บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 การย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด

ทำการทดลองย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดซัลฟิวรัส กรดออกซาลิก และกรดซัลฟิวริก ที่มีการแปรปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ได้แก่ ระดับความเข้มข้น และปริมาตรกรดที่นำมาใช้ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการยอยซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพการผลิตที่สภาวะต่าง ๆ ได้โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสและปริมาณผลผลิตกลูโคสที่เกิดขึ้น

3.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวรัส

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาตรกรดซัลฟิวรัสต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสตามแผนการทดลองข้อ 2.2.1.1 ได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 โดยน้ำเชื่อมกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการแปรปริมาตรกรดซัลฟิวรัสที่ใช้ในการย่อยทั้ง 3 ระดับ มีลักษณะขุ่นขาวคล้ายน้ำแป้ง และปริมาตรของน้ำเชื่อมที่เกิดจากการนำสารละลายที่ได้จากการย่อย 10 มล. มาปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตแปรผันแตกต่างกันมาก เนื่องจากความขุ่นขาวของน้ำแป้งเป็นอุปสรรคต่อการแยกน้ำเชื่อมกับตะกอนออกจากกัน โดยเฉพาะสภาวะที่ใช้กรดซัลฟิวรัสเพียง 10 มล. ซึ่งการย่อยเกิดขึ้นได้ไม่ดี มีความขุ่นขาวมาก การดูดแยกน้ำเชื่อมออกจากตะกอนทำได้ยากเพราะตะกอนที่เกิดขึ้นจะติดขึ้นมากับปลายพลาสเจอร์ปิเปตต์ได้ง่าย จึงทำให้ได้ปริมาตรของน้ำเชื่อมน้อยกว่าที่สภาวะอื่นๆ เมื่อเติมน้ำลงไปเพื่อทำการล้างตะกอน ความขุ่นขาวของน้ำเชื่อมเจือจางลงสามารถแยกน้ำล้างตะกอนได้ง่ายขึ้น ปริมาตรของน้ำล้างตะกอนจึงมากกว่าปริมาณน้ำที่เติมลงไปเพื่อล้างตะกอนเพราะน้ำเชื่อมบางส่วนมารวมอยู่กับน้ำล้างตะกอนนี้ เมื่อนำน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนแต่ละครั้งมาทำการวิเคราะห์ พบว่ามีปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสแตกต่างกัน โดยแปรผันตามปริมาตรของกรดที่ใช้ ดังรูปที่ 3-1 และ 3-2 คือ เมื่อย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวรัสเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล.

ได้ผลผลิตกลูโคสสูงสุด 139.82 มก. หรือเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 2.80 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น (percent conversion, วิธีการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก จ) และน้ำเชื่อมกลูโคสที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้น 3.45 กรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตที่เกิดขึ้นจากการใช้กรดซัลฟิวรัส พบว่ามีค่าต่ำมากจึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ได้จริง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงจะเปลี่ยนชนิดของกรดที่ใช้ เพื่อให้สามารถเตรียมให้มีความเข้มข้นได้สูงกว่า 0.05 โมลาร์ โดยคาดว่าจะสามารถย่อยและให้ผลผลิตได้ดีกว่าการใช้กรดซัลฟิวรัสที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไป กรดที่สนใจจะนำมาใช้ศึกษาต่อไปก็คือกรดออกซาลิก ซึ่งเป็นกรดที่ยังคงนำมาใช้ย่อยแป้งเพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสอยู่ในปัจจุบัน (กล้าณรงค์ ศรีรอต, 2521)

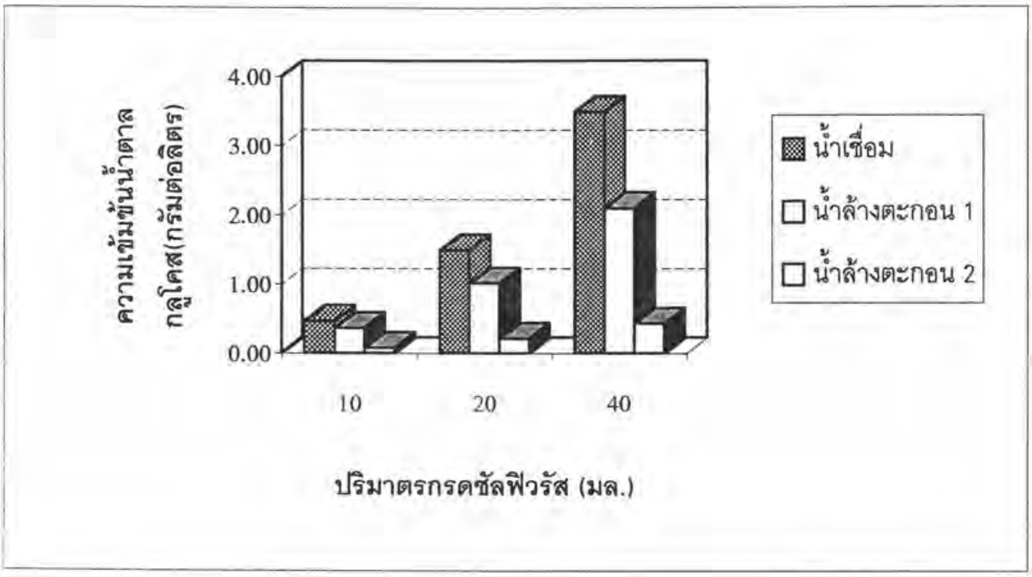
ตารางที่ 3-1 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวรัสเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร

ปริมาตรกรดซัลฟิวรัส (มล.)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย* (มล.)	กลูโคสในน้ำเชื่อม			กลูโคสในน้ำล้างตะกอน						กลูโคสทั้งหมดในสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล*** (%)
					ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2					
		ปริมาตร** (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)			
40	47.00	6.15	3.49	21.56	3.35	2.10	7.03	2.70	0.43	1.16	29.75	139.82	2.80
20	27.00	4.80	1.49	7.12	3.75	1.01	3.76	2.70	0.21	0.57	11.45	31.48	0.63
10	15.00	1.65	0.46	0.76	6.00	0.36	2.16	3.05	0.08	0.23	3.14	4.70	0.09

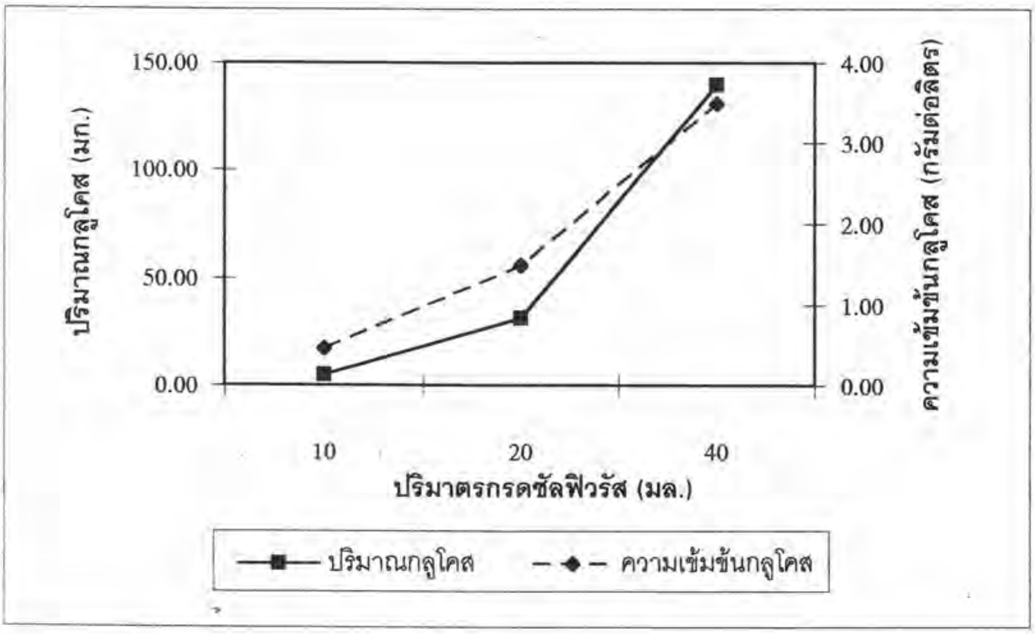
หมายเหตุ : * คือ ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อยที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลาง

** คือ ปริมาตรน้ำเชื่อมที่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นกลางแล้ว

*** คือ ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (สูตรการคำนวณดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ-3)



รูปที่ 3-1 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาตรกรดซัลฟิวรัส



รูปที่ 3-2 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาตรกรดซัลฟิวรัส

3.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิก

3.1.2.1 ผลของความเข้มข้นและปริมาตรกรดออกซาลิกต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส

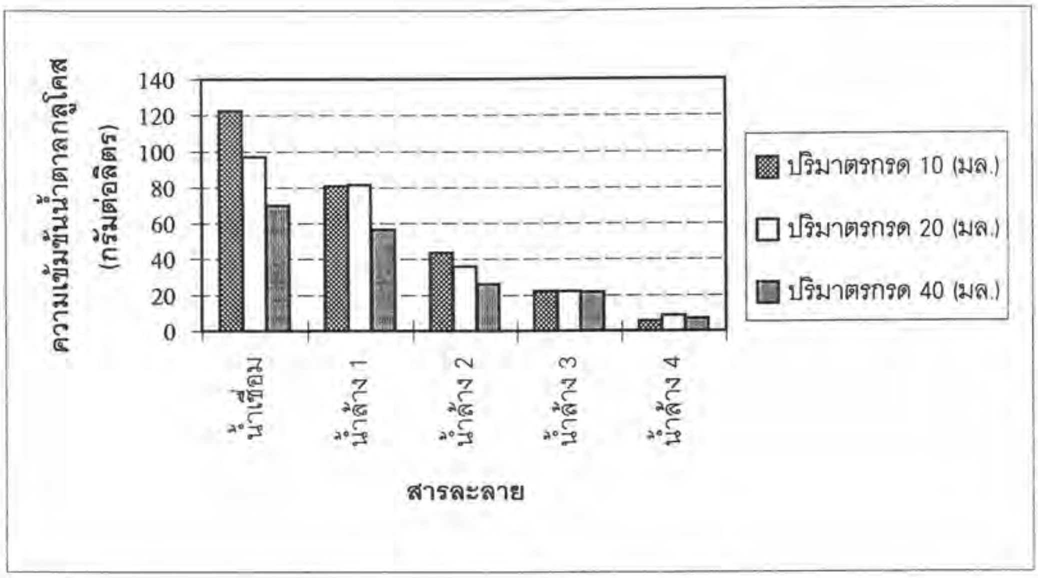
ในการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกที่มีการแปรระดับความเข้มข้นร่วมกับการแปรปริมาตรของกรดที่ใช้ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.1.2.1 ได้ผลดังตารางที่ 3-2 พบว่าในขั้นตอนการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ได้จากการย่อยให้เป็นกลางด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นผลให้เกิดเกลือแคลเซียมออกซาเลทซึ่งละลายน้ำได้ยากเป็นตะกอนปะปนอยู่ในน้ำเชื่อม ซึ่งสามารถปั่นแยกจากน้ำเชื่อมได้ แต่ก็ยังคงมีกลูโคสบางส่วนที่ตกค้างอยู่กับตะกอนไม่สามารถแยกออกมาได้ทั้งหมด จึงต้องทำการล้างตะกอนและนำน้ำล้างตะกอนแต่ละครั้งมาทำการวิเคราะห์กลูโคส ดังผลการทดลองในตารางที่ 3-3 พบว่าปริมาณกลูโคสจากน้ำล้างตะกอนในครั้งถัดไปจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณกลูโคสที่ได้จากน้ำล้างตะกอนครั้งก่อนหน้านั้น คือ กลูโคสจากน้ำล้างตะกอนในครั้งที่ 2 จะมีเพียงครึ่งหนึ่งของกลูโคสจากน้ำล้างตะกอนครั้งที่ 1 และในครั้งที่ 3 ก็จะมีเพียงครึ่งหนึ่งของในครั้งที่ 2 เช่นเดียวกัน เนื่องจากการเติมน้ำลงไปเพื่อล้างตะกอนในครั้งที่ 1 เป็นการละลายน้ำตาลที่เกาะอยู่ตามโมเลกุลของเกลือแคลเซียมออกซาเลท หลังจากปั่นแยกน้ำล้างตะกอนในครั้งแรกออกไป ทำการล้างตะกอนต่อในครั้งที่ 2 สารละลายน้ำตาลที่ยังหลงเหลืออยู่จะถูกเจือจางด้วยน้ำที่เติมลงไปเพื่อล้างตะกอน ทำให้ปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของน้ำล้างตะกอนแปรผกผันกับจำนวนครั้งของการล้าง ซึ่งเมื่อทำการล้างตะกอนไปจนถึงครั้งที่ 4 จะได้น้ำล้างตะกอนลักษณะใส ไม่มีสี และจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นกลูโคสแล้วมีค่าน้อยกว่า 10 กรัมต่อลิตร จึงยุติการล้างตะกอน (รูปที่ 3-3 และ 3-4) หากพิจารณาการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (รูปที่ 3-5) ความเข้มข้นของน้ำล้างตะกอนมีค่าน้อยกว่า 10 กรัมต่อลิตร ตั้งแต่การล้างตะกอนในครั้งที่ 3 จึงไม่จำเป็นต้องล้างตะกอนในรอบที่ 4 โดยสามารถใช้การล้างตะกอนเพียง 2 ครั้งก็เพียงพอ ดังนั้นจำนวนครั้งของการล้างตะกอนจึงขึ้นกับความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการย่อย คือ หากใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดการย่อยได้ดีกว่า ปริมาณน้ำตาลที่ตกค้างกับเกลือมีมากขึ้นตามไปด้วย จึงต้องใช้จำนวนครั้งของการล้างตะกอนมากกว่ากรดที่มีความเข้มข้นต่ำ

ตารางที่ 3-2 ปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดออกซาลิกที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

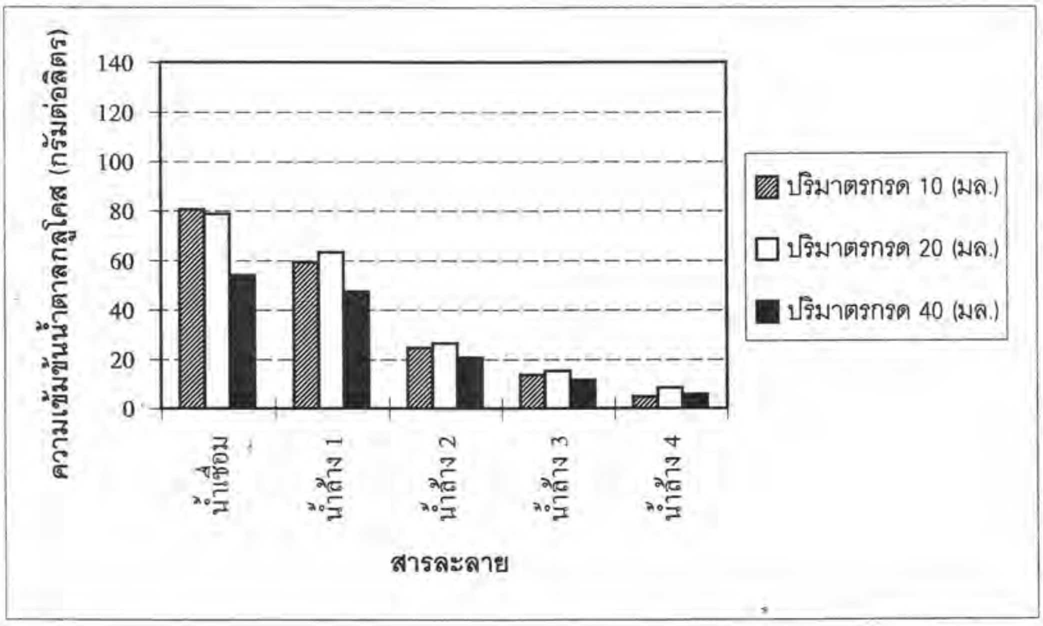
กรดออกซาริก		ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	กลูโคสในน้ำเชื่อม		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)		ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)
2	40	44.75	3.45	69.72	240.39
	20	25.50	2.85	96.84	276.02
	10	19.00	1.20	122.40	146.88
1	40	46.50	3.40	53.97	183.66
	20	28.00	3.10	78.76	244.63
	10	18.25	2.75	80.57	219.76
0.5	40	46.00	5.75	37.71	216.87
	20	28.00	6.05	51.91	313.86
	10	18.50	6.05	35.12	212.16

ตารางที่ 3-3 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของน้ำล้างตะกอน กับจำนวนครั้งของการล้างตะกอนที่เกิดจากการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 10 มล. เมื่อมีการแปรปริมาตรและความเข้มข้นของกรดออกซาลิก

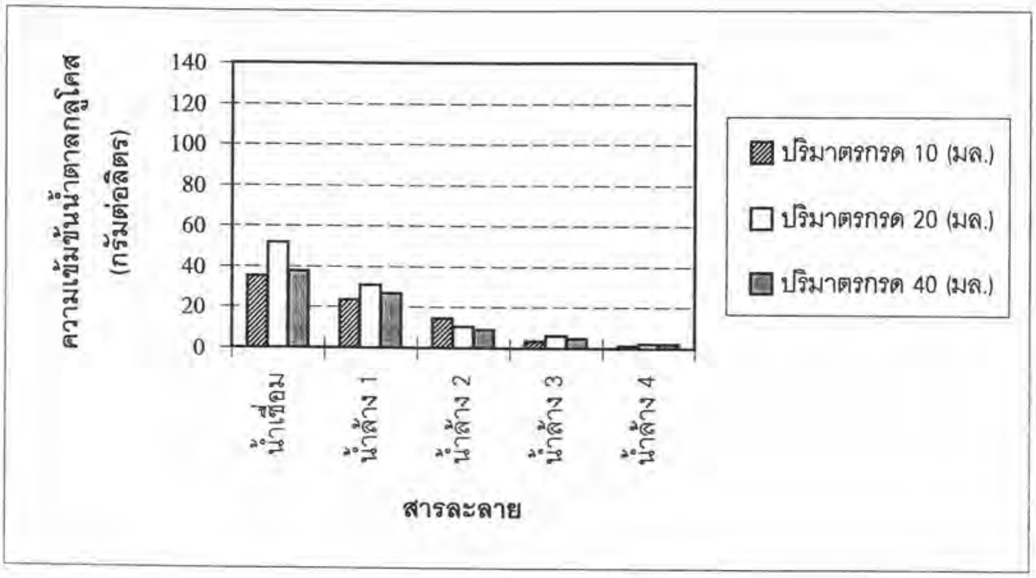
กรดออกซาลิก		ความเข้มข้นกลูโคสในน้ำล้างตะกอน											
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 4		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)
2	40	2.80	56.27	156.56	2.70	26.09	70.28	2.45	21.85	53.52	2.90	6.95	20.16
	20	3.20	81.24	259.92	2.80	35.79	100.27	2.50	21.91	54.78	2.90	8.55	24.80
	10	3.00	80.83	242.48	2.90	43.44	125.96	2.55	21.95	55.97	3.10	5.58	26.61
1	40	2.65	47.41	125.92	2.80	20.71	57.99	2.50	21.60	53.99	2.80	5.70	15.95
	20	3.00	63.32	189.65	3.00	26.55	79.57	2.75	15.14	41.59	2.35	8.53	20.05
	10	3.45	59.08	203.19	3.00	24.64	73.91	2.70	13.71	36.98	2.50	4.76	18.59
0.5	40	2.75	26.60	73.23	2.85	8.99	25.56	2.70	4.69	12.66	2.45	2.15	5.25
	20	2.95	30.63	90.85	2.80	10.59	29.59	2.60	5.92	15.39	2.25	2.15	4.83
	10	2.50	23.45	58.60	3.05	14.26	43.43	2.55	3.58	9.06	2.55	1.36	3.46



รูปที่ 3-3 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอน ของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร



รูปที่ 3-4 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร



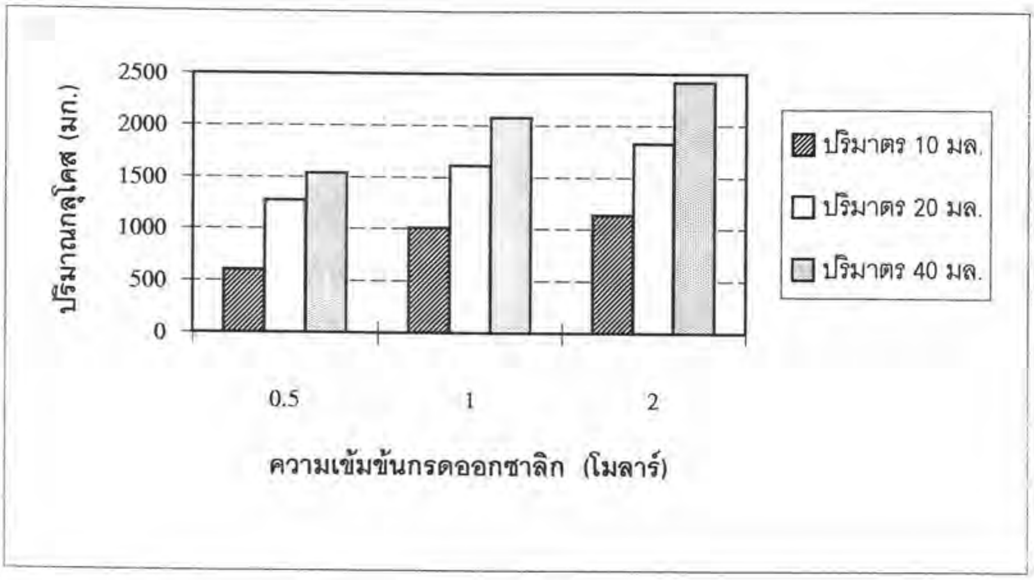
รูปที่ 3-5 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร

พิจารณาปริมาตรของน้ำเชื่อมหลังการปรับความเป็นกรด-ด่างด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในตารางที่ 3-4 พบว่าแปรผกผันกับความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่ใช้ในการย่อยเนื่องจากที่ความเข้มข้นของกรดต่ำๆ สามารถปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำเชื่อมได้ง่าย โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณน้อย ปริมาตรของน้ำเชื่อมที่ได้จึงมีปริมาณมากกว่าการย่อยด้วยกรดเข้มข้นสูงซึ่งต้องใช้แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณมากในการปรับสภาพให้เป็นกลาง ปริมาตรของน้ำเชื่อมที่เกิดขึ้นจึงลดลง โดยที่ระดับความเข้มข้นกรด 0.5 โมลาร์ ให้ปริมาตรของน้ำเชื่อมได้สูงที่สุด รองลงมาคือที่ความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 โมลาร์ ตามลำดับ เนื่องจากกรดออกซาลิกมีความสามารถในการละลายได้สูงสุดประมาณ 1.13 โมลาร์ ซึ่งในการทดลองเตรียมกรดให้เข้มข้น 2.0 โมลาร์ ได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อช่วยในการละลายแล้วดำเนินการทดลองทันทีภายหลังการย่อยและปล่อยให้เย็นตัวลง ทำให้กรดออกซาลิกส่วนที่เกินความสามารถในการละลายนั้นตกผลึก โดยพบมากที่สุดจากการใช้กรด 40 มล. รองลงมาคือ 20 มล. และพบได้น้อยเมื่อใช้กรด 10 มล. และจากการที่กากมันที่นำมาใช้ศึกษามีความชื้นสูง จึงเป็นผลให้น้ำจากกากมันบางส่วนช่วยละลายผลึกของกรดออกซาลิกให้อยู่ในสภาวะของสารละลายซึ่งสัดส่วนของการละลายดังกล่าวจึงเกิดขึ้นได้มากที่สุดเมื่อใช้กรดเพียง 10 มล. และลดลงที่ 20 กับ 40 มล.ตามลำดับ ทำให้การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของการย่อยด้วยกรด 10 มล. ต้องใช้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากที่สุด ปริมาตรของน้ำเชื่อมที่ได้จึงต่ำกว่าการใช้กรด 20 และ 40 มล.

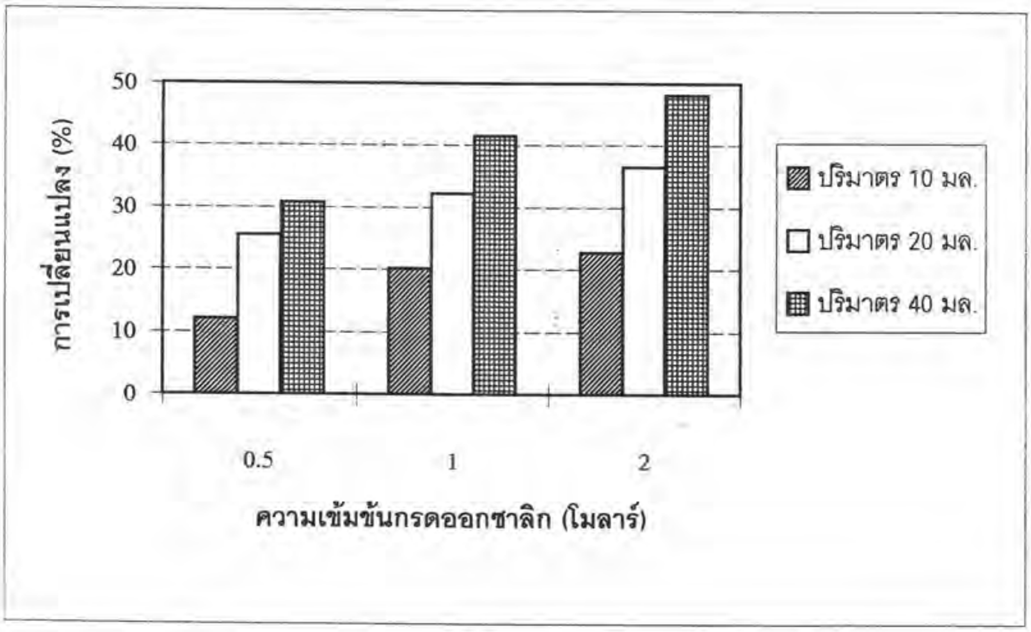
ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกที่มีระดับความเข้มข้นและปริมาตรแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตซึ่งพิจารณาจากปริมาณกลูโคส และร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ซึ่งแสดงด้วยรูปที่ 3-6 และ 3-7 พบว่าการใช้กรดออกซาลิกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล. ให้ผลผลิตกลูโคสได้สูงสุด 2420.57 มก. คิดเป็นร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลเท่ากับ 48.41 เปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณจากผลรวมของปริมาณกลูโคสจากน้ำเชื่อมกลูโคสกับปริมาณกลูโคสจากน้ำล้างตะกอนทั้ง 4 ครั้ง แต่จะพบผลึกของกรดออกซาลิกปนอยู่กับกากมันหลังจากผ่านการย่อยและปล่อยให้เย็นตัวลง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองกรดที่นำมาใช้ ดังนั้นหากคำนึงถึงต้นทุนการผลิต เพื่อไม่ให้เกิดการสิ้นเปลือง จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดลดลงเหลือเพียง 1.0 โมลาร์ ซึ่งจะไม่พบการตกผลึกของกรดนี้ เมื่อย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิก 1.0 โมลาร์, ปริมาตร 40 มล. ได้ผลผลิตกลูโคส 2076.32 มก. หรือเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 41.53 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น 5 กรัม และน้ำเชื่อมที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้น 63.97 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3-4 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดออกซาลิก ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

กรดออกซาริก		ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย	กลูโคสในน้ำเชื่อม			กลูโคสในน้ำล้างตะกอน (มก.)				ปริมาณกลูโคสทั้งหมดในสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสในสารละลายทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	(มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4			
2	40	44.75	3.45	69.72	240.39	156.56	70.28	53.52	20.16	540.91	2420.57	48.41
	20	25.50	2.85	96.84	276.02	259.92	100.27	54.78	24.80	715.78	1825.24	36.50
	10	19.00	1.20	122.40	146.88	242.48	125.96	55.97	26.61	597.9	1136.00	22.72
1	40	46.50	3.40	53.97	183.66	125.92	57.99	53.99	15.95	437.51	2034.27	40.69
	20	28.00	3.10	78.76	244.63	189.65	79.57	41.59	20.05	575.48	1611.32	32.23
	10	18.25	2.75	80.57	219.76	203.19	73.91	36.98	18.59	552.41	1007.86	20.16
0.5	40	46.00	5.75	37.71	216.87	73.23	25.56	12.66	5.25	333.56	1534.37	30.69
	20	28.00	6.05	51.91	313.86	90.85	29.59	15.39	4.83	454.51	1272.63	25.45
	10	18.50	6.05	35.12	212.16	58.60	43.43	9.06	3.46	326.71	602.54	12.05



รูปที่ 3-6 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร



รูปที่ 3-7 เปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ของการย่อยกากมันสำปะหลัง ด้วยกรดออกซาลิกที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

3.1.2.2 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกต่อประสิทธิภาพของการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 121 และ 115 องศาเซลเซียส ที่มีการแปรระยะเวลาในการย่อยตามแผนการทดลองข้อ 2.2.1.2.2 จากการสังเกตพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยเท่ากัน น้ำเชื่อมที่ได้จากการย่อยกากมันที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส มีสีเข้มกว่า น้ำเชื่อมจากการย่อยที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการย่อยที่อุณหภูมิเท่ากันการใช้ระยะเวลาในการย่อยสั้น ทำให้น้ำเชื่อมที่ได้มีสีอ่อนกว่า น้ำเชื่อมจากการย่อยที่ใช้ระยะเวลานาน

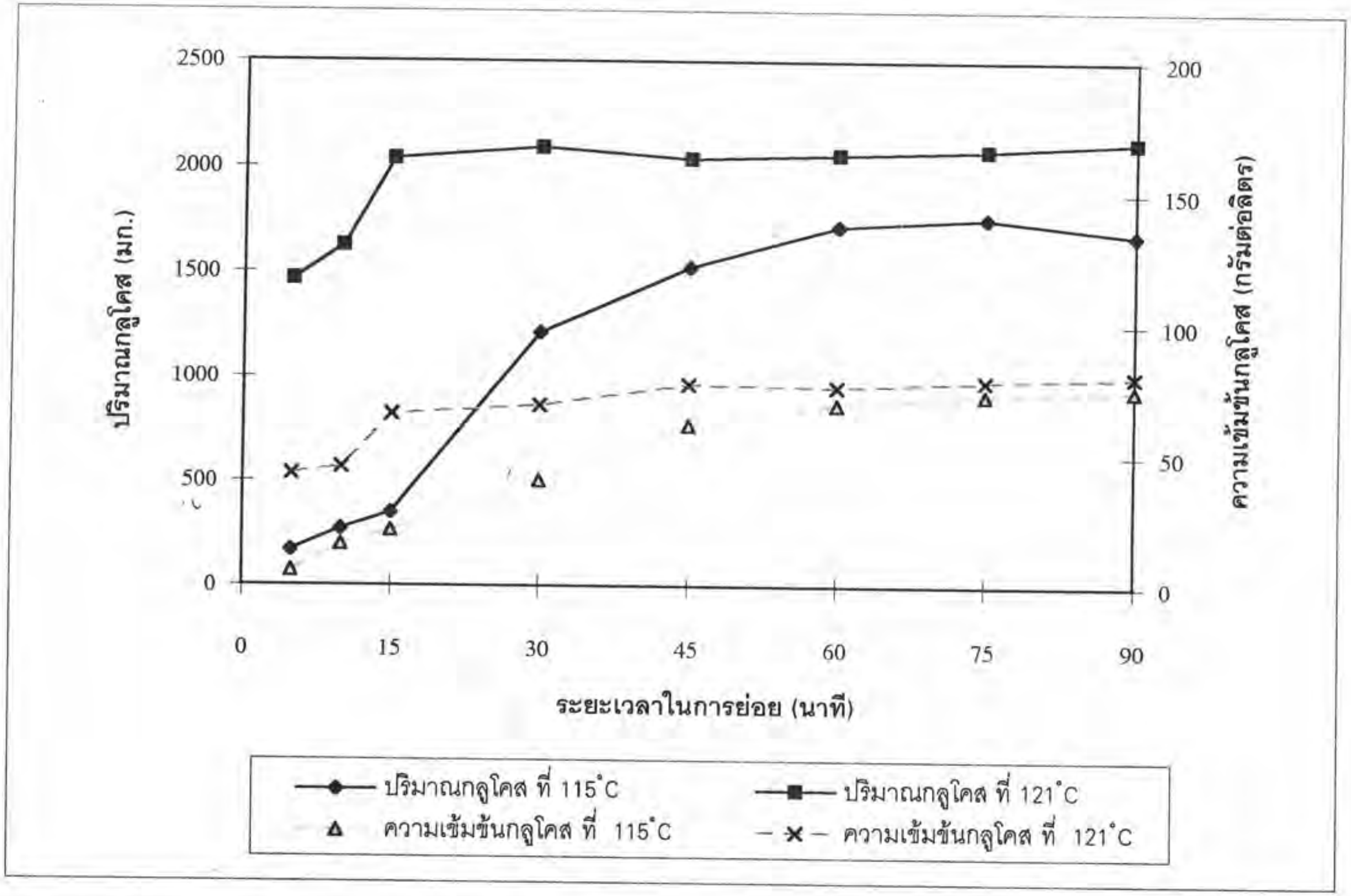
นำน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิก ที่สภาวะต่าง ๆ ไปทำการวิเคราะห์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-5 และ 3-6 พบว่าประสิทธิภาพของการผลิตแปรผันตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อย ซึ่งพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสกับระยะเวลาที่ทำการย่อย ดังรูปที่ 3-8 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลและร้อยละของกลูโคสกับระยะเวลาที่ทำการย่อย ดังรูปที่ 3-9 โดยปฏิกิริยาของการย่อยที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นได้เร็วและปฏิกิริยาเริ่มคงที่ตั้งแต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยเพียง 15 นาที ได้ผลผลิตกลูโคส 2038.62 มก. หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ร้อยละ 40.77 จากการย่อยกากมันสำปะหลังที่เป็นสารตั้งต้น 5 กรัม และจากการปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเกินกว่า 15 นาที ไม่ได้ทำให้เกิดผลผลิตกลูโคสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาของการย่อยที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 60 นาที ได้ผลผลิตกลูโคส 1717.59 มก. เท่ากับเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 34.35 ซึ่งต่ำกว่าที่เกิดจากการย่อยภายใต้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3-5 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 40 มล. ที่อุณหภูมิ 121 °C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

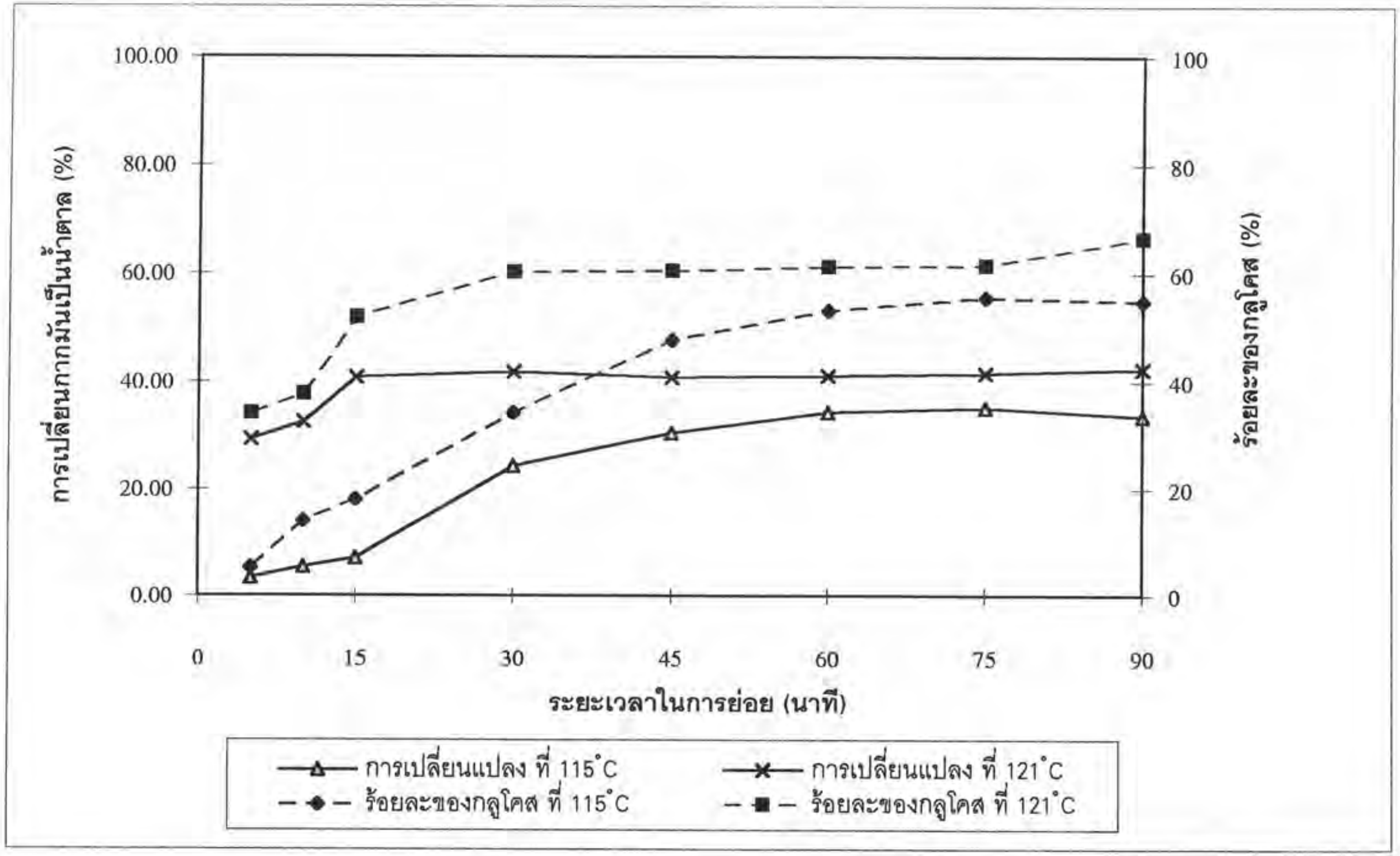
เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส						กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
			ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)				
5	45.25	126.15	60.06	47.59	3.40	43.00	34.07	146.19	177.82	324.01	1466.13	29.32
10	46.25	120.90	61.56	50.93	3.60	45.58	37.70	164.08	186.91	350.99	1623.38	32.47
15	42.50	126.55	70.30	55.55	3.80	65.72	51.93	249.74	229.94	479.68	2038.62	40.77
30	44.00	126.55	76.79	60.70	3.45	69.18	60.24	238.67	236.05	474.72	2088.77	41.78
45	44.75	127.60	79.23	62.10	2.60	77.21	60.49	200.75	236.62	437.37	1957.43	39.15
60	45.00	124.20	79.23	63.79	2.85	76.18	61.34	217.15	235.06	452.21	2057.24	41.14
75	45.00	127.45	82.05	64.38	2.90	78.50	61.59	227.35	234.63	461.98	2078.89	41.58
90	44.25	120.80	85.25	70.56	3.05	80.31	66.48	244.62	233.64	478.26	2115.87	42.32

ตารางที่ 3-6 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 40 มล. ที่อุณหภูมิ 115°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส						กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
			ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)				
5	45.25	106.00	24.63	23.25	2.80	5.58	5.28	15.12	22.16	37.28	168.58	3.37
10	44.75	113.60	40.98	36.13	2.25	15.86	13.98	35.63	24.86	60.49	270.64	5.41
15	44.50	117.40	45.4	38.67	2.60	21.23	18.08	54.99	24.02	79.01	351.33	7.03
30	44.75	117.90	54.61	46.32	2.15	40.34	34.21	86.68	184.04	270.72	1211.86	24.24
45	44.00	128.65	68.42	53.17	1.50	61.46	47.75	91.18	255.19	346.37	1523.38	30.47
60	43.75	130.50	77.35	59.27	2.00	69.34	53.13	138.67	253.92	392.59	1717.59	34.35
75	46.00	130.50	75.66	57.54	1.85	73.08	55.58	134.97	246.78	381.75	1756.03	35.12
90	45.25	136.50	83.08	60.83	1.60	74.89	54.88	120.23	250.06	370.29	1676.30	33.53



รูปที่ 3-8 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, ปริมาตร 40 มล. ที่อุณหภูมิ 115˚C และ 121˚C



รูปที่ 3-9 เปรียบเทียบการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิก เข้มข้น 1.0 โมลาร์, 40 มล. ที่อุณหภูมิ 115˚C และ 121˚C

3.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก

3.1.3.1 ผลของความเข้มข้นและปริมาตรกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส

ผลจากการศึกษาประสิทธิการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกคุณภาพระดับ เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรระดับความเข้มข้นร่วมกับการแปรปริมาตรกรดที่นำมาใช้ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.1.3.1.1 ได้ผลดังตารางที่ 3-7 และเมื่อนำตะกอนไปทำการล้างแล้วนำน้ำล้างตะกอนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส เพื่อศึกษาหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับการล้างตะกอนได้ผลดังตารางที่ 3-8 โดยทำการล้างตะกอนไปจนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำล้างตะกอนมีค่าประมาณ 10 กรัมต่อลิตรจะหยุดไม่ทำการวิเคราะห์น้ำล้างตะกอนในครั้งถัดไป และเลือกจำนวนครั้งของการทดลองเท่าที่น้ำล้างตะกอนในครั้งสุดท้ายมีความเข้มข้นประมาณ 10 กรัมต่อลิตร ซึ่งหากความเข้มข้นต่ำกว่านี้จะไม่นำมาใช้ คือ การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ จำนวนครั้งของการล้างตะกอนที่เหมาะสมเท่ากับ 5 ครั้ง (รูปที่ 3-10) ในขณะที่การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ใช้จำนวนครั้งของการล้างตะกอนเพียง 4 ครั้ง (รูปที่ 3-11) และกรดเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ใช้การล้างตะกอนเพียง 2 ครั้งก็เพียงพอ (รูปที่ 3-12)

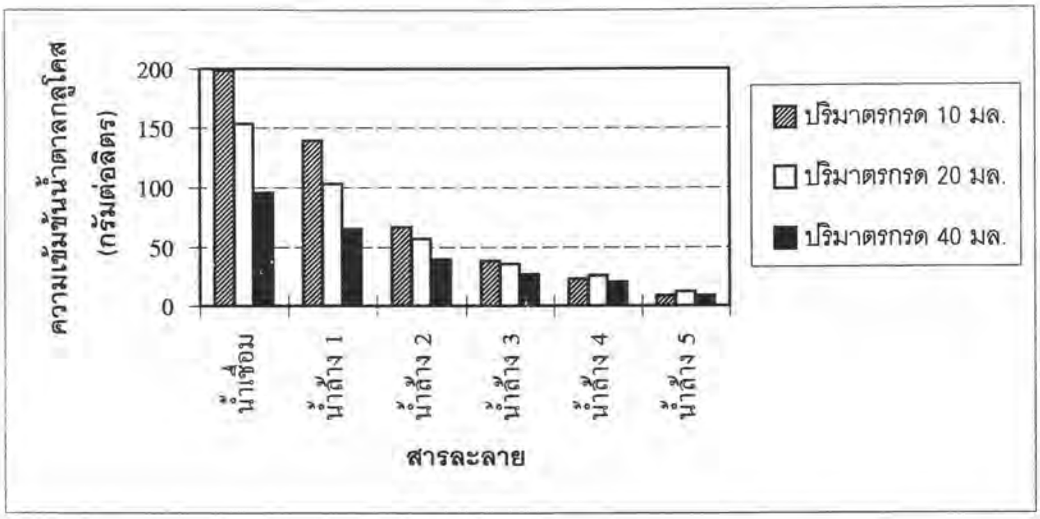
ตารางที่ 3-7 ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

กรดซัลฟิวริก		ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	กลูโคสในน้ำเชื่อม		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)		ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)
2	40	50.25	1.40	95.55	133.77
	20	29.75	2.35	152.88	359.57
	10	22.25	3.30	198.58	656.01
1	40	50.50	3.75	91.93	344.93
	20	30.75	3.10	147.71	458.08
	10	23.25	2.95	177.80	524.76
0.16	40	50.50	4.45	54.59	242.87
	20	30.00	3.45	54.90	189.77
	10	22.75	3.20	15.34	49.26

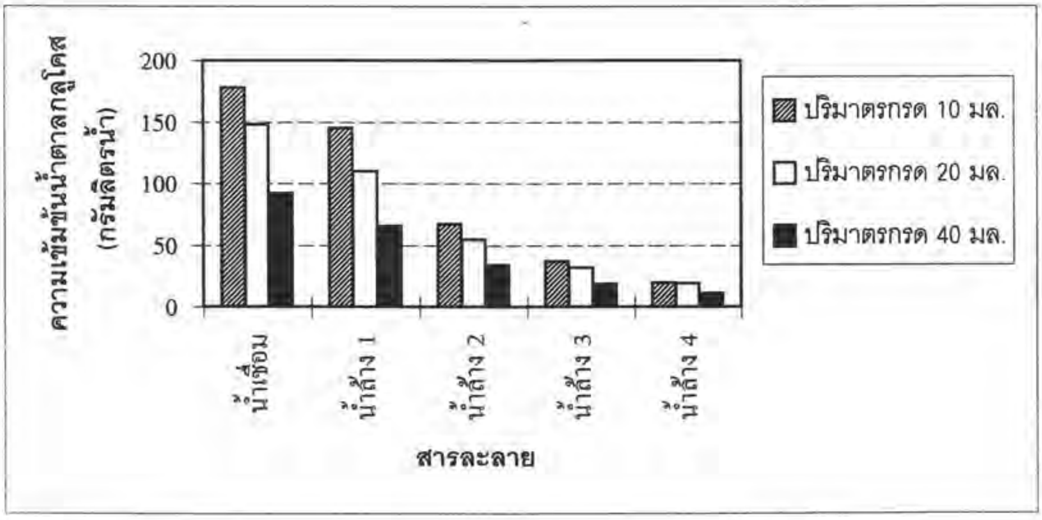
ตารางที่ 3-8 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสในน้ำล้างตะกอน กับจำนวนครั้งของการล้างตะกอนที่เกิดจากการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 10 มล. เมื่อมีการแปรปริมาตรและความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์

กรดซัลฟิวริก		ความเข้มข้นกลูโคสในน้ำล้างตะกอน														
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 4			ครั้งที่ 5		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)
2	40	2.45	64.82	158.74	2.20	39.41	87.70	1.85	26.60	49.05	2.95	20.09	59.20	2.65	8.74	23.21
	20	2.55	102.52	261.19	2.60	56.66	147.31	2.05	35.28	72.42	3.00	25.57	76.60	2.30	12.18	28.00
	10	2.80	138.54	384.95	2.55	66.42	169.22	2.05	38.12	78.32	3.10	23.14	72.14	1.90	8.65	16.44
1	40	3.05	65.46	199.95	2.90	33.78	98.11	1.95	18.59	36.32	2.80	11.20	31.35	-	-	-
	20	2.95	110.14	325.00	2.85	54.44	155.18	2.00	31.92	63.84	2.90	18.94	54.83	-	-	-
	10	2.95	144.87	427.50	3.00	67.35	202.17	2.10	37.24	78.02	2.95	19.49	57.47	-	-	-
0.16	40	2.95	19.39	57.21	3.15	7.62	24.00	2.10	1.91	4.00	-	-	-	-	-	-
	20	2.60	19.40	50.43	3.35	7.69	25.74	2.15	1.90	4.08	-	-	-	-	-	-
	10	2.40	10.35	24.82	3.15	5.88	18.52	2.30	1.16	2.60	-	-	-	-	-	-

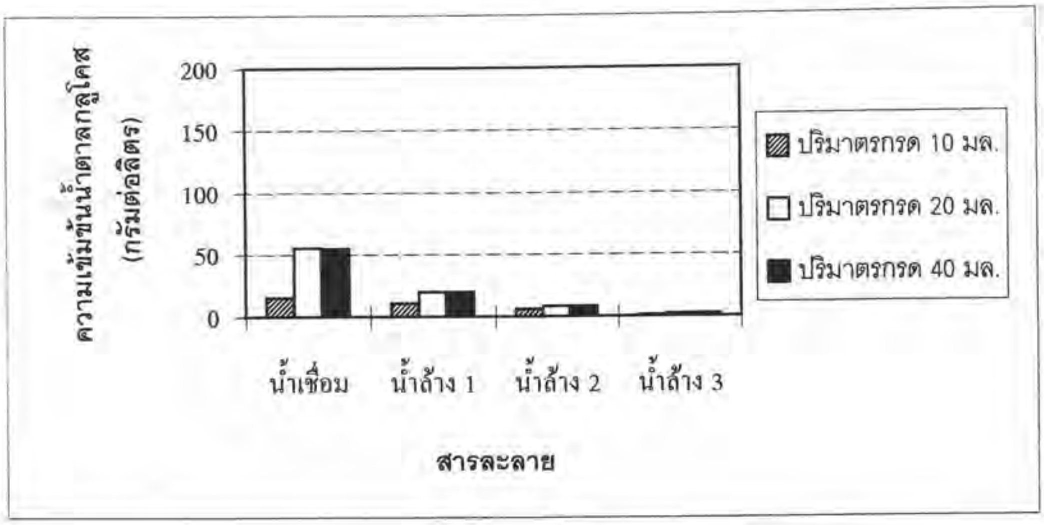
หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-10 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ เข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร



รูปที่ 3-11 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร



รูปที่ 3-12 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ เข้มข้น 0.16 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร

พิจารณาปริมาตรของน้ำเชื่อมที่สภาวะของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล. (ตารางที่ 3-9) พบว่าที่สภาวะนี้มีปริมาตรของน้ำเชื่อมต่ำที่สุด เนื่องจากการย่อยโดยใช้ความเข้มข้นกรดสูงๆ ต้องใช้แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณมากเพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง เป็นผลให้ปริมาตรของน้ำเชื่อมลดลง เมื่อเทียบกับการย่อยด้วยกรดเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่ใช้กรดเพียง 20 และ 10 มล. กลับได้ปริมาตรของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เพราะในกากมันสดที่นำมาใช้ในการศึกษามีความชื้นสูง จึงทำให้น้ำที่มีอยู่ในกากมันนั้นเข้าไปเจือจางกรดให้มีความเข้มข้นลดลงได้ โดยการเจือจางที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาตรกรดที่นำมาใช้คือ เจือจางได้มากเมื่อใช้กรดเพียง 10 มล. และลดลงเมื่อใช้กรด 20 และ 40 มล. ตามลำดับ ดังนั้นสภาวะของการย่อยที่ใช้กรดเข้มข้น 2.0 โมลาร์นั้น การใช้กรดเพียง 10 มล. จึงมีความเข้มข้นของกรดในระบบเจือจางที่สุด การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างใช้แคลเซียมคาร์บอเนตน้อย ทำให้ได้น้ำเชื่อมที่มีปริมาตรมากกว่าการใช้กรด 20 และ 40 มล. ส่วนที่สภาวะการย่อยที่ใช้กรดเข้มข้น 1.0 และ 0.16 โมลาร์นั้น น้ำเชื่อมที่เกิดขึ้นมีปริมาตรใกล้เคียงกัน เนื่องจากการปรับสภาพเป็นกลางเกิดได้เร็วโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณน้อย จึงไม่สามารถคาดคะเนปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตให้พอดีกับการปรับสภาพได้แม่นยำ จึงใส่แคลเซียมคาร์บอเนตลงไปเท่า ๆ กัน เป็นผลให้น้ำเชื่อมเหล่านั้นมีปริมาตรใกล้เคียงกัน

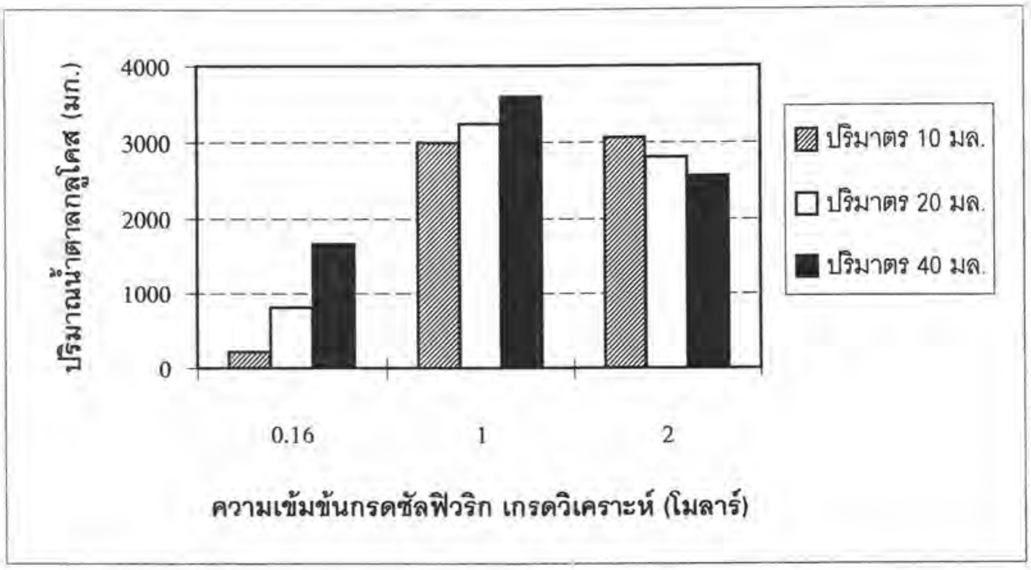
ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสสุทธิที่เกิดจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกคุณภาพระดับ เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรระดับความเข้มข้นร่วมกับการแปรปริมาตรกรดที่ใช้ พบว่าสีของน้ำเชื่อมกลูโคสจะเข้มที่สุดเมื่อใช้กรดเข้มข้น 2.0 โมลาร์ รองลงมาคือ 1.0 โมลาร์ และสีอ่อนที่สุดเมื่อใช้กรดเข้มข้น 0.16 โมลาร์ แต่ประสิทธิภาพการย่อยด้วยกรดเข้มข้น 1.0 โมลาร์ กลับสูงกว่าการใช้กรดเข้มข้น 2.0 และ 0.16 โมลาร์ เมื่อมีปริมาตรกรดเท่ากันโดยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้น, ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสที่ได้, ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล กับความเข้มข้นและปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการย่อยไว้ดังรูปที่ 3-13, 3-14 และ 3-15

จากผลการทดลองในตารางที่ 3-9 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน ปริมาตรของกรดที่ใช้ก็เป็นส่วนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตเช่นกัน คือ โดยประสิทธิภาพสูงสุดได้จากการย่อยด้วยกรดที่มีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล. ซึ่งให้ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลเท่ากับ 71.76 เปอร์เซ็นต์ แต่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสที่เกิดขึ้นมีเพียง 91.93 กรัมต่อลิตร ซึ่งเจือจางเกินไป เนื่องจากความเข้มข้นกลูโคสที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ในกระบวนการหมักควรจะมากกว่า 120 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตเมื่อใช้ปริมาตรกรดลดลงเหลือ 20 และ 10 มล. แทนแม้จะให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลงตามไปด้วย คือ ให้ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้เท่ากับ 64.69 และ 59.79 เปอร์เซ็นต์ แต่กลับทำให้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสเพิ่มขึ้นเป็น 127.71 และ 157.80 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพราะฉะนั้นปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม จึงไม่ควรเกิน 20 มล. โดยสภาวะที่สนใจจะนำมาใช้ทดลองต่อไป คือ การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. เนื่องจากเป็นสภาวะที่ใช้ปริมาณกรดในการย่อยน้อยที่สุดและให้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสได้สูงที่สุด

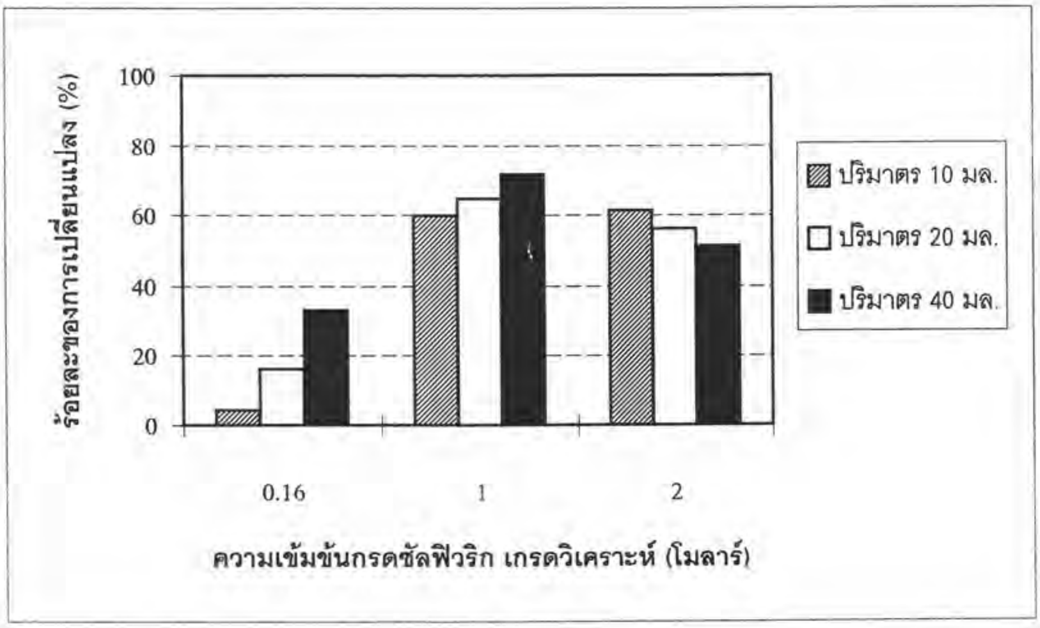
ตารางที่ 3-9 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

กรดซัลฟิวริก		ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย	กลูโคสในน้ำเชื่อม			กลูโคสในน้ำล้างตะกอน (มก.)					ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล.	ปริมาณกลูโคสในสารละลายทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	(มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	(มก.)		
2	40	50.25	1.40	95.55	133.77	158.74	87.70	49.05	59.20	23.21	510.64	2566.49	51.33
	20	29.75	2.35	152.88	359.57	261.19	147.31	72.42	76.60	28.00	945.17	2809.07	56.18
	10	22.25	3.30	198.58	656.01	384.95	169.22	78.32	72.14	16.44	1377.07	3064.80	61.30
1	40	50.50	3.75	91.93	344.93	199.95	98.11	36.32	31.35	-	710.65	3588.13	71.76
	20	30.75	3.10	147.71	458.08	325.00	155.18	63.84	54.83	-	1056.91	3249.50	64.99
	10	23.25	2.95	177.80	524.76	427.50	202.17	78.02	57.47	-	1289.91	2999.63	59.99
0.16	40	50.50	4.45	54.59	242.87	57.21	24.00	4.00	-	-	328.07	1656.73	33.13
	20	30.00	3.45	54.90	189.77	50.43	25.74	4.08	-	-	270.01	810.94	16.22
	10	22.75	3.20	15.34	49.26	24.82	18.52	2.60	-	-	95.19	216.78	4.34

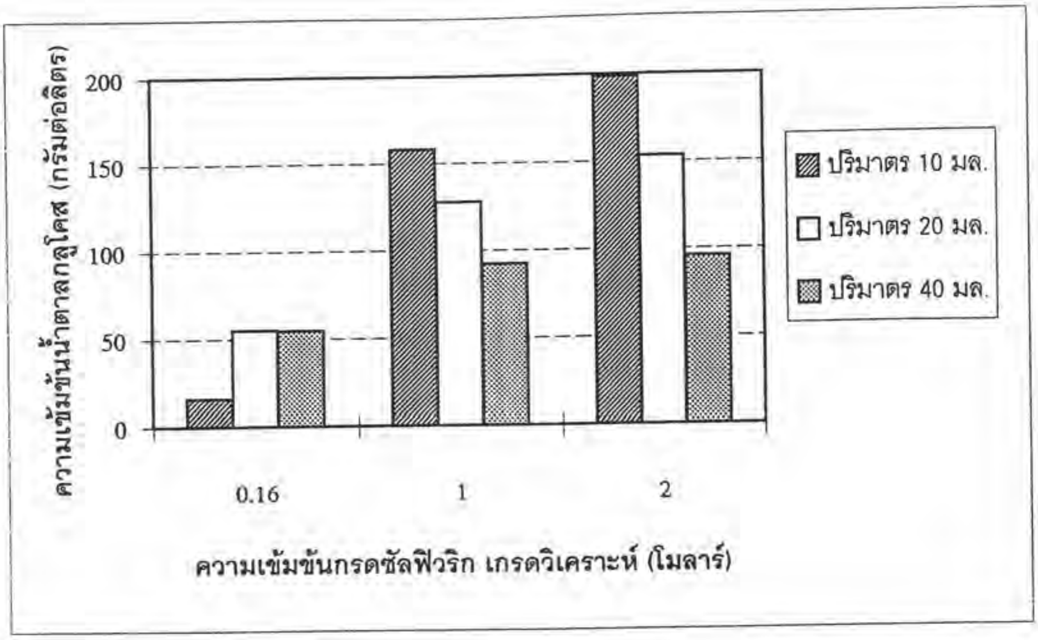
หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-13 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร



รูปที่ 3-14 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร



รูปที่ 3-15 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

3.1.3.2 ผลของความเข้มข้นและปริมาตรกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส

ในการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกคุณภาพระดับ เกรดทางการค้า ที่มีการแปรระดับความเข้มข้นร่วมกับการแปรปริมาตรกรดที่ใช้ ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.1.3.1.2 ได้ผลดังตารางที่ 3-10 และเมื่อนำตะกอนไปทำการล้างแล้วนำน้ำล้างตะกอนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส เพื่อศึกษาหาจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับการล้างตะกอนได้ผลดังตารางที่ 3-11 พบว่าจำนวนครั้งของการล้างตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้น ขึ้นกับความเข้มข้นกรดที่ใช้ในการย่อย เช่นเดียวกับผลการทดลองที่ 3.1.2.1 และ 3.1.3.1 คือ การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ต้องใช้การล้างตะกอน 5 ครั้ง (รูปที่ 3-16), กรดเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ใช้การล้างตะกอนลดลงเหลือเพียง 4 ครั้ง (รูปที่ 3-17) กรดเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ใช้การล้างเพียง 2 ครั้งก็เพียงพอ (รูปที่ 3-18)

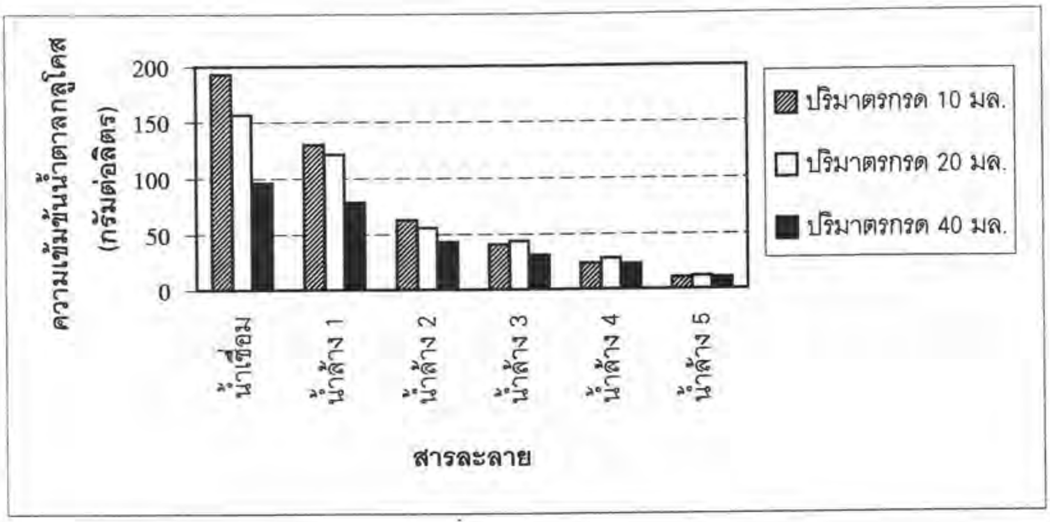
ตารางที่ 3-10 ปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

กรดซัลฟิวริก		ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	กลูโคสในน้ำเชื่อม		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)		ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)
2	40	49.50	1.20	95.55	115.43
	20	31.25	1.90	156.49	294.07
	10	23.50	3.10	192.90	594.99
1	40	53.00	3.15	80.57	253.91
	20	31.75	3.55	124.73	441.68
	10	22.75	4.90	139.83	683.36
0.16	40	48.75	4.20	62.34	262.45
	20	30.25	2.95	54.59	161.35
	10	22.25	2.30	21.08	48.64

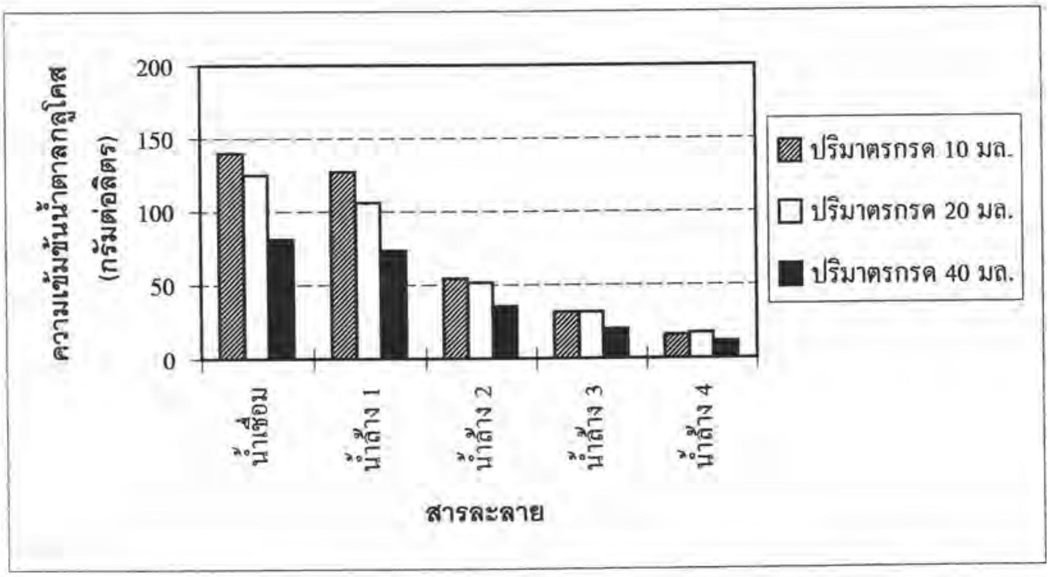
ตารางที่ 3-11 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของน้ำล้างตะกอน กับจำนวนครั้งของการล้างตะกอนที่เกิดจากการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 10 มล. เมื่อมีการแปรปริมาตรและความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า

กรดซัลฟิวริก		ความเข้มข้นกลูโคสในน้ำล้างตะกอน														
		ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 4			ครั้งที่ 5		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)
2	40	1.65	77.99	128.60	2.30	42.71	98.42	1.75	30.63	53.61	3.05	22.83	69.56	2.75	10.63	29.28
	20	2.00	121.11	242.22	2.60	55.78	145.03	1.95	43.64	84.94	3.10	27.74	85.77	2.30	11.75	26.94
	10	2.50	129.77	324.34	2.90	62.65	181.97	2.00	40.29	80.74	3.00	23.09	69.26	2.15	10.16	21.81
1	40	3.15	72.95	225.98	2.95	35.69	105.30	1.90	19.99	38.06	2.65	11.49	30.42	-	-	-
	20	2.75	105.36	290.51	2.85	51.34	146.23	1.90	31.61	60.04	2.50	17.12	42.99	-	-	-
	10	2.40	126.66	303.99	2.80	54.28	151.60	1.95	31.35	61.01	2.90	16.02	46.18	-	-	-
0.16	40	2.60	19.51	50.73	3.15	7.70	24.24	1.50	1.90	2.85	-	-	-	-	-	-
	20	2.45	19.51	47.79	3.30	7.70	25.39	1.70	1.91	3.23	-	-	-	-	-	-
	10	2.15	13.75	29.62	3.40	7.47	25.39	1.95	1.88	3.66	-	-	-	-	-	-

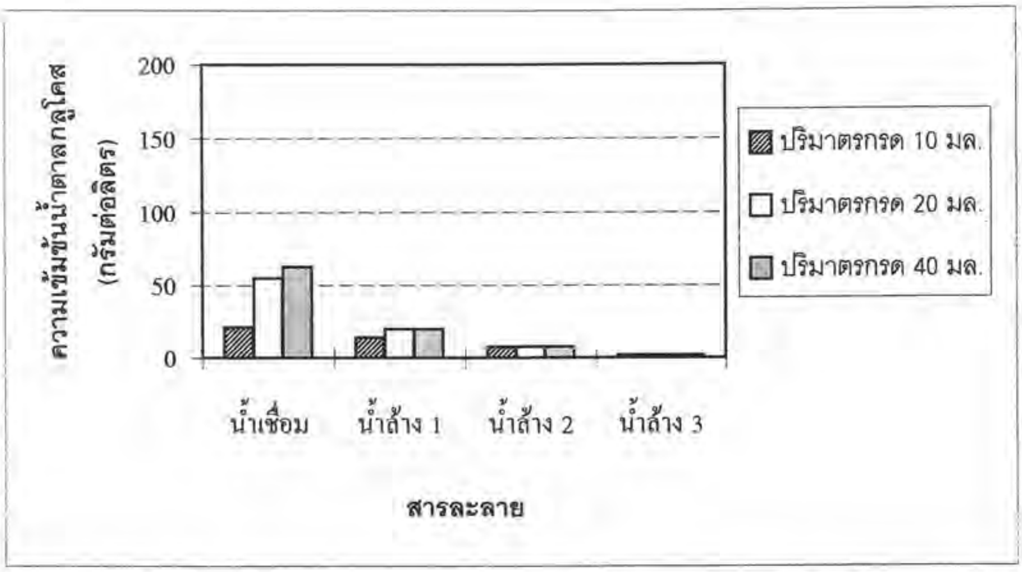
หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-16 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า เข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร



รูปที่ 3-17 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร



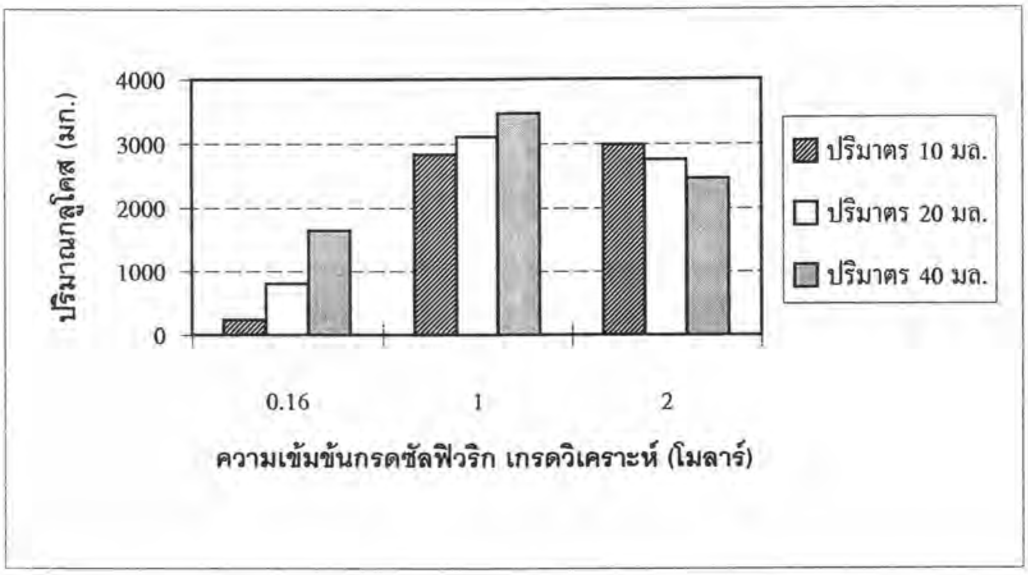
รูปที่ 3-18 เปรียบเทียบความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของน้ำเชื่อมและน้ำล้างตะกอนของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า เข้มข้น 0.16 โมลาร์ ที่มีการแปรปริมาตร

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสสุทธิที่เกิดจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกคุณภาพระดับ เกรดทางการค้า ที่มีการแปรระดับความเข้มข้นร่วมกับการแปรปริมาตรกรดที่ใช้ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-12 ซึ่งพบว่าสีของน้ำเชื่อมกลูโคสจะเข้มที่สุดเมื่อใช้กรดเข้มข้น 2.0 โมลาร์ รองลงมาคือ 1.0 และ 0.16 โมลาร์ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้น, ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสที่ได้, ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล กับความเข้มข้นและปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการย่อยไว้ดังรูปที่ 3-19, 3-20 และ 3-21 จากผลการทดลองในตารางที่ 3-12 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส และระดับความเข้มข้นและปริมาตรกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังสอดคล้องกับผลของการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ดังผลการทดลองที่ 3.1.3.1 คือใช้กรดซัลฟิวริกที่ระดับความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยใช้ปริมาตร 10 มล.

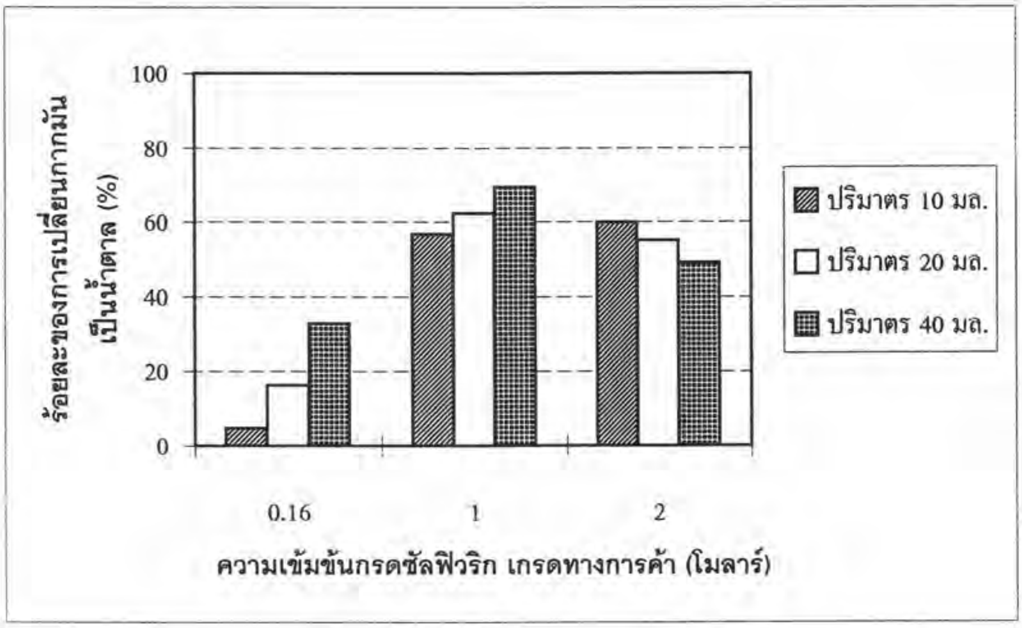
ตารางที่ 3-12 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเกรดทางการค้า ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

กรดซัลฟิวริก		ปริมาตรสารละลาย	กลูโคสในน้ำเชื่อม			กลูโคสในน้ำล้างตะกอน (มก.)					ปริมาณกลูโคสทั้งหมด	ปริมาณกลูโคส	ร้อยละของการ
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	ที่ได้จากการย่อย (มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคส (มก.)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	จากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ในสารละลายทั้งหมด (มก.)	เปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
2	40	49.50	1.20	95.55	115.43	128.60	98.42	53.61	69.56	29.28	494.89	2451.08	49.02
	20	31.25	1.90	156.49	294.07	242.22	145.03	84.94	85.77	26.94	878.97	2750.42	55.01
	10	23.50	3.10	192.90	594.99	324.34	181.97	80.74	69.26	21.81	1273.11	2991.80	59.84
1	40	53.00	3.15	80.57	253.91	225.98	105.30	38.06	30.42	-	653.65	3464.35	69.29
	20	31.75	3.55	124.73	441.68	290.51	146.23	60.04	42.99	-	981.44	3112.55	62.25
	10	22.75	4.90	139.83	683.36	303.99	151.60	61.01	46.18	-	1246.13	2834.70	56.70
0.16	40	48.75	4.20	62.34	262.45	50.73	24.24	2.85	-	-	340.26	1661.93	33.24
	20	30.25	2.95	54.59	161.35	47.79	25.39	3.23	-	-	237.76	716.06	14.32
	10	22.25	2.30	21.08	48.64	29.62	25.39	3.66	-	-	107.32	238.05	4.76

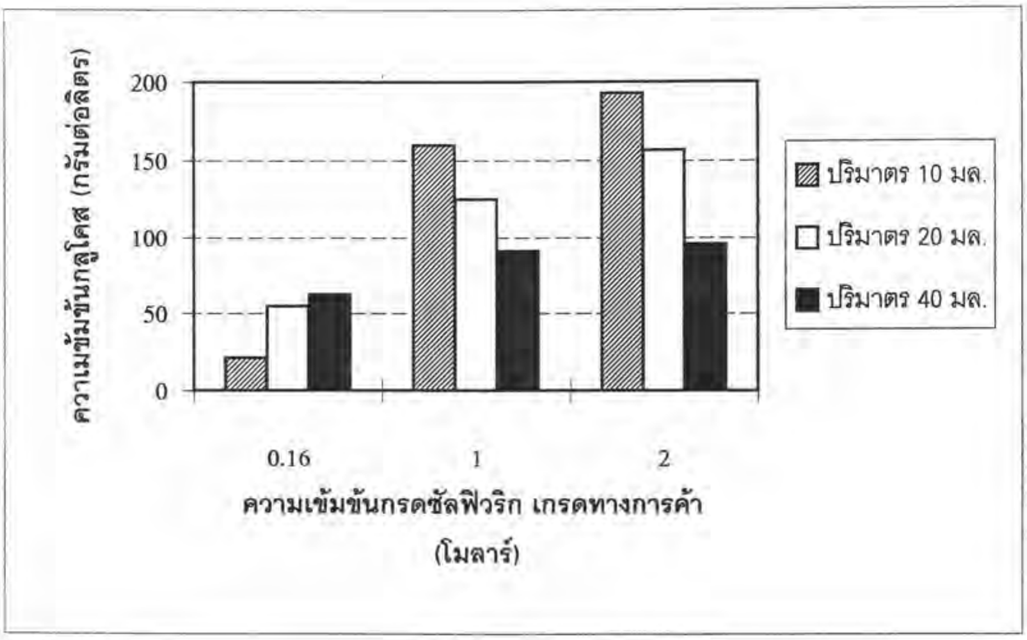
หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-19 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร



รูปที่ 3-20 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร



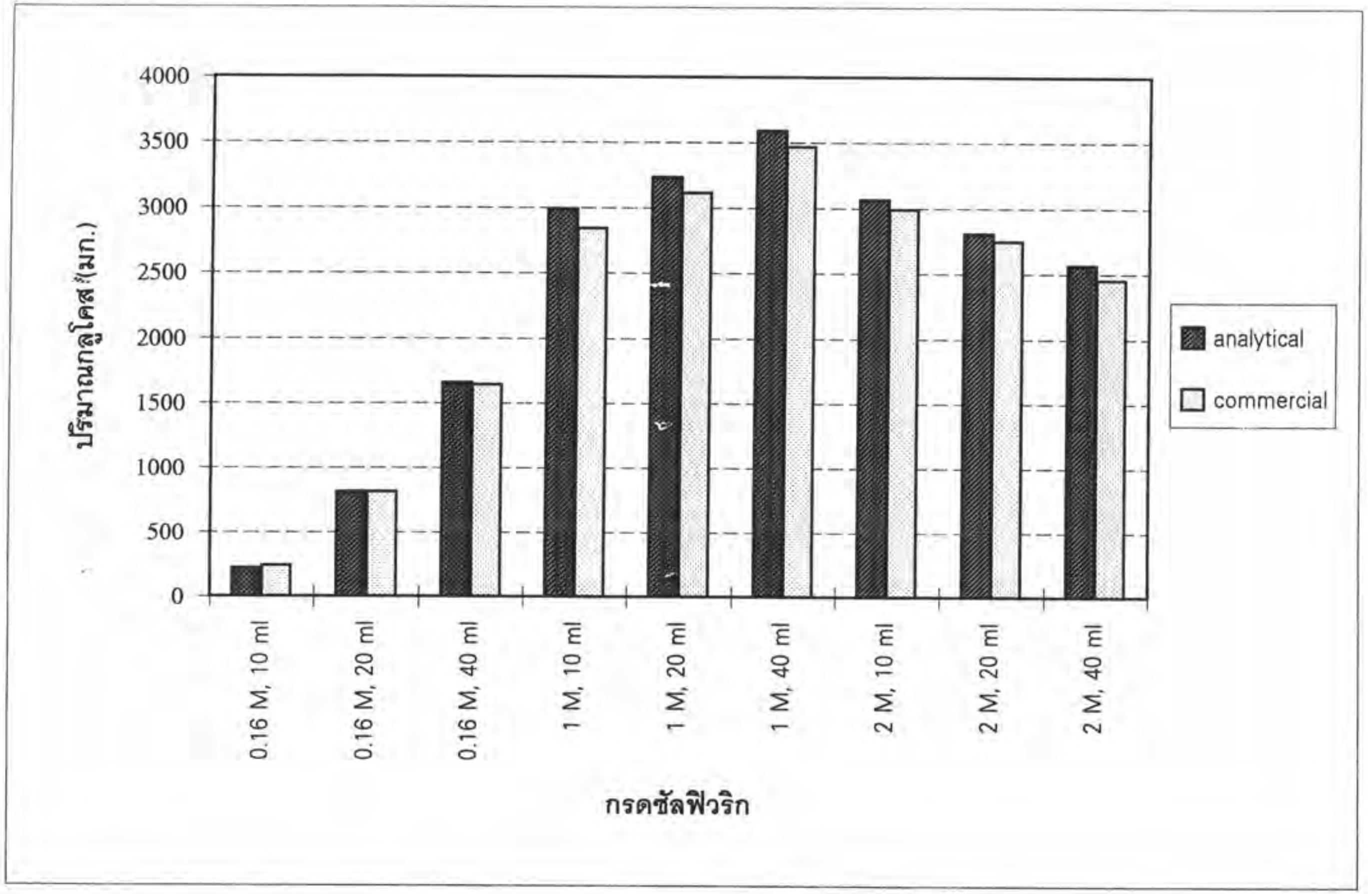
รูปที่ 3-21 เปรียบเทียบความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

3.1.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสระหว่างกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ และ เกรดทางการค้า

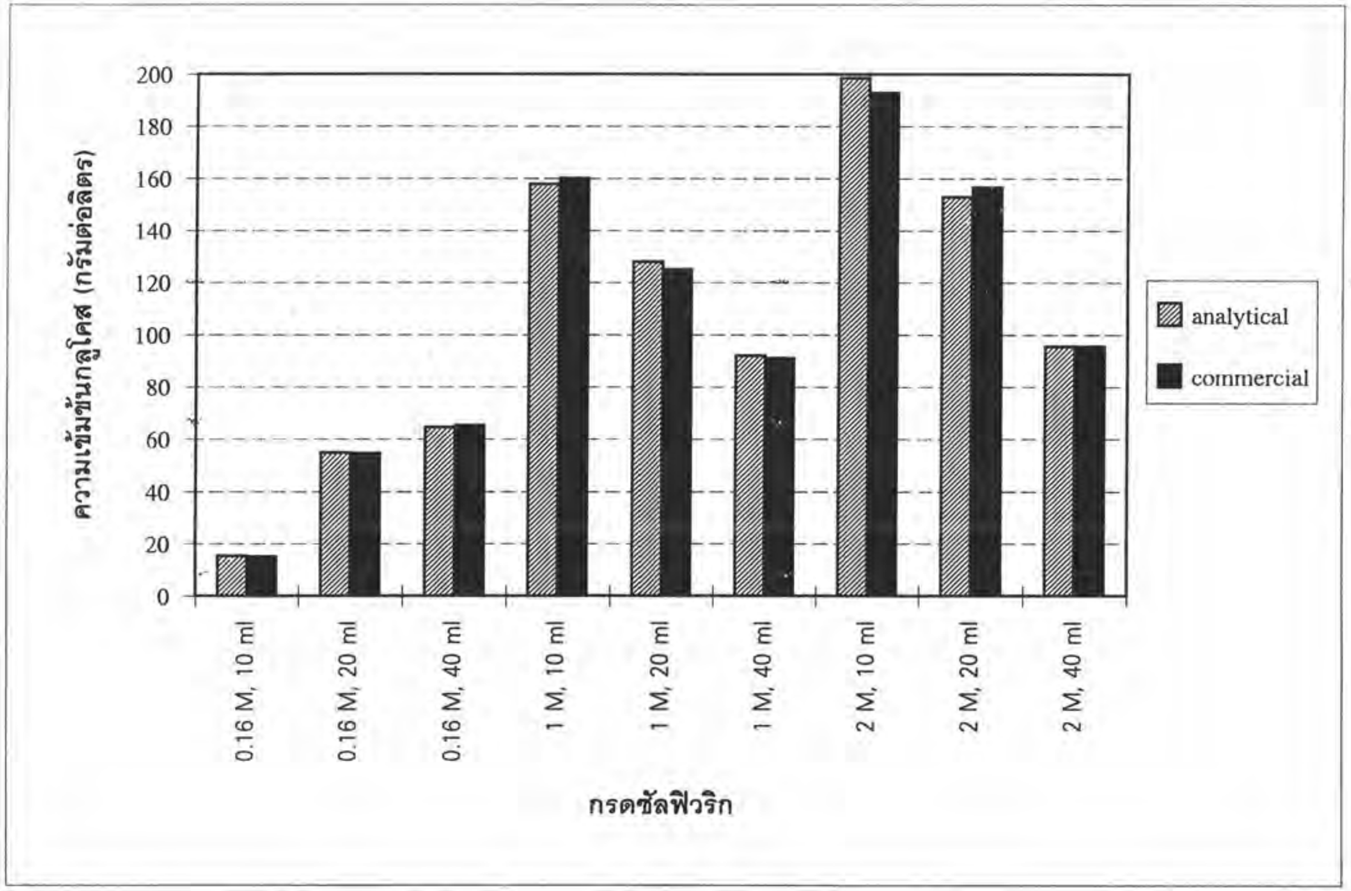
จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีคุณภาพแตกต่างกัน คือ เกรดวิเคราะห์ และ เกรดทางการค้า เมื่อมีการแปรความเข้มข้นร่วมกับการแปรปริมาตรของกรดที่นำมาใช้ตามแผนการทดลองที่ 2.2.1.3.1 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-13 และรูปที่ 3-22 , 3-23 , 3-24 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการผลิตจากค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลที่เกิดขึ้น พบว่าการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ให้ประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสได้ใกล้เคียงกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ ดังนั้นในการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส จึงเลือกกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ซึ่งมีราคาถูกกว่ามาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3-13 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ กับ เกรดทางการค้า ที่มีการแปรความเข้มข้นและปริมาตร

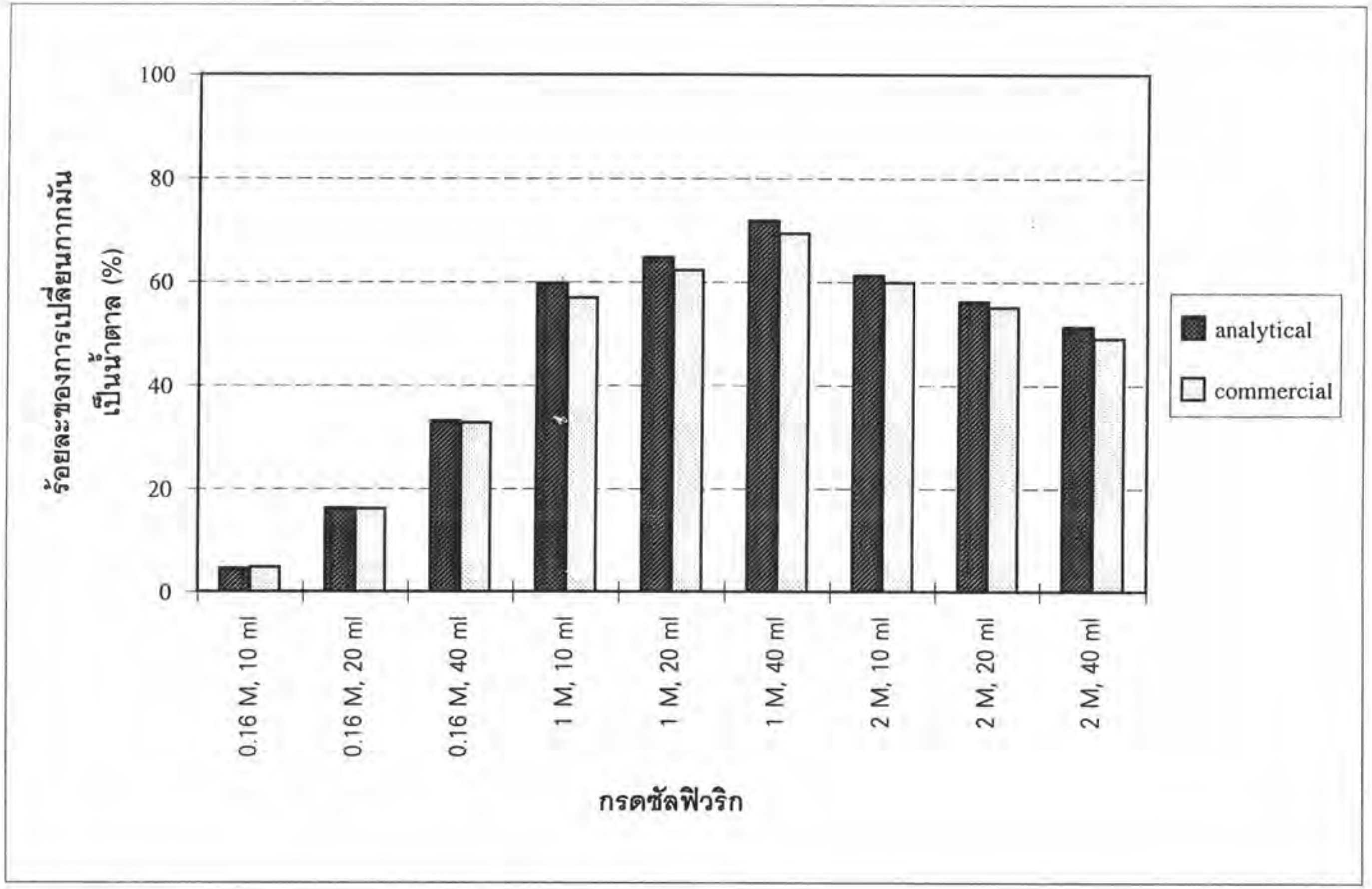
กรดซัลฟิวริก		เกรดวิเคราะห์			เกรดทางการค้า		
ความเข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกลูโคสในสารละลายทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณกลูโคสในสารละลายทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
2	40	95.55	2566.49	51.33	95.55	2451.08	49.02
	20	152.88	2809.07	56.18	156.49	2750.42	55.01
	10	198.58	3064.80	61.30	192.90	2991.80	59.84
1	40	91.93	3588.13	71.76	91.06	3466.12	69.32
	20	127.71	3234.62	64.69	124.73	3112.55	62.25
	10	157.80	2989.74	59.79	159.83	2844.05	56.88
0.16	40	64.59	1656.73	33.13	65.34	1640.60	32.81
	20	54.90	810.94	16.22	54.59	809.97	16.20
	10	15.34	216.78	4.34	15.08	238.05	4.76



รูปที่ 3-22 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ กับเกรดทางการค้า เมื่อมีการแปรปริมาตรและความเข้มข้น



รูปที่ 3-23 เปรียบเทียบความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ กับ เกรดทางการค้า เมื่อมีการแปรปริมาตรและความเข้มข้น



รูปที่ 3-24 เปรียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลของการย่อยกากมันสำปะหลังของกรดซัลฟิวริกเกรดวิเคราะห์ กับ เกรดทางการค้า เมื่อมีการแปรปริมาตรและความเข้มข้น

3.1.3.4 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส

จากการทดลองตามแผนการทดลองข้อ 2.2.1.3.2 ที่มีการแปรอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ คือ 100 , 110 และ 121 องศาเซลเซียส โดยแต่ละระดับอุณหภูมิมีการแปรระยะเวลาที่ทำการย่อย ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-14, 3-15 และ 3-16 พบว่า ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วที่สุด ผลผลิตกลูโคสเริ่มคงที่ตั้งแต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยเท่ากับ 30 นาที ให้ผลผลิตกลูโคส 2729.34 มก. คิดเป็นการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ 54.59 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการย่อยกระทั่งได้ผลผลิตกลูโคสเริ่มคงที่ นานขึ้นเป็น 60 นาที ให้ผลผลิตกลูโคส 2694.54 มก. คิดเป็นการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 53.89 และปฏิกิริยาเกิดได้ช้ามากที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส คือ แม้จะให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบ 90 นาที แต่ผลผลิตกลูโคสที่ได้มีปริมาณต่ำเพียง 1267.87 มก. คิดเป็นการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 25.36 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของที่เกิดจากการย่อยที่อุณหภูมิ 110 และ 121 องศาเซลเซียส ที่ปฏิกิริยาดำเนินไปจนสมบูรณ์ และยังไม่มีแนวโน้มว่าการย่อยภายใต้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะเริ่มคงที่คาดว่าการเพิ่มระยะเวลาในการย่อยต่อไปจะทำให้ผลผลิตกลูโคสเพิ่มขึ้นได้

ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วของการย่อยกากมันสำปะหลัง และช่วงอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสที่ดีอยู่ระหว่าง 110-121 องศาเซลเซียส จึงได้ทำการทดลองต่อไปเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการผลิตกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง ภายใต้อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3-17 และ (รูปที่ 3-25 และ 3-26) พบว่าผลผลิตกลูโคสเริ่มคงที่ตั้งแต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 30 นาที ให้ผลผลิตกลูโคส 2633.61 มก. เท่ากับเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 52.67 ซึ่งปฏิกิริยาของการย่อยดำเนินไปได้เร็วกว่าการย่อยด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ที่เริ่มให้ผลผลิตคงที่ที่ 60 นาที และใกล้เคียงกับการย่อยด้วยอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ที่เริ่มให้ผลผลิตคงที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 30 นาทีเท่ากัน นอกจากนี้ผลจากการสังเกตยังพบว่า สีของน้ำเชื่อมกลูโคสที่เกิดขึ้น มีสีเข้ม-อ่อนแตกต่างกันตามสภาวะของการย่อย โดยสีของน้ำเชื่อมจะแปรผันตามระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ คือ สีของน้ำเชื่อมจะเข้มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยยาวนานขึ้น ซึ่งน้ำเชื่อมที่มีสีเข้มที่สุดได้จากการย่อยภายใต้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส รองลงมาคือที่ 115 องศาซลเซียส, 110 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ตารางที่ 3-14 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส						กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
			ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)				
5	17.25	29.30	5.34	18.05	5.60	0.15	0.52	0.87	0.49	1.36	2.37	0.05
10	18.00	38.05	7.70	20.13	5.70	0.25	0.66	1.42	0.44	1.86	3.35	0.07
15	21.00	108.35	41.32	38.12	5.80	2.35	2.12	13.21	2.1	15.31	32.41	0.65
30	22.00	108.45	47.78	43.79	4.75	4.43	4.01	20.75	15.43	36.17	79.58	1.59
45	22.25	152.95	83.05	54.28	3.40	18.95	12.36	63.31	20.37	83.68	186.36	3.73
60	23.00	148.25	84.36	56.91	3.95	17.20	11.60	67.83	49.11	116.94	268.96	5.38
75	22.50	155.60	123.22	79.26	3.75	46.58	30.00	174.41	156.72	331.13	745.04	14.90
90	23.00	160.60	139.19	86.63	4.45	71.84	44.76	318.62	232.63	551.25	1267.87	25.36

ตารางที่ 3-15 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 110°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

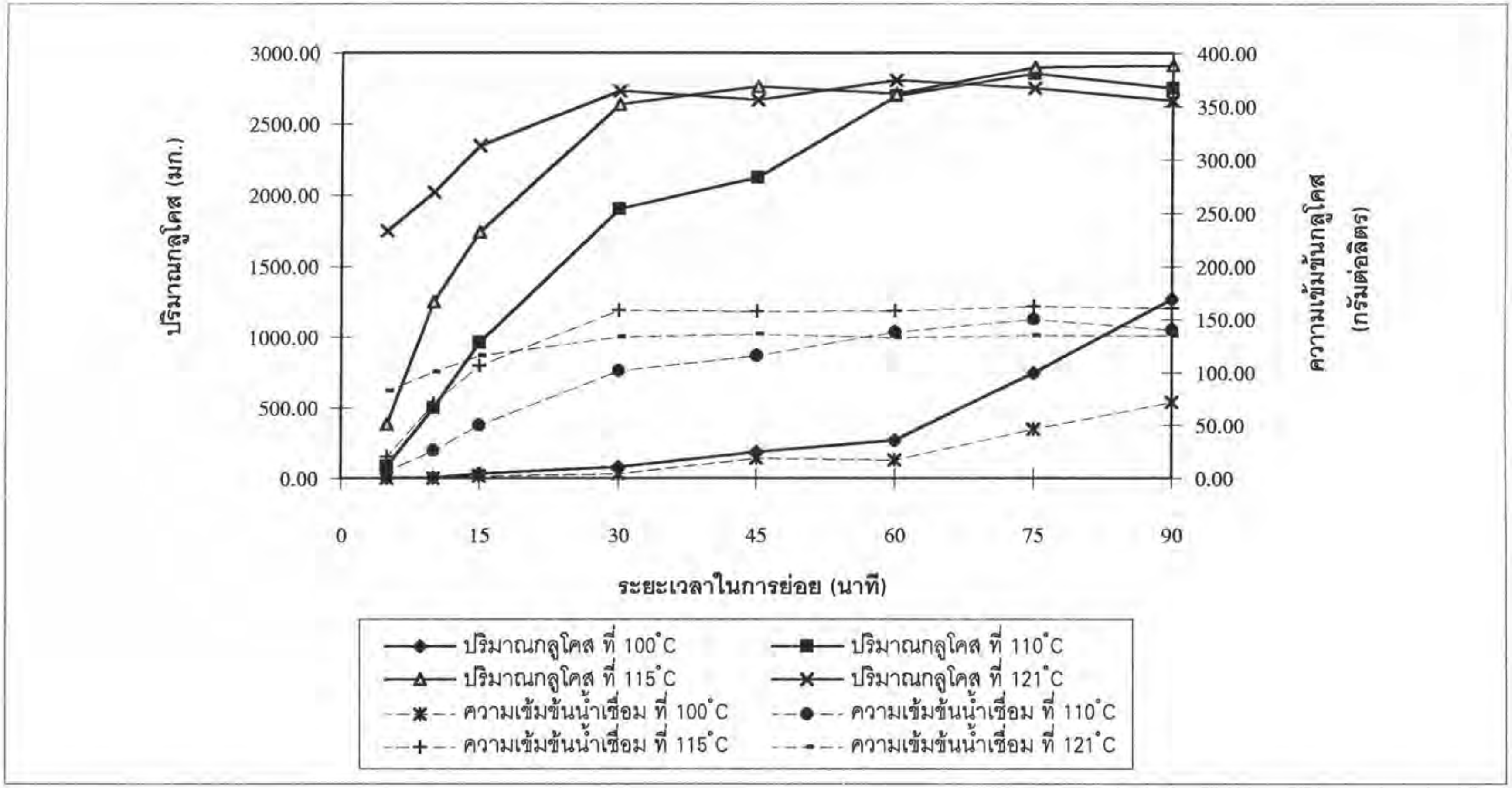
เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส						กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
			ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)				
5	22.25	150.60	58.28	38.59	6.10	6.14	4.02	37.3	2.41	39.71	89.03	1.78
10	21.75	159.25	88.54	55.59	6.15	26.34	16.54	161.83	62.64	224.47	499.17	9.98
15	22.50	159.40	112.50	70.57	6.10	50.05	31.40	305.4	124.5	429.5	958.28	19.17
30	22.50	162.20	124.72	76.92	6.40	101.36	62.59	648.68	196.76	845.44	1902.23	38.04
45	21.50	167.90	127.35	75.85	6.80	115.56	68.83	785.8	201.79	987.59	2123.01	42.46
60	22.50	175.85	154.89	88.08	6.80	138.15	78.55	939.44	258.13	1197.57	2694.54	53.89
75	23.00	172.27	150.19	86.96	6.80	138.67	80.30	942.96	297.42	1240.37	2852.85	57.06
90	22.50	176.35	154.70	87.72	6.65	140.22	79.51	932.58	290.87	1223.45	2750.59	55.01

ตารางที่ 3-16 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 121°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

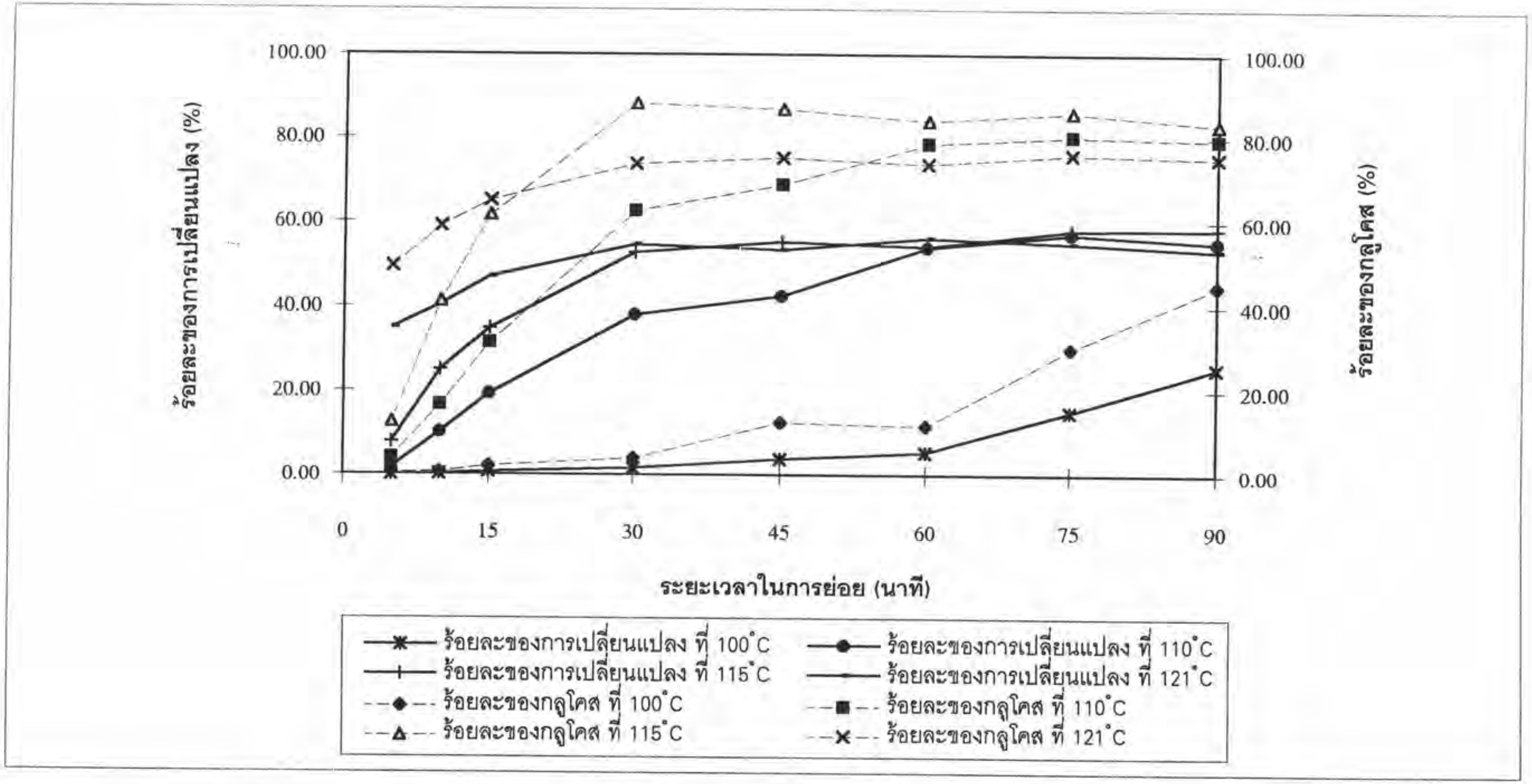
เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส						กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
			ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)				
5	23.50	167.35	130.36	78.12	4.80	82.50	49.41	396.09	347.01	743.1	1746.28	34.93
10	23.50	170.90	136.00	79.60	4.70	100.58	58.90	474.86	385.23	860.09	2021.21	40.42
15	23.50	178.25	153.57	86.15	4.10	115.95	65.05	475.53	522.66	998.19	2345.75	46.92
30	23.25	180.50	153.20	84.88	5.00	132.99	73.70	665.13	508.59	1173.71	2729.34	54.59
45	23.00	180.10	157.52	87.46	5.10	135.57	75.26	692.29	466.8	1159.1	2665.92	53.32
60	24.00	179.65	158.27	88.09	5.80	132.47	73.73	769.27	400.34	1169.61	2807.05	56.14
75	23.25	176.95	161.65	91.36	5.80	134.54	76.03	780.56	402.4	1182.96	2749.48	54.99
90	23.00	179.30	168.80	94.16	5.15	134.80	75.19	692.78	465.13	1157.91	2663.19	53.26

ตารางที่ 3-17 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 115°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)	กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
5	22.75	165.65	105.26	63.54	5.20	20.87	12.60	108.50	59.22	167.72	383.74	7.67
10	22.50	172.20	113.16	65.71	5.15	70.88	41.16	364.22	190.21	554.43	1246.55	24.93
15	22.75	172.85	133.74	77.38	5.10	106.39	61.55	542.31	222.36	764.67	1739.59	34.79
30	23.00	179.90	163.72	90.98	4.00	158.55	88.15	634.22	510.83	1145.05	2633.61	52.67
45	23.00	181.50	159.87	88.08	4.40	157.52	86.79	693.09	507.58	1200.67	2761.54	55.23
60	22.00	187.70	166.92	88.92	5.00	157.75	84.04	752.77	479.08	1231.85	2709.34	54.19
75	22.88	188.85	172.28	91.23	4.70	162.43	86.01	763.41	503.43	1266.84	2897.97	57.96
90	23.00	193.50	169.08	87.39	4.65	160.88	83.13	746.57	520.65	1267.22	2914.60	58.29



รูปที่ 3-25 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C , 110°C , 115°C และ 121°C



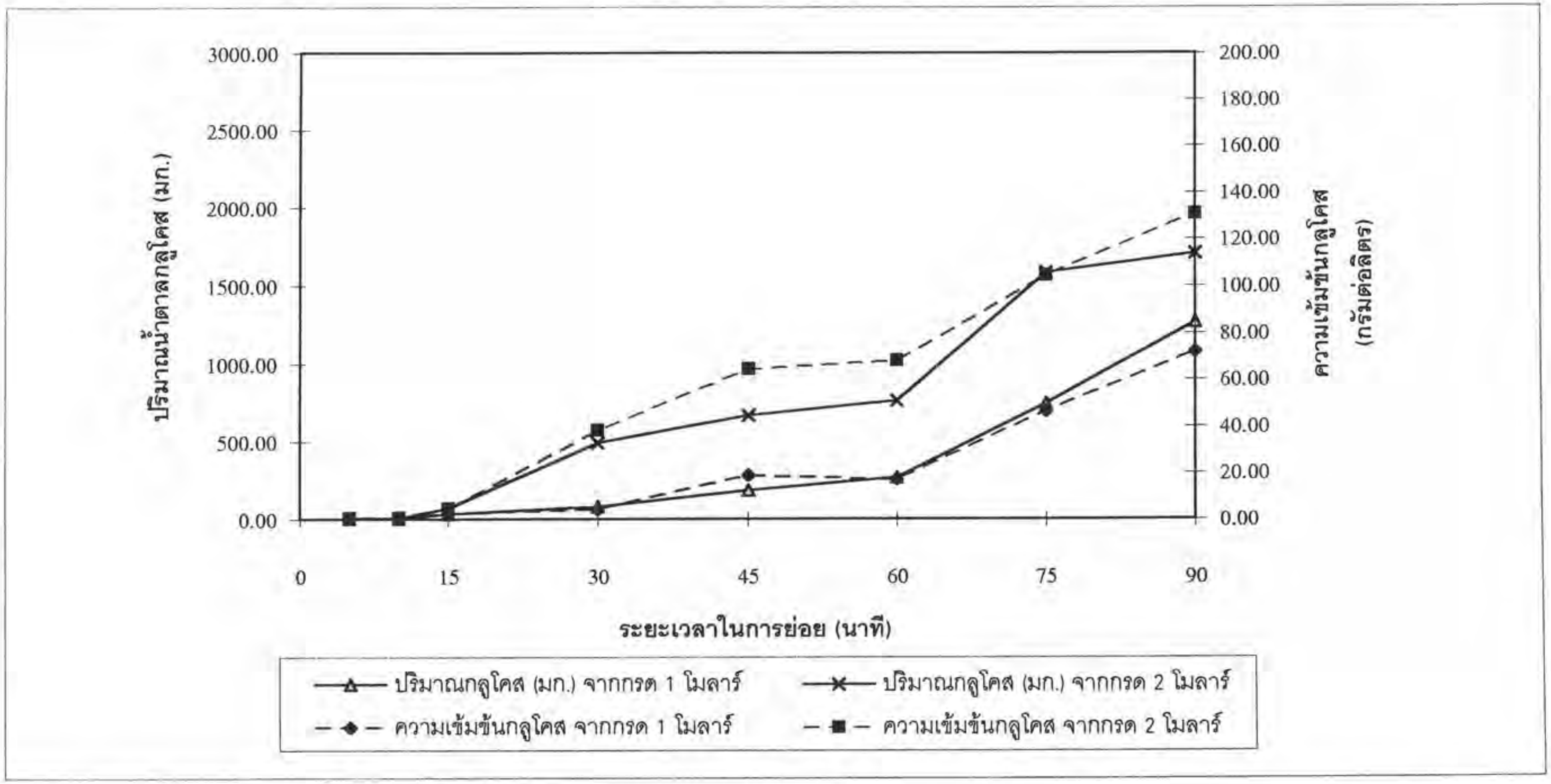
รูปที่ 3-26 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 115°C และ 121°C

เนื่องจากสภาวะของการย่อยขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน นอกจากอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการย่อยแล้ว ความเข้มข้นของกรดก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาของการย่อยเร็วขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาการย่อยเกิดขึ้นได้ช้ามากและให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ ดังนั้นหากเร่งปฏิกิริยาการย่อยให้เร็วขึ้น อาจจะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำการทดลองโดยเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็น 2.0 โมลาร์ และทำการย่อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3-18 พบว่าการใช้ความเข้มข้นกรดสูงขึ้นเป็น 2.0 โมลาร์ ทำให้ปฏิกิริยาของการย่อยดำเนินไปได้เร็วกว่า และให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงกว่าการใช้กรด 1.0 โมลาร์ ภายใต้สภาวะเดียวกัน คือ ได้ปริมาณกลูโคสสูงสุด 1705.40 มก. คิดเป็นการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 34.11 เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 90 นาที (ดังรูปที่ 3-27 และ 3-28) แต่ประสิทธิภาพการผลิตดังกล่าวยังต่ำกว่าที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริก 1.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที, 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นอกจากนี้การใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูงยังเป็นการสิ้นเปลืองกรด, แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง และยังก่อให้เกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น อันจะเป็นผลให้มีน้ำตาลกลูโคสจำนวนมากตกค้างอยู่กับตะกอนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

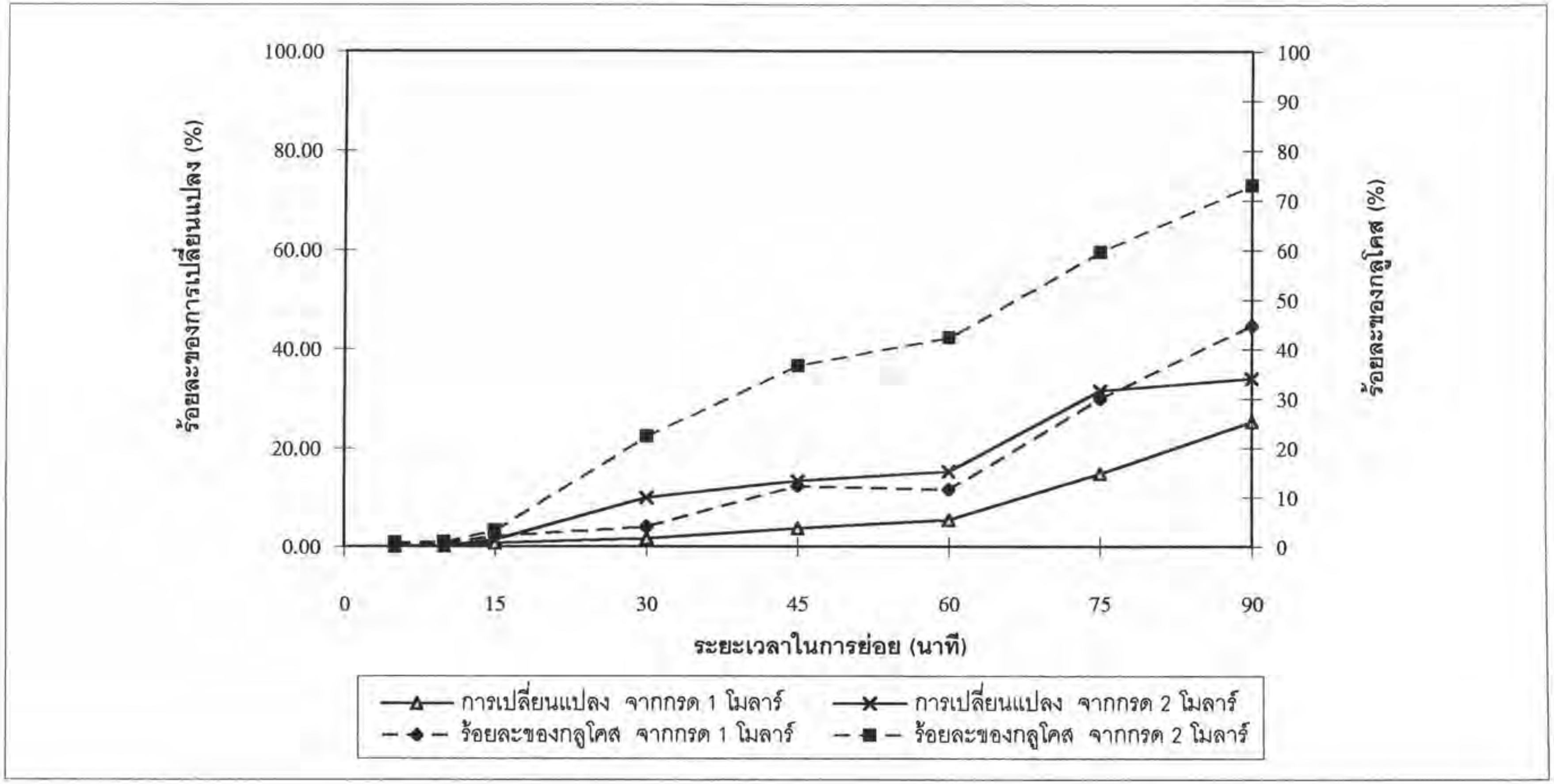
เมื่อพิจารณาสภาวะที่ใช้ในการย่อยกากมันสำปะหลังโดยรวม พบว่าสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตที่ดีที่สุดโดยใช้อุณหภูมิ และเวลาน้อยที่สุดทำให้เกิดการย่อยได้สมบูรณ์ คือ การใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. ต่อกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ทำการย่อยภายใต้อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 3-18 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและค่าร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำเชื่อมกลูโคส						กลูโคสจากน้ำล้างตะกอน (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมด (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
			ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคส (มก.)				
5	18.50	49.85	9.36	18.98	3.30	0.38	0.77	1.25	2.51	3.76	6.96	0.14
10	19.00	50.30	11.45	22.62	3.40	0.48	0.95	1.67	2.57	4.24	8.06	0.16
15	21.00	126.55	44.27	33.52	2.10	4.62	3.24	8.11	24.08	32.19	68.07	1.36
30	22.75	169.30	107.80	63.41	1.90	38.32	22.32	69.94	148.61	218.54	495.00	9.90
45	22.75	176.00	132.15	75.12	1.10	64.45	36.55	69.96	224.53	294.49	669.98	13.40
60	22.75	160.60	133.74	83.18	1.55	68.02	42.33	105.26	230.08	335.34	762.82	15.26
75	23.00	175.20	148.97	85.00	1.30	104.33	59.47	134.82	553.34	688.16	1582.77	31.66
90	22.75	179.40	153.67	85.64	2.10	130.79	72.93	273.44	476.00	749.44	1705.40	34.11



รูปที่ 3-27 เปรียบเทียบปริมาณ และความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100°C ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 โมลาร์



รูปที่ 3-28 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100°C ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 โมลาร์

3.1.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกในขวดรูปกรวยขนาด 2 ลิตร

จากการศึกษาที่ได้รายงานมาดังข้างต้นในการหาสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดเพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส ได้ทำการทดลองเป็นต้นแบบในขวดรูปกรวยขนาด 250 มล. กับกากมันสำปะหลังสดที่มีน้ำหนักเทียบเท่ากับกากมันแห้ง 5 กรัม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ย่อยเพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส ได้จากการใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. ทำการย่อยภายใต้อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้ประสิทธิภาพการผลิตโดยสามารถทำให้เกิดการผลิตกลูโคสได้ประมาณร้อยละ 50 ของกากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น และจากงานวิจัยของสินีนาถ เจียมอนุกูลกิจ (2539) พบว่าสามารถใช้สารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นแหล่งคาร์บอนในการผลิตกรดมะนาวแทนการใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงในการจะพัฒนาการใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังต่อไปจนครบวงจร จึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสในระดับที่มากกว่าการทดลองต้นแบบ โดยทำการทดลองใช้กากมันสำปะหลังที่มีน้ำหนักเทียบเท่ากับกากมันแห้ง 125 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 250 มล. (อัตราส่วนกากมัน 5 กรัม ต่อกรด 10 มล.) ลงในขวดรูปกรวยขนาด 2 ลิตร ทำการย่อยภายใต้อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3-19 พบว่าให้ประสิทธิภาพการผลิตกลูโคสร้อยละ 49.25 ของกากมันสำปะหลังเริ่มต้น และน้ำเชื่อมกลูโคสที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้น 123.56 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3-19 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ และความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 125 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ในขวดรูปกรวยขนาด 2 ลิตร ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 250 มล. ที่อุณหภูมิ 115°C เป็นเวลา 30 นาที

สารละลาย	ปริมาตรของสารละลาย (มล.)	ปริมาณของแข็งในสารละลาย (กรัมต่อลิตร)	น้ำตาลรีดิวซ์		น้ำตาลกลูโคส		ปริมาณกลูโคส (กรัม)
			ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	ความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)	กลูโคสร้อยละ (%)	
น้ำเชื่อมจากการย่อยกากมัน	392	185.9	133.03	71.56	123.56	66.65	48.44
น้ำล้างตะกอน	531	41.8	28.46	68.08	24.71	59.12	13.12
						กลูโคสสุทธิ	61.56

3.2 จลนพลศาสตร์ของการผลิตกลูโคสด้วยกรด

3.2.1 การศึกษาหาค่าคงที่ขณะปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการทดลองข้อ 3.1.3.4 ที่ทำการแปรอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ 10 มล. ภายใต้อุณหภูมิ 100, 110 และ 121 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาของการย่อยดำเนินไปช้ามาก ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลูโคสที่เกิดขึ้นทุก ๆ 15 นาทีไปจนครบ 90 นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-20 ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (k_{100}) ได้จากสมการ

$$\ln C = kt + \ln C_0 \qquad (1)$$

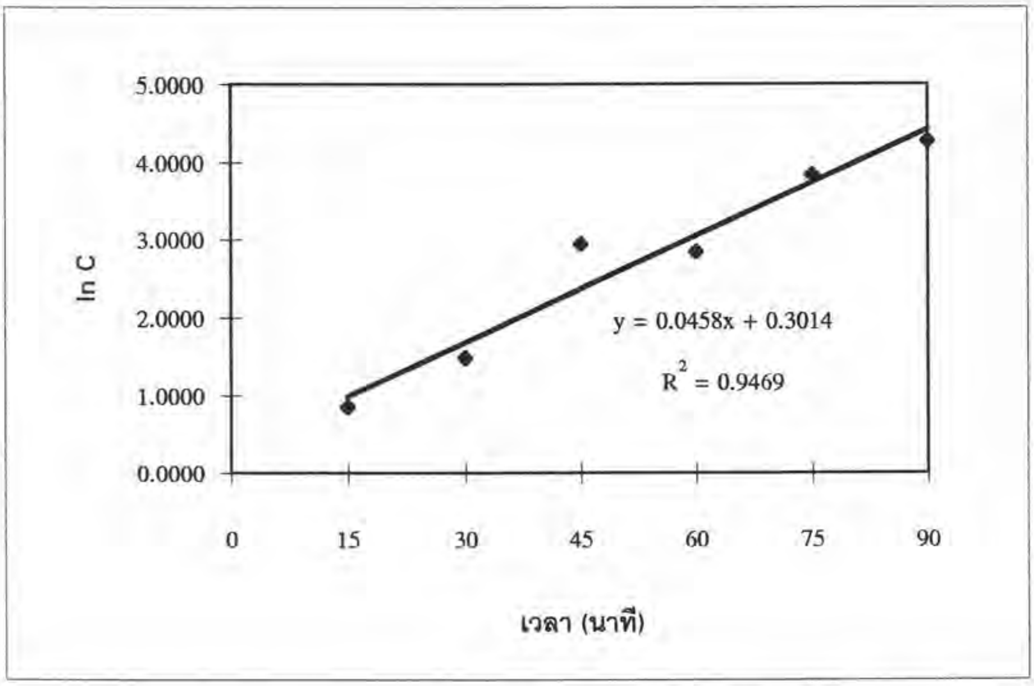
โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln C กับเวลา t เพื่อหาค่า k_{100} จากความชันของเส้นตรงที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3-29 ซึ่งพบว่ากราฟมีความชันเท่ากับ 0.0458 ดังนั้นค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จึงมีค่า k_{100} = 0.0458 (นาที)$^{-1}$

ตารางที่ 3-20 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล, ปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
15	21.00	2.35	15.31	32.41	0.65
30	22.00	4.43	36.17	79.58	1.59
45	22.25	18.95	83.68	186.36	3.73
60	23.00	17.20	116.94	268.96	5.38
75	22.50	46.58	331.13	745.04	14.90
90	23.00	71.84	551.25	1267.87	25.36

ตารางที่ 3-21 ลอการิทึมของความเข้มข้นกลูโคส ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	ln C
15	2.35	0.8544
30	4.43	1.4884
45	18.95	2.9418
60	17.20	2.8449
75	46.58	3.8412
90	71.84	4.2744



รูปที่ 3-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln C กับเวลา ของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100°C

เนื่องจากปฏิกิริยาของการย่อยกากมันสำปะหลังภายใต้อุณหภูมิ 110, 115 และ 121 องศาเซลเซียส แตกต่างไปจากการย่อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งที่ 100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ช้าและอุณหภูมิในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการย่อย จึงสามารถใช้สมการที่ (1) หาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้ ส่วนการย่อยกากมันสำปะหลังภายใต้อุณหภูมิ 110 , 115 และ 121 องศาเซลเซียส ที่ทำให้เกิดการย่อยภายในเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (autoclave) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดนั้นอุณหภูมิระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะไม่คงที่ เพราะปฏิกิริยาได้ดำเนินไปเรื่อย ๆ กว่าที่เครื่องนึ่งจะเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนได้เท่าที่กำหนด จากนั้นเครื่องจึงจะจับเวลาให้เกิดการย่อยเท่าที่ตั้งเวลาเอาไว้ ซึ่งไม่สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาได้ด้วยสมการอัตราเร็วทั่วไป (simple rate equation) ดังนั้นจึงใช้วิธีการคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาตามวิธีของ Guggenheim (Daniels, 1970) ซึ่งใช้สำหรับปฏิกิริยาที่ไม่สามารถวัดผลที่เกิด ณ เวลาเริ่มต้น เนื่องจากเกิดขึ้นเร็วหรืออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดปฏิกิริยา โดยจัดข้อมูลเป็น 2 ชุด ชุดแรก (C) จะเก็บผลจากการสังเกตที่เวลา t ส่วนชุดที่สอง (C′) จะเป็นผลจากการสังเกตที่เวลา $t + \Delta t$ เมื่อให้ Δt เป็นช่วงเวลาที่กำหนด

พิจารณาจากรูปที่ 3-30 (จากผลการทดลองข้อ 3.1.3.4) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 25 นาที จึงจะทำให้เกิดผลผลิตกลูโคสได้ประมาณครึ่งหนึ่งของการย่อยที่เกิดได้จนสมบูรณ์ ทำการทดลองเพื่อเก็บผลของความเข้มข้นกลูโคสที่เกิดขึ้นทุก ๆ t = 5 นาที เป็นข้อมูลชุดที่ 1 คือ C_1 , C_2 , C_3 , C_4 และ C_5 ส่วนข้อมูลชุดที่สอง (C′) ได้กำหนดให้ Δt มีค่าเท่ากับระยะเวลาครึ่งหนึ่งของระยะเวลาที่ใช้เพื่อให้เกิดการย่อยได้สมบูรณ์ ซึ่งที่ 110 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเริ่มคงที่ที่ 60 นาที ดังนั้นจึงกำหนดให้ Δt = 30 นาที และเก็บผลของความเข้มข้นกลูโคสที่เกิดขึ้นที่ $t + \Delta t$ = 35 , 40 , 45 , 50 และ 55 นาที เป็นข้อมูลชุดที่สอง คือ C'_1 , C'_2 , C'_3 , C'_4 และ C'_5 เป็นข้อมูลชุดที่สอง ดังตารางที่ 3-22

คำนวณค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของข้อมูลชุดที่ 1 และชุดที่ 2 เป็นคู่ ๆ เพื่อคำนวณค่า ln (C′-C) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-23 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C′-C) กับเวลา t ดังรูปที่ 3-31 จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (k_{110}) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

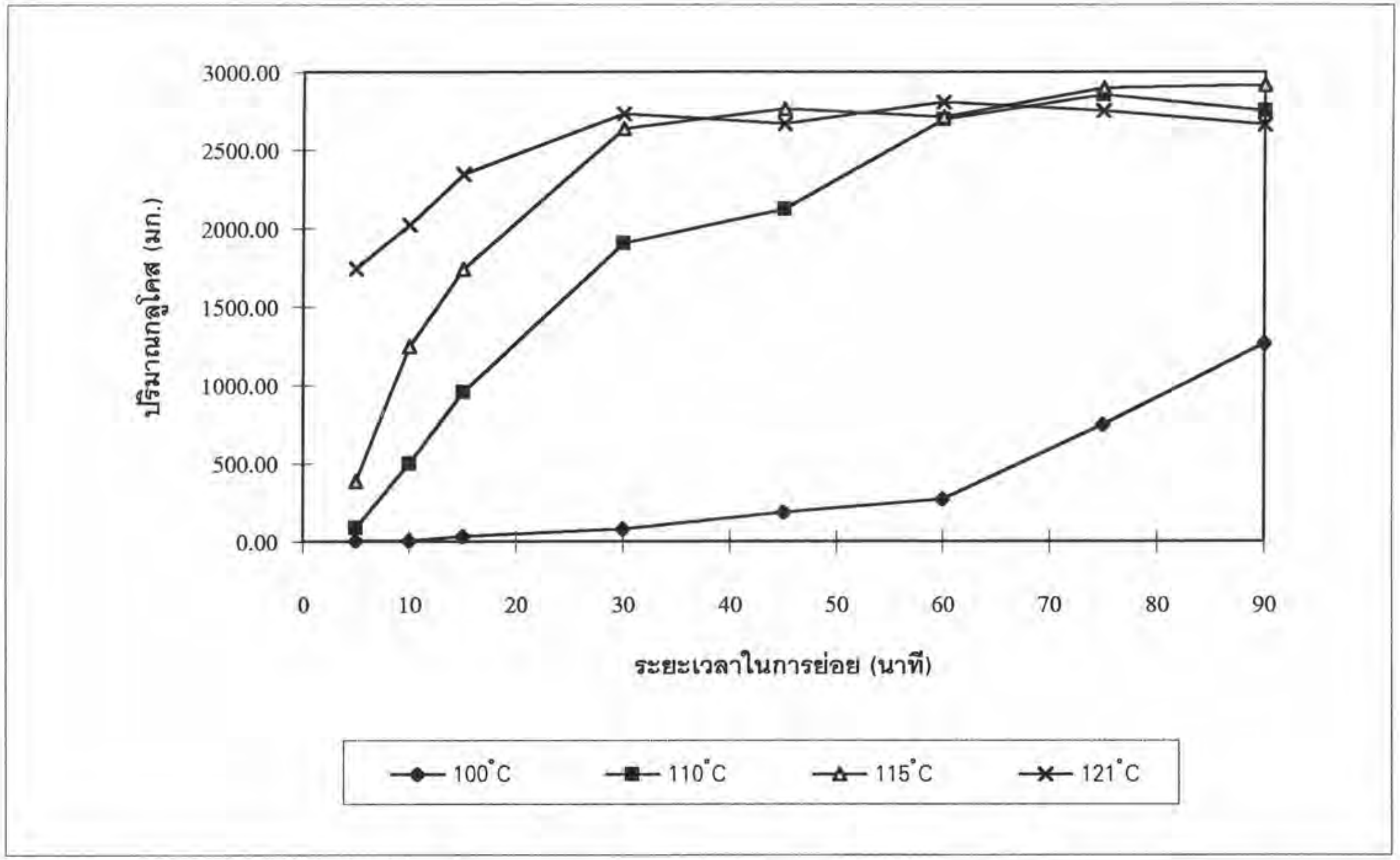
$$\ln (C'-C) = -kt + \ln [(C_m - C_0) (1 - e^{-k\Delta t})] \quad (2)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C′-C) กับเวลา t ที่เป็นเส้นตรง มีความชันเท่ากับ 0.05809 ดังนั้นค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จึงมีค่า k_{110} = 0.0581 (นาที)$^{-1}$

ปฏิกิริยาการย่อยกากมันสำปะหลังภายใต้อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส ดำเนินไปได้เร็วกว่าที่ 110 องศาเซลเซียส กลูโคสเกิดขึ้นได้ประมาณครึ่งหนึ่งของการย่อยที่เกิดได้สมบูรณ์ใช้เวลา 13 นาที ดังนั้นจึงแบ่งช่วงระยะเวลาเพื่อเก็บผลของความเข้มข้นที่เกิดขึ้นเป็น 4 ช่วง ๆ ละ 5 นาที เป็นข้อมูลชุดที่ 1 คือ C_1 , C_2 , C_3 และ C_4 ส่วนปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นจากการย่อยที่ 115 องศาเซลเซียส นี้จะเริ่มคงที่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป 30 นาที ดังนั้นจึงกำหนด Δt ให้มีค่าเท่ากับ 15 นาที และข้อมูลชุดที่ 2 ที่เวลา t + Δt เท่ากับ 20, 25, 30 และ 35 นาทีตามลำดับ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-24 ซึ่งสามารถคำนวณ ln (C′-C) ของแต่ละช่วงเวลาได้ดังตารางที่ 3-25

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C′-C) กับเวลา t ดังรูปที่ 3-32 ที่เป็นไปตามสมการที่ (2) พบว่า ได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0599 ดังนั้นค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส จึงมีค่า k_{115} = 0.0599 (นาที)$^{-1}$

พิจารณาปฏิกิริยาการย่อยกากมันสำปะหลังภายใต้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาดำเนินไปได้เร็วมาก ทำให้ผลผลิตกลูโคสเกิดขึ้นมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณกลูโคสที่เกิดได้สมบูรณ์ในเวลาเพียง 5 นาที และเนื่องจากความจำกัดทางด้านเครื่องมือจึงไม่สามารถแปรระยะเวลาในการย่อยให้ละเอียดกว่า 5 นาทีได้ จึงไม่ทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส (k_{121}) และใช้เฉพาะค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา k_{100} ,k_{110} และ k_{115} ในการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาต่อไป



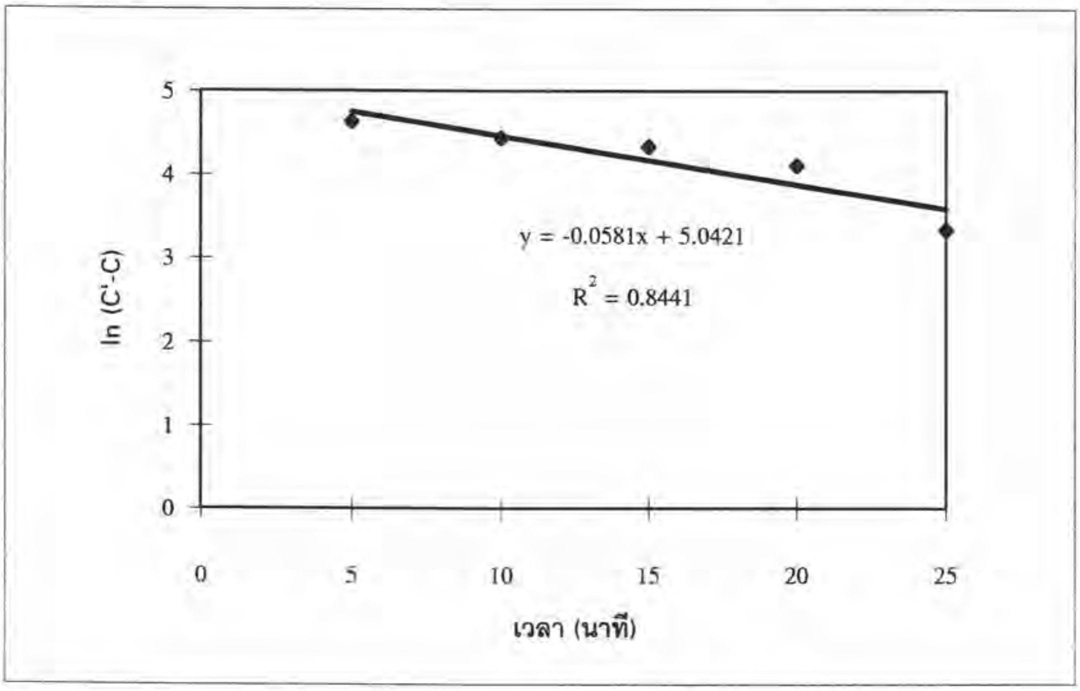
รูปที่ 3-30 เปรียบเทียบปริมาณกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 100˚C , 110˚C , 115˚C และ 121˚C

ตารางที่ 3-22 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล, ปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 110°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
5	21.25	6.02	40.61	88.32	1.77
10	21.50	26.34	224.47	499.17	9.98
15	22.25	48.91	404.71	910.60	18.21
20	23.00	70.63	556.72	1280.46	25.61
25	22.50	106.39	843.61	1898.11	37.96
35	22.75	108.59	916.66	2085.32	41.71
40	22.75	110.91	958.11	2180.36	43.61
45	22.75	125.12	1069.66	2433.56	48.67
50	23.00	131.57	1175.62	2703.91	54.08
55	22.50	134.67	1172.47	2638.06	52.76

ตารางที่ 3-23 ลอการิทึมของความเข้มข้นกลูโคส ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 110°C

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)		ln (C'-C)
	ที่เวลา t	ที่เวลา t + Δt	
5	6.02	108.59	4.6305
10	26.34	110.91	4.4376
15	48.91	125.12	4.3335
20	70.63	131.57	4.1099
25	106.39	134.67	3.3422



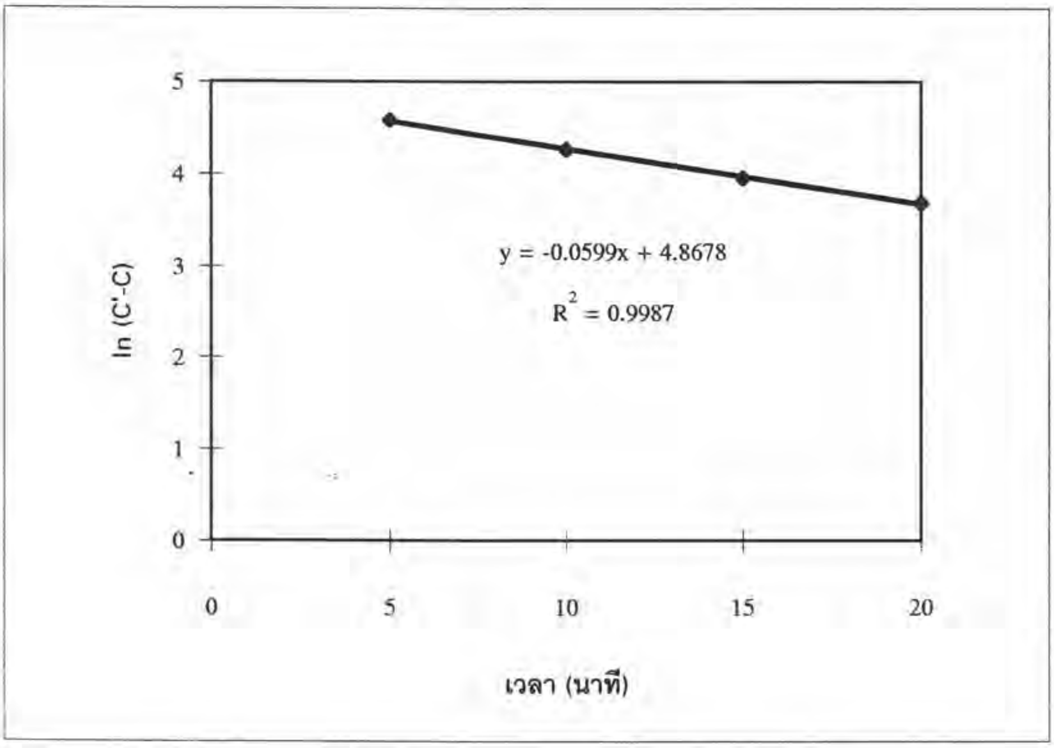
รูปที่ 3-31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln C' - C กับเวลาของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 110°C

ตารางที่ 3-24 ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล, ปริมาณและความเข้มข้นกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 115°C เมื่อมีการแปรระยะเวลาในการย่อย

เวลา (นาที)	ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)	ปริมาณกลูโคสทั้งหมดจากสารละลาย 10 มล. (มก.)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
5	22.75	20.87	167.72	383.74	7.67
10	22.50	70.88	554.43	1246.55	24.93
15	22.75	106.39	764.67	1739.59	34.79
20	23.00	118.27	904.88	2081.23	41.62
25	22.50	141.77	1052.45	2366.99	47.34
30	23.00	158.55	1145.05	2633.62	52.67
35	22.75	158.04	1154.83	2627.24	52.54

ตารางที่ 3-25 ลอการิทึมของความเข้มข้นกลูโคส ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิ 115°C

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นกลูโคส (มก.ต่อ มล.)		ln (C'-C)
	ที่เวลา t	ที่เวลา t + Δt	
5	20.87	118.27	4.5788
10	70.88	141.77	4.2611
15	106.39	158.55	3.9543
20	118.27	158.04	3.6831



รูปที่ 3-32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln C' - C กับ เวลาของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 , มล. ที่อุณหภูมิ 115°C

3.2.2 การศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของการเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา จากผลการทดลองข้อ 3.2.1 ซึ่งศึกษาค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-26 พบว่า ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรผันตามอุณหภูมิ โดยมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) คือ

$$k = Ae^{-Ea/RT} \qquad (3)$$

หรือ

$$\ln k = \frac{-Ea}{RT} + \ln A \qquad (4)$$

เมื่อคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาในรูป ln k ที่อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน ดังตารางที่ 3-27 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln k กับ 1/T ดังรูปที่ 3-33 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน = -2712.2 ซึ่งเท่ากับค่า -Ea/R ดังนั้นปฏิกิริยาของการย่อยกากมันสำปะหลังจึงมีค่าพลังงานกระตุ้น (Ea)

$$\frac{-Ea}{RT} = -2712.2$$

$$Ea = 22.55 \quad KJ/mol$$

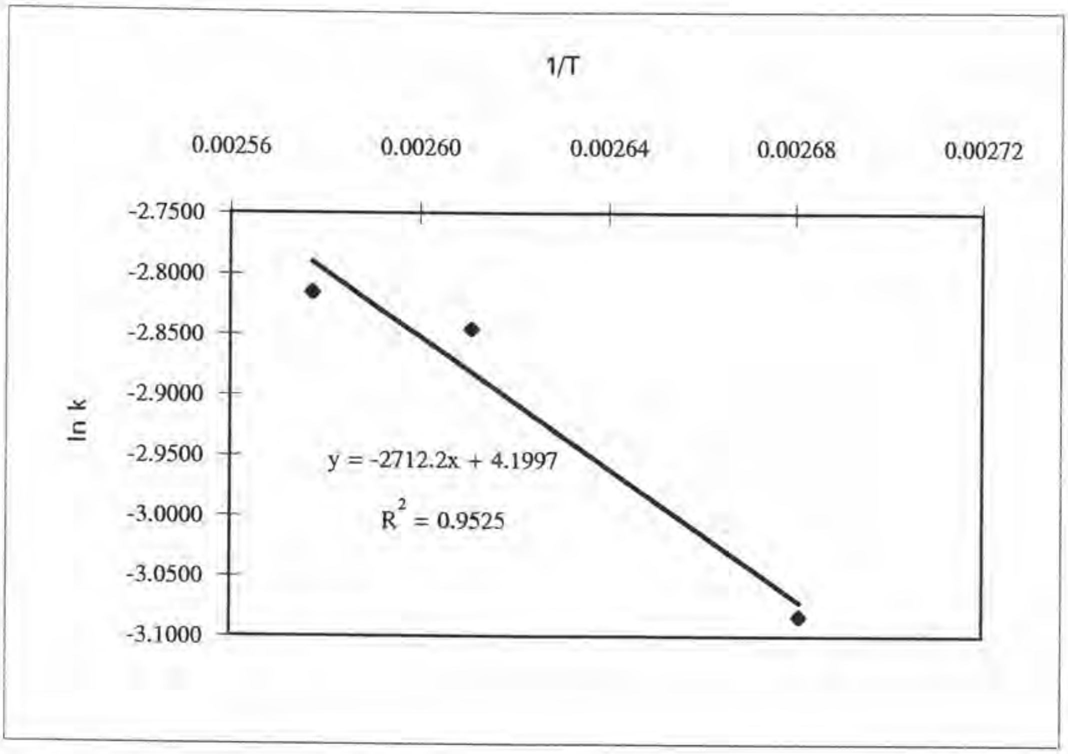
ดังนั้นปฏิกิริยาของการย่อยกากมันสำปะหลังจึงมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ22.55 KJ/mol

ตารางที่ 3-26 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล. ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (นาที)
100	373	0.0458
110	383	0.0581
115	388	0.0599

ตารางที่ 3-27 ส่วนกลับของอุณหภูมิเคลวิน กับค่าลอการิทึมของค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยา ของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล.

ส่วนกลับของอุณหภูมิเคลวิน (1/T)	ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (k)	ln k
0.00268	0.0458	-3.0835
0.00261	0.0581	-2.8456
0.00258	0.0599	-2.8151



รูปที่ 3-33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln k กับส่วนกลับของอุณหภูมิเคลวิน ของการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม โดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์, 10 มล.

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

3.3.1 ผลของปริมาณเอนไซม์อะไมเลส (เอนไซม์ BAN) กับระยะเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลังต่อค่าสมมูลเดกซ์โทรส

ในกระบวนการของการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ในขั้นแรกเป็นการย่อยแป้งจากการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส เพื่อทำให้เกิดการย่อยแป้งอย่างสุ่มเป็นลูกโซ่กลูโคสสายสั้น ๆ สามารถวัดประสิทธิภาพของการย่อยแป้งได้ด้วยค่าสมมูลเดกซ์โทรส และเป็นค่าที่มีผลอย่างยิ่งต่อการผลิตกลูโคสโดยการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสต่อไปในขั้นที่สอง คือ การใช้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่พอเหมาะจึงจะทำให้เกิดการย่อยลูกโซ่กลูโคสไปเป็นหน่วยกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลเดกซ์โทรสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของเอนไซม์อะไมเลสชนิดหนึ่ง เมื่อมีการแปรปริมาณเอนไซม์และระยะเวลาในการย่อยตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.1 เพื่อนำผลจากการทดลองมาคำนวณค่าสมมูลเดกซ์โทรส (ภาคผนวก จ) ดังแสดงในตารางที่ 3-28 รูปที่ 3-34 พบว่าค่าสมมูลเดกซ์โทรสแปรผันตามปริมาณเอนไซม์และเวลาที่ใช้ในการย่อย คือ เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์มากและระยะเวลาในการย่อยนาน ทำให้ได้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสสูงแต่ค่าสมมูลเดกซ์โทรสจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อระยะเวลาในการย่อยตั้งแต่ประมาณ 60 นาทีขึ้นไปในทุกปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ โดยสามารถแบ่งค่าสมมูลเดกซ์โทรสออกได้เป็นช่วง ๆ ตามปริมาณเอนมีไซม์ที่ใช้ คือ ค่าระหว่าง 20-29 ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN 250 หน่วย ค่าระหว่าง 28-33 ได้จากการใช้เอนไซม์ 500 หน่วย , ค่าระหว่าง 34-43 ได้จากการใช้เอนไซม์ 750 หน่วย และค่าระหว่าง 35-45 ได้จากการใช้เอนไซม์ 1000 หน่วย

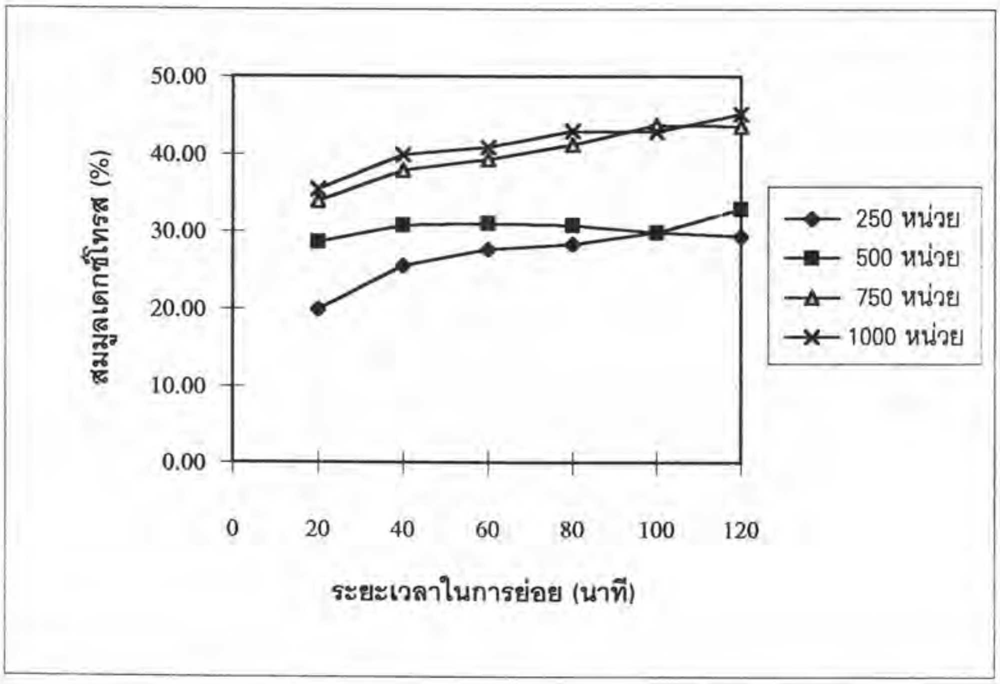
ดังนั้นในการทดลองต่อไปซึ่งจะทำการศึกษาผลของค่าสมมูลเดกซ์โทรสต่อประสิทธิภาพในการผลิตกลูโคส จึงใช้การย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN 500 หน่วยเป็นเวลา 20, 40 และ 60 นาที อันจะทำให้ได้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสเริ่มต้นประมาณ 28, 30 และ 33 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ครอบคลุมไปถึงค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ 250 หน่วยและ 750 หน่วย ทั้งนี้หากพบว่าแนวโน้มของการผลิตกลูโคสจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีค่าสมมูลเดกซ์โทรสน้อยกว่า 29 จึงต้องใช้ปริมาณเอนไซม์ BAN ในการย่อยกากมันสำปะหลังลดลงหรือในทางตรงกันข้ามหากมีแนวโน้มของการผลิตกลูโคสที่ได้จากค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่มากกว่า 33 จึงต้องใช้ปริมาณเอนไซม์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3-28 ปริมาณเอนไซม์ BAN กับเวลาที่ใช้ในการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ต่อสมมูลเดกซ์โทรส

BAN (หน่วย)	เวลา (นาที)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)
250	20	42.03	8.34	19.89
	40	46.00	11.74	25.51
	60	48.55	13.45	27.67
	80	48.80	13.89	28.35
	100	51.00	15.23	29.87
	120	51.40	15.07	29.32
500	20	44.57	12.77	28.61
	40	54.23	16.70	30.76
	60	56.17	17.49	31.08
	80	62.10	19.14	30.81
	100	64.80	19.35	29.87
	120	64.70	21.31	32.93
750	20	56.10	19.03	33.93
	40	59.70	22.64	37.91
	60	63.10	24.84	39.35
	80	63.50	26.30	41.29
	100	64.60	28.32	43.84
	120	64.40	28.10	43.64

ตารางที่ 3-28 (ต่อ)

BAN (หน่วย)	เวลา (นาที)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)
1000	20	58.25	20.65	35.45
	40	61.10	24.40	39.93
	60	65.00	26.61	40.94
	80	64.90	27.97	43.10
	100	66.80	28.68	42.94
	120	67.40	30.48	45.22



รูปที่ 3-34 เปรียบเทียบค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN 250 , 500 , 750 และ 1000 หน่วย ที่เวลาต่างๆ

3.3.2 ผลของค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์อะไมเลส (เอนไซม์ BAN) ต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส เมื่อนำมาย่อยต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (เอนไซม์ SPEZYME)

จากการแปรค่าสมมูลเดกซ์โทรสเริ่มต้นเป็น 28 , 30 และ 33 ต่อประสิทธิภาพในการผลิตกลูโคสเมื่อนำมาย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME 300 และ 1500 หน่วย โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 6 ชั่วโมง และทุก ๆ 12 ชั่วโมงจนครบ 72 ชั่วโมง ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.2 โดยวัดประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสจากค่าร้อยละของกลูโคส ผลการทดลองดังตารางที่ 3-29 และ 3-30 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละของกลูโคสที่เวลาต่าง ๆ ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้เอนไซม์ SPEZYME ย่อยกากมันสำปะหลังที่ค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 28 ให้ค่าร้อยละของกลูโคสต่ำกว่าการย่อยกากมันที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรส 30 และ 33 ในขณะที่การย่อยกากมันที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรส 30 เทียบกับ 33 กลับให้ค่าร้อยละของกลูโคสไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3-35 ดังนั้นค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ควรมีค่าประมาณ 30

ในกระบวนการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ จึงเลือกใช้การย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN 500 หน่วย เป็นเวลา 40 นาที ซึ่งให้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 30 เป็นค่าสมมูลเดกซ์โทรสสำหรับการนำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME เพื่อจะได้ทำการศึกษาถึงปริมาณของเอนไซม์ SPEZYME และเวลาที่เหมาะสมต่อการผลิตกลูโคสในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3-29 สมมูลเดกซ์โทรส ความเข้มข้นและร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ SPEZYME 300 หน่วย เมื่อมีการแปรค่าสมมูลเดกซ์โทรสของกากมันสำปะหลัง

สมมูลเดกซ์โทรส (%)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)
28	0	39.30	11.44	28.55	-	-
	6	41.10	15.67	38.16	0.21	0.52
	12	41.20	21.76	52.93	2.17	5.27
	24	41.40	24.91	60.76	8.32	20.16
	36	42.15	26.15	62.12	18.66	44.49
	48	42.15	27.19	64.50	22.52	53.53
	60	42.70	28.67	67.13	22.93	53.70
	72	44.15	30.00	67.95	25.46	57.68

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-29 (ต่อ)

สมมูลเดกซ์โทรส (%)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)
30	0	47.6	14.12	30.04	-	-
	6	47.15	19.10	40.49	0.21	0.47
	12	47.10	32.24	68.44	2.16	4.59
	24	47.75	38.39	80.38	8.32	17.43
	36	48.65	40.19	82.59	20.75	42.48
	48	48.95	41.31	84.48	35.07	71.64
	60	49.65	42.34	84.97	36.10	72.71
	72	50.00	42.38	84.74	36.36	72.72

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-29 (ต่อ)

สมมูลเดกซ์โทรส (%)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)
33	0	50.20	16.68	33.22	-	-
	6	50.05	19.53	39.04	0.21	0.44
	12	50.65	38.00	75.02	2.16	4.25
	24	51.70	43.15	83.45	8.34	16.15
	36	51.70	44.34	85.75	20.66	39.96
	48	53.00	46.24	87.27	36.47	68.82
	60	53.25	47.10	88.45	39.77	74.69
	72	53.60	47.43	88.48	41.32	77.09

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-30 สมมูลเดกซ์โทรส ความเข้มข้นและร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ SPEZYME 1500 หน่วย เมื่อมีการแปรค่าสมมูลเดกซ์โทรสของกากมันสำปะหลัง

สมมูลเดกซ์โทรส (%)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)
28	0	42.85	12.12	28.28	-	-
	6	42.65	20.48	47.98	0.22	0.51
	12	43.00	28.57	66.83	2.14	4.92
	24	43.05	34.67	80.52	8.36	19.41
	36	43.05	34.62	80.38	20.73	48.16
	48	44.80	35.58	79.49	31.56	70.52
	60	44.90	36.43	81.14	31.61	70.40
	72	47.30	39.53	83.63	32.69	69.17

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-30 (ต่อ)

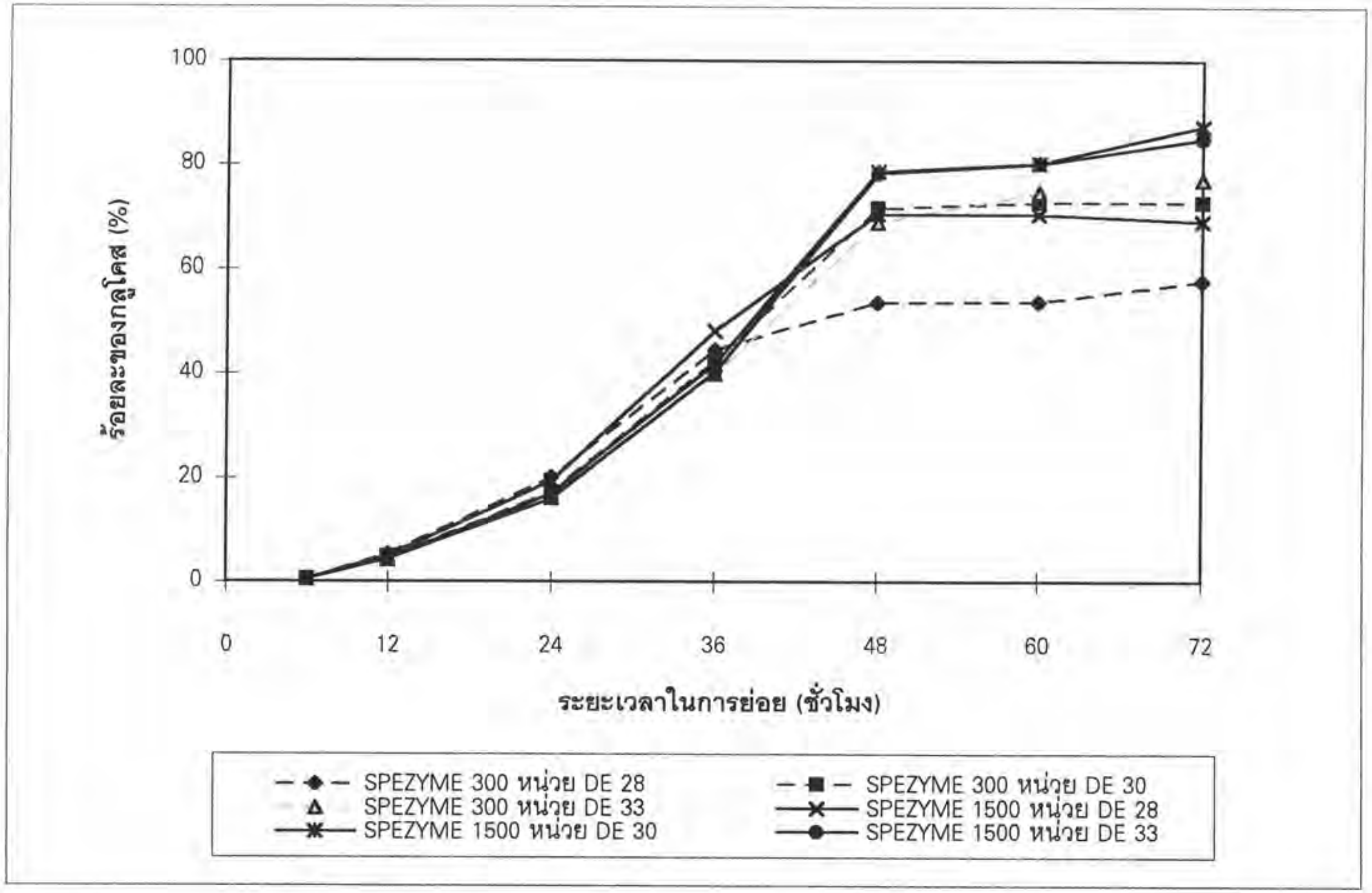
สมมูลเดกซ์โทรส (%)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)
30	0	48.55	14.77	29.88	-	-
	6	48.90	22.79	46.60	0.21	0.45
	12	49.35	41.38	83.85	2.16	4.37
	24	49.05	42.67	86.96	8.33	17.00
	36	49.60	43.29	87.30	20.74	41.82
	48	52.95	46.19	87.92	41.53	78.61
	60	53.50	47.14	88.12	43.23	80.21
	72	54.15	47.86	88.37	47.26	87.28

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-30 (ต่อ)

สมมูลเดกซ์โทรส (%)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)
33	0	47.85	15.96	33.2	-	-
	6	48.65	19.64	40.33	0.21	0.46
	12	49.70	41.14	82.81	2.16	4.35
	24	51.90	44.91	86.52	8.36	16.09
	36	51.20	44.91	87.69	20.65	40.32
	48	52.10	47.15	90.50	40.75	78.33
	60	52.20	47.38	90.77	41.83	80.15
	72	53.35	48.81	91.48	45.30	84.88

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-35 เทียบเทียบค่าร้อยละของกลูโคส ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ SPEZYME 300 และ 1500 หน่วย ที่มีการแปรค่าสมมูลเดกซ์โทรส

3.3.3 ผลของปริมาณเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (เอนไซม์ SPEZYME) และเวลาในการย่อยกากมันสำปะหลังที่ผ่านขั้นตอนการทำให้เกิดลิเคอแฟคชั่นด้วยเอนไซม์อะไมเลส (เอนไซม์ BAN) ต่อประสิทธิภาพในการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส

ในการศึกษาหาปริมาณเอนไซม์ SPEZYME และระยะเวลาในการย่อยที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ BAN ให้มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 30 ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า Liquefied Cassava Pulp หรือ LCP เพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส โดยทำการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เป็น 300 , 450 และ 600 หน่วย ซึ่งมีการปรับปรุงการทดลองโดยเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ SPEZYME เป็น 300 รอบต่อนาที แทนการบ่มทิ้งไว้เพียงอย่างเดียวในอ่างน้ำร้อนติดตามการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสที่พิจารณาจากร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล, ปริมาณ, ความเข้มข้น และร้อยละของกลูโคส ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 6 และ ทุก ๆ 12 ชั่วโมงไปจนครบ 72 ชั่วโมง ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.3ก ซึ่งผลของการเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าระหว่างการเกิดการย่อยทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการทดลองที่ผ่านมา จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 3-31 พบว่าการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม ด้วยเอนไซม์ SPEZYME ปริมาณ 300 , 450 และ 600 หน่วย ให้ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล, ปริมาณ, ความเข้มข้นและร้อยละของกลูโคสไม่แตกต่างกันและจะเริ่มคงที่เมื่อให้เกิดการย่อยไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3-36 และ 3-37

ตารางที่ 3-31 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและร้อยละของกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เท่ากับ 300 , 450 และ 600 หน่วย

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา- (ชั่วโมง)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
300	0	56.0	49.60	15.13	30.50	-	-	-	-
	6	59.0	49.80	48.43	97.25	35.27	70.84	2081.19	41.62
	12	55.8	51.25	50.19	97.95	39.66	77.40	2211.26	44.23
	24	57.0	52.50	51.19	97.50	43.43	82.72	2476.64	49.53
	36	56.5	52.40	51.33	97.96	45.55	86.93	2573.94	51.48
	48	56.5	51.95	51.05	98.26	45.71	87.98	2582.00	51.64
	60	57.0	52.30	50.25	96.61	46.07	88.08	2625.90	52.52
	72	57.8	51.55	50.29	97.54	45.24	87.76	2612.19	52.24

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

: การทดลองนี้มีการเพิ่มอัตราเร็วรอบของการเขย่าระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์

ตารางที่ 3-31 (ต่อ)

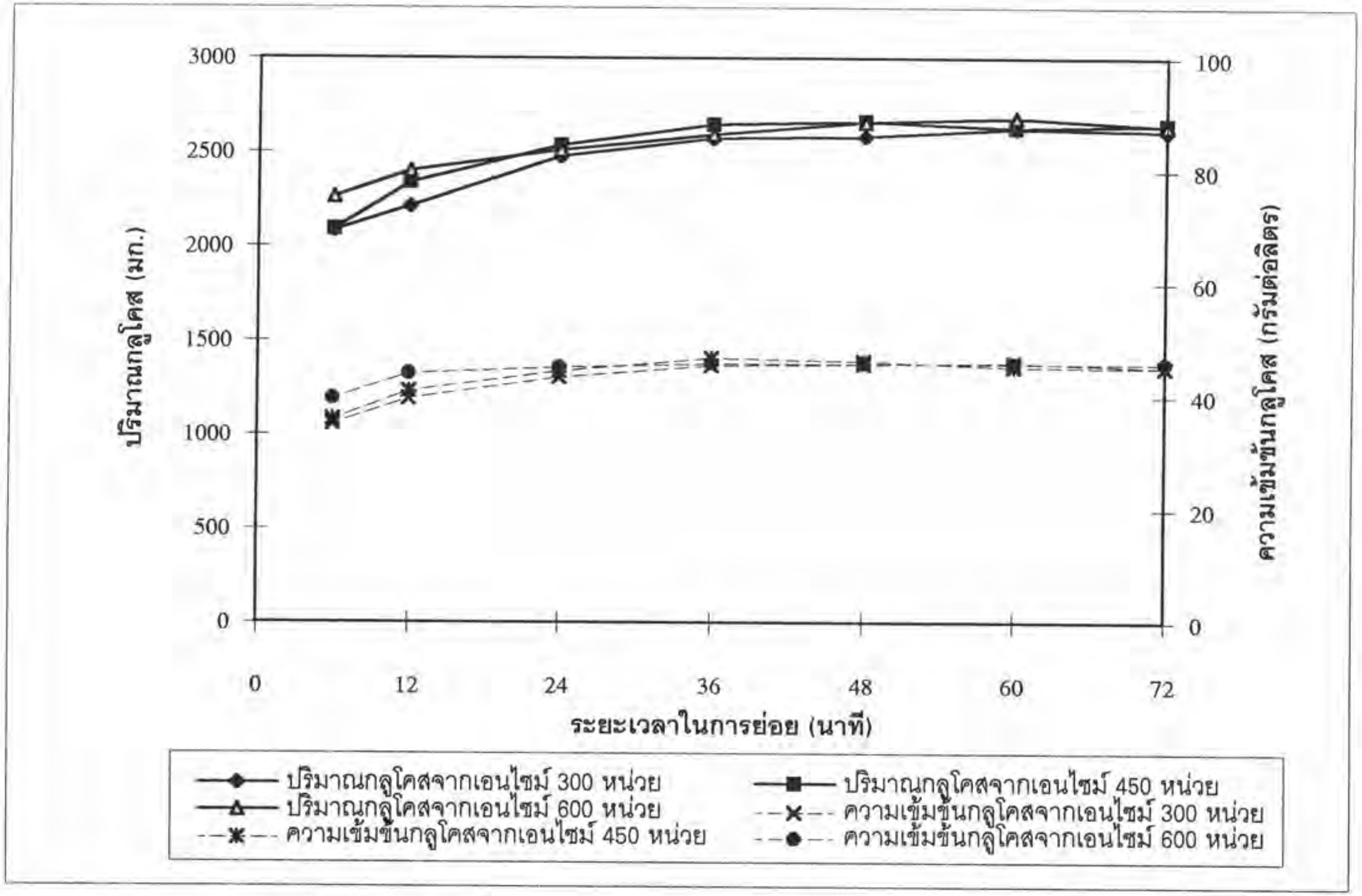
เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
450	0	57.00	51.30	15.98	31.15	-	-	-	-
	6	58.00	51.45	49.62	96.44	36.00	69.97	2087.49	41.75
	12	57.00	51.50	50.43	97.92	40.96	79.48	2337.41	46.75
	24	57.00	52.65	51.24	97.30	44.52	84.57	2537.28	50.75
	36	56.50	53.10	52.05	98.02	46.84	88.22	2646.25	52.93
	48	57.50	52.70	52.10	98.85	46.28	87.88	2661.02	53.22
	60	58.00	51.60	50.52	97.92	45.35	87.88	2630.04	52.60
	72	58.50	51.60	50.48	97.83	45.19	87.58	2643.77	52.88

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

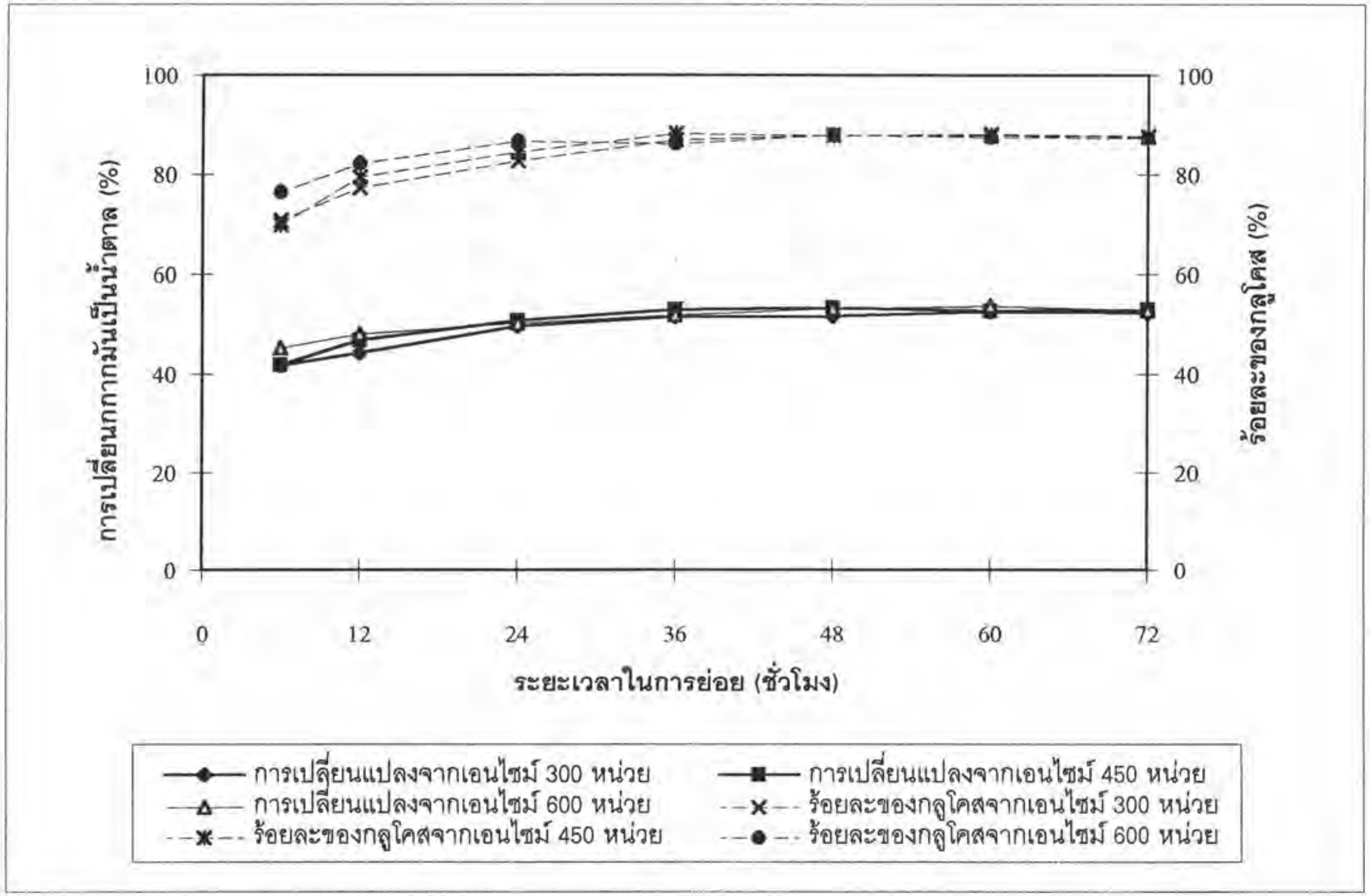
ตารางที่ 3-31 (ต่อ)

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
600	0	56.00	51.80	15.98	30.85	-	-	-	-
	6	57.00	51.85	50.43	97.26	39.66	76.50	2260.25	45.21
	12	54.50	53.65	52.48	97.82	44.11	82.19	2401.45	48.03
	24	55.50	52.15	51.48	98.72	45.24	86.73	2510.26	50.21
	36	56.50	53.25	52.33	98.27	45.91	86.21	2593.42	51.87
	48	58.00	52.15	51.76	99.26	45.86	87.94	2659.99	53.20
	60	58.50	52.45	51.33	97.86	45.86	87.44	2682.25	53.65
	72	57.50	52.55	51.48	97.94	45.91	87.38	2639.43	52.79

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-36 เทียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 300 , 450 และ 600 หน่วย



รูปที่ 3-37 เทียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 300 , 450 และ 600 หน่วย

จากผลการทดลองที่ผ่านมา การใช้เอนไซม์ SPEZYME 300 หน่วย ทำการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ BAN ให้มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเริ่มต้นเท่ากับ 30 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก็เพียงพอในการทำให้เกิดการย่อยแป้งที่ตกค้างในกากมันสำปะหลังได้อย่างสมบูรณ์ แต่ทั้งนี้ปริมาณเอนไซม์ SPEZYME 300 หน่วยนี้ อาจจะไม่ใช่ปริมาณเอนไซม์ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการย่อยได้อย่างสมบูรณ์ จึงได้ทำการทดลองซ้ำเช่นเดิมนี้อีกครั้งตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.3 แต่ได้มีการปรับปรุงการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของกากมันโดยผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ลงไปในน้ำขจัดไอออนในอัตราส่วน 5 มล.ต่อ 1 ลิตร ก่อนจะนำไปเติมลงในกากมันตามวิธีการทดลองข้อ 2.1.3.2 แทนการเติมน้ำขจัดไอออนบริสุทธิ์ลงไปในกากมัน แล้วจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งจะทำให้ด่างเข้าไปผสมกับกากมันได้อย่างทั่วถึง และช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากันในทุกส่วนได้ดีกว่าวิธีการเช่นเดิม จากนั้นจึงดำเนินการทดลองต่อไปตามวิธีการปกติ โดยพบว่าการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างด้วยวิธีนี้ทำให้ประสิทธิภาพของ การย่อยดีขึ้นกว่าเดิม ดังผลการทดลองในตารางที่ 3-32 เมื่อเทียบกับผลการทดลองของวิธีการเช่นเดิม (ดังตารางที่ 3-31) และจากการลดปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ลงเป็น 75 และ 150 หน่วย เทียบกับการย่อยด้วยเอนไซม์ 300 หน่วยเท่าเดิม พบว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME 75 และ 150 หน่วย มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้เอนไซม์ 300 หน่วย และปฏิกิริยาของการย่อยก็ยังเกิดขึ้นได้ช้ากว่า คือ ค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล ปริมาณ ความเข้มข้น และร้อยละของกลูโคสจะเริ่มคงที่เมื่อให้เกิดการย่อยไปเป็นเวลา 48 และ 36 ชั่วโมงตามลำดับ ดังรูปที่ 3-38 และ 3-39 ซึ่งช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาของการย่อยเมื่อใช้เอนไซม์ 300 หน่วย ที่เริ่มคงที่ตั้งแต่ทำการย่อยไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัม ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ BAN ให้มีค่า DE เริ่มต้นเท่ากับ 30 คือ การใช้เอนไซม์ SPEZYME 300 หน่วย โดยมีระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย่อยเท่ากับ 24 ชั่วโมง ได้น้ำเชื่อมกลูโคสที่มีความเข้มข้น 49.48 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละของกลูโคสเท่ากับ 90.87 ของมวลสารละลายทั้งหมด (soluble solid) ได้ปริมาณกลูโคสสุทธิ 2832.64 มก. ซึ่งเท่ากับเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ 56.65 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3-32 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้นและร้อยละของกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เท่ากับ 75 , 150 และ 300 หน่วย

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
75	0	57.00	48.60	15.00	30.86	-	-	-	-
	6	57.00	48.85	46.67	95.54	32.38	66.30	1846.3	36.93
	12	57.00	49.30	47.67	96.72	36.62	74.37	2087.18	41.74
	24	57.50	48.90	48.33	98.85	39.15	80.04	2251.67	45.03
	36	57.00	51.15	50.14	98.02	42.71	83.49	2434.55	48.69
	48	57.50	51.10	49.86	97.57	44.21	86.51	2541.92	50.84
	60	58.50	51.80	50.76	97.99	45.24	87.34	2645.73	52.91
	72	58.00	51.40	50.86	98.94	46.79	91.04	2713.91	54.28

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-32 (ต่อ)

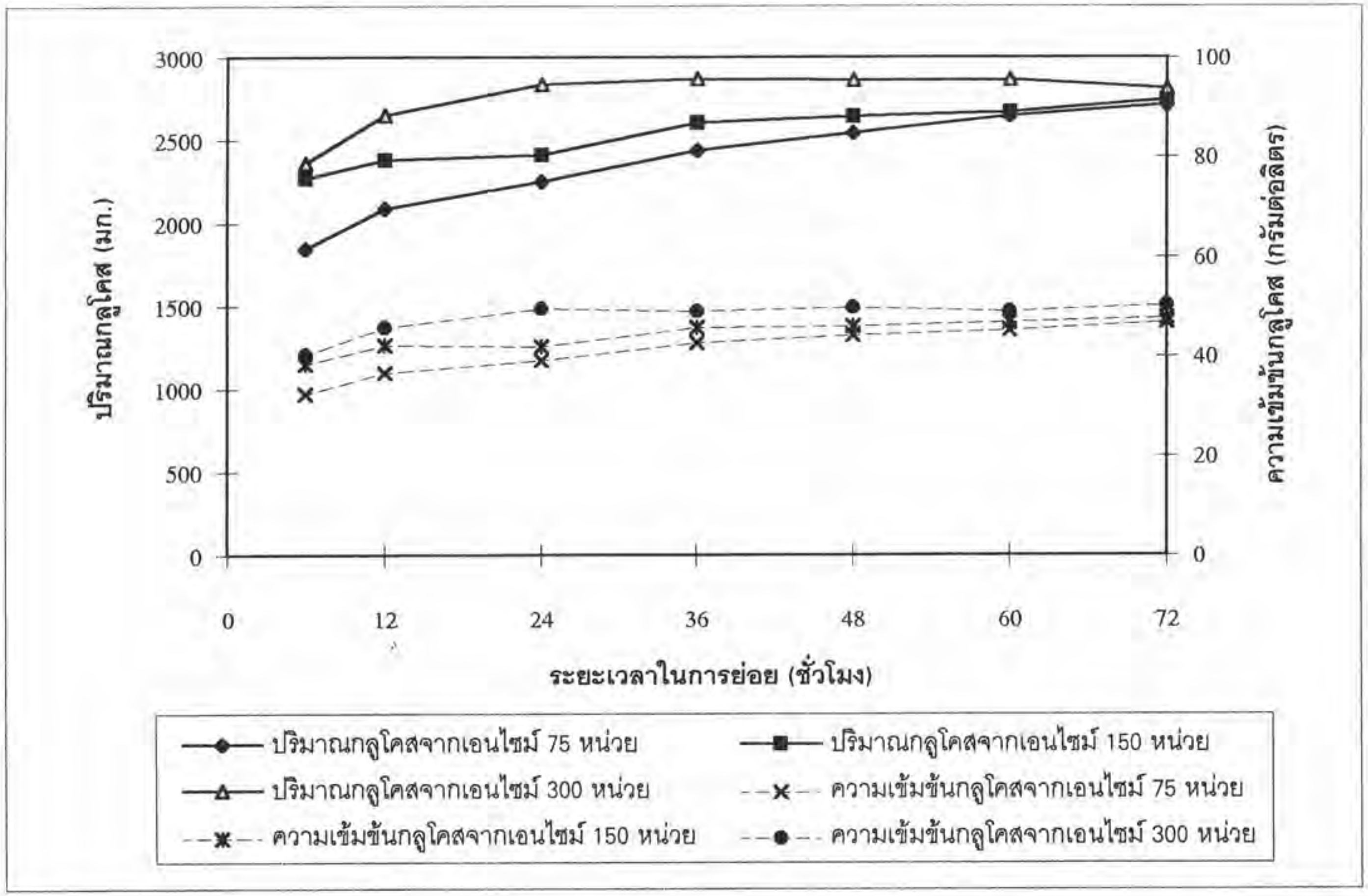
เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
150	0	57.00	49.00	15.24	31.10	-	-	-	-
	6	59.00	48.70	48.05	98.65	38.42	78.93	2267.07	45.34
	12	56.50	49.20	48.57	98.76	42.14	85.64	2380.12	47.60
	24	57.50	51.15	50.14	99.62	41.89	81.78	2410.28	48.21
	36	57.00	52.80	51.90	98.30	45.66	86.50	2602.35	52.05
	48	57.50	52.95	52.48	99.12	45.91	86.68	2640.83	52.82
	60	57.00	54.20	53.38	98.50	46.79	86.33	2667.12	53.34
	72	57.50	55.10	53.62	97.31	47.72	86.61	2743.81	54.88

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

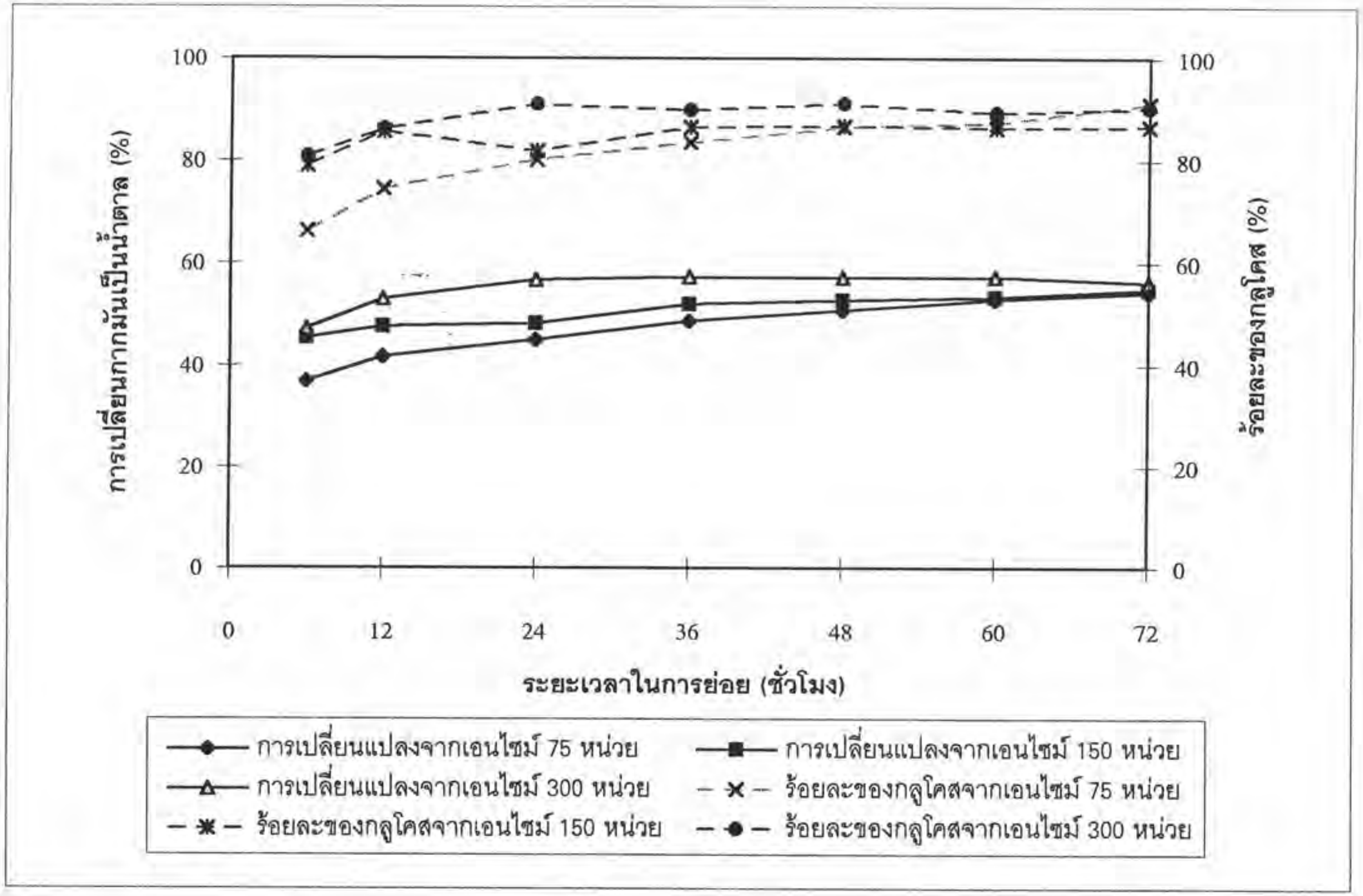
ตารางที่ 3-32 (ต่อ)

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสสุทธิ (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
300	0	57.50	51.00	15.76	30.90	-	-	-	-
	6	58.50	50.00	48.67	97.43	40.34	80.80	2359.25	47.19
	12	58.00	53.00	52.29	98.65	45.66	86.13	2648.01	52.96
	24	57.25	54.45	52.95	98.47	49.48	90.87	2832.69	56.65
	36	58.50	54.55	53.43	98.03	48.98	89.79	2865.97	57.31
	48	57.50	54.65	54.10	98.98	49.74	91.00	2860.06	57.20
	60	58.50	54.85	54.38	99.14	48.96	89.26	2864.35	57.29
	72	56.00	55.70	55.05	98.83	50.20	90.12	2810.17	56.20

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-38 เทียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 75 , 150 และ 300 หน่วย



รูปที่ 3-39 เทียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 75 , 150 และ 300 หน่วย

3.3.4 ผลของปริมาณเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (เอนไซม์ SPEZYME) และเวลาในการย่อยสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง ด้วยเอนไซม์อะไมเลส (เอนไซม์ BAN)

กากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ แป้ง และ เส้นใย ดังนั้นในการที่จะย่อยแป้งที่มีอยู่ในกากมันไปเป็นน้ำตาลกลูโคสให้ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยเอนไซม์ อาจจะต้องสิ้นเปลืองเอนไซม์ไปในปริมาณมาก เนื่องจากเอนไซม์บางส่วนถูกดูดซับไว้ตามเส้นใยจึงไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยแป้งได้อย่างเต็มที่ การที่จะทำให้เกิดการย่อยได้โดยสมบูรณ์จึงต้องใช้เอนไซม์ซึ่งมีราคาแพงในปริมาณมาก ดังนั้นในการทดลองนี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตจึงหาแนวทางในการลดปริมาณการใช้เอนไซม์ลง โดยการแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายออกจากกากมันที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ BAN ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า liqour มาย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ซึ่งคาดว่าจะทำให้สิ้นเปลืองเอนไซม์ SPEZYME น้อยลง ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.4ก

ในการศึกษาหาปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่เหมาะสมสำหรับการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 15 กรัม ด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 40 นาที แบ่งสารละลายที่ได้จากการย่อยเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 50 มล. (เทียบเท่ากับกากมัน 5 กรัม) ไปทำการย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ที่แปรปริมาณเป็น 150 , 240 และ 600 หน่วย พบว่าประสิทธิภาพของการผลิตโดยใช้เอนไซม์ 150 , 240 และ 600 หน่วย ให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังผลการทดลองในตารางที่ 3-33 คือ ให้ผลผลิตกลูโคสได้สูงสุดเมื่อใช้เวลาในการย่อย 72 ชั่วโมง 1493.7 , 1532.79 และ 1541.41 มก.ตามลำดับ ดังรูปที่ 3-40 และ 3-41

ตารางที่ 3-33 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้น และร้อยละของกลูโคส ของการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 40 นาที เมื่อมีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เท่ากับ 150 , 240 และ 600 หน่วย

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
150	0	32.25	14.38	44.59	-	-	-	-
	6	32.55	25.33	77.77	0.40	1.23	21.75	0.44
	12	32.05	27.86	86.58	7.89	24.85	433.38	8.67
	24	32.25	28.67	88.90	18.11	56.16	994.23	19.88
	36	32.75	28.86	88.40	24.74	75.54	1357.5	27.15
	48	33.15	29.81	89.75	25.10	75.39	1376.95	27.54
	60	33.90	30.10	88.79	25.93	76.49	1422.11	28.44
	72	34.65	30.70	88.63	27.22	78.27	1493.17	29.86

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3-33 (ต่อ)

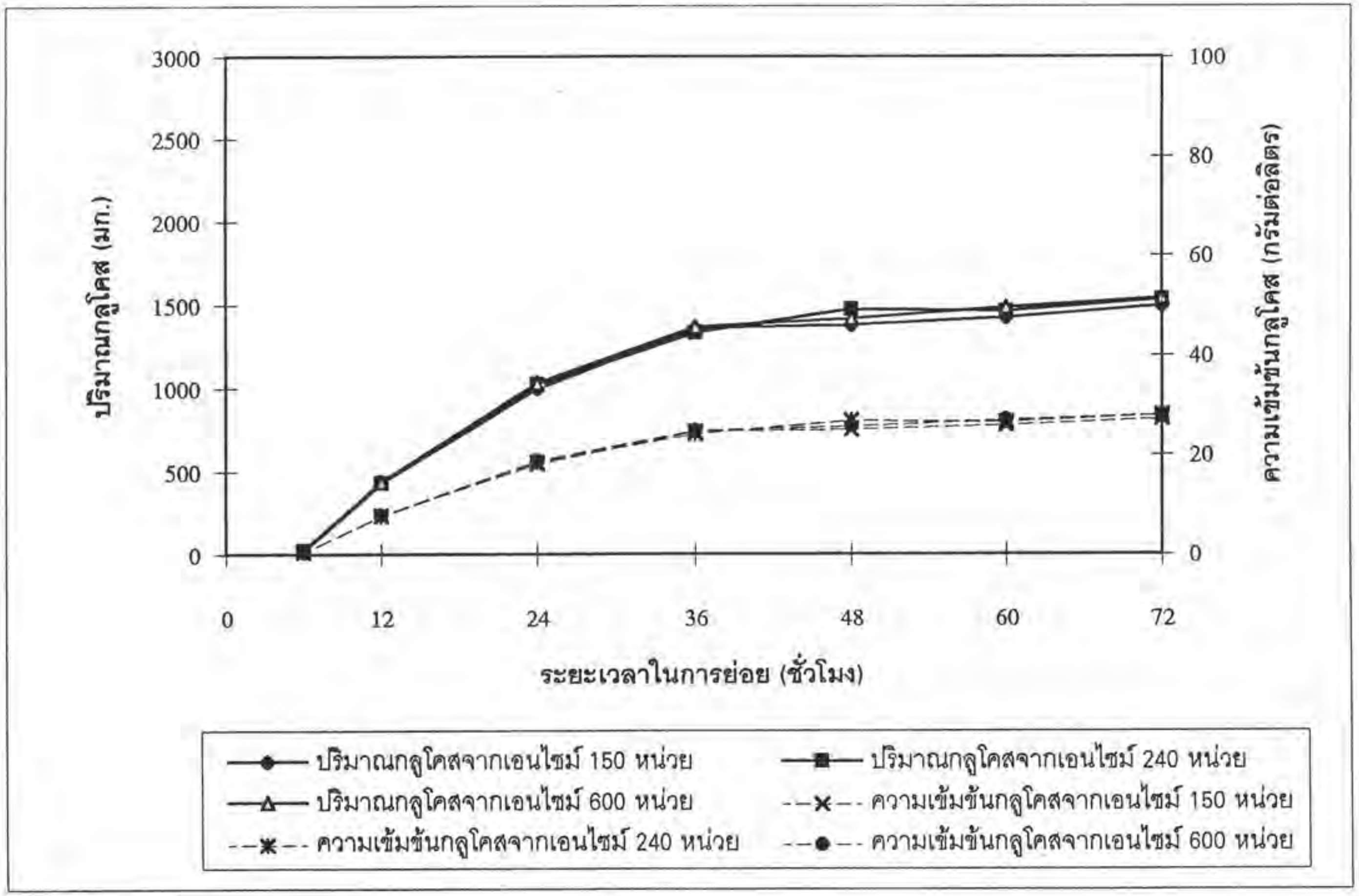
เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
240	0	32.25	14.38	44.59	-	-	-	-
	6	32.80	27.31	83.35	0.40	1.22	21.73	0.43
	12	32.35	28.71	88.70	7.88	24.57	432.52	8.65
	24	31.80	29.00	91.17	18.59	58.77	1020.66	20.41
	36	31.65	28.38	89.94	24.27	76.37	1331.65	26.63
	48	33.20	30.29	91.35	26.80	80.62	1470.74	29.41
	60	33.40	30.19	90.26	26.60	79.60	1459.52	29.19
	72	33.90	30.86	91.03	27.94	79.75	1532.79	30.66

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

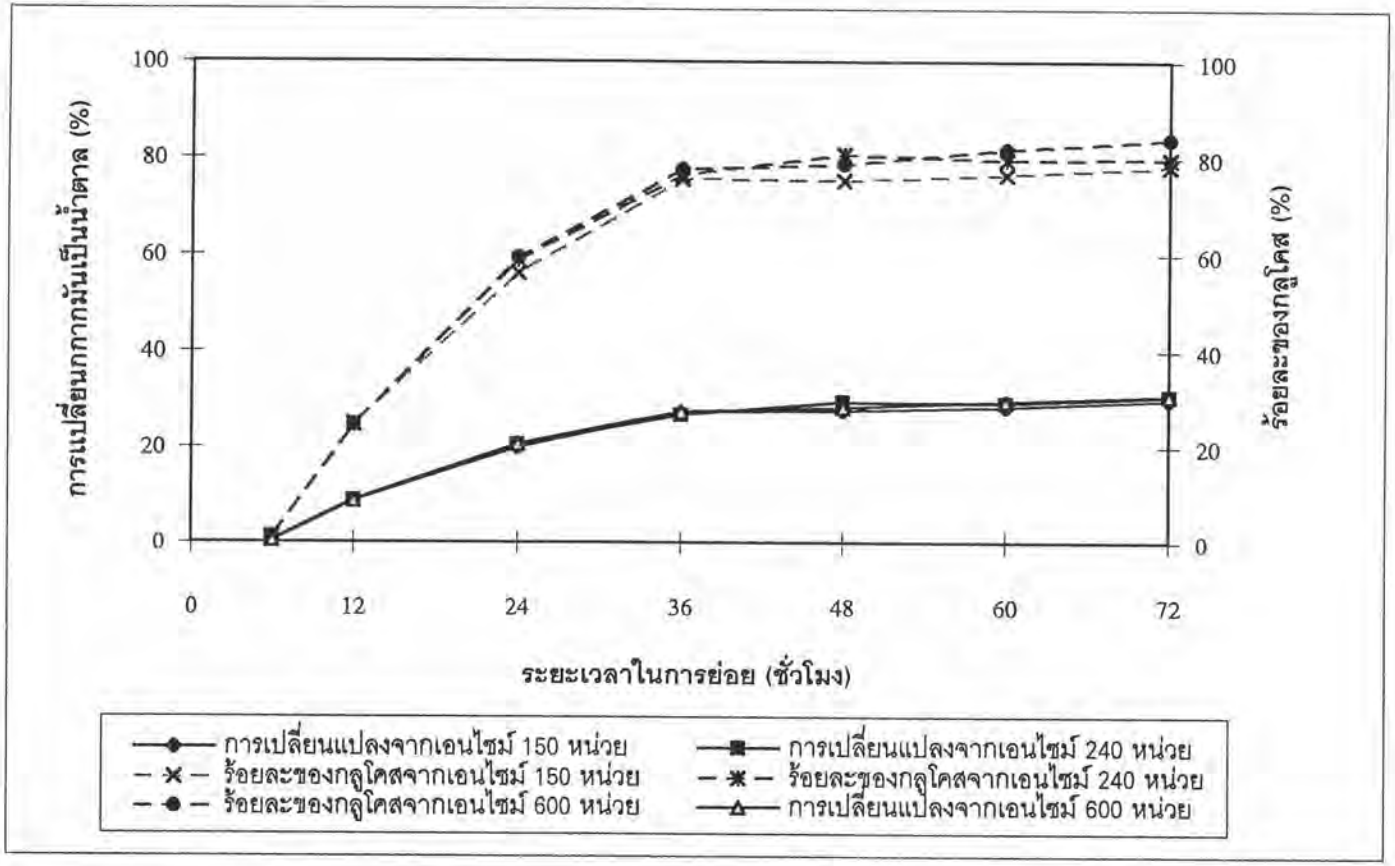
ตารางที่ 3-33 (ต่อ)

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
600	0	32.25	14.38	44.59	-	-		-
	6	32.15	28.40	88.47	0.39	1.24	21.66	0.43
	12	32.20	28.48	88.45	7.89	24.50	433.38	8.67
	24	31.75	28.76	90.56	18.75	59.36	1029.23	20.58
	36	31.95	28.48	89.02	24.89	77.65	1365.69	27.31
	48	32.60	29.29	89.85	25.77	78.67	1413.71	28.27
	60	32.95	29.62	89.89	27.01	81.75	1481.95	29.64
	72	33.40	29.95	89.67	28.01	83.86	1541.41	30.83

หมายเหตุ : เครื่องหมาย " - " หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3-40 เทียบเทียบปริมาณ และความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ของการย่อยสารละลายที่ได้จากการเกิดลิเคอแฟคชั่นของกากมันสำปะหลัง (liquor) ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 150 , 240 และ 600 หน่วย



รูปที่ 3-41 เทียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยสารละลายที่ได้จากการเกิดลิเคอแฟคชั่นของกากมันสำปะหลัง (liquor) ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 150, 240 และ 600 หน่วย

จากผลการทดลองที่ผ่านมา liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 40 นาที เมื่อนำมาย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME เพื่อให้เกิดแซคคาริฟิเคชั่นต่อไปจนสมบูรณ์ กลับให้ผลผลิตกลูโคสน้อยกว่าการทำให้เกิดแซคคาริฟิเคชั่นกากมันที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ BAN โดยไม่แยกส่วนกากออกไป (LCP) ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจาก liquor ที่นำมาใช้นั้นมีส่วนของแป้งที่ถูกย่อยให้ละลายอยู่ในน้ำใสน้อย ยังมีแป้งตกค้างอยู่กับส่วนกากมันที่ถูกแยกออกไป ซึ่งจากการสังเกตพบว่ากากมันส่วนที่แยกออกไปนั้นมีลักษณะเป็นก้อนเมือกแป้งเหนียว ๆ ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการย่อยกากมันด้วยเอนไซม์นานขึ้น จึงน่าจะทำให้เกิดการย่อยแป้งให้มาละลายอยู่ในส่วนของ liquor ได้มากขึ้น และทำให้เกิดแซคคาริฟิเคชั่นต่อไปด้วยเอนไซม์ SPEZYME เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

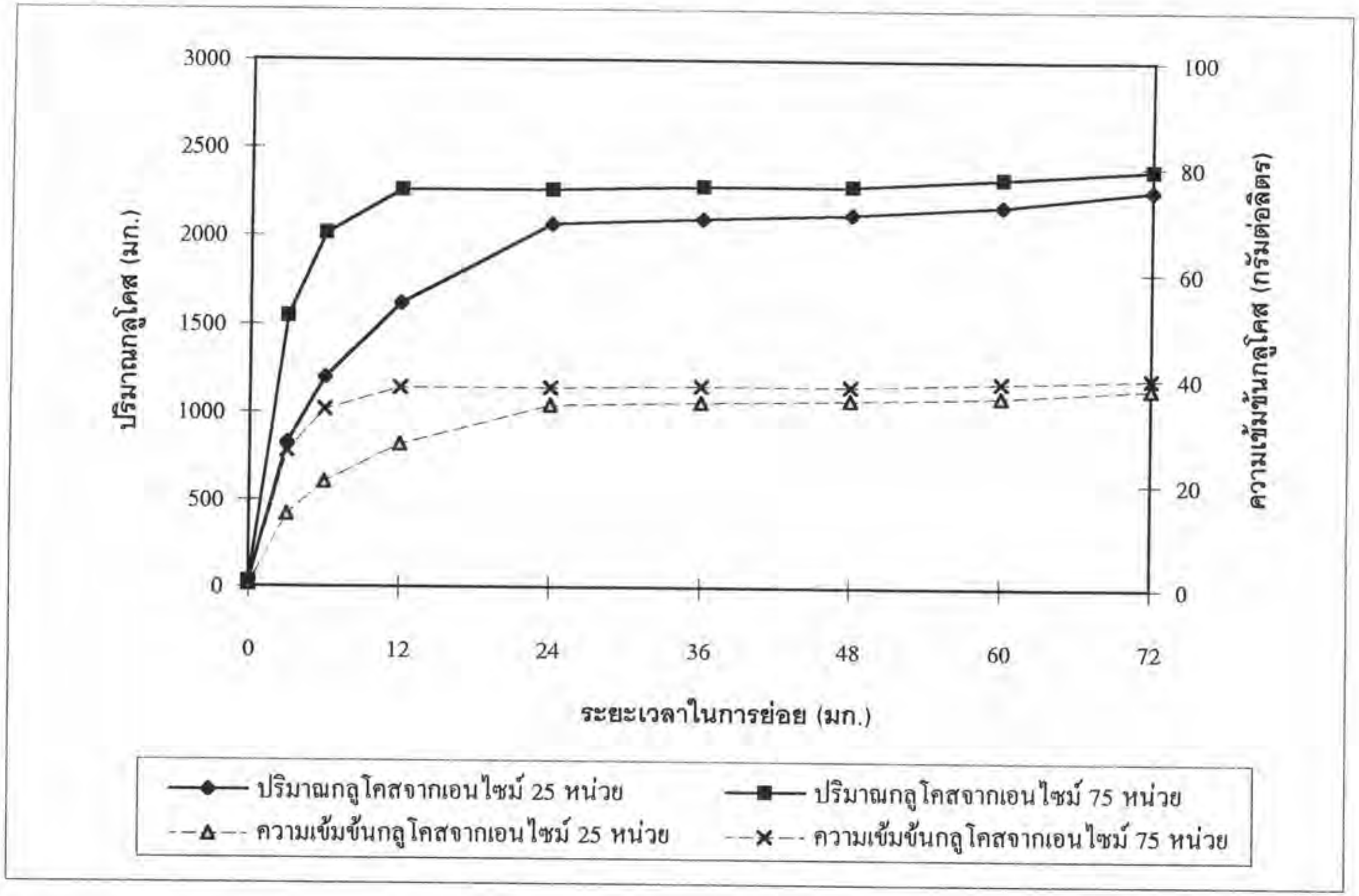
ทำการทดลองตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.4ข โดยนำ liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง 10 กรัม ด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนละ 50 มล. (เทียบเท่ากับกากมัน 5 กรัม) ไปทำการย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ที่แปรปริมาณเป็น 25 และ 75 หน่วย พบว่า การใช้เอนไซม์ 75 หน่วย ให้ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสที่ดีกว่าและปฏิกิริยาของการย่อยยังเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการใช้เอนไซม์เพียง 25 หน่วย ดังผลการทดลองในตารางที่ 3-34 โดยปฏิกิริยาของการย่อยเริ่มคงที่เมื่อทำการย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME ไปเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ผลผลิตกลูโคส 2258.23 มก. เท่ากับเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ 45.16 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปฏิกิริยาของการย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME 25 หน่วย เริ่มคงที่เมื่อทำการย่อยไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลผลิตกลูโคส 2064.3 มก. (รูปที่ 3-42 และ 3-43) และนอกจากนี้ยังพบว่าการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสสูงกว่าการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 40 นาที ซึ่งจากผลการทดลองนี้แม้การย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME 75 หน่วย จะให้ผลผลิตกลูโคสได้สูง แต่ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการย่อย เพราะหากปฏิกิริยายังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์การเพิ่มปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ยังจะทำให้เกิดการย่อยต่อไปได้ และให้ผลผลิตกลูโคสสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเป็นการศึกษาหาปริมาณเอนไซม์ SPEZYME และระยะเวลาในการย่อยที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง โดยแปรปริมาณที่ใช้เป็น 75, 150 และ 300 หน่วย

ตารางที่ 3-34 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้น และร้อยละของกลูโคส ของการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อมีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ให้เท่ากับ 25 และ 75 หน่วย

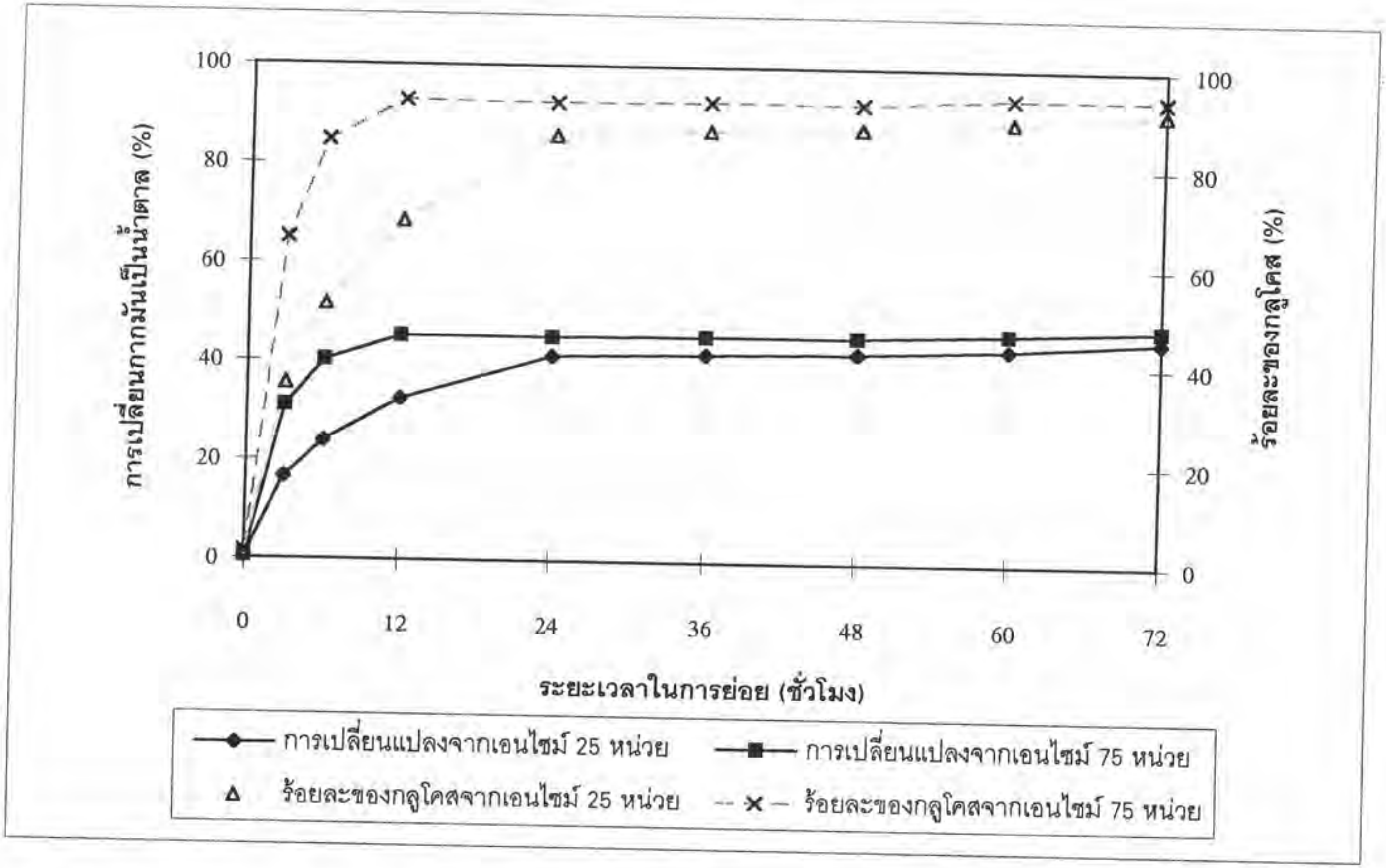
เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
25	0	37.75	15.28	40.48	0.48	1.35	28.57	0.57
	3	39.20	26.67	68.03	13.89	35.44	826.39	16.53
	6	39.00	31.14	79.85	20.09	51.51	1195.56	23.91
	12	39.75	34.76	87.46	27.22	68.48	1619.16	32.38
	24	40.45	38.62	95.48	34.71	85.81	2064.3	41.29
	36	40.50	40.19	99.24	35.27	87.09	2098.02	41.96
	48	40.75	40.43	99.21	35.74	87.71	2126.79	42.54
	60	40.85	40.62	99.44	36.51	89.37	2173.07	43.46
	72	41.7	41.1	98.57	38.11	91.41	2268.04	45.36

ตารางที่ 3-34 (ต่อ)

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
75	0	37.75	15.28	40.48	0.48	1.35	28.57	0.57
	3	40.05	35.00	87.43	25.98	64.86	1545.56	30.91
	6	39.95	38.00	95.11	33.83	84..65	2012.19	40.24
	12	40.90	40.10	98.04	37.96	92.80	2258.23	45.16
	24	41.05	40.52	98.71	37.96	92.47	2258.28	45.17
	36	41.25	40.90	99.16	38.32	92.90	2279.92	45.60
	48	41.45	41.05	99.03	38.42	92.70	2286.07	45.72
	60	41.60	41.33	99.36	39.15	94.11	2329.14	46.58
	72	42.65	41.95	98.36	40.08	93.97	2384.92	47.70



รูปที่ 3-42 เทียบเทียบปริมาณ และความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ของการย่อยสารละลายที่ได้จากการเกิดลิเคอแฟคชั่นของกากมันสำปะหลัง (liqour) ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 25 และ 75 หน่วย



รูปที่ 3-43 เทียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยสารละลายที่ได้จากการเกิดลิเคอแฟคชั่นของกากมันสำปะหลัง (liquor) ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 25 และ 75 หน่วย

ในการศึกษาหาปริมาณเอนไซม์ SPEZYME และระยะเวลาในการย่อยที่เหมาะสมสำหรับการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง ได้มีการปรับปรุงวิธีการทดลองโดยผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ลงไปในน้ำขจัดไอออนในอัตราส่วน 5 มล. ต่อ 1 ลิตร ก่อนนำไปเติมลงในกากมันตามวิธีการทดลองข้อ 2.1.3.2 แทนการเติมน้ำขจัดไอออนบริสุทธิ์ลงไปในกากมันแล้วจึงปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งจะทำให้ด่างเข้าไปผสมกับกากมันได้อย่างทั่วถึง และช่วยปรับสภาพความเป็นกรดด่างให้เท่ากันในทุกส่วนได้ดีขึ้น จากนั้นจึงดำเนินการทดลองต่อไปตามวิธีการทดลองข้อ 2.2.2.4ค โดยย่อยกากมันสำปะหลัง 15 กรัม ด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แบ่ง liquor ที่ได้จากการย่อยเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 50 มล. (เทียบเท่ากับกากมัน 5 กรัม) ไปทำการย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ที่แปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เป็น 75, 150 และ 300 หน่วย ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-35 พบว่าปฏิกิริยาของการย่อยด้วยเอนไซม์ 75 หน่วย เริ่มคงที่เมื่อทำการย่อยไปเป็นเวลา 12 ชั่วโมง (รูปที่ 3-44 และ 3-45) ได้ผลผลิตกลูโคส 2506.92 มก. เท่ากับร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล 50.14 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปฏิกิริยาของการย่อยด้วยเอนไซม์ 150 และ 300 หน่วย เริ่มคงที่ที่ 6 ชั่วโมง ได้ผลผลิตกลูโคสไม่แตกต่างกันคือ 2565.04 และ 2606.92 มก. มีร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลเท่ากับ 51.30 และ 52.13 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการใช้เอนไซม์ SPEZYME เพียง 75 หน่วย ย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก็เพียงพอในการทำให้เกิดการย่อยได้สมบูรณ์ ได้น้ำเชื่อมกลูโคสที่มีความเข้มข้น 40.44 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละของกลูโคสเท่ากับ 92 เปอร์เซ็นต์ของมวลสารละลายทั้งหมด ได้ปริมาณกลูโคสสุทธิ 2506.92 มก. ซึ่งเท่ากับการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ 50.14 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3-35 เปรียบเทียบร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล สมมูลเดกซ์โทรส ปริมาณ ความเข้มข้น และร้อยละของกลูโคส ของการย่อย liquor ที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ BAN เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อมีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ให้เท่ากับ 75 ,150 และ 300 หน่วย

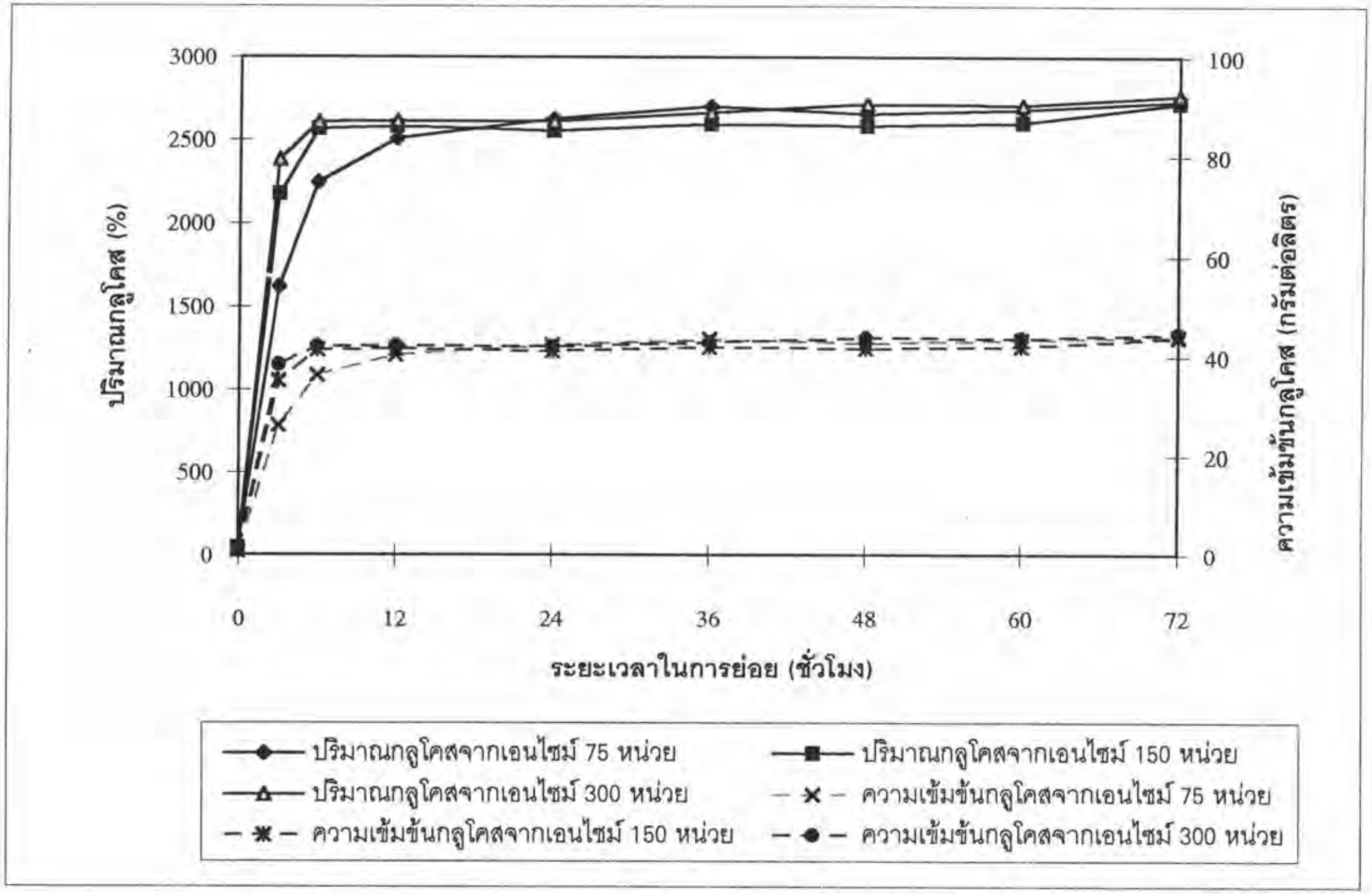
เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
75	0	36.35	14.86	40.88	0.73	2.05	44.75	0.90
	3	37.75	34.67	87.99	26.13	66.19	1619.73	32.39
	6	39.45	37.38	87.33	36.20	84.59	2244.7	44.89
	12	40.80	41.48	94.37	40.44	92.00	2506.92	50.14
	24	42.80	44.33	98.30	42.35	93.90	2625.66	52.51
	36	43.55	45.19	99.09	43.54	95.47	2699.67	53.99
	48	43.95	44.57	98.39	42.81	94.52	2654.15	53.08
	60	44.35	44.33	97.76	43.28	95.44	2683.37	53.67
	72	45.1	44.62	98.94	44.05	97.67	2731.38	54.63

ตารางที่ 3-35 (ต่อ)

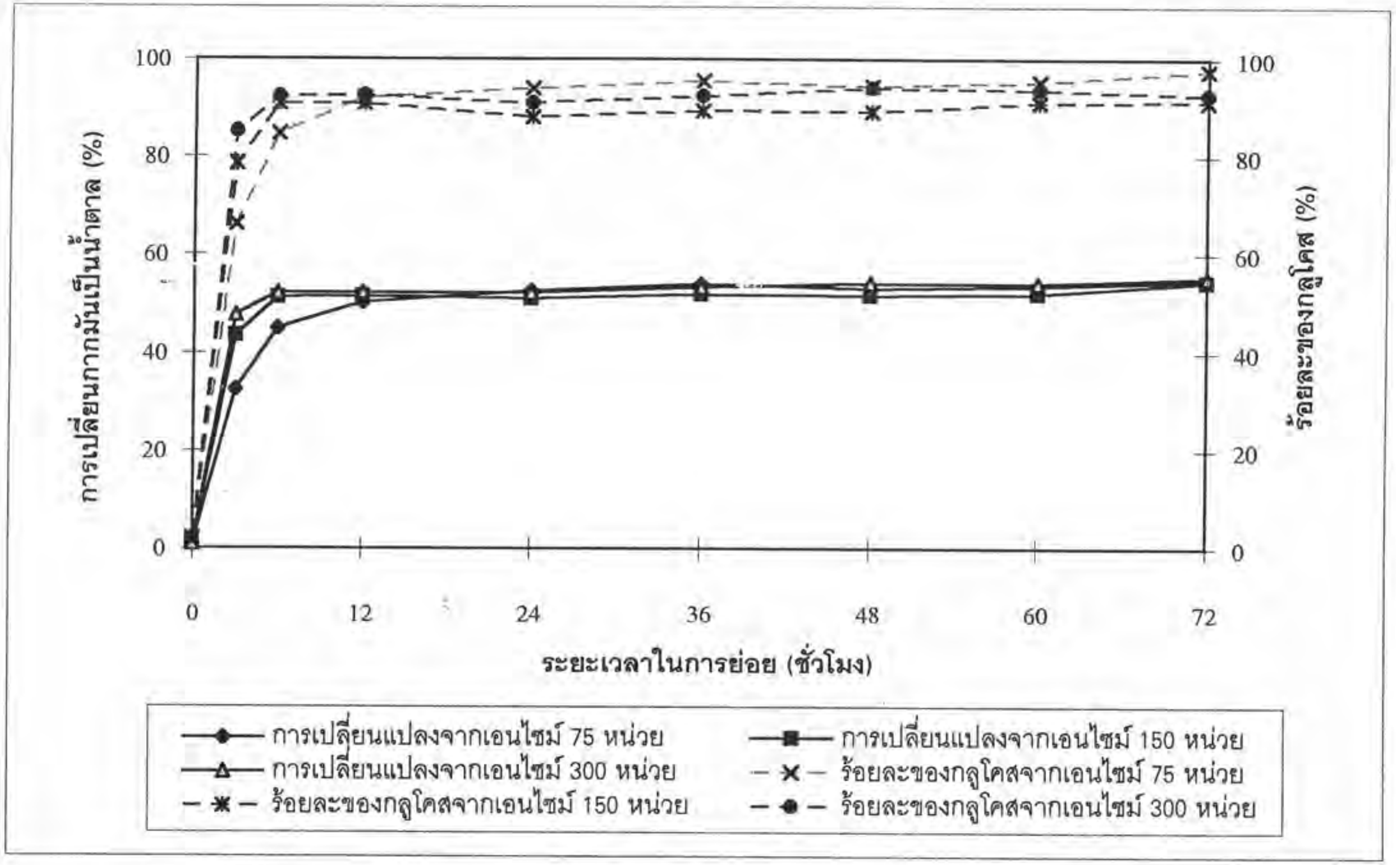
เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
150	0	36.35	14.86	40.88	0.73	2.05	44.75	0.90
	3	44.65	38.71	86.70	35.07	78.52	2173.77	43.48
	6	45.60	41.62	91.25	41.37	90.75	2565.04	51.30
	12	45.80	44.76	97.74	41.58	90.79	2577.96	51.56
	24	46.75	44.86	95.96	41.16	88.03	2551.68	51.03
	36	46.75	46.10	98.61	41.87	89.37	2595.94	51.92
	48	46.65	45.86	98.31	41.63	89.22	2581.45	51.63
	60	46.10	45.86	99.47	41.99	91.08	2603.37	52.07
	72	48.05	47.62	99.1	43.85	91.26	2718.43	54.37

ตารางที่ 3-35 (ต่อ)

เอนไซม์ SPEZYME (หน่วย)	เวลา (ชั่วโมง)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
300	0	36.35	14.86	40.88	0.73	2.05	44.75	0.90
	3	45.10	41.05	91.01	38.42	85.20	2382.27	47.65
	6	45.55	44.52	97.76	42.04	92.30	2606.62	52.13
	12	45.55	44.29	97.22	42.14	92.53	2613.37	52.27
	24	46.30	45.52	98.33	42.09	90.93	2609.8	52.20
	36	46.50	46.29	99.55	42.97	92.43	2664.33	53.29
	48	46.55	46.10	99.04	43.80	94.12	2715.7	54.31
	60	46.65	45.95	98.50	43.69	93.67	2708.98	54.18
	72	48.15	47.14	97.91	44.62	92.69	2766.58	55.33



รูปที่ 3-44 เทียบเทียบปริมาณ และความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคส ของการย่อยสารละลายที่ได้จากการเกิดลิเคอแฟคชั่นของกากมันสำปะหลัง (liqour) ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 75 , 150 และ 300 หน่วย



รูปที่ 3-45 เทียบเทียบค่าร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคส ของการย่อยสารละลายที่ได้จากการเกิดลิเคอแฟคชั่นของกากมันสำปะหลัง (liqour) ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากับ 75, 150 และ 300 หน่วย

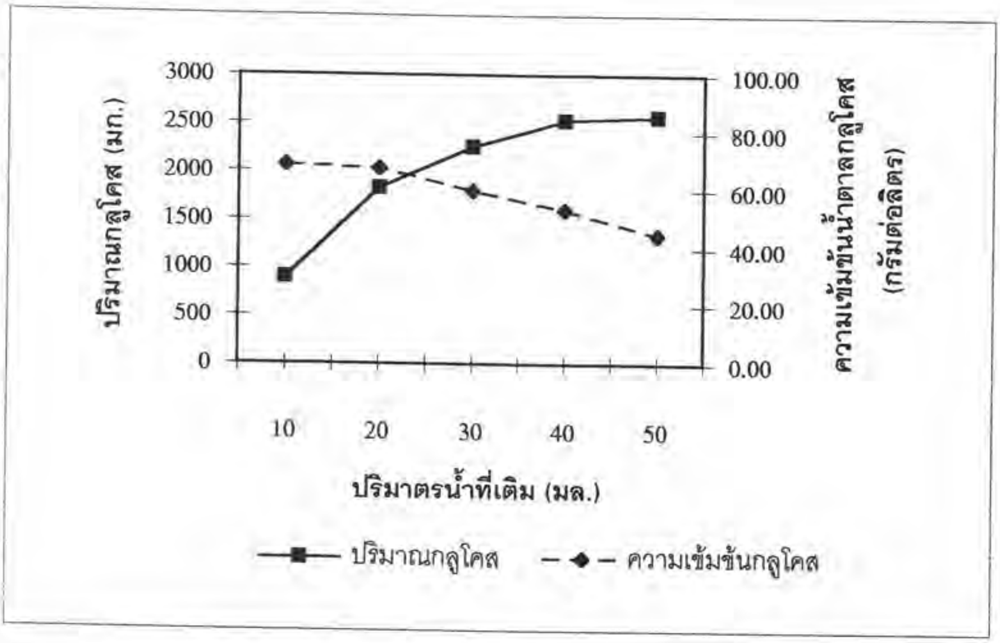
3.3.5 ผลของปริมาณน้ำต่อประสิทธิภาพในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

จากการทดลองที่ผ่านมา เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังแล้วต่อไปจึงจะได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณน้ำที่เติมลงในกากมันเพื่อเป็นตัวกลางที่ช่วยในการทำงานของเอนไซม์ คือทำให้เอนไซม์แพร่ออกไปได้ง่ายและคลุกเคล้าได้ทั่วถึงกันในทุกส่วนของกากมัน แต่การใช้น้ำปริมาณที่สูงเกินไป ปริมาณน้ำส่วนเกินจะเป็นตัวที่ไปเจือจางน้ำเชื่อมกลูโคสให้มีความเข้มข้นลดลง ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากมันต่อปริมาณน้ำที่เติม โดยควบคุมน้ำหนักกากมันเริ่มต้นเท่ากับ 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) และแปรปริมาณน้ำที่ใช้เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มล. ตามแผนการทดลองข้อ 2.2.2.5

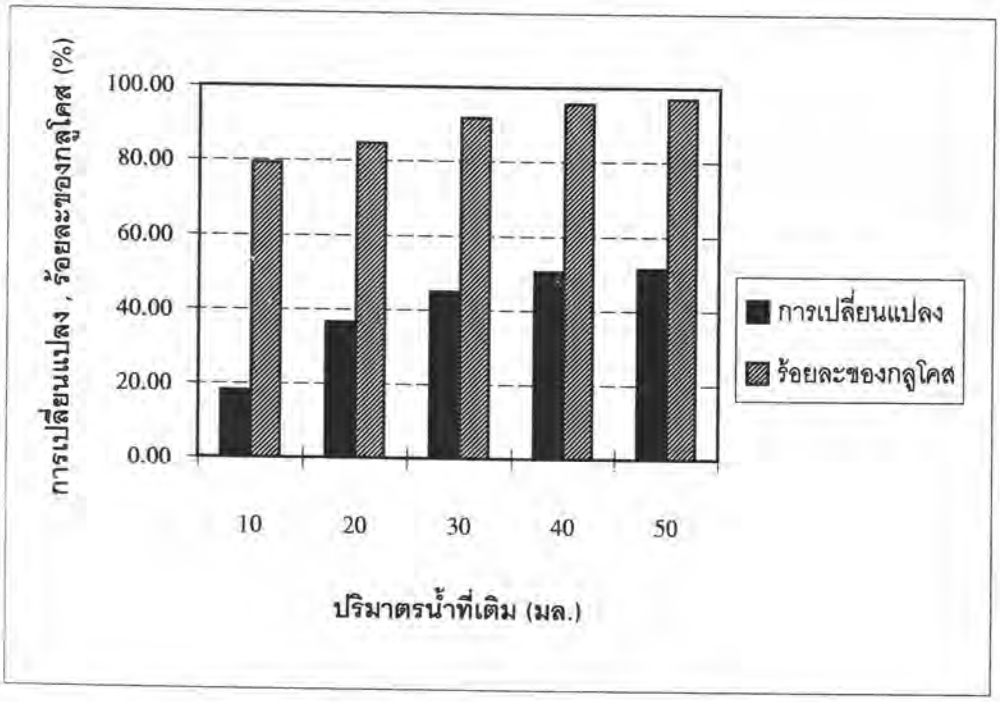
จากผลการทดลองดังตารางที่ 3-36 พบว่า ปริมาณผลผลิตกลูโคสแปรผันตามปริมาณน้ำที่เติมคือ เมื่อใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณผลผลิตกลูโคสก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้าม การใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสลดลง (รูปที่ 3-46 และ 3-47) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการผลิต พบว่าการใช้น้ำ 10, 20, 30 และ 40 มล. ยังมีแนวโน้มที่จะให้ผลผลิตกลูโคสได้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นไปอีกเป็น 50 มล. ผลผลิตกลูโคสจะเริ่มคงที่และไม่แตกต่างจากการใช้น้ำ 40 มล. นั่นคือการใช้น้ำ 40 มล. ต่อกากมัน 5 กรัม ก็เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้นไปกว่านี้ และไม่สามารถจะเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อมกลูโคสให้สูงขึ้นโดยการลดปริมาณน้ำที่ใช้ลงได้ เพราะจะทำให้ปริมาณผลผลิตกลูโคสลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมของการย่อยกากมันสำปะหลังคือ การใช้กากมัน 5 กรัม ต่อปริมาณน้ำที่เติม 40 มล.

ตารางที่ 3-36 ผลของปริมาตรน้ำต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์

ปริมาตรน้ำ (มล.)	ปริมาตรสารละลายที่ได้จากการย่อย (มล.)	ของแข็งในสารละลาย (มก.ต่อ มล.)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.ต่อ มล.)	สมมูลเดกซ์โทรส (%)	กลูโคส (มก.ต่อ มล.)	กลูโคสร้อยละ (%)	ปริมาณกลูโคสจากกากมัน 5 กรัม (มก.)	ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (%)
10	13.00	86.75	83.65	96.47	68.59	79.11	897.00	17.94
20	27.00	79.70	77.50	97.24	67.50	84.69	1823.48	36.47
30	37.50	65.45	64.62	98.73	59.91	91.55	2246.61	44.93
40	46.50	55.65	54.86	98.58	53.25	95.71	2525.20	49.50
50	57.50	46.00	46.22	98.61	44.68	97.11	2568.21	51.36



รูปที่ 3-46 เปรียบเทียบปริมาณและความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาณน้ำที่เติม



รูปที่ 3-47 เปรียบเทียบค่าร้อยละของเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล และร้อยละของกลูโคสของการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรปริมาณน้ำที่เติม