บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์การผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลและน้ำอ้อย ด้วยกระบวนการหมัก ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยผลของน้ำตาลเริ่มต้นที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลของยีสต์ *S. cerevisiae* สายพันธุ์ S5 โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ Logistic model ในการทำนายการเจริญเติบโตของเซลล์ ทำนายอัตราการผลิตเอทานอล และทำนายการใช้น้ำตาล นอกจากนี้ยังศึกษาการนำน้ำกากส่ากลับมาใช้ใหม่ เพื่อนำมาใช้เจือจางกากน้ำตาล

5.1 ศึกษาการหมักเอทานอลด้วยกากน้ำตาล และน้ำอ้อย

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล โดยทำการหมักที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 ใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร เมื่อหมักครบ 72 ชั่วโมง พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลรวม 230 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 69.72 กรัมต่อลิตร (8.8 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ได้น้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 5.99 กรัมต่อลิตร เหลือปริมาณน้ำตาลเหลือสุดท้ายเท่ากับ 53.64 กรัมต่อลิตร และที่น้ำตาลเริ่มต้น 120, 170, 200 และ 260 กรัมต่อลิตร ผลิตเอทานอลได้ต่ำกว่า เท่ากับ 34.69, 46.22, 60.06 และ 60.45 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่น้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้น้อยกว่าเนื่องจากผลของแรงดันออสโมติกที่เกิดจากความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูงเกิน ส่วนที่น้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 200 กรัมต่อลิตร ผลิตเอทานอลได้น้อยเพราะปริมาณน้ำตาลถูกใช้เพื่อการเพิ่มจำนวนเซลล์จึงไม่เพียงพอต่อการผลิตเอทานอล

สำหรับผลการศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำอ้อย โดยทำการหมักที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 ใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร เมื่อหมักครบ 72 ชั่วโมง พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลรวม 230 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 86.31 กรัมต่อลิตร (10.9 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 10.28 กรัมต่อลิตร และมีน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.82 กรัมต่อลิตร และที่น้ำตาลเริ่มต้น 120, 170, 200 และ 260 กรัมต่อลิตร ผลิตเอทานอลได้ต่ำกว่า เท่ากับ 42.80, 61.94, 72.12 และ 78.49 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่น้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร ผลิตเอทานอลได้น้อยกว่า เนื่องจากผลยับยั้งที่เกิดจากความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูงเกิน ส่วนที่น้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 200 กรัมต่อลิตร ผลิตเอทานอลได้น้อยเพราะปริมาณน้ำตาลถูกใช้เพื่อการเพิ่มจำนวนเซลล์จึงไม่เพียงพอต่อการผลิตเอทานอล

5.2 ศึกษาการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล

การนำน้ำกากส่าไปเจือจางกากน้ำตาลแทนน้ำ ได้ทำการทดลองที่ปริมาณน้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 200 กรัมต่อลิตร พบว่าที่ปริมาณน้ำกากส่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถหมักเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 65.53 กรัมต่อลิตร (8.3 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ใช้เวลาไป 354 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 2.96 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 75.57 กรัมต่อลิตร ให้ค่าประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงสุดที่ 97.38 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าเป็น 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถผลิตเอทานอลได้น้อยเนื่องจากผลของผลพลอยได้ของยีสต์ที่เกิดขึ้นจากการผลิตเอทานอล ซึ่งจะส่งผลการยับยั้งต่ออัตราการเจริญเติบโตของยีสต์ ส่วนที่ปริมาณน้ำกากส่า 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลิตเอทานอลได้น้อยกว่าเช่นกัน

5.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอล

เมื่อนำผลการทดลองการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากกากน้ำตาล น้ำอ้อย และกากน้ำตาลเจือจางด้วยน้ำกากส่า มาศึกษาจลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ logistic model สามารถสรุปเป็นประเด็นหลักๆ ดังนี้

จลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

1. การทำนายการเจริญเติบโตของเซลล์ สามารถคำนวณค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) เท่ากับ 0.208 ถึง 0.349 ต่อชั่วโมง และคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) เท่ากับ 5.484 ถึง7.128 กรัมต่อลิตร เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการเจริญเติบโตของเซลล์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.953 ถึง 0.990
2. การทำนายการผลิตเอทานอล สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 4.840 ถึง 9.628 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ยีสต์ และคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) เท่ากับ 3.646 ถึง 10.936 ชั่วโมง เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการผลิตเอทานอลให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.927 ถึง 0.984
3. การทำนายการใช้น้ำตาลของยีสต์ สามารถคำนวณค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.068 ถึง 0.106 กรัมเซลล์ยีสต์ต่อกรัมน้ำตาล และคำนวณค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) เท่ากับ 0.277 ถึง 0.434 ต่อชั่วโมง เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการใช้น้ำตาลของยีสต์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.973 ถึง 0.984

จลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

1. การทำนายการเจริญเติบโตของเซลล์ สามารถคำนวณค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) เท่ากับ 0.191 ถึง 0.235 ต่อชั่วโมง และคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) เท่ากับ 7.349 ถึง 7.806 กรัมต่อลิตร เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการเจริญเติบโตของเซลล์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.978 ถึง 0.989
2. การทำนายการผลิตเอทานอล สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 6.244 ถึง 9.826 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ยีสต์ และคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) เท่ากับ 4.225 ถึง 16.049 ชั่วโมง เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการผลิตเอทานอลให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.948 ถึง 0.997
3. การทำนายการใช้น้ำตาลของยีสต์ สามารถคำนวณค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.079 ถึง 0.135 กรัมเซลล์ยีสต์ต่อกรัมน้ำตาล และคำนวณค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) เท่ากับ 0.528 ถึง 0.718 ต่อชั่วโมง เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการใช้น้ำตาลของยีสต์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.903 ถึง 0.988

จลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลเจือจางด้วยน้ำกากส่า

1. การทำนายการเจริญเติบโตของเซลล์ สามารถคำนวณค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) เท่ากับ 0.016 ถึง 0.275 ต่อชั่วโมง และคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) เท่ากับ 1.923 ถึง 6.990 กรัมต่อลิตร เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการเจริญเติบโตของเซลล์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.897 ถึง 0.990
2. การทำนายการผลิตเอทานอล สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 8.456 ถึง 26.866 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ยีสต์ และคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) เท่ากับ 7.329 ถึง 220.240 ชั่วโมง เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการผลิตเอทานอลให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.865 ถึง 0.991
3. การทำนายการใช้น้ำตาลของยีสต์ สามารถคำนวณค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.025 ถึง 0.081 กรัมเซลล์ยีสต์ต่อกรัมน้ำตาล และคำนวณค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) เท่ากับ 0.020 ถึง 0.425 ต่อชั่วโมง เมื่อนำค่าคงที่มาทำการจำลองการใช้น้ำตาลของยีสต์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังจะสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.910 ถึง 0.981

จากสรุปผลการทดลองที่กล่าวมา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ logistic model สามารถนำมาใช้ในการทำนายการผลิตเอทานอลได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเอทานอลต่อไป

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์การผลิตเอทานอล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ logistic model สร้างมาเพื่อทำนายการเจริญเติบโตของเซลล์ในช่วง lag phase ถึง log phase ดังนั้นจึงเกิดปัญหาการทำนายการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่คลาดเคลื่อนในช่วง stationary phase ปัญหานี้อาจแก้โดยการปรับปรุงสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน
2. การศึกษาการนำน้ำกากส่ากลับมาใช้ใหม่ ยังพบปัญหาด้านการเจริญเติบโตของยีสต์ เนื่องจากมีผลยับยั้งจากสาร by-product ที่ปะปนมากับน้ำกากส่า ดังนั้นอาจจะแก้ปัญหาโดยการปรับสภาพน้ำกากส่าเพื่อกำจัดสารพวก by-product ออกก่อนที่จะนำมาเจืองจางกากน้ำตาล
3. จากการทดลองพบว่า ถ้าใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นสูง ทำให้เชื้อไม่ค่อย เจริญเติบโต และได้ผลผลิตต่ำ ดังนั้นควรจะเปลี่ยนกระบวนการหมักจากการหมักแบบ batch เป็นแบบ fed batch โดยการควบคุมอัตราการเติมน้ำตาล เพื่อทำให้การเพาะเลี้ยงอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการเกิดผลิตภัณฑ์ตลอดเวลา
4. ควรมีการศึกษาหาแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอลจากแหล่งอื่นที่อาจจะมีต้นทุน ในการผลิตที่ต่ำกว่า เช่น ฟางข้าว กากอ้อย เปลือกข้าว เป็นต้น
5. ควรศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* เพิ่มเติม เพื่อหาแนวทางที่จะลดช่วงเวลาที่เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* ใช้ในการหมักให้น้อยลง และให้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และ ควรมีการศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อกระบวนการหมัก เช่น pH อุณหภูมิ วิธีการหมัก เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการหมัก