บทที่ 5
อภิปรายและสรุปผล

การสลายแป้งทางสารเคมี

1. การย่อยด้วยกรด

จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ด้วยกรด 2 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 90, 95 และ 98 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ทั้งในแป้งมันสำปะหลังและมันเส้น จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อสิ้นสุดการย่อย ตัวอย่างกลายเป็นของเหลวใส สีน้ำตาลแดงอ่อน ๆ เนื่องจากกรดทำปฏิกิริยากับน้ำตาลที่เกิดขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ได้มีสีเข้มขึ้น (อุดมเกียรติ พรรธนประเทศ, 2539) และเมื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลพบว่ากรดซัลฟูริกสลายแป้งได้ดีกว่ากรดไฮโดรคลอริกเพราะกรดซัลฟูลริกมีความรุนแรงในการทำปฏิกิริยามีมากกว่า และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูง จะทำให้อัตราการสลายเป็นให้เป็นน้ำตาลมีสูงขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดและเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณน้ำตาลก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากในองค์ประกอบของแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน เมื่อได้รับความร้อนจะมีความหนืดสูง ทำให้การเคลื่อนที่ของกรดได้ไม่ดี ทำให้ย่อยแป้งได้น้อย ถ้าใช้ความเข้มข้นของกรดต่ำเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดสูงขึ้น การย่อยแป้งเพิ่มขึ้น จากการทดลองสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังและมันเส้นด้วยกรด คือ กรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ (Kim & Hamdy,1984 และอรพิน ภูมิภมร และประเสริฐ อธิวกุล, 2535)

การสลายแป้งทางชีวภาพ

1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังครั้งแรกโดยการใช้เอนไซม์เทอร์มามิล

จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 15 ไมโครลิตรที่ค่าความเป็นความกรด-ด่าง 3 ระดับ คือ 5.5, 6.0 และ 6.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ (90, 95 และ 98 องศาเซลเซียส) พบว่าของเหลวที่ผ่านการย่อยจะมีลักษณะ

ใสขึ้นและมีความหนืดลดลงเพราะแป้งถูกย่อยสลาย ซึ่งผลของอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างนั้นจะมีผลต่อโครงสร้างบริเวณเร่งของเอนไซม์ที่จะจับกับแป้ง ซึ่งเอนไซม์เทอร์มามิลจะทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิหนึ่ง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงมากเกินไป โครงสร้างบริเวณเร่งของเอนไซม์จะย่อยแป้งได้ต่ำลง อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 90 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเป็นความกรด-ด่าง 6. 5 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ สุคนธ์ชื่น ศรีงาม (2537) กล้าณรงค์ ศรีรอตและคณะ 2540 และเจริญศักดิ์ และคณะ (2546)

ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของเอนไซม์เทอร์มามิลในการย่อยสลายแป้งมันสำปะหลังและมันเส้นนั้นพบว่า ในการย่อยสลายแป้งมันมีค่า K_m เท่ากับ 0.51 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร V_{max} เท่ากับ 45.78 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที และในการย่อยสลายมันเส้นจลนศาสตร์ พบว่ามีค่า K_m เท่ากับ 0.31 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร V_{max} เท่ากับ 32.39 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นมีผลต่อการสลายแป้ง ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีความบริสุทธิ์มากกว่าจึงทำให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาในการสลายแป้งได้มากกว่าจึงให้ปริมาณน้ำตาลมากกว่า ขณะที่มันเส้นมีปริมาณแป้งน้อยกว่าและมีสิ่งเจือปนมากกว่าทำให้ย่อยแป้งได้น้อยกว่าทำให้ค่า Vmax ของแป้งมันสำปะหลังมีมากกว่า

2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังครั้งที่สุดท้ายด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส

จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 20 ไมโครลิตรที่ค่าความเป็นความกรด-ด่าง 3 ระดับ คือ 4.0, 4.5 และ 5.0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะของเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลัง คือ เป็นความกรด-ด่าง 4.5 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเอนไซม์กลูโคอะไมเลสนี้ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างนี้?เนื่องจากทำให้โครงสร้างบริเวณเร่งของเอนไซม์ที่จะจับกับน้ำตาลหรือโครงสร้างแป้งที่ยังย่อยไม่หมดได้สมบูรณ์มากที่สุดทำให้เอนไซม์กูลโคอะไมเลสจะทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิหนึ่งและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงมากเกินไป หรือค่าความเป็นกรด-ด่างต่างไปจากเดิมโครงสร้างบริเวณเร่งของเอนไซม์ย่จะจับกับน้ำตาลหรือโครงสร้างแป้งที่ยังย่อยไม่หมด ซึ่งจะทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์น้อยลงผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Sims and Munir (1992) และการทดลองของมันเส้นก็ให้ผลการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกัน

ส่วนจลนศาสตร์ของเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ในแป้งมันสำปะหลังและมันเส้นนั้น พบว่าในการย่อยสลายแป้งมันมีค่า K_m เท่ากับ 0.15 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร V_{max} เท่ากับ 213.78 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที และในการย่อยสลายมันเส้นจลนศาสตร์ พบว่ามีค่า K_m เท่ากับ 0.18 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร V_{max} เท่ากับ 202.12 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที ซึ่งมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นมีผลต่อการสลายแป้ง ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีความบริสุทธิ์มากกว่าจึงทำให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยาในการสลายแป้งได้มากกว่าจึงให้ปริมาณน้ำตาลมากกว่า ขณะที่มันเส้นมีปริมาณแป้งน้อยกว่าและมีสิ่งเจือปนมากกว่าทำให้ย่อยแป้งได้น้อยกว่าทำให้ค่า V_{max} ของแป้งมันสำปะหลังมีมากกว่า

การขยายขนาดการสลายแป้งมันสำปะหลังในปฏิกรณ์ชีวภาพขนาดความจุ 4 ลิตร

1. ศึกษาวิธีการและผลของการกวนผสม (mixing) ที่มีต่อการย่อยสลายแป้ง

จากศึกษาการสลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาตร 1.5 ลิตร ในปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วขนาดความจุ 4 ลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลที่ไม่มีการเจือจางปริมาณ 0.038 มิลลิลิตร (คิดจากความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการสลายที่สภาวะต่าง ๆ กันคือ

ถังที่ 1 แป้งแขวนลอยในน้ำทำให้สุกก่อนแล้วจึงย่อยด้วยเอนไซม์

ถังที่ 2 แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อน

ถังที่ 3 แป้งแขวนลอยในน้ำทำให้สุกก่อนแล้วย่อยด้วยเอนไซม์โดยกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที

ถังที่ 4 แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนแล้วกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที

ผลปรากฏว่า ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วที่มีการกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ทั้ง 2 ถัง (ถังที่ 3 และ ถังที่ 4) มีการสลายแป้งได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วที่ไม่การกวนด้วยใบพัด (ถังที่ 1 และ ถังที่ 2) เพราะเอนไซม์สามารถผสมกับโมเลกุลของแป้งได้อย่างทั่วถึงทำให้สลายแป้งได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วแป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนและมีการกวนด้วยใบพัด (ถังที่4) จะทำงานได้ดีที่สุด

2. ศึกษาการย่อสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล (โดยให้สัดส่วนปริมาณแป้ง : ปริมาณเอนไซม์คงที่)

ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีแป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนขณะเดียวกันกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที ความเป็นกรด-ด่าง 6.5

อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการสลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่า ถึงแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ยังมีการย่อยสลายแป้งได้ดี เพราะปริมาณเอนไซม์ที่ใช้มากขึ้นตามไปด้วยซึ่งเพียงพอต่อการสลายประกอบกับการกวนผสมส่งเสริมการย่อยสลายถึงแม้ความเข้มข้นของแป้งจะสูงก็ตาม แสดงว่าปริมาณเอนไซม์ที่ใช้มีความเหมาะสม

การขยายขนาดการสลายแป้งมันสำปะหลังในปฏิกรณ์ชีวภาพขนาดความจุ 10 ลิตร

โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ย่อยด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 0.5630 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เติมแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 30 พีพีเอ็ม ปริมาณ 1.625 มิลลิลิตร ทำการย่อยเป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ด้วยการลดค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 3.0 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มอล และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล เป็นเวลา 15-20 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส เพื่อการย่อยครั้งที่ 2 ด้วยการเติมเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) 2.5 มิลลิลิตร ทำการย่อยเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ขณะย่อยทั้งสองขั้นตอนทำการกวนผสมด้วยใบพัด Ekato Intermig ที่ความเร็ว 200, 300 และ 400 รอบ/นาที ในการย่อยทั้งสองขั้นตอนวิเคราะห์หาสภาวะการกวนผสม power input คุณสมบัติด้านรีโอโลยี และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายแป้ง ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบโดยพบว่า

เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการกวนผสม ค่าพลัง Power input ที่ใช้สำหรับการทำงานของปฏิกรณ์ชีวภาพต่อหน่วยน้ำหนักของเหลว จะเพิ่มขึ้นด้วย ระหว่างการกวนที่อัตราเร็ว 200, 300 และ 400 รอบ/นาที เนื่องจากสารละลายมีความหนืดที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่ค่อยสิ้นเปลืองพลังมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Chamsartra (2004) ที่รายงานว่า ใบพัด Ekato Intermig เป็นใบพัดที่มีประสิทธิภาพสูงให้การกวนผสมที่ดีมากและใช้พลังงานน้อยกว่าใบพัดชนิดต่าง ๆ

1. การย่อยแป้งมันสำปะหลังครั้งแรกด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Power input และ Re

ค่า Re ของการกวนผสมของการย่อยครั้งแรก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า Re ของสารที่อัตราการกวนผสมต่าง ๆ ในช่วงแรกที่เวลา 0.5 ชั่วโมงพบว่า สารละลายแป้งจะมีการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (transition) ($Re = 10^2 - 10^4$) เนื่องจากเป็นช่วงที่แป้งมีความหนืดสูง และเมื่อเวลาผ่านไป 1.5 ชั่วโมง ลักษณะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent) ($Re > 10^4$) เนื่องจากแป้งถูกย่อยบางส่วนมีผลทำให้ความหนืดลดลงขณะเดียวกันความหนืดลดลงจะมีผลทำให้การกวนผสม

ในปฏิกรณ์ดีขึ้น และจากการที่ความหนืดลดลงเนื่องจากเอนไซม์เข้าไปย่อยแป้งได้เกือบจะสมบูรณ์ ซึ่งที่อัตราเร็วรอบในการกวนผสมที่สูงจะให้ปริมาณน้ำตาลสูงกว่าเพราะภายในปฏิกรณ์ชีวภาพนั้นจะมีการผสมกันของแป้งกับเอนไซม์ได้ดีกว่า ดังนั้นความหนืดจะลดลงเพราะแป้งถูกเปลี่ยนโครงสร้างไป (Arbakariya et al., 1997)

1.2 ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ และค่า DE ที่ได้จากการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะค่อย ๆ สูงขึ้นสัมพันธ์กับเวลาและ เมื่อผ่านไป 3 ชั่วโมง อัตราการกวนผสมที่ความเร็วรอบที่ 400 รอบต่อนาทีจะให้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด คือ 38 มิลลิกรัม/มิลลิตร และมีค่า DE สูงสุด คือ 28 เมื่อเทียบกับการผสมที่อัตราเร็ว 200 และ 300 รอบต่อนาที ให้ปริมาณน้ำตาล 28 และ 32 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และค่า DE เท่ากับ 24 และ 26 ตามลำดับ (Arbakariya et al., 1997)

1.3 คุณสมบัติทางรีโอโลยี

ความสัมพันธ์ระหว่างของความหนืดกับอัตราแรงเฉือนพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดของสารจะลดลงเรื่อย ๆ โดยสังเกตได้จากตัวอย่างที่ 0.5 ชั่วโมงแรกของทุก ๆ อัตราความเร็วรอบของใบพัด ความหนืดจะสูงที่สุด (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที) จะแสดงให้เห็นว่าช่วงนี้การย่อยสลายของแป้งยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งตัวอย่างที่ 0.5 ชั่วโมงของทุกอัตราเร็วในการกวน กราฟแสดงความหนืด (viscosity curve) และกราฟความเครียด-อัตรแรงเฉือน (flow curve) แสดงคุณสมบัติของ ๆ เหลวที่มี ความซับซ้อนทาง รีโอโลยี (rheological complexity) คือ เมื่ออัตราแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดจะลดลง เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นลาดลงซึ่งแสดงคุณสมบัติของ shear thinning ซึ่งของเหลวนี้จัดอยู่ในพวก pseudoplastic fluid

หลังจาก 1 ชั่วโมงไปแล้ว ตัวอย่างจากทุก ๆ ความเร็วรอบในการกวน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที ความหนืดจะลดลงอย่างมาก ซึ่งความหนืดของทุก ๆ ตัวอย่างจะลดลงสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราเร็วในการกวนและเวลาในการย่อยสลาย เส้นกราฟแสดงความหนืดที่ได้ค่อนข้างจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย และกราฟความเครียด-อัตราแรงเฉือนแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงซึ่งเป็นคุณสมบัติของ ๆ เหลวในอุดมคติ (Newtonian fluid) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปเอนไซม์มีการทำงานนานขึ้นโดยเฉพาะที่ความเร็วรอบในการกวนสูง การย่อยสลายแป้งเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความหนืดของแป้งลดลง และยิ่งถ้าการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ค่าความหนืดจะคงที่ และผลจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยพบว่าให้ผลสัมพันธ์กันคือเมื่อความหนืดคงที่ปริมาณน้ำตาลที่ได้สูงสุดค่อนข้างคงที่ด้วย

2. การย่อยแป้งมันสำปะหลังครั้งสุดท้ายด้วยเอนไซม์กูลโคอะไมเลส

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง power input และ Re

พบว่าที่อัตราการกวนผสมที่ 200 รอบ/นาที จะมี การใช้พลังงานต่ำสุด และค่า Re ของของเหลวที่อัตราการกวนผสมทุกระดับมีค่าสูงกว่า 10^4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า Re มีค่าสูงที่ความเร็วรอบในการกวนสูงประกอบกับการลดลงของความหนืด ช่วงแรก ๆ ของการย่อยของเหลวจะมีค่าความหนืดสูง และเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดจะลดลงโดยที่ความหนืดอยู่ในช่วง 3.5-0.5 มิลลิปาสคาลนาที เนื่องจากเอนไซม์กูลอะไมเลสมีการย่อยโอลิโกแซคคาไรด์ ช่วงเวลาระหว่าง 8- 20 ชั่วโมง ความหนืดของสารละลายจะเริ่มคงที่เนื่องจากการย่อยสลายเริ่มจะสมบูรณ์แล้ว ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับค่า Re ที่คงที่

2.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และค่า DE

พบว่าจะสูงขึ้นอย่างเร็วมาก เพราะเอนไซม์จะเข้าไปตัดโครงสร้างของโอลิโกแซคคาไรด์ จากปลายด้านนอนรีดิวซ์ที่ตำแหน่ง แอลฟา (1-4), (1-3) และ (1-6) เข้าไปทีละหน่วย ซึ่งจะทำการย่อยโครงสร้างของโอลิโกแซคคาไรด์ต่อจากเอนไซม์ตัวแรกทำให้เกิดผลผลิตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในชั่วโมงแรก ๆ แล้วปริมาณน้ำตาลก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แล้วแสดงว่าการย่อยครั้งสุดท้ายเกือบจะสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นเมื่อวัดปริมาณน้ำตาลที่เวลา 20 ชั่วโมงปริมาณน้ำตาลจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าอัตราการกวนผสมที่เหมาะสม คือ ความเร็วใบพัด 300 รอบต่อนาที เพราะให้ปริมาณสูงที่สุด คือ 250 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรและค่า DE สูงสุด คือ 98.57 ซึ่งอธิบายได้ว่าการกวนผสมที่ต่ำเกินไปจะทำให้เอนไซม์เข้าจับกับโอลิโกแซคคาไรด์ได้ไม่ดี และถ้าให้การกวนผสมที่มากเกินไปใบพัดจะดึงเอาอากาศด้านบนของถังลงมาแทรกระหว่างโมเลกุลของเอนไซม์กับโอลิโกแซคคาไรด์ทำให้เกิดการผสมที่ไม่ดี ซึ่งผลปริมาณของน้ำตาลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของเจริญศักดิ์ และคณะ (2546) ว่า การย่อยสลายแป้งจากแป้งมันสำปะหลังในครั้งสุดท้ายนี้จะได้ค่า DE ประมาณ 96- 98 เมื่อผ่าน 20 ชั่วโมง

2.3 คุณสมบัติทางรีโอโลยี

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราแรงเฉือนพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดของตัวอย่างลดลงในช่วงอัตราแรงเฉือนต่ำ (น้อยกว่า 150 ต่อนาที) ความหนืดของตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามความต่างนี้สัมพันธ์ผกผันกับเวลาในการย่อยสลาย และอัตราเร็วในการกวนของใบพัด ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลพบว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากตัวอย่างต่าง ๆ สัมพันธ์ผกผันกับความหนืด ที่อัตราแรงเฉือนระหว่าง 150 - 300 ต่อนาที ตัวอย่างจากทุก ๆ อัตราเร็วในการกวนและทุกชั่วโมงของการย่อยพบว่าของเหลวแสดง คุณสมบัติของเหลวเป็น Newtonian fluid ที่มีความหนืดประมาณสองเท่าของน้ำ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำตาล

ที่ได้จากการย่อยสลายแป้งมีขนาดเล็ก แม้อัตราแรงเฉือนสูงขึ้นความหนืดของตัวอย่างก็ไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในทุก ๆ ตัวอย่าง สอดคล้องกับ (Arbakariya et al., 1997)

สรุปผลการศึกษา

1. สภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลัง และมันเส้นโดยการใช้กรด คือ กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส

2. สภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลัง และมันเส้นโดยการใช้เอนไซม์เทอร์มามิล คือ ค่าความเป็นกรด- ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

3. ค่าจลนศาสตร์ของการย่อยด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล จากการหาด้วยการพล็อตกราฟจลนศาสตร์ของการย่อยพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่า Km เท่ากับ 0.51 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร และมีค่า Vmax เท่ากับ 45.78 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที ในการย่อยสลายมันเส้นมีค่า Km เท่ากับ 0.31 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตรและมีค่า Vmax เท่ากับ 32.39 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที

4. สภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันและมันเส้นโดยการใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส คือ ค่าความเป็นกรด- ด่าง 4.5 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

5. ค่าจลนศาสตร์ของเอนไซม์กลูโคอะไมเลส จากการหาด้วยการพล็อตกราฟจลนศาสตร์ของการย่อยพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่า Km เท่ากับ 0.15 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตรและมีค่า Vmax เท่ากับ 213.78 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที ส่วนการย่อยสลายในมันเส้น Km เท่ากับ 0.18 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร Vmax เท่ากับ 202.12 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที

6. วิธีการเตรียมแป้ง และผลของการกวนผสมที่มีต่อการย่อยสลาย พบว่าถังที่ 4 แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนขณะเดียวกันกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ที่อัตราการกวนผสมที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาทีทำงานได้ดีที่สุด

7. จากการทดลองนี้ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังที่สามารถย่อยสลายด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล คือ แป้งมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์

8. การการสลายแป้งมันสำปะหลังในปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 10 ลิตร

8.1 เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการกวนผสม Power input ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

8.2 สภาวะที่เหมาะในการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์เทอมามิลในปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 10 ลิตร คือ ที่อีตราความเร็วรอบของใบพัด 400 รอบ/นาที ค่า $Re > 10^4$ การไหลของของเหลวเป็นสภาวะที่ปั่นป่วนปริมาณน้ำตาลที่ได้ เท่ากับ 38 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ค่า DE เท่ากับ 28

8.3 การย่อยครั้งสุดท้าย พบว่าทุกระดับที่อัตราการกวนสภาวะการไหลของของเหลวเป็นแบบปั่นป่วน ($Re > 10^4$) อัตราการกวนผสมที่เหมาะสมคือ 300 รอบ/นาที เวลา 20 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 253 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และได้ค่า DE เท่ากับ 98.5

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำมันเส้นมาทำการศึกษาต่อในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร เพื่อดูประสิทธิภาพในการย่อยสลายแป้งและพลังงานที่ใช้ในการย่อยสลายเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการสลายแป้งมัน
2. ควรทำการย่อขนาดและจำลองสภาวะจากโรงงานต้นแบบที่มีการสลายแป้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองนี้
3. ศึกษาการขยายขนาดจากสภาวะข้อที่ 2 เพื่อการย่อยแป้งในปริมาณมากขึ้น
4. ศึกษาวิธีการสลายแป้งในปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่อง