

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุป

1) น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการเจริญและการผลิตเอทานอลของ *S. cerevisiae* NP 01 โดยยีสต์สามารถเจริญในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยไม่มีระยะปรับตัว อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดหรือ μ_{max} ของยีสต์ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน ขึ้นอยู่กับปริมาณยีสต์เริ่มต้นในน้ำหมัก แต่ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นในช่วง 240 – 280 กรัมต่อลิตร

2) ปริมาณเซลล์เริ่มต้นและความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล โดยการใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นสูงสามารถลดระยะเวลาการหมักและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานได้ โดยพบว่าเมื่อใช้น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่ไม่มีสารอาหารเพิ่มเติม และใช้ปริมาณเซลล์เริ่มต้นที่ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร จะได้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงสุดดังนี้

ความเข้มข้นของ น้ำตาลเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น ของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	ประสิทธิภาพผลได้ เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)	ระยะเวลา การหมัก (ชั่วโมง)
240	101.68	2.82	96.30	36
280	104.97	1.75	88.12	60

3) แอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจนที่ไม่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

4) การผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นของน้ำตาล 240 กรัมต่อลิตร ในระบบ cascade ที่ประกอบด้วยถังหมักขนาด 2 ลิตร เชื่อมต่อกับคอลัมน์แก้ว 3 คอลัมน์ ที่ต่อกันแบบอนุกรม ทำให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น และได้ความเข้มข้นและอัตราผลผลิตของเอทานอลสูงขึ้น และประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลยังขึ้นกับอัตราการเจือจางของระบบ หรือระยะเวลาที่น้ำหมักอยู่ในระบบ โดยที่อัตราการเจือจางที่เท่ากัน การผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยระบบ cascade ให้ความเข้มข้นเอทานอล และอัตราผลผลิต สูงกว่าระบบ CSTR ประมาณ 51 – 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลได้ของเอทานอลมีค่าไม่แตกต่างกัน และการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยระบบ cascade ให้ค่าความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดสูงกว่าเมื่อใช้ระบบแบบกะประมาณ

5 เเปอร์เซ็นต์ แต่ระบบแบบกะให้ค่าอัตราผลผลิตสูงกว่าระบบ cascade ประมาณ 3 เท่า ส่วนประสิทธิภาพผลได้เอทานอลของระบบการหมักต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

ระบบการหมัก	ความเข้มข้น ของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	อัตราผลผลิตเอทานอล (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	ประสิทธิภาพ ผลได้เอทานอล (เปอร์เซ็นต์)
แบบต่อเนื่องโดยระบบ cascade	107.14	0.75	94.45
แบบต่อเนื่องโดยระบบ CSTR	67.28	0.47	98.18
แบบกะ	101.68	2.82	96.30

5) ยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลแบบกะภายใต้สภาวะ VHG ได้โดยพบว่า น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกซ์ 8 กรัมต่อลิตร สามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลได้จาก 99 กรัมต่อลิตร เป็น 107 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง

6) กากเซลล์ยีสต์แห้งจากโรงงานเบียร์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งอาหารเสริมในการหมักเพื่อผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG ได้ โดยพบว่า น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 280 กรัมต่อลิตร และเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 8 กรัมต่อลิตร สามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลได้ประมาณ 6 กรัมต่อลิตร (6 เปอร์เซ็นต์) ที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง

7) ปริมาณยีสต์เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG ในระดับขยายขนาด (50 ลิตร) คือ 5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยที่สภาวะนี้ความเข้มข้นเอทานอลที่ได้ใกล้เคียงกับเมื่อใช้ปริมาณยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร คือได้ความเข้มข้นเอทานอลประมาณ 104 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการหมัก 56 ชั่วโมง

8) การคำนวณต้นทุนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน (คิดเฉพาะในส่วนของวัตถุดิบ) มีค่าสูงกว่าเมื่อใช้กากน้ำตาลหรืออ้อยเป็นวัตถุดิบ ประมาณ 1 บาท คือมีค่าประมาณ 11 บาทต่อเอทานอล 1 ลิตร และมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อใช้มันสำปะหลังผลิตเอทานอลประมาณ 2 - 3 บาท ต่อเอทานอล 1 ลิตร

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากงานวิจัยของ Rittiplang (2005) พบว่า การผลิตสาโทโดย *S. cerevisiae* NP 01 สามารถทนและผลิตเอทานอลได้สูงถึง 15 เปอร์เซ็นต์ (โดยปริมาตร) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ พบว่า *S. cerevisiae* NP 01 สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (104 - 105 กรัมต่อลิตร) ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลสูงขึ้น เช่น

- เพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับยีสต์ในระยะแรกของการหมัก (6 - 12 ชั่วโมงแรก) เพื่อให้ยีสต์เจริญและมีผนังเซลล์ที่แข็งแรง ทำให้สามารถทนและผลิตเอทานอลได้สูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้ลดระยะเวลาการหมักลงได้ มีผลทำให้อัตราผลผลิตเอทานอลเพิ่มสูงขึ้น

- ใช้กระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ซึ่งอาจทำให้ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลได้เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้น อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาอัตราผลผลิตเอทานอลควบคู่ไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำตาลในน้ำหมักอาจทำให้ระยะเวลาการหมักนานขึ้น

2) การผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยระบบ cascade จากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 240 กรัมต่อลิตร พบว่ามีน้ำตาลเหลือในน้ำหมักที่ออกจากคอลัมน์สุดท้ายประมาณ 40 กรัมต่อลิตร ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถใช้น้ำตาลได้อย่างสมบูรณ์ อาจลดความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานให้เหลือเพียง 200 กรัมต่อลิตร

3) ปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในโรงงานโดยทั่วไปจะเป็นแบบถังกวน (stirred tank) ดังนั้นจึงควรมีการทดลองเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยระบบ cascade ที่ประกอบด้วยถังกวนและคอลัมน์ต่อกันแบบอนุกรม (จากการทดลองนี้) กับระบบ cascade ที่เป็นถังกวนหลายอันต่อกันแบบอนุกรม เพื่อให้ทางโรงงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายขึ้น

4) กระบวนการหมักแบบต่อเนื่องโดยระบบ cascade สามารถเพิ่มความเข้มข้น และอัตราผลผลิตของเอทานอลได้ประมาณ 51 - 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการหมักแบบต่อเนื่องโดยระบบถังกวนปกติหรือระบบ CSTR โดยทั่วไป ปัจจุบันมีโรงงานผลิตเอทานอลหลายโรงงานที่ใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่องโดยระบบ CSTR และใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ดังนั้นโรงงานอาจนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปปรับหรือประยุกต์ใช้ โดยปรับจากระบบ CSTR ปกติ เป็นระบบ cascade โดยใช้ถังกวนต่อกันแบบอนุกรม (แทนการใช้ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบคอลัมน์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้) ซึ่งน่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลได้เช่นกัน แต่เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นอาจต่ำกว่าเมื่อใช้ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบคอลัมน์

5) กากเซลล์ยีสต์แห้งของโรงงานเบียร์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งอาหารเสริมในการหมักเพื่อผลิตเอทานอลแบบกะจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะ VHG ได้ โดยสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้ประมาณ 5 - 6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำหมักที่ไม่มีสารอาหารเพิ่มเติม ปัจจุบันโรงงานผลิตเอทานอลหลายแห่งใช้แอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับกระบวนการหมัก อย่างไรก็ตามแอมโมเนียมซัลเฟตไม่มีสารอาหารอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์กับยีสต์นอกจากไนโตรเจน ดังนั้นหากโรงงานผลิตเอทานอลนำกากเซลล์ยีสต์แห้งไปใช้แทนแอมโมเนียมซัลเฟต น่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลขึ้นกับวัตถุดิบที่นำมาใช้ด้วย