บทที่ 4

ผลการทดลอง

การปรับสภาพฟางข้าว

1. ผลการวิเคราะห์ปริมาณส่วนประกอบในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (เทียบกับน้ำหนักฟางแห้ง)

เซลลูโลส	59.47	เปอร์เซนต์
เฮมิเซลลูโลส	4.31	เปอร์เซนต์
ลิกนิน	21.73	เปอร์เซนต์
เถ้า	14.49	เปอร์เซนต์

2. ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของฟางข้าวต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มที่ความเข้มข้น และอัตราส่วนเดียวกับที่แช่ ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3

3. ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูง

โดยการต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วนฟางข้าวต่อสารละลายเท่ากับ 1 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6

4. ผลการปรับสภาพโดยใช้สารละลายเอทานอล

โดยการต้มในสารละลายเอทานอล ความเข้มข้นต่างๆ ในเครื่องอังน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.4

5. ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้เอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

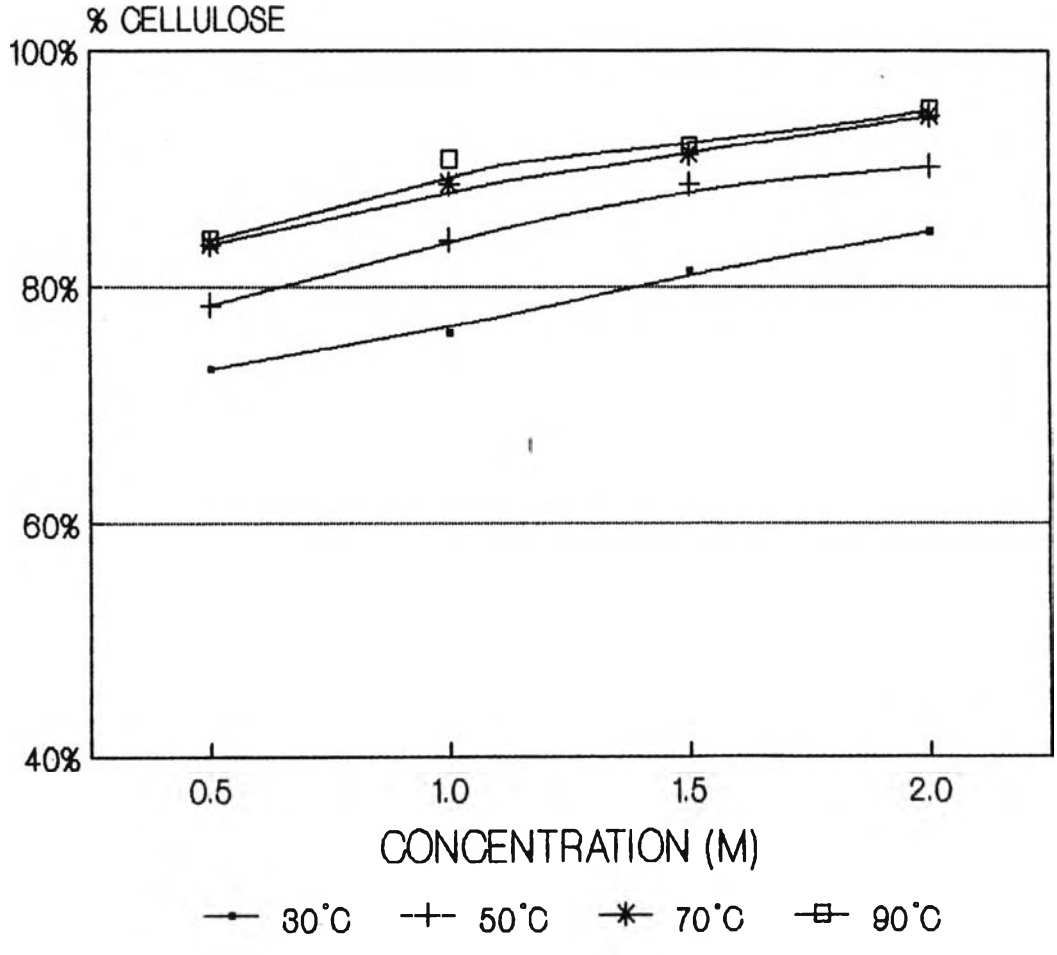
โดยการต้มในสารละลายเอทานอล ความเข้มข้นต่างๆ ในเครื่องอังน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่ และต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงในตารางที่ 4.5

6. ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้เอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูง

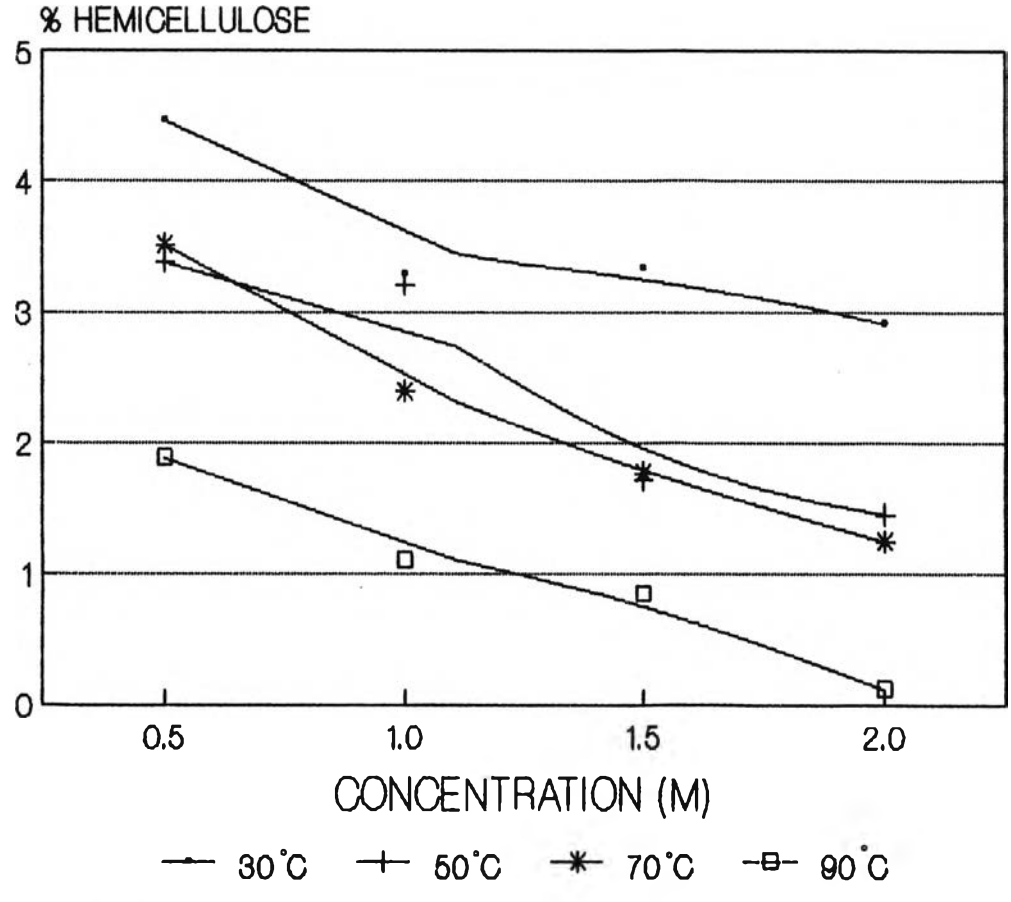
โดยการต้มในสารละลายเอทานอล ความเข้มข้นต่างๆ ในเครื่องอังน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นต่างๆ ในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ

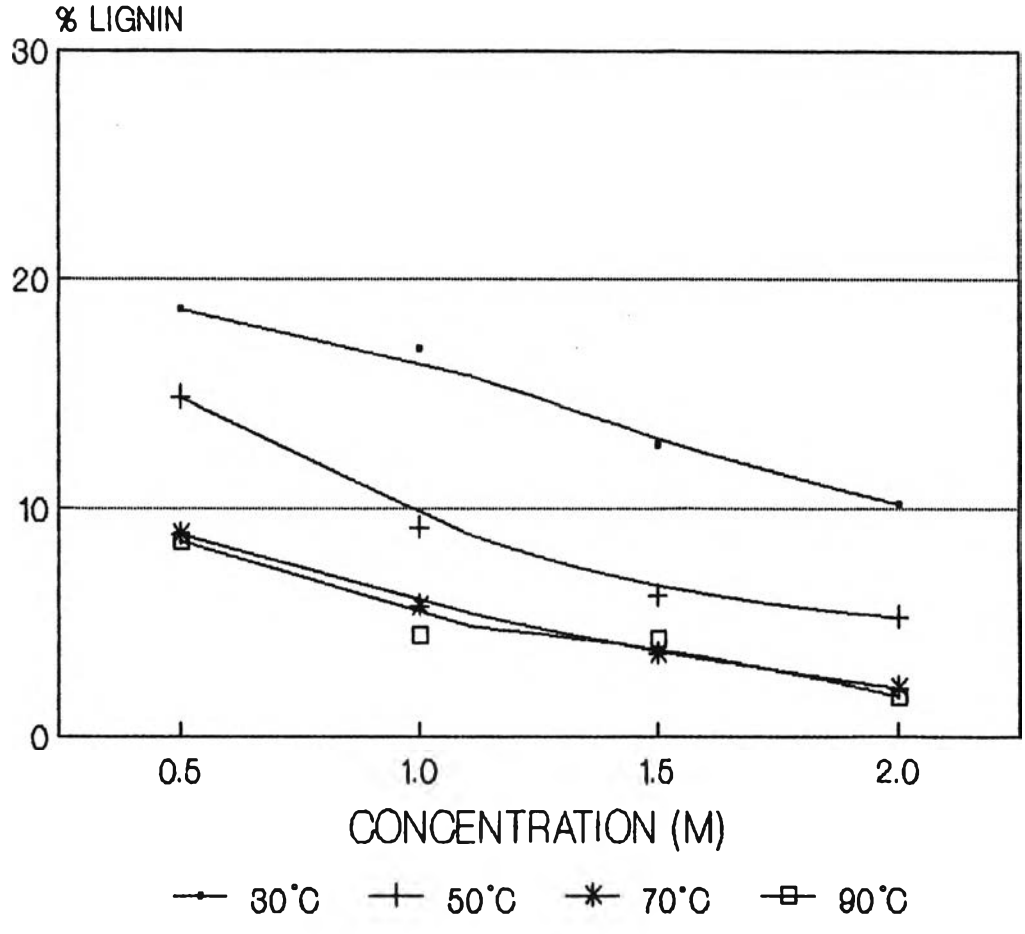
ความเข้มข้นของ NaOH (M)	อุณหภูมิที่ใช้ต้ม (°C)	ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟางหลังการปรับสภาพ (% น้ำหนักแห้ง)				น้ำหนักฟางที่หายไปในการปรับสภาพ (%)
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
0.5	30	72.94	4.46	18.67	3.93	25.21
	50	78.41	3.38	14.80	3.41	27.98
	70	83.48	3.51	8.87	3.14	29.07
	90	83.86	1.88	8.58	3.05	30.37
1.0	30	76.07	3.29	16.93	3.71	26.03
	50	83.86	3.20	9.16	3.78	28.53
	70	88.58	2.39	5.72	3.31	30.15
	90	90.68	1.10	4.44	3.78	36.36
1.5	30	81.26	3.33	12.81	2.60	29.26
	50	88.61	1.72	6.19	3.42	35.35
	70	91.12	1.77	3.65	3.46	42.10
	90	91.76	0.84	4.28	3.12	45.97
2.0	30	84.58	2.91	10.23	2.28	31.98
	50	90.13	1.45	5.25	3.17	36.00
	70	94.46	1.24	2.16	2.14	43.48
	90	94.86	0.11	1.78	3.25	49.70



รูปที่ 4.1 ปริมาณเซลลูโลสในตะกอนฟาง หลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ



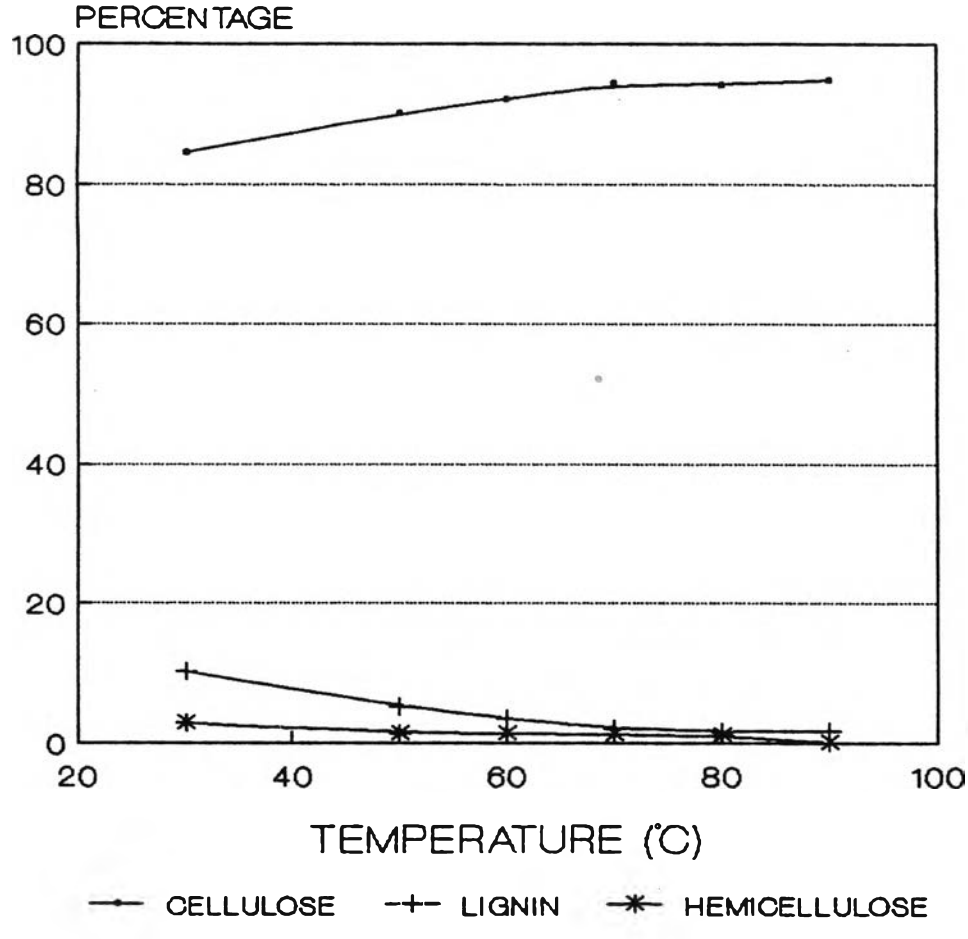
รูปที่ 4.2 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในตะกอนฟาง หลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.3 ปริมาณลิกนินในตะกอนฟาง หลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ผลการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

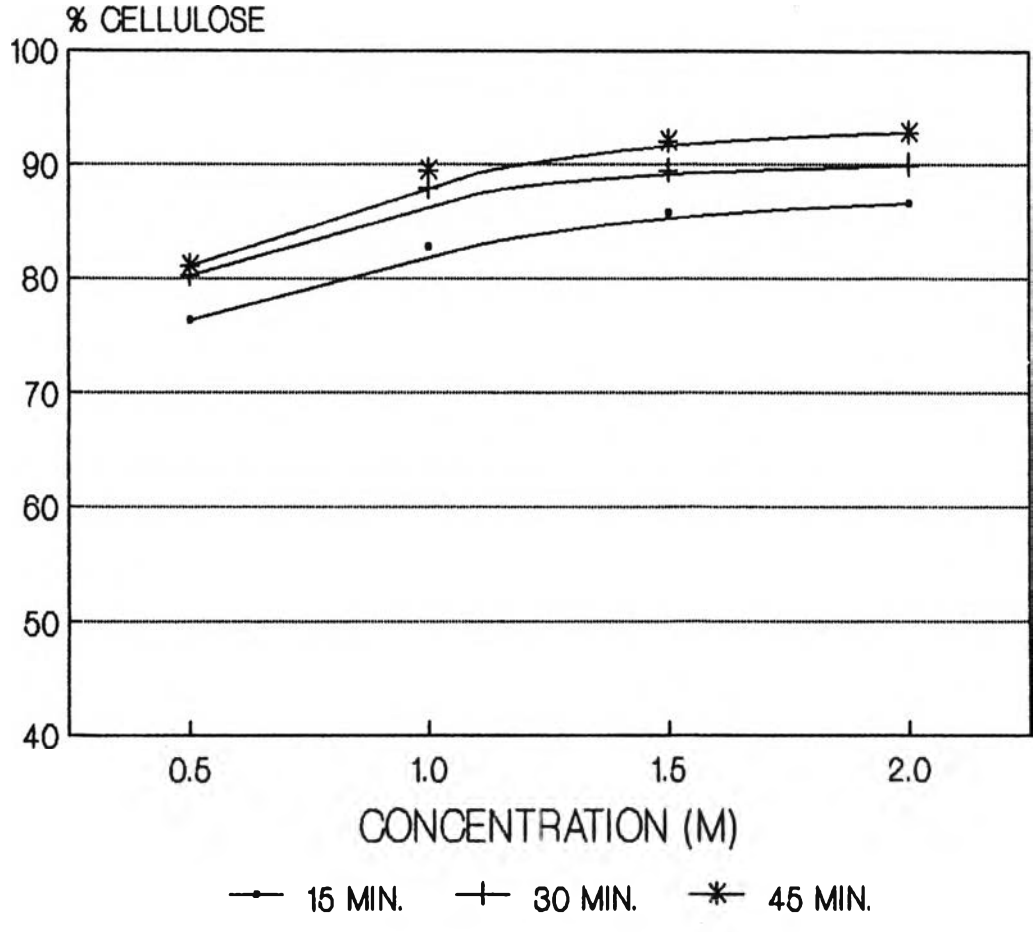
ความเข้มข้นของ NaOH (M)	อุณหภูมิที่ใช้ต้ม (°C)	ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟางหลังการปรับสภาพ (% น้ำหนักแห้ง)				น้ำหนักฟางที่หายไปในการปรับสภาพ (%)
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
2.0	30	84.58	2.91	10.23	2.28	31.98
	50	90.13	1.45	5.25	3.17	36.00
	60	92.07	1.47	3.52	2.94	40.12
	70	94.46	1.24	2.16	2.14	43.48
	80	94.19	1.13	1.66	3.02	46.51
	90	94.86	0.11	1.78	3.25	49.70



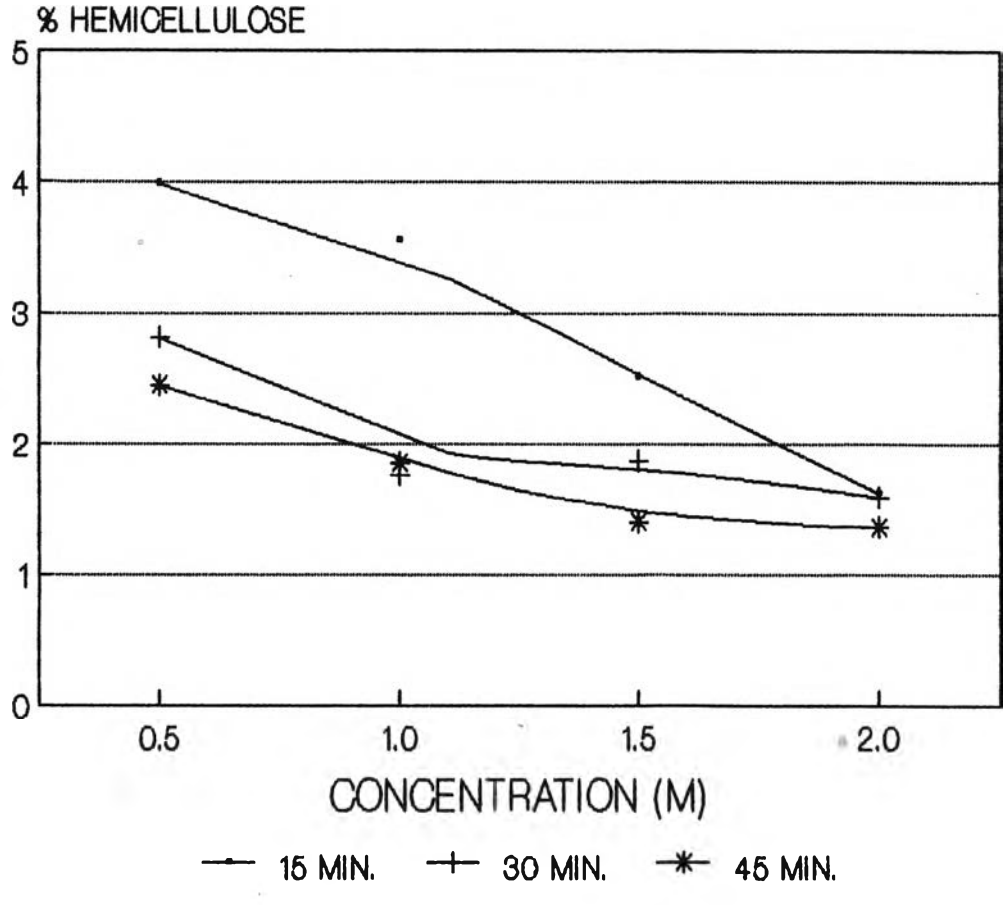
รูปที่ 4.4 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในตะกอนฟาง ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยการต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ

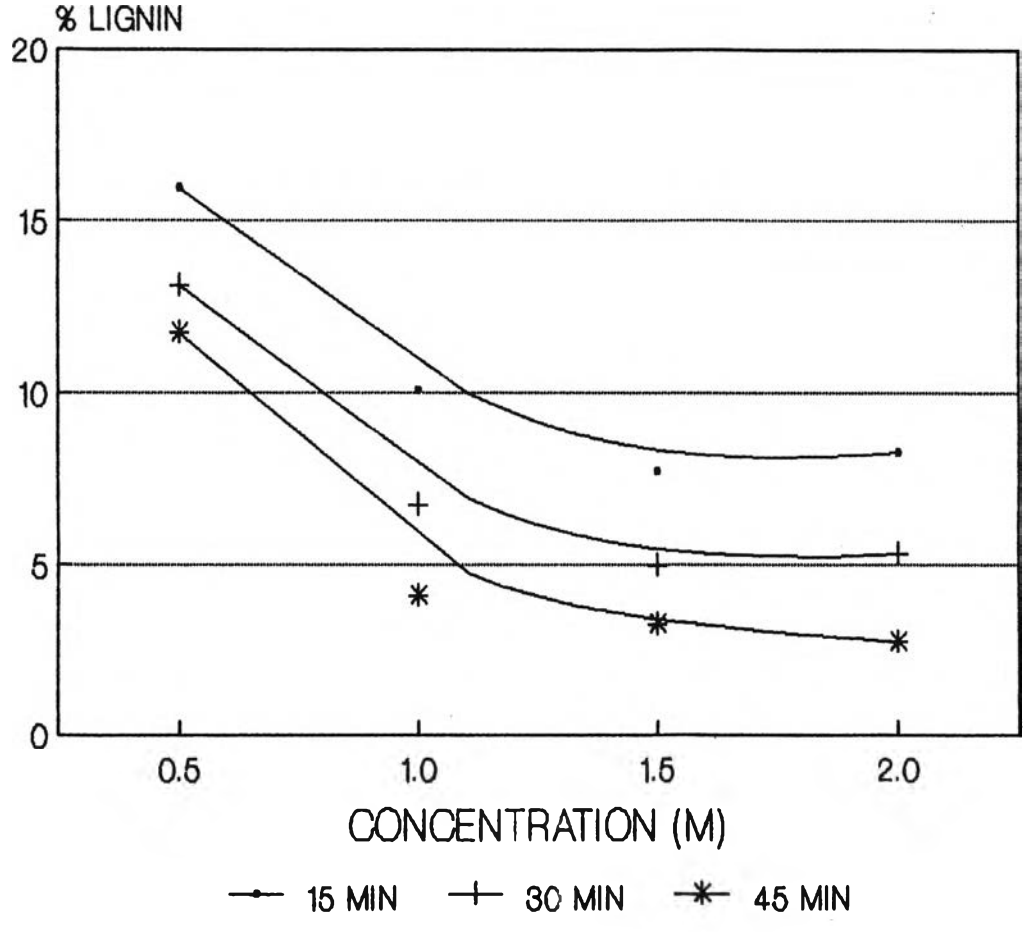
ความเข้มข้นของ NaOH (M)	เวลาที่ใช้ต้ม (MIN)	ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟางหลังการปรับสภาพ (% น้ำหนักแห้ง)				น้ำหนักฟางที่หายไปในการปรับสภาพ (%)
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
0.5	15	76.32	3.99	15.96	3.73	45.86
	30	80.28	2.81	13.09	3.82	48.32
	45	81.11	2.45	11.74	4.70	51.70
1.0	15	82.77	3.55	10.06	3.62	48.17
	30	87.92	1.76	6.71	3.61	51.76
	45	89.41	1.85	4.10	4.64	54.99
1.5	15	85.81	2.51	7.68	4.00	55.07
	30	89.44	1.87	4.97	3.72	59.49
	45	92.03	1.40	3.26	3.31	62.45
2.0	15	86.68	1.62	8.25	3.45	61.03
	30	89.91	1.59	5.30	3.20	65.65
	45	92.78	1.36	2.72	3.14	78.48



รูปที่ 4.5 ปริมาณเซลลูโลสในตะกอนผง หลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.6 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในตะกอนฟาง หลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.7 ปริมาณลิกนินในตะกอนฟาง หลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของเอทานอล (% V/V)	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟางหลังการปรับสภาพ (% น้ำหนักแห้ง)				น้ำหนักฟางที่หายไปในการปรับสภาพ (%)
		เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
50	70	61.23	4.11	21.60	13.06	4.29
75		65.02	4.07	18.38	12.53	8.15
95		67.79	4.16	13.53	14.52	10.93

ตารางที่ 4.5 การปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้เอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วิธีการปรับสภาพ	ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟางหลังการปรับสภาพ (% น้ำหนักแห้ง)				น้ำหนักฟางที่หายไปในการปรับสภาพ (%)
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
ต้มใน 95% เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., แช่ 2.0 M NaOH 24 ชม.	89.94	1.81	4.48	3.77	50.41
ต้มใน 95% เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., แช่ 2.0 M NaOH 24 ชม.,ต้มที่ 50 °C 90 นาที	91.82	1.76	3.12	3.30	52.71
ต้มใน 95% เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., แช่ 2.0 M NaOH 24 ชม.,ต้มที่ 70 °C 90 นาที	92.30	1.82	2.58	3.30	56.20

ตารางที่ 4.6 การปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้เอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

วิธีการปรับสภาพ	ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟางหลังการปรับสภาพ (% น้ำหนักแห้ง)				น้ำหนักฟางที่หายไปในการปรับสภาพ (%)
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
ต้มใน 95%เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., ต้มใน 0.5 M NaOH 15 นาที	86.11	3.90	5.14	4.85	51.93
ต้มใน 95% เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., ต้มใน 1.0 M NaOH 15 นาที	88.50	3.38	3.47	4.65	57.98
ต้มใน 95% เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., ต้มใน 1.5 M NaOH 15 นาที	89.11	3.32	3.12	4.45	59.85
ต้มใน 95% เอทานอล ที่ 70 °C, 4 ชม., ต้มใน 2.0 M NaOH 15 นาที	90.17	3.46	1.65	4.72	61.31

การย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว

1. ผลการหาค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว ที่ผ่านการปรับสภาพ

   แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

2. ผลการหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ

   แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

3. ผลการหาอัตราส่วนของเอนไซม์ต่อสับสเตรทที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ

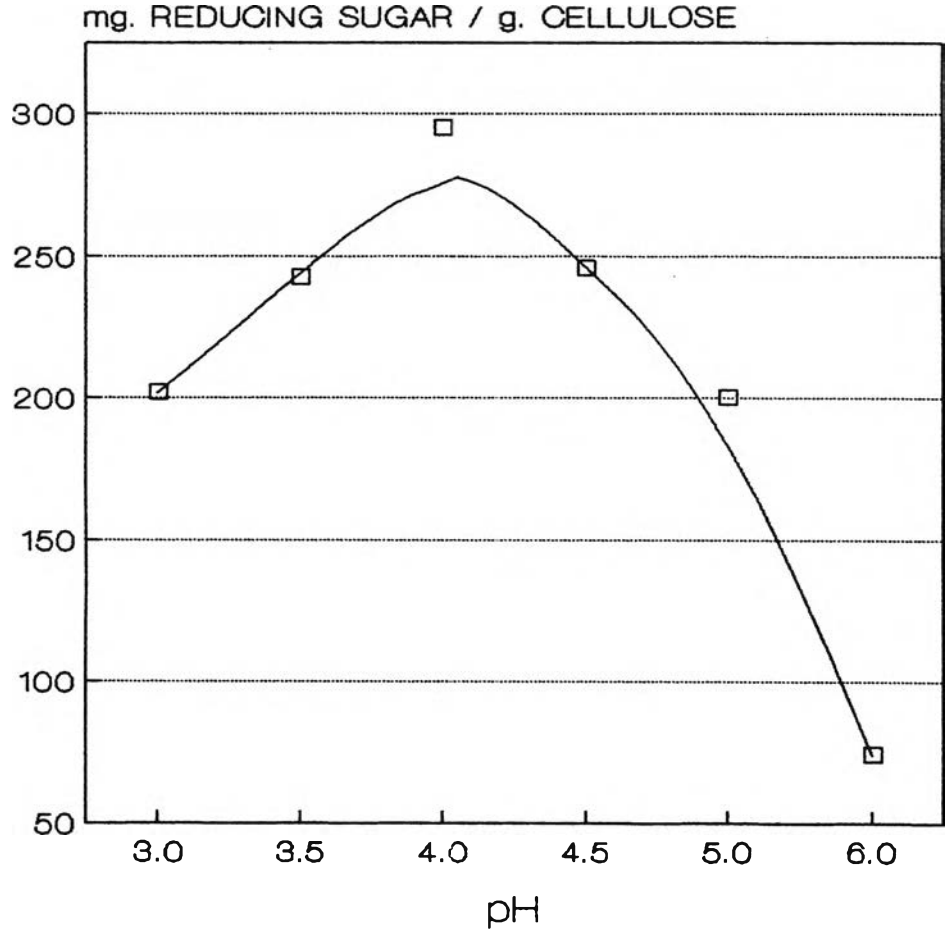
   แสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10

4. ผลการหาเวลาที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ

   แสดงในตารางที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.7 ผลการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH ค่าต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลสเท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

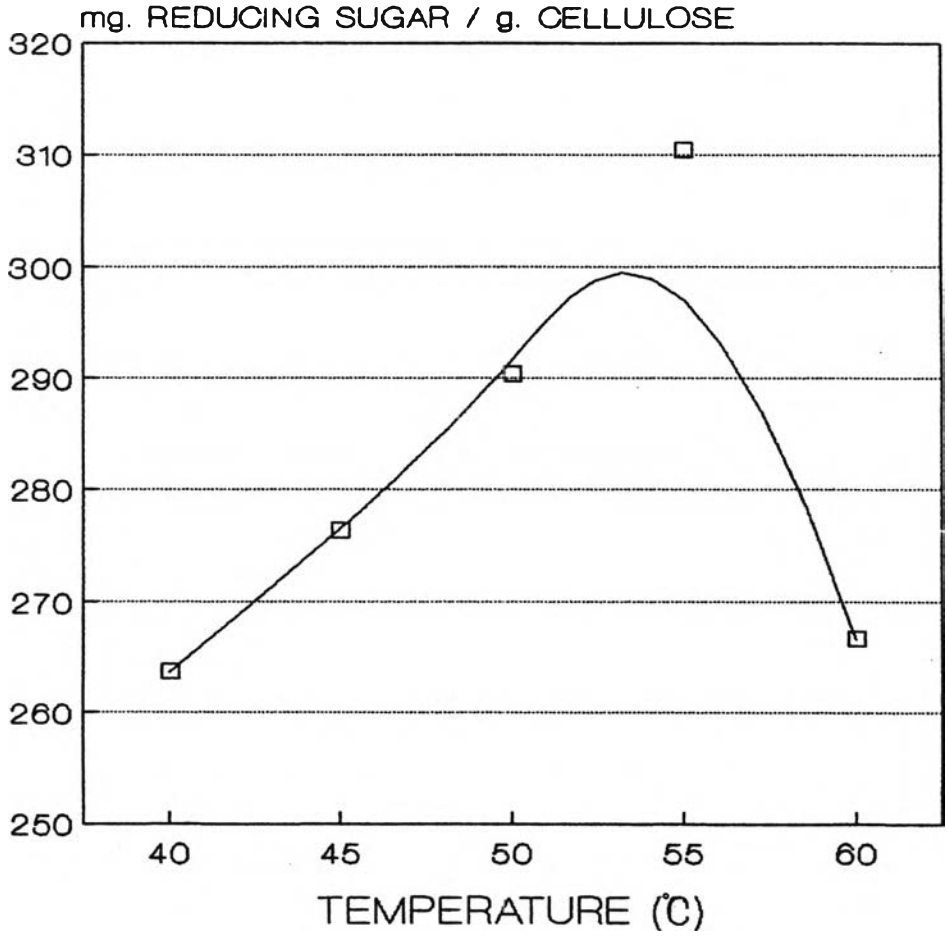
pH	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม) / ปริมาณเซลลูโลส (กรัม)	ค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ (%)	ค่าการเปลี่ยน (%)
3.0	201.75	31.56	18.16
3.5	242.53	17.73	21.83
4.0	294.80	0.00	26.53
4.5	245.56	16.70	22.10
5.0	200.07	32.13	20.62
6.0	74.05	74.88	6.66



รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH ค่าต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส เท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.8 ผลการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส เท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

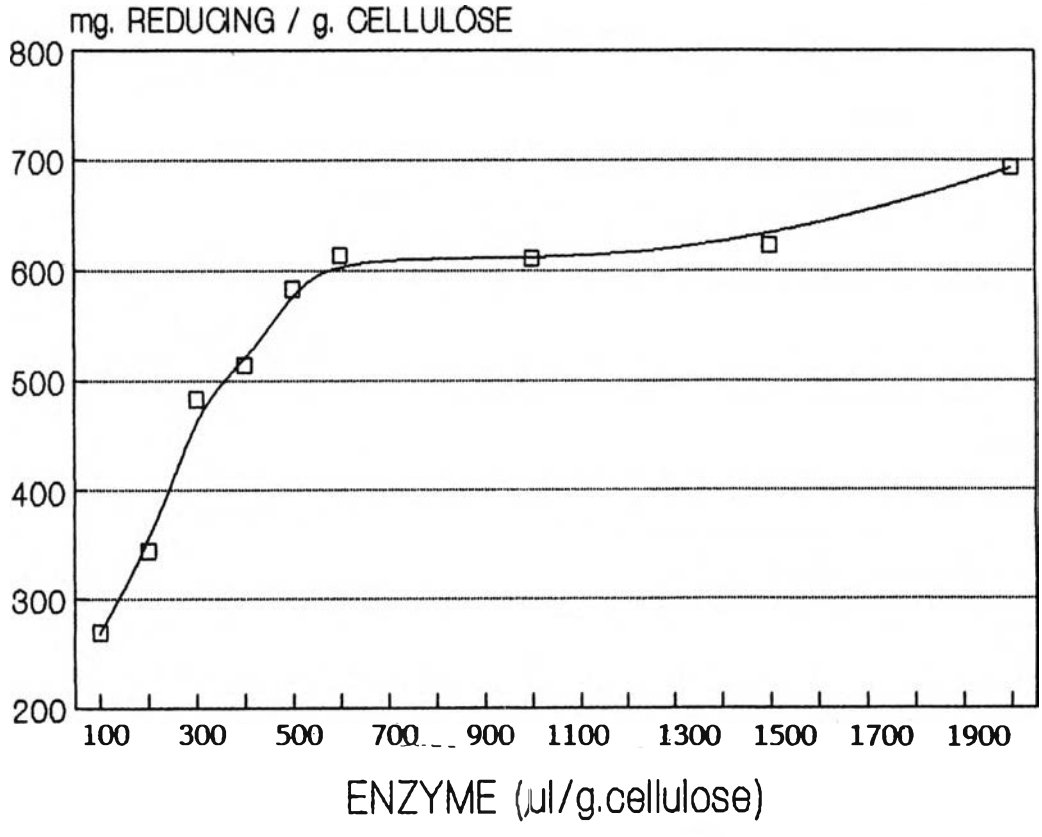
อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม) / ปริมาณเซลลูโลส (กรัม)	ค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ (%)	ค่าการเปลี่ยน (%)
40	263.63	15.05	23.73
45	276.31	10.96	24.87
50	290.33	6.45	26.13
55	310.35	0.00	27.95
60	266.44	14.08	24.00



รูปที่ 4.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส เท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 ผลการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 ที่อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

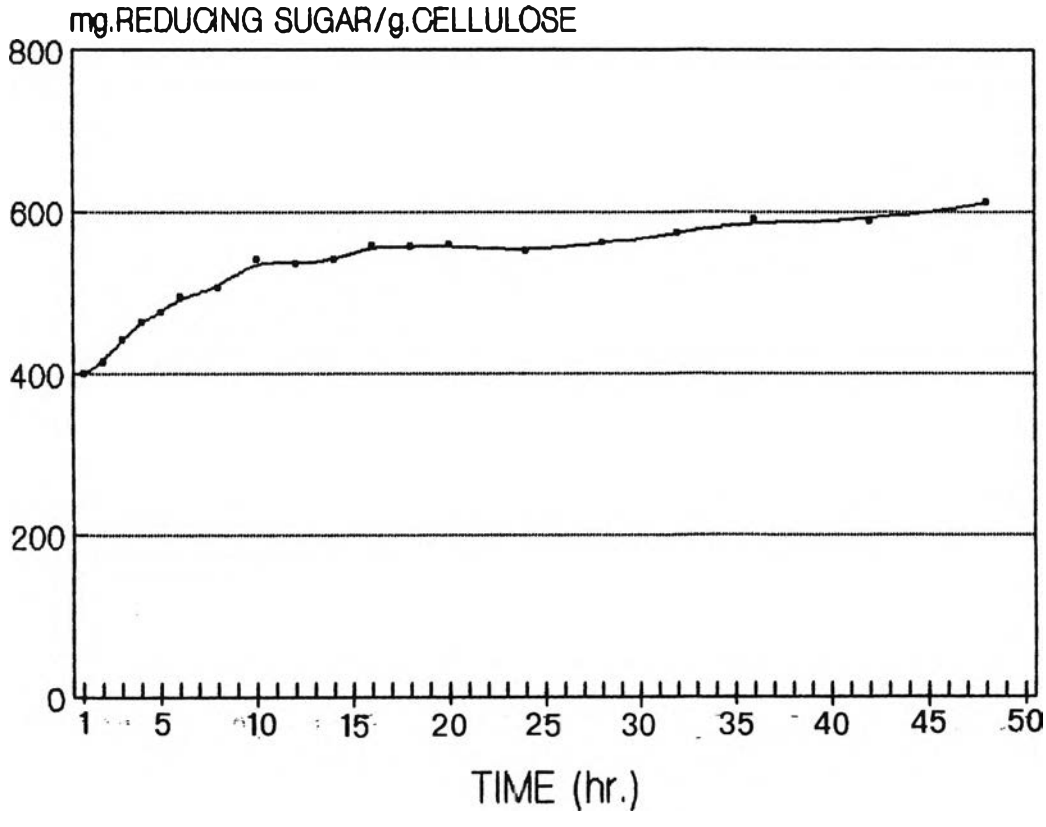
อัตราส่วนของ เอนไซม์(μl):เซลลูโลส (กรัม)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม) / ปริมาณเซลลูโลส (กรัม)	ค่าการเปลี่ยน (%)
100 : 1	268.57	24.17
200 : 1	343.36	30.90
300 : 1	481.58	43.34
400 : 1	512.32	46.19
500 : 1	581.81	52.36
600 : 1	612.32	55.11
1000 : 1	609.22	54.83
1500 : 1	621.40	55.93
2000 : 1	691.96	62.28



รูปที่ 4.10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 ที่อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.10 ผลการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส เท่ากับ 500 ไมโครลิตรต่อกรัมเซลลูโลส ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม) / ปริมาณเซลลูโลส (กรัม)	ค่าการเปลี่ยน (%)
1	398.11	35.43
2	412.58	36.72
3	440.19	39.18
4	461.65	41.09
5	474.30	42.21
6	491.95	43.78
8	503.72	44.83
10	539.63	48.03
12	535.05	47.62
14	539.44	48.01
16	557.07	49.58
18	555.30	49.42
20	557.43	49.61
24	550.66	49.01
28	560.37	49.87
32	571.80	50.89
36	589.48	52.46
42	586.48	52.20
48	610.67	54.35



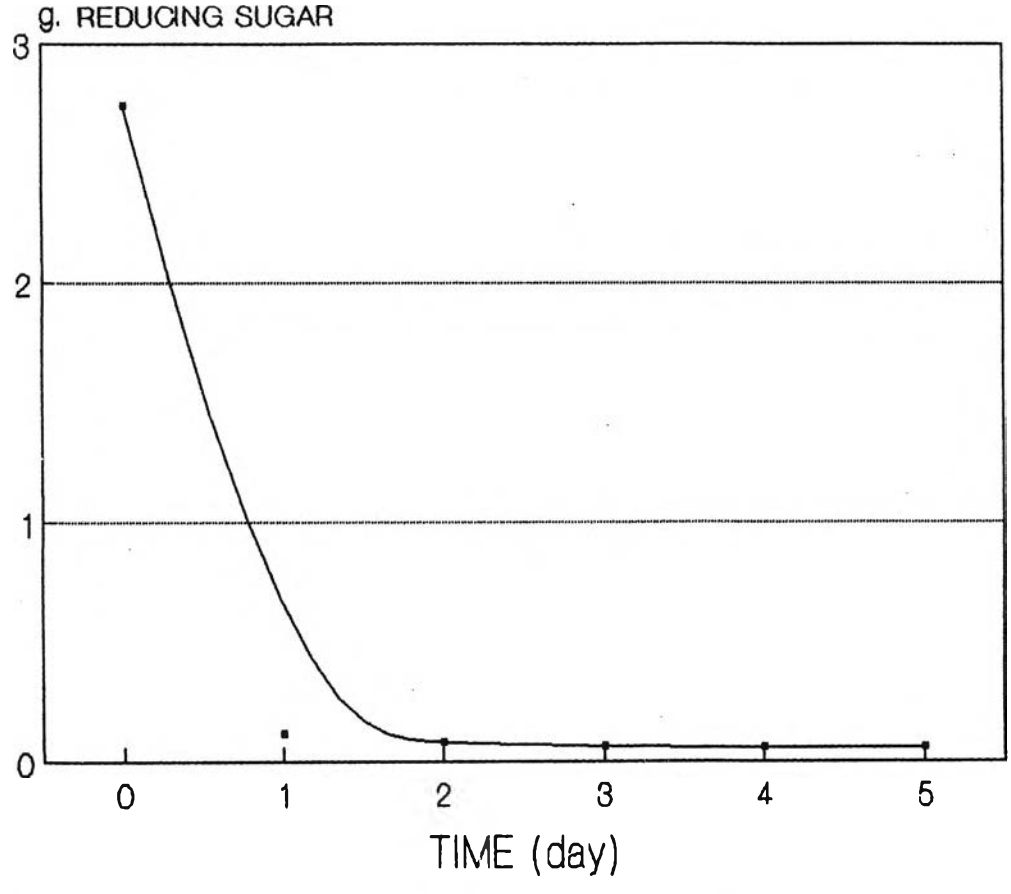
รูปที่ 4.11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์เซลลูเลสต่อเซลลูโลส เท่ากับ 500 ไมโครลิตรต่อกรัมเซลลูโลส ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ

การผลิตเอทานอล

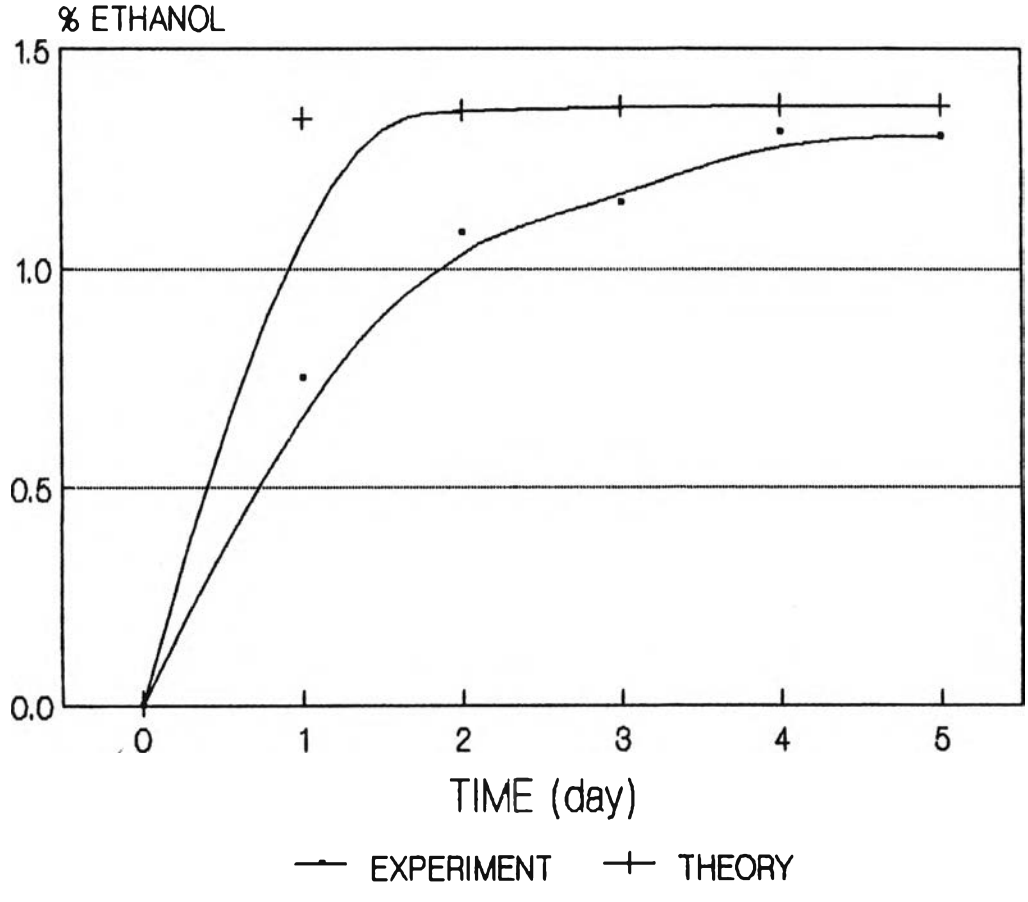
การผลิตเอทานอลจากน้ำตาล ที่ได้จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว ที่ผ่านการปรับสภาพ แสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.12, 4.13

ตารางที่ 4.11 ผลการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลที่ได้จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว ที่ผ่านการปรับสภาพ

เวลา (วัน)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือ (กรัม)	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ตามทฤษฎี (%โดยน้ำหนัก)	ค่าการเปลี่ยนเทียบกับค่าตามทฤษฎี(%)
0	2.7403	0.00	0.0000	0.0000	0.00
1	0.1174	0.75	0.7491	1.3406	55.88
2	0.0825	1.08	1.0772	1.3584	79.30
3	0.0622	1.15	1.1463	1.3688	83.75
4	0.0586	1.31	1.3056	1.3706	95.25
5	0.0578	1.30	1.2956	1.3711	94.49



รูปที่ 4.12 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ลดลงในระหว่างการผลิตเอทานอลที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.13 ปริมาณเอทานอลที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการผลิตเอทานอลที่เวลาต่างๆ และปริมาณเอทานอลที่ควรผลิตได้ตามทฤษฎี