บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ ตามวิธีทดลองข้อ 2.4.1-2.4.6 (ภาคผนวก ก 2) ผลการทดลอง (ตารางที่ 3.1) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่า ความชื้น ปริมาณแป้ง เถ้า เถ้าที่ไม่ละลายในกรด โปรตีน และความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 13.32 96.25 0.29 0.09 0.25 เปอร์เซ็นต์ และ 5.66 (ค่าเฉลี่ย) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (มอก.274-2521) กระทรวงอุตสาหกรรม ที่กำหนดชั้นคุณภาพลักษณะทางเคมี (ตารางภาคผนวก ก) ปรากฏว่า ชั้นคุณภาพของแป้งมันสำปะหลังที่นำมาทดลองมีคุณลักษณะทางเคมีจัดอยู่ในชั้นคุณภาพที่ 2

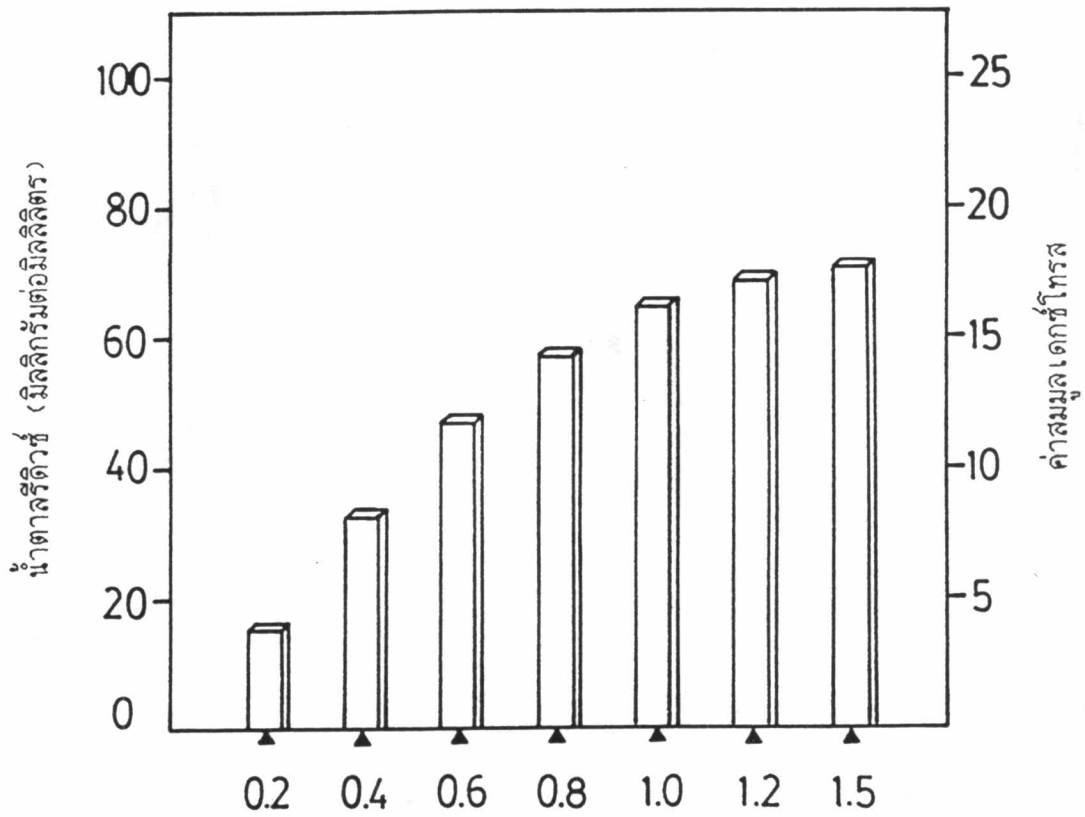
3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส

3.2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl (liquefaction processes)

3.2.1.1 ผลกระทบของปริมาณ Termamyl ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง จากการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังโดยเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 6.0-6.5 แปรค่าปริมาณ Termamyl ต่าง ๆ กัน คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 และ 1.5 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) นำไปไฮโดรไลซ์ในอ่างน้ำมันอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลอง (รูปที่ 3.1) พบว่า ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เมื่อ

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)	จำนวนตัวอย่าง				ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	
ความชื้น	13.43	12.75	13.35	13.77	13.32
แป้ง (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	96.73	95.36	97.82	95.08	96.25
เถ้า (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	0.27	0.32	0.37	0.19	0.29
เถ้าที่ไม่ละลายในกรด (acid insoluble ash) (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	0.05	0.11	0.14	0.06	0.09
โปรตีน (ของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง)	0.24	0.36	0.17	0.23	0.25
ความเป็นกรด-ด่าง	5.67	5.65	5.65	5.70	5.66

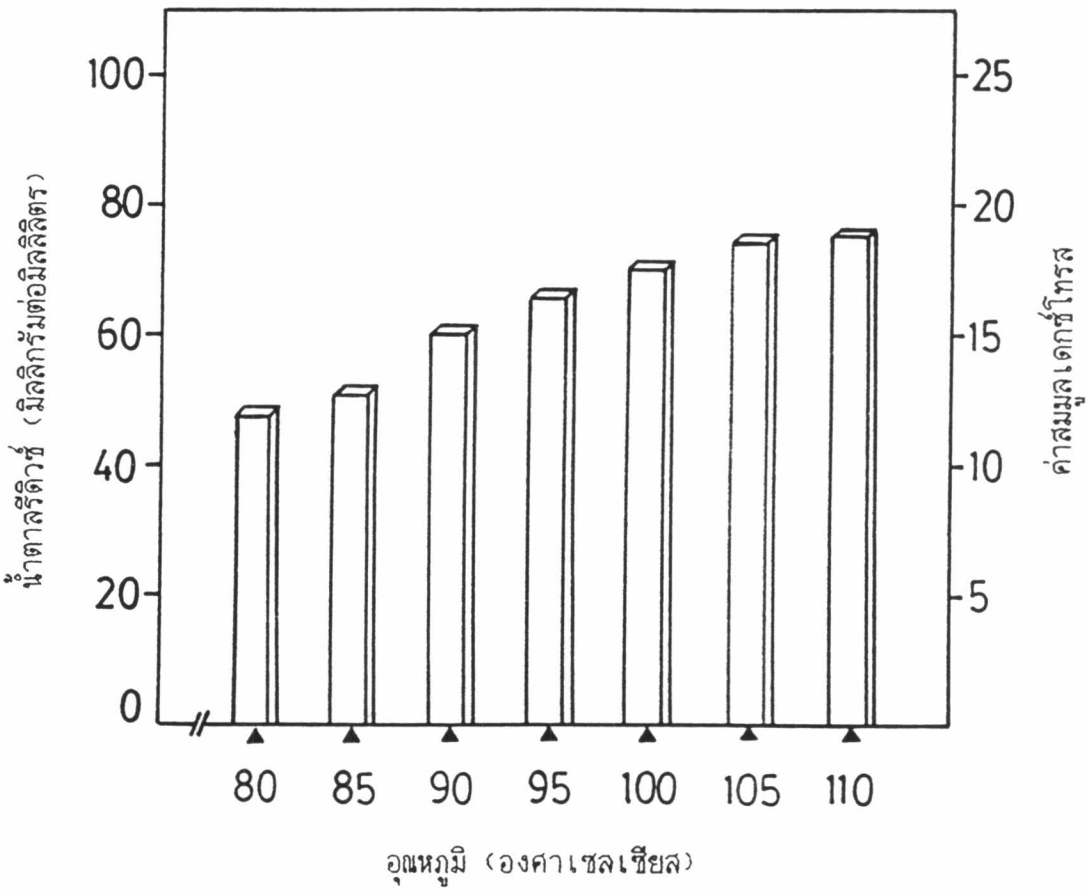


รูปที่ 3.1 ผลกระทบของปริมาณ Termamyl ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 6.0-6.5 อุณหภูมิไฮโดรไลซ์ 100 องศาเซลเซียส

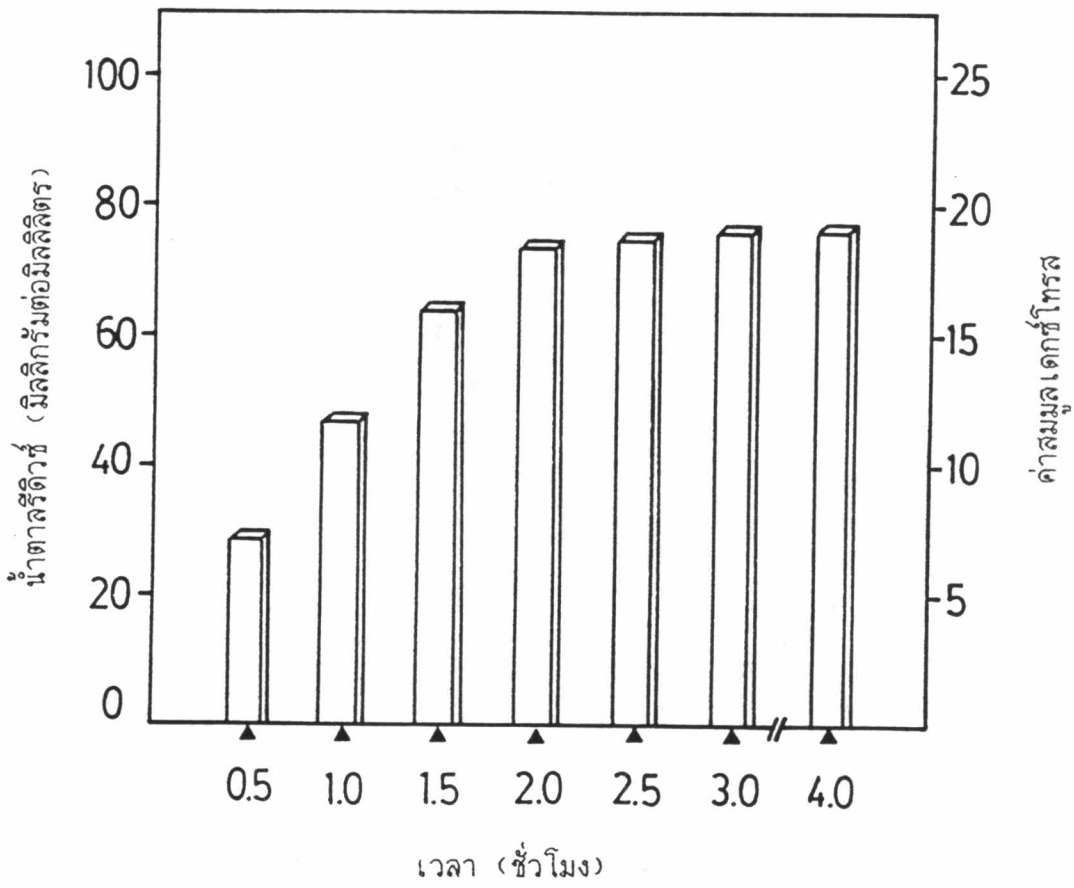
เพิ่มปริมาณ Termamyl น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่เกิดจากไฮโดรไลซ์มีค่าเท่ากับ 15.17 32.60 46.95 57.47 64.48 68.65 และ 70.99 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซทตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose equivalent, DE) มีค่าอยู่ในช่วง 4-17 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณ Termamyl 1.2-1.5 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังสูงสุดมีค่าใกล้เคียง ถึงแม้ว่าปริมาณ Termamyl จะเพิ่มขึ้น

3.2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl ทำการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 6.0-6.5 เติม Termamyl 1.2 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) นำไปไฮโดรไลซ์ในอ่างน้ำมันอัตราการกวน 300 รอบต่อนาที แปรค่าอุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ 80 85 90 95 100 105 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลอง (รูปที่ 3.2) พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl สูงขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 47.84 50.90 60.52 66.17 70.45 74.57 และ 75.43 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท ตามลำดับ ค่าสมมูลเดกซ์โทรส มีค่าอยู่ในช่วง 12-19 เป็นที่น่าสังเกตเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการไฮโดรไลซ์จนถึง 110 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl จะสูงสุด

3.2.1.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl ทำการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 6.0-6.5 เติม Termamyl 1.2 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) นำไปไฮโดรไลซ์ในอ่างน้ำมันอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที วัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาการไฮโดรไลซ์ต่าง ๆ กัน คือ 0.5 1.5 2 2.5 3 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดลอง (รูปที่ 3.3) พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ตั้งแต่ 2-4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์เริ่มคงที่ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดอยู่ในช่วง 74.86-77.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท ค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูงสุดอยู่ในช่วง 18-19 และจากการทดลองพบว่า เมื่อ



รูปที่ 3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการไฮโดรไลท์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 6.0-6.5 ปริมาณ Termamyl 1.2 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



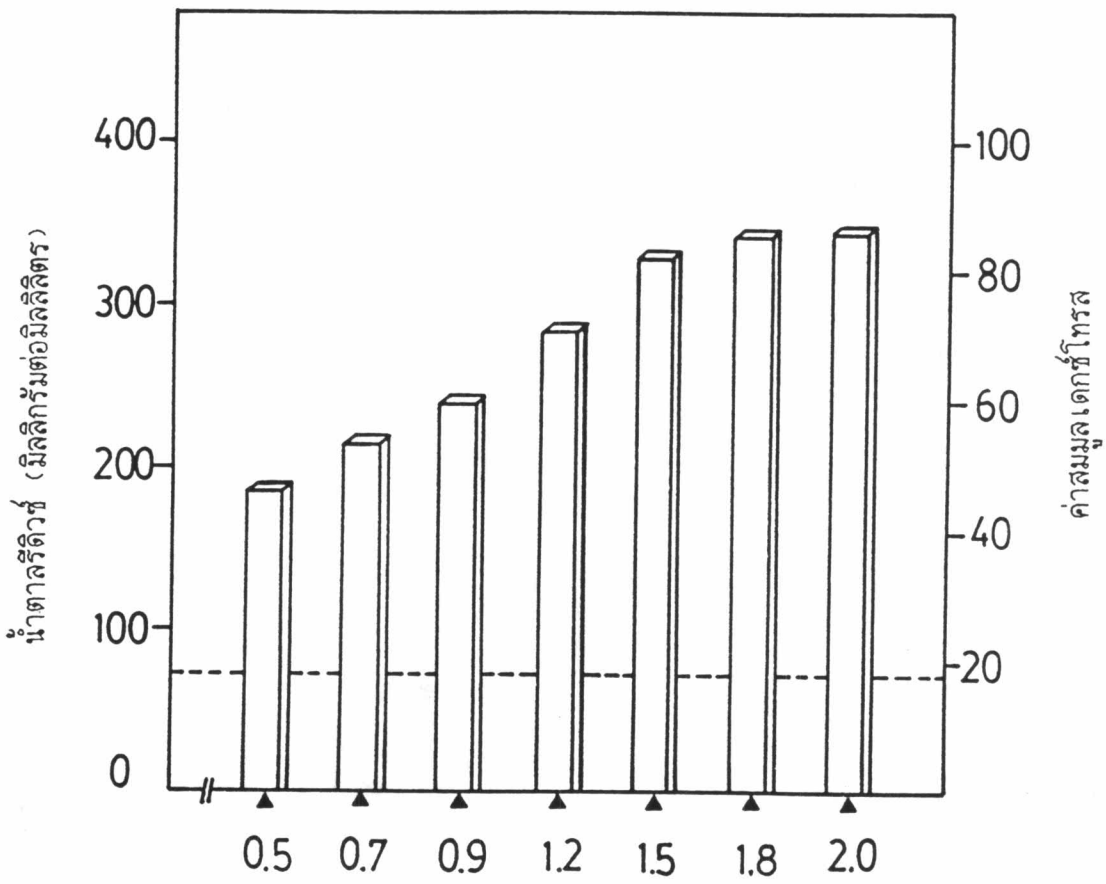
รูปที่ 3.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง เมื่อใช้ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ Termamyl 1.2 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) พีเอช 6.0-6.5 ทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาการไฮโดรไลซ์เพิ่มขึ้น แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทจะมีความเข้มของสีเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลา 2 ชั่วโมง ในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง สำหรับการทดลองต่อ ๆ ไป

3.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย AMG (saccharification process)

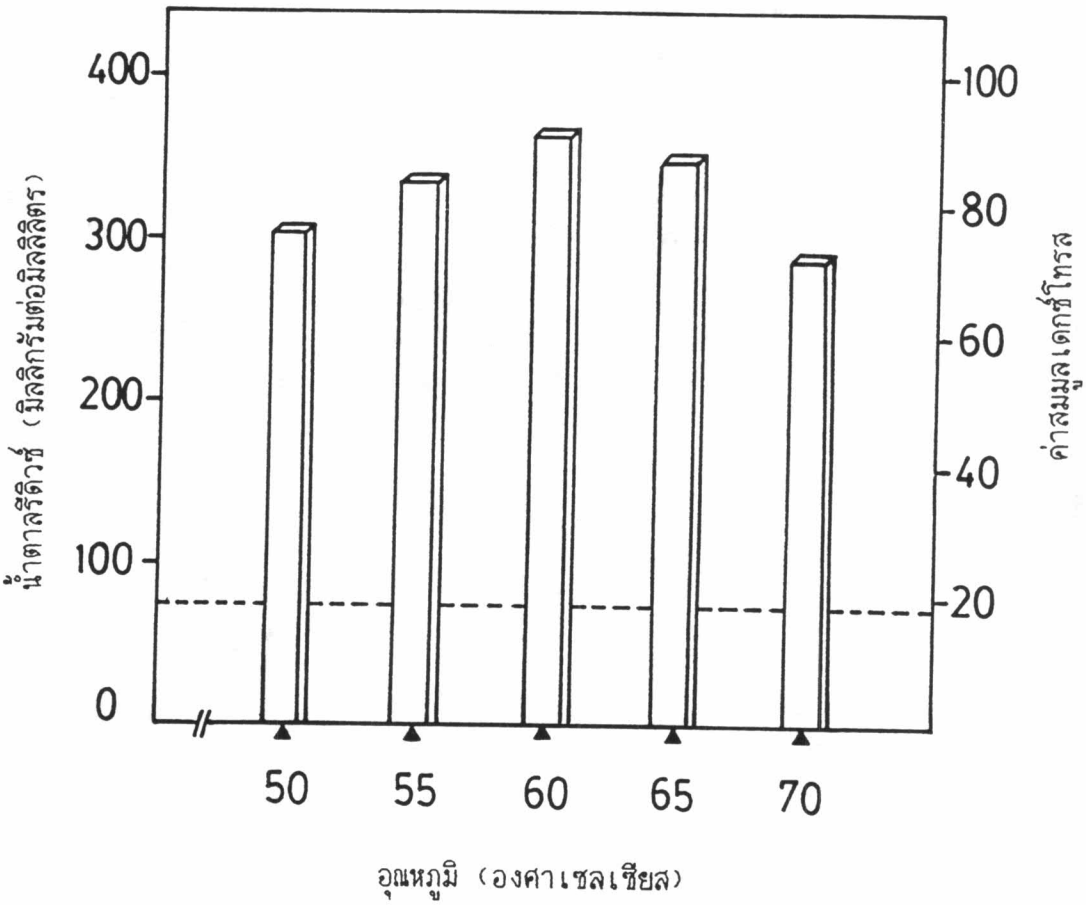
3.2.2.1 ผลกระทบของปริมาณ AMG ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท นำแป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ตามวิธีทดลองข้อ 2.9.1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 4.0-4.5 เติม AMG โดยแปรค่าปริมาณ AMG ต่างๆ กันคือ 0.5 0.7 0.9 1.2 1.5 1.8 และ 2.0 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ทำการไฮโดรไลซ์ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำลายแอคติวิตีของ AMG ในเครื่องอบฆ่าเชื้อภายใต้ความดันเป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลอง (รูปที่ 3.4) พบว่า ที่ปริมาณ AMG 0.5-1.2 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเริ่มค่อย ๆ คงที่ที่ปริมาณ AMG เท่ากับ 1.5-2.0 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 187.50 219.37 247.86 284.22 332.32 338.46 และ 342.91 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท ตามลำดับ และค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูงสุดอยู่ในช่วง 47-86

3.2.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย AMG ทำการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 4.0-4.5 เติม AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ไฮโดรไลซ์ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ โดยแปรค่าอุณหภูมิต่าง ๆ กันคือ 50 55 60 65 และ 70 องศาเซลเซียส อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำลายแอคติวิตีของ AMG ในเครื่องอบฆ่าเชื้อภายใต้ความดันเป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลอง (รูปที่ 3.5) พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทสูงที่สุด ได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 371.52 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท ค่าสมมูลเดกซ์โทรส



รูปที่ 3.4 ผลกระทบของปริมาณ AMG ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 4.0-4.5 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

- - - - น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น



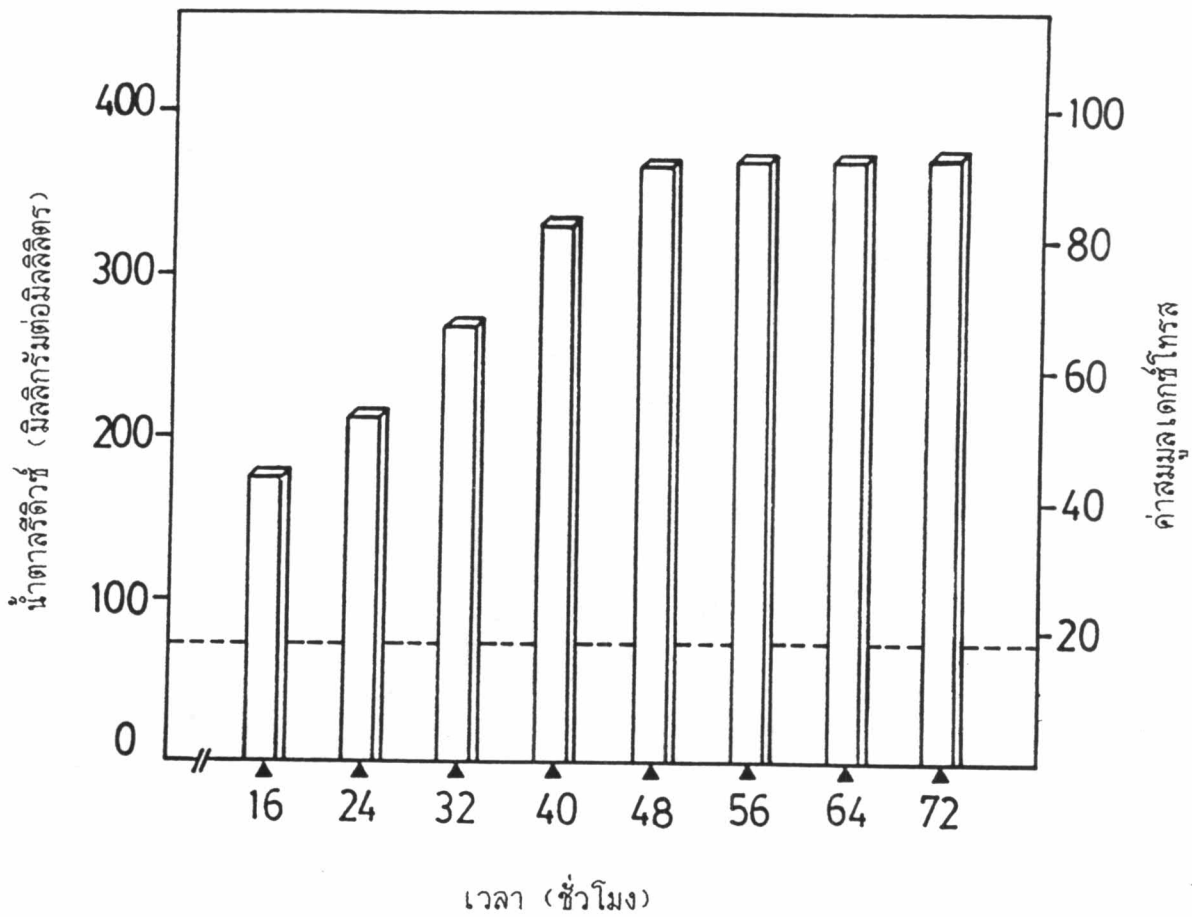
รูปที่ 3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ด้วย AMG ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 4.0-4.5 ปริมาณ AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) เวลาของของการไฮโดรไลซ์ 48 ชั่วโมง

- - - - น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

เท่ากับ 93 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส น้ำตาลรีดิวซ์และค่าสมมูลเดกซ์โทรสมีค่าลดลงเป็นที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งพบว่าที่อุณหภูมิการไฮโดรไลซ์สูงขึ้น ความเข้มสีของไฮโดรไลเซทมีค่ามากขึ้นแปรผันตาม ซึ่งยากแก่การกำจัดตลอดจนมีผลกระทบต่อเอนไซม์ในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่อไป

3.2.2.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย AMG ทำการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 4.0-4.5 เติม AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ไฮโดรไลซ์ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที วัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาต่าง ๆ กันคือ 16 24 32 40 48 56 64 และ 72 ชั่วโมง ทำลายแอคติวิตีของ AMG ในเครื่องอบฆ่าเชื้อภายใต้ความดันเป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลอง (รูปที่ 3.6) พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาของการไฮโดรไลซ์ต่าง ๆ กัน มีค่าเท่ากับ 178.75 215.98 267.14 332.26 372.18 377.96 375.75 และ 377.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาของการไฮโดรไลซ์ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 48 เป็นต้นไป ประสิทธิภาพการไฮโดรไลซ์ด้วย AMG เริ่มมีค่าคงที่ ค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 92-94 จากการทดลองยังพบอีกว่า เมื่อระยะเวลาของการไฮโดรไลซ์นานขึ้น ความเข้มสีของไฮโดรไลเซทมีค่าเพิ่มขึ้น

3.2.2.4 ผลกระทบของการทำลายและไม่ทำลายแอคติวิตี Termamyl ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย AMG แบ่งแป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทที่ได้จากวิธีทดลองข้อ 2.9.1 ออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ส่วนหนึ่งนำไปทำลายแอคติวิตีของ Termamyl ในเครื่องอบฆ่าเชื้อภายใต้ความดันเป็นเวลา 10 นาที ส่วนที่เหลือไม่ทำลายแอคติวิตี หลังจากนั้นทำการไฮโดรไลซ์ทั้งสองส่วนด้วย AMG โดยเติม AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ไฮโดรไลซ์ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลอง (ตารางที่ 3.2) พบว่าประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย AMG ซึ่งผ่านการทำลายและไม่ทำลายแอคติวิตี Termamyl ไม่มีความแตกต่างกัน ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 372.74 และ 371.55 ค่าสมมูลเดกซ์โทรสมีค่า 93 แต่เป็นที่น่าสังเกตจากการ



รูปที่ 3.6 ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ด้วย AMG ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 4.0-4.5 ปริมาณ AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส

- - - - น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

ตารางที่ 3.2 ผลกระทบของการทำลายและไม่ทำลายแอคติวิตี Termamyl ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลซ์เซทด้วย AMG

สภาวะการไฮโดรไลซ์[a]	น้ำตาลรีดิวซ์(มก./มล.)		ความเข้มของสี(ICUMSA color index)[b]	
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
ไม่ทำลายแอคติวิตี	74.62	371.55	625.34	764.60
ทำลายแอคติวิตี ; 10 นาที	74.62	372.74	712.52	912.53
ทำลายแอคติวิตี ; 15 นาที	74.62	373.16	736.16	975.78

[a] สภาวะการไฮโดรไลซ์ ; ใช้ AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

[b] ความเข้มของสีน้ำเชื่อม (ICUMSA color index) วัดตามวิธีในภาคผนวก ง

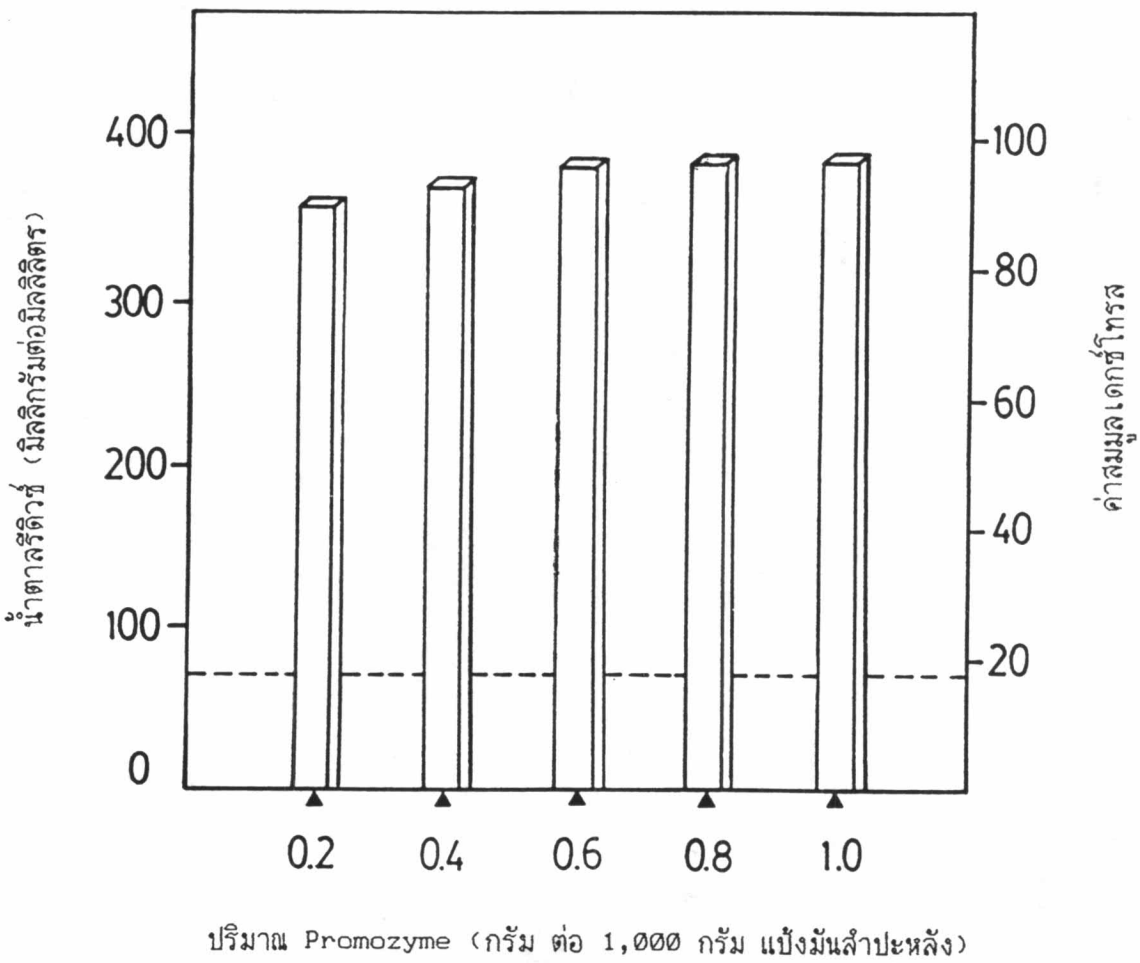
ทดลองพบว่า ไฮโดรไลเซทที่ได้มีความเข้มของสี แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

3.2.2.5 การเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย Promozyme ทำการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ตามวิธีทดลองข้อ 2.9.2 ยกเว้นมีการเติม AMG 1.3 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,ØØØ กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ร่วมกับ Promozyme โดยแปรค่าปริมาณ Promozyme ต่าง ๆ กัน คือ Ø.2 Ø.4 Ø.6 Ø.8 และ 1.Ø กรัม (Promozyme ต่อ 1,ØØØ กรัม แป้งมันสำปะหลัง) วัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่เกิดจากการไฮโดรไลซ์ ผลการทดลอง (รูปที่ 3.7) พบว่า การใช้ Promozyme ร่วมกับ AMG ในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ทำให้ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์สูงขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 364.65 38Ø.Ø8 385.7Ø 387.3Ø และ 388.24 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท ตามลำดับ ส่วนค่าสมมูลเดกซ์โทรสมีค่าอยู่ในช่วง 94-97 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง พบว่า การเติม Promozyme ร่วมกับ AMG ทำให้ประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซ์สูงขึ้น

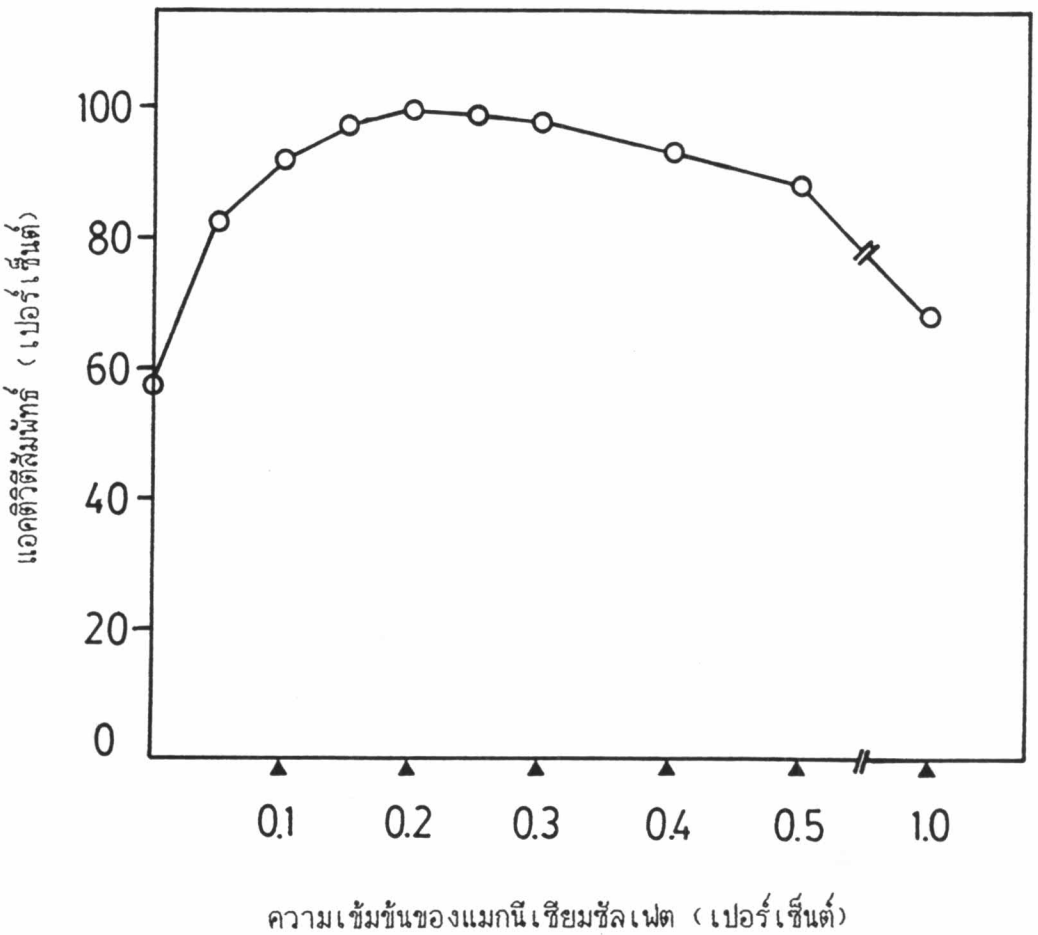
3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของ Sweetzyme T ในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส

3.3.1 ผลกระทบของความเข้มข้นแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4.7H_2O$) ต่อการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T

ทำการวัดแอคติวิตีของ Sweetzyme T ตามวิธีทดลองข้อ 2.1Ø ยกเว้นใช้สารละลายกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ตามวิธีทดลองข้อ 2.9.1 และ 2.9.2 ความเข้มข้น 4Ø เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 7.5 ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟตละลายอยู่ในช่วงความเข้มข้น Ø.1-1.Ø เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผลการทดลอง (รูปที่ 3.8) พบว่า ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟต มีผลกระทบต่อแอคติวิตีของ Sweetzyme T ถ้าหากมีแมกนีเซียมซัลเฟตละลายอยู่ในสารละลายกลูโคส Ø.Ø5-Ø.3 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้การทำงานของ Sweetzyme T สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ถ้าหากให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะไม่มีการลดลงของแอคติวิตี เมื่อเปรียบเทียบแอคติวิตีที่ไม่มีแมกนีเซียมซัลเฟต



<u>รูปที่ 3.7</u> ผลกระทบของการใช้ Promozyme ร่วมกับ AMG ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลัง 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 4.0-4.5 ปริมาณ AMG 1.3 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) อุณหภูมิของการไฮโดรไลซ์ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- - - - น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น



รูปที่ 3.8 ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4.7H_2O$) ต่อการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T

3.3.2 ผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_5$) ต่อการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T

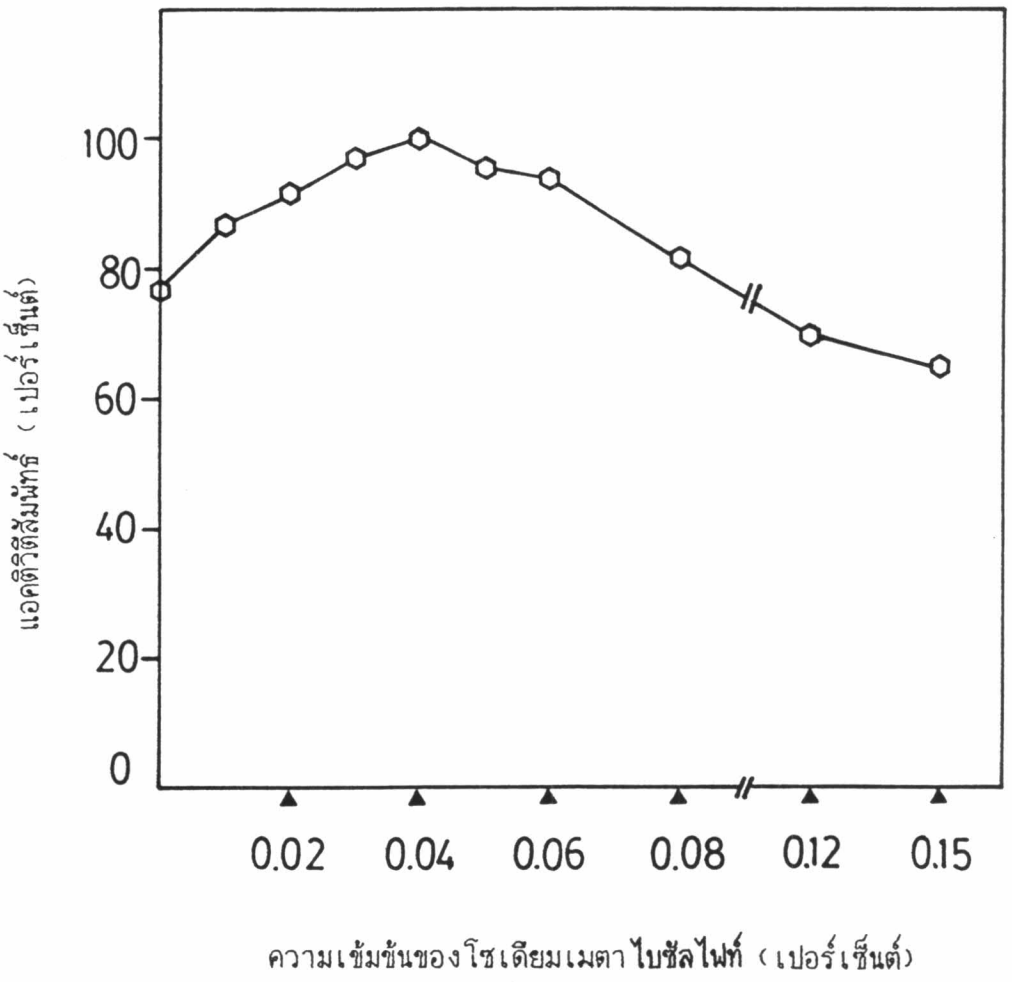
ทำการวัดแอคติวิตีของ Sweetzyme T ตามวิธีทดลองข้อ 2.10 ยกเว้นใช้สารละลายกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ตามวิธีทดลองข้อ 2.9.1 และ 2.9.2 ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 7.5 ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ละลายอยู่ในความเข้มข้น 0.01-0.15 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผลการทดลอง (รูปที่ 3.9) พบว่าโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ จะช่วยเพิ่มแอคติวิตีของ Sweetzyme T เช่นเดียวกับแมกนีเซียมซัลเฟต แต่ความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ที่ทำให้ Sweetzyme T มีแอคติวิตีสูงสุดค่อนข้างต่ำคือ ในช่วง 0.01-0.06 เปอร์เซ็นต์ และเป็นที่น่าสังเกตที่ความเข้มข้นโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์สูงขึ้น การเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T จะลดลง

3.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T

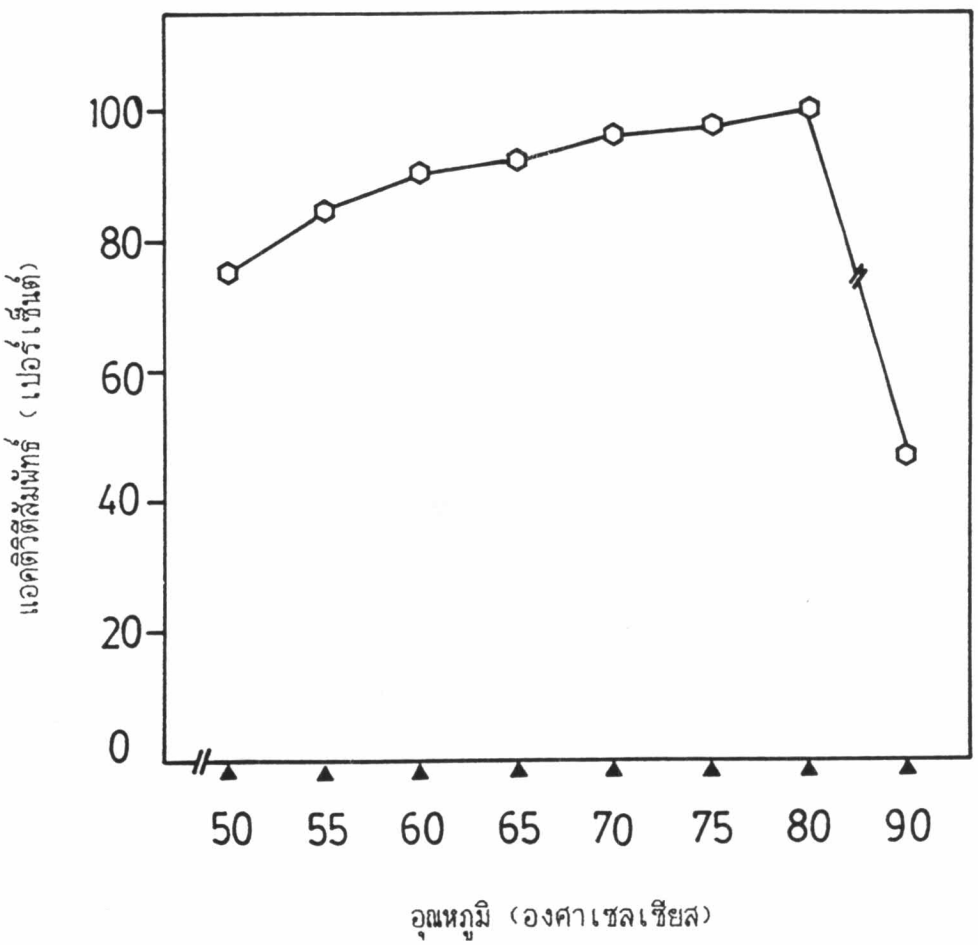
ทำการวัดแอคติวิตีของ Sweetzyme T ในสารละลายกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ พีเอช 7.5 ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทำปฏิกิริยาในอ่างเขย่าควบคุมอุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ 50 55 60 65 70 75 80 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง (รูปที่ 3.10) พบว่า Sweetzyme T สามารถเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (50-80 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะให้แอคติวิตีสัมพัทธ์สูงสุด หากอุณหภูมิที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาสูงหรือต่ำกว่านี้ แอคติวิตีของ Sweetzyme T จะลดลง

3.3.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเสถียรของ Sweetzyme T

บ่ม Sweetzyme T น้ำหนัก 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ในสารละลายกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พีเอช 7.5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.9 ผลกระทบของโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_5$) ต่อการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T



รูปที่ 3.10 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อแอคติวิตีของ Sweetzyme T

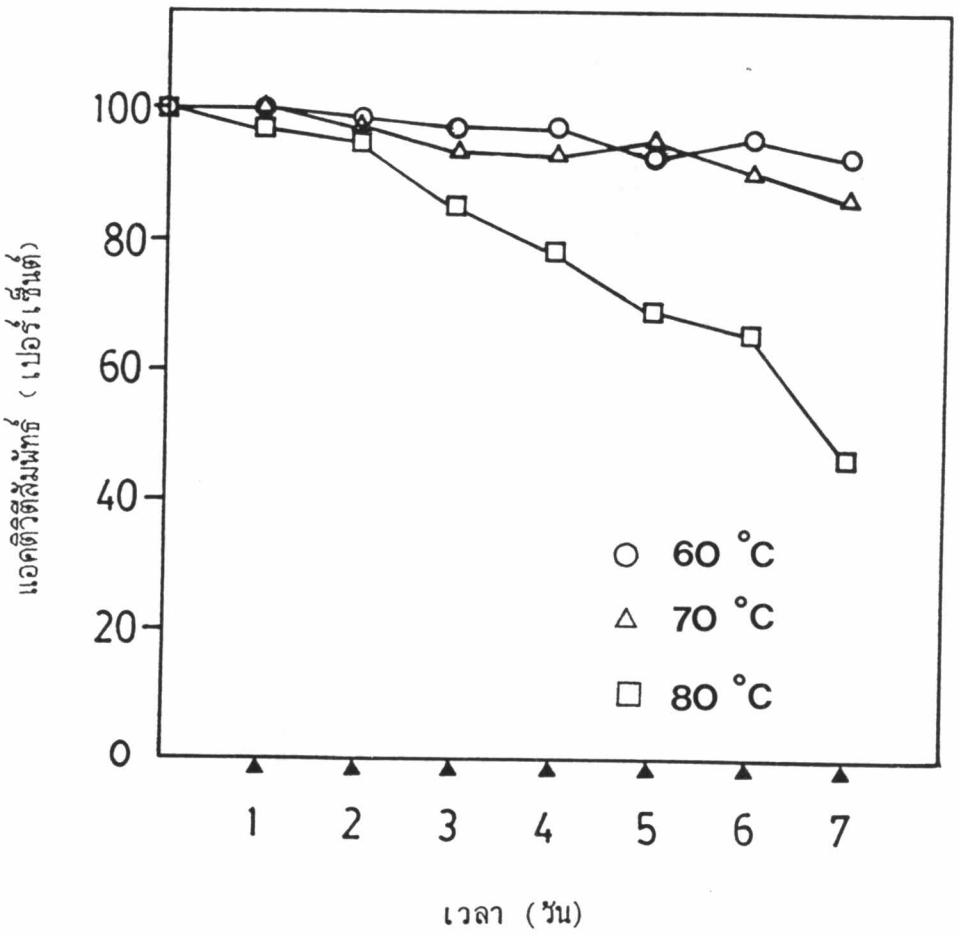
ทำการวัดแอคติวิตีของ Sweetzyme T ตามวิธีทดลองข้อ 2.10 ผลการทดลอง (รูปที่ 3.11) พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อความเสถียรของ Sweetzyme T ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส Sweetzyme T มีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง (80 องศาเซลเซียส) คือ มีแอคติวิตีสัมพัทธ์ 90-95 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิสูงแอคติวิตีลดลงอย่างรวดเร็ว

3.3.5 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส ต่อการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่น ด้วย Sweetzyme T

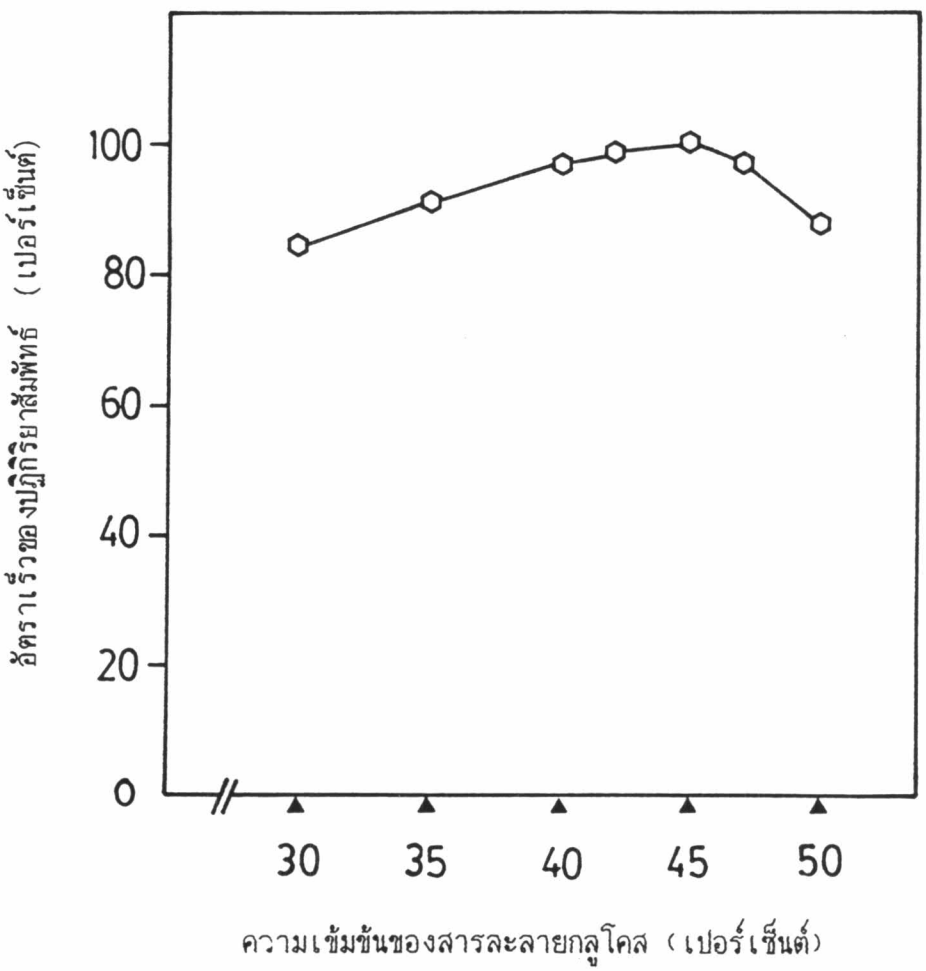
ศึกษาอัตราเร็วของการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นด้วย Sweetzyme T เมื่อใช้ Sweetzyme T น้ำหนัก 10 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อสารละลายกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตามวิธีทดลองข้อ 2.9.1 และ 2.9.2 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แปรค่าเข้มข้นของสารละลายกลูโคสในช่วง 30-50 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5-8.0 ทำปฏิกิริยาในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส วัดปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นและอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสต่าง ๆ กัน ผลการทดลอง (รูปที่ 3.12) พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) จะมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงสุด แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นกลูโคสมากหรือน้อยกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะลดลง

3.3.6 ผลกระทบของความเข้มข้นกลูโคสต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ในถังกวนแบบไม่ต่อเนื่อง

ศึกษาการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสแบบไม่ต่อเนื่องในถังกวนขนาด 250 มิลลิลิตร เมื่อใช้ Sweetzyme T น้ำหนัก 10 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อสารละลายกลูโคส ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการทดลองโดยแปรค่าความเข้มข้นของกลูโคสต่าง ๆ กัน คือ 35 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ควบคุมพีเอชของปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.0 ด้วย 5 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนต ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ใน



รูปที่ 3.11 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเสถียรของ Sweetzyme T



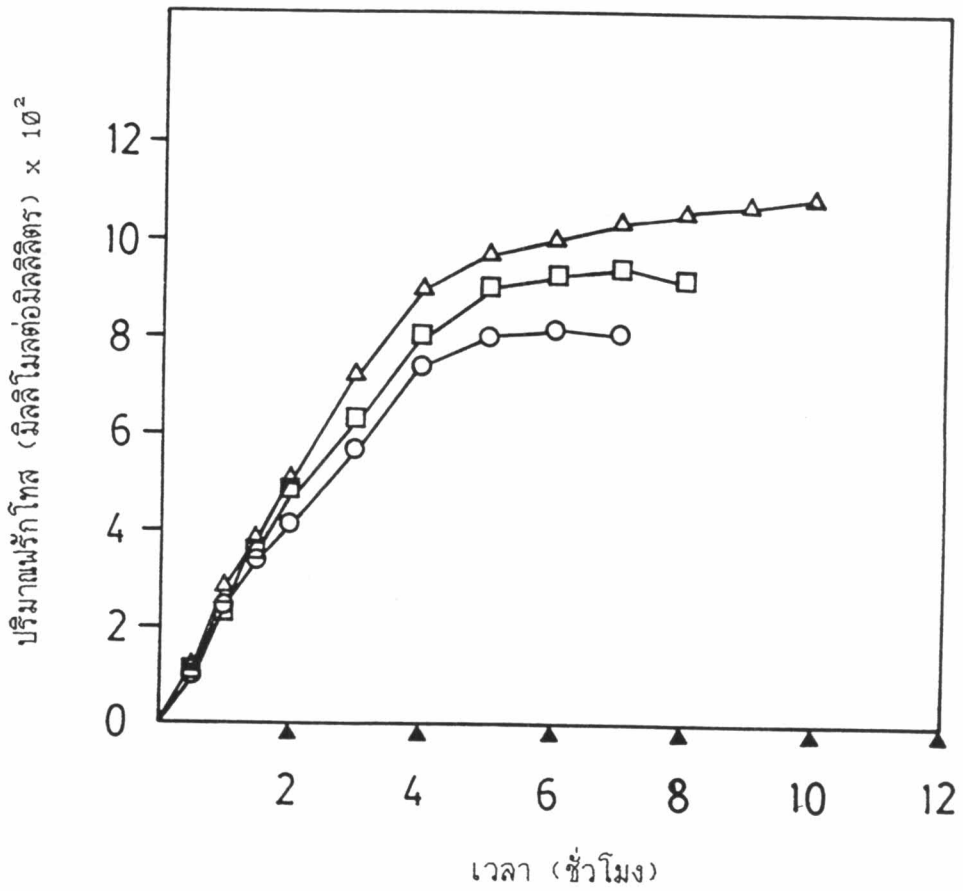
รูปที่ 3.12 ผลกระทบของความเข้มข้นกลูโคสต่ออัตราเร็วของการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่น ด้วย Sweetzyme T

การทำปฏิกิริยาผลการทดลอง (รูปที่ 3.13) พบว่า ที่ความเข้มข้นกลูโคส 35-45 เปอร์เซ็นต์ ปฏิกิริยาของกลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นจะให้ผลผลิตฟรักโทรสได้สูงถึง 43 เปอร์เซ็นต์ และเป็นที่น่าสังเกตจากผลการทดลอง ถึงแม้ว่าผลผลิตจะแตกต่างกันไปเมื่อใช้ความเข้มข้นของกลูโคสแตกต่างกันแต่รูปแบบอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของกลูโคส ที่ทุก ๆ ความเข้มข้นจะให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้นไม่แตกต่างกัน

3.4 ศึกษาการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์แพคเบด (packed bed reactor)

3.4.1 ผลกระทบของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสและความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส

นำ Sweetzyme T น้ำหนัก 16 กรัม (น้ำหนักแห้ง) บรรจุลงในหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด ป้อนสารละลายกลูโคสความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 35 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปรับพีเอชให้ได้พีเอช 7.5 โดยป้อนสารละลายกลูโคสเข้าทางด้านล่างของหอปฏิกรณ์ ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่า conversion (เปอร์เซ็นต์) ที่อัตราการป้อนและความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสต่าง ๆ กัน ผลการทดลอง (รูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15) พบว่า ปริมาณฟรักโทสที่เกิดจากปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นในหอปฏิกรณ์แพคเบดสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสสูงขึ้น และเมื่ออัตราการป้อนสูงขึ้นทำให้ conversion ลดลงที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) อัตราการป้อน 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นสูงสุดจะมี conversion เท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์ และมีเวลาสเปซเท่ากับ 120 นาที

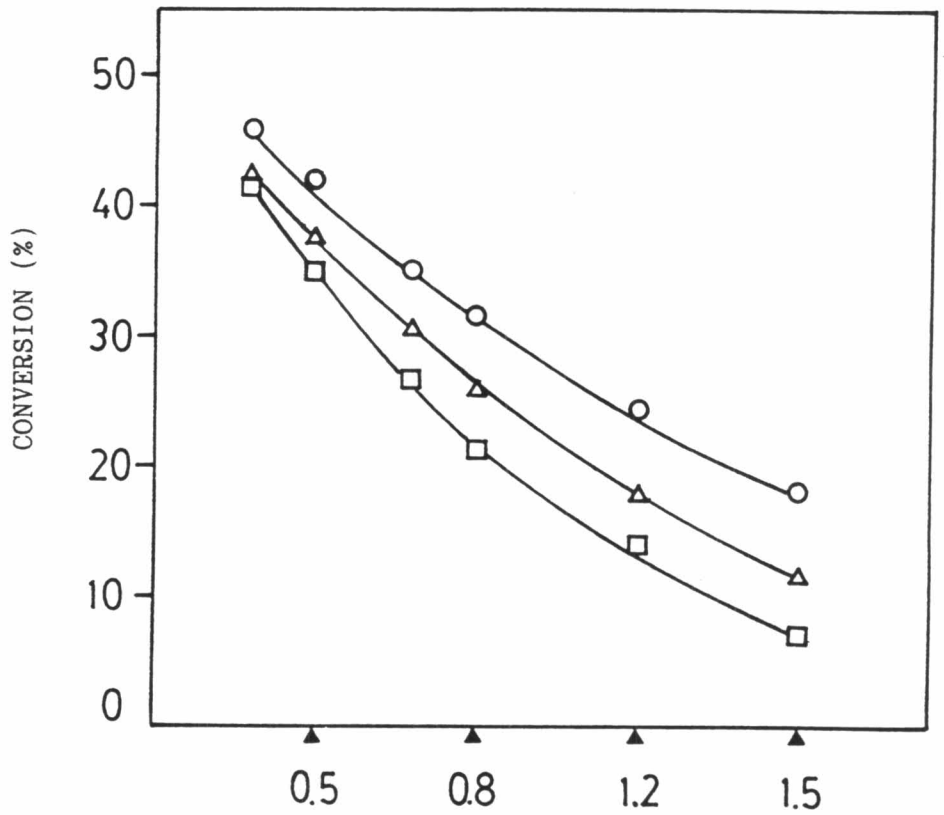


รูปที่ 3.13 ผลกระทบของความเข้มข้นกลูโคส ต่อการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่น ด้วย Sweetzyme T ในถังกวนแบบไม่ต่อเนื่อง ขนาด 250 มิลลิลิตร ใช้ Sweetzyme T น้ำหนัก 10 กรัม ควบคุมพีเอชสารละลายกลูโคสให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.0 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

○ 35 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)

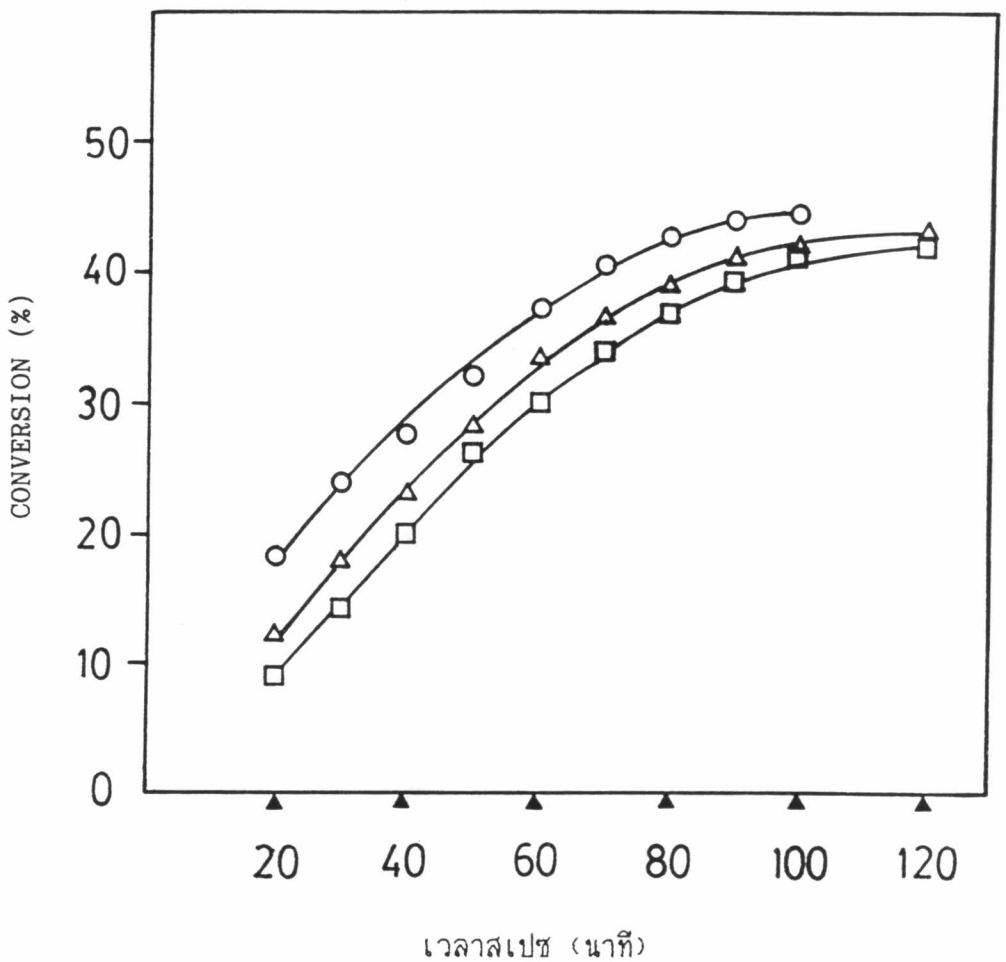
□ 40 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)

△ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของ conversion (เปอร์เซ็นต์) กับอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส ในหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด ปริมาตรเบดบรรจุ 27.5 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสต่าง ๆ กัน พีเอช 7.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

- ○ สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์
- △ สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์
- □ สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 45 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของ conversion(เปอร์เซ็นต์) กับเวลาสเปซในหอปฏิกรณ์แบบแพคเบด ปริมาตรเบดบรรจุ 27.5 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสต่าง ๆ กัน พีเอช 7.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

○ สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์

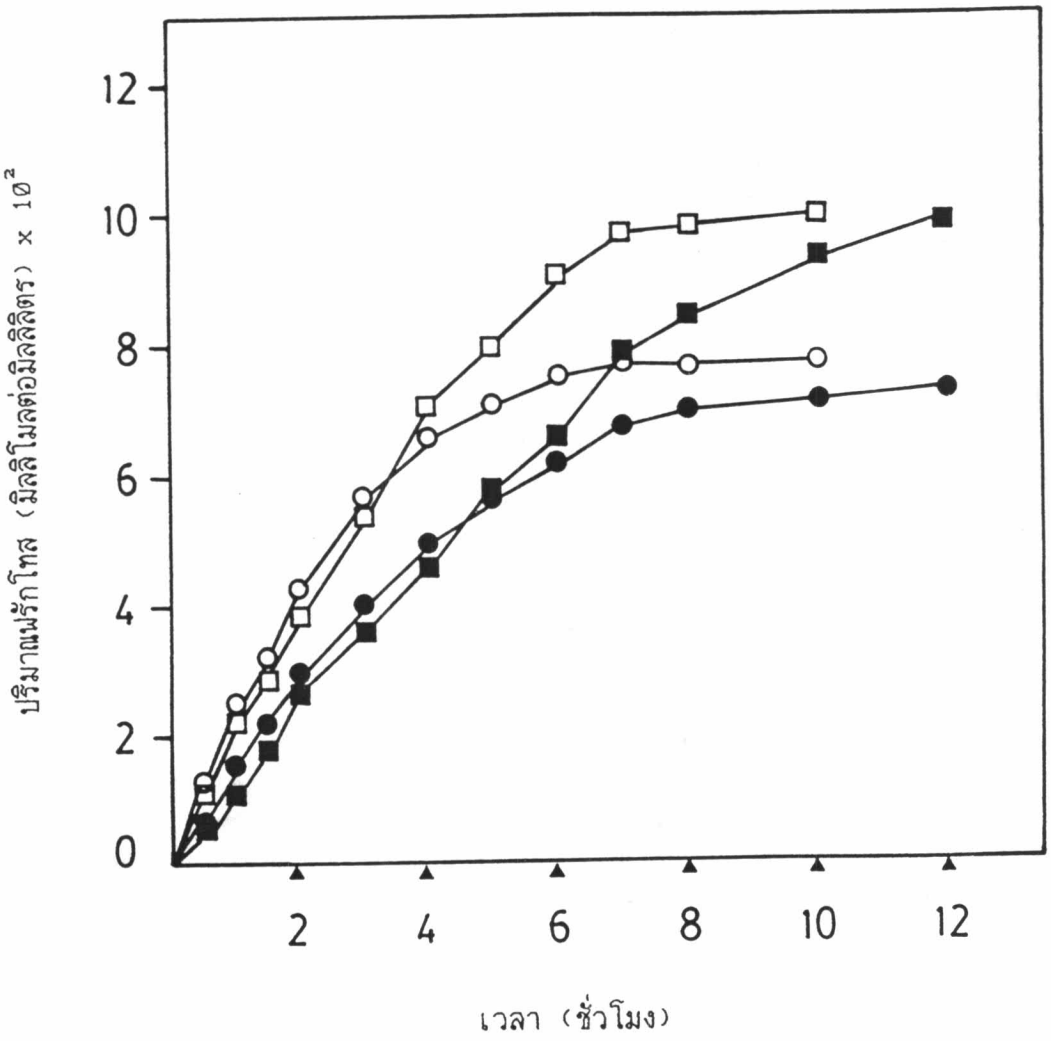
△ สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์

□ สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 45 เปอร์เซ็นต์

3.5 ศึกษาการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด (fluidized bed reactor)

3.5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการผลิตฟรักโทสและอัตราเร็วของปฏิกิริยา ในหอปฏิกรณ์ฟลูไดซ์เบด แบบไม่ต่อเนื่อง

ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นด้วย Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด เมื่อใช้ Sweetzyme T น้ำหนัก 120 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ความเข้มข้นกลูโคส 35 และ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) อัตราการให้อากาศ 1.5-2.0 ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8.0 ด้วย 5 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนต ทำการทดลองเร่งปฏิกิริยาการผลิตเมื่อแปรค่าอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยาต่างกันคือ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นและอัตราเร็วของปฏิกิริยา ผลการทดลอง (รูปที่ 3.16) พบว่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นเกิดขึ้นได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยที่จะทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ช้าลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามปริมาณฟรักโทสสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันทั้งสองอุณหภูมิ ซึ่งเห็นได้ชัดทั้งที่ความเข้มข้นกลูโคส 35 และ 45 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นกลูโคส 35 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละอุณหภูมิของการเร่งปฏิกิริยา เป็นที่น่าสนใจพบว่า ในแต่ละอุณหภูมิจะให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเท่ากัน เช่น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.016-0.018 มิลลิโมลต่อกรัมSweetzyme T ต่อนาที ทั้งสองความเข้มข้นกูลโคสที่ศึกษา ซึ่งผลการทดลองได้ผลทำนองเดียวกับการใช้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส



<u>รูปที่ 3.16</u> ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่น เพื่อใช้ผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แบบไม่ต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความเข้มข้นของกลูโคสเท่ากับ 35 และ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 120 กรัม (น้ำหนักแห้ง) อัตราการให้อากาศ 1.5-2.0 ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.5

● 35 % กลูโคส, 50 °ซ ○ 35 % กลูโคส, 60 °ซ

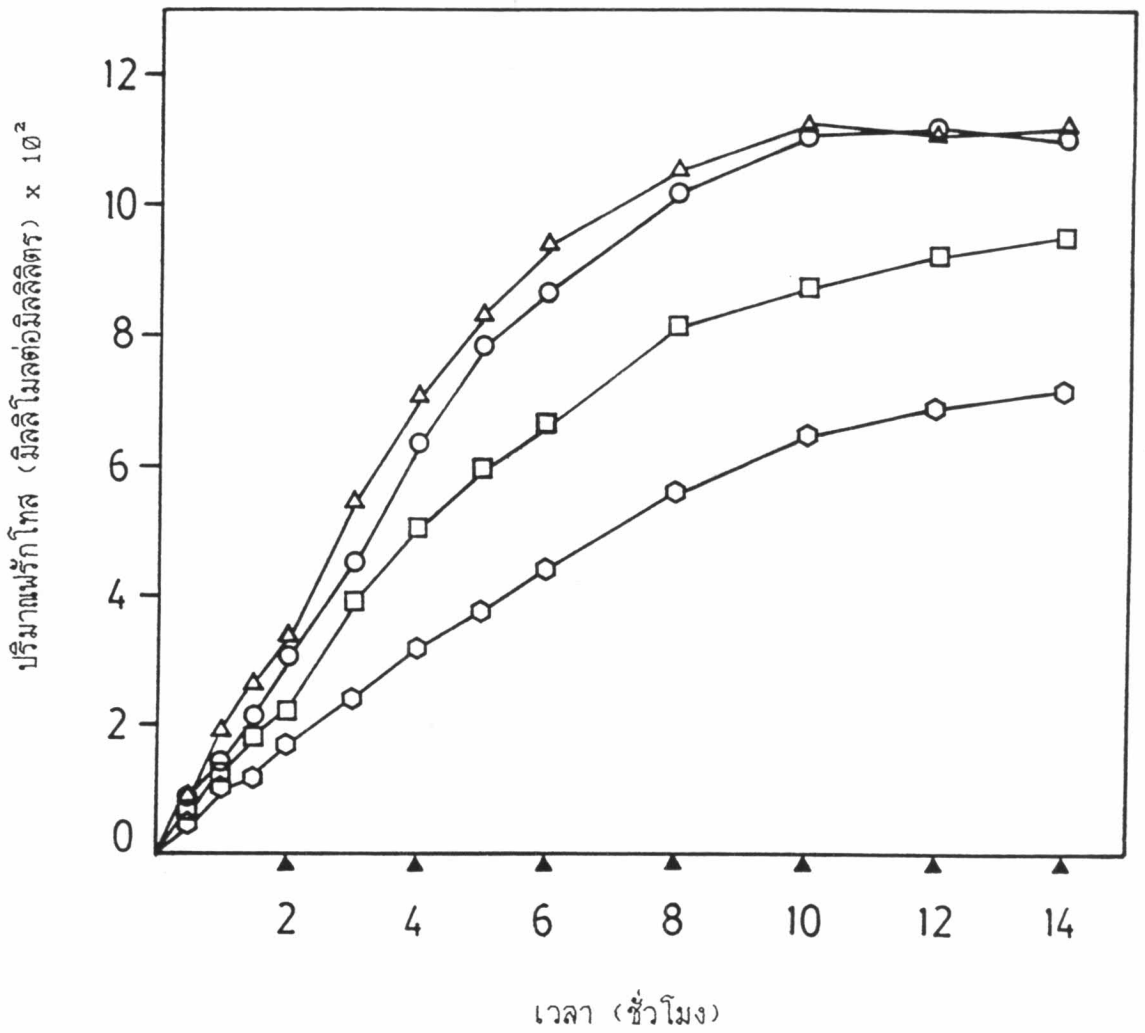
■ 45 % กลูโคส, 50 °ซ □ 45 % กลูโคส, 60 °ซ

3.5.2 ผลกระทบของปริมาณ Sweetzyme T ต่อการผลิตฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

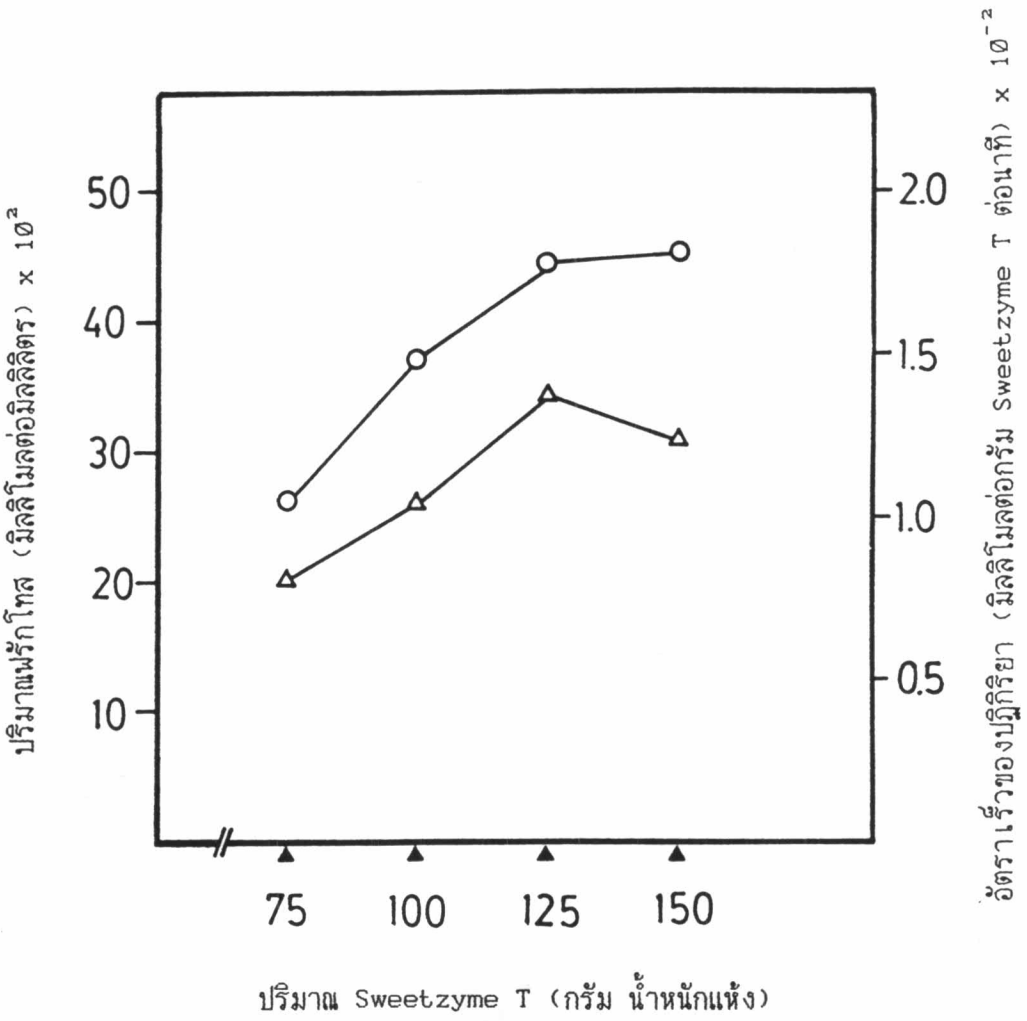
ศึกษาการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส และอัตราเร็วของปฏิกิริยาในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ขนาด 1.5 ลิตร เมื่อใช้ความเข้มข้นกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มี Ø.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ Ø.Ø4 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 6Ø มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการให้อากาศ 1.5-2.Ø ลิตรต่อนาที ทำการทดลองแปรค่าปริมาณ Sweetzyme T ในช่วง 75-15Ø กรัม (น้ำหนักแห้ง) ให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 6Ø องศาเซลเซียส ควบคุมพีเอชให้อยู่ช่วง 7.5-8.Ø ด้วย 5 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนต ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นและอัตราเร็วของปฏิกิริยาในระหว่างการทดลอง ผลการทดลอง (รูปที่ 3.17) พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นในหอปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Sweetzyme T ที่ใช้ ซึ่งมีผลช่วยให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ได้เร็วยิ่งขึ้น การใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 125-15Ø กรัม (น้ำหนักแห้ง) จะทำให้ผลผลิตฟรักโทสสูงที่สุด (conversion 45 เปอร์เซ็นต์) ถ้าหากปริมาณ Sweetzyme T ที่ใช้น้อยลงจะทำให้ผลผลิตลดลง (รูปที่ 3.18) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของ ปฏิกิริยาและผลผลิตฟรักโทสที่ได้ เปรียบเทียบกับปริมาณ Sweetzyme T ที่ใช้ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ปริมาณ Sweetzyme T ที่ทำให้ผลผลิตสูงสุดคือ 125-15Ø กรัม หากใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้อยกว่า 125 กรัม ผลผลิตฟรักโทสที่ได้น้อยลง สำหรับการใช้ Sweetzyme T มากกว่า 125 กรัม แนวโน้มของอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะค่อย ๆ ลดลง ไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของปริมาณ Sweetzyme T ที่เพิ่มขึ้น

3.5.3 ผลกระทบของความเข้มข้นกลูโคสต่อการผลิตฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

แปรค่าความเข้มข้นกลูโคสในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสต่าง ๆ กันคือ 3Ø 35 4Ø และ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต Ø.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ Ø.Ø4 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) อัตราการป้อนกลูโคส 6Ø มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการให้อากาศ 1.5-2.Ø ลิตรต่อนาที ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 6Ø



รูปที่ 3.17 ผลกระทบของปริมาณ Sweetzyme T ต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด โดยแปรค่าปริมาณ Sweetzyme T ต่าง ๆ กันคือ 75 (⬡) 100 (□) 125 (○) และ 150 (△) กรัม (น้ำหนักแห้ง) เมื่อใช้ความเข้มข้นกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมพีเอชอยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.0 อัตราการให้อากาศ 1.5-2.0 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนกลูโคส 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา (Δ) และปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นสูงสุด (○) กับปริมาณของ Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

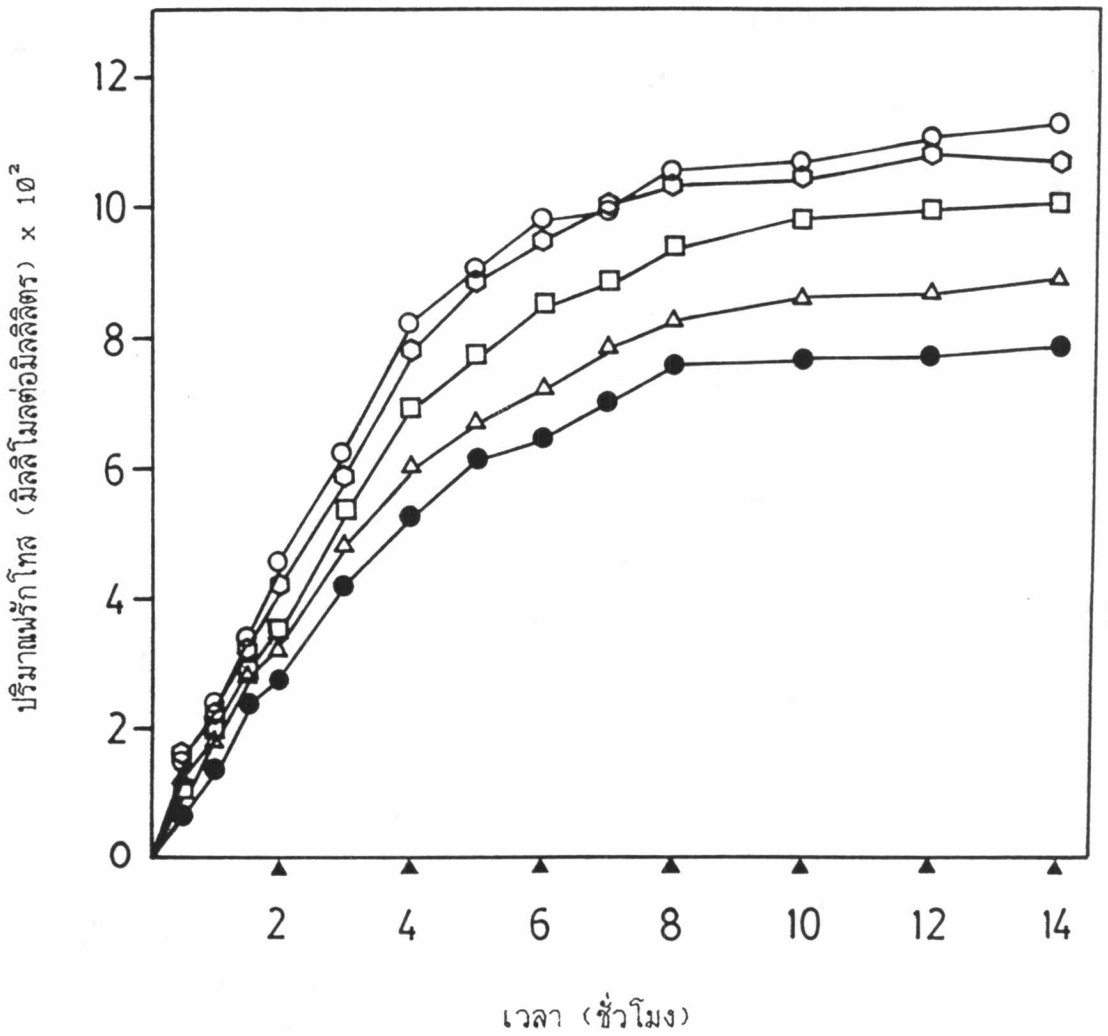
องศาเซลเซียส ควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.0 ด้วย 5 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนต ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นที่ปฏิกิริยาเวลาต่าง ๆ กัน ผลการทดลอง (รูปที่ 3.19) พบว่า ปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นในหอปฏิกรณ์แปรค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่ใช้ โดยปริมาณฟรักโทสสูงสุดเท่ากับ 7.62×10^{2} 8.78×10^{2} 9.96×10^{2} และ 11.14×10^{2} (มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร) ตามลำดับ ปริมาณฟรักโทสเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ใช้เวลาแตกต่างกันด้วย แต่อัตราเร็วของปฏิกิริยาการเกิดฟรักโทสมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 1.45×10^{-2}-1.48×10^{-2} มิลลิโมลต่อกรัม Sweetzyme T ต่อนาที ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.18

3.5.4 ผลกระทบของอัตราการป้อนกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส

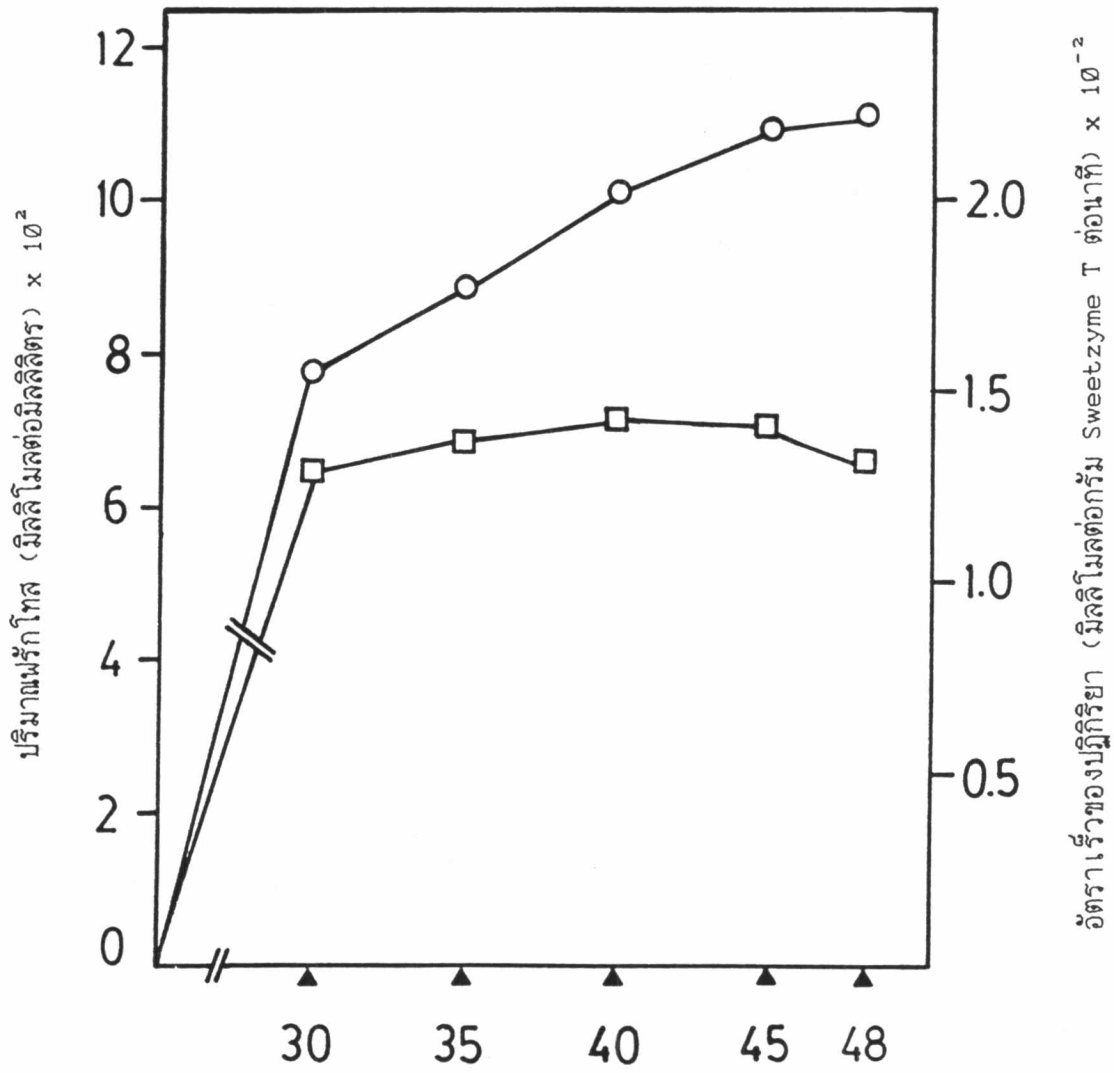
เมื่อใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ความเข้มข้นของกลูโคสเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์(โดยน้ำหนัก)ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ แปรค่าอัตราการป้อนกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์เท่ากับ 60 120 180 240 และ 300 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการให้อากาศ 1.5-2.0 ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.0 ด้วย 5 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนต ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นที่เวลาปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ผลการทดลอง (รูปที่ 3.20) พบว่า เมื่อแปรค่าอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าลดลง(11.24×10^{2} 9.71×10^{2} 8.18×10^{2} 6.25×10^{2} และ 5.49×10^{2} มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเกิดฟรักโทสมีค่าแตกต่างกันคือ 1.49×10^{-2} 1.41×10^{-2} 1.31×10^{-2} 1.16×10^{-2} และ 0.90×10^{-2} มิลลิโมลต่อกรัม Sweetzyme T ต่อนาที ตามลำดับ

3.5.5 ผลกระทบของอัตราการให้อากาศเข้าสู่หอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส

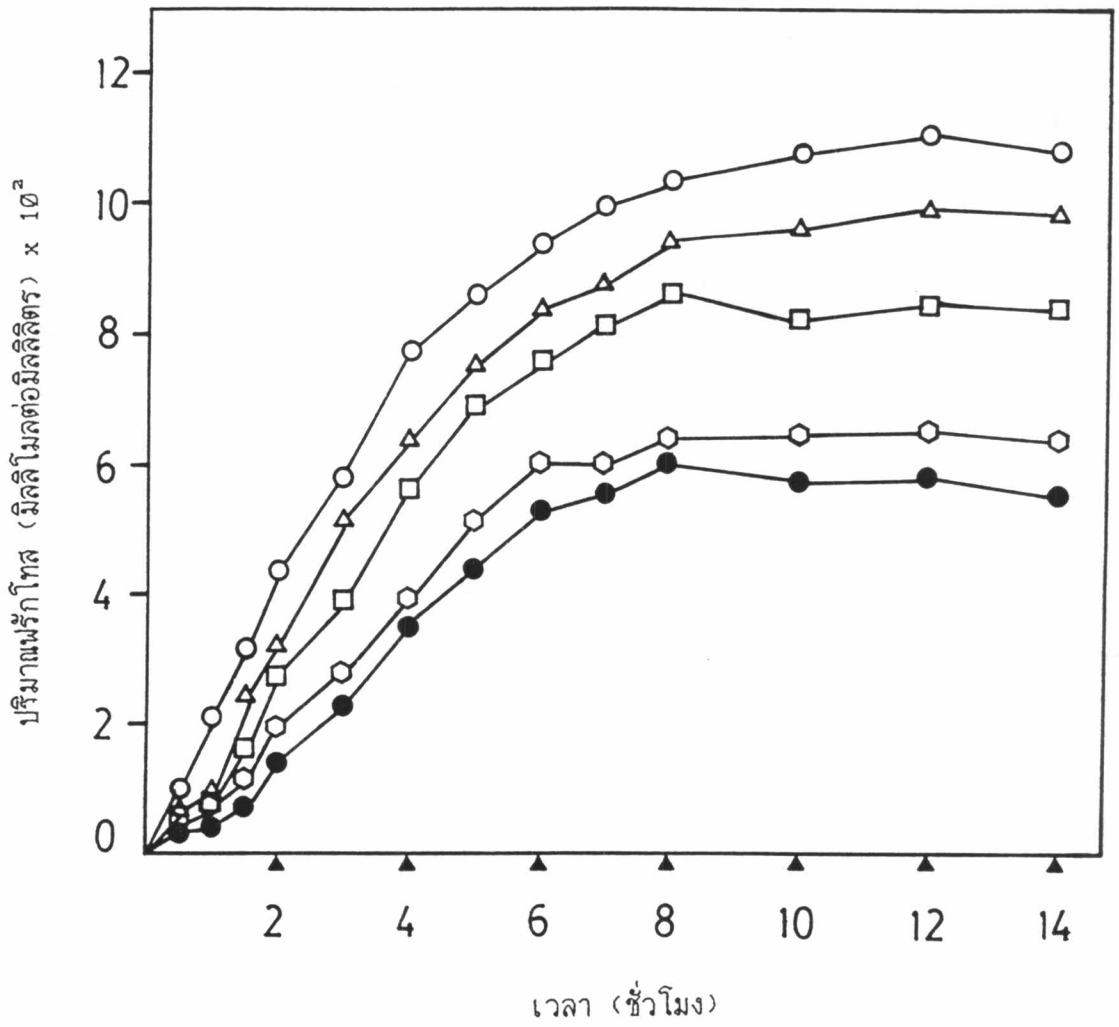
เมื่อใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ความเข้มข้นของกลูโคสเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์(โดยน้ำหนัก)ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อน



รูปที่ 3.19 ผลกระทบของความเข้มข้นกลูโคสต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด โดยใช้ปริมาณ Sweetzyme T 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) แปรค่าความเข้มข้นกลูโคสต่าง ๆ กันคือ 30 (●) 35 (△) 40 (□) 45 (⬡) และ 48 (○) เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมพีเอช 7.5-8.0 อัตราการให้อากาศ 1.5-2.0 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนกลูโคส 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา (□) และปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นสูงสุด (○) กับความเข้มข้นของกลูโคสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

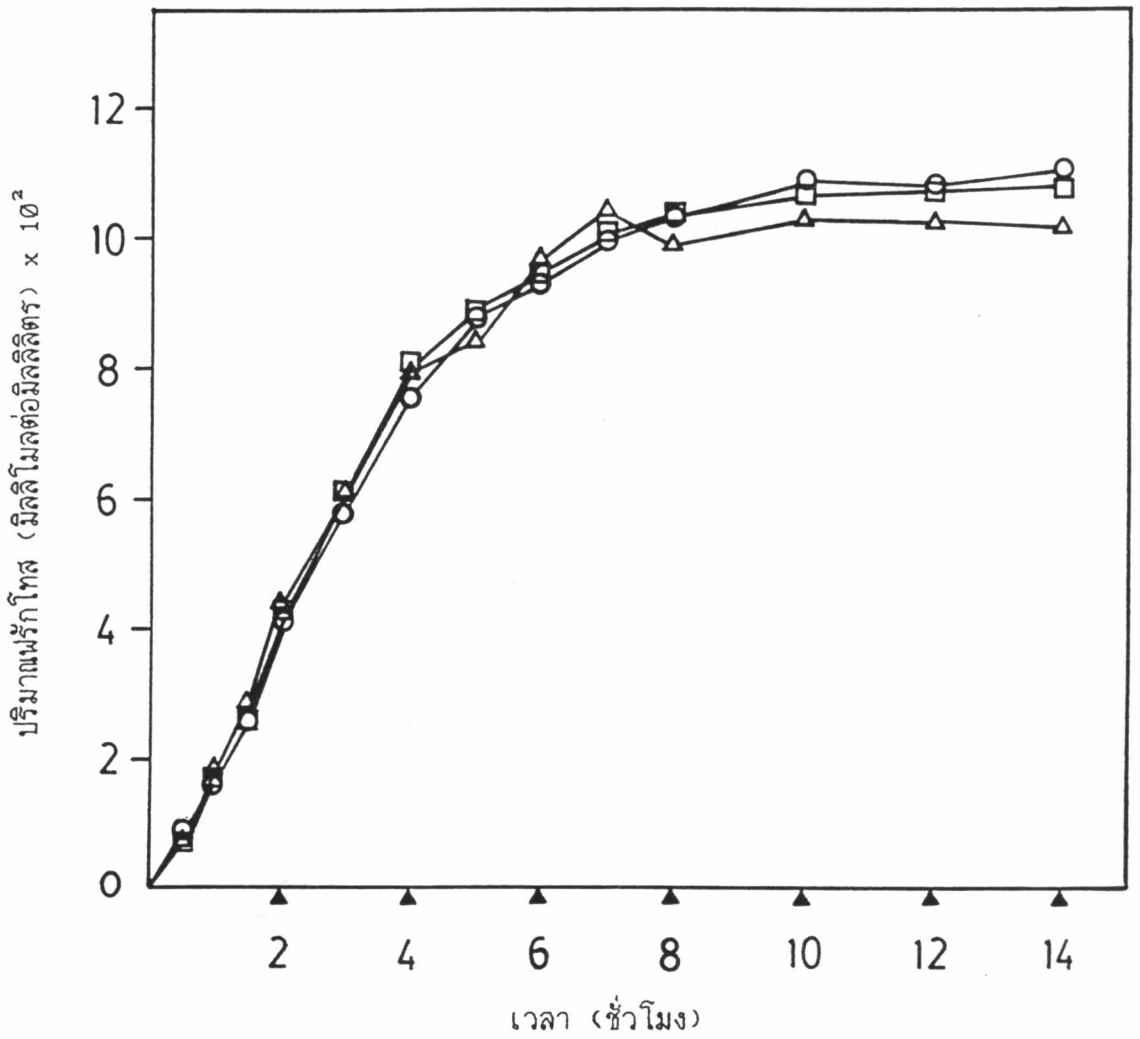


<u>รูปที่ 3.21</u> ผลกระทบของอัตราการป้อนกลูโคส เข้าสู่หอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ต่อผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ใช้ปริมาณ Sweetzyme T 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ความเข้มข้นกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมพีเอช 7.5-8.0 แปรค่าอัตราการป้อนกลูโคสต่าง ๆ กัน คือ 60 (○) 120 (△) 180 (□) 240 (⬡) และ 300 (●) มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการให้อากาศ 1.5-2.0 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

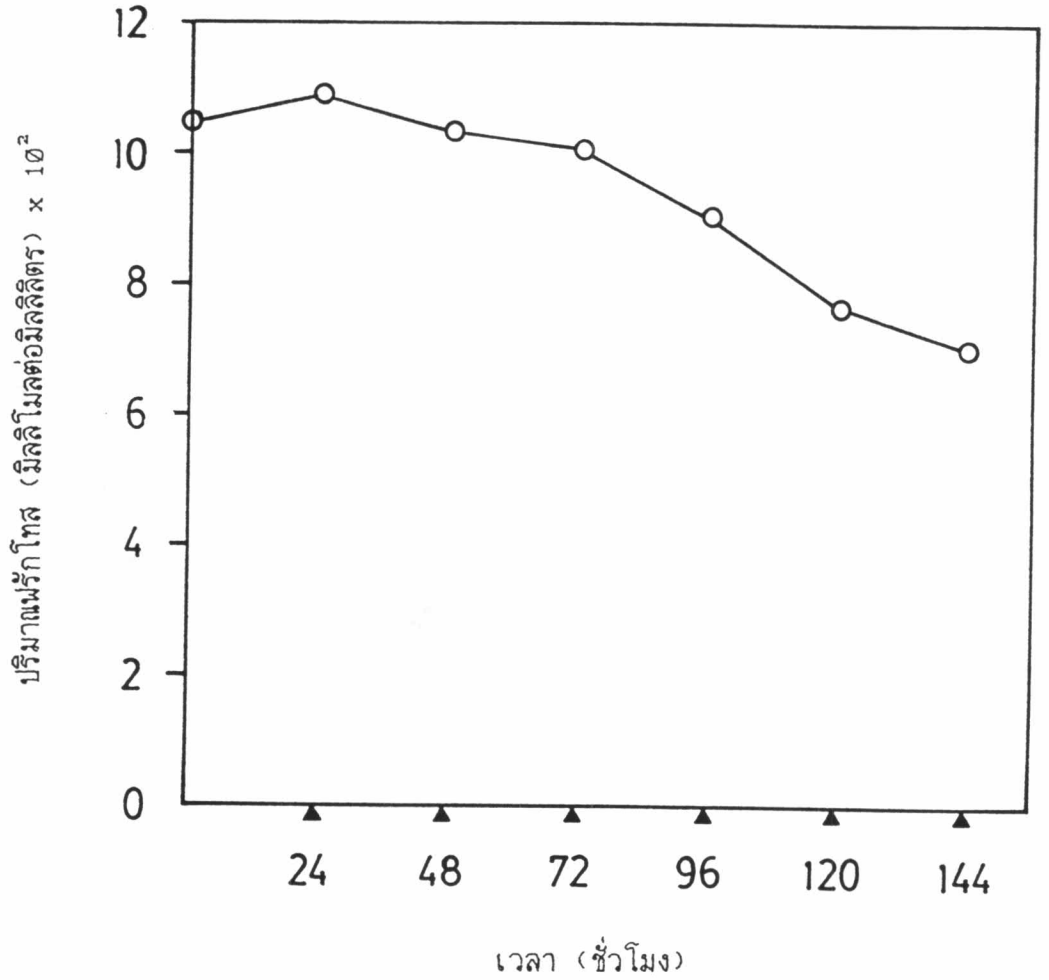
กลูโคส 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง แปรค่าอัตราการให้อากาศเข้าสู่หอปฏิกรณ์เท่ากับ 1.25-1.50 2.0-2.5 และ 3-4 ลิตรต่อนาที ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอชด้วย 5 มิลลิโมลาร์ โซเดียมไบคาร์บอเนต ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นที่ปฏิกิริยาเวลาต่าง ๆ กัน ผลการทดลอง (รูปที่ 3.22) พบว่า ที่อัตราการให้อากาศ 1.25-1.50 และ 2.0-2.5 ไม่พบความแตกต่างกันของผลผลิต ปริมาณฟรักโทสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 11.31 x 10^2 และ 11.16 x 10^2 มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร แต่จะพบว่าถ้าใช้อัตราการให้อากาศ 3-4 ลิตรต่อนาที มีแนวโน้มว่าปริมาณฟรักโทสจะลดลง

3.5.6 <u>ความเสถียรของ Sweetzyme T ต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด</u>

นำ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ความเข้มข้นของกลูโคสเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อนกลูโคสเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการให้อากาศเท่ากับ 1.25-1.5 ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอชของปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วง 7.5-8.0 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ติดตามปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นในหอปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน ผลการทดลอง (รูปที่ 3.23) พบว่า ปริมาณฟรักโทสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 11.24 x 10^2 มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร ในช่วง 3 วันแรก ของการทดลอง หลังจากนั้นปริมาณฟรักโทสมีแนวโน้มลดลง เหลือเพียง 7.37 x 10^2 มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร ในวันที่ 6 ของการผลิต เป็นที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งพบว่า เม็ด Sweetzyme T จะมีการผุกร่อนเพิ่มขึ้นแปรตามเวลาของการผลิตในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด



<u>รูปที่ 3.22</u> ผลกระทบของอัตราการให้อากาศเข้าสู่หอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ต่อผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส เมื่อใช้ปริมาณ Sweetzyme T 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ความเข้มข้นกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต 0.2 เปอร์เซ็นต์ เสริมด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 0.04 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อนกลูโคสเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง แปรค่าอัตราการให้อากาศเท่ากับ 1.25-1.5 (○) 2.0-2.5 (□) และ 3.0-4.0 (△) ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอช 7.5-8.0 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.23 แสดงความเสถียรของการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด เมื่อใช้ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ความเข้มข้นกลูโคสเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) อัตราการป้อนกูลโคสเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้อากาศเท่ากับ 1.25-1.50 ลิตรต่อนาที พีเอช 7.5-8.0 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 วัน

3.6 การพัฒนาการผลิตสารละลายกลูโคสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบไม่ต่อเนื่อง

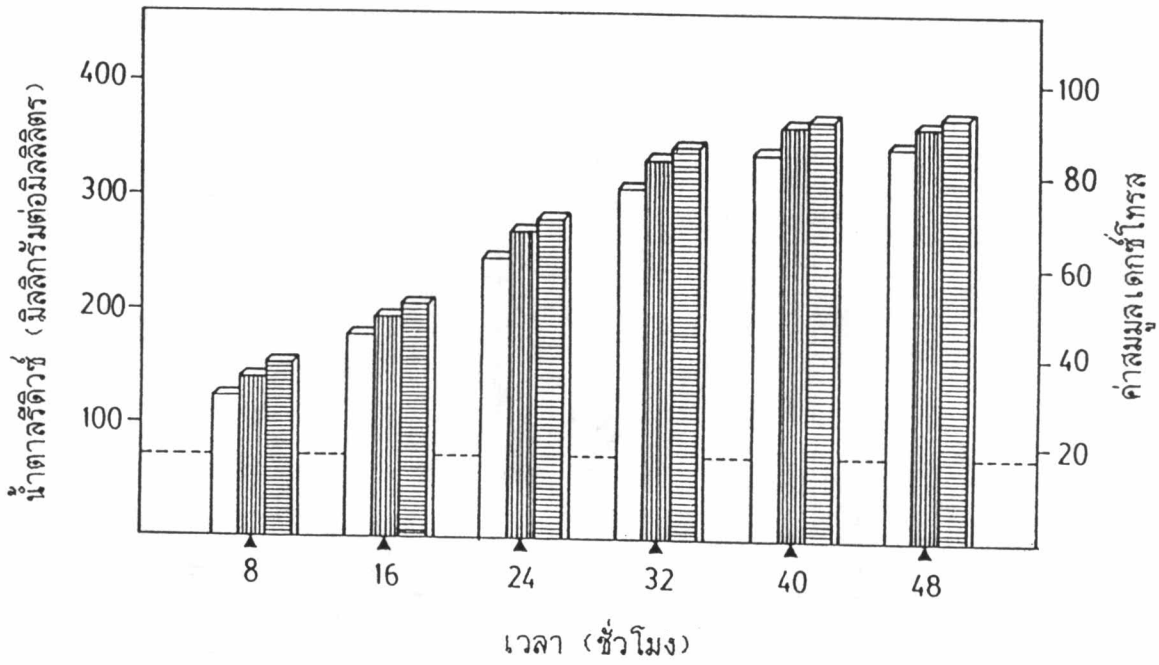
เนื่องจากงานวิจัยนี้ เริ่มต้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส การทดลองทำในระดับขวดเขย่าขนาด 500 มิลลิลิตร ทำให้ได้ปริมาณสารละลายกลูโคสไม่เพียงพอต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ดังนั้นจึงทำการศึกษาพัฒนาการผลิตสารละลายกลูโคส ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ขนาด 1.50 ลิตร แบบไม่ต่อเนื่อง

3.6.1 ผลกระทบของปริมาณ AMG ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แบบไม่ต่อเนื่อง

ทำการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ที่ได้จากการทดลองข้อ 2.9.1 ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ปริมาตร 1,200 มิลลิลิตร แปรค่าปริมาณ AMG ต่าง ๆ กันคือ 1.5 1.8 และ 2.0 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) อัตราการให้อากาศเท่ากับ 2.0-3.0 ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอชของปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วงพีเอช 4.0-4.5 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส วัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และค่าสมมูลเดกซ์โทรส ที่เวลาต่าง ๆ ที่ทำปฏิกิริยา ผลการทดลอง (รูปที่ 3.24) พบว่าประสิทธิภาพการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทในหอฟลูอิไดซ์เบดเร็วกว่าในขวดเขย่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์เท่ากับ 375.30 383.46 และ 384.09 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรไฮโดรไลเซท และค่าสมมูลเดกซ์โทรสอยู่ในช่วง 94-96 ซึ่งเวลาของการไฮโดรไลซ์ที่ทำให้ปฏิกิริยาเริ่มคงที่ในชั่วโมงที่ 40

3.6.2 ผลกระทบของการใช้ AMG ร่วมกับ Promozyme ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แบบไม่ต่อเนื่อง

ไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ปริมาตร 1,200 มิลลิลิตร เติม AMG 1.3 มิลลิลิตร(AMG ต่อ 1,000 กรัมแป้งมันสำปะหลัง) ร่วมกับ Promozyme ซึ่งแปรค่าต่างกันคือ 0.2 0.4 และ 0.6 กรัม (Promozyme ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) อัตราการให้อากาศเท่ากับ 2.0-3.0 ลิตรต่อนาที ควบคุมพีเอชของปฏิกิริยาอยู่ในช่วงพีเอช 4.0-4.5 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส วัด



<u>รูปที่ 3.24</u> ผลกระทบของปริมาณ AMG ต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซท ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด อัตราการให้อากาศเท่ากับ 2.0-3.0 ลิตรต่อนาที พีเอช 4.0-4.5 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

□ ปริมาณ AMG 1.5 (มิลลิลิตรต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง)

▥ ปริมาณ AMG 1.8 (มิลลิลิตรต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง)

▤ ปริมาณ AMG 2.0 (มิลลิลิตรต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง)

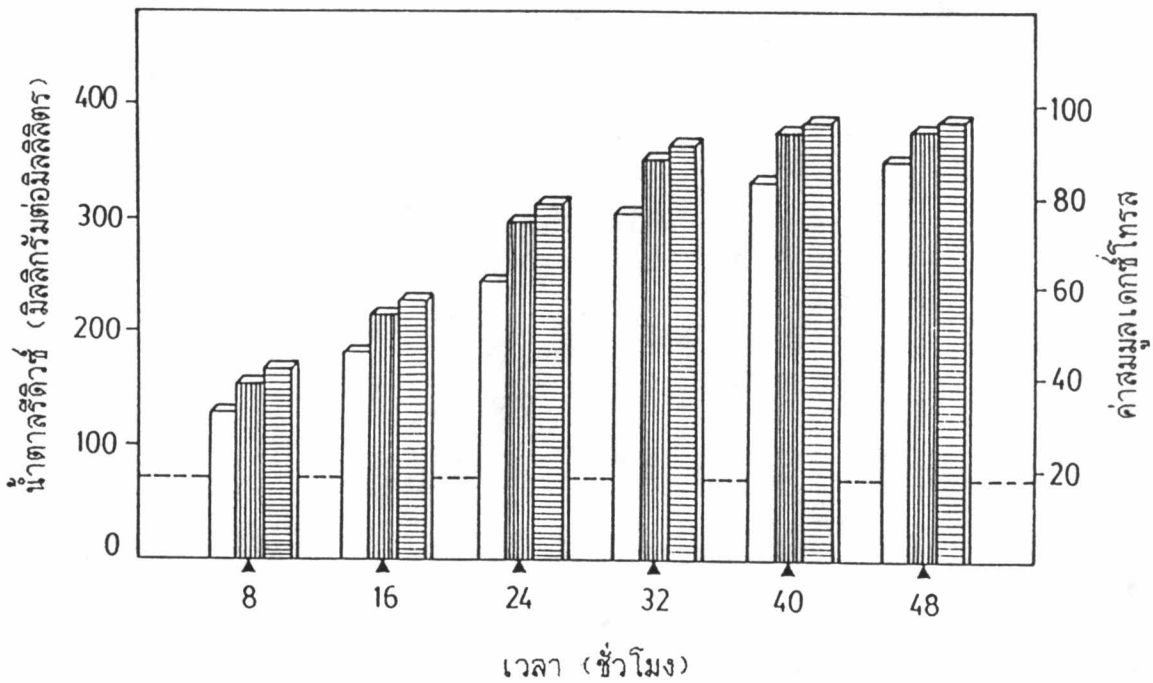
- - - - น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และค่าสมมูลเดกซ์โทรส ที่เวลาต่าง ๆ ที่ทำปฏิกิริยา ผลการทดลอง(รูปที่ 3.25) พบว่า การใช้ Promozyme ร่วมกับ AMG เพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ในหอปฏิกรณ์**ฟลูอิไดซ์เบด** สามารถเพิ่มผลผลิตของน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าใช้ AMG เพียงอย่างเดียว ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 376.21 391.64 และ 392.36 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ได้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูงถึง 98

3.7 <u>การตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมี วัตถุเจือปน และสารปนเปื้อนในน้ำเชื่อมฟรักโทสที่ผลิตได้ในหอปฏิกรณ์แพคเบดและ**ฟลูอิไดซ์เบด**</u>

นำน้ำเชื่อมฟรักโทสที่ผลิตได้ กรองเอาตะกอน Sweetzyme T ออก ทำการฟอกสีโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon) กำจัดอิออนต่าง ๆ ออกโดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุเรซินชนิดแลกเปลี่ยนประจุบวกและลบ (anion-cation exchager resin ; Dowex 88, 66) ทำให้เข้มข้นในเครื่องระเหยภายใต้สูญญากาศ

จากการตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมี วัตถุเจือปน และสารปนเปื้อน ตามวิธีทดลองใน มอก.56-2516 และ มอก.268-2521 (ภาคผนวก จ และ ช) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4



<u>รูปที่ 3.25</u> ผลกระทบของปริมาณ AMG ร่วมกับ Promozyme ต่อการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด เมื่อใช้ AMG 1.3 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) อัตราการให้อากาศเท่ากับ 2.0-3.0 ลิตรต่อนาที พีเอช 4.0-4.5 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

□ ปริมาณ Promozyme 0.2 (กรัม 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง)

▥ ปริมาณ Promozyme 0.4 (กรัม 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง)

▤ ปริมาณ Promozyme 0.6 (กรัม 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง)

- - - - น้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะทางเคมีของน้ำเชื่อมฟรักโทรส

คุณลักษณะทางเคมี	เปอร์เซ็นต์
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (โดยน้ำหนัก)	71.0 ± 0.5
ฟรักโทส (ไม่น้อยกว่า)	42
กลูโคส + ฟรักโทส (ไม่น้อยกว่า)	94
โอลิโกแซคคาร์ไรด์ (น้อยกว่า)	6
เถ้าซัลเฟต (น้ำหนักแห้ง)	0.37 ± 0.03
สี, ICUMSA color index (น้อยกว่า)	200
pH	4.5 - 4.7

ตารางที่ 3.4 ปริมาณวัตถุเจือปน และสารปนเปื้อนในน้ำเชื่อมฟรักโทส

วัตถุเจือปนและสารปนเปื้อน	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำเชื่อม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	28-36
อาร์เซนิก (As)	น้อยกว่า 1
ทองแดง (Cu)	น้อยกว่า 5
ตะกั่ว (Pb)	น้อยกว่า 2