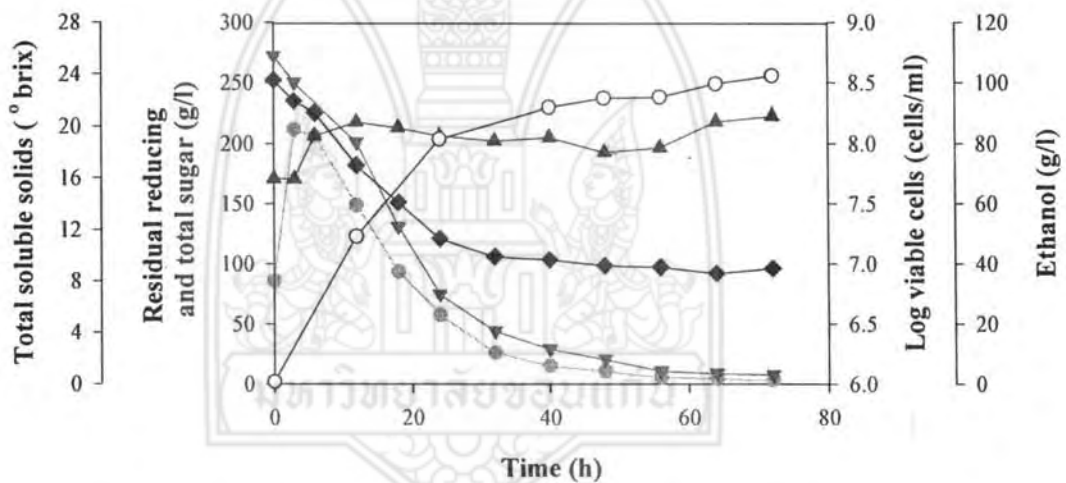


บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้

S. cerevisiae TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด และเซลล์อิสระโดยการหมักแบบกะ

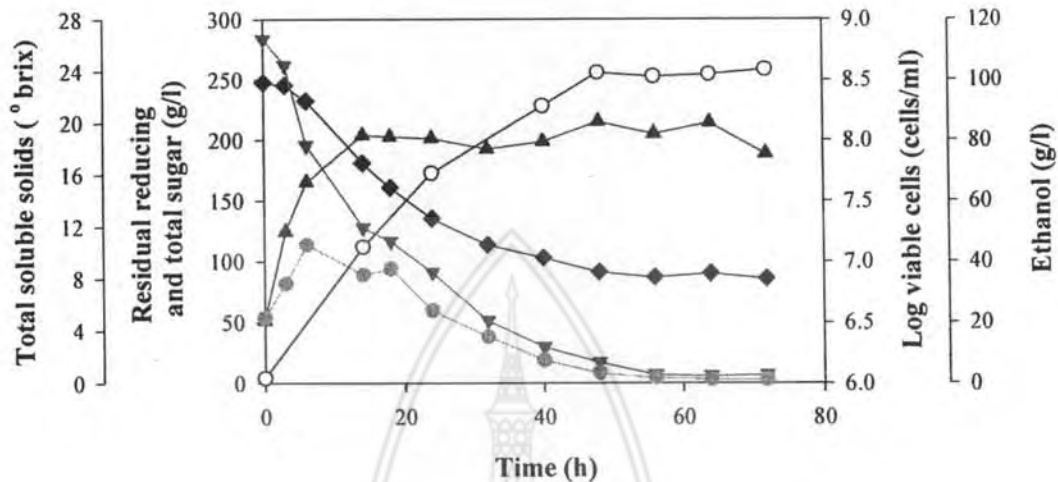
รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 อิสระ ซึ่งพบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกันคือ ปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด เริ่มต้นที่ประมาณ 24 องศาบริกซ์ เมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือประมาณ 9 องศาบริกซ์ น้ำตาลเริ่มต้นทั้งหมดประมาณ 271 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือ 7.73 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์ที่ช่วงเวลา 3-6 ชั่วโมงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจะลดลงเหลือ 2.94 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการทดลอง และปริมาณเซลล์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมักเริ่มต้นมีค่า 5.15×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จำนวนเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 12 ชั่วโมงแรก จากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ย 1.58×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด (◆) น้ำตาลทั้งหมด (▼) น้ำตาลรีดิวซ์ (●) เซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิต (▲) และความเข้มข้นของเอทานอล (○) ในระหว่างการหมักโดยเซลล์อิสระของ *S. cerevisiae* TISTR 5048

ผลการทดลองเมื่อหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกัน โดยปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดเริ่มต้นที่ประมาณ 24 องศาบริกซ์ เมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือประมาณ 8 องศาบริกซ์ น้ำตาลเริ่มต้นทั้งหมดประมาณ 283 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือ 6.88 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์

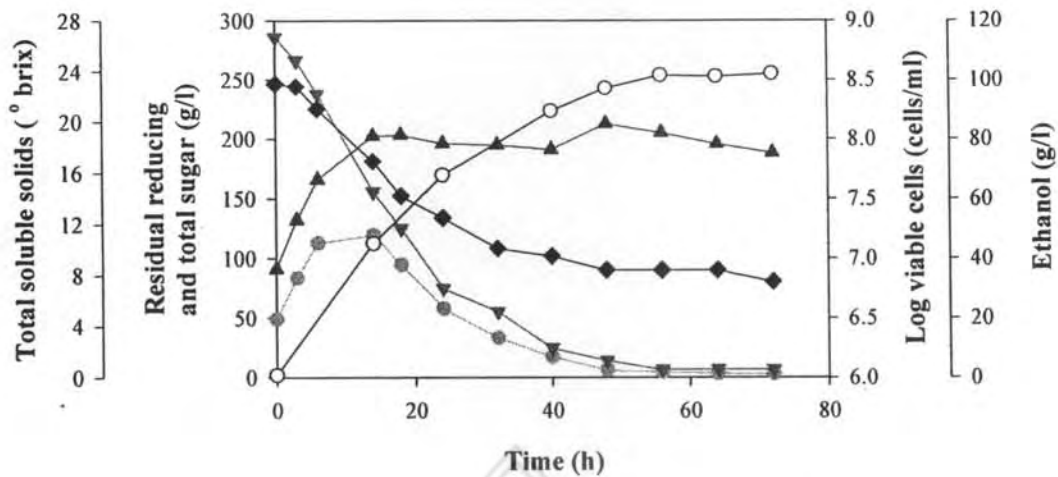
ที่ช่วงเวลา 3-6 ชั่วโมงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจะลดลงเหลือประมาณ 3 กรัมต่อลิตร ส่วนจำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมักเริ่มต้นมีค่า 3.88×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 14 ชั่วโมงแรก และคงที่หลังจากนั้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.14×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร



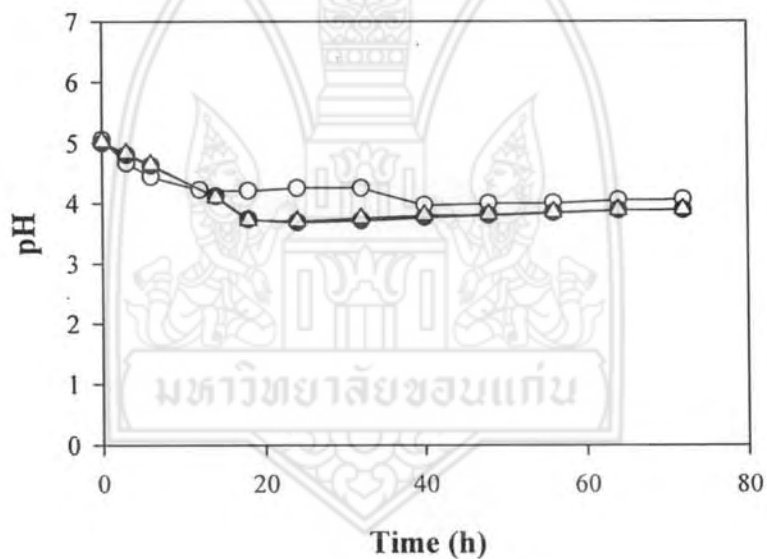
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด (◆) น้ำตาลทั้งหมด (▼) น้ำตาลรีดิวซ์ (■) เซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิต (▲) และความเข้มข้นของเอทานอล (○) ในระหว่างการหมักโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพดขนาด 12 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดเริ่มต้นที่ประมาณ 24 องศาบริกซ์ เมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือประมาณ 7.5 องศาบริกซ์ น้ำตาลเริ่มต้นทั้งหมดประมาณ 285 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือ 6.59 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์ ที่ช่วงเวลา 3-14 ชั่วโมงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจะลดลงเหลือ 2.93 กรัมต่อลิตร ส่วนจำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมักจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 14 ชั่วโมงแรก และมีค่าคงที่หลังจากนั้นโดยมีค่าเฉลี่ย 1.37×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ pH ในระหว่างการหมักเอทานอลโดยใช้เซลล์ยีสต์อิสระและเซลล์ยีสต์ตรึงรูปบนขังข้าวโพด 2 ขนาด พบว่าการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำหมักมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน (รูปที่ 4.4) คือ มี pH เริ่มต้นของน้ำหมักเท่ากับ 5 จากนั้น pH ของน้ำหมักจะมีค่าลดลงและคงที่ที่ประมาณชั่วโมงที่ 12 และ 18 เมื่อใช้เซลล์อิสระและเซลล์ตรึงรูปทั้ง 2 ขนาด ตามลำดับ โดยเมื่อใช้เซลล์อิสระจะมีค่า pH คงที่เฉลี่ยประมาณ 4.12 ส่วนเมื่อใช้เซลล์ยีสต์ตรึงรูปทั้งขนาด 6 และ 12 มิลลิเมตร pH ของน้ำหมักคงที่ประมาณ 3.8 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 18 ของการหมัก

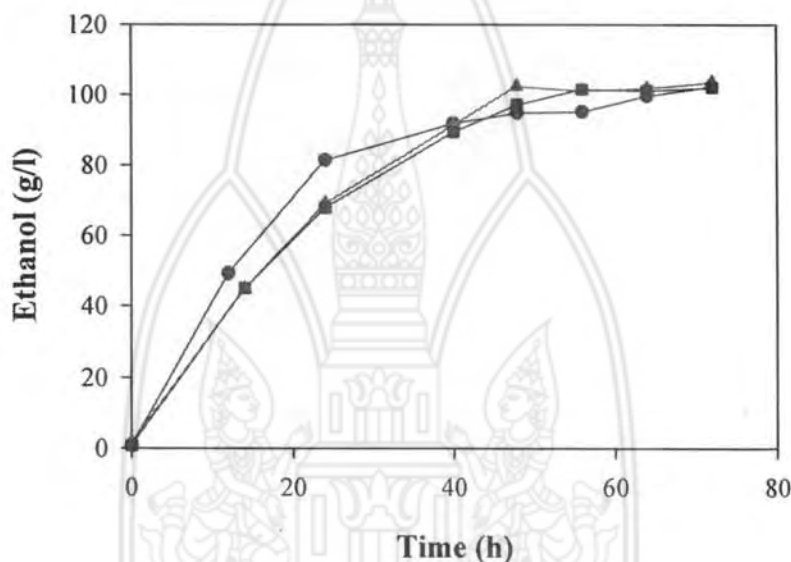


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด (◆) น้ำตาลทั้งหมด (▼) น้ำตาลรีดิวซ์ (●) เซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิต (▲) และความเข้มข้นของเอทานอล (○) ในระหว่างการหมักโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพดขนาด 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำหมักระหว่างการหมักเอทานอลโดยใช้เซลล์อิสระ (○) และเซลล์ยีสต์ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร (●) และ 12 มิลลิเมตร (▲)

รูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้เซลล์ยีสต์อิสระและเซลล์ยีสต์ตรึงรูปบนขังข้าวโพด 2 ขนาด ซึ่งพบว่า เมื่อใช้เซลล์อิสระความเข้มข้นของเอทานอลจะสูงกว่าเมื่อใช้เซลล์ยีสต์ตรึงรูปในช่วง 40 ชั่วโมงแรกของการหมัก จากนั้นความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และมีค่าสูงสุด 102.34 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการหมักที่ชั่วโมงที่ 72 เมื่อใช้เซลล์ยีสต์ตรึงรูปบนขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร พบว่าได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุด 102.39 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 48 ชั่วโมง และเมื่อใช้เซลล์ยีสต์ตรึงรูปบนขังข้าวโพดขนาด 12 มิลลิเมตร พบว่าได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุด 101.58 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 56 ชั่วโมง ตารางที่ 4.1 สรุปประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในแง่ความเข้มข้นของเอทานอล ผลได้ และอัตราผลผลิต เมื่อใช้ยีสต์รูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของเอทานอลที่เวลาต่าง ๆ ระหว่างการหมักโดยใช้เซลล์ยีสต์อิสระ (○) และเซลล์ยีสต์ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร (▲) และ 12 มิลลิเมตร (■)

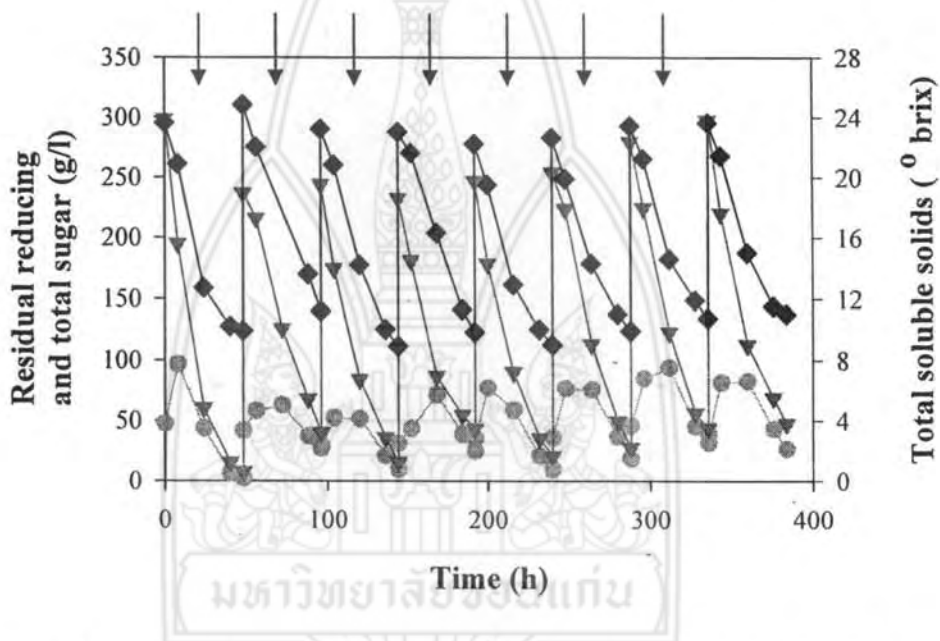
จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อใช้ขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นวัสดุตรึงจะได้ความเข้มข้นของเอทานอล ผลได้ และอัตราการผลผลิต สูงกว่าเมื่อใช้ขังข้าวโพดขนาด 12 มิลลิเมตร ทั้งที่ระยะเวลาการหมัก 48, 56, 64 และ 72 ชั่วโมง และเมื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ในทางสถิติโดยวิธี t-test พบว่าที่เวลาการหมัก 48 ชั่วโมง เมื่อใช้ขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นวัสดุตรึงจะได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าเมื่อใช้ขังข้าวโพดขนาด 12 มิลลิเมตร แต่ค่าผลได้ไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นวัสดุตรึงเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมักแบบกะช้ำโดยใช้เซลล์ยีสต์ตรึงรูปต่อไป

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของเอทานอล ผลได้ และอัตราการผลิต เมื่อใช้เซลล์ยีสต์ที่ถูกตรึงบนแข็งข้าวโพดขนาด 6 และ 12 มิลลิเมตร และเซลล์อิสระ

เซลล์ที่ใช้	ความเข้มข้นของเอทานอลสุดท้าย (กรัมต่อลิตร) ที่ชั่วโมงที่			ความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิ (กรัมต่อลิตร) ที่ชั่วโมงที่			ผลได้เอทานอล ที่ชั่วโมงที่			อัตราการผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง) ที่ชั่วโมงที่			
	48	56	72	48	56	72	48	56	72	48	56	72	
การหมัก													
เซลล์อิสระ	94.85	95.17	102.34	94.08	94.40	98.87	101.56	0.37	0.36	0.38	1.96	1.69	1.41
เซลล์ตรึงบนแข็ง													
ข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร	102.39	101.17	101.85	100.69	99.47	100.15	101.81	0.38	0.36	0.37	2.10	1.78	1.41
เซลล์ตรึงบนแข็ง													
ข้าวโพดขนาด 12 มิลลิเมตร	97.20	101.58	102.10	96.38	100.76	100.37	101.28	0.36	0.36	0.36	2.01	1.80	1.41

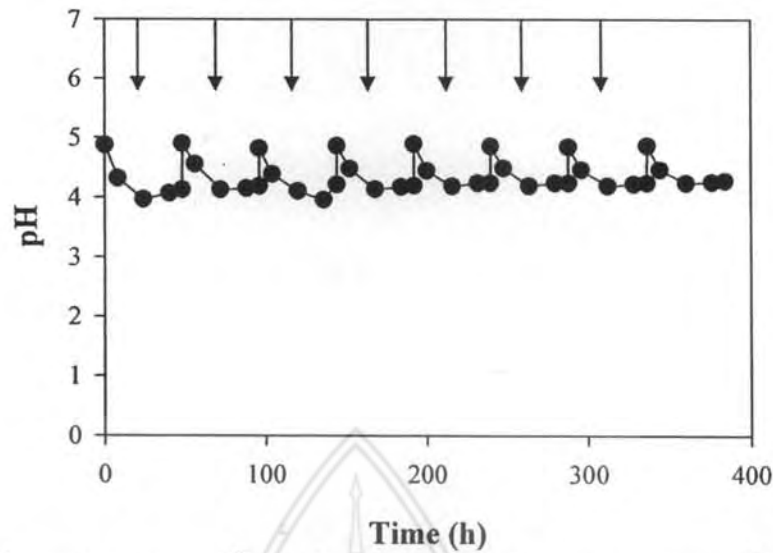
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด โดยการหมักแบบกะขี้

รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณน้ำตาลในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะขี้โดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดทั้ง 8 กะ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ มีค่าเริ่มต้น 23.3 ± 0.55 องศาบริกซ์ และเมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือ 9.94 ± 0.77 องศาบริกซ์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมดก็เป็นไปในทำนองเดียวกันทุกกะ คือมีค่าเริ่มต้น 261.14 ± 22.87 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อสิ้นสุดการหมักในกะแรกจะเหลือน้ำตาลน้อยที่สุดคือประมาณ 7.61 กรัมต่อลิตร ส่วนในกะที่ 2 ถึงกะที่ 8 จะมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเหลือ 34.02 ± 11.15 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์ก็เป็นไปในทำนองเดียวกันทั้ง 8 กะ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นใน 8 ถึง 24 ชั่วโมงแรกจากนั้นจะมีค่าลดลงโดยมีค่าเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการหมักในแต่ละกะเป็น 21.46 ± 7.63 กรัมต่อลิตร



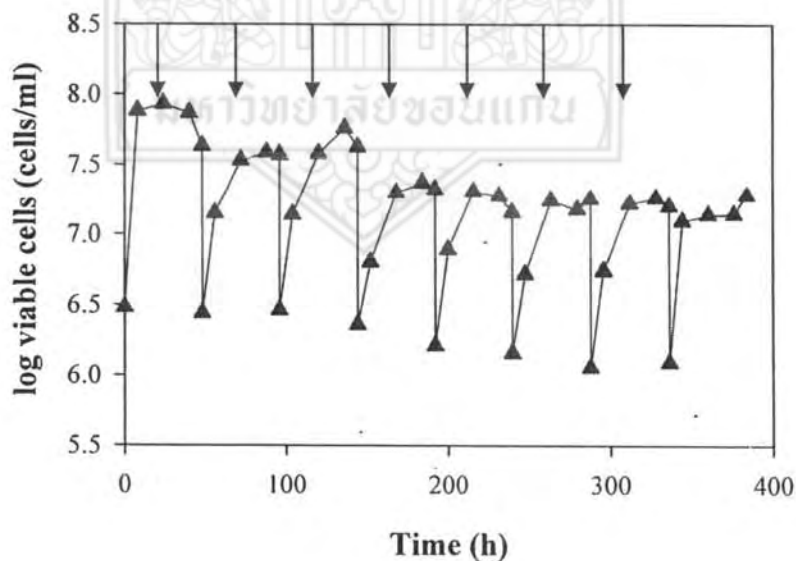
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (◆), ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (▼) และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (●) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะขี้โดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะขี้ซึ่งพบว่า pH ของน้ำหมักในแต่ละกะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ pH เริ่มต้นของน้ำหมักมีค่าเฉลี่ย 4.87 ± 0.02 จากนั้นจะมีค่าลดลงและเมื่อสิ้นสุดการหมักจะมี pH เฉลี่ย 4.22 ± 0.34



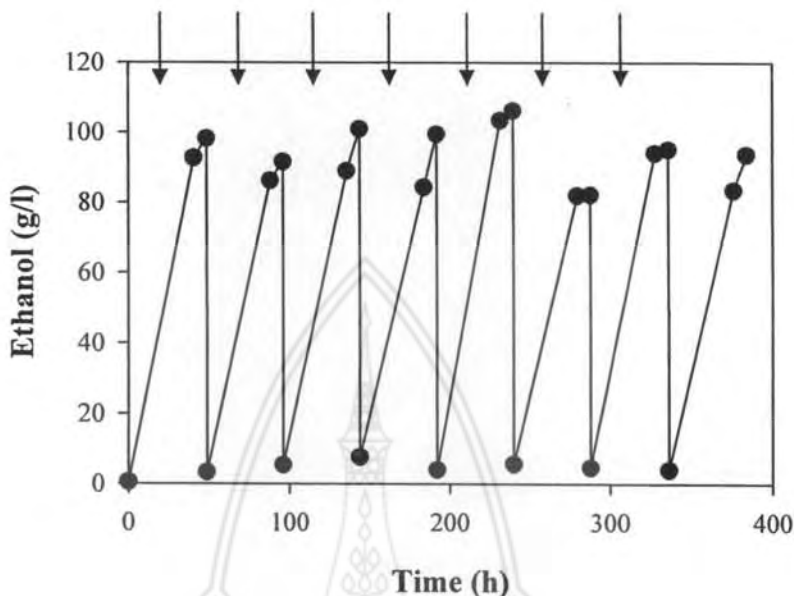
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักแบบกะซ้ำ พบว่า จำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมักเมื่อสิ้นสุดการหมักในแต่ละกะ มีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงเล็กน้อยจากกะที่ 1 ถึงกะที่ 4 และมีค่าค่อนข้างคงที่จากกะที่ 4 ถึง 8 โดยค่าเฉลี่ยของเซลล์ยีสต์อิสระในกะที่ 1 ถึงกะที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ $(5.29 \pm 1.64) \times 10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ส่วนในกะที่ 4 ถึงกะที่ 8 มีค่าเฉลี่ยประมาณ $(1.75 \pm 0.25) \times 10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอทานอลในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักแบบกะซ้ำ ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลเมื่อสิ้นสุดการหมักมีค่าใกล้เคียงทั้ง 8 กะ โดยมีค่าเฉลี่ย 97.90 ± 4.96 กรัมต่อลิตร และตารางที่ 4.2 สรุปประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในการหมักแต่ละกะในแง่ของ ความเข้มข้นเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิต



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเอทานอลในระหว่างการหมักแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอล เมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด โดยการหมักแบบกะซ้ำ

กะที่	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		ผลได้เอทานอล	อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)
	สุดท้าย	สุทธิ		
1	98.25	97.75	0.34	2.04
2	91.56	88.23	0.45	1.84
3	100.95	95.52	0.42	1.99
4	99.46	91.90	0.49	1.91
5	106.28	102.24	0.45	2.13
6	82.21	76.60	0.34	1.96
7	95.14	90.49	0.38	1.89
8	93.67	89.68	0.36	1.87
ค่าเฉลี่ย	97.90	93.69	0.41	1.95
SD	4.96	5.03	0.05	0.10

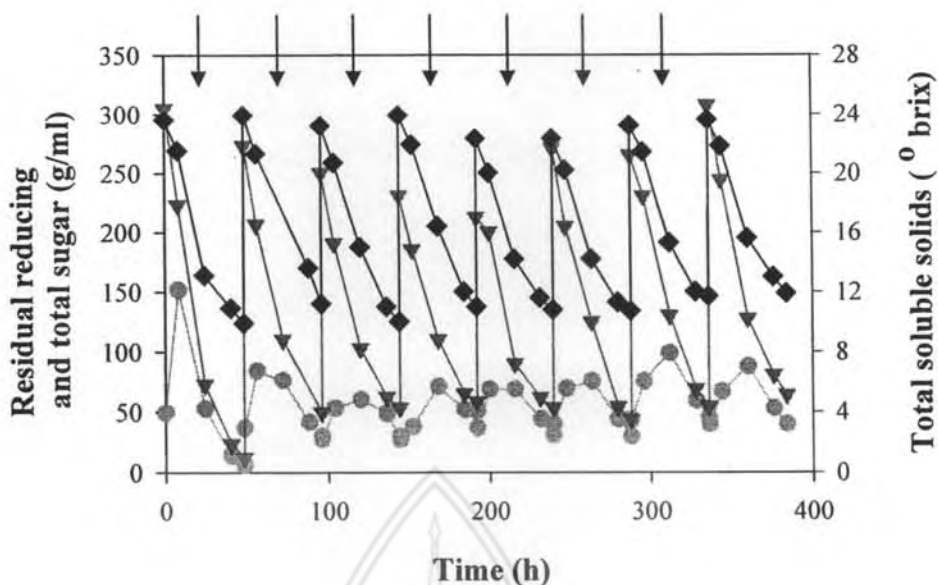
ผลการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 ดริงรูปบนซึ่งข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร สามารถผลิตเอทานอลแบบกะขี้ได้อย่างน้อย 8 กะโดยประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในแต่ละกะค่อนข้างใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากข้อมูลของ Nuanpeng และคณะ (2006) พบว่าการผลิตเอทานอลจากกลูโคส 240 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการหมักแบบกะโดยใช้เซลล์อิสระของ *S. cerevisiae* NP 01 สามารถผลิตเอทานอลได้ 98.99 กรัมต่อลิตร โดยค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 เมื่อหมักที่สภาวะเดียวกัน คือมีค่าเท่ากับ 94.85 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 48 ชั่วโมง ดังนั้นการทดลองต่อไปจึงจะใช้ *S. cerevisiae* NP 01 ดริงรูปบนซึ่งข้าวโพดเพื่อผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยการหมักแบบกะขี้ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลได้

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกดริงบนซึ่งข้าวโพด โดยการหมักแบบกะขี้

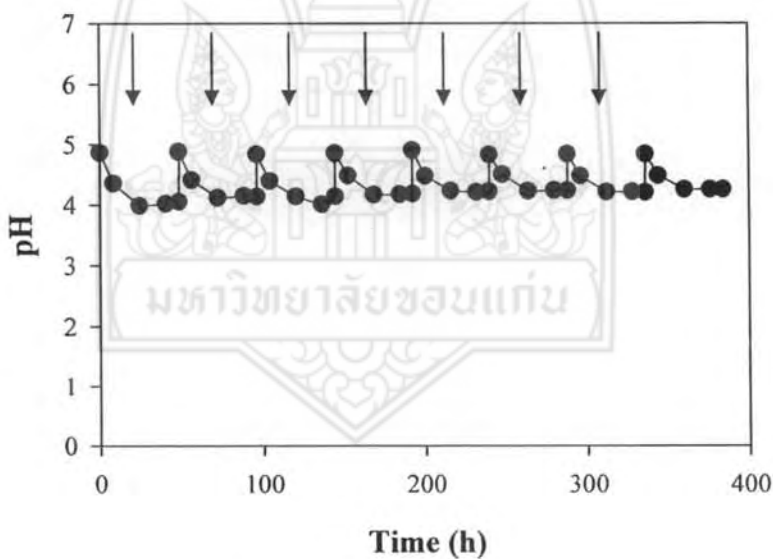
รูปที่ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณน้ำตาลในน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะขี้โดย *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกดริงบนซึ่งข้าวโพดขนาด 6 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดทั้ง 8 กะ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ มีค่าเริ่มต้น 23.25 ± 0.50 องศาบริกซ์ และเมื่อสิ้นสุดการหมักเหลือ 10.9 ± 0.55 องศาบริกซ์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลทั้งหมดก็เป็นไปในทำนองเดียวกันทุกกะ คือมีค่าเริ่มต้น 263.92 ± 24.57 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อสิ้นสุดการหมักในกะแรกจะเหลือน้ำตาลน้อยที่สุดคือประมาณ 12.20 กรัมต่อลิตร ส่วนในกะที่ 2 ถึงกะที่ 8 จะมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเหลือ 53.73 ± 4.33 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์ก็เป็นไปในทำนองเดียวกันทั้ง 8 กะ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นใน 8 ถึง 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นจะมีค่าลดลงโดยมีค่าเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการหมักในแต่ละกะเป็น 36.05 ± 7.70 กรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะขี้ซึ่งพบว่า pH ของน้ำหมักในแต่ละกะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ pH เริ่มต้นของน้ำหมักมีค่าเฉลี่ย 4.86 ± 0.02 จากนั้นจะมีค่าลดลงและเมื่อสิ้นสุดการหมักจะมี pH เฉลี่ย 4.19 ± 0.05

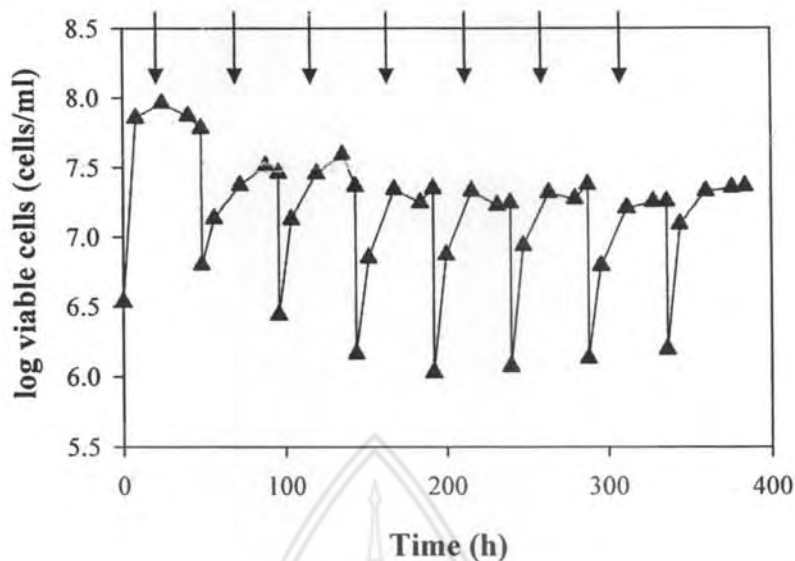
รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักแบบกะขี้ พบว่า จำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมักเมื่อสิ้นสุดการหมักในแต่ละกะ มีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงเล็กน้อยจากกะที่ 1 ถึงกะที่ 2 และมีค่าค่อนข้างคงที่จากกะที่ 2 ถึง 8 โดยค่าเฉลี่ยของเซลล์ยีสต์อิสระในกะที่ 1 มีค่าเฉลี่ยประมาณ $(7.45 \pm 0.87) \times 10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ส่วนในกะที่ 2 ถึง 8 มีค่าเฉลี่ยประมาณ $(2.28 \pm 0.41) \times 10^7$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (◆), ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (▼) และ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (●) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะช้าโดย *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

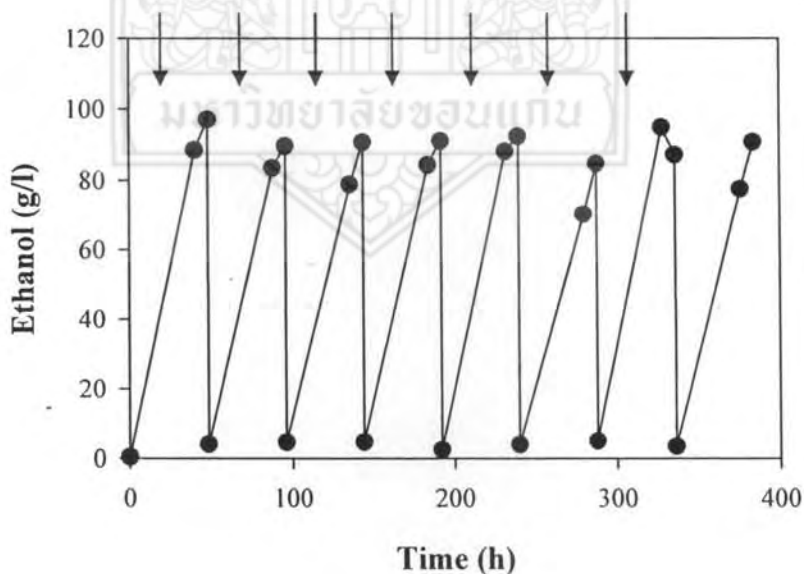


รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะช้าโดย *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ยีสต์อิสระที่มีชีวิตในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอทานอลในน้ำหมัก ในระหว่างการหมักแบบกะซ้ำ ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลเมื่อสิ้นสุดการหมักมีค่าใกล้เคียงทั้ง 8 กะ โดยมีค่าเฉลี่ย 91.19 ± 3.01 กรัมต่อลิตร และตารางที่ 4.3 สรุปประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในการหมักแต่ละกะ ในแง่ของความเข้มข้นเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิต



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเอทานอลในระหว่างการหมักแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด (ลูกศรแสดงเวลาที่เริ่มกะใหม่)

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอล เมื่อใช้ *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด โดยการหมักแบบกะซ้า

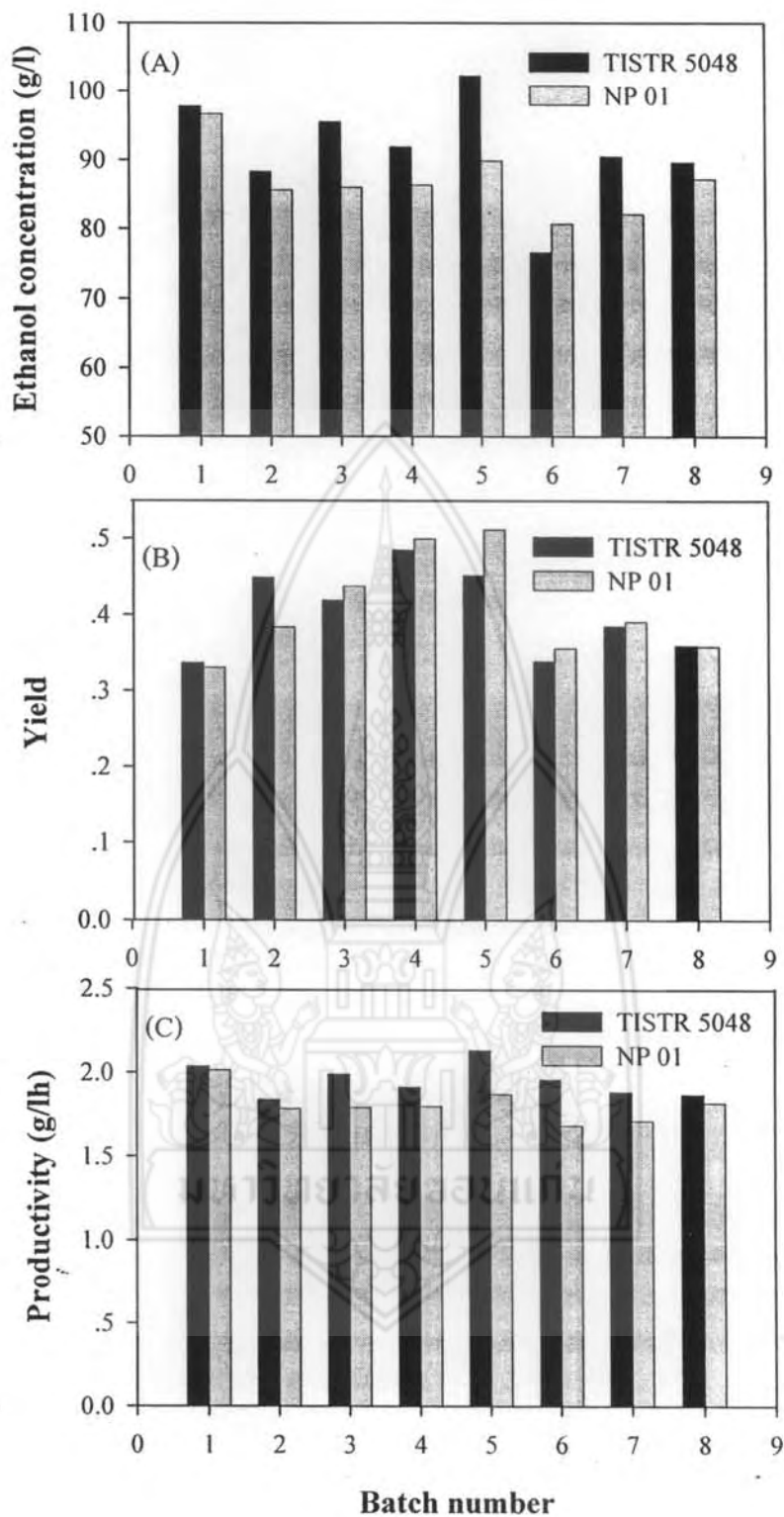
กะที่	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		ผลได้เอทานอล	อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)
	สุดท้าย	สุทธิ		
1	97.02	96.62	0.33	2.01
2	89.63	85.61	0.38	1.78
3	90.58	86.02	0.44	1.79
4	91.02	86.35	0.50	1.80
5	92.26	89.84	0.51	1.87
6	84.66	80.73	0.36	1.68
7	87.16	82.17	0.39	1.71
8	90.68	87.25	0.36	1.82
ค่าเฉลี่ย	91.19	86.82	0.41	1.81
SD	3.01	4.87	0.68	0.10

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 และ *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด

จากการทดลองที่ 4.2 และ 4.3 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 และ *S. cerevisiae* NP 01 ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่า ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเฉลี่ยทั้ง 8 กะ เมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 จะมีค่าสูงกว่า *S. cerevisiae* NP 01 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบในทางสถิติโดยวิธี t-test พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลได้เอทานอลเมื่อใช้ยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอัตราผลผลิตเอทานอลเมื่อเปรียบเทียบในทางสถิติพบว่าอัตราผลผลิตเอทานอลเมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 จะมีค่าสูงกว่า *S. cerevisiae* NP 01 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 และ *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด

กะที่	ความเข้มข้นของเอทานอล สุทธิ (กรัมต่อลิตร)		ผลได้เอทานอล		อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	
	TISTR 5048	NP 01	TISTR 5048	NP 01	TISTR 5048	NP 01
1	97.75	96.62	0.34	0.33	2.04	2.01
2	88.27	85.61	0.45	0.38	1.84	1.78
3	95.52	86.02	0.42	0.44	1.99	1.79
4	91.90	86.35	0.49	0.50	1.91	1.80
5	102.24	89.84	0.45	0.51	2.13	1.87
6	76.60	80.73	0.34	0.36	1.96	1.68
7	90.49	82.17	0.38	0.39	1.89	1.71
8	89.68	87.25	0.36	0.36	1.87	1.82
ค่าเฉลี่ย	93.69	86.82	0.41	0.41	1.95	1.81
SD	5.03	4.87	0.05	0.07	0.10	0.10



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะซ้ำโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 และ *S. cerevisiae* NP 01 ที่ถูกตรึงบนขังข้าวโพด : (A) ความเข้มข้นเอทานอล, (B) ผลได้ และ (C) อัตราผลผลิต

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนแอปเปิ้ลโดยการหมักแบบกะช้า

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณน้ำตาล จำนวนเซลล์ยีสต์อิสระ และปริมาณเอทานอล ในน้ำหมักในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะช้าโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนแอปเปิ้ลขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร คล้ายคลึงกับเมื่อใช้ยีสต์ที่ตรึงบนชานข้าวโพด ในรูปที่ 4.6, 4.8 และ 4.9 (ไม่ได้แสดงข้อมูล)

ตารางที่ 4.5 และ 4.6 สรุปประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในการหมักแต่ละกะ ในแง่ของความเข้มข้นเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิต เมื่อใช้ยีสต์ที่ถูกตรึงบนแอปเปิ้ลขนาด 3 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 ตรึงรูปบนแอปเปิ้ลทั้ง 2 ขนาด สามารถผลิตเอทานอลแบบกะช้าได้อย่างน้อย 8 กะโดยประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในแต่ละกะค่อนข้างใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอล เมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนแอปเปิ้ลขนาด 3 มิลลิเมตร โดยการหมักแบบกะช้า ที่ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 48 ชั่วโมง

กะที่	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		ผลได้เอทานอล	อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)
	สุดท้าย	สุทธิ		
1	98.99	91.48	0.27	1.91
2	96.28	86.53	0.42	1.80
3	97.26	87.10	0.39	1.81
4	93.11	83.18	0.37	1.73
5	97.69	87.16	0.38	1.82
6	92.34	83.91	0.42	1.75
7	92.94	84.89	0.41	1.77
8	90.93	81.35	0.45	1.69
ค่าเฉลี่ย	94.94	85.70	0.39	1.79
SD	2.96	3.10	0.05	0.06

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิ ผลได้ และอัตราผลผลิตเอทานอล เมื่อใช้ *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนแอปเปิ้ลขนาด 6 มิลลิเมตร โดยการหมักแบบกะช้า ที่ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 48 ชั่วโมง

กะที่	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		ผลได้เอทานอล	อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)
	สุดท้าย	สุทธิ		
1	98.16	95.36	0.32	1.99
2	93.22	85.49	0.31	1.78
3	93.83	86.13	0.43	1.79
4	88.84	80.87	0.46	1.68
5	94.80	87.08	0.44	1.81
6	89.96	82.03	0.33	1.71
7	92.04	84.28	0.43	1.76
8	90.55	84.99	0.48	1.77
ค่าเฉลี่ย	92.68	85.78	0.40	1.79
SD	3.01	4.39	0.07	0.09

4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะช้าเมื่อใช้วัสดุตั้งต่าง ๆ

จากการทดลองที่ 4.2 และ 4.5 คือการผลิตเอทานอลแบบกะช้าโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด และแอปเปิ้ล สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานด้วยกระบวนการหมักแบบกะช้าโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ตรึงบนแคลเซียมอัลจีเนต (อมรรัตน์ และอรุณ, 2547) โดยเปรียบเทียบในแง่ของความเข้มข้นของเอทานอล ผลได้ และ อัตราผลผลิต ดังแสดงในตารางที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของเอทานอลสุดท้ายที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะขี้จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ลและ แคลเซียมอัลจีเนต

กะที่	ซังข้าวโพด*	แอปเปิ้ล*		แคลเซียมอัลจีเนต**
		3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	
1	98.25	98.99	98.16	83.92
2	91.56	96.28	93.22	80.63
3	100.95	97.26	93.83	71.42
4	99.46	93.11	88.84	87.85
5	106.28	97.69	94.80	91.77
6	82.21	92.34	89.96	75.21
7	95.14	92.94	92.04	80.89
8	93.63	90.93	90.55	80.06
ค่าเฉลี่ย	95.94	94.94	92.68	81.47
SD	7.21	2.96	3.01	6.50

* ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 48 ชั่วโมง

**ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 64 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะขี้จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ล และ แคลเซียมอัลจีเนต

กะที่	ซังข้าวโพด*	แอปเปิ้ล*		แคลเซียมอัลจีเนต**
		3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	
1	97.75	91.48	95.36	83.92
2	88.27	86.53	85.49	80.63
3	95.52	87.10	86.13	71.42
4	91.90	83.18	80.87	87.85
5	102.24	87.16	87.08	91.77
6	76.60	83.91	82.03	75.21
7	90.49	84.89	84.28	80.89
8	89.68	81.35	84.99	80.06
ค่าเฉลี่ย	93.69	85.70	85.78	81.47
SD	5.03	3.10	4.39	6.50

* ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 48 ชั่วโมง

**ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 64 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลได้เอทานอลที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะเข้าจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ลและแคลเซียมอัลจีเนต

กะที่	ซังข้าวโพด*	แอปเปิ้ล*		แคลเซียมอัลจีเนต** 3 มิลลิเมตร
		3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	
1	0.34	0.27	0.32	0.34
2	0.45	0.42	0.31	0.33
3	0.42	0.39	0.43	0.31
4	0.49	0.37	0.46	0.35
5	0.45	0.38	0.44	0.35
6	0.34	0.42	0.33	0.31
7	0.38	0.41	0.43	0.33
8	0.36	0.45	0.48	0.33
ค่าเฉลี่ย	0.41	0.39	0.40	0.33
SD	0.05	0.05	0.07	0.02

* ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 48 ชั่วโมง

**ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 64 ชั่วโมง

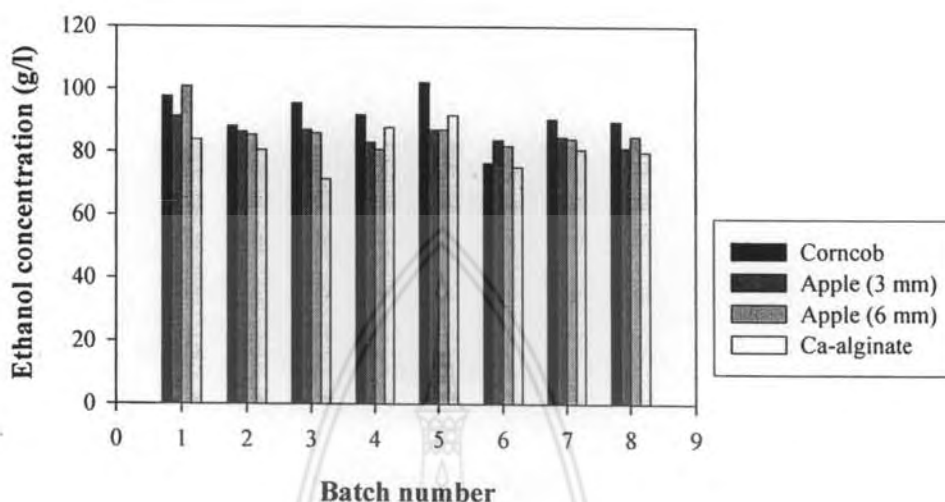
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบอัตราผลผลิตเอทานอลที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะเข้าจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ล และแคลเซียมอัลจีเนต

กะที่	ซังข้าวโพด*	แอปเปิ้ล*		แคลเซียมอัลจีเนต** 3 มิลลิเมตร
		3 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร	
1	2.04	1.91	1.99	1.31
2	1.84	1.80	1.78	1.26
3	1.99	1.81	1.79	1.12
4	1.91	1.73	1.68	1.37
5	2.13	1.82	1.81	1.43
6	1.96	1.75	1.71	1.18
7	1.89	1.77	1.76	1.26
8	1.87	1.69	1.77	1.25
ค่าเฉลี่ย	1.95	1.79	1.79	1.27
SD	0.10	0.06	0.09	0.10

* ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 48 ชั่วโมง

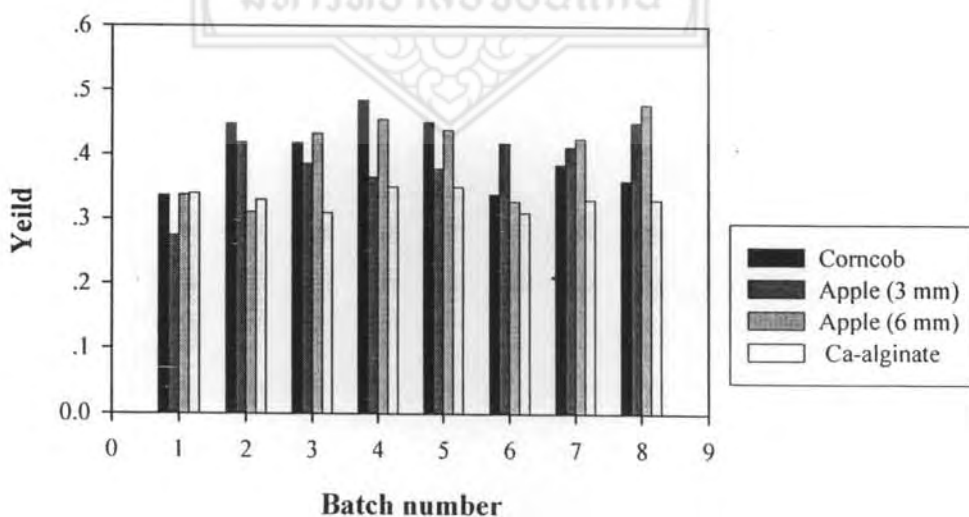
**ระยะเวลาในการหมักแต่ละกะ 64 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบในทางสถิติโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test พบว่า เมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นวัสดุตั้งจะให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าการใช้แอปเปิ้ลและแคลเซียมอัลจิเนต และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้อัปเปิ้ลและแคลเซียมอัลจิเนตจะให้ค่าไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



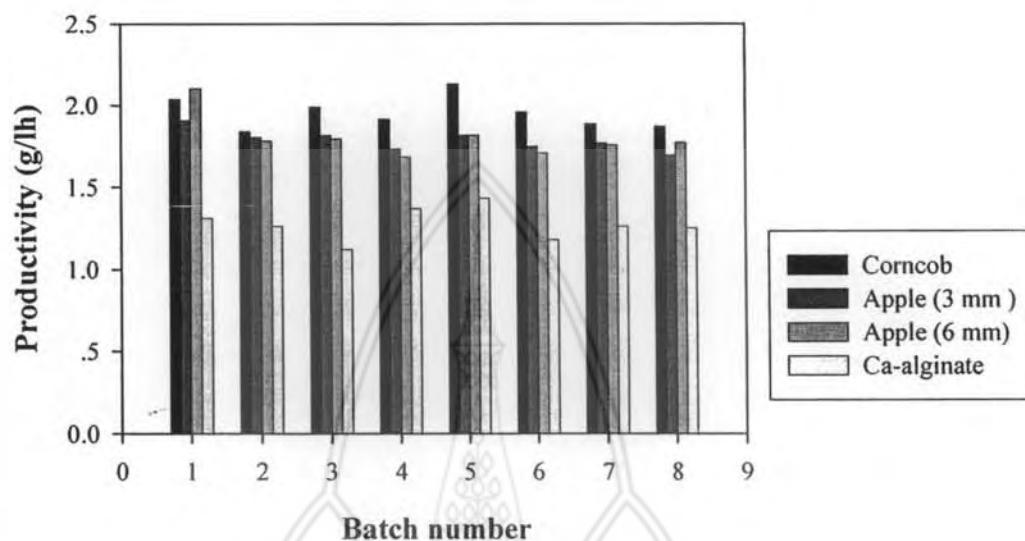
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของเอทานอลสุทธิที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะขี้จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ล และแคลเซียมอัลจิเนต

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบในทางสถิติโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test พบว่า เมื่อใช้แคลเซียมอัลจิเนตเป็นวัสดุตั้งจะให้ค่าผลได้เอทานอลน้อยที่สุด โดยที่เมื่อใช้ซังข้าวโพดและแอปเปิ้ลทั้ง 2 ขนาด ให้ค่าผลได้เอทานอลไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลได้เอทานอลที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะขี้จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ล และแคลเซียมอัลจิเนต

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบในทางสถิติโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test พบว่าเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นวัสดุตั้งจะให้ค่าอัตราผลผลิตเอทานอลสูงกว่าเมื่อใช้แอปเปิ้ลทั้ง 2 ขนาด และเมื่อใช้แอปเปิ้ลทั้ง 2 ขนาดให้อัตราผลผลิตเอทานอลสูงกว่าเมื่อใช้แคลเซียมอัลจีเนตเป็นวัสดุตั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบอัตราผลผลิตเอทานอลสุทธิที่ได้จากการหมักเอทานอลแบบกะขี้จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* TISTR 5048 ที่ถูกตรึงบนซังข้าวโพด แอปเปิ้ล และแคลเซียมอัลจีเนต