

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 6 ตอนตามวิธีการทดลอง คือตอนที่ 1 ผลขององค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวาน สารละลายน้ำเชื่อมและต้นสดข้าวฟ่างหวาน ตอนที่ 2 ผลการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2 ตอนที่ 3 ผลการผลิตน้ำเชื่อมข้นข้าวฟ่างหวานโดยการระเหยน้ำคั้น ตอนที่ 4 ผลการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2 และตอนที่ 5 ผลการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยครูดเซลลูโลสผงเพียงอย่างเดียว และตอนที่ 6 ผลการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานแบบรวมปฏิกิริยาด้วย ครูดเซลลูโลสผงร่วมกับหัวเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลขององค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำคั้นสด สารละลายน้ำเชื่อมและต้นสดข้าวฟ่างหวาน

4.1.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวาน

ปริมาณไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่อยู่ในน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ที่ความหวานประมาณ 18 ถึง 20 องศาบริกซ์ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์

องค์ประกอบเบื้องต้น	ปริมาณ
น้ำตาลทั้งหมด	216.13 กรัมต่อลิตร
น้ำตาลรีดิวิซ์	147.07 กรัมต่อลิตร
ไนโตรเจน	ร้อยละโดยน้ำหนัก 0.05
ฟิเอช	4.50
ของแข็งทั้งหมด	20 องศาบริกซ์

4.1.2 องค์ประกอบเบื้องต้นของสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน

น้ำเชื่อมข้นที่ได้จากการระเหยของ 3 พันธุ์ คือ เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ ซึ่งมีความหวานประมาณ 68 ถึง 78 องศาบริกซ์ เมื่อนำไปทำให้เป็นสารละลายเจือจาง 20 องศาบริกซ์ ก่อนใช้เป็นสับสเตรทของการหมักเอทานอล ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และไนโตรเจนในสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์
เคลเลอร์ และควาเลย์

องค์ประกอบ	พันธุ์		
	เรย์	เคลเลอร์	ควาเลย์
น้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	216.13	216.13	216.13
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.04	0.03	0.02

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของต้นสดข้าวฟ่างหวาน

ส่วนของต้นสดข้าวฟ่างหวานที่ผ่านการบดละเอียดและนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนเท่ากับ 0.5 ถึง 1.5 เซนติเมตร ก่อนใช้เป็นสับสเตรทของการหมักเอทานอล ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เช่น ไนโตรเจน เซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส และลิกนิน ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของต้นสดสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์

องค์ประกอบ	พันธุ์		
	เรย์	เคลเลอร์	ควาเลย์
น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	55.52	49.68	42.07
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.08	0.07	0.08
เซลลูโลส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	54.49	58.73	56.02
เฮมิ-เซลลูโลส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	14.58	17.14	15.81
ลิกนิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	29.04	21.26	26.45
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.89	2.82	1.72

จากการวิเคราะห์ไนโตรเจนในต้นสดข้าวฟ่างหวานพบว่ามีย่าน้อยมาก ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณไนโตรเจนที่ตรวจพบของสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานความเข้มข้น 20 องศาบริกซ์ มีค่าน้อยกว่าต้นสดมากที่สุด 3 พันธุ์ ต้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์มีลิกนินมากที่สุด ประมาณร้อยละ 29 โดยน้ำหนัก พันธุ์เคลเลอร์มีเซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส และเถ้ามากที่สุด ประมาณร้อยละ 58.73 17.14 และ 2.82 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.2 ผลการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวาน

ผลการทดลองการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์และเคลเลอร์ได้กำหนดสัญลักษณ์และความหมายไว้ในตารางที่ 4.4

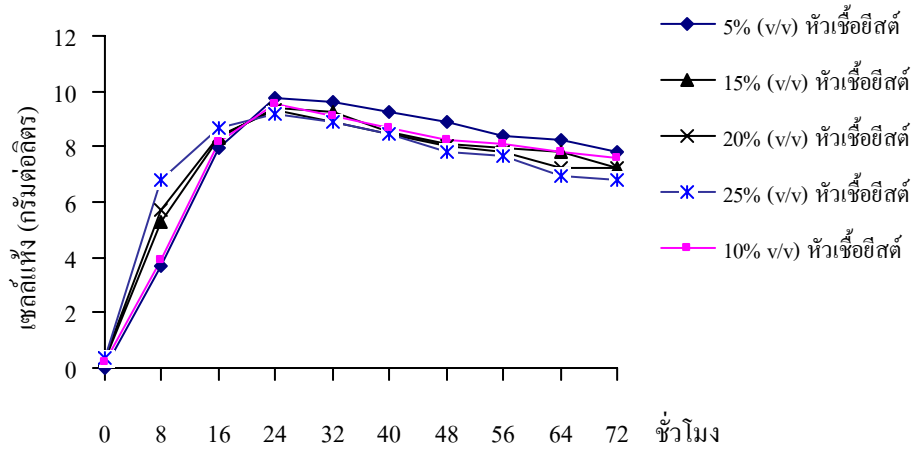
ตารางที่ 4.4 สัญลักษณ์และคำย่อและความหมายที่ใช้ในตอนี่ 4.2

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย
psig	ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ
°C	องศาเซลเซียส
SWJ-1	น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ที่ไม่ได้ปรับพีเอช
SWJ-2	น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ที่ได้ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5
SWJ-3	น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์ที่ได้ปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 5
SW	น้ำข้าวฟ่างหวานผสมกับสารละลายกรด-เบส
DNS method	วิธี Di-nitro salicylic acid
YM	ยีสต์-มอลต์ สกัด
%(v/v)	ร้อยละ โดยปริมาตร
YMA	ยีสต์-มอลต์ สกัดอุ่นแข็ง
C_x	ความเข้มข้นของเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร) ที่เวลาใดๆ
C_{x0}	ความเข้มข้นของเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร) เวลาเริ่มต้น
t	ระยะเวลาที่ใช้หมัก (ชั่วโมง)
μ	อัตราจำเพาะของการเติบโต (ต่อชั่วโมง)
K_S	ค่าคงที่ของโมนอด (กรัมต่อลิตร)
μ_{max}	อัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (ต่อชั่วโมง)
C_S	ความเข้มข้นของน้ำตาล (กรัมต่อลิตร)
t_d	เวลาทวิคูณ (ชั่วโมง)
$Y_{X/S}$	ผลได้ของเซลล์ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)
$Y_{P/S}$	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)
$Y_{P/X}$	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)
Q_X	อัตราการผลิตเซลล์ (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)
Q_P	อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)

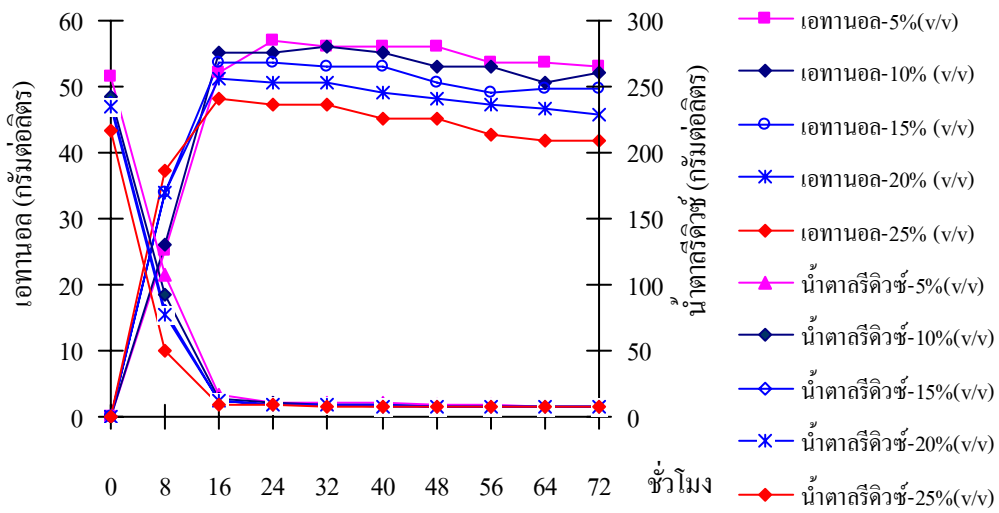
4.2.1. ปริมาณหัวเชื้อ *S. cerevisiae* RT-P2 และพีเอชที่เหมาะสม

4.2.1.1 ปริมาณหัวเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2 ในอาหารเหลวสูตร YM ที่เหมาะสม

ผลการทดลองพบว่า ร้อยละ 5 โดยปริมาตรของหัวเชื้อยีสต์มีความเหมาะสมสำหรับการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-1 ที่สภาวะนี้น้ำหนักเซลล์แห้งและเอทานอลที่ได้มีค่าสูงสุดภายใน 24 ชั่วโมงประมาณ 9.73 และ 56.88 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ผลคำนวณพารามิเตอร์ของการหมักเอทานอลโดยใช้ข้อมูลจากรูป ดังตารางที่ 4.5 อัตราการผลิตเซลล์และอัตราการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ที่ไม่ได้ปรับพีเอช SWJ-1 มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.1 เซลล์แห้งกับเวลาของน้ำหมัก SWJ-1 ที่หัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยปริมาตร



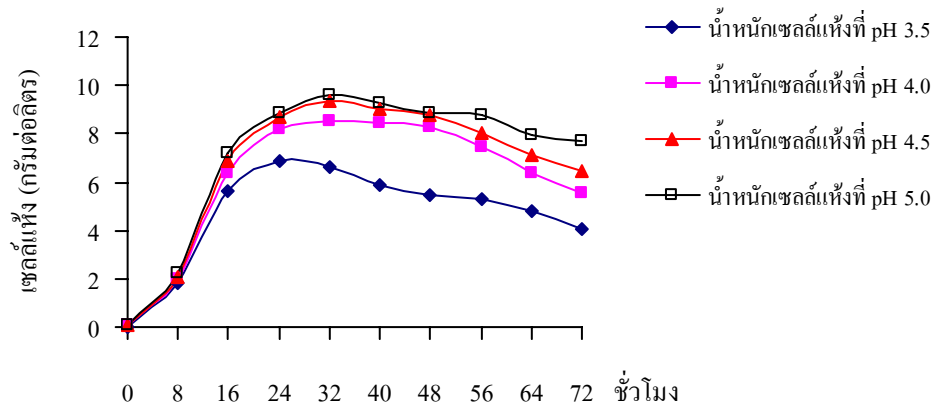
รูปที่ 4.2 เอทานอลและน้ำตาลรีดิวิซกับเวลาของน้ำหมัก SWJ-1 ที่หัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-1 ที่หัวเชื้อยีสต์ ร้อยละโดยปริมาตรต่างๆ

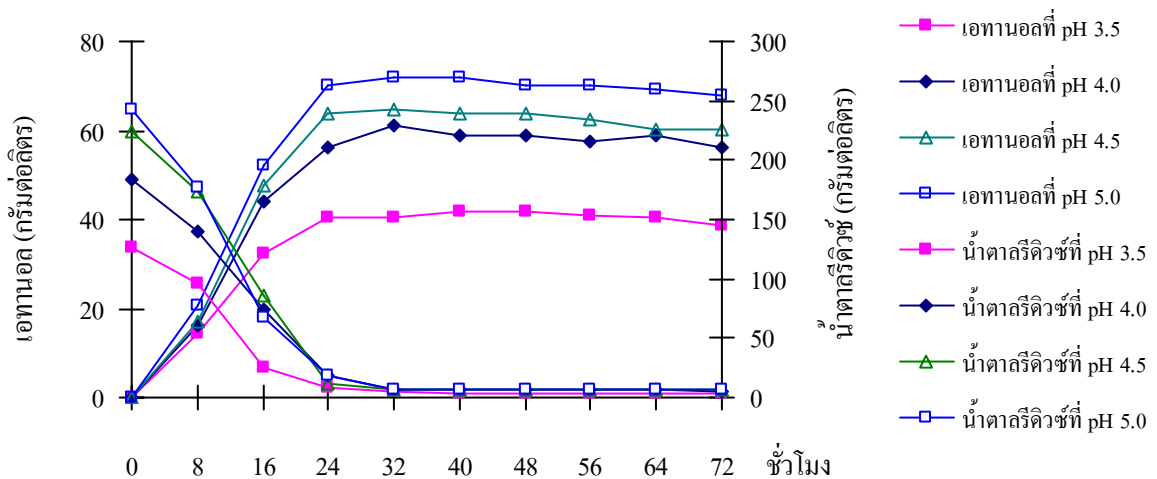
พารามิเตอร์	หัวเชื้อยีสต์ (ร้อยละโดยปริมาตร)				
	5	10	15	20	25
ผลได้ของเซลล์, $Y_{X/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.039	0.040	0.040	0.040	0.043
ผลได้ของผลิตภัณฑ์, $Y_{P/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.236	0.239	0.234	0.224	0.228
ผลได้ของผลิตภัณฑ์, $Y_{P/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	5.852	5.908	5.884	5.655	5.368
อัตราการผลิตเซลล์, Q_X (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.405	0.390	0.380	0.373	0.368
อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์, Q_P (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	2.370	2.304	2.238	2.107	1.975

4.2.1.2 พีเอชของน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ที่เหมาะสม

ผลการทดลองพบว่า พีเอชเริ่มต้นของน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5 สำหรับการผลิตเอทานอลด้วยหัวเชื้อยีสต์ร็อยละ 5 โดยปริมาตร *S. cerevisiae* RT-P2 น้ำหนักเซลล์แห้งยีสต์และเอทานอลที่ได้สูงสุดเท่ากับ 9.56 และ 71.89 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 ตามลำดับ ผลคำนวณพารามิเตอร์ของการหมักเอทานอลที่พีเอชต่างๆ ดังตารางที่ 4.6 อัตราการผลิตเซลล์ และอัตราการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-1 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร็อยละ 5 โดยปริมาตร มีค่ามากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 5



รูปที่ 4.3 เซลล์แห้งของยีสต์กับเวลาของน้ำหมักที่พีเอชเท่ากับ 3.5 4.0 4.5 และ 5.0



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นเอทานอลและน้ำตาลรีดิวซ์กับเวลาของน้ำหมักที่พีเอชเท่ากับ 3.5 4.0 4.5 และ 5.0

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ชนิด SWJ-1 ที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ

พารามิเตอร์	พีเอชเริ่มต้นของน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์			
	3.5	4.0	4.5	5.0
ผลได้ของเซลล์, $Y_{X/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.054	0.048	0.043	0.040
ผลได้ของผลิตภัณฑ์, $Y_{P/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.336	0.347	0.30	0.305
ผลได้ของผลิตภัณฑ์, $Y_{P/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	6.086	7.262	6.996	7.615
อัตราการผลิตเซลล์, Q_X (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.207	0.263	0.289	0.295
อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์, Q_P (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	1.259	1.913	2.024	2.247

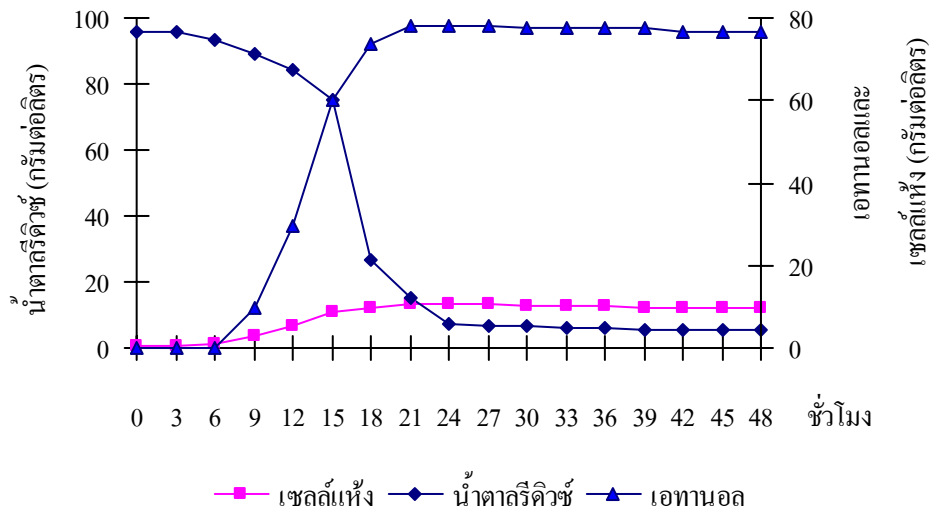
4.2.2. จลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์และเคลเลอร์

4.2.2.1 การหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-1 และ SWJ-2 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ ร้อยละ 5 โดยปริมาตร *S. cerevisiae* RT-P2 ที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร YM

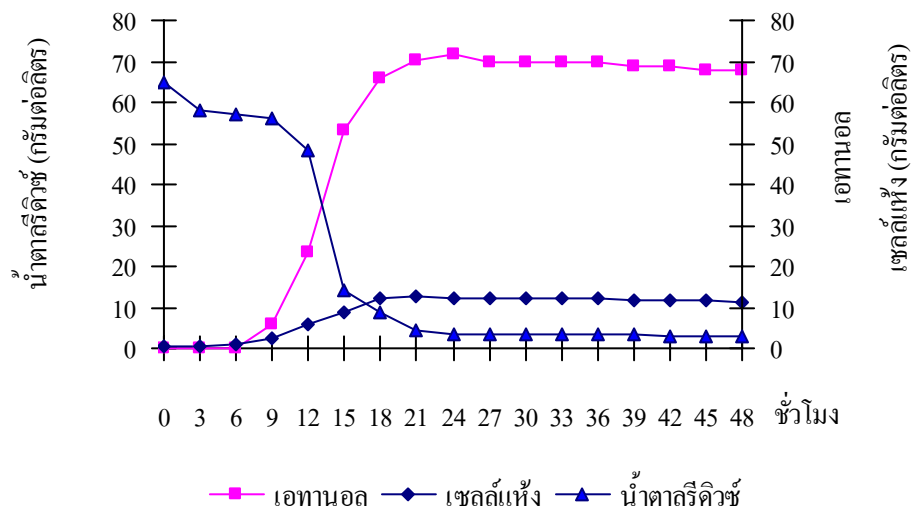
ใช้อาหารเหลวสูตร YM ผลิตหัวเชื้อยีสต์ จากนั้นนำไปหมักเอทานอลจากน้ำคั้นสด SWJ-1 และ SWJ-2 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 32°C ใช้ระยะเวลาหมัก 48 ชั่วโมง พบว่า ยีสต์ใช้เวลาปรับตัวเท่ากันคือประมาณ 3 ชั่วโมง ค่าความอัตราการเจริญจำเพาะของจุลินทรีย์และค่าคงที่ของโมโนคของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้น SWJ-1 ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 14-20 ชั่วโมงและน้ำคั้น SWJ-2 ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 6-21 ชั่วโมง ผลคำนวณดังตารางที่ 3 พบว่า อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์ของน้ำหมัก SWJ-2 ซึ่งได้ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 มีค่าเป็น 3 เท่าของน้ำหมักที่ไม่ได้ปรับพีเอช SWJ-1 และสัมพรรคภาพของจุลินทรีย์ในน้ำหมัก SWJ-2 น้อยกว่า SWJ-1 ซึ่งน้ำหมัก SWJ-2 ใช้สำหรับการหมักเอทานอลได้ดีกว่า ผลการคำนวณพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้ข้อมูลที่ระยะเวลาการหมักที่ซึ่งความเข้มข้นเอทานอลที่ได้มีค่าสูงที่สุดจากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-1 และ SWJ-2 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในอาหารเหลวสูตร YM

พารามิเตอร์	น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์	
	SWJ-1	SWJ-2
อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดของจุลินทรีย์ μ_{max} (ต่อชั่วโมง)	0.23	0.71
สัมพรรคภาพของจุลินทรีย์ K_s (กรัมต่อลิตร)	170.80	103.89
สมการจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากคำนวณบนพื้นฐานการเติบโตของจุลินทรีย์ (สมการ Monod)	$\mu_x = \frac{0.23C_s}{170.80 + C_s}$ (R^2 เท่ากับ 0.94)	$\mu_x = \frac{0.71C_s}{103.89 + C_s}$ (R^2 เท่ากับ 0.90)



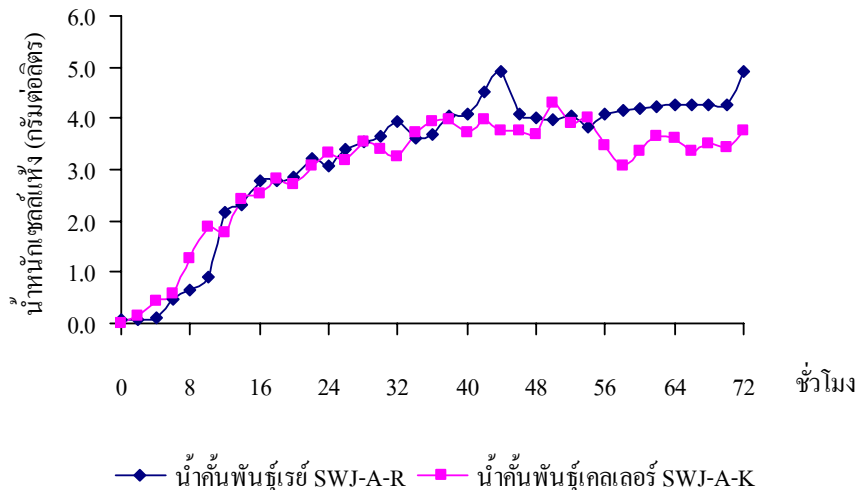
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของเอทานอล น้ำตาลรีดิวิซและน้ำหนัเซลล์แห้งกับเวลาของการหมักเอทานอล จากน้ำคั้นพันธุ์เรย์ ชนิด SWJ-1 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในอาหารเหลวสูตร YM



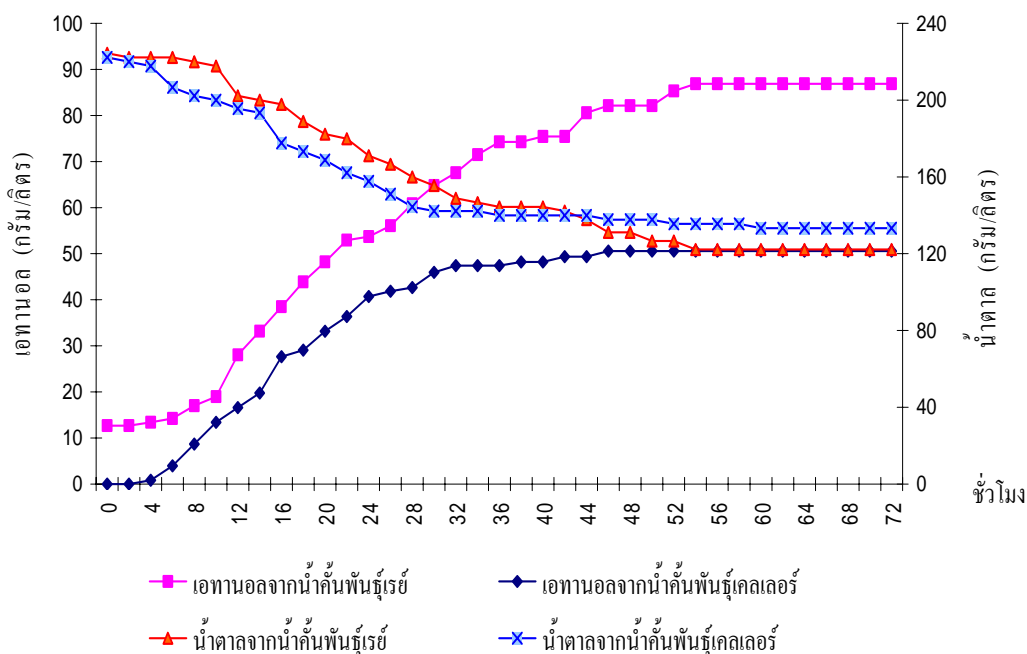
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของเอทานอล น้ำตาลรีดิวิซและน้ำหนัเซลล์แห้งกับเวลาของการหมักเอทานอล จากน้ำคั้นพันธุ์เรย์ชนิด SWJ-2 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในอาหารเหลวสูตร YM

4.2.2.2 การหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-2 และเคลเลอร์ SWJ-3 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร *S. cerevisiae* RT-P2 ที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร SW

การใช้อาหารเหลวสูตร SW ผลิตหัวเชื้อยีสต์ แล้วนำไปหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ SWJ-2 และเคลเลอร์ SWJ-3 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 32°C ใช้ระยะเวลาหมัก 72 ชั่วโมง พบว่ายีสต์ใช้เวลาปรับตัวนานประมาณ 6 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับคำนวณพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากน้ำหมักทั้ง 2 ชนิด โดยใช้ผลการทดลองจากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.7 เซลล์แห้งกับเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์และเคลเลอร์



รูปที่ 4.8 เอทานอลและน้ำตาลรีดิวิซ์กับเวลาที่ใช้ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์และเคลเลอร์

เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้น SWJ-1, SWJ-2 และ SWJ-3 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร *S. cerevisiae* RT-P2 ที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร YM และ SW ดังตารางที่ 4.8 พบว่า ผลได้ของเซลล์และผลิตภัณฑ์ อัตราการผลิตเซลล์และผลิตภัณฑ์จากการใช้หัวเชื้อยีสต์ที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร YM ของน้ำคั้น SWJ-2 มีค่ามากที่สุด นั่นคือการใช้อาหารเหลว YM ผลิตหัวเชื้อยีสต์มีความเหมาะสมกับการเติบโตของยีสต์ เนื่องจาก YM มีสารอาหารครบถ้วนเมื่อเทียบกับอาหารเหลวสูตร SW ซึ่งใช้น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานที่ได้ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ด้วยสารละลาย

บัพเฟอร์ อาหารเหลวสูตร SW มีเพียงน้ำตาล ฟอสเฟต และไนโตรเจนประมาณ 233, 12 และ 0.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ราคาสารเคมีต่อลิตรของอาหารเหลวสูตร YM และ SW ประมาณ 80 และ 65 บาท ตามลำดับ การใช้ น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานปรับพีเอชเท่ากับ 5 ด้วยสารละลายบัพเฟอร์เป็นอาหารเหลวผลิตหัวเชื้อยีสต์จะทำให้ประหยัดราคาอาหารลงได้ลิตรละ 15 บาท

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ และเซลล์เลอร์ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในอาหารสูตร YM และ SW

ค่าพารามิเตอร์	หัวเชื้อยีสต์เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร			
	YM		SW	
	SWJ-1	SWJ-2	SWJ-2	SWJ-3
เวลาทวิคูณ t_d (ชั่วโมง) R^2 เท่ากับ 0.98	3.38	3.89	3.14	1.54
ผลได้ของเซลล์, $Y_{X/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.144	0.213	0.037	0.044
ผลได้ของผลิตภัณฑ์, $Y_{P/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.880	0.890	0.726	0.599
ผลได้ของผลิตภัณฑ์, $Y_{P/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	6.120	6.062	19.376	13.465
อัตราการผลิตเซลล์, Q_x (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.533	0.574	0.069	0.082
อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์, Q_p (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	3.259	3.348	1.375	1.099
ความเข้มข้นเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	78.21	71.89	86.9	50.56
ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)	24	21	56	46

เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากน้ำคั้น SWJ-2 และ SWJ-3 ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร *S. cerevisiae* RT-P2 ที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร SW ดังตารางที่ 4.8 พบว่า เวลาที่ยีสต์ใช้เติบโตเป็นสองเท่าในน้ำหมักพันธุ์เซลล์เลอร์ SWJ-3 เร็วกว่าพันธุ์เรย์ SWJ-2 ผลได้ของเซลล์และอัตราการผลิตเซลล์ของเชื้อยีสต์ที่ได้จากการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นทั้งสองพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (ทั้งต่อสับสเตรทและต่อน้ำหนักเซลล์แห้งยีสต์) และอัตราการผลิตเอทานอลของน้ำคั้นพันธุ์เรย์ SWJ-2 มีค่ามากกว่าเซลล์เลอร์ SWJ-3 ดังนั้น น้ำคั้นพันธุ์เรย์นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตเอทานอลได้ดีกว่าเซลล์เลอร์ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรที่ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และอุณหภูมิห้องเฉลี่ย 32°C ระยะเวลาของการหมักประมาณ 56 ชั่วโมง

เอทานอลที่ได้จากการคำนวณบนพื้นฐานของ 1 ตันต้นสดข้าวฟ่างหวานจากการเพาะปลูกให้น้ำคั้นประมาณ 300-400 ลิตรที่ความหวานประมาณ 15-22 องศาบริกซ์ ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าปริมาตรที่ผลิตได้และความหวานเฉลี่ยเท่ากับ 350 ลิตรและ 18 องศาบริกซ์ในการคำนวณผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสดข้าวฟ่างหวาน ผลการคำนวณพบว่า ผลได้เอทานอลต่อกรัมต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ และเซลล์เลอร์มีค่าเท่ากับ 0.03 และ 0.02 กรัมต่อกรัมสับสเตรท

4.3 ผลการผลิตน้ำเชื่อมข้นข้าวฟ่างหวานโดยการระเหยน้ำคั้นสด

4.3.1 ผลการระเหยด้วยเครื่องระเหยถึงสแตนเลส 2 ชั้น

ผลการระเหยน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวานที่น้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 35.5 และ 80.6 กิโลกรัมด้วยเครื่องระเหยถึงสแตนเลส 2 ชั้นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 98 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.9 และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการระเหย ดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการระเหยน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานหนัก 35.5 และ 80.6 กิโลกรัม

ตัวแปร	น้ำหนักเริ่มต้น 35.5 กิโลกรัม		น้ำหนักเริ่มต้น 80.6 กิโลกรัม	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
น้ำข้าวฟ่างหวาน (กิโลกรัม)	35.5	9.3	80.6	21.3
ความหวาน (องศาบริกซ์)	20.5	75.0	21.5	75.0
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	49.7	90.2	65.8	93.8
แก๊สหุงต้ม (กิโลกรัม)	0	28	0	28
เวลาที่ใช้ระเหย (ชั่วโมง)	0	17	0	28
อัตราการใช้แก๊ส (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	-	1.1	-	1.0
อัตราการระเหยน้ำ (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	-	1.54	-	2.12



(ก) น้ำเชื่อมข้นพันธุ์เรย์



(ข) น้ำเชื่อมข้นพันธุ์เคลเลอร์



(ค) น้ำเชื่อมข้นพันธุ์ควาเลย์

รูปที่ 4.9 น้ำเชื่อมข้นข้าวฟ่างหวานที่ได้จากการระเหย

กำลังจากแก๊สหุงต้มในการระเหยน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานจากความหวานประมาณ 20 องศาบริกซ์ จนกระทั่งได้ความหวานตามต้องการคือ 75 องศาบริกซ์ คำนวณบนพื้นฐานของแก๊สหุงต้ม 1 กิโลกรัม ให้พลังงาน 49,886.21 กิโลจูล พบว่า กำลังที่ใช้ระเหยน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานปริมาณเริ่มต้น 80.6 กิโลกรัม ใช้กำลังสำหรับการระเหยน้ำน้อยกว่าน้ำคั้นที่ปริมาณเริ่มต้น 35.5 กิโลกรัม ดังตารางที่ 4.10 ผลการ

คำนวณกำลังจากแก๊สหุงต้มต่อกิโลกรัมน้ำเชื่อมชั้นที่ผลิตได้ พบว่า น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานปริมาณเริ่มต้น 80.6 กิโลกรัม ใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้มน้อยกว่าน้ำคั้นที่ปริมาณเริ่มต้น 35.5 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.10 กำลังจากแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการระเหยน้ำคั้นข้าวฟ่างหวาน

ตัวแปร	กำลังจากแก๊สหุงต้ม (กิโลวัตต์)	กำลังจากแก๊สหุงต้มต่อน้ำหนัก น้ำเชื่อมชั้น (กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัม)
น้ำข้าวฟ่างหวาน 35.5 กิโลกรัม	14.67	1.58
น้ำข้าวฟ่างหวาน 80.6 กิโลกรัม	13.86	0.65

4.3.2 ผลการระเหยด้วยการระเหยจากกระทะเหล็กปากกว้าง

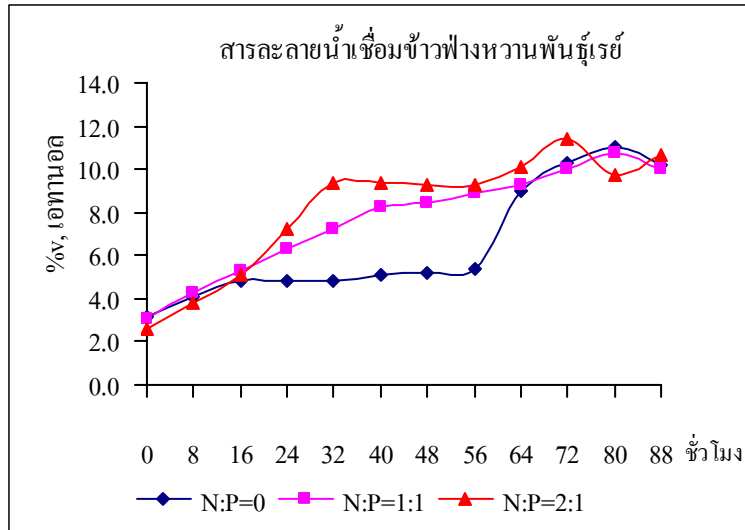
การผลิตน้ำเชื่อมชั้นข้าวฟ่างหวานจำนวน 22 กิโลกรัม โดยการระเหยน้ำด้วยกระทะเหล็กปากกว้างที่มีไม้พินเป็นแหล่งพลังงานความร้อน พบว่าใช้เวลาในการระเหย 4 ชั่วโมง ได้น้ำเชื่อมชั้นที่ 78 องศาบริกซ์ จำนวน 3.9 กิโลกรัม ใช้ไม้พินทั้งสิ้น 30 กิโลกรัม

ค่าพลังงานของไม้พิน 1 กิโลกรัมมีค่าอยู่ในช่วง 3,500- 4,058 กิโลแคลอรี [24] หรือคิดเป็น 840-968 กิโลจูล (1 กิโลแคลอรีเท่ากับ 4.1868 กิโลจูล) หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 904 กิโลจูล ผลการคำนวณพลังงานจากไม้พินเท่ากับ 27.12 กิโลจูลต่อ 4 ชั่วโมง หรือ 1.88 กิโลวัตต์ นั่นคือ กำลังที่ใช้ระเหยน้ำด้วยไม้พินต่อน้ำหนักน้ำเชื่อมชั้นมีค่าเท่ากับ 0.48 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัม และมีอัตราการระเหยน้ำประมาณ 4.53 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

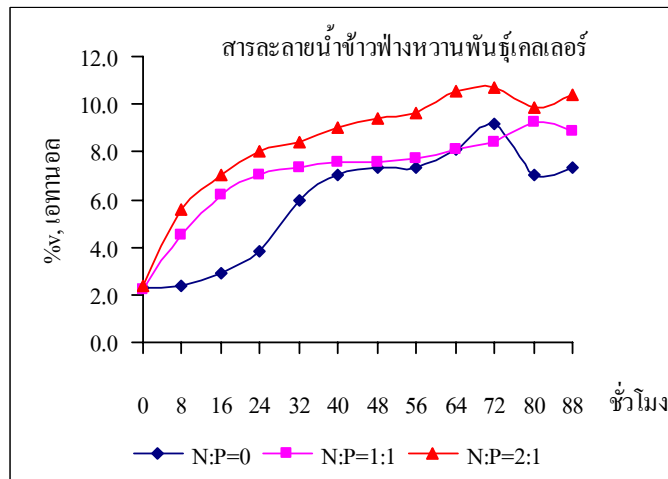
กำลังจากการใช้กระทะเหล็กปากกว้างระเหยน้ำมีค่าน้อยกว่าการใช้เครื่องระเหยถึงสแตนเลส 2 ชั้น อยู่เท่ากับ 0.17 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัม นอกจากนี้คุณภาพของน้ำเชื่อมชั้นที่ได้ดีกว่าอีกด้วย เนื่องจากมีการกวนด้วยไม้พายและตักฟองออกตลอดเวลา ทำให้เศษอนุภาคถูกกำจัดออกไปด้วย

4.4 ผลการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2

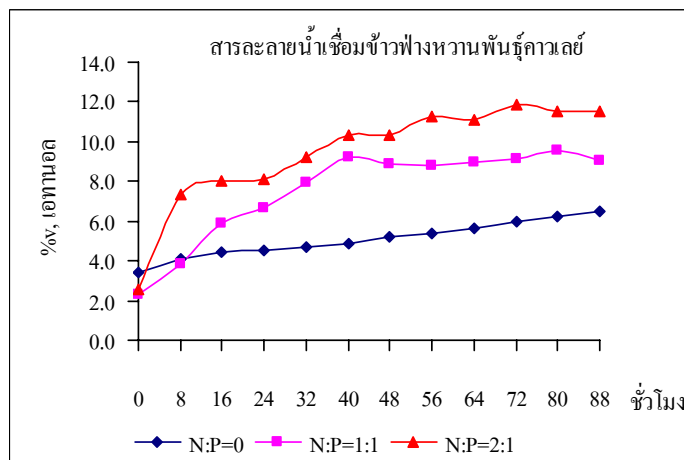
เปรียบเทียบน้ำหนักเซลล์แห้ง ความเข้มข้นเอทานอลและน้ำตาลของการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และ คาวเลย์ที่ไม่ได้เติมและเติมแหล่งไนโตรเจน (ปุ๋ยยูเรีย) และฟอสฟอรัส (ปุ๋ยฟอสเฟต) ที่ N:P เท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่า เอทานอลที่ได้จากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานที่ N:P เท่ากับ 2:1 ของพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และคาวเลย์ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 11.40 10.70 และ 11.88%v ใช้เวลาหมักเท่ากับ 72 ชั่วโมง 64 ชั่วโมง และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นน้ำตาลที่ลดลงและน้ำหนักเซลล์แห้งของแต่ละพันธุ์มีความสอดคล้องกับการเกิดเอทานอล ดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.18 ตามลำดับ



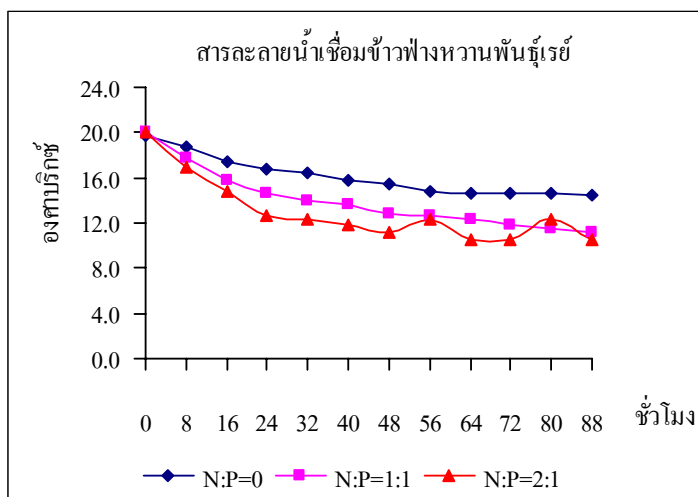
รูปที่ 4.10 เอทานอลที่ได้จากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



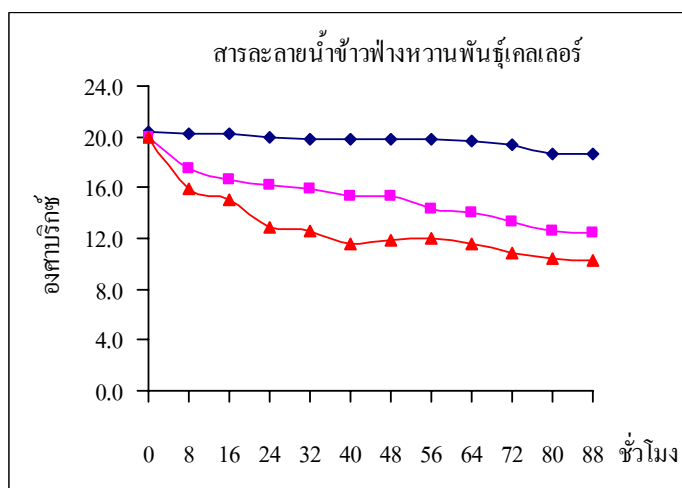
รูปที่ 4.11 เอทานอลที่ได้จากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



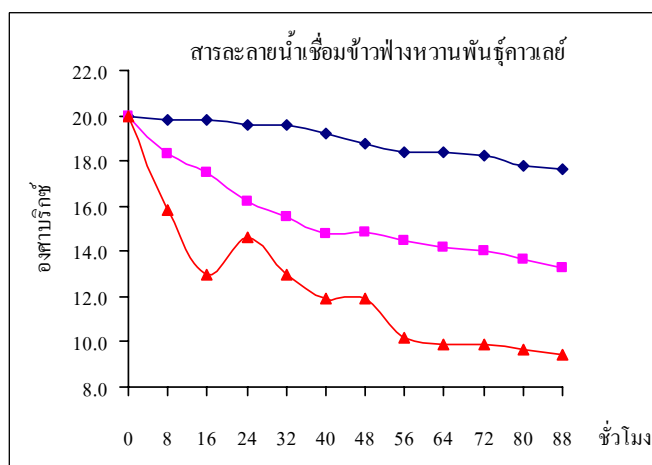
รูปที่ 4.12 เอทานอลที่ได้จากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาลีย์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



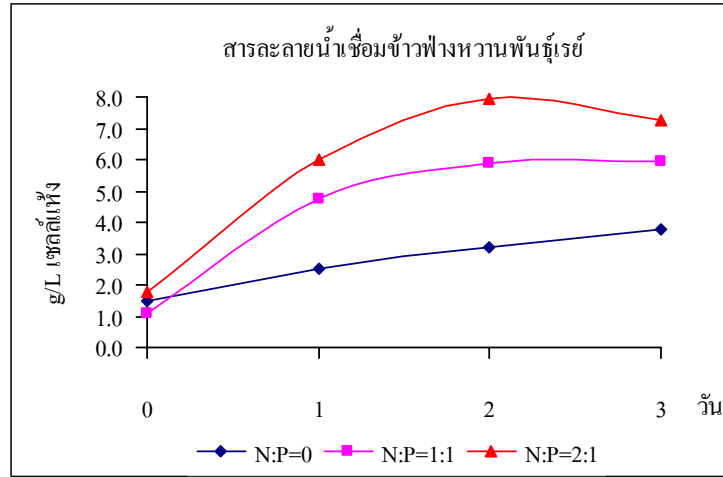
รูปที่ 4.13 น้ำตาลที่ลดลงจากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



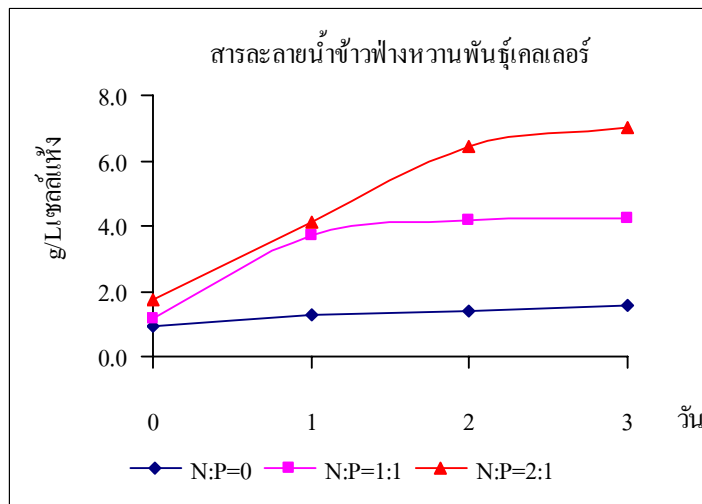
รูปที่ 4.14 น้ำตาลที่ลดลงจากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



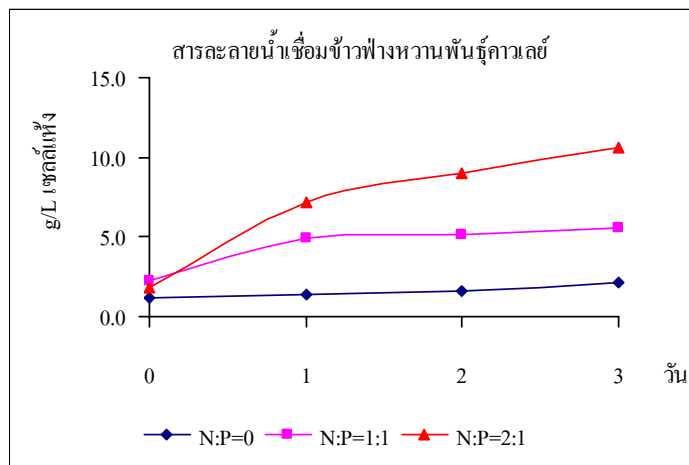
รูปที่ 4.15 น้ำตาลที่ลดลงจากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลย์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



รูปที่ 4.16 น้ำหนักเซลล์แห้งจากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



รูปที่ 4.17 น้ำหนักเซลล์แห้งจากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1



รูปที่ 4.18 น้ำหนักเซลล์แห้งจากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลย์
ที่ N:P = 0, N:P = 1:1 และ N:P = 2:1

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเติบโตของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อม พันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ ที่มีแหล่งคาร์บอน 20 องศาบริกซ์, N:P เท่ากับ 0 1:1 และ 2:1 ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ Q_p , Q_x , $Y_{X/S}$, $Y_{P/X}$, และ $Y_{P/S}$ ที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.18 ของสารละลายน้ำข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ ดังตารางที่ 4.11 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อม

ข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในน้ำข้าวฟ่างหวานและอาหารเหลวสูตร N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

พารามิเตอร์	อาหารเหลวสูตร		
	N:P=0	N:P=1:1	N:P=2:1
เวลาทวีคูณ t_d (ชั่วโมง)	40.2 R^2 เท่ากับ 0.94	10.1 R^2 เท่ากับ 0.91	14.0 R^2 เท่ากับ 0.94
$Y_{X/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.03	0.05	0.05
$Y_{P/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.88	0.78	0.80
$Y_{P/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	34.51	15.63	15.60
Q_x (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.03	0.06	0.08
Q_p (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.95	0.93	1.19
เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	107.50	104.56	111.34
เวลาที่ใช้หมัก (ชั่วโมง)	80	80	72

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อม

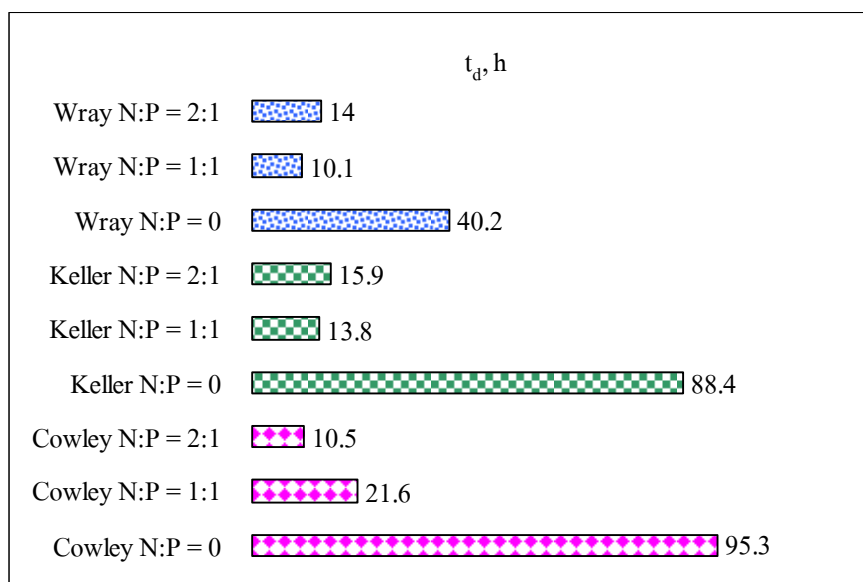
ข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในน้ำข้าวฟ่างหวานและอาหารเหลวสูตร N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

พารามิเตอร์	อาหารเหลวสูตร		
	N:P=0	N:P=1:1	N:P=2:1
เวลาทวีคูณ t_d (ชั่วโมง)	88.4 R^2 เท่ากับ 0.89	13.8 R^2 เท่ากับ 0.99	15.9 R^2 เท่ากับ 0.99
$Y_{X/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.05	0.04	0.06
$Y_{P/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	5.76	0.83	0.84
$Y_{P/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	108.63	22.37	15.10
Q_x (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.01	0.04	0.08
Q_p (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.94	0.86	1.26
เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	89.84	90.64	104.27
เวลาที่ใช้หมัก (ชั่วโมง)	72	80	64

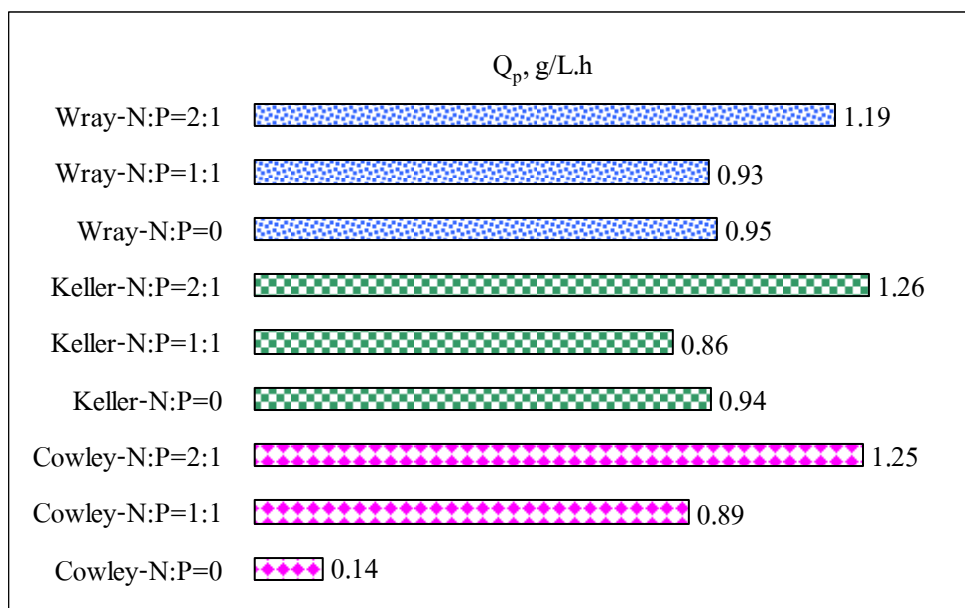
ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อม
ข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลย์ด้วยหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 5 โดยปริมาตรในน้ำข้าวฟ่างหวานและ
อาหารเหลวสูตร N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

พารามิเตอร์	อาหารเหลวสูตร		
	N:P=0	N:P=1:1	N:P=2:1
เวลาทวีคูณ t_d (ชั่วโมง)	95.30	21.60	10.50
	R^2 เท่ากับ 0.99	R^2 เท่ากับ 0.99	R^2 เท่ากับ 0.88
$Y_{X/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.04	0.05	0.08
$Y_{P/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.44	0.99	0.79
$Y_{P/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	10.21	21.85	10.29
Q_x (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.01	0.04	0.12
Q_p (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.14	0.89	1.25
เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	23.23	93.54	115.94
เวลาที่ใช้หมัก (ชั่วโมง)	80	80	72

เวลาที่ยีสต์ใช้เพื่อเพิ่มปริมาณเป็น 2 เท่าหรือเวลาทวีคูณในช่วงการเติบโตแบบเอ็กโพเนนเชียล พบว่า การเติมยูเรียในอาหารเหลวทำให้ยีสต์เติบโตได้เร็วขึ้นกว่าไม่ได้เติม ดังรูปที่ 4.19



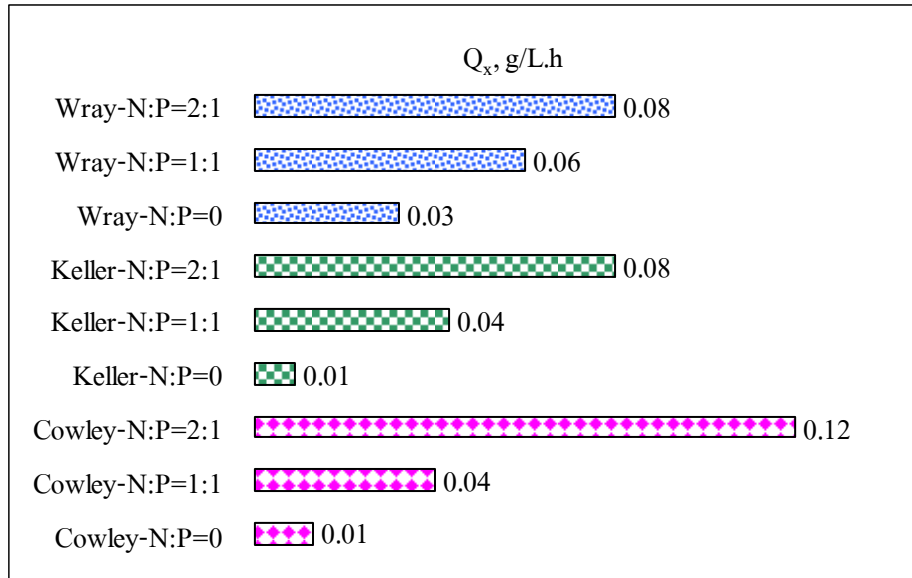
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบเวลาทวีคูณที่ยีสต์ใช้ในระหว่างการเติบโตแบบเอ็กโพเนนเชียลของสารละลาย
น้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1



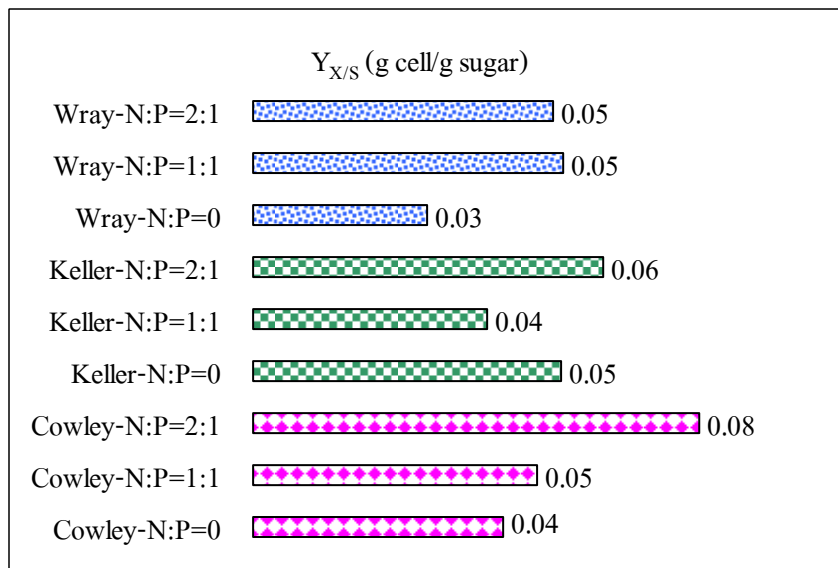
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราการผลิตเอทานอลของการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

เปรียบเทียบอัตราการผลิตเอทานอลของการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1 ดังรูปที่ 4.20 ตามลำดับ พบว่าการเติมปุ๋ยไนโตรเจนที่ N:P = 2:1 ทำให้อัตราการผลิตเอทานอลของพันธุ์ควาเลย์เพิ่มขึ้นเป็น 1.26 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง เปรียบเทียบกับเมื่อไม่ได้เติมไนโตรเจนมีค่าเพียง 0.14 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง แต่การเติมปุ๋ยไนโตรเจนไม่มีผลต่อพันธุ์เคลเลอร์และเรย์มากนัก พันธุ์เคลเลอร์และเรย์จากก่อนเดิมมีค่าอัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.94 และ 0.95 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง การเติมปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 2 เท่ากับ มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 1.02 และ 1.19 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ การใช้ปุ๋ยเป็นแหล่งไนโตรเจนไม่เพียงแต่ช่วยเร่งให้ยีสต์เติบโตด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้นแต่ยังเพิ่มผลได้ของเอทานอลและลดการเกิดสารข้างเคียงอีกด้วย [25] อย่างไรก็ตาม อัตราการผลิตเอทานอลขึ้นกับพันธุ์ข้าวฟ่างหวานอีกด้วย

อัตราการผลิตเซลล์ของสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลย์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.12 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่ N:P = 2:1 ดังรูปที่ 4.21 ทำนองเดียวกันกับผลได้ของเซลล์ต่อสับสเตรทสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลย์มีค่ามากที่สุดที่ N:P = 2:1 ดังรูปที่ 4.22 สำหรับผลได้ของเอทานอลต่อสับสเตรท และผลได้ของเอทานอลต่อเซลล์ของสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์มีค่ามากที่สุด ที่ N:P = 0 ดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24

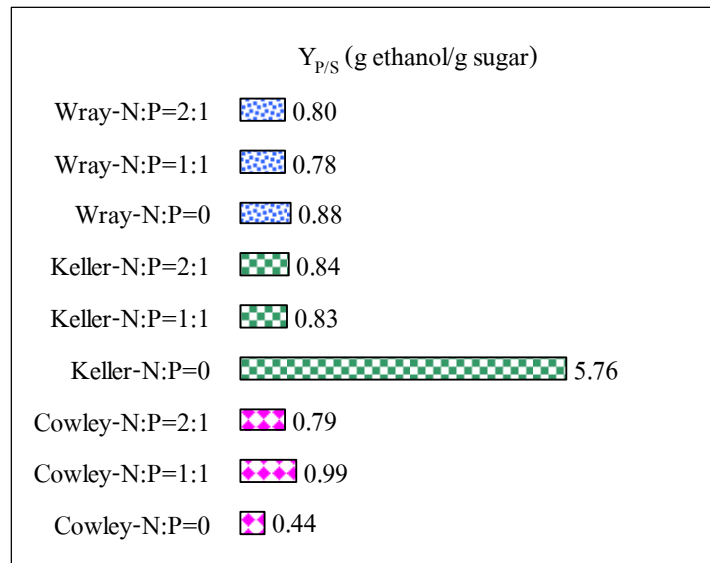


รูปที่ 4.21 เปรียบอัตราการผลิตเซลล์ของการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

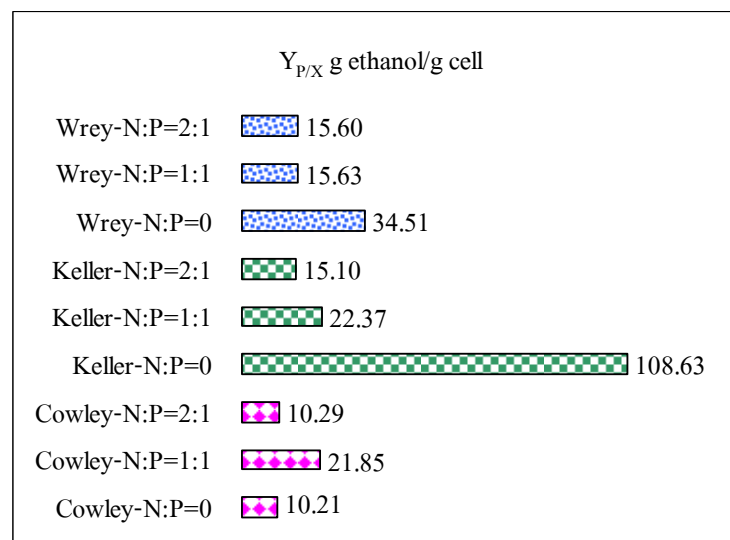


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลได้ของเซลล์ต่อสับสเตรทสำหรับการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อม ข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

การคำนวณเอทานอลเอทานอลที่ได้จากการหมักสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานสายพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ซึ่งมีความหวาน 20 องศาบริกซ์มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.0744 1.0605 และ 1.0773 กรัมต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.14 น้ำคั้น 80 กิโลกรัม ผลิตน้ำเชื่อมขึ้นได้เท่ากับ 21 กิโลกรัม จากการทดลองน้ำเชื่อมขึ้นสายพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์หนักเท่ากับ 360 403 และ 380 กรัม ใช้ทำ สารละลายน้ำเชื่อมได้ปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลได้ของเอทานอลต่อสับสเตรทสำหรับการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลได้ของเอทานอลต่อเซลล์สำหรับการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ ที่ N:P=0, N:P=1:1 และ N:P=2:1

ดังนั้น สารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานสายพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ ที่ความหวาน 20 องศาบริกซ์ คิดเป็นน้ำหนักเฉลี่ยจากน้ำหนักเท่ากับ 1.37 1.50 และ 1.45 กิโลกรัม หรือมีปริมาตรเท่ากับ 1.28 1.41 และ 1.35 ลิตร ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณผลได้เอทานอลต่อกรัมต้นสดบนพื้นฐานค่าเฉลี่ยต้นสด 1 ต้นผลิตน้ำคั้นได้ 350 ลิตร ผลจากการคำนวณ พบว่า ผลได้เอทานอลต่อกรัมต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ มีค่าเท่ากับ 0.030, 0.026 และ 0.030 กรัมต่อกรัมสับสเตรท (ต้นสด) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.14 ความหนาแน่นของสารละลายข้าวฟ่างหวานสายพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ ที่ความหวาน 20 องศาบริกซ์

สารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์	ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)
เรย์	1.0744
เคลเลอร์	1.0605
ควาเลย์	1.0773

4.5 ผลการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยกรดเซลลูเลสเพียงอย่างเดียว

4.5.1 สภาพที่เหมาะสมของการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยกรดเซลลูเลส

การเติบโตของจุลินทรีย์ที่เกิดจากการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ตามวิธีการทดลองออร์โทโกนอล ดังภาคผนวก ๓ ตารางที่ ผผ-1 และผผ-2 ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปใช้ในการกำหนดหาสภาวะที่เหมาะสม

ผลจากการคำนวณตามวิธีการทดลองออร์โทโกนอล ซึ่งมีปัจจัยควบคุม 3 พารามิเตอร์ (น้ำหนักต้นสด น้ำหนักกรดเซลลูเลส และระยะเวลา) แต่ละพารามิเตอร์แบ่งออกเป็น 5 ระดับ ดังภาคผนวก ๓ ตารางที่ ผผ-3 ถึง ตารางที่ ผผ-5 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการหมักเอทานอลจากต้นสดพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ คือการหมักเอทานอลใช้ต้นสดข้าวฟ่างหวานเป็นสับสเตรทหนักเท่ากับ 25 กรัมและ 30 กรัม กรดเซลลูเลส 4 กรัมและ 5 กรัม ในอาหารเหลวพีเอช 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ระยะเวลาที่ใช้หมักเท่ากัน คือ 9 วัน ดังตารางที่ 4.15

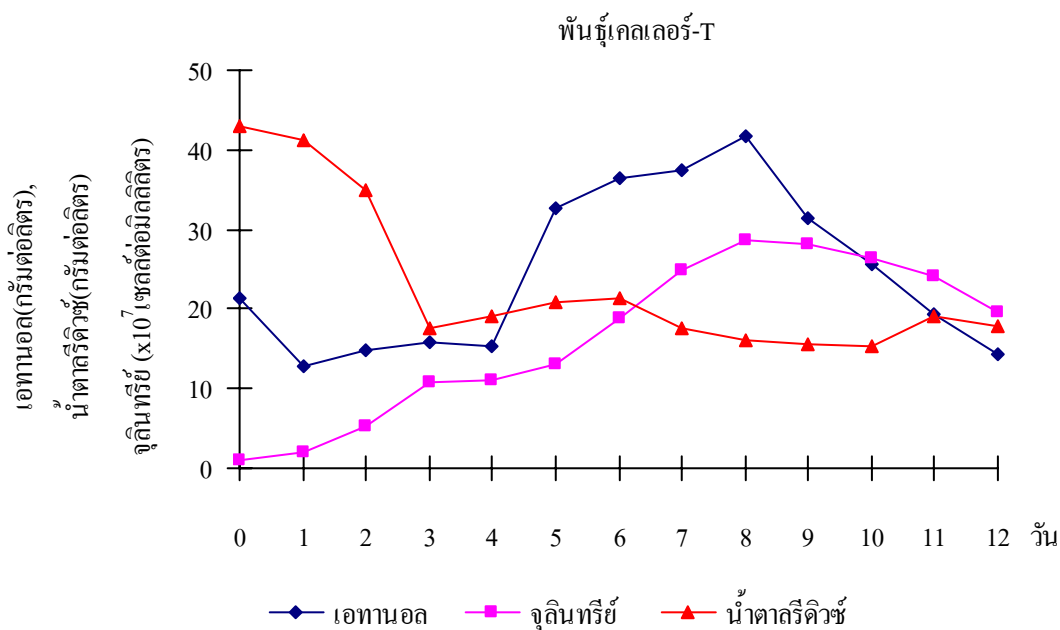
ตารางที่ 4.15 สภาวะที่เหมาะสมของการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ด้วยกรดเซลลูเลสเพียงอย่างเดียวในอาหารเหลวปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์	น้ำหนัก		ระยะเวลา (วัน)
	ต้นสด (กรัม)	กรดเซลลูเลส (กรัม)	
เคลเลอร์	25	4	9
ควาเลย์	30	5	9

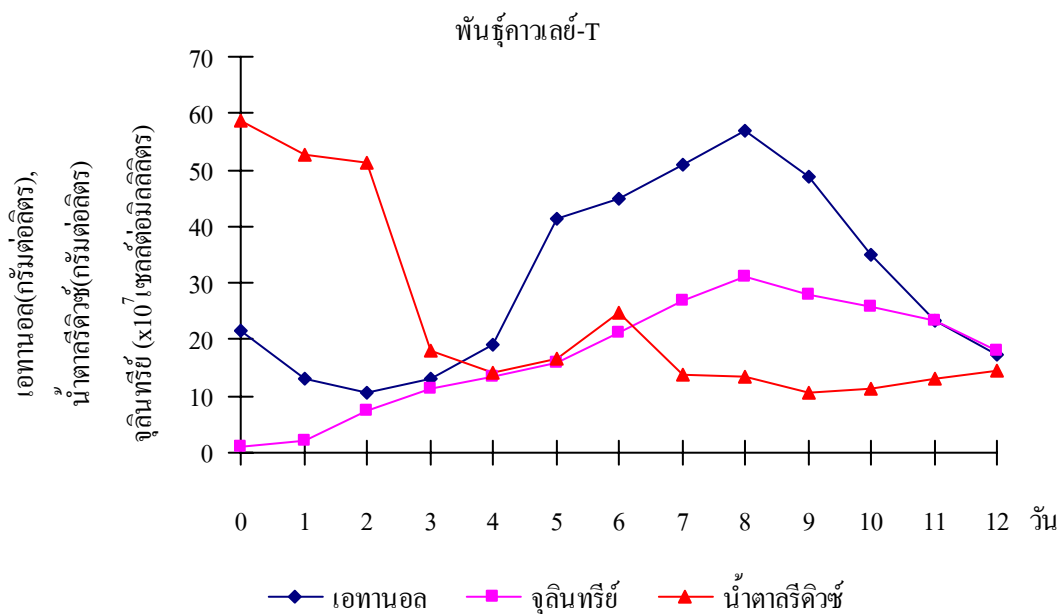
4.5.2 ผลการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานที่สภาวะเหมาะสม

จากตารางที่ 4.15 เชื่อเราสามารถเจริญเติบโตได้ดีในพันธุ์เคลเลอร์เมื่อใช้กรดเซลลูเลสร้อยละ 4 โดยน้ำหนักแห้ง ต้นสดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักเปียก ใช้เวลา 9 วัน ส่วนพันธุ์ควาเลย์ได้สภาวะเหมาะสมที่กรดเซลลูเลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง ต้นสดร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเปียก ใช้เวลา 9 วัน เมื่อทำการหมักซ้ำที่สภาวะเหมาะสม ใช้ระยะเวลา 12 วัน พบว่า เอทานอลที่ได้จากพันธุ์เคลเลอร์ และ

พันธุ์ควาเลยมีค่าประมาณ 41.8 และ 56.8 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาหมักเท่ากับ 8 วัน ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 เอทานอล น้ำตาลรีดิซ และกลูโคสของการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวาน พันธุ์เคลเลอร์ด้วยครูดเซลลูเลสผงที่สภาวะเหมาะสม



รูปที่ 4.26 เอทานอล น้ำตาลรีดิซ และกลูโคสของการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวาน พันธุ์ควาเลยด้วยครูดเซลลูเลสผงที่สภาวะเหมาะสม

โปรไฟล์เอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ พิจารณาจากความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาที่สภาวะเหมาะสม เอทานอลและการเติบโตของจุลินทรีย์จะมีค่าลดลง เนื่องจากขาดแคลนสับสเตรทที่ระยะเวลาดังกล่าว แสดงว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผลต่อการหมักเอทานอล ผลได้ของเอทานอลของการหมักต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์ และควาเลียคิตปีนร้อยละ 16.7 และ 18.9 ของน้ำหนักต้นสดข้าวฟ่างหวาน

เอทานอลที่ได้จากการคำนวณบนพื้นฐานของความถ่วงจำเพาะของเอทานอล 0.78 (ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร) พบว่าต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์ 1 ต้น ให้เอทานอลประมาณ 214 ลิตร ส่วนต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลีย 1 ต้น ให้เอทานอลประมาณ 243 ลิตร

ผลจากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.25 และ 4.26 จำนวนพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลีย พบว่า เวลาทวีคูณไม่แตกต่างกันมากนัก เชื้อราไตรโคเดอร์มา ริสอี RT-P1 สามารถเติบโตได้ตั้งแต่เริ่มต้นของการหมัก ผลได้ของเอทานอลต่อกรัมกลูโคสของพันธุ์เคลเลอร์และควาเลียประมาณ 0.76 และ 0.78 ตามลำดับ อัตราการผลิตเอทานอลของทั้งสองพันธุ์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลียด้วยครูดเซลลูเลสผงที่สภาวะเหมาะสม

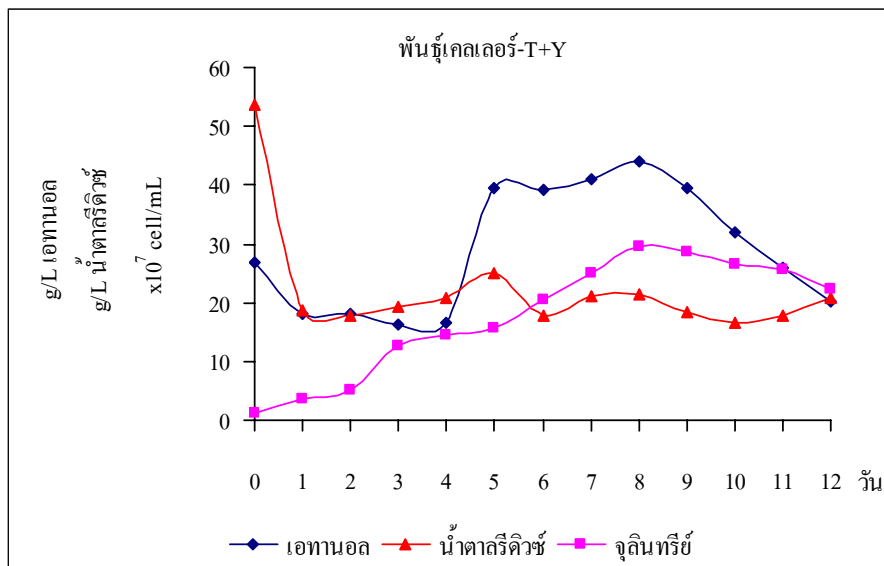
พารามิเตอร์	ต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์	
	เคลเลอร์	ควาเลีย
Q_p (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.11	0.18
Q_x (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.05	0.05
$Y_{p/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.76	0.78
$Y_{p/X}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	2.23	3.53
$Y_{x/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.34	0.22
เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	41.8	56.8
เวลาที่ใช้หมัก (ชั่วโมง)	22.23	20.48
ผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสด	0.17	0.19

4.6 ผลการหมักเอทานอลจากต้นสดข้าวฟ่างหวานแบบรวมปฏิกิริยาด้วยครูดเซลลูเลสผงร่วมกับหัว

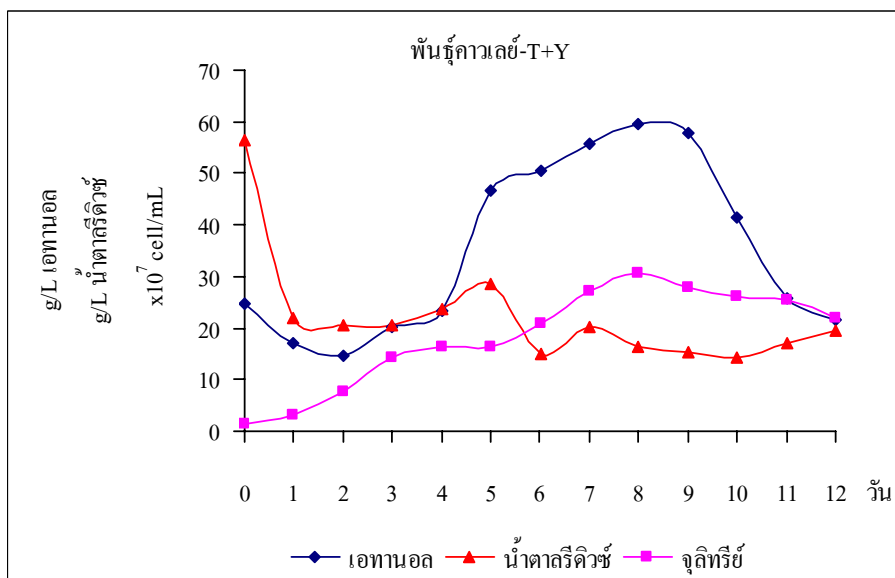
เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2

ผลของการหมักเอทานอลแบบรวมปฏิกิริยาจากต้นสดข้าวฟ่างหวานทั้ง 2 พันธุ์ที่สภาวะเหมาะสม คือน้ำหนักต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลียเท่ากับ 25 และ 30 กรัม ครูดเซลลูเลสผงเท่ากับ 4 และ 5 กรัม ในอาหารเหลว พีเอช 5 สูตร-4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร หมักร่วมกับหัวเชื้อ-

ยีสต์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ใช้เวลาหมักนาน 12 วัน พบว่า เอทานอลที่ได้จากพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ ประมาณ 43.9 และ 59.7 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาหมักเท่ากับ 8 วัน ซึ่งมีค่ามากกว่าเอทานอล ที่ได้จากการหมักด้วยครูดเซลลูเลสผงเพียงอย่างเดียวอยู่ประมาณ 2.1 และ 2.9 กรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 เอทานอล น้ำตาลรีดิวิซ์ และกลูโคสรีดิวิซ์ของการหมักเอทานอลแบบรวมปฏิกริยาจากต้นสดข้าว ฟางหวานพันธุ์เคลเลอร์ด้วยครูดเซลลูเลสผงร่วมกับหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.28 เอทานอล น้ำตาลรีดิวิซ์ และกลูโคสรีดิวิซ์ของการหมักเอทานอลแบบรวมปฏิกริยาจากต้นสดข้าว ฟางหวานพันธุ์ควาเลย์ด้วยครูดเซลลูเลสผงร่วมกับหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

ผลจากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.27 และ 4.28 คำนวณพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลจากต้นสาคุดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ ดังตารางที่ 4.17 พบว่า พารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของการหมักทั้ง 2 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการหมักทั้งหมด การหมักเอทานอลด้วยครูดเซลลูเลสเพียงอย่างเดียวใช้เวลาน้อยกว่า 1 วัน ซึ่งสะดวกและง่ายกว่าการหมักแบบรวมปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้เวลาเพิ่ม 1 วันสำหรับการเตรียมหัวเชื้อยีสต์ ถึงแม้เอทานอลที่ได้จากวิธีการหมักเอทานอลแบบรวมปฏิกิริยาจะมากกว่าเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลแบบรวมปฏิกิริยาจากต้นสาคุดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ด้วยครูดเซลลูเลสพร้อมกับหัวเชื้อยีสต์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร

พารามิเตอร์	ต้นสาคุดข้าวฟ่างหวานพันธุ์	
	เคลเลอร์	ควาเลย์
Q_p (กรัมเอทานอลต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.09	0.18
Q_x (กรัมเซลล์ต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.05	0.05
$Y_{p/S}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.53	0.88
$Y_{p/x}$ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์)	1.81	3.60
$Y_{x/S}$ (กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส)	0.30	0.24
เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	43.90	59.70
เวลาที่ใช้หมัก (ชั่วโมง)	20.23	20.65
ผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสาคุด	0.18	0.20

เปรียบเทียบผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสาคุดของพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์จากวิธีการหมัก 2 แบบ คือ การหมักโดยใช้ครูดเซลลูเลสเพียงอย่างเดียวและแบบรวมปฏิกิริยา พบว่ามีค่าใกล้เคียงระหว่างร้อยละ 17 โดยน้ำหนัก ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [26] ที่ใช้ยีสต์สายพันธุ์ที่ร้อนทำการหมักต้นสาคุดข้าวฟ่างหวานขนาด 0.5-1.5 เซนติเมตร ผลได้เอทานอลเท่ากับร้อยละ 7.9 โดยน้ำหนัก หรือ 0.46 กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส