

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำคั้นสด สารละลายน้ำเชื่อมและต้นสดข้าวฟ่างหวาน

น้ำคั้นสดมีความหวานประมาณ 18-20 องศาบริกซ์ ในโตรเจนเริ่มต้น 0.05%w พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.5

สารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานมีความหวาน 20 บริกซ์ ในโตรเจนเริ่มต้นของพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลียเท่ากับร้อยละ 0.04, 0.03 และ 0.02 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นของต้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลีย เท่ากับ 55.52 49.68 และ 42.07 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในโตรเจนเริ่มต้นของแต่ละพันธุ์เรย์มีค่าใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ต้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์มีลิคินินมากที่สุด ประมาณร้อยละ 29 โดยน้ำหนัก พันธุ์เคลเลอร์มีเซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลสและเถ้ามากที่สุดประมาณร้อยละ 58.73 17.14 และ 2.82 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

5.2 การหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวาน

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวาน 2 พันธุ์ คือ พันธุ์เรย์และเคลเลอร์ด้วย *S. cerevisiae* RT-P2 ที่สภาวะเหมาะสม สรุปผลการทดลอง ดังต่อไปนี้คือ

- หัวเชื้อยีสต์ที่เหมาะสม คือร้อยละ 5 โดยปริมาตร
- น้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์และเคลเลอร์ มีน้ำตาลเริ่มต้นประมาณ 18 ถึง 20 องศาบริกซ์

สามารถใช้เป็นอาหารเหลวแทนอาหารเหลววายเอ็มได้โดยไม่ต้องเติมแหล่งไนโตรเจนเพิ่ม โดยปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5

- เอทานอลที่ได้จากการหมักน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์และเคลเลอร์ เท่ากับ 86.9 กรัมต่อลิตรและ 50.56 กรัมต่อลิตรใช้เวลาหมักนาน 56 ชั่วโมงและ 46 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 32°C

- ผลได้และอัตราการผลิตของเอทานอลของการหมักน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์มากกว่าพันธุ์เคลเลอร์ประมาณ 0.13 และ 0.28 กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส แต่ใช้เวลาหมักนานกว่า 10 ชั่วโมง

ผลจากงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาทางด้านจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอลด้วยจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ แบคทีเรีย โดยใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ เป็นสับสเตรท พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวานพันธุ์ที่ใช้ในการศึกษานี้น้อยกว่าการศึกษาที่ผ่านมา และอัตราการผลิตเอทานอลได้ผลดีกว่า ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานด้วยจุลินทรีย์ที่สภาวะต่างๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมากับงานวิจัยนี้

จุลินทรีย์	พีเอช, อุณหภูมิ	ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)	เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	อัตราการผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	เอกสารอ้างอิง
<i>S. cerevisiae</i> RIT02	5, 32°C	21 (shaking flask)	71.89 (ที่ความเข้มข้น 9.1% v/v)	3.35	งานวิจัยนี้
<i>S. cerevisiae</i> ตรังรูป	4.5	6 (shaking flask) 10 (5L Bioreactor)	95.15% yield 96.72% yield	- -	[27]
<i>S. cerevisiae</i> TISTR 5048	4.9	36	73.57 ± 1.62	2.04 ± 0.05	[28]
<i>S. cerevisiae</i> TISTR 5048	35°C	36 (shaking flask) 36 (5L Fermentor)	69.00 66.58	1.92 1.85	[29]
<i>Z. mobilis</i> TISTR 548	37°C	48 (shaking flask) 36 (5L Fermentor)	78.60 78.03	1.64 1.63	

5.3 การผลิตน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานโดยการระเหยน้ำคั้นสด

เครื่องระเหยถึงสแตนเลส 2 ชั้น ใช้แก๊สหุงต้มเป็นแหล่งพลังงานความร้อนระเหยน้ำออกจากน้ำคั้นสดข้าวฟ่างหวาน เปรียบเทียบกับการระเหยน้ำด้วยกระทะปากกว้าง สรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบการระเหยน้ำด้วยเครื่องระเหยถึงสแตนเลส 2 ชั้นกับกระทะเหล็กปากกว้าง

ตัวแปร	เครื่องระเหย			
	ถึงสแตนเลส 2 ชั้น		กระทะเหล็กปากกว้าง	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	80.6	21.3	22	3.9
ความหวาน (องศาบริกซ์)	20	75	19	78
พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมน้ำเชื่อม)	-	0.65	-	0.48
เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	-	28	-	4
อัตราการระเหยน้ำ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	-	2.12	-	4.53
กำลังที่ใช้ในการระเหยน้ำ (กิโลวัตต์)	-	13.86	-	1.88
ค่าพลังงานคิดเป็นเงิน (บาท)	-	590	-	-

แก๊สหุงต้มที่ใช้ของเครื่องระเหยถึงสแตนเลส 2 ชั้น เท่ากับ 28 กิโลกรัม (2 ถัง) เป็นเงิน 590 บาท (ราคา 295 บาท/ถัง) ส่วนไม้พินที่ใช้ของเครื่องระเหยกระทะเหล็กปากกว้างไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย เพราะได้จากศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุพรรณบุรี

5.4 การหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* RT-P2

สารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ สามารถใช้เป็นสับสเตรทที่ความหวานเริ่มต้นเท่ากับ 20 องศาบริกซ์ สำหรับการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง 30°C การเติมปุ๋ยยูเรียและฟอสเฟตเพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทำให้การเติบโตของเซลล์ยีสต์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะในสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานมีปริมาณไนโตรเจนน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำคั้นจากต้นสดข้าวฟ่างหวาน งานวิจัยที่ผ่านมา [30] พบว่าการหมักเอทานอลน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานไม่ต้องเติมยูเรีย แต่ขึ้นกับพันธุ์ข้าวฟ่างหวาน สายพันธุ์ยีสต์และพีเอชอย่างมีนัยสำคัญ

ผลสรุปการหมักเอทานอลจากสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์ และควาเลย์ มีดังนี้คือ

- อัตราส่วนไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่ใช้เติมลงในสายละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ที่ดีที่สุดคือ N:P = 2:1 เพราะเอทานอลที่ได้จากการหมักมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 115.9 104.3 และ 111.3 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาหมักเท่ากับ 72 64 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเทียบกับที่ N:P = 0 และ N:P = 1:1

- ถึงแม้ว่าสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ที่ N:P = 2:1 ให้อัตราการผลิตเอทานอลสูงที่สุดเท่ากับ 1.19, 1.26 และ 1.25 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเทียบกับที่ N:P = 0 และ N:P = 1:1 ก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตเอทานอลของสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และเรย์ที่ N:P = 0 พบว่า มีความแตกต่างกันน้อย เมื่อเทียบกับพันธุ์ควาเลย์ นั่นคือสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์ควาเลย์ต้องการแหล่งอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเพิ่มเติม ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลต่างระหว่างอัตราการผลิตเอทานอลของสารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์เรย์ เคลเลอร์และควาเลย์ที่ N:P = 2:1 และที่ N:P = 0

สารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานพันธุ์	อัตราการผลิตเอทานอลที่ N:P (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ความแตกต่างของอัตราการผลิตเอทานอลระหว่าง N:P = 2:1 และ 0 (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)
	2:1	0	
เรย์	1.19	0.95	0.24
เคลเลอร์	1.26	0.94	0.32
ควาเลย์	1.25	0.14	1.11

5.5 ผลการหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวานด้วยกรดเซลลูเลสผงเพียงอย่างเดียว

สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ต้นสัคข้าวฟ่างหวานที่ใช้เป็นสับสเตรทคือ พันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์
- สภาวะที่เหมาะสมของการหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ด้วยกรดเซลลูเลสผง ในอาหารเหลวพีเอช 5 สูตร-4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังตารางที่ 5.4
- เปรียบเทียบผลได้ของกรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส อัตราการผลิตเอทานอล ผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสัคข้าวฟ่างหวานของแต่ละพันธุ์ ระหว่างการหมักด้วยกรดเซลลูเลสผงและแบบรวมปฏิกิริยา ระยะเวลาที่ใช้หมักเท่ากันคือ 8 วัน หรือ 192 ชั่วโมง ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 5.5 ดังนั้นการใช้กรดเซลลูเลสผงสำหรับการหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวานจึงดีกว่าแบบรวมปฏิกิริยา เพราะสะดวกและใช้เวลาน้อยกว่า 1 วัน
- การหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวานทั้งสองพันธุ์เป็นการหมักแบบกะ จะเห็นได้ว่าการเติบโตของจุลินทรีย์ น้ำตาลรีดิวซ์ และเอทานอลมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องที่ระยะเวลาหมัก 8 วันเป็นต้นไป เนื่องจากสารอาหารที่มีอยู่ในระบบลดลงอย่างมาก จึงไม่พอเพียงอีกต่อไป ซึ่งเป็นข้อด้อยของการหมักเอทานอลแบบกะ

ตารางที่ 5.4 สภาวะเหมาะสมของการหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์

ปัจจัยควบคุม	ต้นสัคข้าวฟ่างหวานพันธุ์	
	เคลเลอร์	ควาเลย์
น้ำหนักต้นสัคข้าวฟ่างหวาน (กรัม)	25	30
น้ำหนักกรดเซลลูเลสผง (กรัม)	4	5
ระยะเวลาที่ใช้หมัก (วัน)	8	8

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ระหว่างการหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวานพันธุ์เคลเลอร์และควาเลย์ด้วยกรดเซลลูเลสผงเพียงอย่างเดียวกับแบบรวมปฏิกิริยา

พารามิเตอร์	การหมักเอทานอลจากต้นสัคข้าวฟ่างหวาน			
	ด้วยกรดเซลลูเลสผง		แบบรวมปฏิกิริยา	
	พันธุ์		พันธุ์	
	เคลเลอร์	ควาเลย์	เคลเลอร์	ควาเลย์
ผลได้ของเอทานอล (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส)	0.76	0.78	0.60	0.88
อัตราการผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	0.11	0.18	0.10	0.18
ผลได้ของเอทานอล (กรัมต่อกรัมสับสเตรท)	0.17	0.19	0.18	0.20

5.6 เปรียบเทียบเอทานอลที่ได้จากการหมักส่วนต่างๆ ของข้าวฟ่างหวาน

งานวิจัยนี้ได้นำข้าวฟ่างหวานมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเอทานอลเพื่อพลังงานทดแทน โดยนำส่วนต่างๆ 3 ส่วน คือ น้ำคั้นต้นสดข้าวฟ่างหวาน สารละลายน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน และต้นสดข้าวฟ่างหวาน จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลได้เอทานอลต่อกรัมกลูโคส อัตราการผลิตเอทานอลผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสดข้าวฟ่างหวานแต่ละพันธุ์ ดังตารางที่ 5.6 พบว่า ผลได้เอทานอลของน้ำคั้น สารละลายน้ำเชื่อม และต้นสดข้าวฟ่างหวาน มีค่าอยู่ในช่วง 0.60 ถึง 0.84 กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคส อัตราการผลิตเอทานอลของน้ำคั้น และสารละลายน้ำเชื่อม มีค่าใกล้เคียงอยู่ในช่วง 1.10 ถึง 1.38 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ส่วนการผลิตเอทานอลของต้นสดข้าวฟ่างหวานมีค่าน้อยกว่า ขณะที่ผลได้ของเอทานอลต่อกรัมต้นสดข้าวฟ่างหวานของการใช้ต้นมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5.6 เอทานอลที่ได้จากการนำส่วนต่างๆ ของข้าวฟ่างหวานใช้เป็นสับสเตรท

สับสเตรท	ผลได้เอทานอล (กรัมต่อกรัมกลูโคส)	อัตราการผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	ผลได้ของเอทานอล (กรัมต่อกรัมสับสเตรท)
น้ำคั้น			
- พันธุ์เรย์	0.73	1.38	0.03
- พันธุ์เคลเลอร์	0.60	1.10	0.02
สารละลายน้ำเชื่อม			
- พันธุ์เรย์	0.80	1.19	0.030
- พันธุ์เคลเลอร์	0.84	1.26	0.026
- พันธุ์ควาเลย์	0.79	1.25	0.030
ต้นสด			
- พันธุ์เคลเลอร์	0.76	0.11	0.17
- พันธุ์ควาเลย์	0.78	0.18	0.18

ยิ่งไปกว่านั้น การใช้ต้นสดใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้ส่วนที่เป็นน้ำคั้นและสารละลายน้ำเชื่อม เพราะต้องผ่านการระเหย ดังนั้น การหมักเอทานอลโดยใช้ต้นสดข้าวฟ่างหวานจึงควรพัฒนาเอนไซม์และกระบวนการหมัก เช่น การหมักแบบกึ่งกะที่จะนำมาใช้แทนการหมักแบบกะ ซึ่งใช้เวลา 8 วัน เพื่อเกิดการย่อยสลายและหมักในเวลาที่รวดเร็วกว่าในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ การนำส่วนต่างๆ ของข้าวฟ่างหวานมาใช้ในการหมักเอทานอลขึ้นกับการพิจารณาปัจจัยอื่นๆ อีกนอกจากการใช้พลังงาน เช่น การระเหยให้ผลดีเรื่องการเก็บรักษาไม่ให้เกิดการหมักโดยธรรมชาติ แต่ต้องลงทุนเรื่องพลังงานที่ใช้ในการระเหย การหมักเอทานอลโดยใช้น้ำคั้นที่แหล่งปลูกอาจช่วยลดการปนเปื้อน เวลาและพลังงานที่ใช้ได้ [29]