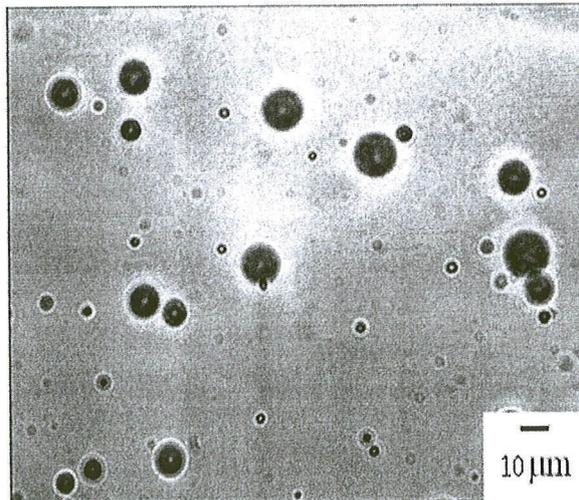


## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 การเตรียมอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอยตามสถานะในตารางที่ 3.1 พบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (% Conversion) เท่ากับ 100 ซึ่งแสดงว่าการที่มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำไปตรวจดูรูปร่างและลักษณะของอนุภาคที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Optical microscope ได้ผลดังรูปที่ 4.1

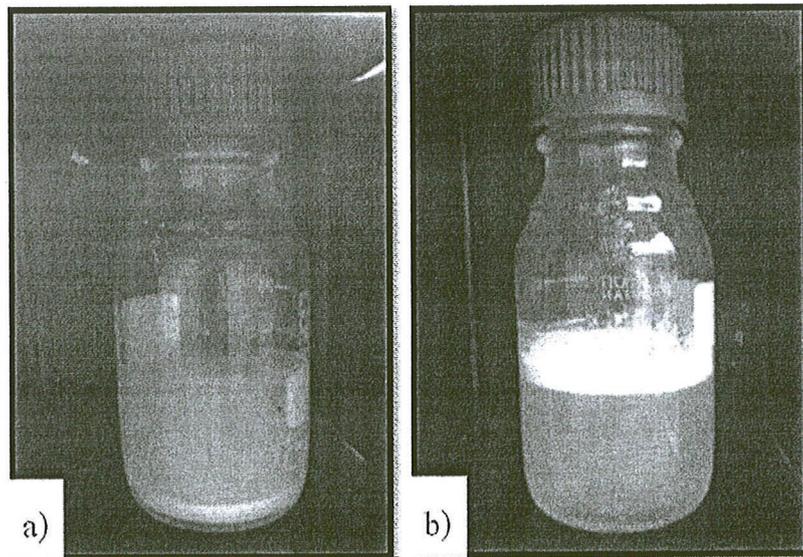


รูปที่ 4.1 Optical micrograph ของอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีน

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอนุภาคของพอลิไคไวนิลเบนซีนที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยที่ตลอดทั้งอนุภาคเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแยกชั้น โดยมีขนาดของอนุภาคอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของอนุภาคที่เตรียมโดยใช้เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ในการเตรียมหยดมอนอเมอร์ อนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้นี้จะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลและพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคน ซึ่งจะทำการเตรียมในขั้นตอนต่อไป

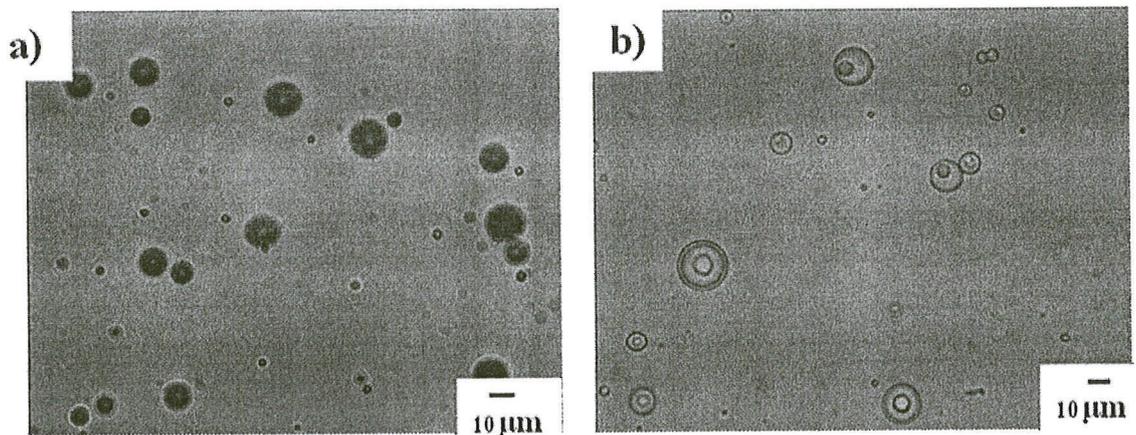
#### 4.2 การเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อนด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

การทดลองนี้ เป็นการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคนเป็นวัสดุเก็บความร้อน ด้วยกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย ซึ่งในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลนี้ ใช้กลไกการแยกวัฏภาคภายในหยดมอนอเมอร์ (Internal phase separation) ซึ่งมีหลักการ คือ เริ่มต้นภายในหยดมอนอเมอร์จะมี ออกตะเดกเคน เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และไดไวนิลเบนซีน ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชัน เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเกิดเป็นเรดิคัลเนื่องจากความร้อน จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับไดไวนิลเบนซีนและเกิดเป็นสายโซ่ของพอลิเมอร์ เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้น จนถึงจุดๆหนึ่งที่เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical chain length) สายโซ่พอลิเมอร์จะไม่สามารถละลายอยู่ภายในต่อไปได้อีก จึงมีการแยกตัวออกจากส่วนไดไวนิลเบนซีนและออกตะเดกเคน และเมื่อทำการพิจารณาความสามารถในการเข้าใกล้ตัวของพอลิไดไวนิลเบนซีนกับออกตะเดกเคน พบว่าพอลิไดไวนิลเบนซีนสามารถอยู่ใกล้ชั้นน้ำได้มากกว่า เนื่องจากค่าแรงตึงระหว่างผิว (Interfacial tension) ของพอลิไดไวนิลเบนซีนกับน้ำ ต่ำกว่าของออกตะเดกเคนกับน้ำ ดังนั้น การที่พอลิไดไวนิลเบนซีน อยู่ชั้นนอกจะมีความเสถียรมากกว่า พอลิไดไวนิลเบนซีนจึงเคลื่อนที่ออกไปอยู่ด้านนอกและเกิดการตกตะกอนเป็นชั้นของพอลิไดไวนิลเบนซีนหุ้มออกตะเดกเคนซึ่งอยู่ด้านใน เพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้จริง จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะและรูปร่างของอนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีน และพอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูลที่หุ้มออกตะเดกเคน ได้ผลดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีนที่เตรียมได้เมื่อตั้งทิ้งไว้: a) อนุภาคพอลิไดไวนิลเบนซีน และ b) พอลิไดไวนิลเบนซีนแคปซูล

หลังจากการสังเคราะห์ เมื่อนำอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนและพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล ตั้งทิ้งไว้มากกว่า 1 ชั่วโมง จะพบว่า อนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนจะเกิดการตกตะกอนที่ก้นขวด ในขณะที่พอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลจะลอยขึ้นด้านบนเกิดเป็นชั้นของแคปซูลที่มีลักษณะคล้ายครีม (Creaming) เนื่องจากเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของ PDVB เทียบกับน้ำ พบว่า PDVB จะมีความหนาแน่นมากกว่าจึงทำให้อนุภาคของ PDVB ตกตะกอนอยู่ที่ก้นขวด ในขณะที่ เมื่อพิจารณา PDVB-OD เทียบกับน้ำ ความหนาแน่นของทั้งอนุภาคจะต่ำกว่าน้ำ มีผลทำให้อนุภาคเกิดการลอยตัว และเกิดเป็นชั้นของแคปซูลที่มีลักษณะคล้ายครีมนั่นเอง



รูปที่ 4.3 Optical micrograph ของอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่สังเคราะห์ได้: a) อนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีน และ b) พอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าทั้งอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีน และพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล จะมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยจะมีความแตกต่างกันที่ ภายในอนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ในขณะที่พอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่อยู่ภายใน คือ ออกตะเดกเคนที่ถูกหุ้มด้วยพอลิไคไวนิลเบนซีนที่เป็นชั้นนอก

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเอายางธรรมชาติซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมาผสมเพื่อเตรียมเป็นเปลือกแคปซูล เพื่อลดการใช้มอนอเมอร์จากปิโตรเคมี และปรับปรุงสมบัติของเปลือกแคปซูลให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้น จะต้องทำการศึกษาว่าการเติมยางธรรมชาติลงไปจะมีผลต่อการเกิดแคปซูลอย่างไรบ้าง โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ และปริมาณของยางธรรมชาติ

#### 4.2.1 การศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ในขั้นตอนแรกก่อนนำยางธรรมชาติมาใช้จะทำการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งได้ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่างๆโดยการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารออกซิไดซ์ คือ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการเขย่าด้วยคลื่นความถี่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดซ์ จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง เนื่องจากสารออกซิไดซ์จะทำให้พันธะคู่ของยางธรรมชาติแตกออก ทำให้กลายเป็นโซ่ที่สั้นลง

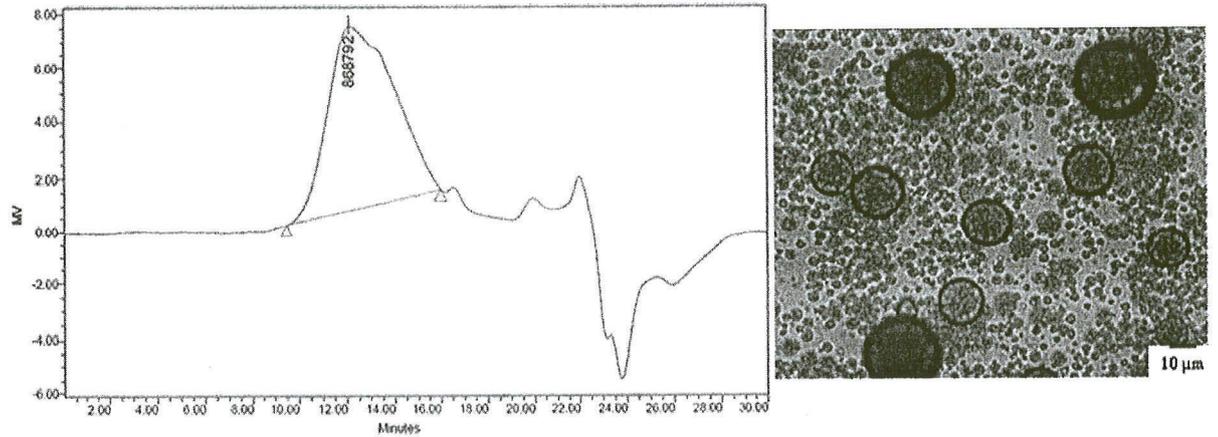
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปริมาตรต่างๆ

ปริมาณสารออกซิไดซ์ (มิลลิลิตร)	Mn (g/mol)	Mw (g/mol)	Mw/Mn
0	308,130	886,956	2.87
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 20	162,519	356,654	2.19
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 40	146,001	368,508	2.52
KPS : 40	119,876	320,133	2.60
KPS : 80	89,923	1,405,405	15.62

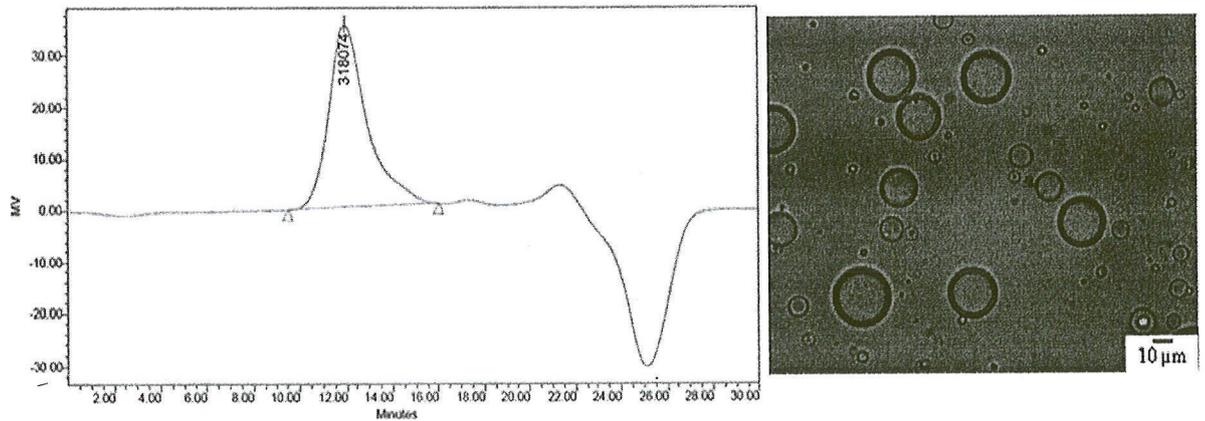
ยางธรรมชาติที่ได้จะนำไปใช้ในการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่หุ้มออกตะเดคเคนต่อไป

ในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลของไดไวนิลเบนซีนและยางธรรมชาตินี้ ได้ทำการเติมยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆลงไปผสมในปริมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์โดยใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลสูงมากทำให้ละลายได้ยากและไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้กับไดไวนิลเบนซีน ออกตะเดคเคนและเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จากนั้นเตรียมเป็นหยดมอนอเมอร์โดยการปั่นด้วยความเร็วสูงที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำสารแขวนลอยของหยดมอนอเมอร์ที่ได้ไปทำการสังเคราะห์ต่อทันที โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งยางธรรมชาติที่เมื่อนำไปสังเคราะห์แล้วทำให้เกิดเป็นแคปซูลของพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติโดยที่พอลิเมอร์แคปซูลนั้นมีการแยกเฟสชัดเจนระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับออกตะเดคเคนที่ถูกหุ้มอยู่ข้างใน คือยางธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

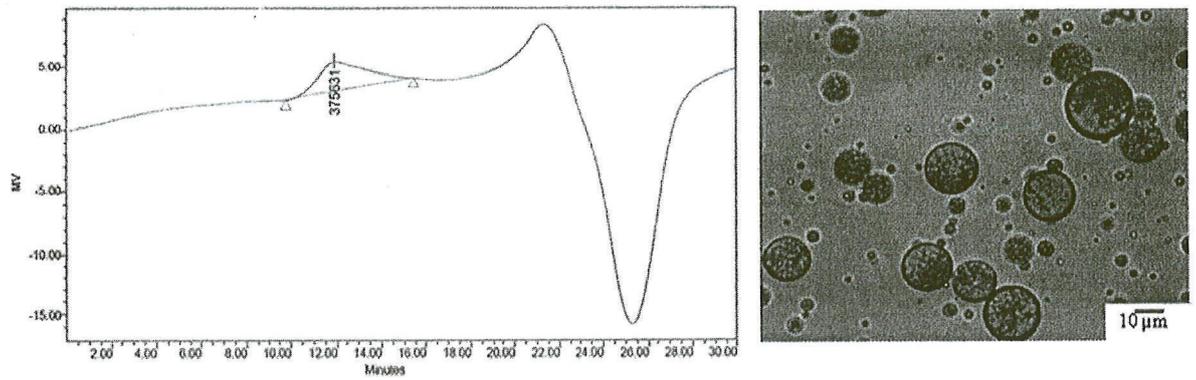
ปริมาณ 20 มิลลิลิตรเป็นสารออกซิไดซ์ ที่ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 ส่วนยางธรรมชาติที่มีสารออกซิไดซ์สถานะอื่นนั้นไม่สามารถเกิดการแยกเฟสระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับออกตะเดกเคนได้ ดังรูปที่ 4.4, 4.6, 4.7 และ 4.8



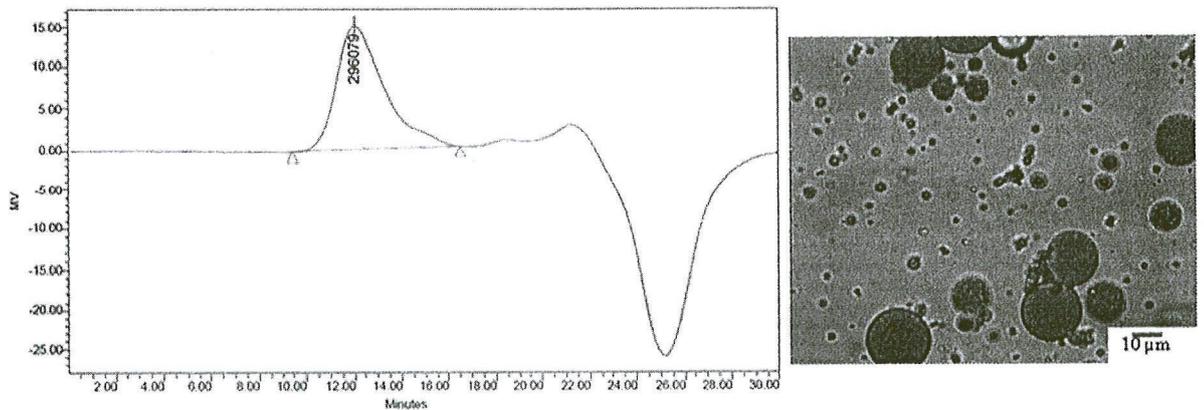
รูปที่ 4.4 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติ และOptical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 308,130 g/mol)



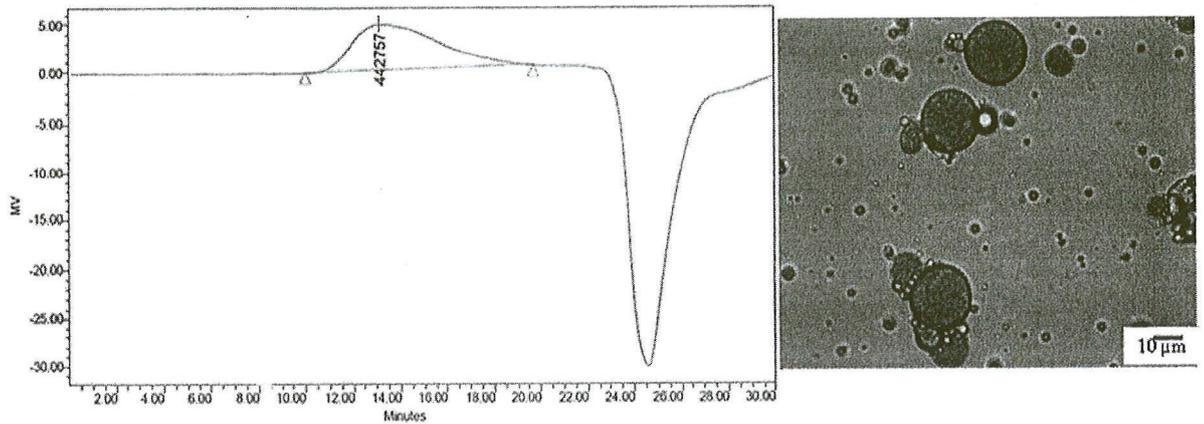
รูปที่ 4.5 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี  $H_2O_2$  20 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol)



รูปที่ 4.6 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี  $H_2O_2$  40 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 146,001 g/mol)



รูปที่ 4.7 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี KPS 40 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 119,876 g/mol)

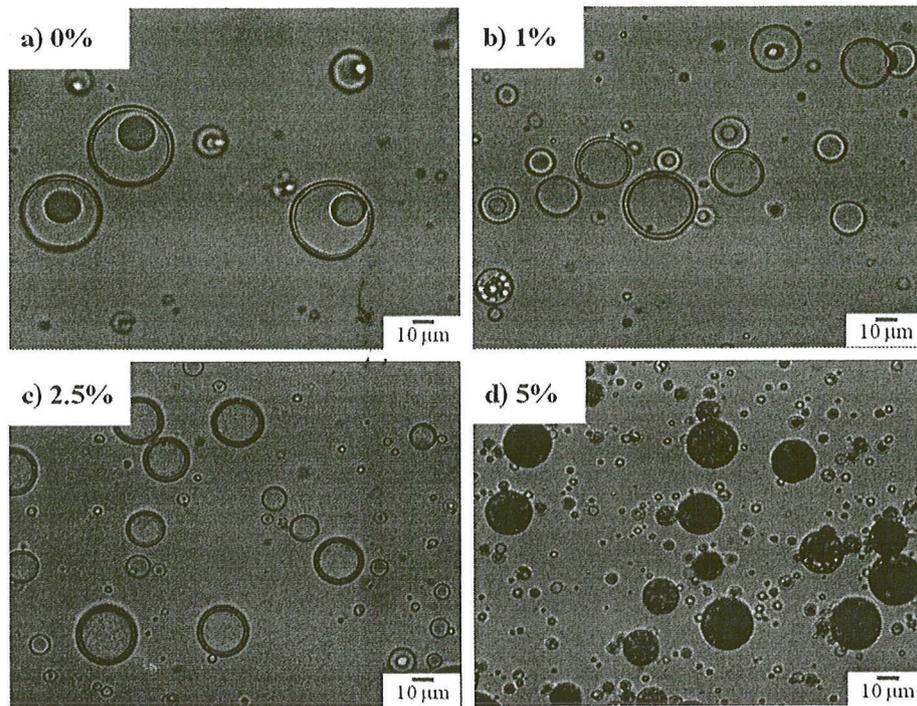


รูปที่ 4.8 GPC chromatogram ของยางธรรมชาติที่มี KPS 80 ml เป็นตัวออกซิไดซ์ในการลดน้ำหนักโมเลกุล และ Optical micrograph ของ PDVB/OD/NR 2.5% wt NR (ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 89,923 g/mol)

#### 4.2.2 การศึกษาผลของปริมาณของยางธรรมชาติ

อีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา คือ ผลของปริมาณยางธรรมชาติที่ผสมลงไป โดยได้เลือกใช้ยางธรรมชาติยางธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 20 มิลลิลิตรเป็นสารออกซิไดซ์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 162,519 g/mol ผสมลงไป ในปริมาณต่างๆจากนั้นเตรียมเป็นหยดมอนอเมอร์โดยการปั่นด้วยความเร็วสูงที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำสารแขวนลอยของหยดมอนอเมอร์ที่ได้ไปทำการสังเคราะห์ต่อทันที โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9





รูปที่ 4.9 Optical micrograph ของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณต่างๆ (%wt) : a) 0, b) 1, c) 2.5, และ d) 5

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 162,159 g/mol ที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีการแยกเฟสชัดเจนระหว่างเปลือกพอลิเมอร์กับออกตะเดเคนที่ถูกหุ้มอยู่ข้างใน เหมือนกับในกรณีที่ไม่มีการผสมยางธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.9 a) เมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติเป็น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์แคปซูลยังสามารถเกิดขึ้นได้ แต่การแยกเฟสภายในจะไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากภายในจะไม่ใสเหมือนรูปที่ 4.9 a) และ b) เมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติอีกเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะไม่สามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้ แต่จะได้อนุภาคพอลิเมอร์ที่สายโซ่พอลิเมอร์กระจายตัวอยู่ด้านในอนุภาค เนื่องจากการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติเป็นการเพิ่มความหนืดภายในหยดมอนอเมอร์ ซึ่งจะมีผลต่อการแยกเฟสของพอลิไควนิลเบนซีนที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ สายโซ่ของยางธรรมชาติจะทำให้มีความหนืดภายในหยดมอนอเมอร์ที่สูง จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิไควนิลเบนซีน ไปยังรอยต่อระหว่างผิวของหยดมอนอเมอร์กับน้ำทำให้ไม่สามารถเกิดเป็นเปลือกพอลิเมอร์ได้ จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณของยางธรรมชาติเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อการเกิดแคปซูล จาก optical micrograph จะเห็นได้ว่า แคปซูลที่เตรียมได้มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสูง (Polydisperse) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปของการเตรียมหยดมอนอเมอร์ โดยใช้การปั่นกวนความเร็วสูงด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์และ

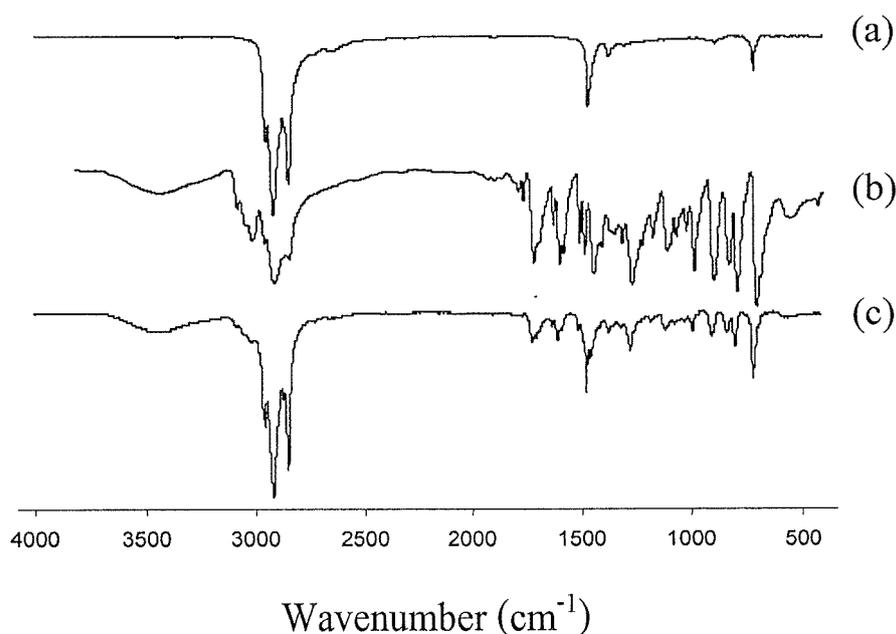
ดังนั้นในการเตรียมพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล จะต้องเลือกใช้ยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณที่เหมาะสม จึงจะเกิดการแยกเฟสได้สมบูรณ์

### 4.3 การหาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติของอนุภาคพอลิเมอร์และพอลิเมอร์แคปซูล

เมื่อเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลได้แล้ว จะทำการศึกษาลักษณะเฉพาะโดยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

#### 4.3.1 โครงสร้างทางเคมี (Chemical structure)

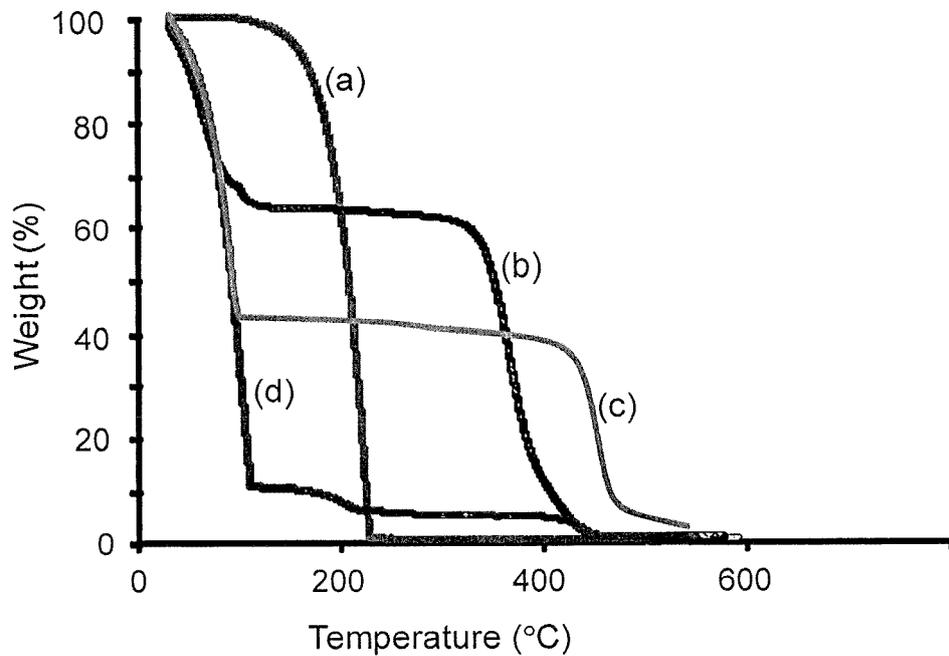
การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลที่เตรียมได้โดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectroscopy ได้ผลดังรูปที่ 4.10 ในกรณีของออกตะเดคเคนที่ไม่ถูกหุ้ม (a) สเปกตรัมแสดงพีกของการสั่นที่  $720\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของ in-plane rocking vibration ของหมู่ methylene group พีกการดูดกลืนที่  $1460$  and  $1360\text{ cm}^{-1}$  ของ C-H stretching ของ methylene bridges และยังพบ alkyl C-H stretching ของ methyl และ methylene groups ที่  $2920$  and  $2850\text{ cm}^{-1}$  ในกรณีของพอลิไควนิลเบนซีน (b) จะพบพีกการดูดกลืนที่  $700$ - $750\text{ cm}^{-1}$  ของ benzene ring deformation พีกที่  $1500$ ,  $1600\text{ cm}^{-1}$  ของ benzene ring C=C stretching และพบพีกของ aliphatic C-H stretching ที่  $2920\text{ cm}^{-1}$  ในขณะที่  $3030\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ aromatic C-H stretching ซึ่งพีกทั้งหมดของออกตะเดคเคนและพอลิไควนิลเบนซีนที่กล่าวมานี้ จะพบในสเปกตรัมของพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล (c) เช่นกัน และไม่พบพีกใหม่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงว่าพอลิไควนิลเบนซีนแคปซูลมีออกตะเดคเคนผสมอยู่ด้วย



รูปที่ 4.10 FTIR spectra ของ (a) ออกตะเดคเคน (b) พอลิไควนิลเบนซีน และ (c) พอลิไควนิลเบนซีนแคปซูล

### 4.3.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

เมื่อทำการศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของออกตะเดกเคน อนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีนและพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล ได้ผลดังรูปที่ 4.11

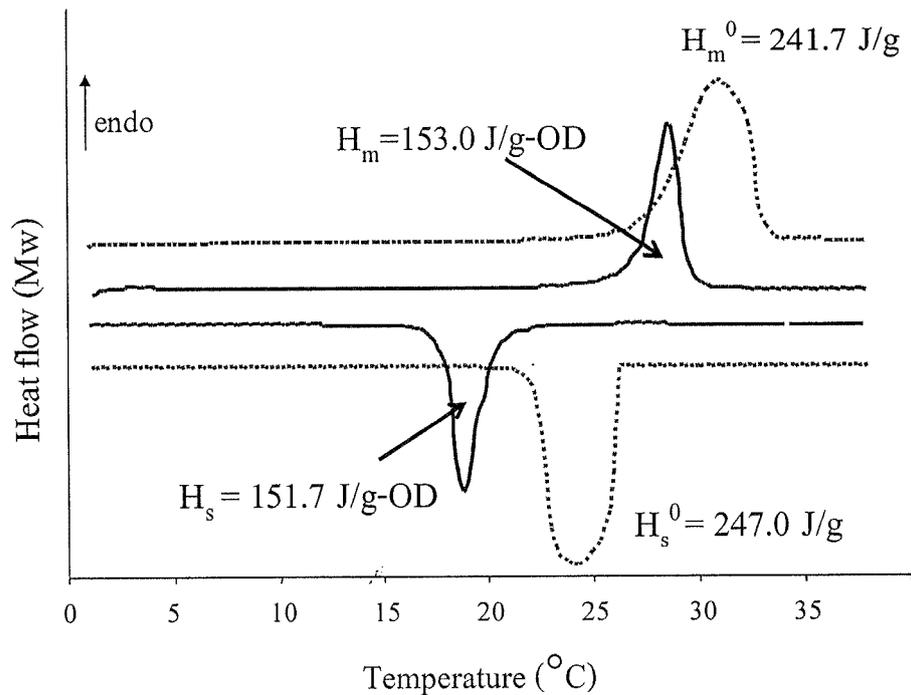


**รูปที่ 4.11** TGA thermogram ของ (a) ออกตะเดกเคน (b) ยางธรรมชาติลาเท็กซ์ (c) อนุภาคพอลิไคไวนิลเบนซีน และ (d) พอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณยางธรรมชาติ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ อัตราเร็วและเวลาในการป่นเตรียมหยาบมอนอเมอร์ที่ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

จากรูปเป็นการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของออกตะเดกเคนและพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล รวมทั้งองค์ประกอบของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูลที่เตรียมได้ โดยใช้เครื่อง TGA จาก TGA thermogram จะเห็นว่าเส้น (a) ออกตะเดกเคนที่ยังไม่ได้ทำการหุ้มมีอยู่ประมาณ 99.6 % จะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวระหว่าง 162-305 องศาเซลเซียส เส้น (b) แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติลาเท็กซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำที่เกิดการสลายตัวในช่วงแรก และยางธรรมชาติที่เกิดการสลายตัวในช่วงที่ 2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิไคไวนิลเบนซีน (เส้น (c)) เกิดขึ้นที่ประมาณ 300-500 องศาเซลเซียส ในขณะที่การสลายตัวของพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล จะมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวทั้งหมด 3 ช่วง ช่วงแรกจะเป็นการสลายตัวของน้ำซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือ วัฏภาคน้ำ (Aqueous phase) ที่เป็นตัวกลางในการเตรียมพอลิเมอร์แคปซูล

ด้วยกระบวนการแบบแวนดอย เนื่องจากน้ำเป็นสารโมเลกุลเล็กจึงมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำ คือจะมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 จะเป็นการสลายตัวของ ออกตะเดเคนที่ถูกหุ้ม จะมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 180-295 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับออกตะเดเคนที่ยังไม่ได้ทำการหุ้ม ออกตะเดเคนที่อยู่ในแคปซูลจะมีค่าอุณหภูมิ สลายตัวสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากออกตะเดเคนถูกหุ้มด้วยพอลิไคไวนิลเบนซีน และช่วงสุดท้ายเป็น การสลายตัวของพอลิไคไวนิลเบนซีน เนื่องจากพอลิไคไวนิลเบนซีนเป็นพอลิเมอร์ มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และเป็นแบบร่างแห จึงเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิสลายตัวของพอลิ ไคไวนิลเบนซีน (c) ส่วนการสลายตัวของยางธรรมชาติ ไม่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากมีปริมาณ ของยางธรรมชาตินี้้อยมากในแคปซูล นอกจากนี้ยังสามารถหาปริมาณสารที่เป็นองค์ประกอบได้ คือ มีน้ำ 76.0 % ออกตะเดเคน 12.0 % และพอลิไคไวนิลเบนซีน 10.0 % ซึ่งจะเห็นว่า อัตราส่วนของ พอลิไคไวนิลเบนซีน:ออกตะเดเคน จะใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ (DVB:OD = 50:50 % wt/wt)

เมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของออกตะเดเคนด้วยเครื่อง DSC พบว่า ออก ตะเดเคนที่ยังไม่ได้ถูกหุ้มมีค่าความร้อนในการหลอมเหลวเท่ากับ 241.7 J/g ค่าอุณหภูมิในการ หลอมเหลว เท่ากับ 29.9 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 247.0 J/g และค่า อุณหภูมิในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 25.4 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.12

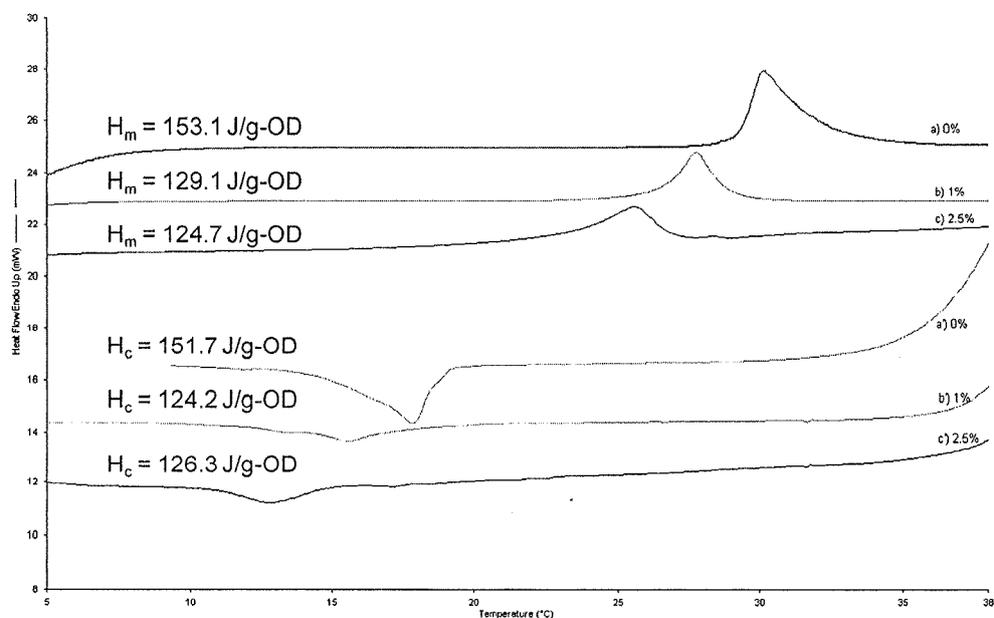


รูปที่ 4.12 DSC Thermogram ของออกตะเดเคน (เส้นสีดำ) และออกตะเดเคนที่ถูกหุ้มอยู่ในพอลิ ไคไวนิลเบนซีนแคปซูล (เส้นสีแดง) (อัตราการสแกน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 0-40 องศาเซลเซียส)

หมายเหตุ  $\Delta H_m$  คือ ค่าความร้อนในการหลอมเหลว  
 $\Delta H_c$  คือ ค่าความร้อนในการเกิดผลึก  
 $T_m$  คือ อุณหภูมิในการหลอมเหลว  
 $T_c$  คือ อุณหภูมิในการเกิดผลึก

ในขณะที่ DSC Thermogram ของออกตะเดคเคนที่อยู่ในพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล มีค่าความร้อนในการหลอมเหลวเท่ากับ 153.0 J/g-OD ค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลว มีค่าเท่ากับ 28.5 °C ค่าความร้อนในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 151.7 J/g-OD และ ค่าอุณหภูมิในการแข็งตัว มีค่าเท่ากับ 18.0 °C

เมื่อมีการผสมยางธรรมชาติลงไปเพื่อเตรียมเป็นเปลือกแคปซูล สมบัติทางความร้อนของออกตะเดคเคนที่ถูกหุ้มอยู่มีค่าลดลงจากเดิม (ของพอลิไคไวนิลเบนซีนแคปซูล) น่าจะเกิดเนื่องจากยางธรรมชาติซึ่งจัดเรียงตัวอยู่เปลือกชั้นในขัดขวางการเกิดผลึกของออกตะเดคเคน อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติจาก 1 เปอร์เซ็นต์เป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้แสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญ

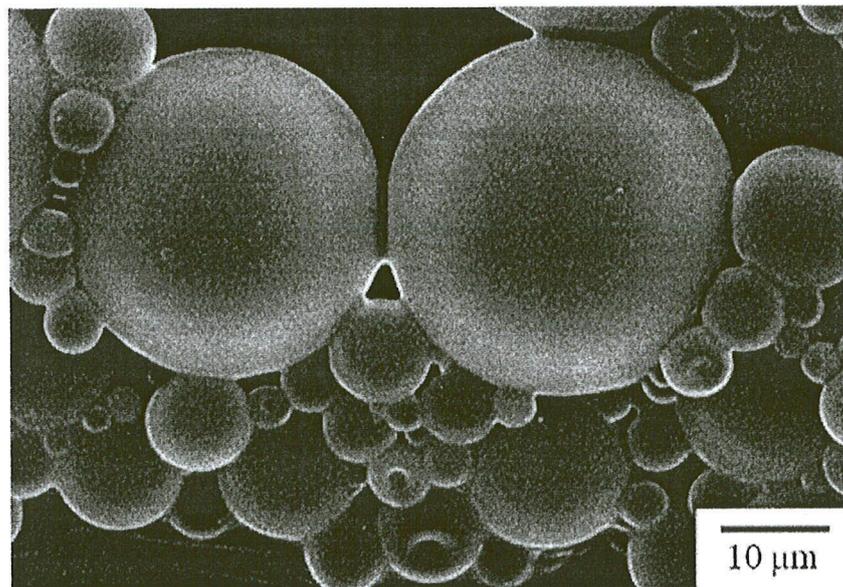


รูปที่ 4.13 DSC thermogram ของออกตะเดคเคนในพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมได้โดยใช้ปริมาณยางธรรมชาติต่างๆ โดยใช้อัตราการสแกน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 0-40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของออกตะเดกเคนที่อยู่ในพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่ใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณต่างๆ

NR (%wt)	ค่าความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ		อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ	
	การหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) (J/g-OD)	การแข็งตัว ( $\Delta H_s$ ) (J/g-OD)	การหลอมเหลว ( $T_m$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	การแข็งตัว ( $T_s$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	153.1	-151.7	19.0-33.0	23.0-10.0
1	129.1	-124.2	19.0-31.0	26.0-8.0
2.5	124.7	-126.3	15.0-29.0	20.0-4.0
5	114.5	-106.7	14.0-29.0	26.0-6.0

เมื่อทำการศึกษารูปร่างของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 SEM micrograph ของพอลิไควนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุล 162,519 g/mol ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากรูป SEM จะเห็นได้ว่าผิวด้านนอกของแคปซูลมีความเรียบและสม่ำเสมอ แสดงว่าเป็นเปลือกพอลิไคไวนิลเบนซีน ส่วนยางธรรมชาติซึ่งจะมีความเหนียวหนะเนื่องจากมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะจัดเรียงตัวเป็นเปลือกชั้นใน

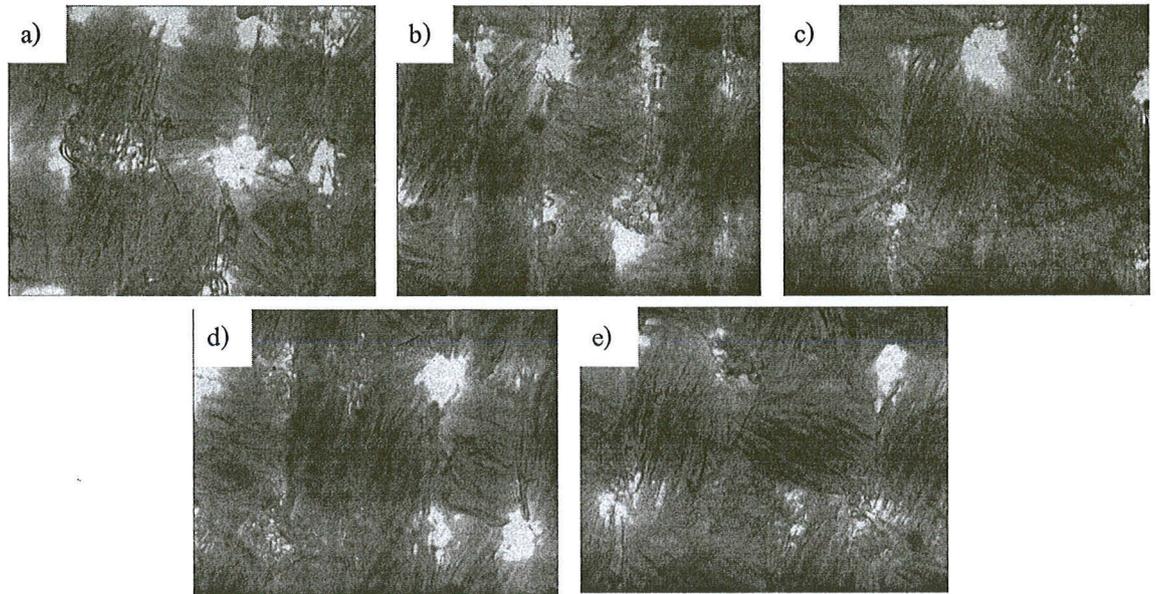
#### 4.4 การเคลือบผ้าด้วยพอลิเมอร์แคปซูล

ในขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้ ได้ทำการนำแคปซูลที่เตรียมได้มาทดลองเคลือบบนผ้าฝ้าย โดยใช้อะคริลิกอิมัลชันเป็นสารตัวเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์แคปซูลต่อสารตัวเชื่อม จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเคลือบติดของแคปซูลบนผ้าได้ผลดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ผลการเคลือบพอลิไคไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูล (ยางธรรมชาติ 2.5% โดยน้ำหนัก) บนผ้าฝ้าย

	แคปซูล:สารตัวเชื่อม				
	1:5	1:1	2:1	5:1	10:1
เปอร์เซ็นต์การเคลือบติด (%)	21.99	25.04	13.28	11.10	12.78

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใช้อัตราส่วนแคปซูล:สารตัวเชื่อม เป็น 1:1 จะมีเปอร์เซ็นต์การเคลือบติดสูงที่สุด แสดงว่ามีปริมาณของแคปซูลและสารตัวเชื่อมที่เหมาะสมกับพื้นที่ของผ้า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแคปซูลขึ้นไปอีก เปอร์เซ็นต์การเคลือบติดลดลง เนื่องจากมีปริมาณแคปซูลมากเกินไป และจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่ามี การกระจายตัวของแคปซูลบนผ้างรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 Optical micrograph ของผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยพอลิไดไวนิลเบนซีน/ยางธรรมชาติแคปซูลที่อัตราส่วนต่างๆ แคปซูล:สารตัวเชื่อม a) 1:5 b) 1:1 c) 2:1 d) 5:1 และ e) 10:1