บทที่ 4

ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัย แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าองค์ประกอบหลักของกากมันสำปะหลังคือ คาร์โบไฮเดรท มีปริมาณ 67.46 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ สุนีย์ โชตินีรนาท (2539) ที่พบว่า กากมันสำปะหลังมีคาร์โบไฮเดรทเป็นองค์ประกอบประมาณ 66.22 เปอร์เซ็นต์ และงานวิจัยของ Budiatman และ Lonsane (1987) ที่ได้รายงานว่า กากมันสำปะหลังมีแป้งเป็นองค์ประกอบประมาณ 50-63 เปอร์เซ็นต์

จากผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถคาดได้ว่ากากมันสำปะหลังมี คาร์โบไฮเดรท คิดเป็น 48.63 เปอร์เซ็นต์ของแป้งที่ผลิตได้จากหัวมันสำปะหลัง (การคำนวณดังภาคผนวก ค) ซึ่งมีความน่าสนใจในการนำมาแปรรูปให้มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากขึ้น โดยใช้เป็นสารตั้งต้นที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และมีปริมาณมาก สำหรับการผลิตน้ำตาลกลูโคสที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น อาหาร ยา แอลกอฮอล์ และผงชูรส เป็นต้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในงานวิจัย
(วิเคราะห์โดย สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความชื้น	11.63 ± 0.12
โปรตีน	1.85 ± 0.29
ไขมัน	4.18 ± 0.30
ไฟเบอร์	11.58 ± 0.42
เถ้า	3.30 ± 0.04
คาร์โบไฮเดรท	67.46
รวม	100

4.2 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

ในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลสร่วมกับแอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนสนั้น เอนไซม์แต่ละชนิดมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยแตกต่างกัน จึงทำการทดลองหาอุณภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยกากมันสำปะหลังของเอนไซม์แต่ละชนิด เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อย หากนำเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิดมาทำงานร่วมกัน

4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยจาก 40 เป็น 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่าเป็น 26.53 และ 27.36 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 3 และรูปที่ 8) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยเป็น 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ลดลงเป็น 25.56 กรัม/ลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คิดเป็นความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง 6.58 เปอร์เซ็นต์

การที่อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ของเอนไซม์นั้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ที่โมเลกุลของเอนไซม์และสับสเทรต ถ้าโมเลกุลของเอนไซม์มีพลังงานมากเกินไป โครงสร้างตติยภูมิจะเสียหาย มีผลให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติ และสูญเสียแอคติวิตีได้ (ปราณี อ่านเปรื่อง, 2543)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 หรือ 50 องศาเซลเซียส เป็น 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของเอนไซม์มีพลังงานมากเกินไป จนทำให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติและสูญเสียแอคติวิตีได้

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลส คือ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ก็แสดงแนวโน้มว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อย คือ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวมีแนวโน้มที่สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้สูงที่สุด ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ สุนีย์ โชตินีรนาท (2539) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลสที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* อยู่ระหว่างอุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส

I19511186

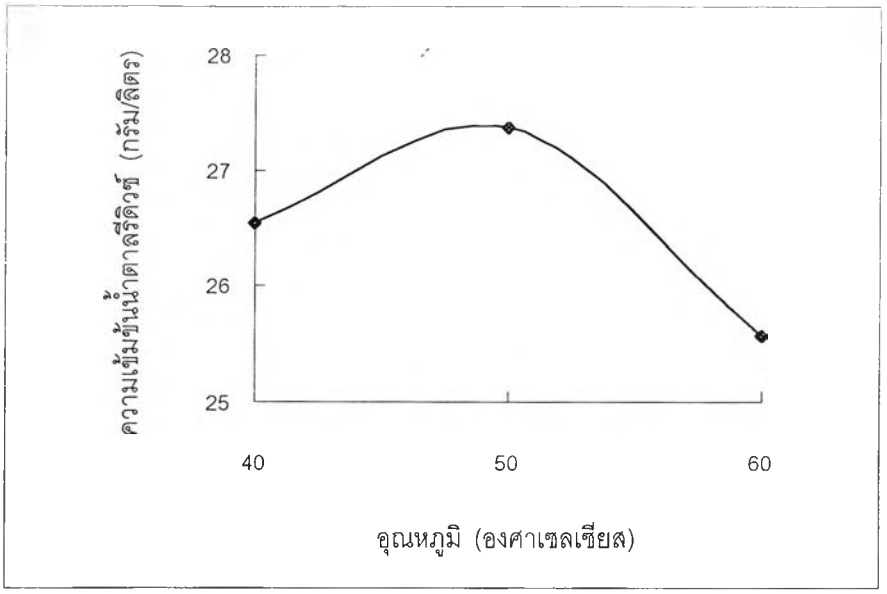
ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ (กรัม/ลิตร)			
	กลูโคอะไมเลส	แอลฟาอะไมเลส	เซลลูเลส	เพกทิเนส
40	$26.53^{ab} \pm 0.13$	$6.29^{b} \pm 0.39$	$3.05^{ab} \pm 0.10$	$2.86^{b} \pm 0.16$
50	$27.36^{a} \pm 0.51$	$7.22^{a} \pm 0.31$	$3.31^{a} \pm 0.09$	$4.26^{a} \pm 0.11$
60	$25.56^{bc} \pm 0.93$	$7.48^{a} \pm 0.21$	$2.92^{bc} \pm 0.19$	$3.92^{a} \pm 0.43$
70	ND	$4.31^{c} \pm 0.18$	ND	ND

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ND ไม่มีข้อมูล

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
ความเป็นกรดด่าง 5
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลส

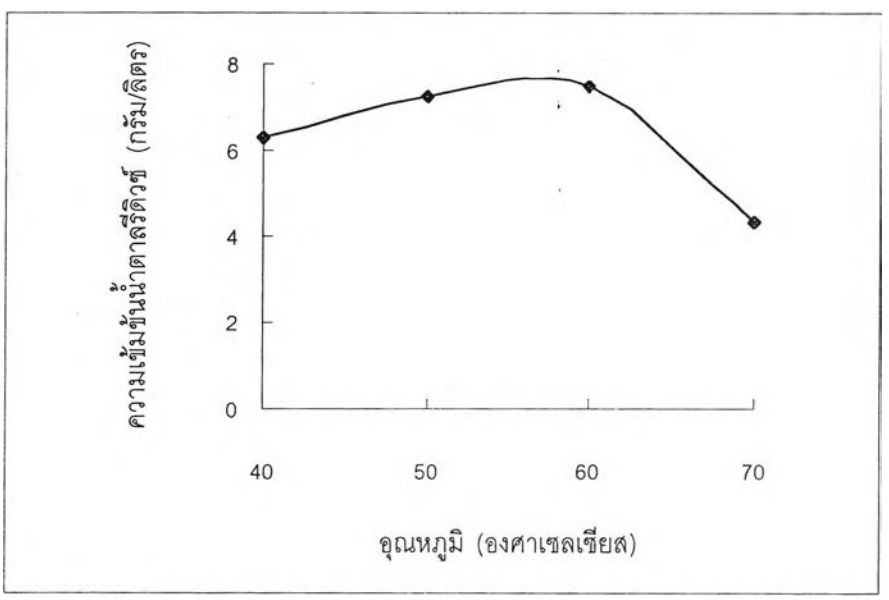
ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
กลูโคอะไมเลส 48.6 AGU
ความเป็นกรดด่าง 5
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วแอลฟาอะไมเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยแอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 และรูปที่ 9 คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยจาก 40 เป็น 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 6.29 เป็น 7.22 และ 7.48 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียสนั้น ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยจาก 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 18.92 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยเป็น 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ ลดลงเป็น 4.31 กรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการย่อยที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าลดลงจากการย่อยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 42.38 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแอลฟาอะไมเลส ระหว่างอุณหภูมิช่วง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เอนไซม์และสับสเทรตมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น มีการชนกันต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ลดลง เนื่องจากโมเลกุลของเอนไซม์มีพลังงานมากเกินไป จึงเสียสภาพธรรมชาติ

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแอลฟาอะไมเลส คือ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีแนวโน้มที่สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้สูงที่สุด โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมเช่นเดียวกับที่ได้จากงานวิจัยของ สุนีย์ โชตินีรนาท (2539) ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแอลฟาอะไมเลสที่ผลิตจาก *Bacillus subtilis* คือ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส



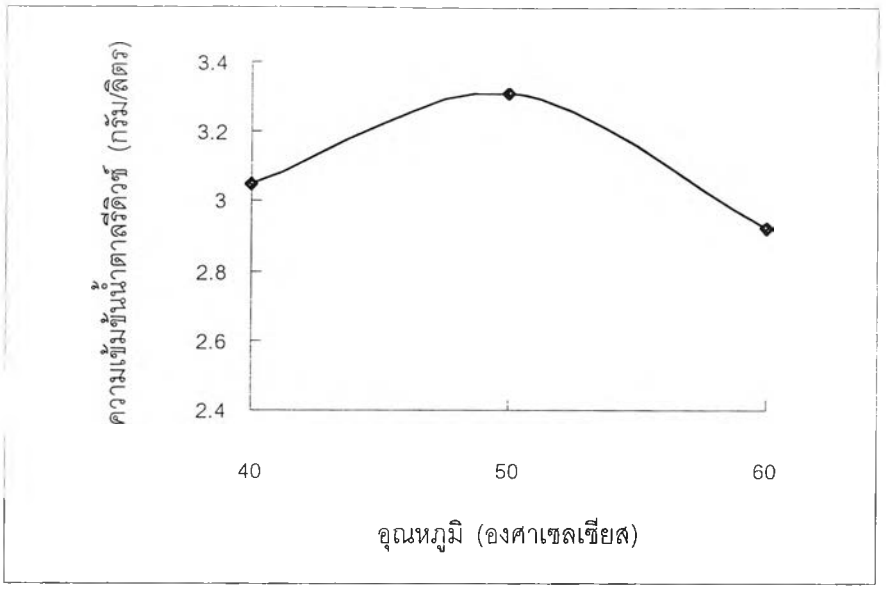
รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU
ความเป็นกรดด่าง 5
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง

4.2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเซลลูเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยเซลลูเลส 300 NCU ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยจาก 40 เป็น 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่า 3.05 และ 3.31 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 10 และเมื่ออุณหภูมิในการย่อยเพิ่มเป็น 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตลดลงเป็น 2.92 กรัม/ลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คิดเป็นความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง 11.78 เปอร์เซ็นต์ โดยความสามารถในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงมีเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 4.2.1 และ 4.2.2

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเซลลูเลส คือ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ก็แสดงแนวโน้มว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยคือ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้สูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Haska และ Ohta (1993) ที่ได้รายงานว่า เซลลูเลสจากเชื้อ *Thrichoderma reesei* สามารถย่อยกระดาษกรองได้ดีที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และงานวิจัยของ Lee และ Kim (1993) ซึ่งได้ทำการย่อยเซลลูโลสด้วยเซลลูเลสที่ผลิตจากเชื้อ *Thrichoderma virde* ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

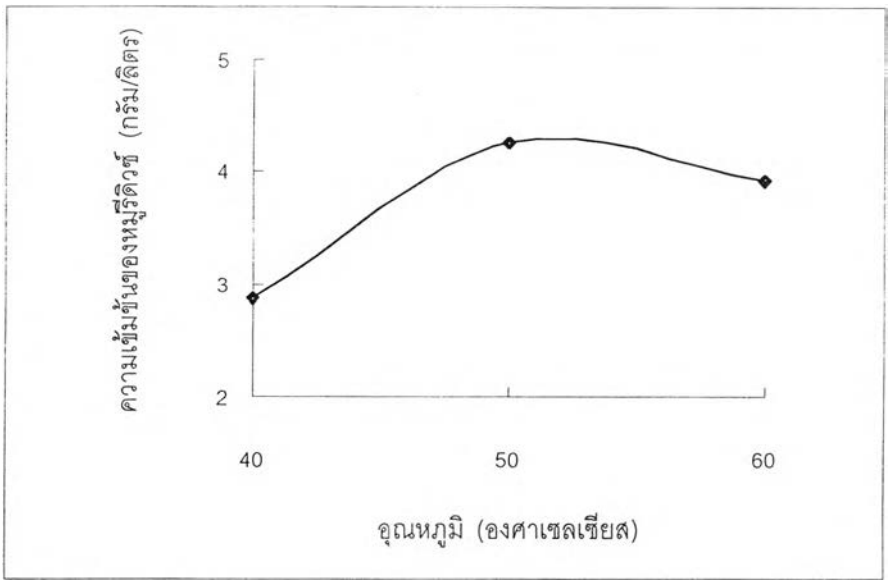


รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
เซลลูเลส 300 NCU
ความเป็นกรดด่าง 5
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง

4.2.4 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเพกทิเนส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยเพกทิเนส 1,300 PG ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 และรูปที่ 11 โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยจาก 40 เป็น 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของหมู่รีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 2.86 เป็น 4.86 กรัม/ลิตร ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คิดเป็นความเข้มข้นของหมู่รีดิวซ์เพิ่มขึ้น 69.93 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิในการย่อยเพิ่มเป็น 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของหมู่รีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่า 3.92 กรัม/ลิตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการย่อยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 ผลของอุณหภูมิต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เพกทิเนส

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
เพกทิเนส 1,300 PG
ความเป็นกรดด่าง 5
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเพกทิเนส คือ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวมีแนวโน้มที่สามารถผลิตหมู่รีดิวซ์ได้สูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการทดลองด้วยเพกทิเนสที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* เช่นเดียวกัน ได้แก่ งานวิจัยของ อรุณี เพียรทวีรัชต์ และ ปราณี อ่านเปรื่อง (2536) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยกล้วยหอมด้วยเพกทิเนส เพื่อผลิตน้ำกล้วยหอมโดยการย่อยร่วมกับเซลลูเลส และงานวิจัยของประนอม พรชัยประสิทธิ์ (2540) ในการผลิตเนคต้าฟักทองโดยใช้เพกทิเนส พบว่า อุณหภูมิ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เพกทิเนสสามารถทำงานได้ดี และงานวิจัยของ Sreenath, Frey และ Radola (1984) ซึ่งได้ทำการย่อยแครอทด้วยเพกทิเนสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยย่อยร่วมกับเซลลูเลส

4.2.5 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสม

จากผลการทดลองข้อ 4.2.1 ถึง 4.2.4 พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ถ้าจะนำเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิด คือ กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนส มาทำงานร่วมกันในการย่อยกากมันสำปะหลัง คือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าแอลฟาอะไมเลสจะสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการย่อยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมทั้ง 4 ชนิด ที่จะได้ทำการทดลองต่อไป จึงย่อยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

4.3 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

ในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมระหว่าง กลูโคอะไมเลสร่วมกับแอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนสนั้น เอนไซม์แต่ละชนิดมีค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการย่อยแตกต่างกัน จึงทำการทดลองหาค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการย่อยกากมันสำปะหลังของเอนไซม์แต่ละชนิด เพื่อหาค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการย่อยหากนำเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิดมาทำงานร่วมกัน

4.3.1 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 25.51 เป็น 27.28 กรัม/ลิตร เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในการย่อย จาก 4 เป็น 5 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 12 โดยคิดเป็นความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น 6.94 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อค่าความเป็นกรดด่างเพิ่มขึ้นเป็น 6 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่า 26.89 กรัม/ลิตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะเห็นว่าการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่าง เนื่องจากค่าความเป็นกรดด่างมีผลต่อการแตกตัวของอิออนที่อยู่ในบริเวณเร่ง (active site) ของเอนไซม์ ดังนั้นเมื่อค่าความเป็นกรดด่างเปลี่ยนไป ก็จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนโครงรูปสามมิติซึ่งจะมีผลไปสู่การเบี่ยงเบนในด้านการจับกับสับสเทรต หรือการเร่งปฏิกริยาของเอนไซม์ (ปราณี อ่านเปรื่อง, 2543)

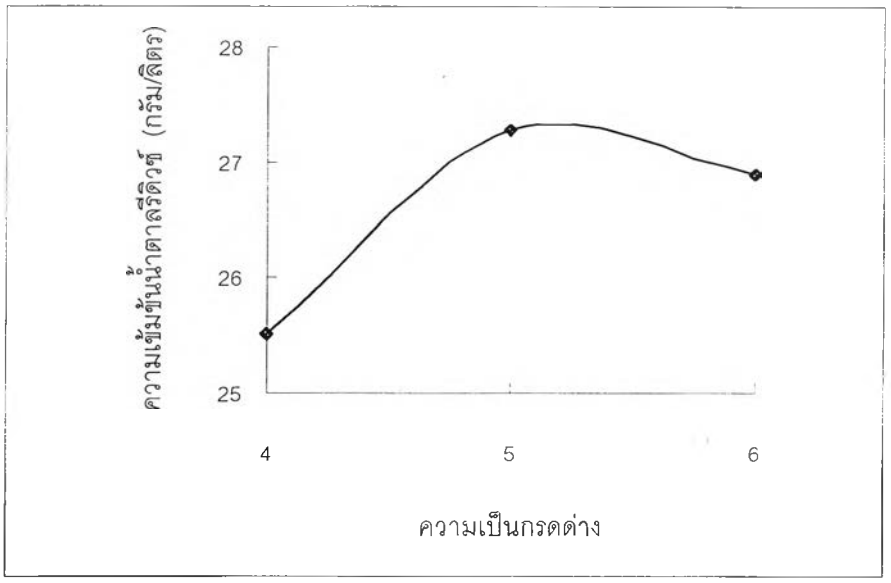
ตารางที่ 4 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

ความเป็นกรดด่าง	ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ (กรัม/ลิตร)			
	กลูโคอะไมเลส	แอลฟาอะไมเลส	เซลลูเลส	เพกทิเนส
4	$25.51^{b} \pm 0.40$	$0.06^{d} \pm 0.05$	$2.87^{b} \pm 0.11$	$3.53^{b} \pm 0.06$
5	$27.28^{a} \pm 0.34$	$7.40^{c} \pm 0.15$	$3.35^{a} \pm 0.06$	$4.02^{a} \pm 0.11$
6	$26.89^{a} \pm 0.32$	$8.81^{a} \pm 0.05$	$2.82^{b} \pm 0.23$	$3.28^{c} \pm 0.08$
7	ND	$8.32^{b} \pm 0.22$	ND	ND

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ND ไม่มีข้อมูล

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 12 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลส

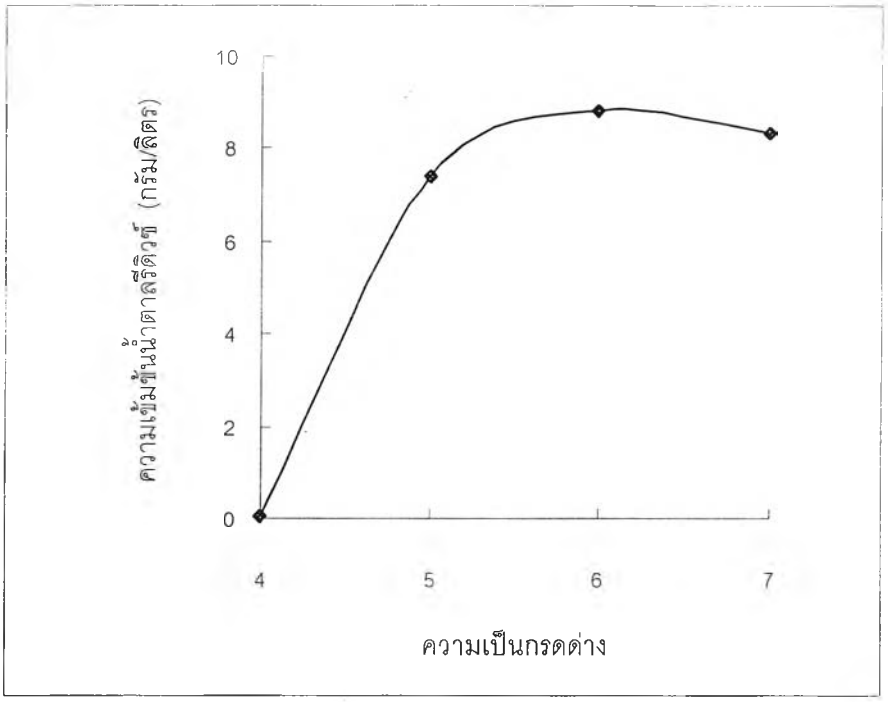
ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	5	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	1	ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า กลูโคอะไมเลสย่อยกากมันสำปะหลังได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เนื่องจากมีแนวโน้มที่สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้สูงที่สุด ใกล้เคียงกับงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการทดลองด้วยกลูโคอะไมเลสที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* เช่นเดียวกัน ได้แก่ งานวิจัยของ Lages และ Tannenbaum (1978) ซึ่งทำการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลสที่ค่าความเป็นกรดด่าง 4.8 ถึง 5 หลังจากนั้น Fujii และ Kawamura (1984) ได้ศึกษาการย่อยแป้งด้วยกลูโคอะไมเลส ซึ่งทำการย่อยที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5.25 โดยย่อยร่วมกับแอลฟาอะไมเลส รวมทั้งงานวิจัยของ Franco, Preto และ Ciacco (1992) ได้ทำการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยกลูโคอะไมเลสที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5.2 โดยย่อยร่วมกับแอลฟาอะไมเลส และงานวิจัยของ Nebesny, Pierzgalski และ Brzezinski (1996) ซึ่งได้ทำการย่อยแป้งมันฝรั่งที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 โดยย่อยร่วมกับแอลฟาอะไมเลส

4.3.2 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแอลฟาอะไมเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยแอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองดังตารางที่ 4 และรูปที่ 13 คือ เมื่อค่าความเป็นกรดด่างในการย่อยเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 5 และ 6 ทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 7.40 และ 8.81 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจากที่ความเป็นกรดด่าง 5 คิดเป็น 19.65 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อค่าความเป็นกรดด่างเพิ่มขึ้นเป็น 7 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ลดลงเป็น 8.32 กรัม/ลิตร มีค่าต่ำกว่าการย่อยที่ค่าความเป็นกรดด่าง 6 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คิดเป็นความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง 5.56 เปอร์เซ็นต์ โดยความสามารถในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงมีเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 4.3.1

จากผลการทดลองพบว่า แอลฟาอะไมเลสย่อยกากมันสำปะหลังได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่าง 6 เนื่องจากสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้สูงที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ สุนีย์ โชตินีรนาท (2539) ซึ่งพบว่า ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแอลฟาอะไมเลสที่ผลิตจาก *Bacillus subtilis* คือ ความเป็นกรดด่าง 6



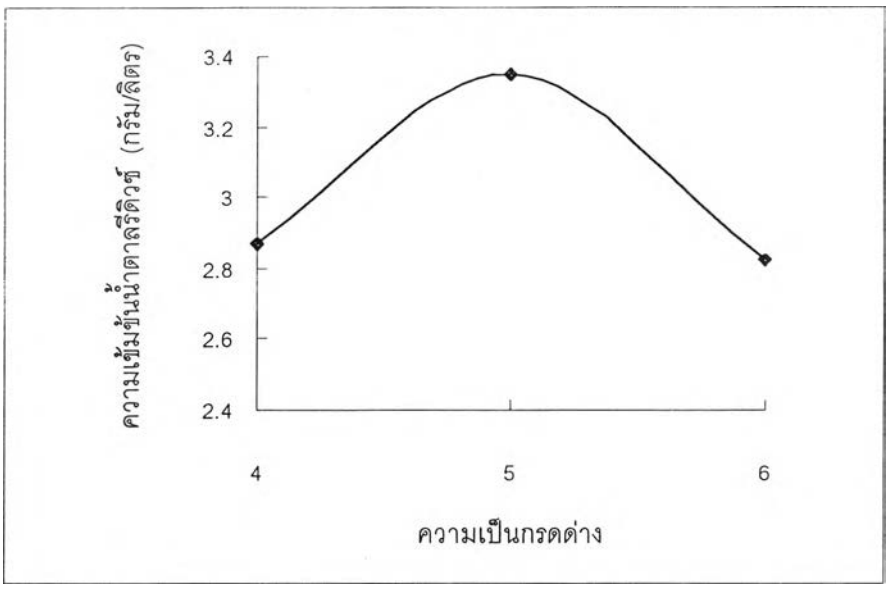
รูปที่ 13 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยแอลฟาอะไมเลส

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	5	กรัม
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	1	ชั่วโมง

4.3.3 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเซลลูเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยเซลลูเลส 300 NCU ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองดังตารางที่ 4 และรูปที่ 14 คือ เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างจาก 4 เป็น 5 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นจาก 2.87 เป็น 3.35 กรัม/ลิตร และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างเป็น 6 ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ลดลงเป็น 2.82 กรัม/ลิตร ซึ่งความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 มีค่าสูงที่สุดโดยมีค่าสูงกว่าที่ความเป็นกรดด่าง 4 และ 6 เป็น 16.72 และ 15.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากผลการทดลองพบว่าเซลลูเลสย่อยกากมันสำปะหลังได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Haska และ

Ohta (1993) ที่ได้รายงานว่า เซลลูเลสจาก *Thrichoderma reesei* สามารถย่อยกระดาษกรองได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่าง 4.5-5 และงานวิจัยของ Lee และ Kim (1993) ซึ่งได้ทำการย่อยเซลลูโลสด้วยเซลลูเลสที่ผลิตจากเชื้อ *Thrichoderma virde* ที่ความเป็นกรดด่าง 5



รูปที่ 14 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเซลลูเลส

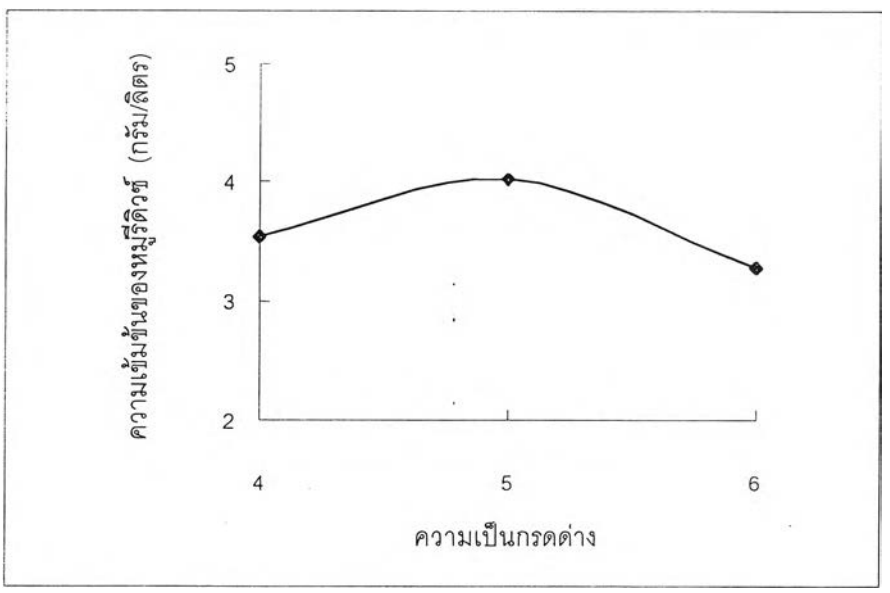
ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
เซลลูเลส 300 NCU
อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง

4.3.4 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเพกทิเนส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ด้วยเพกทิเนส 1,300 PG ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองดังตารางที่ 4 และรูปที่ 15 คือ เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างจาก 4 เป็น 5 ความเข้มข้นของหมู่รีดิวซ์ที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นจาก 3.53 เป็น 4.02 กรัม/ลิตร และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างเป็น 6 ความเข้มข้นของหมู่รีดิวซ์ที่ผลิตได้ลดลงเป็น 3.28 กรัม/ลิตร ซึ่งความเข้มข้นของหมู่รีดิวซ์ที่ผลิตได้ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 มีค่าสูงที่สุด

โดยมีค่าสูงกว่าที่ความเป็นกรดด่าง 4 และ 6 เป็น 13.88 และ 22.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการทดลองพบว่าเพกทิเนสย่อยกากมันสำปะหลังได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Stratilova, Capka และ Benkova (1987) ซึ่งกล่าวไว้ว่า ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์เพกทิเนสที่ผลิตจาก *Aspergillus* sp. คือ ค่าความเป็นกรดด่าง 4.8



รูปที่ 15 ผลของความเป็นกรดด่างต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเพกทิเนส

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 5 กรัม
เพกทิเนส 1,300 PG
อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
เขย่า 120 รอบ/นาที
เวลา 1 ชั่วโมง

4.3.5 ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสม

จากผลการทดลองข้อ 4.3.1 ถึง 4.3.4 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมที่สุด ถ้าจะนำเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิด คือ กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนสมาทำงานร่วมกันในการย่อยกากมันสำปะหลัง คือ ความเป็นกรดด่าง 5 ถึงแม้ว่าแอลฟาอะไมเลสจะ

สามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ค่าความเป็นกรดด่าง 6 แต่ก็ยังสามารถทำงานได้ค่อนข้างดีที่ค่าความเป็นกรดดาง 5 และที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5 นี้เหมาะสมต่อการทำงานของกลูโคอะไมเลสซึ่งมีความสำคัญในการย่อยกากมันสำปะหลังให้ได้น้ำตาลกลูโคสรวมทั้งเหมาะสมต่อการทำงานของเซลลูเลสและเพกทิเนสด้วย

4.4 การย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสม

จากงานวิจัยของ สุนีย์ โชตินีรนาท (2539) ได้พบว่า การย่อยกากมันสำปะหลังโดยใช้แอลฟาอะไมเลสผสมกลูโคอะไมเลสและเซลลูเลส สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าการใช้แอลฟาอะไมเลสผสมกลูโคอะไมเลส

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาต่อจากงานวิจัยของสุนีย์ โชตินีรนาท โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างเซลลูเลสต่อเอนไซม์ผสมของกลูโคอะไมเลสกับแอลฟาอะไมเลส รวมทั้งการนำเพกทิเนสมาร่วมในการย่อยเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

4.4.1 ผลของปริมาณเซลลูเลสในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลสร่วมกับ แอลฟาอะไมเลสและเซลลูเลส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU ร่วมกับแอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU และแปรปริมาณของเซลลูเลสที่ระดับต่าง ๆ ผลการทดลองดังตารางที่ 5 และรูปที่ 16 คือ การย่อยด้วยเอนไซม์ 2 ชนิด คือ กลูโคอะไมเลสร่วมกับแอลฟาอะไมเลสโดยปราศจากเซลลูเลสจะผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้น้อยที่สุด แต่เมื่อใช้เซลลูเลสร่วมกับกลูโคอะไมเลสและแอลฟาอะไมเลสในการย่อยจะสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูเลสเป็น 37.5 และ 75 NCU พบว่าสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูเลสเป็น 75 NCU ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์เพียง 2 ชนิด คือ กลูโคอะไมเลส และแอลฟาอะไมเลส 12.94 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับผลการทดลองของ สุนีย์ โชตินีรนาท คือ การเพิ่มเซลลูเลสลงไปในการย่อยกากมันสำปะหลัง สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ปริมาณมากกว่าการใช้เอนไซม์เพียง 2 ชนิด คือ แอลฟาอะไมเลส และกลูโคอะไมเลส เนื่องจากเซลลูเลสจะช่วยทำให้แป้งถูกปลดปล่อยออกจากการเกาะกุมของลิกโนเซลลูโลส ทำให้มีแป้งอยู่ในรูปอิสระมากขึ้น สามารถจับกับอะไมเลสได้สะดวกขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสเป็น

112.5 และ 150 NCU ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่าไม่แตกต่างไปจากการย่อยที่ปริมาณของเซลลูเลสเป็น 75 NCU ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

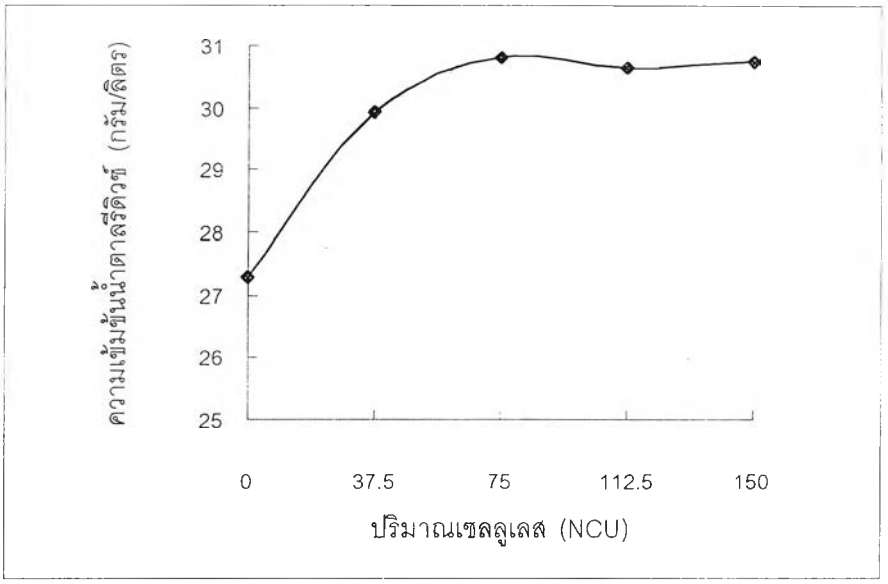
จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า ปริมาณของเซลลูเลสที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกับกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU และแอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU คือ 75 NCU

ตารางที่ 5 ผลของปริมาณเซลลูเลสต่อการย่อยกากมันสำปะหลังร่วมกับกลูโคอะไมเลส และแอลฟาอะไมเลส

ปริมาณเซลลูเลส (NCU)	ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร)
0	$27.28^{c} \pm 0.28$
37.5	$29.92^{b} \pm 0.01$
75	$30.81^{a} \pm 0.16$
112.5	$30.65^{a} \pm 0.37$
150	$30.74^{a} \pm 0.23$

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	5	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	1	ชั่วโมง



รูปที่ 16 ผลของปริมาณเซลลูเลสต่อการย่อยกากมันสำปะหลังร่วมกับกลูโคอะไมเลสและ แอลฟาอะไมเลส

ที่ภาวะ :

กากมันสำปะหลัง	5	กรัม
กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
เขย่า	120	รอบ/นาที
เวลา	1	ชั่วโมง

4.4.2 ผลของปริมาณเพกทิเนสในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลสร่วมกับแอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนส

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 5 กรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU และเซลลูเลส 75 NCU โดยแปรปริมาณของเพกทิเนสที่ระดับต่าง ๆ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 17 คือ การย่อยด้วยเอนไซม์ผสม 3 ชนิด คือ กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลสที่ปราศจากเพกทิเนส ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้น้อยที่สุด แต่เมื่อใช้

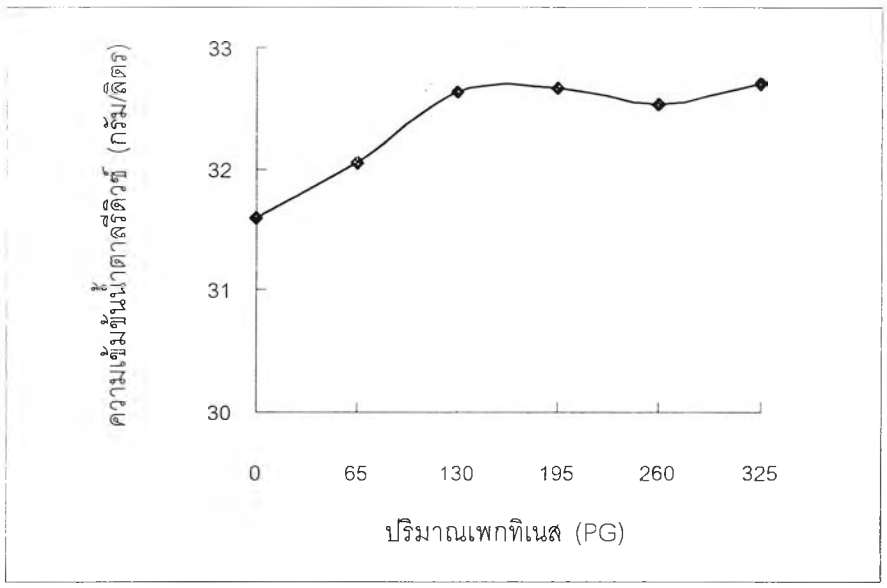
ตารางที่ 6 ผลของปริมาณเพกทิเนสต่อการย่อยกากมันสำปะหลังร่วมกับกลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลส

ปริมาณเพกทิเนส (PG)	ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร)
0	$31.59^{c} \pm 0.21$
65	$32.05^{b} \pm 0.04$
130	$32.63^{a} \pm 0.21$
195	$32.66^{a} \pm 0.36$
260	$32.53^{a} \pm 0.18$
325	$32.70^{a} \pm 0.28$

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	5	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	เซลลูเลส	75	NCU
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	1	ชั่วโมง

เพกทิเนสร่วมกับกลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลสในการย่อยสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเพกทิเนสเป็น 65 และ 130 PG พบว่าสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อเพิ่มปริมาณเพกทิเนสเป็น 195, 260 และ 325 PG ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จะมีค่าไม่แตกต่างไปจากการย่อยที่ปริมาณของเพกทิเนสเป็น 130 PG ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งการที่เพกทิเนสช่วยให้สามารถ



รูปที่ 17 ผลของปริมาณเพกทิเนสต่อการย่อยกากมันสำปะหลังร่วมกับกลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลส

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	5	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	เซลลูเลส	75	NCU
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	1	ชั่วโมง

ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารประกอบเพกติน ในโครงสร้างของผนังเซลล์พืชจะอยู่ในลักษณะที่จับกับเส้นใยของเซลลูโลส ดังนั้นการใช้เพกทิเนสร่วมกับเซลลูเลสในการทำลายผนังเซลล์จะช่วยให้สามารถย่อยเซลล์พืชได้ดีขึ้น ทำให้แป้งถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปอิสระมากขึ้น หลังจากนั้นแอลฟาอะไมเลสจะย่อยโมเลกุลของแป้งอย่างสุ่ม ทำให้มีปลาย non-reducing มากขึ้น เป็นการเพิ่มสับสเทรตให้แก่กลูโคอะไมเลส ซึ่งจะเข้าตัดพันธะที่ปลาย non-reducing มีผลให้สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sreenath, Frey และ Radola (1984) ซึ่งได้ทำการย่อยแครอทโดยใช้เซลลูเลสและเพกทิเนส พบว่า การใช้เซลลูเลสร่วมกับเพกทิเนสในการย่อยจะช่วยเสริมการสลายเซลล์พืชได้ดีกว่าการใช้เอนไซม์ชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว

และจากงานวิจัยของ Padmanabhan และ Lonsane (1992) พบว่า การใช้เพกทิเนสและเซลลูเลสช่วยในการสกัดแป้งจากมันสำปะหลัง ทำให้สามารถสกัดแป้งได้เพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า ปริมาณเพกทิเนสที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกับกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU และเซลลูเลส 75 NCU คือ 130 PG

4.5 <u>อัตราส่วนของเอนไซม์ผสม (กลูโคสอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนส) ต่อกากมันสำปะหลัง</u>

จากสัดส่วนของเอนไซม์ที่เหมาะสมตามการทดลองข้างต้น ได้ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเอนไซม์ผสมดังกล่าวต่อกากมันสำปะหลังโดยทำการย่อยกากมันสำปะหลังที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU ร่วมกับ แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU เซลลูเลส 75 NCU และเพกทิเนส 130 PG ผลการทดลองดังตารางที่ 7 และรูปที่ 18 คือ ช่วงเริ่มต้นของการย่อยในทุกๆ ค่าความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จะสูงความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์จึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แล้วเข้าสู่ค่าคงที่ในที่สุด เนื่องจากปริมาณกากมันสำปะหลังลดลง จึงทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ลดลงด้วย ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์จึงมีค่าคงที่เมื่อทำการย่อยต่อไปเรื่อย ๆ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังจาก 10 เป็น 30 50 และ 80 กรัม/ลิตร อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นจะเพิ่มขึ้น ในลักษณะ first order kinetics คือ อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังเป็น 100 และ 120 กรัม/ลิตร อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ดังแสดงไว้ในรูปที่ 19 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นของการย่อยกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 80 กรัม/ลิตร

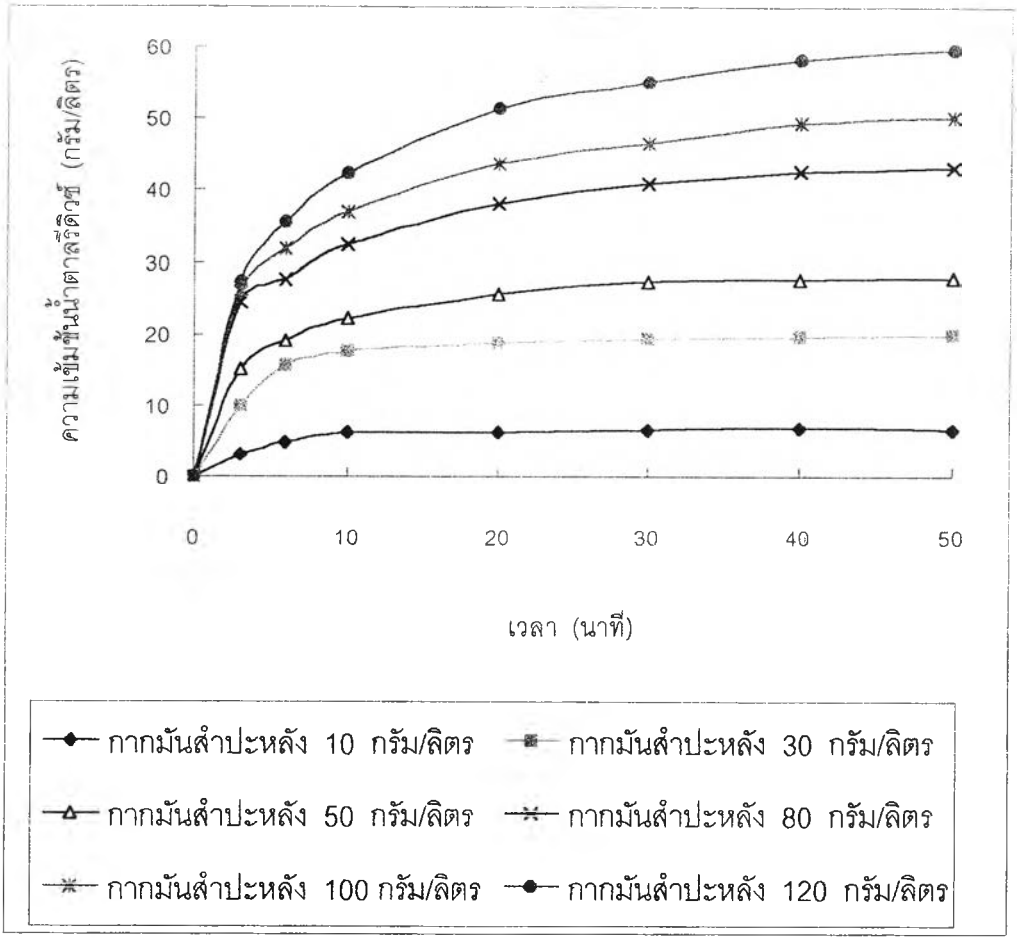
จากผลการทดลองแสดงว่า เอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 48.6 AGU ร่วมกับแอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU เซลลูเลส 75 NCU และเพกทิเนส 130 PG จะทำปฏิกริยาพอดีกับกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 80 กรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยอัตราเริ่มต้น 8.15 กรัม/ลิตร.นาที (การคำนวณดังภาคผนวก ค)

ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้และอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ (กรัม/ลิตร)							อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น (กรัม/ลิตร.นาที)
	3 นาที	6 นาที	10 นาที	20 นาที	30 นาที	40 นาที	50 นาที	
10	3.01	4.97	6.14	6.29	6.44	6.92	6.64	$1.00^{d} \pm 0.02$
30	9.90	15.70	17.58	18.79	19.21	19.75	19.93	$3.03^{c} \pm 0.17$
50	15.04	18.91	22.25	25.53	27.23	27.64	27.78	$5.01^{b} \pm 0.54$
80	24.46	27.66	32.30	38.12	40.90	42.68	43.13	$8.15^{a} \pm 0.62$
100	25.96	31.94	36.95	43.85	46.77	49.44	50.22	$8.65^{a} \pm 1.68$
120	27.31	35.52	42.33	51.46	55.10	58.25	59.64	$9.10^{a} \pm 1.50$

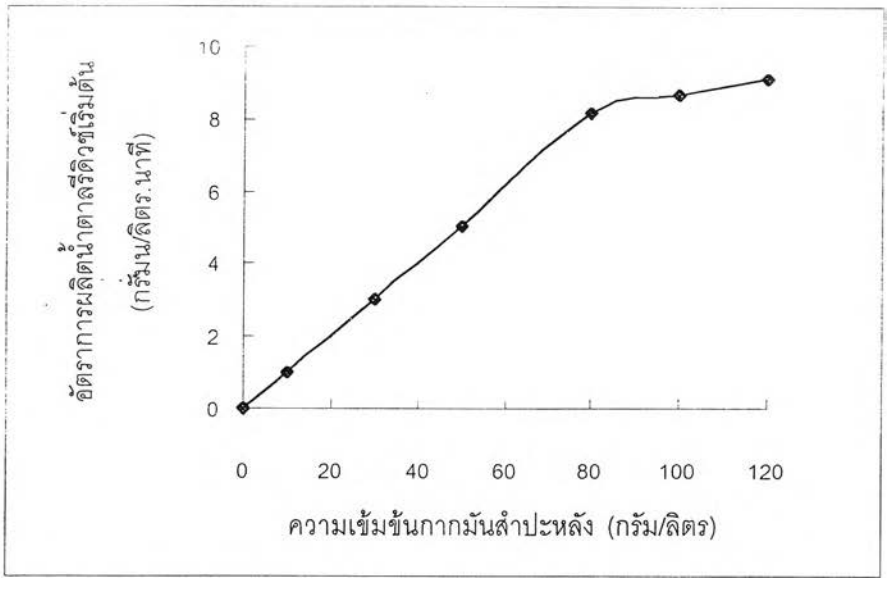
a, b, c, d ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ที่ภาวะ :	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	เซลลูเลส	75	NCU
	เพกทิเนส	130	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	1	ชั่วโมง



รูปที่ 18 ผลของความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้

ที่ภาวะ :	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	เซลลูเลส	75	NCU
	เพกทิเนส	130	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่า	120	รอบ/นาที



รูปที่ 19 ผลของความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังต่ออัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

ที่ภาวะ :	กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
	เซลลูเลส	75	NCU
	เพกทิเนส	130	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่า	120	รอบ/นาที
	เวลา	3	นาที

4.6 <u>ศึกษาเปรียบเทียบการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสม</u>

เมื่อทำการย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 8 กรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยการย่อยด้วยเอนไซม์ผสมแบบต่าง ๆ ซึ่งปริมาณเอนไซม์แต่ละชนิดที่ใช้ในการย่อย คือ กลูโคอะไมเลส 48.6 AGU แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU เซลลูเลส 75 NCU และเพกทิเนส 130 PG แล้ววิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยวิธี HPLC ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ พบว่า การย่อยด้วยเอนไซม์ผสม 4 ชนิด ได้แก่ กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนส ทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าการย่อยด้วย เอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลส และมีค่าสูง

กว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเพกทิเนส ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 8 และรูปที่ 20 ซึ่งมีประสิทธิภาพการย่อยกากมันสำปะหลัง เท่ากับ 64.37 59.77 และ 59.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (การคำนวณดังภาคผนวก ค.) โดยในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมทั้ง 4 ชนิด เซลลูเลสและเพกทิเนสจะร่วมกันทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ แล้วทำให้แป้งถูกปลดปล่อยออกมาและทำปฏิกริยากับแอลฟาอะไมเลสและกลูโคอะไมเลสได้สะดวกขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ได้มีค่ามากกว่าการใช้เซลลูเลส หรือเพกทิเนสชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียวในการสลายผนังเซลล์พืช

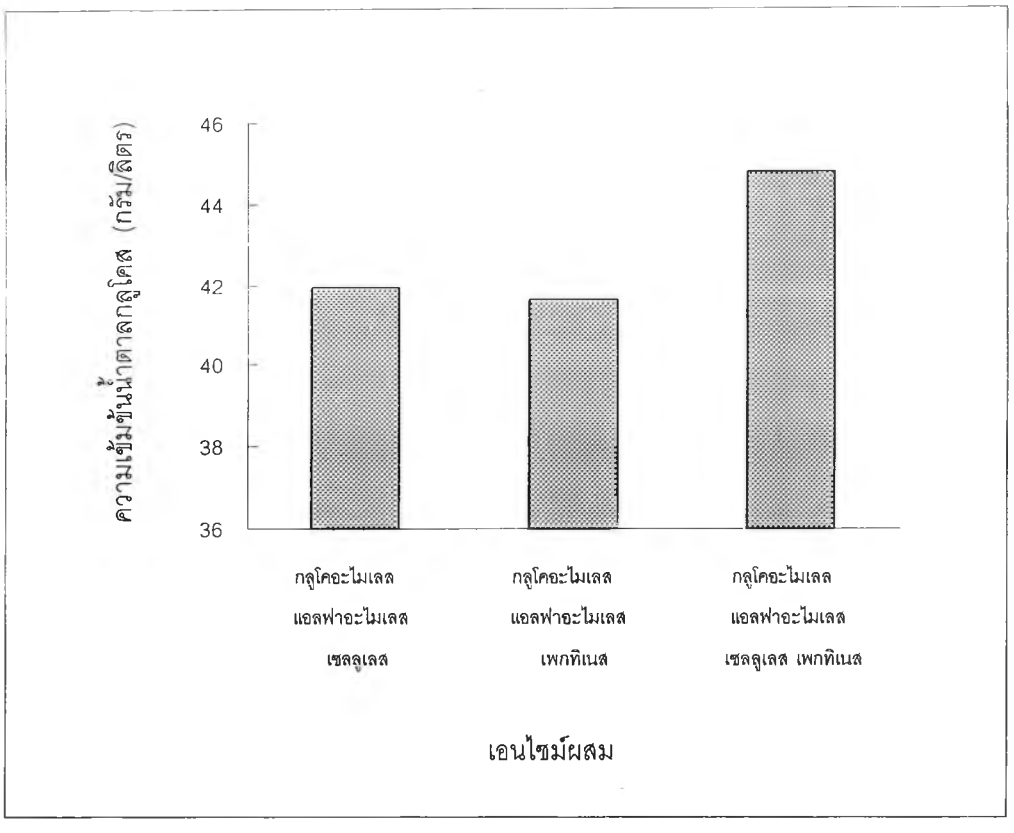
ตารางที่ 8 ผลของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้

เอนไซม์ผสม	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (กรัม/ลิตร)
1. กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลส	$41.91^{b} \pm 0.32$
2. กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเพกทิเนส	$41.64^{b} \pm 0.54$
3. กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพกทิเนส	$44.81^{a} \pm 1.93$

a, b ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ; ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

ที่ภาวะ :

กากมันสำปะหลัง	8	กรัม
กลูโคอะไมเลส	48.6	AGU
แอลฟาอะไมเลส	0.6	KNU
เซลลูเลส	75	NCU
เพกทิเนส	130	PG
อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
เขย่า	120	รอบ/นาที
เวลา	1	ชั่วโมง



รูปที่ 20 ผลของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสมต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้

ที่ภาวะ : กากมันสำปะหลัง 8 กรัม

เอนไซม์ผสมแบบต่าง ๆ

1. กลูโคอะไมเลส 48.6 AGU แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU และ เซลลูเลส 75 NCU
2. กลูโคอะไมเลส 48.6 AGU แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU และ เพกทิเนส 130 PG
3. กลูโคอะไมเลส 48.6 AGU แอลฟาอะไมเลส 0.6 KNU เซลลูเลส 75 NCU และ เพกทิเนส 130 PG

อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ค่าความเป็นกรดด่าง 5

เขย่า 120 รอบ/นาที

เวลา 1 ชั่วโมง

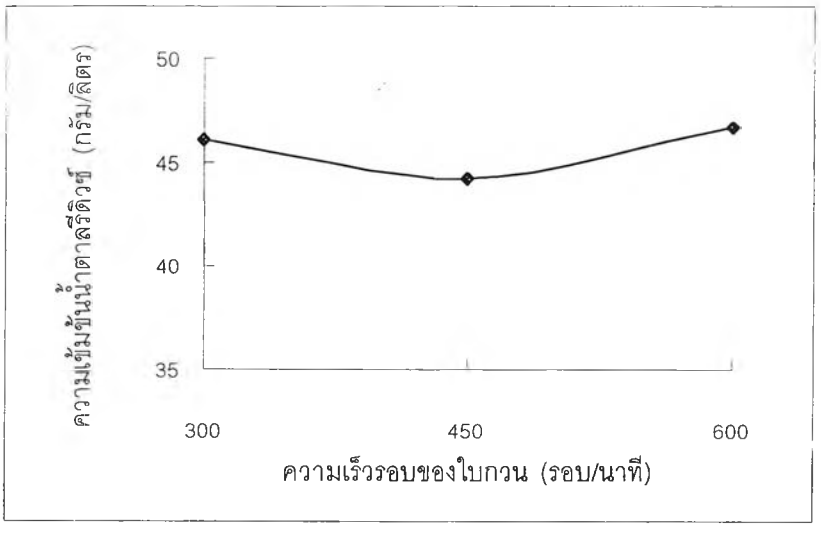
4.7 อิทธิพลของความเร็วรอบของใบกวนต่อการย่อยกากมันสำปะหลัง

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 32 กรัม ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 194.4 AGU ร่วมกับ แอลฟาอะไมเลส 2.4 KNU เซลลูเลส 300 NCU และเพกทิเนส 520 PG ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 โดยการกวนในลักษณะเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชัน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แปรค่าความเร็วรอบของใบกวนเป็น 3 ระดับ คือ 300, 450 และ 600 รอบ/นาที ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 21 คือ การกวนด้วยความเร็วรอบของใบกวนที่ระดับต่าง ๆ ทั้ง 3 นั้น ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งกลไกการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยสับสเทรตที่เป็น solid form มีขั้นตอนแรกคือ การแพร่ของเอนไซม์ (diffusion) ไปยังพื้นผิวของสับสเทรต แล้วจึงเกิดการจับกันระหว่างเอนไซม์และสับสเทรต (adsorption) หลังจากนั้นเอนไซม์จึงทำหน้าที่เร่งปฏิกริยาการย่อยสับสเทรต (catalysis) (Leloup, Colonna และ Ring, 1991) ซึ่งการย่อยสับสเทรตโดยการกวนด้วยใบกวนช่วยให้เอนไซม์สามารถแพร่ไปยังพื้นผิวของสับสเทรตได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวน จึงทำให้เอนไซม์สามารถย่อยสับสเทรตได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบใบกวนขึ้นอีก ทำให้แรงเฉือน (shear force) มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติและสูญเสียแอคติวิตีได้ (Gaouar และคณะ, 1997) แต่จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงเฉือน ในช่วงความเร็วรอบของใบกวนจาก 300 ถึง 600 รอบ/นาที ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ผสมดังกล่าว ดังนั้นจึงกำหนดความเร็วรอบของใบกวนที่ใช้ในการย่อยกากมันสำปะหลังพร้อมทั้งกรองน้ำตาลรีดิวซ์โดยเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชันที่จะได้ศึกษาในหัวข้อต่อไป คือ 600 รอบ/นาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบสูงสุดของเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชันที่ใช้ในงานวิจัย เนื่องจากการกรองแบบอัลทราฟิลเทรชัน ในการทดลองขั้นต่อไปต้องการแรงเฉือนผ่านหน้าผิวกรองที่ช่วยลดการเกิดชั้นเจลที่ต้านทานต่อการไหลผ่านเมมเบรนเพื่อให้ได้อัตราการกรองที่จะแยกผลิตภัณฑ์ได้สูงที่สุดโดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์

ตารางที่ 9 อิทธิพลของความเร็วรอบของใบกวนต่อการย่อยกากมันสำปะหลัง

ความเร็วรอบของใบกวน (รอบ/นาที)	ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร)
300	46.06 ± 0.54
450	44.19 ± 2.61
600	46.63 ± 0.53

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	กวนเป็นเวลา	1	ชั่วโมง



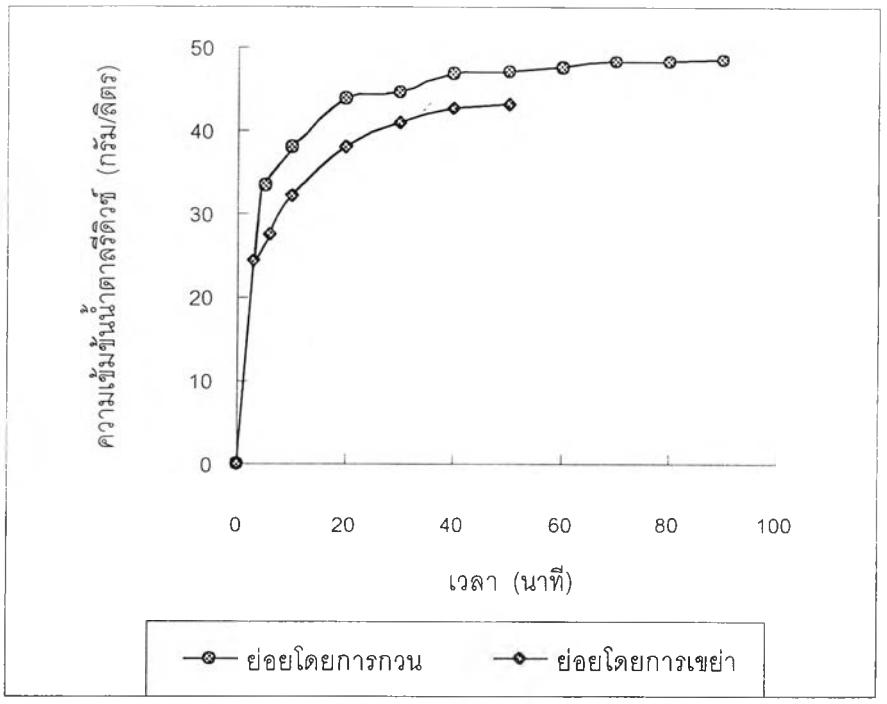
รูปที่ 21 อิทธิพลของความเร็วรอบของใบกวนต่อการย่อยกากมันสำปะหลัง

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	กวนเป็นเวลา	1	ชั่วโมง

4.8 ผลของการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ batch

เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 32 กรัม ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 194.4 AGU ร่วมกับแอลฟาอะไมเลส 2.4 KNU เซลลูเลส 300 NCU และเพกทิเนส 520 PG ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 กวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 22 (สัญลักษณ์ —o—) พบว่า ในช่วง 5 นาทีแรกของการย่อย ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยอัตรา 6.68 กรัม/ลิตร.นาที (ความชันของเส้นกราฟช่วง 5 นาทีแรก) หลังจากนั้นอัตราในการผลิตเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณกากมันสำปะหลังที่เป็นสับสเทรตของระบบลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อปริมาณกากมันสำปะหลังลดลงจนถึงระดับที่ไม่สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์อีกต่อไป ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์จึงเข้าสู่ค่าคงที่ โดยที่เวลา 90 นาที ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้มีค่า 48.49 กรัม/ลิตร คิดเป็น 0.61 กรัมน้ำตาลรีดิวซ์/กรัมกากมันสำปะหลัง และมีประสิทธิภาพการย่อยเท่ากับ 70.11 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองข้อ 4.5 จากการย่อยกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 80 กรัม/ลิตร เช่นเดียวกัน แต่เป็นการย่อยโดยการเขย่า (สัญลักษณ์ —o— ในรูปเดียวกัน) พบว่าการย่อยกากมันสำปะหลังโดยการกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที ให้น้ำตาลรีดิวซ์ที่มีความเข้มข้นมากกว่าการย่อยโดยการเขย่า 9.27 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการกวนโดยใบกวนให้ความปั่นป่วน (turbulence) แก่ระบบได้มากกว่าการเขย่า เป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในระบบให้สูงกว่า ทำให้เอนไซม์สามารถแพร่ไปยังพื้นผิวของสับสเทรตได้ดี เอนไซม์จึงย่อยสับสเทรตได้ดีกว่าการย่อยโดยการเขย่า



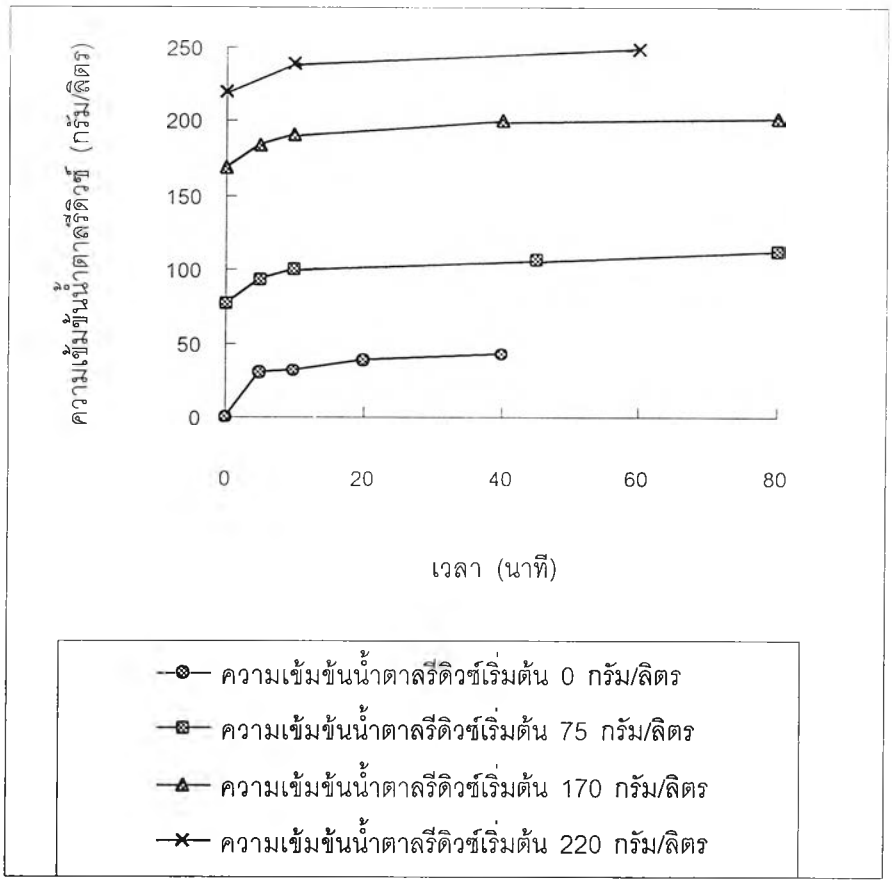
รูปที่ 22 ผลของการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ batch

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	

4.9 ผลของการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Fed-batch

การย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 32 กรัม ด้วยเอนไซม์ผสมระหว่างกลูโคอะไมเลส 194.4 AGU ร่วมกับแอลฟาอะไมเลส 2.4 KNU เซลลูเลส 300 NCU และเพกทิเนส 520 PG ที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น 0 กรัม/ลิตร โดยการเขย่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5 และเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่เวลาต่าง ๆ ได้ผลการทดลองแสดงด้วยสัญลักษณ์ —⊙— ในรูปที่ 23 พบว่า ในช่วงต้นของการย่อยกากมันสำปะหลังสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ในอัตราเริ่มต้น 6.06 กรัม/ลิตร.นาที (ความชันของกราฟในช่วง 5 นาทีแรก) ทำให้ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ค่าคงที่ในที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นเป็น 75, 170 และ 220 กรัม/ลิตร ที่ภาวะเดียวกัน ได้ผลการทดลอง แสดงไว้ในรูปเดียวกันด้วยสัญลักษณ์ —▣— , —△— และ —✕— ตามลำดับ พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ต่อเวลา มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองที่ภาวะความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น 0 กรัม/ลิตร แต่ให้อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นเป็น 3.55, 2.96 และ 1.87 กรัม/ลิตร.นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นจะลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ในระบบเพิ่มขึ้น ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 24 ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของกลูโคอะไมเลสถูกยับยั้งโดยน้ำตาลกลูโคสที่เพิ่มขึ้น (ณรงค์ อัศวสุนทรางกูร, 2534) และจากงานวิจัยของ Lee และ Kim (1993) ซึ่งกล่าวไว้ว่า น้ำตาลกลูโคสเป็นตัวยับยั้งการทำงานของเซลลูเลส

จากการทดลองดังกล่าวข้างต้น เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น 0 กรัม/ลิตร แล้วทำการย่อยต่อไปโดยการเติมกากมันสำปะหลังนึ่ง พบว่าความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 25 แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์ยังคงมีแอคติวิตีที่สามารถทำงานต่อได้ และเมื่อย่อยกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นต่าง ๆ ที่สูงขึ้น ได้แก่ 75, 170 และ 220 กรัม/ลิตร แล้วทำการย่อยกากมันสำปะหลังต่อไปโดยการเติมกากมันสำปะหลังนึ่งเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยกากมันสำปะหลังที่เติมลงไปลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากรูปที่ 25 ให้อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีค่าใกล้คงที่ตลอดเวลา (หลังผ่านช่วงอัตราการผลิตเริ่มต้นไปแล้ว) อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยในช่วงเวลาหลังอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นที่ได้จากกราฟต่อความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยในช่วงนั้น ๆ แสดงดังรูปที่ 26 พบว่า เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบมีค่าสูงขึ้น มีผลต่อการยังยั้งการทำงานของเอนไซม์ จึงทำให้อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง จากกราฟได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยในระบบกับอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ย แสดงได้ด้วยสมการ คือ



รูปที่ 23 ผลการย่อยกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นค่าต่าง ๆ

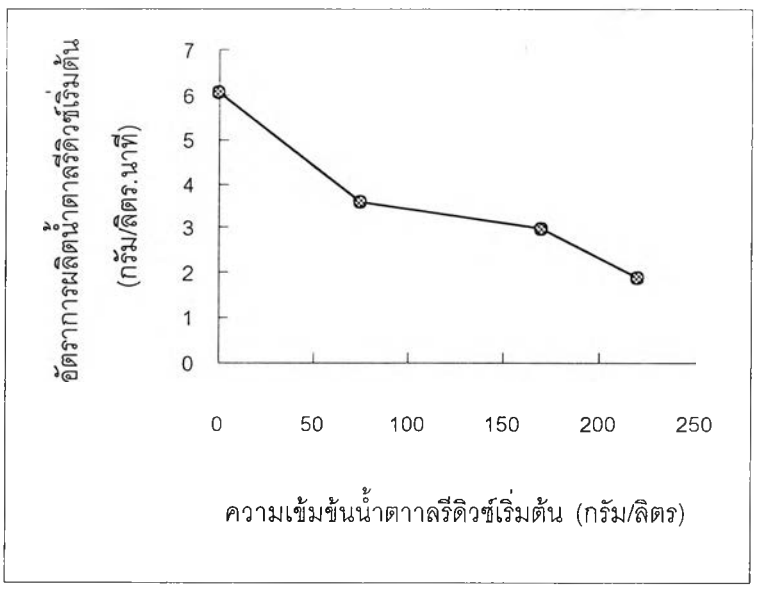
ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	ย่อยโดยการเขย่า		

$$v = 102.16\ C_R^{-1.31} \quad (15)$$

เมื่อ v คือ อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร.นาที)

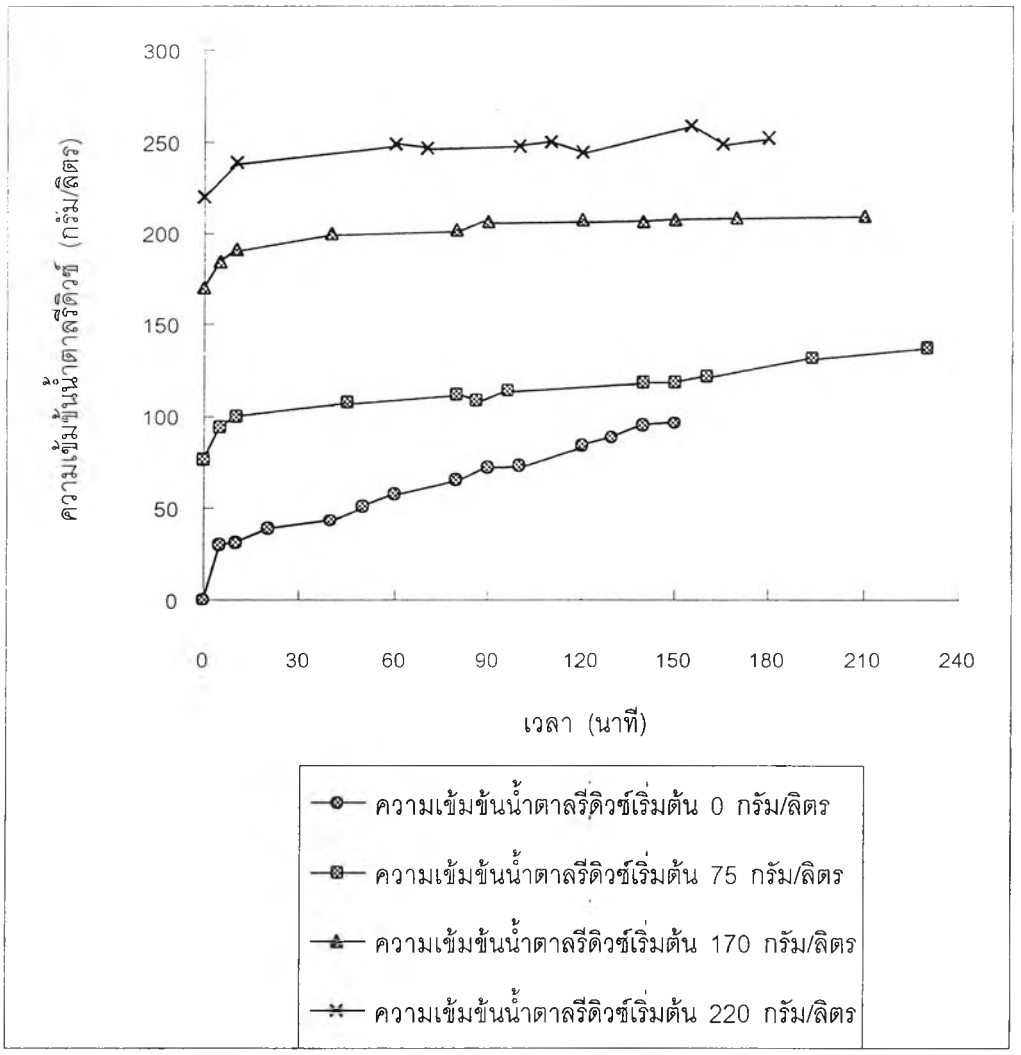
C_R คือ ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์ (กรัม/ลิตร)

ดังนั้นการนำเอาการกรองแบบอัลทราฟิลเทรชันมาประยุกต์ใช้กับการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ในถังปฏิกรณ์ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการนำเอาน้ำตาลรีดิวซ์ออกจากระบบเพื่อคงประสิทธิภาพการย่อยกากมันสำปะหลังของเอนไซม์ และยังเป็นการตรึงเอนไซม์ให้อยู่ในภาวะอิสระในระบบที่จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Darnoko, Cheryan และ Artz, 1988)



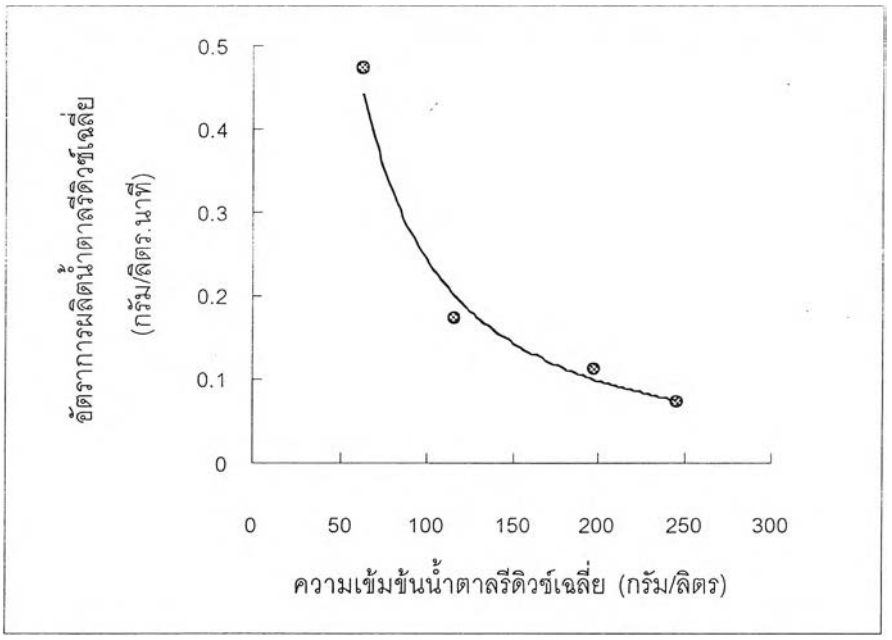
รูปที่ 24 อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นในการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Fed-batch ที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นค่าต่าง ๆ

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	ย่อยโดยการเขย่า		



รูปที่ 25 ผลการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Fed-batch

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	ย่อยโดยการเขย่า		



รูปที่ 26 อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยในการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Fed-batch ที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยค่าต่าง ๆ

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	ย่อยโดยการเขย่า		

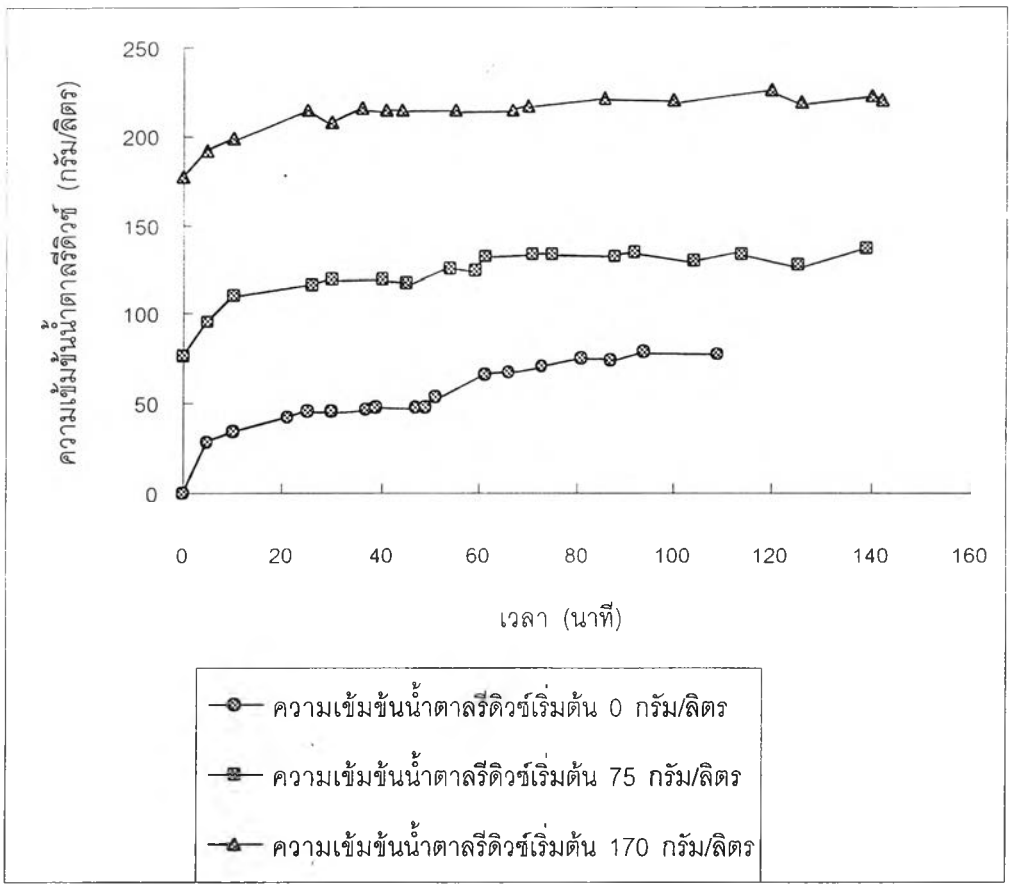
4.10 ผลของการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous

การนำการกรองแบบอัลทราฟิลเทรชันมาใช้ร่วมกับการย่อยกากมันสำปะหลัง เพื่อตรึงเอนไซม์ไว้ในถังปฏิกรณ์ เมมเบรนที่ใช้ต้องมีขนาด molecular weight cut off ที่เหมาะสมสำหรับกักเอนไซม์ไว้ได้ โดยน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นผลผลิตจากการย่อยต้องสามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ กลูโคอะไมเลสจาก *Aspergillus niger* แอลฟาอะ

ไมเลสจาก *Bacillus amyloliquefaciens* เซลลูเลสจาก *Trichoderma reesei* และเพกทิเนส จาก *Aspergillus niger* มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 99,000 58,000 20,000 และ 35,000 ตามลำดับ (Fogarty, 1983) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาด molecular weight cut off 10,000 ซึ่งมีความเหมาะสมเนื่องจากมีขนาด molecular weight cut off ต่ำเพียงพอต่อการกักเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิด ให้สามารถทำงานต่อไปได้ในเครื่องปฏิกรณ์

การย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous ทำให้ได้ค่าความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชันที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาการย่อย แสดงดังรูปที่ 27 ซึ่งในการย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 32 กรัม ที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น 0 กรัม/ลิตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่าง 5 กวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที (สัญลักษณ์ —○—) ในช่วงเริ่มต้นของการย่อย (10 นาทีแรก) จะปล่อยให้เกิดการย่อยกากมันสำปะหลังโดยยังไม่มีการกรอง และเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มรบกวนการทำงานของเอนไซม์ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มเข้าสู่ภาวะคงตัวจึงเริ่มกรองน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ออก โดยใช้ความดันคงที่ 200 kPa แล้วเติมกากมันสำปะหลังนึ่งซึ่งมีบัฟเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยลงไปทดแทนส่วนที่ถูกย่อย โดยการทดลองได้ควบคุมการเติมบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการนึ่งกากมันสำปะหลังให้เท่ากับปริมาตรของน้ำหมักที่กรองได้ เพื่อควบคุมภาวะของการย่อยในระบบ (ปริมาตรของระบบและอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อเอนไซม์) ให้คงที่ตลอดการทดลองและเป็นการลดความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบแล้วทำการย่อยและกรองต่อไป ทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือที่มอเตอร์มี torque จำกัด ไม่สามารถทำการทดลองต่อเนื่องโดยการเติมกากมันสำปะหลังเพิ่มได้อีก จึงจำลองภาวะที่เข้มข้นขึ้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบถ้ามีการย่อยอย่างต่อเนื่องโดยทำการย่อยที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น 75 และ 170 กรัม/ลิตร ตามขั้นตอนการทดลองดังกล่าวข้างต้น ผลการทดลองดังรูปที่ 27 สัญลักษณ์ —▣— และ —▲— ตามลำดับ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นมีค่ามากขึ้น อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จะมีค่าลดลง ดังเหตุผลจากข้อ 4.9

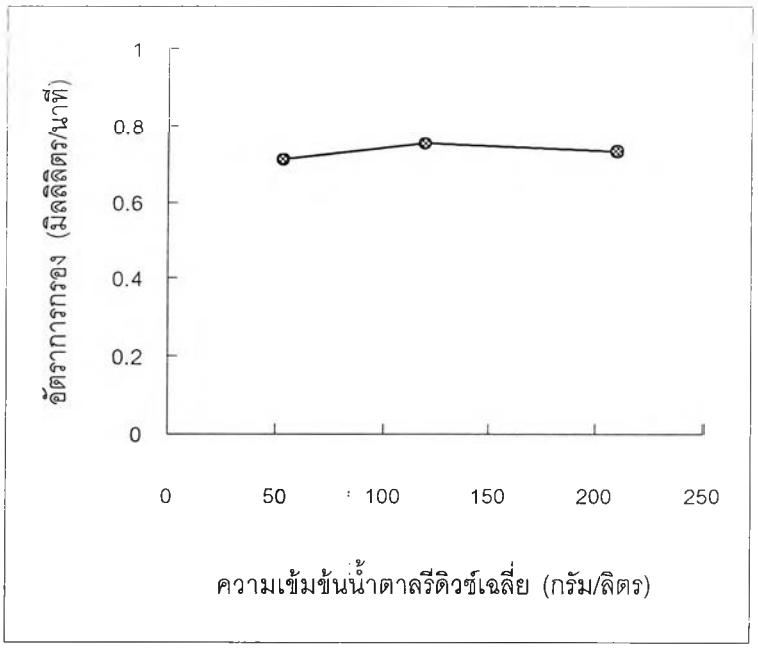
เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการกรองที่ความดันคงที่ 200 kPa พบว่า ในช่วงเริ่มต้นอัตราการกรองมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปมีชั้นเจลเกิดขึ้นจึงทำให้อัตราการกรองลดต่ำลง และเนื่องจากมีการกวนอย่างต่อเนื่อง อัตราการเกิดชั้นเจลกับอัตราการถูกพัดพาของชั้นเจลที่เกิดจากการกวนจึงมีค่าเท่ากัน ทำให้อัตราการกรองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งในการย่อยกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นค่าต่าง ๆ ได้แก่ 0, 75 และ 170 กรัม/ลิตร มีอัตราการกรองที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.73 มิลลิลิตร/นาที คิดเป็นอัตราเร็วในการกรองเท่ากับ 0.19 ลิตร/ตารางเมตร.นาที โดย



รูปที่ 27 ผลการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	กวนด้วยความเร็วรอบ	600	รอบ/นาที
	กรองด้วยความดัน	200	kPa

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการกรองกับความเข้มข้นเฉลี่ยของน้ำตาลรีดิวซ์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 28 พบว่า ไม่ให้ความแตกต่างกัน เนื่องจาก Iritani และคณะ (1995) ได้กล่าวว่า การกรองแบบอัลทราฟิลเทรชันมีแนวโน้มใกล้เคียงกับ cake filltration กล่าวคือ อัตราการกรองจะแปรผันตามความดันที่ใช้กรองและจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนืด จากผลการทดลองที่ใช้ความดันในการ



รูปที่ 28 อัตราการกรองในการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous ที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยค่าต่าง ๆ

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	กวนด้วยความเร็วรอบ	600	รอบ/นาที
	กรองด้วยความดัน	200	kPa

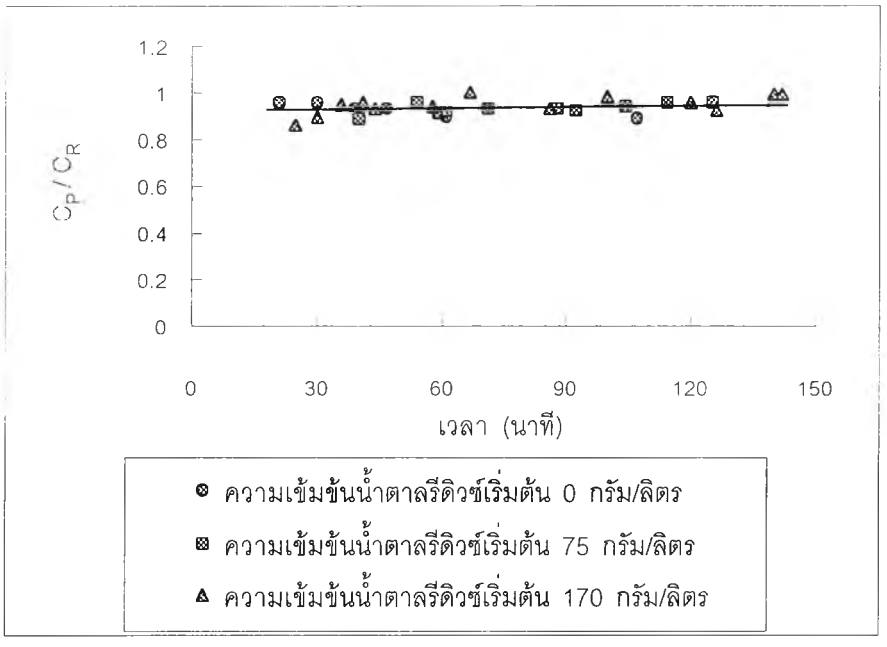
กรองคงที่ ทำให้ความหนืดของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผ่านเมมเบรนเท่านั้นที่จะเป็นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการกรอง แต่ความหนืดของน้ำตาลรีดิวซ์ในช่วงความเข้มข้น 50 ถึง 215 กรัม/ลิตร มีค่าใกล้เคียงกัน จึงมีผลให้อัตราการกรองไม่แตกต่างกัน

สำหรับคุณภาพของส่วนที่กรองได้ (ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของส่วนที่กรองได้) แสดงในรูปสัดส่วนของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของส่วนที่กรองได้ (C_P) ต่อความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์ (C_R) ดังรูปที่ 29 พบว่า ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของส่วนที่กรองได้มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์ คิดเป็นประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์ ในทุก ๆ กรณีของภาวะการย่อยกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นที่ต่าง ๆ ซึ่งจะได้ว่า

$$C_P/C_R = 0.95 \qquad (16)$$

$$C_P = 0.95\ C_R \qquad (17)$$

แสดงว่า เมมเบรนมีค่าสัมประสิทธิ์รีเจคชันต่อน้ำตาลรีดิวซ์น้อยมาก ทำให้น้ำตาลรีดิวซ์สามารถผ่านเมมเบรนได้ดี ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของผลิตภัณฑ์ที่กรองได้จึงใกล้เคียงกับความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์ และเมื่อเติมกากมันสำปะหลังนึ่งชดเชยส่วนที่ถูกย่อยไปลงในระบบที่มีการกรอง แล้วปล่อยให้เอนไซม์ทำงานต่อไป 15 ชั่วโมง (โดยนำตัวอย่างออกไปเขย่าที่เวลา 145 นาที) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 30 พบว่า หลังจากมีการเติมกากมันสำปะหลังนึ่งความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตกลงทันที เนื่องจากบัฟเฟอร์ที่ติดไปกับกากมันสำปะหลังนึ่งทำให้ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบเจือจาง แต่หลังจากปล่อยให้เอนไซม์ทำการย่อยต่อไปเป็นเวลา 15 ชั่วโมงแล้ว ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเอนไซม์ยังคงมีแอคติวิตีอย่างเพียงพอที่จะย่อยกากมันสำปะหลังที่เติมได้ จึงกล่าวได้ว่าเมมเบรนที่เลือกใช้สามารถกักเอนไซม์ไว้ภายในระบบและทำให้เอนไซม์ย่อยกากมันสำปะหลังต่อไปได้ ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 29 สัดส่วนของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของส่วนที่กรองได้ต่อความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์ที่เวลาต่าง ๆ

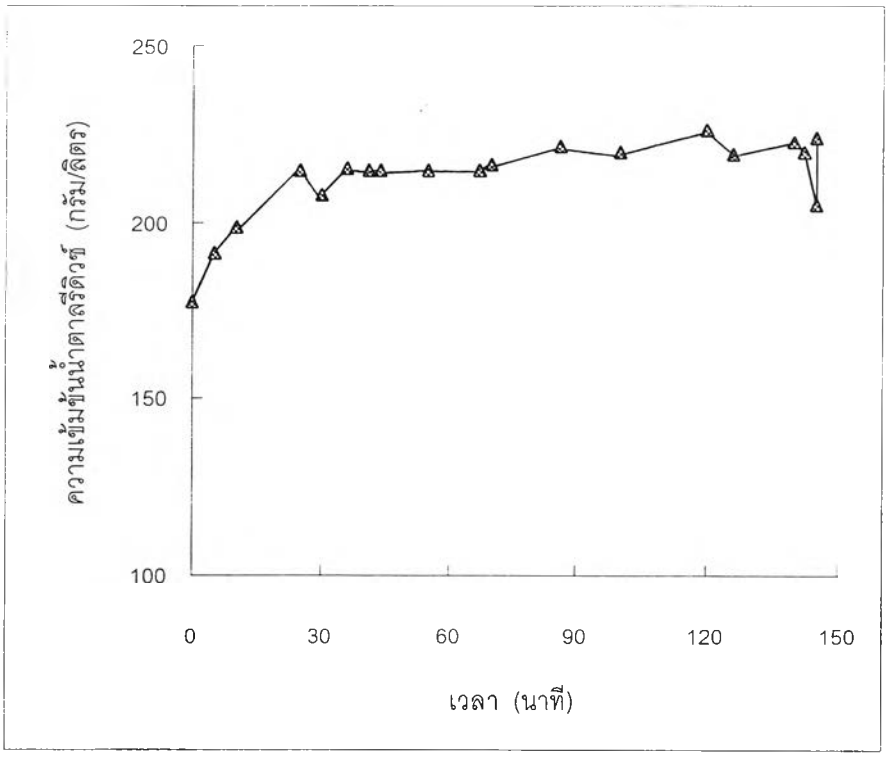
ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	กวนด้วยความเร็วรอบ	600	รอบ/นาที
	กรองด้วยความดัน	200	kPa

C_P = ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของส่วนที่กรองได้

C_R = ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในถังปฏิกรณ์

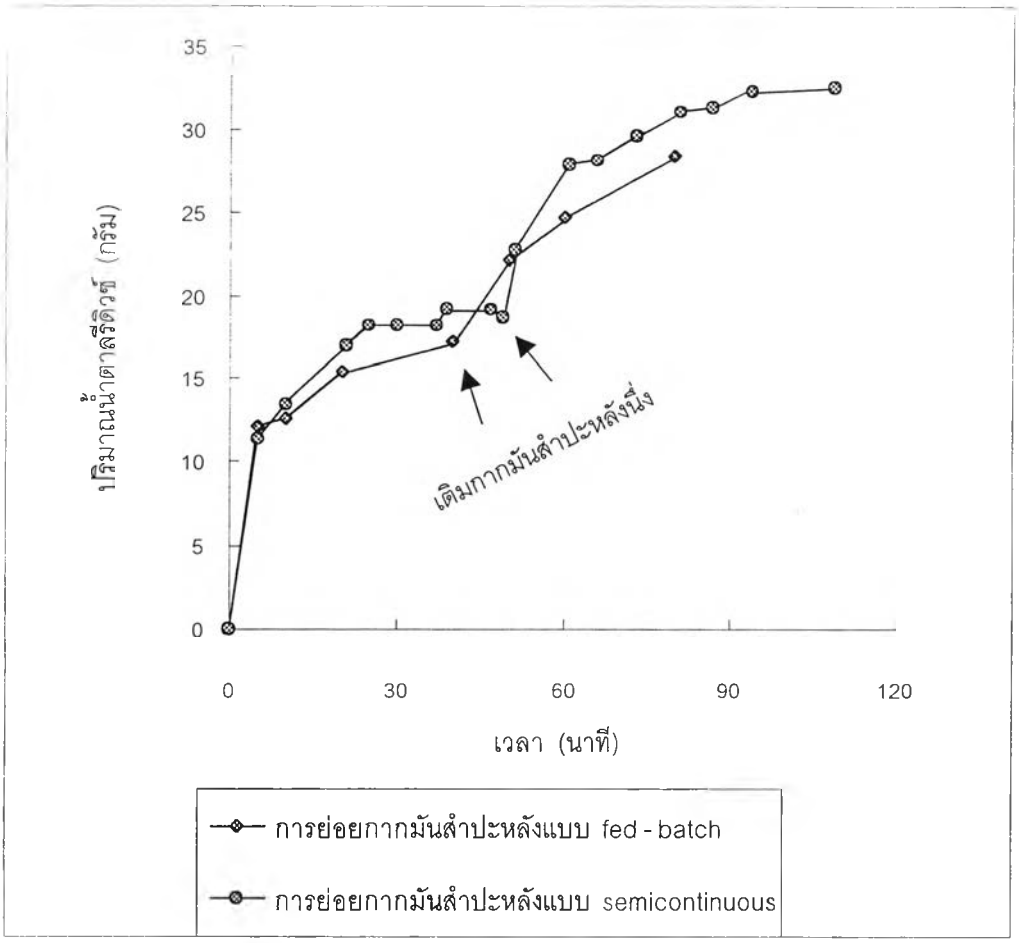
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous กับการย่อยแบบ Fed-batch ดังแสดงในรูปที่ 31 พบว่า การย่อยแบบ semicontinuous ในเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชันที่มีการกวน ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยรวมมากกว่าการย่อยแบบ Fed-batch ซึ่งเป็นการย่อยโดยการเขย่า เนื่องจากการกวนมีอิทธิพลต่อการย่อยกากมันสำปะหลังที่ดีกว่าการเขย่า ดังเหตุผลจากข้อ 4.7 และ 4.8 รวมทั้งในการย่อยแบบ semicontinuous มีการกรองน้ำตาลรีดิวซ์ออกอย่างต่อเนื่องก่อนเติมกากมันสำปะหลังนึ่งเข้าไปแทนที่ ซึ่งเป็นการลดอิทธิพลของน้ำตาลรีดิวซ์ที่จะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ รูปที่ 32 แสดง ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบต่อเวลาการย่อย พบว่า การย่อยแบบ semicontinuous ให้ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบที่สูงกว่าการย่อยแบบ Fed-batch เนื่องจากในการย่อยแบบ semicontinuous ระบบจะถูกรักษาปริมาตรให้คงที่ตลอดเวลา ในขณะที่การย่อยแบบ Fed-batch ระบบจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมกากมันสำปะหลังนึ่ง รวมทั้งบัฟเฟอร์ที่ติดไปกับกากมันสำปะหลัง ดังนั้นจึงทำให้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้นถูกเจือจางอยู่ตลอดเวลา น้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังในระบบ semicontinuous จึงไม่ถูกเจือจางเช่นในระบบ Fed-batch

ดังนั้นการใช้การกรองแบบอัลทราฟิลเทรชันร่วมกับการย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อกักเอนไซม์ไว้ในถังปฏิกรณ์ เป็นการตรึงเอนไซม์ให้สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่าการย่อยด้วยระบบ Fed-batch



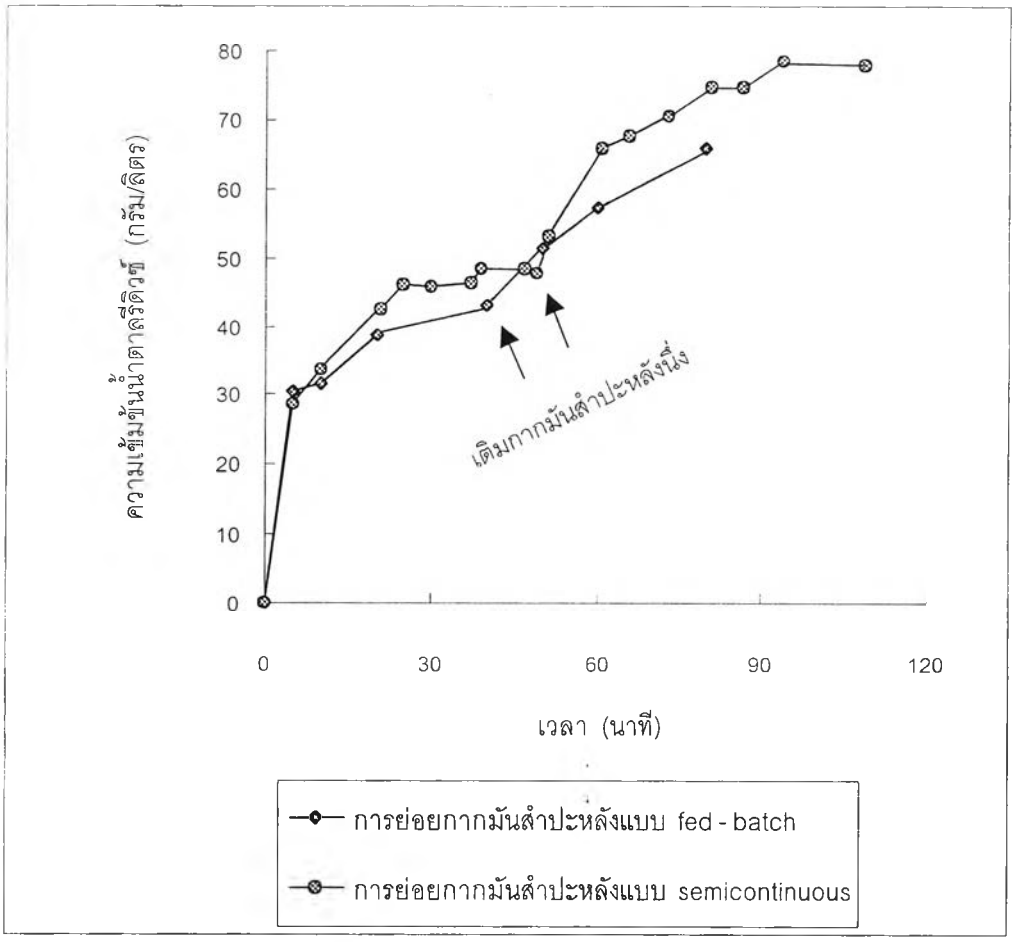
รูปที่ 30 ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมกากมันสำปะหลังหลังจากการย่อยแบบ semicontinuous

ที่ภาวะ :	เติมกากมันสำปะหลังนึ่ง	16	กรัม หลังจากการย่อยแบบ semicontinuous
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	
	เขย่าเป็นเวลา	15	ชั่วโมง



รูปที่ 31 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยรวมที่ผลิตได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Fed-batch และ semicontinuous

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	



รูปที่ 32 ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Fed-batch และ semicontinuous

ที่ภาวะ :	กากมันสำปะหลัง	32	กรัม
	กลูโคอะไมเลส	194.4	AGU
	แอลฟาอะไมเลส	2.4	KNU
	เซลลูเลส	300	NCU
	เพกทิเนส	520	PG
	อุณหภูมิ	50	องศาเซลเซียส
	ค่าความเป็นกรดด่าง	5	

4.11 การคาดการณ์ค่าความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา

เนื่องจากในระบบการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous กากมันสำปะหลังจะถูกย่อยและเปลี่ยนเป็นน้ำตาลรีดิวซ์อย่างต่อเนื่อง และน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จะถูกดึงผ่านเมมเบรนออกอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นอัตราการสะสมมวลของน้ำตาลรีดิวซ์ในเครื่องปฏิกรณ์ (dM/dt ; กรัม/นาที) สามารถแสดงได้ด้วยสมการสมดุลมวลสาร ต่อไปนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{VdC_R}{dt} = vV - jAC_P \qquad (18)$$

โดยในที่นี้ j คือ อัตราการกรอง (ลิตร/ตารางเมตร.นาที)

A คือ พื้นที่การกรอง (ตารางเมตร)

C_P คือ ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของส่วนที่กรองได้ (กรัม/ลิตร)

v คือ อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร.นาที)

V คือ ปริมาตรของระบบการย่อยกากมันสำปะหลัง (ลิตร)

ดังนั้น ถ้าทราบความสัมพันธ์ของ v , j และ C_P ในรูปของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบ (C_R) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง C_R กับเวลา (t) ที่เกิดขึ้นภายในระบบการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีปริมาตรคงที่ได้ (สามารถคาดคะเนความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาได้)

จากผลการทดลองในข้อ 4.9 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ย (v) กับค่า C_R ในระบบ Fed – batch ดังสมการที่ (15)

$$v = 102.16C_R^{-1.31} \qquad (15)$$

ผลการทดลองในข้อ 4.10 ที่ทำการกรองที่ภาวะการย่อยกากมันสำปะหลังที่ความดันในการกรอง ความเร็วรอบในการกวน และขนาด molecular weight cut off ของเมมเบรนไว้ให้คงที่ (200 kPa, 600 รอบ/นาที และ 10,000 Da ตามลำดับ) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_P กับค่า C_R ดังสมการที่ (17)

$$C_P = 0.95\, C_R \qquad (17)$$

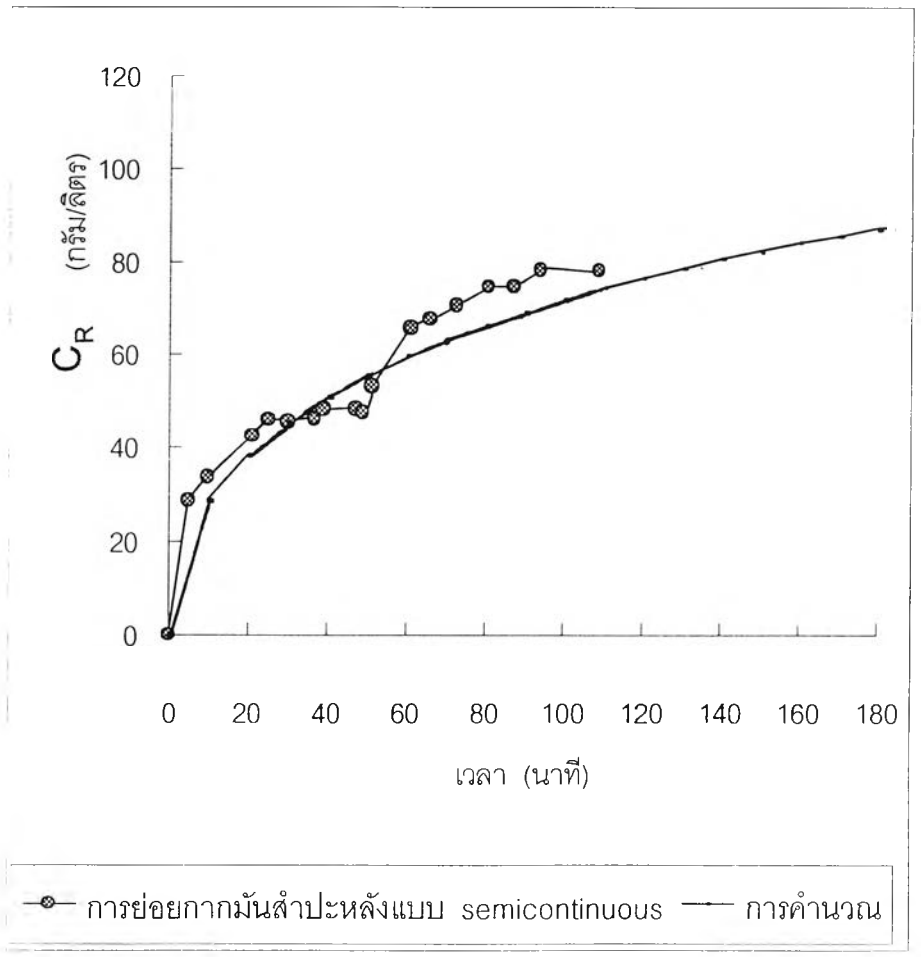
และอัตราการกรอง (j) ในภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ มีค่าคือ

$$j = 0.19 \quad \text{ลิตร/ตารางเมตร.นาที}$$

ดังนั้นในระบบที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งมีค่า $V = 0.4$ ลิตร, $A = 3.85 \times 10^{-3}$ ตารางเมตร จะได้ความสัมพันธ์ของ C_R กับ t ดังสมการที่ (19)

$$C_R^{2.31} = 58803.98 \left(1 - e^{(-4.013t / 1000)} \right) \qquad (19)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous ที่ภาวะเดียวกัน ดังรูปที่ 33 พบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน สามารถใช้ข้อมูลจากการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ



รูปที่ 33 ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชันที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา

Fed – batch (batch) ร่วมกับสมบัติทางกายภาพ และสมบัติการกรองของเครื่องปฏิกรณ์อัลทราฟิลเทรชัน มาคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous ได้อย่างแม่นยำ

และเมื่อระบบของการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ semicontinuous อยู่ในภาวะคงตัว (steady state) จากสมการ (18) จะได้

$$j \times A \times C_P = v \times V \qquad (20)$$

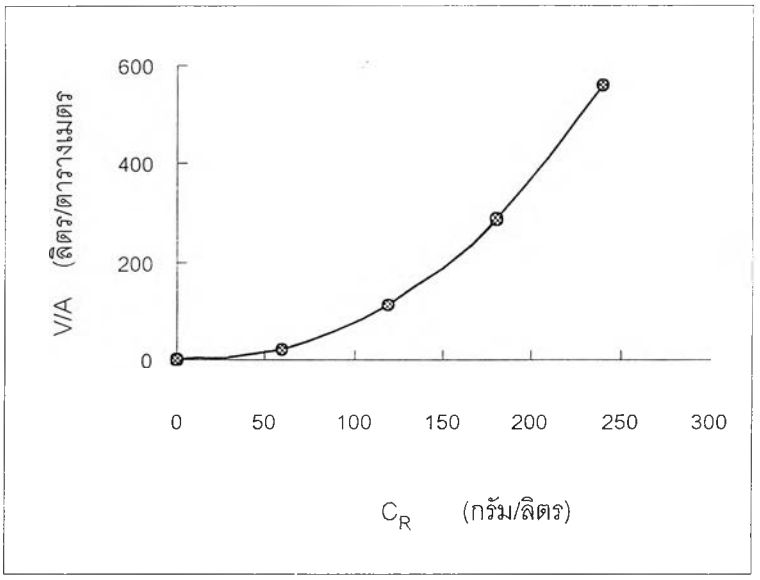
มวลของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ถูกดึงออก = มวลของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตขึ้นในระบบ

ดังนั้นในระบบที่มีอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ของเอนไซม์ และประสิทธิภาพในการกรอง (C_P , j) ที่ทราบค่า จะสามารถกำหนดค่าสัดส่วนของปริมาตรบรรจุของเครื่องปฏิกรณ์ต่อพื้นที่การกรอง (V/A) กับค่า C_R ที่ทำให้เกิดภาวะคงตัวได้ ซึ่งจากผลการวิจัยจะได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง V/A กับ C_R ดังสมการที่ (21) และแสดงดังรูปที่ 34

$$V/A = 1.77 \times 10^{-3} \times C_R^{2.31} \qquad (21)$$

ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่า V = 0.4 ลิตร , A = 3.85×10^{-3} ตารางเมตร คือ C_R = 115.58 กรัม/ลิตร

จากการสมดุลมวลสารและข้อมูลต่างๆ ข้างต้น จะสามารถคำนวณค่า C_R สูงสุดที่สามารถผลิตได้จากระบบปฏิกรณ์ใดๆ และในทางกลับกัน จะสามารถกำหนดเลือกสัดส่วนระหว่าง V/A ที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ที่จะทำให้ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีความเข้มข้นตามที่ต้องการได้



รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของปริมาตรของระบบกับพื้นที่การกรองต่อความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ในเครื่องปฏิกรณ์

ที่ภาวะ :	ความดันในการกรอง	200	kPa
	ความเร็วรอบในการกวน	600	รอบ/นาที
	ขนาด molecular weight cut off	10,000	