

ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังสดโดยใช้กรดเจือจางและเอนไซม์

The Feasibility Study of Reducing Sugar Production from Fresh Cassava Pulp Using Diluted Acid and Enzymatic Reactions

กำไล เลหาพัฒนาเลิศ* ศิริ สมบูรณ์ และวษุณย์ สัจจวีรวรรณ

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยรังสิต ถนนพหลโยธิน ตำบลหลักหก อำเภอเมือง
จังหวัดปทุมธานี 12000 E-mail: kamlai.l@rsu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังสดโดยมุ่งเน้นการใช้กรดความเข้มข้นต่ำที่สุดในการปรับสภาพเพื่อลดความหนืดของวัตถุดิบ การทดลองได้ศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นของเอนไซม์ และระยะเวลาการย่อยที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังสด จากการย่อยกากมันสำปะหลังสดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจางที่แปรผันความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 0.11, 0.17 และ 0.28 โมลาร์ ในสภาวะอุณหภูมิสูง พบว่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.11 โมลาร์ และระยะเวลาในการย่อย 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพกากมันสำปะหลังสด โดยปริมาณกากมันสำปะหลังที่ถูกย่อยได้คิดเป็นร้อยละ 35.9 ของน้ำหนักกากมันสำปะหลังเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงทำการย่อยไฮโดรไลสต่อด้วยเอนไซม์ α -อะไมเลสที่ความเข้มข้นและระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเท่ากับร้อยละ 0.2 และระยะเวลาในการย่อย 1.5 ชั่วโมง เป็นสภาวะการย่อยที่เหมาะสมที่สุด โดยมีผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับร้อยละ 62.1

คำสำคัญ: กากมันสำปะหลัง การย่อย การปรับสภาพด้วยกรดเจือจาง

Abstract

This research aimed to increase the reducing sugar productivity by using the lowest amount of diluted acid to reduce the viscosity of fresh cassava pulp during the pretreatment process. The results from the reactions of 3 diluted hydrochloric acid concentrations of 0.11, 0.17 and 0.28 M with cassava pulp at high temperature for the pretreatment process revealed that the optimum acid concentration and hydrolysis time were 0.11 M and 1 hour, respectively. The amount of hydrolyzed cassava pulp that caused the reduction of the solution viscosity was 35.9%. Subsequently, the hydrolysate was subjected to α -amylase with different concentrations and amylolysis times. The results showed that the suitable enzyme concentration for producing the highest amount of reducing sugar was 0.2% with the hydrolysis time of 1.5 hour, yielding 62.1 g reducing sugar per 100 g substrate.

Keywords: cassava pulp, hydrolysis, diluted acid pretreatment

1. บทนำ

กากมันสำปะหลังเป็นของเหลือทิ้งประเภทของแข็ง (solid waste) ที่ได้จากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยมีสัดส่วนเท่ากับร้อยละ 10-15 ของหัวมันสำปะหลังสดที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิต จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังพบว่าประกอบด้วยแป้งและเส้นใยปริมาณสูง (ร้อยละ 50-70 และ 20-30 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ) ซึ่งโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ด้วยกรดหรือเอนไซม์ (Rattanachomsri et al., 2009; Thongkratok et al., 2010) และน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มทางชีวภาพได้หลากหลาย เช่น เอทานอล เป็นต้น (Srinorakutara et al., 2006; Ubalua, 2007) ดังนั้นกากมันสำปะหลังจึงเป็นวัตถุดิบทางเลือกอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะมีราคาถูกแล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้ง และเป็นการแก้ปัญหาการจัดการกากมันสำปะหลังให้กับผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน

อย่างไรก็ตามการนำกากมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมยังไม่สามารถทำได้ เพราะมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากตัวกากมันสำปะหลังมีความหนืดสูงทำให้การกวนผสมทำได้ยาก นอกจากนี้แป้งที่เหลืออยู่ในกากมันสำปะหลังไม่ได้อยู่ในรูปเม็ดแป้งอิสระ แต่ถูกกักไว้ในโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส (Pandey et al., 2000; Sriroth et al., 2000; Rattana chomsri et al., 2009) ส่งผลให้การใช้เอนไซม์เพียงอย่างเดียวในการย่อยกากมันสำปะหลังมีผลได้ของน้ำตาลต่ำ ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ดังนั้นการปรับสภาพกากมันสำปะหลังก่อนนำไปย่อยด้วยเอนไซม์ (pretreatment) จึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะช่วยทำลายโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ทำให้มีแป้งละลายออกมามากขึ้น ความหนืด

ของกากมันสำปะหลังลดลง การกวนผสมทำได้ดีขึ้น และผลผลิตของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยกรดเจือจางในสภาวะอุณหภูมิสูงเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก (Zheng et al., 2009) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าการใช้กรดความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้เกิดสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์จำพวก Fufural ซึ่งทำให้เกิดปัญหาต่อเนื่องในขั้นตอนการหมักผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการเพิ่มผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตจากกากมันสำปะหลังสดโดยใช้กรดเจือจางในการปรับสภาพร่วมกับเอนไซม์ ซึ่งมุ่งเน้นการใช้กรดความเข้มข้นที่น้อยที่สุด เพื่อลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น โดยจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการใช้กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในอนาคตต่อไป

2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพกากมันสำปะหลังสดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจางในสภาวะอุณหภูมิสูง
2. ศึกษาความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและระยะเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดต่อผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 กากมันสำปะหลังสด (cassava pulp) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ช.ไชยวัฒน์ อุตสาหกรรม จำกัด จ.ชลบุรี

3.1.2 เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Liquezyme SC) ผลิตจากบริษัทโนโวไซม์ (Novozyme, Denmark) มีกิจกรรมเอนไซม์เท่ากับ 120 KNU-S/g

3.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

นำกากมันสำปะหลังไปอบแห้งที่ 50°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง ได้แก่ ไขมัน เถ้า ความชื้น เส้นใย โปรตีน และปริมาณแป้ง วิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC (1995) และวิธีเอนไซม์ (AACC, 1976) ตามลำดับ

3.3 การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง

นำกากมันสำปะหลังสด (ความชื้นร้อยละ 88.8) มาชั่งด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางความเข้มข้น 0.11, 0.17 และ 0.28 M โดยน้ำหนักของตัวอย่าง บ่มที่อุณหภูมิ 90°C แล้วเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆคือ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ชั่วโมง ทำการหยุดปฏิกิริยาโดยบ่มในอ่างน้ำแข็ง หลังจากนั้นปรับค่า pH ของตัวอย่างให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วปรับปริมาตรตัวอย่างเป็น 500 มล. ด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองตัวอย่างผ่านผ้าขาวบาง เก็บเฉพาะส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ตามวิธีของ Somogyi-Nelson (Somogyi, 1952) สำหรับกากที่เหลือบนผ้าขาวบางให้นำไปล้างด้วยน้ำกลั่นครั้งละ 100 มล. จำนวน 3 ครั้ง แล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ทำการชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาสัดส่วนของกากมันสำปะหลังที่ถูกย่อยได้ต่อไป

3.4 การย่อยกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดแล้วโดยใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

นำตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด มาทำการย่อย (hydrolysis) ด้วยเอนไซม์ α -อะไมเลส โดยทำการแปรผันระดับความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ 0.05, 0.1 และ 0.2% โดยน้ำหนักแห้งของกากมันสำปะหลังในสถานะที่เหมาะสม ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาในการย่อยเท่ากับ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ชั่วโมง จากนั้นนำมาหยุดปฏิกิริยาด้วย 0.4 mM HgCl_2 แล้วกรองตัวอย่าง

ด้วยผ้าขาวบาง นำของเหลวที่กรองได้มาปั่นเหวี่ยง เก็บเฉพาะส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดตามวิธีของ Somogyi-Nelson (Somogyi, 1952) และ Phenol-Sulfuric (Dubois et al., 1956) ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

จากผลการทดลองพบว่ากากมันสำปะหลังประกอบด้วยโปรตีน, ไขมัน, แป้ง, เส้นใยหยาบ และเถ้า ร้อยละ 1.4, 0.4, 60.3, 29.9 และ 1.7 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) โดยผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีรายงานมาก่อน (Sriroth et al., 2000; Chotineeranan et al., 2004; Khempaka et al., 2009) ซึ่งจากการที่กากมันสำปะหลังมีปริมาณของแป้งและเส้นใยสูงจึงเหมาะที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบทางเลือกในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพต่อไป

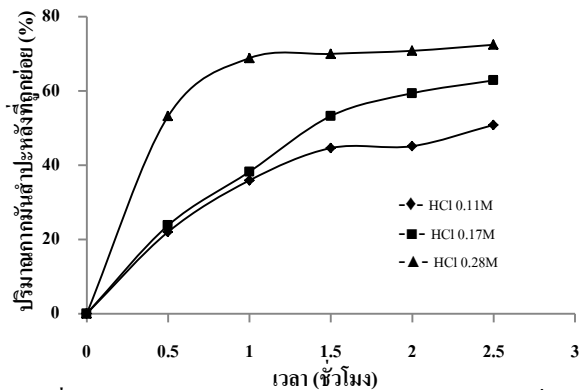
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังอบแห้ง

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ (โดยน้ำหนักแห้ง)
ความชื้น	7.8±0.2
โปรตีน	1.4±0.0
ไขมัน	0.4±0.0
แป้ง	60.3±1.5
เส้นใยหยาบ	29.9±2.6
เถ้า	1.7±0.1

หมายเหตุ ตัวเลขในตารางคือ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2 ผลของความเข้มข้นของกรดเกลือเจือจางต่อการปรับสภาพกากมันสำปะหลังสด จากการทดลองพบว่าปริมาณของกากมันสดที่ถูกย่อยได้ด้วยกรดเกลือแปรผัน

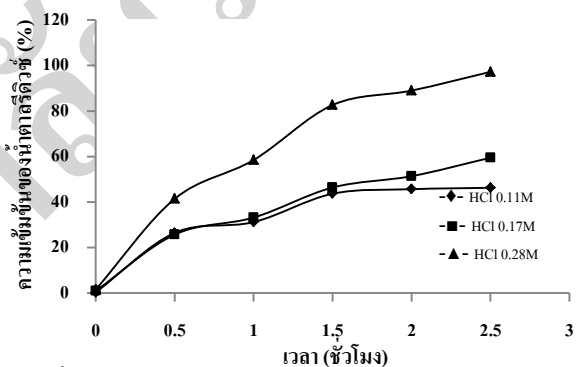
ตามความเข้มข้นของกรดเกลือและระยะเวลาในการย่อย (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากมันสำปะหลังที่ถูกย่อยและระยะเวลาในการย่อยด้วยกรดเกลือเนื่องจากความเข้มข้นแตกต่างกัน

เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นปริมาณกากมันสำปะหลังที่ถูกย่อยได้จะเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการย่อย 2.5 ชั่วโมง ปริมาณกากมันสำปะหลังที่ถูกย่อยได้มีค่าร้อยละ 50.9, 62.9 และ 72.5 ที่ความเข้มข้นของกรด 0.11, 0.17 และ 0.28 M ตามลำดับ เป็นที่สังเกตว่าเมื่อทำการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยกรดที่มีความเข้มข้น 0.28 M ในระยะแรกมีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วทำให้กราฟมีความชันที่สูง แต่หลังจากที่เพิ่มระยะเวลาในการย่อยมากกว่า 1 ชั่วโมงพบว่าความชันของกราฟเริ่มมีค่าคงที่ แสดงว่าเกิดการย่อยได้น้อยหรืออาจไม่เกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของกากมันสำปะหลังส่วนที่เหลือยังคงมีความเป็นผลึกอยู่สูงทำให้การย่อยสลายด้วยกรด ซึ่งบ่งชี้ว่าในช่วงแรกกรดได้เข้าทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบภายในกากมันสำปะหลังในส่วนที่ย่อยได้ง่าย เมื่อระยะเวลาผ่านไปเหลือแต่องค์ประกอบที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงซึ่งกรดไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่อได้ จึงทำให้ปริมาณของกากมันที่ถูกย่อยมีค่าคงที่ สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่น้อยกว่า 0.11M พบว่าความหนืดของตัวอย่างยังคงไม่เปลี่ยนแปลง จึงไม่นำมารายงาน

จากรูปที่ 2 แสดงผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดพบว่า ที่ความเข้มข้นของกรดเกลือสูงจะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าการใช้กรดที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งกรดจะไปทำการสลายพันธะภายในโมเลกุลของโพลีเมอร์ ทำให้มีขนาดเล็กลง (Chatakanonda et al., 2011) และได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น โดยกราฟจะมีความชันสูงขึ้นในระยะแรก หลังจากนั้นปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและคงที่สำหรับความเข้มข้นของกรด 0.11 และ 0.17 M ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดที่สูง (0.28M) ยังคงได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้และระยะเวลาในการย่อยด้วยกรดเกลือเนื่องจากความเข้มข้นแตกต่างกัน

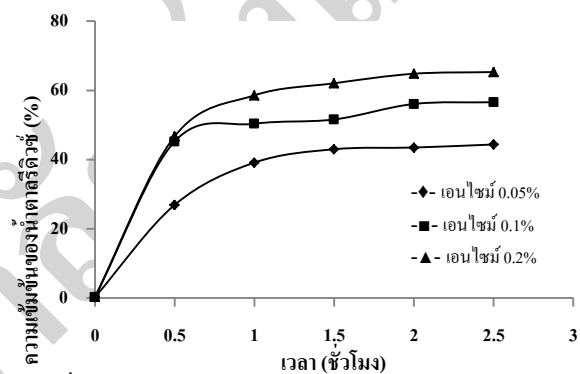
ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อย่อยกากมันด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.11, 0.17 และ 0.28 M ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับร้อยละ 46.2, 59.5 และ 97.2 ที่ระยะเวลาในการย่อย 2.5 ชม. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้กรดความเข้มข้นสูงมีผลต่อการเกิดสารจำพวก furfural และ hydroxymethyl furfural (HMF) นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาปริมาณของเกลือสูงในระบบหลังจากการปรับค่าความเป็นกรด่างในขั้นตอนการย่อยโดยใช้เอนไซม์ต่อไป ซึ่งสารประกอบที่เป็นผลพลอยได้ดังกล่าวเป็นสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่จะต้องใช้ในกระบวนการหมักผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ (Zhu et al., 2012)

ดังนั้นการใช้ความเข้มข้นของกรดน้อยที่สุดที่ระยะเวลาสั้นที่สุดในการปรับสภาพกากมันสด จะเป็นการลดช่วยลดการเกิดสารประกอบที่ไม่ต้องการดังกล่าว นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดระยะเวลาและพลังงานในการปรับสภาพอีกด้วย โดยจากการทดลองพบว่าการใช้กรดความเข้มข้น 0.11 M ที่ระยะเวลาในการย่อย 1 ชม. ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ไม่แตกต่างจากการใช้กรดความเข้มข้น 0.17 M ที่ระยะเวลาเดียวกันมากนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้กรดเข้มข้น 0.11 M ระยะเวลาในการย่อย 1 ชม. ในการปรับสภาพกากมันสำปะหลัง ซึ่งเพียงพอที่จะในการลดความหนืดของกากมันสำปะหลังสด และเพิ่มประสิทธิภาพการกวนผสมเมื่อทำการย่อยด้วยเอนไซม์ในขั้นตอนต่อไป

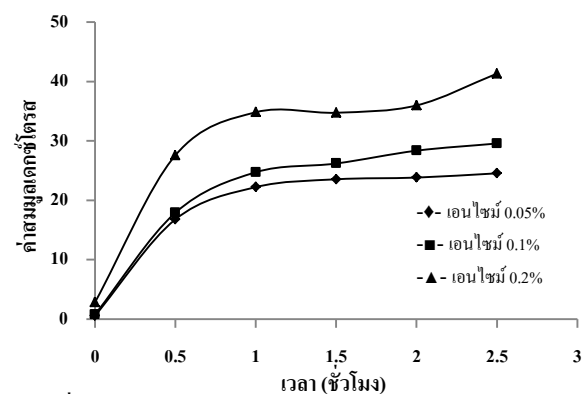
4.3 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสต่อปัสต์ต่อผลได้น้ำตาลรีดิวซ์และค่าสมมูลเดกซ์โตรส

กากมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดแล้วถูกนำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์ α -amylase พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตามความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้ เนื่องจากเอนไซม์ไปทำการย่อยสลายโมเลกุลของเดกซ์ตรินที่ได้จากขั้นตอน 3.3 ให้มีขนาดเล็กลง และได้น้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้น โดยปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ความเข้มข้น 0.05, 0.1 และ 0.2% มีค่าเท่ากับ 44.3, 56.6 และ 65.3% ของกากมันสำปะหลังเริ่มต้น ที่ระยะเวลาในการย่อย 2.5 ชม. ตามลำดับ (รูปที่ 3) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสมมูลเดกซ์โตรส (DE) ที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงในช่วงแรกของการย่อย แต่เมื่อระยะเวลาในการย่อยพบว่าค่าเพิ่มขึ้นของค่า DE ลดลง และไม่เพิ่มขึ้นในที่สุด โดยค่า DE ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ α -อะไมเลสความเข้มข้น 0.2% มีค่าสูงกว่าที่ความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.1% และ 0.05% เนื่องจากค่าสมมูลเดกซ์โตรสเป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ระดับของการย่อย โดยคำนวณจากสัดส่วนของน้ำตาลรีดิวซ์เทียบกับปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในระบบ ซึ่งจาก

รูปที่ 4 สังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาในการย่อยมากกว่า 1 ชั่วโมง ค่า DE มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการที่เอนไซม์สามารถย่อยซีสเตรตได้ช้าลง ทำให้การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลรีดิวซ์น้อยลงตามไปด้วย จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์คือ 0.1% และระยะเวลาที่ใช้ในการย่อย 1 ชม. โดยจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 50.4% ของน้ำหนักกากมันสำปะหลังเริ่มต้น



รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในการย่อยไฮโดรไลส



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและระยะเวลาต่อค่าสมมูลเดกซ์โตรสของไฮโดรไลส

5. สรุปผลการทดลอง

องค์ประกอบหลักของกากมันสำปะหลังเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรต แสดงว่ากากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ โดยต้องผ่านการปรับสภาพเสียก่อนด้วย

กรดเจี๊จาง ซึ่งพบว่าความหนืดของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยกรดเกลือเจี๊จางในสภาวะอุณหภูมิสูงมีค่าลดลง นอกจากนี้การใช้กรดยังเป็นการช่วยเปิดโครงสร้างลิกโนโซลลูโลสของกากมันสำปะหลังให้เอนไซม์ย่อยแบ่งทำงานได้ดีขึ้น และได้ผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- AACC. (1976). Approved method of American Association of Cereal Chemists. St. Paul Minnesota: AACC.
- AOAC. (1995). Official methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. 16th edn. Washington DC: AOAC.
- Chotineeranat S, Pradistsuwana C, Siritheerasas P, Tantratian S. (2004). Reducing sugar production from cassava pulp using enzymes and ultra-filtration I: Enzymatic hydrolysis. J Sci Res Chula Univ 29(2):119-128.
- Chatakanonda P, Wansuksri R, Sriroth K. (2011). Impact of Annealing on Susceptibility to Acid Hydrolysis and Physico-Chemical Properties of Cassava Starch. Kasetsart J. (Nat. Sci.) 45:284-294.
- Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal Chem 28(3): 350-356.
- Khempaka S, Molee W, Guillaume M. (2009). Dried cassava pulp as an alternative feedstuff for broilers: Effect on growth performance, carcass traits, digestive organs, and nutrient digestibility. J Appl Poult Res 18(3):487-493.
- Pandey A, Soccol CR, Nigam P, Soccol VT, Vanderberghe LPS, Mohan R. (2000). Biotechnological potential of agro-industrial residue. II: cassava bagasse. Bioresour Technol 74(1):81-87.
- Rattanachomsri U, Tanapongpipat S, Eurwilaichitr L, Champreda V. (2009). Simultaneous non-thermal saccharification of cassava pulp by multi-enzyme activity and ethanol fermentation by *Candida tropicalis*. J Biosci Bioeng 107(5):488-493.
- Srinorakutara T, Kaewvimol L, Saengow L. (2006). Approach of cassava waste pretreatments for fuel ethanol production in Thailand. J Sci Res Chula Uni 31(1):77-84.
- Sriroth K, Chollakup R, Chotineeranat S, Piyachomkwan K, Oates CG. (2000). Processing of cassava waste for improved bio mass utilization. Bioresour Technol 71(1):63-69.
- Somogyi M. (1952). Note on sugar determination. J Biol Chem 195:19-23.
- Thongkratok R, Khempaka S, Molee W. (2010). Protein enrichment of cassava pulp using microorganisms fermentation techniques for use as an alternative animal feedstuff. J Anim Vet Adv 22(9):2859-2862.
- Ubalua AO. (2007). Cassava wastes: treatment options and value addition alternatives. Afr J Biotechnol 6(18):2065-2073.
- Zheng Y, Pan Z, Zhang R. (2009). Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production. Int J Agric & Biol Eng 2(3):51-68.
- Zhu M, Li P, Gong X, Wang J. (2012). A comparison of the production of ethanol between simultaneous saccharification and fermentation and separate hydrolysis and fermentation using untreated cassava pulp and enzyme cocktail. Biosci Biotechnol Biochem 76(4):671-678.