

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การศึกษาการผลิตนาโนแคปซูลเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ในงานวิจัยนี้ แบ่งการศึกษาออกเป็นสองขั้นตอนหลัก คือ การผลิตนาโนแคปซูล ซึ่งในขั้นตอนแรกจะทำการทดลองเพื่อผลิตนาโนแคปซูลให้มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กที่เหมาะสม ได้นาโนแคปซูลที่มีขนาดในช่วงเล็กกว่าไมโครเมตร (หลายสิบถึงหลายร้อยนาโนเมตร) และมีลักษณะภายนอกเหมาะสมในการไปผลิตเป็นเครื่องสำอาง ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของกระบวนการเอนแคปซูลชันและการปลดปล่อยเคอร์คูมิน จากนาโนแคปซูลที่ผลิตได้ ผลการทดลองที่ได้จะแสดงไว้ในลำดับถัดไป

4.1 ผลเบื้องต้นของการเตรียมนาโนแคปซูล

4.1.1 ผลการทดสอบการละลายของโคโคซาน

จากการทดสอบการละลายของโคโคซานในกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้โคโคซาน 3 กรัม ต่อกกรด 100 cm³ ได้ลักษณะของสารละลายโคโคซานดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของโคโคซานในกรดอะซิติกแต่ละความเข้มข้น(โคโคซาน 3 % w/v)

กรดอะซิติก (%v/v)	ลักษณะของสารละลายโคโคซาน
0.1	เป็นเจลใสคล้ายสารละลาย
0.5	เป็นเจลใส
1.0	เป็นเจลใสมีความหนืด
1.5	เป็นเจลใสมีความหนืดเพิ่มขึ้น
2.0	เป็นเจลสีเหลืองมีความหนืด
2.5	เป็นเจลสีเหลืองมีความหนืดเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.1 พบว่ากรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 2.0 v/v ทำให้โคโคซานมีความเป็นเจลที่เหมาะสมต่อการผลิตเป็นแคปซูล ดังนั้นจึงเลือกใช้ที่ความเข้มข้นนี้ในการทำงานวิจัย

4.1.2 ผลการทดสอบการเตรียม O/W Emulsion

เริ่มต้นจากการเตรียมโคโคซานให้มีลักษณะก่อดัวเป็นอิมัลชันในน้ำ เพื่อสามารถหุ้มเคอร์คิวมินให้อยู่ภายในโครงสร้างของโคโคซาน ดังนั้นต้องเตรียมโคโคซานให้มีลักษณะที่เหมาะสมในการก่อดัวเป็นแคปซูล ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของโคโคซาน

ความเข้มข้นของโคโคซาน (%w/v)	ลักษณะของโคโคซาน	หมายเหตุ
1.0	โคโคซานมีสีใส ไม่ค่อยเป็นเจล	เตรียมแคปซูลไม่ได้
1.5	โคโคซานมีสีใสเริ่มเป็นเจล	เตรียมแคปซูลได้
2.0	โคโคซานมีสีใสเป็นเจล	เตรียมแคปซูลได้
2.5	โคโคซานมีสีเหลืองอ่อนเป็นเจล	เตรียมแคปซูลได้
3.0	โคโคซานมีสีเหลืองเป็นเจล	เตรียมแคปซูลได้
4.0	โคโคซานมีสีเหลือง เจลมีความหนืดสูง	หัว Homogenizer เสีย
5.0	โคโคซานมีสีเหลือง เจลมีความหนืดเพิ่มขึ้น	หัว Homogenizer เสีย
7.0	โคโคซานมีสีเหลือง เจลมีความหนืดสูงมาก	หัว Homogenizer เสีย

จากการทดลอง พบว่าโคโคซานที่มีความเหมาะสมในการก่อดัวเป็นแคปซูล อยู่ในช่วงความเข้มข้นของโคโคซาน 2.0-3.0 % w/v [2]

4.1.3 ผลการทดสอบการเตรียม O/W/O Emulsion

4.1.3.1 การเตรียม O/W/O Emulsion โดยใช้ Span 20 หรือ Span 80 ร่วมกับ Tween 80 เป็น ตัวทำอิมัลชัน (Emulsifier)

ขั้นตอนการเตรียม o/w/o อิมัลชันมีอธิบายอยู่ในหัวข้อ 3.2.1 ให้ข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วรอบ ชนิดของเครื่อง Homogenizer ฯลฯ

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของ o/w/o ของอิมัลชัน

NO.	ชนิดอิมัลซิฟายเออร์	อัตราส่วน (v/v)	HLB _{ของระบบ}	คุณลักษณะของอิมัลชัน
1	Tween 80 : Span 20	50/50	15.0	รวมตัวเป็นเนื้อเดียวหยาบๆ
2	Tween 80 : Span 80	50/50	15.0	รวมตัวเป็นเนื้อเดียวละเอียด
3	Tween 80 : Span 20	50/100	13.4	รวมตัวเป็นเนื้อเดียวหยาบๆ
4	Tween 80 : Span 80	50/100	7.5	รวมตัวเป็นเนื้อเดียวละเอียด
5	Tween 80 : Span 20	50/25	12.3	รวมตัวเป็นเนื้อเดียวหยาบๆ
6	Tween 80 : Span 80	50/25	13.3	รวมตัวเป็นเนื้อเดียวละเอียด

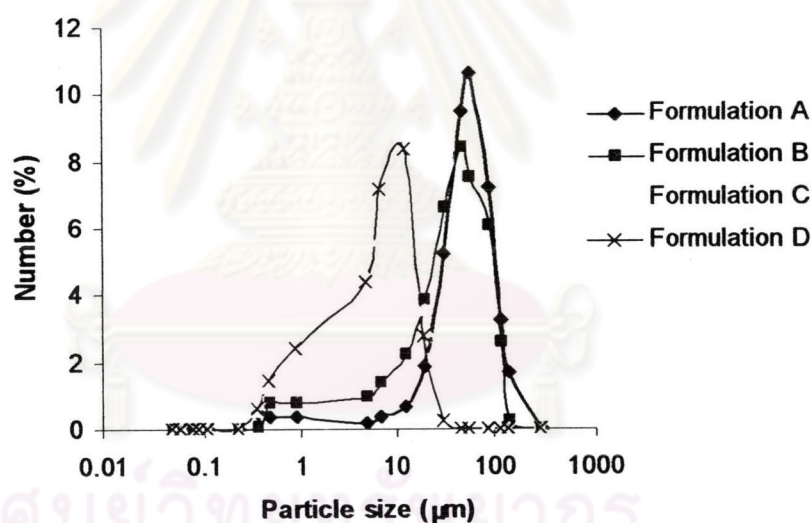
จากตาราง 4.3 พบว่า อิมัลซิฟายเออร์ Tween 80 : Span 80 อิมัลชันมีการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวละเอียด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกชนิดของอิมัลซิฟายเออร์ที่จะนำมาใช้ร่วมกันควรมีสสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน เพื่อให้มีความอึดตัวของส่วนประกอบที่ชอบน้ำและชอบน้ำมันในระดับที่เหมือนกัน จึงจะมีผลให้อิมัลชันมีความคงตัว [21]

เพื่อตรวจสอบผลกระทบของอัตราส่วนผสมระหว่าง Tween 80 กับ Span 20 และระหว่าง Tween 80 กับ Span 80 จึงได้ทำการทดลองสังเคราะห์และวัดขนาดของอนุภาคใน o/w/o emulsion ต่อไป

4.1.3.2 การเตรียม O/W/O Emulsion โดยใช้ Span 20 กับ Tween 80 เป็น ตัวทำ อิมัลชัน (Emulsifier)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของอิมัลชัน

Formulation	Span 20 : Tween 80 (v/v)	HLB _{ของระบบ}	ขนาดอนุภาค ± SD (μm)
A	50/150	5.2	57.6 ± 7.85
B	75/150	6.1	35.15 ± 8.59
C	100/150	7.0	10.4 ± 17.48
D	150/150	7.5	8.47 ± 9.16



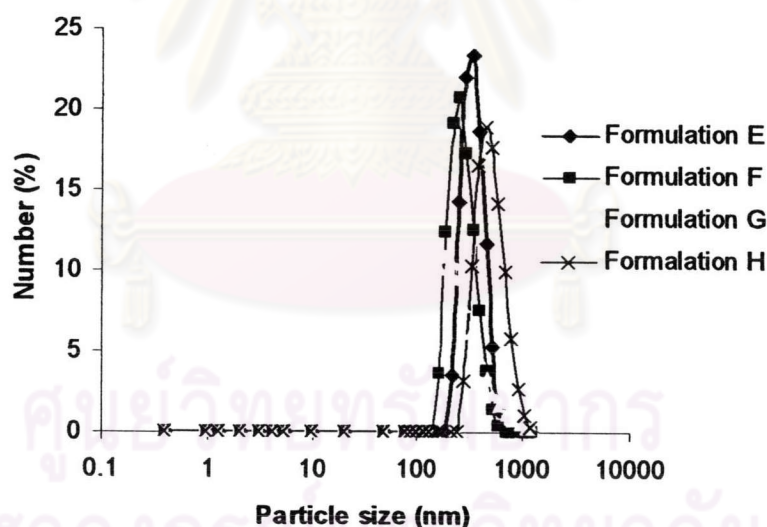
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ O/W/O Emulsion

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion และรูปที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion พบว่าอัตราส่วนระหว่าง Span 20 : Tween 80 ที่ 150/150 v/v ทำให้ขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion เล็กที่สุด คือ 8.47 μm และมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบ ทั้งนี้คาดว่าส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากใช้สัดส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ ปริมาณพอเพียง ที่คู่ควรอย่างแข็งแรงที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำมัน จึงทำให้ได้ขนาดของอนุภาคเล็กตามความต้องการ

4.1.3.3 เตรียม O/W/O Emulsion โดยใช้ Span 80 กับ Tween 80 เป็น ตัวทำอิมัลชัน (Emulsifier)

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของอิมัลชัน

Formulation	Span 80 : Tween 80 (v/v)	HLB _{ของระบบ}	ขนาดอนุภาค \pm SD (nm)
E	50/50	15.0	451.4 \pm 6.29
F	60/40	13.3	431.5 \pm 6.13
G	70/30	11.7	426.0 \pm 12.22
H	80/20	10.0	552.7 \pm 18.25



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion

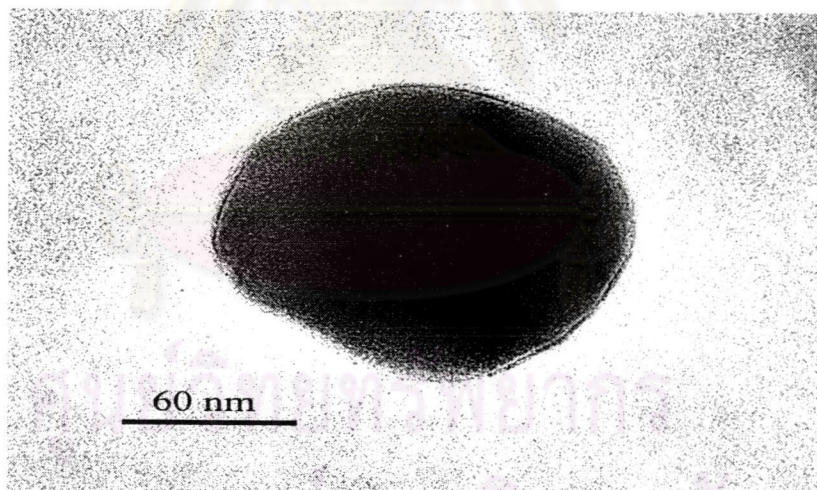
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion โดยใช้ Span 80 กับ Tween 80 เป็น ตัวทำอิมัลชัน และรูปที่ 4.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion พบว่าอัตราส่วนระหว่าง Span 80 : Tween 80 ที่ 50/50 60/40 และ 70/30 v/v มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 451.4 431.5 และ 426.0 nm ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายขนาดอนุภาค

ของ O/W/O Emulsion ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้คาดว่าส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการเติมสัดส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ในปริมาณพอเพียง จึงเกิดการคูดซบอย่างแข็งแรงที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำมัน และมีค่า HLB ของระบบที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 11.7-13.3 ซึ่งทำให้อิมัลชันมีความคงตัวและได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็ก ในระหว่างที่ 80/20 v/v มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดคือ 552.7 nm และการกระจายขนาดอนุภาคกว้างที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของอิมัลซิไฟเออร์ปริมาณมากเกินไป จะส่งผลทำให้ขนาดอนุภาคของ O/W/O Emulsion มีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้น และการกระจายขนาดอนุภาคกว้างขึ้น อาจเนื่องมาจากอิมัลซิไฟเออร์ที่เหลือรวมตัวกันจับกับอนุภาคของแคปซูล

4.1.4 ผลการทดสอบการเตรียมนาโนแคปซูล (ไลโปซอมนที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาอัลดีไฮด์)

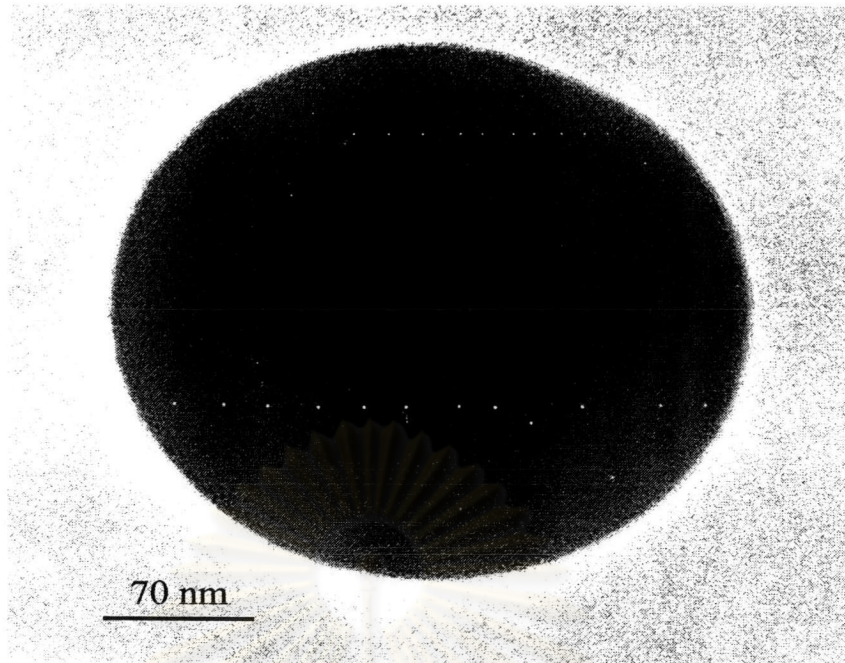
เมื่อเตรียมนาโนแคปซูล โดยใช้สูตร O/W/O Emulsion ตามตารางที่ 4.4 ปรากฏได้นาโนแคปซูลหลังอบแห้งที่มีลักษณะเป็นผงมีสีน้ำตาลอ่อน

จากนั้นศึกษาสัณฐาน (Morphology) ของนาโนแคปซูลที่ผลิตได้โดย Transmission Electron microscope (TEM) ดังรูป 4.3 - 4.6

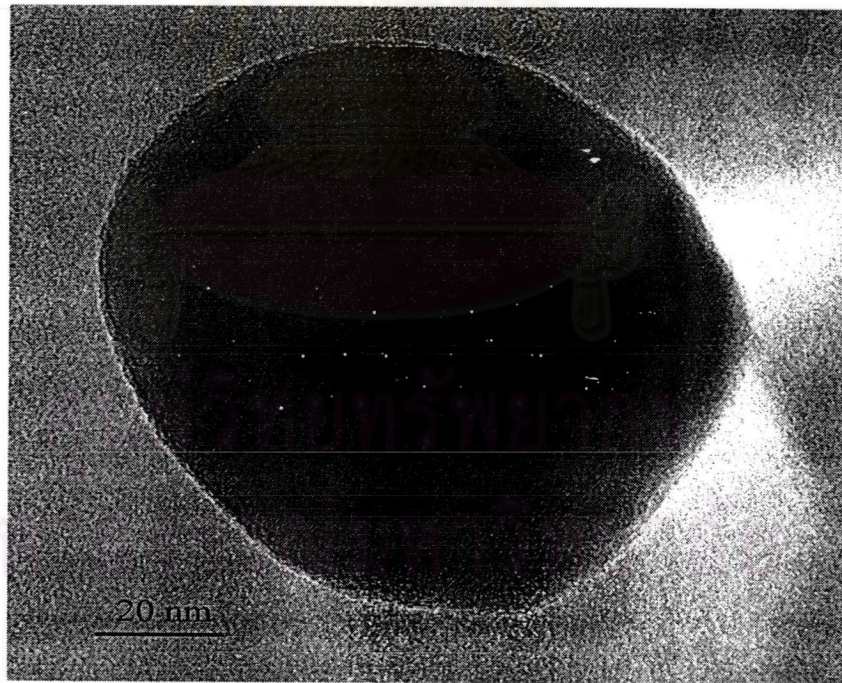


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างนาโนแคปซูล Formulation (E)

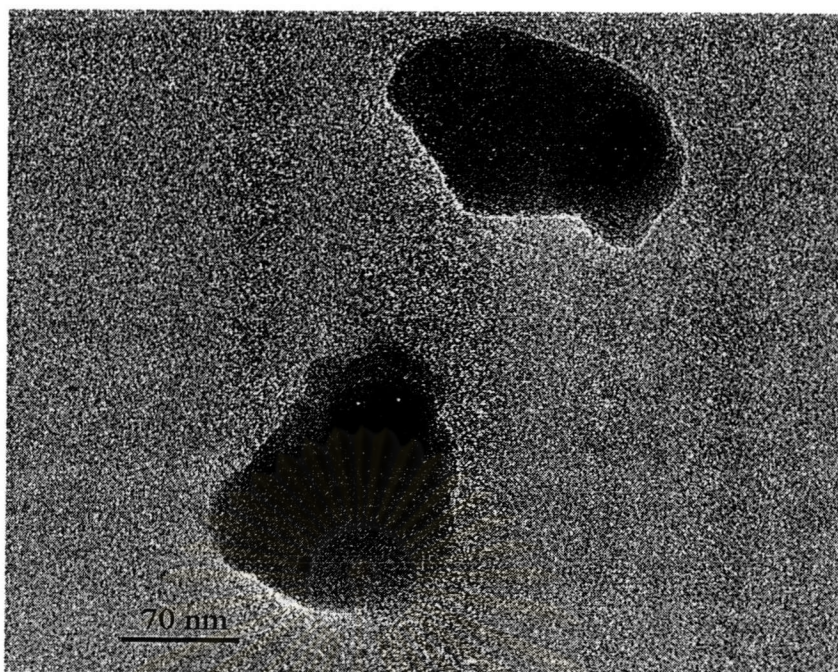
Magnification – 20,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 150 nm



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างนาโนแคปซูล Formulation (F)
Magnification - 40,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 290.5 nm



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างนาโนแคปซูล Formulation (G)
Magnification - 40,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 103.5 nm



รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างนาโนแคปซูล Formulation (H)
Magnification - 20,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 153.1 nm

จากการสังเกตรูปร่าง จากภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูลที่ผลิตได้ พบว่า ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation A B และ C มีรูปร่างลักษณะเหมือนวงกลมอยู่ในปlokหุ้ม คาดว่ามีเคอร์คูมินอยู่แกนกลาง และชั้นบางๆของไคโตซานปกคลุม ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในกรณีที่ใช้ความเข้มข้นของไคโตซานที่ 3 %w/v และสัดส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ ที่ 50/50 60/40 และ 70/30 v/v มีปริมาณพอเพียงที่ทำให้มีชั้นมีความคงตัว ในขณะที่กลูตาอัลดีไฮด์ เป็นสารเชื่อมโยงทำให้ไคโตซานมีโครงสร้างที่แข็งแรง และเหมาะสมในการสร้างแคปซูล แต่งานวิจัยนี้จะไม่เลือกใช้กลูตาอัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงกับไคโตซานต่อไปอีก เนื่องจากกลูตาอัลดีไฮด์มีความเป็นพิษ ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะมีกลูตาอัลดีไฮด์หลงเหลือ นาโนแคปซูลที่ผลิตได้จะมีกลูตาอัลดีไฮด์ปนเปื้อนตามมาด้วย ซึ่งเป็นอันตรายต่อเซลล์ของผิวหนัง แต่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อผลิตนาโนแคปซูล (nanocapsule) ของเคอร์คูมิน (curcumin) ที่หุ้มด้วยไคโตซานเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ไตรพอลิฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมโยงกับไคโตซานเพื่อป้องกันปัญหานี้ เนื่องจากไตรพอลิฟอสเฟตไม่เป็นพิษ และมีประจุลบ สามารถสร้างพันธะเป็นเจลกับไคโตซานได้ ระหว่างประจุบวกหมู่เอมีโนของไคโตซาน และประจุลบของไตรพอลิฟอสเฟต

4.2 การผลิตนาโนแคปซูล

ได้ทำการทดลองผลิตนาโนแคปซูลตามขั้นตอนหัวข้อ 3.2.1 โดยใช้เงื่อนไข ดังต่อไปนี้ (ไกลโคซานเชื่อมโยงด้วยไตรพอลิฟอสเฟต)

1. Core to Wall ratio 1:4, 2% w/v Span 80 และ 2% w/v Tween 80 (ตารางที่ 4.6)
2. Core to Wall ratio 1:3, 5% w/v Span 80 และ 5% w/v Tween 80 (ตารางที่ 4.7)
3. Core to Wall ratio 1:4, 5% w/v Span 80 และ 5% w/v Tween 80 (ตารางที่ 4.8)
4. Core to Wall ratio 1:5, 5% w/v Span 80 และ 5% w/v Tween 80 (ตารางที่ 4.9)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของขนาดของนาโนแคปซูลในอิมัลชัน (Core to Wall ratio 1:4, 2% w/v Span 80 และ 2% w/v Tween 80)

Formulation	chitosan (% w/v)	TPP(w/v)	Span 80: Tween 80	ค่าเฉลี่ย (nm)	SD	PDI.
1	2.0	0.7	50/50	530.2	17.10	0.597
2			60/40	384.2	20.26	0.492
3			70/30	356.3	15.82	0.466
4		1.0	50/50	554.3	45.15	0.444
5			60/40	406.8	13.32	0.515
6			70/30	378.7	23.19	0.602
7		1.5	50/50	400.0	12.91	0.454
8			60/40	406.7	18.94	0.491
9			70/30	362.9	19.18	0.386
10	2.5	0.7	50/50	401.3	28.23	0.268
11			60/40	402.5	6.23	0.313
12			70/30	422.2	34.01	0.234
13		1.0	50/50	435.8	18.78	0.422
14			60/40	406.6	13.37	0.313
15			70/30	475.6	8.51	0.359
16		1.5	50/50	437.3	41.44	0.234
17			60/40	376.7	10.10	0.422
18			70/30	397.9	17.49	0.338
19	3.0	0.7	50/50	432.1	12.38	0.253
20			60/40	506.6	16.74	0.497
21			70/30	476.3	10.22	0.411
22		1.0	50/50	440.2	25.03	0.293
23			60/40	490.1	29.92	0.259
24			70/30	483.4	13.02	0.424
25		1.5	50/50	363.4	20.47	0.397
26			60/40	431.6	23.63	0.268
27			70/30	451.1	14.09	0.376

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของขนาดของนาโนแคปซูลในอิมัลชัน (Core to Wall ratio 1:3)

Formulation	chitosan (% w/v)	TPP(w/v)	Span 80: Tween 80	ค่าเฉลี่ย (nm)	SD	PDI.		
28	2.0	0.7	50/50	310.5	17.62	0.480		
29			60/40	311.1	24.55	0.342		
30			70/30	283.4	11.60	0.536		
31		1.0	1.0	50/50	287.8	1.25	0.368	
32				60/40	299.7	10.84	0.493	
33				70/30	295.9	8.20	0.347	
34			1.5	1.5	50/50	278.7	3.56	0.401
35					60/40	298.3	9.08	0.488
36					70/30	310.5	9.93	0.239
37	2.5	0.7	50/50	283.3	8.18	0.366		
38			60/40	287.8	12.55	0.280		
39			70/30	306.9	4.41	0.202		
40		1.0	1.0	50/50	298.2	5.70	0.311	
41				60/40	293.8	4.86	0.189	
42				70/30	317.0	8.05	0.410	
43			1.5	1.5	50/50	280.3	7.31	0.217
44					60/40	272.7	13.52	0.289
45					70/30	305.1	4.67	0.210
46	3.0	0.7	50/50	330.9	11.34	0.371		
47			60/40	320.7	19.78	0.281		
48			70/30	415.1	13.98	0.308		
49		1.0	1.0	50/50	319.3	5.44	0.215	
50				60/40	347.7	14.70	0.267	
51				70/30	366.5	5.01	0.280	
52			1.5	1.5	50/50	307.0	8.52	0.027
53					60/40	295.8	1.81	0.106
54					70/30	371.9	20.08	0.159

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของขนาดของนาโนแคปซูลในอิมัลชัน (Core to Wall ratio 1:4)

Formulation	chitosan (% w/v)	TPP(w/v)	Span 80: Tween 80	ค่าเฉลี่ย (nm)	SD	PDI.	
55	2.0	0.7	50/50	338.8	12.41	0.043	
56			60/40	358.8	8.62	0.242	
57			70/30	366.2	28.36	0.211	
58		1.0	1.0	50/50	320.3	17.37	0.173
59				60/40	376.3	8.13	0.243
60				70/30	339.2	15.03	0.261
61		1.5	1.5	50/50	329.7	18.26	0.045
62				60/40	415.2	21.40	0.198
63				70/30	304.0	24.80	0.155
64	2.5	0.7	50/50	256.5	5.77	0.103	
65			60/40	266.5	6.41	0.174	
66			70/30	289.8	22.98	0.229	
67		1.0	1.0	50/50	258.1	16.23	0.149
68				60/40	258.1	16.23	0.151
69				70/30	304.6	20.49	0.113
70		1.5	1.5	50/50	261.6	10.10	0.278
71				60/40	268.9	14.35	0.270
72				70/30	272.0	10.51	0.251
73	3.0	0.7	50/50	276.1	9.23	0.199	
74			60/40	268.7	15.53	0.146	
75			70/30	280.1	8.22	0.263	
76		1.0	1.0	50/50	258.5	10.44	0.165
77				60/40	320.2	2.75	0.234
78				70/30	286.4	7.32	0.196
79		1.5	1.5	50/50	253.8	20.15	0.262
80				60/40	282.4	2.53	0.157
81				70/30	284.2	19.63	0.337

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของขนาดของนาโนแคปซูลในอิมัลชัน (Core to Wall ratio 1:5)

Formulation	chitosan (% w/v)	TPP(w/v)	Span 80: Tween 80	ค่าเฉลี่ย (nm)	SD	PDI.
82	2.0	0.7	50/50	350.7	14.25	0.165
83			60/40	335.0	21.41	0.165
84			70/30	363.5	6.66	0.210
85		1.0	50/50	345.9	4.67	0.084
86			60/40	367.5	8.82	0.012
87			70/30	346.3	16.00	0.188
88		1.5	50/50	345.8	3.47	0.145
89			60/40	373.1	23.34	0.147
90			70/30	349.7	46.71	0.060
91	2.5	0.7	50/50	263.6	6.58	0.146
92			60/40	283.5	18.69	0.194
93			70/30	297.0	9.96	0.129
94		1.0	50/50	274.0	7.94	0.257
95			60/40	266.9	11.09	0.201
96			70/30	287.0	22.60	0.050
97		1.5	50/50	342.6	15.82	0.097
98			60/40	331.7	22.65	0.137
99			70/30	340.9	10.73	0.213
100	3.0	0.7	50/50	340.6	9.51	0.267
101			60/40	363.7	15.80	0.189
102			70/30	378.0	17.81	0.138
103		1.0	50/50	346.1	16.09	0.244
104			60/40	355.6	9.90	0.226
105			70/30	367.9	10.62	0.169
106		1.5	50/50	310.4	4.53	0.019
107			60/40	321.3	7.69	0.182
108	70/30		341.6	13.19	0.120	

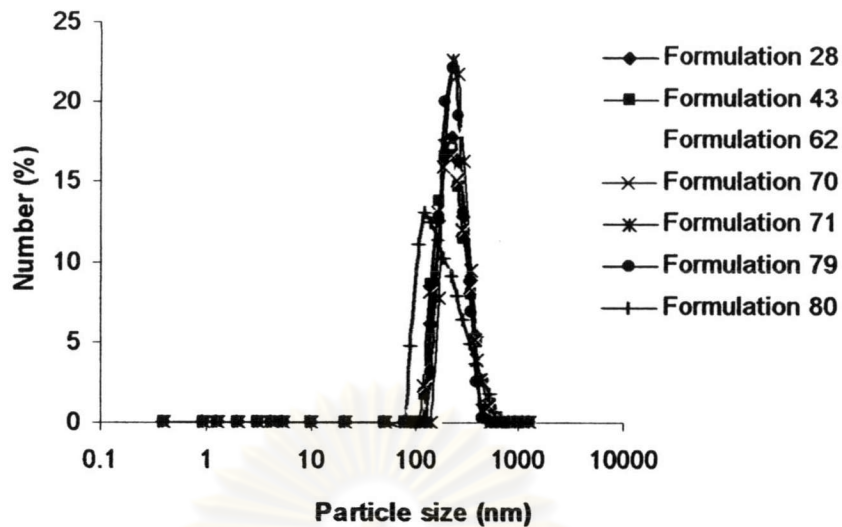
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของนาโนแคปซูล

4.3.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลหลังอบแห้ง

จากผลการทดลองผลิตนาโนแคปซูลในตาราง 4.6 – 4.9 พบว่า Formulation ที่ 28 43 62 70 71 79 และ 80 เท่านั้นที่ อบแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze dry) แล้วได้นาโนแคปซูลที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด

ตารางที่ 4.10 Formulation ที่นาโนแคปซูลมีลักษณะเป็นผง

Formulation	HLB _{ของระบบ}	ค่าเฉลี่ย (nm)	SD	PDI.
28	10.3	310.5	17.62	0.480
43	10.3	280.3	7.31	0.217
62	11.1	415.2	21.40	0.198
70	10.3	261.6	10.10	0.278
71	11.1	268.9	14.35	0.270
79	10.3	253.8	20.15	0.262
80	11.1	280.1	2.53	0.157



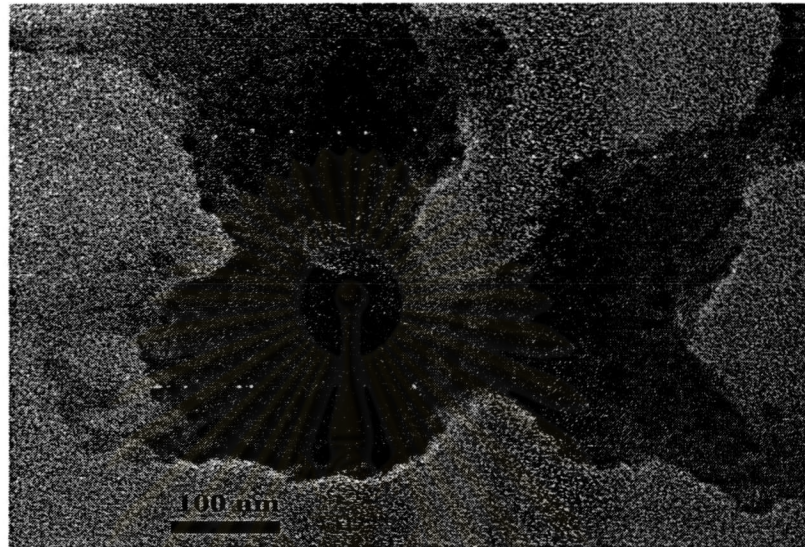
รูปที่ 4.7 การกระจายขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูล

จากตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาค พบว่า Formulation 70 71 79 และ 80 มีขนาดเฉลี่ยอนุภาคของนาโนแคปซูลเล็กใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของสเปน 80 : ทวิน 80 ที่ 50/50 v/v มีค่า HLB ของระบบ เท่ากับ 10.3 และอัตราส่วนของสเปน 80 : ทวิน 80 ที่ 60/40 v/v มีค่า HLB ของระบบ เท่ากับ 11.1 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากมีสัดส่วนของอิมัลซิฟายเออร์ปริมาณพอเพียงที่คู่ค้ำอย่างแข็งแรงที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำมัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ Formulation 70 มีขนาดเฉลี่ยของนาโนแคปซูล 261.6 nm และ Formulation 71 มีขนาดเฉลี่ยของนาโนแคปซูล 268.9 nm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนอิมัลซิฟายเออร์ระหว่าง Span 80 : Tween 80 จาก 50/50 v/v เป็น 60/40 v/v ทำให้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคโตขึ้น เมื่อพิจารณา Formulation 79 และ 80 ก็แสดงผลเช่นเดียวกัน คือ Formulation 79 มีขนาดเฉลี่ยของนาโนแคปซูล 253.8 nm และ Formulation 80 มีขนาดเฉลี่ยของนาโนแคปซูล 280.1 nm จากผลดังกล่าวทำให้พอสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของอิมัลซิฟายเออร์ ในช่วงที่ทดลอง จะทำให้นาโนแคปซูลมีขนาดใหญ่ขึ้นอาจเนื่องมาจากค่า HLB ของระบบที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 10.3 ซึ่งทำให้อิมัลชันมีความคงตัวและได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด [7]

4.3.2 ผลการศึกษาสัณฐาน (Morphology) ของนาโนแคปซูล

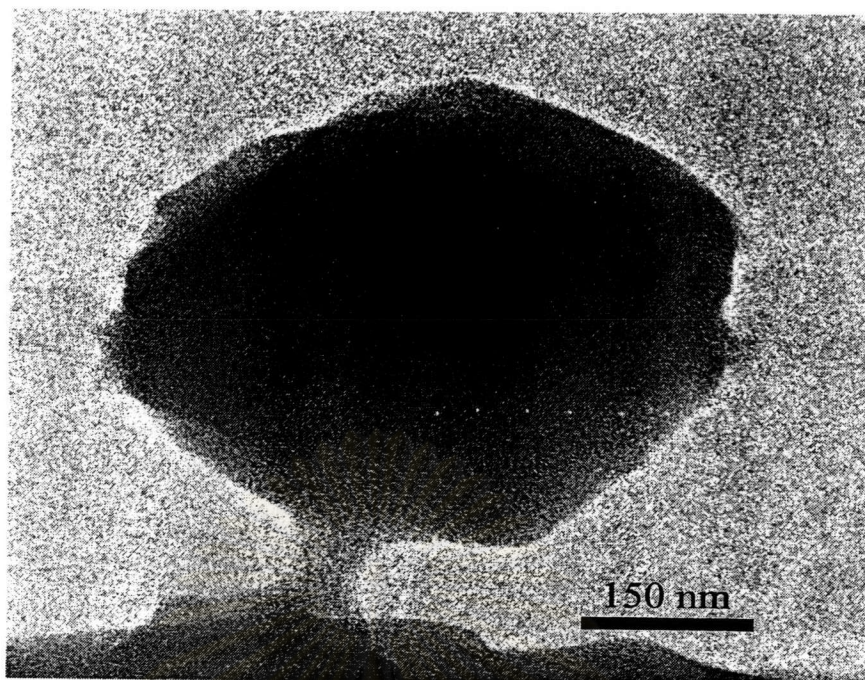
ได้ศึกษาสัณฐาน (Morphology) ของผงนาโนแคปซูลที่ผลิตได้โดยการส่องและถ่ายภาพด้วย Transmission Electron microscope (TEM) ดังรูป 4.8-4.14



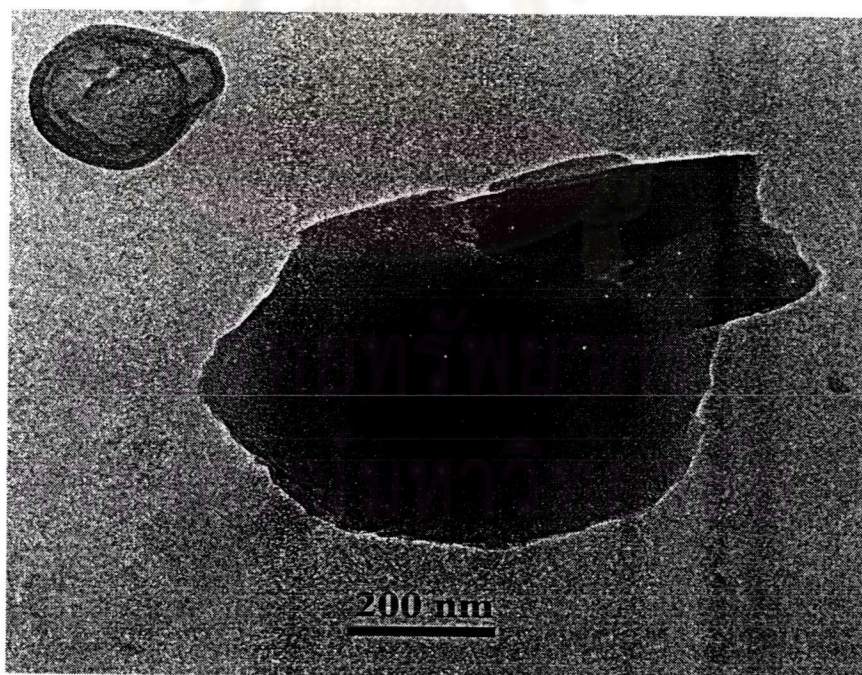
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (28)
Magnification – 60,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 300 nm



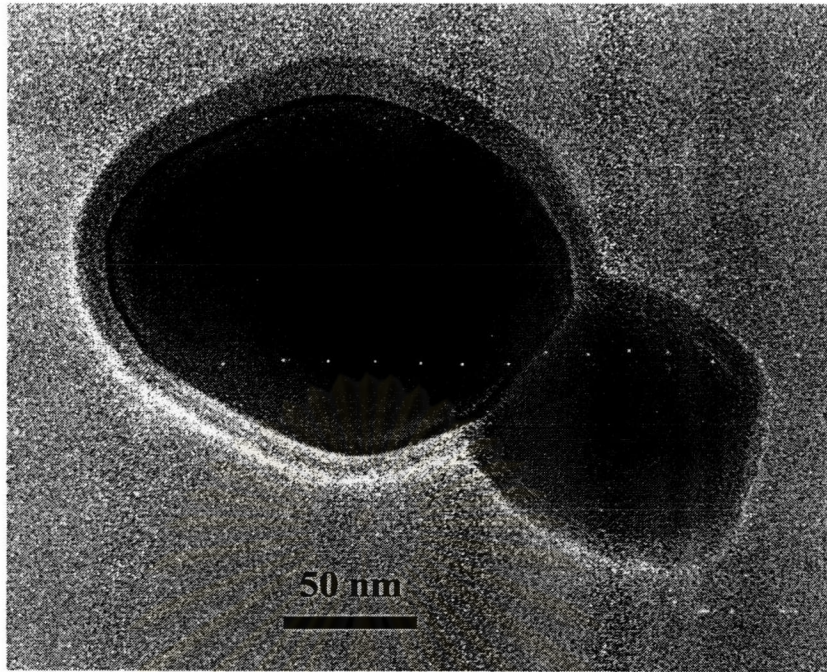
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (43)
Magnification – 20,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 326.1 nm



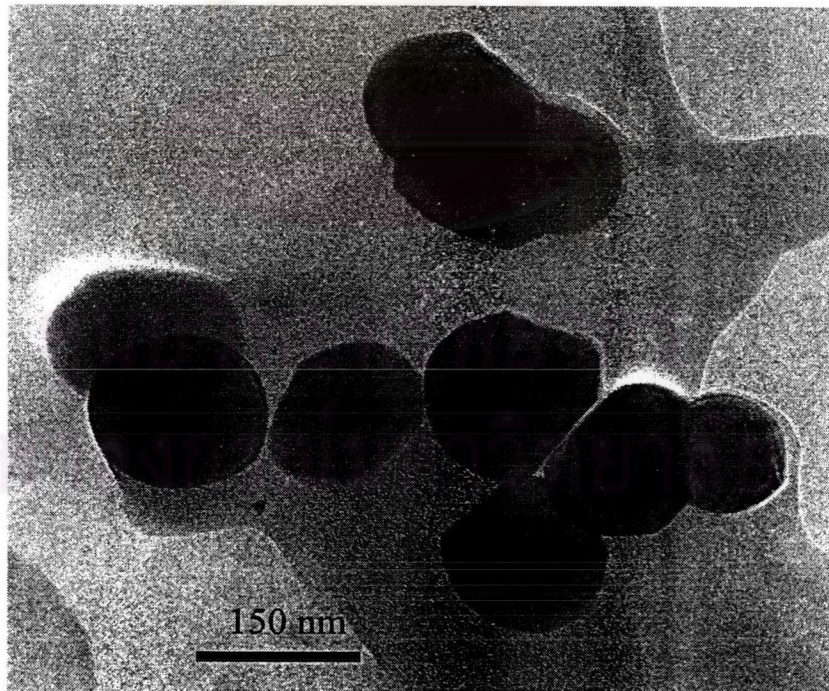
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (62)
Magnification – 20,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 521.74 nm



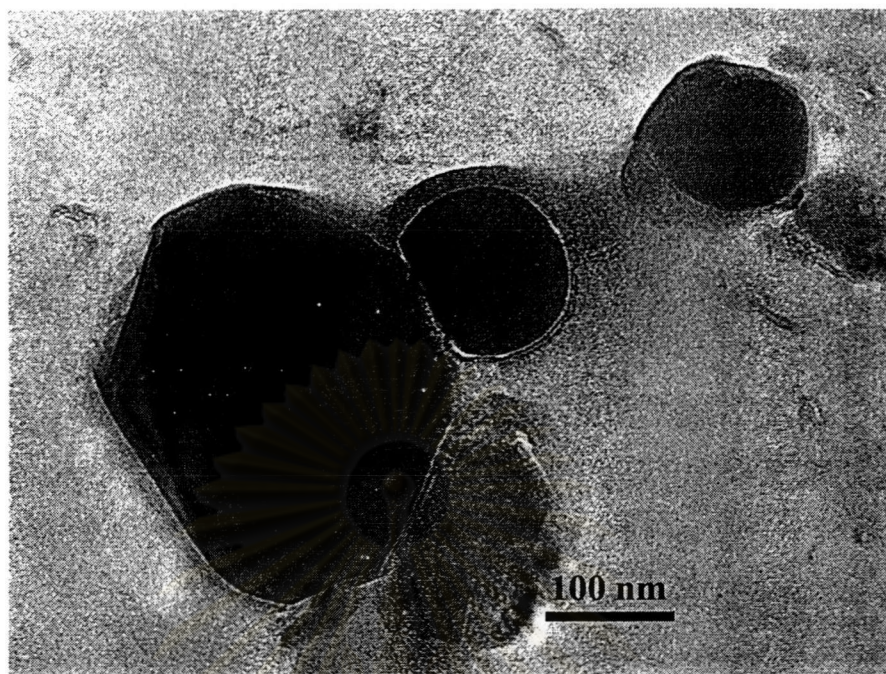
รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (70)
Magnification – 10,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 600 nm



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (71)
Magnification – 40,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 188.89 nm



รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (79)
Magnification – 20,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 156.8 nm



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation (80)

Magnification – 20,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 222.2 nm

จากภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ตามลำดับ จะเห็นว่าในกรณีของ Formulation 71 และ 79 ลักษณะนาโนแคปซูลค่อนข้างกลม และมีชั้นของโคโคซานล้อมรอบแกนของเคอร์คูมิน โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโคโคซาน ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy disperse X-ray analysis :EDS) ทั้งนี้คาดว่าส่วนหนึ่งเป็นผลจากการเตรียมสูตรในการทำนาโนแคปซูลโดยใช้ความเข้มข้นของโคโคซานที่ 3 %w/v สัดส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ ที่ 50/50 และ 60/40 สัดส่วนระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำมัน ที่ 4:1 ซึ่งมีปริมาณที่พอเพียงต่อการสร้างเป็นนาโนแคปซูล และใช้ไตรโพลีฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมโยงทำให้โคโคซานมีโครงสร้างที่แข็งแรงได้ เมื่อใช้ที่ความเข้มข้น 1.5 %w/v

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่วัดโดย Nanosizer และTEM

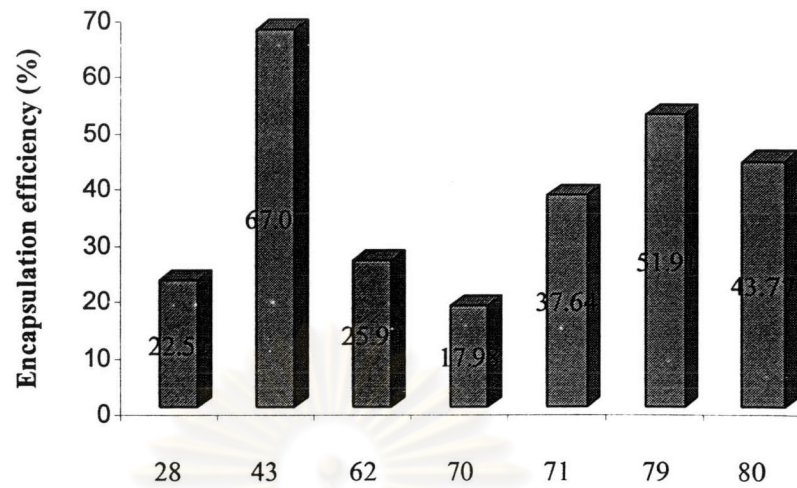
Formulation	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	
	Nanosizer	TEM (เฉลี่ยจากรูป)
28	310.5 ± 17.62	300.0 (รูปที่ 4.8)
43	280.3 ± 7.31	326.1 (รูปที่ 4.9)
62	415.2 ± 21.40	521.4 (รูปที่ 4.10)
70	261.6 ± 10.10	600.0 (รูปที่ 4.11)
71	268.9 ± 14.35	188.9 (รูปที่ 4.12)
79	253.8 ± 20.15	156.8 (รูปที่ 4.13)
80	280.1 ± 2.53	222.2 (รูปที่ 4.14)

จากตารางที่ 4.11 พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่วัดโดย Nanosizer และTEM มีขนาดที่แตกต่างกัน เนื่องจากสถานะที่ใช้วัดนั้นต่างกัน ในกรณีที่วัดโดย Nanosizer ใช้วิธีผสมมาทำการวัด ซึ่งมีลักษณะเป็นเจลที่มีตัวทำละลายคือ mineral oil โดยเจลเกิดการบวมตัว (Swelling) ทำให้มีขนาดเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่วัดโดยTEM ใช้นาโนแคปซูลที่มีลักษณะเป็นผงแห้ง จึงไม่มีปัญหาในส่วนนี้ แต่เนื่องจากใช้จำนวนอนุภาคในการวัดขนาดหาค่าเฉลี่ยจำนวนน้อย จึงมีปัญหา sampling error และขนาดที่ได้เป็นกรณี 2 มิติ เท่านั้น

4.3.3 ประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล (Encapsulation Efficiency)

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล สำหรับFormulation ที่นาโนแคปซูลมีลักษณะเป็นผง

Formulation	ความเข้มข้นของเคอร์คูมิน (ppm)			น้ำหนัก นาโนแคปซูล (g)	Encapsulation Efficiency (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
28	27.1100	28.5469	27.8284	0.1659	22.52
43	87.6732	88.6937	88.1834	0.1582	67.07
62	35.6328	35.4626	35.5477	0.1457	25.90
70	59.1009	58.2975	58.6992	0.0628	17.98
71	50.7718	52.6482	51.7100	0.1456	37.64
79	35.4235	36.8469	36.1352	0.2873	51.91
80	30.2189	34.5574	32.3881	0.2897	43.77

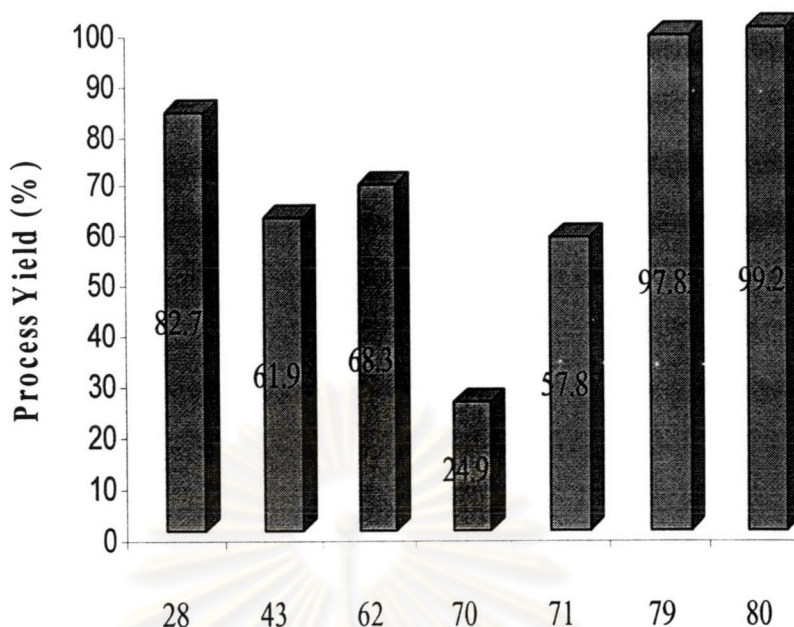


รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล สำหรับ Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ตามลำดับ

4.3.4 ผลได้ (Process Yield) ของการผลิตนาโนแคปซูล

ตารางที่ 4.13 ผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation ที่นาโนแคปซูลมีลักษณะเป็นผง

Formulation	Curcumin Initial (g)	Chitosan Initial (g)	TPP Initial (g)	Nanocapsules (g)	Process Yield (%)	Overall Yield (%)
28	0.0205	0.1659	0.0140	0.1659	82.78	18.64
43	0.0208	0.2047	0.0300	0.1582	61.92	41.52
62	0.0200	0.1632	0.0300	0.1457	68.34	17.70
70	0.0205	0.2008	0.0300	0.0628	24.99	4.49
71	0.0200	0.2016	0.0300	0.1456	57.87	21.78
79	0.0200	0.2437	0.0300	0.2873	97.82	50.77
80	0.0200	0.2418	0.0300	0.2897	99.28	43.45



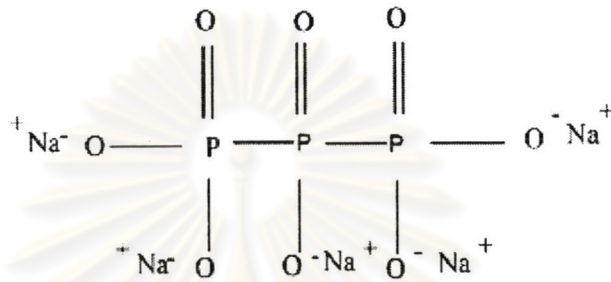
รูปที่ 4.16 ผลได้ของการผลิต (Process Yield) ของนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 28 43 62 70 71 79 และ 80 ตามลำดับ

จากกราฟของประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูลใน รูปที่ 4.15 และผลได้ของการผลิต (Process Yield) ของนาโนแคปซูลใน รูปที่ 4.16 ที่ Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล Formulation 43 มีค่าสูงสุด โดยที่ผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79 และ 80 มีค่าสูงใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของ โคลโคซาน 3 %w/v มีปริมาณที่เพียงพอในการสร้างแคปซูล และเป็นความเข้มข้นของโคลโคซาน ที่เหมาะสมในการผลิตนาโนแคปซูลโดยใช้วิธีการอิมัลชันเชิงซ้อนแล้วระเหยตัวทำละลายออก (Multiple emulsion/solvent evaporation) ที่ใช้ในการวิจัยนี้

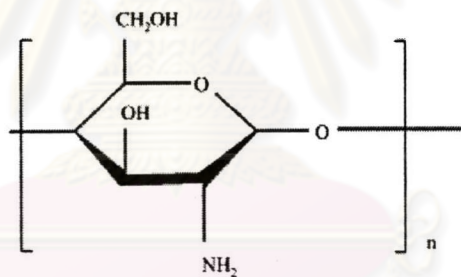
เมื่อพิจารณา Formulation 70 71 79 80 พบว่า Formulation 70 มีผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลเท่ากับ 24.99 %w/w และ Formulation 71 มีผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลเท่ากับ 57.87 %w/w ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนอิมัลซิฟายเออร์ระหว่าง Span 80 : Tween 80 จาก 50/50 v/v เป็น 60/40 v/v จะทำให้ค่าผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา Formulation 79 และ 80 ก็แสดงผลเช่นเดียวกัน คือ Formulation 79 มีผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลเท่ากับ 97.82 %w/w และ Formulation 80 มีผลได้ของการผลิตนาโนแคปซูลเท่ากับ 99.28 %w/w ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอิมัลซิฟายเออร์ โดยการเพิ่มสัดส่วนอิมัลซิฟายเออร์ระหว่าง Span 80 : Tween 80 จะทำให้นาโนแคปซูลมีผลได้ ของการผลิตนาโนแคปซูลเพิ่มขึ้น

4.3.5 การหาลักษณะสมบัติกายภาพและเคมีของไคโตซาน (Physicochemical characterizations of chitosan)

ได้ลักษณะสมบัติกายภาพและเคมีของไคโตซาน โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน ในนาโนแคปซูล เพื่อวิเคราะห์ยืนยันผลการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ฟังก์ชันของไคโตซานกับไตรพอลิฟอสเฟต



รูปที่ 4.16 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต



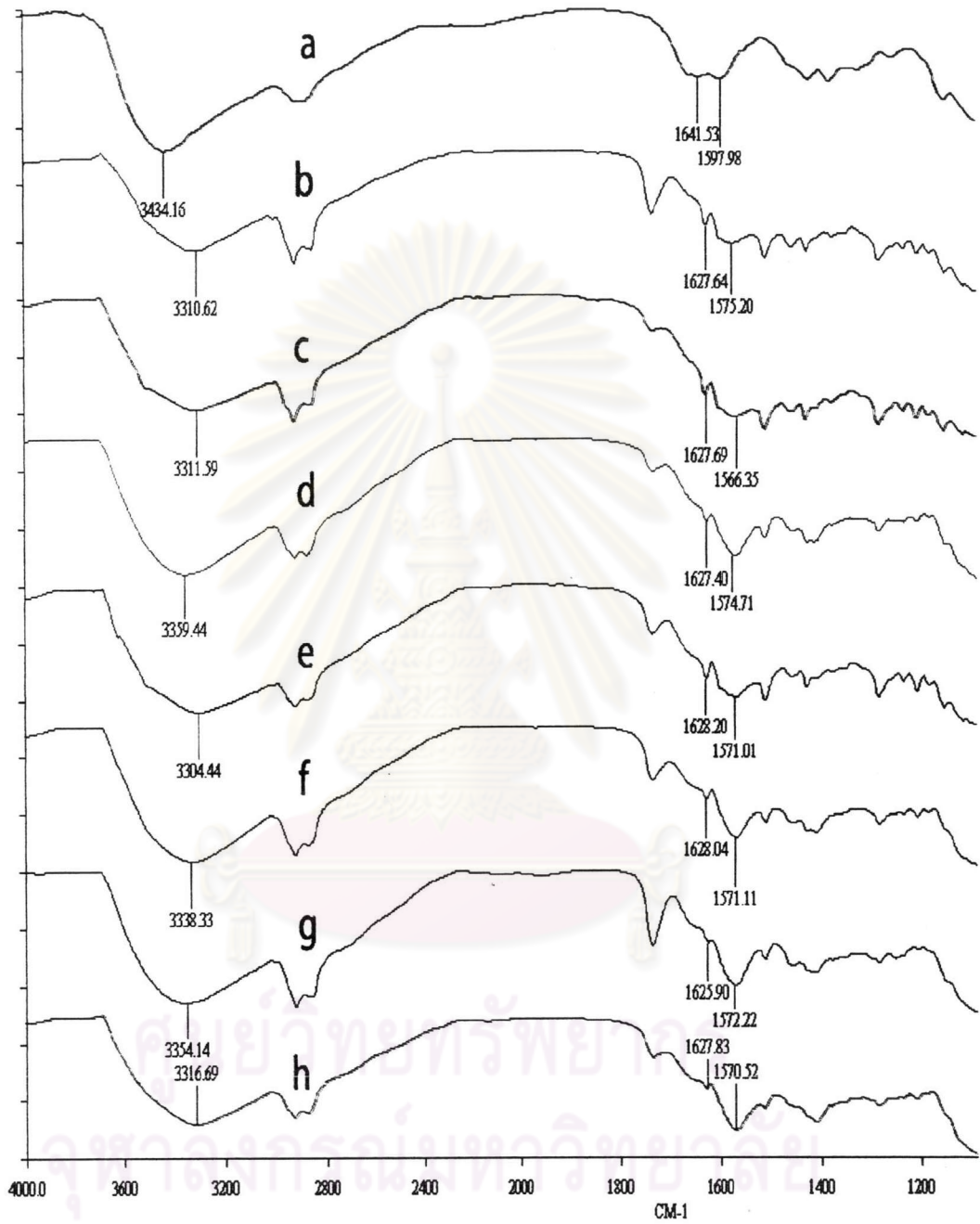
รูปที่ 4.17 โครงสร้างโมเลกุลไคโตซาน

จากกราฟของ FT-IR สเปกตรัมของไคโตซานบริสุทธิ์ และของ Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ในรูปที่ 4.18 สามารถวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน โดยพิจารณากราฟที่หมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$ group) กับหมู่อะมิโน ($-NH_2$ group) พบว่าพีคที่ความยาวคลื่นช่วง $3530-3300\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันของ $-OH$ ความยาวคลื่นช่วง $1650-1590\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันของ $-NH_2$

จากกราฟจะเห็นได้ว่าหมู่ฟังก์ชันของ $-OH$ ของไคโตซานบริสุทธิ์ มีความยาวคลื่น 3434.16 cm^{-1} เมื่อสร้างเป็นนาโนแคปซูล Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ตำแหน่งของพีคมีความยาวคลื่นลดลงจาก 3434.16 cm^{-1} เป็น 3310.62 (Form. 28) 3311.59 (Form. 43) 3359.44 (Form. 62) 3304.44 (Form. 70) 3338.33 (Form. 71) 3354.14 (Form. 79) และ 3316.69 (Form. 80)

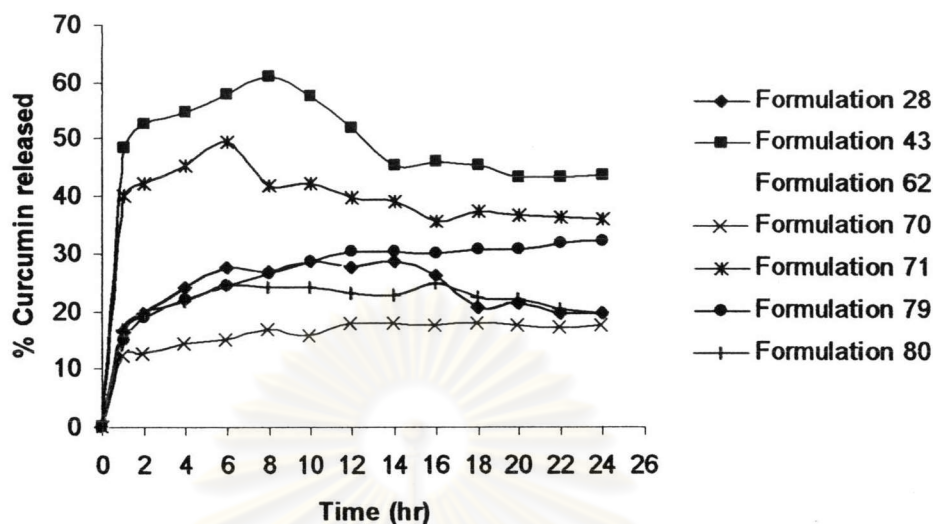
cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก O ของไตรพอลิฟอสเฟต ไปจับกับ H ของไคโตซาน เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน หมู่ฟังก์ชันของ $-\text{OH}$ จึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [5, 23]

หมู่ฟังก์ชันของ $-\text{NH}_2$ ในไคโตซานบริสุทธิ์มีพีคที่ความยาวคลื่น 1641.53 cm^{-1} และ 1597.98 cm^{-1} เมื่อสร้างเป็นนาโนแคปซูล Formulation 28 43 62 70 71 79 80 พบว่าพีคที่ 1 มีความแหลมมากขึ้นจากเดิม และมีความยาวคลื่นลดลงจากเดิม คือจาก 1641.53 cm^{-1} เป็น 1627.64 (Form. 28) 1627.69 (Form. 43) 1627.40 (Form. 62) 1628.20 (Form. 70) 1628.04 (Form. 71) 1625.90 (Form. 79) และ 1627.83 (Form. 80) cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าพีคนี้เป็นตัวบ่งชี้การเชื่อมโยงของโครงสร้างไคโตซาน จากการพิจารณาพีคที่ 1 ดังกล่าว พบว่าที่ Formulation 79 มีความยาวคลื่นต่ำสุดดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Formulation 79 น่าจะมีโครงสร้างร่างแหสามมิติของไคโตซานที่แข็งแรงที่สุด อนึ่งเมื่อพิจารณาพีคที่ 2 พบว่าตำแหน่งพีคเปลี่ยนจาก 1597.98 เป็น 1575.20 (Form. 28) 1566.35 (Form. 43) 1574.71 (Form. 62) 1571.01 (Form. 70) 1571.11 (Form. 71) 1572.22 (Form. 79) และ 1570.52 (Form. 80) cm^{-1} ตามลำดับ จากการพิจารณาพีคที่ 2 ดังกล่าว พบว่าลักษณะพีคไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจากเดิม จึงคาดว่าพีคนี้ไม่น่ามีผลต่อการเชื่อมโยงของโครงสร้างไคโตซาน จากข้อมูลที่ได้ข้างต้นอาจสรุปได้ว่าชั้นฟิล์มของไคโตซานมีการปรับปรุงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนโครงสร้างของไคโตซานโดยไตรพอลิฟอสเฟต ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไตรพอลิฟอสฟอริกของไตรพอลิฟอสเฟต กับหมู่แอมโมเนียมของไคโตซาน [5, 23] จึงทำให้ได้นาโนแคปซูลที่มีลักษณะสมบูรณ์ และสามารถกักเก็บเคอร์คิวมินไว้ภายในโครงสร้างของไคโตซานได้ จากผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของไตรพอลิฟอสเฟต ที่ $1.5 \% \text{ w/v}$ จะทำให้ได้นาโนแคปซูลที่มีลักษณะเป็นผง ถ้าน้อยกว่านี้ไม่สามารถเป็นแคปซูล



รูปที่ 4.18 FT-IR สเปกตรัมของ ไดโคลซานบริสุทธิ์ และของ Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ตามลำดับ (a-h)

4.3.6 ผลการปลดปล่อยเคอร์คูมินจากนาโนแคปซูล



รูปที่ 4.19 ผลการปลดปล่อยเคอร์คูมินจากนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 28 43 62 70 71 79 และ 80 ตามลำดับ

เส้นกราฟรูปในที่ 4.19 แสดงการปลดปล่อยของเคอร์คูมินสำหรับ Formulation 28 43 62 70 71 79 และ 80 ตามลำดับ พบว่า Formulation 43 ปลดปล่อยเคอร์คูมินออกมาในปริมาณมากที่สุด ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากมีไคโตซานที่ความเข้มข้น 2.5 %w/v จึงปลดปล่อยเร็วกว่าไคโตซานที่ความเข้มข้น 3.0 %w/v [23-25] และประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูลมีค่าสูงที่สุดคือ 67.07%w/w จึงปลดปล่อยออกมาได้ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาที่ Formulation 70 71 79 และ 80 จะพบว่า การปลดปล่อยเคอร์คูมินออกมาในช่วงแรกจะมีปริมาณมากแล้วลดลงตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของไคโตซาน ซึ่งเป็นผนังของนาโนแคปซูลมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น [23-25] จึงทำให้ปลดปล่อยเคอร์คูมินออกมาได้ยากขึ้น Formulation 70 และ 71 มีไคโตซานที่ความเข้มข้น 2.5 %w/v ส่วน Formulation 79 และ 80 มีไคโตซานที่ความเข้มข้นเท่ากันคือ 3.0 %w/v แต่สำหรับ Formulation 70 ปลดปล่อยเคอร์คูมินออกมาในปริมาณน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก ผลได้การบรรจุแคปซูล มีค่าต่ำที่สุด คือ 17.98 % w/w

เมื่อพิจารณา Formulation 62 จากกราฟพบว่า มีการปลดปล่อยเคอร์คูมินออกมาในปริมาณที่น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสร้างนาโนแคปซูลมีลักษณะรวมกันเป็นกลุ่ม โดยพิจารณาจากข้อมูลในภาพถ่าย TEM ในรูปที่ 4.10

จากการผลิตนาโนแคปซูลตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.2 โดยใช้เงื่อนไข ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าสามารถผลิตนาโนแคปซูลที่มีลักษณะที่ต้องการเพียง 7 เงื่อนไข มีดังนี้คือ Formulation 28 43 62 70 71 79 80 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของนาโนแคปซูลที่ผลิตได้ จะส่งผลให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตนาโนแคปซูล โดยพิจารณา ดังนี้

1. ในกรณีของขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูล พบว่า Formulation 43 70 71 79 และ 80 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กและการกระจายขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลแคบตามที่ต้องการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสูตรดังกล่าวเหมาะสมที่จะใช้ผลิตนาโนแคปซูล
2. เมื่อสังเกตรูปร่างของนาโนแคปซูล โดย Transmission Electron Microscope (TEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโคโคซาน ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy disperse X-ray analysis :EDS) พบว่า Formulation 43 71 79 และ 80 ลักษณะนาโนแคปซูลค่อนข้างกลมและมีชั้นของโคโคซานล้อมรอบอนุภาคของเคอร์คูมินอย่างชัดเจน
3. จากประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล พบว่า Formulation 43 79 และ 80 มีประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล ที่เหมาะสมในการผลิตนาโนแคปซูล
4. จากผลได้ของการผลิต (Process Yield) นาโนแคปซูล พบว่า Formulation 79 และ 80 มีผลได้ที่เหมาะสมในการผลิตนาโนแคปซูล
5. จากประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูลและผลได้ของการผลิต (Process Yield) นาโนแคปซูล พบว่าผลได้การผลิตรวม (Overall Yield) สำหรับ Formulation 79 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 50.77 % ซึ่งเหมาะสมในการผลิตนาโนแคปซูลเพราะคุ้มทุนต่อต้นทุนการผลิต

จากการพิจารณาการลักษณะสมบัติของนาโนแคปซูลที่ผลิตได้ข้างต้น จะส่งผลให้ Formulation 79 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตนาโนแคปซูล เพราะได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กและการกระจายขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูลมีช่วงแคบตามที่ต้องการ ลักษณะนาโนแคปซูลจากภาพถ่าย TEM ค่อนข้างกลมและมีชั้นของโคโคซานล้อมรอบอนุภาคของเคอร์คูมิน หนึ่งประสิทธิภาพของการบรรจุแคปซูล และผลได้ของการผลิต (Process Yield) นาโนแคปซูล มีปริมาณที่มากพอเพียงในการผลิตสำหรับ Formulation 79

สรุปแล้วผลการทดลองในการผลิตนาโนแคปซูล แสดงให้เห็นว่า Formulation 79 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตนาโนแคปซูลเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองยืนยันผลการผลิตนาโนแคปซูล ซึ่งมีแสดงไว้ในลำดับถัดไป

4.4 การยืนยันผลการผลิตนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79

4.4.1 การผลิตนาโนแคปซูล

ได้ทำการผลิตนาโนแคปซูล โดยใช้เงื่อนไข ดังนี้

1. ความเข้มข้นของ ไคโตซาน 3 % w/v
2. สัดส่วนระหว่าง วัฏภาคน้ำ และ วัฏภาคน้ำมัน 4:1
3. อัตราส่วนผสมระหว่าง Span 80 : Tween 80 คือ 50/50 v/v
4. ความเข้มข้นของ ไตรโพลีฟอสเฟต 1.5 % w/v

จากการทดลองผลิตนาโนแคปซูลตามเงื่อนไขดังกล่าว พบว่าสามารถผลิตนาโนแคปซูลที่มีลักษณะเป็นผง ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 o/w emulsion, o/w/o emulsion และ Nanocapsules ที่ผลิตได้ตาม Formulation 79

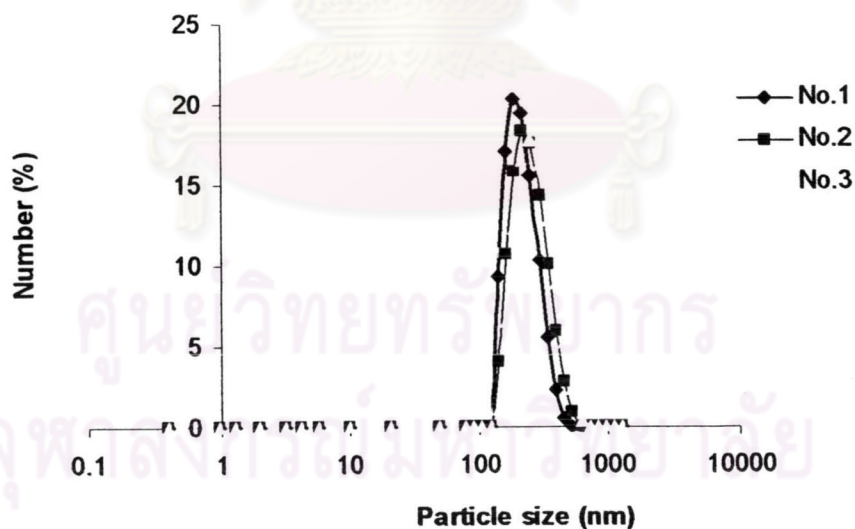
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของนาโนแคปซูลที่สังเคราะห์ซ้ำ

ได้ทำการสังเคราะห์นาโนแคปซูลซึ่งบรรจุเคอร์คูมิน อีก 3 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาความน่าเชื่อถือของการสังเคราะห์

4.4.2.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายขนาดอนุภาคของนาโนแคปซูล

ตารางที่ 4.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79

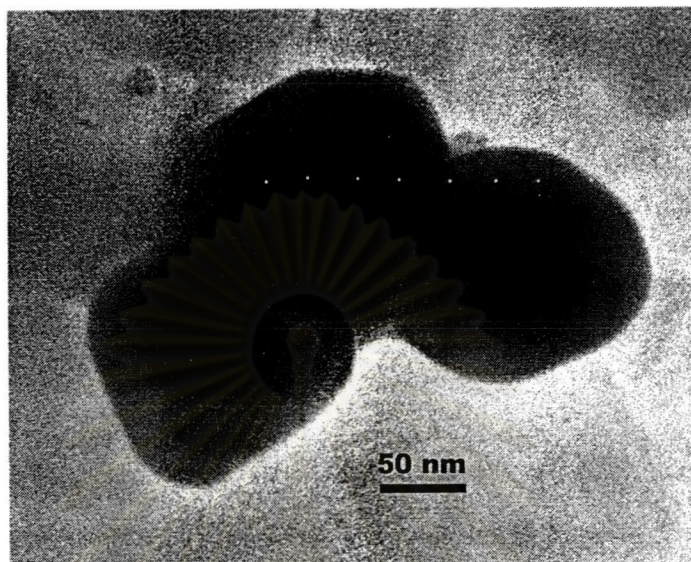
NO	HLB _{ของระบบ}	ค่าเฉลี่ย (nm)	SD	PDI.
1	10.3	256.9	12.23	0.531
2	10.3	272.7	8.25	0.218
3	10.3	291.2	17.56	0.189



รูปที่ 4.21 การกระจายขนาดของนาโนแคปซูล

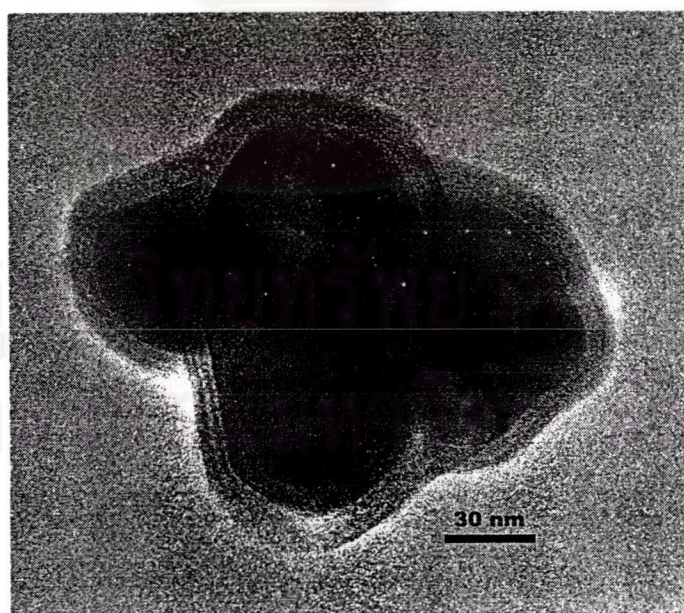
4.4.2.2 ผลการศึกษาสัณฐาน (Morphology) ของนาโนแคปซูล

รูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงผลการส่องดูนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79



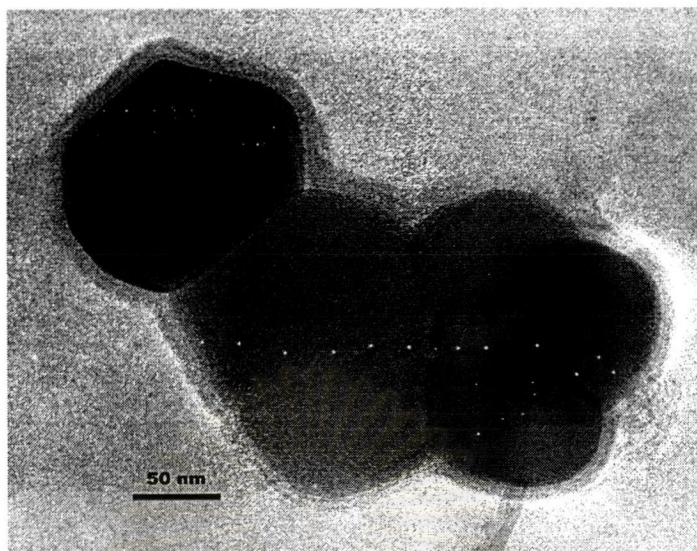
รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation 79 (No. 1)

Magnification - 40,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 145.5 nm



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation 79 (No. 2)

Magnification - 60,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 87.5 nm

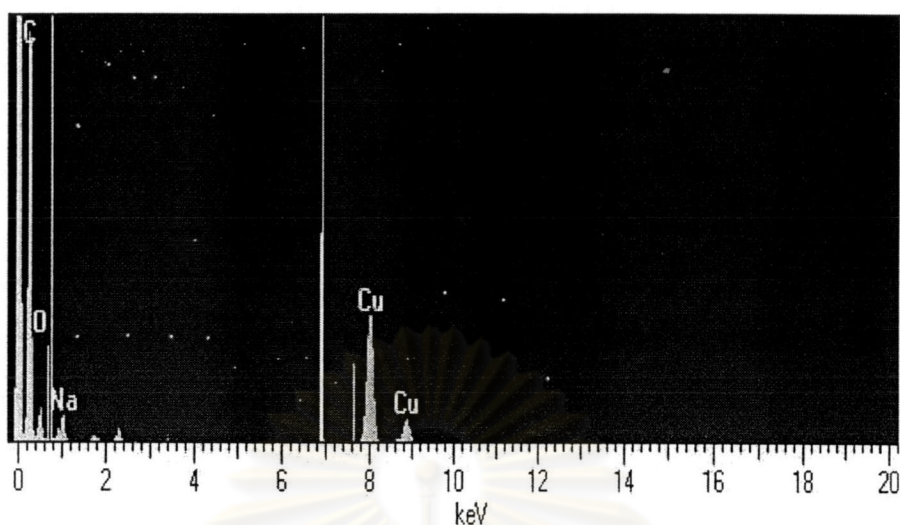


รูปที่ 4.24 ภาพถ่าย TEM ของนาโนแคปซูล Formulation 79 (No. 3)
Magnification – 40,000 : มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 172.73 nm

4.4.2.3 ผลการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคโตซาน ด้วยเทคนิคจุด

วิเคราะห์ (Energy disperse X - ray analysis : EDS)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคโตซานด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีธาตุ C O และNa ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งพิจารณาได้จากสูตร โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซานและสูตรโครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมไตรฟอสเฟตจากรูปที่ 4.16 - 4.17 ซึ่งพอสรุปได้ว่าชั้นบางๆที่สังเกตเห็นจากภาพถ่าย TEM คือไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ฟังก์ชันของไคโตซานกับไตรฟอสเฟตแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนโครงสร้างของไคโตซานโดยฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเชื่อมโยงฟอสฟอริก และแอมโมเนียมไอออน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS จึงไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ P และ N ได้ ส่วนที่พบ Cu เนื่องจากใช้ TEM grid ที่มีส่วนผสมของ Cu



รูปที่ 4.25 องค์ประกอบทางเคมีของโคโตซานวิเคราะห์ด้วย EDS

4.4.2.4 ประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล (Encapsulation Efficiency)

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล สำหรับ Formulation 79

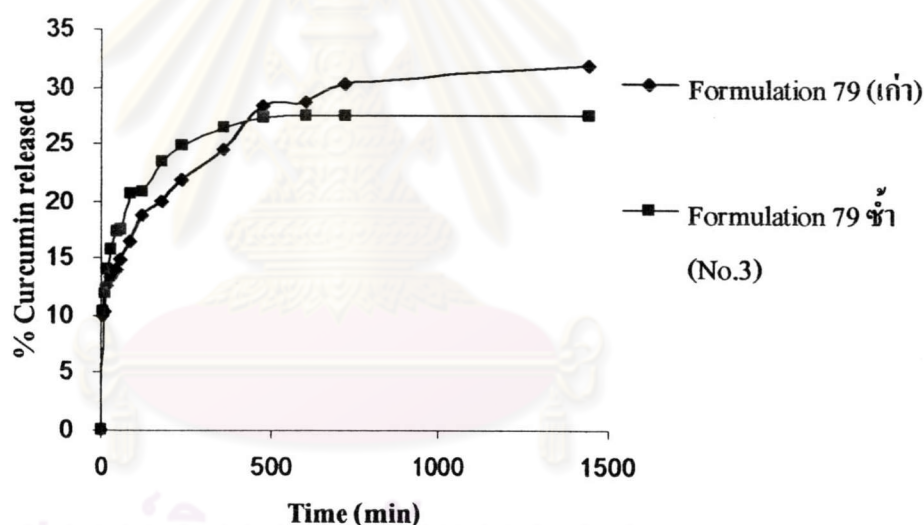
No.	ความเข้มข้นของเคอร์คูมิน (ppm)			น้ำหนัก nanocapsules (g)	Encapsulation Efficiency (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
1	36.4565	39.1462	37.8013	0.2466	44.55
2	38.5649	36.8572	37.7111	0.2547	49.11
3	38.9945	37.4512	38.2229	0.2033	39.20

4.4.2.5 ผลได้ของการผลิต (Process Yield) นาโนแคปซูล

ตารางที่ 4.16 ผลได้ของการผลิต (Process Yield) นาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79

No.	curcumin เริ่มต้น (g)	chitosan เริ่มต้น (g)	TPP เริ่มต้น (g)	nanocapsules (g)	Process Yield (%)
1	0.0200	0.2437	0.0300	0.2466	83.96
2	0.0200	0.2437	0.0300	0.2547	86.72
3	0.0200	0.2437	0.0300	0.2033	69.22

4.4.2.6 ผลการปลดปล่อยเคอร์คูมินจากนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79



รูปที่ 4.26 ผลการปลดปล่อยเคอร์คูมินจากนาโนแคปซูลสำหรับ Formulation 79(แก้ว) และ Formulation 79 ซ้ำ (No.3)

สรุปแล้วที่ได้ทำการสังเคราะห์นาโนแคปซูลซึ่งบรรจุเคอร์คูมิน อีก 3 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาความน่าเชื่อถือของการสังเคราะห์ ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตนาโนแคปซูล Formulation 79 ได้ผลตามต้องการดังนี้ จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ามีขนาดเฉลี่ยของนาโนแคปซูลเล็กใกล้เคียงกัน และในรูปที่ 4.21 มีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบ

จากรูปที่ 4.22 - 4.24 พบว่าลักษณะนาโนแคปซูลจากภาพถ่าย TEM ดูค่อนข้างกลม และมีชั้นของไคโตซานล้อมรอบอนุภาคของเคอร์คูมิน

จากตารางของประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล ใน ตารางที่ 4.14 และผลได้ของการผลิต (Process Yield) ของนาโนแคปซูลใน ตารางที่ 4.15 พบว่าประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล สำหรับ และผลได้ของการผลิตของนาโนแคปซูล มีค่าใกล้เคียงกับ Formulation 79 ครั้งก่อน

จากกราฟรูปในที่ 4.26 แสดงการปลดปล่อยของเคอร์คูมินสำหรับ Formulation 79(เก่า) และ Formulation 79 ซ้ำ (No.3) พบว่าสามารถปลดปล่อยสารเคอร์คูมินออกมาใกล้เคียงกันโดย Formulation 79 ซ้ำ (No.3) สามารถปลดปล่อยเคอร์คูมินออกมาจากนาโนแคปซูลได้ 27.53 %w/w ซึ่งประสิทธิภาพการบรรจุแคปซูล มีค่า 39.20 % w/w

ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า Formulation 79 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตนาโนแคปซูลเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางจริง

การทำนายสูตรอุดมคติ

จากการคำนวณหา N_p , V_{inside} , S_{total} ที่ผนังไคโตซานหนา 5 10 20 และ 50 นาโนเมตร แสดงค่าตามภาคผนวก ฉ สามารถทำนายว่านาโนแคปซูลในอุดมคติ ควรผลิตนาโนแคปซูลความหนาของผนังประมาณ 20 นาโนเมตร ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 250 นาโนเมตร ซึ่งไคโตซาน 1 กรัม สามารถบรรจุ เคอร์คูมินได้ 1.4552 กรัม จากการทดลองในการเตรียมนาโนแคปซูลเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือ Formulation 79 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 253.8 นาโนเมตร เมื่อวัดความหนาของผนังไคโตซานจากภาพถ่าย TEM (รูป ค6) สามารถวัดความหนาได้ 15.8 นาโนเมตร

จากการทดลองบรรจุเคอร์คูมินในไคโตซานในสำหรับ Formulation 79 ซึ่งใช้ไคโตซาน ปริมาณ 0.2418 กรัม จากการคำนวณในภาคผนวก ฉ ควรสามารถบรรจุเคอร์คูมินได้ถึง 0.3519 กรัม (3519 ppm) แต่ในการทดลองจริงได้เลือกบรรจุเคอร์คูมิน เพียงปริมาณ 0.02 กรัม (200 ppm) ดังนั้น หากมีความประสงค์จะเพิ่มปริมาณการนำส่งเคอร์คูมินจะสามารถเพิ่มได้สูงขึ้นจากปัจจุบัน สิบเท่าเศษ