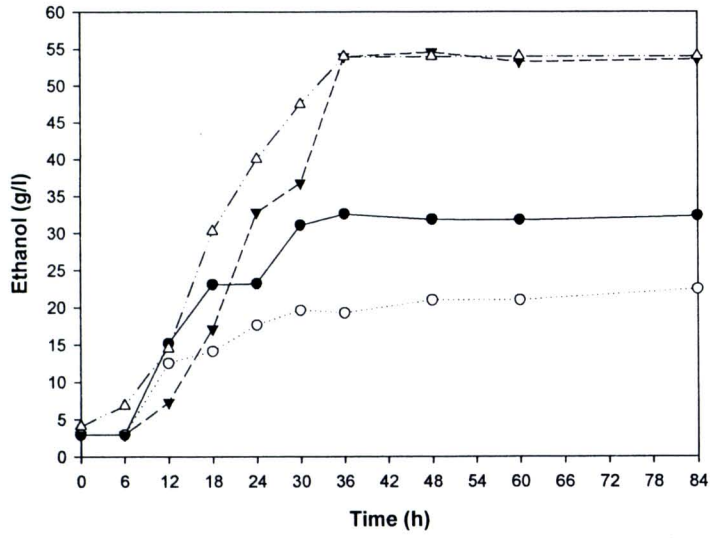
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)



ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส (●) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (○) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (▼) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (△)

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบและ พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ด้วยเชื้อ *Z. mobilis*

องค์ประกอบ/ พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์	สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน			
	เอนไซม์อินูลิเนส	กรดที่ อุณหภูมิ 60°C	กรดที่ อุณหภูมิ 80°C	กรดที่ อุณหภูมิ 100°C
ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)	84	84	84	84
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเริ่มต้น (องศาบริกซ์)	19.8±1.13	20.1±0.14	20.5±0.71	20.8±0.28
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	60.08±16.64	127.38±1.09	155.69±0.65	157.21±22.44
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	214.41±20.34	215.88±1.19	220.03±2.21	212.69±1.10
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสุดท้าย(กรัมต่อลิตร)	88.40±9.65	107.16±12.02	101.58±1.92	87.52±20.62
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้(กรัมต่อลิตร)	126.02±10.69	108.72±10.83	118.45±4.12	125.17±21.73
ความเข้มข้นของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	4.10±0.0	2.84±0.25	6.79±0.21	6.84±0.49
ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	32.35±0.01	22.44±1.96	53.56±1.63	53.96±3.91
อัตราผลผลิตของเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.39±0.1	0.27±0.02	0.64±0.02	0.64±0.05
ผลได้ของเอทานอล (กรัมของเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้)	0.26±0.02	0.21±0.00	0.45±0.00	0.43±0.11
ผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)	50.33±4.27	40.47±0.50	88.66±0.38	84.53±21.11

จากผลการทดลองพบว่าในทุกๆ สภาวะของการทดลอง แบคทีเรียมีการใช้น้ำตาลในการเจริญและผลิตเอทานอล ทำให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวส์ทั้งสองชนิดนี้ลดลง นอกจากนี้ปริมาณที่ใช้ก็มีความแตกต่างกันด้วย ซึ่งการหมักในแต่ละสภาวะให้ผลได้ของเอทานอล และอัตราการผลิตเอทานอลต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการหมักแบบกะในระดับฟลาสก์ น้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ผลได้ของเอทานอลสูงที่สุดคือ 0.45 กรัมของเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ รองลงมาคือการหมักน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส น้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.43 0.26 และ0.21 กรัมของเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ตามลำดับ ส่วนอัตราผลผลิตของเอทานอลนั้นพบว่าน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดเท่ากันคือ 0.64 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง รองลงมาคือการหมักน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าอัตราผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.39 และ 0.27 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎีน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่

อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ค่าสูงที่สุดคือ 88.66 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือการหมักน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส น้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์อินูลิเนส และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 84.53, 50.33 และ 40.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ และน้ำคั้นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับสภาพน้ำคั้นด้วยกรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สามารถทำได้สะดวกกว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองเพื่อศึกษาหาค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นของน้ำคั้นและปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ใช้ในการหมัก จึงเลือกใช้วิธีการปรับสภาพน้ำคั้นด้วยกรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

4.3.2 การศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณเชื้อเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของสูตรอาหารที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล

จากการศึกษาผลของความเป็นกรดด่างและปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นพบว่าน้ำคั้นที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีการลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเร็วกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ โดยที่ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักเริ่มต้นเท่ากับ 5.0 และ 6.0 มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดดังนี้คือชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเริ่มลดลงที่เวลาการหมักเท่ากับ 36 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเริ่มลดลงที่เวลาการหมักเท่ากับ 6 ชั่วโมง และเริ่มคงที่ที่เวลาการหมักเท่ากับ 66 ชั่วโมง ส่วนชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเริ่มลดลงตั้งแต่เริ่มกระบวนการหมัก และเริ่มคงที่ที่เวลาการหมักผ่านไป 42 ชั่วโมง ในกรณีของน้ำคั้นที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 7.0 มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดน้อยและช้ามากเมื่อเทียบกับที่ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นอื่น ชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้คล้ายกันคือที่เวลาการหมักเท่ากับ 36 ชั่วโมง มีการลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนที่มีการเติมกล้าเชื้อเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเริ่มลดลงที่เวลาการหมักเท่ากับ 30 ชั่วโมง และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 60 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.7)

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดด่างในระหว่างการหมักพบว่าค่าความเป็นกรดด่างในทุกสภาวะของการทดลองมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น และเมื่อสิ้นสุดการหมักค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักมีค่าอยู่ในช่วง 4.25-4.84 (ภาพที่ 4.8) สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักมีค่าลดลงอาจเนื่องจากเชื้อ *Z. mobilis* มีการผลิตกรดซึ่งสารเมทาบอไลท์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดในระหว่างการหมัก

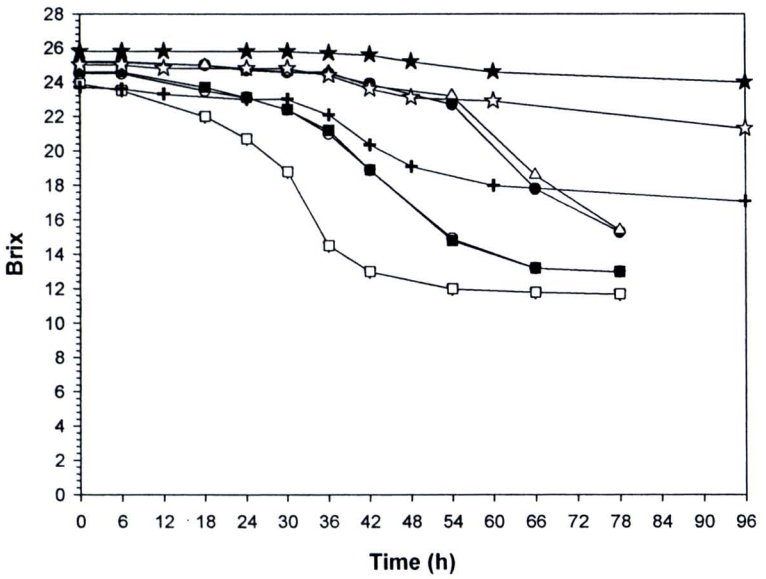
ภาพที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการลดลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ มีการลดลงเร็วกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 และ 6.0 มีแนวโน้มการลดลงของ

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เร็วกว่าชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ในชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 และ 6.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการลดลงอย่างช้าๆ และน้อยมากเมื่อเทียบกับสภาวะที่มีการเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับในชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 การเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวส์น้อยมากที่ระยะเวลาของการหมักเท่ากับ 36 ชั่วโมง ส่วนสภาวะที่มีการเติมกล้าเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเริ่มลดลงที่เวลาการหมักเท่ากับ 30 ชั่วโมง และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 60 ชั่วโมง

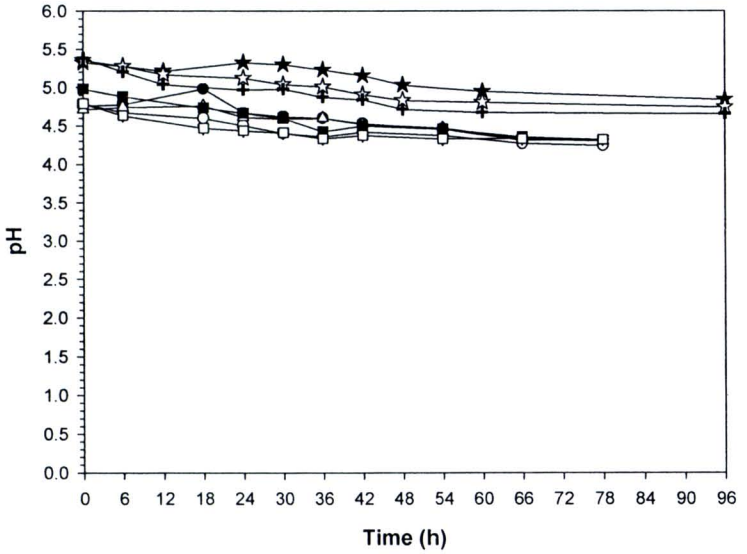
ภาพที่ 4.11 แสดงปริมาณของเอทานอลที่ผลิตได้ จากข้อมูลจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมารการลดลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวส์ โดยพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 และ 6.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเอทานอลสูงที่สุด รองลดลงคือชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 และ 6.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับชุดการทดลองที่มีปริมาณเอทานอลน้อยที่สุดคือชุดการทดลองที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 หรือ 6.0 เป็นสภาวะที่ดีและเหมาะสมต่อการเจริญและการผลิตเอทานอลมากกว่าสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของ Swings และ DeLey (1977) ที่รายงานว่าเชื้อแบคทีเรีย *Zymomonas mobilis* สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในช่วงความเป็นกรดด่าง 5.0-6.0

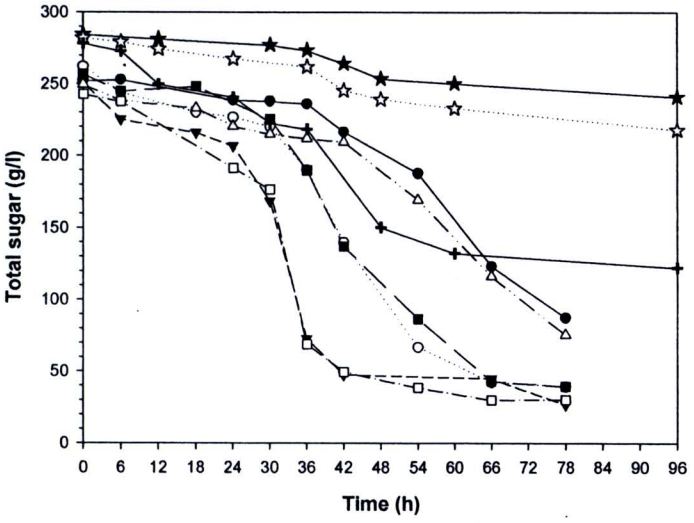
ส่วนปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นที่ใช้นั้นเห็นได้ว่ามีผลอย่างมากต่อการผลิตเอทานอลโดยพบว่าการใช้ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีอัตราการใช้น้ำตาล และอัตราการผลิตเอทานอลสูงกว่าการใช้กล้าเชื้อเริ่มต้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



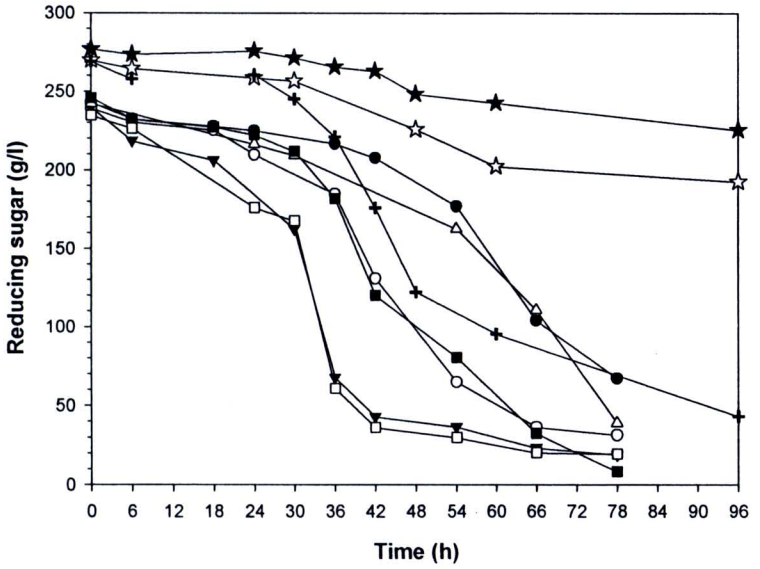
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร: ● pH 5.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ○ pH 5.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ▼ pH 5.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); △ pH 6.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ■ pH 6.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); □ pH 6.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); ★ pH 7.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ☆ pH 7.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ✚ pH 7.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v)



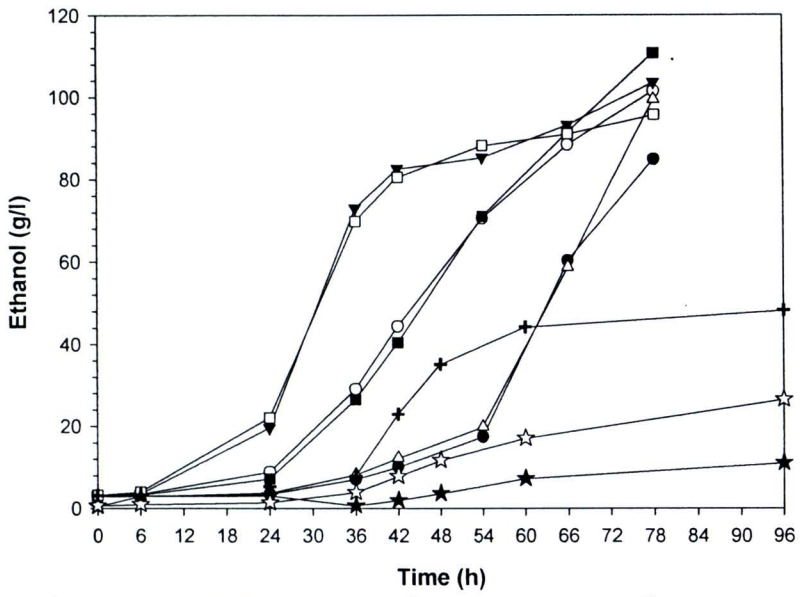
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร: ● pH 5.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ○ pH 5.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ▼ pH 5.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); △ pH 6.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ■ pH 6.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); □ pH 6.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); ★ pH 7.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ☆ pH 7.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ✚ pH 7.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v)



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร: ● pH 5.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ○ pH 5.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ▼ pH 5.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); △ pH 6.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ■ pH 6.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); □ pH 6.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); ★ pH 7.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ☆ pH 7.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ✚ pH 7.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v)



ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร: ● pH 5.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ○ pH 5.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ▼ pH 5.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); △ pH 6.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ■ pH 6.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); □ pH 6.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); ★ pH 7.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ☆ pH 7.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ✚ pH 7.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v)



ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น 5.0, 6.0 และ 7.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร: ● pH 5.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ○ pH 5.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ▼ pH 5.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); △ pH 6.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ■ pH 6.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); □ pH 6.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v); ★ pH 7.0, กล้าเชื้อ 1 % (v/v); ☆ pH 7.0, กล้าเชื้อ 5 % (v/v); ✚ pH 7.0, กล้าเชื้อ 10 % (v/v)

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นแตกต่างกัน

องค์ประกอบ/พารามิเตอร์ทางจลน-พลศาสตร์	**ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เริ่มต้น**								
	5.0			**6.0**			**7.0**		
	ปริมาณเชื้อเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)			**ปริมาณเชื้อเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)**			**ปริมาณเชื้อเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)**		
	1	**5**	**10**	**1**	**5**	**10**	**1**	**5**	**10**
ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)	78	78	78	78	78	78	96	96	96
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	270.10 ± 5.12	262.1 ± 7.81	250.67 ± 1.89	282.29 ± 0.81	275.81 ± 0.81	264.00 ± 0.81	284.67 ± 8.35	281.90 ± 7.27	278.29 ± 9.70
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการหมัก (กรัมต่อลิตร)	123.24 ± 8.75	39.24 ± 2.29	26.86 ± 3.10	61.81 ± 2.15	40.38 ± 2.83	41.02 ± 1.58	240.86 ± 21.21	189.14 ± 7.07	122.29 ± 14.34

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ (กรัมต่อลิตร)	188.76 ±3.64	222.86 ± 10.10	223.81 ±4.98	220.48 ±9.54	235.43 ±2.02	223.30 ±0.77	43.71 ±12.86	92.76 ±0.20	146.00 ±4.65
ความเข้มข้นของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	10.54 ± 0.29	12.49 ± 0.52	13.21 ± 0.11	10.83 ± 0.35	12.62 ± 0.15	12.97 ± 0.10	1.41 ± 0.01	3.35 ± 0.23	6.12 ± 0.96
ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	83.18 ± 2.30	98.53 ± 4.07	104.20 ± 0.90	85.49 ± 2.72	99.56 ± 1.19	102.38 ± 0.78	11.11 ± 0.00	26.44 ± 1.80	48.28 ± 7.50
อัตราผลผลิตของเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	1.09 ± 0.03	1.30 ± 0.06	1.30 ± 0.01	1.07 ± 0.08	1.28 ± 0.01	1.31 ± 0.00	0.12 ± 0.00	0.28 ± 0.02	0.51 ± 0.08
ผลได้ (yield) ของเอทานอล (กรัมของเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้)	0.45 ± 0.00	0.46 ± 0.01	0.47 ± 0.01	0.39 ± 0.01	0.42 ± 0.00	0.46 ± 0.00	0.25 ± 0.06	0.28 ± 0.02	0.30 ± 0.03
ผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)	88.09 ± 0.69	89.24 ± 0.46	90.77 ± 2.81	76.04 ± 3.45	82.92 ± 0.28	89.9 ± 0.37	52.0 ± 15.32	55.88 ± 3.70	60.57 ± 7.73

จากการเปรียบเทียบค่าทางจลนพลศาสตร์การหมัก พบว่าสภาวะการหมักที่ปรับค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นของน้ำหมักเป็น 5.0 ร่วมกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรให้ผลได้ของเอทานอลสูงที่สุดเท่ากับ 0.47 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ รองลงมาคือสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) น้ำสกัดหัวแก่นตะวันที่ปรับค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6.0 ร่วมกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีอัตราการผลิตเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 1.31 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง รองลงมาคือ สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 10

เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ สำหรับผลได้ของเอทานอลในทางทฤษฎีพบว่าสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 90.77 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 6.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสภาวะความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.0 ร่วมกับเชื้อเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ(ตารางที่ 4.5)

เนื่องจากสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 5.0 และใช้เชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะนี้ในการศึกษาทดลองในลำดับต่อไป

4.3.3 การศึกษาหาปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันในการผลิตเอทานอล

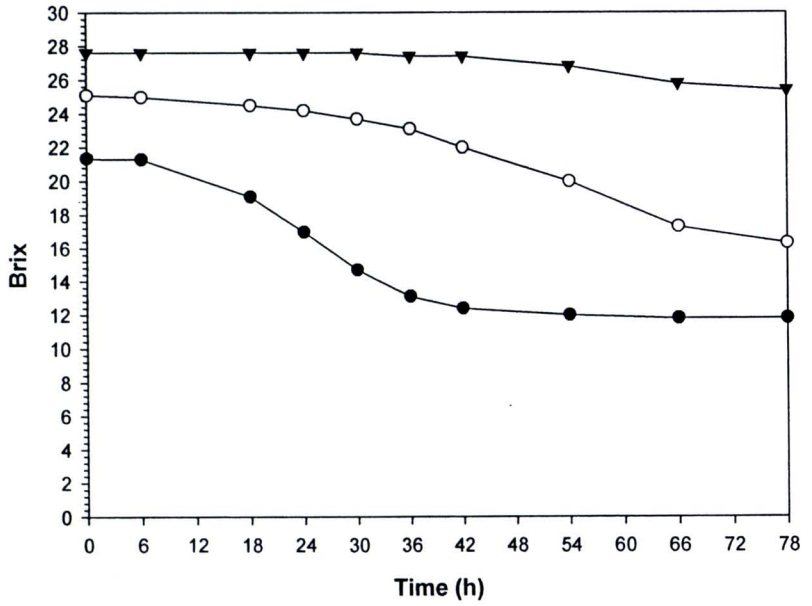
จากการศึกษาหาปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมักพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของน้ำสกัดหัวแก่นตะวันที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเริ่มกระบวนการหมักและเริ่มคงที่ที่เวลาการหมักเท่ากับ 42 ชั่วโมง ซึ่งการลดลงนี้เกิดขึ้นได้เร็วและลดลงมากกว่าในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 275 และ 300 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 275 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาการหมักเท่ากับ 6 ชั่วโมง สำหรับสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 300 กรัมต่อลิตร ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการหมัก (ภาพที่ 4.12)

ในระหว่างการหมัก ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำหมักในทุกสภาวะการทดลองมีแนวโน้มลดลง และมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4.45-4.83 เมื่อสิ้นสุดการหมัก (ภาพที่ 4.13)

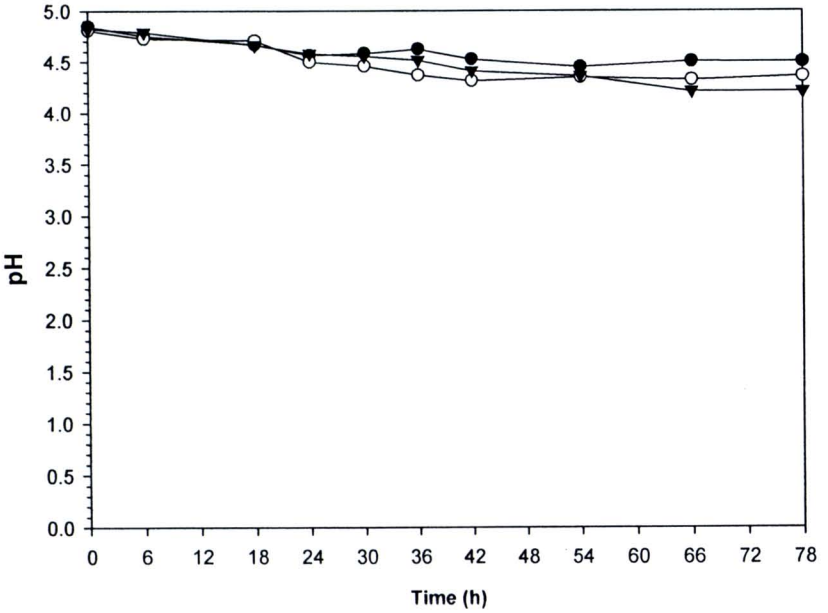
ภาพที่ 4.14 และ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมัก จากข้อมูลพบว่าในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ที่เวลาการหมักเท่ากับ 42 ชั่วโมง ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 275 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการลดลงอย่างช้าๆ ส่วนในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 300 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อมีการใช้น้ำตาลเพื่อการเจริญและการผลิตเอทานอลน้อยมาก

ภาพที่ 4.16 แสดงปริมาณของเอทานอลที่ผลิตได้ โดยพบว่าในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้สูงที่สุดเท่ากับ 73.82 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาของการหมัก 78 ชั่วโมง รองลงมาคือในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 275 กรัมต่อลิตร และ 300 กรัมต่อลิตร โดยมีค่าความเข้มข้นของเอทานอล

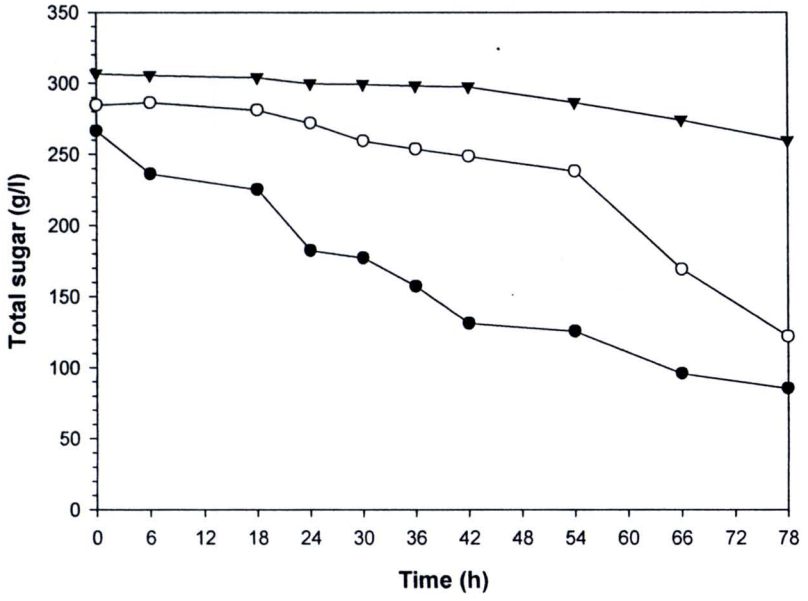
เท่ากับ 64.04 และ 16.44 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ



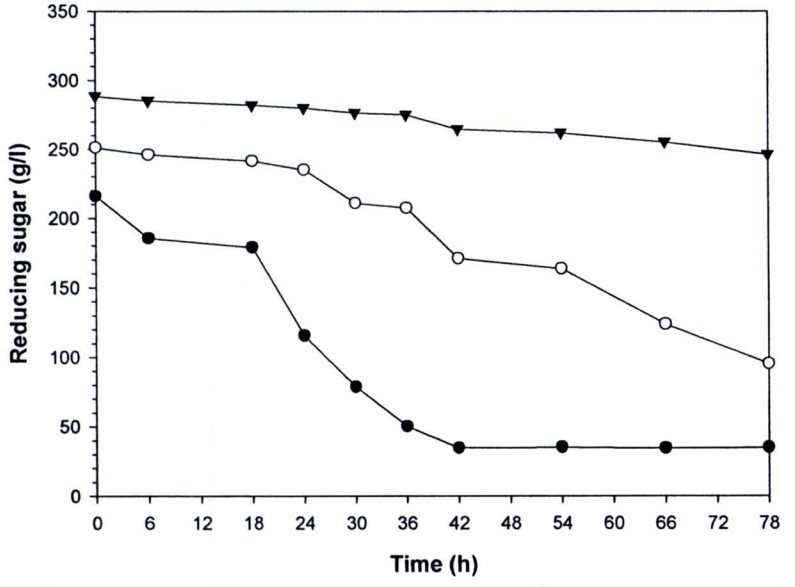
ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร : ● 250 (g/l); ○ 275 (g/l); ▼ 300 (g/l)



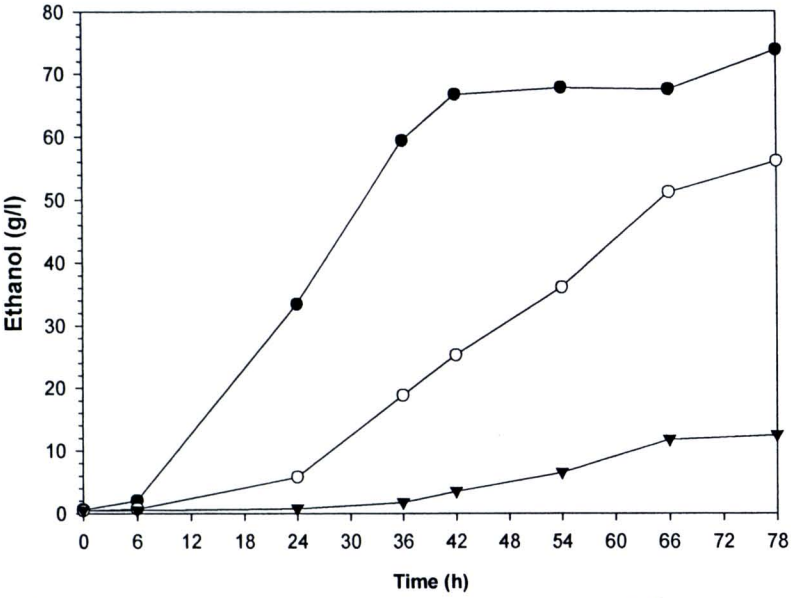
ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร : ● 250 (g/l); ○ 275 (g/l); ▼ 300 (g/l)



ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร: ● 250 (g/l); ○ 275 (g/l); ▼ 300 (g/l)



ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร: ● 250 (g/l); ○ 275 (g/l); ▼ 300 (g/l)



ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร: ● 250 (g/l); ○ 275 (g/l); ▼ 300 (g/l)

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มี ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250, 275 และ 300 กรัมต่อลิตร

องค์ประกอบ / พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์	ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวัน (กรัมต่อลิตร)		
	250	**275**	**300**
ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)	78	78	78
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	266.48±0.12	284.64±0.84	306.67±3.03
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการหมัก (กรัมต่อลิตร)	85.52±4.18	122.38±5.12	259.76±0.67
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ (กรัมต่อลิตร)	180.95±18.72	162.27±5.96	46.91±2.35
ความเข้มข้นของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	9.35±0.81	7.11±0.26	1.58±0.14
ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	73.82±6.42	64.04±2.09	16.44±0.01
อัตราผลผลิตของเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.95±0.08	0.72±0.03	0.16±0.01
ผลได้ของเอทานอล (กรัมของเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้)	0.41±0.01	0.35±0.03	0.27±0.01
ผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)	80.06±1.33	67.94±5.01	52.16±2.05

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าองค์ประกอบและค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันโดยใช้ *Z. mobilis* ด้วยวิธีการหมักแบบกะในระดับฟลาสก์ จากข้อมูลพบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้สูงที่สุด มีค่าผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.41 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ มีอัตราผลผลิตเอทานอล 0.95 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎี

เท่ากับ 80.06 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 275 กรัมต่อลิตรให้ผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.35 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ มีอัตราผลผลิตเอทานอล 0.72 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎีเท่ากับ 67.94 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 300 กรัมต่อลิตรให้ผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 0.27 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ มีอัตราผลผลิตเอทานอล 0.16 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎีเท่ากับ 52.16 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลข้างต้นประกอบกับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นในหัวแก่นตะวันมีค่าใกล้เคียง 250 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะที่มีการปรับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250 กรัมต่อลิตร สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป

4.3.4 การศึกษาแหล่งของไนโตรเจนและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล

จากการศึกษาถึงแหล่งของไนโตรเจนทั้งสิ้น 4 แหล่งคือ ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต แอมโมเนียมไนเตรท แอมโมเนียมซัลเฟต และยูเรีย ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 กรัมต่อลิตร ต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันโดยใช้ *Z. mobilis* ด้วยวิธีการหมักแบบกะในระดับฟลาสก์ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ในระหว่างการหมัก เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ของการหมัก พบว่าการผลิตเอทานอลจะแปรผันไปตามชนิดและความเข้มข้นของแหล่งไนโตรเจนที่ใช้ โดยพบว่าการใช้ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และแอมโมเนียมไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจน มีแนวโน้มช่วยให้ *Z. mobilis* สามารถผลิตเอทานอลได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแหล่งไนโตรเจนชนิดอื่น หรือชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเติมแหล่งไนโตรเจนเสริม นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของแหล่งไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเป็นพิษของแหล่งไนโตรเจนในระดับที่สูงเกินไป ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้คือ 95.9 กรัมต่อลิตรเมื่อใช้แอมโมเนียมไนเตรทความเข้มข้น 0.50 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน รองลงมาคือการใช้ไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้น 0.50 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 95.6 กรัมต่อลิตร สำหรับแหล่งไนโตรเจนที่ให้ปริมาณเอทานอลต่ำสุดคือ ยูเรีย (ตารางที่ 4.7) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในครั้งนี้สอดคล้องกับรายงานของ Swing and Delay (1977) นอกจากนี้ผลการวิจัยในครั้งนี้ยังชี้ให้เห็นว่าถึงแม้ในน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันจะมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบแต่ปริมาณที่พบในวัตถุดิบอาจจะไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการเจริญและการผลิตเอทานอล ดังนั้นการเติมแหล่งไนโตรเจนเสริมลงไปในอาหารที่ใช้ในการหมักเอทานอลจึงช่วยส่งเสริมให้ *Z. mobilis* สามารถผลิตเอทานอลได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณเอทานอลในชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเสริมแหล่งไนโตรเจน

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่แปรผันชนิดและความเข้มข้นของแหล่งไนโตรเจนที่ระดับต่างๆ กัน

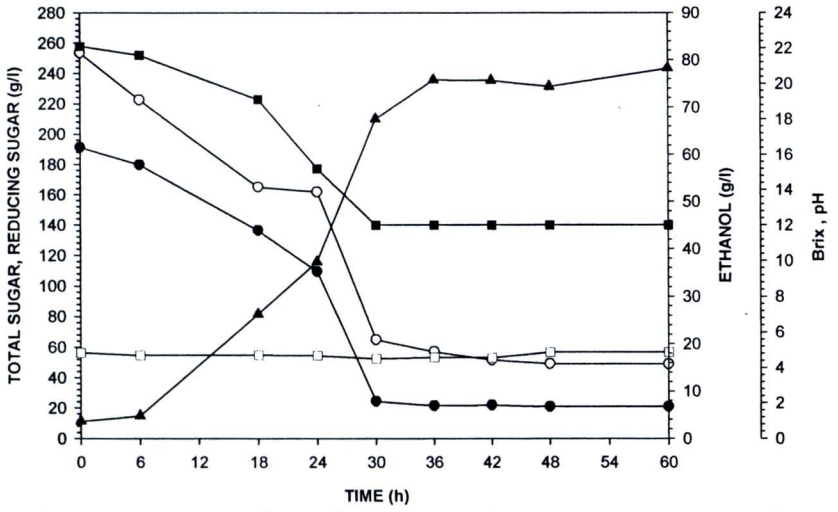
แหล่งของไนโตรเจน	ความเข้มข้นของไนโตรเจน (g/L)	ค่าจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอล		
		P (g/L)	*Yps* (g/g)	*Qp* (g/L.h)
Control	0	90.2±2.28	0.39±0.02	1.82±0.51
Diammonium phosphate	0.25	91.9±4.05	0.42±0.11	1.91±0.23
	0.50	95.6±3.52	0.44±0.20	1.99±0.32
	0.75	88.5±3.09	0.43±0.06	1.84±0.09
	1.00	86.2±2.98	0.40±0.05	1.80±0.12
Ammonium nitrate	0.25	92.4±1.27	0.44±0.13	1.92±0.22
	0.50	95.9±3.02	0.50±0.08	1.93±0.13
	0.75	93.6±4.50	0.50±0.20	1.95±0.40
	1.00	92.8±2.01	0.46±0.12	1.92±0.06
Ammonium sulfate	0.25	75.6±1.16	0.27±0.09	1.57±0.13
	0.50	80.0±2.09	0.47±0.16	1.67±0.22
	0.75	82.7±1.87	0.43±0.06	1.72±0.09
	1.00	81.1±2.00	0.44±0.17	1.69±0.18
Urea	0.25	79.4±2.45	0.41±0.21	1.65±0.34
	0.50	76.0±0.95	0.38±0.18	1.58±0.19
	0.75	75.6±1.07	0.37±0.08	1.57±0.11
	1.00	70.7±2.24	0.37±0.02	1.47±0.06

P, ความเข้มข้นของเอทานอล (g/L); *Yps*, ผลได้; Q_p, อัตราการผลิตเอทานอล (g/L.h)

4.4 การศึกษาการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันโดยใช้ *Z. mobilis* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 5 ลิตร ด้วยวิธีการหมักแบบกะ

จากการนำสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากผลการศึกษาในระดับฟลาสก์ไปทดสอบการผลิตเอทานอลในระดับถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 5 ลิตร โดยเลือกใช้น้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปรับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 250 กรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเป็น 5.0 ใช้แอมโมเนียมไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจนที่ความเข้มข้น 0.50 กรัมต่อลิตร ใช้กล้าเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำการหมักโดยมีปริมาตรทำงาน (working volume) เท่ากับ 4 ลิตร และกำหนดอัตราการกวนที่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีการลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 30 ชั่วโมง การลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์พบว่ามีแนวโน้มการลดลงเช่นเดียวกันกับการลดลงของปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด การลดลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดพบว่ามีการลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มมีค่าคงที่ที่ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 48 ชั่วโมง และการเปลี่ยนแปลง

ของปริมาณเอทานอลพบว่ามีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 36 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 60 ชั่วโมง และค่าความเป็นกรดด่างตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 4.51-4.88 (ภาพที่ 4.17)



ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความเข้มข้นของเอทานอลในระหว่างการหมักน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันเพื่อผลิตเอทานอลในถังหมักขนาด 5 ลิตร โดยให้มีปริมาตรการทำงานเท่ากับ 4 ลิตร อัตราการกวนที่ 100 รอบต่อนาที : ● น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร); ○ น้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร); ■ ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (°Brix); □ ความเป็นกรด-ด่าง (pH); ▲ ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบและพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันที่ผ่านการแปรผันให้มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 ปรับให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นเป็น 5.0 และเติมกล้าเชื้อเริ่มต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

องค์ประกอบ/พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์	ค่าที่ได้
ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)	60
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	22.10±0.14
ค่าความเป็นกรดด่างเมื่อเริ่มต้นของน้ำคั้น	5.0
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	253±10.97
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการหมัก (กรัมต่อลิตร)	49.07±5.89
ความเข้มข้นของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์โดยปริตร)	9.92±0.14
ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	78.24±1.07
อัตราผลผลิตของเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	1.31±0.02
ผลได้ (yield) ของเอทานอล (กรัมของเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้)	0.39±0.01
ผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)	75.07±0.83

จากการศึกษาค่าทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำสกัดจากหัวแก่นตะวันนำบว่าผลได้ของเอทานอลมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.39 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ ผลิตเอทานอลสูงสุดมีค่า 1.31 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของเอทานอลในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 75.07 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.8)