บทที่ 7

สรุปผลและเสนอแนะ

ต้นข้าวโพดเป็นวัสดุที่เหลือหลังจากเก็บฝักไปแล้วในแต่ละปี ประเทศไทยเรามีเหลือทิ้งเป็นจำนวนมหาศาล แม้ว่าชาวไร่ได้นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนหรือใช้ทำปุ๋ยแล้วก็ตาม งานวิจัยนี้จึงพยายามนำต้นข้าวโพดมาใช้ให้เป็นประโยชน์ด้วยการสกัดและเปลี่ยนสารพวกเซลลูโลสและน้ำตาลให้เป็นอัลกอฮอล์ ได้แบ่งขั้นตอนของงานวิจัยเป็น 3 ขั้นตอน ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

พรี-ไฮโดรไลซิส

ต้นข้าวโพดที่บดแล้วลอดผ่านตระแกรงขนาด 3, 4 และ 10 เมช ถูกนำมาแยกสกัดน้ำตาลด้วยกรดซัลฟูริคที่มีความเข้มข้น 4.4% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที ชิ้นมวลต้นข้าวโพดขนาด 10 เมช ให้น้ำตาลรีดิวส์มากกว่า 4 และ 3 เมชถึง 10.6 เมช และ 24.52% ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณน้ำหนักของต้นข้าวโพดเท่า ๆ กัน ทั้งนี้เพราะน้ำตาลที่อยู่ในต้นข้าวโพดบดขนาดเล็กจะซึมผ่านผนังได้เร็วและมากกว่าต้นข้าวโพดบดขนาดใหญ่ และมีความเข้มข้นของกรด 4.4% นี้จะได้ปริมาณน้ำตาลดีกว่าที่ความเข้มข้น 4% และ 5% เนื่องจากว่าที่ความเข้มข้นของกรดมาก เมื่อใช้เวลาสกัดนานเท่ากัน น้ำตาลที่ได้จะเปลี่ยนรูปเป็นสารอื่นไป แต่ถ้าใช้ปริมาณกรดน้อยลง การสกัดก็ให้ประสิทธิภาพต่ำ

ในทำนองเดียวกับกรณีที่ใช้ปริมาตรของสารละลายกรดมากย่อมต้องละลายหรือสกัดน้ำตาลได้มากเช่นเดียวกัน แต่เมื่อคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์แล้ว อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายกรด (มิลลิลิตร) : น้ำหนักชิ้นมวลต้นข้าวโพดควรเป็น 10:1

สารละลายที่แยกได้จากการสกัดครั้งแรก เมื่อนำมาตรวจหาปริมาณของกรดที่เหลืออยู่ปรากฏว่ายังมีเหลืออยู่พอที่จะนำไปสกัดแยกน้ำตาลต้นข้าวโพดใหม่ต่อไปได้อีก จึงได้ทดลองนำมาสกัดต่อเป็นครั้งที่สอง ซึ่งสามารถสกัดน้ำตาลได้ความเข้มข้นเพิ่มจากครั้งที่หนึ่งถึง 90.6% ในครั้งที่สามปริมาณของน้ำตาลเข้มข้นเพิ่มจากครั้งที่สองเพียง 15.6% เป็นเพราะสารละลายมีความเข้มข้นของน้ำตาลใกล้สมดุลย์กับปริมาณของน้ำตาลที่มีอยู่ในต้นข้าวโพดแล้ว

ไฮโดรไลซิส

กากต้นข้าวโพดที่เหลือจากการสกัดน้ำตาลออกไปแล้วยังมีสารพวกเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเหลืออยู่ ซึ่งสามารถย่อยสลายสารเหล่านี้ให้กลายเป็นน้ำตาลได้ โดยการใช้สารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 80% โดยน้ำหนัก เมื่อนำกากต้นข้าวโพดมาแช่เป็นเวลานานเท่า ๆ กัน จะได้ปริมาณน้ำตาลดีกว่าเมื่อแช่กากต้นข้าวโพดในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 75 และ 85% เมื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายกรดเป็น 8% แล้วให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานเท่า ๆ กัน เนื่องจากว่าการแช่กากต้นข้าวโพดที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดมาก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง นอกจากจะทำลายโครงสร้างของลิกนินแล้ว ยังเกิดการสลายน้ำตาลที่ได้จากเซลลูโลสไปเป็นสารอื่น แต่ถ้าแช่กากต้นข้าวโพดที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดน้อยลงก็ให้ประสิทธิภาพต่ำ

ในทำนองเดียวกัน กรณีที่ใช้ปริมาตรของสารละลายกรดมาก (เป็นปริมาตรของสารละลายกรด 8%) ย่อมต้องย่อยสลายให้น้ำตาลได้มาก แต่เมื่อคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์แล้ว อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายกรด (มิลลิลิตร) : น้ำหนักกากต้นข้าวโพด (กรัม) ควรเป็น 8.1

เมื่อทดลองยืดเวลาในการแช่กากต้นข้าวโพดให้นานออกไป พบว่าควรใช้เวลาแช่นาน 3 ชั่วโมงจึงจะได้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด เนื่องจากการแช่นานกว่า 3 ชั่วโมง สารละลายกรดเข้มข้นจะซึมเข้าไปในกากต้นข้าวโพด เป็นเวลานานเกินไปจนเกิดการสลายน้ำตาลจากเซลลูโลสไปเป็นสารอื่น ส่วนการใช้เวลาแช่น้อยกว่า สารละลายกรดเข้มข้นยังซึมเข้าไปไม่ทั่วถึงจึงเกิดปฏิกิริยาได้ไม่เต็มที่

ในทำนองเดียวกันกับการยืดเวลาในการให้ความร้อน พบว่าควรใช้เวลาให้ความร้อนนาน 20 นาทีจะให้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาถึงด้านเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่า ยิ่งใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้นจะเป็นผลดี เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างราคาน้ำตาลที่ได้รับการต่อราคาไฟฟ้าที่ใช้จะมากกว่าเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานานออกไป แต่ทั้งนี้ย่อมขึ้นกับปริมาณของตัวอย่างกากต้นข้าวโพดที่ใช้ด้วย

เมื่อนำกากต้นข้าวโพดที่เหลือจากการสกัดน้ำตาลมาทดลองในสภาวะที่ให้ความร้อน 121 องศาเซลเซียส โดยการใช้สารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 80% โดยน้ำหนัก เมื่อนำกากต้นข้าวโพดมาแช่เป็นเวลานานเท่า ๆ กัน จะได้ปริมาณน้ำตาลดีกว่าเมื่อแช่กากต้นข้าวโพดในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 75 และ 85% เมื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายกรดเป็น 8% แล้วให้ความร้อนที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานเท่า ๆ กัน เมื่อคำนึงถึง

ด้านเศรษฐกิจแล้ว อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายกรด (มิลลิลิตร) : น้ำหนักกากต้นข้าวโพด (กรัม) ควรเป็น 6 : 1 ในการทดลองยืดเวลาในการแช่กากต้นข้าวโพดให้นานออกไปพบว่า ควรใช้เวลานาน 2 ชั่วโมง จึงจะได้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด และเมื่อทดลองยืดเวลาในการให้ความร้อนพบว่า การใช้เวลานาน 7 นาทีจะให้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเหตุผลดังกล่าวมาแล้วข้างต้นในการทดลองไฮโดรไลส์กากต้นข้าวโพดที่ 100 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบการไฮโดรไลส์กากต้นข้าวโพดที่ 121 องศาเซลเซียส กับการไฮโดรไลส์ที่ 100 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ให้ความเข้มข้นและปริมาณน้ำตาลมากที่สุด พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จะสามารถลดเวลาในการแช่ให้น้อยลงเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟุริคที่ความเข้มข้นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้กากต้นข้าวโพดพองตัวได้ง่ายเร็วกว่า สารละลายกรดสามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ดังนั้น จึงไม่ต้องการแช่กากต้นข้าวโพดเป็นเวลานานเท่ากับการไฮโดรไลส์ที่ความร้อนต่ำกว่า และพบว่าอัตราส่วนของปริมาตรของสารละลายกรดต่อน้ำหนักของกากต้นข้าวโพดก็ใช้ลดลงทำให้สามารถลดปริมาณการใช้กรดได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 121 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรด 8% เท่า ๆ กัน ทั้งนี้การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าย่อมย่อยสลายกากต้นข้าวโพดได้มากกว่า ทำให้กากต้นข้าวโพดมีขนาดเล็กลง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายกรดกับกากต้นข้าวโพดมีมากขึ้น จึงสามารถลดอัตราส่วนของปริมาตรสารละลายกรดต่อน้ำหนักกากต้นข้าวโพดลงได้ และพบว่าเมื่อไฮโดรไลส์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายกรดเท่ากับที่ไฮโดรไลส์ที่ 100 องศาเซลเซียส จะสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนลงได้ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงกว่าทำให้โมเลกุลของกรดมีพลังงานจลน์มากกว่า จึงเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า นอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลที่ได้รับ เมื่อใช้สภาวะที่ให้ความเข้มข้นของน้ำตาลมากที่สุดในการไฮโดรไลส์กากต้นข้าวโพดที่ 121 องศาเซลเซียส เป็น 2.1% ซึ่งมากกว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลที่ได้รับเมื่อใช้สภาวะที่ให้ความเข้มข้นของน้ำตาลมากที่สุดในการไฮโดรไลส์กากต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสได้ 1.4% ซึ่งหากคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์ จะเห็นได้ว่าการไฮโดรไลส์กากต้นข้าวโพด เมื่อใช้สภาวะตามอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ให้ผลดีกว่าเมื่อใช้สภาวะตามอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ได้ค่าราคาน้ำตาล/ราคากรดเป็น 3.04×10^{-4} และ 1.98×10^{-4} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ ง-20 ในภาคผนวก ง.

การผลิตเอทิลอัลกอฮอล์ด้วยสารละลายน้ำตาลจากต้นข้าวโพด

ระยะแรกได้ศึกษาการเจริญเติบโตของ S. cerevisiae ในสารละลายน้ำตาลของต้นข้าวโพดที่มีความเข้มข้นคิดเป็นปริมาณของแข็งรวมที่ละลายได้ 4, 8 และ 12 องศาบริกซ์ พบว่า ยีสต์จะเจริญในสารละลายที่มีความเข้มข้น 4 องศาบริกซ์ ได้ดีกว่าในสารละลายที่มีความเข้มข้น 8 และ 12 องศาบริกซ์ หลังจากใช้เวลาผ่านไป 12 ถึง 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เป็นเพราะในสารละลายที่มีความเข้มข้น 8 และ 12 องศาบริกซ์ มีปริมาณซัลเฟตอยู่สูงมากถึง 0.79% และ 1.1%

ในการหมักเพื่อให้ได้อัลกอฮอล์ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 4 และ 8 องศาบริกซ์เท่านั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวแล้วข้างต้น ในระยะเวลา 12 ชั่วโมงแรกได้ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 240 รอบ/นาที เพื่อให้ออกซิเจนแก่สารละลาย ซึ่งทำให้ได้จำนวนเซลเพิ่มขึ้นในสารละลายที่มีความเข้มข้น 4 องศาบริกซ์ ปริมาณอัลกอฮอล์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แล้วเพิ่มเร็วขึ้นในช่วงเวลา 24-36 ชั่วโมง แต่ที่เวลาหลัง 36 ชั่วโมงนั้นปริมาณอัลกอฮอล์เริ่มคงที่เพราะน้ำตาลที่มีอยู่เหลือน้อยลง คิดเป็นปริมาณการเปลี่ยนแปลงของเอทิลอัลกอฮอล์จากน้ำตาล (% conversion) ที่ 24 ชั่วโมง ได้ 86.14% ส่วนในสารละลายที่เข้มข้น 8 องศาบริกซ์ ช่วงเวลา 24-36 ชั่วโมง มีการเพิ่มปริมาณอัลกอฮอล์สูง แม้ช่วงเวลาหลัง 36 ชั่วโมงแล้ว ปริมาณอัลกอฮอล์ยังเพิ่มขึ้นแต่ก็มีอัตราการเพิ่มช้ากว่า คิดเป็นปริมาณการเปลี่ยนแปลงของเอทิลอัลกอฮอล์จากน้ำตาลที่ 24 และ 36 ชั่วโมง ได้ 88.15% และ 76.02% ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเอทิลอัลกอฮอล์จากน้ำตาลในสารละลายที่มีความเข้มข้น 8 องศาบริกซ์ สูงกว่า จึงควรใช้เป็นสารอาหารสำหรับผลิตเอทิลอัลกอฮอล์มากกว่า 4 องศาบริกซ์

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นน้ำตาลของสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลส์ชิ้นมวลต้นข้าวโพดด้วยสารละลายกรดซัลฟุริคในการทดลองนี้กับการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอ็นไซม์เซลลูแลส (cellulase) ของ Trichoderma viride (36) พบว่าเมื่อใช้ชิ้นมวลต้นข้าวโพดที่ลอดผ่านตระแกรงขนาด 10 เมช พรี-ไฮโดรไลส์ด้วยสารละลายกรดซัลฟุริค 4.4% อัตราส่วนของปริมาตรสารละลายกรด (มิลลิลิตร):น้ำหนักชิ้นมวลต้นข้าวโพด (กรัม) 10:1 ที่อุณหภูมิ 100 องศาแซลเซียส เวลา 50 นาที จากนั้นไฮโดรไลส์จากต้นข้าวโพดด้วยสารละลายกรดซัลฟุริคเข้มข้น 80% แช่กากเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเจือจางให้เป็นสารละลายกรด 8% อัตราส่วนสารละลายกรด 8% (มิลลิลิตร):น้ำหนักกากต้นข้าวโพด (กรัม) 6:1

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จะได้สารละลายน้ำตาลมีประมาณของแข็งรวมที่ละลายได้ 4 องศาบริกซ์ และมีปริมาณความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวส์ 2.94%

ส่วนการทดลองซึ่งย่อยเซลลูโลสด้วยเอ็นไซม์เซลลูแลส จาก Trichoderma viride นั้น พบว่าเมื่อใช้ชิ้นมวลต้นข้าวโพด ซึ่งขจัดลิกนินออกด้วยโดยต้นในกรดเปออะซิติก (peracetic acid) ที่ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกากต้นข้าวโพดมาย่อยด้วยเอ็นไซม์เซลลูแลส onozuka CUY มีความเข้มข้น 1% โดยอัตราส่วนเอ็นไซม์เซลลูแลส (มิลลิลิตร):น้ำหนักกากต้นข้าวโพด (กรัม) 9:1 โดยมีเซลลูแลส onozuka CUY 4,000 หน่วย/กรัมสารละลายอาหาร ซึ่งมีความเป็น pH 5.0 โดยใช้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จะได้ปริมาณความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวส์ 4.98%