

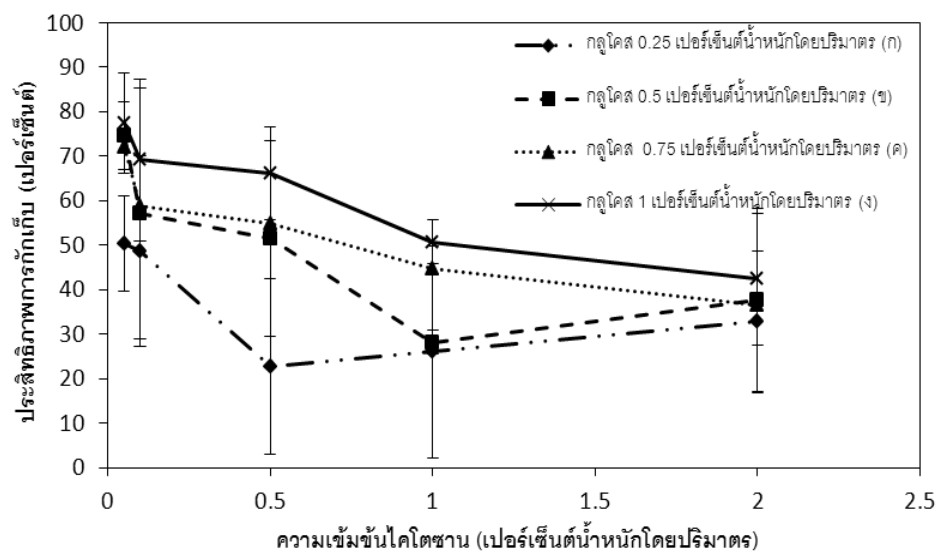
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การหาประสิทธิภาพการกักเก็บ

4.1.1 กักเก็บกลูโคส

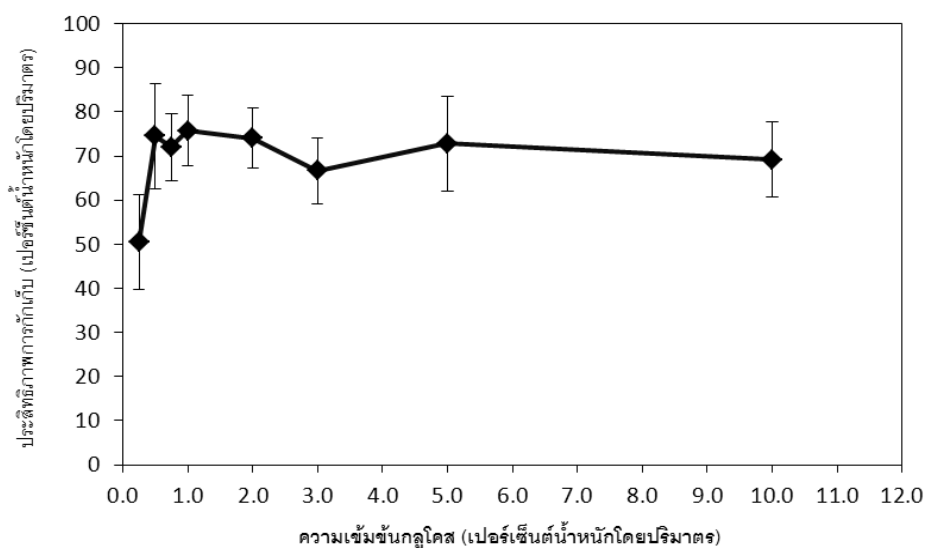
จากผลการทดลองการกักเก็บกลูโคสในอนุภาคนาโนไคโตซานโดยการกำหนดความเข้มข้นไคโตซาน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร แปรผันความเข้มข้นกลูโคสต่างๆ ได้แก่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าเมื่อความเข้มข้นไคโตซานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคสมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 4.1 อิทธิพลของไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคส : (ก) กลูโคส 0.25, (ข) กลูโคส 0.5, (ค) กลูโคส 0.75 และ (ง) กลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร (ณ อุณหภูมิห้อง ที่พีเอช 5.2)

การใช้ไคโตซานเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร และกลูโคสเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร พบว่าให้ประสิทธิภาพกักเก็บดีที่สุดที่สุดคิดเป็น 76.32 ± 8.0 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อใช้ความเข้มข้นกลูโคสที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 ได้แก่ 2, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์

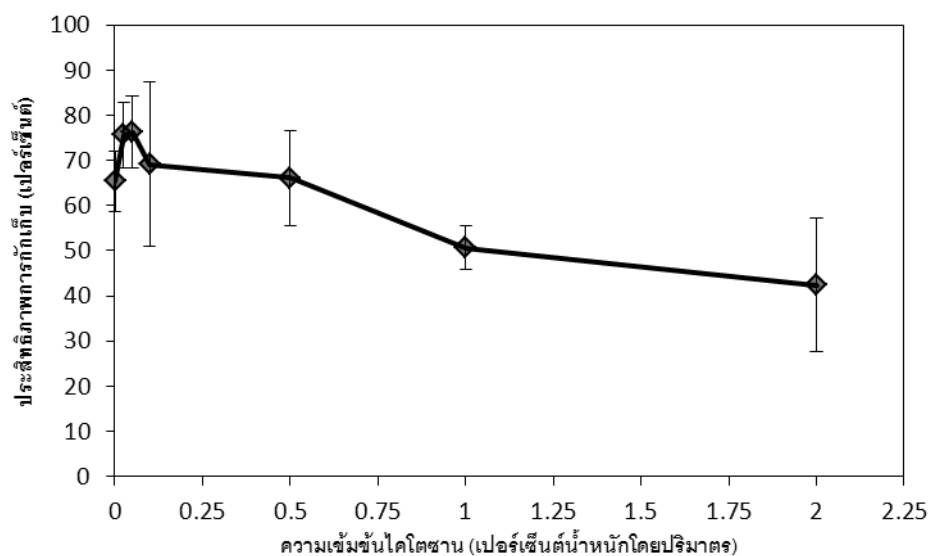
น้ำหนักโดยปริมาตร แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพการกักเก็บใกล้เคียงกัน จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงว่าไคโตซานที่ความเข้มข้นเดียวกันนั้นจะมีประสิทธิภาพการกักเก็บสารได้มากขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของกลูโคส แต่ความสามารถในการกักเก็บสารของไคโตซานมีจำกัด ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไป ในที่นี้ คือ ตั้งแต่ 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสที่นำมากักเก็บก็ตาม จะไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการกักเก็บในอนุภาคนาโนไคโตซาน



ภาพที่ 4.2 ผลของกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บ ที่ไคโตซานเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร (อุณหภูมิห้อง และพีเอช 5.3)

เมื่อใช้ความเข้มข้นไคโตซาน ได้แก่ 0.001, 0.025, 0.05, 0.1, 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร กักเก็บกลูโคสเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร แสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าความเข้มข้นไคโตซานที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพกักเก็บลดลงตามลำดับ โดยสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่มีการนำไคโตซานมาทำการกักเก็บโปรตีนพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของไคโตซานน้อย จะให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บได้ดีกว่าความเข้มข้นไคโตซานมาก เนื่องจากที่ความเข้มข้นไคโตซานมาก ส่งผลทำให้โมเลกุลของไคโตซานจะเกาะตัวกันแน่นขึ้น ดังนั้นจึงมีความหนืดมากขึ้น ทำให้เกิดขวางการกักเก็บสารของไคโตซาน โดยโมเลกุลที่มีการจับตัวกันเป็นร่างแหที่แข็งแรงกว่าที่ความเข้มข้นน้อย ทำให้สารที่นำมากักเก็บเข้าไปแทรกตัวอยู่ได้น้อยกว่าจึงมีประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคสได้น้อยกว่า (Vandenberg *et al.*, 2001) ดังนั้นความเข้มข้นของ

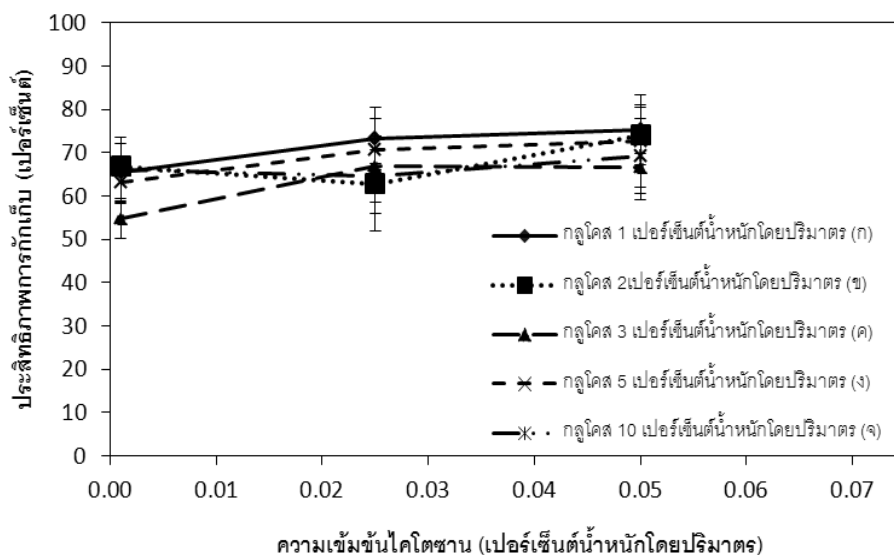
ไคโตซานจึงมีผลต่อการกักเก็บกลูโคส นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาไอออนิกระหว่างไคโตซานกับสารที่นำมากักเก็บ โดยมีน้ำเป็นตัวกลางในสายโมเลกุลของไคโตซานที่ละลายน้ำได้จะเกิดการขยายตัว และกลูโคสอาจจะถูกกักเก็บอยู่ท่ามกลางโมเลกุลไคโตซานที่เต็มไปด้วยประจุบวก (ในการทดลองวัดค่าพีเอชได้ 5.32) บ่งชี้ได้ว่ากลูโคสไม่เพียงแต่ถูกกักเก็บบนผิวของอนุภาคนาโนไคโตซานเท่านั้นแต่ยังกระจายตัวอยู่ด้านนอกซึ่งเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ (hydrophilic area) ของโครงร่างแหเชิงซ้อนไคโตซาน (Hong *et al.*, 2010)



ภาพที่ 4.3 อิทธิพลของไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.001, 0.025, 0.05, 0.1, 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคสเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร (ณ อุณหภูมิห้อง และพีเอช 5.0)

จากนั้นทำการแปรผันความเข้มข้นไคโตซานให้น้อยกว่า 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ได้แก่ 0.001, 0.025 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ที่การกักเก็บกลูโคสที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยพบว่าประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคสมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ทั้งนี้เนื่องมาจากความเจือจางของไคโตซาน ทำให้ความสามารถในการสร้างตัวเป็นโครงร่างแหของอนุภาคที่ไม่แข็งแรง ดังนั้นจึงห่อหุ้มสารได้น้อยกว่าความเข้มข้นไคโตซานที่มากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บสารที่ลดลง (Wen *et al.*, 2006) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกลูโคสได้แก่ 2, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร พบว่าประสิทธิภาพการกักเก็บมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า

ความเข้มข้นโคโตซานที่เหมาะสมต่อการกักเก็บอยู่ในช่วง 0.05 – 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคสที่ความเข้มข้นโคโตซาน 0.025 และ 0.001 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโดยปริมาตร ต่อการกักเก็บกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ : (ก) กลูโคส 1, (ข) กลูโคส 2, (ค) กลูโคส 3, (ง) กลูโคส 5 และ (จ) กลูโคส 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร (ณ อุณหภูมิห้อง และพีเอช 5.3)

จากนั้นได้ทำการทดสอบทางสถิติในการใช้โคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ กักเก็บกลูโคส เพื่อที่จะเลือกความเข้มข้นโคโตซาน และกลูโคสที่เหมาะสม ที่ให้ประสิทธิภาพการกักเก็บที่ดีที่สุด โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามแผนการทดลองแบบ Complete Randomize Design (CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี One way ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistics Package for the Social Sciences (SPSS) 19.0 มีการทดสอบค่าความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ .05 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS 19.0 พบว่าความเข้มข้นของโคโตซาน 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บกลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ($p\text{-value} \leq .05$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่โคโตซานที่ความเข้มข้นอื่นๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} \geq .05$) ในตารางที่ 4.2 ซึ่งผลสรุปจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยการใช้สถิติเลวิน ดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือตามตารางที่ 4.1 เนื่องจากข้อมูลไม่ขัดกับข้อตกลง

เบื้องต้นของการวิเคราะห์ที่ว่าการแปรปรวนของประชากรในแต่ละกลุ่มของความเข้มข้นไคโตซานที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 4.1

สถิติเลวินทดสอบการเท่ากันของความแปรปรวนในการแปรรูปความเข้มข้นไคโตซานและกลูโคส

Test of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
chitosan_0.05	.580	3	8	.645
chitosan_0.1	1.397	3	8	.313
chitosan_0.5	.819	3	8	.519
chitosan_1	.442	3	8	.729
chitosan_2	1.451	3	8	.299

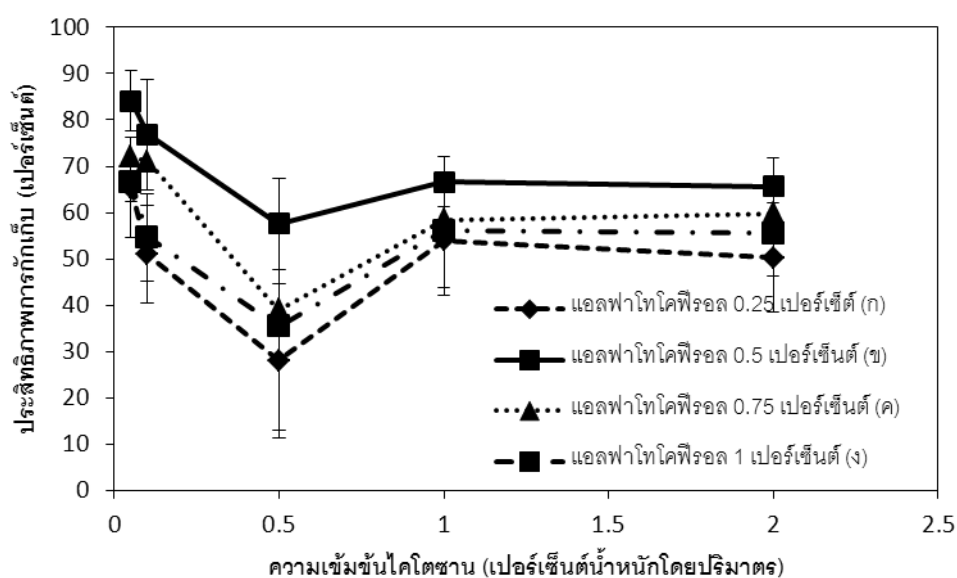
ตารางที่ 4.2

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการแปรรูปความเข้มข้นไคโตซานและกลูโคส

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
chitosan_0.05	Between Groups	2985.991	3	995.330	2.601	.024*
	Within Groups	3061.005	8	382.626		
	Total	6046.996	11			
chitosan_0.1	Between Groups	381.785	3	127.262	.218	.881
	Within Groups	4675.041	8	584.380		
	Total	5056.825	11			
chitosan_0.5	Between Groups	131.492	3	43.831	.706	.575
	Within Groups	496.428	8	62.054		
	Total	627.920	11			
chitosan_1	Between Groups	666.672	3	222.224	.309	.819
	Within Groups	5753.943	8	719.243		
	Total	6420.616	11			
chitosan_2	Between Groups	1183.440	3	394.480	.730	.563
	Within Groups	4325.455	8	540.682		
	Total	5508.895	11			

4.1.2 กักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล

จากการทดลองการกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลในอนุภาคนาโนไคโตซาน โดยการกำหนดความเข้มข้นไคโตซาน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร แปรผันความเข้มข้นแอลฟาโทโคฟีรอล ได้แก่ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าความเข้มข้นไคโตซาน 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร และ แอลฟาโทโคฟีรอลเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพการกักเก็บดีที่สุดคิดเป็น 84.11 ± 6.5 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไคโตซาน ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 4.5 อิทธิพลของไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล : (ก) แอลฟาโทโคฟีรอล 0.25, (ข) แอลฟาโทโคฟีรอล 0.5, (ค) แอลฟาโทโคฟีรอล 0.75 และ (ง) แอลฟาโทโคฟีรอล 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร (ณ อุณหภูมิห้อง และพีเอช 5.4)

ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของโมเลกุลไคโตซานที่มากขึ้นจะมีความหนืดมากขึ้น รวมถึงโมเลกุลของแอลฟาโทโคฟีรอลซึ่งมีความหนืดมาก ทำให้การกักเก็บในอนุภาคนาโนไคโตซานความเข้มข้นมากจึงเกิดได้ยากกว่าที่ความเข้มข้นน้อย นอกจากนี้โมเลกุลแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นสารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอลฟาโทโคฟีรอล และไคโตซานจึงเกิดได้น้อย จึงมีการสูญเสียแอลฟาโทโคฟีรอลขึ้น ที่อาจลอยอยู่ชั้นบนของสารละลาย และการเกิดอนุภาคนาโนไคโตซานนั้น เยื่อหุ้มของอนุภาคบางเกินไปจะห่อหุ้มแอลฟาโทโคฟีรอลได้อย่าง

สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีนำไคโตซานมากักเก็บน้ำมันตะไคร้หอม พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันตะไคร้หอมให้สูงกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บลดลง ดังนั้นความหนืดของน้ำมันที่มีมากเกินไปจะทำให้จับกับโมเลกุลของอนุภาคนาโนไคโตซานได้ไม่ดี จึงมีผลให้กักเก็บได้น้อย (Wen *et al.*, 2006)

จากนั้นได้ทำการทดสอบทางสถิติในการใช้ไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ กักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล เพื่อเลือกความเข้มข้นไคโตซาน และแอลฟาโทโคฟีรอลที่เหมาะสม ที่ให้ประสิทธิภาพการกักเก็บที่ดีที่สุด โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการกำหนดความเข้มข้นไคโตซาน และแอลฟาโทโคฟีรอล แล้วนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนตามแผนการทดลองแบบ Complete Randomize Design (CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี One way ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistics Package for the Social Sciences (SPSS) 19.0 มีการทดสอบค่าความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ .05 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS 19.0 พบว่าความเข้มข้นของไคโตซาน 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ($p\text{-value} \leq .05$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ไคโตซานที่ความเข้มข้นอื่นๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} \geq .05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ในขณะที่ผลสรุปจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยการใช้สถิติเลวินดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากข้อมูลไม่ขัดกับข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์ที่ว่าความแปรปรวนของประชากรในแต่ละกลุ่มของความเข้มข้นไคโตซานที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 4.3

สถิติเลวินทดสอบการเท่ากันของความแปรปรวนในการแปรผันความเข้มข้นไคโตซาน
และแอลฟาโทโคฟีรอล

Test of Homogeneity of Variances				
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
chitosan_0.05	1.534	3	8	.279
chitosan_0.1	1.302	3	8	.339
chitosan_0.5	.784	3	8	.536
chitosan_1	1.099	3	8	.404
chitosan_2	.620	3	8	.621

ตารางที่ 4.4

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการแปรผันความเข้มข้นโคโคซาน และแอลฟาโทโคฟีรอล

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Vit_E_0.25	Between Groups	2103.265	4	525.816	3.196	.062
	Within Groups	1645.178	10	164.518		
	Total	3748.443	14			
Vit_E_0.5	Between Groups	1718.810	4	429.702	4.036	.033*
	Within Groups	1064.753	10	106.475		
	Total	2783.563	14			
Vit_E_0.75	Between Groups	1292.592	4	323.148	4.646	.222
	Within Groups	695.602	10	69.560		
	Total	1988.194	14			
Vit_E_1	Between Groups	1533.379	4	383.345	2.248	.136
	Within Groups	1705.429	10	170.543		
	Total	3238.808	14			

จากการวิเคราะห์ทางสถิติข้างต้นทำให้สามารถที่จะยืนยันได้ถึงการเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมของโคโคซาน กลูโคส และแอลฟาโทโคฟีรอลที่ใช้เตรียมอนุภาคนาโนโคโคซานที่กักเก็บสารดังกล่าวแล้วนั้น เพื่อที่จะนำมาศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลการปลดปล่อย รวมไปถึงรูปร่างลักษณะ ขนาด ประจุโดยรวมบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนโคโคซาน และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันของกลูโคส และแอลฟาโทโคฟีรอลกับโคโคซานเพื่อศึกษากลไกการกักเก็บต่อไป

4.1.3 กักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล

จากผลการทดลองทำการแปรผันความเข้มข้นของโคโคซาน กลูโคส และแอลฟาโทโคฟีรอลที่ความเข้มข้นต่างๆ จึงได้ทำการเลือกสภาวะที่ดีที่สุด เพื่อนำมาใช้เตรียมอนุภาคนาโนโคโคซานกักเก็บกลูโคสรวมกับแอลฟาโทโคฟีรอลต่อไป ซึ่งความเข้มข้นโคโคซานที่เหมาะสมคือ 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร กลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร และแอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร หลังจากทำการทดลองและใช้วิธีวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมทางสถิติแล้วพบว่าสภาวะความเข้มข้นที่ได้เลือกมานั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ดังนั้นจึงได้เลือกสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโน

ไคโตซานเพื่อกักเก็บสารทั้งสองชนิด และในตารางที่ 4.5 แสดงถึงประสิทธิภาพการกักเก็บสารชนิดต่างๆ ของอนุภาคนาโนไคโตซาน พบว่าการกักเก็บกลูโคสชนิดเดียวมีประสิทธิภาพกักเก็บเท่ากับ 76.32 ± 8.05 เปอร์เซ็นต์ แอลฟาโทโคฟีรอลมีประสิทธิภาพกักเก็บเท่ากับ 84.11 ± 6.53 เปอร์เซ็นต์ โดยการเตรียมอนุภาคนาโนไคโตซานเพื่อกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลร่วมกัน ใช้สภาวะความเข้มข้นที่ได้ทดสอบมาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากผลการทดลองพบว่ากลูโคสให้ประสิทธิภาพกักเก็บคิดเป็น 51.78 ± 1.27 เปอร์เซ็นต์ และแอลฟาโทโคฟีรอลคิดเป็น 44.55 ± 2.82 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะกักเก็บสารสองชนิดร่วมกันในอนุภาคนาโนไคโตซาน ทั้งนี้พบว่าทั้งกลูโคส และแอลฟาโทโคฟีรอลมีประสิทธิภาพการกักเก็บลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การกักเก็บสารแต่ละอย่างเพียงชนิดเดียว เนื่องจากกลูโคสเป็นสารที่ละลายน้ำ มีการทำปฏิกิริยาไอออนิกกับไคโตซาน (Hong *et al.*, 2010) ในขณะที่แอลฟาโทโคฟีรอลเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ และมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดคล้ายน้ำมัน ซึ่งอาจไม่เข้าไปรวมอยู่ในอนุภาคนาโนไคโตซาน แต่อาจเคลือบอยู่บริเวณผิวภายนอกอนุภาค (Wen *et al.*, 2006) ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บที่ได้ลดลง และน้อยกว่ากลูโคส

ตารางที่ 4.5

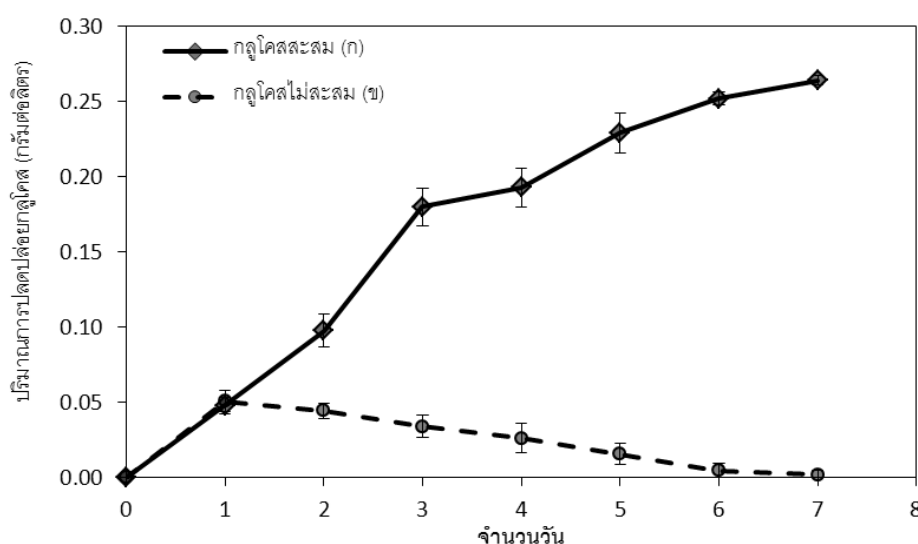
ประสิทธิภาพการกักเก็บสารของอนุภาคนาโนไคโตซาน

ประสิทธิภาพการกักเก็บ (% ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)			
กักเก็บสารชนิดเดียว		กักเก็บสารสองชนิดพร้อมกัน	
กลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก โดยปริมาตร	แอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดย ปริมาตร	กลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก โดยปริมาตร	แอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดย ปริมาตร
76.32 ± 8.0	84.11 ± 6.5	51.78 ± 1.27	44.55 ± 2.82

4.2 การปลดปล่อยสารจากอนุภาคนาโนไคโตซาน

4.2.1 การปลดปล่อยกลูโคส

จากการศึกษาการปลดปล่อยกลูโคสสะสมและไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซาน เป็นระยะเวลา 7 วัน ณ อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปโมเลกุลของกลูโคสมีการสะสมอยู่ภายในอนุภาคนาโนไคโตซาน จึงถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคนาโนไคโตซานอย่างช้าๆ และมีการปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น ซึ่งมีปริมาณการปลดปล่อยที่ใกล้เคียงกันในแต่ละวัน จนกระทั่งวันที่ 6 อัตราการปลดปล่อยจึงคงที่โดยมีอัตราการปลดปล่อยเฉลี่ย 0.034 กรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งปริมาณกลูโคสเริ่มต้นคือ 10 กรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณกลูโคสที่ถูกปลดปล่อยออกมาได้ทั้งหมดในระยะเวลา 7 วันคือ 1.28 กรัมต่อลิตร คิดเป็น 12.8 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ากลูโคสในอนุภาคนาโนไคโตซานมีการปลดปล่อยกลูโคสอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ซึ่งในการปลดปล่อยกลูโคสนั้นได้อาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นสาร การแพร่จากในสภาวะที่มีโมเลกุลกลูโคสที่ความเข้มข้นมากกว่าคือภายในอนุภาคนาโนไคโตซาน แพร่ไปสู่สภาวะที่มีกลูโคสความเข้มข้นน้อยกว่า โดยอาศัยแรงดันออสโมติกช่วยในการแพร่ของสาร (Hong *et al.*, 2010)



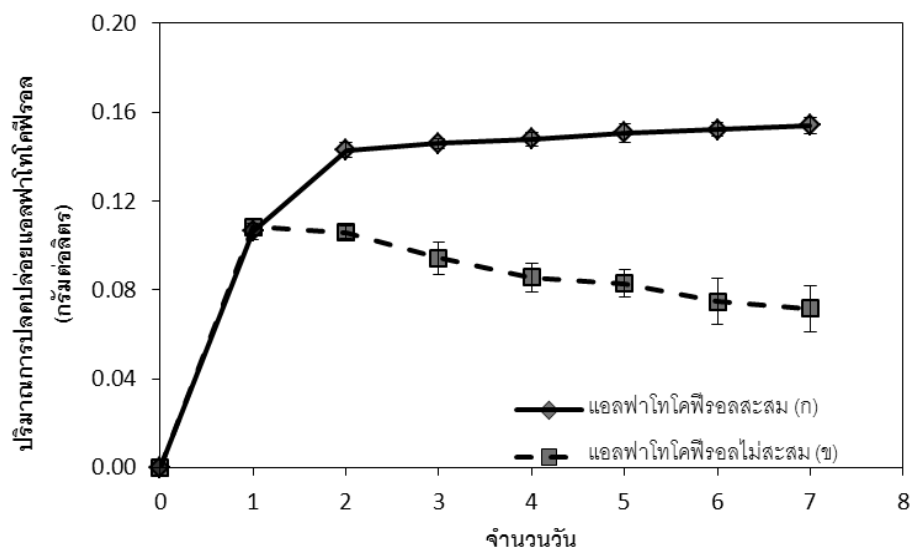
ภาพที่ 4.6 การปลดปล่อยกลูโคสสะสมและไม่สะสม ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน

เขย่าด้วยความแรงของ 180 รอบต่อนาที : (ก) กลูโคสสะสม และ (ข) กลูโคสไม่สะสม

ในขณะที่การปลดปล่อยกลูโคสแบบไม่สะสมนั้น มีการปลดปล่อยลดลงอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการแพร่ของสารจากสภาวะความเข้มข้นของสารมากกว่าไปยังที่สภาวะความเข้มข้นของสารน้อย ในการเติมน้ำ ddH_2O กลับเข้าไปในแต่ละวันเป็นการเจือจางความเข้มข้นของกลูโคสภายในอนุภาคนาโนไคโตซานให้มีความเข้มข้นลดลงในแต่ละวัน ดังนั้นการปลดปล่อยกลูโคสออกมาจึงลดลง ทั้งนี้การปลดปล่อยสะสมและไม่สะสมขึ้นกับสภาวะแวดล้อมที่มีการปลดปล่อย เช่น อุณหภูมิ ความแรงของการเขย่า ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในการปลดปล่อยสาร เช่น ยาจากอนุภาคที่นำส่งในสภาวะที่ต้องการ และมีช่วงเวลาการปลดปล่อยที่เหมาะสมได้ (นลินาและพรรั่มภา, 2550)

4.2.2 การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล

จากการศึกษาการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสมและไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซานเป็นระยะเวลา 7 วัน ณ อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่ามีการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นไปในลักษณะเพิ่มขึ้นในระยะแรก ทำให้เห็นว่าการปลดปล่อยสารได้อย่างต่อเนื่องโดยจะมีแนวโน้มอัตราการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลมากขึ้น และค่อนข้างคงที่ในวันที่ 6 มีอัตราการปลดปล่อยเฉลี่ยที่ 0.019 กรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งมีปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลเริ่มต้น 4.85 กรัมต่อลิตร มีปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่ปลดปล่อยได้ทั้งหมดในระยะเวลา 7 วันคือ 1 กรัมต่อลิตร คิดเป็น 20.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากคุณสมบัติของแอลฟาโทโคฟีรอลนั้นเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ และมีความหนืดอยู่ภายในโมเลกุล มีการแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลโครงร่างไคโตซาน และส่วนใหญ่จะห่อหุ้มอยู่ภายนอกอนุภาคด้วยจึงมีอัตราการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลน้อยกว่ากลูโคส



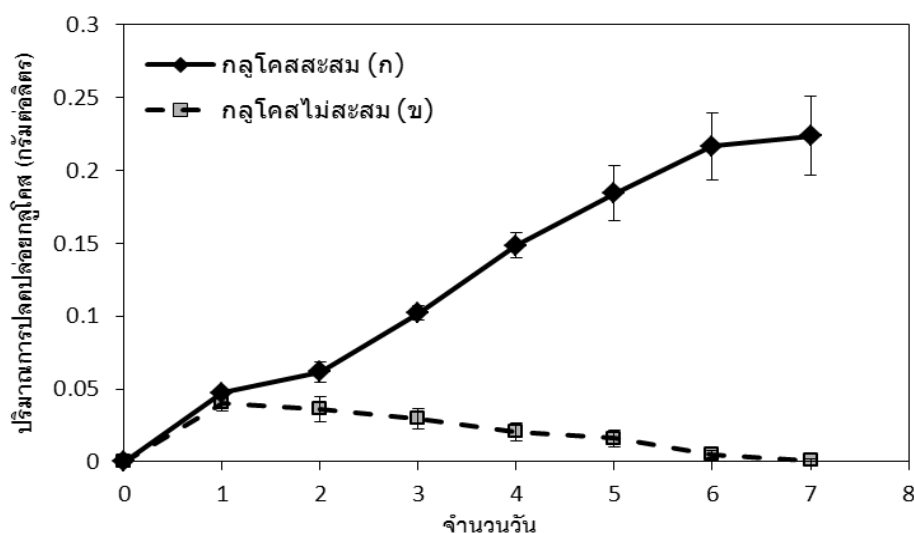
ภาพที่ 4.7 การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสมและไม่สะสม ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน เขย่าด้วยความแรงของ 180 รอบต่อนาที : (ก) แอลฟาโทโคฟีรอลสะสม และ(ข) แอลฟาโทโคฟีรอลไม่สะสม

โดยได้มีรายงานวิจัยถึงการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลเริ่มต้นอย่างรวดเร็วขึ้น เกิดจากการบวมขึ้นอย่างรวดเร็วของโคโตซาน และเกิดการแพร่ของแอลฟาโทโคฟีรอลที่มีการสะสมความเข้มข้นมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ทำให้มีการแพร่จากความเข้มข้นมากกว่าไปสู่ความเข้มข้นน้อยกว่า ไปยังภายนอกอนุภาคนาโนโคโตซานตามรูพรุนของโคโตซาน แอลฟาโทโคฟีรอลเกาะกับโคโตซานได้อย่างหลวม จึงทำให้ปลดปล่อยออกมา (นลินาและพรวิมลภา, 2550) และแอลฟาโทโคฟีรอลที่ปล่อยออกมานั้นมีการกระจายตัวอยู่บนผิวภายนอกอนุภาคนาโนโคโตซานเป็นส่วนใหญ่ (Yenilmez *et al.*, 2011) ในขณะที่การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบไม่สะสมนั้น มีการปลดปล่อยลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจะเห็นว่าสารที่เลือกมาเป็นต้นแบบในการศึกษาการกักเก็บในอนุภาคนาโนโคโตซานนี้ แม้ว่าคุณสมบัติในการละลายน้ำแตกต่างกัน แต่รูปแบบการปลดปล่อยไม่ว่าจะเป็นแบบสะสมหรือไม่สะสมมีความเป็นไปได้ในลักษณะเดียวกัน

4.2.3 การปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล

4.2.3.1 การปลดปล่อยกลูโคส ผลการทดลองการนำกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลมากักเก็บในอนุภาคนาโนโคโตซานแล้วศึกษาการปลดปล่อย พบว่าทั้งกลูโคสมีการปลดปล่อยสะสมเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยมีอัตราการปลดปล่อยกลูโคสเฉลี่ยที่ 0.027 กรัมต่อลิตรต่อวัน คิดเป็น

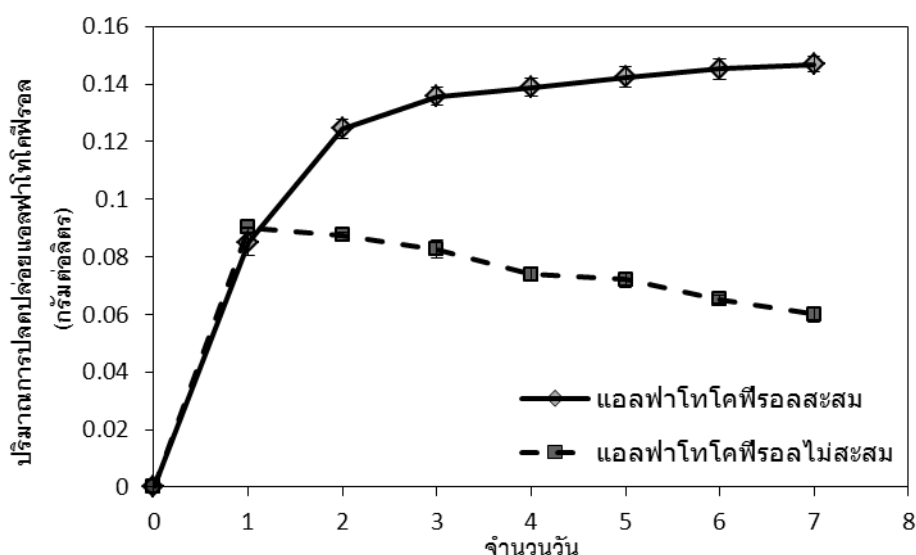
9.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่าอัตราการปลดปล่อยสารพร้อมกันสองชนิดจะมีอัตราการปลดปล่อยกลูโคสน้อยกว่า ดังภาพที่ 4.8 เนื่องจากอนุภาคนาโนไคโตซานต้องมีการปลดปล่อยสารถึงสองชนิดพร้อมกัน ซึ่งการกักเก็บจำเป็นจะต้องอาศัยพื้นที่ในอนุภาคนาโนไคโตซานมากขึ้นให้กักเก็บสารสองชนิด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ปริมาณการปลดปล่อยกลูโคสลดลง ดังนั้นการกักเก็บสารสองชนิดพร้อมกันจึงไม่มีผลต่อการปลดปล่อยกลูโคส ในส่วนของการปลดปล่อยไม่สะสมของสารสองชนิดพร้อมกันนั้น จากผลการทดลองพบว่า การปลดปล่อยแบบไม่สะสมของกลูโคสน้อยลงอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการปลดปล่อยค่อนข้างคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยกลูโคสเพียงชนิดเดียวพบว่ามีการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.8 ผลการปลดปล่อยกลูโคสสะสม และไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บสารสองชนิด ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน : (ก) กลูโคสสะสม และ (ข) กลูโคสไม่สะสม

4.2.3.2 การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล ผลการทดลองการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลที่กักเก็บร่วมกับกลูโคสจากอนุภาคนาโนไคโตซานพบว่า มีการปลดปล่อยสะสมค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลเพียงชนิดเดียวพบว่ามีการปลดปล่อยได้น้อยลง ดังภาพที่ 4.9 ซึ่งอัตราการปลดปล่อยของแอลฟาโทโคฟีรอลที่กักเก็บร่วมกับกลูโคสพบว่ามีอัตราการปลดปล่อย 0.018 กรัมต่อลิตรต่อวัน และปริมาณการปลดปล่อยน้อยกว่าการปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวเพียงเล็กน้อย คิดเป็น 18.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบไม่สะสมพบว่ามีอัตราการปลดปล่อยลดลงอย่างรวดเร็ว และ

ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ จึงทำปฏิกิริยากับไคโตซานได้อย่างหลวม ในขณะที่รวมกับกลูโคสซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ และเมื่อมีการเจือจางของสภาวะภายในอนุภาค จึงส่งผลให้มีความเข้มข้นภายในกับภายนอกอนุภาคแตกต่างกันมาก แอลฟาโทโคฟีรอลจึงปลดปล่อยออกมาได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลเพียงชนิดเดียว ซึ่งแอลฟาโทโคฟีรอลถูกปล่อยออกมาโดยการสลายตัวโดยรวม (bulk erosion) ของไคโตซานเป็นการสลายตัวของโพลิเมอร์ที่มีส่วนที่ชอบน้ำโดยเริ่มจากการที่น้ำซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุล ทำให้สายโซ่โมเลกุลเล็กลงด้วยการสลายพันธะเอสเทอร์ (Langer, 1990) ดังนั้นแสดงว่าการปลดปล่อยสารทั้งสองชนิดพร้อมกันจากอนุภาคนาโนไคโตซานนั้นไม่แตกต่างจากการปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียว แสดงว่าการกักเก็บสารทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร

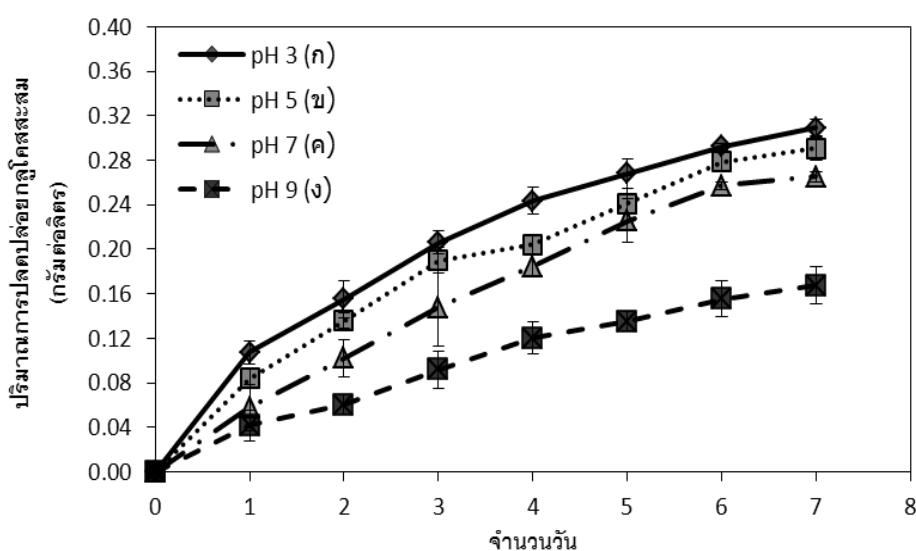


ภาพที่ 4.9 ผลการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสม และไม่สะสม จากอนุภาคนาโนไคโตซาน ที่กักเก็บสารสองชนิด ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน : (ก) แอลฟาโทโคฟีรอลสะสม และ (ข) แอลฟาโทโคฟีรอลไม่สะสม

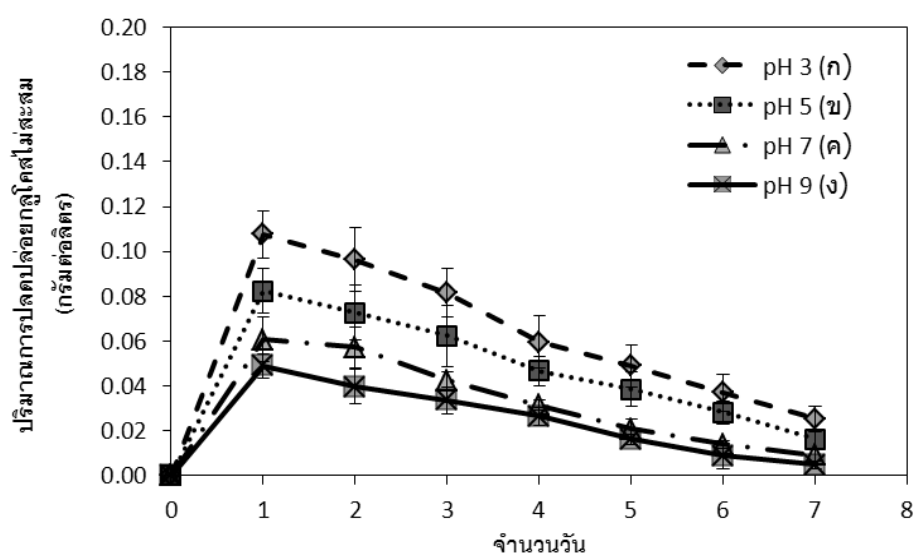
4.2.4 ผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อย

4.2.4.1 การปลดปล่อยกลูโคส จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชมีผลต่อการปลดปล่อยกลูโคส โดยอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสเมื่อทดสอบการปลดปล่อยภายใต้สภาวะที่อยู่ใน ddH₂O ที่ค่าพีเอชต่างๆ เป็นระยะเวลา 7 วัน ณ อุณหภูมิห้องพบว่า มีการ

ปลดปล่อยสะสมเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณการปลดปล่อยกลูโคสลดลง โดยค่าพีเอช 3 พบว่าให้ประสิทธิภาพการปลดปล่อยกลูโคสได้ดีที่สุดคิดเป็น 15.97 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 เนื่องจากสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำทำให้อันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) ภายในโครงสร้างไคโตซานอ่อนลง (Shilan *et al.*, 2007) แม้ว่าจะมีการเพิ่มโปรตอนให้กับโมเลกุลไคโตซานมากขึ้นก็ตาม และทำให้การสร้างตัวเป็นเจลของไคโตซานลดลง โครงสร้างไคโตซานมีการบวมได้น้อยในสภาวะกรด นอกจากนี้ยังมีการแพร่ของกลูโคสบริเวณผิวของอนุภาคและการซึมผ่านของสารเข้าออกในโครงร่างไคโตซานเกิดมากขึ้น (permeability เพิ่มขึ้น) จึงทำให้มีการปลดปล่อยกลูโคสซึมผ่านรูพรุนของไคโตซานออกมาได้มากกว่าเมื่ออยู่ในสภาวะที่ค่าพีเอชสูง แสดงว่าสภาวะของค่าพีเอชมีผลต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยสารของอนุภาคนาโนไคโตซาน (Vanessa *et al.*, 2005 & Pornsak *et al.*, 2008) ในขณะที่การปลดปล่อยไม่สะสม ดังภาพที่ 4.11 พบว่าการปลดปล่อยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่สภาวะที่ค่าพีเอช 3 มีการปลดปล่อยกลูโคสได้มากที่สุด และการปลดปล่อยกลูโคสน้อยลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอช เมื่อมีการเติม ddH_2O ที่ค่าพีเอชต่างๆ กลับเข้าไปทุกวัน ทำให้น้ำแทรกผ่านเข้าไปภายในอนุภาคมากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นกลูโคสภายในน้อยลง จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยของกลูโคสออกมาได้ลดลง

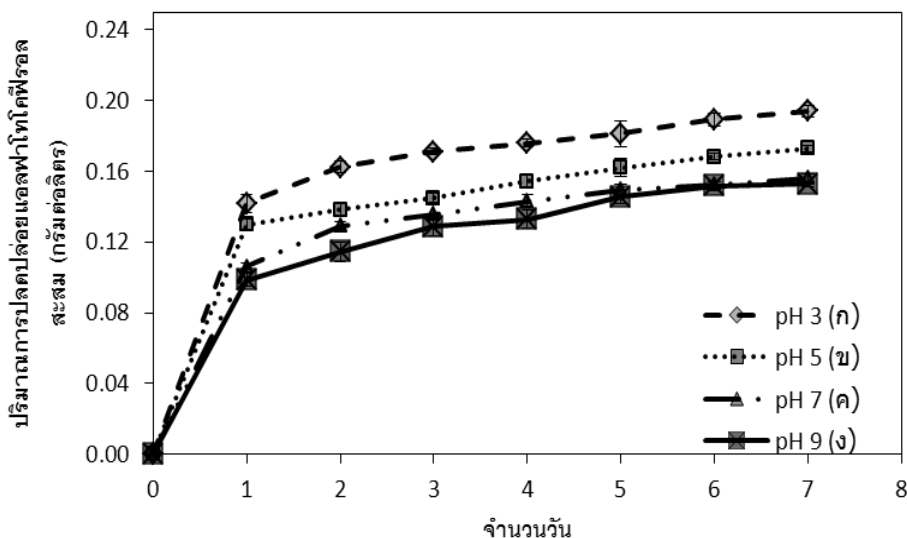


ภาพที่ 4.10 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสแบบสะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9



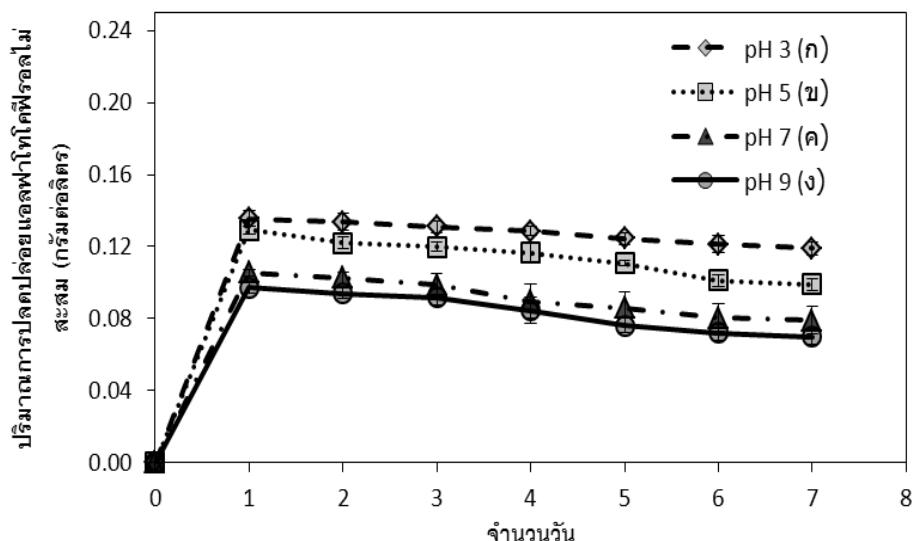
ภาพที่ 4.11 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสแบบไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

4.2.4.2 การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล จากผลการทดลองอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลทดสอบด้วย ddH_2O ที่ค่าพีเอชต่างๆ พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล โดยแอลฟาโทโคฟีรอลถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีค่าพีเอชลดลง ซึ่งค่าพีเอช 3 พบว่าให้ประสิทธิภาพการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีที่สุดคิดเป็น 26.53 เปอร์เซ็นต์ การปลดปล่อยเริ่มคงที่เมื่อเข้าสู่วันที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 4.12 เนื่องจากที่สภาวะค่าพีเอชต่ำ หมู่อะมิโนส่วนใหญ่ของไคโตซานจะถูกเพิ่มโปรตอนเข้าไป ทำให้การผลักกันระหว่างประจุเดียวกันโดยใช้แรงไฟฟ้าสถิตเพิ่มขึ้น เกิดช่องว่างภายในโครงร่างแหไคโตซานมากขึ้น (Anna *et al.*, 2007) ซึ่งแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำโมเลกุลส่วนใหญ่จะกระจายอยู่บริเวณรอบนอกอนุภาคนาโนไคโตซานอยู่ (Yenilmez *et al.*, 2011) จึงทำให้โอกาสที่แอลฟาโทโคฟีรอลรวมกับไคโตซานเกิดได้ลดลงตามมา ส่งผลให้แอลฟาโทโคฟีรอลส่วนใหญ่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ดังนั้นค่าพีเอชของสภาวะภายในโพลิเมอร์สามารถเปลี่ยนแปลงเพื่อที่จะควบคุมการปลดปล่อยสารได้ (Bao *et al.*, 2008)



ภาพที่ 4.12 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบสะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

ในส่วนของการปลดปล่อยแบบไม่สะสมของแอลฟาโทโคฟีรอล พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อการปลดปล่อยไม่สะสมเช่นกัน ค่าพีเอชสูงทำให้ปริมาณการปลดปล่อยมีแนวโน้มลดลง โดยที่สภาวะพีเอชต่ำเกิดการปลดปล่อยได้ดีกว่าที่ค่าพีเอชสูง และการปลดปล่อยเป็นไปในทิศทางเดียวกับการปลดปล่อยกลูโคส ดังภาพที่ 4.13

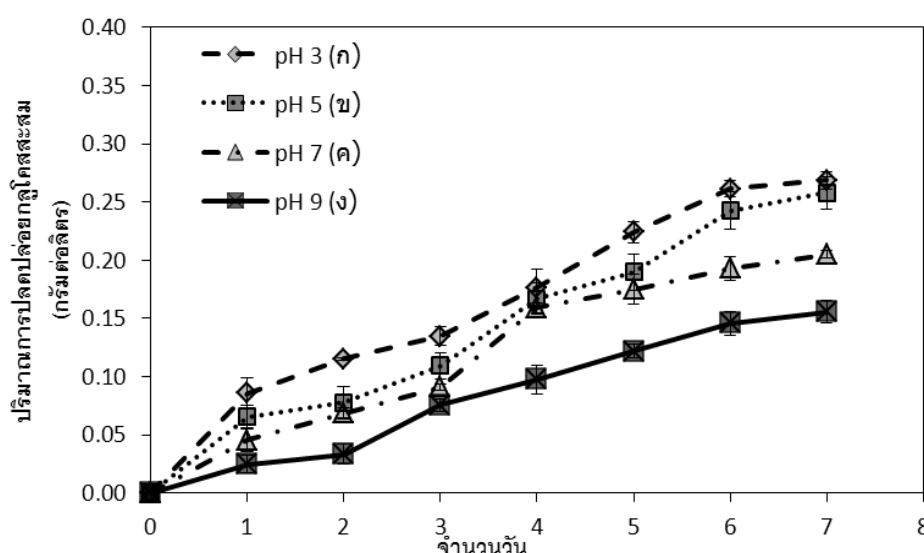


ภาพที่ 4.13 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

4.2.4.3 การปลดปล่อยกลูโคส และแอลฟาโทโคฟีรอล จากผลการทดลองการ

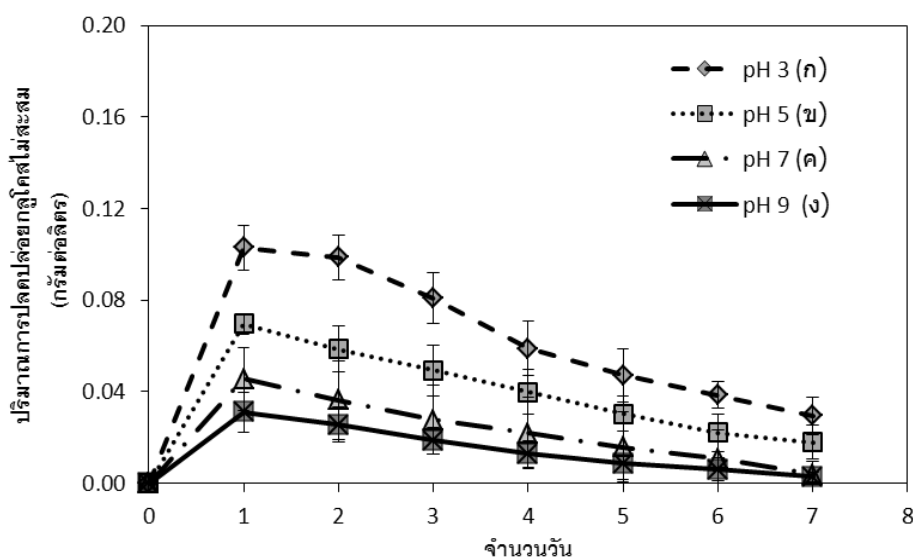
ปลดปล่อยกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอลจากอนุภาคนาโนไคโตซานภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชต่างๆ แบ่งผลการศึกษาเป็น

(1) **การปลดปล่อยกลูโคสสะสม** ผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้การปลดปล่อยกลูโคสลดลง ซึ่งค่าพีเอชที่มีผลทำให้การปลดปล่อยกลูโคสสะสมดีที่สุดคือ ค่าพีเอช 3 คิดเป็น 12.8 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.14 เนื่องจากกลูโคสเป็นโมเลกุลที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะมีการเกิดปฏิกิริยาภายในและระหว่างสายโมเลกุลกับไคโตซานได้ เช่น พันธะไฮโดรเจน และแรงวานเดอร์วาลส์ ภายในโมเลกุลของไคโตซานมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้และอยู่ในสภาพที่เป็นสารละลายได้ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาภายในและระหว่างโมเลกุล หรือเกิดระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน (Naoji *et al.*, 2000) เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่า การปลดปล่อยสารทั้งสองชนิดพร้อมกันจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ทำให้ปริมาณการปลดปล่อยกลูโคสเกิดน้อยลง แต่แนวโน้มการปลดปล่อยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนไคโตซานต้องใช้พื้นที่ในการกักเก็บสารสองชนิดพร้อมกัน จึงทำให้ปลดปล่อยกลูโคสได้ลดลง



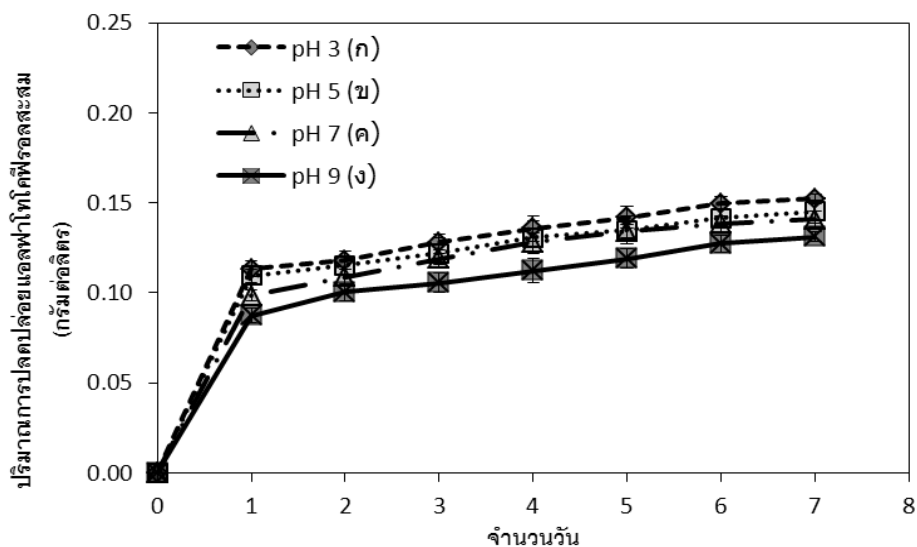
ภาพที่ 4.14 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสแบบสะสม จากอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอล ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

(2) **การปลดปล่อยกลูโคสไม่สะสม** ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการปลดปล่อยแบบไม่สะสมของกลูโคสจากอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บสารทั้งสองชนิดพร้อมกันพบว่า ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ทำให้การปลดปล่อยกลูโคสลดลง และค่าพีเอช 3 ให้การปลดปล่อยแบบไม่สะสมของกลูโคสได้มากที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปการปลดปล่อยกลูโคสลดลงตามลำดับ ดังภาพที่ 4.15



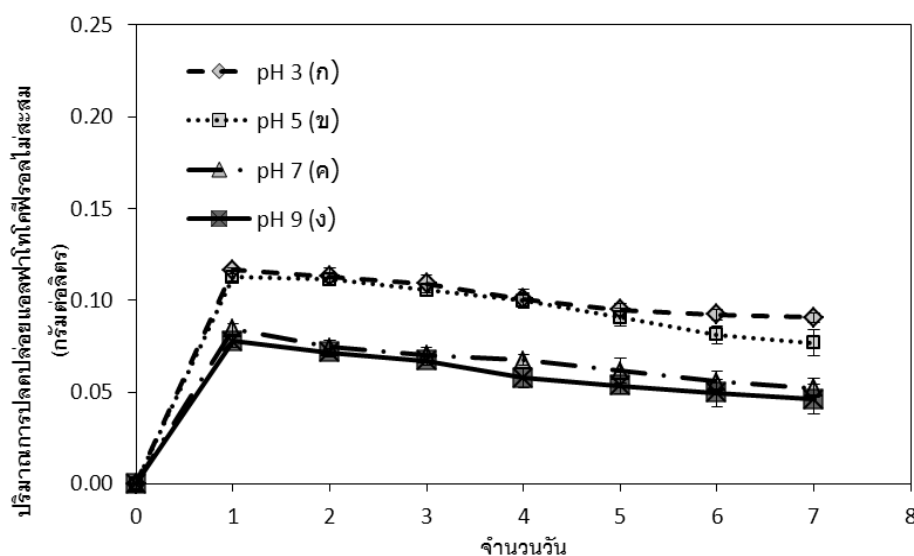
ภาพที่ 4.15 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสแบบไม่สะสม จากอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอล ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

(3) **การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสม** ผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสม พบว่าการปลดปล่อยในระยะเริ่มต้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และคงที่ ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลลดลง ดังภาพที่ 4.16 ซึ่งค่าพีเอช 3 พบว่าให้ประสิทธิภาพการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีที่สุดคิดเป็น 21 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าพีเอชต่ำจะทำให้มีการเติมโปรตอนให้กับหมู่อะมิโนของไคโตซาน นำไปสู่การคลายตัวของสายโพลิเมอร์ ทำให้น้ำเข้าไปอยู่ในโมเลกุลไคโตซานได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงมีการขับออกหรือปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลซึ่งกระจายอยู่บริเวณผิวอนุภาคนาโนไคโตซานได้มากกว่าที่ค่าพีเอชสูง ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงหมู่โปรตอนออกจากหมู่อะมิโน ทำให้โครงสร้างไคโตซานหดแน่น จึงปลดปล่อยสารได้ยากกว่า (Jagjit & Ashveen, 2008) เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่าพฤติกรรมของการปลดปล่อยไม่แตกต่างกันแต่ปริมาณการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลพร้อมกับการปลดปล่อยกลูโคสมีปริมาณน้อยกว่า การปลดปล่อยสารชนิดเดียว



ภาพที่ 4.16 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสมจากอนุภาคนาโนโคโคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอล ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

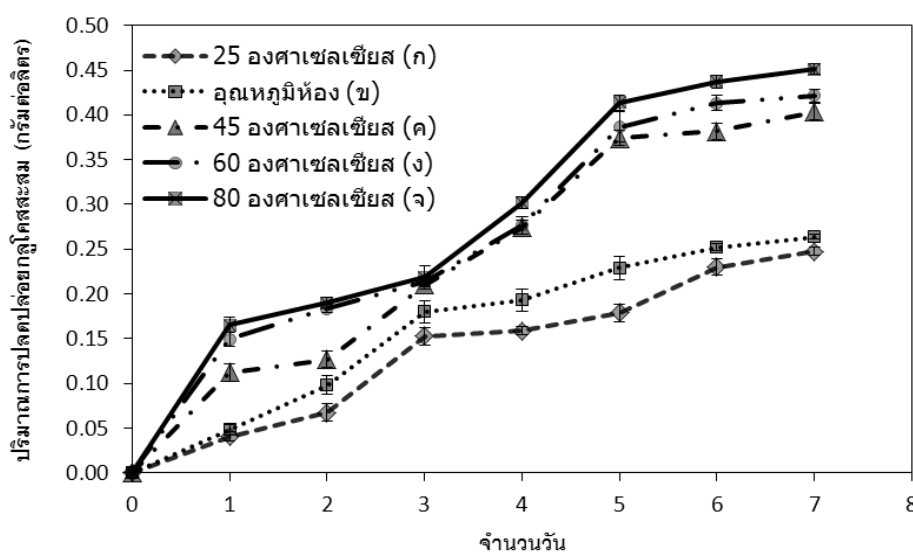
(4) การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลไม่สะสม จากผลการทดลองพบว่าการปลดปล่อยไม่สะสมค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและคงที่ การปลดปล่อยในสภาวะพีเอช 3 และ 5 ใกล้เคียงกัน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลลดลง ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ผลของค่าพีเอชต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลไม่สะสมจากอนุภาคนาโนโคโคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอล ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน : (ก) pH 3, (ข) pH 5, (ค) pH 7 และ (ง) pH 9

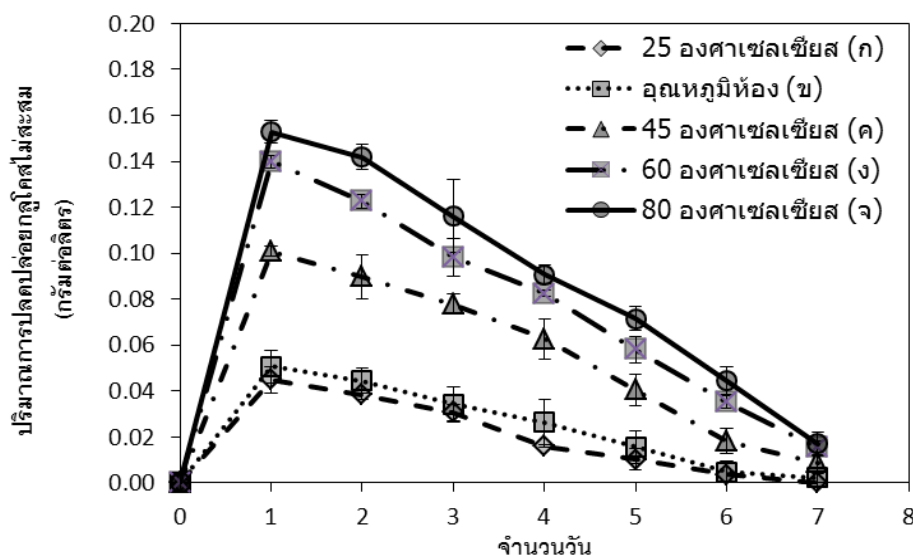
4.2.5 ผลของอุณหภูมิต่อการปลดปล่อย

4.2.5.1 การปลดปล่อยกลูโคส จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการปลดปล่อยกลูโคส โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้มีการปลดปล่อยกลูโคสมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.18 อนุภาคนาโนไคโตซานมีการปลดปล่อยกลูโคสได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คิดเป็น 21.8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้โครงสร้างไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลง เกิดการคลายตัวของโครงสร้าง ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลบนสายหลัก และหมู่คาร์บอกซิลจะถูกป้องกันจากการบวมขึ้นของสายไคโตซาน ดังนั้นการจับกันระหว่างหมู่อะมิโนกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสจึงลดลง นอกจากนี้อีกปัจจัยหนึ่งคือการเกิดพันธะระหว่างไคโตซานกับกลูโคสจะแตกออกเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ การทำปฏิกิริยาต่อกันอ่อนลง จึงส่งผลให้กลูโคสเกิดการรั่วออกมาจากภายในสู่ภายนอกไคโตซานเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (Bao *et al.*, 2008) นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าอุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญในการสลายของสายโมเลกุลไคโตซานให้สั้นลงหรือกลายเป็นโมโนเมอร์ได้ (Zhishen & Dongfeng, 2002)



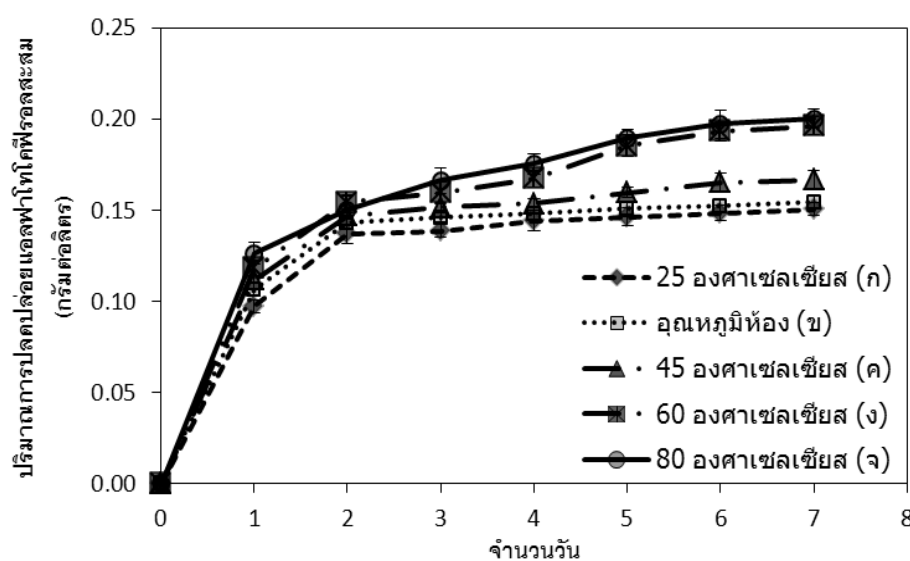
ภาพที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสสะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซานเป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

ในขณะที่การปลดปล่อยกลูโคสไม่สะสมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่าการปลดปล่อยกลูโคสเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไปพบว่าการปลดปล่อยมีแนวโน้มลดลง ดังภาพที่ 4.19



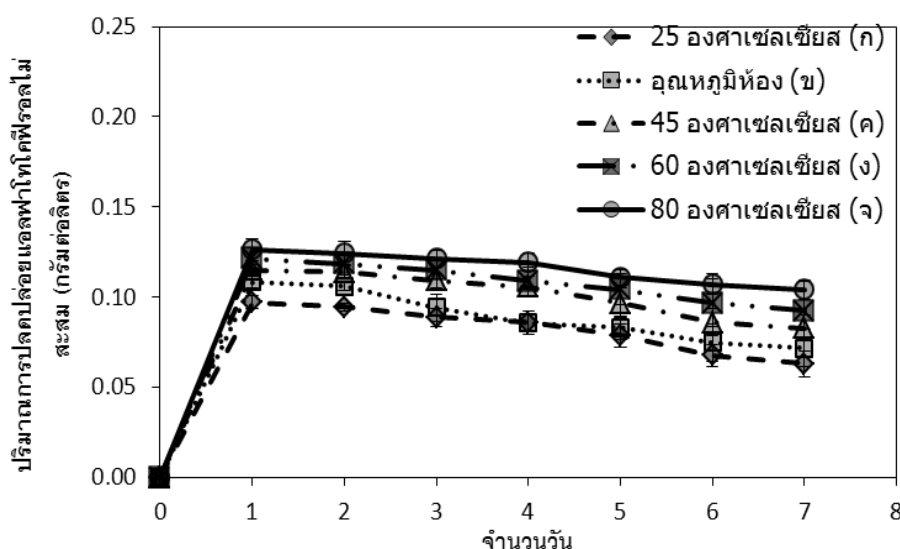
ภาพที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซาน เป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิต้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

4.2.5.2 การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสมมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.20 โดยเริ่มต้นมีการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลอย่างช้าและเริ่มต่อเนื่องจนคงที่ในวันที่ 5 อนุภาคนาโนไคโตซานมีการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คิดเป็น 24.8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลทำให้สายโมเลกุลไคโตซาน มีการบวมของสายโซ่ไคโตซาน ทำให้มีลักษณะคล้ายเจลมากขึ้น บ่งบอกได้ว่าการทำปฏิกิริยากันภายในสายโมเลกุลของโพลีเมอร์เกิดการแตกออกมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลจากไคโตซาน (Jagjit & Ashveen., 2008)



ภาพที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบสะสมจากอนุภาคนาโนไฮดรอกไซด์เป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

ในการปลดปล่อยแบบไม่สะสมเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วพบว่ามีการปลดปล่อยลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4.21 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ไฮดรอกไซด์มีการคลายตัวของสายโมเลกุลมากขึ้น จึงปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลที่ส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวอนุภาคนาโนไฮดรอกไซด์เนื่องจากน้ำที่เติมกลับเข้าไปส่งผลให้เจือจางความเข้มข้นภายในอนุภาคให้น้อยลง ทำให้การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลออกมาได้น้อยลง

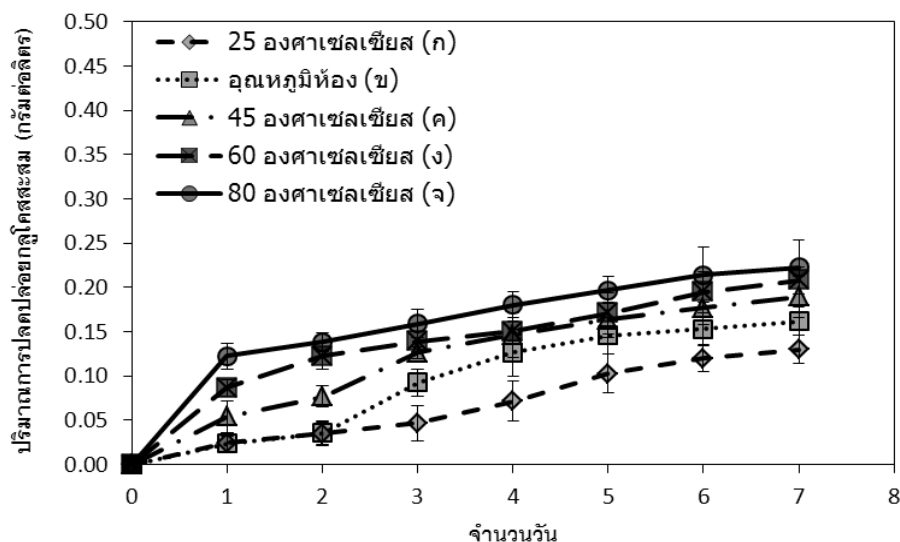


ภาพที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบไม่สะสมจากอนุภาคนาโนไคโตซานเป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

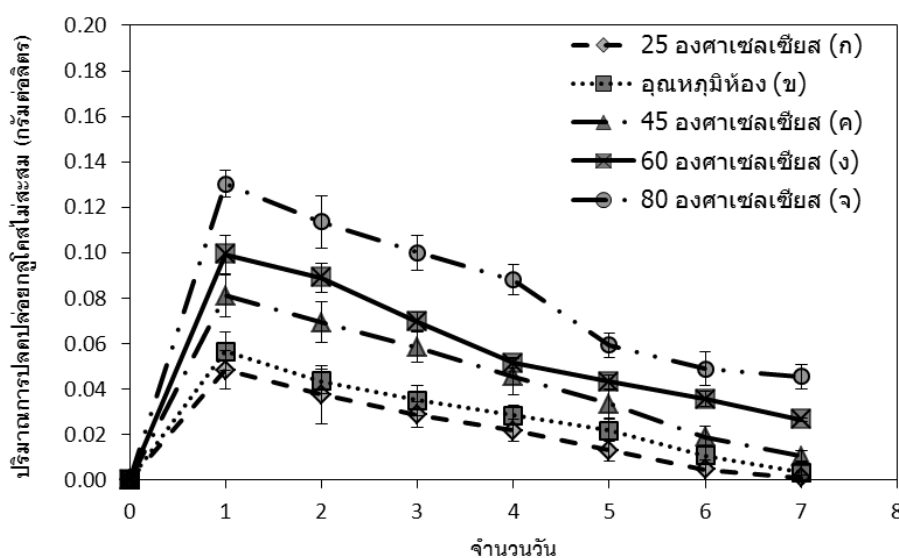
4.2.5.3 การปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล จากผลการทดลองการปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลจากอนุภาคนาโนไคโตซานภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ แบ่งเป็น

(1) การปลดปล่อยกลูโคสสะสม ผลการทดลองอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล ทดสอบการปลดปล่อยภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ พบว่าการปลดปล่อยกลูโคสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.22 ซึ่งปริมาณการปลดปล่อยกลูโคสสะสมคิดเป็น 12.4 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสให้การปลดปล่อยกลูโคสได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยกลูโคสเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่า การปลดปล่อยสารสองชนิดพร้อมกันทำให้การปลดปล่อยกลูโคสสะสมภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ มีการปลดปล่อยได้ปริมาณน้อยกว่า แต่การปลดปล่อยเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

(2) การปลดปล่อยกลูโคสไม่สะสม ในส่วนของการปลดปล่อยกลูโคสแบบไม่สะสมของการปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ พบว่าการปลดปล่อยไม่สะสมมีแนวโน้มลดลง และมีการปลดปล่อยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.23



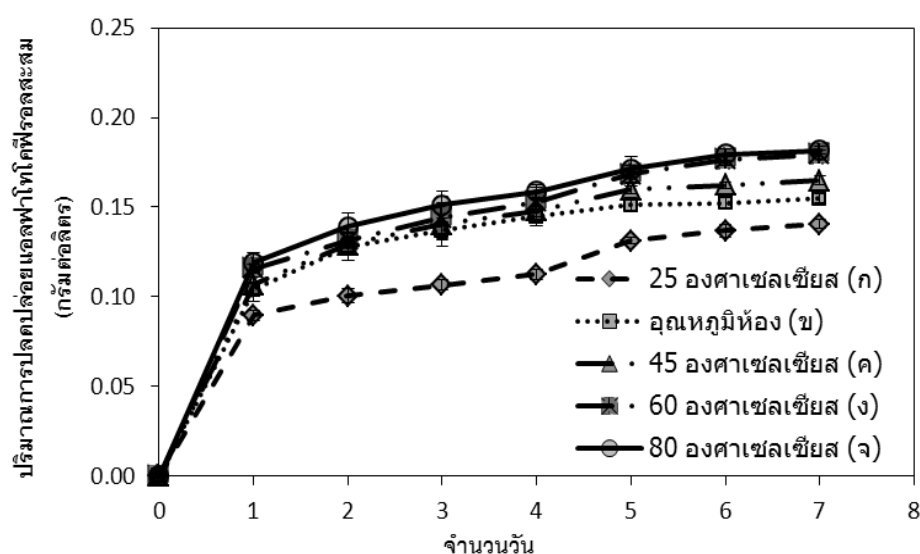
ภาพที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสแบบสะสมจากอนุภาคไคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.23 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยกลูโคสแบบไม่สะสมจากอนุภาคไคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

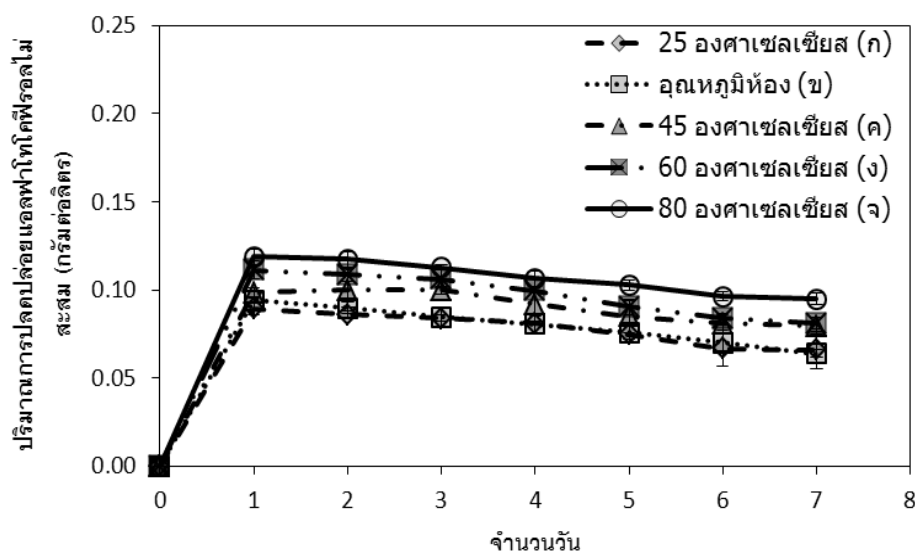
(3) การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสม เมื่อทดสอบการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสมเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันพบว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลสะสมได้ดีที่สุด ดังภาพที่ 4.24 ปริมาณการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟี

รอลคิดเป็น 23 เปอร์เซ็นต์ บ่งบอกได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้มีการปลดปล่อยทั้งกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่าทั้งแอลฟาโทโคฟีรอลและกลูโคสนั้นเมื่อนำมาก็กักเก็บพร้อมกัน ทำให้มีปริมาณการปลดปล่อยน้อยกว่า แต่แนวโน้มการปลดปล่อยไม่แตกต่างกัน ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีบทบาทที่สำคัญในการสลายหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของโคโคซาน รวมถึงความหนืดที่มีภายในโมเลกุลเอง ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร (Zhishen & Dongfeng, 2002)



ภาพที่ 4.24 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบสะสมจากอนุภาคโคโคซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

(4) การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลไม่สะสม ในส่วนของการปลดปล่อยแบบไม่สะสมของแอลฟาโทโคฟีรอล พบว่ามีการปลดปล่อยลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4.25



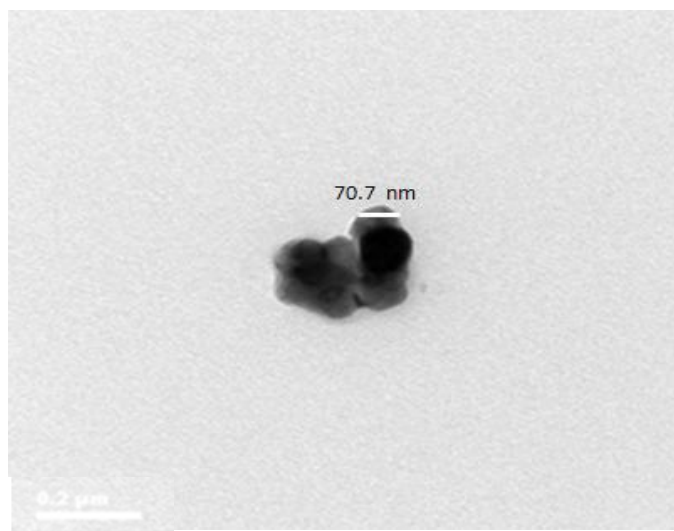
ภาพที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแบบไม่สะสมจากอนุภาคไคโตซานที่กักเก็บกลูโคสร่วมกับแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) 25, (ข) อุณหภูมิห้อง, (ค) 45, (ง) 60 และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

4.3 การศึกษาลักษณะของอนุภาคนาโนไคโตซาน

4.3.1 ศึกษารูปร่าง และขนาด

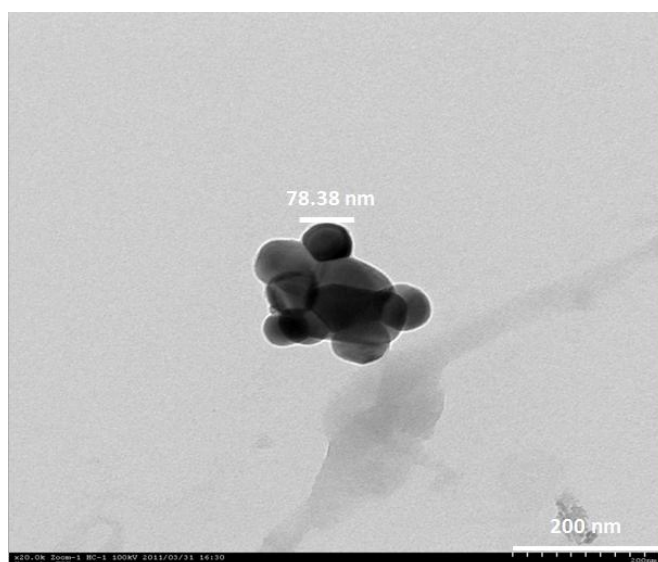
4.3.1.1 อนุภาคนาโนไคโตซานก่อน และหลังกักเก็บ ผลการศึกษาขนาดและรูปร่างลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนและหลังการกักเก็บด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แบ่งเป็น

(1) อนุภาคนาโนไคโตซาน อนุภาคไคโตซานก่อนการกักเก็บสาร เมื่อทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่ามีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 70.7 นาโนเมตร มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมเกาะกลุ่มกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.26 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่มีการเตรียมอนุภาคนาโนไคโตซานและศึกษารูปร่างลักษณะของอนุภาคด้วย TEM พบว่าอนุภาคที่ได้มีรูปร่างค่อนข้างกลมและพื้นผิวเรียบมีการกระจายตัวกัน วัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยได้ 90 นาโนเมตร (Romila & Surendra, 2010) นอกจากนี้ยังมีอนุภาคนาโนไคโตซานที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีการเกาะกลุ่มกันแน่นและมีลักษณะเป็นทรงกลม (Li *et al.*, 2005)



ภาพที่ 4.26 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคไคโตซานเตรียมได้จากไคโตซาน 0.05 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง

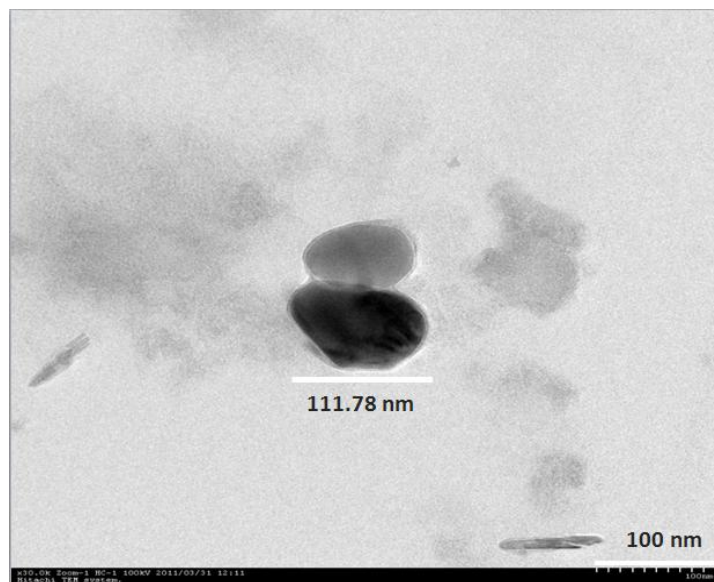
(2) **อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคส** อนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคสเมื่อทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 78.38 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.27 พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม (spherical shape) และมีส่วนที่มีสีเข้มอยู่ภายในอนุภาค ซึ่งเป็นโมเลกุลของกลูโคสที่กักเก็บอยู่ภายใน



ภาพที่ 4.27 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคสเตรียมได้จากไคโตซาน 0.05 และกลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง

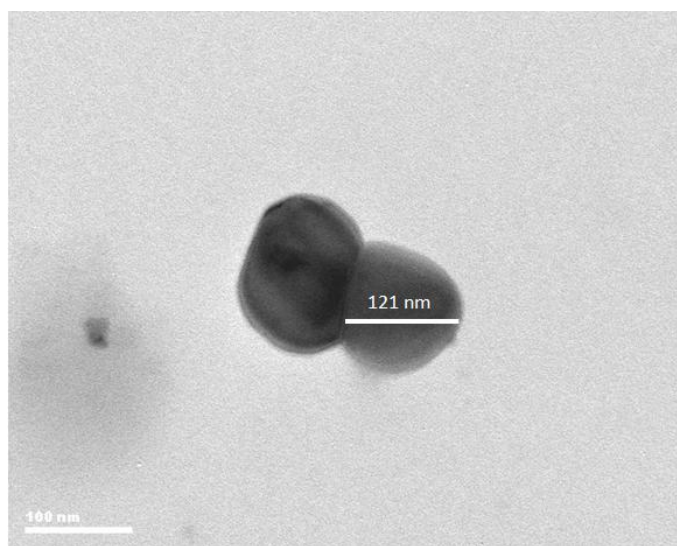
โดยได้มีรายงานวิจัยที่มีการศึกษาการกักเก็บอาร์บูตินในอนุภาคนาโนไคโตซาน เมื่อตรวจสอบรูปร่างโมเลกุลแล้วพบว่ามึลักษณะเป็นทรงกลมเช่นเดียวกัน มีบริเวณที่เป็นสีเข้มกว่าอยู่ภายในโมเลกุลของอนุภาคนาโนไคโตซาน โดยเป็นโมเลกุลของอาร์บูตินที่กักเก็บอยู่ภายในอนุภาคนาโนไคโตซาน มีขนาดโมเลกุล 50-200 นาโนเมตร (Pimporn *et al.*, 2010)

(3) อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล อนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล เมื่อทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 111.78 นาโนเมตร อนุภาคที่ได้มีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม (semispherical shape) ซึ่งภาพโดยรวมอนุภาคที่ได้มีส่วนที่จางของไคโตซานที่ห่อหุ้มส่วนที่เป็นสีเข้มอยู่ภายในโมเลกุลซึ่งเป็นโมเลกุลของแอลฟาโทโคฟีรอล ขอบอนุภาคมีลักษณะคล้ายเยื่อบางๆ หุ้มอยู่อีกหนึ่งชั้น อนุภาคมีการเกาะกลุ่มกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.28 สอดคล้องกับการศึกษาลักษณะของอนุภาคนาโนไคโตซานที่มีการกักเก็บเรตินอล พบว่าอนุภาคที่ได้มีขนาดอนุภาค 141 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่กว้าง อนุภาคที่ได้มีการกระจายตัวกันลักษณะคล้ายกับทรงกลม โดยมีอนุภาคบางกลุ่มที่มีการจับกลุ่มกันเองระหว่างกัน (Dong *et al.*, 2006)



ภาพที่ 4.28 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลเตรียมได้จากไคโตซาน 0.05 และแอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง

(4) **อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคส และแอลฟาโทโคฟีรอล** อนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล เมื่อทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่ามีขนาดอนุภาคเท่ากับ 121 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.29 อนุภาคที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นทรงกลมมาเกาะกลุ่มกันโดยภายในมีส่วนสีเข้มขนาดเล็กเกาะอยู่ ซึ่งเป็นส่วนของกลูโคส และมีส่วนที่เป็นสีเข้มลักษณะใสซึ่งเป็นส่วนของแอลฟาโทโคฟีรอลที่อยู่ภายในอนุภาคนาโนไคโตซาน เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บสารชนิดเดียวแล้วพบว่า ขนาดอนุภาคที่กักเก็บสารสองชนิดพร้อมกันนั้นได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บสารเพียงชนิดเดียว เนื่องจากการกักเก็บสารสองชนิดที่มีคุณสมบัติ น้ำหนักโมเลกุลต่างกันภายในอนุภาคนาโนไคโตซานเดียวกันนั้น ทำให้อนุภาคนาโนไคโตซานจำเป็นต้องใช้พื้นที่บนอนุภาคเพื่อกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลพร้อมกัน ดังนั้นทำให้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บสารเพียงชนิดเดียว



ภาพที่ 4.29 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลเตรียมได้จากไคโตซาน 0.05, กลูโคส 1 และแอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง

ตารางที่ 4.6

สรุปขนาดอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนและหลังการกักเก็บสาร

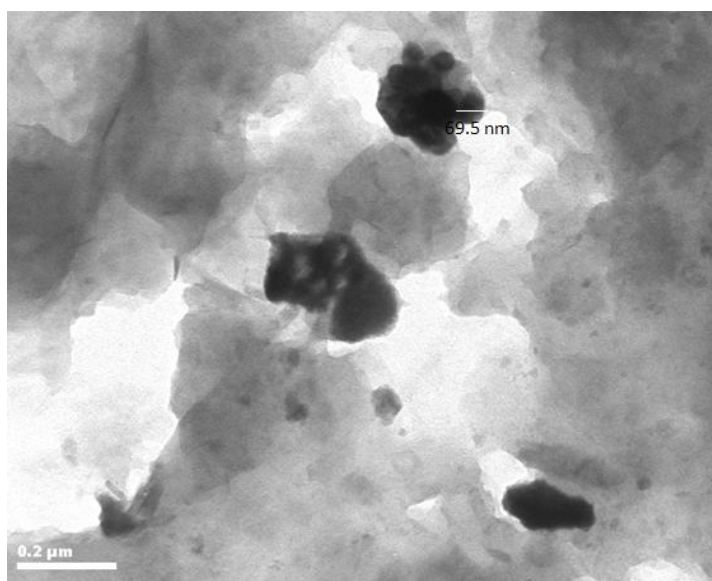
ชนิดของอนุภาค	ขนาดอนุภาค $\pm$ ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (นาโนเมตร)
อนุภาคนาโนไคโตซาน	70.70 ± 6.5
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคส	78.38 ± 19.2
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล	111.78 ± 19.0
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล	121.00 ± 10.0

4.3.1.2 อนุภาคนาโนไคโตซานหลังจากปลดปล่อย ผลการศึกษาขนาดและรูปร่างลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนและหลังการปลดปล่อยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แบ่งเป็น

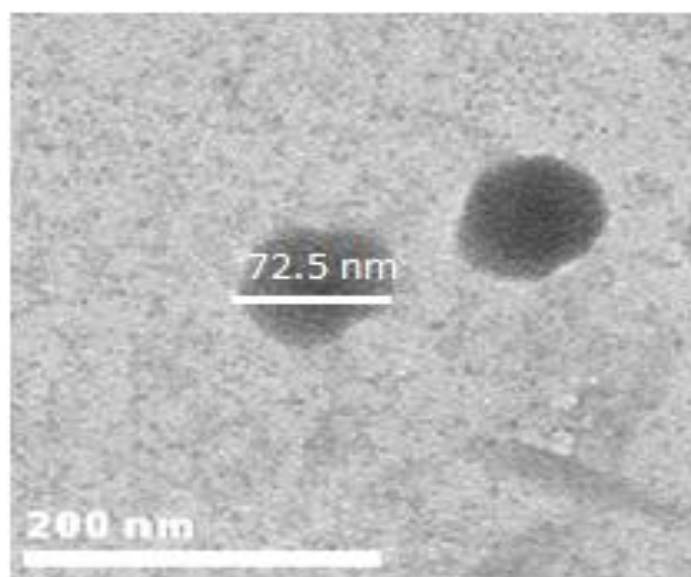
(1) **อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคส** อนุภาคนาโนไคโตซานหลังจากปลดปล่อยกลูโคสแล้วทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่าอนุภาคนาโนไคโตซานยังคงมีการเกาะกลุ่มกัน มีขนาดอนุภาคลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคที่กักเก็บกลูโคส ซึ่งมีขนาดอนุภาคนาโนไคโตซานหลังปลดปล่อยกลูโคสเฉลี่ย 69.5 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.30

(2) **อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล** อนุภาคนาโนไคโตซานหลังจากปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแล้วทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่ามีขนาดเท่ากับ 72.5 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.31 ขนาดอนุภาคที่ได้เล็กกว่าอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล เนื่องจากมีการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแล้ว

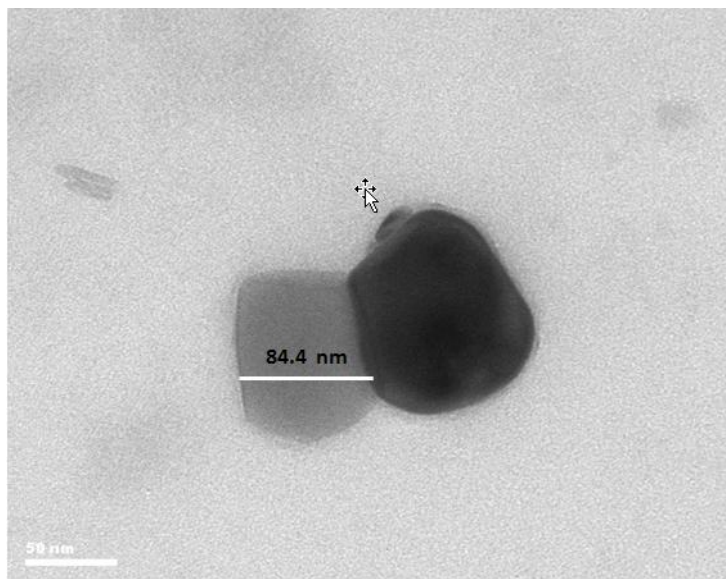
(3) **อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล** อนุภาคนาโนไคโตซานหลังจากปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล ทดสอบด้วยกล้อง TEM พบว่ามีขนาดเท่ากับ 84.4 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.32 เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคหลังการปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่ามีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากอนุภาคต้องกักเก็บสารสองชนิดพร้อมกัน ดังนั้นหลังจากการปลดปล่อยแล้วทำให้ขนาดอนุภาคที่ได้ใหญ่กว่า หรืออาจมีกลูโคสหรือแอลฟาโทโคฟีรอลบางส่วนเหลืออยู่ในอนุภาค



ภาพที่ 4.30 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคไคโตซานหลังจากปลดปล่อยกลูโคสเป็นระยะเวลา 7 วัน เตรียมได้จากไคโตซาน 0.05 และ กลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง



ภาพที่ 4.31 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคไคโตซานหลังจากปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นระยะเวลา 7 วัน เตรียมได้จากไคโตซาน 0.05 และ แอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง



ภาพที่ 4.32 ภาพจากกล้อง TEM ของอนุภาคไคโตซานหลังจากปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลเป็นระยะเวลา 7 วัน เตรียมได้จากไคโตซาน 0.05 , กลูโคส 1 และแอลฟาโทโคฟีรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้สาร TPP เป็นสารเชื่อมขวาง

ตารางที่ 4.7

สรุปขนาดอนุภาคนาโนไคโตซานหลังการปลดปล่อยสาร

ชนิดของอนุภาค	ขนาดอนุภาค $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นาโนเมตร)
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคส	69.5 ± 18.0
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล	72.5 ± 4.6
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล	84.4 ± 13.0

4.3.2 การวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

4.3.2.1 การวัดค่าศักย์ซีต้าก่อนและหลังการกักเก็บ การวัดค่าศักย์ซีต้าเพื่อหาประจุโดยรวมบนผิวของอนุภาค และเพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัวในระดับคอลลอยด์ของอนุภาค บ่งบอกได้ถึงเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ได้โดยตรง ค่าศักย์ซีต้าจึงเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างผิวหน้าของคอลลอยด์กับของเหลวที่คอลลอยด์นั้นแขวนลอยอยู่

ถ้าอนุภาคมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูง (ไม่ว่าจะเป็นบวกหรือลบ) อนุภาคเหล่านั้นจะผลักซึ่งกันและกันและกันเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน ทำให้เกิดความเสถียรทางด้านการกระจายตัว ในทางตรงข้ามถ้าอนุภาคนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ อนุภาคจะเข้ามาเกาะรวมตัวกันได้ง่าย ทำให้เกิดความไม่เสถียรของระบบขึ้น ซึ่งอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนและหลังการกักเก็บสารได้ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ดังนี้

(1) **อนุภาคนาโนไคโตซาน** ผลการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซานพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนกักเก็บ เมื่อเปรียบเทียบกับที่กักเก็บสารแล้วนั้นมีค่าต่างกัน โดยก่อนการกักเก็บอนุภาคนาโนไคโตซานมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $+30$ มิลลิโวลต์ ดังแสดงว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีในสภาวะที่เป็นคอลลอยด์ และยังแสดงถึงการเกิดอนุภาคนาโนไคโตซานที่มีความเสถียรด้วย เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะบ่งบอกได้ว่าหมู่อะมิโนที่ยาวซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างไคโตซานนั้นจะขัดขวางการดูดซับประจุลบ ทำให้รักษาระดับค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นที่ห่อหุ้มอนุภาค จึงป้องกันการตกตะกอนของอนุภาค (Partha *et al.*, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการศึกษาประจุบนผิวของอนุภาคนาโนไคโตซานพบว่ามีประจุบวก บ่งบอกถึงหมู่อะมิโนของไคโตซานที่ถูกเติมโปรตอนเข้าไปพบได้บนผิวของอนุภาค (Harris *et al.*, 2010)

(2) **อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคส** การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -31.6 ± 3.8 มิลลิโวลต์ ซึ่งพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซานเปลี่ยนไปเมื่อกักเก็บกลูโคสแล้ว และได้ค่ามากกว่า -30 มิลลิโวลต์ แสดงว่าอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสมีความเสถียร ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันได้ง่าย ภายในอนุภาคนาโนไคโตซานประจุลบจากกลูโคสเมื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับไคโตซานซึ่งมีประจุบวกจากหมู่อะมิโนแล้ว ทำให้สภาพประจุรวมบนผิวของอนุภาคที่เตรียมได้มีค่าเป็นลบ เนื่องจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างประจุบวกของไคโตซานกับประจุลบของกลูโคสเกิดขึ้นอย่างอ่อน แต่ยังสามารถเกิดการสร้างตัวเป็นโครงร่างของอนุภาคนาโนไคโตซานได้ (Yan *et al.*, 2005)

(3) **อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล** ผลการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลมีค่าเท่ากับ -48.4 ± 5.6 มิลลิโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซานแล้วพบว่าประจุบนผิวของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป จากประจุบวกเป็นประจุลบที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีความเสถียร เมื่อมีการกักเก็บสารภายในอนุภาคนาโนไคโตซานทำให้ประจุรวมบนผิวของอนุภาคนาโนมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยสารที่นำมากักเก็บอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงประจุ

โดยแอลฟาโทโคฟีรอลซึ่งมีประจุเป็นลบอยู่ภายในโมเลกุลมาก ทำปฏิกิริยากับประจุบวกของไคโตซานจึงได้มีข้อเสนอแนะว่าเกิดจากการแทรกโมเลกุลของสารเข้าไปภายในอนุภาคนาโนไคโตซานแล้วทำให้ประจุผิวโดยรวมของโมเลกุลเปลี่ยนไป (Majid *et al.*, 2010)

(4) **อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล** ผลการวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล พบว่าได้ค่าเท่ากับ -20.3 ± 4.02 มิลลิโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานแล้วพบว่าประจุบนผิวอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปเป็นประจุลบ และมีค่าศักย์ซีต้าน้อยลง แสดงให้เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนไคโตซานที่มีการกักเก็บสารสองชนิดพร้อมกันมีความเสถียรน้อยกว่ากักเก็บสารเพียงชนิดเดียว เนื่องจากค่าศักย์ซีต้าได้ค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $+30$ ถึง -30 มิลลิโวลต์ แสดงว่าอนุภาคที่กักเก็บสารทั้งสองชนิดมีความเสถียรน้อยกว่าการกระจายตัวของอนุภาคเมื่ออยู่ในสภาพคอลลอยด์ได้ไม่ดีเท่ากับอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บสารเพียงชนิดเดียว

ตารางที่ 4.8

สรุปการวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนและหลังการกักเก็บสาร

ชนิดของอนุภาค	ค่าศักย์ซีต้า $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิโวลต์)
อนุภาคนาโนไคโตซาน	$+30.0 \pm 4.54$
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคส	-31.6 ± 3.80
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล	-48.4 ± 5.60
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล	-20.3 ± 4.02

4.3.2.2 การวัดค่าศักย์ซีต้าหลังการปลดปล่อย

(1) **อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคส** การวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานหลังการปลดปล่อยกลูโคสพบว่ามีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับ -21 ± 2.91 มิลลิโวลต์ ซึ่งพบว่าค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานหลังปลดปล่อยกลูโคสแล้ว เมื่อเทียบกับการกักเก็บนั้นมีค่าลดลง และได้ค่าน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ แสดงว่าอนุภาคนาโนไคโตซานหลังจากปลดปล่อยกลูโคสมีความเสถียรน้อย เกิดการเกาะกลุ่มกันได้ง่าย เมื่อกลูโคสถูกปลดปล่อยจากอนุภาคนาโน

ไคโตซานแล้ว กลูโคสซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้จึงได้เกิดการแพร่ออกมาภายนอกทำให้ประจุบนผิวโดยเป็นลบ

(2) **อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล** การวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลพบว่ามีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับ -19 ± 3.82 มิลลิโวลต์ ซึ่งพบว่าค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานเมื่อปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแล้วได้ค่าน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้ก่อนการปลดปล่อยซึ่งมีค่าเป็นลบมากกว่า แสดงว่าอนุภาคมีความเสถียรน้อยกว่า เมื่อแอลฟาโทโคฟีรอลถูกปลดปล่อยจากอนุภาคนาโนไคโตซานแล้ว แอลฟาโทโคฟีรอลซึ่งเป็นสารที่ละลายไม่น้ำอาจเกิดการแทรกตัวออกมาภายนอก และโมเลกุลของแอลฟาโทโคฟีรอลที่มีประจุเป็นลบ จึงทำให้ประจุบนผิวอนุภาคโดยรวมเป็นลบ

(3) **อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล** ผลการวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล มีค่าเท่ากับ -18.6 ± 3.33 มิลลิโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานที่ปลดปล่อยสารเพียงชนิดเดียวแล้วพบว่าประจุบนผิวอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง และมีค่าศักย์ซีต่าน้อยลงอย่างใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนไคโตซานที่มีการปลดปล่อยสารสองชนิดพร้อมกันมีความเสถียรน้อยกว่ากักเก็บสารเพียงชนิดเดียว เนื่องจากค่าศักย์ซีต้าได้ค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $+30$ ถึง -30 มิลลิโวลต์ แสดงว่าอนุภาคที่ปลดปล่อยสารทั้งสองชนิดมีความเสถียรน้อยกว่า การกระจายตัวของอนุภาคเมื่ออยู่ในสภาพคอลลอยด์ได้ไม่ดีเท่ากับอนุภาคนาโนไคโตซานที่กักเก็บสารเพียงชนิดเดียว

ตารางที่ 4.9

สรุปการวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคนาโนไคโตซานหลังการปลดปล่อย

ชนิดของอนุภาค	ค่าศักย์ซีต้า $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิโวลต์)
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคส	-21 ± 2.91
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล	-19 ± 3.82
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล	-18.6 ± 3.33

ตารางที่ 4.10

สรุปขนาดอนุภาคและค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคนาโนไคโตซาน

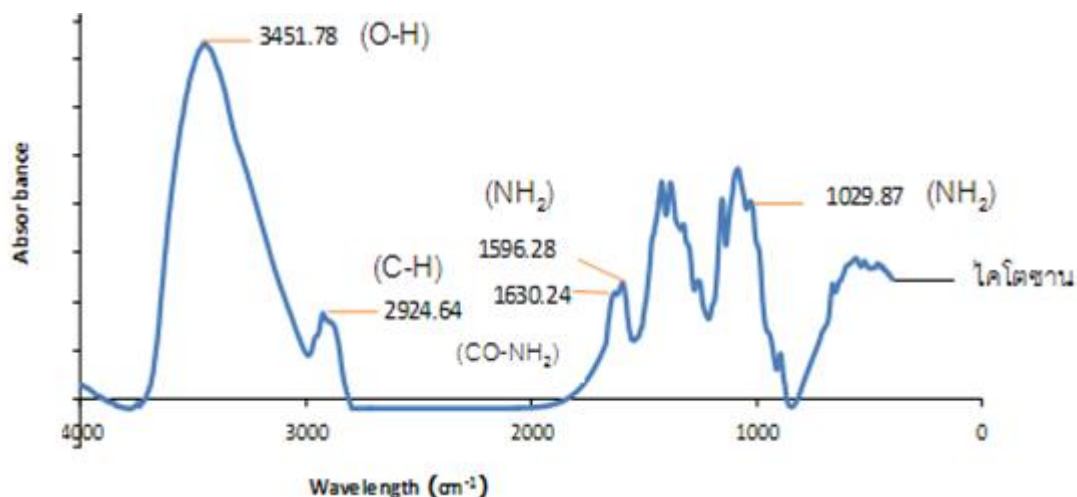
ชนิดของอนุภาค	ขนาดอนุภาค $\pm$ ค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน (นาโนเมตร)	ค่าศักย์ไฟฟ้า $\pm$ ค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน (มิลลิโวลต์)
อนุภาคนาโนไคโตซาน	70.70 ± 6.50	$+30.00 \pm 4.54$
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคส	78.38 ± 19.20	-31.60 ± 3.80
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคส	69.50 ± 18.00	-21.00 ± 2.91
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล	111.78 ± 19.00	-48.4 ± 5.60
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล	72.50 ± 4.60	-19.00 ± 3.82
อนุภาคนาโนไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล	121.00 ± 10.00	-20.30 ± 4.02
อนุภาคนาโนไคโตซานปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล	84.40 ± 13.00	-18.60 ± 3.33

4.4 ศึกษาองค์ประกอบของอนุภาคนาโนไคโตซานในการกักเก็บและปลดปล่อยสารโดยใช้เทคนิค Transmission-resolved Fourier Transform Infrared spectroscopy (TR-FTIR)

4.4.1 ศึกษาการกักเก็บสาร

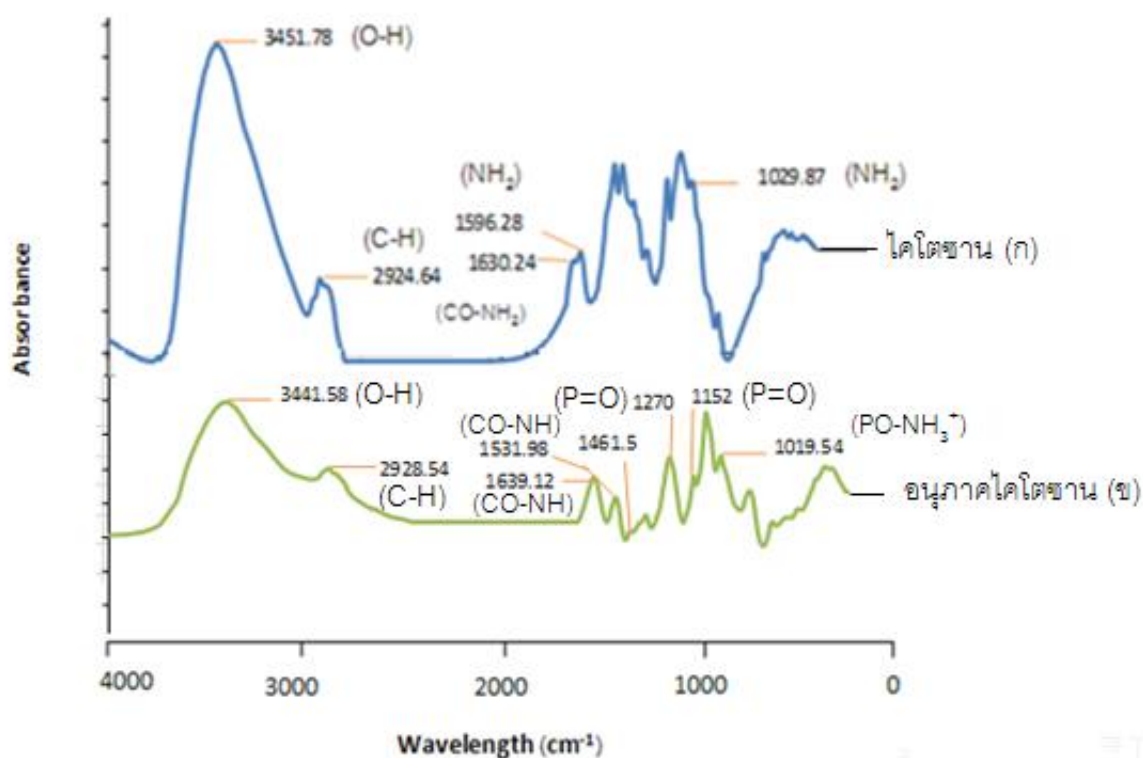
4.4.1.1 การเกิดอนุภาคนาโนไคโตซาน จากการศึกษาลักษณะการวัด FTIR สเปกตรัมของอนุภาคไคโตซานโดยใช้เทคนิค TR-FTIR ดังแสดงในภาพที่ 4.33 พบว่าสเปกตรัมของไคโตซานมีโครงสร้างในส่วนของหมู่เอมีน เอไมด์ ไฮดรอกซิล ที่ตำแหน่ง 3451.78 cm^{-1} เป็นหมู่เอมีน N-H และมีหมู่ไฮดรอกซิล -OH ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ไคโตซานโดยวิธี FTIR พบตำแหน่งที่ 3446.94 cm^{-1} และตำแหน่งที่ 2924.74 cm^{-1} เป็นหมู่ของอัลเคน ที่มีการยืดสายโซ่ตรงของ C-H ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น $2936\text{-}2916 \text{ cm}^{-1}$ (Majid *et al.*, 2010) ตำแหน่งที่ 1029 cm^{-1} และ

1630.24 เป็นหมู่เอมีนและหมู่เอไมด์ตามลำดับ ซึ่งตรงกับช่วงคลื่น 1638-1618 cm^{-1} และตำแหน่งที่ 1596.28 เป็นพีคของหมู่เอมีนซึ่งอยู่ในช่วง 1650-1590 cm^{-1} ของไคโตซาน



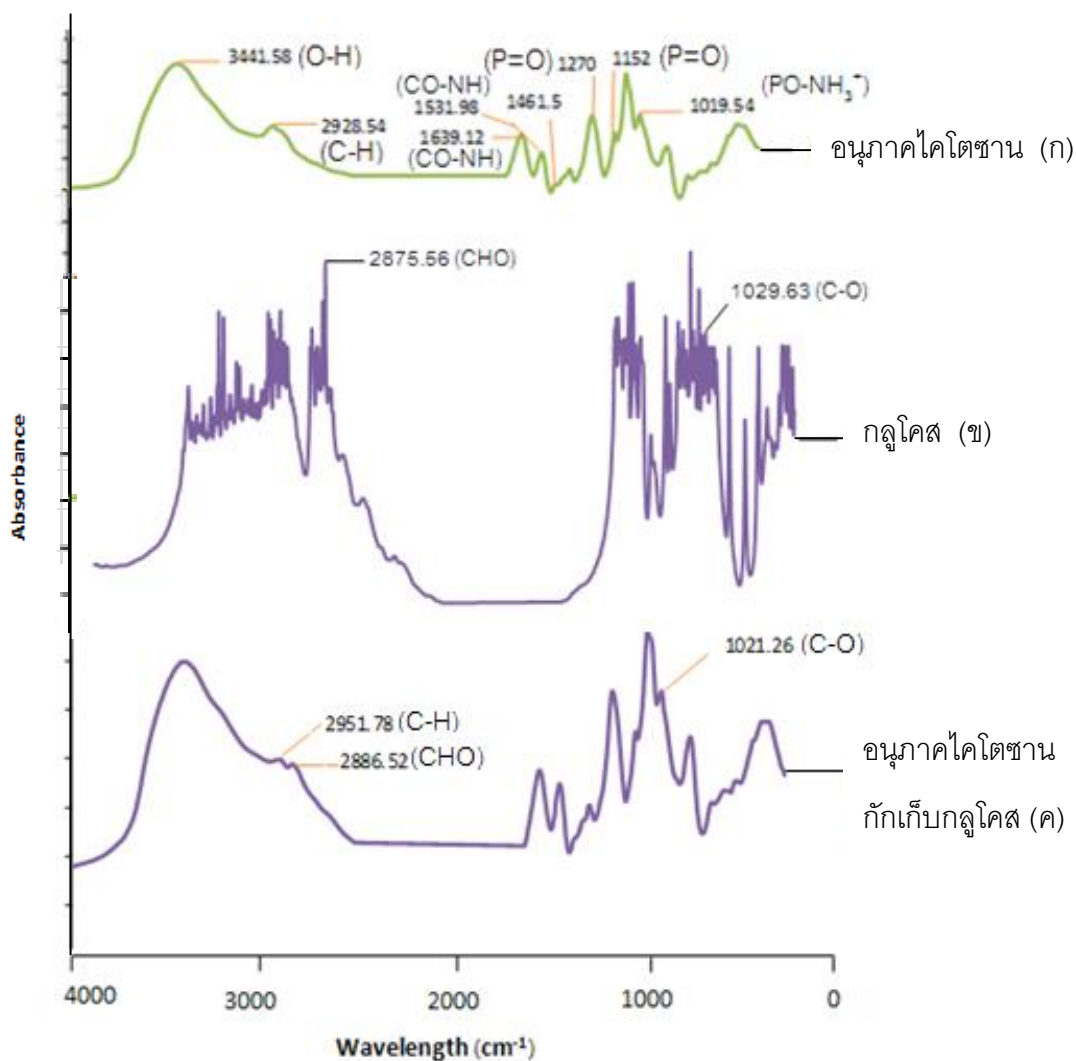
ภาพที่ 4.33 สเปกตรัมของไคโตซานวัดโดยใช้เทคนิค TR-FTIR

เมื่อนำสเปกตรัมของไคโตซานเปรียบเทียบกับอนุภาคไคโตซานพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงคือมีพีคที่ตำแหน่ง 1019.54 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมา ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมของไคโตซานเพียงอย่างเดียวเป็นพีคที่ได้จากการเชื่อมกันระหว่างหมู่ฟอสเฟตของ TPP กับหมู่เอมีนของไคโตซาน และพีคที่ตำแหน่ง 1152.28 cm^{-1} ซึ่งตรงกับช่วงคลื่น 1200-1150 cm^{-1} แสดงว่ามีการเชื่อมพันธะต่อกัน ทำให้เกิดเป็นอนุภาคไคโตซาน สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางด้วยหมู่ฟอสเฟตในพีคที่ตำแหน่ง 1155 cm^{-1} ส่วนในตำแหน่งที่ 1270 cm^{-1} เป็นหมู่ฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งอยู่ในช่วง 1300-1250 cm^{-1} และตำแหน่งที่ 1029 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของเอมีนได้หายไป (Devika *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล-OH ที่ตำแหน่ง 3424.39 cm^{-1} อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3500-3300 cm^{-1} ในตำแหน่งที่ 2928.54 cm^{-1} เป็นพีคที่อาจเกิดจากการยืดของสาย C-H ส่วนพีค 1639.12 cm^{-1} เป็นพีคของหมู่เอไมด์ ที่มี C=O และ N-H ที่เชื่อมกันอยู่ในโมเลกุลของอนุภาคไคโตซาน นอกจากนี้ยังมีหมู่เอมีน -NH₂ ตรงกับความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วง 1680-1630 cm^{-1} และที่ตำแหน่ง 1531.98 cm^{-1} เป็นพีคของหมู่เอไมด์ที่มีการโค้งงอของหมู่เอมีน N-H ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1570-1515 cm^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.34 สเปกตรัมของโคโคเอนเปรียบเทียบกับอนุภาคโคโคเอนวัดโดยใช้เทคนิคTR-FTIR :
(ก) โคโคเอน และ (ข) อนุภาคโคโคเอน

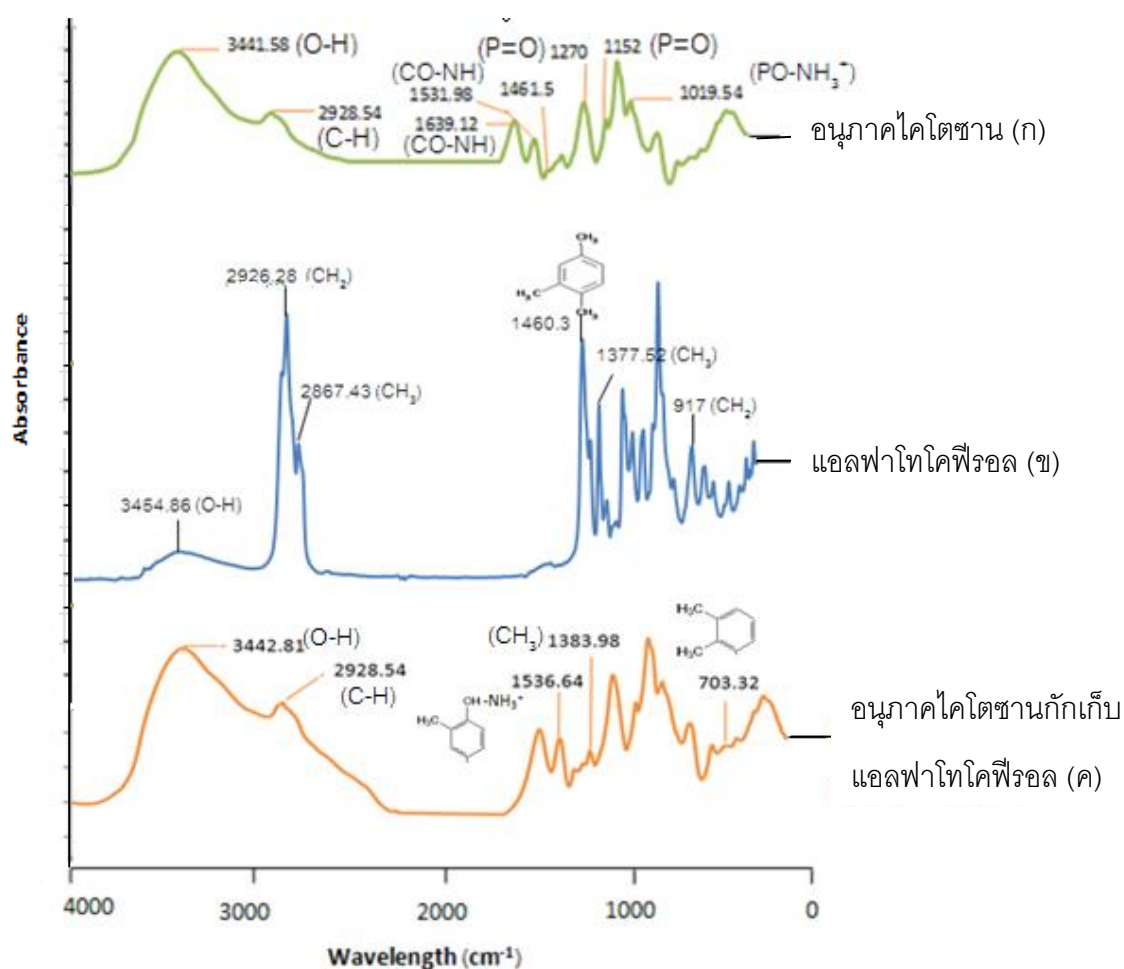
4.4.1.2 การเกิดอนุภาคโคโคเอนกักเก็บกลูโคส จากการศึกษาสเปกตรัมของอนุภาคโคโคเอนกักเก็บกลูโคส มีพีคที่ตำแหน่ง 2886.52 cm^{-1} เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของอนุภาคโคโคเอน ซึ่งเป็นหมู่แอลดีไฮด์ -CHO ของกลูโคสที่เด่นชัดขึ้นมาตรงกับพีคของหมู่แอลดีไฮด์ที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น $2900-2800 \text{ cm}^{-1}$ โดยมีการจับกันของ C-H ที่เกิดจากการยึดและสั้นของสายโซ่ตรงภายในโมเลกุล ส่วนตำแหน่งที่ 1021.26 cm^{-1} เป็นหมู่ของ CH_2OH บ่งถึงพันธะ C-O ตรงกับในช่วงคลื่น $1075-1000 \text{ cm}^{-1}$ (Jiemei *et al.*, 2010) ซึ่งตรงกับสเปกตรัมของกลูโคสที่ตำแหน่ง 1029.63 cm^{-1} เป็นพันธะของ C-O และหมู่แอลดีไฮด์ของกลูโคสที่ตำแหน่ง 2875.56 cm^{-1} (Cyril *et al.*, 1999) นอกจากนี้ที่พีค 2951.78 cm^{-1} เป็นพีคที่ได้จากการยึดของ C-H ภายในโมเลกุลของกลูโคส (Medhat *et al.*, 2006) ที่มีการจับกับหมู่อะมิโนของโคโคเอน อาจเกิดเนื่องจากการ protonate ของหมู่อะมิโนในโคโคเอน แล้วจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคส ซึ่งตรงกับพีคในช่วงคลื่น $2936-2916 \text{ cm}^{-1}$ จึงทำให้เกิดการกักเก็บกลูโคสภายในอนุภาคโคโคเอน ดังแสดงในภาพที่ 4.35



ภาพที่ 4.35 สเปกตรัมของอนุภาคไคโตซานเปรียบเทียบกับอนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคสวัดโดยใช้เทคนิค TR-FTIR : (ก) อนุภาคไคโตซาน, (ข) กลูโคส และ(ค) อนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคส

4.4.1.3 การเกิดอนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล จากการศึกษาสเปกตรัมของอนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล พบว่ามีพีคที่ 2928.54 cm^{-1} เป็นพีคที่ชัดเจนซึ่งมีการยืดออกของ C-H แบบไม่สมมาตร ซึ่งตรงกับพีคที่อยู่ในช่วง $2936\text{--}2916\text{ cm}^{-1}$ โดยตรงกับพีคของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตำแหน่ง 2926.28 cm^{-1} เป็นส่วนของ CH_2 เป็นโครงสร้างส่วนที่มีการสั่นสะเทือน พร้อมกับมีการยืดออกแบบไม่สมมาตร (Che *et al.*, 2005) และที่ตำแหน่ง 917 cm^{-1} เป็นตัวแทนของหมู่แอลเคนที่มีการยืดของ CH_2 แบบทรานส์ เปลี่ยนแปลงไปเป็นตำแหน่ง 703.32 cm^{-1} เป็นพีคที่เป็นตัวแทนของวงอะโรมาติก ซึ่งเป็นโครงสร้างในโมเลกุลของแอลฟาโทโคฟีรอลตรงกับพีคที่ความยาวคลื่น $710\text{--}690\text{ cm}^{-1}$ (Man *et al.*, 2005) เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของอนุภาคนาโนไคโตซานที่ 1531.98 cm^{-1} เป็นตัวแทนของหมู่เอไมด์ที่เกิดการโค้งงอของ NH เปลี่ยนแปลงไปเป็นพีคที่ตำแหน่ง 1536.64 cm^{-1} ซึ่งมีความเป็นไปได้มากที่สุดคือเกิดจากการทำ

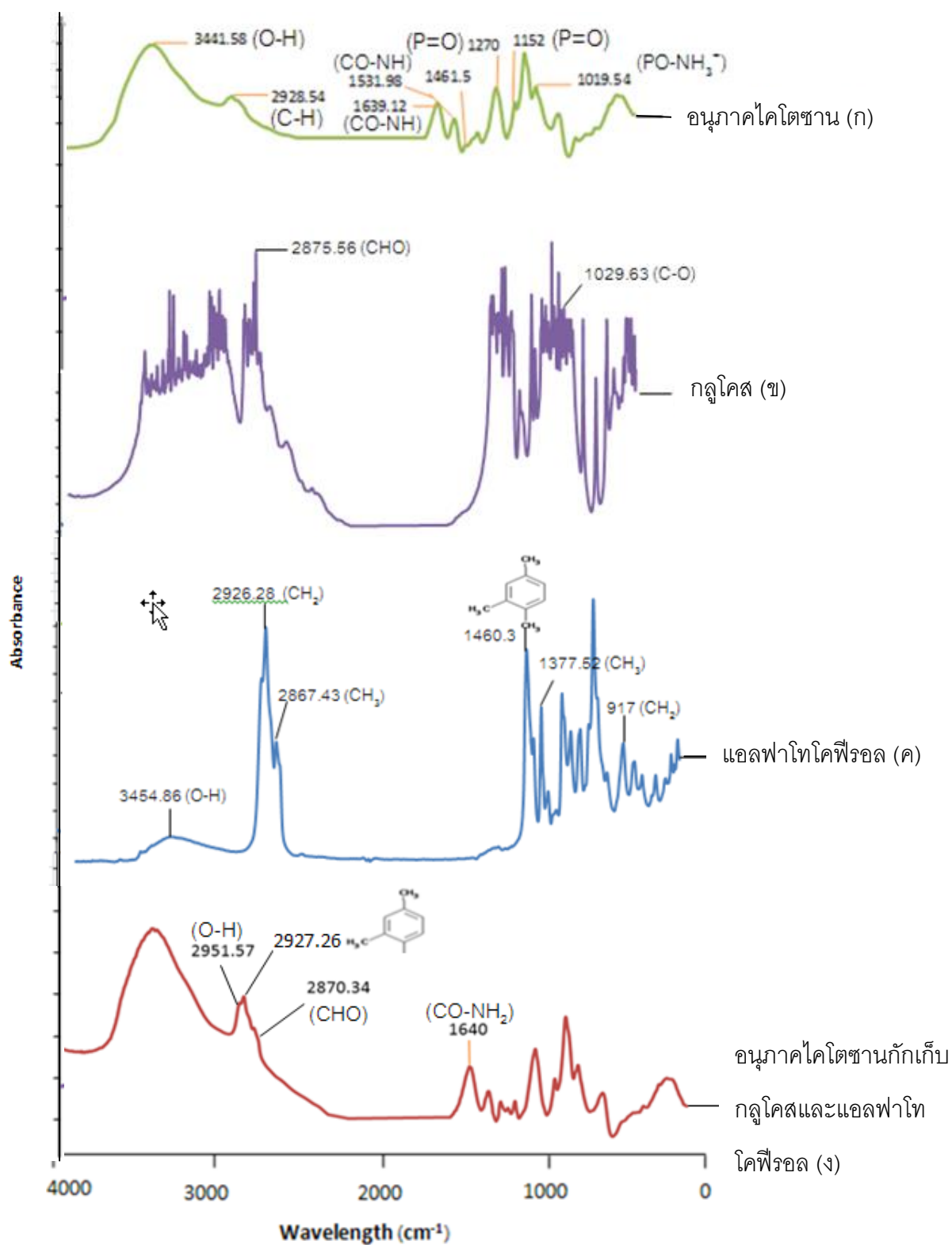
ปฏิกิริยากันระหว่างหมู่อะมิโนของไคโตซานกับวงอะโรมาติกของแอลฟาโทโคฟีรอล (Majid *et al.*, 2010) จึงทำให้เกิดเป็นอนุภาคไคโตซานที่กักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล นอกจากนี้พีกที่ตำแหน่ง 1383.98 cm^{-1} เป็นหมู่เมทิลที่เกิดการโค้งงอแบบไม่สมมาตรซึ่งตรงกับในช่วงคลื่นที่ตำแหน่ง $1385\text{-}1380\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งตรงกับสเปกตรัมของแอลฟาโทโคฟีรอลในตำแหน่ง 1377.52 cm^{-1} ซึ่งเป็นการงอของหมู่เมทิลได้อีกที่ตำแหน่ง (Che *et al.*, 2005 & Samdra *et al.*, 2009) ดังแสดงในภาพที่ 4.36 นอกจากนี้ยังพบตำแหน่งสเปกตรัมตำแหน่งที่สำคัญของแอลฟาโทโคฟีรอล ได้แก่ 3454.86 cm^{-1} เป็นตัวแทนของหมู่ไฮดรอกซิล (Sandra *et al.*, 2009) ตรงกับสเปกตรัมอนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลในตำแหน่งที่ 3442.81 cm^{-1}



ภาพที่ 4.36 สเปกตรัมของอนุภาคไคโตซานเปรียบเทียบกับอนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอลวัดโดยใช้เทคนิค ATR-FTIR และ TR-FTIR : (ก) อนุภาคไคโตซาน, (ข) แอลฟาโทโคฟีรอล และ (ค) อนุภาคไคโตซานกักเก็บแอลฟาโทโคฟีรอล

4.4.1.4 การเกิดอนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล สเปค

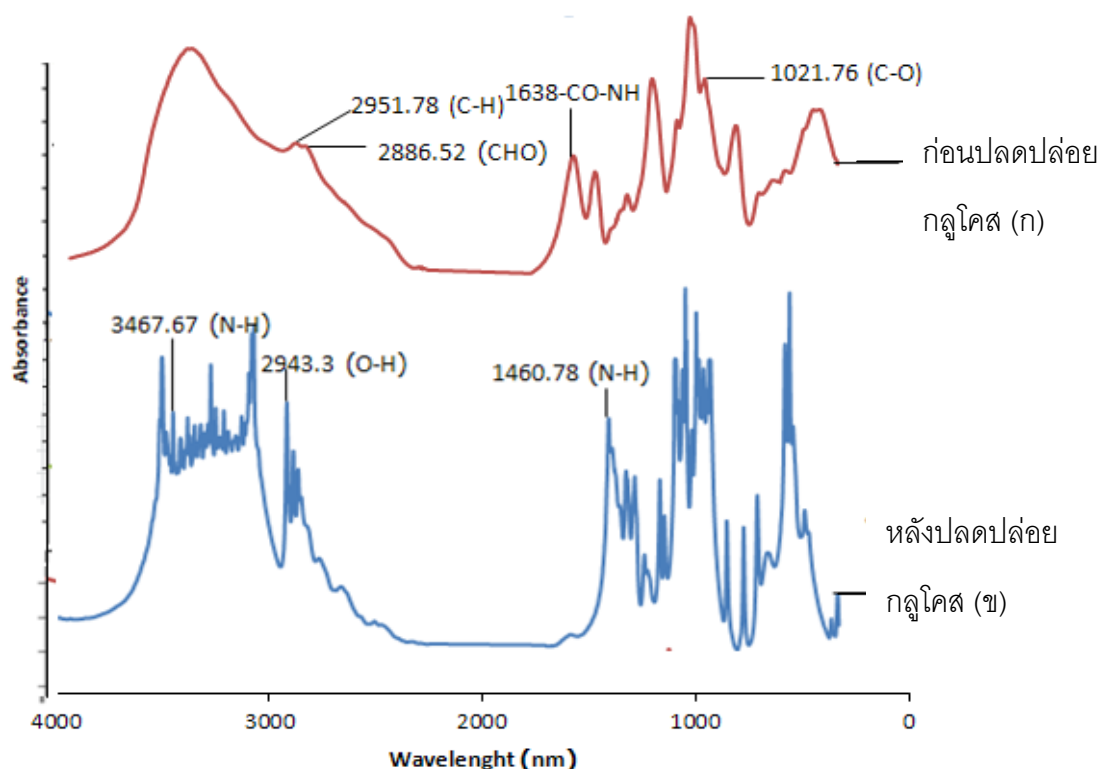
ตราของอนุภาคไคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล เมื่อเปรียบเทียบกับ สเปกตราของอนุภาคไคโตซาน พบว่ามีพีคอ่อนที่ตำแหน่ง 2870.34 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมาแสดงถึงหมู่แอลดีไฮด์ CHO และมีการยืดของ C-H อยู่ภายใน ตรงกับช่วงคลื่น $2900\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นหมู่แอลดีไฮด์ในโมเลกุลกลูโคส ซึ่งตรงกับสเปกตราของกลูโคสคือในตำแหน่ง 2875.56 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่แอลดีไฮด์ (Cyril *et al.*, 1999) รวมถึงหมู่เมทิลของแอลฟาโทโคฟีรอลที่มีการยืดออกแบบสมมาตร ซึ่งตรงกับพีคในช่วง $2882\text{-}2862\text{ cm}^{-1}$ ส่วนพีค 2951.57 cm^{-1} แสดงถึงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล OH ซึ่งมีพีคกว้างๆ อยู่ในช่วง $3100\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$ พีค 2927.26 cm^{-1} แสดงถึงตำแหน่งของหมู่ฟีนิลของแอลฟาโทโคฟีรอลเชื่อมกับหมู่เมทิล ในขณะที่พีคที่แข็งตำแหน่ง 1640 cm^{-1} แสดงถึงหมู่เอไมด์ของโมเลกุลไคโตซาน จากข้อมูลที่ได้แสดงว่าในอนุภาคไคโตซานมีโมเลกุลของกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 4.37



ภาพที่ 4.37 สเปกตรัมของอนุภาคโคโตซานเปรียบเทียบกับอนุภาคโคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลวัดโดยใช้เทคนิค ATR-FTIR และ TR-FTIR : (ก) อนุภาคโคโตซาน, (ข) กลูโคส, (ค) แอลฟาโทโคฟีรอล และ (ง) อนุภาคโคโตซานกักเก็บกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล

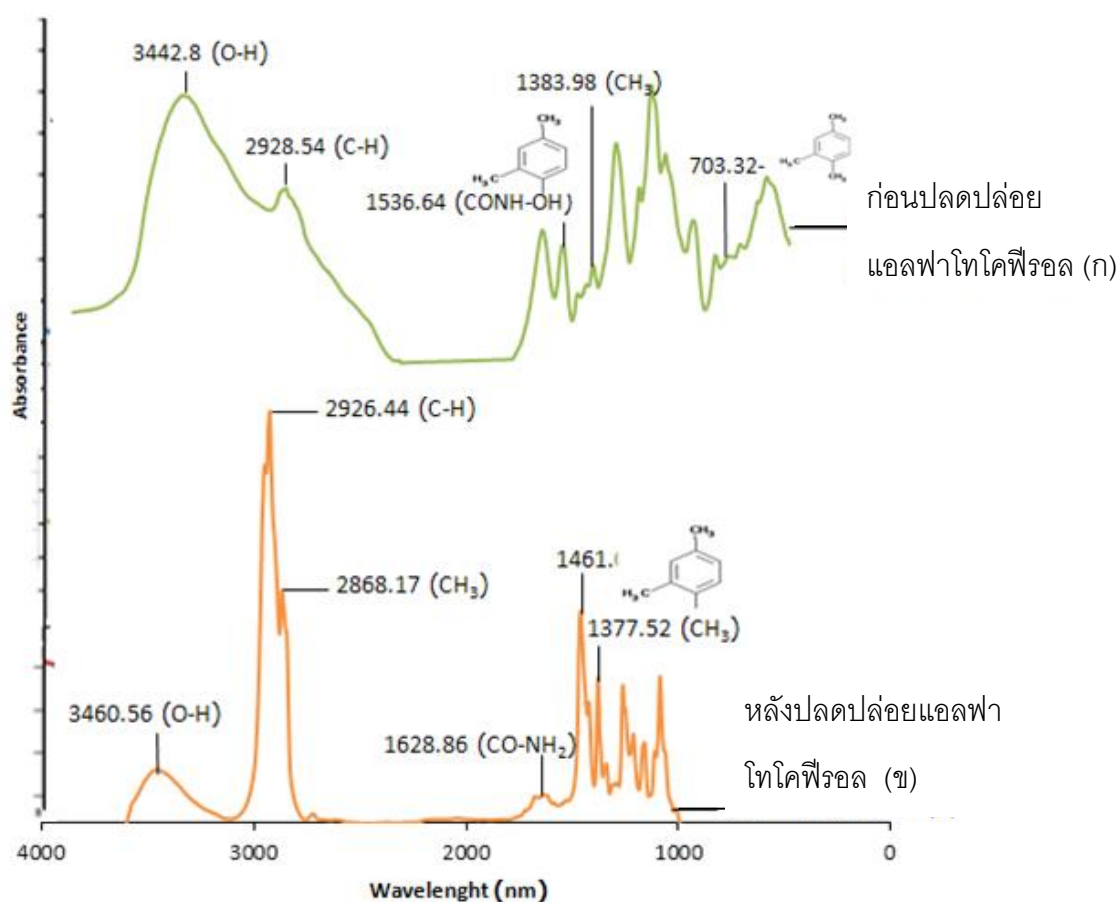
4.4.2 ศึกษาการปลดปล่อยสาร

4.4.2.1 การปลดปล่อยกลูโคส จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบสเปกตร้าของอนุภาคไคโตซานที่กักเก็บกลูโคสก่อนและหลังการปลดปล่อยพบว่าก่อนการปลดปล่อยสเปกตร้าที่ได้จะมีความคมและกว้างมากกว่าหลังปลดปล่อย (Yuan *et al.*, 2010) ดังภาพที่ 4.38 ซึ่งหลังการปลดปล่อยกลูโคสพบพีคที่ตำแหน่ง 3467.67 cm^{-1} เป็นส่วนของเอมีนที่มีการจับกันของ N-H (เอมีนทุติยภูมิ) ในไคโตซาน (Ping *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังมีพีคในตำแหน่งที่ 2943.3 cm^{-1} อยู่ในช่วงของหมู่ไฮดรอกซิลที่พบได้ในกลูโคส โดยมีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง 1638 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่เอไมด์ในช่วงก่อนการปลดปล่อยไปเป็นตำแหน่งที่ 1460.78 cm^{-1} ในช่วงหลังการปลดปล่อยแล้วเป็นหมู่เอมีน (N-H) โดยมีการ deprotonate ที่หมู่เอไมด์ในส่วนก่อนการปลดปล่อยทำให้โครงสร้างของอนุภาคนาโนไคโตซานเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงทำให้มีการปล่อยกลูโคสออกมา



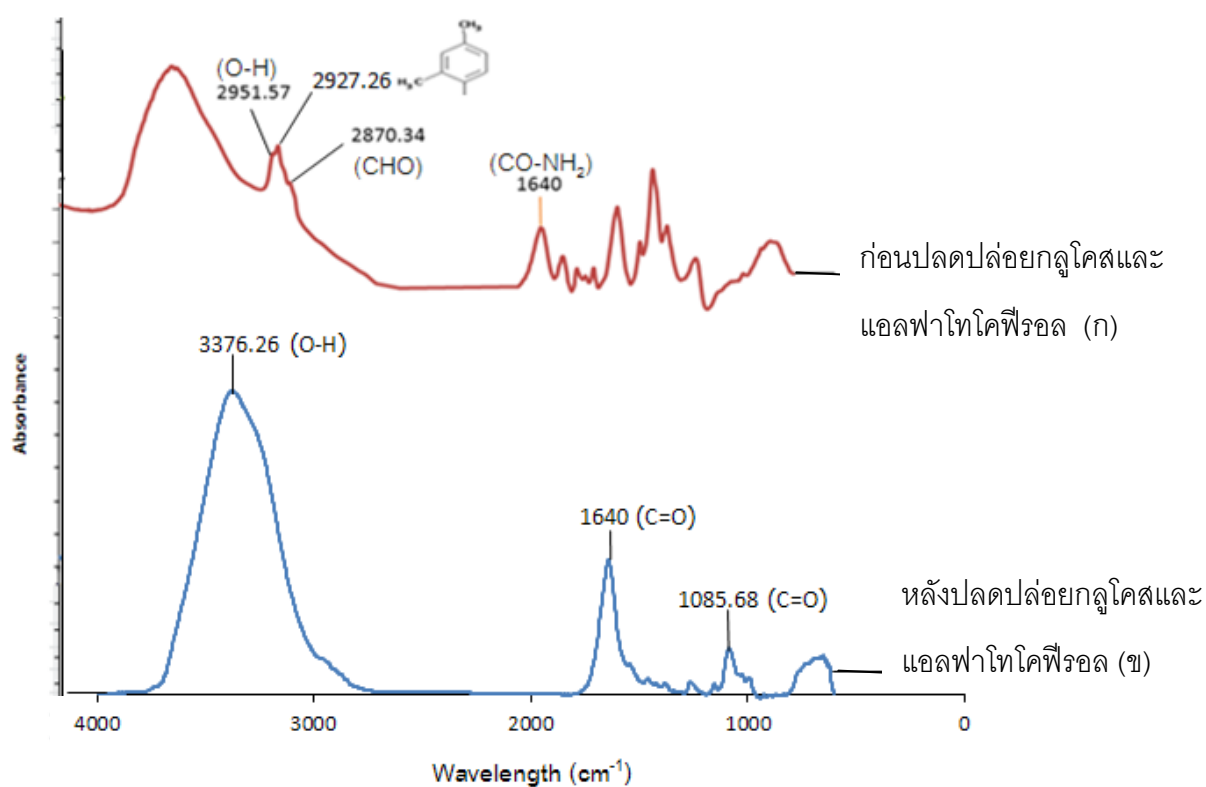
ภาพที่ 4.38 สเปกตรัมของอนุภาคไคโตซานก่อนและหลังปลดปล่อยกลูโคสวัดได้ใช้เทคนิค TR-FTIR : (ก) อนุภาคไคโตซานก่อนการปลดปล่อยกลูโคส และ (ข) อนุภาคไคโตซานหลังการปลดปล่อยกลูโคส

4.4.2.2 การปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล เมื่อเปรียบเทียบสเปกตราก่อนและหลังการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลพบว่าหลังการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลมีพีคที่ตำแหน่ง 3460.56 cm^{-1} เป็นหมู่ไฮดรอกซิลของแอลฟาโทโคฟีรอล ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 2868.17 cm^{-1} เป็นตัวแทนของการยืดแบบสมมาตรของหมู่เมทิล (Che *et al.*, 2005) นอกจากนี้พบว่ามีตำแหน่งที่ 1536.64 cm^{-1} ในสเปกตราก่อนการปลดปล่อยได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นตำแหน่ง 1461.05 cm^{-1} และ 1377.52 cm^{-1} เป็นโครงสร้างของหมู่ฟีนิล และหมู่เมทิลที่มีการโค้งงอแบบสมมาตรซึ่งพบได้ในแอลฟาโทโคฟีรอลหลังจากที่มีการปลดปล่อยจากอนุภาคนาโนโคโคซาน (Man *et al.*, 2005) ส่วนในสเปกตราก่อนการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลแล้วมีพีคที่ตำแหน่ง 1628.86 cm^{-1} เป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นมาจากก่อนการปลดปล่อย เป็นหมู่เอไมด์ของสายโคโคซานที่เกิดการคลายตัวของสายโคโคซานหลังการปลดปล่อย ดังภาพที่ 4.39



ภาพที่ 4.39 สเปกตรัมของอนุภาคโคโคซานก่อนและหลังปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอลวัดโดยใช้เทคนิค TR-FTIR : (ก) อนุภาคโคโคซานก่อนการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล และ (ข) อนุภาคโคโคซานหลังการปลดปล่อยแอลฟาโทโคฟีรอล

4.4.2.3 การปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล จากการศึกษาการปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลจากอนุภาคนาโนไคโตซาน นำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของอนุภาคนาโนไคโตซานก่อนการปลดปล่อยพบว่า หลังปลดปล่อยพบพีคที่ตำแหน่ง 3376.26 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนในตำแหน่ง 1640 cm^{-1} เป็นพีคของเอไมด์ (CO-NH) โดยมีการยืดของ C=O พบได้ในไคโตซานหลังจากที่มีการปลดปล่อยสารทั้งสองชนิดแล้ว รวมถึงตำแหน่ง 1085 cm^{-1} เป็นการยืดและสั่นของหมู่ C=O ในไคโตซาน (Kamlesh & Usha, 2011) ซึ่งหมู่เมทิลที่เชื่อมกับฟีนิลของแอลฟาโทโคฟีรอลและหมู่อัลดีไฮด์ของกลูโคสที่พบได้ในสเปกตราก่อนการปลดปล่อยได้หายไปแสดงว่ามีการปลดปล่อยสารทั้งสองชนิดจากอนุภาคนาโนไคโตซาน ดังภาพที่ 4.40



ภาพที่ 4.40 สเปกตรัมของอนุภาคไคโตซานก่อนและหลังปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอลวัดโดยใช้เทคนิค TR-FTIR : (ก) อนุภาคไคโตซานก่อนการปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล และ(ข) อนุภาคไคโตซานหลังการปลดปล่อยกลูโคสและแอลฟาโทโคฟีรอล