

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (แก่นตะวัน)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันที่ปลูกในแหล่งต่างๆ คือ จังหวัดขอนแก่น และชัยภูมิ โดยวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดต่าง ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณอินูลิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณแร่ธาตุบางชนิดที่มีอยู่ในวัตถุดิบ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวัน

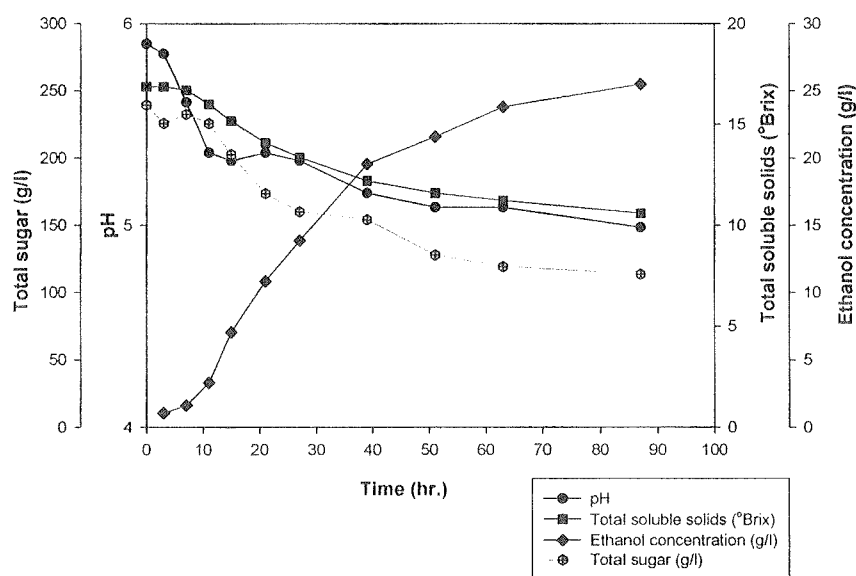
องค์ประกอบ	ปริมาณที่พบ
pH	5.45 ± 0.19
Moisture (%)	76.2 ± 2.0
Total soluble solid (^o Brix)	16.47 ± 0.34
Total sugar (g/l)	285.56 ± 31.79
Reducing sugar (g/l)	27.25 ± 0.28
Inulin content (g/l)	222.22 ± 31.87
Phenolic compound (g/l)	0.463 ± 0.36
Nitrogen (N) (mg/l)	238 ± 0.113
Phosphorus (P) (mg/l)	18 ± 0.014
Potassium (K) (mg/l)	262 ± 0.081
Calcium (Ca) (mg/l)	7 ± 0.0004
Magnesium (Mg) (mg/l)	34 ± 0.011
Sulfur (S) (mg/l)	10 ± 0.001
Sodium (Na) (mg/l)	26 ± 0.001
Ferrous (Fe) (mg/l)	14.4 ± 3.911
Manganese (Mn) (mg/l)	1.284 ± 0.034
Copper (Cu) (mg/l)	0.584 ± 0.091
Zinc (Zn) (mg/l)	1.9 ± 0.052

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในวัตถุดิบจะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่พบในน้ำคั้นจากหัวแก่้นตะวันอยู่ในรูปของอินูลิน โดยมีค่าประมาณ 77.82 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ NNFCC (2002, อ้างถึงในสนั่น และคณะ, 2549) ที่กล่าวว่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลทั้งหมดที่พบในหัวแก่้นตะวันจะอยู่ในรูปของอินูลินซึ่งมีน้ำตาลฟรุคโตสเป็นองค์ประกอบหลัก

นอกจากนี้ยังพบว่าในน้ำคั้นจากหัวแก่้นตะวันยังมีแร่ธาตุหลายชนิดที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานของเอนไซม์ (เป็น co-factor ของเอนไซม์) เช่น Zn, Mg, Mn, Fe เป็นต้น จากองค์ประกอบข้างต้นชี้ให้เห็นว่าหัวแก่้นตะวันมีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล

4.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำคั้นจากหัวแก่้นตะวันที่ไม่ผ่านการย่อยเป็นวัตถุดิบในการเจริญและผลิตเอทานอลโดยใช้ *S. cerevisiae*

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำคั้นจากหัวแก่้นตะวันที่ไม่ผ่านการย่อยอินูลิน มาทดสอบการหมักเอทานอลโดยใช้ *S. cerevisiae* ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดย *S. cerevisiae* มีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำคือ ประมาณ 3% โดยปริมาตร (ประมาณ 25 กรัมต่อลิตร) และมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเหลืออยู่ค่อนข้างมาก (ประมาณ 114 กรัมต่อลิตร) (ภาพที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าน้ำตาล (อินูลิน) ที่มีอยู่ในวัตถุดิบนั้น ยีสต์ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อการเจริญและผลิตเอทานอลได้ ดังนั้นในการนำหัวแก่้นตะวันมาใช้ในการผลิตเอทานอล จำเป็นต้องนำวัตถุดิบมาย่อยสลายสารอินูลินให้กลายเป็นน้ำตาลที่สามารถหมักได้ คือ กลูโคส และฟรุคโตส



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่้นตะวันที่ไม่ผ่านการย่อยอินูลินโดยใช้ *S. cerevisiae*

4.3 ผลการทดสอบการหมักเอทานอล โดยใช้ น้ำคั้นจากหัวแก่งตะวัน ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดและ เอนไซม์เป็นวัตถุดิบในการหมัก โดยใช้ *S. cerevisiae*

จากการศึกษาโดยนำน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันไปย่อยสลายสารอินลินให้กลายเป็นน้ำตาลที่สามารถหมักได้ โดยใช้สภาวะต่างๆ ได้แก่ การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที และการย่อยด้วยเอนไซม์อินูลเลสที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การย่อยน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันด้วย กรดซัลฟิวริก ร่วมกับการให้ความร้อนสามารถย่อยสลายสารอินลินได้ดีกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้ยังพบว่า การย่อยที่อุณหภูมิสูง สามารถย่อยสลายสารอินลินได้ดีกว่าการย่อยที่อุณหภูมิต่ำ (ตารางที่ 4.2)

จากตารางที่ 4.2 ยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการย่อยวัตถุดิบสูงขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ก็จะมากขึ้นด้วย โดยที่สภาวะการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด คือประมาณ 154 กรัมต่อลิตร ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณอินลินที่เหลือน้อยลง (ประมาณ 80 กรัมต่อ ลิตร) แสดงว่าอินลินถูกย่อยไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่สภาวะการย่อยด้วยกรด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการย่อยด้วยเอนไซม์ จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณอินลินที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าอุณหภูมิมีผลต่อการย่อยอินลิน

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำคั้นแก่งตะวันทั้งก่อนและหลังการย่อย

วิธีเตรียมวัตถุดิบ	Total soluble solid (°Brix)	Total sugar (g/l)	Reducing sugar (g/l)	Inulin content (g/l)	Phenolic compound (g/l)
ไม่ได้ย่อย	16.9	285.56	27.25	222.22	0.72
ย่อยด้วยกรดที่ 60°C	18.0	255.90	76.57	147.01	0.624
ย่อยด้วยกรดที่ 80°C	19.0	260.12	139.10	88.27	0.728
ย่อยด้วยกรดที่ 100°C	19.4	267.40	154.18	79.50	0.928
ย่อยด้วยเอนไซม์	17.8	257.35	61.43	163.41	0.686

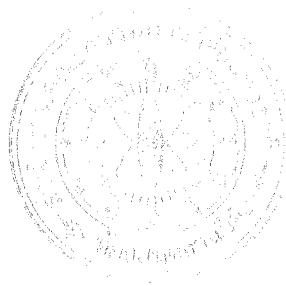
หลังจากย่อยอินลินในน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันด้วยสภาวะต่างๆ แล้ว ได้นำน้ำคั้นจากหัวแก่ง ตะวันที่ได้จากการย่อยที่สภาวะต่างๆ ไปทดสอบการหมักเอทานอลด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* โดยเติม กล้าเชื้อเริ่มต้น 5% โดยปริมาตร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากผล การทดลองพบว่า ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวัน ที่ผ่านการย่อยด้วยกรดหรือ เอนไซม์มีค่าสูงกว่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันที่ยังไม่ผ่านการย่อย สำหรับ

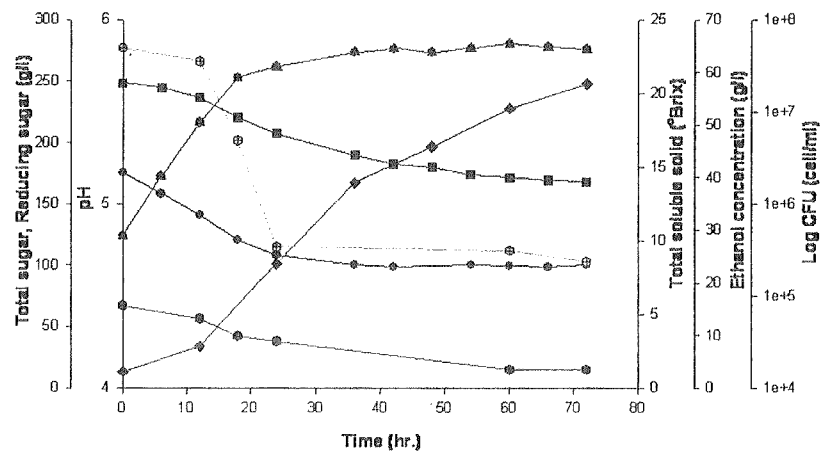
สภาวะที่ให้ปริมาณเอทานอลสูงที่สุดคือ สภาวะการย่อยด้วยกรดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ให้เอทานอลประมาณ 60 กรัมต่อลิตร) ส่วนสภาวะการย่อยด้วยเอนไซม์จะให้ปริมาณเอทานอลต่ำที่สุด คือ 49 กรัมต่อลิตร (ภาพที่ 4.2-4.5)

หากเปรียบเทียบผลได้ (yield) และอัตราผลผลิตเอทานอล (productivity) พบว่า สภาวะการย่อยน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันด้วยกรดซัลฟิวริกพร้อมกับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ให้ผลได้สูงสุดคือ 0.377 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป และอัตราผลผลิตเอทานอลสูงที่สุดเท่ากับ 0.838 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่สภาวะการย่อยด้วยกรดพร้อมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.3)

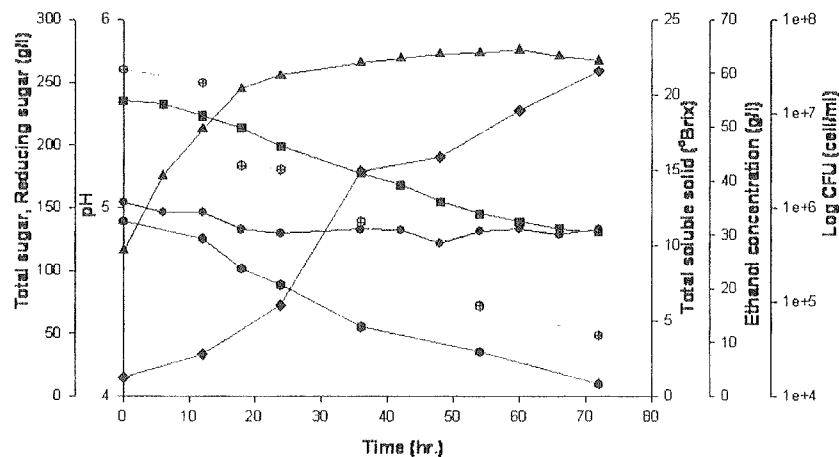
จากผลการทดลองข้างต้น จึงเลือกสภาวะการย่อยน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันด้วยกรดซัลฟิวริกพร้อมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองในขั้นต่อไป เนื่องจากให้ปริมาณเอทานอลและอัตราผลผลิตสูงสุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ แม้ว่าผลได้จะน้อยกว่าที่สภาวะการย่อยด้วยกรดพร้อมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แต่ที่สภาวะดังกล่าวให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการย่อยด้วยกรดพร้อมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ปริมาณเอทานอล ผลได้และอัตราผลผลิตเอทานอลใกล้เคียงกันแล้วนั้น พบว่าที่สภาวะดังกล่าวจะให้สารประกอบฟีนอลิกในปริมาณที่สูง ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญและการผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ยังสูงกว่าทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

ส่วนที่สภาวะการย่อยด้วยเอนไซมนั้น จะให้ปริมาณเอทานอล ผลได้และอัตราผลผลิตเอทานอลต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากปริมาณเอนไซม์ที่เติมลงไปมีปริมาณที่น้อยหรือในวัตถุดิบมีสารที่ไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยน้อยไปด้วย ดังนั้น จึงควรมีการแปรผันปริมาณเอนไซม์ที่เติมลงไปหรือวิเคราะห์หาสารที่มีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เพื่อให้สามารถย่อยอินลินได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

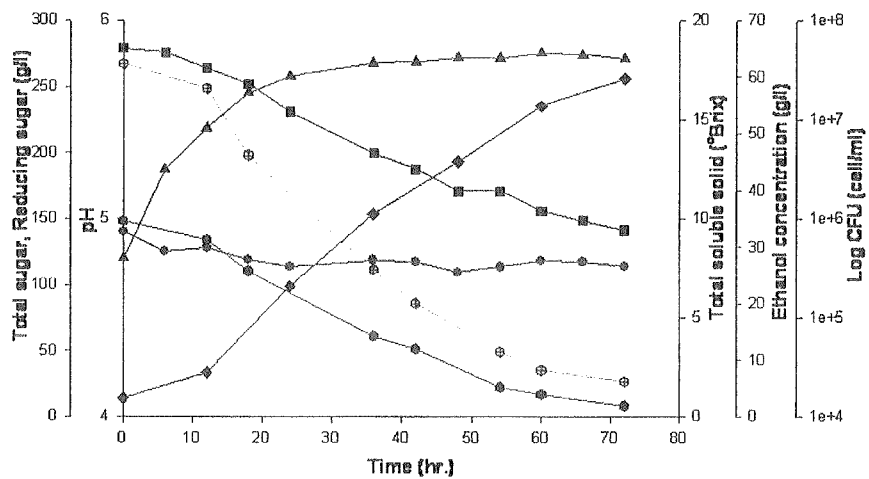




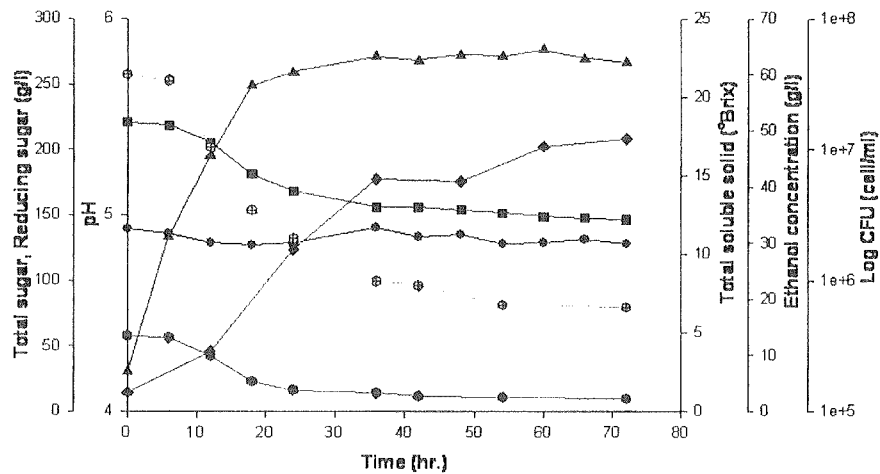
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันที่ผ่านมาการย่อยด้วยกรดร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C โดยเชื้อ *S. cerevisiae* โดยที่ —○— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —□— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันที่ผ่านมาการย่อยด้วยกรดร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C โดยเชื้อ *S. cerevisiae* โดยที่ —○— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —□— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำคั้นจากหัวแก่งตวันี่ผ่านการย่อยด้วยกรดร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C โดยเชื้อ *S. cerevisiae* โดยที่ —●— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —⊕— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำคั้นจากหัวแก่งตวันี่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์อินูลเลสโดยเชื้อ *S. cerevisiae* โดยที่ —●— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —⊕— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

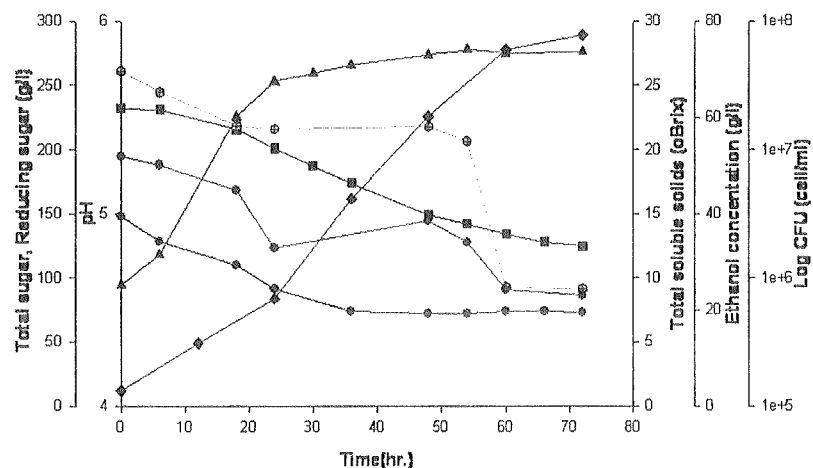
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบผ่านการย่อยอินูลินที่สภาวะต่างๆ

Condition	Total sugar (g/l)	Ethanol (g/l)	Yield (g/g)	Productivity (g/L/hr)
Acid 60°C	255.9	57.87	0.377	0.804
Acid 80°C	260.12	60.4	0.285	0.838
Acid 100°C	267.4	59.68	0.248	0.829
Enzyme	257.35	48.61	0.273	0.675

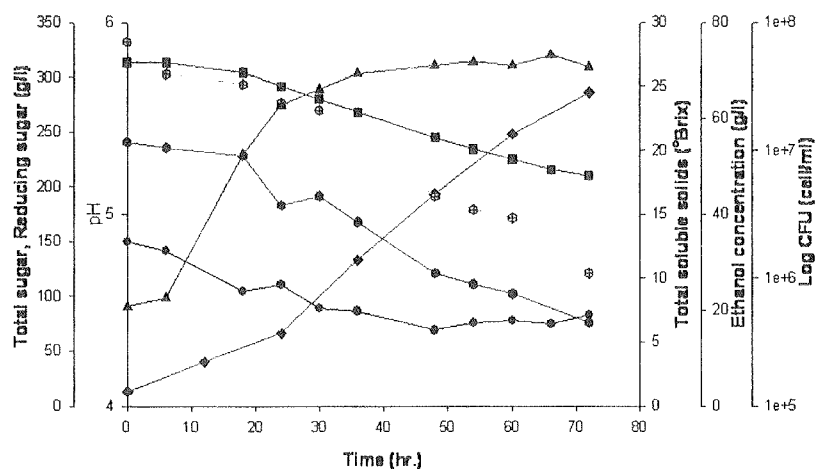
4.4 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแก่่นตะวันโดย *S. cerevisiae* โดยวิธีการหมักแบบกะ

4.4.1 ผลการแปรผันปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 250, 300 และ 350 กรัมต่อลิตร

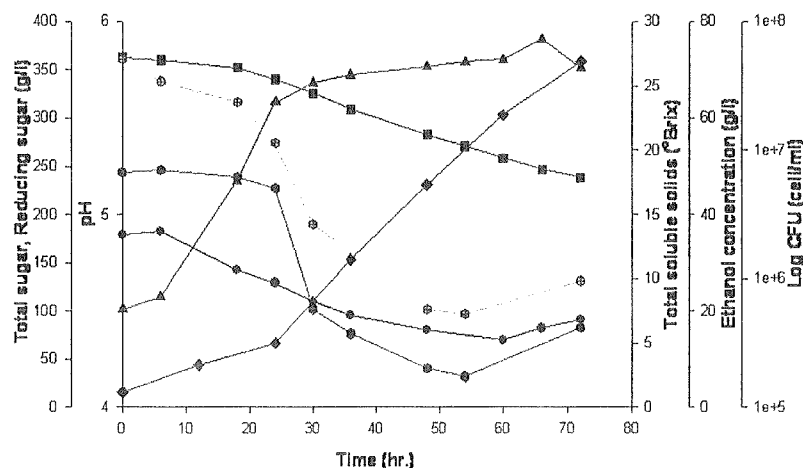
จากการทดลองหมักน้ำคั้นจากหัวแก่่นตะวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 250, 300 และ 350 กรัมต่อลิตร โดยใช้เชื้อเริ่มต้น 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าในระหว่างการหมัก เซลล์ยีสต์มีการเจริญและเพิ่มจำนวนขึ้นจนกระทั่งมีค่าเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงที่ 24 ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากเซลล์ยีสต์นำไปใช้เพื่อการเจริญและเริ่มมีค่าคงที่ที่ชั่วโมงที่ 36 – 48 ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเอทานอลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หากเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากน้ำคั้นหัวแก่่นตะวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ กัน พบว่าการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแก่่นตะวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณเอทานอลสูงสุดคือ 60.22 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 48 ชั่วโมงหลังจากการหมัก หรือประมาณ 77.19 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาในการหมัก 72 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.6-4.8)



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 250 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่ —■— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —●— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —×— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —*— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



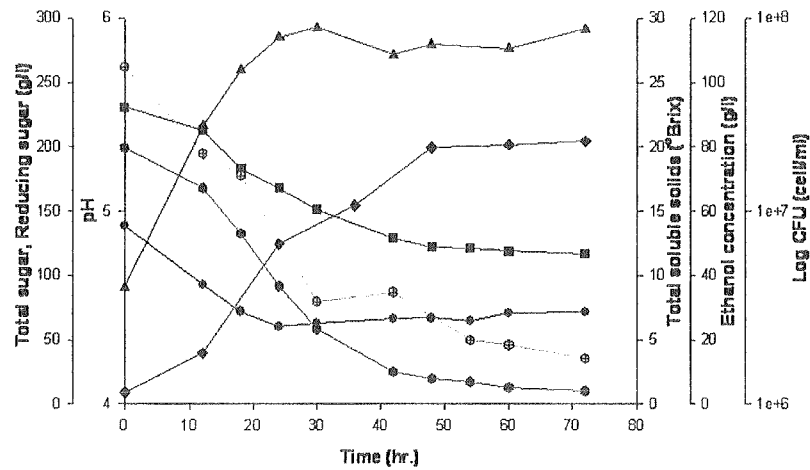
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 300 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่ —■— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —●— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —×— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —*— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



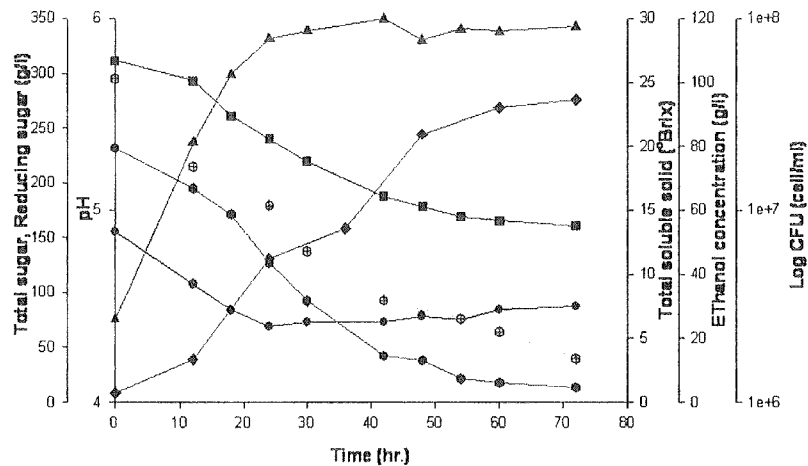
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 350 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่ —●— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

4.4.2 ผลการแปรผันปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ 10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 250, 300 และ 350 กรัมต่อลิตร

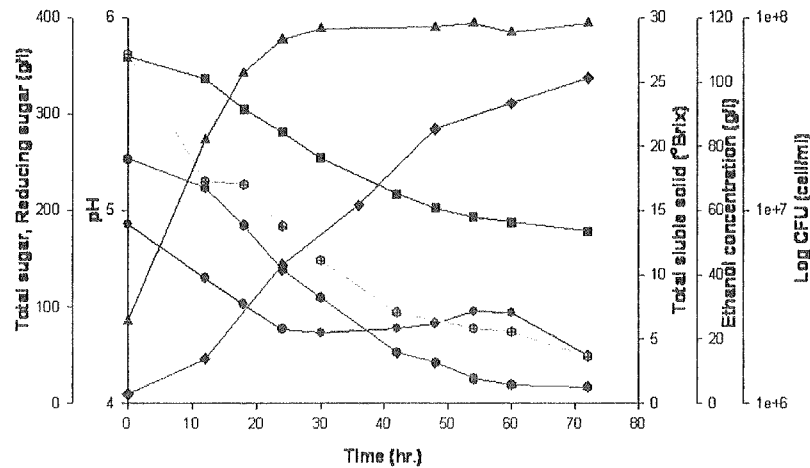
จากการทดลองหมักน้ำคั้นจากหัวแค้นตะวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 250, 300 และ 350 กรัมต่อลิตร โดยใช้เชื้อเริ่มต้น 10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าในระหว่างการหมัก เซลล์ยีสต์มีการเจริญและเพิ่มจำนวนขึ้นจนกระทั่งมีค่าเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงที่ 24 ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีแนวโน้มที่ลดลงในขณะที่ปริมาณเอทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลที่ลดลง และหากเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากน้ำคั้นหัวแค้นตะวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ กัน พบว่าการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแค้นตะวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 350 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณเอทานอลสูงสุดคือ 85.35 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 48 ชั่วโมงหลังจากการหมัก ผลได้สูงสุดที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร (0.42 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้) และอัตราผลผลิตสูงสุดที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 350 กรัมต่อลิตร (1.78 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง) (ภาพที่ 4.9-4.11)



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 250 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่ —■— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —◆— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◇— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)



ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 300 กรัมต่อลิตรและปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่ —■— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◇— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

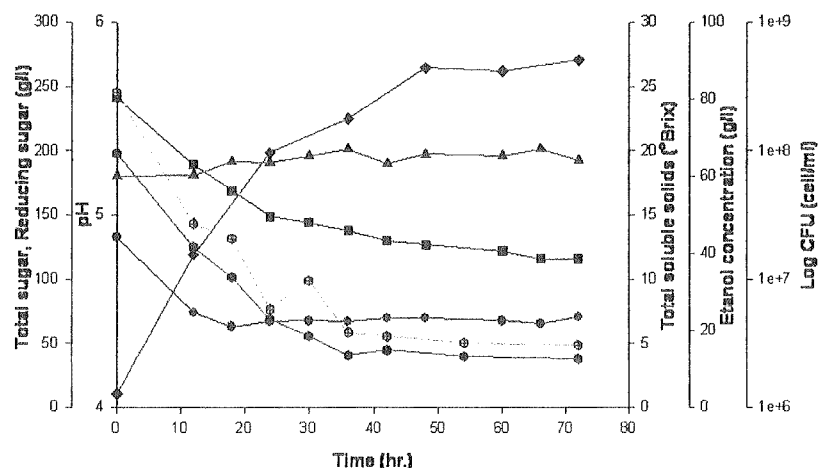


ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 350 กรัมต่อลิตรและปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิเมตร โดยที่ —■— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —◆— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◇— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —+— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —●— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิเมตร)

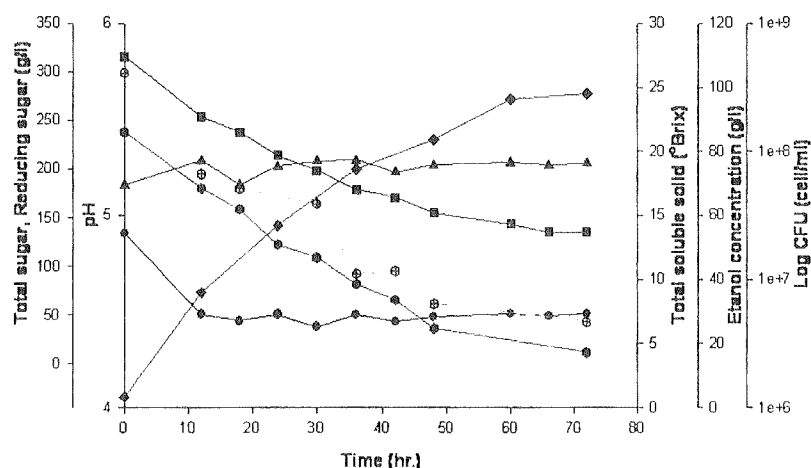
4.4.3 ผลการแปรผันปริมาณเชื้อเริ่มต้นที่ 10^8 เซลล์ต่อมิลลิเมตร และปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 250, 300 และ 350 กรัมต่อลิตร

จากการทดลองหมักน้ำคั้นจากหัวแค้นตะวันตกวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 250, 300 และ 350 กรัมต่อลิตร โดยใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้น 10^8 เซลล์ต่อมิลลิเมตร พบว่าในระหว่างการหมักเซลล์มีการเจริญและเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการหมัก ทำให้อัตราการใช้น้ำตาลใน 12 ชั่วโมงแรกของการหมักเป็นไปอย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเอทานอลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 12 ชั่วโมงแรกของการหมัก หลังจากนั้นปริมาณเซลล์เริ่มคงที่ ปริมาณน้ำตาลและปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ก็เริ่มคงที่เช่นกัน และหากเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากน้ำคั้นหัวแค้นตะวันตกในแต่ละความเข้มข้น พบว่าการหมักน้ำคั้นจากหัวแค้นตะวันตกวันที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร จะให้ปริมาณเอทานอล ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอลสูงสุดที่ 88.08 กรัมต่อลิตร 0.45 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ และ 1.84 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมงตามลำดับ (ภาพที่ 4.12-4.14) ที่ระยะเวลาในการหมัก 48 ชั่วโมง

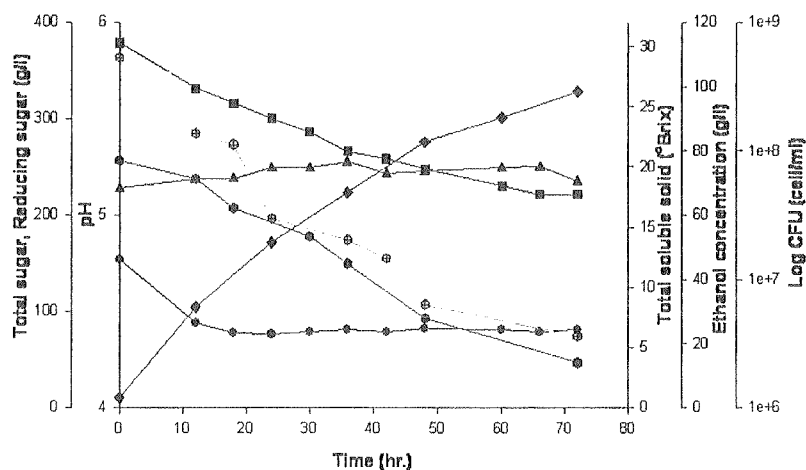
หากพิจารณาการผลิตเอทานอลที่ระยะเวลาในการหมัก 72 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 98.45 กรัมต่อลิตร อัตราผลผลิตเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 1.37 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 350 กรัมต่อลิตร ส่วนผลได้สูงสุดเท่ากับ 0.46 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 250 กรัมต่อลิตรและปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิเมตร โดยที่ —●— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —⊕— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —*— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิเมตร)



ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 300 กรัมต่อลิตรและปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิเมตร โดยที่ —●— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —■— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —◆— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —⊕— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —*— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิเมตร)



ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตเอทานอล โดยการแปรผันปริมาณน้ำตาล เริ่มต้นที่ 350 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่ —■— แทนค่าความเป็นกรดต่าง, —◆— แทนค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์), —●— แทนค่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ (กรัมต่อลิตร), —✕— แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร), —*— แทนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร), —▲— แทนปริมาณเซลล์ยีสต์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

หากเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันเพื่อผลิตเอทานอลโดยใช้ *S. cerevisiae* โดยพิจารณาถึงค่าผลได้ ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ และอัตราผลผลิตเอทานอล ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง พบว่าสถานะที่มีการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จะให้ค่าดังกล่าวสูงที่สุดคือ ปริมาณเอทานอลเท่ากับ 88.08 กรัมต่อลิตร ผลได้ 0.45 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ และอัตราผลผลิต 1.84 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางที่ 4.4)

สำหรับผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า สถานะที่มีการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 350 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จะให้ปริมาณเอทานอลสูงสุดและอัตราผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 101.19 กรัมต่อลิตร และ 1.41 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนผลได้สูงสุดเท่ากับ 0.46 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป ที่สถานะที่มีการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และที่สถานะที่มีการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 4.5)

ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกสถานะที่มีการแปรผันปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร และปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เนื่องจากให้ปริมาณเอทานอล ผลได้และอัตราผลผลิตสูง แม้ว่าที่สถานะอื่นจะให้ปริมาณเอทานอลสูงกว่า (101.19 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการหมัก

72 ชั่วโมง) แต่ใช้เวลาในการผลิตเอทานอลน้อยกว่าประมาณ 24 ชั่วโมง อีกทั้งปริมาณน้ำตาลที่ใช้สามารถปรับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นได้ง่าย โดยมีค่าใกล้เคียงกับน้ำตาลที่มีอยู่ในวัตถุดิบ

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นจากหัวแก้งตะวัน ภายใต้สภาวะการแปรผันปริมาณน้ำตาลและเชื้อเริ่มต้นที่ระดับต่างๆ กัน ที่ระยะเวลาในการหมัก 48 ชั่วโมง

Cell number (cells/ml)	Sugar concentration (g/l)	Total sugar (g/l)	Ethanol (g/l)	Yield (g/g)	Productivity (g/V/hr)
1×10^6 CFU	250	261.20	60.22	0.51	1.26
	300	322.23	44.24	0.40	0.92
	350	361.20	46.21	0.18	0.96
1×10^7 CFU	250	262.17	79.81	0.42	1.66
	300	294.88	83.78	0.40	1.75
	350	362.49	85.35	0.31	1.78
1×10^8 CFU	250	245.06	88.08	0.45	1.84
	300	299.25	83.59	0.35	1.74
	350	363.61	82.75	0.32	1.72



ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวัน ภายใต้สภาวะการแปรผันปริมาณน้ำตาลและเชื้อเริ่มต้นที่ระดับต่างๆ กัน ที่ระยะเวลาในการหมัก 72 ชั่วโมง

Cell number (cells/ml)	Sugar concentration (g/l)	Total sugar (g/l)	Ethanol (g/l)	Yield (g/g)	Productivity (g/L/hr)
1×10^6 CFU	250	261.20	77.19	0.46	1.07
	300	322.23	65.42	0.31	0.91
	350	361.20	71.84	0.31	1.00
1×10^7 CFU	250	262.17	81.73	0.36	1.14
	300	294.88	94.48	0.37	1.31
	350	362.49	101.19	0.32	1.41
1×10^8 CFU	250	245.06	90.17	0.46	1.25
	300	299.25	97.99	0.38	1.36
	350	363.61	98.45	0.34	1.37

4.4.4 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอล

จากการศึกษาผลของ pH ต่อการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันเพื่อผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* โดยการแปรผัน pH เริ่มต้นที่ 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เช่น ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณเอทานอล และค่า pH ระหว่างการหมักมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน คือ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆ และเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงที่ 24 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเอทานอลที่สูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 36 หากพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในการหมักคือ ค่าความเข้มข้นของเอทานอล ค่าอัตราผลผลิตเอทานอล และค่าผลได้เอทานอลที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง จะพบว่าให้ผลไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละระดับของค่า pH (ตารางที่ 4.6) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากองค์ประกอบในวัตถุดิบจะพบว่าค่า pH ของน้ำคั้นหัวแก่งตะวันมีค่าอยู่ในช่วง 5.0-6.0 ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องปรับค่า pH เริ่มต้น ซึ่งงานวิจัยนี้ให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Siqueira Paula F. (2008) ที่ได้แปรผัน pH เริ่มต้นของอาหารผลิตเอทานอลเป็น 4.3, 5.0 และ 6.0 โดยมีกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบในการผลิต พบว่าผลได้เอทานอลสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 38.53 – 42.08 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ ที่ pH เริ่มต้น 4.3-6.0

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันเพื่อผลิตเอทานอลโดยยีสต์ *S. cerevisiae* ภายใต้การแปรผันค่า pH เริ่มต้นในการหมัก

Condition	Ethanol (g/l)	Yield (g/g)	Productivity (g/L/hr)
pH 4.5	74.89	0.39	1.56
pH 5.0	76.06	0.41	1.58
pH 5.5	76.42	0.41	1.59
pH 6.0	74.50	0.44	1.55

4.4.5 ผลการศึกษาของแหล่งไนโตรเจนและความเข้มข้นของปริมาณไนโตรเจน

จากการศึกษาผลของแหล่งไนโตรเจน 4 ชนิด คือแอมโมเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมไนเตรท ยูเรีย และไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ต่อการผลิตเอทานอลจากแก่งตะวันโดย *S. cerevisiae* โดยแปรผันความเข้มข้นของแหล่งไนโตรเจนแต่ละชนิดเป็น 5 ระดับ คือ 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 กรัมต่อลิตร พบว่าแอมโมเนียมไนเตรทและไดแอมโมเนียมฟอสเฟตช่วยส่งเสริมให้ยีสต์มีการผลิตเอทานอลสูงกว่าการใช้แอมโมเนียมซัลเฟตและยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน และหากเปรียบเทียบระหว่างการเติมแหล่งไนโตรเจนชนิดต่างๆ กับการไม่เติมแหล่งไนโตรเจนเสริม (ชุดควบคุม) พบว่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากสภาวะที่ไม่เติมแหล่งไนโตรเจนหรือชุดควบคุม มีค่าสูงกว่าสภาวะที่มีการเติมไนโตรเจน ยกเว้นสภาวะที่เติมแอมโมเนียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.25% และ 0.50% และไดแอมโมเนียมฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0.25-1.0 % ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้เมื่อใช้แอมโมเนียมไนเตรท ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต แอมโมเนียมซัลเฟต และยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนเสริมมีค่าเท่ากับ 108.34, 101.55, 99.10 และ 99.17 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) จากข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณไนโตรเจนในวัตถุดิบมีอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อการเจริญและการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ ดังนั้นในการผลิตเอทานอลจากแก่งตะวันไม่จำเป็นต้องเติมแหล่งไนโตรเจนเสริม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตเอทานอลลงได้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันเพื่อผลิตเอทานอล โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ภายใต้การแปรผันชนิดและความเข้มข้นของแหล่งไนโตรเจนแต่ละชนิด

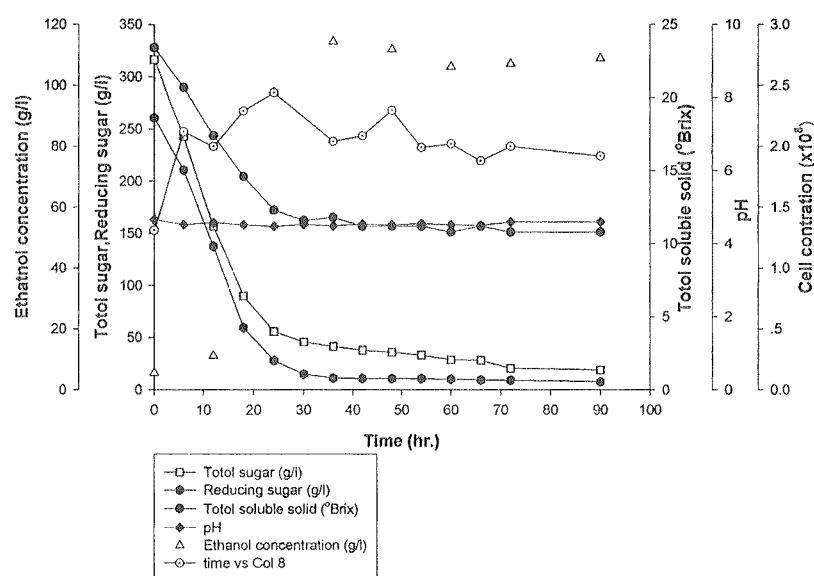
N-source	N-conc. (% w/v)	Ethanol Conc. (g/L)	Yield (g/g)	Productivity (g/L.h)	Fermentation time (h)
Control	-	96.24	0.37	2.01	48
DAP	0.25	102.22	0.38	1.70	60
	0.50	95.51	0.50	2.65	36
	0.75	97.57	0.37	1.62	60
	1.00	96.92	0.35	1.61	60
NH ₄ NO ₃	0.25	108.08	0.45	1.50	72
	0.50	108.34	0.47	1.50	72
	0.75	106.80	0.49	1.48	72
	1.00	107.13	0.50	1.49	72
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.25	90.56	0.34	1.51	60
	0.50	95.57	0.39	1.33	72
	0.75	99.10	0.45	1.38	72
	1.00	95.74	0.40	1.56	60
Urea	0.25	91.03	0.41	1.51	60
	0.50	90.15	0.36	1.25	72
	0.75	99.17	0.37	1.38	72
	1.00	72.88	0.32	1.21	60

DAP = diammonium phosphate

4.5 ผลการศึกษาการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแก่งตะวันในถังหมักขนาด 5 ลิตร

จากผลการทดสอบการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแก่งตะวันในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่มีปริมาตรทำงานเท่ากับ 4.0 ลิตร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมตามผลการทดลองข้างต้น คือปรับความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นในน้ำหมักเป็น 250 กรัมต่อลิตร pH เริ่มต้น 5.0 ใช้เซลล์เริ่มต้น 10⁸ เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยไม่ต้องเติมแหล่งไนโตรเจนเสริม และทำการปรับความเร็วรอบของใบกวนเป็น 100 รอบต่อนาที ทำการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการหมักเอทานอลเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการหมักในระดับฟลาสก์ โดยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 12 ชั่วโมงแรกของการหมัก และเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงที่ 24 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น ความ

เข้มข้นของเอทานอลสูงสุดคือ 114.42 กรัมต่อลิตร ผลได้เอทานอลเท่ากับ 0.42 กรัมเอทานอลต่อกรัม น้ำตาลที่ถูกใช้ และค่าอัตราผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 3.18 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่ระยะเวลาการหมัก 36 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.15 และตารางที่ 4.8)



ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการหมักน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันเพื่อผลิตเอทานอลโดยยีสต์ *S. cerevisiae* ในถังหมักขนาด 5 ลิตร

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นจากหัวแก่นตะวันโดย ยีสต์ *S. cerevisiae* ในถังหมักปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 5 ลิตร

พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมัก	ค่าที่ได้
ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	36
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	316.50
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้ (กรัมต่อลิตร)	274.44
ความเข้มข้นเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	114.42
อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	3.18
ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้)	0.42
ผลได้ของเอทานอลเทียบกับทฤษฎี	82.35

4.6 ผลการศึกษาปริมาณของเอนไซม์อินูลินเนสที่ใช้ย่อยสารอินูลินในหัวแก่งตะวันเพื่อการผลิตเอทานอล

จากการศึกษาปริมาณของเอนไซม์อินูลินเนสต่อการย่อยสารอินูลินในน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวัน โดยการแปรผันความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ระดับ 3, 8, 12, 16, 20, 40 และ 60 หน่วยของเอนไซม์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ ปริมาณผลผลิตเอทานอลที่ได้จะเพิ่มขึ้น การใช้เอนไซม์ในความเข้มข้น 40 หน่วย ให้ปริมาณเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 75.09 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้เท่ากับ 0.362 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ และค่าอัตราผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 1.564 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.9) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสารอินูลินในน้ำคั้นจากหัวแก่งตะวันมีผลโดยตรงกับการผลิตเอทานอล

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแก่งตะวันโดยการแปรผันปริมาณเอนไซม์อินูลินเนสที่ใช้ย่อยสารอินูลินในหัวแก่งตะวัน ที่ระยะเวลาในการหมัก 48 ชั่วโมง

Unit of enzyme	Total sugar (g/L)	Ethanol (g/L)	Yield (g/g)	Productivity (g/L.h)
3.0	157.5	47.11	0.290	0.980
8.0	154.0	49.21	0.310	1.025
12.0	161.0	46.65	0.290	0.970
16.0	160.4	51.32	0.320	1.069
20.0	196.1	67.17	0.340	1.399
40.0	207.4	75.09	0.362	1.564
60.0	199.2	74.70	0.375	1.556

4.7 ผลการศึกษาวิธีการย่อยสารอินูลินในหัวแก่งตะวันโดยใช้กรดร่วมกับเอนไซม์

จากการศึกษาผลของการย่อยสารอินูลินในหัวแก่งตะวันโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยระหว่างวิธีการ 5 วิธีการคือ 1) การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 2) การย่อยด้วยเอนไซม์อินูลินเนสที่ความเข้มข้น 20 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ 3) การย่อยด้วยเอนไซม์อินูลินเนสที่ความเข้มข้น 100 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ 4) การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกร่วมกับเอนไซม์อินูลินเนสที่ความเข้มข้น 20 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ และ 5) การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกร่วมกับเอนไซม์อินูลินเนสที่ความเข้มข้น 100 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการย่อยสารอินูลินโดยใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับเอนไซม์อินูลินเนสที่ความเข้มข้น 100 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลสูงที่สุดคือ 81.63 กรัมต่อลิตร

คิดเป็นผลได้เท่ากับ 0.40 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ และอัตราผลผลิตเท่ากับ 1.79 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางที่ 4.10)

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นหัวแก่งตะวันที่ผ่านมา การย่อยสลายอินูลินด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร่วมกับความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส (1), ด้วยเอนไซม์ที่ความเข้มข้น 20 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ (2), ด้วยเอนไซม์ที่ความเข้มข้น 100 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ (3), ด้วยกรดร่วมกับเอนไซม์ที่ความเข้มข้น 20 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ (4) และด้วยกรดร่วมกับเอนไซม์ที่ความเข้มข้น 20 หน่วยต่อกิโลกรัมวัตถุดิบ (5)

ค่าพารามิเตอร์การหมัก	ไม่ได้ปรับสภาพวัตถุดิบ	สภาวะในการย่อยสลายอินูลินในวัตถุดิบ				
		1	2	3	4	5
ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	48	30	48	48	30	48
ความเข้มข้นเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	60.29	67.12	71.07	67.76	69.12	81.63
ผลได้เอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้)	0.36	0.38	0.36	0.39	0.38	0.40
อัตราผลผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	1.25	2.23	1.48	1.41	2.27	1.79
ผลได้เทียบกับค่าทฤษฎี (%)	70.58	74.50	71.17	75.88	74.50	77.45