

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

นำแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

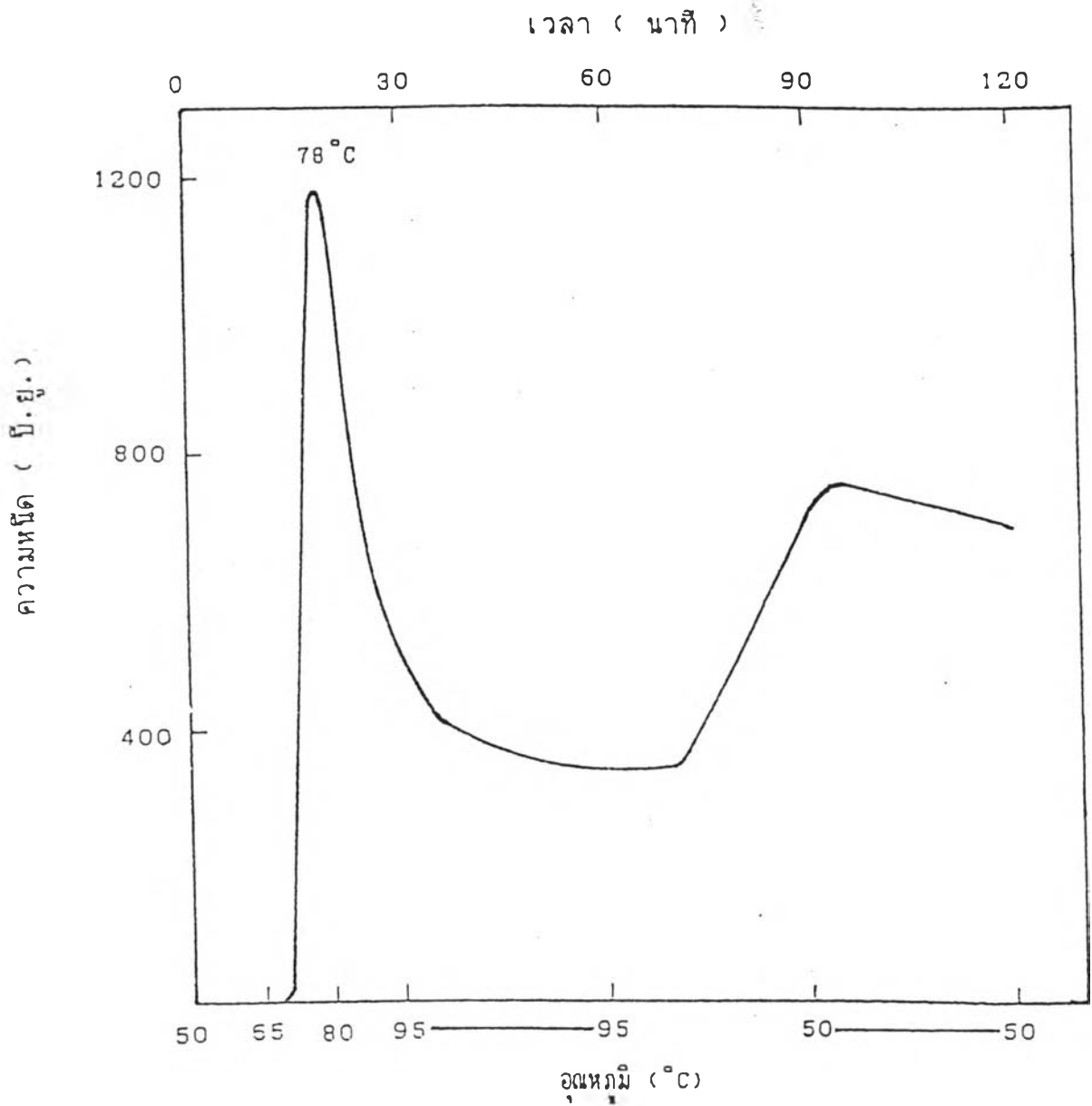
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

สมบัติทางเคมี*	
ความชื้น (ร้อยละ)	12.67+0.16
ความเป็นกรด-ด่าง	5.12+0.00
ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละของ นน.แป้งแห้ง)	$5.92 \times 10^{-3} + 0.00$
ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละของ นน.แป้งแห้ง)	22.68+0.02

* หมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

กราฟ Brabender แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ ใน heating-cooling cycle แสดงในรูปที่ 4.1 จากกราฟนี้สามารถอ่าน ค่าของอุณหภูมิ แป้งสุก (pasting temperature) ความหนืดในช่วง heating (ความหนืดสูงสุด ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที) ความหนืดในช่วง cooling (ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที) ผลต่างระหว่างความหนืดของ

แป้งเปียกในช่วง heating (อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ถึง 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที) และผลต่างระหว่างความหนืดของแป้งเปียกในช่วง cooling (อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ถึง 50 องศาเซลเซียส) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติมีความหนืดของแป้งเปียกเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วง heating โดยความหนืดของแป้งเปียกจะเพิ่มขึ้นจนสูงสุด (peak viscosity) ที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส หลังอุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส ความหนืดของแป้งเปียกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ความหนืดของแป้งเปียกจะลดลงจากจุดความหนืดสูงสุดประมาณ 3.5 เท่า และความหนืดจะเพิ่มขึ้นใหม่ โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจากจุด 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ประมาณ 2 เท่า แสดงว่าสารละลายแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติเกิดการคืนตัว



รูปที่ 4.1 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติความเข้มข้นร้อยละ 8

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิแป้งสุกและความหนืดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากกราฟ Brabender ของแป้ง
มันสำปะหลังธรรมชาติ

สมบัติ	ค่าที่วัดได้ ¹
อุณหภูมิแป้งสุก (pasting temperature)	67-69 °C
ค่าความหนืดสูงสุด	1,180 บี.ยู. ²
ค่าความหนืดที่ 95 °C	500 บี.ยู.
ค่าความหนืดที่ 95 °C นาน 30 นาที	340 บี.ยู.
ค่าความหนืดที่ 50 °C	720 บี.ยู.
ค่าความหนืดที่ 50 °C นาน 30 นาที	690 บี.ยู.
ค่าผลต่างความหนืดที่ 95 °C ถึง 95 °C นาน 30 นาที	160 บี.ยู.

1. วัดด้วยเครื่อง Brabender Visco-Amylograph ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8

2. บี.ยู. ย่อมาจาก Brabender Unit (B.U.)

4.2 การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาเคมี

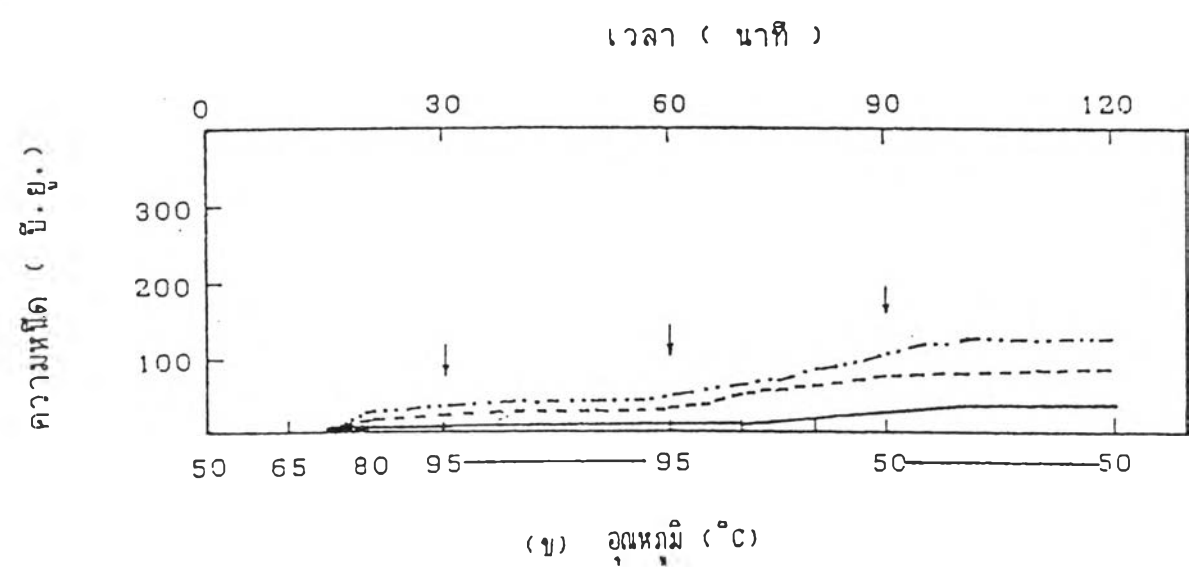
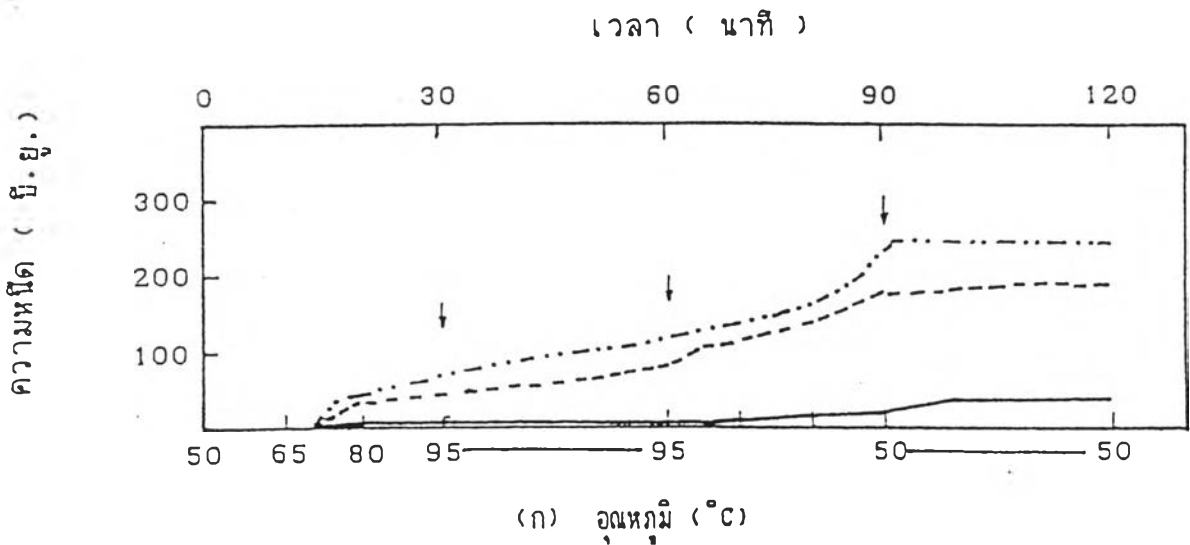
4.2.1 ภาวะที่เหมาะสมในการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติด้วยปฏิกิริยา cross - linking โดยใช้ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$

ผลจากปฏิกิริยา cross - linking ที่มีต่อความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ภาวะสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 40 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) pH 11.00 \pm 0.10 ที่อุณหภูมิ 50 \pm 2 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.20 , 0.25 และ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 2 ระดับ คือ 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ได้มีความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle ต่ำกว่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติมาก โดยเมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความหนืดของแป้งเปียกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะลดลง (ตารางที่ 4.3) ซึ่งผลการทดลองนี้ให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kerr และ Cleveland (33) และ Srijesdark และ คณะ (19) ที่ได้ตัดแปรแป้งข้าวโพดธรรมชาติและแป้งมันฝรั่งธรรมชาติด้วยปฏิกิริยา cross - linking ตามลำดับ ซึ่งก็พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ เวลาของปฏิกิริยา และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปฏิกิริยา cross - linking จะเกิดได้มากขึ้นด้วย จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ และเวลาของปฏิกิริยา เป็นตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางใน heating - cooling cycle อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.4) โดยความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ กับเวลาของปฏิกิริยา มีปฏิสัมพันธ์ต่อปฏิกิริยา cross - linking ในทิศทางเสริมกัน กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ กับเวลาของปฏิกิริยา เพิ่มขึ้น ความหนืดของแป้งเปียกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จะลดลง (รูปที่ 4.4)

การพิจารณาเสถียรภาพความหนืดของแป้งเปียก ตามวิธีของ Srijesdark และคณะ (19) โดยใช้ผลต่างของความหนืดของแป้งเปียกในช่วง heating ระหว่างค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และใช้ผลต่างของความหนืดในช่วง cooling ระหว่างค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30

นาที และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งถ้าผลต่างมีค่าน้อย แสดงว่าแป้งเปียกมีเสถียรภาพความหนืดดี และในทางตรงกันข้าม ถ้าผลต่างมีค่ามาก แสดงว่าแป้งเปียกมีเสถียรภาพความหนืดต่ำ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ และเวลาปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อเสถียรภาพความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางใน heating - cooling cycle อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.6) โดยเมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าผลต่างของความหนืดใน heating-cooling cycle จะมีค่าลดลง แสดงว่าแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ได้มีเสถียรภาพความหนืดมากขึ้น

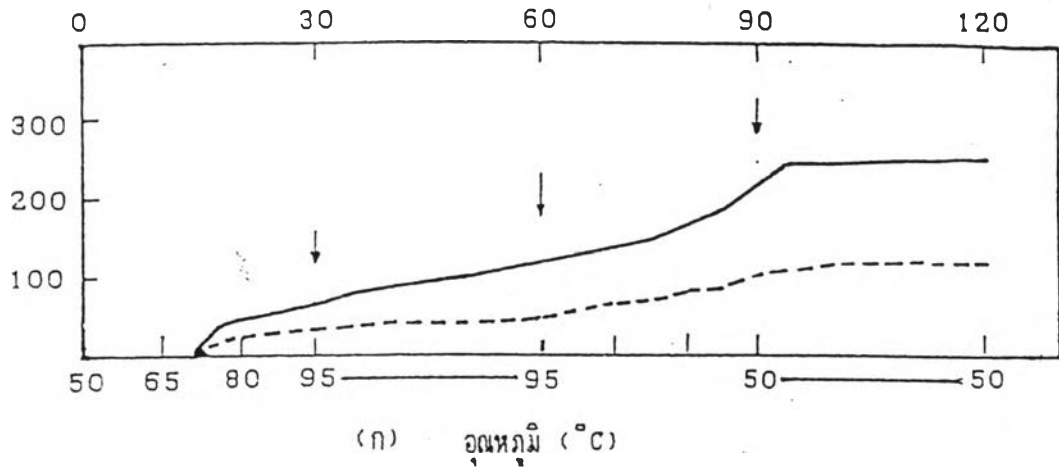
การพิจารณาแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางไปศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางด้วยปฏิกิริยา oxidation จะพิจารณาเสถียรภาพความหนืดใน heating - cooling cycle กล่าวคือแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่จะนำไปศึกษาต่อต้องมีเสถียรภาพความหนืดใน heating - cooling cycle สูง พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางคือ ใช้ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา คือ 4 และ 6 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.5) แต่จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลต่างของความหนืดโดยวิธี Unpaired Data t-Test พบว่าที่ภาวะความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจะเลือกแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ภาวะความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางด้วยปฏิกิริยา oxidation ต่อไป



รูปที่ 4.2 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง (ความเข้มข้นร้อยละ 8)
 ที่ใช้ปริมาณ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ที่ระดับต่าง ๆ และเวลาของปฏิกิริยา (ก) 4 ชั่วโมง
 (ข) 6 ชั่วโมง

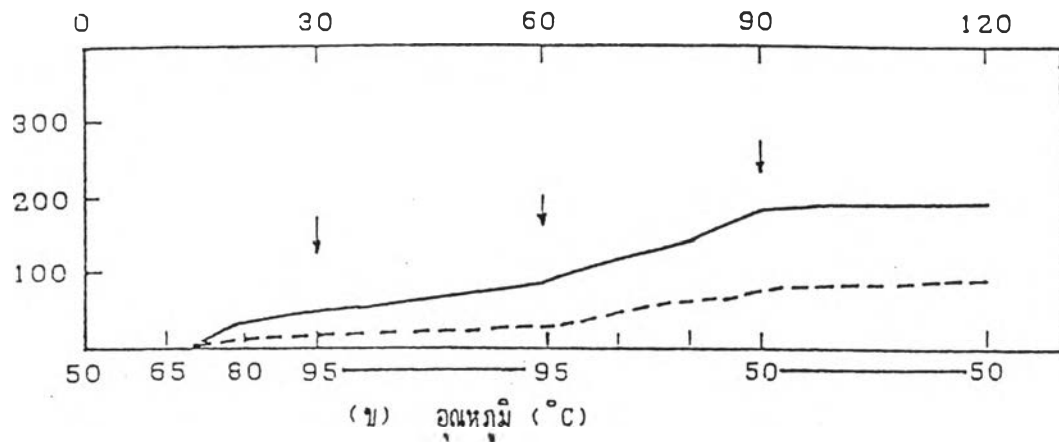
- ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.20
- ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.25
- ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.30

ความหนืด (บี.ยู.)



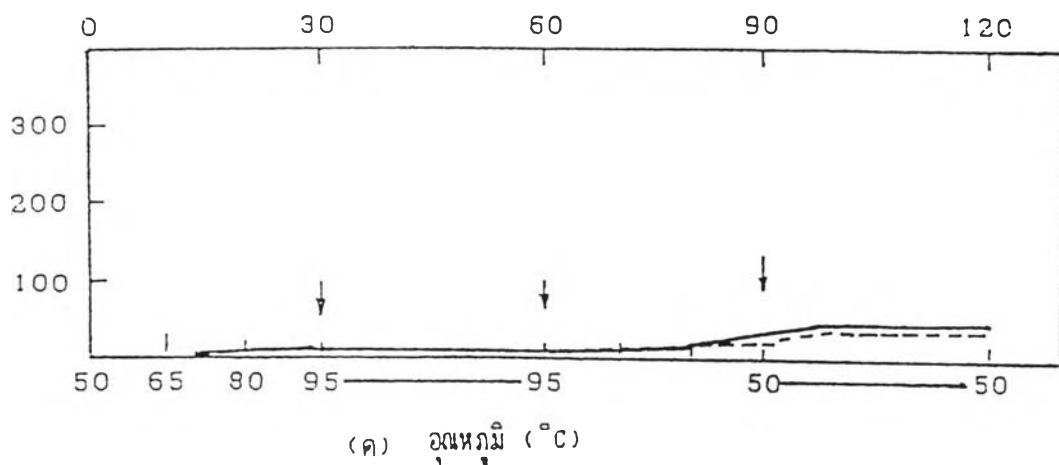
เวลา (นาที)

ความหนืด (บี.ยู.)



เวลา (นาที)

ความหนืด (บี.ยู.)



รูปที่ 4.3 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง(ความเข้มข้นร้อยละ 8) ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ (ก) ร้อยละ 0.20 (ข) ร้อยละ 0.25 และ (ค) ร้อยละ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง)

- เวลาปฏิบัติ 4 ชั่วโมง
- เวลาปฏิบัติ 6 ชั่วโมง

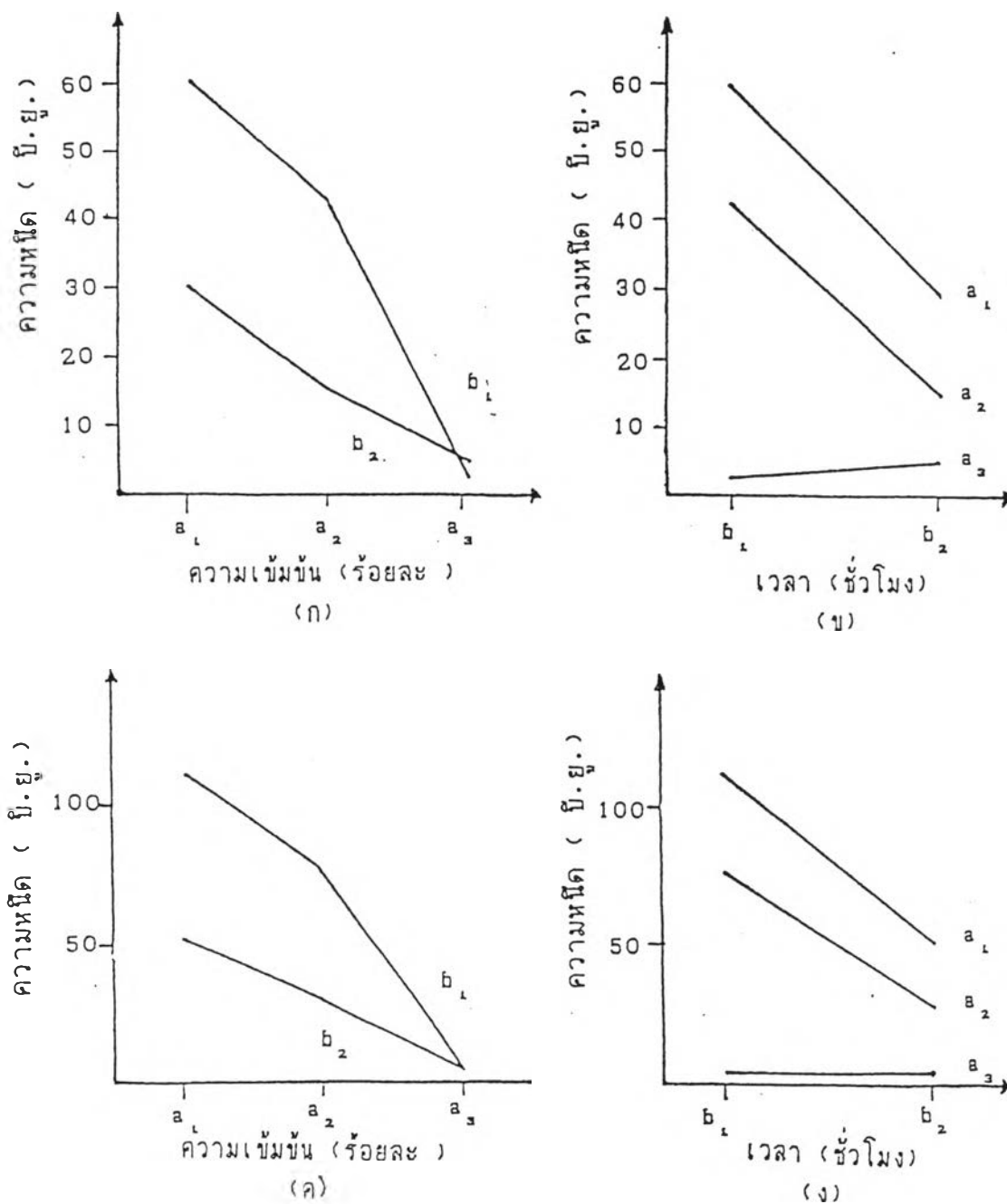
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความหนืดของน้ำมันล้าปะหลังเชื่อมขวางที่ความเข้มข้นร้อยละ 8

ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ (A)	เวลา (B)	ค่าเฉลี่ยความหนืดของแป้งเปียก (บี.ยู.)		
		95°C	95°C นาน 30 นาที	50°C
$a_1 = 0.20\%$	$b_1 = 4$ ชม.	60.0+0.0	112.5+7.5	212.5+7.5
	$b_2 = 6$ ชม.	30.0+5.0	52.5+7.5	105.0+10.0
$a_2 = 0.25\%$	$b_1 = 4$ ชม.	42.5+7.5	77.5+7.5	190.0+5.0
	$b_2 = 6$ ชม.	15.0+5.0	30.0+5.0	77.5+2.5
$a_3 = 0.30\%$	$b_1 = 4$ ชม.	2.5+2.5	5.0+0.0	30.0+0.0
	$b_2 = 6$ ชม.	5.0+0.0	5.0+0.0	27.5+2.5

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่
ความเข้มข้นร้อยละ 8

SOV	d.f.	Mean square ของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง		
		ที่อุณหภูมิต่าง ๆ		
		95 °C	95 °C นาน 30 นาที	50 °C
ความเข้มข้น(A)	2	1,727.083 *	6,139.583 *	19,033.340 *
เวลา (B)	1	1,008.334 *	3,852.082 *	16,502.090 *
AB	2	327.083 *	1,002.084 *	3,858.328 *
Error	6	37.500	64.584	64.583

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 4.4 ปฏิสัมพันธ์ ของความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ กับเวลาของปฏิกิริยาต่อความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) และ (ข) 95°C (ค) และ (ง) 95°C นาน 30 นาที

a_1, a_2, a_3 คือ ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.20, 0.25 และ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) ตามลำดับ

b_1, b_2 คือเวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยผลต่างของความหนืดของน้ำมันสำหรับห้องเชื่อมขวางที่ความเข้มข้นร้อยละ 8

		ค่าเฉลี่ยผลต่างของความหนืดของน้ำมันเบี่ยง (บี.ยู.)	
ความเข้มข้นของ	เวลา		
$\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ (A)	(B)	95°C นาน 30 นาที-95°C	50°C-95°C นาน 30 นาที
$a_1 = 0.20\%$	$b_1 = 4$ ชม.	52.5+ <u>7.5</u>	100.0+ <u>0.0</u>
	$b_2 = 6$ ชม.	22.5+ <u>2.5</u>	52.5+ <u>2.5</u>
$a_2 = 0.25\%$	$b_1 = 4$ ชม.	35.0+ <u>0.0</u>	112.5+ <u>12.5</u>
	$b_2 = 6$ ชม.	15.0+ <u>0.0</u>	47.5+ <u>2.5</u>
$a_3 = 0.30\%$	$b_1 = 4$ ชม.	2.5+ <u>2.5</u>	25.0+ <u>0.0</u>
	$b_2 = 6$ ชม.	0.0+ <u>0.0</u>	22.5+ <u>2.5</u>

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง
ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8

SOV	d.f.	Mean Square ของผลต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางที่อุณหภูมิต่าง ๆ	
		95°C นาน 30 นาที-95°C	50°C-95°C นาน 30 นาที
ความเข้มข้น(A)	2	1,356.250 [*]	3,956.250 [*]
เวลา (B)	1	918.750 [*]	4,408.332 [*]
AB	2	193.750 [*]	1,039.584 [*]
Error	6	22.917	58.333

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.2.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง

การละลายและกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ และแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง แสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 พบว่าที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส 85 องศาเซลเซียส และ 95 องศาเซลเซียส แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติจะมีการละลาย (solubility) และกำลังการพองตัว (swelling power) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางประมาณ 7- 10 เท่า เมื่อพิจารณาการละลายและกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ระดับต่าง ๆ พบว่าแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ระดับความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมง มีการละลายและกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ระดับอื่น ๆ ทั้งนี้เพราะเมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยา esterification ($\text{STOH} + \text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$

0

$\text{STOPOST} + \text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$) จะเกิดได้มากขึ้น จึงเกิดพันธะฟอสเฟตไดเอสเทอร์ (พันธะเชื่อม

ONa

ขวาง) ชนิดโคเวเลนต์ระหว่างโมเลกุลแป้งสองสายมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น เป็นผลให้จำกัดการละลายและกำลังการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ และเวลาของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อการละลายและกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.9 และ 4.10)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต ในรูปฟอสฟอรัสในแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มในแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง จะเพิ่มตามความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ และ เวลาของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการสร้างพันธะฟอสเฟตไดเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลแป้งสองสายมากขึ้น และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ และเวลาของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มในแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางธรรมชาติ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.12) แม้ว่าปริมาณฟอสฟอรัสในแป้งมันสำปะหลัง

เชื่อมขวางจะมีค่าสูงสุดคือร้อยละ 10.52×10^{-3} ของน้ำหนักแป้งแห้ง แต่ยังต่ำกว่ามาตรฐานที่ทางสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของประเทศไทย (3) และสหรัฐอเมริกา (9) กำหนดไว้ให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง แสดงในตารางที่ 4.13 และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_2\text{O}_7$ และเวลาของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่ไม่มีผลให้ปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.12)

ตารางที่ 4.7 การละลายของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ความเข้มข้น ของ $\text{Na}_3\text{P}_2\text{O}_7$	เวลา	ค่าเฉลี่ยร้อยละของการละลายของแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65°C	75°C	85°C	95°C
(A)	(B)				
แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง					
$a_1 = 0.20\%$	$b_1 = 4$ ชม.	6.442±0.340	8.218±0.460	8.457±0.257	9.785±1.108
	$b_2 = 6$ ชม.	4.899±0.005	6.212±0.086	6.790±0.084	7.261±0.189
$a_2 = 0.25\%$	$b_1 = 4$ ชม.	6.188±0.028	6.632±0.041	7.374±0.092	7.464±0.066
	$b_2 = 6$ ชม.	4.774±0.060	5.698±0.228	5.830±0.114	6.285±0.023
$a_3 = 0.30\%$	$b_1 = 4$ ชม.	3.692±0.048	4.544±0.084	4.996±0.080	5.135±0.173
	$b_2 = 6$ ชม.	3.584±0.192	4.088±0.382	4.384±0.027	4.596±0.010
แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ					
-	-	7.058±0.154	30.638±4.618	37.518±2.022	41.044±0.588

ตารางที่ 4.8 กำลังการงอตัวของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ความเข้มข้น ของ $\text{Na}_3\text{P}_2\text{O}_7$	เวลา	ค่าเฉลี่ยกำลังการงอตัวของแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65°C	75°C	85°C	95°C
(A)	(B)				
แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง					
$a_1 = 0.20\%$	$b_1 = 4$ ชม.	9.638±0.006	9.855±0.080	10.171±0.149	11.129±0.221
	$b_2 = 6$ ชม.	8.799±0.030	8.884±0.100	9.172±0.044	9.278±0.062
$a_2 = 0.25\%$	$b_1 = 4$ ชม.	9.157±0.003	9.208±0.028	9.462±0.120	9.609±0.009
	$b_2 = 6$ ชม.	8.312±0.114	8.552±0.004	8.636±0.034	9.047±0.007
$a_3 = 0.30\%$	$b_1 = 4$ ชม.	7.832±0.032	7.848±0.051	7.911±0.005	7.992±0.016
	$b_2 = 6$ ชม.	7.794±0.030	7.856±0.004	7.894±0.002	7.926±0.006
แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ					
-	-	13.270±0.050	43.350±2.478	50.250±0.335	60.228±1.198

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

SOV	d.f.	Mean Square ของการละลายของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
ความเข้มข้น (A)	2	5.041 [*]	8.618 [*]	8.868 [*]	18.422 [*]
เวลา (B)	1	3.132 [*]	3.845 [*]	4.873 [*]	5.998 [*]
AB	2	0.631 [*]	0.630	0.333 [*]	1.026
Error	6	5.312X10 ⁻²	0.142	3.392X10 ⁻²	0.433

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อม-
ขวางที่อุณหภูมิต่าง ๆ

SOV	d. f.	Mean Square ของกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง			
		เชื่อมขวางที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
ความเข้มข้น (A)	2	2.039 [*]	2.340 [*]	3.222 [*]	5.041 [*]
เวลา (B)	1	0.987 [*]	0.874 [*]	1.132 [*]	3.132 [*]
AB	2	0.215 [*]	0.250 [*]	0.275 [*]	0.631 [*]
Error	6	5.330X10 ⁻³	6.622X10 ⁻³	1.330X10 ⁻²	5.312X10 ⁻²

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.11 ปริมาณฟอสฟอรัส และฟอสฟอรัสตกค้าง ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง

ความเข้มข้น ของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ (A)	เวลา (B)	ปริมาณฟอสฟอรัส $\times 10^3$ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณฟอสฟอรัสตกค้าง $\times 10^4$ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง			
$a_1 = 0.20\%$	$b_1 = 4$ ชม.	6.2778 ± 0.0412	3.6100 ± 0.4120
	$b_2 = 6$ ชม.	9.0101 ± 0.0209	30.9330 ± 0.2090
$a_2 = 0.25\%$	$b_1 = 4$ ชม.	6.7646 ± 0.3182	8.4785 ± 3.1815
	$b_2 = 6$ ชม.	9.0490 ± 0.0106	31.3225 ± 0.1065
$a_3 = 0.30\%$	$b_1 = 4$ ชม.	10.0822 ± 0.0320	41.6535 ± 0.3205
	$b_2 = 6$ ชม.	10.5228 ± 0.4852	46.0595 ± 4.8525
แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ			
-	-	5.9168 ± 0.0002	-

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างและปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง

SOV	d.f.	Mean Square	
		ปริมาณฟอสฟอรัสตกค้างของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง	ปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง ^a
ความเข้มข้น (A)	2	8.584×10^{-6} *	1.246
เวลา (B)	1	9.927×10^{-6} *	0.207
AB	2	1.475×10^{-6} *	0.452
Error	6	1.133×10^{-7}	0.408

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

NS หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.13 ปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง

ความเข้มข้น ของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ (A)	เวลา (B)	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละโดยน้ำหนักแป้งแห้ง)
แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง		
$a_1 = 0.20\%$	$b_1 = 4$ ชม.	24.06 ± 0.32
	$b_2 = 6$ ชม.	24.57 ± 0.40
$a_2 = 0.25\%$	$b_1 = 4$ ชม.	24.10 ± 0.30
	$b_2 = 6$ ชม.	23.96 ± 0.50
$a_3 = 0.30\%$	$b_1 = 4$ ชม.	22.66 ± 0.24
	$b_2 = 6$ ชม.	23.00 ± 0.02
แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ		
-	-	22.68 ± 0.02

4.2.3 ภาวะที่เหมาะสมในการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางด้วยปฏิกิริยา

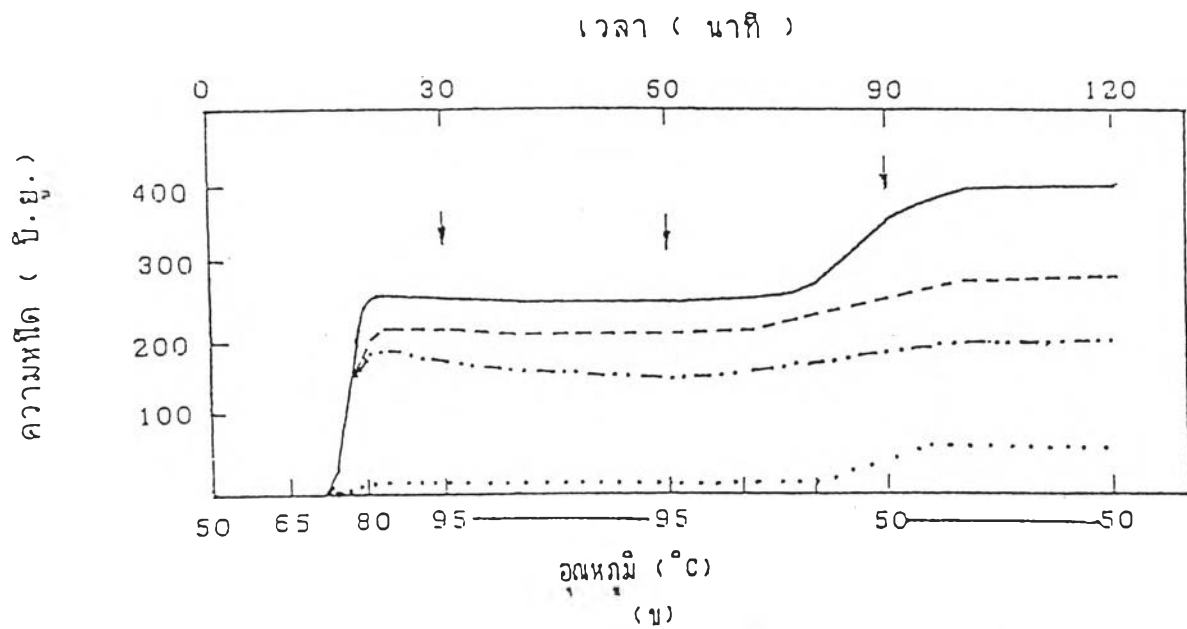
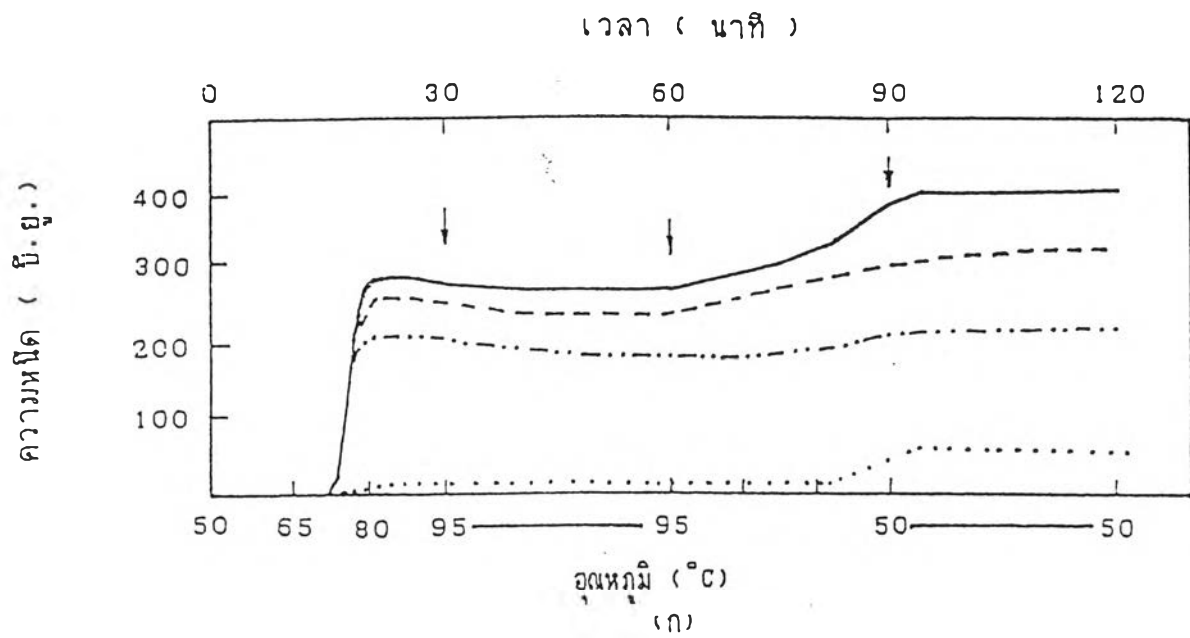
oxidation

ผลของปฏิกิริยา oxidation ที่มีต่อความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง ซึ่งตัดแปรที่ภาวะสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 40 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) pH 9.00 ± 0.10 ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นของ NaOCl 3 ระดับ คือ ร้อยละ 3.00 , 4.00 และ 5.00 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 2 ระดับ คือ 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่าแป้งมันสำปะหลังตัดแปร (แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์) ที่ได้ มีอุณหภูมิแป้งสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง แต่มีความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle สูงกว่าความหนืดของแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง โดยเมื่อความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความหนืดของแป้งเปียกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะลดลง (ตารางที่ 4.14) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Senti และคณะ (7) ซึ่งได้ตัดแปรแป้งข้าวโพดเชื่อมขวางด้วย NaOCl พบว่าการตัดแปรแป้งข้าวโพดที่มีระดับพันธะเชื่อมขวางปานกลาง (1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 250 AGU) เมื่อใช้เวลาในการ oxidize เพิ่มขึ้น (5-8 ชั่วโมง) ความหนืดสูงสุดและความหนืดของแป้งเปียกจะลดลง จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีผลให้ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรใน heating - cooling cycle มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.15)

เสถียรภาพความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรใน heating - cooling cycle แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ NaOCl เพิ่มขึ้น ค่าผลต่างของความหนืดของแป้งเปียกในช่วง heating จะเพิ่มขึ้น แต่ค่าผลต่างของความหนืดของแป้งเปียกในช่วง cooling จะลดลง ส่วนเมื่อเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าผลต่างของความหนืดใน heating - cooling cycle จะลดลงเล็กน้อย นั่นคือแป้งตัดแปรมีเสถียรภาพความหนืดเพิ่มขึ้นทั้งนี้เพราะเมื่อความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยา oxidation จะเกิดมากขึ้นด้วย ทำให้โมเลกุลแป้งมีหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้สายโพลีเมอร์สูญเสียลักษณะของสายตรง (6,7) ดังนั้นแรงยึดภายในโครงสร้างเม็ดแป้งน้อยลง

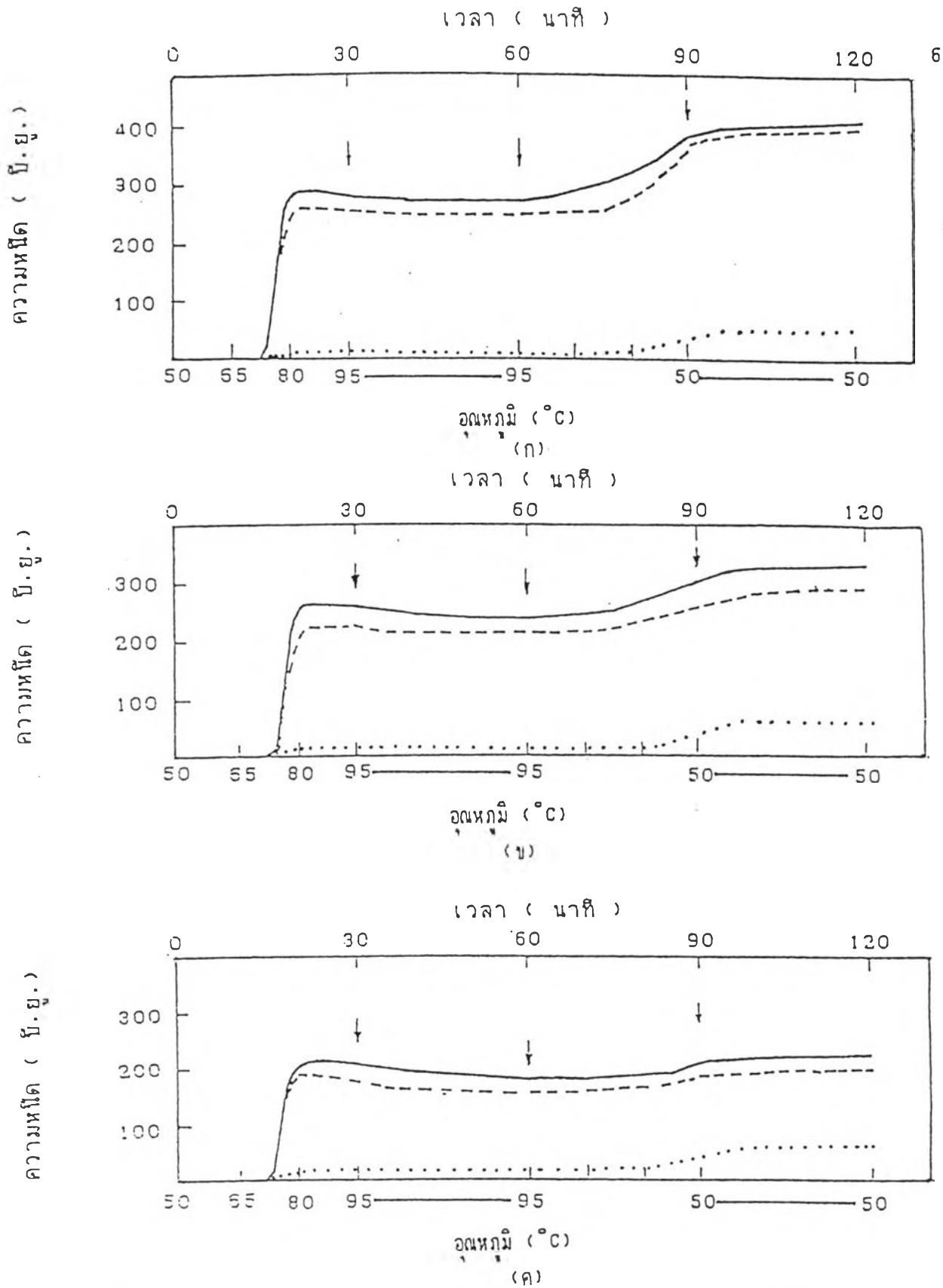
แป้งจะสุกได้ง่ายขึ้น แป้งเปียกมีความหนืดลดลง และเกิดการคืนตัวน้อย จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีผลให้ผลต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรใน heating - cooling cycle มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.17)

การพิจารณาเลือกแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแป้งกับความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle จะพิจารณาจากเสถียรภาพของความหนืดใน heating-cooling cycle พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.14) ดังนั้นจึงเลือกแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ภาวะความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) และเวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแป้งกับความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle ต่อไป



รูปที่ 4.5 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้น ร้อยละ 8) ที่ใช้ปริมาณ NaOCl ระดับต่าง ๆ และเวลาของปฏิกิริยา (ก) 4 ชั่วโมง และ (ข) 6 ชั่วโมง

- ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 3.00
- ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 4.00
- · - · - · - ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00
- แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่คัดเลือก



รูปที่ 4.6 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้น ร้อยละ 8) ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ NaOCl (ก) ร้อยละ 3.00 (ข) ร้อยละ 4.00 และ (ค) ร้อยละ 5.00 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง)

- เวลาของปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง
- - - - - เวลาของปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง
- แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่คัดเลือก

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความหนืดของน้ำมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8

ความเข้มข้น ของ NaOCl (A)	เวลา (B)	อุณหภูมิ แป้งสก (°C)	ค่าเฉลี่ยความหนืดของแป้งเปียก (บี.ย.)		
			95°C	95°C นาน 30 นาที	50°C
a ₁ = 3.00%	b ₁ = 4 ชม.	74.5	280.00 _{+0.00}	270.00 _{+0.00}	395.00 _{+5.00}
	b ₂ = 6 ชม.	74.0	252.50 _{+2.50}	245.00 _{+5.00}	347.50 _{+12.50}
a ₂ = 4.00%	b ₁ = 4 ชม.	74.0	245.00 _{+10.00}	225.00 _{+10.00}	290.00 _{+5.00}
	b ₂ = 6 ชม.	73.5	212.50 _{+7.50}	200.00 _{+10.00}	252.50 _{+2.50}
a ₃ = 5.00%	b ₁ = 4 ชม.	73.5	217.50 _{+7.50}	192.50 _{+7.50}	222.50 _{+7.50}
	b ₂ = 6 ชม.	73.5	185.00 _{+10.00}	165.00 _{+10.00}	190.00 _{+10.00}

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง และออกซิไดซ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8

SOV	d.f.	Mean Square ของความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง		
		เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ		
		95 °C	95 °C นาน 30 นาที	50 °C
ความเข้มข้น(A)	2	4,258.344 [*]	6,243.750 [*]	27,633.350 [*]
เวลา(B)	1	2,852.125 [*]	2,002.063 [*]	4,602.125 [*]
AB	2	8.312	2.094	58.312
Error	6	106.250	127.083	122.917

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยผลต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่
ความเข้มข้นร้อยละ 8

ความเข้มข้น ของNaOCl(A)	เวลา (B)	ค่าเฉลี่ยผลต่างของความหนืดของแป้งเปียก (บี.ยู.)	
		95°C-95°C นาน 30 นาที	50°C-95°C นาน 30 นาที
$a_1 = 3.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	10.0 \pm 0.0	125.0 \pm 5.0
	$b_2 = 6$ ชม.	7.5 \pm 2.5	102.5 \pm 7.5
$a_2 = 4.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	20.0 \pm 0.0	65.0 \pm 5.0
	$b_2 = 6$ ชม.	12.5 \pm 2.5	52.5 \pm 7.5
$a_3 = 5.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	25.0 \pm 0.0	30.0 \pm 0.0
	$b_2 = 6$ ชม.	20.0 \pm 0.0	25.0 \pm 0.0

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลต่างของความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง
เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8

SOV	d.f.	Mean Square ของผลต่างของความหนืดและแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	
		95 °C ถึง 95 °C นาน 30 นาที	95 °C นาน 30 นาที ถึง 50 °C
ความเข้มข้น(A)	2	189.583 *	7,627.084 *
เวลา(B)	1	75.000 *	533.336 *
AB	2	6.250	77.082
Error	6	4.167	54.167

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.2.4 สมบัติของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์

การละลายและกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร (แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์) แสดงในตารางที่ 4.18 และตารางที่ 4.19 พบว่าที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร จะมีการละลายและกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเข้มข้นของ NaOCl เท่านั้นที่เป็นตัวแปรที่มีผลให้การละลายและกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.20 และ 4.21) ทั้งนี้เพราะเมื่อความเข้มข้นของ NaOCl เพิ่มขึ้นจะเกิดปฏิกิริยา oxidation ได้มากขึ้น ทำให้โมเลกุลแป้งมีหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มมากขึ้น มีผลให้แรงยึดภายในโครงสร้างเม็ดแป้งน้อยลง นอกจากนี้ปฏิกิริยา oxidation ในภาวะที่เป็นด่าง โมเลกุลแป้งสามารถถูก hydrolyze ทำให้ขนาดเล็กลง (34) แป้งจะละลายออกมาจากเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรได้มากขึ้น เป็นผลให้การละลายของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรมีค่ามากขึ้น และเนื่องจากโมเลกุลแป้งมีหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ดังนั้นเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรจะอมน้ำได้มากขึ้น กำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรมีค่ามากขึ้น (กำลังการพองตัวเป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการจับกับโมเลกุลน้ำของแป้ง โดยกำลังการพองตัวมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของแป้งที่พองตัวต่อน้ำหนักแป้งแห้ง (12))

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอกซิลของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรแสดงในตารางที่ 4.22 พบว่าปริมาณคาร์บอกซิลที่เพิ่มขึ้นในแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่ามีการ oxidize หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเป็นหมู่คาร์บอกซิล จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเข้มข้นของ NaOCl เท่านั้นที่เป็นตัวแปรที่มีผลให้ปริมาณคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.23) และแม้ว่าปริมาณคาร์บอกซิลในแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรจะมีค่าสูงสุด คือร้อยละ 0.09 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) แต่ก็ยังต่ำกว่ามาตรฐานที่องค์การอาหารและองค์การอนามัยโลก (35) กำหนดไว้ให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 1.10 ของน้ำหนักแป้งแห้ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร แสดงในตารางที่ 4.24 พบว่าความเข้มข้นของ NaOCl และเวลาของปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่ไม่มีผลให้ปริมาณ

อะไมโลสในแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.23)

4.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแป้งกับความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle

ผลของปริมาณการใช้แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ แป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง และแป้งมันสำปะหลังตัดแปรต่อความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle แสดงในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.10 พบว่าปริมาณการใช้แป้งจะมีผลต่อความหนืดของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle โดยแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จะเพิ่มจากประมาณ 230 บี.ยู. เป็น 1,950 บี.ยู. แต่ที่ปริมาณร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 10 แป้งจะแสดงลักษณะ break down ใน heating และเกิดการคินตัวมากขึ้น

สำหรับแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5 และ 8 จะมีความหนืดน้อยมาก ใน heating - cooling cycle แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเป็นร้อยละ 9 และ 10 ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วง heating จนถึงช่วง cooling ส่วนแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยปฏิกิริยา cross - linking (ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.30 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และเวลาของปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง) และปฏิกิริยา oxidation (ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และเวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมง) พบว่าที่ปริมาณแป้งร้อยละ 5 และ ร้อยละ 8 ความหนืดจะเพิ่มขึ้นใน heating - cooling cycle เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ปริมาณแป้งเท่ากัน และที่ปริมาณแป้งร้อยละ 10 และร้อยละ 12.5 แป้งมันสำปะหลังตัดแปรจะแสดงลักษณะ break down และเกิดการคินตัวมากขึ้น ดังนั้นแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่คัดเลือกนี้สามารถใช้ได้ที่ปริมาณแป้งร้อยละ 5 และร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) เพราะแป้งเปียกจะมีความหนืดที่เสถียรใน heating - cooling cycle มากกว่าเมื่อใช้ที่ปริมาณ ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 12.5

ตารางที่ 4.25 แสดงเสถียรภาพความหนืดของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและ

น้ำมันสำปะหลังตัดแปร โดยวัดความหนืดของแป้งเปียก (ความเข้มข้นของแป้ง ร้อยละ 5) ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., RVTD) พบว่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่ตึงทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 ° C จะเพิ่มขึ้นประมาณ 83 เท่า (แสดงว่าเกิดการคินตัว) แต่เมื่อตึงทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน ความหนืดจะลดลงเรื่อย ๆ และมีน้ำแยกออกมาจากแป้ง ส่วนความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรเมื่อตึงทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 ° C เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า และเมื่อตึงทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นแล้วความหนืดจึงลดลงในวันที่ 3 และมีน้ำแยกออกมาจากแป้ง แสดงว่าแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีเสถียรภาพความหนืดมากกว่าแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

รูปที่ 4.11 - 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ตามวิธีของ Mazurs และคณะ (36) จะเห็นได้ว่า แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่จะนำไปใช้งานที่ต้องให้ความร้อนเป็นเวลานานควรใช้ปริมาณแป้งร้อยละ 5 หรือต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าไม่มีเส้นกราฟ A ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแป้งเป็นร้อยละ 8 และ 10 ความหนืดสูงสุดจะเพิ่มเป็น 1,190 และ 1,950 บี.ยู. ตามลำดับ ซึ่งมีความหนืดมากกว่า 1,000 บี.ยู. ทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นกราฟ A ตามวิธีของ Mazurs และคณะ ส่วนแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่คัดเลือกนี้สามารถใช้ปริมาณแป้งได้ถึงร้อยละ 8 โดยที่แป้งเปียกยังมีความหนืดที่เสถียรใน heating-cooling cycle

ตารางที่ 4.18 การละลายของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ความเข้มข้น ของNaOCl(A)	เวลา (B)	ค่าเฉลี่ยร้อยละของการละลายของแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65°C	75°C	85°C	95°C
a ₁ = 3.00%	b ₁ = 4 ชม.	20.462+0.720	23.994+0.764	26.350+0.524	26.682+1.108
	b ₂ = 6 ชม.	22.031+2.169	24.486+1.534	25.690+1.046	27.746+0.126
a ₂ = 4.00%	b ₁ = 4 ชม.	22.640+1.774	27.246+1.653	31.314+1.500	31.983+1.047
	b ₂ = 6 ชม.	22.987+0.927	28.969+1.071	29.856+0.454	33.199+0.457
a ₃ = 5.00%	b ₁ = 4 ชม.	24.867+0.025	30.499+0.254	34.491+1.521	39.746+1.004
	b ₂ = 6 ชม.	25.886+0.408	31.908+1.609	35.414+0.842	39.303+0.271

ตารางที่ 4.19 กำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ความเข้มข้น ของNaOCl(A)	เวลา (B)	ค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวของแป้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65°C	75°C	85°C	95°C
a ₁ = 3.00%	b ₁ = 4 ชม.	15.054+0.902	18.387+0.235	20.726+0.852	22.372+0.940
	b ₂ = 6 ชม.	15.650+0.684	18.420+0.254	21.550+0.940	25.204+1.344
a ₂ = 4.00%	b ₁ = 4 ชม.	16.548+0.736	21.746+1.006	25.294+1.506	29.504+1.388
	b ₂ = 6 ชม.	15.716+1.354	22.302+0.368	26.288+1.054	30.178+0.672
a ₃ = 5.00%	b ₁ = 4 ชม.	18.314+1.330	27.607+0.643	36.640+0.878	43.284+0.226
	b ₂ = 6 ชม.	20.088+0.438	28.620+1.544	37.990+1.678	44.183+0.337

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการละลายของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวาง และออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

SOV	d. f.	Mean Square ของการละลายของแป้งมันสำปะหลัง			
		เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
ความเข้มข้น(A)	2	17.380 *	48.691 *	79.802 *	152.368 *
เวลา (B)	1	2.852	4.378	0.476	1.121
AB	2	0.380	0.410	1.468	0.843
Error	6	3.132	3.156	2.283	1.210

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

SOV	d. f.	Mean Square ของกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง			
		เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ			
		65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
ความเข้มข้น(A)	2	16.564 *	96.320 *	277.411 *	418.320 *
เวลา (B)	1	0.788	0.856	3.345	5.467
AB	2	1.702	0.240	7.178×10^{-2}	1.407
Error	6	1.872	1.355	2.858	1.744

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.22 ปริมาณคาร์บอกซิลของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์

ความเข้มข้น ของNaOCl(A)	เวลา (B)	ปริมาณคาร์บอกซิล (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
$a_1 = 3.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	0.0287 ± 0.0059
	$b_2 = 6$ ชม.	0.0331 ± 0.0079
$a_2 = 4.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	0.0438 ± 0.0028
	$b_2 = 6$ ชม.	0.0538 ± 0.0046
$a_3 = 5.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	0.0760 ± 0.0012
	$b_2 = 6$ ชม.	0.0905 ± 0.0087

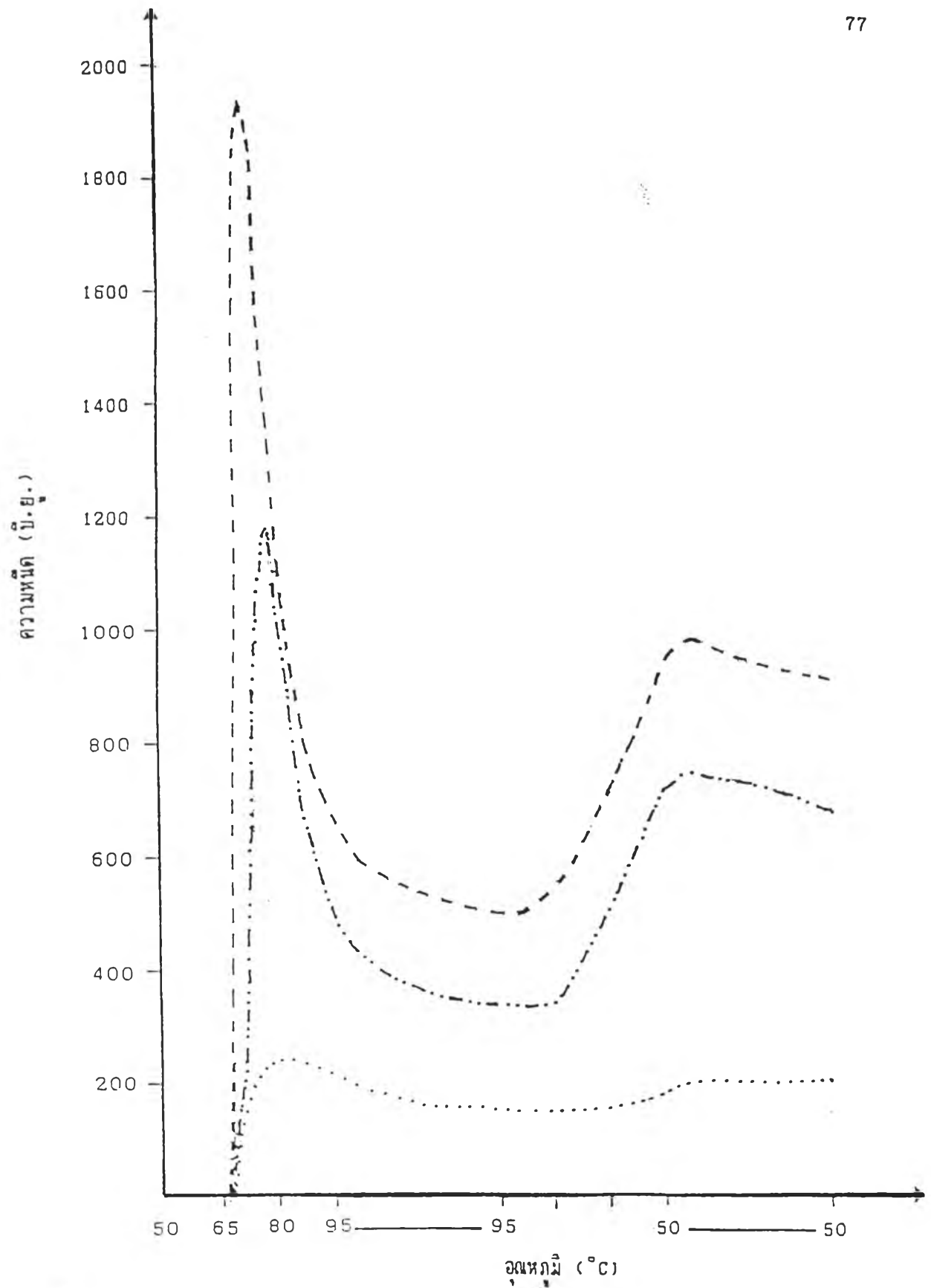
ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอกซิลและปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางและออกซิไดซ์

SOV	d. f.	Mean Square	
		ปริมาณคาร์บอกซิลของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางและออกซิไดซ์	ปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางและออกซิไดซ์
ความเข้มข้น(A)	2	2.865×10^{-3} *	0.156
เวลา(B)	1	2.698×10^{-4}	8.691×10^{-2}
AB	2	2.780×10^{-5}	9.595×10^{-2}
Error	6	6.543×10^{-5}	0.170

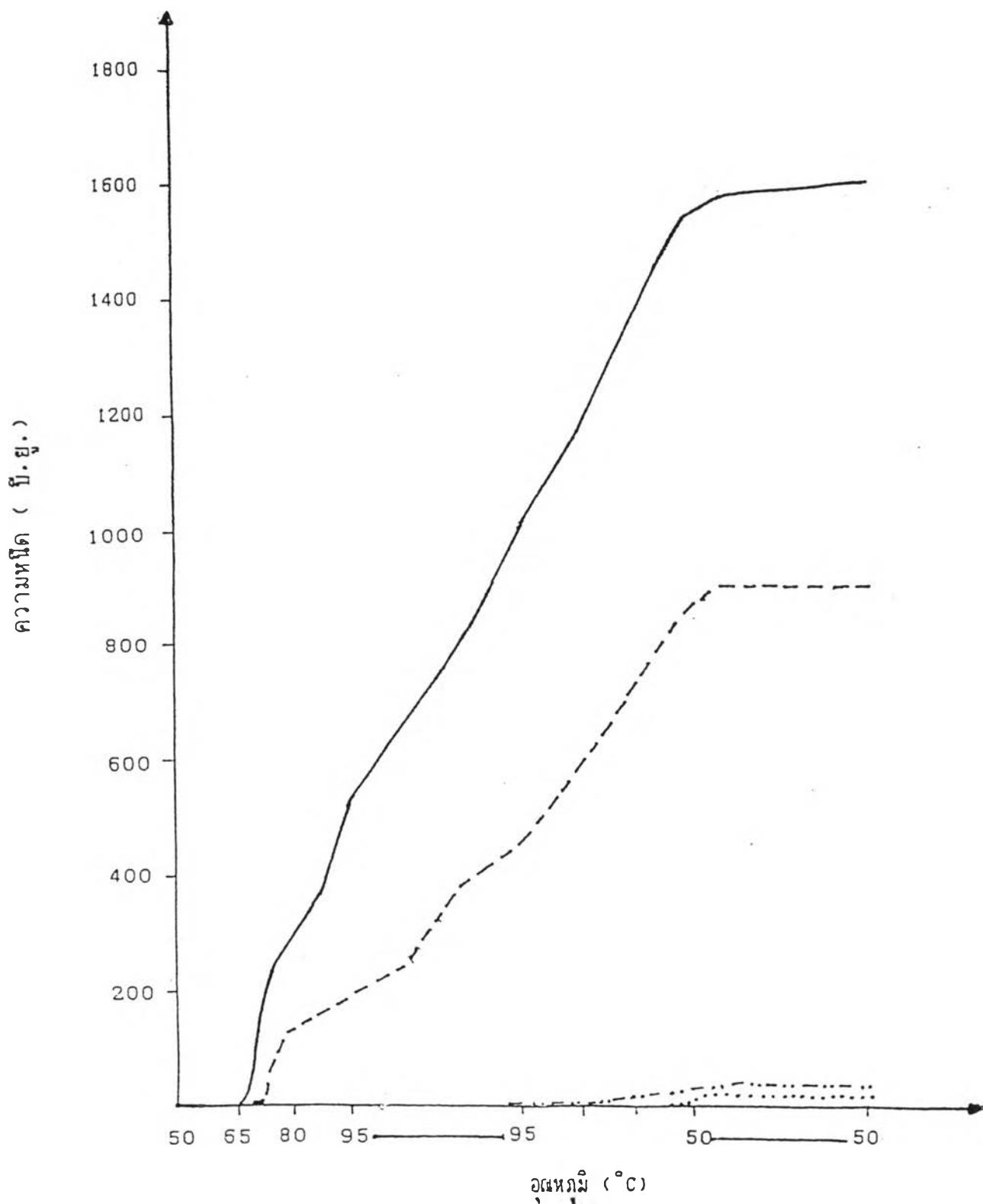
* หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.24 ปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์

ความเข้มข้น ของNaOCI (A)	เวลา (B)	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
$a_1 = 3.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	23.60 \pm 0.30
	$b_2 = 6$ ชม.	23.68 \pm 0.44
$a_2 = 4.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	24.06 \pm 0.38
	$b_2 = 6$ ชม.	23.98 \pm 0.00
$a_3 = 5.00\%$	$b_1 = 4$ ชม.	23.67 \pm 0.27
	$b_2 = 6$ ชม.	24.18 \pm 0.10

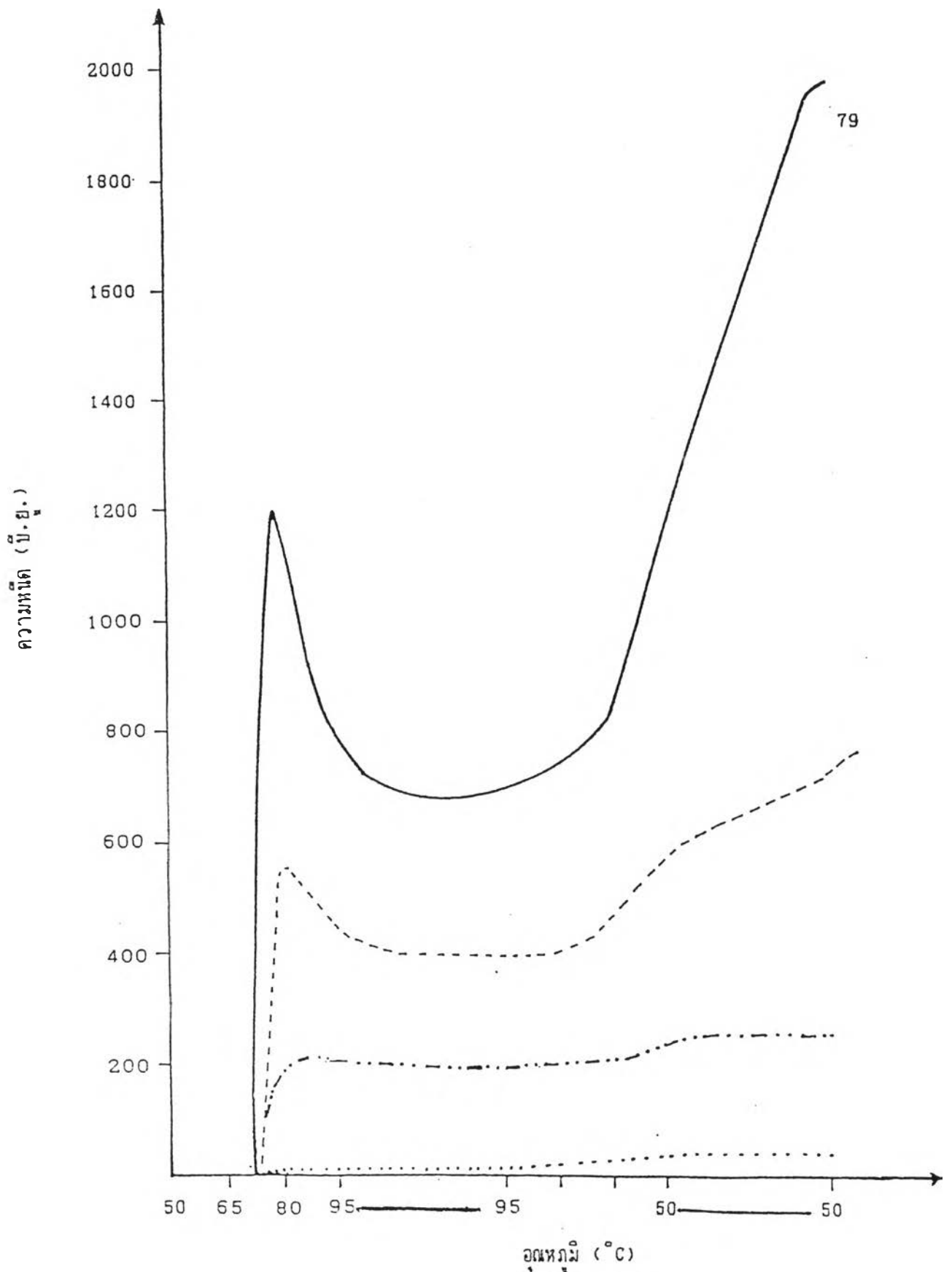


รูปที่ 4.7 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5, 8 และ 10 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5
..... ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8 ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 10

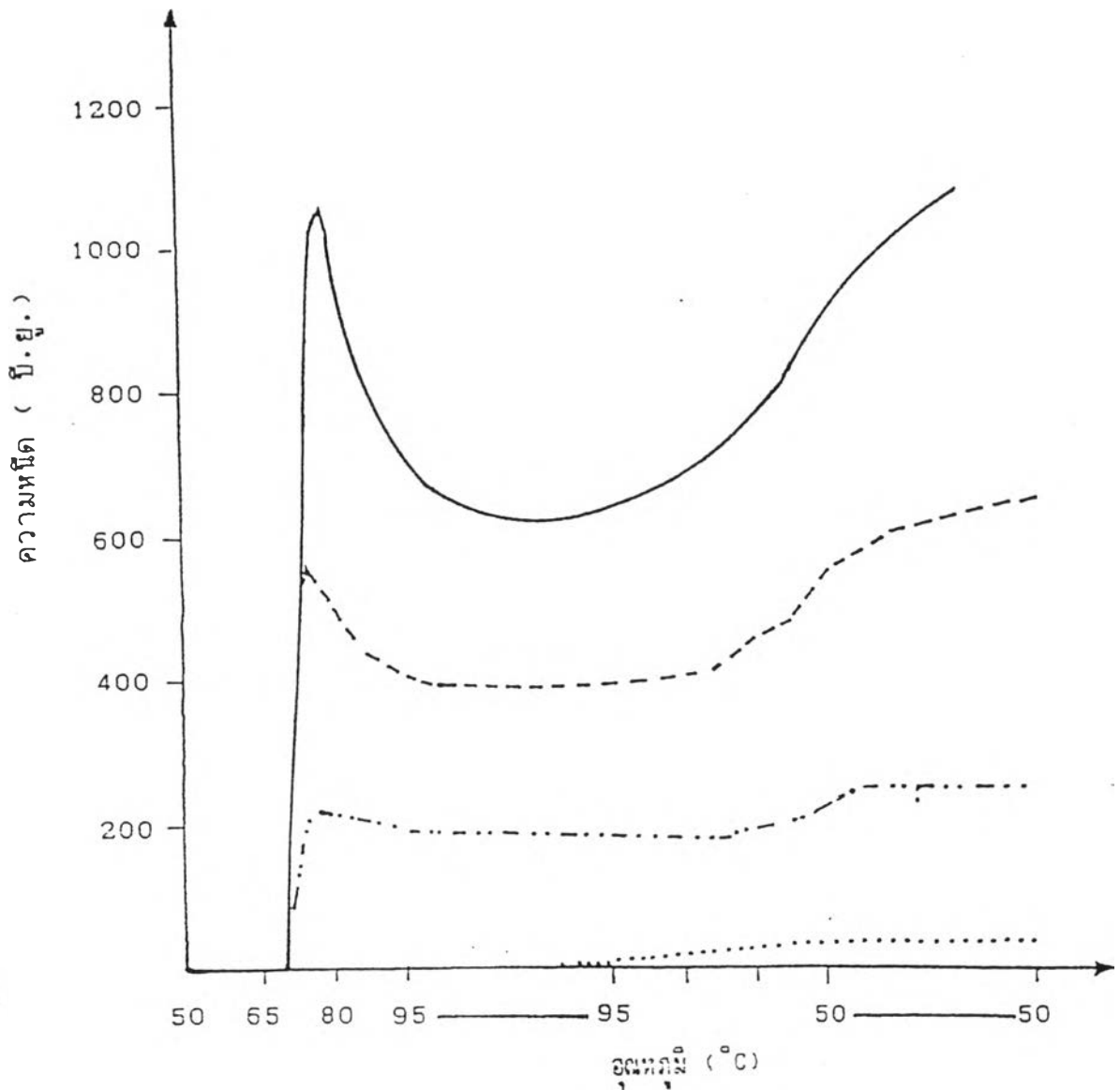


รูปที่ 4.8 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 8, 9 และ 10 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง)

- ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5 - · - · - ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8
 ---- ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 9 _____ ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 10



รูปที่ 4.9 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00 และเวลาของปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง) ที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5, 8, 10 และ 12.5 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5
 ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8 ----- ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 10
 _____ ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 12.5



รูปที่ 4.10 กราฟ Brabender ของแป้งมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้นของ NaCl ร้อยละ 5.00 และเวลาของปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง) ที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5, 8, 10 และ 12.5 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5
 ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8 --- ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 10
 _____ ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 12.5

ตารางที่ 4.25 ค่าเฉลี่ยความหนืดของน้ำมันสำปะหลังธรรมชาติ และน้ำมันสำปะหลังเชื่อม-
ขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 5) ที่เวลาต่าง ๆ

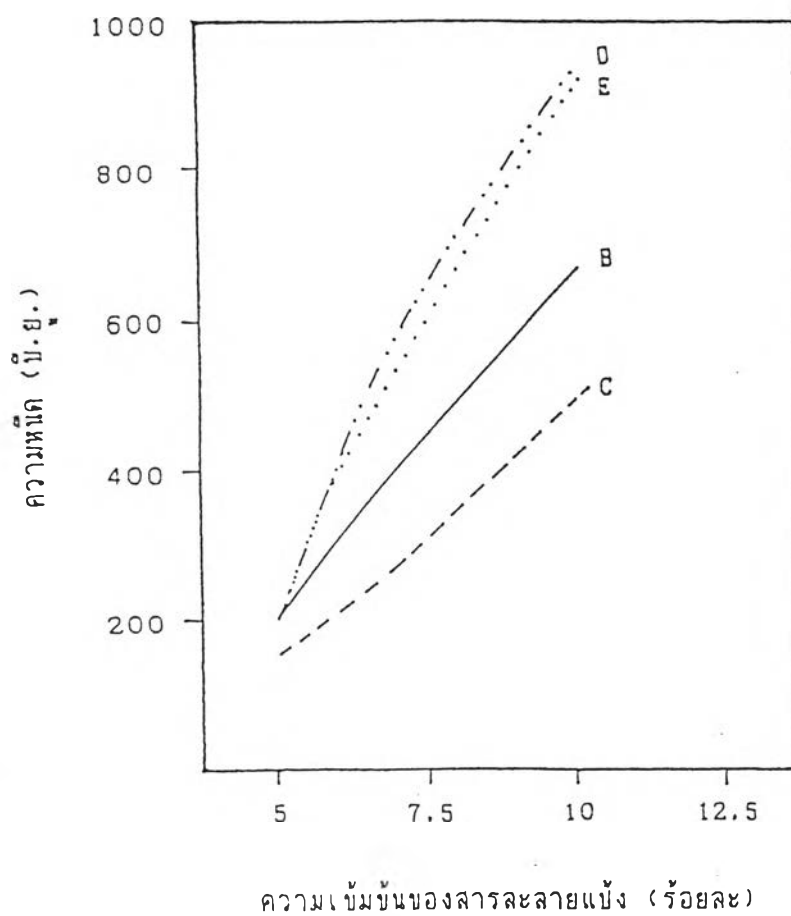
ความเข้มข้นของ NaOC1 (A)	เวลา (B)	ค่าเฉลี่ยความหนืดของแป้งที่เวลาต่าง ๆ (centipoise)					
		90°C	25°C	25°C นานวัน	25°C นาน2วัน	25°C นาน3วัน	

น้ำมันสำปะหลังเชื่อมขวางและออกซิไดซ์

5.00 %	4 ชม.	108.8	241.2	1,209.4	2,214.2	1,727.2
	6 ชม.	104.9	234.3	1,127.1	1,860.0	1,635.4

น้ำมันสำปะหลังธรรมชาติ

-	-	377.8	31,511.6	29,471.6	25,817.2	2,444.6
---	---	-------	----------	----------	----------	---------



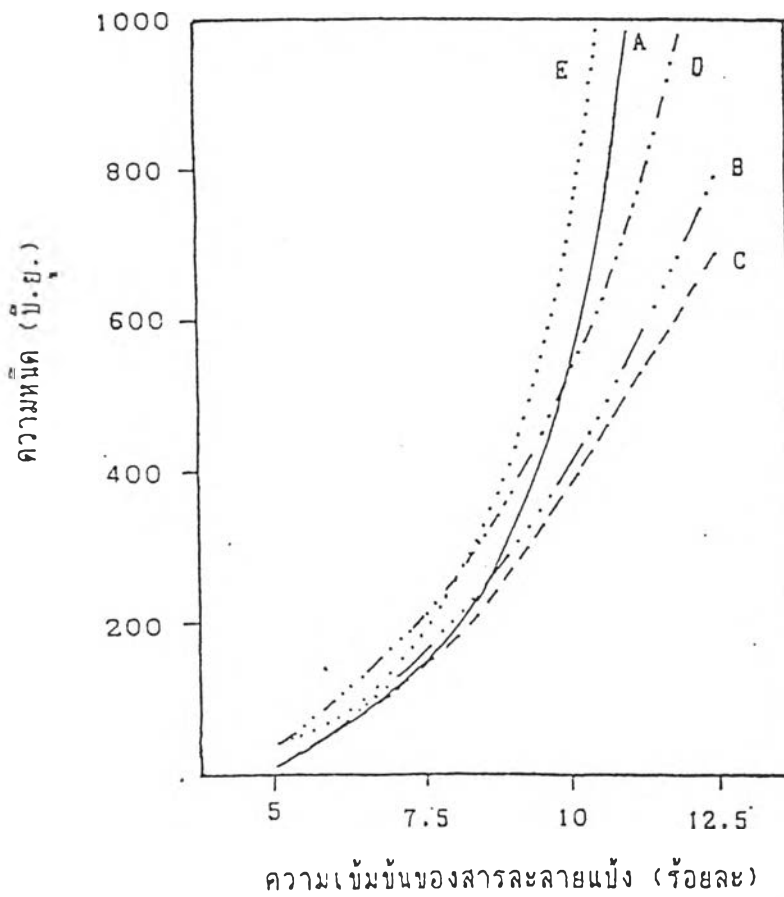
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ

เส้นกราฟ B แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 95 ° C

เส้นกราฟ C แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 95 ° C นาน 30 นาที

เส้นกราฟ D แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 50 ° C

เส้นกราฟ E แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 50 ° C นาน 30 นาที



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00 และ เวลาของ ปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง)

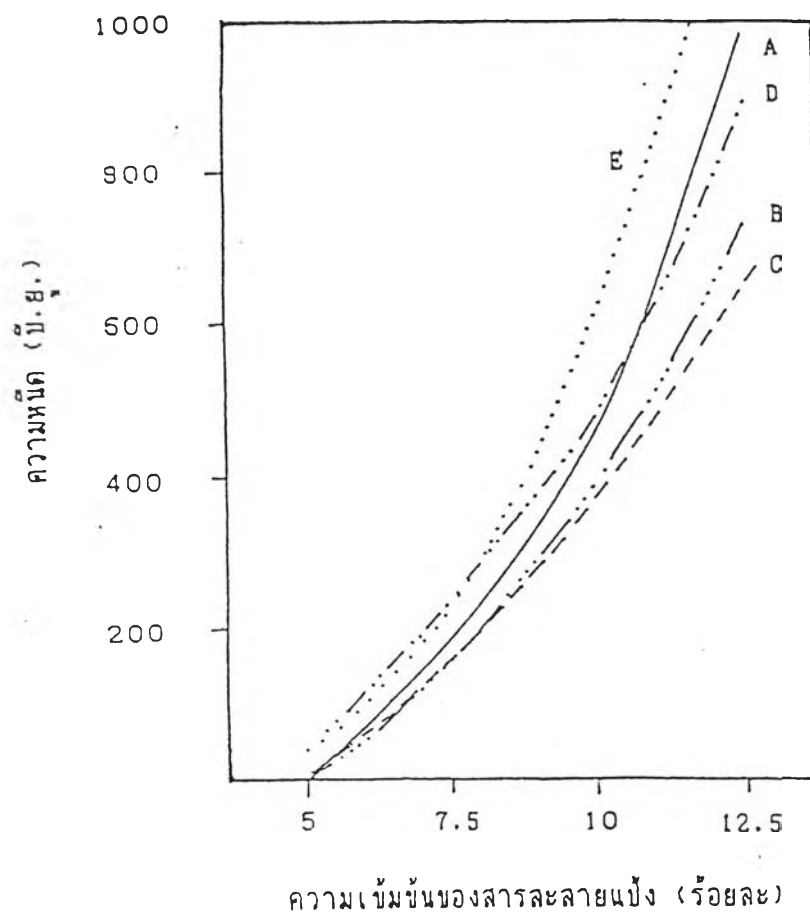
เส้นกราฟ A แสดงความหนืดที่จุดสูงสุดในช่วง heating

เส้นกราฟ B แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 95 ° C

เส้นกราฟ C แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 95 ° C นาน 30 นาที

เส้นกราฟ D แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 50 ° C

เส้นกราฟ E แสดงความหนืดที่อุณหภูมิ 50 ° C นาน 30 นาที



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนักกับความเข้มข้นต่างๆ ของแ่งมันสำปะหลัง เชื่อมขวางและออกซิไดซ์ (ความเข้มข้นของ NaOCl ร้อยละ 5.00 และ เวลาของ ปฏิกริยา 6 ชั่วโมง)

เส้นกราฟ A แสดงความหนักที่จุดสูงสุดในช่วง heating

เส้นกราฟ B แสดงความหนักที่อุณหภูมิ 95°C

เส้นกราฟ C แสดงความหนักที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที

เส้นกราฟ D แสดงความหนักที่อุณหภูมิ 50°C

เส้นกราฟ E แสดงความหนักที่อุณหภูมิ 50°C นาน 30 นาที