



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาสิ่งทออัจฉริยะโดยการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้

Development of smart textiles by immobilization of nanoencapsulated phase change materials



นางสาวปณณมา ศิริพันธ์โนน

๖๐๐๒๖๙๙๖๗

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๙

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาสิ่งทออัจฉริยะโดยการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้
 แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน
 ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 384,000 บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559
 นางสาว ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ-
 ทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

พอลิอิลิกโพรไลด์พอลิได้อัลลิลโดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDDA) นาโนแคปซูลที่บรรจุด้วย n-octadecane (PDDA-en-Oc) ถูกเตรียมและตรึงลงบนผ้าฝ้ายอย่างง่ายเพื่อสร้างสมบัติการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ (Thermo-regulating) ให้กับผ้าฝ้าย ในขั้นแรกอิมัลชันของ n-octadecane และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Oc-SDS) ถูกเตรียมโดยคลื่นเสียงความเข้มสูง จากนั้นจะถูกนำไปผสมกับ PDDA เพื่อสร้างนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc ซึ่งสามารถสร้างนาโนแคปซูลที่มีโครงสร้างเปลือกและแกนลักษณะทรงกลม (Globular core-shell structure) ได้สำเร็จ ซึ่งนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc มีค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วง 99-152 จูล/กรัม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 101-256 นาโนเมตร ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PDDA จาก 1 ถึง 14 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากการก่อตัวของ PDDA ที่มีการจัดเรียงรูปร่างและความหนาของชั้นเปลือกที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของ PDDA จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการห่อหุ้ม n-octadecane เป็นผลให้ปริมาณของนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc เพิ่มขึ้น ยิ่งปริมาณแคปซูลเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นขณะเปลี่ยนสถานะของ n-octadecane ยิ่งมากขึ้น ประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเป็นแคปซูลจะมีค่าสูงสุดที่ 65.99 % เมื่อใช้ PDDA 10 มิลลิโมลาร์ ในกระบวนการห่อหุ้ม โดยแคปซูลจะมีค่าความร้อนแฝงสูงสุดประมาณ 151.97 จูลต่อกรัม

นาโนแคปซูล PEL-en-Oc ที่เตรียมได้จากขั้นตอนก่อนหน้าสามารถตรึงลงบนผ้าฝ้ายที่ถูกทำให้มีประจุบวกได้สำเร็จโดยการเคลือบสลับด้วยสารยึดติด PSS และนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เปลือกชั้นนอกสุดมีประจุบวก โดยปรับความเข้มข้นของสารยึดติด PSS ในช่วง 1-50 มิลลิโมลาร์ ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของ PSS ปริมาณของ PDDA-en-Oc นาโนแคปซูลที่ถูกตรึงลงบนผ้าฝ้ายจะยิ่งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc ที่ถูกตรึงลงบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายสามารถทำได้โดยการแช่สลับตัวอย่างผ้าฝ้ายในระบบสารยึดติด PSS/นาโนแคปซูล PDDA-en-Oc

ผ้าฝ้ายที่ถูกตรึงด้วยนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc แสดงสมบัติการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยยังสามารถรักษาสมบัติการหายใจได้ (Breathability) ของผ้าฝ้ายตั้งต้นไว้ได้ เมื่อปริมาณของนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc นาโนแคปซูลที่ถูกตรึงลงบนผ้าฝ้ายเพิ่มขึ้นจะแสดงสมบัติการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ยาวนานขึ้น ผ้าฝ้ายที่ถูกตรึงด้วย PSS และนาโนแคปซูล PDDA-en-Oc จำนวน 5 รอบสามารถแสดงสมบัติการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้สูงที่สุด นั่นคือ เป็นเวลามากกว่า 10 นาที เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมมีค่าประมาณ 50 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : วัสดุเปลี่ยนสถานะ, พอลิอิลิกโพรไลด์, การสร้างแคปซูลระดับนาโน, สิ่งทออัจฉริยะ

Research Title: Development of smart textiles by immobilization of nanoencapsulated phase change materials

Researcher: Asst.Prof.Dr. Punnama Siriphannon

Faculty: Science **Department:** Chemistry

ABSTRACT

Poly(diallyldimethylammonium chloride) (PDDA) polyelectrolyte encapsulated n-octadecane nanocapsules (PDDA-en-Oc) were facily prepared and immobilized on cotton fabrics in order to generate thermo-regulating property. Firstly, an emulsion of n-octadecane and sodium dodecyl sulfate (Oc-SDS) was prepared by high intensity sonication and then mixed with the PDDA to create the PDDA-en-Oc nanocapsules, in which they successfully produced the nanocapsules with globular core-shell structure. The PDDA-en-Oc nanocapsules possessed the latent heat value in the range of 99–152 J/g with the average particle size in the range of 101–256 nm. The average particle size of PDDA-en-Oc increased with increasing of PDDA concentration from 1 to 14 mM due to the formation of different PDDA conformation and shell thickness. In addition, the increase of PDDA concentration could improve the efficiency of n-octadecane encapsulation, bringing about the increase PDDA-en-Oc nanocapsules quantity. The higher amount of encapsulated nanocapsules, the higher latent heat quantity was obtained during the phase transition of n-octadecane. The highest encapsulation efficiency was obtained at about 65.99 % when the 10 mM PDDA was used in the encapsulation process, in which it possessed the highest latent heat of about 151.97 J/g.

The as-prepared PDDA-en-Oc nanocapsules were successfully immobilized on the cationized cotton fabrics by stepwise coating with the PSS binder and PDDA-en-Oc nanocapsules. The concentration of PSS binder was varied in the range of 1–50 mM. The higher PSS concentration, the higher quantity of PDDA-en-Oc nanocapsules was immobilized on the cotton fabrics. In addition, the increase of quantity of PDDA-en-Oc nanocapsules immobilized on the cotton fabric could be obtained by stepwise soaking the cotton samples in the system of PSS binder/PDDA-en-Oc nanocapsules.

The PDDA-en-Oc immobilized cotton fabrics exhibited the thermo-regulating property, while preserved the breathability of starting cotton fabric. The prolonged duration of thermo-regulating action was obtained when increasing the quantity of PDDA-en-Oc immobilized on the cotton fabric. The cotton sample immobilized with 5 cycles of PSS and PDDA-en-Oc nanocapsules exhibited the highest thermo-regulating action for longer than 10 min when the surrounding temperature was about 50 °C.

Keywords : Phase change material, Polyelectrolyte, Nanoencapsulation, Smart textiles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 อีกทั้งได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานต่างๆ ดังรายนามต่อไปนี้

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการให้ความอนุเคราะห์ตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่าง
ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ปุณณมา ศิริพันธ์โนน
หัวหน้าโครงการ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม	
2.1 แนวคิดและทฤษฎี	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	11
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	12
3.3.1 การสร้างนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้	12
3.3.2 ตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้	12
3.3.3 การเตรียมพื้นผิวผ้าที่จะนำมาใช้ในการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้	13
3.3.4 การตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้บนพื้นผิวผ้าด้วยเทคนิคเลเซอร์-บายเลเยอร์ โดยใช้พอลิอิลเล็กโทรไลต์เป็นสารยึดติด	13
3.3.5 ตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนและทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้	13
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	
4.1 การเตรียมอิมัลชัน Oc-SDS	15
4.2 การเตรียมนาโนแคปซูลพอลิอิลเล็กโทรไลต์บรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้	16
4.2.1 ขนาดอนุภาคและค่าศักย์ซีต้าของแคปซูล PDDA-en-Oc	16
4.2.2 สมบัติทางความร้อนของแคปซูล PDDA-en-Oc	19
4.3 การทำผ้าฝ้ายให้มีพื้นผิวเป็นประจุบวก	22
4.4 การตรึงแคปซูล PD4-en-S10Oc10_t10 ลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ถูกทำให้มีประจุบวก	22
4.5 การตรึงแคปซูล PD10-en-S10Oc10_t10 ลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ถูกทำให้มีประจุบวก	26
4.6 การเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบของแคปซูล PD10-en-S10Oc10_t10	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 สมบัติการปรับอุณหภูมิได้ (Thermo-regulation)	29
4.8 สมบัติการหายใจได้ (Breathability)	32
บทที่ 5 สรุปลผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปลผลการวิจัย	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
บทที่ 6 สรุปลผลผลิตที่ได้จากการวิจัย	34
เอกสารอ้างอิง	35
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	39
ประวัติผู้วิจัย	40



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.1 ภาพถ่ายอิมัลชัน Oc-SDS ที่มีสีของ Sudan red 7B ที่เตรียมจากความเข้มข้นของ n-octadecane และเวลาในการทำอัลตราโซนิกที่แตกต่างกัน	15
4.2 ภาพถ่าย TEM ของแคปซูล PDDA-en-Oc	16
4.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและค่าศักย์ซีต้าของแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	17
4.4 ภาพถ่ายการเกิดปรากฏการณ์ Flocculation	17
4.5 แบบจำลองการเกิด PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ	19
4.6 DSC เทอร์โมแกรมของ PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ	20
4.7 ปฏิกริยาการทำผ้าฝ้ายให้มีประจุบวก	22
4.8 ภาพถ่าย FE-SEM ของผ้าฝ้ายเริ่มต้น (a) ผ้า Cat-cot (b) ผ้า Cat-cot/PSS (c) ผ้า Cat-cot/PSS/Cap4+ (d)	23
4.9 XPS สเปกตรัมของผ้าฝ้ายเริ่มต้น, ผ้า Cat-cot, ผ้า Cat-cot/PSS และ ผ้า Cat-cot/PSS/Cap4+ ที่ความละเอียดต่ำ (a) ความละเอียดสูงที่ตำแหน่ง N1s (b) และความละเอียดสูงที่ตำแหน่ง S2p (c)	24
4.10 แบบจำลองการเกิด Cat-cot/PSS และ Cat-cot/PSS/Cap4+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบ	26
4.11 แบบจำลองการเกิด Cat-cot/PSS/Cap4+ และ Cat-cot/PSS/Cap10+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบ	28
4.12 ภาพถ่าย FE-SEM ของผ้า Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x5 ที่กำลังขยาย 20,000x (a) และกำลังขยาย 50,000x	29
4.13 ภาพถ่ายความร้อนของผ้าตัวอย่าง Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x1	30
4.14 ภาพถ่ายความร้อนของผ้าตัวอย่าง Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x3	30
4.15 ภาพถ่ายความร้อนของผ้าตัวอย่าง Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x5	31

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, ะชนีการกระจายตัวของอนุภาค และค่าศักย์ซีต้าของ Oc-SDS และแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ	18
4.2 สมบัติทางความร้อนของ <i>n</i> -octadecane และแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ	21
4.3 ความเข้มของสัญญาณของ N1s, O1s และ S2p และสัดส่วนของความเข้มสัญญาณของ N/O และ S/O ของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในแต่ละชั้นจากเครื่อง XPS	25
4.4 ค่า K/S ของ Cat-cot/PSS/colCap4+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบในขั้นตอนก่อนหน้า	25
4.5 ค่า K/S ของ Cat-cot/PSS/colCap4+ และ Cat-cot/PSS/colCap10+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบในขั้นตอนก่อนหน้า	27
4.6 ค่า K/S ของ Cat-cot/(PSS10/colCap10+) เมื่อทำการเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบ PSS/Cap10+	29
4.7 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว	32



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

- อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยอุตสาหกรรมย่อยมากมายตั้งแต่การผลิตเส้นใย การทอเป็นผืนผ้า การฟอกย้อมและปรับปรุงสมบัติ ไปสู่การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอประเภทต่างๆ จึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีตลาดขนาดใหญ่และมีการแข่งขันสูง ดังนั้นการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพสิ่งทอให้มีสมบัติพิเศษและมีคุณภาพสูงจึงถือเป็นโอกาสทางการตลาดที่จะเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และเพิ่มโอกาสการจำหน่ายสินค้าในตลาดระดับบน กระบวนการสำคัญที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ได้แก่ กระบวนการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำการปรับปรุงเส้นใยและผืนผ้าด้วยสารเคมีและสารตกแต่งที่เหมาะสม เพื่อให้มีสมบัติบางประการดีขึ้นหรือมีสมบัติเฉพาะที่ตรงต่อความต้องการมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารเคมีสำหรับการตกแต่งสำเร็จชนิดใหม่ๆ และการพัฒนาสมบัติและคุณภาพของสารตกแต่งสำเร็จที่มีอยู่เดิม จึงมีขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นจำนวนมากทั้งในและต่างประเทศ รวมทั้งการวิจัยและพัฒนากระบวนการและเครื่องจักรที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเอานาโนเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมตกแต่งสำเร็จเพื่อพัฒนาสิ่งทอให้เป็นนวัตกรรมใหม่ ซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ (Multifunctional textiles) เช่น สมบัติด้านการยับ ด้านการลามไฟ ด้านการซึมผ่านน้ำ ด้านแบคทีเรีย ด้านไฟฟ้าสถิตย์ ให้มีกลิ่นหอม และให้ผิวสัมผัสนุ่มขึ้น เป็นต้น จึงเรียกสิ่งทอที่พัฒนาขึ้นว่า “สิ่งทออัจฉริยะ”

อย่างไรก็ตามการตกแต่งสำเร็จถือเป็นจุดอ่อนที่สุดในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอของไทย ซึ่งยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างจริงจัง ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการตกแต่งสำเร็จเป็นขั้นตอนที่มีต้นทุนด้านสารเคมีและพลังงานสูง อีกทั้งประสิทธิภาพของกระบวนการตกแต่งสำเร็จทั่วไปยังไม่ดีพอและเครื่องจักรที่ใช้มีความล้าสมัย จึงมีสารตกแต่งเหลือทิ้งจากกระบวนการในปริมาณมากก่อให้เกิดภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารเคมีเหล่านี้ และอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวหากเกิดการสะสมของสารเหล่านี้ในปริมาณมาก จากปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาสารตกแต่งสำเร็จที่มีอยู่เดิมและกระบวนการตกแต่งสำเร็จด้วยนาโนเทคโนโลยีที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อน ประหยัดสารเคมี ประหยัดพลังงาน ประหยัดค่าใช้จ่าย มีประสิทธิภาพในการยึดติดของสารตกแต่งสูงและเป็นเทคนิคที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยสารตกแต่งสำเร็จที่คณะผู้วิจัยสนใจ ได้แก่ “วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้” (Phase change materials, PCM) เนื่องจากเส้นใยและสิ่งทอที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จด้วยสาร PCM จะสามารถรักษาระดับอุณหภูมิของสิ่งทอและสภาวะแวดล้อมที่อยู่ใกล้เคียงได้ตามต้องการ โดยอาศัยการดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อมหรือคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อการเปลี่ยนสถานะของสาร PCM ซึ่งสาร PCM เป็นสารเคมีกลุ่มหนึ่งที่มีความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมากในการศึกษาพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ทั้งงานด้านสิ่งทอ ด้านก่อสร้าง ด้านพลังงาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้สาร PCM กับสิ่งทอถูกพัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยขององค์การนาซาในช่วงปลายทศวรรษ 1970 ถึงต้นทศวรรษ 1980 เพื่อนำไปใช้ในการผลิตชุดนักบินอวกาศที่สามารถปกป้องนักบินอวกาศจากความผันผวนของอุณหภูมิเมื่อออกไปปฏิบัติงานในอวกาศ จากจุดเริ่มต้นนี้เองจึงเกิดการพัฒนาล้างทอด้วยสาร PCM และนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มประเภทอื่นๆ ในท้องตลาด เช่น เครื่องนุ่งห่มกันหนาว เสื้อผ้าและอุปกรณ์กีฬากลางแจ้ง ผลิตภัณฑ์เครื่องนอน บรรจุภัณฑ์ สิ่งทอสำหรับยานยนต์ สิ่งทอสำหรับการแพทย์ เป็นต้น ทั้งนี้การวิจัยและพัฒนาสิ่งทอด้วยสาร PCM เริ่มเป็นที่สนใจในกลุ่มนักวิจัยในหลายประเทศและมีแนวโน้มจะเพิ่มจำนวนสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องมาจากปัญหาภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate change) ที่กำลังเกิดขึ้นทั่วทุกทวีป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบางพื้นที่ให้เพิ่มสูงขึ้นหรือลดต่ำลงอย่างผิดปกติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบต่อประชากรที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มจึงถือเป็นเหมือนสิ่งที่จะช่วยปกป้องร่างกายมนุษย์จากสภาวะแวดล้อมและสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงได้

สาร PCM ที่ได้รับความสนใจและพัฒนาจากกลุ่มนักวิจัยมี 2 กลุ่มใหญ่ กลุ่มแรกเป็นสาร PCM อนินทรีย์จำพวกเกลือที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Inorganic salt hydrates) แต่สารจำพวกนี้มีข้อด้อยหลายประการ เช่น เกิดสถานะเย็นตัวยิ่งยวด (Supercooling) เกิดการแยกตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ไม่สามารถเข้ากับวัสดุบางประเภท เช่น วัสดุที่มีขี้ดดำ และก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ กลุ่มที่สองเป็นสาร PCM อินทรีย์ (Organic PCMs) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความเหมาะสมและได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานสิ่งทอเครื่องนุ่งห่ม โดยสาร PCM อินทรีย์จำพวกพาราฟินแว็กซ์ (Paraffin waxes) ที่เป็นอัลเคนไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงเป็นกลุ่มสารที่มีการศึกษาวิจัยมากที่สุดกลุ่มหนึ่ง โดยเฉพาะ n-hexadecane n-octadecane และ n-eicosane เนื่องจากสารอินทรีย์เหล่านี้มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะสูง มีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมก่อให้เกิดความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ มีเสถียรภาพทางเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน และไม่ดูดความชื้น

วิธีการนำสาร PCM อินทรีย์มาตกแต่งสำเร็จสิ่งทอสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ได้รับ ความนิยม คือ การบรรจุสาร PCM ในแคปซูลขนาดเล็กแล้วจึงนำแคปซูลเคลือบบนผิวเส้นใยและสิ่งทอ เนื่องจากการเตรียมสาร PCM บรรจุในแคปซูลขนาดเล็ก จะช่วยลดความยุ่งยากในการนำไปใช้ในกระบวนการตกแต่งสำเร็จ ช่วยปกป้องสาร PCM จากสิ่งแวดล้อมภายนอก และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการสูญหายของสาร PCM ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นเป้าหมายของกลุ่มวิจัยต่างๆ ในหลายประเทศที่ ศึกษาเกี่ยวกับการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอด้วยแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM จึงแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การพัฒนาวิธีการสร้างแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM อินทรีย์และการพัฒนาสารยึดติดและวิธีการยึดติดแคปซูลบนสิ่งทอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีการสร้างแคปซูลบรรจุสาร PCM อินทรีย์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยสร้างเปลือกนอกของแคปซูลจากสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหน่วยย่อยประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุหรือแตกตัวเป็นประจุได้ด้วยเทคนิคเลเยอร์บาย-เลเยอร์ (Layer-by-layer technique, Lbl) ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคดังกล่าวในการสร้างแคปซูล สำหรับการประยุกต์ใช้ในทางด้านอาหารและระบบการนำส่งยา นอกจากนี้แคปซูลที่มีขนาดระดับนาโนจะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการส่งผ่านความร้อนระหว่างสาร PCM และสภาวะแวดล้อม ช่วยลดปริมาณสารที่ใช้ทั้งในส่วนของสาร PCM และส่วนเปลือกนอกของแคปซูล นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมุ่งพัฒนากระบวนการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุสาร PCM ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยส่วนแรกบนพื้นผิวเส้นใย โดยใช้พอลิเอทิลีนทรีโกลีทที่มีประจุตรงข้ามกับประจุที่ผิวด้านนอกของนาโนแคปซูลเป็นสารยึดติด พอลิเอทิลีนทรีโกลีทจะสามารถสร้างชั้นฟิล์มที่มีความหนาในระดับนาโนเมตรบนพื้นผิวเส้นใยได้ด้วยตนเอง (Self-assembly) และเป็นตัวกลางในการเกิดอันตรกิริยากับพอลิเอทิลีนทรีโกลีทบนนาโนแคปซูลก่อให้เกิดการตรึงนาโนแคปซูลบนพื้นผิวเส้นใยเนื่องจากขนาดของแคปซูลบรรจุสาร PCM และความหนาของชั้นฟิล์มของสารยึดติดพอลิเอทิลีนทรีโกลีทอยู่ในระดับนาโนเส้นใยที่เตรียมได้จึงยังคงความนุ่มนวล ความยืดหยุ่น การระบายอากาศและความชื้นไว้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการสร้างนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ (PCM) จากพอลิเอทิลีนทรีโกลีทด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ ตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้

1.2.2 ศึกษาการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ลงบนผ้าด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ โดยใช้พอลิเอทิลีนทรีโกลีทเป็นสารยึดติด ตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูล เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการสร้างนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ (PCM) จากพอลิเอทิลีนทรีโกลีทด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ โดยปรับเปลี่ยนสภาวะในการเตรียม เช่น ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทิลีนทรีโกลีท ปริมาณวัสดุ PCM เป็นต้น

1.3.2 ศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการเตรียมต่อขนาด สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของแคปซูลบรรจุวัสดุ PCM ที่เตรียมได้

1.3.3 ศึกษาการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุ PCM ลงบนผ้าด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ โดยปรับเปลี่ยนสภาวะในการตรึง เช่น การดัดแปรโครงสร้างของพื้นผิวผ้า ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทิลีนทรีโกลีทที่ใช้เป็นสารยึดติด เป็นต้น

1.3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์ผ้าที่ตรึงด้วยนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุ PCM ด้วยเทคนิคต่างๆ

1.3.5 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุ PCM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิชาการ ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างนาโนแคปซูลและการตรึงนาโนแคปซูลบนพื้นผิวผ้าด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนแต่มีประสิทธิภาพ ซึ่งองค์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นในลักษณะเดียวกันได้ อีกทั้งสามารถนำผลงานวิจัยไปเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ และ/หรือ ส่งผลงานวิจัยไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติได้อย่างน้อย 1 เรื่อง

1.4.2 ด้านนโยบาย สามารถสร้างองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีที่สามารถนำไปพัฒนากระบวนการตกแต่งสำเร็จสิ่งทอที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นการสร้างและพัฒนาผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเสื้อผ้าสิ่งทอให้มีคุณภาพและสมบัติพิเศษ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในตลาดระดับนานาชาติ

1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ สามารถสร้างและพัฒนาผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเสื้อผ้าสิ่งทอให้มีคุณภาพและสมบัติพิเศษ ด้วยเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนที่สามารถเพิ่ม/ดัดแปรเข้าไปในกระบวนการผลิตเดิมและใช้สารเคมีในปริมาณน้อย จึงเป็นผลให้ผู้ประกอบการมีกลุ่มผลิตภัณฑ์ใหม่ออกสู่ตลาด โดยไม่ต้องลงทุนเพิ่มในมูลค่าสูง แต่สามารถเพิ่มโอกาสในด้านการตลาด

1.4.4 ด้านสังคมและชุมชน กระบวนการที่นำเสนอใช้สารเคมีที่ไม่เป็นพิษในปริมาณน้อย จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ อีกทั้งผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่พัฒนาได้จะช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของประชากร

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในบรรดาสารตกแต่งสำเร็จหลากหลายประเภท “วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้” (Phase change materials, PCM) เป็นกลุ่มหนึ่งที่มีความสนใจจากกลุ่มนักวิจัย เนื่องจากเส้นใยและสิ่งทอที่ผ่านการตกแต่งสำเร็จด้วยสาร PCM จะสามารถรักษาระดับอุณหภูมิของสิ่งทอและสภาวะแวดล้อมที่อยู่ใกล้เคียงได้ตามต้องการ โดยอาศัยการดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อมหรือคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อการเปลี่ยนสถานะของสาร PCM [1–2] การประยุกต์ใช้สาร PCM กับสิ่งทอถูกพัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยขององค์การนาซ่าในช่วงปลายทศวรรษ 1970 ถึงต้นทศวรรษ 1980 เพื่อนำไปใช้ในการผลิตชุดนักบินอวกาศที่สามารถปกป้องนักบินอวกาศจากความผันผวนของอุณหภูมิเมื่อออกไปปฏิบัติงานในอวกาศ [3] จากจุดเริ่มต้นนี้เองจึงเกิดการพัฒนาสิ่งทอด้วยสาร PCM และนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มประเภทอื่นๆ ในท้องตลาด เช่น เครื่องนุ่งห่มกันหนาว เสื้อผ้าและอุปกรณ์กีฬากลางแจ้ง ผลิตภัณฑ์เครื่องนอน บรรจุกัมภ์ สิ่งทอสำหรับยานยนต์ สิ่งทอสำหรับการแพทย์ เป็นต้น [ref] ทั้งนี้การวิจัยและพัฒนาสิ่งทอด้วยสาร PCM เริ่มเป็นที่สนใจในกลุ่มนักวิจัยในหลายประเทศและมีแนวโน้มจะเพิ่มจำนวนสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องมาจากปัญหาภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate change) ที่กำลังเกิดขึ้นทั่วทุกทวีป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบางพื้นที่ให้เพิ่มสูงขึ้นหรือลดต่ำลงอย่างผิดปกติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบต่อประชากรที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว โดยปกติอุณหภูมิของร่างกายมนุษย์เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่รู้สึกสบายจะมีค่าประมาณ $36.3\text{--}37.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิภายในร่างกายจะถูกรักษาให้คงอยู่ที่ $37.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยกลไกต่างๆ ของร่างกาย [4] หากอุณหภูมิที่ผิวของร่างกายมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิภายในร่างกายมากกว่า $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ เราจะรู้สึกอึดอัดไม่สบายตัว ซึ่งเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มถือเป็นเหมือนสิ่งที่จะช่วยปกป้องร่างกายมนุษย์จากสภาวะแวดล้อมและสภาพอากาศที่ร้อนจัดหรือหนาวจัดได้

การทำงานของสาร PCM เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวของสาร PCM สาร PCM จะดูดความร้อนจากสภาวะแวดล้อมเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และเก็บสะสมไว้ในสาร PCM และเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมลดต่ำลงจนถึงจุดเยือกแข็งของสาร PCM พลังงานความร้อนที่ถูกเก็บสะสมไว้ในสาร PCM จะถูกปลดปล่อยออกสู่สภาวะแวดล้อมและเกิดการเปลี่ยนสถานะของสาร PCM จากของเหลวเป็นของแข็ง จากพฤติกรรมดังกล่าวของสาร PCM จะส่งผลให้อุณหภูมิของสิ่งทอและสภาวะแวดล้อมที่อยู่ใกล้เคียงมีค่าค่อนข้างคงที่ (Isothermal conditions) สมบัติพื้นฐานของสาร PCM สำหรับงานสิ่งทอ ได้แก่ จุดหลอมเหลวมีค่าในช่วง $15\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความแตกต่างระหว่างจุดหลอมเหลวและจุดแข็งตัวมีค่าน้อย มีค่าความร้อนในการหลอมเหลวสูง มีความสามารถในการนำความร้อนและการถ่ายเทความร้อนสูง มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนสถานะกลับไปกลับมา ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ผลิตได้ง่าย และราคาไม่แพง [5–7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาร PCM ที่ได้รับความสนใจและพัฒนาในช่วงแรก ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Inorganic salt hydrates) แต่สารจำพวกนี้มีข้อด้อยหลายประการ เช่น เกิดสถานะเย็นตัวยิ่งยวด (Supercooling) เกิดการแยกตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ไม่สามารถเข้ากับวัสดุบางประเภท เช่น วัสดุที่มีขั้วต่ำ และก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ [8–9] ดังนั้นในภายหลังงานวิจัยส่วนใหญ่จึงให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนาสาร PCM อินทรีย์ (Organic PCMs) ซึ่งสารอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมและได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานสิ่งทอเครื่องนุ่งห่ม ได้แก่ กลุ่มพาราฟินแว็กซ์ (Paraffin waxes) ที่เป็นอัลเคนไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง โดยเฉพาะ n-hexadecane [10–15] n-octadecane [10,12–14,16–22] และ n-eicosane [10,16] เนื่องจากสารอินทรีย์เหล่านี้มีค่าความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะสูง มีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมก่อให้เกิดความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ มีเสถียรภาพทางเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน และไม่ดูดความชื้น

การปรับปรุงสมบัติสิ่งทอด้วยสาร PCM สามารถทำได้หลายวิธี โดยอาจจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ การใส่สาร PCM เข้าไปในเส้นใยหรือสิ่งทอโดยตรง (Direct incorporation of PCMs to fibers or fabrics) และการบรรจุสาร PCM ในแคปซูลขนาดเล็กแล้วจึงนำแคปซูลไปใส่ในเนื้อเส้นใยหรือ (Incorporation of encapsulated PCMs into fiber matrix) หรือเคลือบบนผิวเส้นใยและสิ่งทอ (Incorporation of encapsulated PCMs to fiber and fabric by coating) [23] สำหรับวิธีการใส่สาร PCM เข้าไปในเส้นใยหรือสิ่งทอโดยตรงนั้นข้อจำกัดหลายประการ เช่น หากใช้สาร PCM และ/หรือชนิดของเส้นใยที่แตกต่างกันจำเป็นจะต้องมีการปรับเปลี่ยนกระบวนการและสภาวะที่ใช้ผลิตเส้นใยหรือสิ่งทอเป็นผลให้มีความยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบสายการผลิตในอุตสาหกรรม สาร PCM บางชนิดเมื่อนำมาใช้โดยตรงกับเส้นใยสิ่งทอจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มีข้อจำกัดในการซักล้าง อีกทั้งสาร PCM อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นฐานของเส้นใยสิ่งทอ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาการปรับปรุงสมบัติสิ่งทอด้วยสาร PCM ที่บรรจุในแคปซูลขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องมาจากการเตรียมแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM จะช่วยลดความยุ่งยากในการนำไปใช้ในกระบวนการตกแต่งสำเร็จ เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนชนิดสาร PCM ได้โดยไม่กระทบต่อกระบวนการโดยรวมในสายการผลิต ช่วยปกป้องสาร PCM จากสิ่งแวดล้อมภายนอก และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการสูญหายของสาร PCM ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของสาร PCM ลดต่ำลง อีกทั้งการใช้สาร PCM ในรูปแคปซูลขนาดเล็กระดับไมโคร-นาโนน่าจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นฐานของเส้นใยสิ่งทอ ตัวอย่างการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM และการปรับปรุงสมบัติเส้นใยสิ่งทอด้วยแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM มีดังนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM

กระบวนการสร้างแคปซูลขนาดเล็กสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกายภาพ ตัวอย่างการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM มีดังนี้

Zhang *et al.* [24] ได้เตรียมไมโครแคปซูลและนาโนแคปซูลบรรจุ n-octadecane 70% โดยน้ำหนัก โดยการสร้างเปลือกนอกของแคปซูลด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์ จากผลการวิจัยพบว่าอัตราเร็วในการบั่นทอน ปริมาณสารลดแรงตึงผิวและปริมาณไซโคลเฮกเซนที่ใช้จะมีผลต่อขนาดและลักษณะสัณฐานวิทยาของแคปซูล เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการบั่นทอนและปริมาณสารลดแรงตึงผิวจะเป็นผลให้แคปซูลที่เตรียมได้มีค่าการกระจายขนาดที่แคบลง โดยขนาดของแคปซูลไม่มีผลต่อพฤติกรรมกลั่นตัว แต่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกของ n-octadecane

Fang *et al.* [25] ได้เตรียมนาโนแคปซูลพอลิสไตรีนบรรจุ n-octadecane ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบมินิเอมัลชัน โดยใช้อัตราโซนิคช่วยในการเกิดปฏิกิริยา นาโนแคปซูลที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 100–123 nm จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่า n-octadecane ถูกห่อหุ้มด้วยแคปซูลพอลิสไตรีน ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของนาโนแคปซูลพอลิสไตรีนบรรจุ n-octadecane มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ n-octadecane และค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะขึ้นกับปริมาณ n-octadecane ที่ใช้

Sanchez *et al.* [26] ได้เตรียมไมโครแคปซูลบรรจุพาราฟินด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอยของสไตรีน (St) และเมทิลเมทาคริเลต (MMA) อัตราส่วนโดยมวลระหว่างมอนอเมอร์ต่อพาราฟินและ MMA/St มีผลโดยตรงต่อกระบวนการสร้างแคปซูล อัตราการเกิดพอลิเมอไรเซชัน และสมบัติทางกายภาพของไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ เมื่อเพิ่มปริมาณ MMA เป็นผลให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาและขนาดโดยเฉลี่ยของแคปซูลที่ได้น้อยลง เมื่ออัตราส่วนโดยมวลระหว่างมอนอเมอร์ต่อพาราฟินต่ำกว่า 3.0 จะไม่สามารถสร้างแคปซูลได้เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์สั้นเกินไป สภาวะที่ดีที่สุดในการสร้างไมโครแคปซูลบรรจุพาราฟินคือสภาวะที่ใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่างมอนอเมอร์ต่อพาราฟินเป็น 3.0 และอัตราส่วนโดยมวลของ MMA/St เป็น 4.0 และจากผลการวิเคราะห์ TGA แสดงว่าไมโครแคปซูลบรรจุพาราฟินที่สร้างด้วยวิธีนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-เมทิลเมทาคริเลต

Yu *et al.* [27] ได้เตรียมไมโครแคปซูลบรรจุ n-dodecanol โดยใช้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นเปลือกนอกของแคปซูลและใช้พอลิเมอร์ร่วมสไตรีน-มาเลอิกแอนไฮดริดเป็นสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) สมบัติทางความร้อนและกายภาพของไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารลดแรงตึงผิวต่อปริมาณ n-dodecanol เป็น 4.8% จะได้ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะของ n-dodecanol มีค่าสูงสุดเป็น 187.5 kJ/kg

Chen *et al.* [28] ได้เตรียมนาโนแคปซูลพอลิเมทิลเมทาครีเลต (PMMA) บรรจุ n-dodecanol ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบมินิเอมัลชัน โดยใช้ DNS-86 อิมัลซิไฟเออร์ร่วมกับเฮกซะเดเคนโคอิมัลซิไฟเออร์ (HD) จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการเติมโคอิมัลซิไฟเออร์ HD และปริมาณ DNS-86 อิมัลซิไฟเออร์และปริมาณโคอิมัลซิไฟเออร์ HD ที่ใช้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูล การเติมโคอิมัลซิไฟเออร์ HD ลงในวัฏภาคน้ำจะช่วยให้การสร้างแคปซูลบรรจุ n-dodecanol ได้ดี เมื่อใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่าง DNS-86 ต่อ n-dodecanol เป็น 3% และอัตราส่วนโดยมวลระหว่าง HD ต่อ n-dodecanol เป็น 2% จะเป็นสถานะที่สามารถสร้างแคปซูลที่ให้ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะสูงสุดเท่ากับ 98.8 J/g ซึ่งแคปซูลที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 150 nm และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 18.2 °C

งานวิจัยข้างต้นเป็นตัวอย่างเพียงบางส่วนของการศึกษาวิจัยและพัฒนาการเตรียมแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM อินทรีย์ ซึ่งแคปซูลที่เตรียมได้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ โดยเฉพาะงานด้านสิ่งทอและการก่อสร้าง

การเคลือบแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM บนผิวเส้นใยและสิ่งทอ

Y.G. Bryant และ D.P. Colvin [29–30] ได้พัฒนาวิธีการเคลือบแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM บนผลิตภัณฑ์สิ่งทอเพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของสิ่งทอให้ดีขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลเดิมของสิ่ง-ทอ แคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM จะถูกนำไปผสมกับสารยึดติดแล้วจึงนำไปเคลือบบนผิวสิ่งทอ ผลงานวิจัยของกลุ่มวิจัยนี้ได้รับการจดสิทธิบัตรหลายฉบับ จากแนวทางข้างต้นนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ที่ช่วยรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกายผู้สวมใส่ เช่น ชุดดำน้ำ เครื่องแบบทหาร ถุงมือถุงเท้า พื้นรองเท้า ชุดกันไฟ เป็นต้น กระบวนการเคลือบแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM บนผลิตภัณฑ์สิ่งทอสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการบีบอัด-ทำให้แห้ง-ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยความร้อน (Pad-Dry-Cure) การพิมพ์ลาย (Screen printing) การจุ่มเคลือบ (Dip coating) เป็นต้น [6,31]

ปัจจัยต่างๆ ที่ต้องศึกษาและควบคุมในการเคลือบแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM บนผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของสารยึดติด อัตราส่วนของสารยึดติดต่อแคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM ชนิดและสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้สร้างเปลือกนอกของแคปซูล ความสามารถในการยึดติดกับพื้นผิวสิ่งทอ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการยึดติดของสารยึดติด และสถานะต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการเคลือบผิว ปัจจัยที่กล่าวข้างต้นส่งผลต่อสมบัติการเป็นฉนวนความร้อน ความคงทน ความสบายในการสวมใส่ เสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ได้

R.J. Pushaw และ P.A. Havertown [32] ได้จดสิทธิบัตรการเคลือบผิวสิ่งทอด้วยไมโครแคปซูลบรรจุสาร PCM ซึ่งในสิทธิบัตรได้นำเสนอผลของชนิดของสารยึดติดต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของสิ่งทอที่ผ่านการเคลือบผิว ในการเคลือบไมโครแคปซูลบรรจุสาร PCM ด้วยสารยึดติดประเภทอะคริลิกบนวัสดุที่มีลักษณะยืดหยุ่น พบว่าความยืดหยุ่นของวัสดุที่ผ่านการเคลือบลดลงและเมื่อถึงจุดจะพบการปริแตกของชั้นเคลือบ ปัญหาที่เกิดขึ้นถูกนำเสนอทางแก้ไขโดยใช้สารเคลือบเกรดการค้าพอลิเอทเธอร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะคริลิกลาเท็กซ์ที่มีประจุลบและมีจุดเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ -25°C ในการเตรียมสารเคลือบชนิดใหม่นี้จะกำหนดอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห่งระหว่างไมโครแคปซูลต่อพอลิอะคริลิกลาเท็กซ์เป็น 70–300 ต่อ 100 ส่วน เมื่อเตรียมเป็นสารเคลือบเหลวจะมีการเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณ 0.1–1% น้ำ 40–60% และสารลดการเกิดโฟม 0.1–0.5% โดยน้ำหนักของสารเคลือบเหลว

J.K. Choi *et al.* [17] ได้สังเคราะห์ไมโครแคปซูลเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์บรรจุด้วย n-octadecane ด้วยวิธี interfacial polymerization แคปซูลที่ได้มีขนาดระหว่าง 1–1.5 μm สามารถดูดความร้อน 140.6 kJ/kg ในช่วงอุณหภูมิ 28 – 30 $^{\circ}\text{C}$ ไมโครแคปซูลถูกนำไปเคลือบบนผ้าพอลิเอสเตอร์โดยใช้เทคนิค Knife-over-roll (KOR) และการพิมพ์ลาย (Screen printing, SP) และใช้สารยึดติดเป็นสารผสมอะคริลิก-ยูรีเทน ผักก่อนและหลังการเคลือบจะนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ เพื่อหาสภาวะในการยึดติดที่ดีที่สุด ผลการทดลองพบว่าผ้าที่เคลือบด้วยเทคนิค SP จะมีความกระด้างและดูดความชื้นน้อยกว่า แต่มีความสามารถในการผ่านของอากาศสูงกว่าผ้าที่เคลือบด้วยเทคนิค KOR

J.K. Choi *et al.* [33] ได้เตรียมผ้าที่มีสมบัติสะท้อนน้ำแต่ไอสามารถแพร่ผ่านได้ (Vapor-permeable water-repellent fabrics) โดยมีการใส่และไม่ใส่ไมโครแคปซูลบรรจุสาร PCM เรียกว่า WRPCM และ WR ตามลำดับ ไมโครแคปซูลบรรจุ n-octadecane ถูกเคลือบบนผ้าด้วยเทคนิคการเคลือบแบบเปียก เมื่อนำผ้า WRPCM ไปหาค่าความจุความร้อนเมื่อร้อนขึ้นและเมื่อเย็นลง ได้ค่าความจุความร้อนเท่ากับ 14.0 และ 13.0 kJ/kg ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบการสวมใส่เปรียบเทียบระหว่างผ้า WRPCM และ WR ภายใต้สภาวะทดสอบทั้งร้อน (30 $^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 65%) และเย็น (5 $^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 65%) พบว่าภายใต้สภาวะทดสอบขณะเย็นผ้า WRPCM มีอุณหภูมิสูงกว่าผ้า WR

P. Sanchez *et al.* [34] ได้สังเคราะห์ไมโครแคปซูลพอลิสไตรีนบรรจุพาราฟินแว็กซ์ด้วยวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย โดยพาราฟินแว็กซ์ที่ใช้เป็นเกรดการค้าที่เป็นอัลเคนไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 19–27 อะตอม ซึ่งมีค่าความสามารถในการจุความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 40 – 45 $^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ 202.6 kJ/kg ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ถูกนำไปเคลือบบนสิ่งทอโดยใช้สารยึดติดเกรดการค้าหลายชนิด ผลการศึกษาพบว่าสิ่งทอที่เคลือบด้วยไมโครแคปซูล 35 %โดยน้ำหนักจะมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 7.6 kJ/kg สิ่งทอที่ผ่านการเคลือบมีความทนทานต่อการซักล้าง การขัดถู และการรีด

S. Alay *et al.* [35] ได้เตรียมไมโครแคปซูลพอลิวิทิลอะคริเลตบรรจุ n-hexadecane โดยวิธีอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน แคปซูลที่ได้มีขนาดระหว่าง 0.5–4.5 μm จากนั้นไมโครแคปซูลจะถูกนำไปเคลือบบนผ้าฝ้าย 100% และผ้าฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ (50/50) ด้วยเทคนิคกระบวนการบีบอัดทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยความร้อน (Pad-Cure) โดยใช้พอลิยูรีเทนเป็นสารยึดติด ค่าความจุความร้อนของผ้าฝ้ายและผ้าฝ้ายผสมที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าเท่ากับ 6.6 และ 28.6 kJ/kg ตามลำดับ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะมีค่าเท่ากับ 16.7 และ 17.0 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการอย่างต่อเนื่องของการประยุกต์ใช้แคปซูลขนาดเล็กบรรจุสาร PCM ในการเคลือบผิวเส้นใยสิ่งทอ อย่างไรก็ตามในหลายกลุ่มวิจัยยังคงประสบปัญหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการใช้สารยึดติดในการเคลือบผิวมักจะมีผลให้ผ้าเกิดความกระด้าง ความชื้นไม่สามารถแพร่ผ่านได้ ทำให้ผ้าที่ผ่านการเคลือบมีความนุ่มนวล ความยืดหยุ่น การระบายอากาศและความชื้นลดต่ำลง หากลดปริมาณการใช้สารยึดติดลงก็จะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการหลุดร่อนของไมโครแคปซูลระหว่างกระบวนการผลิต การใช้งาน และการซักล้าง

จากปัญหาข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในสองส่วนหลักของงานวิจัย โดยในส่วนแรกจะเป็นการสร้างแคปซูลขนาดเล็กระดับนาโนบรรจุสาร PCM โดยใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolytes) เป็นเปลือกนอกของแคปซูล ซึ่งพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นพอลิเมอร์ที่มีหน่วยย่อยที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุหรือแตกตัวเป็นประจุได้ โดยมีทั้งชนิดที่เป็นประจุบวก ประจุลบ และชนิดที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ในการสร้างแคปซูลจะใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์สองชนิดที่มีประจุตรงข้ามกันสลับกันเข้าห่อหุ้มสาร PCM ที่เป็นอิมัลชันอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ เกิดเป็นเปลือกแคปซูลที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร ซึ่งเทคนิคดังกล่าวเรียกว่า เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-layer technique, Lbl) ในการสร้างแคปซูลด้วยวิธีดังกล่าวสามารถออกแบบระบบแคปซูลให้มีสมบัติและประจุบนพื้นผิวแคปซูลได้หลากหลายรูปแบบ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับเส้น-ใยที่แตกต่างชนิดกันได้นอกจากนี้แคปซูลที่มีขนาดระดับนาโนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการส่งผ่านความร้อนระหว่างสาร PCM และสถานะแวดล้อม ช่วยลดปริมาณสารที่ใช้ทั้งในส่วนของสาร PCM และส่วนเปลือกนอกของแคปซูล และในส่วนที่สองงานวิจัยมุ่งพัฒนาการตรึงนาโนแคปซูลบนพื้นผิวเส้นใยโดยใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับประจุที่ผิวด้านนอกของนาโนแคปซูลเป็นสารยึดติด พอลิอิเล็กโทรไลต์จะสามารถสร้างชั้นฟิล์มที่มีความหนาในระดับนาโนเมตรบนพื้นผิวเส้นใยได้ด้วยตนเอง (Self-assembly) และเป็นตัวกลางในการเกิดอันตรกิริยากับพอลิ อิเล็กโทรไลต์บนนาโนแคปซูลก่อให้เกิดการตรึงนาโนแคปซูลบนพื้นผิวเส้นใย เนื่องจากขนาดของแคปซูลบรรจุสาร PCM และความหนาของชั้นฟิล์มของสารยึดติดพอลิอิเล็กโทรไลต์อยู่ในระดับนาโนเส้นใยที่เตรียมได้จึงยังคงความนุ่มนวล ความยืดหยุ่น การระบายอากาศและความชื้นไว้ได้ จุดเด่นอีกส่วนหนึ่งของเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ ได้แก่ เป็นเทคนิคที่ง่าย ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องขนาดและลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เป็นระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายดังนั้นจึงไม่เป็นอันตราย ใช้สารเคมีปริมาณน้อย ประหยัดพลังงาน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [36–37]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ออกตะเดเคน (*n*-Octadecane, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$, Oc) บริษัท Merck (99 %) เกรตวิเคราะห์
2. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}$, SDS) บริษัท Ajax Finechem เกรตวิเคราะห์
3. พอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly(diallyldimethylammonium chloride, PDDA) บริษัท Sigma Aldrich ($M_w \sim 100,000-200,000$, 20 wt% in water) เกรตวิเคราะห์
4. ทรីคลอโรโพรพิลไฮดรอกซีไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride (CHTAC) บริษัท Sigma Aldrich เกรตวิเคราะห์
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) บริษัท Carlo Erba เกรตวิเคราะห์
6. พอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (Poly(4-styrenesulfonic acid, PSS) บริษัท Sigma Aldrich ($M_w \sim 75,000$, 18 wt% in water) เกรตวิเคราะห์
7. สี ซูดาน เรด (Sudan red 7B) บริษัท Merck เกรตสำหรับงานกล้องจุลทรรศน์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอัลตราโซนิกความเข้มสูง (High intensity ultrasonic processor) บริษัท Sonics&Materials Inc. รุ่น Vibra-Cell VC505
2. เครื่องตรวจวิเคราะห์อนุภาคโดยเทคนิคการกระเจิงแสงเชิงพลวัต (Dynamic light scattering analyzer, DLS) บริษัท Beckman Coulter Inc. รุ่น DelsaNano C
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) บริษัท JEOL, รุ่น JSM 5600 LV
4. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) บริษัท Mettler Toledo, รุ่น DSC 3
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) บริษัท Hitachi รุ่น SU8020
6. เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์ (X-ray photoelectron spectrometer, XPS) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน
7. เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer, UV-Vis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บริษัท Thermo Scientific รุ่น Helios Omega
8. เครื่องตรวจวัดสี (Colorimeter) บริษัท HunterLab รุ่น MiniScan XE Plus
 9. กล้องอินฟราเรดถ่ายภาพความร้อน (Infrared thermography camera) บริษัท FLIR รุ่น C2
 10. เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) บริษัท Labogene, รุ่น Coolsafe 110-4

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การสร้างนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ ในขั้นนี้จะประกอบด้วยกิจกรรมย่อย ดังนี้

1) นำวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ n-octadecane ผสมกับสารลดแรงตึงผิว Sodium dodecyl sulfate (SDS) มาเตรียมเป็นอิมัลชันแบบ oil-in-water (Oc-SDS) โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิคช่วยในการสร้างอิมัลชัน

2) นำอิมัลชัน Oc-SDS ที่ได้ไปผสมกับสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์ PDPA ซึ่งมีประจุตรงข้ามกับประจุของสารลดแรงตึงผิว พร้อมปั่นกวน เกิดเป็นนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้

ปัจจัยศึกษาที่จะปรับเปลี่ยนในขั้นนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ ได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลาย PDPA ที่ใช้ในการสร้างเปลือกนอกของนาโนแคปซูล เป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 มิลลิโมลาร์
- ความเข้มข้นของวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ เป็น 2.5, 5, 7.5, 10, 15 มิลลิลิตร/ลิตร
- ระยะเวลาในการทำให้เป็นอิมัลชันโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิค เป็น 5, 10, 15, 20, 30 นาที

3.3.2 ตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ ซึ่งในขั้นนี้จะประกอบด้วยกิจกรรมย่อย ดังนี้

นำนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ที่เตรียมได้ในขั้นที่ 3.3.1 ไปตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

- ลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)
- การวัดขนาดและประจุบนพื้นผิวของนาโนแคปซูลที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงเชิงพลวัต (DLS)

- ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะและช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) โดยก่อนการตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ตัวอย่างแคปซูลจะถูกนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer)

3.3.3 การเตรียมพื้นผิวผ้าที่จะนำมาใช้ในการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ โดยนำผ้าตัวอย่างที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ มาปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมีให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวกบนพื้นผิว เพื่อให้มีการยึดติดกับสารตกแต่งในขั้นตอนถัดไปได้ดี ในขั้นนี้จะประกอบด้วยกิจกรรมย่อย ดังนี้

- 1) นำผ้าผ่ายไปแช่ในสารละลายผสมระหว่าง CHTAC กับ NaOH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำออกมาสะเทินให้เป็นกลาง โดยการล้างในกรดอะซิติกเจือจาง จากนั้นล้างในน้ำ

DI หลายๆ ครั้ง จนผ้ามี pH เป็นกลาง

3.3.4 การตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้บนพื้นผิวผ้าด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ โดยใช้พอลิอิลเล็กโทรไลต์เป็นสารยึดติด ในขั้นนี้จะประกอบด้วยกิจกรรมย่อย ดังนี้

1) นำผ้าตัวอย่างที่ปรับปรุงให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบนพื้นผิวแล้วมาจุ่มเคลือบในสารละลายพอลิอิลเล็กโทรไลต์ PSS ซึ่งมีประจุลบ ซึ่งเป็นประจุตรงข้ามกับประจุบนพื้นผิวผ้าและประจุบนพื้นผิวแคปซูล เป็นเวลา 30 นาที

2) นำผ้าตัวอย่างจากขั้นตอนที่ 1 ไปแช่ล้างในน้ำ DI เป็นเวลา 5 นาที

3) นำผ้าตัวอย่างจากขั้นตอนที่ 2 ไปจุ่มในสารละลายที่มีนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้กระจายตัวอยู่ เป็นเวลา 30 นาที

4) นำผ้าตัวอย่างจากขั้นตอนที่ 3 ไปแช่ล้างในน้ำ DI เป็นเวลา 5 นาที

ปัจจัยศึกษาที่จะปรับเปลี่ยนในขั้นนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้บนพื้นผิวผ้า ได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายพอลิอิลเล็กโทรไลต์ PSS ที่ใช้เป็นสารยึดติด เป็น 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50 มิลลิโมลาร์
- สมบัติพื้นผิวของนาโนแคปซูล
- จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ PSS/นาโนแคปซูล เป็น 1-5 รอบ

3.3.5 ตรวจสอบคุณสมบัติและทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลบรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ ซึ่งในขั้นนี้จะประกอบด้วยกิจกรรมย่อย ดังนี้

นำผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลที่เตรียมได้ในขั้นที่ 3.3.4 ไปตรวจสอบคุณสมบัติ, ปริมาณนาโนแคปซูลบนชิ้นผ้าตัวอย่าง และทดสอบสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูงชนิดฟิลิมีชัน (FE-SEM)

- สถานะทางเคมีของผ้าที่ผ่านการตรึงนาโนแคปซูลด้วยโดยใช้เทคนิค X-ray photoelectron spectrometer (XPS) เทียบกับผ้าก่อนการปรับปรุงพื้นผิว
- ปริมาณของนาโนแคปซูลที่ถูกตรึงลงบนผ้าฝ้าย โดยการตรวจวัดสีของ Sudan red 7B ที่ละลายอยู่ใน n-octadecane ด้วยเครื่องตรวจวัดสี (Colorimeter) ทำโดยละลายสี Sudan red 7B ใน n-octadecane ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ก่อนนำไปเตรียมแคปซูลและตรึงลงบนผ้าฝ้าย จากนั้นนำผ้าตัวอย่างไปตรวจวัดค่าความเข้มสี (K/S) ของ Sudan red 7B ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร
- สมบัติการปรับอุณหภูมิได้ (Thermo-regulation) ตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน ทำโดยนำชิ้นผ้าฝ้ายตั้งต้นและผ้าฝ้ายตัวอย่างไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำออกมาอยู่ในตู้ที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนบันทึกภาพที่เวลา 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 นาที ซึ่งสีฟ้าในภาพความร้อนจะบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสีเหลืองและสีแดงตามลำดับ
- สมบัติการหายใจได้ (Breathability) ตรวจวิเคราะห์จากความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ทำโดยนำน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตรใส่ขวดแก้วขนาดเล็ก (Vial) แล้วนำไปซังน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นผ้าตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมารัดปิดที่ปากขวดแทนฝาขวด จากนั้นนำขวดแก้วที่ถูกปิดด้วยชิ้นผ้าตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำขวดแก้วออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นผ้าตัวอย่างออกจากปากขวด แล้วซังน้ำหนักอีกครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า WVTR ด้วยสมการดังแสดง [38]

$$WVTR = \frac{24M}{At}$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การเตรียมอิมัลชัน Oc-SDS

ในการเตรียมอิมัลชัน Oc-SDS งานวิจัยนี้เลือกใช้ SDS ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่า ค่าการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ n-octadecane และ เวลาในการทำอัลตราโซนิกเพื่อให้เกิดเป็นอิมัลชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยเลือกจากสภาวะที่ไม่มี n-octadecane เหลือเกินอยู่ในระบบ ทำโดยละลายสี Sudan red 7B ซึ่งมีสีแดงลงไป ใน n-octadecane ก่อนนำไปเตรียมเป็นอิมัลชัน ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งตัวย่อ emul-S_{x₁}Oc_{x₂}_t_{x₃} แทนอิมัลชัน โดยที่ x₁ คือความเข้มข้น SDS (มิลลิโมลาร์), x₂ คือความเข้มข้น n-octadecane (มิลลิลิตร/ลิตร) และ x₃ คือเวลาในการทำอัลตราโซนิก (นาที)



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายอิมัลชัน Oc-SDS ที่มีสีของ Sudan red 7B ที่เตรียมจากความเข้มข้นของ n-octadecane และเวลาในการทำอัลตราโซนิกที่แตกต่างกัน

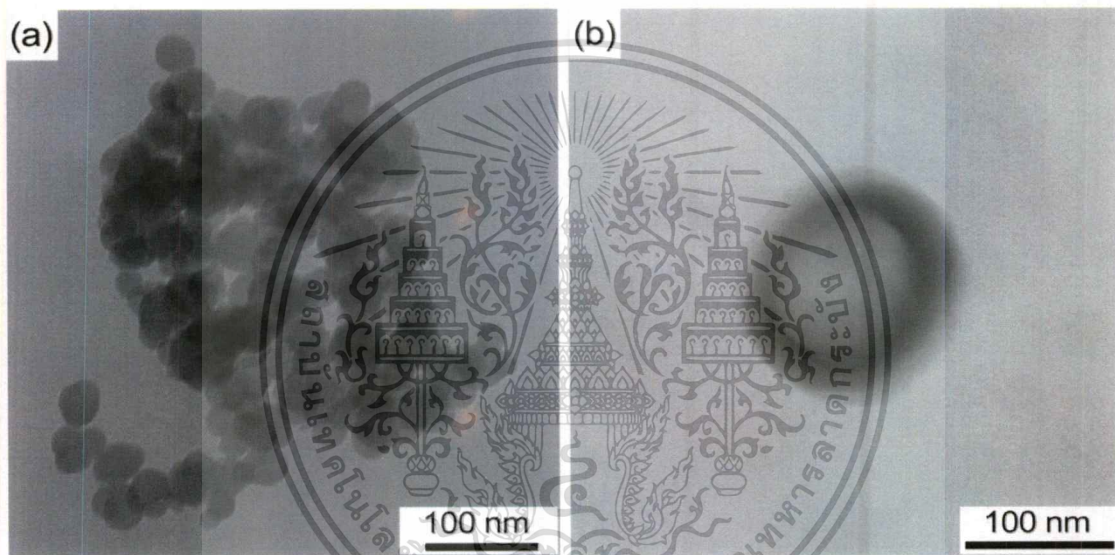
จากภาพที่ 4.1 พบว่าการสภาวะที่ใช้เวลาในการทำอัลตราโซนิก 10 นาที และ n-octadecane ที่ความเข้มข้น 2.5-10 มิลลิลิตร/ลิตร จะไม่มี n-octadecane เหลือเกิน แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้น n-octadecane เป็น 15 มิลลิลิตร/ลิตร จะต้องใช้เวลาในการทำอัลตราโซนิกมากถึง 30 นาทีจึงจะทำให้ n-octadecane ไม่เหลือเกินได้ จากผลดังกล่าวเราจึงเลือกใช้อิมัลชัน Oc-SDS ที่เตรียมจาก n-octadecane เข้มข้น 10 มิลลิลิตร/ลิตร ที่ใช้เวลาในการทำให้เกิดเป็นอิมัลชัน 10 นาที ไปใช้ในการห่อหุ้มด้วยพอลิอิเล็กโทรไลต์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเตรียมนาโนแคปซูลพอลิเล็กโทรไลต์บรรจุวัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้

เมื่อนำ Oc-SDS ที่มีประจุลบที่เตรียมได้ข้างต้นมาทำการห่อหุ้มด้วยพอลิเล็กโทรไลต์ประจุบวก PDDA ได้เป็นแคปซูล PDDA ที่ห่อหุ้มด้วย n-octadecane (PDDA-en-Oc) โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ PDDA ซึ่งใช้ตัวย่อ $PDX_4-en-SX_1Ocx_2_tx_3$ แทนแคปซูล PDDA-en-Oc โดยที่ x_1 คือความเข้มข้น SDS (มิลลิโมลาร์), x_2 คือความเข้มข้น n-octadecane (มิลลิลิตร/ลิตร), x_3 คือเวลาในการทำอัลตราโซนิก (นาที) และ x_4 คือความเข้มข้น PDDA (มิลลิโมลาร์)

ภาพที่ 4.2 (a) และ (b) แสดงภาพ TEM ของแคปซูล PDDA-en-Oc พบว่าอนุภาคที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกลม และมีโครงสร้างเป็น เปลือก/แกน (Core/shell) เป็นการยืนยันว่าวิธีการในงานวิจัยนี้สามารถห่อหุ้ม n-octadecane เป็นแคปซูลได้สำเร็จ

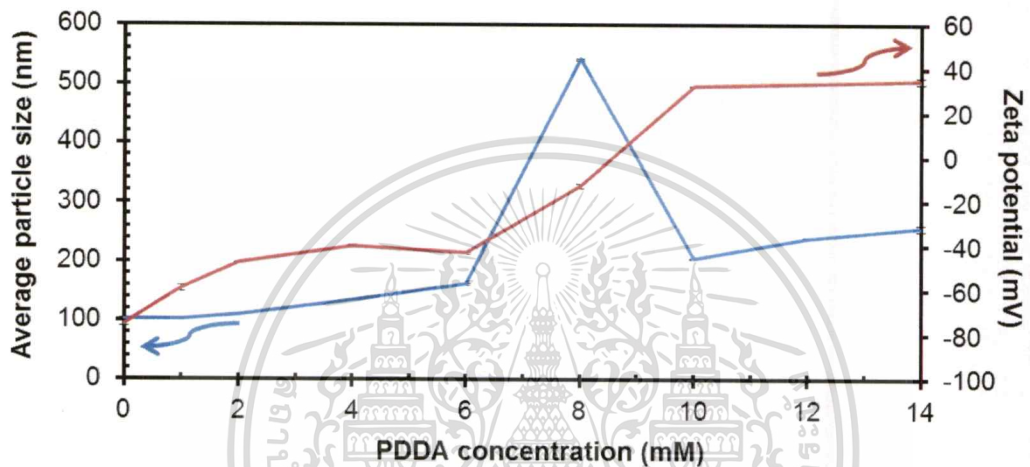


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย TEM ของแคปซูล PDDA-en-Oc

4.2.1 ขนาดอนุภาคและค่าศักย์ซีต้าของแคปซูล PDDA-en-Oc

ภาพที่ 4.3 และตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) และค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของแคปซูล PDDA-en-Oc เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ PDDA พบว่าเมื่อมีการเติมสารละลาย PDDA ลงไปในอิมัลชันตั้งต้น Oc-SDS อนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่าชั้นของ PDDA ได้เข้าไปห่อหุ้ม Oc-SDS เรียบร้อยแล้ว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย PDDA ที่ใช้ในการเตรียมนาโนแคปซูล แคปซูลจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจาก PDDA เข้าไปห่อหุ้ม Oc-SDS มากขึ้น และ/หรือ การจัดเรียงสายโซ่ของ PDDA เปลี่ยนไป และเมื่อมาดูที่ผลค่าศักย์ซีต้า พบว่าอิมัลชันตั้งต้น Oc-SDS มีค่าศักย์ซีต้าเป็นลบ เนื่องจากประจุลบจากอิมัลซิไฟเออร์ SDS แต่เมื่อมีการเติมสารละลาย PDDA ลงไปในอิมัลชันตั้งต้น Oc-SDS ค่าศักย์ซีต้าจะมีค่าเพิ่มไปทางค่าบวกมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าชั้นของ PDDA ได้เข้าไปห่อหุ้มประจุบางส่วนบนพื้นผิว Oc-SDS แล้ว อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้น PDDA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก 4 ไป 6 มิลลิโมลาร์ ตัวอย่างที่ได้จะมีค่าศักย์ซีต้าลดลง ซึ่งไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากในตัวอย่างแคปซูลที่ใช้ PDDA เข้มข้น 6 มิลลิโมลาร์ เกิดการรวมตัวของแคปซูลเป็นก้อนขนาดเล็ก ทำให้ค่าศักย์ซีต้า ที่ได้คลาดเคลื่อน การเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย PDDA ที่ใช้ในการเตรียมแคปซูลจาก 6 เป็น 8 มิลลิโมลาร์ แคปซูลที่ได้จะมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 161 เป็น 541 นาโนเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้สารละลาย PDDA เข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ ในการเตรียมแคปซูล แคปซูลที่ได้จะมีค่าศักย์ซีต้าใกล้เคียง 0 ทำให้ระบบอิมัลชันที่ได้ไม่เสถียร เพราะแรงผลักระหว่างอนุภาคไม่เพียงพอ จึงเกิดการรวมตัวกันของแคปซูลเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ Flocculation ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและค่าศักย์ซีต้าของแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายการเกิดปรากฏการณ์ Flocculation

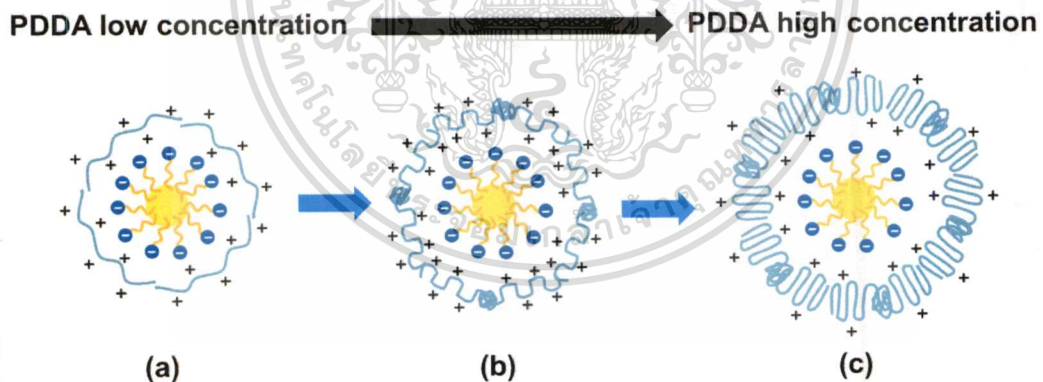
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, ระยะเวลากระจายตัวของอนุภาค และค่าศักย์ไฟฟ้าของ Oc-SDS และแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสารละลาย PDDA (มิลลิโมลาร์)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ดัชนีการกระจายตัวของอนุภาค (PDI)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)
emul-S10Oc10_t10	0	101.00 ± 3.08	0.147 ± 0.022	-74.87 ± 1.27
PD1-en-S10Oc10_t10	1	101.37 ± 0.84	0.147 ± 0.015	-59.09 ± 1.38
PD2-en-S10Oc10_t10	2	108.90 ± 0.56	0.146 ± 0.011	-47.69 ± 0.29
PD4-en-S10Oc10_t10	4	134.17 ± 0.42	0.175 ± 0.007	-40.29 ± 0.52
PD6-en-S10Oc10_t10	6	160.63 ± 1.69	0.188 ± 0.006	-43.29 ± 0.25
PD8-en-S10Oc10_t10	8	541.13 ± 1.55	0.198 ± 0.054	-12.94 ± 0.93
PD10-en-S10Oc10_t10	10	204.43 ± 1.19	0.143 ± 0.014	31.94 ± 0.22
PD12-en-S10Oc10_t10	12	238.17 ± 1.50	0.140 ± 0.006	33.38 ± 0.55
PD14-en-S10Oc10_t10	14	255.97 ± 5.61	0.159 ± 0.014	34.54 ± 1.45

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย PDDA จาก 8 เป็น 10 มิลลิโมลาร์ แคปซูลจะมีค่าศักย์-ศักย์เพิ่มจาก -12.94 เป็น 31.94 มิลลิโวลต์ ทำให้มีลิ่มชั้นที่เกิดขึ้นมีความเสถียร ไม่เกิดปรากฏการณ์ Flocculation ขนาดของแคปซูลที่ได้จึงลดลงจาก 541 เป็น 204 นาโนเมตร การเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย PDDA มากกว่า 10 มิลลิโมลาร์ แคปซูลที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ค่าศักย์ศักย์ไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลที่ได้สามารถทำนายการจัดเรียงรูปร่าง (Conformation) ของ PDDA ที่ห่อหุ้มไปบน Oc-SDS ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.5 คือเมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลาย PDDA ต่ำ โมเลกุล PDDA จะจัดเรียงตัวค่อนข้างที่เหยียดในสารละลาย เนื่องจากการผลักกันของประจุเดียวกันภายในสายโซ่ เมื่อไปห่อหุ้มบน Oc-SDS จะห่อหุ้มลงไปแบบแผ่ราบไปกับพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (a) การใช้สารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้สายโซ่ PDDA จะเริ่มขดไปมาภายในสายโซ่ เนื่องจากเกิดการผลักกันจากทั้งประจุภายในสายโซ่เดียวกันและระหว่างสายโซ่ เมื่อไปห่อหุ้มบน Oc-SDS จะได้ชั้นของเปลือกที่หนาขึ้น และมีประจุบวกบนพื้นผิวที่หนาแน่นกว่าการใช้สารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่ำดังแสดงในภาพที่ 4.5 (b) การใช้ความเข้มข้น PDDA เข้มข้นสูงมาก จะทำให้เกิดการขดพับและทำให้สายโซ่บางส่วนเกิดการพันกันระหว่างสายโซ่ เรียกว่า Electrostatic blob ซึ่งบริเวณพื้นผิวด้านนอกของตำแหน่งที่เกิด Electrostatic blob จะไม่มีประจุ เนื่องจากตำแหน่งที่มีประจุหันเข้าด้านใน [39] ทำให้เมื่อไปห่อหุ้มบน Oc-SDS จะได้ชั้นของเปลือกที่หนา แต่มีประจุบวกบนพื้นผิวที่ไม่หนาแน่น

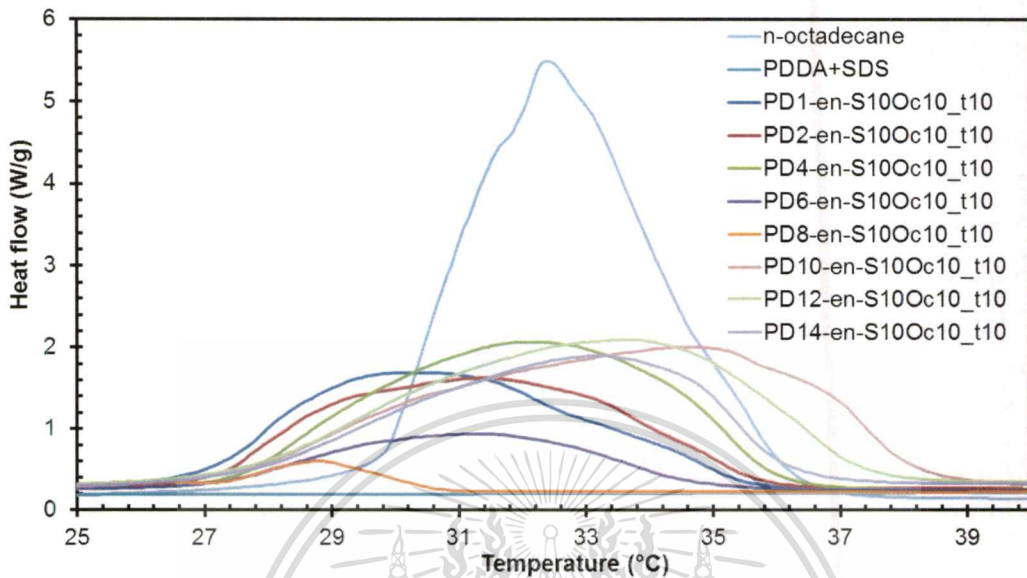


ภาพที่ 4.5 แบบจำลองการเกิด PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.2.2 สมบัติทางความร้อนของแคปซูล PDDA-en-Oc

ภาพที่ 4.6 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของแคปซูล PDDA-en-Oc เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ PDDA พบว่าแคปซูลที่ได้มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ n-octadecane เริ่มต้น ซึ่งสารผสมระหว่าง PDPA กับ SDS ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

ในตำแหน่งนี้ เป็นการยืนยันว่า n-octadecane ถูกห่อหุ้มเป็นแคปซูลแล้ว โดยจะเห็นว่าแคปซูลที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมเหลวได้เร็วกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเทียบกับปริมาณสารสูงกว่า

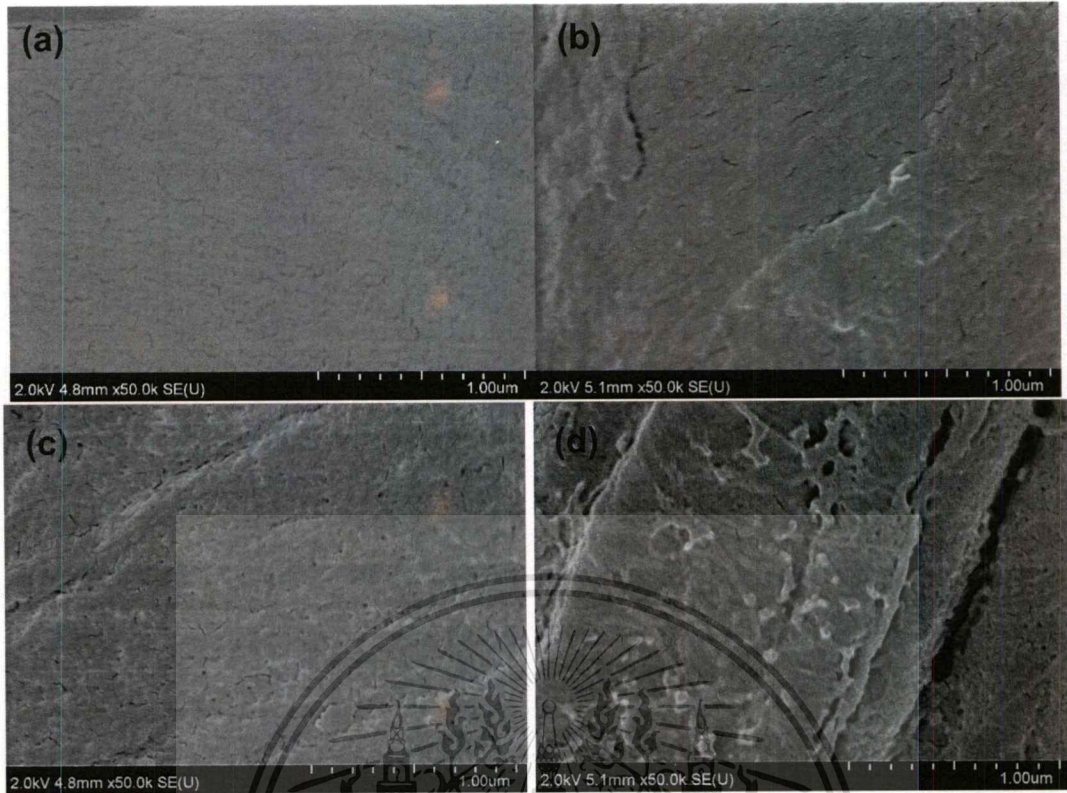


ภาพที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของ PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ ค่าความร้อนแฝงหรือค่าเอนทัลปี (ΔH) ซึ่งแสดงถึงปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างดูดหรือคายเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะ และค่าประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเป็นแคปซูล (Encapsulation efficiency) พบว่าแคปซูลที่เตรียมได้มีค่าความร้อนแฝงต่ำกว่า n-octadecane ตั้งต้น เนื่องจากการมีเปลือกมาห่อหุ้มจะไปขัดขวางการส่งผ่านความร้อนระหว่าง n-octadecane กับสิ่งแวดล้อม การเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย PDDA ในการเตรียมแคปซูล พบว่าแคปซูลจะมีค่าความร้อนแฝงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโมเลกุลของ PDDA จำนวนมากขึ้นที่จะไปห่อหุ้ม n-octadecane เกิดเป็นแคปซูล ก่อให้เกิดแคปซูลปริมาณมากขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเป็นแคปซูลก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนแฝงของตัวอย่างแคปซูลที่เตรียมจาก PDDA 6 และ 8 มิลลิโมลาร์ มีค่าต่ำ ไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ได้กล่าวมาก่อนหน้า ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ PDDA 6 และ 8 มิลลิโมลาร์ ระบบอิมัลชันที่เกิดขึ้นไม่เสถียร เกิดปรากฏการณ์ Flocculation ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้า ทำให้แคปซูลเกิดการรวมตัวกันแล้วแยกชั้นออกไป การเพิ่มความเข้มข้นสารละลาย PDDA ที่ใช้ในการเตรียมแคปซูลมากกว่า 10 มิลลิโมลาร์ ค่าความร้อนแฝงจะเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีชั้นเปลือกห่อหุ้มแคปซูลที่หนาจะทำให้เกิดการขัดขวางการส่งผ่านความร้อนมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ *n*-octadecane และแคปซูล PDDA-en-Oc ที่เตรียมจากสารละลาย PDDA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น สารละลาย PDDA (มิลลิโมลาร์)	$T_{m,onset}$ (องศาเซลเซียส)	$T_{m,peak}$ (องศาเซลเซียส)	ΔH_m (จูล/กรัม)	$T_{c,onset}$ (องศาเซลเซียส)	$T_{c,peak}$ (องศาเซลเซียส)	ΔH_c (จูล/กรัม)	ประสิทธิภาพการ ทอหุ้มเป็นแคปซูล (เปอร์เซ็นต์)
<i>n</i> -octadecane	0	29.6	32.44	232.3	27.42	24.8	236.77	-
PD1-en-S10Oc10_t10	1	26.86	24.08	98.5	25.38	30.53	101.55	42.65
PD2-en-S10Oc10_t10	2	26.98	31.39	115.57	25.33	24.59	119.41	50.09
PD4-en-S10Oc10_t10	4	27.34	32.09	124.44	25.82	23.37	124.38	53.05
PD6-en-S10Oc10_t10	6	26.90	31.28	43.88	25.11	22.68	38.54	17.57
PD8-en-S10Oc10_t10	8	26.84	28.77	15.47	25.08	21.12	14.10	6.30
PD10-en-S10Oc10_t10	10	27.20	34.66	151.97	26.08	25.74	157.59	65.99
PD12-en-S10Oc10_t10	12	27.41	33.58	137.78	25.54	25.36	142.49	59.75
PD14-en-S10Oc10_t10	14	27.37	33.17	109.99	25.92	25.06	113.54	47.65

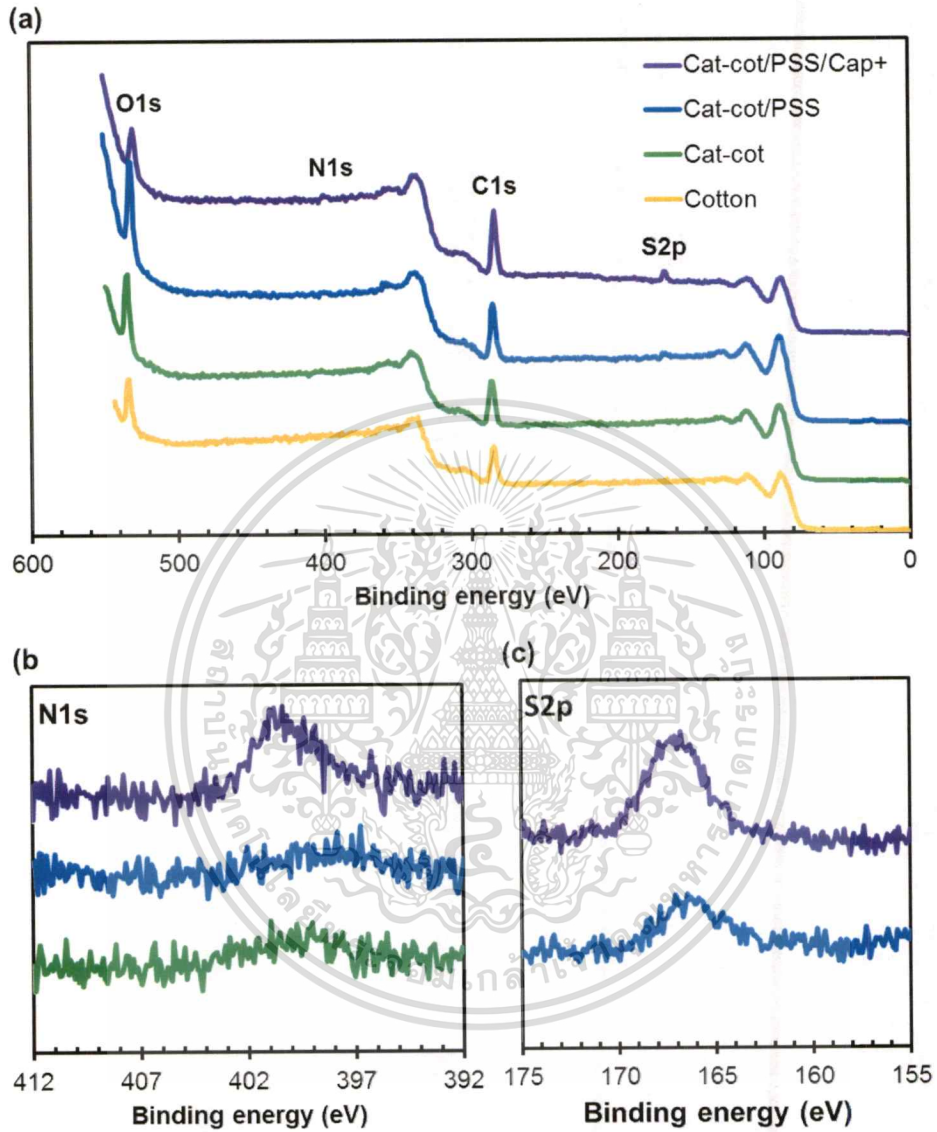


ภาพที่ 4.8 ภาพถ่าย FE-SEM ของผ้าฝ้ายเริ่มต้น (a) ผ้า Cat-cot (b) ผ้า Cat-cot/PSS (c) ผ้า Cat-cot/PSS/Cap4+ (d)

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในแต่ละชั้น สามารถตรวจวิเคราะห์ได้จากเทคนิค XPS ผลการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่า ผ้าฝ้ายตั้งต้น จะแสดงสัญญาณของ C1s และ O1s แต่ผ้า Cat-cot จะพบสัญญาณของ N1s ปริมาณน้อยที่เกิดจาก ขั้นตอนการทำให้ผ้าฝ้ายมีประจุบวก ร่วมกับสัญญาณของ C1s และ O1s เป็นการยืนยันได้ว่าผ้าฝ้ายตั้งต้น ถูกทำปฏิกิริยาให้มีประจุบวกได้สำเร็จ ผ้า Cat-cot/PSS จะตรวจพบสัญญาณของ S2p จากหมู่ซัลโฟเนต ในโครงสร้าง PSS ร่วมกับสัญญาณ C1s, O1s และ N1s เป็นการยืนยันได้ว่า PSS ได้ถูกเคลือบลงบนพื้นผิว ของผ้าฝ้ายตัวอย่างแล้ว ผ้าตัวอย่างที่ตรึงด้วยแคปซูล PDDA-en-Oc จะพบสัญญาณของ N1s และ สัญญาณ S2p เพิ่มมากขึ้นจากผ้า Cat-cot/PSS ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้อยที่เกิดขึ้นของสัญญาณ N1s และ S2p ได้ถูกตรวจวิเคราะห์ ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.9 (a) และ (b) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มของสัญญาณของ N1s, O1s และ S2p และสัดส่วนของความเข้ม สัญญาณของ N/O และ S/O ของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในแต่ละชั้น พบว่าสัดส่วนของ ความเข้มสัญญาณของ N/O และ S/O ของผ้าฝ้ายที่ตรึงด้วยแคปซูล PDDA-en-Oc มีค่าเพิ่มขึ้นจากผ้าฝ้าย ก่อนการตรึงแคปซูล PDDA-en-Oc (Cat-cot, Cat-cot/PSS) เนื่องมาจากสัญญาณของ N1s จาก PDDA

และสัญญาณ S2p จาก SDS จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแคปซูล PDDA-en-Oc ถูกติดลงไปกับพื้นผิวผ้าฝ้ายได้สำเร็จ



ภาพที่ 4.9 XPS สเปกตรัมของผ้าฝ้ายเริ่มต้น, ผ้า Cat-cot, ผ้า Cat-cot/PSS และผ้า Cat-cot/PSS/Cap4+ ที่ความละเอียดต่ำ (a) ความละเอียดสูงที่ตำแหน่ง N1s (b) และความละเอียดสูงที่ตำแหน่ง S2p (c)

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของสัญญาณของ N1s, O1s และ S2p และสัดส่วนของความเข้มข้นสัญญาณของ N/O และ S/O ของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวในแต่ละชั้นจากเครื่อง XPS

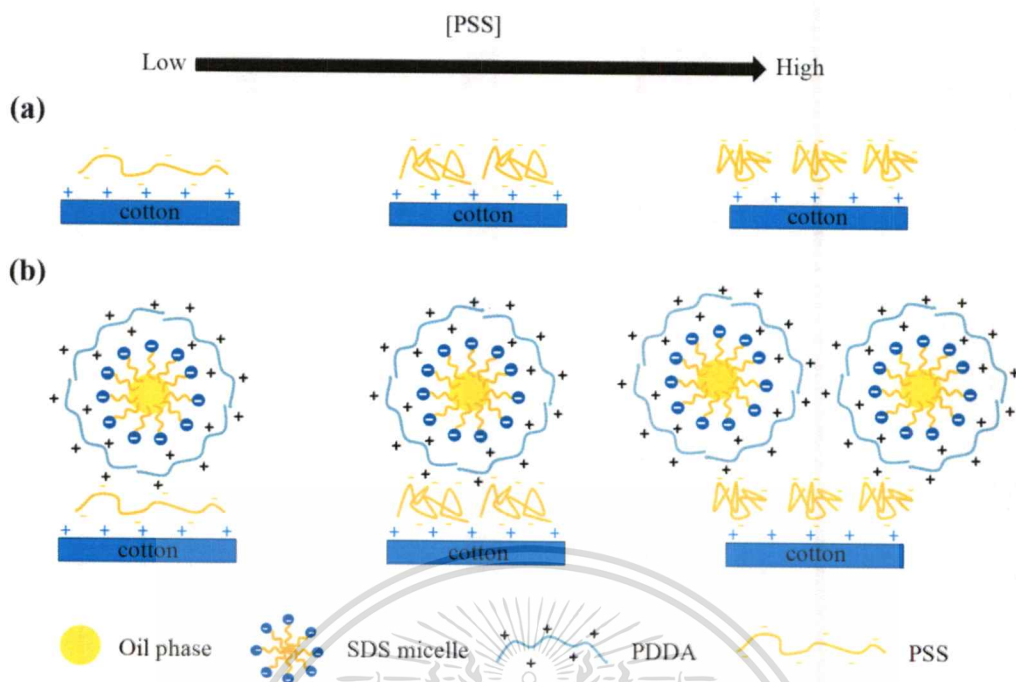
Sample	Peak intensity (CPS)			Intensity ratio	
				N/O	S/O
	N1s	O1s	S2p		
Cotton	n/a	6.11	n/a	-	-
Cat-cot	0.44	8.95	n/a	0.05 : 1	-
Cat-cot/PSS	0.39	9.24	0.51	0.04 : 1	0.06 : 1
Cat-cot/PSS10/Cap4+	0.58	4.37	0.76	0.13 : 1	0.17 : 1

ผลของการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบ Cat-cot ต่อปริมาณแคปซูลที่ถูกติดลงบนพื้นผิวผ้า Cat-cot/PSS จะถูกตรวจวัดจากค่าความเข้มข้นของสี (K/S) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งค่า K/S จะแสดงถึงปริมาณแคปซูลที่มีสีจาก Sudan red 7B เป็นองค์ประกอบ (colCap+) ยิ่งค่า K/S สูงแสดงว่าบนพื้นผิวผ้ามีแคปซูลอยู่ปริมาณมาก พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดในการตรึงแคปซูล แคปซูลจะถูกตรึงลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายตัวอย่างได้ในปริมาณมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ค่า K/S ของ Cat-cot/PSS/colCap4+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบในขั้นตอนก่อนหน้า

Sample	PSS concentration (mM)	K/S
Cat-cot/PSS1/colCap4+	1	0.0099 ± 0.0001
Cat-cot/PSS5/colCap4+	5	0.0152 ± 0.0003
Cat-cot/PSS10/colCap4+	10	0.0246 ± 0.0005
Cat-cot/PSS20/colCap4+	20	0.0301 ± 0.0007
Cat-cot/PSS30/colCap4+	30	0.0410 ± 0.0001
Cat-cot/PSS40/colCap4+	40	0.0459 ± 0.0003
Cat-cot/PSS50/colCap4+	50	0.0559 ± 0.0002

จากผลที่ได้ข้างต้นสามารถทำนายพฤติกรรมของ PSS ที่เคลือบไปบนพื้นผิวของ Cat-cot และ แคปซูลที่ตรึงลงไปบน Cat-cot/PSS ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แบบจำลองการเกิด Cat-cot/PSS และ Cat-cot/PSS/Cap4+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบ

เนื่องจาก PSS เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์แก่ แตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย PSS ต่ำ สายโซ่โมเลกุลของ PSS จะจัดเรียงตัวค่อนข้างที่จะเหยียดในสารละลาย เนื่องจากการผลักรันของประจุเดียวกันภายในสายโซ่ เมื่อนำไปเคลือบไปบนพื้นผิวของ Cat-cot จะเคลือบไปแบบค่อนข้างแผ่ราบไปกับพื้นผิว แต่การใช้สารละลาย PSS ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้สายโซ่ PSS เริ่มหดไปมาภายในสายโซ่ เนื่องจากการผลักรันจากประจุเดียวกันทั้งจากภายในสายโซ่เดียวกันและระหว่างสายโซ่ ทำให้เมื่อไปเคลือบไปบนพื้นผิว Cat-cot จึงมีความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวสูงกว่า เมื่อนำไปตรึงด้วยแคปซูล PDDA-en-Oc ที่มีผิวชั้นนอกเป็นประจุบวก แคปซูลจึงสามารถไปติดบนพื้นผิวได้มากกว่า

4.5 การตรึงแคปซูล PD10-en-S10Oc10_t10 ลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ถูกทำให้มีประจุบวก

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าแคปซูล PD4-en-S10Oc10_t10 (Cap4+) ซึ่งมีค่าศักย์ซีต้าเป็น -40.29 มิลลิโวลต์ สามารถติดลงบนพื้นผิว Cat-cot/PSS ซึ่งมีประจุลบได้ ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของสมบัติพื้นผิวของแคปซูล PDDA-en-Oc ที่ใช้ในการตรึงลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายตัวอย่างต่อปริมาณแคปซูลที่ติดลงบนพื้นผิวผ้าฝ้าย เราจึงทำการเลือกแคปซูล PD10-en-S10Oc10_t10 (Cap10+) ซึ่งมีค่าศักย์ซีต้าเป็น 31.94 มิลลิโวลต์ มาตรึงลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายเปรียบเทียบกับแคปซูล Cap4+ โดยทำการตรวจ

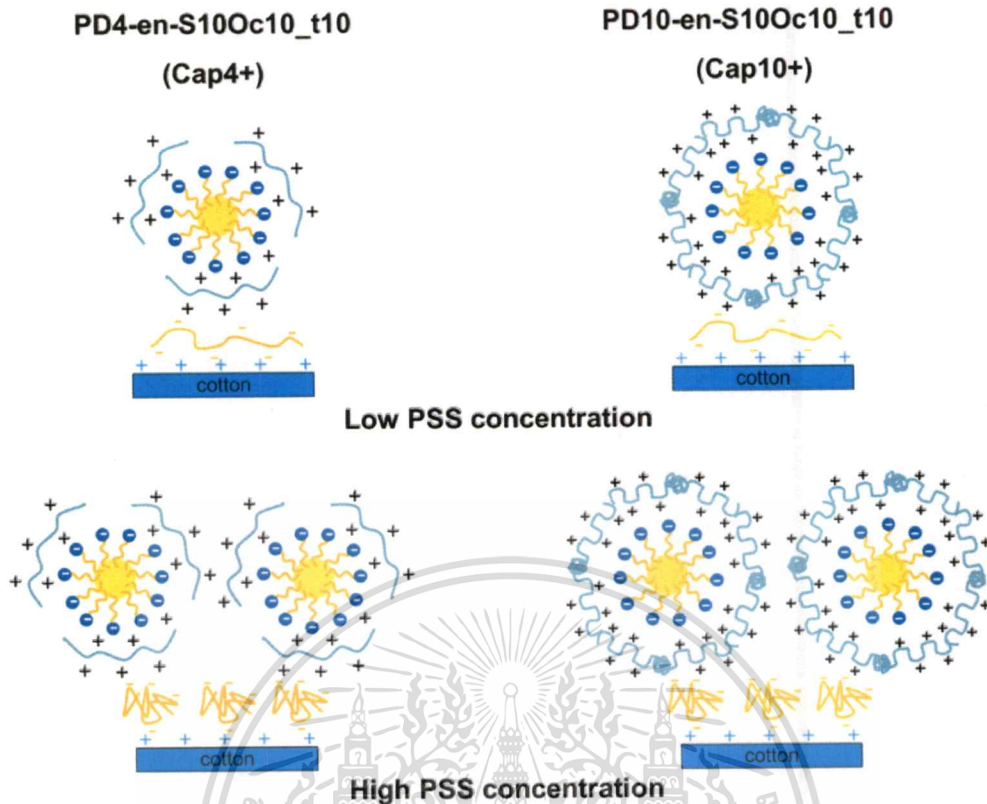
วิเคราะห์หาปริมาณแคปซูลบนพื้นผิวผ้าฝ้ายตัวอย่างจากค่า K/S ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า K/S ของ Cat-cot/PSS/colCap4+ และ Cat-cot/PSS/colCap10+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบในขั้นตอนก่อนหน้า

Sample	K/S	
	Cap4+	Cap10+
Cat-cot/PSS1/colCap+	0.0099 ± 0.0001	0.0097 ± 0.0003
Cat-cot/PSS5/colCap+	0.0152 ± 0.0003	0.0148 ± 0.0010
Cat-cot/PSS10/colCap+	0.0246 ± 0.0005	0.0246 ± 0.0006
Cat-cot/PSS20/colCap+	0.0301 ± 0.0007	0.0288 ± 0.0008
Cat-cot/PSS30/colCap+	0.0410 ± 0.0001	0.0407 ± 0.0005
Cat-cot/PSS40/colCap+	0.0459 ± 0.0003	0.0456 ± 0.0013
Cat-cot/PSS50/colCap+	0.0559 ± 0.0002	0.0557 ± 0.0005

พบว่าการใช้ความเข้มข้นสารละลาย PSS ที่ใช้ในการปรับปรุงผ้าก่อนการตรึงแคปซูลเท่ากัน ปริมาณแคปซูล Cap4+ และ Cap10+ ที่ถูกตรึงลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายจะใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย PSS พบว่าปริมาณแคปซูลทั้ง Cap4+ และ Cap10+ ที่ถูกตรึงลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายจะมากขึ้น

จากผลที่ได้สามารถทำนายพฤติกรรมของการตรึงแคปซูล Cap4+ และ Cap10+ ลงบน Cat-cot/PSS ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.11 แคปซูล Cap4+ และ Cap10+ จะยึดติดลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายด้วยอันตรกิริยาเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic interaction) ระหว่าง PSS ที่มีประจุลบที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้าฝ้าย กับประจุบวกจากพื้นผิวของชั้นนอกสุดของแคปซูล โดยที่แคปซูล Cap10+ มีประจุบวกบนพื้นผิวด้านนอกสุดมากกว่าแคปซูล Cap4+ ทำให้ผ้าฝ้ายตัวอย่างที่ตรึงด้วยแคปซูล Cap10+ จะมีตำแหน่งประจุบวกบนพื้นผิวผ้าฝ้ายมากกว่าผ้าฝ้ายที่ตรึงด้วยแคปซูล Cap4+ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณแคปซูลที่ยึดติดไปบนพื้นผิวผ้าฝ้ายในปริมาณใกล้เคียงกัน และตำแหน่งประจุบวกบนพื้นผิวผ้าฝ้ายจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้เคลือบผ้าฝ้ายก่อนทำการตรึงแคปซูล

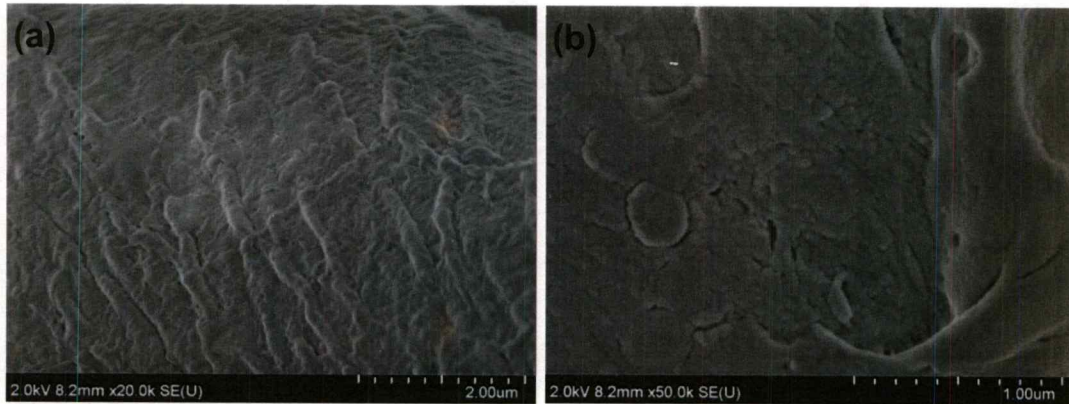


ภาพที่ 4.11 แบบจำลองการเกิด Cat-cot/PSS/Cap4+ และ Cat-cot/PSS/Cap10+ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ใช้ในการเคลือบ

4.6 การเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบของแคปซูล PD10-en-S10Oc10_t10

ปริมาณแคปซูลบนพื้นผิวผ้าสามารถเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มจำนวนชั้นเคลือบแคปซูล โดยการเคลือบสลับระหว่างสารละลาย PSS กับแคปซูลที่มีชั้นนอกสุดเป็นประจุบวก โดยจะใช้เวลาในการแช่ Cat-cot ในสารละลาย PSS 10 นาที และใช้เวลาในการแช่แคปซูล Cap10+ 10 นาที โดยทำการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบในการเคลือบแคปซูลเป็น 1-5 รอบ

เมื่อนำตัวอย่างที่ทำการเคลือบสลับระหว่าง PSS กับแคปซูล Cap10+ เป็นจำนวน 5 รอบ (Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_{x5}) ไปตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FE-SEM ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.12 พบว่าพื้นผิวของผ้าฝ้ายถูกเคลือบด้วยชั้นที่มีความขรุขระที่ประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมของแคปซูล Cap10+ อย่างไรก็ตามอนุภาค Cap10+ ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้าฝ้ายมีลักษณะคล้ายหนอน (Worm-like) เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของ Cap10+ ในชั้นของสารยึดติด PSS



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่าย FE-SEM ของผ้า Cat-cot/(PSS10/Cap10+) $\times 5$ ที่กำลังขยาย 20,000x (a) และกำลังขยาย 50,000x

ผลของการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบในการเคลือบแคปซูลเป็น 1-5 รอบ ต่อปริมาณของแคปซูลที่ติดลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายตัวอย่างสามารถตรวจวิเคราะห์ได้จากค่า K/S เช่นเดียวกับในหัวข้อก่อนหน้า ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ PSS และ Cap10+ สามารถเพิ่มปริมาณแคปซูลได้

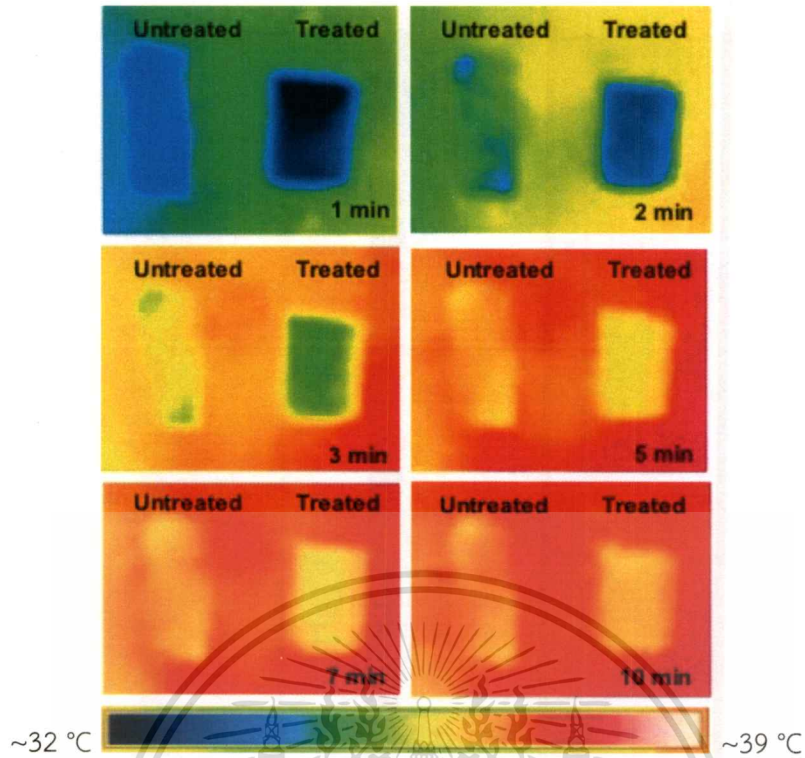
ตารางที่ 4.6 ค่า K/S ของ Cat-cot/(PSS10/colCap10+) เมื่อทำการเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบ PSS/Cap10+

Sample	Number of Cap10+ coated layer	K/S
Cat-cot/(PSS10/colCap10+) $\times 1$	1	0.0243 ± 0.0004
Cat-cot/(PSS10/colCap10+) $\times 2$	2	0.0289 ± 0.0004
Cat-cot/(PSS10/colCap10+) $\times 3$	3	0.0343 ± 0.0004
Cat-cot/(PSS10/colCap10+) $\times 4$	4	0.0423 ± 0.0003
Cat-cot/(PSS10/colCap10+) $\times 5$	5	0.0517 ± 0.0002

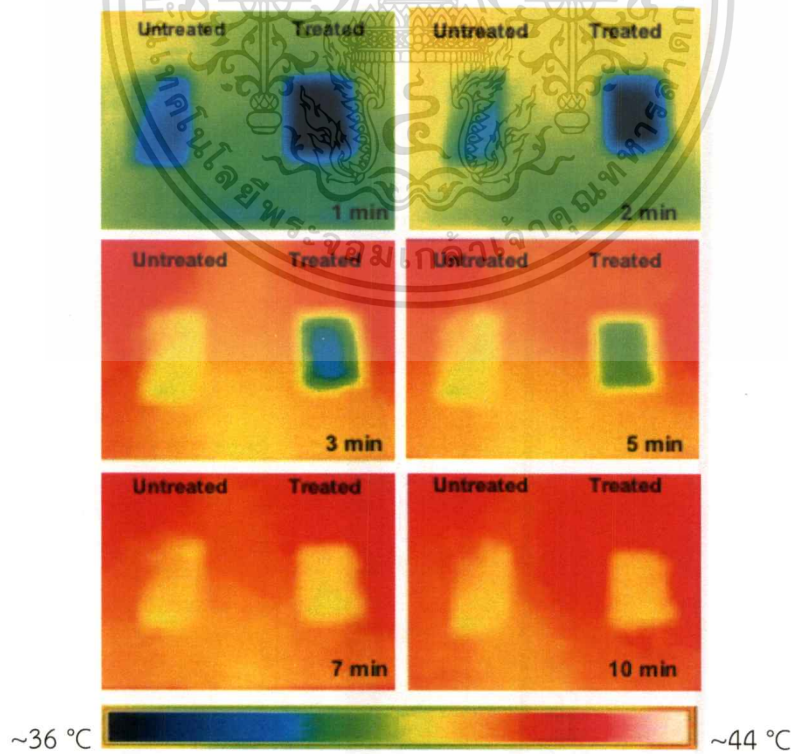
4.7 สมบัติการปรับอุณหภูมิได้ (Thermo-regulation)

ผ้าฝ้ายตัวอย่างที่มีปริมาณแคปซูลบนพื้นผิวผ้าที่แตกต่างกันจะถูกเลือกมาทดสอบสมบัติการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน ทำโดยนำชิ้นผ้าฝ้ายตั้งต้นและผ้าฝ้ายตัวอย่างไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำออกมาอยู่ในตู้ที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนบันทึกภาพที่เวลา 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 นาที ซึ่งสีฟ้าในภาพความร้อนจะบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสีเหลืองและสีแดงตามลำดับ ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.13 – 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

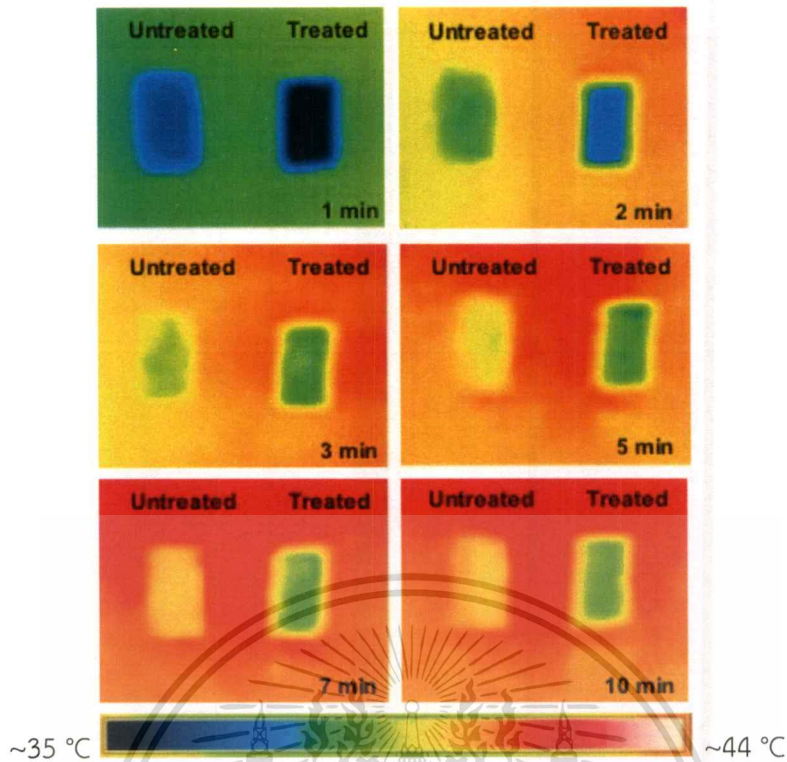


ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายความร้อนของผ้าตัวอย่าง Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x1



ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายความร้อนของผ้าตัวอย่าง Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายความร้อนของผ้าตัวอย่าง Cat-cot/(PSS10/Cap10+)_x5

พบว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายตัวอย่างทุกตัวอย่างจะมีค่าต่ำกว่าผ้าฝ้ายเริ่มต้น ซึ่งให้เห็นถึงการทำงานของสมบัติการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ของแคปซูลที่ตรึงอยู่บนพื้นผิวผ้าฝ้าย โดยเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบเพิ่มสูงขึ้น แคปซูลที่บรรจุด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะจะดูดซับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมมา และเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งการทำงานเช่นนี้ของแคปซูลจะสามารถหน่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผ้าฝ้ายตัวอย่างได้จนกระทั่ง n-octadecane ภายในแคปซูลจะเกิดการหลอมเหลวจนหมด โดยที่ผ้าฝ้ายตั้งต้นสามารถคงความเย็นไว้ได้ประมาณ 3 นาที เนื่องจากสมบัติความเป็นฉนวนทางความร้อนของผ้าฝ้าย และจะเห็นได้ว่าในทุกตัวอย่างผ้าฝ้ายที่ตรึงด้วยแคปซูลบรรจุด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะจะสามารถคงความเย็นไว้ได้นานกว่าผ้าฝ้ายตั้งต้นทั้งหมด โดยที่ตัวอย่างผ้าที่มีปริมาณแคปซูลอยู่จำนวนมากกว่าจะสามารถคงความเย็นไว้ได้นานกว่า ซึ่งตัวอย่างผ้าที่ทำการเคลือบสลับระหว่าง PSS กับแคปซูล Cap10+ เป็นจำนวน 5 รอบ สามารถคงความเย็นไว้ได้นานที่สุด คือมากกว่า 10 นาที

4.8 สมบัติการหายใจได้ (Breathability)

สมบัติการหายใจได้ของชิ้นผ้าตัวอย่างสามารถตรวจวิเคราะห์ได้จากความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ผลการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว

ตัวอย่าง	WVTR (กรัม/ตารางเมตร/วัน)
Cotton	4,042 ± 21
Cat-cot	4,060 ± 71
Cat-cot/PSS1	3,961 ± 71
Cat-cot/PSS3	3,857 ± 11
Cat-cot/PSS5	3,872 ± 42
Cat-cot/PSS1/Cap10+	3,980 ± 63
Cat-cot/PSS3/Cap10+	3,923 ± 64
Cat-cot/PSS5/Cap10+	3,929 ± 15
Cat-cot/(PSS10/Cap10+) _x3	3,946 ± 27
Cat-cot/(PSS10/Cap10+) _x5	3,959 ± 82

พบว่าค่า WVTR ของผ้าฝ้ายตั้งต้นและผ้าฝ้ายตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญชี้ให้เห็นว่ากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลต่อสมบัติการหายใจได้ของผ้าตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถใช้พอลิเอทิลีนโพรพิลีนในการห่อหุ้มวัสดุเปลี่ยนสถานะ n-octadecane และทำหน้าที่เสมือนเป็นสารยึดติดในการตรึงแคปซูลลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายได้สำเร็จ โดยวิธีการที่งานวิจัยนี้นำเสนอ เป็นวิธีการที่ง่าย ทำในระบบที่ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย ทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง ใช้สารเคมีในปริมาณน้อยและสารเคมีที่ใช้ไม่เป็นพิษ ทำให้ประหยัดสารเคมี ประหยัดพลังงานและประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งถือว่าเป็นเทคนิคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ทำให้สมบัติการหายใจได้ของผ้าฝ้ายตั้งต้นเปลี่ยนแปลงไป

- การเตรียมแคปซูล PDDA-en-Oc

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทิลีนโพรพิลีน PDPA ในช่วง 1 – 14 มิลลิโมลาร์ในการเตรียมแคปซูล PDPA-en-Oc จะทำให้แคปซูลมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 101 ถึง 256 นาโนเมตร อีกทั้งจะทำให้ได้แคปซูลในปริมาณมากขึ้น ซึ่งเมื่อมีแคปซูลปริมาณมากขึ้น ค่าความร้อนแฝงที่ได้ก็จะสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 99 ถึง 152 จูลต่อกรัม โดยแคปซูลที่เตรียมจากสารละลายพอลิเอทิลีนโพรพิลีน PDPA เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์จะให้ค่าความร้อนแฝงมากที่สุด คือ 152 จูลต่อกรัม คิดเป็นประสิทธิภาพในการห่อหุ้มเป็นแคปซูลได้เท่ากับ 66 เปอร์เซ็นต์

- การตรึงแคปซูล PDPA-en-Oc ลงบนพื้นผิวผ้าฝ้าย

การใช้ความเข้มข้นของสารละลาย PSS ที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดระหว่างพื้นผิวผ้าฝ้ายกับแคปซูล PDPA-en-Oc สูงขึ้น จะทำให้ได้แคปซูล PDPA-en-Oc มาตรึงลงบนพื้นผิวผ้าฝ้ายเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบสลับระหว่าง PSS และแคปซูล PDPA-en-Oc ก็จะสามารถเพิ่มปริมาณแคปซูลบนพื้นผิวผ้าฝ้ายตัวอย่างได้

สมบัติการปรับอุณหภูมิได้ของผ้าฝ้ายตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแคปซูลที่มีอยู่บนพื้นผิวผ้าฝ้ายตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่แสดงสมบัติการปรับอุณหภูมิได้ ได้ยาวนานที่สุดคือตัวอย่างที่เตรียมจากการเคลือบสลับระหว่าง PSS และแคปซูล PDPA-en-Oc เป็นจำนวน 5 รอบ โดยสามารถคงความเย็นไว้ได้เป็นเวลามากกว่า 10 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำกระบวนการการตรึงนาโนแคปซูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้และพัฒนาในการตกแต่งสำเร็จผ้าจากธรรมชาติและ/หรือผ้าสังเคราะห์อื่นๆ
2. นำกระบวนการในการห่อหุ้มเฟสน้ำมันและตรึงลงบนผ้าฝ้ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้และพัฒนาในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

1. lamphaojeen, Y. and Siriphannon P., (2016, March 13-17). Effect of Polyelectrolyte Multilayers Shell on Thermal Properties of *n*-octadecane Phase change material Nanocapsule. *251st American Chemical Society National Meeting & Exposition, San Diego, California, USA.*
2. lamphaojeen, Y. and Siriphannon P., Adjustable Thermal Barrier of Cotton Fabric by Multilayer Immobilization of Phase change material Nanocapsules; *In preparation.*



เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Pause, Development of heat and cold insulating membrane structures with phase change material, *J. Coated Fabrics* 25 (1995) 59–68.
- [2] J. Rupp, Interactive textiles regulate body temperature, *Int. Text. Bull.* 45 (1) (1999) 58–59.
- [3] G. Nelson, Microencapsulation in textile finishing, *Rev. Prog. Color.* 31 (2001) 57–64.
- [4] S. Rutishauser, *Physiology and Anatomy*, Churchill Livingstone, Edinburgh, London, Madrid, Melbourne, New York, Tokyo, 1994.
- [5] A. Kurklu, Thermal performance of a tapered store containing tubes of phase change material: cooling cycle, *Energ. Convers. Manage.* 38 (4) (1997) 333–340.
- [6] B. Pause, Driving more comfortably with phase change materials, *Tech. Textil. Int.* 11 (2) (2002) 24–27.
- [7] K. Nagano, T. Mochida, S. Takeda, R. Doman' ski, M. Rebow, Thermal characteristics of manganese(II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2) (2003) 229–241.
- [8] A.M. Khudhair, M.M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energ. Convers. Manage.* 45 (2004) 263–275.
- [9] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: a review, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15 (2011) 1373–1391.
- [10] N. Sarier, E. Onder, The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics, *Thermochim. Acta* 452 (2007) 149–160.
- [11] W. Mhike, W.W. Focke, J.P. Mofokeng, A.S. Luyt, Thermally conductive phase change materials for energy storage based on low-density polyethylene, soft Fischer-Tropsch wax and graphite, *Thermochim. Acta* 527 (2012) 75–82.
- [12] A. Demharter, Polyurethane rigid foam: a proven thermal insulating material, *Cryogenics* 38 (1998) 113–117.
- [13] H. Shim, E.A. McCullough, B.W. Jones, Using phase change materials in clothing, *Text. Res. J.* 71 (6) (2001) 495–502.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] F. Salaun, E. Devaux, S. Bourbigot, P. Rumeau, P.O. Chapuis, S.K. Sahe, S. Volz, Thermoregulating response of cotton fabric containing microencapsulated phase change materials, *Thermochim. Acta* 477 (2008) 25–31.
- [15] F. Salaun, E. Devaux, S. Bourbigot, P. Rumeau, Influence of process parameters on microcapsules loaded with n-hexadecane prepared by in-situ polymerization, *Chem. Eng. J.* 155 (1–2) (2009) 457–465.
- [16] Y. Shin, K. Son, D.I. Yoo, Development of natural dyed textiles with thermoregulating properties, *Thermochim. Acta* 511 (1–2) (2010) 1–7.
- [17] J.K. Choi, G. Cho, P. Kim, C. Cho, Thermal storage/release and mechanical properties of phase change materials on polyester fabrics, *Text. Res. J.* 74 (2004) 292–296.
- [18] H. Chung, G. Cho, Thermal properties and physiological responses of vapor-permeable water-repellent fabrics treated with microcapsule-containing PCMs, *Text. Res. J.* 74 (2004) 571–575.
- [19] X.X. Zhang, X.C. Wang, X.M. Tao, K.L. Yick, Energy storage polymer/MicroPCMs blended chips and thermo-regulated fibers, *J. Mater. Sci.* 40 (14) (2005) 3729–3734.
- [20] B. Pause, Interactive thermal insulating system having a layer treated with a coating of energy absorbing phase change material adjacent a layer of fibers containing energy absorbing phase change material, US Patent 6,217,993 (2001), available from <http://patft.uspto.gov/>.
- [21] H. Bo, E.M. Gustafsson, F. Setterwall, Tetradecane and hexadecane binary mixture as phase change materials (PCMs) for cool storage in district cooling systems, *Energy* 24 (1999) 1015–1028.
- [22] X.X. Zhang, X.C. Wang, X.M. Tao, K.L. Yick, Structures, Properties of wet spun thermo-regulated polyacrylonitrile-vinylidene chloride fibers, *Text. Res. J.* 76 (2006) 351–359.
- [23] N. Sarier, E. Onder, Organic phase change materials and their textile applications: An overview, *Thermochim. Acta* 540 (2012) 7–60.
- [24] X.X. Zhang, Y.F. Fan, X.M. Tao, K.L. Yick, Fabrication and properties of microcapsules and nanocapsules containing n-octadecane, *Mater. Chem. Phys.* 88 (2004) 300–307.
- [25] Y. Fang, S. Kuang, X. Gao, Z. Zhang, Preparation and characterization of novel nanoencapsulated phase change materials, *Energ. Convers. Manag.* 49 (2008) 3704–3707.

- [26] L. Sanchez, P. Sanchez, A. de Lucas, M. Carmona, J. Rodriguez, Microencapsulation of PCMs with a polystyrene shell, *Colloid Polymer Sci.* 285 (2007) 1377–1385.
- [27] F. Yu, Z-H. Chen, X-R. Zeng, Preparation, characterization, and thermal properties of microPCMs containing n-dodecanol by using different types of styrene–maleic anhydride as emulsifier, *Colloid Polymer Sci.* 287 (2009) 549–560.
- [28] Z-H. Chen, F. Yu, X-R. Zeng, Z-G. Zhang, Preparation, characterization and thermal properties of nanocapsules containing phase change material n-dodecanol by miniemulsion polymerization with polymerizable emulsifier, *Appl. Energ.* 91 (2012) 7–12.
- [29] Y.G. Bryant, D.P. Colvin, Fabric with reversible enhanced thermal properties, US Patent 5,366,807 (1994).
- [30] D.P. Colvin, Y.G. Bryant, Protective clothing containing encapsulated phase change materials, *ASME: Adv. Heat Mass Transf. ASME-IMECE* 362 (40) (1998) 123–132.
- [31] C. Gao, K. Kuklane, I. Holmer, Cooling vests with phase change materials: the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment, *Eur. J. Appl. Phys.* 111 (2011) 1207–1216.
- [32] R.J. Pushaw, P.A. Havertown, Coated skived foam and fabric article containing energy absorbing phase change material, US Patent 5,677,048 (1997), available from <http://patft.uspto.gov/>.
- [33] J.K. Choi, H. Chung, B. Lee, K. Chung, G. Cho, M. Park, Y. Kim, S. Watanuki, Clothing temperature changes of phase change material-treated warm-up in cold and warm environments, *Fiber Polym.* 6 (4) (2005) 343–347.
- [34] P. Sanchez, M.V. Sanchez-Fernandez, A. Romero, J.F. Rodriguez, L. Sanchez-Silva, Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules, *Thermochim. Acta* 498 (2010) 16–21.
- [35] S. Alay, F. Gode, C. Alkan, Synthesis and thermal properties of poly(n-butyl acrylate)/n-hexadecane microcapsules using different cross-linkers and their application to textile fabrics, *J. Appl. Polym. Sci.* 120 (5) (2011) 2821–2829.
- [36] H. Dautzenberg, W. Jaeger, J. Kotz, B. Philipp, Seidel Ch. and Stscherbina D., *Polyelectrolytes: Formation, Characterization and Application*, Hanser Publishers, New York, 1994.
- [37] X. Shi, M. Shen, H. Mohwald, Polyelectrolyte multilayer nanoreactors toward the synthesis of diverse nanostructured materials, *Prog. Polym. Sci.* 29 (2004) 987–1019.

- [38] S.S. Ramkumar, A. Purushothaman, K.D. Hake, D.D. McAlister, Relationship Between Cotton Varieties and Moisture Vapor Transport of Knitted Fabrics, *J. Eng. Fiber. Fabr.* 2 (2007) 10-18.
- [39] A.V. Dobrynina, M. Rubinsteinb, Theory of polyelectrolytes in solutions and at surfaces, *Prog. Polym. Sci.* 30 (2005) 1049–1118.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

1. งบบุคลากร :			
ค่าจ้างชั่วคราว	105,120.00	บาท	
2. งบดำเนินงาน :			
ค่าใช้สอย	155,384.50	บาท	
ค่าวัสดุ	<u>123,495.50</u>	บาท	
	รวม	<u>384,000.00</u>	บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวปทุมมา ศิริพันธ์โนน
 ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Punnama Siriphannon
 ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 8
 หน่วยงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
 ถนนฉลองกรุง กรุงเทพฯ 10520
 โทร 02-329-8400 ต่อ 344 โทรสาร 02-329-8428
 e-mail: punnama.si@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา	วุฒิ	สาขาวิชา	สถาบัน	ประเทศ
2533-2537	วท.บ.	เคมีอุตสาหกรรม (เกียรตินิยม)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง	ไทย
2537-2539	M.Eng.	Inorganic Materials	Tokyo Institute of Technology	ญี่ปุ่น
2540-2543	D.Eng.	Inorganic Materials	Tokyo Institute of Technology	ญี่ปุ่น

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษและหัวข้อวิจัย

- Biomedical materials :- Synthesis, characterization, modification and testing of ceramic-polymer hybrid composites for medical applications
- Nanomaterials :- Synthesis, characterization, modification and testing of nanoporous materials and self-assembly nanocoating for special applications
- Environmental friendly natural adhesives and coatings

ทุนการศึกษาที่เคยได้รับ

- 2533-2535 ทุนการศึกษาจากบริษัท ICI ประเทศไทย จำกัด
- 2537-2539 ทุนการศึกษาระดับปริญญาโทจากรัฐบาลญี่ปุ่น (Monbusho)
- 2540-2541 ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Association of International Education Japan (AIEJ)
- 2541-2543 ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Tokio Marine Kagami Memorial Foundation

รางวัลที่เคยได้รับ

- 2543 รางวัล Young research award ที่ได้รับจากการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมระดับนานาชาติ "The 4th International Workshop on Design and Soft Solution-Processing for Advanced Inorganic Materials" จัดขึ้นที่เมืองโยโกฮาม่า ประเทศญี่ปุ่น ระหว่าง 28 กุมภาพันธ์ – 1 มีนาคม 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติการทำงาน

- 2537-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2547-ปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2544-ปัจจุบัน หัวหน้าห้องปฏิบัติการ X-ray diffractometer และ X-ray fluorescence spectroscopy ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2548-2552 รองหัวหน้าศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. Siriphannon, P., Hayashi, S., Yasumori, A., and Okada, K., Preparation and sintering of CaSiO_3 from coprecipitated powder using NaOH as precipitant and its apatite formation in simulated body fluid solution, *J. Mater. Res.* 1999; 14: 529-536.
2. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Influence of preparation conditions on the microstructure and bioactivity of α - CaSiO_3 ceramics: Formation of hydroxyapatite in simulated body fluid, *J. Biomed. Mater. Res.* 2000; 52: 30-39.
3. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Comparative study on formation of hydroxyapatite in simulated body fluid under static and flowing systems, *J. Biomed. Mater. Res.* 2002; 60: 175-185.
4. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Formation of hydroxyapatite on CaSiO_3 powders in simulated body fluid, *J. Euro. Ceram. Soc.* 2002; 22: 511-520.
5. Okada, K., Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., Hayashi, S., Hydroxyapatite Formation on CaSiO_3 Ceramics in Protein Containing System, *Key Eng. Mat. (Proceeding of 7th European Ceramic Society)* 2002; 206-213: 1551-1554.
6. Okada, K., Siriphannon, P., Kameshima, Y., Hayashi, S., Hydroxyapatite Formation on CaSiO_3 Ceramics in Simulated Body Fluid, *Trans. Mater. Res. Soc. Japan*, 2004, 29, 891-896.
7. Siriphannon, P., Monvisade, P., Jinawath, S., Hemachandra, K., Preparation and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(ethylene glutarate) Biomaterials, *J. Biomed. Mater. Res. A*, 2007; 81A:381-391.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Monvisade, P., Siriphannon, P., Jernsungnern R., Rattanabodee S. Preparation of hydroxyapatite/poly(methyl methacrylate) and calcium silicate/poly(methyl methacrylate) interpenetrating hybrid composites. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2007; 18: 1955-1959.
9. Siriphannon P., Monvisade P., Poly(ethylene terephthalate)/hydroxyapatite biomaterials: Preparation, characterization and *in vitro* bioactivity. *J.Mater.Sci.Mater.Med.*; 2007; 18: 1955–1959.
10. Siriphannon P., Monvisade P., Preparation and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(ethylene adipate) Hybrid Composites. *J. Biomat. Sci-Polym. E.*; 2008; 19(7) :925-936.
11. Monvisade P., Siriphannon P., Chitosan Intercalated Montmorillonite: Preparation, Characterization and Basic Dye Adsorption. *Appl.Clay.Sci.*; 2009; 42(3-4): 427-431.
12. Monvisade P., Siriphannon P., Tapcharoen, W., Effect of Ring-opening Polymerization Condition on Characteristic and Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Poly(ethylene glutarate) Biomaterials. *J.Biomed.Mater.Res.Part A*; 2009; 90A(3): 656-663.
13. Sirapanichart S., Khouchaf L., Siriphannon P., Monvisade P., Louarn G., Elouadi B., Chemical and Dielectric Study of PMMA/Montmorionite Nano-Composite Films, *Ferroelectrics*; 2010; 402(1): 47-54.
14. Pannasri, P., Siriphannon, P., Monvisade, P., Nookaew, J., Hydrothermal growth of ZnO nanostructures from nano-ZnO seeded in P(MMA-co-BA) matrix. *J.Polym.Res.*; 2011; 18(6): 2245-2254.
15. Sirapanichart, S., Monvisade, P., Siriphannon, P., Nookaew, J., Poly(methyl methacrylate-co-butyl acrylate)/organophosphate-modified montmorillonite composites. *Iran.Polym.J.*; 2011; 20(10), 803 – 811.
16. Iamphaojeen, Y., Siriphannon, P., Immobilization of zinc oxide nanoparticles on cotton fabrics using poly 4-styrenesulfonic acid polyelectrolyte. *Inter.J.Mater.Res.*; 2012; 103(5), 643 – 647.
17. Suebwongnat, S., Jianprasert, A., Siriphannon, P., Monvisade, P., Calcium silicate/poly(ethylene terephthalate) biomaterials via ring-opening polymerization, *J.Polym.Res.*; 2012; 19(10): 1-7.

18. Siriphannon, P., Monvisade, P., *In situ* ring-opening polymerization of hydroxyapatite/poly(ethylene adipate)-co-(ethylene terephthalate) biomimetic composites. *Bull.Mater.Sci.*; 2013; 36(1): 121–128.
19. Kaemkit, C., Monvisade, P., Siriphannon, P., Nukeaw, J., Water-soluble chitosan intercalated montmorillonite nanocomposites for removal of basic blue 66 and basic yellow 1 from aqueous solution. *J.Appl.Polym.Sci.*; 2013; 128(1): 879–887.
20. Tepmatee, P., Siriphannon, P., Effect of Preparation Method on Structure and Adsorption Capacity of Aluminium Pillared Montmorillonite. *Mater.Res.Bull.*; 2013; 48(11): 4856–4866.
21. lamphaojeen, Y., Siriphannon, P., Nanoencapsulation of *n*-Octadecane Phase Change Material in Self-Assembled Polyelectrolyte by Soft Solution Technique. *Inter.J.Polym.Mater.*; 2014; 63(17): 918–922.

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

1. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, เขาวเรศ มะลิมาศ และ ปิยวิทย์ รัตนฤทธิ์นนท์, ผลของค่า pH และเวลาในการเลี้ยงตะกอนต่อการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีตกตะกอนร่วม, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 2546; 12,1: 17-26.
2. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ภูมิรีย์ ไชยเสน และ ศิริินภา อมรชัยเลิศรัตน์, การสังเคราะห์แคลเซียมดีดานตด้วยวิธีทางเคมี, วารสารวิทยาศาสตร์ มช. 2546; 31: 38-45.
3. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ สุภาณี ชนะวงศ์, การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 2546; 12, 2: 36-45.
4. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ยุพเรศ แก้วพินิก และ ศิริพร บำรุงพันธ์, การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตด้วยโซล-เจลสำหรับงานทางการแพทย์, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2546; 11, 2: 1-10.
5. ยวันดา เอี่ยมเผ่าจีน และ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, การปลูกผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์บนผ้าฝ้ายที่ปรับปรุงด้วยพอลิไทรินซิลโฟนิคแอซิดและสมบัติการป้องกันรังสียูวี, วารสารวิทยาศาสตร์ มช. 2554; 39(3): 459-465.

ผลงานในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Formation of bonelike apatite on CaSiO₃ ceramics, *Proceeding of 1st JSPS International Workshop on Design and Soft Solution-Processing for Advanced Inorganic Materials* (Yokohama, Japan), August 20-21,1998, pp.46-49.

2. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Apatite formation on CaSiO_3 ceramics in simulated body fluid, *Proceeding of 11th fall meeting of the ceramic society of Japan* (Nagoya, Japan), October 1-3, 1998, pp.456.
3. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Dependence of apatite formation on microstructure of CaSiO_3 , *Proceeding of annual meeting of the ceramic society of Japan* (Tokyo, Japan), March 25-27, 1999, pp.157.
4. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., Okada, K., and Hayashi, S., Influence of grain size of calcium silicate ceramics on hydroxyapatite precipitation in SBF solution, in *Bioceramics12*, edited by H. Ohgushi, G.W. Hastings, and T. Yoshikawa (Nara, Japan), October 8-11, 1999, pp.145-148.
5. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Apatite formation on CaSiO_3 Ceramics in simulated body fluid under flowing condition, *Proceeding of 4th JSPS International' Workshop on Design and Soft Solution-Processing for Advanced Inorganic Materials* (Yokohama, Japan), February 28 – March 1, 2000, pp.50.
6. Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Okada, K., Apatite formation on CaSiO_3 powders in SBF solution, *Proceeding of annual meeting of the ceramic society of Japan* (Sendai, Japan), March 21-23, 2000, pp.156.
7. Okada, K., Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Hayashi, S., Hydroxyapatite Formation on CaSiO_3 Ceramics in Protein Containing System, *Key Eng. Mat. (Proceeding of 7th European Ceramic Society)* 2002, 206-213: 1551-1554.
8. Yasumori, Y., Siriphannon, P., Kameshima, Y., Yasumori, A., and Hayashi, S., Effect of Preparation Conditions of CaO-SiO_2 Ceramics on its Bioactivity, *International Symposium of Bio-Integrated Materials and Tissue Engineering* (Tokyo, Japan), March 7-8, 2002, 82-83.
9. Monvisade, P., Siriphannon, P., and Chanawong, S., Synthesis of hydroxyapatite/poly(ethylene adipate) composites by *in situ* ring-opening polymerization, *The 8th Pacific Polymer Proceedings* (Bangkok, Thailand), November 24-27, 2003, 115-116.
10. Monvisade P., and Siriphannon, P., Chitosan intercalated montmorillonite adsorbent for dye containing wastewater treatment. The Sixth Princess Chulabhorn International Science Congress, *The interface of chemistry and biology in the "Omics" era:Environment & Health, and Drug Discovery* (Bangkok, Thailand), November 25-29 2007.

11. Siriphannon P., Monvisade P., Hybrid ceramic-polymer biomaterials. *The French-Thai Workshop on "Advanced Materials and Technology"*, (Krabi, Thailand), March 23-27, 2008.
12. Siriphannon P., Monvisade P., Biomimetic ceramic-polymer composites for medical applications. *AUN/SEED Net 1st Regional Workshop on Natural Resources and Materials for Sustainable Development of ASEAN*, (Phnom Penh, Kingdom of Cambodia), August 18-19, 2008.
13. Monvisade P., Siriphannon P., Adsorption of dye onto chitosan intercalated montmorillonite. *The IUMRS International Conference in Asia 2008*, (Nagoya, Japan), December 9-13, 2008.
14. Siriphannon P., Trisak S., Limraungthum P., Aluminium-Pillared Montmorillonite Adsorbent for Dye Containing Wastewater Treatment. *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific 2010*, (Kanazawa, Japan), September 30 – October 1, 2010.
15. Siriphannon P., Monvisade P., Nanoporous adsorbent from chitosan interacted montmorillonite for dye-containing wastewater treatment. *The International Conference for Nanomaterials Synthesis and Characterization 2011*, (Selangor, Malaysia), July 4 – 5, 2011.
16. Suebwongnat, S., Siriphannon, P., and Monvisade, P., Preparation of calcium silicate/poly(ethylene terephthalate-co-caprolactone) composites for medical applications. *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012)*, (Chiang Mai, Thailand), January 11-13, 2012.
17. Tepmatee P., and Siriphannon P., Development of nanoporous aluminium-pillared montmorillonite adsorbents for dye containing wastewater treatment. *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012)*, (Chiang Mai, Thailand), January 11-13, 2012.
18. Suebwongnat, S., Siriphannon, P., and Monvisade, P., Mechanical properties and bioactivity of calcium silicate/poly(ethylene terephthalate-co-caprolactone) composites. *15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies*, (Wollongong, Australia), September 23-26, 2012.

19. Siriphannon, P., and lamphaojeen, Y., Growth of nano-zno seeds immobilized on cotton fabrics using poly 4-styrenesulfonic acid. *The 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies*, (Wollongong, Australia), September 23-26, 2012.
20. Siriphannon, P., lamphaojeen, Y., and Tepmatee P., Nanotechnology for eco-friendly development in textile finishing. *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2013)*, (Chonburi, Thailand), January 23-25, 2013.
21. Treephet, A., Siriphannon, P., Controlled release of KNO_3 fertilizer from chitosan/montmorillonite nanocomposites, *The 2014 IUPAC World Polymer Congress (MACRO2014)*, (Chiang Mai, Thailand), July 6-11, 2014.
22. Siriphannon, P., Ruengchainikom, T., Tharakarn, J., Lertkanchanaporn, K., Development of nanoporous iron oxide-pillared clay for dye containing wastewater treatment. *The 5th International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications (ICNFA'14)*, (Prague, Czech Republic), August 11-13, 2014.

ผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1. อมรรัตน์ สวัสดิ์มงคล, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ชลลดา ฤตวิรุฬห์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิอะคริลิกแอซิดกับโคโตซาน-มอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรซ์ขณะขึ้นรูป, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่ 17 (โรงแรมดิเอ็มเพรส อ.เมือง จังหวัดเชียงใหม่), 29 – 30 ตุลาคม 2550.
2. อภิขญา เจียนประเสริฐ, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่17 (โรงแรมดิเอ็มเพรส อ.เมือง จังหวัดเชียงใหม่), 29 – 30 ตุลาคม 2550.
3. ระพี เจริญสูงเนิน, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ (สไตรีน – บิวทาไดอิน - สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่17 (โรงแรมดิเอ็มเพรส อ.เมือง จังหวัดเชียงใหม่), 29 – 30 ตุลาคม 2550.
4. ณัชชา ปานกุล, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ, และปุณณมา ศิริพันธ์โนน, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำของกาวอะคริเลตพอลิยูรีเทนด้วยน้ำมันลินสีด, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551.
5. สานิตย์ สิริระปาณิชาติ, สุรลักษณ์ มรรคศศิธร, สุวิชา บัวเขียว, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, และภัทราวุธ มนต์วิเศษ, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนพอลิเมทิลเมทาคริเลต/มอนต์มอริลโลไนต์, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ยูวันดา เอี่ยมเผ่าจีน และ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, Growth of nano-ZnO seeds immobilized on cotton fabrics using poly 4-styrenesulfonic acid, การประชุมเชิงวิชาการ“ศรินครินทร์วิโรฒ วิชาการ” ครั้งที่ 5 (มหาวิทยาลัยศรินครินทร์วิโรฒ กรุงเทพฯ), 17 – 18 มีนาคม 2554.

บทความวิชาการ

1. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2546 เซรามิกส์ชั้นสูงสำหรับงานอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 12(1) : 58-67.
2. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2546. วัสดุชีวภาพสำหรับงานทางการแพทย์. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 13(1) : 51-59.
3. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2545. ฟลูออไรด์ป้องกันฟันผุได้อย่างไร?. วารสารเคมีน่ารู้. 1(1) : 72-74.
4. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2546. เสื้อผ้าจากนาโนเทคโนโลยี. วารสารเคมีน่ารู้. 2(3) : 73-74.
5. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2547. คาร์บอนนาโนโพลิม อันยรูปใหม่ของคาร์บอน. วารสารเคมีน่ารู้. 3(2) : 34-36.
6. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2548. หลอดทดลองเล็กที่สุดในโลก. วารสารเคมีน่ารู้. 3(4) : 43-45.
7. สารอะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ. บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด. 2549.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้