

บทที่ 2

เนื้อเรื่อง

2.1 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

ยีสต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้คือ *Saccharomyces cerevisiae* NP 01 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ. ดร. ไพบุลย์ ด้านวิรุทธ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น นำยีสต์ที่เก็บไว้ในกลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์ มาเจือลงในจานอาหารร่วน YM (YM agar plate) ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 1-2 วัน เมื่อได้โคโลนีเดี่ยว นำเซลล์ยีสต์ที่ได้จากโคโลนีเดี่ยวไปเจือลงในหลอดอาหารร่วนเอียง (YM slant) และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 1-2 วัน เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

2.1.1.2 การเตรียมกล้าเชื้อเริ่มต้น

ถ่ายเชื้อยีสต์จากหลอดอาหารร่วนเอียงจำนวน 1 หลอด ใส่ในอาหารเหลว YM นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 16 – 18 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายยีสต์ลงในอาหารเหลว YM โดยมีปริมาณเชื้อเริ่มต้นในอาหารเหลว YM ประมาณ 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และเพาะเลี้ยงต่อในสถานะเดิมจนกระทั่งมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นประมาณ 10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (บ่ม 16 – 18 ชั่วโมง) จึงนำไปใช้เป็นกล้าเชื้อเริ่มต้นในกระบวนการหมักต่อไป

2.1.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์

- 1) แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC-14B, Shimadzu, Japan)
- 2) เครื่องผสมสาร (Vortex Mixer, G 560 E, Scientific Ins., New York, USA)
- 3) ตู้อบ (Hot air oven, F 240 WTE Binder, Germany)
- 4) เครื่องชั่ง (Balance, PT 1200, Sartorius, Germany)
- 5) เครื่องวัดพีเอช (pH meter, Cb 40, GMbH, Germany)
- 6) หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ (Autoclave, UM 65LVA, Thailand)

- 7) กล้องจุลทรรศน์ (Microscope, Olympus Optical Co, Japan)
- 8) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, RC 28 S, Sorvall, USA)
- 9) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, UV-1201, Shimadzu, Japan)
- 10) แผ่นให้ความร้อน (Hot plate, M 12/1, Franz MORA, France)
- 11) ฮีมาไซโตมิเตอร์ (Heamacytometer, Improved Neubauer Bright line, Boeco, West Germany)
- 12) เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Controller Incubator Shaker, G 10 Gyratory, New Brunswick Scientific Edison, USA)
- 13) ตู้ปลอดเชื้อ (Laminar air flow, BH 143, Gelman Sciences, Australia)
- 14) แชนรีแฟรคโตมิเตอร์ (Hand refractometer, Atago, Japan)
- 15) ถังหมักขนาด 2 ลิตร (2-L Fermenter, Biostat[®] B, B.Braun, Germany)
- 16) ถังหมักขนาด 5 ลิตร (5-L Fermenter, Biostat[®] B, B.Braun, Germany)
- 17) ถังกวนขนาด 50 ลิตร (50-L Stirred Tank Bioreactor, Sahachang, Thailand)

2.1.1.4 สารเคมี

- 1) Phenol 5 % (w/v) (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 2) H₂SO₄ conc. (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 3) Propanol 10 % (v/v) (HPLC grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 4) Ethanol 75 % (v/v) (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 5) Glucose (Commercial grade, Patar Limited Partnership, Thailand)
- 6) 3, 5 -dinitro salicylic acid (Analytical grade, Sigma, India)
- 7) NaOH (Analytical grade, Lab Scan, Thailand)
- 8) Sodium potassium tartrate (Analytical grade, Merck, Germany)
- 9) Yeast extract (Analytical grade, Himedia, India)
- 10) Malt extract (Analytical grade, Himedia, India)
- 11) Peptone (Analytical grade, Himedia, India)
- 12) Methylene blue (Analytical grade, UNIVAR, Australia)
- 13) Sodium citrate dehydrate (Analytical grade, UNIVAR, Australia)
- 14) MgSO₄.7H₂O (Analytical grade, Riedel_dehaen, Germany)
- 15) KH₂PO₄ (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 16) CaCl₂.2H₂O (Analytical grade, UNIVAR, England)

- 17) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 18) $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)
- 19) $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Analytical grade, Ajax, New Zealand)
- 20) HCl (Analytical grade, BDH Laboratory Supplies, England)

2.1.1.5 อาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อ YM (yeast extract malt extract) 1 ลิตร ประกอบด้วยยีสต์เอ็กซ์แทรก (yeast extract) 3 กรัมต่อลิตร มอลเอ็กซ์แทรก (malt extract) 3 กรัมต่อลิตร เปปโตน (peptone) 5.0 กรัมต่อลิตร กลูโคส 10 กรัมต่อลิตร ปรับพีเอชอาหารเลี้ยงเชื้อให้เป็น 5 โดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก

2.1.1.6 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการหมักเอทานอล

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำหวานที่คั้นได้จากลำต้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์ มข. 40 จากภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 18 องศาบริกซ์) จากนั้นนำน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่ได้มาเติวให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 75 องศาบริกซ์ น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้นที่ได้นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปใช้ ขั้นตอนการเตรียมน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้นแสดงดังรูปที่ 2.1 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการหมักเอทานอลทำโดยนำน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้นมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดหรือปริมาณน้ำตาลตามต้องการ โดยใช้ Hand refractometer นำไปนิ่งฆ่าเชื้อที่ 110 องศาเซลเซียส (เวลาที่ใช้นั้นขึ้นกับปริมาตรน้ำหมัก) ก่อนนำไปใช้ในการหมักเอทานอล

2.1.1.7 สารอาหารเสริมที่ใช้ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

- 1) ยีสต์เอ็กซ์แทรก (Analytical grade, Himedia, India)
- 2) เปปโตน (Analytical grade, Himedia, India)
- 3) กากเซลล์ยีสต์แห้ง (Dried spent yeast) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก เปียร์ ทิพย์ บรวิเวอร์รี่ (1991) จำกัด อ. บางบาล จ. พระนครศรีอยุธยา



ข้าวฟ่างหวาน



หีบ



น้ำคั้นข้าวฟ่างหวาน



เคี้ยว



น้ำคั้นถาดันข้าวฟ่างหวานเข้มข้น

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำคั้นถาดันข้าวฟ่างหวานเข้มข้น

2.1.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยมีรายละเอียดของการทดลองของแต่ละส่วนดังนี้

2.1.2.1 วิธีการทดลองส่วนที่ 1 : การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลโดยการหมักแบบต่อเนื่องในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานด้วย *Saccharomyces cerevisiae*

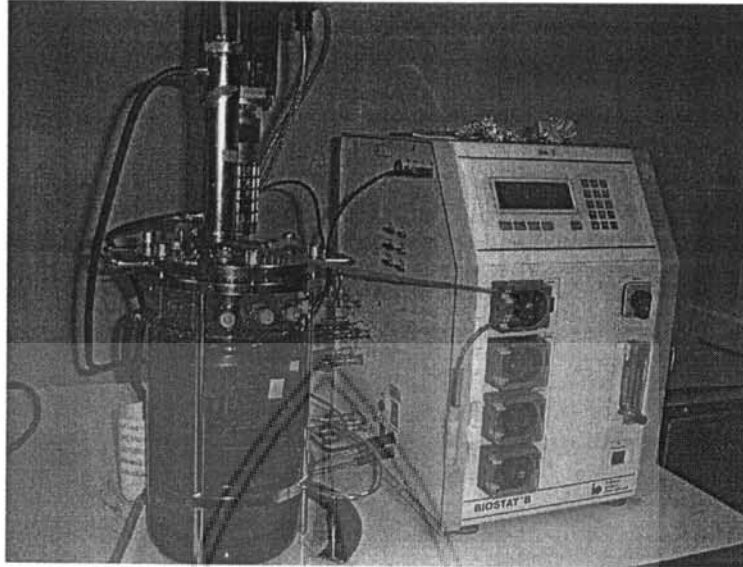
2.1.2.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบที่สำคัญในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน และน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้น (จากข้อ 2.1.1.6) ได้แก่

- (1) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยใช้ Hand refractometer (ภาคผนวกที่ 1)
- (2) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดย Phenol sulfuric (ภาคผนวกที่ 2)
- (3) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยวิธี 3,5-dinitrosalicylic acid (ภาคผนวกที่ 3)
- (4) ความเป็นกรดต่าง โดย pH meter
- (5) ปริมาณธาตุต่างๆ

2.1.2.1.2 การหาอัตราการเจริญและการผลิตเอทานอลของ *S. cerevisiae* ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการหมักแบบกะในถังหมักขนาด 2 ลิตร ที่มีการแปรผันจำนวนกล้าเชื้อเริ่มต้น

เลี้ยง *S. cerevisiae* NP 01 ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อที่มีความเข้มข้นของน้ำตาล 240 และ 280 กรัมต่อลิตร และเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยเลี้ยงในถังหมักขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วในการกวน 100 รอบต่อนาที (Laopaiboon และคณะ 2007) โดยแปรผันปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 , 1×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร หมักจนกว่าน้ำตาลในอาหารมีค่าคงที่ การหมักเอทานอลแบบกะในถังหมักขนาด 2 ลิตร แสดงดังรูปที่ 2.2 ในระหว่างกระบวนการหมัก เก็บตัวอย่างเป็นระยะเพื่อวิเคราะห์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ เอทานอล (โดยวิธี Gas chromatograph ดังภาคผนวกที่ 4) และจำนวนยีสต์ที่มีชีวิต (โดยวิธี Direct count method with methylene blue staining ดังภาคผนวกที่ 5) จากข้อมูลที่ได้คำนวณอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของยีสต์ที่สภาวะต่างๆ และคำนวณ และเปรียบเทียบความเข้มข้น ผลได้ และอัตราผลผลิตของเอทานอลที่ได้จากการหมัก



รูปที่ 2.2 การหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในถังหมักขนาด 2 ลิตร

2.1.2.1.3 การหาการเจริญและการผลิตเอทานอลของ *S. cerevisiae* ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อที่มีการเติมและไม่เติมแหล่งไนโตรเจนและมีความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการหมักแบบกะ ในถังหมักขนาด 2 ลิตร

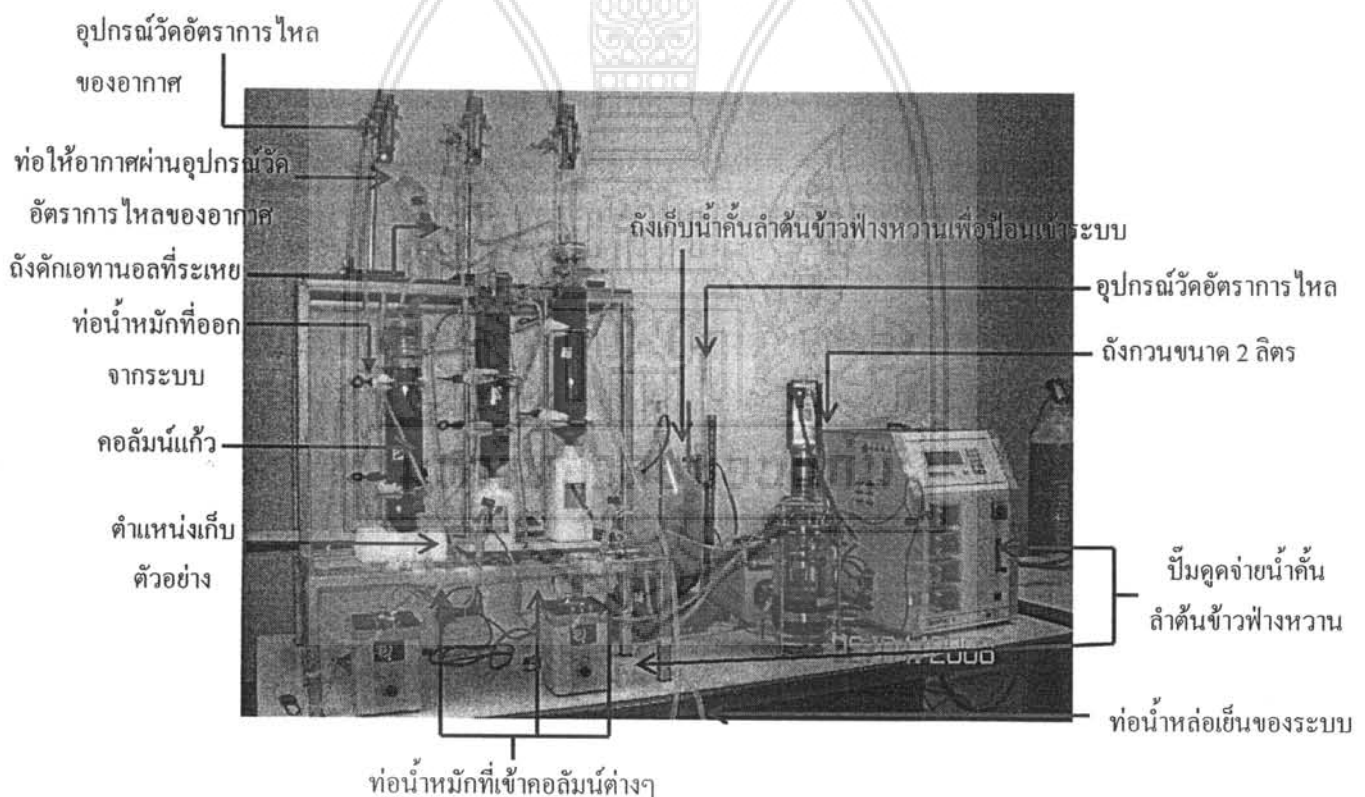
เลี้ยงยีสต์ *S. cerevisiae* NP 01 ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นของน้ำตาล 240 และ 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยเลี้ยงในถังหมักขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วในการกวน 100 รอบต่อนาที โดยใช้ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.1.2.1.2 หมักจนกว่าน้ำตาลในอาหารมีค่าคงที่ โดยในระหว่างการหมัก เก็บตัวอย่างวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ดังข้อ 2.1.2.1.2 จากนั้นคำนวณและเปรียบเทียบความเข้มข้น ผลได้ และอัตราผลผลิตของเอทานอลที่ได้จากการหมักภายใต้สภาวะต่างๆ

2.1.2.1.4 การหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในถังหมักขนาด 5 ลิตร

หมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในถังหมักขนาด 5 ลิตร โดยมีปริมาตรทำงาน (working volume) 3320 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงสุด (จากข้อ 2.1.2.1.3) ในระหว่างการหมักเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ดังข้อ 2.1.2.1.2 จากนั้นคำนวณความเข้มข้น ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอล และเปรียบเทียบผลที่ได้กับเมื่อหมักในถังหมักขนาด 2 ลิตร

2.1.2.1.5 การหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานใน ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade ที่ประกอบด้วยถังกวนและ tubular reactor

ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade ประกอบด้วยถังกวนขนาด 2 ลิตร และ tubular reactor ซึ่งเป็นคอลัมน์แก้วจำนวน 3 คอลัมน์ เรียงต่อกันแบบอนุกรม (รูปที่ 2.3) ปริมาตรทำงานของถังกวนและคอลัมน์แก้วแต่ละอันเท่ากับ 1000, 770, 770 และ 780 มิลลิลิตร ตามลำดับ คิดเป็นปริมาตรทำงานรวมทั้งหมดของระบบเป็น 3320 มิลลิลิตร น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อถูกปั๊มเข้าสู่ถังกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นน้ำหมักที่ออกจากถังกวนจะเข้าทาง ด้านล่างของคอลัมน์ที่ 1 น้ำหมักที่ไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ที่ 1 จะถูกปั๊มเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ที่ 2 และไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ที่ 2 และถูกปั๊มต่อทางด้านล่างของคอลัมน์ที่ 3 และไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ที่ 3 ตามลำดับ ในระหว่างการหมักมีการเติมอากาศเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์แต่ละคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลต่ำคือ 0.005 vvm เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกอน และเก็บตัวอย่างที่ออกจากถังกวน และคอลัมน์แก้วแต่ละอันเพื่อวิเคราะห์ องค์ประกอบต่างๆ ดังข้อ 2.1.2.1.2 จากนั้นเปรียบเทียบและคำนวณความเข้มข้น ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอลภายใต้สภาวะต่างๆ



รูปที่ 2.3 ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade ที่ประกอบด้วยถังกวนขนาด 2 ลิตร และ tubular reactor จำนวน 3
คอลัมน์

2.1.2.1.6 การหาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล

คำนวณและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในแง่ของความเข้มข้นผลได้ และ อัตราผลผลิตของเอทานอล ในการหมักแบบกะและแบบต่อเนื่อง ที่ได้จากข้อ 2.1.2.1.4 – 2.1.2.1.5

2.1.2.2.7 รวบรวมข้อมูล และสรุปผลการศึกษาในส่วนที่ 1

2.1.2.2 วิธีการทดลองส่วนที่ 2 : การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้เทคโนโลยี VHG

2.1.2.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบที่สำคัญในยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์ เปปโตเน และกากเซลล์ยีสต์แห้ง หรือ dried spent yeast

วิเคราะห์องค์ประกอบที่สำคัญในยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์ (Himedia, India) เปปโตเน (Himedia, India) และกากเซลล์ยีสต์แห้ง หรือ dried spent yeast (โรงงานเบียร์ทิพย์ จ. อุดรฯ) ที่จะใช้เป็นแหล่งอาหารเสริมในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

2.1.2.2.2 การหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้การหมักแบบ VHG ในถังหมักขนาด 5 ลิตร โดยใช้ยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์ และเปปโตเนเป็นแหล่งอาหารเสริม

น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้นถูกเจือจางให้มีปริมาณน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักเอทานอล โดยเตรียมเป็นวัตถุดิบ 3 สูตร ได้แก่

- 1) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร และเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์และเปปโตเน 3.0 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (SSJ+YEP)
- 2) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร และเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์ 8.0 กรัมต่อลิตร (SSJ+YE)
- 3) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร โดยไม่เติมอาหารเสริม (เป็นชุดควบคุม) (SSJ)

จากนั้นเลี้ยงยีสต์ *S. cerevisiae* NP 01 ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อทั้ง 3 สูตร ในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยกวนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ในระหว่างกระบวนการหมักเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณเอทานอล และจำนวนเซลล์ยีสต์ที่มีชีวิต จากนั้นคำนวณและเปรียบเทียบผลได้ อัตราผลผลิต และความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อ 3 สูตร

2.1.2.2.3 การหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้การหมักแบบ VHG ในถังหมักขนาด 5 ลิตรโดยใช้กากเซลล์ยีสต์แห้งเป็นแหล่งอาหารเสริม

หมักเอทานอลในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อที่มีปริมาณน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร และเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 0, 8 และ 16 กรัมต่อลิตร โดยหมักในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่

อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และกวนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ในระหว่างกระบวนการหมักเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ดังข้อ 2.1.2.2.2 จำนวนและเปรียบเทียบผลได้ อัตราผลผลิต และความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ที่สภาวะต่างๆ

2.1.2.2.4 การหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้การหมักแบบ VHG ในถังหมักขนาด 5 ลิตร โดยแปรผันจำนวนยีสต์เริ่มต้น

หมักเอทานอลในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อที่มีปริมาณน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร และเติมกากเซลล์ยีสต์เพิ่มความเข้มข้นที่ให้เอทานอลสูงสุด (จากข้อ 2.1.2.2.3) โดยแปรผันจำนวนยีสต์เริ่มต้นเป็น 1×10^7 , 5×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยหมักในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และกวนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ในระหว่างกระบวนการหมักเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ดังข้อ 2.1.2.2.2 จำนวนและเปรียบเทียบผลได้ อัตราผลผลิต และความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ที่สภาวะต่างๆ

2.1.2.2.5 การหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในระดับขยายขนาดภายใต้การหมักแบบ VHG

เตรียมถังหมักขนาด 50 ลิตรพร้อมอุปกรณ์ประกอบ จากนั้นหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในถังหมักขนาด 50 ลิตร (รูปที่ 2.4) โดยใช้น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสูตรที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงสุดที่ได้จากข้อ 2.1.2.2.4 ในระหว่างการหมัก เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ดังข้อ 2.1.2.2.2 จากนั้นคำนวณผลได้ อัตราผลผลิต และความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้



รูปที่ 2.4 ถังหมักขนาด 50 ลิตร

2.1.2.2.5 การหาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลภายใต้สภาวะ VHG ในถังหมักขนาดต่างกัน

เปรียบเทียบผลได้ อัตราผลผลิต และความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้เมื่อหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG ในถังหมักขนาด 5 ลิตร และ 50 ลิตร

2.1.2.2.6 รวบรวมข้อมูล และสรุปผลการศึกษาในส่วนที่ 2

เมื่อทำการวิจัยเสร็จทั้งสองส่วนแล้ว คำนวณต้นทุนวัตถุดิบโดยประมาณในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเปรียบเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่นที่ใช้ในการผลิตเอทานอล และสรุปผลการทดลองทั้งหมด

2.1.3 วิธีการคำนวณ

2.1.3.1 อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate, $\mu_{\max}$)

$$\mu_{\max} = (\ln X_2 - \ln X_1) / (t_2 - t_1)$$

เมื่อ X_1 และ X_2 คือความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ

2.1.3.2 ผลได้ (Yield, $Y_{p/s}$) เอทานอล

$$\text{ผลได้} = \frac{\text{ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ (กรัมต่อลิตร)}}{\text{ความเข้มข้นของน้ำตาลที่ใช้ (กรัมต่อลิตร)}}$$

2.1.3.3 อัตราผลผลิต (Productivity, Q_p) เอทานอล

$$\text{อัตราผลผลิต} = \frac{\text{ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ (กรัมต่อลิตร)}}{\text{เวลาที่ใช้ในการหมัก (ชั่วโมง)}}$$

2.1.3.4 ประสิทธิภาพผลได้ (Productivity, E) เอทานอลเทียบกับผลได้ทางทฤษฎี

$$\text{ประสิทธิภาพผลได้} = \frac{\text{ผลได้เอทานอล} \times 100}{\text{ผลได้ทางทฤษฎี}}$$

ผลได้เอทานอลทางทฤษฎีเมื่อนำน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 0.54 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาล

2.2 ผลการวิจัย

2.2.1 ผลการวิจัยส่วนที่ 1 : การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลโดยการหมักแบบต่อเนื่อง
ในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานด้วย *Saccharomyces cerevisiae*

2.2.1.1 การศึกษาองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสายพันธุ์ มข. 40 และน้ำคั้น
ลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

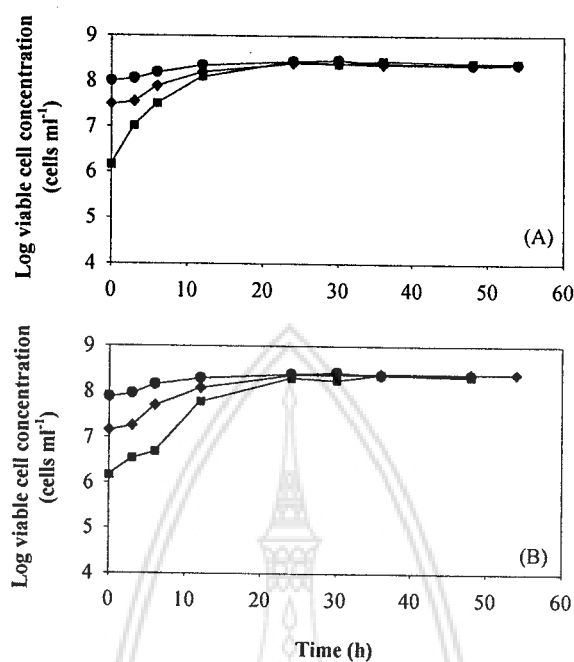
องค์ประกอบ	น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน	น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเข้มข้น
พีเอช	4.9	-
ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	17.8	75
น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	37.65	-
น้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	173.02	-
Total N (%)	0.0	0.276
Total P (%)	0.0020	0.164
Total K (%)	0.179	5.055
Total Na (%)	0.017	0.394
Total Ca (%)	0.0166	0.064
Total Mg (%)	0.0194	0.0638
Total Fe (%)	0.0002	0.0004
Total Mn (%)	0.0003	0.0003
Total Cu (%)	0.00003	0.0002
Total Zn (%)	0.00014	0.0023
Total S (%)	0.012	0.0230

2.2.1.2 อัตราการเจริญและการผลิตเอทานอลของ *S. cerevisiae* NP 01 ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการหมักแบบกะในถังหมักขนาด 2 ลิตร ที่มีการแปรผันปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้น

2.2.1.2.1 อัตราการเจริญของ *S. cerevisiae* NP 01 ที่มีการแปรผันจำนวนกล้ำเชื้อเริ่มต้นในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร

การศึกษาอัตราการเจริญของ *S. cerevisiae* NP 01 ที่มีการแปรผันปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 , 1×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร ในกระบวนการหมักแบบกะแสดงดังรูปที่ 2.5 จากผลการทดลองสามารถคำนวณอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของยีสต์ที่มีปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์จุลินทรีย์และสภาวะในการเพาะเลี้ยง แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเริ่มต้น โดยเมื่อแปรผันปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้นในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 หรือ 280 กรัมต่อลิตร และเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเซลล์เริ่มต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีผลต่ออัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของยีสต์ โดยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตรเมื่อใช้ปริมาณยีสต์เริ่มต้นเท่ากัน จะได้ค่าอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดใกล้เคียงกัน





รูปที่ 2.5 กราฟการเจริญของ *S. cerevisiae* NP 01 ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 (A) และ 280 (B) กรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นต่างๆ (■ = 1×10^6 , ◆ = 1×10^7 และ ● = 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

ตารางที่ 2.2 อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด ($\mu_{\max}$) ของ *S. cerevisiae* NP 01 ที่มีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นต่างๆ ในน้ำ คั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร

ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)	$\mu_{\max}$ (ต่อชั่วโมง)
240	1.45×10^6	0.36
	3.13×10^7	0.15
	0.95×10^8	0.08
280	1.50×10^6	0.31
	1.45×10^7	0.19
	1.45×10^8	0.08

2.2.1.2.2 ผลของปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้นต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้น

ข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์

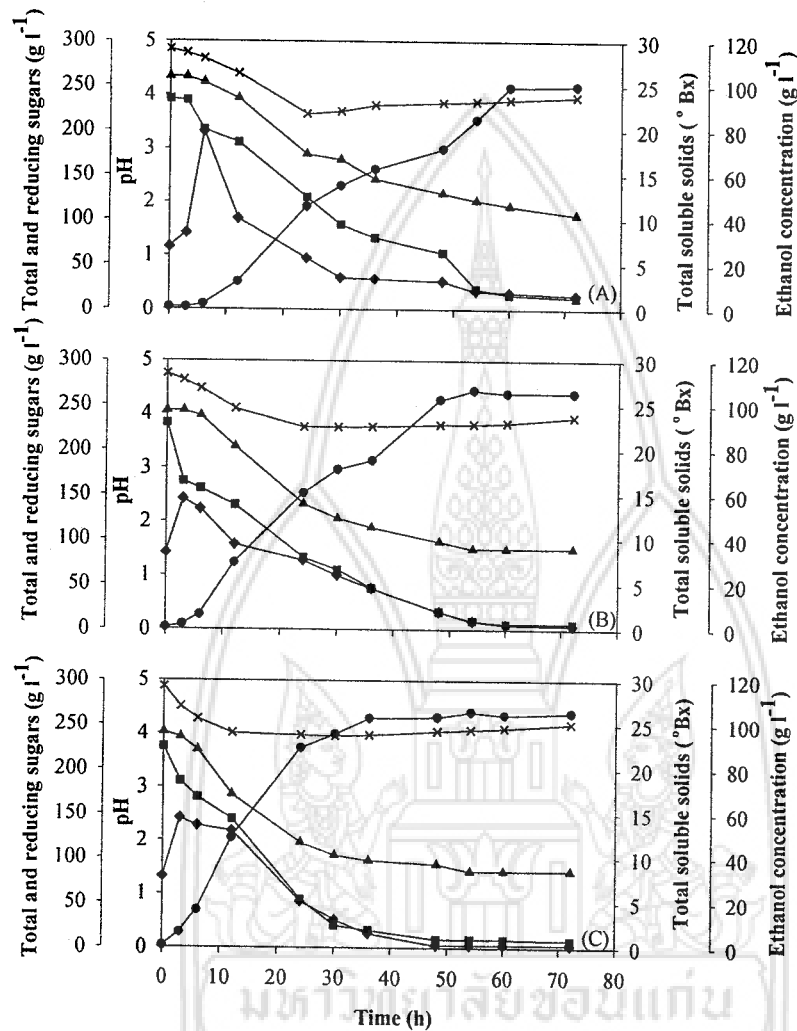
การหาปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลแบบกะในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ยีสต์เริ่มต้นเป็น 1×10^6 , 1×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.6A ถึง 2.6C

รูปที่ 2.6A แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลที่มีปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อเริ่มกระบวนการหมักพบว่า ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 235.37 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 69.66 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 26 องศาบริกซ์ และปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1.45×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อการหมักดำเนินไปปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบหมด และคงที่ที่ชั่วโมงที่ 60 ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่คงที่ที่ 60 ชั่วโมง โดยมีค่า 19.35 กรัมต่อลิตร และ 11.6 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ส่วนปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และคงที่ในชั่วโมงที่ 60 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 99.52 กรัมต่อลิตร สำหรับพีเอชของน้ำหมักจะค่อยๆ ลดลงใน 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีพีเอชประมาณ 4.0

รูปที่ 2.6B การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอล โดยมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จากผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นทั้งหมดมีค่า 230.30 กรัมต่อลิตร น้ำตาลรีดิวซ์ 85.26 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 24.4 องศาบริกซ์ และปริมาณเซลล์เริ่มต้น 3.13×10^7 เมื่อการหมักดำเนินไปความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบหมดและคงที่ที่ 54 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่คงที่ในเวลาการหมักเดียวกัน มีค่าประมาณ 9 องศาบริกซ์ ส่วนความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการหมักดำเนินไปประมาณ 3 ชั่วโมง คือมีค่าจาก 85.26 กรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 145.26 กรัมต่อลิตร ซึ่งอาจเนื่องมาจากยีสต์สามารถผลิตเอนไซม์อินเวอร์เทส (invertase) ซึ่งคุณสมบัติของเอนไซม์นี้คือสามารถเปลี่ยนน้ำตาลที่ไม่รีดิวซ์ เช่น ซูโครส ให้กลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กลูโคสและฟรุกโตส เพื่อให้ยีสต์สามารถนำไปใช้ได้ หลังจากนั้นความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ก็ลดลง และคงที่โดยมีค่าประมาณ 10 กรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำหมักมีค่าค่อยๆ ลดลงใน 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีพีเอชประมาณ 4.0 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้มีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามการใช้น้ำตาลของยีสต์ และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกับผลการทดลองเมื่อใช้จำนวนเซลล์เริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (รูปที่ 2.6A)

รูปที่ 2.6C แสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมัก น้ำหมักมีความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมด 225.45 กรัมต่อลิตร น้ำตาลรีดิวซ์ 79.68 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 24.2 องศา

บrikซ์ และปริมาณเซลล์เริ่มต้น 0.95×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร อย่างไรก็ตามรูปแบบกระบวนการหมักมีลักษณะคล้ายกับสภาวะที่ใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1×10^6 และ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แต่ใช้ระยะเวลาในการหมักสั้นกว่าสภาวะอื่น คือ ที่ชั่วโมงที่ 36 องค์ประกอบต่างๆ เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะอื่น

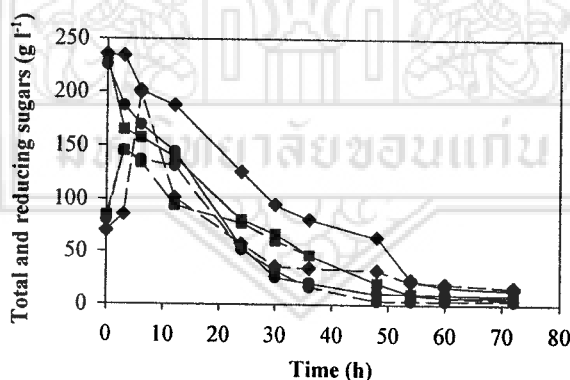


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 (A), 1×10^7 (B) และ 1×10^8 (C) เซลล์ต่อมิลลิลิตร (x = พีเอช, ▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ■ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, ◆ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ความเข้มข้นเอทานอล)



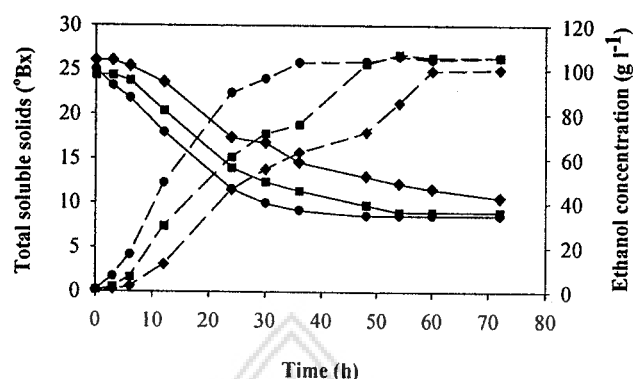
เมื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และความเข้มข้นของเอทานอล ภายใต้สภาวะการเพาะเลี้ยงที่มีปริมาณเซลล์เริ่มต้นต่างๆ จากรูปที่ 2.6A ถึง 2.6C มาเปรียบเทียบกับกันจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ซึ่งพบว่าที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้นประมาณ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะลดลงเร็วกว่าภายใต้สภาวะที่ใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นน้อยกว่า ส่วนความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ เมื่อใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่า ปริมาณเอทานอลสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะอื่นๆ อย่างไรก็ตามที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปริมาณเอทานอลที่ได้เริ่มคงที่เร็วกว่าภายใต้สภาวะอื่น โดยเริ่มคงที่ในช่วงเวลาที่ 36 ในขณะที่เมื่อใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1×10^6 และ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปริมาณเอทานอลเริ่มคงที่ที่ช่วงเวลาที่ 60 และ 54 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2.3) พบว่า ปริมาณเซลล์เริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล โดยเมื่อใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นที่ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จะได้อัตราผลผลิต ผลได้ และประสิทธิภาพผลได้สูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ คือมีประสิทธิภาพผลได้ 92.59 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของเอทานอล 103.03 กรัมต่อลิตร อัตราผลผลิต 2.86 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ 0.50 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้ ดังนั้น ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการเติมแหล่งไนโตรเจนและไม่เติมแหล่งไนโตรเจนต่อการผลิตเอทานอลในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการหมักแบบกะจะใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร



77.
TP
593
ร4510

รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (เส้นทึบ) และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (เส้นประ) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นต่างๆ ($\diamond = 1 \times 10^6$, $\blacksquare = 1 \times 10^7$ และ $\bullet = 1 \times 10^8$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (เส้นทึบ) และความเข้มข้นของเอทานอล (เส้นประ) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้ายเชื้อเริ่มต้นต่างๆ ($\diamond = 1 \times 10^6$, $\blacksquare = 1 \times 10^7$ และ $\bullet = 1 \times 10^8$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic parameters) ของการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้นต่างๆ

ปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้น (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
1.45×10^6	99.52	1.66	0.46	84.33	60
3.13×10^7	106.83	1.98	0.49	90.74	54
0.95×10^8	103.03	2.86	0.50	92.59	36

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

2.2.1.2.3 ผลของปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้นต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้น

ข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์

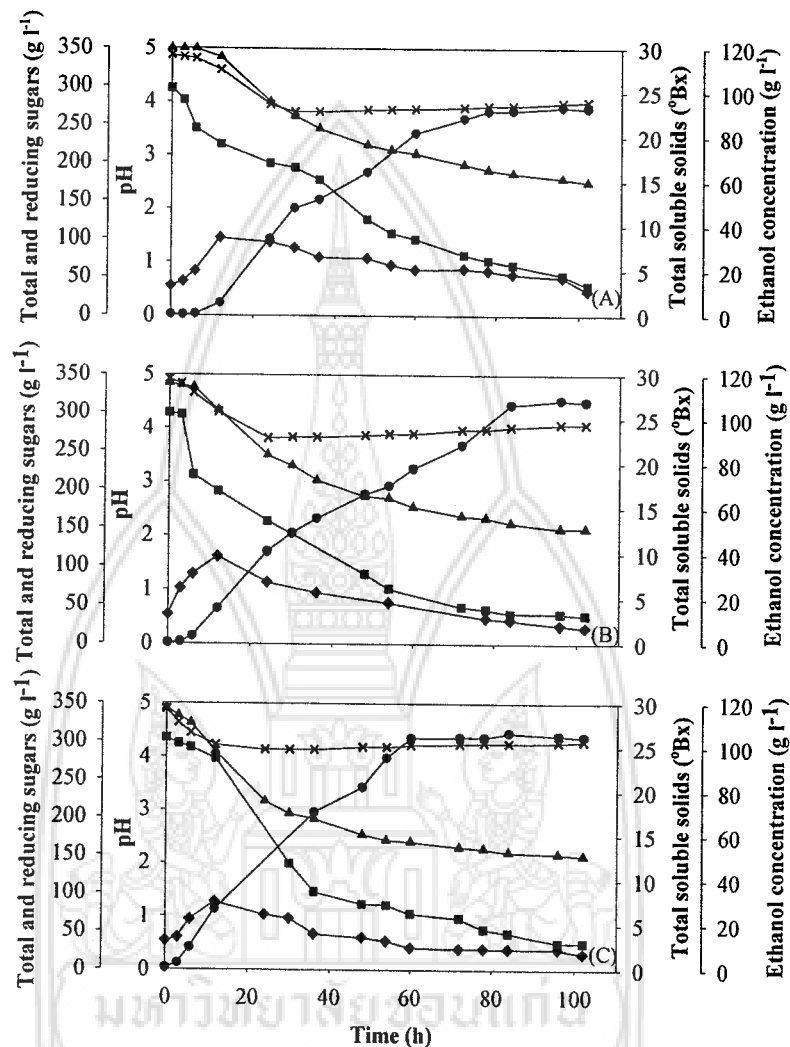
การหาปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สัต์เริ่มต้นเป็น 1×10^6 , 1×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.9A ถึง 2.9C

จากรูปที่ 2.9A แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลที่มีปริมาณกล้ำเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อเริ่มกระบวนการหมักพบว่า ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 297.68 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 38.68 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 30 องศาบริกซ์ จำนวนเซลล์เริ่มต้นประมาณ 1.50×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อการหมักดำเนินไปปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจะค่อยๆ ลดลง และเหลือเพียงเล็กน้อยที่ชั่วโมงที่ 78 ส่วนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะค่อยๆ ลดลง และพบว่า ที่ชั่วโมง 78 มีค่า 58.78 กรัมต่อลิตร และ 16.4 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ส่วนปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และพบว่า ในชั่วโมงที่ 78 มีค่าเท่ากับ 91.76 กรัมต่อลิตร สำหรับพีเอชของน้ำ หมักจะค่อยๆ ลดลงในช่วง 30 ชั่วโมงแรก และมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากนั้น โดยมีพีเอชประมาณ 4.0

รูปที่ 2.9B แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลโดยมีปริมาณเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมักความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดมีค่า 300 กรัมต่อลิตร น้ำตาลรีดิวซ์ 37.51 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 29 องศาบริกซ์ และมีปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1.45×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อการหมักดำเนินไปความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดค่อยๆ ลดลง สอดคล้องกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ทั้งหมด และคงที่ชั่วโมงที่ 84 ความเข้มข้นเอทานอลที่ผลิตได้สูงสุด 106.62 กรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นเอทานอลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกับสถานะที่ใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้ปริมาณเซลล์เท่ากัน อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการหมักในสถานะที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่สูงกว่าจะใช้เวลาในการหมักนานกว่า อาจเนื่องมาจากน้ำหมักในสถานะที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่สูงๆ จะมีแรงดันออสโมติก (osmosis pressure) ของสารอาหารเข้าสู่เซลล์ที่สูง จึงทำให้สัต์ต้องใช้ระยะเวลาที่นานกว่าในการนำน้ำตาลเข้าสู่เซลล์เพื่อเปลี่ยนเป็นเอทานอล (Ozmihci and Kargi, 2007)

รูปที่ 2.9C แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลโดยมีปริมาณเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมักความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดมีค่า 305.26 กรัมต่อลิตร น้ำตาลรีดิวซ์ 37.71 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 29.4 องศาบริกซ์ และมีปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1.45×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อการหมักดำเนินไป พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงทางต่างๆ มีลักษณะคล้ายคลึงกับสถานะ

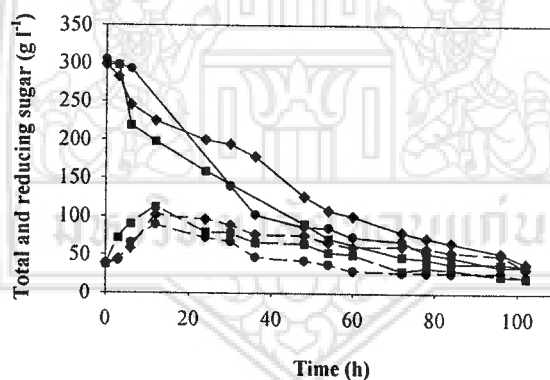
ที่ใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1×10^6 และ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักเร็วกว่า นั่นคือ ที่ชั่วโมงที่ 60 ค่าจนพลาสตร์ในสภาวะที่มีปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1.45×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เริ่มคงที่ ในขณะที่สภาวะที่ใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1.50×10^6 และ 1.45×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ใช้ระยะเวลาในการหมัก 78 และ 84 ชั่วโมง ตามลำดับ



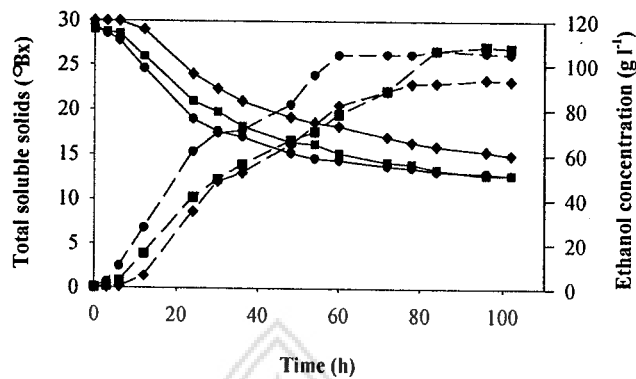
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 (A), 1×10^7 (B) และ 1×10^8 (C) เซลล์ต่อมิลลิลิตร (x = พีเอช, ▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ■ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, ◆ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ความเข้มข้นเอทานอล)

เมื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และความเข้มข้นของเอทานอล ภายใต้การเพาะเลี้ยงที่มีปริมาณเซลล์เริ่มต้นต่างๆ มาเปรียบเทียบจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งพบว่าที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้นประมาณ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะลดลงเร็วกว่าภายใต้สภาวะที่ใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นน้อยกว่า ส่วนความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้เมื่อจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่า ปริมาณเอทานอลที่ได้เริ่มคงที่เร็วกว่าภายใต้สภาวะอื่น โดยเริ่มคงที่ในช่วงเวลาที่ 60 ในขณะที่เมื่อใช้เซลล์เริ่มต้น 1×10^6 และ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปริมาณเอทานอลเริ่มคงที่ที่ช่วง 78 และ 84 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2.4) พบว่า ที่จำนวนเซลล์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ให้ผลได้ 0.45 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้ คิดเป็นประสิทธิภาพผลได้ในการผลิตเอทานอล 83.61 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราผลผลิต 1.74 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้นที่สูง สามารถลดระยะเวลาในการหมักเอทานอลและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานได้ ดังนั้นในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมและไม่เติมแหล่งไนโตรเจนต่อการผลิตเอทานอลในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการหมักแบบกะจะใช้เซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมด (เส้นทึบ) และน้ำตาลรีดิวซ์ (เส้นประ) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้นต่างๆ (◆ = 1×10^6 , ■ = 1×10^7 และ ● = 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (เส้นทึบ) และความเข้มข้นของเอทานอล (เส้นประ) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้นต่างๆ (◆ = 1×10^6 , ■ = 1×10^7 และ ● = 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน ภายใต้สภาวะที่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร โดยมีจำนวนเซลล์ยีสต์เริ่มต้นต่างๆ

ปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้น (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
1.50×10^6	91.76	1.18	0.41	75.37	78
1.45×10^7	106.62	1.27	0.41	75.63	84
1.45×10^8	104.67	1.74	0.45	83.61	60

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

2.2.1.3 ผลของการเติมแหล่งไนโตรเจนต่อการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะการหมักปกติและสภาวะ VHG ในถังหมักขนาด 2 ลิตร

Thanonkeo และคณะ (2002) พบว่าแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์ อย่างไรก็ตามสายพันธุ์เคลเลอร์นี้ได้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเป็นสายพันธุ์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ สายพันธุ์ มข. 40 ซึ่งเป็นไปได้ว่าสายพันธุ์ใหม่นี้อาจไม่ต้องการแอมโมเนียมซัลเฟตสำหรับการผลิตเอทานอลแล้ว การทดลองนี้จึงต้องการศึกษาผลของแอมโมเนียมซัลเฟตต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานทั้งในสภาวะการหมักปกติ (น้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร) และสภาวะการหมักแบบ VHG (น้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร)

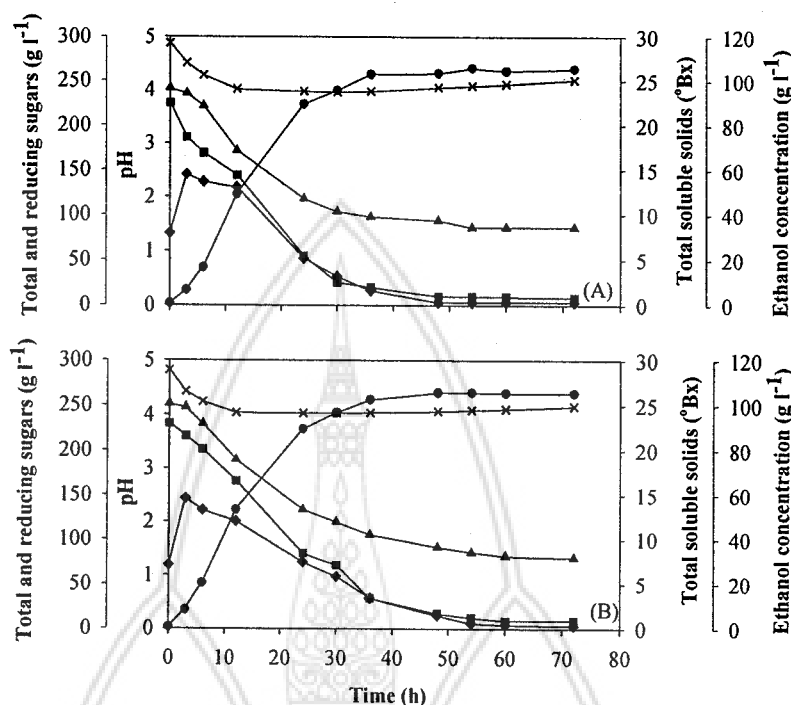
2.2.1.3.1 การผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์

ผลของการเติมและไม่เติมแหล่งไนโตรเจนต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน โดยกระบวนการหมักแบบกะ โดยใช้ปริมาณยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.12A และ 2.12B ตามลำดับ รูปที่ 2.12A แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร ที่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมัก ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 225.45 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 79.68 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 24.2 องศาบริกซ์ จำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ 0.95×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อการหมักดำเนินไป ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์จะค่อยๆ ลดลงจนเกือบหมด และคงที่ที่ชั่วโมงที่ 36 ซึ่งให้ผลการทดลองคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยที่เวลาดังกล่าวได้ความเข้มข้นเอทานอลเท่ากับ 103.03 กรัมต่อลิตร สำหรับการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำหมักพบว่า มีค่าลดลงจาก 4.9 เป็น 4.0 ใน 12 ชั่วโมงแรกหลังจากนั้นพีเอชมีค่าค่อนข้างคงที่

รูปที่ 2.12B แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร ที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟต ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลการทดลองเมื่อเติมแอมโมเนียมซัลเฟต

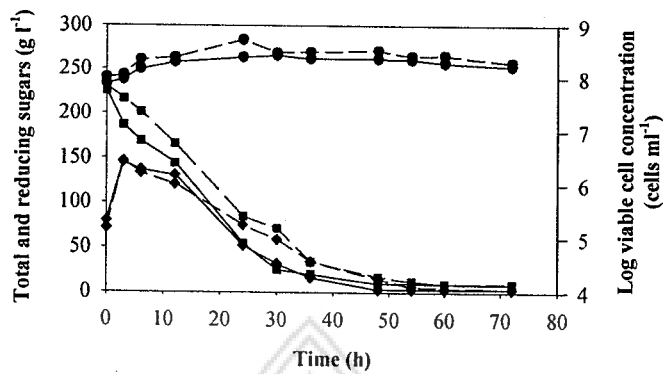
เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ เซลล์ยีสต์ที่มีชีวิต ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และเอทานอล ภายใต้สภาวะที่มีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน (รูปที่ 2.13 และ 14) พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟต ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด จะลดลงได้เร็วกว่าสภาวะที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเพียงเล็กน้อย แต่หลังจาก 30-36 ชั่วโมง องค์ประกอบ

ดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เซลลิวโลสที่มีชีวิต และเอทานอลในน้ำหมักทั้ง 2 สภาวะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการหมัก

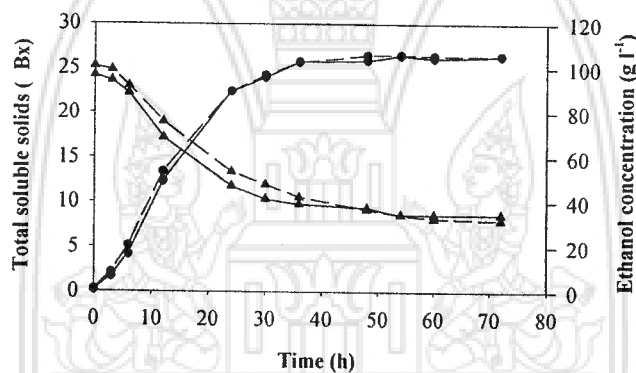


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีการเติม (A) และไม่เติม (B) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (X = พีเอช, ▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ■ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, ◆ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ความเข้มข้นเอทานอล)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีการเติม (เส้นทึบ) และไม่เติม (เส้นประ) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (■ = ปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด, ♦ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ปริมาณเซลล์ยีสต์ที่มีชีวิต)



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีการเติม (เส้นทึบ) และไม่เติม (เส้นประ) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ● = ความเข้มข้นเอทานอล)

ตารางที่ 2.5 แสดงประสิทธิภาพของการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักแบบกะภายใต้สภาวะที่มีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่า การเติมแอมโมเนียมซัลเฟตไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในแง่

ของความเข้มข้นของเอทานอลและอัตราผลผลิตเอทานอล โดยความเข้มข้นและอัตราผลผลิตเอทานอล ทั้ง 2 สภาวะ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 102.75 - 103.03 กรัมต่อลิตร และ 2.80 - 2.86 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีแหล่งในโตรเจนเพียงพอต่อการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักแบบกะด้วย *S. cerevisiae* NP 01 การเติมแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลได้เร็วขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในแง่ของผลได้ของเอทานอลพบว่า สภาวะที่เติมในโตรเจนให้ค่าผลได้เอทานอลต่ำกว่าสภาวะที่ไม่เติมแหล่งในโตรเจนเสริมประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า แอมโมเนียมซัลเฟตอาจมีผลทำให้ *S. cerevisiae* NP 01 สร้างผลิตภัณฑ์พลอยได้เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน ที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

สภาวะ	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
เติมแอมโมเนียมซัลเฟต	103.03	2.86	0.50	92.59	36
ไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต	102.75	2.80	0.52	96.30	36

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

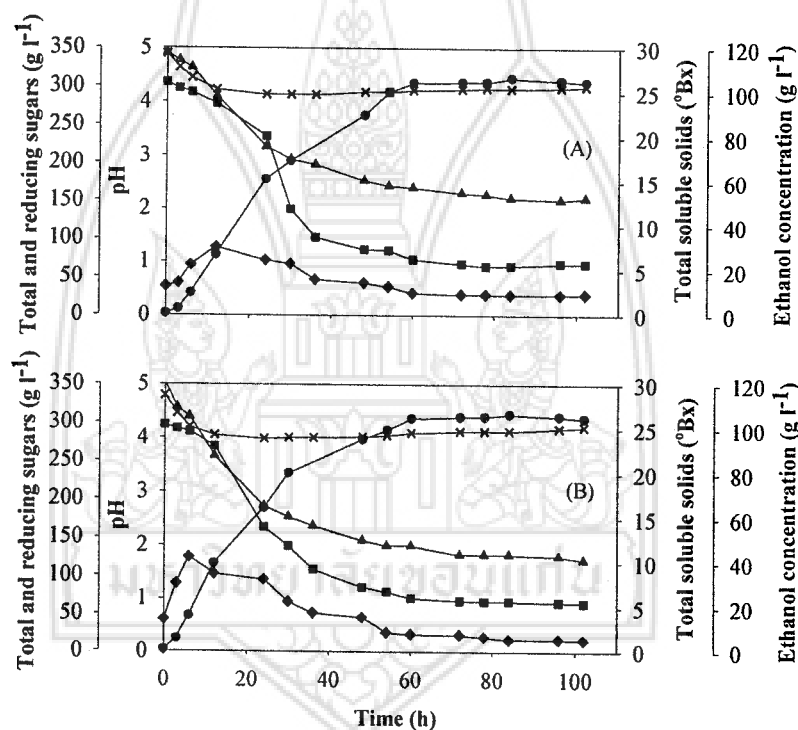
2.2.1.3.2 การผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์

ผลของการเติมและไม่เติมแหล่งในโตรเจนต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยกระบวนการหมักแบบกะ โดยใช้ปริมาณยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 2.15A และ 2.15B ตามลำดับ รูปที่ 2.15A แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ระหว่างการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่า เมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมัก ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 305.26 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 37.71 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 29.4 องศาบริกซ์ ปริมาณเซลล์เริ่มต้นประมาณ 1.45×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เมื่อการหมักดำเนินไปความ

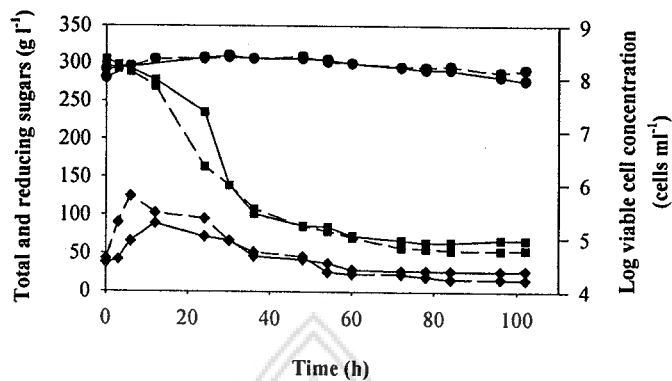
เข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ละลาย ได้ทั้งหมดจะค่อยๆ ลดลง และคงที่ที่ชั่วโมงที่ 60 โดยที่เวลาดังกล่าวได้ความเข้มข้นเอทานอลเท่ากับ 104.67 กรัมต่อลิตร สำหรับการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำหมักพบว่า มีค่าลดลงจาก 4.89 เป็น 4.14 ใน 24 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นพีเอชมีค่าค่อนข้างคงที่

รูปที่ 2.15B แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ระหว่างการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และไม่มีแอมโมเนียมซัลเฟต ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักมีแนวโน้มคล้ายกันกับผลการทดลองเมื่อเติมแอมโมเนียมซัลเฟต

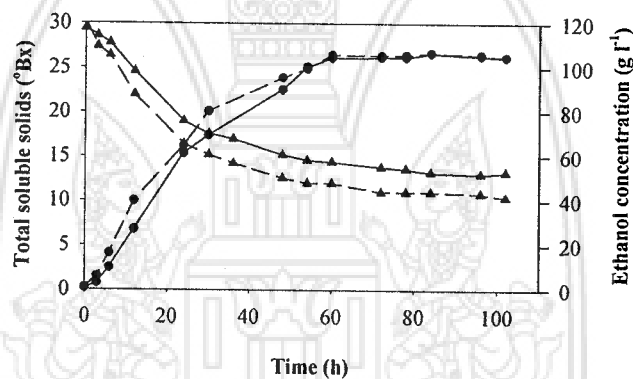
เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ เซลลิวโลสที่มีชีวิต ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และเอทานอล ภายใต้สภาวะที่มีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน (รูปที่ 2.16 และ 17) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง ยกเว้นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟต จะมีการลดลงและคงที่ได้เร็วกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติม (A) และไม่เติม (B) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกลั่นเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (X = พีเอช, ▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ■ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, ◆ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ความเข้มข้นเอทานอล)



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติม (เส้นทึบ) และไม่เติม (เส้นประ) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (■ = ปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด, ♦ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ปริมาณเซลล์ยีสต์ที่มีชีวิต)



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติม (เส้นทึบ) และไม่เติม (เส้นประ) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ● = ความเข้มข้นเอทานอล)

ตารางที่ 2.6 แสดงประสิทธิภาพของการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักแบบกะภายใต้สภาวะที่มีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลการทดลองพบว่า ทั้ง 2 สภาวะมีประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในรูปของความเข้มข้นเอทานอลและอัตราผลผลิตเอทานอลไม่แตกต่างกัน ส่วนผลได้ของเอทานอลพบว่า สภาวะที่เติมไนโตรเจนให้ค่าผลได้เอทานอลต่ำกว่าสภาวะที่ไม่เติมแหล่งไนโตรเจนเสริมประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตพบว่าให้ผลสอดคล้องกันคือ แอมโมเนียมซัลเฟตไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในรูปของความเข้มข้นเอทานอลและอัตราผลผลิตเอทานอลที่ได้ แต่การเติมแอมโมเนียมซัลเฟตทำให้ผลได้ของเอทานอลลดลงประมาณ 3-4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีแหล่งไนโตรเจนเพียงพอต่อการผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* NP 01 การเติมแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานไม่มีผลทำให้การหมักเร็วขึ้นหรือช้าลง แต่อาจมีผลทำให้ยีสต์สร้างผลิตภัณฑ์พลอยได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.6 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และมีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

สภาวะ	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
เติมแอมโมเนียมซัลเฟต	104.67	1.74	0.45	83.61	60
ไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟต	105.88	1.76	0.47	86.69	60

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

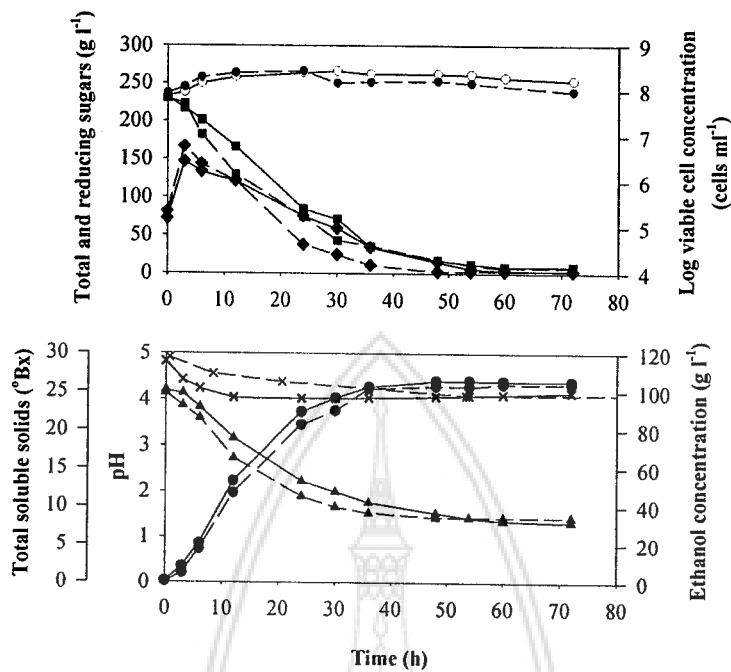
2.2.1.4 การผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยกระบวนการหมักแบบกะในถังหมักขนาด 5 ลิตร

จากผลการทดลองการหาสภาวะการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักแบบกะในถังหมักขนาด 2 ลิตร โดยใช้ น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะที่มีการเติมและไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตและใช้ปริมาณกล้ายเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าสภาวะที่ไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตให้ประสิทธิภาพผลได้ของการผลิตเอทานอลสูงกว่า ดังนั้นจึงใช้สภาวะนี้ในการทดลองต่อไป

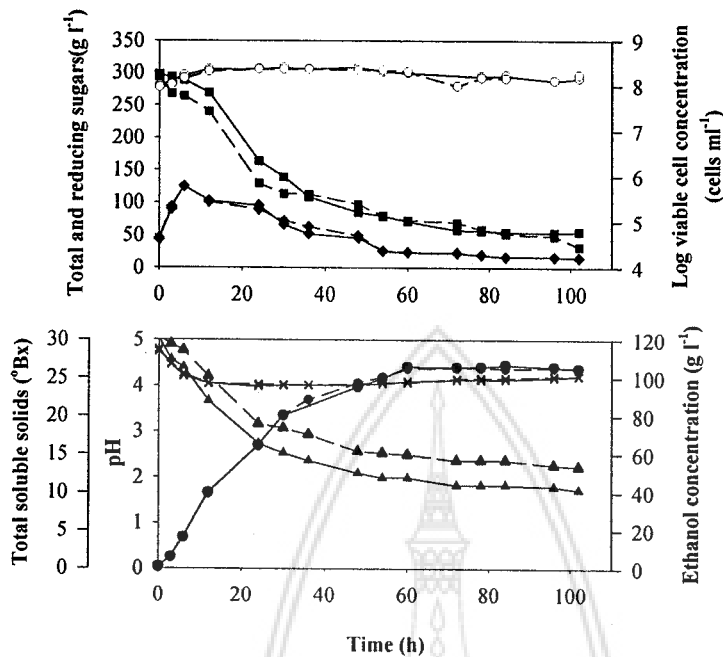
รูปที่ 2.18 และ 2.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในถังหมักขนาด 2 และ 5 ลิตร ผลการทดลองพบว่า ขนาดของถังหมักไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำหมักและพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักที่สภาวะต่างๆ มีแนวโน้มคล้ายกัน แสดงให้เห็นว่าระบบการกวน การผสม และการควบคุมอุณหภูมิของถังหมักทั้ง 2 ขนาดมีลักษณะเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามการหมักภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นมากกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ช้ากว่า เนื่องจากน้ำหมักที่มีความเข้มข้นน้ำตาลที่สูงจะมีแรงดันออสโมติกเพิ่มมากขึ้น ทำให้ยีสต์ต้องใช้เวลาในการปรับตัวที่นานกว่าในการนำน้ำตาลเข้าสู่เซลล์เพื่อเปลี่ยนเป็นเอทานอล (Ozmihci และ Kargi, 2007)

ตารางที่ 2.7 แสดงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกล้ายเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่า ภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพผลได้สูงสุดคือ 96.30 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพผลได้ ผลได้และอัตราผลผลิตลดลง ซึ่งเหตุผลดังได้กล่าวข้างต้นแล้ว

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร ในถังหมักขนาด 2 (เส้นทึบ) และ 5 (เส้นประ) ลิตร โดยมีปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (X = พีเอช, $\blacktriangle$ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, $\blacksquare$ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, $\blacklozenge$ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, $\bullet$ = ความเข้มข้นเอทานอล, $\circ$ = ปริมาณเซลล์ที่มีชีวิต)



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร ในถังหมักขนาด 2 (เส้นทึบ) และ 5 (เส้นประ) ลิตร โดยมีปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (x = พีเอช, ▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ■ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, ◆ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ความเข้มข้นเอทานอล, ○ = ปริมาณเซลล์ที่มีชีวิต)

ตารางที่ 2.7 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 และ 280 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในถังหมักขนาด 2 และ 5 ลิตร

ความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	ขนาดของถังหมัก (ลิตร)	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
240	2	102.75	2.80	0.52	96.30	36
	5	101.68	2.82	0.52	96.30	36
280	2	105.88	1.76	0.47	86.69	60
	5	104.97	1.75	0.48	88.12	60

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

2.2.1.5 การผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade

ผลจากการทดลองข้อ 2.2.1.2 – 2.2.1.4 พบว่าการใช้น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร โดยไม่ต้องเติมแหล่งไนโตรเจนเสริม และใช้ปริมาณยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลโดยรวมสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะดังกล่าวในการทดลองนี้

การศึกษาการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ cascade ทำโดยแปรผันอัตราการเจือจางของน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาล 240 กรัมต่อลิตร เข้าสู่ระบบที่ประกอบด้วยถังหมักที่เชื่อมต่อกับคอลัมน์แก้ว 3 คอลัมน์ (รูปที่ 2.3) โดยให้มีค่าอัตราการเจือจางรวมของระบบเท่ากับ 0.007, 0.02 และ 0.04 ต่อชั่วโมง โดยอัตราการเจือจางที่ป้อนเข้าสู่ระบบต้องมีค่าไม่เกินอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของ *S. cerevisiae* NP 01 เพื่อป้องกันการเกิดการชะของเซลล์ออกจากระบบ (wash out) (Stanbury et. al., 1995) จากค่าอัตราการเจือจางดังกล่าวสามารถหาอัตราการไหลของวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบได้ดัง สมการต่อไปนี้

$$\begin{array}{lcl} \text{อัตราการไหล} & = & \text{ปริมาตรทำงานของระบบ} \times \text{อัตราการเจือจาง} \\ \text{(มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)} & & \text{(มิลลิลิตร)} \quad \quad \quad \text{(ต่อชั่วโมง)} \end{array}$$

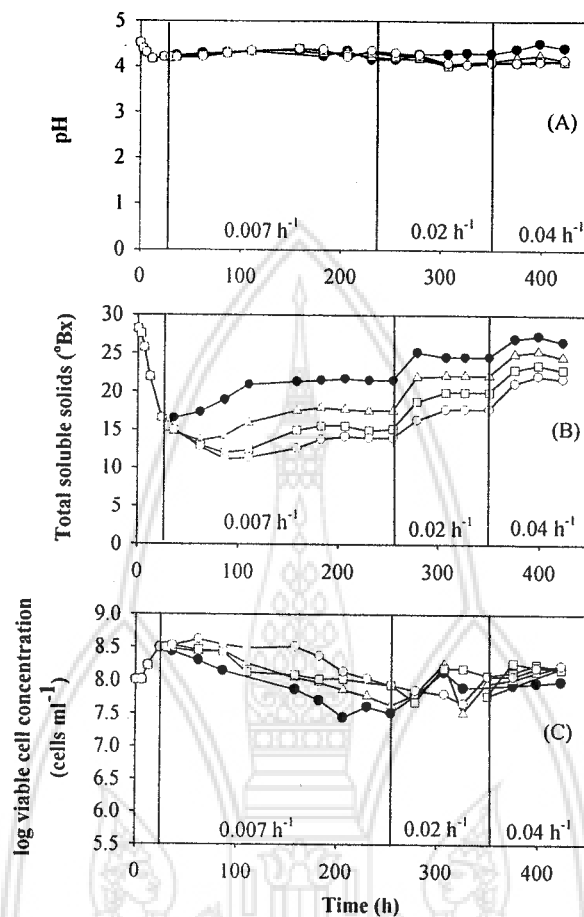
ผลการทดลองการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นของน้ำตาล 240 กรัมต่อลิตร ในระบบที่ประกอบด้วยถังหมักขนาด 2 ลิตร เชื่อมต่อกับคอลัมน์แก้ว 3 คอลัมน์ (รูปที่ 2.20 ถึง 2.21) พบว่า ระยะเวลาที่น้ำหมักอยู่ภายในระบบ (retention time) มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการหมัก โดยระยะเวลาที่น้ำหมักอยู่ภายในระบบที่นานกว่า ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลและผลิตเอทานอลได้สูงกว่าเมื่อให้น้ำหมักอยู่ภายในระบบน้อยกว่า สำหรับพีเอชของน้ำหมักที่ออกจากถังหมักและคอลัมน์แต่ละส่วนมีค่าโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาของการหมักอยู่ในช่วง 4.02 ถึง 4.52 (รูปที่ 2.20A) สาเหตุที่พีเอชค่อนข้างคงที่อาจเนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก มีความสามารถในการละลายสูงในน้ำหมัก และเมื่อละลายในน้ำหมักจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกและแตกตัวออกไปเป็นไอออนคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ซึ่งมีผลช่วยรักษาพีเอชของน้ำหมักให้คงที่ (Shen และคณะ, 2004) ส่วนปริมาณเซลล์ยีสต์ที่มีชีวิตมีค่าอยู่ในช่วง 0.33×10^8 ถึง 3.51×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (รูปที่ 2.20C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า *S. cerevisiae* NP 01 สามารถเจริญภายในระบบที่ศึกษาได้

อัตราการเจือจางต่ำสุดที่ใช้ศึกษา คือ 0.007 ต่อชั่วโมง โดยมีระยะเวลาในการหมักประมาณ 143 ชั่วโมง ก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady states) ผลการทดลองพบว่า น้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ไปเมื่อน้ำหมักไหลผ่านถังหมัก คอลัมน์ที่ 1 คอลัมน์ที่ 2 และคอลัมน์ที่ 3 มีค่าเท่ากับ 32, 51, 76 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำตาลเริ่มต้น ตามลำดับ (ตารางที่ 2.8) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบการหมักที่มีการแบ่งเป็นส่วนๆ มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น และพบว่าได้ความ

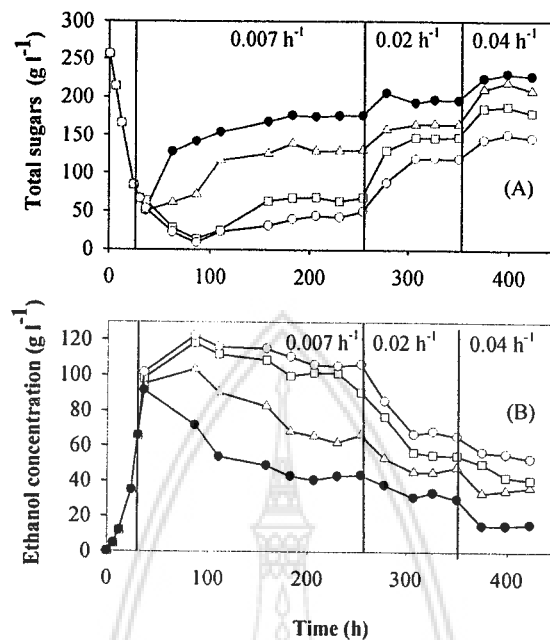
เข้มข้นเอทานอล อัตราการผลิต ผลได้ และ ประสิทธิภาพผลได้เพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อน้ำหมักไหลผ่านคอลัมน์ที่ 3 ของระบบโดยมีค่า 107.14 กรัมต่อลิตร, 0.75 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง, 0.51 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้ และ 94.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราการเจือจางของระบบเป็น 0.02 ต่อชั่วโมง พบว่า *S. cerevisiae* NP 01 สามารถใช้น้ำตาลได้โดยพบว่าเมื่อน้ำหมักไหลผ่านถังหมักคอลัมน์ที่ 1 คอลัมน์ที่ 2 และคอลัมน์ที่ 3 ความสามารถในการใช้น้ำตาลทั้งหมดลดลงเหลือเพียง 24, 36, 43 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 2.9) ระดับน้ำตาลที่เหลือ (residual sugar) ในระบบการหมักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเจือจาง 0.007 ต่อชั่วโมง เนื่องจากระยะเวลาที่น้ำหมักอยู่ภายในระบบสั้นกว่า ในทำนองเดียวกัน ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีค่าลดลงตามความสามารถของยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลภายในระยะเวลาที่น้ำหมักอยู่ในระบบ อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตเอทานอลภายใต้สภาวะดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเจือจางที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.04 ต่อชั่วโมง พบว่า ความสามารถในการใช้น้ำตาลของ *S. cerevisiae* NP 01 ลดลง (ตารางที่ 2.10) โดยเมื่อน้ำหมักไหลออกจากถังหมัก คอลัมน์ที่ 1 คอลัมน์ที่ 2 และคอลัมน์ที่ 3 ความสามารถในการใช้น้ำตาลลดลงเหลือเพียง 12, 28, 31 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าที่อัตราการเจือจางของระบบที่ 0.04 และ 0.007 ต่อชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Gil et al. (1991) ซึ่งพบว่าอัตราการเจือจางของน้ำตาลซูโครสที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (ปริมาตรทำงานทั้งหมด 1,070 มิลลิลิตร) เพื่อผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องไม่ควรเกิน 0.1 ต่อชั่วโมง นอกจากนี้ Vasconcelos และคณะ (2004) ศึกษาการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากกากน้ำตาลโดยใช้ยีสต์ที่ถูกตรึงบนลำต้นอ้อยและพบว่าการใช้อัตราการเจือจางระหว่าง 0.05 ถึง 0.07 ต่อชั่วโมง สามารถรักษาชีวิตของเซลล์ให้คงที่ในระหว่างกระบวนการหมักได้

ในระหว่างการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่า ยีสต์ที่อยู่ภายในระบบมีกิจกรรมสูงและแอ็กทีฟ (active) ในการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล เมื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร ในระบบ cascade ที่มีถังหมักเชื่อมต่อกับคอลัมน์แก้ว 3 คอลัมน์ (ปริมาตรทำงานรวม 3,320 มิลลิลิตร) ที่อัตราการเจือจางรวมต่างๆ ของน้ำคั้นที่เข้าสู่ระบบ (ตารางที่ 2.11) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการเจือจางสูงขึ้น อัตราการผลิตเอทานอลรวมจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้โดยระบบมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามผลได้และประสิทธิภาพผลได้มีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกๆ อัตราการเจือจาง โดยประสิทธิภาพผลได้เอทานอลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 98.15 เปอร์เซ็นต์ ของผลได้ทางทฤษฎีที่อัตราการเจือจาง 0.04 ต่อชั่วโมง ผลการทดลองของระบบที่มีถังหมักเชื่อมต่อกับคอลัมน์แก้ว 3 คอลัมน์ แสดงให้เห็นว่า ความสามารถของยีสต์ *S. cerevisiae* NP 01 ในการผลิตเอทานอลขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่น้ำหมักอยู่ภายในระบบ หากพิจารณาแต่ละอัตราการเจือจางจะพบว่า การต่อระบบที่เป็นแบบแบ่งส่วน (series) มีส่วนช่วยในการเจือจางความ

เข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักก่อนเข้าสู่ระบบ และทำให้ความสามารถของยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอลได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.20 พีเอช (A) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (B) และปริมาณเซลล์ที่มีชีวิต (C) ในน้ำหมักที่ออกจากแต่ละส่วนของระบบ cascade ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน ที่อัตราการเจือจางต่างๆ : ถังหมัก (●), คอลัมน์ที่ 1 (△), คอลัมน์ที่ 2 (□) และคอลัมน์ที่ 3 (○).



รูปที่ 2.21 ความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมด (A) และความเข้มข้นของเอทานอล (B) ในน้ำหมักที่ออกจากแต่ละส่วนของระบบ cascade ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่อัตราการเจือจางต่างๆ: ถึงหมัก (●), คอลัมน์ที่ 1 (△), คอลัมน์ที่ 2 (□) และคอลัมน์ที่ 3 (○).

ตารางที่ 2.8 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่อัตราการเจือจางรวมของระบบ 0.007 ต่อชั่วโมง

ระบบ	D	V	RTS	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E
ถึงหมัก	0.023	1000	176.10	41.84	0.96	0.52	96.30
ถึงหมักถึงคอลัมน์ที่ 1	0.013	1770	130.17	65.76	0.85	0.52	96.30
ถึงหมักถึงคอลัมน์ที่ 2	0.009	2540	66.49	100.91	0.60	0.53	98.15
ถึงหมักถึงคอลัมน์ที่ 3	0.007	3320	45.84	107.14	0.75	0.51	94.45

D = อัตราการเจือจาง (ต่อชั่วโมง), V = ปริมาณน้ำหมัก (มิลลิลิตร),

RTS = ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือ (กรัมต่อลิตร),

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 2.9 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่อัตราการเจือจางรวมของระบบ 0.02 ต่อชั่วโมง

ระบบ	D*	V	RTS	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E
ถังหมัก	0.07	1000	195.73	31.59	2.21	0.52	96.30
ถังหมักถึงคอลัมน์ที่ 1	0.04	1770	165.05	46.38	1.86	0.50	92.60
ถังหมักถึงคอลัมน์ที่ 2	0.03	2540	147.52	55.64	1.67	0.53	94.45
ถังหมักถึงคอลัมน์ที่ 3	0.02	3320	119.83	66.13	1.32	0.48	88.89

* ดูรายละเอียดในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.10 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่อัตราการเจือจางรวมของระบบ 0.04 ต่อชั่วโมง

ระบบ	D	V	RTS	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E
ถังหมัก	0.13	1000	226.50	15.18	1.97	0.50	92.60
ถังหมักถึงคอลัมน์ที่ 1	0.08	1770	185.07	34.87	2.79	0.48	88.89
ถังหมักถึงคอลัมน์ที่ 2	0.05	2540	178.05	41.15	2.06	0.52	96.30
ถังหมักถึงคอลัมน์ที่ 3	0.04	3320	153.94	54.55	2.18	0.53	98.15

* ดูรายละเอียดในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.11 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน โดยระบบ cascade ที่อัตราการเจือจางรวมต่างๆ

อัตราการเจือจางรวม (ต่อชั่วโมง)	RTS	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E
0.007	45.84	107.14	0.75	0.51	94.45
0.02	119.83	66.13	1.32	0.48	88.89
0.04	153.94	54.55	2.18	0.53	98.15

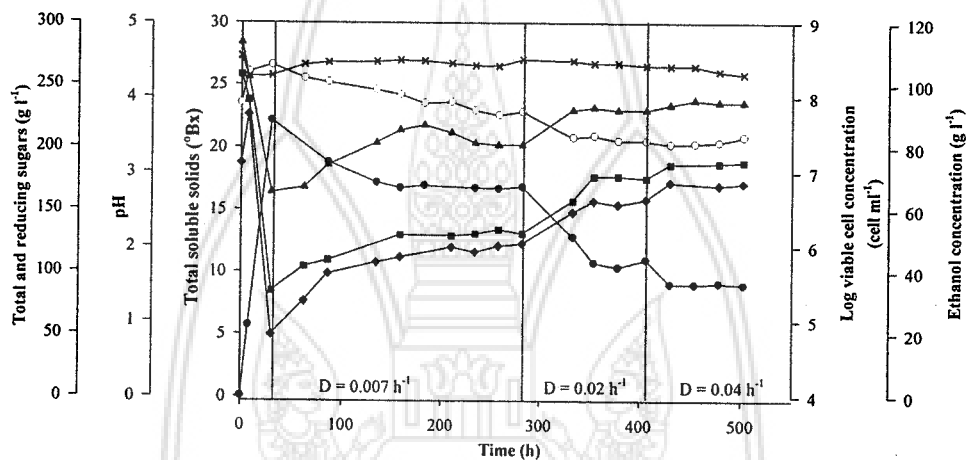
RTS = ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือ (กรัมต่อลิตร),

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ใช้), E = ประสิทธิภาพผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)

เมื่อเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน โดยระบบ cascade (ตารางที่ 2.11) กับการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยระบบทั่วไปคือ ระบบถังกวน

(continuous stirred tank bioreactor, CSTR) (รูปที่ 2.22 และ ตารางที่ 2.12) ที่ปริมาตรทำงานรวมที่เท่ากันพบว่า ระบบ cascade ได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตเท่ากัน โดยระบบ cascade ผลิตเอทานอลได้มากกว่าระบบ CSTR เท่ากับ 39.86, 23.32 และ 22.43 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเจือจางรวมของระบบ 0.007, 0.02 และ 0.04 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในแง่ของอัตราผลผลิตเอทานอลพบว่าระบบ cascade มีอัตราผลผลิตเอทานอลสูงกว่าระบบ CSTR เท่ากับ 0.78, 0.46 และ 0.74 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่อัตราการเจือจางรวมของระบบ 0.007, 0.02 และ 0.04 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับความสามารถในการใช้น้ำตาลของยีสต์พบว่า *S. cerevisiae* NP 01 สามารถใช้น้ำตาลในระบบ cascade ได้ดีกว่าระบบ CSTR ที่ทุกอัตราการเจือจาง กล่าวคือ ที่อัตราการเจือจางรวมของระบบ 0.007, 0.02 และ 0.04 ต่อชั่วโมง ในระบบ cascade ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลได้ 82.16, 53.37 และ 40.10 เปอร์เซ็นต์ (ของน้ำตาลเริ่มต้น) ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้ระบบ CSTR ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลได้เพียง 49.29, 31.64 และ 27.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยระบบ CSTR จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (x = ฟิโอส, ▲ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, ■ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, ◆ = ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ● = ความเข้มข้นเอทานอล, ○ = ปริมาณเซลล์ที่มีชีวิต)

ตารางที่ 2.12 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน โดยระบบถังกวนที่อัตราการเจือจางรวมต่างๆ

อัตราการเจือจางรวม (ต่อชั่วโมง)	RTS	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E
0.007	130.93	67.28	0.47	0.53	98.18
0.02	176.51	42.81	0.86	0.53	97.28
0.04	187.68	36.12	1.44	0.51	95.25

* ดูรายละเอียดในตารางที่ 2.11

2.2.2 ผลการวิจัยส่วนที่ 2 : การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้เทคโนโลยี VHG

2.2.2.1 องค์ประกอบที่สำคัญในยีสต์เอ็กซ์แทร็ก เปปโตน และกากเซลล์ยีสต์แห้ง

ยีสต์เอ็กซ์แทร็ก 3 กรัมต่อลิตร และ เปปโตน 5 กรัมต่อลิตร เป็นองค์ประกอบหลักของอาหารสังเคราะห์สูตรผลิตเอทานอล (ethanol production medium) (Melzoch และคณะ, 1994) อย่างไรก็ตามไม่มีรายงานชัดเจนว่าสารอาหาร 2 ชนิดนี้มีองค์ประกอบอะไรที่สำคัญบ้าง และสารอีกชนิดหนึ่งที่จะใช้เป็นสารอาหารในการทดลองนี้คือกากเซลล์ยีสต์แห้ง หรือ dried spent yeast ซึ่งยังไม่มีรายงานชัดเจนว่ามีส่วนประกอบที่สำคัญอะไรบ้าง ดังนั้นจึงควรมีการเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่สำคัญในสารทั้ง 3 ชนิดนี้

ตารางที่ 2.13 แสดงองค์ประกอบที่สำคัญของยีสต์เอ็กซ์แทร็ก เปปโตน และกากเซลล์ยีสต์แห้ง ซึ่งจะใช้เป็นแหล่งอาหารเสริมในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG ผลการวิเคราะห์พบว่า กากเซลล์ยีสต์แห้งมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โซเดียม และคลอไรด์ต่ำกว่าในยีสต์เอ็กซ์แทร็ก และเปปโตน แต่มีปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียมสูงกว่า ในขณะที่องค์ประกอบอื่นที่วิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นกากเซลล์ยีสต์แห้งจึงน่าจะเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งอาหารเสริมในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

ตารางที่ 2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของยีสต์เอ็กซ์แทร็ก เปปโตน และกากเซลล์ยีสต์แห้ง

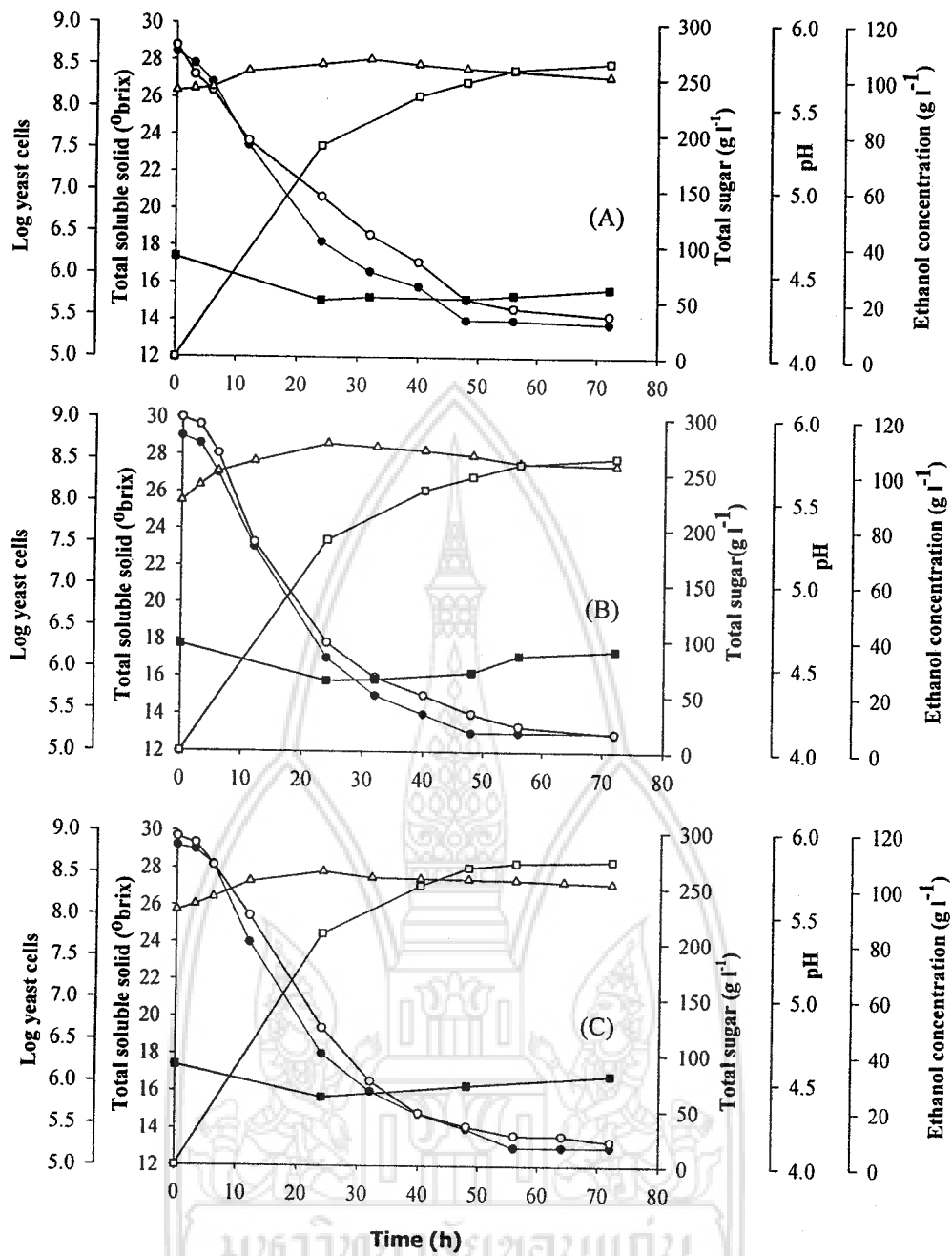
องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์)	ยีสต์เอ็กซ์แทร็ก	เปปโตน	กากเซลล์ยีสต์แห้ง
Total N	10.65	11.49	6.44
Total P	1.15	0.80	1.25
Total K	4.96	1.41	1.59
Total Na	0.82	2.99	0.34
Total Ca	0.024	0.013	0.067
Total Mg	0.054	0.014	0.174
Total Fe	0.0052	0.0102	0.0081
Total Mn	ND*	ND*	ND*
Total Cu	ND*	ND*	ND*
Total Zn	0.0087	0.0040	0.0044
Total Cl	0.25	2.70	0.11
Total S	0.35	1.00	0.35

* ไม่สามารถตรวจพบ

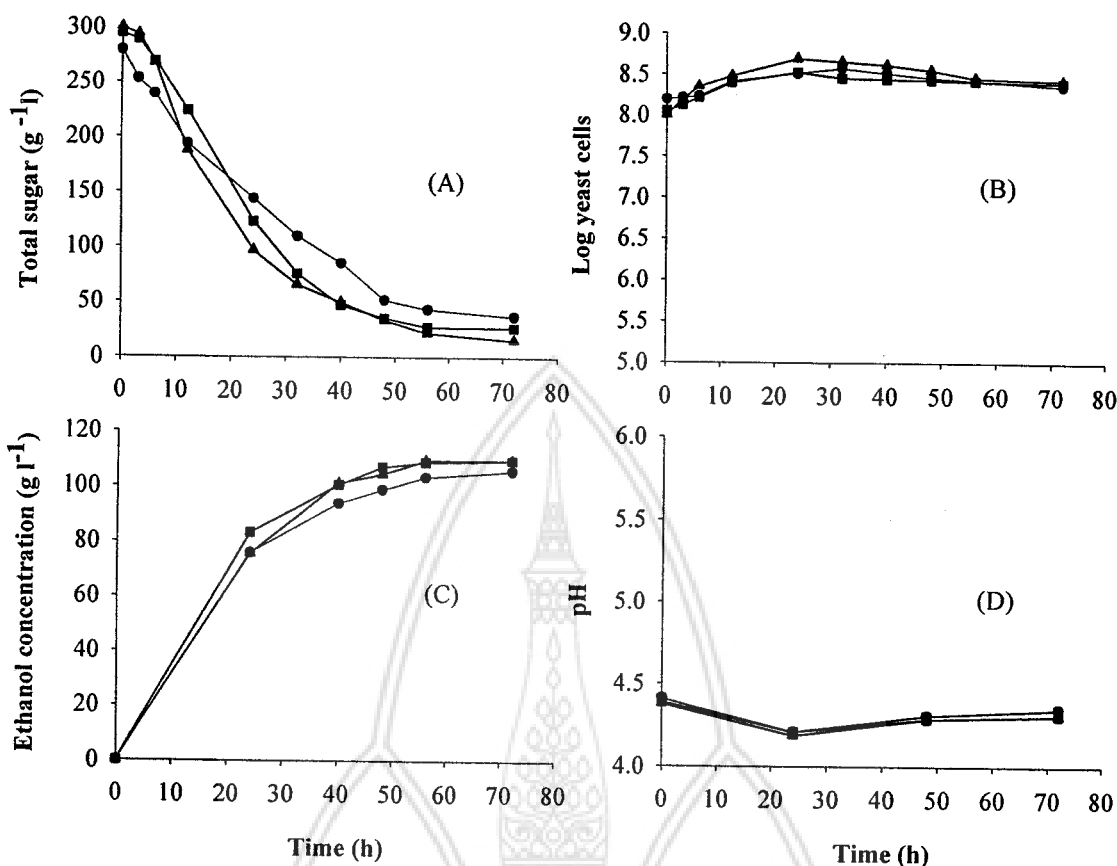
2.2.2.2 ผลของยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตเนต่อการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG

ก่อนการใช้กากเซลล์ยีสต์แห้งเป็นแหล่งอาหารเสริมในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานควรทราบก่อนว่า หากใช้ยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตเน ที่ถูกแนะนำว่าเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญในอาหารสังเคราะห์สูตรผลิตเอทานอล และเมื่อนำมาหมักเพื่อผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลได้หรือไม่

เมื่อนำหมัก 3 ชนิด คือ (1) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และเติมยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตเน 3.0 และ 5.0 กรัมต่อลิตร (SSJ+YEP) (2) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมยีสต์เอ็กซ์แทร็ก 8.0 กรัมต่อลิตร (SSJ+YE) และ (3) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่ไม่มีอาหารเสริม (SSJ, เป็นชุดควบคุม) ถูกนำมาใช้ในการผลิตเอทานอลในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.23 และ 2.24 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่สำคัญแต่ละชนิดในน้ำหมักทั้ง 3 สูตรมีแนวโน้มคล้ายกัน (รูปที่ 2.23) อย่างไรก็ตามเมื่อเติมยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตเน หรือยีสต์เอ็กซ์แทร็กอย่างเดียว (ในปริมาณรวมที่เท่ากันคือ 8 กรัมต่อลิตร) *S. cerevisiae* NP 01 สามารถใช้น้ำตาลได้เร็วกว่าน้ำหมักชุดควบคุม หลังจาก 24 ชั่วโมงของการหมัก (รูปที่ 2.24A) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณน้ำตาลคงเหลือในน้ำหมักเพียง 17-22 กรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำหมักชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลคงเหลือในน้ำหมักถึง 37 กรัมต่อลิตร การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลสอดคล้องกับปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น โดยพบว่าเมื่อใช้น้ำหมัก SSJ+YEP และ SSJ+YE ได้ปริมาณเอทานอลสูงกว่าน้ำหมักชุดควบคุมเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการหมักที่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำหมัก SSJ+YEP และ SSJ+YE พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ไม่แตกต่างกัน ส่วนปริมาณเซลล์ยีสต์ในน้ำหมักพบว่ายีสต์สามารถเพิ่มจำนวนได้ใน 24 ชั่วโมงแรกของการหมัก (รูปที่ 2.24B) หลังจากนั้นปริมาณเซลล์ที่มีชีวิตค่อนข้างคงที่ การที่ปริมาณเซลล์ที่มีชีวิตยังมีค่าสูงเมื่อสิ้นสุดการหมักแสดงให้เห็นว่า *S. cerevisiae* NP 01 สามารถทนเอทานอลได้สูงถึงประมาณ 109 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าพีเอชของน้ำหมักทั้ง 3 สูตรมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการหมัก (รูปที่ 2.24D) เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลที่ได้เมื่อใช้น้ำหมักสูตรต่างๆ (ตารางที่ 2.14) พบว่าเมื่อใช้น้ำหมัก SSJ+YE ให้อัตราผลผลิตเอทานอลสูงสุดเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการหมักต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการหมักที่เท่ากันที่ 48 ชั่วโมง (ตารางที่ 2.15) พบว่า SSJ+YE ให้ความเข้มข้นและอัตราผลผลิตเอทานอลสูงสุด ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าแหล่งอาหารเสริม (คือยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตเน) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลภายใต้สภาวะ VHG ได้ และสามารถใช้ยีสต์เอ็กซ์แทร็กแทนเปปโตเนในอาหารสังเคราะห์สูตรผลิตเอทานอลได้ (เนื่องจากเปปโตเนมีราคาแพงกว่ายีสต์เอ็กซ์แทร็กประมาณ 1.5 เท่า)



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสูตรต่างๆ ที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร : SSJ (A), SSJ+YEP (B) และ SSJ+YE (C) (Δ = ปริมาณเซลล์ยีสต์, $\bullet$ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, $\circ$ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, $\blacksquare$ = พีเอช, $\square$ = ความเข้มข้นเอทานอล)



รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (A) ปริมาณเซลล์ยีสต์ (B) ความเข้มข้นเอทานอล (C) และ พีเอช (D) ในน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสูตรต่างๆ : SSJ (●), SSJ+YEP (▲) และ SSJ+YE (■)

ตารางที่ 2.14 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลภายใต้สภาวะ VHG จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสูตรต่างๆ

น้ำหมัก	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
SSJ (control)	105.70	1.47	0.44	81.48	72
SSJ+YEP	109.42	1.95	0.43	79.63	56
SSJ+YE	107.12	2.23	0.44	81.48	48

SSJ = น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร (ชุดควบคุม)

SSJ+YEP = SSJ ที่มียีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตน 3.0 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

SSJ+YE = SSJ ที่มียีสต์เอ็กซ์แทร็ก 8.0 กรัมต่อลิตร

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเทียบกับผลได้ทางทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 2.15 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลภายใต้สภาวะ VHG จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสูตรต่างๆ ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง

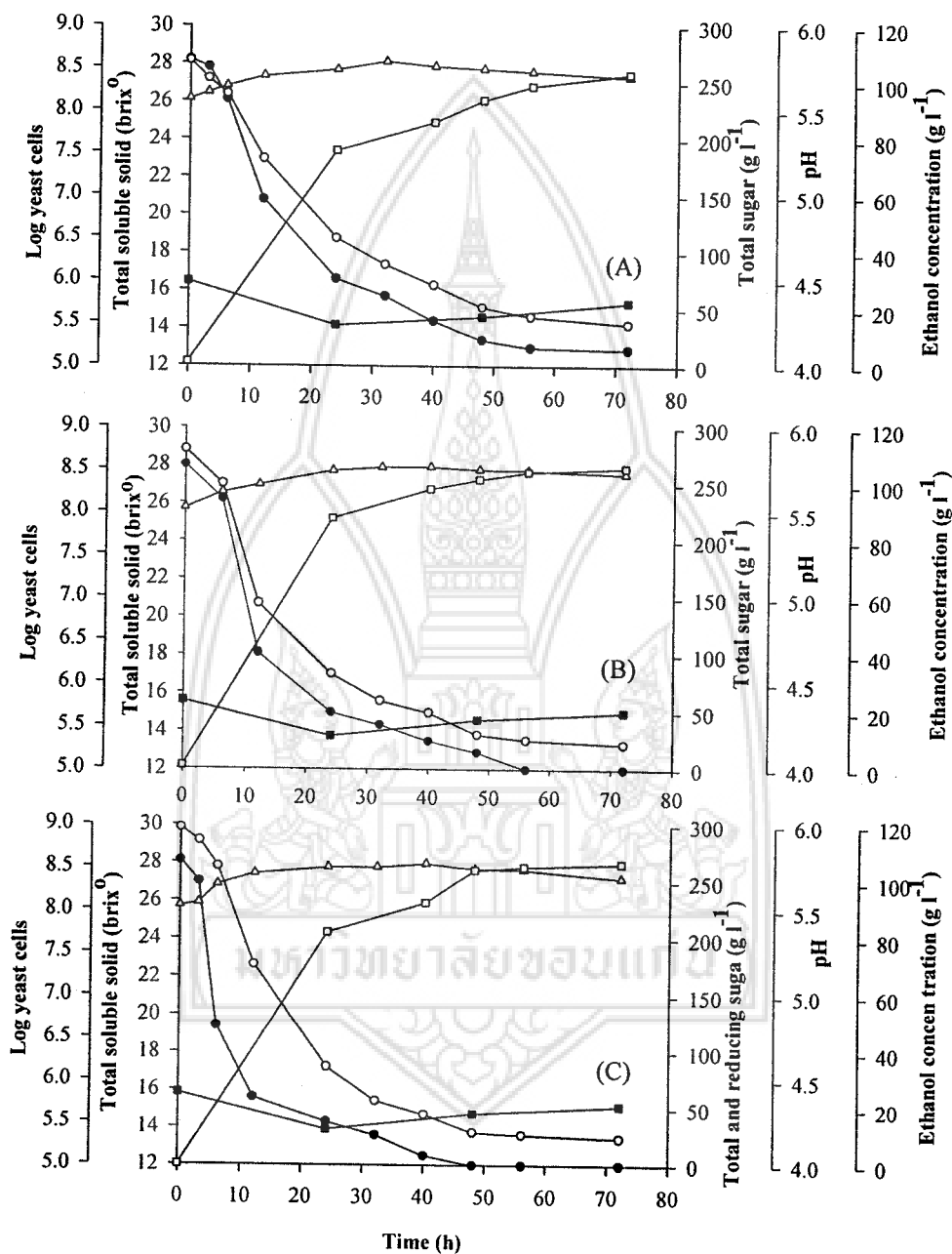
น้ำหมัก	P^*	Q_p^*	$Y_{p/s}^*$	E^*	t^*
SSJ (control)*	98.90	2.06	0.44	81.48	48
SSJ+YEP*	104.60	2.18	0.42	77.78	48
SSJ+YE*	107.12	2.23	0.44	81.48	48

* ดูรายละเอียดในตารางที่ 2.14

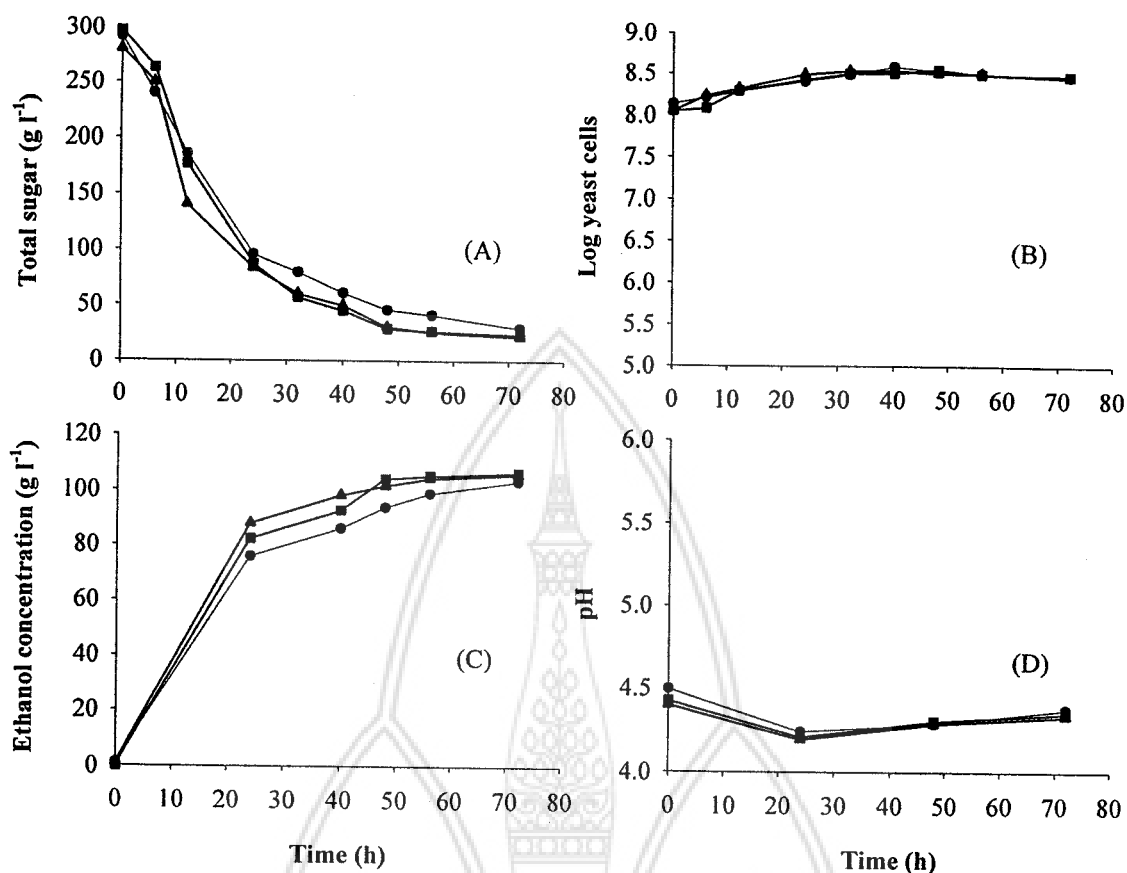
2.2.2.3 ผลของกากเซลล์ยีสต์แห้งต่อการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG

จากผลการทดลองที่ 2.2.2.2 พบว่ายีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตโนสามารถเพิ่มอัตราการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานได้ อย่างไรก็ตามยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตโนเป็นสารอาหารที่ราคาแพง (ยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตโน 500 กรัม ราคาประมาณ 2,000 และ 3,000 บาท ตามลำดับ) ซึ่งอาจไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตเอทานอลเชิงพาณิชย์ แนวทางแก้ไขทางหนึ่งคือ การใช้กากเซลล์ยีสต์แห้งแทน เนื่องจากพบว่าในกากเซลล์ยีสต์แห้งมีองค์ประกอบของสารอาหารหลายชนิดใกล้เคียงกับยีสต์เอ็กซ์แทร็กและเปปโตโน (ตารางที่ 2.13) การทดลองนี้จึงต้องการศึกษาผลของกากเซลล์ยีสต์แห้งต่อการผลิตเอทานอลและหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกากเซลล์ยีสต์แห้งต่อการผลิตเอทานอล โดยหมักเอทานอลในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อที่มีน้ำตาล 280 กรัมต่อลิตร และเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 0 (SSJ, เป็นชุดควบคุม), 8 และ 16 กรัมต่อลิตร โดยหมักในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.25 และ 2.26 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำหมักทั้ง 3 สูตรมีแนวโน้มคล้ายกัน (รูปที่ 2.25) อย่างไรก็ตามเมื่อเติมกากเซลล์ยีสต์แห้งลงในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน *S. cerevisiae* NP 01 สามารถใช้น้ำตาลได้เร็วกว่าน้ำหมักชุดควบคุม (รูปที่ 2.26A) ผลการทดลองที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่าการเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8-16 กรัมต่อลิตร ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลได้ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเมื่อสิ้นสุดการหมักมีน้ำตาลคงเหลือประมาณ 24-29 กรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าการเติมกากเซลล์ยีสต์แห้งทำให้ยีสต์สามารถผลิตเอทานอลได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการหมักที่เท่ากัน (รูปที่ 2.26C) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้เมื่อสิ้นสุดการหมักมีค่าใกล้เคียงกันทุกสภาวะที่ใช้ทดลอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำหมักที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 และ 16 กรัมต่อลิตร พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ไม่แตกต่างกัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณเซลล์ยีสต์ในน้ำหมักทั้ง 3 สูตร (รูปที่ 2.26B) พบว่าไม่แตกต่างกัน โดยมีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นใน 24 ชั่วโมงแรก และคงที่ตลอดการทดลอง ส่วนพีเอชของน้ำหมักทั้ง 3 สูตร (รูปที่ 2.26D) มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่งให้ผลคล้ายกับการทดลองที่ 2.2.1.2 เมื่อคำนวณ

ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลที่ได้เมื่อใช้น้ำหมักสูตรต่างๆ (ตารางที่ 2.16) พบว่าเมื่อใช้น้ำหมักที่เติมกากเชลลียีสต์แห้ง 8 และ 16 กรัมต่อลิตรให้อัตราผลผลิตเอทานอลสูงที่สุดเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการหมักต่ำที่สุด ส่วนค่าผลได้ของเอทานอลเมื่อใช้น้ำหมักทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้กากเชลลียีสต์แห้งกับการทดลองที่ใช้ยีสต์เอ็กซ์แทรกเป็นอาหารเสริมพบว่าได้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2.15 และ 2.16)



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเชลลียีสต์แห้งที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยมีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร : 0 (A), 8 (B) และ 16 (C) กรัมต่อลิตร (Δ = ปริมาณเชลลียีสต์, $\bullet$ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, $\circ$ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, $\blacksquare$ = พีเอช, $\square$ = ความเข้มข้นเอทานอล)



รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (A) ปริมาณเซลล์ยีสต์ (B) ความเข้มข้นเอทานอล (C) และ พีเอช (D) ในน้ำหมักระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ : 0 (●), 8 (▲) และ 16 (■) กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.16 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้งที่ความเข้มข้นต่างๆ ภายใต้สภาวะ VHG ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง

กากเซลล์ยีสต์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
0	98.90	2.06	0.44	81.48	48
8	104.54	2.18	0.42	77.78	48
16	105.36	2.20	0.42	77.78	48

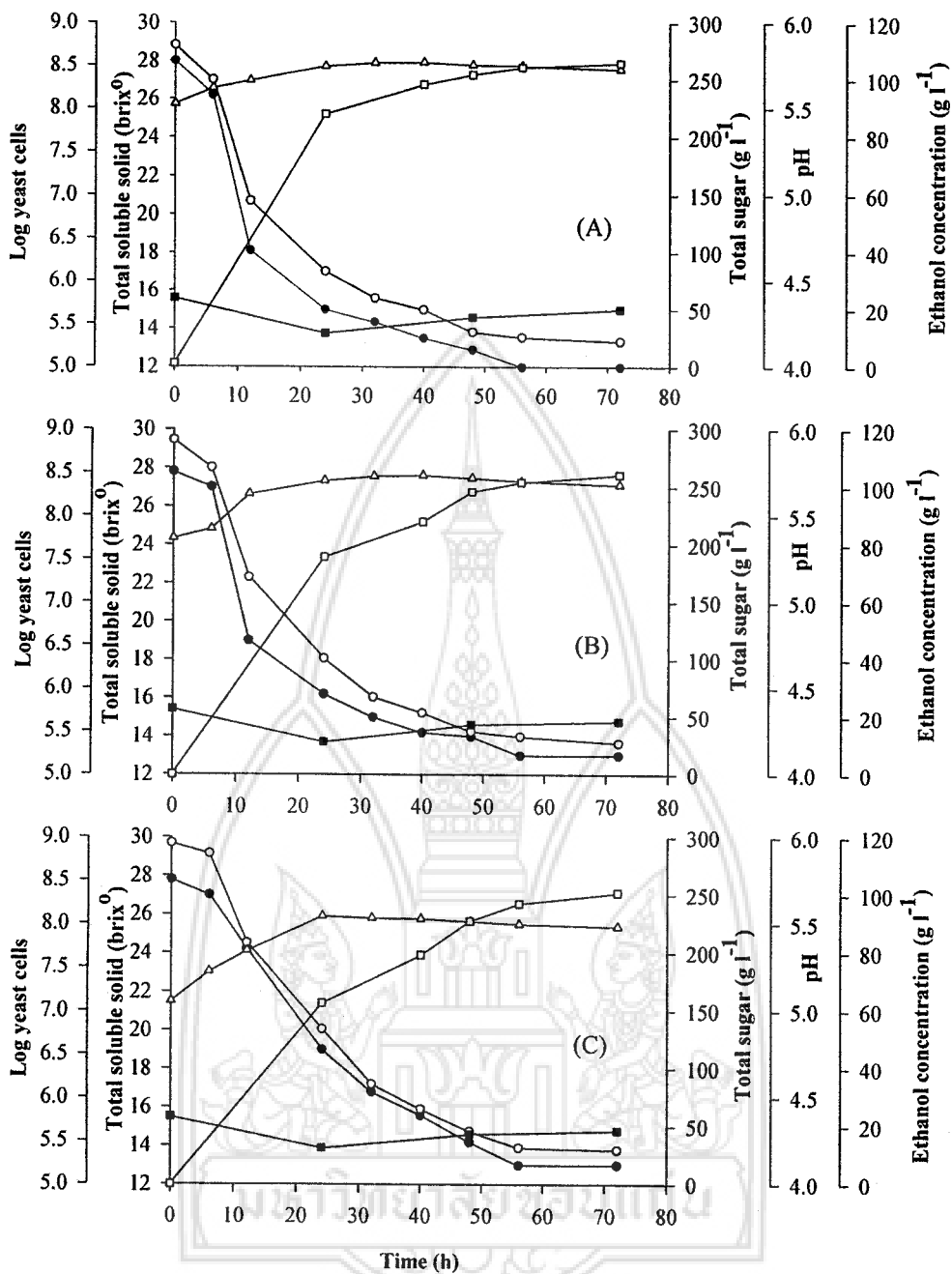
P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

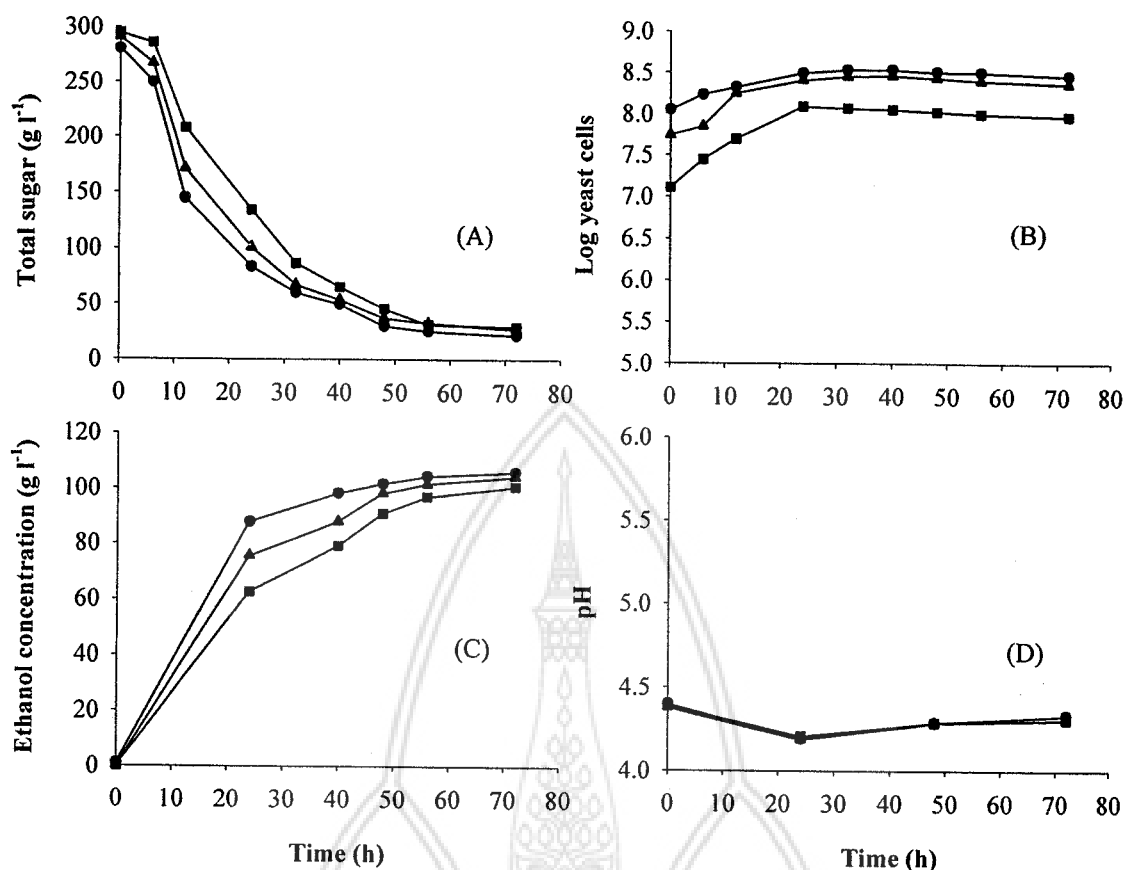
E = ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเทียบกับผลได้ทางทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)

2.2.2.4 ผลของปริมาณยีสต์เริ่มต้นต่อการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG

จากผลการทดลองข้อ 2.2.2.3 พบว่ากากเซลล์ยีสต์แห้งสามารถใช้แทนยีสต์เอ็กซ์แทรกในการเพิ่มอัตราการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานได้ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นเริ่มต้นของยีสต์ที่ใช้ในการทดลองที่ผ่านมาก่อนข้างสูง (ประมาณ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร) ซึ่งทำให้ต้องเตรียมกล้าเชื้อเริ่มต้นจำนวนมาก และจากการทดลองที่ผ่านมามีพบว่ายีสต์สามารถเจริญหรือเพิ่มจำนวนได้ดีใน 12 ชั่วโมงแรกของการทดลอง ดังนั้นหากสามารถใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้นลดลงจะทำให้สามารถลดต้นทุนในการเตรียมกล้าเชื้อได้ การทดลองนี้จึงต้องการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของยีสต์ต่อการผลิตเอทานอลและหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของยีสต์ต่อการผลิตเอทานอล โดยหมักเอทานอลในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานปลอดเชื้อที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และเติมกากเซลล์แห้งยีสต์ 8 กรัมต่อลิตร โดยแปรผันปริมาณยีสต์เริ่มต้นเป็น 1×10^7 , 5×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร หมักในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.27 และ 2.28 โดยพบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำหมักที่สภาวะต่างๆ คล้ายกัน (รูปที่ 2.27) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเจริญของยีสต์ในน้ำหมักพบว่าที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ยีสต์สามารถเจริญและเพิ่มจำนวนได้ประมาณ 3 เท่า (เป็น 3.22×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร) ใน 24 ชั่วโมงแรกของการหมัก (รูปที่ 2.28B) ในขณะที่เมื่อใช้จำนวนยีสต์เริ่มต้นเป็น 5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ยีสต์สามารถเพิ่มจำนวนได้ใกล้เคียงกับเมื่อใช้เซลล์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ภายใน 12 ชั่วโมง ในขณะที่เมื่อใช้เซลล์เริ่มต้น 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จำนวนเซลล์ยีสต์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดที่ 24 ชั่วโมง โดยที่เวลาดังกล่าวมีจำนวนเซลล์ในน้ำหมักต่ำกว่าเมื่อใช้เซลล์เริ่มต้น 5×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ประมาณ 3 เท่า จำนวนเซลล์ยีสต์ในน้ำหมักมีผลต่ออัตราการใช้น้ำตาลและการผลิตเอทานอลของยีสต์โดยเฉพาะในช่วง 48 ชั่วโมงแรก (รูปที่ 2.28A และ C) แต่ไม่มีผลต่อความเข้มข้นสุดท้ายของเอทานอลที่ได้ ซึ่งที่ทุกสภาวะความเข้มข้นสุดท้ายของเอทานอลมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่เซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^7 , 5×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าความเข้มข้นเอทานอลมีค่าสูงสุดที่ 72, 56 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ 48 ชั่วโมงของการหมักพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลเมื่อใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้น 5×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีค่าต่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ คือได้ความเข้มข้นเอทานอล 101.67 และ 104.54 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลที่ระยะเวลาการหมักที่เท่ากัน 48 ชั่วโมง เมื่อใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้น 5×10^7 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีค่าอัตราผลผลิตและผลได้ของเอทานอลไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.17) ดังนั้นความเข้มข้นของยีสต์ที่จะเลือกใช้ในการผลิตเอทานอลในระดับขยายขนาดคือ 5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (เนื่องจากสามารถลดปริมาณของการเตรียมกล้าเชื้อลงได้ 2 เท่า เมื่อเทียบกับเมื่อใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



รูปที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นเซลล์เริ่มต้นต่างๆ : 1×10^8 (A), 5×10^7 (B) และ 1×10^7 (C) เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Δ = ปริมาณเซลล์ยีสต์, $\bullet$ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, $\circ$ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, $\blacksquare$ = พีเอช, $\square$ = ความเข้มข้นเอทานอล)



รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (A) ปริมาณเซลล์ยีสต์ (B) ความเข้มข้นเอทานอล (C) และ พีเอช (D) ในน้ำหมักระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้นต่างๆ : 1×10^8 (●), 5×10^7 (▲) และ 1×10^7 (■) เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 2.17 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาณเซลล์เริ่มต้นต่างๆ ภายใต้สภาวะ VHG ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง

ปริมาณเซลล์เริ่มต้น (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E	t
1×10^8	104.54	2.18	0.42	77.78	48
5×10^7	101.67	2.12	0.42	77.78	48
1×10^7	97.05	2.02	0.42	77.78	48

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

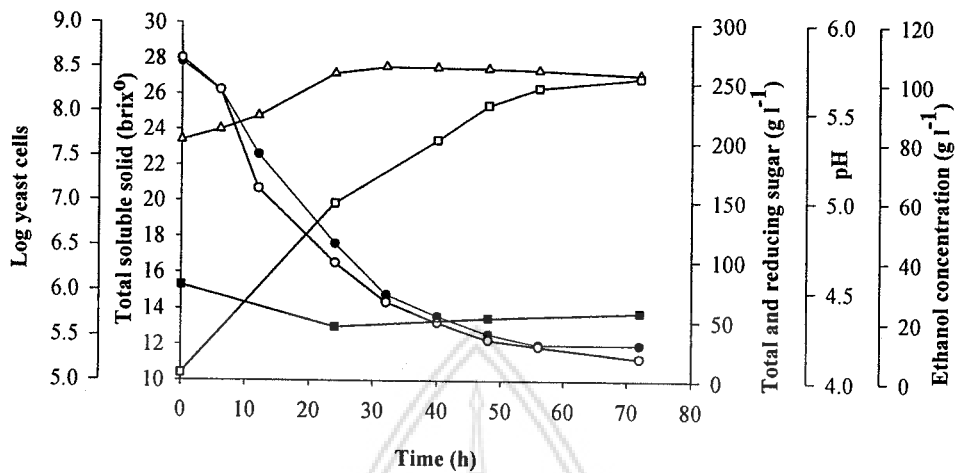
E = ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเทียบกับผลได้ทางทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)

2.2.2.5 การหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในระดับขยายขนาด

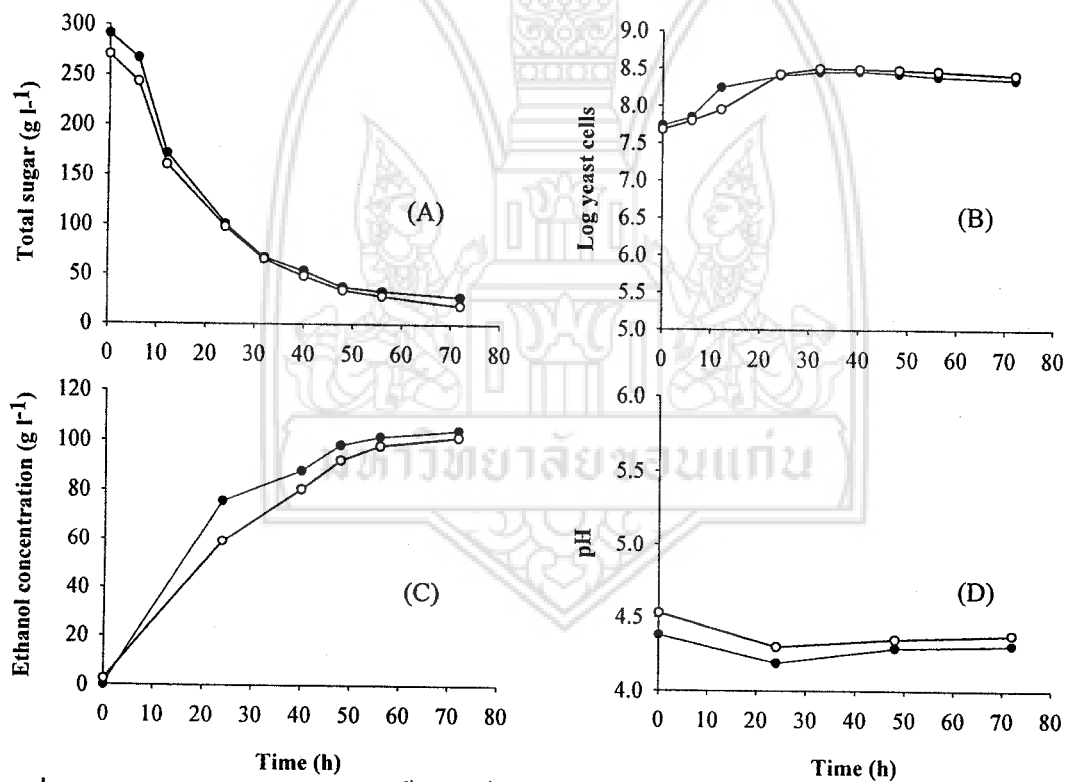
ภายใต้การหมักแบบ VHG และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในถังหมักขนาดต่างกัน

จากการทดลองข้อ 2.2.2.4 พบว่าความเข้มข้นของยีสต์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 กรัมต่อลิตรคือที่ 5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร อย่างไรก็ตามการทดลองก่อนหน้านี้เป็นการทดลองขนาดเล็กในถังหมักขนาด 5 ลิตร จึงควรมีการทดลองหมักในระดับขยายขนาดก่อนนำไปทดลองหมักในระดับ pilot scale หรือ industrial scale การทดลองนี้จึงเป็นการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.2.2.3 ถึง 2.2.2.4 ในถังหมักขนาด 50 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.29

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ระหว่างการหมักในถังหมักขนาด 5 ลิตร และ 50 ลิตร (รูปที่ 2.30) พบว่าคล้ายกัน โดยความเข้มข้นของน้ำตาลลดลงอย่างรวดเร็วใน 48 ชั่วโมงแรกของการหมัก หลังจากนั้นความเข้มข้นของน้ำตาลลดลงอย่างช้าๆ ในทั้ง 2 สภาวะ (รูปที่ 2.30A) ส่วนความเข้มข้นของเอทานอลที่เกิดขึ้นในถังหมัก 5 ลิตร พบว่าเกิดขึ้นได้เร็วกว่าในถังหมัก 50 ลิตร ใน 48 ชั่วโมงแรก อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการหมักที่ 72 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2.30C) สำหรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณยีสต์ทั้ง 2 สภาวะ พบว่าไม่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำหมักในระหว่างการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 4.2 ถึง 4.5 ตลอดการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในถังหมักขนาด 5 และ 50 ลิตร (ตารางที่ 2.18) พบว่า ที่ 48 ชั่วโมงของการหมัก ความเข้มข้นของเอทานอลและอัตราผลผลิตเอทานอลของการหมักในถังหมักขนาด 50 ลิตร มีค่าต่ำกว่าในถังหมักขนาด 5 ลิตร ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม การหมักทั้ง 2 สภาวะมีค่าผลได้เอทานอลไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการกวนและระบบควบคุมอุณหภูมิในถังหมักขนาด 50 ลิตร มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบการกวนและระบบควบคุมอุณหภูมิในถังหมักขนาด 5 ลิตร



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นเซลล์เริ่มต้น 5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในถังหมักขนาด 50 ลิตร (Δ = ปริมาณเซลล์ยีสต์, $\bullet$ = ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, $\circ$ = ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด, $\blacksquare$ = พีเอช, $\square$ = ความเข้มข้นเอทานอล)



รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (A) ปริมาณเซลล์ยีสต์ (B) ความเข้มข้นเอทานอล (C) และ พีเอช (D) ในน้ำหมักระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในถังหมักขนาด 5 (●) และ 50 (○) ลิตร

ตารางที่ 2.18 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานในถังหมักขนาด 5 และ 50 ลิตร ภายใต้สภาวะ VHG

ขนาดถังหมัก (ลิตร)	t	P	Q_p	$Y_{p/s}$	E
5	48	101.67	2.12	0.42	77.78
	56	104.36	1.86	0.42	77.78
50	48	98.12	2.04	0.42	77.78
	56	101.52	1.82	0.42	77.78

P = ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร), Q_p = อัตราการผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)

$Y_{p/s}$ = ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป), t = ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)

E = ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเทียบกับผลได้ทางทฤษฎี (เปอร์เซ็นต์)

2.2.3 การคำนวณต้นทุนโดยประมาณในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานและเปรียบเทียบกับการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบชนิดอื่นที่ใช้ในการผลิตเอทานอล

งานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะต้นทุนวัตถุดิบคือข้าวฟ่างหวาน โดยพบว่าต้นทุนการผลิตข้าวฟ่างหวานของเกษตรกรประมาณ 650 บาท/ตัน (0.65 บาท/กิโลกรัม) (ประสิทธิ์ ใจสิด, 2551) และข้าวฟ่างหวาน 1 ตัน จะได้น้ำหวานที่สามารถนำไปหมักเอทานอลประมาณ 500 ลิตร โดยน้ำหวานที่คั้นได้มีความเข้มข้นของน้ำตาลประมาณ 180 กรัมต่อลิตร

เพราะฉะนั้นข้าวฟ่างหวาน 1 ตัน จะมีความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมด 90,000 กรัม

จากผลการวิจัยนี้พบว่า ประสิทธิภาพผลได้เอทานอลมีค่าประมาณ 95% ของผลได้ทางทฤษฎี (ผลได้เอทานอลทางทฤษฎีเมื่อนำน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 0.54 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาล)

ดังนั้นข้าวฟ่างหวาน 1 ตันจะได้เอทานอลทั้งหมด = $(90,000)(0.95)(0.54) = 46,170$ กรัม

= 46.17 กิโลกรัม

หรือ = 58.44 ลิตร

(ความหนาแน่นของเอทานอล: เอทานอล 1 มิลลิลิตร = 0.79 กรัม)

จากต้นทุนวัตถุดิบและผลผลิตเอทานอลที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับเมื่อใช้วัตถุดิบชนิดอื่นในการผลิตเอทานอล (กากน้ำตาล มันสำปะหลัง และอ้อย) ดังแสดงในตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานและวัตถุดิบชนิดอื่นๆ

วัตถุดิบ	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)	ผลผลิตเอทานอล (ลิตร/ตัน)	ต้นทุนการผลิตเอทานอล (บาท/ลิตร)*
กากน้ำตาล**	2.5	250	10.00
มันสำปะหลัง**	2.5	180	13.89
อ้อย**	0.7	70	10.00
ข้าวฟ่างหวาน	0.65	58	11.20

* คัดเฉพาะต้นทุนของวัตถุดิบ

** ที่มา : ประสิทธิ์ ใจศิลป์ (2550 และ 2551)

ตารางที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าต้นทุนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน (คิดเฉพาะในส่วน of วัตถุดิบ) มีค่าสูงกว่าเมื่อใช้กากน้ำตาล และอ้อยเป็นวัตถุดิบ ประมาณ 1 บาท และมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อใช้มันสำปะหลังผลิตเอทานอลประมาณ 2-3 บาท ต่อ เอทานอล 1 ลิตร

