

พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตฟิล์มและการตอบสนอง  
ด้านการตรวจวัดสี



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE/NATURAL RUBBER NANOCOMPOSITE FILMS  
AND COLORIMETRIC RESPONSE

Miss Wipawee Punyanuntakit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2015  
Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตฟิล์มและการตอบสนองด้านการตรวจวัดสี |
| โดย                             | นางสาววิภาวี ปัญญานันทกิตติ์   |
| สาขาวิชา                        | ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | รองศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล  |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรารณ อินทศิริ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธ์ญา สุรินทร์บุรณ์)

วิภาวี ปัญญานันทกิตต์ : พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตฟิล์มและการตอบสนองด้านการตรวจวัดสี (POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE/NATURAL RUBBER NANOCOMPOSITE FILMS AND COLORIMETRIC RESPONSE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.นิศานาถ ไตรผล, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต และศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในเมทริกซ์ยาง โดยเริ่มจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) มอนอเมอร์ในสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตให้ได้เป็นพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต จากนั้นนำพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปผสมกับยางธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ กัน ดังนี้ ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นและน้ำยางผสมสูตร สารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอพอกไซต์ในโทลูอีนทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูป จากการศึกษาพบว่าฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตสามารถเตรียมได้จากสารละลายยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซต์ในโทลูอีนทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูปและจากน้ำยางผสมสูตร ในกรณีของน้ำยางข้น พบว่าเมื่อเติมสารแขวนลอยของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตลงในน้ำยางข้น พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงทันที เมื่อศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตพบว่าการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในเมทริกซ์ยางที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอพอกไซต์ทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูปจะเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในเมทริกซ์ยางที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูปไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในเมทริกซ์ยางทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูปที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอพอกไซต์ไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ส่วนพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในเมทริกซ์ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรมีพฤติกรรมเปลี่ยนสีคล้ายคลึงกับพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ กล่าวคือ การเปลี่ยนสีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิเกิน 110 องศาเซลเซียส เมื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมได้ พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติอพอกไซต์ไม่เกิดการคงรูปเนื่องจากไม่สามารถเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งเป็นสารคงรูปได้ในปริมาณที่สูงมากพอเพราะเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและน้ำยางผสมสูตรสามารถเกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุล สำหรับฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุตรวจวัดอุณหภูมิมากที่สุด เนื่องจากมีความทนทานต่อตัวทำละลายไม่มีขั้วและทนแรงดึงมากที่สุด

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5672092523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLYDIACETYLENE, PDA/ZINC OXIDE, NATURAL RUBBER, THERMOCHROMISM

WIPAWEE PUNYANUNTAKIT: POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE/NATURAL RUBBER NANOCOMPOSITE FILMS AND COLORIMETRIC RESPONSE. ADVISOR: ASST. PROF.KANOKTIP BOONKERD, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., 113 pp.

The objective of this research was to study the preparation of polydiacetylene/ZnO/natural rubber nanocomposite films and study the thermochromic responses of polydiacetylene/ZnO nanocomposite embedded in the rubber. Firstly, 10,12- pentacosadiynoic acid (PCDA) monomers in the suspension of ZnO were polymerized under ultraviolet light to form poly(PCDA)/ZnO nanocomposites. Then, the obtained poly(PCDA)/ZnO nanocomposites were mixed with various natural rubber forms including concentrated and compounded natural rubber latex, solution of natural rubber and epoxidized natural rubber in toluene with and without curing agent. From the study, it was found that the polydiacetylene/ZnO/natural rubber nanocomposite films can be obtained when using the solution of natural rubber and epoxidized natural rubber with and without curing agent, and the compounded natural rubber latex. In the case of concentrated natural rubber latex, it was seen that the polydiacetylene/ZnO nanocomposite immediately changed from blue to red once mixed with the concentrated natural rubber latex. When studying the thermochromic responses of polydiacetylene/ZnO nanocomposite, it was found that the color change of polydiacetylene/ZnO nanocomposite embedded in rubber metrics prepared from the solution of natural rubber and epoxidized natural rubber with and without curing agent initially occurred at 80°C. The temperature at which the polydiacetylene/ZnO nanocomposite embedded in rubber metrics prepared from the solution of natural rubber and epoxidized natural rubber with and without curing agent showed the color irreversibility was 180 and 160°C, respectively. However, the polydiacetylene/ZnO nanocomposite that preparing from the compounded natural rubber latex showed the thermochromic responses similar to the pure polydiacetylene/ZnO nanocomposite. The color change was initially observed at 65 °C and the temperature showing the color irreversibility was at 110 °C. When studying the physical properties of the obtained films, it was shown that the cured films prepared from epoxidized natural rubber cannot be sufficiently cured due to the limited amount of maleic anhydride (MA) acting as a curing agent causing the polydiacetylene/ZnO nanocomposite change from blue to red. The polydiacetylene/ZnO/NR nanocomposite film prepared from the compounded natural rubber latex and natural rubber solution can form crosslinking. From this study, the polydiacetylene/ZnO/NR nanocomposite film prepared from the compounded natural rubber latex is the most suitable material for using as a thermosensing film due to its highest resistance to non polar solvent and highest tensile strength.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer  
Science

Academic Year: 2015

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ความช่วยเหลือในด้านวิชาการ การดำเนินการวิจัยและความช่วยเหลือด้านอื่นๆ จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความรู้ คำปรึกษา แนวทางการดำเนินงานวิจัย แนวทางการแก้ปัญหา ความช่วยเหลือไม่ว่าจะเป็นเรื่องวิทยานิพนธ์หรือเรื่องอื่น ๆ อีกทั้งยังให้โอกาสและกำลังใจมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำปรึกษา แนวทางการดำเนินงานวิจัย ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ ความช่วยเหลือในทุกด้าน ข้อคิดต่าง ๆ ให้โอกาสและกำลังใจมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชาติ ไตรผล สำหรับความรู้ คำแนะนำในงานวิจัย และข้อคิดดี ๆ ในการดำเนินชีวิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ ข้อชี้แนะ รวมทั้งการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เจ้าหน้าที่และบุคลากร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินเรื่องขอใช้ห้องปฏิบัติการนอกวันเวลาราชการ ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างต่อเนื่อง

ทุนวิจัย 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง ประจำปีงบประมาณ 2558 คลัสเตอร์วัสดุขั้นสูง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU-58-037-AM)

สมาชิกในกลุ่มวิจัย ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา แลกเปลี่ยนความคิดเห็นและเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

ขอบคุณครอบครัว เพื่อน พี่น้อง ที่ให้โอกาส สนับสนุน คอยรับฟังและเป็นกำลังใจเสมอมา

ขอบคุณตัวเองที่มีความพยายามและอดทน ถึงแม้คิดที่จะล้มเลิกในหลายครั้ง แต่ก็ยังอดทนจนสำเร็จ และขอบคุณทุกคนที่กล่าวมาที่เป็นส่วนหนึ่งในความสำเร็จนี้

สุดท้ายนี้ การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ไม่ใช่แค่มาหาความรู้และทำงานวิจัย แต่เป็นประสบการณ์ชีวิตที่ดี ได้พบเจอเรื่องราวและสิ่งต่างๆ มากมาย ฝึกความเป็นผู้ใหญ่ ความเป็นผู้ใหญ่ ความรับผิดชอบ ความอดทน ทำให้ได้เจออาจารย์และกลุ่มวิจัยที่แสนดี น่ารัก อบอุ่นเหมือนครอบครัว และมีความสุขที่ได้เป็นส่วนหนึ่งของที่นี่

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | 1    |
| สารบัญรูปภาพ.....   | 3    |
| บทที่ 1 บทนำ .....  | 8    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 8    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 9    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....  | 9    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 9    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....  | 10   |
| 2.1 พอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene, PDA).....   | 10   |
| 2.1.1 สมบัติและกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน.....  | 11   |
| 2.2 พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต (Polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite, PDA/ZnO)..... | 12   |
| 2.3 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) .....  | 17   |
| 2.3.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex).....  | 17   |
| 2.3.2 ยางธรรมชาติแห้ง (Dry natural rubber).....   | 22   |
| 2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ .....  | 22   |
| 2.4 ยางธรรมชาติดัดแปร (Modified natural rubber) .....   | 23   |
| 2.4.1 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) .....                                     | 24   |
| 2.4.2 ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized rubber).....   | 26   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.5     | ยางคอมพาวด์ (Rubber compound).....  | 28 |
| 2.5.1   | การออกสูตรเคมียาง (Compounding formulation).....                                      | 28 |
| 2.5.2   | สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators).....   | 29 |
| 2.5.3   | สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (Activators and Retarders) .....                       | 31 |
| 2.5.4   | สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants).....   | 31 |
| 2.5.5   | สารตัวเติม (Fillers).....   | 32 |
| 2.5.6   | สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and Processing aids).....      | 32 |
| 2.5.7   | สารอื่นๆ.....   | 34 |
| 2.6     | หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์ .....  | 35 |
| 2.6.1   | เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy) .....           | 36 |
| 2.6.2   | ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength).....   | 39 |
| 2.6.3   | การทดสอบการบวมตัว (Swelling test).....  | 41 |
| 2.7     | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....   | 42 |
| บทที่ 3 | วิธีดำเนินการวิจัย.....   | 48 |
| 3.1     | แผนดำเนินการวิจัย .....   | 48 |
| 3.2     | วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....   | 51 |
| 3.3     | กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะแซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต .....               | 53 |
| 3.3.1   | การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะแซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน .....    | 53 |
| 3.3.2   | การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะแซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน.....             | 53 |
| 3.4     | การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยพอลิไดอะแซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต..... | 54 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.5   | กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต.....  | 54 |
| 3.5.1 | การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติชั้น.....                                 | 54 |
| 3.5.2 | การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติแห้ง.....                                    | 54 |
| 3.5.3 | วิธีการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติอ็อกไซด์แห้ง.....                        | 55 |
| 3.6   | การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต.....                                 | 55 |
| 3.7   | การศึกษาสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต.....                              | 55 |
| 3.8   | กระบวนการเตรียมและคงรูปฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป.....                         | 56 |
| 3.8.1 | การเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติชั้นที่เติมสารคงรูป.....                       | 56 |
| 3.8.2 | การเตรียมและคงรูปฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติแห้งที่มีการเติมสารคงรูป.....             | 56 |
| 3.8.3 | วิธีการเตรียมและคงรูปฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติอ็อกไซด์แห้งที่มีการเติมสารคงรูป..... | 57 |
| 3.9   | การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป.....                       | 57 |
| 3.10  | การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป.....                | 58 |
| 3.11  | การศึกษาการบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป.....          | 58 |

|   |    |
|---|----|
| 3.12 การศึกษาคุณสมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยาง<br>ธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป ..... | 58 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....  | 60 |
| 4.1 การศึกษาสมบัติของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต.....  | 60 |
| 4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตใน<br>น้ำปราศจากไอออนและในโทลูอิน.....                        | 61 |
| 4.1.2 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO นา<br>โนคอมพอสิตเมื่ออยู่ในรูปของแข็ง.....                 | 62 |
| 4.2 การเตรียมสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....  | 64 |
| 4.2.1 สมบัติและลักษณะของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาติ<br>นาโนคอมพอสิต .....                                     | 65 |
| 4.2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยาง<br>ธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....                                 | 67 |
| 4.2.3 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม<br>poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....                      | 69 |
| 4.3 การเตรียมสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มี<br>การเติมสารคงรูป.....                             | 76 |
| 4.3.1 สมบัติและลักษณะของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาติ<br>นาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป .....                 | 76 |
| 4.3.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยาง<br>ธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป .....             | 79 |
| 4.3.3 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม<br>poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป.....   | 81 |
| 4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่<br>เติมสารคงรูป.....                             | 87 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.4.1   | สถานะการคงรูปและสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูป .....                      | 87  |
| 4.4.2   | สมบัติการบวมตัวในโทลูอีน (Swelling index) .....   | 89  |
| 4.4.3   | สมบัติความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) .....  | 91  |
| บทที่ 5 | สรุปผลการวิจัย .....  | 92  |
| 5.1     | การเตรียมพอลิไคแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาติ นาโนคอมพอสิต .....  | 92  |
| 5.2     | พฤติกรรมการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีต่ออุณหภูมิของพอลิไคแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ..... | 93  |
| 5.3     | สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไคแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....            | 94  |
|         | รายการอ้างอิง .....   | 95  |
|         | ภาคผนวก .....   | 100 |
|         | ภาคผนวก ก .....   | 101 |
|         | ภาคผนวก ข .....   | 105 |
|         | ภาคผนวก ค .....   | 106 |
|         | ภาคผนวก ง .....   | 108 |
|         | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....  | 113 |

## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ .....   | 18   |
| ตารางที่ 2.2 การใช้งานยางธรรมชาติอ็อกไซด์ .....  | 26   |
| ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบ ปริมาณยางและสารเคมีต่าง ๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน.....   | 35   |
| ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....   | 51   |
| ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบ pH และสีของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....                               | 66   |
| ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของน้ำยางผสมสูตรถุงมือแพทย์ .....   | 77   |
| ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบ ค่า pH และสีของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูป .....            | 78   |
| ตารางที่ 4.4 สภาวะการคงรูปและสีที่ได้หลังจากการคงรูปของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูป ..... | 88   |
| ตารางที่ ก-1 สมบัติทั่วไปของคลอโรฟอร์ม .....   | 101  |
| ตารางที่ ก-2 สมบัติทั่วไปของ 10,12- pentacosadiynoic acid (PCDA) .....   | 102  |
| ตารางที่ ก-3 สมบัติทั่วไปของกรดเสตียริก.....   | 102  |
| ตารางที่ ก-4 สมบัติทั่วไปของ Tetrabenzylthiuram disulfide (TBzTD).....   | 103  |
| ตารางที่ ก-5 สมบัติทั่วไปของโทลูอิน.....   | 103  |
| ตารางที่ ก-6 สมบัติทั่วไปของซิงก์ออกไซด์ .....   | 104  |
| ตารางที่ ข-1 มาตรฐานยางแท่งชนิดต่าง ๆ.....   | 105  |
| ตารางที่ ค-1 ค่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร .....   | 106  |
| ตารางที่ ค-2 ค่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....  | 106  |
| ตารางที่ ค-3 ค่าการบวมตัวของฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....   | 106  |

|  |     |
|--|-----|
| ตารางที่ ค-4 ค่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....   | 107 |
| ตารางที่ ค-5 ค่าการบวมตัวของแผ่นฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่<br>เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....          | 107 |
| ตารางที่ ง-1 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร .....   | 108 |
| ตารางที่ ง-2 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป.....   | 108 |
| ตารางที่ ง-3 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่<br>เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....               | 109 |
| ตารางที่ ง-4 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตร.....   | 109 |
| ตารางที่ ง-5 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....   | 110 |
| ตารางที่ ง-6 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่<br>เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป .....          | 110 |
| ตารางที่ ง-7 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร.....  | 111 |
| ตารางที่ ง-8 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรและผ่าน<br>การคงรูป .....  | 111 |
| ตารางที่ ง-9 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่<br>เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรและผ่านการคงรูป ..... | 112 |

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA).....  | 10 |
| รูปที่ 2.2 การเกิดโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสซีเคิลและพอลิไดแอเซทิลีนเวสซีเคิล.....   | 11 |
| รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าต่าง ๆ .....  | 12 |
| รูปที่ 2.4 การเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์เข้าไปในโครงสร้างพอลิไดแอเซทิลีน<br>เวสซีเคิล.....   | 13 |
| รูปที่ 2.5 FT-IR สเปกตรัมของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตชนิดต่าง ๆ .....   | 14 |
| รูปที่ 2.6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสซีเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) poly<br>(PCDA)/ ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวอย่างที่เป็นน้ำที่มีภาวะความเป็นกรดและเบส<br>ต่างกัน.....                       | 15 |
| รูปที่ 2.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสซีเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) poly<br>(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวอย่างที่เป็นน้ำเมื่อมีการเติมเอทานอลเข้าไปใน<br>ระบบที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ..... | 15 |
| รูปที่ 2.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสซีเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) poly<br>(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวอย่างที่เป็น PVA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....   | 16 |
| รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิสุ่<br>อุณหภูมิห้อง.....   | 16 |
| รูปที่ 2.10 โครงสร้างของยางธรรมชาติ .....  | 17 |
| รูปที่ 2.11 แผนผังแสดงการเตรียมน้ำยางธรรมชาติขั้นด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง.....   | 21 |
| รูปที่ 2.12 การตัดแปรรโครงสร้างยางธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ.....  | 23 |
| รูปที่ 2.13 โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์.....  | 24 |
| รูปที่ 2.14 กระบวนการเตรียมนยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....   | 25 |
| รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์อย่างด้วยกำมะถัน .....   | 27 |
| รูปที่ 2.16 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 2.17 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer .....   | 39 |
| รูปที่ 2.18 ขั้นตอนทดสอบความทนต่อแรงดึงรูปร่างคล้ายดัมเบลล์ .....  | 40 |
| รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด .....   | 41 |
| รูปที่ 2.20 การตอบสนองของฟิล์ม PDA/PVA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....   | 43 |
| รูปที่ 2.21 โครงสร้างของ 5,7-hexadecadiynoic acid (HDDA), 10,12-tricosadiynoic acid (TCDA) และ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) .....  | 44 |
| รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (ก) poly(PCDA) เวสซีเคิล (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต (ค) poly(TCDA) เวสซีเคิล (ง) poly(TCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และ (จ) poly(HDDA)/ZnO เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง ..... | 45 |
| รูปที่ 2.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO nanocomposite ใน (1) 1,2-dichlorobenzene, (2) chlorobenzene, (3) toluene, (4) butanol, (5) hexanol, (6) ethanol, (7) chloroform, (8) THF (9) น้ำ และ (10) Poly(PCDA) ในน้ำ (11) Poly(PCDA) ใน THF .....                                | 46 |
| รูปที่ 2.24 ภาพถ่ายพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่าง ๆ (ก) toluene + PS, (ข) toluene + PMMA, (ค) toluene + PE (ง) water + PVA ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 200°C และหลังเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง .....   | 46 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์สารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและโทลูอิน .....  | 49 |
| รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....  | 50 |
| รูปที่ 3.3 เครื่อง Universal testing (NISTON-5843) .....   | 59 |
| รูปที่ 3.4 ตัวอย่างขั้นตอนทดสอบรูปร่างดัมเบลล์ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต .....  | 59 |
| รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายแสดงสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่กระจายตัวอยู่ใน (ก) น้ำปราศจากไอออน และ (ข) โทลูอิน .....   | 61 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 4.2  | สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอิน.....   | 62 |
| รูปที่ 4.3  | ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส.....   | 63 |
| รูปที่ 4.4  | ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง .....  | 64 |
| รูปที่ 4.5  | ภาพถ่ายฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จาก .....  | 67 |
| รูปที่ 4.6  | สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอินและในสารละลายยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม .....   | 68 |
| รูปที่ 4.7  | สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอินและในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม .....                                    | 69 |
| รูปที่ 4.8  | ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1.76 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (3.52 phr) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส.....  | 70 |
| รูปที่ 4.9  | ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1.76 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (3.52 phr) เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง .....        | 72 |
| รูปที่ 4.10 | ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (2.93 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (5.87phr) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส..... | 74 |
| รูปที่ 4.11 | ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (2.93 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (5.87 phr) เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง .....      | 75 |
| รูปที่ 4.12 | สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอินและในสารละลายยางธรรมชาติที่มีสารคงรูปในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม.....  | 80 |



- รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนและในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีสารคงรูปในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม ..... 81
- รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร เมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส..... 82
- รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง..... 83
- รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส..... 84
- รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ..... 84
- รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส..... 85
- รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง..... 86
- รูปที่ 4.20 ตัวอย่างฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่ผ่านการคงรูป (ก) ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร (ข) ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติผสมสูตรและ (ค) ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร..... 89
- รูปที่ 4.21 แผนภูมิแท่งแสดงค่าการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและสารละลายยางผสมสูตรซึ่งแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 14 วัน..... 90

- รูปที่ 4.22 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร สารละลายยางผสมสูตร และสารละลายยางอีพอกไซด์ผสมสูตร ..... 91



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิไดแอเซทิลีนเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้ มีสมบัติการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงเมื่อได้รับสิ่งกระตุ้นจากภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่างของสารเคมี แรงเค้นเชิงกล เป็นต้น โดยการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกเมื่อได้รับสิ่งกระตุ้น ทำให้สายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัว ส่งผลให้อิเล็กตรอนในสายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจึงต้องใช้ระดับพลังงานเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง<sup>(1)(2)(3)(4)</sup> อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของแอมฟิฟิลิกมอนอเมอร์ในน้ำด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากคุณสมบัติเด่นของพอลิไดแอเซทิลีนที่กล่าวมาข้างต้น นักวิทยาศาสตร์จึงทำการศึกษาและพัฒนาเป็นวัสดุตรวจวัด อุณหภูมิ สารเคมีต่าง ๆ<sup>(5)(6)(7)</sup>

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติในการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของพอลิไดแอเซทิลีนให้เป็นแบบผันกลับได้โดยการเตรียมอยู่ในรูปของนาโนคอมพอสิต โดยใช้ซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรเป็นตัวรองรับและหมู่คาร์บอกซิลิกของนอเมอร์เกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ ซึ่งทำให้พอลิไดแอเซทิลีนสามารถจัดตัวอย่างเป็นระเบียบบนพื้นผิวด้านบนของซิงก์ออกไซด์โดยรอบ<sup>(8)</sup> นอกจากนี้ยังพบว่านาโนคอมพอสิตที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรมากขึ้น สามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้น ทำให้สามารถเตรียมอยู่ในรูปสารแขวนลอยต่าง ๆ หรือนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ที่ละลายและไม่ละลายน้ำได้<sup>(9)(10)</sup> ซึ่งเป็นการเพิ่มแนวทางในการเตรียมในรูปแบบอื่น ๆ เพื่อนำไปใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ทักงอได้ อีกทั้งยังหาได้ง่ายในประเทศไทย ในทางการค้ายางธรรมชาติมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือน้ำยางธรรมชาติและยางแห้ง โดยยางธรรมชาติสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว อย่างไรก็ตามจากการที่ยางธรรมชาติมีเพียงไฮโดรเจนและคาร์บอนในโครงสร้างทำให้เกิดการบวมตัวในน้ำมันได้ดี ดังนั้นจึงมีการจำหน่ายยางธรรมชาติดัดแปรในรูปยางธรรมชาติอิมพอกไซด์ ทำให้มีความสามารถในการทนทานต่อน้ำมันมากกว่ายางธรรมชาติทั่วไป จากเหตุผลข้างต้น ยางธรรมชาติทั้งจากน้ำยางและสารละลายของยางธรรมชาติและสารละลายของยางธรรมชาติอิมพอกไซด์ในตัวทำละลายอินทรีย์ จึงเหมาะที่จะเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์สำหรับขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ทั้งในรูปของน้ำยางและสารละลายของยางธรรมชาติและสารละลายของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อดูว่าโครงสร้างของยางธรรมชาติส่งผลต่อการเปลี่ยนสีและการผันกลับของสีอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาแผ่นฟิล์มสำหรับเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีความสามารถในการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิต่อไปในอนาคต โดยมีพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนสีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและผันกลับได้เมื่อลดอุณหภูมิลงสู่สภาวะปกติเป็นส่วนประกอบสำคัญ อย่างไรก็ตามนอกจากสมบัติการเปลี่ยนสีและการผันกลับของสีแล้ว สมบัติเชิงกลของวัสดุจะต้องสูงพอที่จะไม่เกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงระหว่างที่ใช้งาน ดังนั้นการเลือกชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับเตรียมเป็นฟิล์มจึงเป็นสิ่งสำคัญ อีกทั้งต้นทุนในการผลิตและความยากง่ายในการขึ้นรูปยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ยางธรรมชาติจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่น ทนต่อการฉีกขาด หาได้ง่าย ทั้งยังเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ที่พบได้ในอุปกรณ์ทั่วไปในชีวิตประจำวันหรือแม้แต่ในเครื่องจักร ซึ่งคาดว่าพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต จะสามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้ได้จริงต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สังเคราะห์และขึ้นรูปฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต
2. ทดสอบสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สังเคราะห์และขึ้นรูปพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางและสารละลายของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ในลักษณะแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการ drop casting และทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ การบวมตัวในตัวทำละลายและการทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตฟิล์มสำหรับประยุกต์ใช้ในงานด้านการตรวจวัดอุณหภูมิ

## บทที่ 2

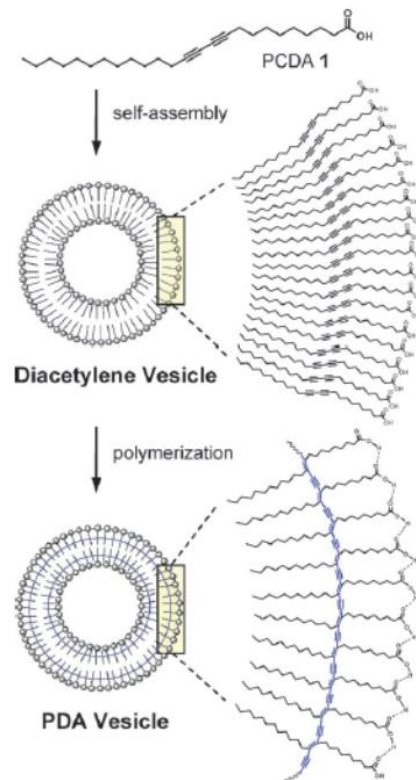
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิไดแอเซทิลีน (Polydiacetylene, PDA)

พอลิไดแอเซทิลีนเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ซึ่งปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างมากในการพัฒนาเพื่อเป็นวัสดุสำหรับงานด้านการตรวจวัด เนื่องจากมีสมบัติในการเปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้รังสียูวี (Ultraviolet radiation) ของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นแอมฟิฟิลิกโมเลกุล (amphiphilic molecule) ที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่มีขั้ว (hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic tail) ตัวอย่างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ได้แก่ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเมื่อไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จำนวนมากกระจายตัวอยู่ในน้ำจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสซิเคิล (bilayer vesicle) และเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันผ่านการฉายแสงยูวี จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างพันธะของสายโซ่ข้างเกิดเป็นพอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิล (polydiacetylene vesicle) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



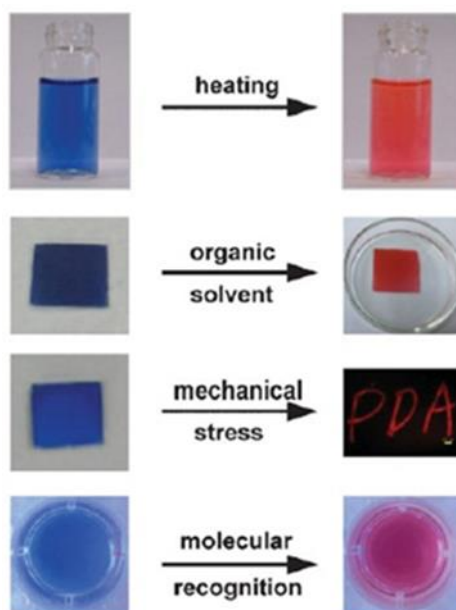
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA)



รูปที่ 2.2 การเกิดโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิลและพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล<sup>(5)</sup>

### 2.1.1 สมบัติและกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน<sup>(11)(12)(13)</sup>

พอลิไดแอเซทิลีนมีคุณสมบัติเด่นด้านการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเติมสารเคมีบางชนิดเข้าไปในระบบ ความเป็นกรดต่างของสารเคมี หรือแรงเค้นเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สาเหตุที่พอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อโดนรบกวนจากสิ่งเร้าภายนอกก็เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่หลัก (conjugated backbone) และสายโซ่ข้าง (alkyl chain) ของพอลิไดแอเซทิลีน โดยสายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัว ส่งผลให้อิเล็กตรอนในสายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจึงต้องใช้ระดับพลังงานเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากน้ำเงินเป็นแดง โดยทั่วไปในสภาวะปกติพอลิไดแอเซทิลีนจะมีสีน้ำเงินและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และเมื่อเปลี่ยนเป็นสีแดงจะปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าต่าง ๆ<sup>(1)</sup>

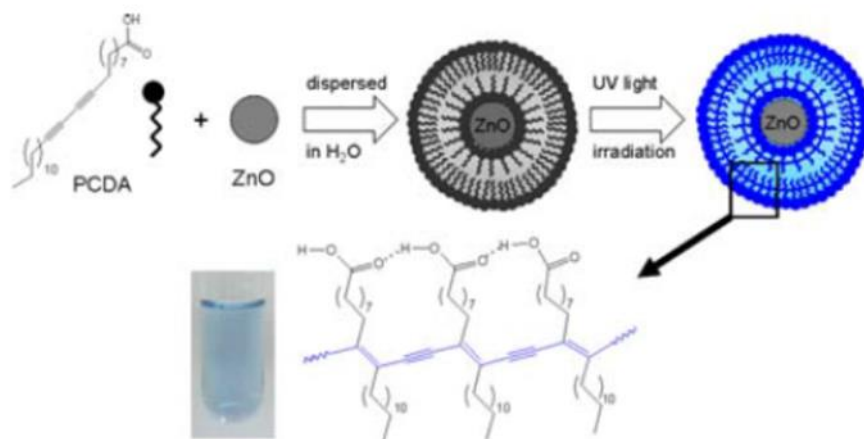
จากสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า การสังเคราะห์ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำซึ่งมีความปลอดภัยและไม่เป็นพิษ ทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเป็นตัวเลือกที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยที่ต้องการพัฒนาวัสดุสำหรับงานด้านการตรวจวัดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ<sup>(14)</sup>

## 2.2 พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต (Polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite, PDA/ZnO)

เนื่องจากสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนที่มีลักษณะเฉพาะตัวและน่าสนใจ ทำให้นักวิจัยเลือกศึกษาค้นคว้าและพัฒนาพอลิไดอะเซทิลีนมากยิ่งขึ้น เช่น การปรับแต่งโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ช่วงอุณหภูมิแตกต่างไปจากเดิม<sup>(4)</sup> การเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้<sup>(8)</sup> เป็นต้น เพื่อให้เกิดการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในลักษณะและระดับที่แตกต่างออกไป

การพัฒนาสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนโดยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เข้าไปในโครงสร้างเวสซิคูลของพอลิไดอะเซทิลีน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อให้เกิดเป็นพอลิไดอะเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่มีซิงก์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ โดยที่หมู่คาร์บอกซิ-

เลทของพอลิไดแอเซทิลีนจะเข้าไปยึดเกาะกับประจุบวกบนพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ด้วยแรงระหว่างประจุ (ionic interaction) ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของพอลิไดแอเซทิลีนที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

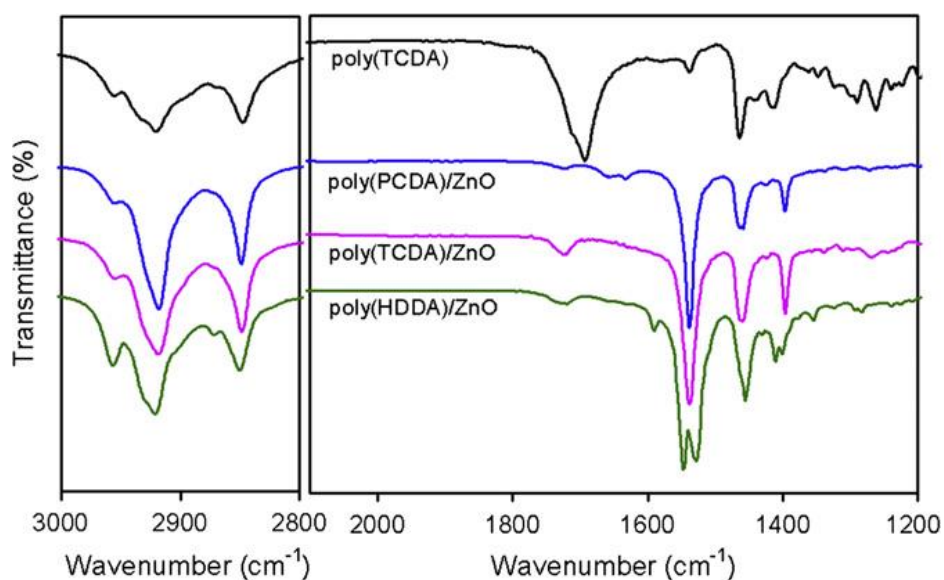


รูปที่ 2.4 การเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์เข้าไปในโครงสร้างพอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิล<sup>(9)</sup>

เมื่อนำพอลิไดแอเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้างต้น ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับประจุพอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิลกับพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตพบว่า พอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิลแสดงตำแหน่งการสั่นของหมู่  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_2$ , และ  $\text{CH}_3$  ที่ความยาวคลื่น 2848, 2918, และ 2954  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ และบริเวณความยาวคลื่น 1690  $\text{cm}^{-1}$  แสดงตำแหน่งการสั่นแบบยืดหดของพันธะไฮโดรเจนในหมู่  $-\text{COOH}$  ของบริเวณส่วนหัว อีกทั้งบริเวณความยาวคลื่น 1470–1420  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของหมู่  $\text{CH}_2$  ในสายโซ่อัลคิล สำหรับพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตพบว่า มีลักษณะของสเปกตรัมที่แตกต่างออกไป สังเกตได้จากรูปที่ 2.5 สเปกตรัมของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตและ poly(TCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 1540 และ 1398  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่  $\text{COO}$  และการสั่นแบบสมมาตรของหมู่  $\text{COO}$  ของคาร์บอกซิเลตแอนไอออน แสดงถึงพันธะไฮดรอกซิลระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตในส่วนหัวกับ  $\text{Zn-OH}_2^+$  บริเวณพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ และบริเวณความยาวคลื่น 1725  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของหมู่  $-\text{COOH}$  ซึ่งไม่มีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้น ส่วนสเปกตรัมของ

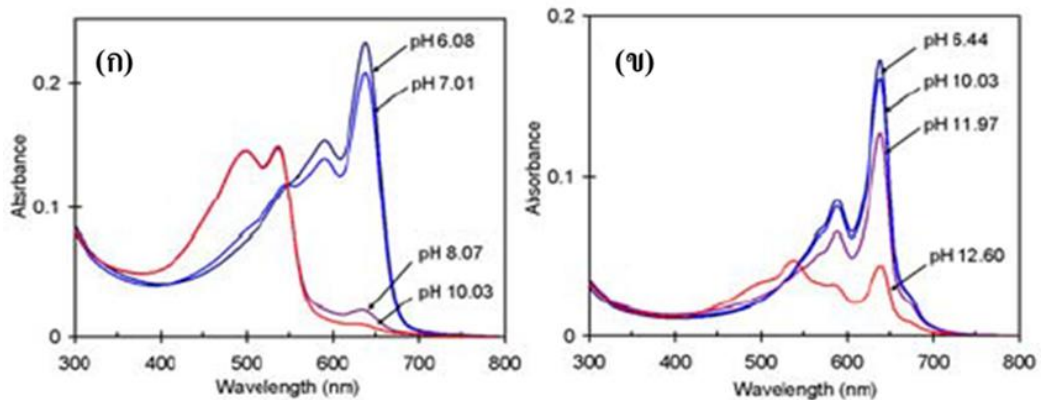


poly(HDDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตนั้น จะมีการแตกออกของพีคที่แสดงการสั่นของหมู่ COO จากคาร์บอกซิเลตไอออน ที่บริเวณความยาวคลื่น 1590, 1548, และ 1530  $\text{cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบไม่สมมาตร และที่บริเวณความยาวคลื่น 1412, 1403, และ 1380  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบสมมาตร

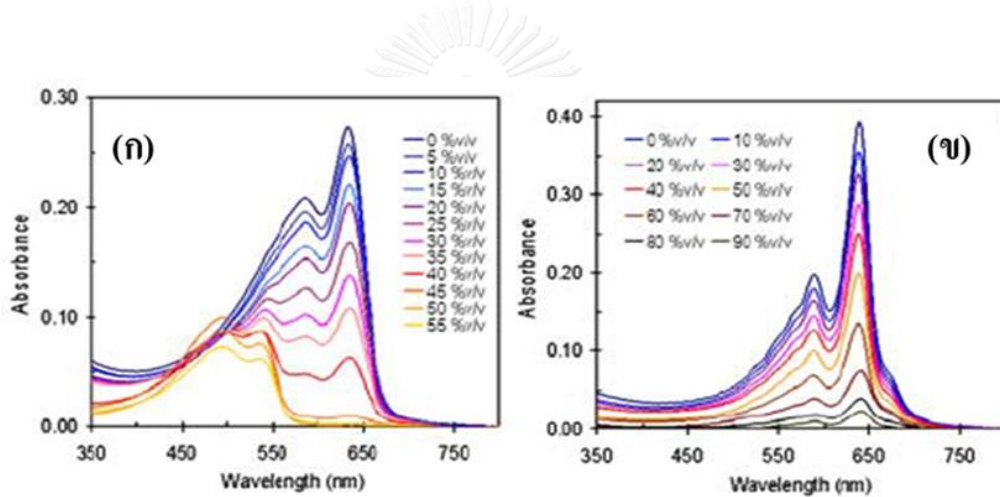


รูปที่ 2.5 FT-IR สเปกตรัมของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตชนิดต่าง ๆ<sup>(44)</sup>

สมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตนั้น มีสมบัติที่แตกต่างไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธ์ คือ มีความเสถียรต่อกรดและเบสมากกว่าเดิม โดยจะเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงที่ค่า pH สูงกว่า และการเติมเอทานอลก็จะไม่ไปรบกวนระบบและทำให้สีเปลี่ยนเช่นกัน<sup>(9)</sup> ซึ่งสามารถดูได้จาก สเปกตรารการดูดกลืนแสงที่ไม่ปรากฏเฟสสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

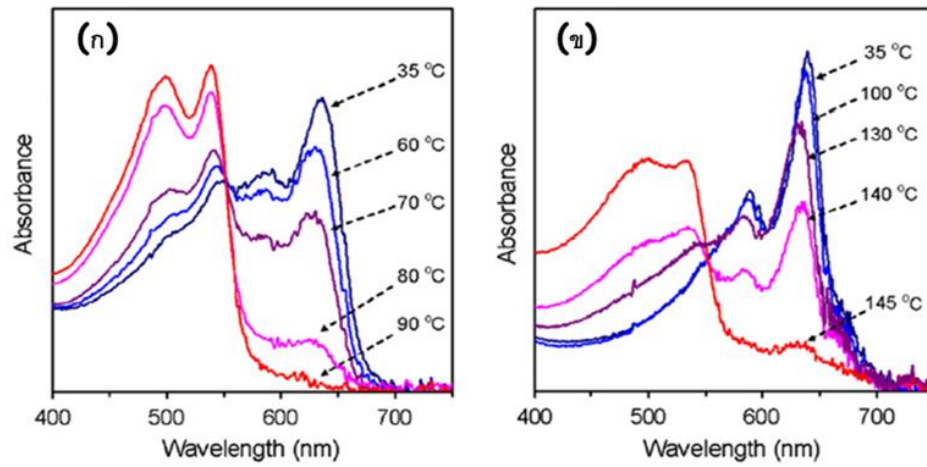


รูปที่ 2.6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดอะเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธ์ิ และ (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวกลางที่เป็นน้ำที่มีภาวะความเป็นกรดและเบสต่างกัน<sup>(9)</sup>

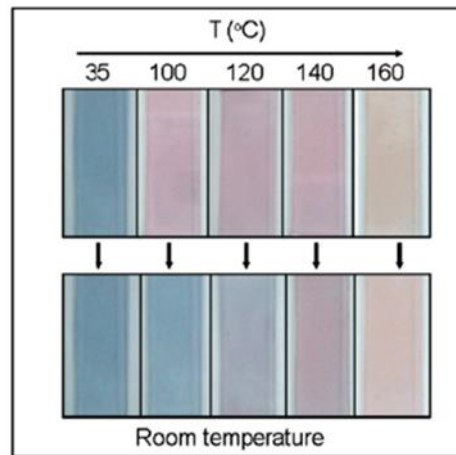


รูปที่ 2.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดอะเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธ์ิ และ (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวกลางที่เป็นน้ำเมื่อมีการเติมเอทานอลเข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ<sup>(9)</sup>

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่ออุณหภูมิระหว่างพอลิไดอะเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธ์ิกับพอลิไดอะเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ยังพบว่าพอลิไดอะเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่าและยังสามารถเกิดการผันกลับสีได้ด้วย<sup>(8)</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ที่เปรียบเทียบสเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและภาพการผันกลับสีของพอลิไดอะเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปแบบฟิล์มตามลำดับ



รูปที่ 2.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลบริสุทธ์ และ (ข) poly (PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตั้วกลางที่เป็น PVA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ<sup>(8)</sup>



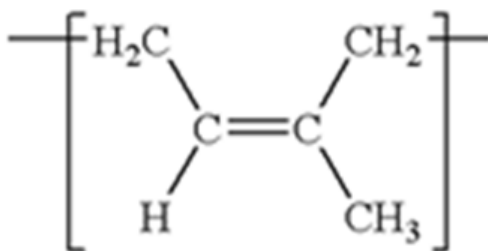
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิสู่อุณหภูมิห้อง<sup>(8)</sup>

สำหรับวิธีการสังเคราะห์พอลิไดแอเซทิลีนซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตด้วยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์นั้น สามารถทำได้ง่ายเช่นเดียวกับการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซล-เคล ค่าใช้จ่ายไม่แพง ทั้งยังส่งผลให้มีความเสถียรและสามารถผันกลับสีได้ซึ่งเป็นสมบัติเด่นที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นและลดการใช้ทรัพยากรลงเนื่องจากสามารถใช้ตรวจวัดซ้ำได้

## 2.3 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)<sup>(15)(16)</sup>

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยได้มาจากต้นยางพารา พันธุ์ฮีเวีย บราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมที่สุดและปลูกมากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

การเข้ามาของยางพาราสู่ประเทศไทยเกิดเมื่อปี พ.ศ. 2442 โดยพระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ได้นำต้นยางพารามาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง ทางภาคใต้ของประเทศไทยเป็นที่แรกและได้ส่งคนไปเรียนรู้วิธีการปลูกยางพาราเพื่อมาสอนประชาชนพร้อมทั้งนำพันธุ์ยางพาราไปแจกจ่ายและส่งเสริมให้ประชาชนปลูกมากขึ้น ซึ่งในยุคนั้นอาจกล่าวได้ว่าเป็นยุคต้นยางพาราและชาวบ้านเรียกยางพารานี้ว่า ยางเทศา ต่อมามีการขยายพื้นที่ในปลูกยางพาราไปทั่วทั้งภาคใต้ ก่อให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมยางพาราของประเทศไทยเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตและส่งออกยางพาราได้มากที่สุดในโลก



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

### 2.3.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex)<sup>(17)(18)</sup>

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ของ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ที่กระจายตัวแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นสว่นประกอบ โดยน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพาราหรือที่เรียกว่า น้ำยางสดจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น มีสภาพเป็นคอลลอยด์และมี pH ประมาณ 7 ซึ่งน้ำยางธรรมชาติสามารถแบ่งส่วนประกอบหลักออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

#### 1. อนุภาคยาง (Rubber particles)

อนุภาคยางนั้นมีรูปร่างเป็นทรงกลมและถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีน โดยที่โปรตีนจะอยู่ชั้นนอกและไขมันแทรกอยู่ระหว่างโปรตีนกับซิส-1,4-พอลิไอโซพรีนที่ถูกหุ้มไว้อยู่ภายในสุด นอกจากนี้อาจจะมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ใน

ปริมาณที่น้อยมาก โดยปกติในอุณหภูมิห้องจะแขวนลอยอยู่ในน้ำและมีอยู่ประมาณร้อยละ 35

## 2. เซรัม (Serum phase)

เซรัม คือ ส่วนที่เป็นน้ำ ซึ่งประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้ง และน้ำตาลมีอยู่ในน้ำอย่างปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีโปรตีนและกรดอะมิโน ซึ่งจะมีโปรตีนประเภทอัลฟาไกลูโบลินเป็นส่วนใหญ่ในเซรัม ในน้ำยางธรรมชาติจะมีเซรัมอยู่ประมาณร้อยละ 55

## 3. ลูทอยด์ (Lutoid phase)

ลูทอยด์ มีลักษณะเป็นอนุภาคค่อนข้างกลม ห่อหุ้มด้วยเยื่อบาง ๆ ภายในเยื่อบางนี้จะมีทั้งสารละลายและสารแขวนลอยของโปรตีนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ในส่วนของลูทอยด์ยังมีอนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey - wysling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยาง มีอนุภาคกลม ขนาดใหญ่กว่ายางและมีปริมาณไม่มาก มักเป็นสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ซึ่งทำให้ยางมีสีเหลืองเข้มทั้งยังสามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรัม ในน้ำยางธรรมชาติจะมีส่วนของลูทอยด์อยู่ประมาณร้อยละ 10 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

| ส่วนประกอบ | ปริมาณ (%) |
|------------|------------|
| น้ำ        | 55-70      |
| เนื้อยาง   | 30-40      |
| เรซิน      | 1.5-2      |
| โปรตีน     | 1.5-3      |
| ซีไค       | 0.5-1      |
| น้ำตาล     | 1-2        |

น้ำยางธรรมชาติที่กรี๊ดได้จากต้นยางพาราจะคงสภาพอยู่ได้ไม่เกิน 6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศและจากสภาวะแวดล้อมจะกินสารอาหารที่อยู่ในน้ำยาง เช่น โปรตีน น้ำตาล ไขมัน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว เกิดการบูดเน่าและส่งกลิ่นเหม็น จากการทำแบคทีเรียกินและย่อยสลายอาหารได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ส่งผลให้ค่า pH ของน้ำยางธรรมชาติลดลง น้ำยางธรรมชาติจะหนืดขึ้นและอนุภาคของยางจะเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ จนกลายเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนน้ำยางธรรมชาติสูญเสียสภาพ ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพจึงมีการ

ใส่สารป้องกันการจับตัว (Anticoagulant) ได้แก่ แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ โพรมัลดีไฮด์ เป็นต้น หลังจากนั้นจะนำไปแปรรูปเป็นยางธรรมชาติดิบได้ 2 แบบ คือ น้ำยางธรรมชาติข้น (concentrated latex) กับ ยางธรรมชาติแห้ง (dry natural rubber)

### 2.3.1.1 น้ำยางธรรมชาติข้น (Concentrated latex)

น้ำยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารานั้น มีเนื้อยางเพียงร้อยละ 30-40 ส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำชะส่วนใหญ่และสารอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการทำงานและง่ายต่อการขนส่ง จึงได้เตรียมน้ำยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปของน้ำยางธรรมชาติข้น โดยการนำน้ำยางธรรมชาติไปผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นและแยกส่วนที่ไม่ใช่ยางออกไป สำหรับวิธีการผลิตน้ำยางธรรมชาติข้นมีด้วยกัน 4 วิธี ดังนี้

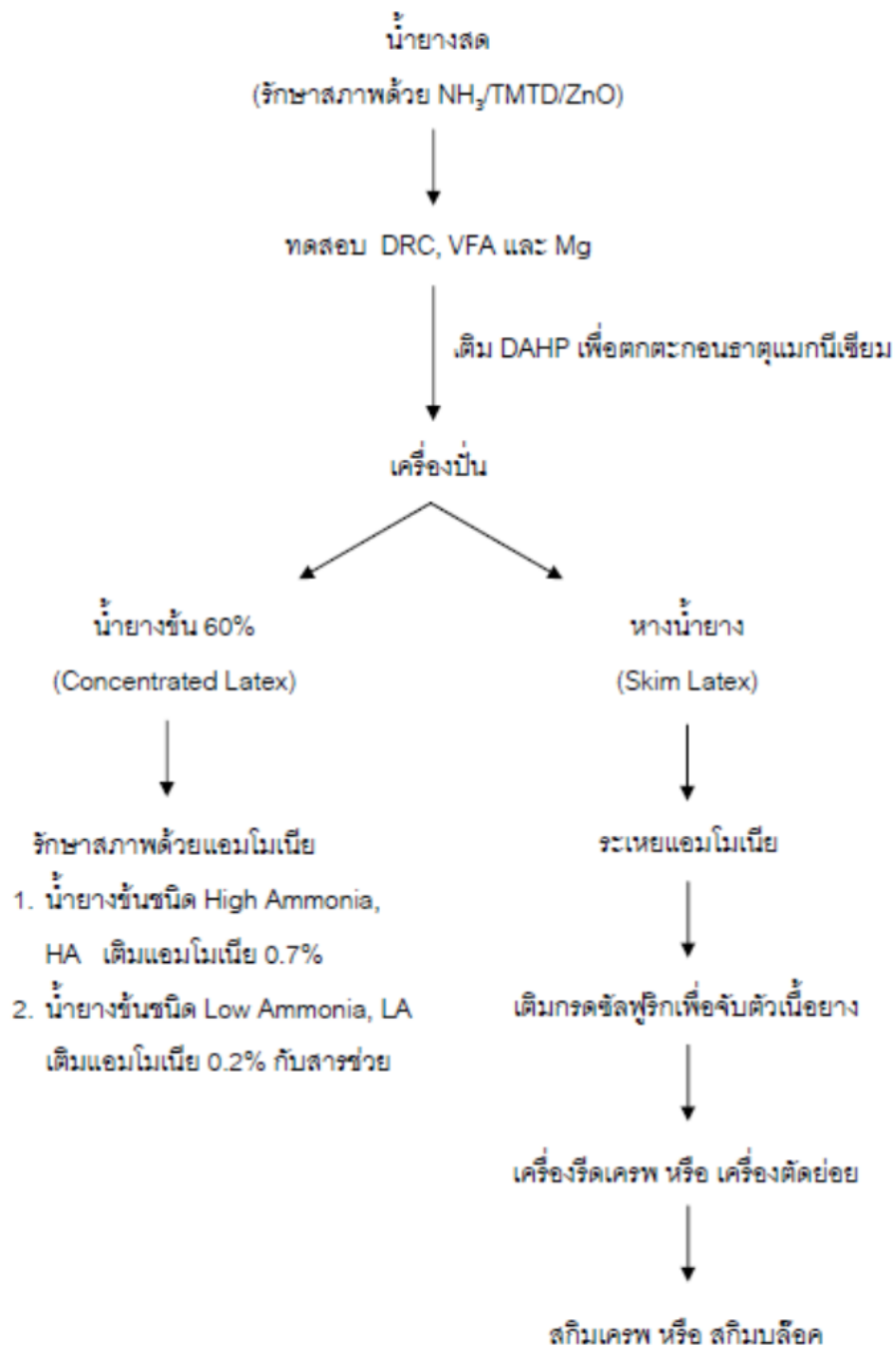
1. การระเหยน้ำ (evaporation) วิธีนี้ต้องมีการเติมสารที่ทำให้น้ำยางธรรมชาติคงตัว (stabilizer) เช่น potassium soap ในถึงน้ำยางธรรมชาติ แล้วให้ความร้อนรอบๆ ถัง เมื่อน้ำระเหยไปน้ำยางธรรมชาติข้นที่ได้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 75% ปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% caustic potash 1.5% และสารที่ทำให้น้ำยางธรรมชาติคงตัวกับโปรตีนประมาณ 13.5% วิธีนี้เหมาะกับการขนย้ายน้ำยางธรรมชาติในระยะทางไกล
2. การทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีนี้มีการเติมสารทำให้เกิดครีม (creaming agent) เช่น sodium alginate, locust bean gum, dum karaya, gum tragacanth เป็นต้น โดยสารทำให้เกิดครีมจะไปพอกหรือเคลือบผิวของอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยมาที่ผิวของน้ำยางธรรมชาติ จะทำให้ได้น้ำยางธรรมชาติข้นที่มีความบริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อทำซ้ำหลายๆ ครั้ง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา
3. การปั่นเหวี่ยง (centrifuging) วิธีนี้เป็นการใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูงแยกเนื้อยางออกจากสวานที่ปนเสริม ทำให้ได้น้ำยางธรรมชาติข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยรูปที่ 2.11 แสดงแผนผังการเตรียมน้ำยางธรรมชาติข้นด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง
4. การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electro decantation) วิธีนี้จะใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยแยกสวานของเนื้อยางออกจากสวานของเสริม โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวกลงในน้ำยางธรรมชาติที่เติมสารช่วยให้น้ำยางธรรมชาติคงตัว จากนั้นอนุภาคยางที่มีประจุลบหุ้มอยู่จะเคลื่อนตัวไปหาขั้วบวกบริเวณผิวของน้ำยางธรรมชาติ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและต้องใช้งบลงทุนสูง

หลังจากผ่านกระบวนการข้างต้นจะได้น้ำยางธรรมชาติชั้นที่มีเนื้อเยื่ออยู่ประมาณร้อยละ 60 ซึ่งน้ำยางธรรมชาติชั้นโดยทั่วไปจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

1. น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) เป็นระบบที่โซ่ปริมาณแอมโมเนียสูง ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 0.7% ต่อน้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติ
2. น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia, LA) เป็นระบบที่โซ่ปริมาณแอมโมเนียต่ำ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 0.2% ต่อน้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติ และใช้สารเคมีบางชนิดรวมด้วย เช่น เตทตระเมทิลไฮยูเรมไดซัลไฟด์ ร่วมกับ ซิงก์ออกไซด์ เป็นต้น

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติชั้นมีด้วยกันหลากหลายชนิด เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย หมอน ที่นอน สายน้ำเกลือ เส้นด้ายยางยืด เป็นต้น ดังนั้นการเลือกใช้น้ำยางธรรมชาติชั้นทั้งสองชนิดนี้ ควรคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต ความเหมาะสมในกรรมวิธีการผลิต เพื่อที่จะเลือกใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด





รูปที่ 2.11 แผนผังแสดงการเตรียมน้ำยางธรรมชาติชั้นด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง<sup>(18)</sup>



### 2.3.2 ยางธรรมชาติแห้ง (Dry natural rubber)<sup>(19)</sup>

ยางธรรมชาติแห้ง มาจากการแปรรูปของน้ำยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปแบบของแข็ง สำหรับการเตรียมยางธรรมชาติแห้งทำได้โดยการเติมกรดฟอร์มิกหรือกรดอะซิติกลงไปใต้น้ำยางธรรมชาติ กรดจะทำให้น้ำยางธรรมชาติจับตัวเป็นก้อน เกิดการแยกกันระหว่างเนื้อยางและน้ำ จากนั้นจะทำการกำจัดน้ำออกโดยการรีดด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้ง เมื่อรีดน้ำออกแล้วนำแผ่นยางธรรมชาติที่ได้ไประเหยน้ำออกด้วยลมร้อน เมื่อยางธรรมชาติแห้งแล้วจึงนำมาเปลี่ยนรูปร่างให้อยู่ในลักษณะ แผ่น ก้อน แท่ง หรือปรับปรุงสีตามที่ต้องการเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานในขั้นต่อไป กรรมวิธีการผลิตยางแห้งโดยสวนใหญ่ มี 2 ประเภท คือ

#### 1. การผลิตยางแบบธรรมดา (Conventional Rubber Process)

ไตแก การผลิตยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ และยางสกิม

#### 2. การผลิตยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน (Technically Specified Rubber Process)

ไตแก ยางแท่ง

สำหรับสาเหตุหลักในการแปรรูปน้ำยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปยางธรรมชาติแห้งก็เพื่อความสะดวกในการจัดเก็บ ดูแลรักษาและขนส่ง ทั้งยังยืดระยะเวลาในการรักษาสภาพของยางธรรมชาติให้นานขึ้นอีกด้วย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติแห้ง เช่น รองเท้ายาง พื้นรองเท้า ยางปูพื้น ยางชิ้นส่วนรถยนต์และเฟอร์นิเจอร์ ยางล้อรถยนต์ ยางรองคอคสะพาน เป็นต้น

### 2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ

จากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่าย และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

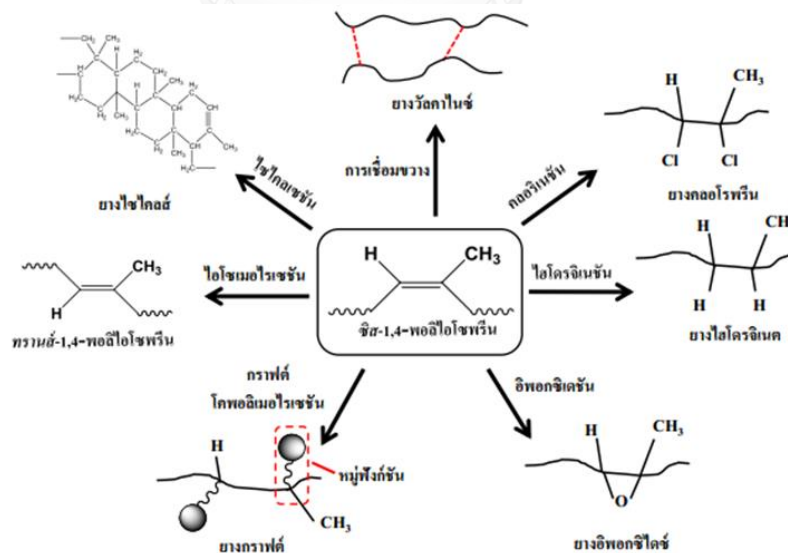
1. มีความยืดหยุ่นสูง โดยเมื่อยางธรรมชาติถูกแรงภายนอกกระทำ จะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม หรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว
2. มีสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง
3. มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี โดยมีความยืดหยุ่นสูงในขณะที่มีความร้อนภายในที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ
4. มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง
5. ยางธรรมชาติมีสมบัติความเหนียวติดกันดี
6. มีความต้านทานไฟฟ้าสูง จึงสามารถใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี
7. ยางธรรมชาติสามารถเกิดการบวมตัวและละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดได้ ไม่ทนทานต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมี

8. ยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ายางธรรมชาติจะมีข้อดีหลายประการแต่ก็ยังมีข้อด้อย ทำให้จำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติบางประการให้ดีขึ้น จึงมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างยางธรรมชาติขึ้นและเกิดยางธรรมชาติดัดแปรขึ้นมาหลายชนิด เพื่อที่จะลดข้อด้อยและนำไปใช้งานแทนยางธรรมชาติทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและหลากหลายมากยิ่งขึ้น

#### 2.4 ยางธรรมชาติดัดแปร (Modified natural rubber)<sup>(20)</sup>

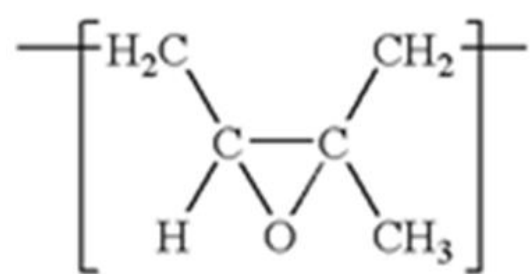
ยางธรรมชาติดัดแปรเป็นการนำยางธรรมชาติมาปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยกระบวนการทางเคมี โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบริเวณพันธะคู่ของโครงสร้างยางธรรมชาติซึ่งมีความไม่อิ่มตัวสูง ทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันภายในโมเลกุลหรือการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมลงไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอน ทำให้เกิดพันธะเคมีใหม่ที่มีลักษณะร่วมกันระหว่างยางธรรมชาติกับหมู่ฟังก์ชันที่ได้เติมเข้าไป เช่น การเติมหมู่คลอรีน การเติมไฮโดรเจนให้กับพันธะคู่ การเกิดวงแหวน การเติมหมู่ออกซิเรนของออกซิเจน หรือการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่ของยางธรรมชาติ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การดัดแปรโครงสร้างยางธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ<sup>(20)</sup>

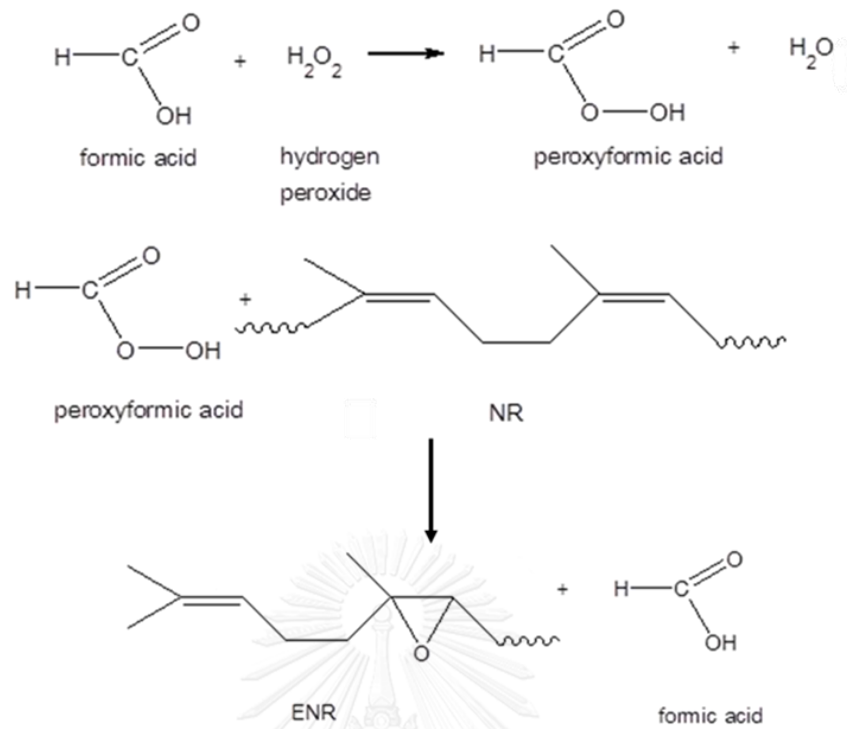
### 2.4.1 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydized natural rubber, ENR)<sup>(20)(21)(22)</sup>

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดจากการดัดแปรยางธรรมชาติ โดยการลดพันธะคู่ที่มีอยู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติลงและให้มีวงแหวนอีพอกไซด์เข้าไปแทน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นโมเลกุลใหม่ที่ได้จะยืดหยุ่นและเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความทนต่อน้ำมันและความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศดีขึ้น ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม ต่าง ๆ ได้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทางการค้าจะมีอยู่ 2 เกรด ตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้าง คือ ร้อยละ 25 และ 50 (ENR25 และ ENR50 ตามลำดับ)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ในระบบอุตสาหกรรมนิยมเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากน้ำยางธรรมชาติ โดยสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (epoxidation) ด้วยกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) ทำให้เกิดวงแหวนอีพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน (oxirane ring) ตรงตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

จากการดัดแปรโครงสร้างยางธรรมชาติให้เป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีสภาพความเป็นขั้วเพิ่มขึ้นตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่มีในโครงสร้างโมเลกุล ส่งผลให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทนทานต่อสารละลายไม่มีขั้วและน้ำมันได้มากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศอีกด้วย จากสมบัติเด่นข้างต้นของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์

| สมบัติเด่น                      | การใช้งาน  | เกรดของยาง ENR |
|---------------------------------|--|----------------|
| - ทนทานต่อน้ำมัน                | ท่อ ข้อต่อ และสายยาง                                     | ENR25, ENR50   |
| - การซึมผ่านอากาศต่ำ            | แบลตเตอร์ ยางใน เคลือบภายในท่อ                           | ENR25          |
| - เสริมประสิทธิภาพได้ด้วยซิลิกา | ใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ไม่ต้องการให้เป็นสีดำ  | ENR25          |
| - มีความต้านทานต่อการหมุนต่ำ    | ดอกยางรถยนต์ พื้นยาง พื้นรองเท้ากีฬา                     | ENR25, ENR50   |
| - การหน่วง                      | ป้องกันการสั่นของเครื่องและใช้งานกับเครื่องกลทางวิศวกรรม | ENR25, ENR50   |
| - การติดประสาน                  | กาว เคลือบสายพาน PVC                                     | ENR25, ENR50   |

#### 2.4.2 ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanized rubber)<sup>(23)(24)</sup>

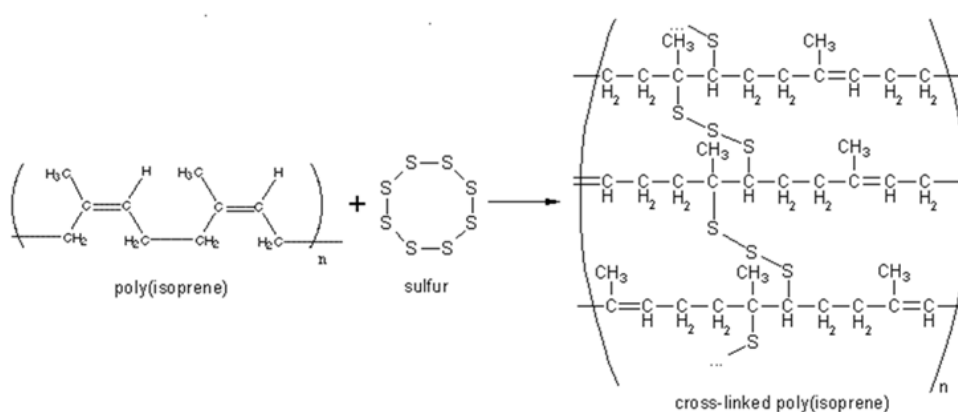
ยางวัลคาไนซ์ (vulcanized rubber) หรือยางคงรูป (cured rubber) เป็นการดัดแปรยางโดยการเติมสารที่ช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (crosslink) ตรงตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาในโครงสร้างของยาง ซึ่งก็คือ บริเวณพันธะคู่ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น

##### 2.4.2.1 สารทำให้ยางคงรูป (Curing agent) หรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

สารวัลคาไนซ์ คือ สารที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ซึ่งการวัลคาไนซ์ยางที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเพอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

### 2.4.2.1.1 ระบบกำมะถัน (Sulfur system)

กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้ นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR เป็นต้น แต่นี้ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน หรือยาง EPM ได้ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถัน<sup>(25)</sup>

### 2.4.2.1.2 ระบบเพอร์ออกไซด์ (Peroxide system)<sup>(26)</sup>

การวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่ เช่น ยางซิลิโคน และยางที่ไม่มีพันธะคู่หรือพวกที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่ไวต่อปฏิกิริยา ระบบนี้จะมีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน อีกทั้งเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตรายเพราะสามารถระเบิดได้ การขนย้ายและเก็บรักษาจึงต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล เช่น EPM, EVA, CPE เป็นต้น หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น เช่น HNBR, EPDM สำหรับยางอื่น ๆ ยังคงนิยมการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมากกว่า เพื่อป้องกันการเกิดอันตราย

### 2.4.2.1.3 ระบบที่ใช้สารเคมีอื่น ๆ

การนำสารวัลคาไนซ์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในการคงรูปร่างนั้น ไม่ค่อยเป็นที่นิยม มีการใช้น้อยหรือใช้ในกรณีที่เป็นพิเศษ เช่น การใช้โลหะออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ร่วมกับซิงก์ออกไซด์ ในการคงรูปของยางคลอโรพรีน หรือการใช้สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซด์นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยางบิวไทล์ เป็นต้น

### 2.4.2.2 สมบัติของยางวัลคาไนซ์

หลังจากการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ซึ่งทำโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงเป็นร่างแหทำให้ยางมีสมบัติที่เปลี่ยนไป ดังนี้

1. ความเปราะหรือความยืดหยุ่นมากขึ้น
2. ความแข็งแรง โมดูลัสและความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น
3. ความทนทานต่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้น

4. เปลี่ยนสภาพจากเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เป็นเทอร์โมเซตติ้ง (thermosetting) จากสมบัติที่เปลี่ยนไป ทำให้สามารถนำยางไปใช้งานได้อย่างหลากหลายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 2.5 ยางคอมพาวด์ (Rubber compound)<sup>(23)(24)(27)</sup>

ยางคอมพาวด์ คือ ยางที่มีการผสมสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยการจะผลิตยางคอมพาวด์ได้นั้นจะต้องมีการออกสูตรเคมีและการผสมยาง เพื่อให้ได้ยางคอมพาวด์ที่สามารถนำไปขึ้นรูปและคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ

### 2.5.1 การออกสูตรเคมียาง (Compounding formulation)

การออกสูตรเคมียาง เป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากจะส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ สมบัติหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์และต้นทุนการผลิต ดังนั้นการออกสูตรเคมียางที่ดีต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับสมบัติและการใช้งานของยางกลไกการทำงานของสารเคมีต่าง ๆ ที่จะผสมลงไป รวมทั้งต้องมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องจักรที่ใช้ในการผสมและการแปรรูปด้วย โดยทั่วไปส่วนประกอบต่างๆ ในสูตรเคมียาง ประกอบด้วย ดังนี้

1. ยาง ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber, SR) ยางผสม (blends) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomer, TPE)

2. สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent)
3. สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator)
4. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator)
5. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)
6. สารตัวเติม (fillers)
7. สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)
8. สารอื่นๆ เช่น สี (pigments) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) และสารหน่วงการติดไฟ (flame retardants) เป็นต้น

### 2.5.2 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น ลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลง ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ในปัจจุบันสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นหลายกลุ่ม ดังนี้

#### 2.5.2.1 เมอร์แคปโต (Mercapto)

สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอรัชสั้น และมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง ตัวอย่างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโต ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercapto benzothiazole, MBT) และไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide, MBTS)

#### 2.5.2.2 เบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (Benzothiazole sulfenamide)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอรัชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้นยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดีและมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง ตัวอย่างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไสโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide, CBS) บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-tert.butyl-2-benzothiazole sulfonamide, TBBS) ไดไซ-



โคลเฮกซิลเบนโซโซโรซัลฟีนาไมด์ (N,N'-dicyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide, DCBS) และมอโฟลิโนโซโรเบนโซโซโรซัลฟีนาไมด์ (2-(4-morpholiniothio) benzothiazole, MBS) เป็นต้น

### 2.5.2.3 ไตโทไธคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชสั้นและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการวัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถใช้ในการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานทางการแพทย์ เกษีกรรมหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ซิงก์-ไดเมทิลไดไทโธคาร์บาเมต (zinc dimethyldithiocarbamate, ZDMC) ซิงก์ไดเอทิลไดไทโธคาร์บาเมต (zinc diethyldithiocarbamate, ZDEC) และซิงก์ไดเบนซิลไดไทโธคาร์บาเมต (zinc dibenzylthiocarbamate, ZBEC) เป็นต้น

### 2.5.2.4 ไทยูแรม (Thiurams)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทยูแรมมีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมาก ในขณะที่ให้ระยะเวลาสกรอชที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไตโทไธคาร์บาเมตเล็กน้อย ตัวอย่างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ เทตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide, TMTD) เทตระเมทิลไทยูแรมโมนอสัลไฟด์ (tetramethylthiuram monosulfide, TMTM) เทตระเบนซิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetrabenzylthiuram disulfide, TBzTD) เป็นต้น

### 2.5.2.5 กัวนิติน (Guanidines)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ แต่จะไปใช้ป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่น ๆ ตัวอย่างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิติน (diphenylguanidine, DPG) ไดโทลิลกัวนิติน (di-o-tolylguanidine, DOTG) และโทลิลไบกัวนิติน (o-tolylbiguanide, OTBG)

## 2.5.3 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (Activators and Retarders)

### 2.5.3.1 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น โดยสารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริก ในปริมาณ 1-2 phr

### 2.5.3.2 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders)

สารหน่วงปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อยืดระยะเวลาสกรอร์ช ทำให้ลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษาอย่างคอมพาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างของสารหน่วงปฏิกิริยา ได้แก่ สารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น พะทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) กรดเบนโซอิก (benzoic acid) และกรดมาเลอิก (maleic acid) นอกจากนี้ยังมีไซโคลเฮกซิลโทโอพะทาลิไมด์ (cyclohexyl-N-thiophthalimide, CTP) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า PVI (pre-vulcanization inhibitor) สารหน่วงปฏิกิริยาชนิดนี้จะเพิ่มระยะเวลาสกรอร์ชของยางคอมพาวด์โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ซึ่งต่างจากสารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด

## 2.5.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง ส่วนใหญ่นิยมเติมลงไปปริมาณ 1-3 phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน (amine derivatives) และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (phenol derivatives) โดยทั่วไปสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยางสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง ตัวอย่างของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ได้แก่ ไอโซโพรพิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine, IPPD) ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine, 6PPD) พอลิเมอร์ของไทรมะทิลไดไฮโดรควิโนลีน (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinolin, TMQ) ไดบิวทิลครีโซล (2,6-Di-tert.butyl-p-cresol, BHT) และสไตรีนตฟีนอล (Styrenated phenol, SPH) เป็นต้น

### 2.5.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือ องค์กรประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ทำใ้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. สารตัวเติมเสริมแรง จะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก พื้นที่ผิวสูง ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา เป็นต้น
2. สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ใช้สำหรับลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว ทัลคัม แคลเซียม-คาร์บอเนต เป็นต้น

### 2.5.6 สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and Processing aids)

#### 2.5.6.1 สารทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers)

สารทำให้ยางนิ่มหรือพลาสติกไซเซอร์ คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางแล้วทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้น มีความหนืดลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็ว ทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติดกัน ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้นและช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยาง การเลือกใช้ชนิดของสารทำให้ยางนิ่มจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ การตกสี และราคา สารทำให้ยางนิ่มสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

##### 1. น้ำมันมิเนอร์ล (Mineral oils)

น้ำมันมิเนอร์ลเป็นสารทำให้ยางนิ่มที่มีความสำคัญมาก เพราะมีราคาถูกและสามารถผสมเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยตามลักษณะโครงสร้างเคมี คือ น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันแนพเทนิค (naphthenic oil) และน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil)

##### 2. ไชพาราฟิน (Paraffin wax)

ไชพาราฟินเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับน้ำมันพาราฟินิกแต่น้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่า ไชพาราฟินเกรดต่าง ๆ จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันหรือมีจุดหลอมเหลวต่างกัน ซึ่งสามารถใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มหรือเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนไชพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน

### 3. สารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ (Synthetic plasticizers)

สารกลุ่มนี้นิยมใช้น้อยเพราะมีราคาค่อนข้างสูง จึงนำไปใช้กับยางบางประเภทที่ไม่สามารถเข้ากันได้ หรือเข้ากันได้เล็กน้อยกับน้ำมันมิเนอร์ล โดยสารกลุ่มนี้นอกจากจะทำให้ความหนืดของยางลดลงแล้ว ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติดกันและไม่ทำใหยางเปลี่ยนสี แต่ส่วนใหญ่จะทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงลดลงและมีสมบัติแรงดึงที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้ แต่จะทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น ตัวอย่างของสารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ ได้แก่ คลอรีเนตพาราฟิน (chlorinated paraffins) ไทโอบิวไทริกเอซิดบิวทิลเอสเทอร์ (thiobutyric acid butylester) ไดออกทิลเฟทาเลต (dioctylphthalate, DOP) ไดไอโซออกทิลเฟทาเลต (diisooctylphthalate, DIOP) และไดไอโซโนนิลเฟทาเลต (diisononylphthalate, DINP)

#### 2.5.6.2 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยในกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้การผสมหรือการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการผลิต สารทำให้ยางนิ่มที่กล่าวถึงข้างต้นจึงถือเป็นส่วนหนึ่งของสารช่วยในกระบวนการผลิตด้วยและยังมีสารช่วยในกระบวนการผลิตอื่น ๆ ที่เติมลงไปในยางเพื่อจุดประสงค์เฉพาะบางอย่างที่ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ตัวอย่างของสารช่วยในกระบวนการผลิต ได้แก่

##### 1. สารทำให้เหนียวติด (Tackifiers)

สารทำให้เหนียวติด เป็นสารเคมีที่ช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติดของยางสังเคราะห์ ทำให้สามารถนำยางมาประกอปกกันได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างของสารทำให้เหนียวติด ได้แก่ คูมาโรนเรซิน (coumarone) อินดีนเรซิน (indene resin) ปีโตรเลียมเรซิน (petroleum resin) ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) เป็นต้น

##### 2. เพปไทเซอร์ (Peptizers)

เพปไทเซอร์เป็นสารที่เติมเข้าไปในช่วงขั้นตอนของการบดย่อยยาง เพื่อลดความหนืดให้เร็วขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานในการบดย่อยยาง ตัวอย่างของเพปไทเซอร์ ได้แก่ Zinc-2-benzamidothiophenolate (Pepton 65) Zinc salt of pentachlorothiophenol (Renacit IV) เป็นต้น

##### 3. แฟกทิจ (Factice)

แฟกทิจเป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อจุดประสงค์เฉพาะบางอย่าง เช่น ต้องการประหยัดพลังงานในระหว่างการผสม เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยางคอมพาวด์ (green strength) เพิ่มความเสถียรทางรูปร่างให้แก่ยางคอมพาวด์ที่ได้รับการขึ้นรูปด้วยการเอ็กสทรูดและช่วยทำให้พื้นผิวยางที่ขึ้นรูปได้มี

ความเรียบมากขึ้น แต่การเติมแพกทิซลงไปจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลงโดยเฉพาะความต้านทานต่อการขีดถู

## 2.5.7 สารอื่นๆ

### 2.5.7.1 สี (Pigments)

สีที่นิยมใช้ในการผสมกับยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สีอินทรีย์และสีอนินทรีย์ โดยสีอินทรีย์ให้สีที่มีความสว่างสดใสน้อยกว่าสีอนินทรีย์ แต่มีความทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมีสูงกว่าสีอินทรีย์มาก ทั้งยังมีราคาถูกกว่าอีกด้วย ตัวอย่างของสีอินทรีย์ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide,  $\text{TiO}_2$ ) ให้สีขาวสว่าง เหล็กออกไซด์ (iron oxides) ให้สีโทนแดง โครเมียมออกไซด์ (chromium oxide) ให้สีโทนเขียวและเหลือง-เขียว แคดเมียมซัลไฟด์ (cadmium sulfide) ให้สีโทนเหลือง ส้ม และแดง แม้ว่าสีอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพสูงและให้สีที่สว่างสดใสกว่าสีอนินทรีย์ แต่มีข้อเสียคือไม่ทนต่อความร้อน ไขมัน กรด ต่าง และมีราคาแพง อีกทั้งสีบางตัวยังอาจก่อให้เกิดปัญหาการบวมได้อีกด้วย ตัวอย่างของสีอนินทรีย์ ได้แก่ azodyes สีโทนส้ม และ phthalocyanide dyes สีโทนน้ำเงินและเขียว

### 2.5.7.2 สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents)

สารทำให้เกิดฟอง คือ สารที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้องแต่จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงและปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อนหรือในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาคิวลิง โดยก๊าซที่ปล่อยออกมาจะทำให้ยางมีรูพรุนหรือมีฟองกระจายอยู่ทั่วไปเรียกว่า ฟองน้ำ (sponge) ตัวอย่างของสารทำให้เกิดฟอง ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (azodicarbonamide, ADC) เบนซีนซัลโฟไฮดราไซด์ (benzenesulfohydrazide, BSH) เบนซีนไดซัลโฟไฮดราไซด์ (benzene-1,3-disulfohydrazide) และไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเทตระมีน (N,N'-dinitrosopentamethylenetetramine, DNPT)

### 2.5.7.3 สารหน่วงไฟ (Flame retardants)

สารหน่วงไฟ เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยหน่วงการติดไฟของผลิตภัณฑ์ โดยสารเคมีนี้จะสลายตัวให้แก๊สหรือสารที่ไม่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างสารหน่วงการติดไฟ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) และแอนติโมนีออกไซด์ ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) เป็นต้น

โดยตารางที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบ ปริมาณยางและสารเคมีต่าง ๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบ ปริมาณยางและสารเคมีต่าง ๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน

| ส่วนประกอบ                                       | ปริมาณ     |
|--|------------|
| ยาง (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป)                | 100        |
| กำมะถัน  | 2.5-3.5    |
| สารกระตุ้น                                       | 1-5        |
| สารเร่งให้ยางคงรูป (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) | 0.5-2      |
| สารตัวเติม                                       | ตามต้องการ |
| สารทำให้ยางนิ่ม                                  | 5-10       |
| สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ                          | 1-2        |

การออกสูตรยางหรือสัดส่วนในการผสมสารเคมีต่าง ๆ นั้น ต้องคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตเป็นหลัก โดยต้องเลือกใช้สารเคมีและปรับสัดส่วนตามความเหมาะสม นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงเครื่องมือที่ใช้ ขั้นตอนและต้นทุนในการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสม

## 2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ นาโนคอมพอสิตที่ใช้ยางธรรมชาติ 3 รูปแบบ คือ น้ำยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติแห้ง และยางธรรมชาติอิมัลชัน เป็นพอลิเมอร์สำหรับขึ้นรูปฟิล์ม โดยเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy)

ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

2. สมบัติการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากอุณหภูมิด้วยภาพถ่าย

ศึกษาการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตเมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่ภาวะเดิมที่อุณหภูมิห้อง

3. ความทนต่อแรงดึง (tensile strength)

ศึกษาความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตเพื่อคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้

4. การบวมตัวในตัวทำละลาย (swelling test)

ศึกษาความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์และความสามารถในการคงรูปร่างของฟิล์มที่เตรียมได้ ในงานวิจัยนี้ใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลายสำหรับทดสอบการบวมตัว

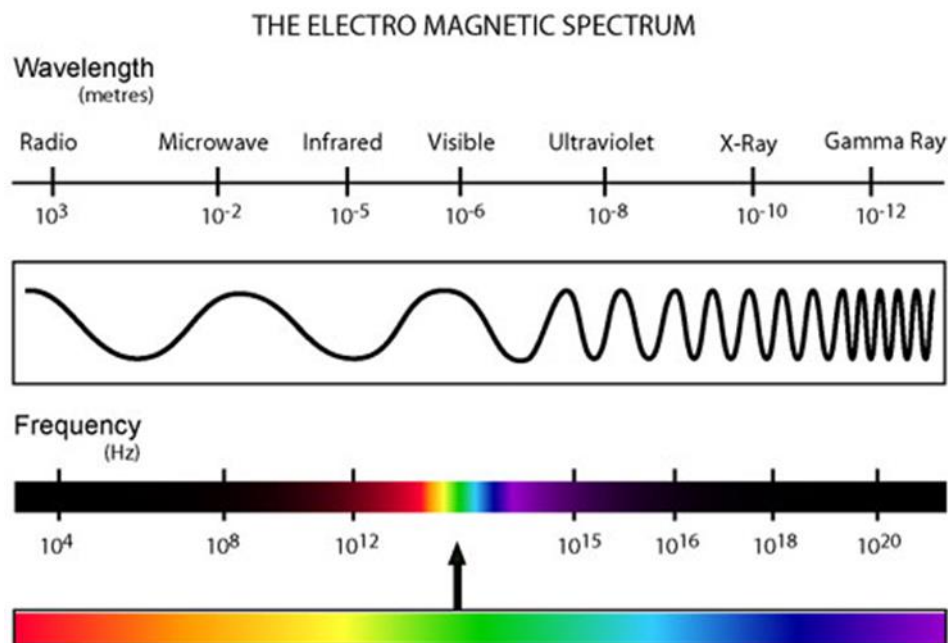
### 2.6.1 เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy)<sup>(28) (29)</sup> (30) (31) (32)

แสงเปนครีโนแมเหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความเร็วในการเดินทางสูงมาก โดยมีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับผลคูณของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และความถี่ ( $\nu$ ) แต่ความเร็วในการเดินทางจะเปลี่ยนไปเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางอื่นๆ ซึ่งความเร็วแสงนั้นจะมีค่าเท่ากับ 299,792,458 เมตร/วินาที โดยรูปที่ 2.16 แสดงแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสงที่มองเห็น (visible light) เปนแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่าง ๆ ซึ่งมีสีหลักอยู่ 7 สี คือ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง เมื่อแสงสีขาวตกกระทบวัตถุแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใด แสดงว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีอื่น ๆ ไว้หมดแต่สะท้อนแสงที่ตามองเห็นออกมา ถ้าวัตถุนั้น ๆ ดูดกลืนแสงทุกสีได้หมดจะมองเห็นวัตถุนั้นเป็นสีดำ

แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light) เปนแสงที่มีคุณสมบัติในการทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมเกิดการสงผาน (electronic transmission) เมื่อร่างกายถูกแสงนี้เป็นเวลานานอาจเกิดอันตราย เช่น ผิวหนังไหม้ เยื่อบุลูกตาถูกทำลาย และอาจทำให้เป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้

แสงอินฟราเรด (infrared light) เปนแสงที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า สามารถทำให้โมเลกุลของวัตถุต่าง ๆ เกิดการสั่นสะเทือนจนเกิดเป็นความร้อน เนื่องจากวัตถุสวนใหญ่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 3,000-100,000 นาโนเมตรได้ดี ดังนั้นจึงนิยมใช้รังสีอินฟราเรดในการทำให้วัตถุต่าง ๆ แห้งเพราะมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ความร้อนแบบธรรมดา



รูปที่ 2.16 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<sup>(33)</sup>

เครื่อง UV-Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณความเข้มแสงที่ส่องทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาว 180 ถึง 800 นาโนเมตร โดยความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารตัวอย่าง สารส่วนใหญ่ที่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ ซึ่งสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้สามารถวัดได้ทั้งในสถานะแก๊ส ของแข็ง และของเหลว โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิคนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ตามกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต กล่าวว่า “อัตราของแสงที่ถูกดูดกลืนไว้ จะผันแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น และระยะทางที่แสงนั้นส่องผ่าน”

$$A = \epsilon bC$$

โดยที่

A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

$\epsilon$  คือ Molar absorptivity มีหน่วยเป็น ลิตร/โมล-เซนติเมตร



b คือ ความหนาของสารหรือความหนาของเซลล์บรรจุสาร  
มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

C คือ ความเข้มข้นของสาร มีหน่วยเป็น โมลต่อลิตร

กำหนดให้ค่าการส่งผ่าน (transmittance) :  $T = P/P_0$

$$\%T = P/P_0 \times 100$$

$$\log \%T = \log[(P/P_0) \times 100] = 2 + \log(P/P_0)$$

จาก  $A = \log(P_0/P)$  จะได้

$$\log \%T = 2 - A$$

$$A = 2 - \log \%T$$

โดยที่

T คือ ค่าการส่งผ่าน (transmittance)

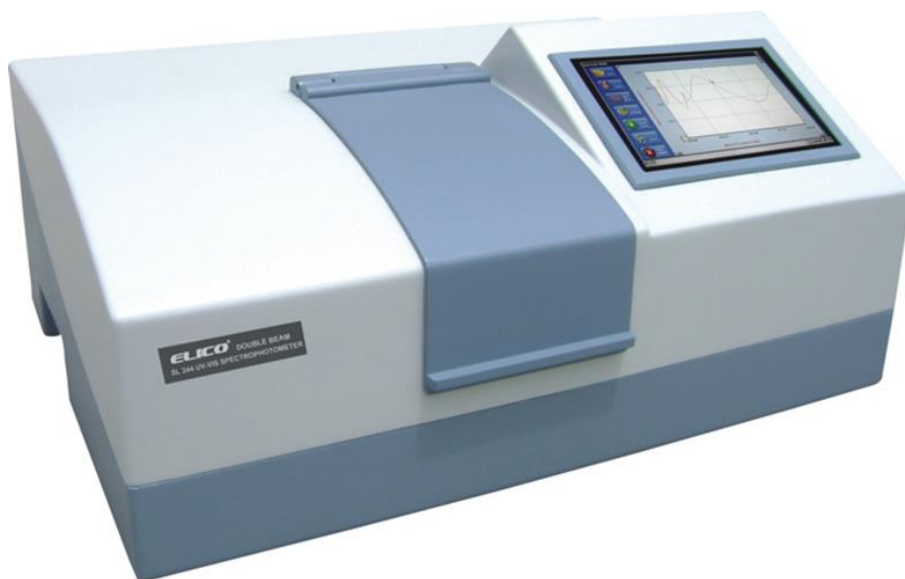
P คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างออกมา

$P_0$  คือ ความเข้มแสงเริ่มต้นที่ให้เข้าไป

กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อแสงที่ส่องผ่านสารตัวอย่างต้องเป็นแสงเอกรงค์ (monochromatic radiation) สารตัวอย่างที่ใช้วัดต้องเป็นเนื้อเดียวกัน และเจือจางมากพอสมควร

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy โดยหลักการแล้วสเปกตรัมซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีและแสงขาวของสารตัวอย่างจะแสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารนั้น ๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ชนิดของสารได้ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะให้ผลเพียงคร่าว ๆ เพราะลักษณะของสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดที่ได้จะมีความกว้างมากและยังมีรายละเอียดอีกมากจึงควรใช้เทคนิคอื่นร่วมวิเคราะห์ด้วย สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้น ดังนั้นเมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารก็จะสามารถหาปริมาณของสารที่จะวิเคราะห์ได้จากกราฟมาตรฐาน

ตัวอย่างการนำเทคนิค UV-Vis spectroscopy ไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ใช้ในงานวิจัยทางคลินิก ทางชีวเคมี ทางสิ่งแวดล้อม ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และเกษตร ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องสำอาง เป็นต้น



รูปที่ 2.17 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer<sup>(34)</sup>

### 2.6.2 ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)<sup>(35) (36) (37) (38)</sup>

ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยความสัมพันธ์กันระหว่างความเค้น (stress,  $\sigma$ ) และความเครียด (strain,  $\epsilon$ ) โดยความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่าง ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

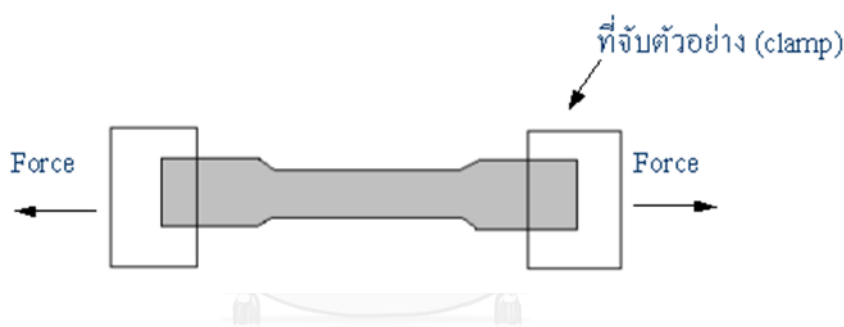
$$\text{ความเค้น } (\sigma) = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}}$$

ความเครียด คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น

$$\text{ความเครียด } (\epsilon) = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป } (\Delta L)}{\text{ความยาวเดิม (L)}}$$

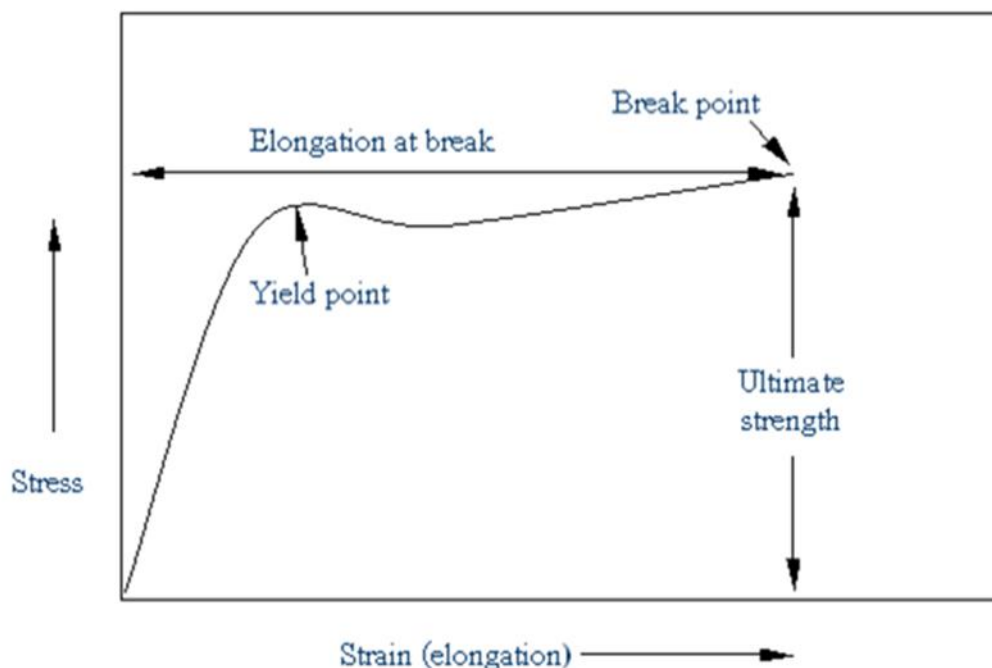
$$\text{โมดูลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\epsilon)}$$

เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้นหรือแรงที่ถูกให้กับตัวอย่างจึงมีผลต่อการยึดของตัวอย่างหรือความเครียดเป็นอย่างมาก เช่น เมื่อนำตัวอย่างประเภทเส้นใยมาทดสอบโดยใช้แรงดึงอย่างรวดเร็วจนทำให้เส้นใยขาดโดยง่าย แต่เมื่อใช้แรงขนาดเดิมแต่ดึงอย่างช้า ๆ จะทำให้เส้นใยยืดออกและทนต่อแรงดึงอยู่ได้นานก่อนที่จะขาด ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปสำหรับการทดสอบความเค้นและความเครียดนั้น จะมีขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบหลายแบบ สำหรับการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานต่าง ๆ ในการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), British Standards (BS), Japanese Industrial Standards (JIS), มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ซึ่งได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบ กำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ สำหรับชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์มักใช้ตัวอย่างเป็นรูปร่างคล้ายดัมเบลล์ (Dumb-bell) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ชิ้นทดสอบความทนต่อแรงดึงรูปร่างคล้ายดัมเบลล์

ในการทดสอบปลายของตัวอย่างจะถูกยึดด้วยที่จับและถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่ทราบขนาดแน่นอน ข้อมูลที่ได้จะนำไปพลอตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) กราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19 นอกจากความเค้นและความเครียดแล้ว ยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นของพอลิเมอร์อีก เช่น modulus หรือ stiffness ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ และ toughness ซึ่งแสดงความต้านทานต่อการขาด



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด<sup>(39)</sup>

จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์จะพบว่าเมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงนั้นวัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (elastic behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิมจนเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปเส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง ซึ่งวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนผ่านจุดที่มีค่าความเค้นสูงสุดวัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ที่จุดคราก (yield point) จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (yield stress) หรือ yield strength เป็นค่าที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และที่จุดสุดท้ายของกราฟคือ ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (tensile strength at break) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน<sup>(40)</sup>

### 2.6.3 การทดสอบการบวมตัว (Swelling test)<sup>(41) (42)</sup>

การทดสอบการบวมตัวเป็นการวัดความสามารถในการบวมตัวของวัสดุในตัวทำละลายหรือสารเคมีที่สนใจ โดยดูจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการแช่วัสดุในสารละลายตามระยะเวลาที่

กำหนด เพื่อดูความสามารถของความทนทานต่อการแทรกซึมของตัวทำละลายนั้น ๆ ทั้งยังสามารถบอกได้ถึงปริมาณการคงรูปในยางได้ โดยการแช่ยางที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในโพลูอินเป็นระยะเวลาตามต้องการ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักยางที่ผ่านการแช่ในโพลูอิน หากยางมีปริมาณการบวมตัวน้อย น้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปไม่มาก แสดงว่ามีความทนทานต่อโพลูอินและมีปริมาณการคงรูปสูง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้าง โดยร้อยละการบวมตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

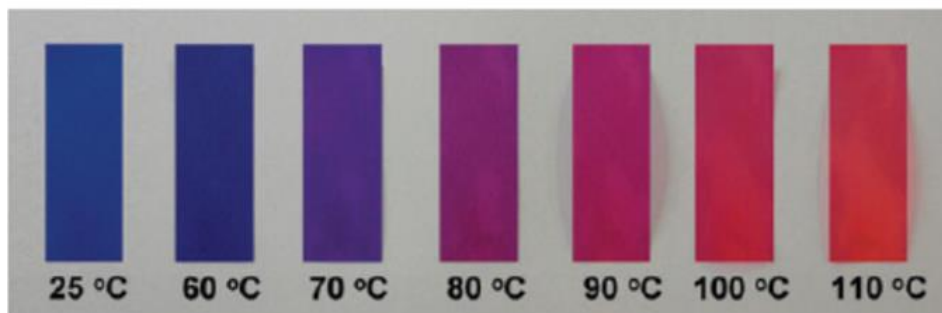
$$\text{Swelling (\%)} = \left( \frac{W - W_0}{W_0} \right) \times 100$$

โดยที่ Swelling (%) คือ เปอร์เซ็นต์การบวมตัว  
 $W_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้น มีหน่วยเป็น กรัม  
 $W$  คือ น้ำหนักหลังแช่ในตัวทำละลาย มีหน่วยเป็น กรัม

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2009 Ahn และคณะ<sup>(1)</sup> ได้ศึกษาปัจจัยที่ทำให้พอลิไดอะเซทิลีนซึ่งเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนสีและกลไกของการเปลี่ยนสี จากงานวิจัยนี้พบว่าพอลิไดอะเซทิลีนสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นจากสิ่งเร้าภายนอก ได้แก่ ความร้อน ความเป็นกรดต่างของสารเคมีหรือแรงเค้นเชิงกล โดยสิ่งเร้าภายนอก ส่งผลให้เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิก ทำให้สายโซ่หลักที่มีหมู่คอนจูเกตในโครงสร้างเกิดการบิดตัว อิเล็กตรอนในสายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจึงต้องใช้ระดับพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า

ในปี ค.ศ. 2009 Yoon และคณะ<sup>(5)</sup> ได้เตรียมพอลิไดอะเซทิลีนในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ในน้ำ ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ บนแผ่นกระจก บนเส้นใย ในรูปของไมโครฟลูอิดิกส์และบนตัวแลกเปลี่ยนพลังงานแรโซแนนซ์ และศึกษาการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนที่เตรียมได้ จากงานวิจัยนี้พบว่าพอลิไดอะเซทิลีนที่อยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์และที่ถูกตรึงอยู่บนพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ยังคงสามารถเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นการตอบสนองของพอลิไดอะเซทิลีนในรูปแบบฟิล์มเมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 2.20 การตอบสนองของฟิล์ม PDA/PVA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ<sup>(5)</sup>

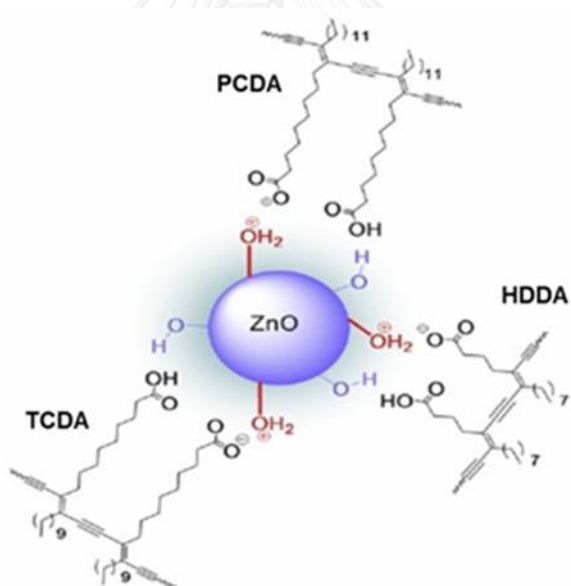
ในปี ค.ศ. 2010 Rungruangviriyia และคณะ<sup>(9)</sup> ได้ศึกษาอิทธิพลของค่า pH และปริมาณของเอทานอลต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตพบว่า Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าความเป็นกรดต่างที่สูงขึ้นและไม่พบการเปลี่ยนสีเมื่อเติมเอทานอล (จากรูปที่ 2.6 และ 2.7) สาเหตุเนื่องมาจากซิงก์ออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นนาโนซัพสเตรตให้ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นผ่านพันธะไฮออนิกระหว่างประจุบวกที่ผิวของซิงก์ออกไซด์กับหมู่คาร์บอกซิเลตของ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงส่งผลให้สมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากภายนอกแตกต่างไปจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธิ์

ในปี ค.ศ. 2011 Traiphol และคณะ<sup>(8)</sup> ได้ศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตกับพอลิไดอะเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธิ์ พบว่า พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไดอะเซทิลีนเวสซิเคิลบริสุทธิ์ และเมื่อทำการลดอุณหภูมิของสารแขวนลอยของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตลงจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ อีกทั้งเมื่อทดสอบในรูปแบบฟิล์มบางพบว่าพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบ 2 ชั้น คือชั้นแรกเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วงและสามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิประมาณ 90°C และ 100°C ในตัวกลางที่เป็นน้ำและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามลำดับ ชั้นที่สองผันกลับไม่ได้ โดยจะเปลี่ยนสีจากม่วงไปเป็นแดง ที่อุณหภูมิ 145°C ขึ้นไป (จากรูปที่ 2.8 และ 2.9)

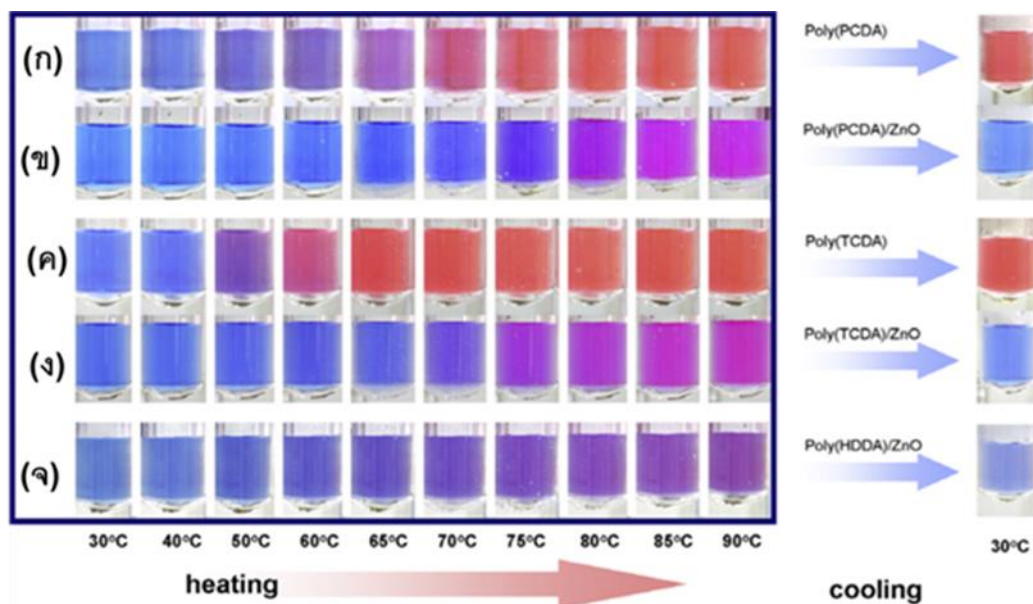
ในปี ค.ศ. 2012 Patlolla และคณะ<sup>(43)</sup> ได้ศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของพอลิไดอะเซทิลีน/โลหะออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคและชนิดแตกต่างกัน พบว่าพอลิไดอะเซทิลีน/โลหะออกไซด์ที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคมากกว่า 300 นาโนเมตร ไม่สามารถผันกลับสีได้ อีกทั้งเมื่อเตรียมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาค 300 นาโนเมตร จะไม่สามารถผันกลับสีได้เช่นกันเพราะการผันกลับเนื่องจากอุณหภูมิเป็นผล

มาจากหมู่คีเลตที่เกิดระหว่างซิงก์ออกไซด์และหมู่คาร์บอกซิลิกของพอลิไดแอเซทิลีน และยังพบว่า การใช้ซิงก์ออกไซด์ผสมกับเซอร์โคเนียจะมีผลต่อการหน่วงการผ่นกลับเป็นสีน้ำเงิน

ในปี ค.ศ. 2013 Chanakul และคณะ<sup>(44)</sup> ได้ศึกษาผลของความยาวของสายโซ่แอลคิลของมอนอเมอร์ (ซึ่งประพติตัวเป็นสายโซ่ข้างของพอลิเมอร์) ที่ใช้เตรียมพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตต่อสมบัติการเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิพบว่า พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตมีสมบัติการผ่นกลับสีได้เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำ และพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากมอนอเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่แอลคิลสั้นกว่าจะเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแรงดิสเพอร์ชัน (dispersion interaction) ภายในพอลิไดแอเซทิลีนที่อยู่ในนาโนคอมพอสิตลดลง โดยรูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของสายโซ่แอลคิลที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ และรูปที่ 2.22 แสดงพฤติกรรมกรมการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนที่มีขนาดสายโซ่ต่างกัน



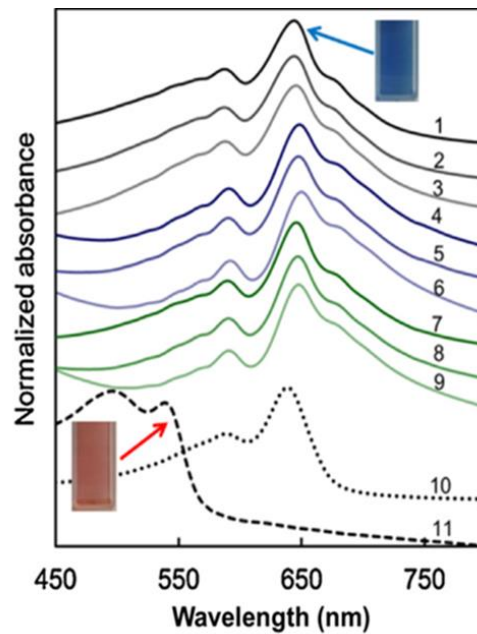
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของ 5,7-hexadecadiynoic acid (HDDA), 10,12-tricosadiynoic acid (TCDA) และ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA)<sup>(44)</sup>



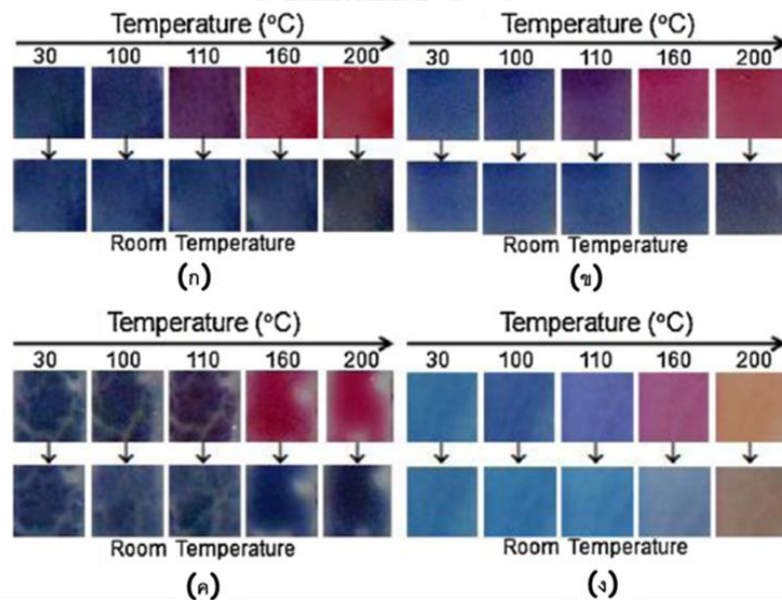
รูปที่ 2.22 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (ก) poly(PCDA) เวสซีเคิล (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต (ค) poly(TCDA) เวสซีเคิล (ง) poly(TCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และ (จ) poly(HDDA)/ZnO เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง<sup>(44)</sup>

ในปี ค.ศ. 2015 Toomree และคณะ<sup>(10)</sup> ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายอินทรีย์และพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่อสมบัติการเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนพบว่า พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตมีเสถียรภาพสามารถแขวนลอยในตัวทำละลายอินทรีย์ได้หลายชนิด เช่น โทลูอีน คลอโรเบนซีน เอทานอล เป็นต้น โดยไม่เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงซึ่งสามารถดูได้จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และทดสอบสมบัติการเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต/พอลิเมอร์เมทริกซ์ PS, PMMA, PE และ PVA พบว่าแผ่นฟิล์มมีการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและสามารถผันกลับสีได้เมื่อลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.24 แสดงว่าพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตไม่ถูกรบกวนจากพอลิเมอร์เมทริกซ์เช่นกัน แต่ลักษณะแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก ไม่เรียบ อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์บางชนิดที่ต้องมีการเติมสารอื่นๆ เพื่อช่วยในการขึ้นรูป





รูปที่ 2.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO nanocomposite ใน (1) 1,2-dichlorobenzene, (2) chlorobenzene, (3) toluene, (4) butanol, (5) hexanol, (6) ethanol, (7) chloroform, (8) THF (9) น้ำ และ (10) Poly(PCDA) ใน น้ำ (11) Poly(PCDA) ใน THF<sup>(10)</sup>



รูปที่ 2.24 ภาพถ่ายพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่าง ๆ (ก) toluene + PS, (ข) toluene + PMMA, (ค) toluene + PE (ง) water + PVA ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 200°C และหลังเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง<sup>(10)</sup>

จากงานวิจัยที่กล่าวมาในข้างต้นทำให้ทราบว่า พอลิไคเอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตมีความน่าสนใจเนื่องจากสมบัติการเปลี่ยนสีที่เห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่าซึ่งเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานด้านตรวจวัด อีกทั้งยังมีความเสถียรเนื่องจากสามารถเตรียมได้ในตัวทำละลายหลายชนิดรวมถึงพอลิเมอร์เมทริกซ์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการเตรียมและการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไคเอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่มียางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทั้งที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่มีความปลอดภัย สะดวกในการเตรียม และสามารถใช้พอลิไคเอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่แขวนลอยในน้ำได้ และยางธรรมชาติแห้งที่ไม่ต้องกังวลเรื่องสิ่งเจือปนแบบน้ำยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ซึ่งมีความทนทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้และน้ำมัน ทั้งนี้การใช้ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มในด้านต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่น ความยืดหยุ่น สามารถหักงอได้ ผิวเรียบ มีความทนทานต่อน้ำมัน สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น และการต่างกันของยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบ ทำให้ระบบการคงรูปยางแตกต่างกันด้วย ซึ่งต้องระมัดระวังระดับอุณหภูมิในการคงรูปยางไม่ให้สูงเกินไปจนทำให้พอลิไคเอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตเปลี่ยนสี โดยในระบบการคงรูปยางธรรมชาติด้วยกำมะถันสามารถเติมตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เพื่อช่วยให้การคงรูปเกิดเร็วขึ้นและไม่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน ส่วนยางธรรมชาติอิพอกไซด์ใช้การคงรูปด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

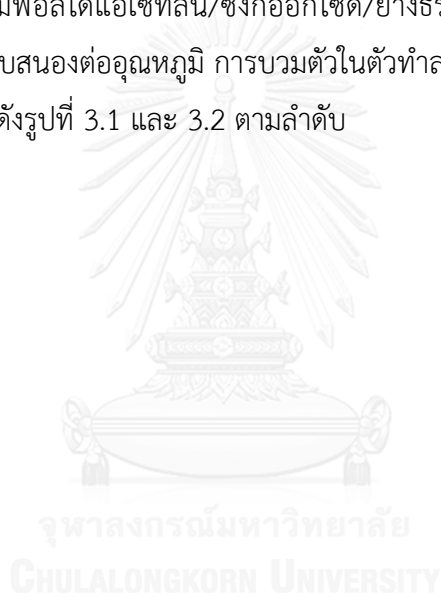
จากงานวิจัย ในปี ค.ศ. 2015 Riyapan และคณะ<sup>(45)</sup> ได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์จากการกราฟของยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ผ่านการกราฟด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณมากจะมีค่าการบวมตัวที่ลดลง เนื่องมาจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้สามารถกราฟติดอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์และทำให้เกิดการคงรูปบางส่วนในโครงสร้างด้วย จากงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นที่จะเลือกใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์มาใช้สำหรับการคงรูปยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำแทนการใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงแล้วจะมีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอลิไคเอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต

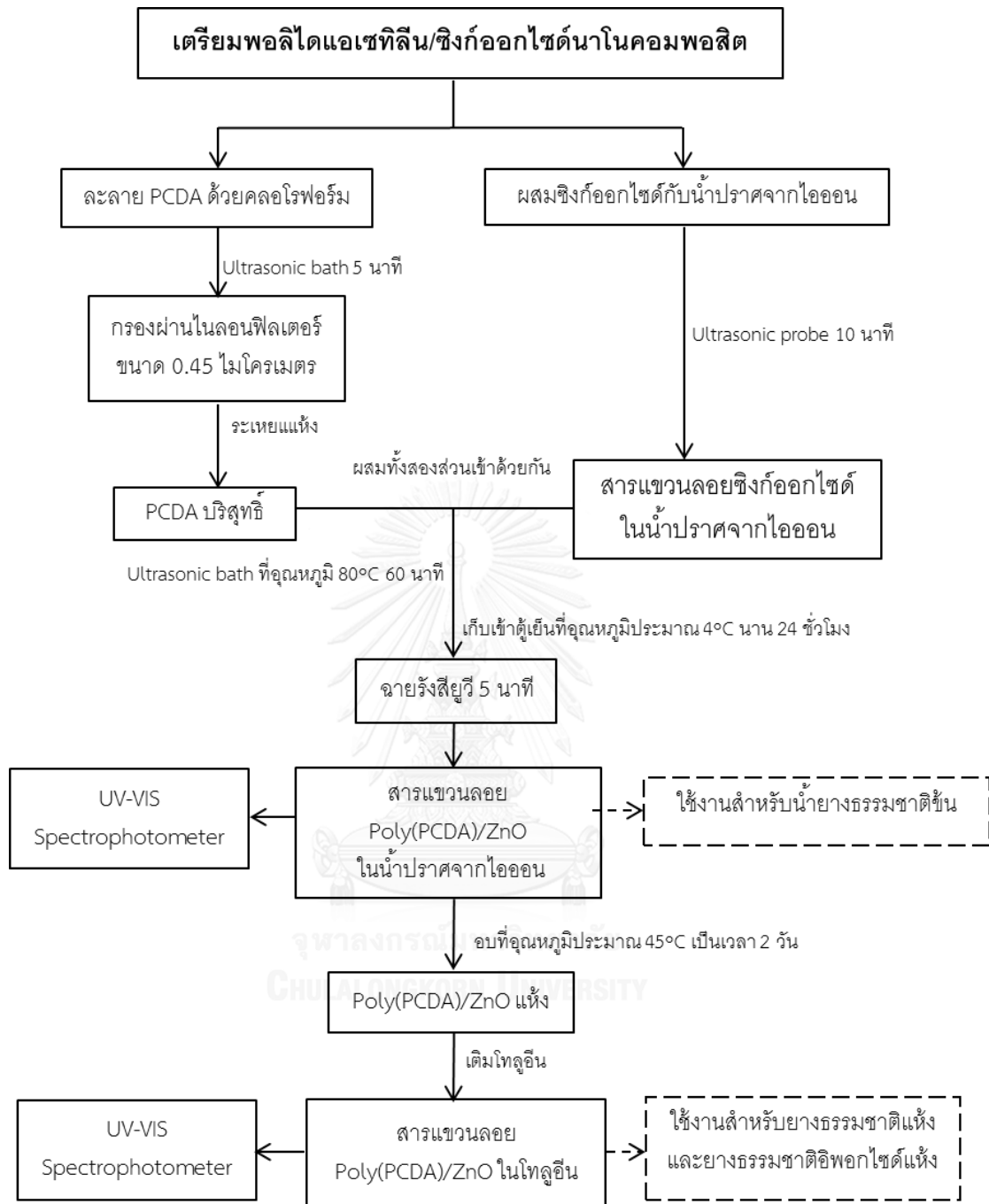
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

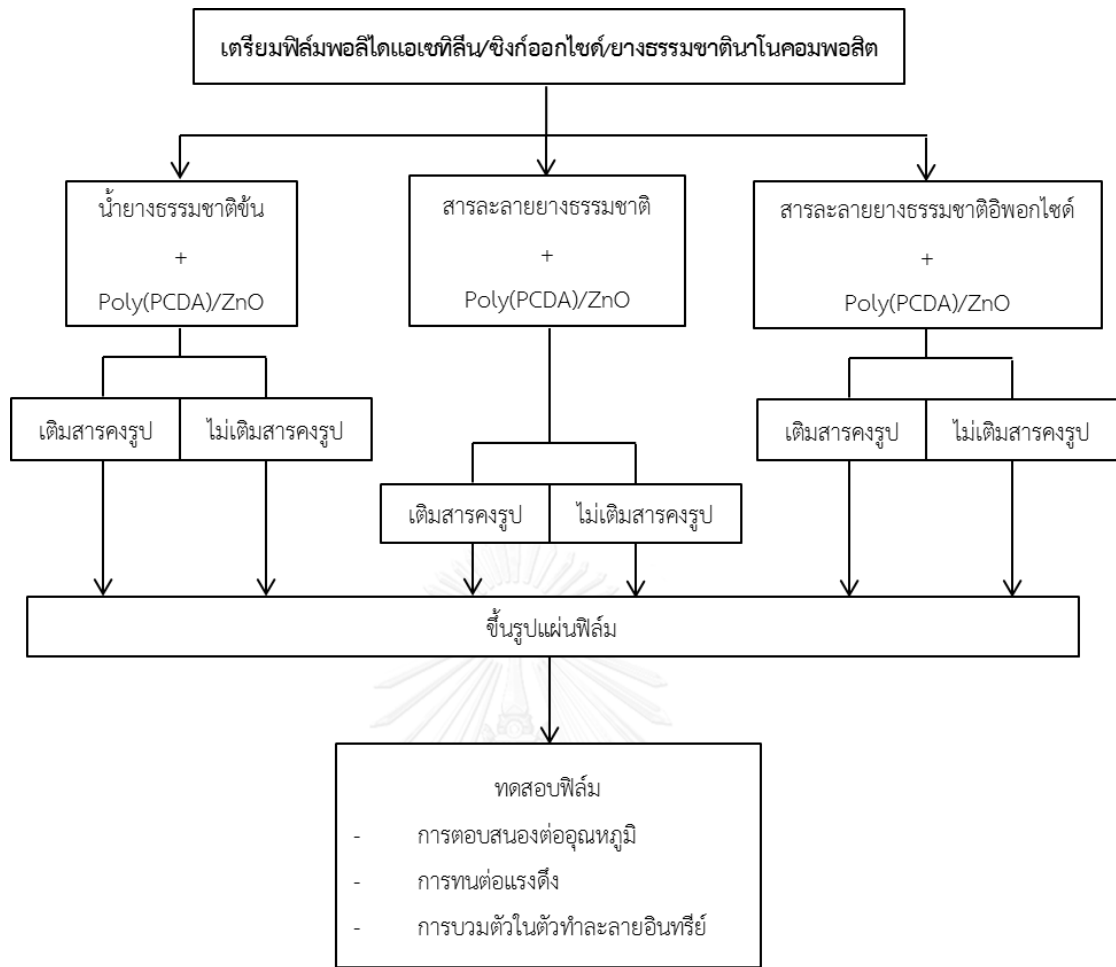
#### 3.1 แผนดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต โดยใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) เป็นแอเซทิลีนมอนอเมอร์และยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ซึ่งยางธรรมชาติที่ใช้จะมีรูปแบบและชนิดที่ต่างกันได้แก่ น้ำยางธรรมชาติชั้น น้ำยางผสมสูตร ยางธรรมชาติแห้ง ยางธรรมชาติอพอกไซด์แห้ง จากนั้นแผ่นฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่ได้จะถูกนำไปศึกษา สมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิ การบวมตัวในตัวทำละลายอินทรีย์ การทนต่อแรงดึง ซึ่งแผนดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ





รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์สารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและโทลูอีน



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

### 3.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุและสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

| สารเคมี                                | เกรด      | บริษัท  |
|--|-----------|---|
| 10,12-pentacosadiynoic acid<br>(PCDA)  | AR        | ซิกม่า-อัลดริช<br>(Sigma-Aldrich Co.,LLC.)                                  |
| ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)                     | ทางการค้า | นาโนแมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด<br>(NANO MATERIALS TECHNOLOGY<br>Co.,Ltd.) |
| กรดสเตียริก                            | ทางการค้า | เอฟ บี (ประเทศไทย) จำกัด<br>(F.B. (THAILAND),Ltd.)                          |
| เตตระเบนซิลไทยแรม ไดซัลไฟด์<br>(TBzTD) | ทางการค้า | ซันไซน์ เคมีคอล จำกัด<br>Sunsine Chemical Co.,Ltd.                          |
| กำมะถัน                                | ทางการค้า | อุทิศ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด<br>(Utids Enterprise Co.,Ltd.)                   |
| มาเลอิกแอนไฮไดรด์                      | ทางการค้า | ฟลูก้า<br>(Fluka)   |
| โพลูอิน                                | AR        | อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด<br>(RCI Labscan Co.,Ltd.)                           |

ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| สารเคมี                  | เกรด                        | บริษัท   |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| คลอโรฟอร์ม               | AR                          | อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด<br>(RCI Labscan Co.,Ltd.)                  |
| น้ำปราศจากไอออน          | -                           | คณะวิทยาศาสตร์<br>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                            |
| ยางธรรมชาติแห้ง          | STR 5L                      | ศักดิ์รุ่งเรืองกิจ จำกัด<br>(Sakdarongreungkij Co.,Ltd)            |
| ยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง | ENR 25                      | แซน-แทป อินเตอร์เนชันแนล จำกัด<br>(San-Thap International Co.,Ltd) |
| น้ำยางธรรมชาติชั้น       | HA                          | สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร                                     |
| น้ำยางผสมสูตร            | สำหรับถูงมือ<br>ทางการแพทย์ | สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร                                     |
| - น้ำยางธรรมชาติชั้น     |                             |  |
| - โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์   |                             |  |
| - กำมะถัน                |                             |  |
| - ซิงก์ออกไซด์           |                             |  |
| - Teric 16 A 16          |                             |  |
| - ZDEC                   |                             |  |
| - ZMBT                   |                             |  |
| - Wingstay L             |                             |  |

### 3.3 กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน มีค่าความเข้มข้นของ PCDA 1 มิลลิโมลาร์ และมีปริมาณของซิงก์ออกไซด์เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.3.1 การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน

ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน สามารถลำดับขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. คำนวณและชั่ง PCDA และผงซิงก์ออกไซด์ โดยกำหนดปริมาณของน้ำที่ปราศจากไอออนเท่ากับ 20 มิลลิลิตร
2. ละลาย PCDA ในคลอโรฟอร์ม ด้วยเครื่อง ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที และกรองด้วยไนลอนฟิลเตอร์ขนาด 0.45 ไมโครเมตร จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส
3. ผสมผงซิงก์ออกไซด์กับน้ำที่ปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง ultrasonic probe เป็นเวลา 10 นาที
4. เทสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้ลงใน PCDA ที่เตรียมไว้ แล้วนำไปเข้าเครื่อง ultrasonic bath ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้จากข้างต้นมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นห่อด้วยกระดาษฟอยด์ เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกแล้วเก็บเข้าตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำสารแขวนลอยผสมออกมาฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำที่ปราศจากไอออน

#### 3.3.2. การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน

ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนสามารถ ลำดับขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. นำสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำที่ปราศจากไอออนไประเหยแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 วัน



2. เติมโพลูอินปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่แห้งแล้ว
3. นำไปเข้าเครื่อง ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในโพลูอิน

### 3.4 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโพลูอิน ศึกษาด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytik Jena) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนและโพลูอินเป็น blank ตามลำดับ

### 3.5 กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

ในขั้นตอนนี้จะใช้ยางธรรมชาติ 3 รูปแบบ คือ น้ำยางธรรมชาติข้น ยางธรรมชาติแห้งและยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งสำหรับเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

#### 3.5.1 การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติข้น

ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติข้นที่ไม่มีการเติมสารคงรูป มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ผสมน้ำยางธรรมชาติข้นที่ไม่มีการเติมสารคงรูปกับสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 0.07 parts per hundred of rubber (phr)
2. กวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมสารจนสารแขวนลอยทั้งสองชนิดเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

#### 3.5.2 การเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติแห้ง

ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติแห้งที่ไม่มีการเติมสารคงรูป มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ละลายยางธรรมชาติแห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอีน โดยใช้เครื่องกวนผสมสาร ได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติ
2. เตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน โดยกำหนดให้มีพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตปริมาณ 1.76 และ 3.52 phr แล้วผสมกับสารละลายยางธรรมชาติที่เตรียมไว้ข้างต้นด้วยเครื่องกวนผสมสารจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

### 3.5.3 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง

ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งที่ไม่มีการเติมสารคงรูป มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอีน โดยใช้เครื่องกวนผสมสารได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์
2. เตรียมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน โดยกำหนดให้มีพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตปริมาณ 2.93 และ 5.87 phr แล้วผสมกับสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมไว้ข้างต้นด้วยเครื่องกวนผสมสารจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

### 3.6 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

สมบัติการดูดกลืนแสงของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จะถูกศึกษาทั้งในรูปแบบสารแขวนลอยและในรูปแบบฟิล์มที่หยดลงบนกระจกสไลด์ 3 หยด โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้โทลูอีนและกระจกสไลด์เป็น blank ตามลำดับ

### 3.7 การศึกษาสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติชั้น สารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถศึกษาได้โดยการหยดตัวอย่างลงบนกระจกสไลด์ประมาณ 2 มิลลิลิตร ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจะได้ฟิล์มมีขนาดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร และยาวประมาณ 1 เซนติเมตร นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปให้ความ

ร้อนในตู้อบ จากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มแต่ละชนิด ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยถ่ายภาพทุก 5 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกและถ่ายภาพทุก 10 องศาเซลเซียส ในช่วงท้าย เพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นอกจากนี้ฟิล์มที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องหลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิก็น่าจะถูกถ่ายภาพเช่นกันเพื่อดูความสามารถในการผันกลับสีสู่อุณหภูมิห้อง

### 3.8 กระบวนการเตรียมและคงรูปฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

ในกระบวนการนี้จะมีการเติมสารคงรูปลงไปในส่วนแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตในยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบ โดยชนิดของสารคงรูปและปริมาณที่ใช้จะแตกต่างกันไปในยางธรรมชาติแต่ละรูปแบบ รวมถึงสภาวะการคงรูปก็ต้องปรับให้เหมาะสม เพื่อให้การคงรูปเกิดขึ้นได้ดีทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและเหมาะที่จะนำไปใช้งาน

#### 3.8.1 การเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติชั้นที่เติมสารคงรูป

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากน้ำยางธรรมชาติชั้นที่เติมสารคงรูป มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ผสมน้ำยางผสมสุตรกับสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน 0.07 phr กวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมสารจนสารแขวนลอยทั้งสองเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้างต้นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในแบบกระจกที่มีขนาดกว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งสารแขวนลอยผสมที่เทไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

#### 3.8.2 การเตรียมและคงรูปฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติแห้งและมีการเติมสารคงรูป

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติแห้งและมีการเติมสารคงรูป มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ละลายยางธรรมชาติแห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอีน จนได้สารละลายยางธรรมชาติ จากนั้นเติมกรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr เตตระเบนซิลไทยูแรม ไดซิลไฟต์ 2 phr และกำมะถัน 1.5 phr

ได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติผสมสูตร

2. ละลายสารแขวนลอยพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตในโทลูอีน โดยกำหนดให้มีพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตปริมาณ 0.88 phr จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายยางธรรมชาติผสมสูตรจากข้างต้น กวนด้วยเครื่องกวนผสมสารจนเป็นเนื้อเดียวกัน
3. เทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้างต้นลงในแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร
4. ทิ้งสารแขวนลอยผสมที่เทไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

### 3.8.3 วิธีการเตรียมและคงรูปฟิล์มพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งและมีการเติมสารคงรูป

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งและมีการเติมสารคงรูป มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอีน จนได้สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จากนั้นเติม มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.15 phr ได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร
2. ละลายสารแขวนลอยพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตในโทลูอีน โดยกำหนดให้มีพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตปริมาณ 0.88 phr จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรจากข้างต้น กวนด้วยเครื่องกวนผสมสารจนเป็นเนื้อเดียวกัน
3. เทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้างต้นลงในแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร
4. ทิ้งสารแขวนลอยผสมที่เทไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

### 3.9 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิไดออกซีเททราไฮดรอนาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยยางธรรมชาติแห้งและยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งที่มีการเติมสารคงรูปลงไป ขั้นตอนการผสม ถูกศึกษาในรูปแบบสารแขวนลอยและในรูปแบบฟิล์มที่หยดลงบนกระจกสไลด์ปริมาตร 3 หยด โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้โทลูอีนและกระจกสไลด์เป็น blank ตามลำดับ

### 3.10 การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาติ นาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

การเปลี่ยนสีของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติชั้น สารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมสารคงรูปตามความเหมาะสมในยางธรรมชาติแต่ละรูปแบบ สามารถศึกษาได้โดยนำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติมาหยดลงบนกระจกสไลด์ประมาณ 2 มิลลิเมตร ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจะได้ฟิล์มมีขนาดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร และยาวประมาณ 1 เซนติเมตร นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปให้ความร้อนในตู้อบ จากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มแต่ละชนิด ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยถ่ายภาพทุก 5 องศาเซลเซียส ในช่วงแรก และถ่ายภาพทุก 10 องศาเซลเซียส ในช่วงท้าย เพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นอกจากนี้ฟิล์มที่ยื่นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องหลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิก็นจะถูกถ่ายภาพเช่นกันเพื่อดูความสามารถในการผันกลับสีเมื่อลดอุณหภูมิสู่อุณหภูมิห้อง

### 3.11 การศึกษาการบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

การบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากยางธรรมชาติที่เติมสารคงรูปและผ่านการคงรูปด้วยความร้อนตามสภาวะที่แตกต่างกันไปตามรูปแบบของยางที่ใช้ สามารถศึกษาได้โดยการนำฟิล์มที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแช่ในโทลูอีน เป็นเวลา 14 วัน และทำการชั่งน้ำหนักฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวัน เนื่องจากการบวมตัวด้วยโทลูอีน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทนทานต่อโทลูอีนและดูปริมาณการคงรูปยางที่เกิดขึ้น

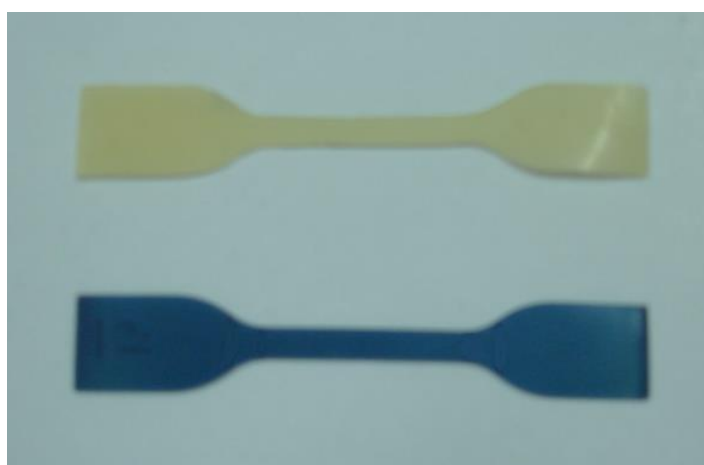
### 3.12 การศึกษาคุณสมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

ศึกษาความทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบ ที่มีการเติมสารคงรูปและผ่านการคงรูปด้วยความร้อน โดยการทดสอบด้วยเครื่อง universal testing (Instron model-5843) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที และขึ้นทดสอบจะมีรูปร่างดิมเบลล์ตามแบบ ISO 37 type IV ตัวอย่างขึ้นทดสอบของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับในการทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิดจะทำซ้ำจำนวน 5 ครั้งและรายงานผลออกมาเป็นค่าเฉลี่ย เพื่อ

เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไดแอเซทีลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติแต่ละรูปแบบและดูปริมาณการคงรูปยางที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.3 เครื่อง Universal testing (NISTON-5843)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

## บทที่ 4

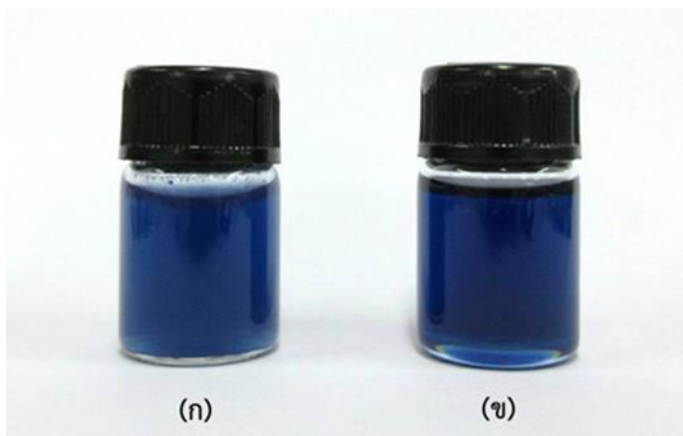
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษากระบวนการเตรียมและสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตเพื่อพัฒนาเป็นแผ่นฟิล์มสำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิ โดยจะใช้ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) เป็นไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ สำหรับการเตรียม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต (poly(PCDA)/ZnO nanocomposite) และทำการเตรียมแผ่นฟิล์มสำหรับตรวจวัดที่มีเมทริกซ์เป็นยางธรรมชาติ ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มจะใช้ยางธรรมชาติที่มีรูปแบบและชนิดที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำยางธรรมชาติชั้น (Latex) น้ำยางผสมสูตร (Latex compound) ยางธรรมชาติแห้ง (NR) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง (ENR) ในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ซึ่งผลการทดลองแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาสมบัติของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ สามารถเตรียมได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันด้วยรังสียูวี ซึ่งสารที่ได้มีสีน้ำเงินเข้มและกระจายตัวได้ดีในน้ำปราศจากไอออนดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) โดยการปรากฏของสีน้ำเงินเป็นสมบัติเฉพาะของพอลิไดอะเซทิลีน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเป็นพอลิเมอไรต์ที่มีคอนจูเกตในสายโซ่ จากนั้นทำการเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนไประเหยน้ำปราศจากไอออนออกจนหมดและเติมโทลูอีนลงไป ปรับปริมาตรให้มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ พบว่าสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนมีสีน้ำเงินเข้มและสามารถกระจายตัวได้ดีในโทลูอีนเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข)

จากการเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีน พบว่าได้สารสีน้ำเงินเข้มและกระจายตัวได้ดีในตัวกลางทั้งสองชนิด จึงกล่าวได้ว่า การใช้โทลูอีนเป็นตัวกลางไม่รบกวนโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO จึงยังคงมีสีน้ำเงินและไม่เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง ดังนั้นจึงสามารถใช้โทลูอีนในการเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตและสารละลายสำหรับเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาติได้



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายแสดงสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่กระจายตัวอยู่ใน  
(ก) น้ำปราศจากไอออน และ (ข) โทลูอีน

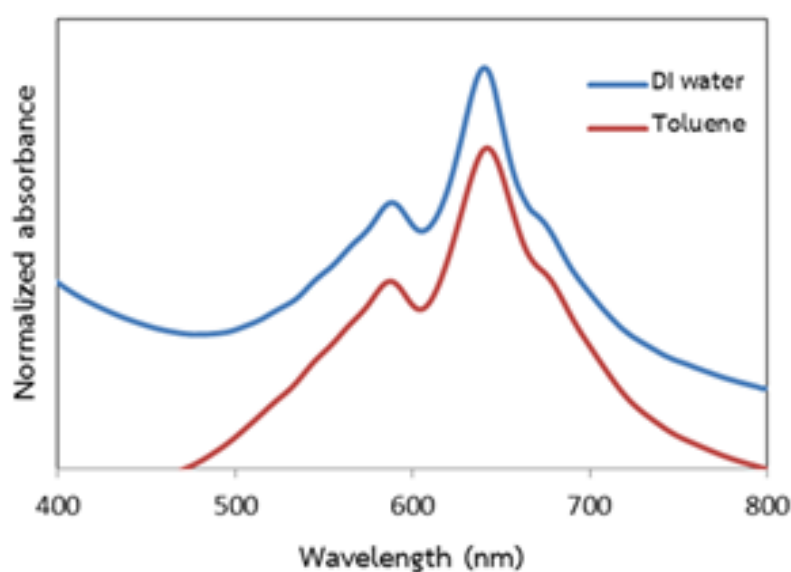
#### 4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีน

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer เป็นการวิเคราะห์สีของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ การจัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกต (conjugation length) ของพอลิไดอะเซทิลีนในโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยพิจารณาจากค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) หากตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสง (absorption band) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นที่สูงขึ้นจะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ถ้าแถบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นต่ำลงจะแสดงถึงการลดลงของระยะคอนจูเกต จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 643 นาโนเมตร มียอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร และแถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ซึ่งแสดงถึงสมบัติของความเป็นคอมพอสิต ที่ความยาวคลื่นประมาณ 675 นาโนเมตร และสำหรับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 645 นาโนเมตร และแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 675 นาโนเมตร ซึ่งสารแขวนลอยทั้งสองมีสีน้ำเงิน<sup>(10)</sup>

ผลจากการศึกษาการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีนที่เตรียมสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่า สารแขวนลอยที่ได้มีสีน้ำเงินและมีค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร



แถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 665 นาโนเมตร และสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงว่าการเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีนของงานวิจัยนี้ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จึงสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตได้

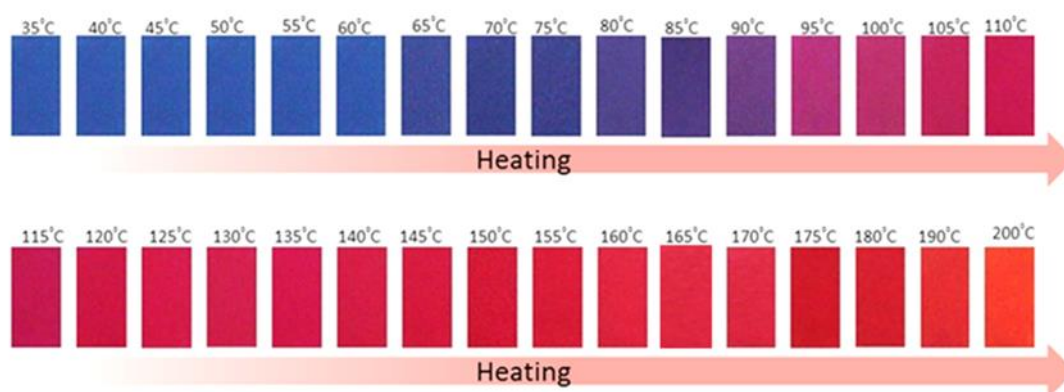


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีน

#### 4.1.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตเมื่ออยู่ในรูปของแข็ง

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เมื่อได้รับความร้อนจึงได้เตรียม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตให้อยู่ในรูปของแข็งซึ่งเป็นเฟสเดียวกับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต โดยหยดสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนลงบนกระดาษกรองและทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยในช่วงต้นของการทดลองจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส แต่ในช่วงปลายจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 10 องศาเซลเซียส และในแต่ละ

ครั้งที่เพิ่มอุณหภูมิจะคงที่อุณหภูมินั้นไว้ 5 นาที แล้วทำการถ่ายภาพเพื่อดูสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่เปลี่ยนไปในทุกช่วงอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

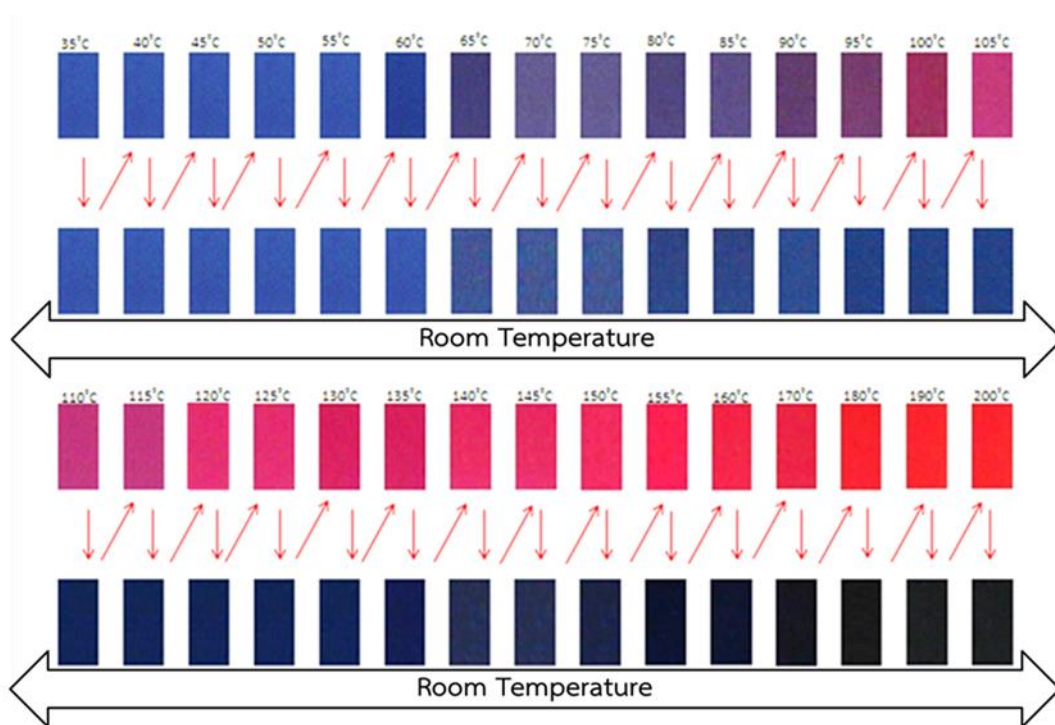


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาพบว่า poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์เมื่อได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความร้อนไปรบกวนหมู่คอนจูเกตบนสายโซ่หลักของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้างในสายโซ่หลักส่งผลให้ระยะคอนจูเกตเปลี่ยนไป โดยจากการทดลองพบว่าจะเริ่มมีการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนสีในช่วง 65 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะเห็นเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน เนื่องจากการปนกันของเพลสีน้ำเงินกับสีแดง หลังจากนั้นเพลสีแดงจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะมองเห็นเป็นสีม่วงปนแดง และท้ายที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตจะเปลี่ยนเป็นเพลสีแดงทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

การจะนำพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับตรวจวัดนั้นนอกจากสมบัติการเปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าแล้ว การผันกลับสีเมื่อกลับสู่สภาวะปกติยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญสำหรับการนำไปใช้งานตรวจวัด จึงได้ศึกษาพฤติกรรมการผันกลับสีของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต โดยทำการให้ความร้อน poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส ในช่วงต้นของการทดลองจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงปลายจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 10 องศาเซลเซียส และในแต่ละครั้งที่เพิ่มอุณหภูมิจะคงที่อุณหภูมินั้นไว้ 5 นาที แล้วถ่ายภาพ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมินั้น จากนั้นนำ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตออกมาจากเตาอบ ถ่ายภาพ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่เย็นตัวสู่อุณหภูมิต้องอีกครั้งหนึ่ง

ก่อนนำไปอบเพิ่มอุณหภูมิใหม่ต่อไปและทำซ้ำแบบนี้ในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งพฤติกรรมการผันกลับของสีของพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์ เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาการผันกลับสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งบนกระจกสไลด์พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 105 องศาเซลเซียส การผันกลับสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งสามารถผันกลับสีได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีเฟสสีแดงปนอยู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นการผันกลับสีจะเป็นการผันกลับแบบไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองในส่วนนี้ทำให้ทราบถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดด้วย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนสีและผันกลับได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 65 ถึง 105 องศาเซลเซียส

#### 4.2 การเตรียมสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตเพื่อประยุกต์เป็นวัสดุสำหรับงานด้านการตรวจวัด โดยเลือกใช้ยางธรรมชาติ 3 ชนิด คือ ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้น (concentrated latex) ยางธรรมชาติแห้ง (NR) และยางธรรมชาติอิพอกไซด์แห้ง

(ENR) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมาเป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต เพื่อที่จะได้ฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นจากสมบัติเด่นของยางธรรมชาติและมีสมบัติบางประการแตกต่างกันออกไปตามชนิดของยางธรรมชาติที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม

การเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ทำได้โดยการเติมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่กระจายตัวอยู่ในน้ำปราศจากไอออนลงไปผสมกับยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้น แต่จะใช้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในโทลูอีนผสมกับสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลายเหมือนกัน ส่วนการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตนั้น สามารถเตรียมได้โดยการนำสารแขวนลอยผสม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติแต่ละชนิด หยดลงบนกระจกสไลด์และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

#### 4.2.1 สมบัติและลักษณะของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

การเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายที่สุด เนื่องจากสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำยางธรรมชาติชั้นก็เป็นสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเช่นกัน แต่จากการทดลองผสมสารแขวนลอยทั้งสองเข้าด้วยกันพบว่า สารแขวนลอยผสมที่ได้เปลี่ยนเป็นสีแดงทันที ซึ่งสาเหตุอาจเป็นผลมาจากการที่ยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นมีการเติมแอมโมเนียลงไปเพื่อรักษาสภาพน้ำยางธรรมชาติในปริมาณที่สูง โดยมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 10 ถึง 11 และอาจมีการปนเปื้อนจากการเติมสารเคมีอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สามารถรบกวนโครงสร้างคอนจูเกตของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จึงส่งผลทำให้เปลี่ยนเป็นสีแดงทันที

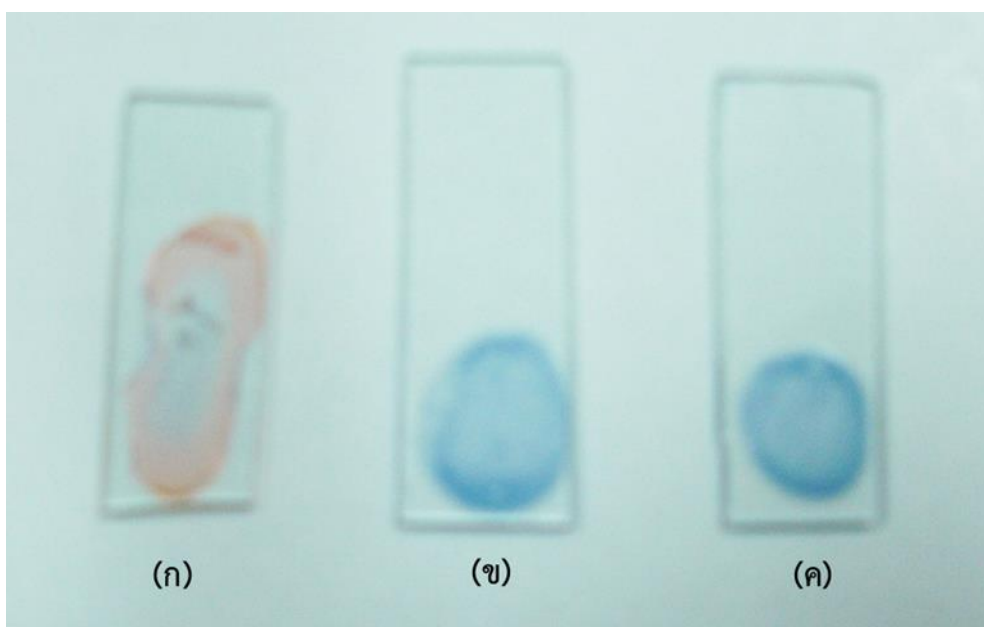
จากการที่ไม่สามารถเตรียมแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตจากยางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นได้ ดังนั้นจึงนำยางธรรมชาติแห้งเกรด STR-5L และยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งเกรด ENR25 ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่ายางธรรมชาติในรูปน้ำยางข้นมาเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต โดยผสมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนกับสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีโทลูอีนเป็นตัวทำละลาย โดยเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตปริมาณ 1.76 และ 3.52 phr สำหรับยางธรรมชาติ และเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตปริมาณ 2.93 และ 5.87 phr สำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จากการทดลองพบว่าสามารถเตรียมสาร

แขวนลอยผสม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต จากสารละลายยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ได้โดยที่สารแขวนลอยผสมยังคงมีสีน้ำเงินทั้งคู่ แสดงว่าสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไม่ไปรบกวนโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตจึงยังคงเป็นสีน้ำเงินและไม่เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง ส่วนประกอบ pH และสีของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากยงทั้ง 3 รูปแบบที่กล่าวข้างต้น แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบ pH และสีของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

|                                    | ส่วนประกอบของสารแขวนลอย   | pH | สีของสารแขวนลอย |
|------------------------------------|---|----|-----------------|
| Poly(PCDA)/ZnO/Latex nanocomposite | สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำ<br>+<br>น้ำยางธรรมชาติข้น                         | 10 | สีแดง           |
| Poly(PCDA)/ZnO/NR nanocomposite    | สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน<br>+<br>สารละลายยางธรรมชาติในโทลูอีน          | 7  | สีน้ำเงินและใส  |
| Poly(PCDA)/ZnO/ENR nanocomposite   | สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน<br>+<br>สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในโทลูอีน | 7  | สีน้ำเงินและใส  |

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่าไม่สามารถใช้น้ำยางธรรมชาติชั้นเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ในการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ยางธรรมชาติแห้งและยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์สำหรับขึ้นรูปฟิล์ม โดยการนำสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากข้างต้นมาหยดลงบนกระจกสไลด์และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จะได้ฟิล์มที่มีสีน้ำเงิน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

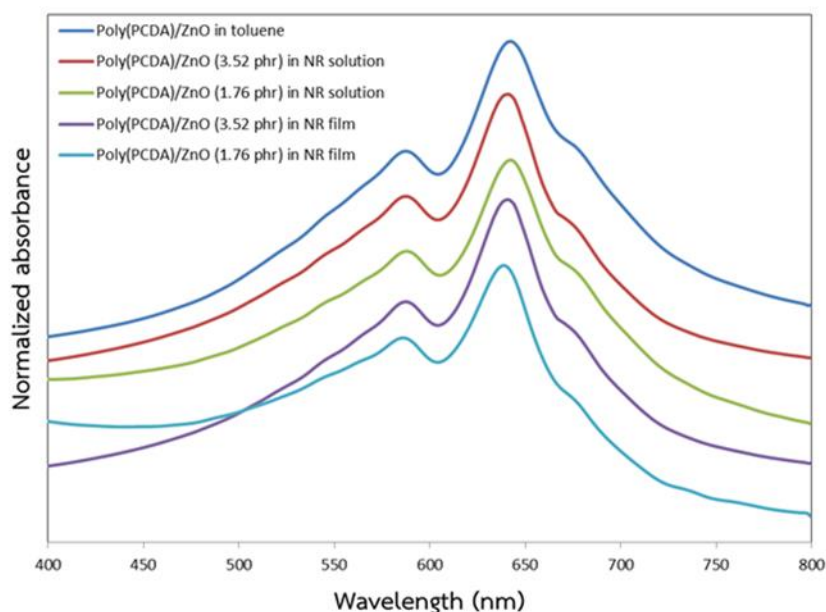


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จาก  
(ก) น้ำยางชั้น (ข) สารละลายยางธรรมชาติ และ (ค) สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

#### 4.2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

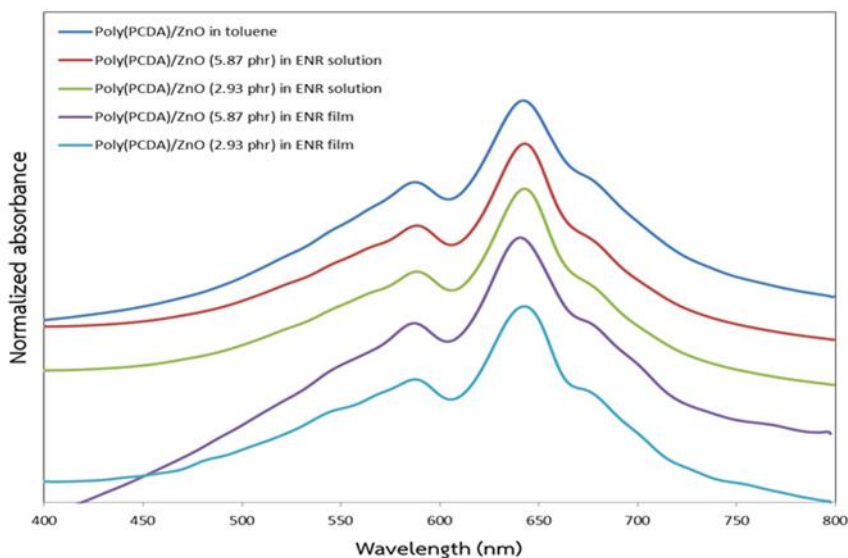
จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนเปรียบเทียบกับ การดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy พบว่าสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย

poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนและเมื่อทำทดสอบการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปแบบฟิล์มพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงที่เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งผลที่ได้ข้างต้นบ่งชี้ว่า พฤติกรรมการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตไม่ได้เปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าจะถูกทำให้กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ยางก็ตาม



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนและในสารละลายยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม

จากนั้นทำการศึกษาการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนเปรียบเทียบกับ การดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติ อีพอกไซด์พบว่า สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติ อีพอกไซด์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 675 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนและเมื่อทดสอบ poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปแบบฟิล์มพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงที่เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอินและในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม

ดังนั้นการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต สามารถเตรียมได้จากทั้งสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ เนื่องจากสารละลายทั้งสองชนิดไม่ไปรบกวนลักษณะโครงสร้างคอนจูเกตใน poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ซึ่งดูได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นไม่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

#### 4.2.3 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต จึงได้นำฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่มียางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากข้างต้น ไปทำการทดสอบ โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนในเตาอบตั้งแต่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส ในช่วงต้นของการทดลองจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส และในช่วงปลายจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 10 องศาเซลเซียส ในแต่ละครั้ง que เพิ่มอุณหภูมิจะคงที่อุณหภูมินั้นไว้ 5 นาที แล้วทำการถ่ายภาพเพื่อดูสีของที่เปลี่ยนไปในทุกช่วงอุณหภูมิ



#### 4.2.3.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต

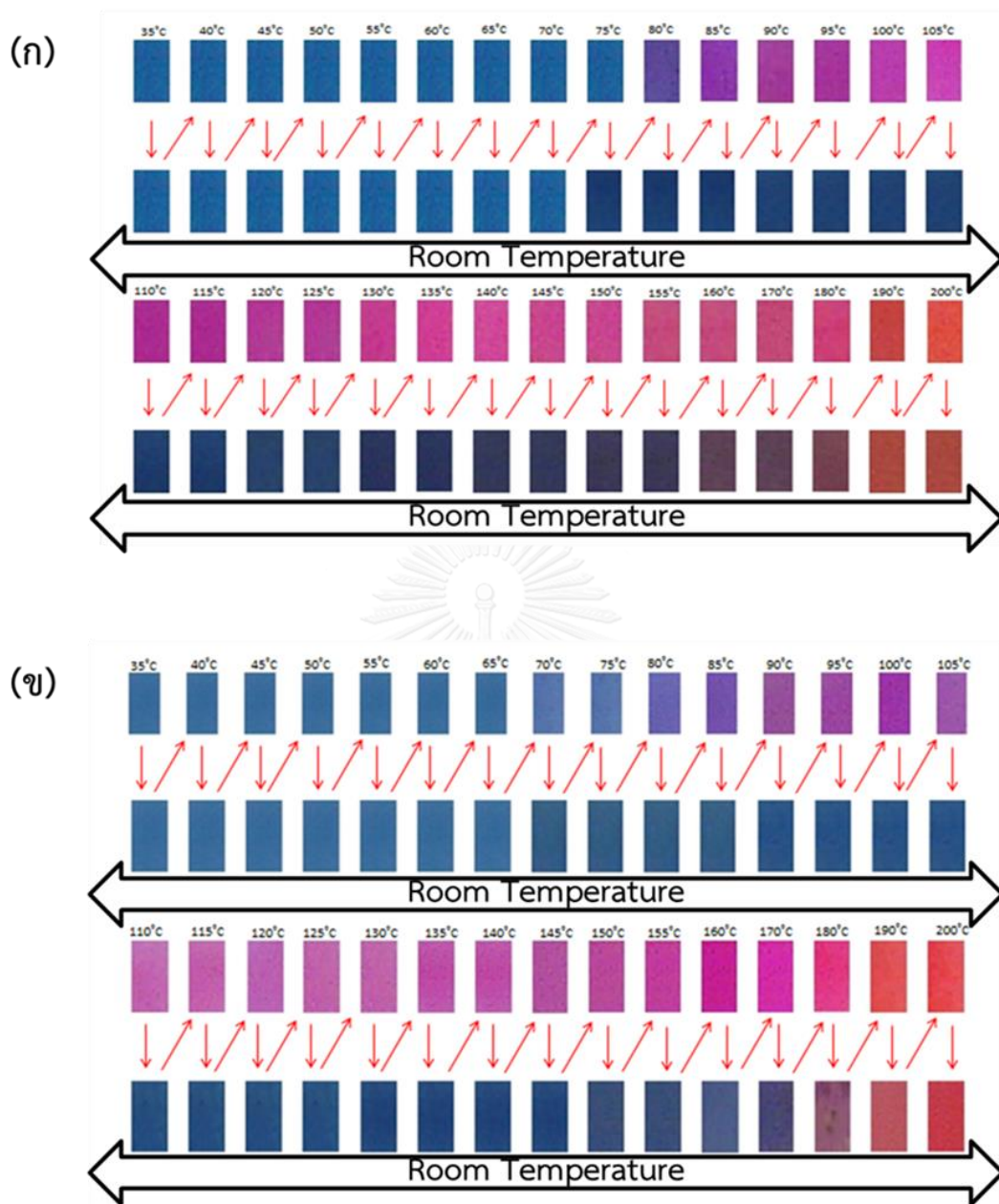
เมื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต โดยใช้ตัวอย่างฟิล์มที่มีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 1.76 และ 3.52 phr เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเปลี่ยนสีของฟิล์มเมื่อมีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่แตกต่างกัน โดยจากผลการทดลองพบว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตทั้งสองมีการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เหมือนกัน ถึงแม้จะมีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตต่างกันก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1.76 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (3.52 phr) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส

ในส่วนของการศึกษาด้านการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่มีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 1.76 และ 3.52 phr ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนสีของฟิล์มทั้งสองจะเริ่มที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาการผันกลับสีเมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งให้เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้องอีกครั้ง พบว่ามีพฤติกรรมการผันกลับสีที่ต่างกัน โดยจากรูปที่ 4.9 (ก) ฟิล์มที่มีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 1.76 phr เกิดการผันกลับสีได้เร็วกว่าฟิล์มที่มีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 3.52 phr รูปที่ 4.9 (ข) โดยพิจารณาจากช่วงการผันกลับสีที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งสังเกตได้จากช่วงอุณหภูมิ 130 ถึง 180 องศาเซลเซียส เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนและเย็นตัวลงจะเห็นเป็นสีม่วงและหลังจากนั้นจะเป็นสีแดง ซึ่งต่างจากฟิล์มที่มีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 3.52 phr จะมีช่วงการผันกลับสีที่ไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า การมีปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่มากกว่าจะช่วยให้เกิดการผันกลับสีได้ดีกว่า อีกทั้งการเพิ่มปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตจะไปช่วยลดสีเหลืองอ่อนของยางธรรมชาติทำให้สามารถสังเกตสีได้ดีขึ้น





รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1.76 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (3.52 phr) เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

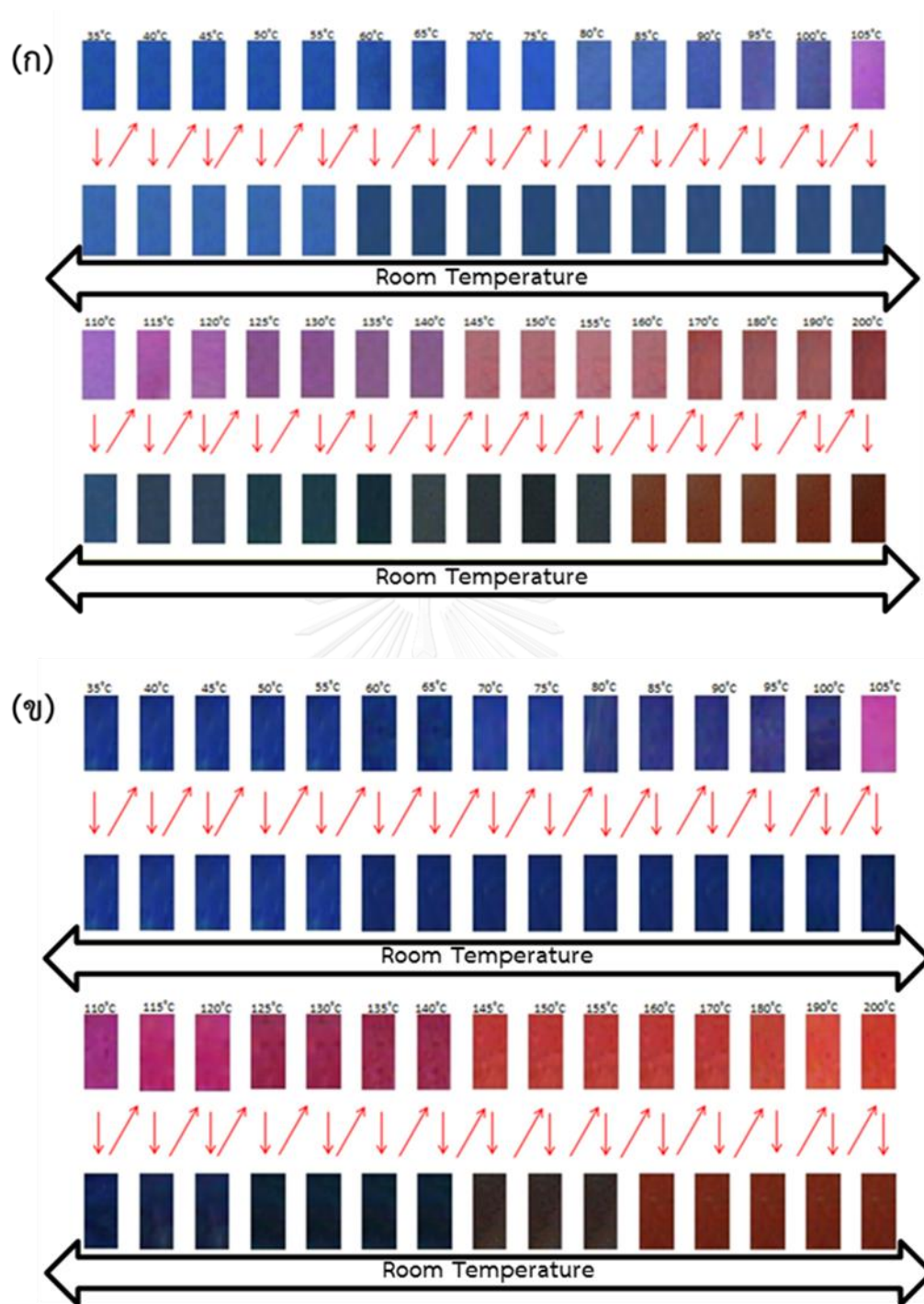
#### 4.2.3.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต

จากการที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไม่ได้รับกวนโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต อีกทั้งยังสามารถเตรียมเป็นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่มีสีน้ำเงินชัดเจน จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต เช่นเดียวกับข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบสีของยางธรรมชาติเกรด STR 5L กับสีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จะสังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีสีเหลืองที่เข้มกว่า ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้จึงเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณที่มากกว่า ดังนี้ 2.93 และ 5.87 phr จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วงเริ่มที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 155 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป ในทั้งสองตัวอย่าง พิจารณาได้จากรูปที่ 4.10 จากการที่มีปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตต่างกันนั้น ส่งผลต่อการพิจารณาสีที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนไปของเฉดสีจะเห็นได้ชัดเจนตามปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในระบบซึ่งจะไปลดการรบกวนของสีเหลืองอ่อนจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์นั่นเอง



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (2.93 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (5.87phr) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส

เมื่อศึกษาพฤติกรรมการณ์การผันกลับสีในทั้งสองตัวอย่าง พิจารณาจากรูปที่ 4.11 พบว่าฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตทั้งสองตัวอย่างไม่สามารถผันกลับสีได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ซึ่งลดลงมา 20 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เมื่อเทียบกับพฤติกรรมการณ์การผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม (ก) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (2.93 phr) และ (ข) poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (5.87 phr) เมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

### 4.3 การเตรียมสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

ในส่วนของการทดลองนี้จะมีการเติมสารตัวเติมและสารคงรูปที่เหมาะสมกับยางธรรมชาติแต่ ละรูปแบบลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้มีความแข็งแรงเหมาะสมที่จะ นำไปใช้งานจริง โดยได้เลือกใช้น้ำยางผสมสูตรสำหรับผลิตภัณฑ์มือแพทย์ในระบบอุตสาหกรรมที่ความ เสถียรและมีสารตัวเติมต่าง ๆ รวมทั้งสารคงรูปมาเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทั้งยังเตรียมสารละลายยาง ธรรมชาติที่เติมตัวกระตุ้น ตัวเร่งการคงรูปและสารคงรูป ซึ่งน้ำยางผสมสูตรและสารละลายยางธรรมชาติ จะใช้ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) เป็นสารช่วยคงรูป พร้อมทั้งยังปรับปริมาณการใช้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตลดลง เพื่อให้เหมาะสมต่อการสังเกตการเปลี่ยนสีจึงลดการใช้ในปริมาณมากเกินความจำเป็น

#### 4.3.1 สมบัติและลักษณะของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

การเตรียมสารแขวนลอยผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตกับน้ำยางผสมสูตร ทำ ได้โดยเติมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนลงไปใต้น้ำยาง ผสมสูตรที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำเช่นกัน ส่วนประกอบของน้ำยางผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงใน ตารางที่ 4.2 และใช้ปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 0.07 phr สารแขวนลอยผสมที่ได้มี สีน้ำเงินอ่อนและมีลักษณะขุ่นขึ้นเนื่องมาจากลักษณะของน้ำยางผสมสูตรนั่นเอง แต่การที่ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่เปลี่ยนเป็นสีแดงแสดงว่าน้ำยางผสมสูตรมีสภาพที่เหมาะสม และความเข้มข้นน้อยกว่าน้ำยางขุ่นทั่วไปจึงไม่ไปรบกวนโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโน คอมพอสิต

การเตรียมสารแขวนลอยผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีนกับสารละลาย ยางธรรมชาติที่ใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย มีตัวกระตุ้น คือ กรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr ตัวเร่งการคงรูปคือ TBzTD 2 phr และสารคงรูป คือ กำมะถัน 1.5 phr และใช้ปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 0.88 phr จากการผสมสารเหล่านี้จะได้สารแขวนลอยผสมสีน้ำ เงิน

สำหรับในสุดท้ายการเตรียมสารแขวนลอยผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลู อีนกับสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 0.15 phr เป็นตัวช่วยคงรูป และใช้ปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 0.88 phr ได้สาร แขวนลอยผสมสีน้ำเงิน และการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ไม่สามารถใส่เกิน 0.2 phr ได้ เนื่องจากจะเกิด

การเปลี่ยนสี สำหรับส่วนประกอบ pH และสีของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูปจากยางทั้ง 3 รูปแบบ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของน้ำยางผสมสูตรถูงมือแพทย์

| สาร                       | น้ำหนัก (กรัม) |
|---------------------------|----------------|
| น้ำยางธรรมชาติชั้น        | 167            |
| 10% โพลเทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 2              |
| 10% Teric 16 A 16         | 0.2            |
| 50% กำมะถัน               | 1.6            |
| 50% ZDEC                  | 0.8            |
| 50% ZMBT                  | 0.8            |
| 50% Wingstay-L            | 2              |
| 50% ซิงก์ออกไซด์          | 2              |
| น้ำ                       | 170.5          |



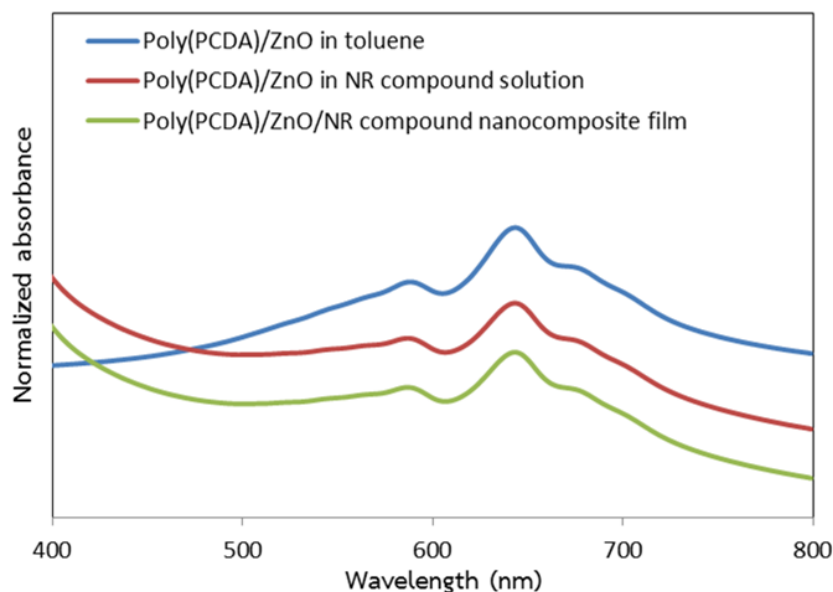
ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบ ค่า pH และสีของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

|   | ส่วนประกอบของสารแขวนลอย  | pH | สีของสารแขวนลอย          |
|---|--|----|--------------------------|
| Poly(PCDA)/ZnO/Latex compound nanocomposite | สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำ<br>+<br>น้ำยางผสมสูตร  | 9  | สีน้ำเงินอ่อนและขุ่น     |
| Poly(PCDA)/ZnO/NR compound nanocomposite    | สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน<br>+<br>สารละลายยางธรรมชาติผสมสูตรในโทลูอีน<br>(stearic acid 1 phr + ZnO 3 phr + TBzTD 2 phr + sulfur 1.5 phr) | 7  | สีน้ำเงินและขุ่นเล็กน้อย |
| Poly(PCDA)/ZnO/ENR compound nanocomposite   | สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน<br>+<br>สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรในโทลูอีน<br>(MA 0.15 phr)  | 7  | สีน้ำเงินและใส           |

การเตรียมฟิล์มจากสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป ทำได้โดยนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้จากข้างต้นไปหยดลงบนกระจกสไลด์แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงและพฤติกรรมในการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูปในขั้นตอนต่อไป

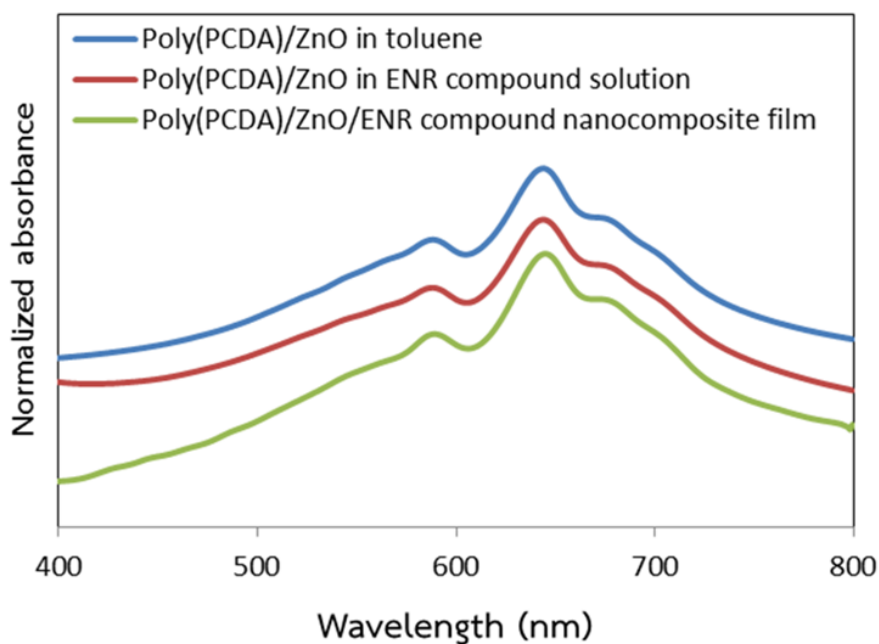
#### 4.3.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูปด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ไม่สามารถวิเคราะห์สารแขวนลอยและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรได้ เนื่องจากมีความขุ่นทำให้เกิดการรบกวนในการตรวจวัด สำหรับสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ ผลการวิเคราะห์พบว่า สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปและ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในฟิล์มยางธรรมชาติ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการดูดกลืนของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ผลที่ได้บ่งชี้ว่าการเติมสารคงรูปลงไปไม่มีผลต่อโครงสร้าง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทั้งที่อยู่ในสารละลายยางธรรมชาติหรือในฟิล์มยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอินและในสารละลายยางธรรมชาติที่มีสารคงรูปในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม

เมื่อทำการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคงรูปและในฟิล์มที่เตรียมได้ ผลการวิเคราะห์พบว่า สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคงรูปและ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการดูดกลืนของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ผลที่ได้บ่งชี้ว่าการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารคงรูปไม่มีผลต่อโครงสร้าง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทั้งที่อยู่ในสารละลายยางธรรมชาติหรือในฟิล์มยางธรรมชาติ ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมสารคงรูปไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่ว่าจะเตรียมโดยการใช้ยางธรรมชาติในรูปแบบใดก็ตาม



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอินและในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีสารคงรูปในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์ม

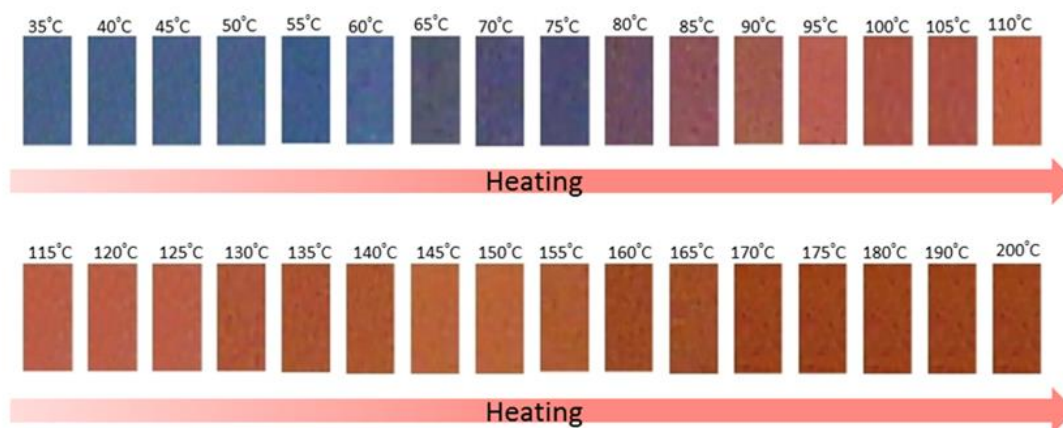
#### 4.3.3 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป

จากผลการทดลองข้างต้นจึงได้นำฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป มาทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์ม เพื่อวิเคราะห์ว่าการเติมสารตัวเติมลงไปจะมีผลต่อการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในยางธรรมชาติหรือไม่

##### 4.3.3.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร

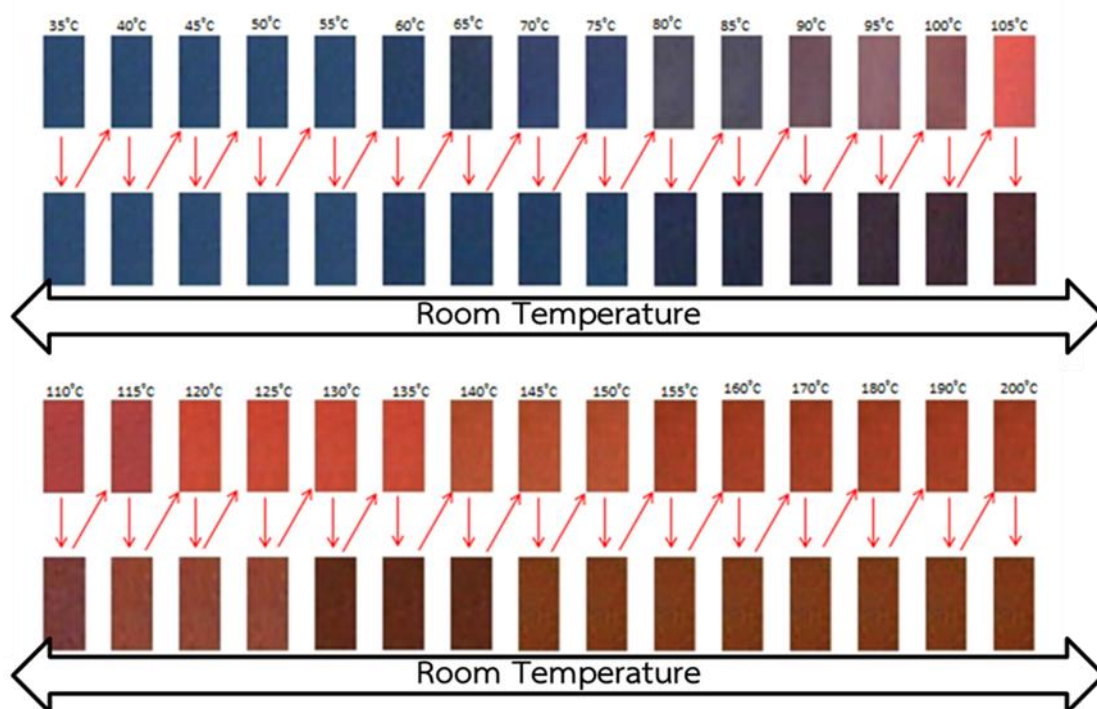
การเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตจากน้ำยางผสมสูตร เป็นการเตรียมที่ง่ายและไม่ยุ่งยากซึ่งถือเป็นข้อดีและได้เปรียบเมื่อเทียบกับการเตรียมจากสารละลายยาง แต่ฟิล์มที่เตรียมได้ถึงแม้จะมีสีน้ำเงินแต่มีลักษณะขุ่นเล็กน้อยทำให้สังเกตการเปลี่ยนสีได้ยากกว่า อีกทั้งภายในน้ำยางธรรมชาติยังมีสารตัวเติมหลายชนิดซึ่งอาจจะส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์มชนิดนี้ ซึ่ง

จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วงของฟิล์มที่เตรียมได้เริ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเป็นสีแดงที่ 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร เมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส

จากนั้นได้ศึกษาการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร พบว่าสามารถผันกลับสีสมบูรณ์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส จากนั้นจะผันกลับได้บางส่วนจนถึงอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่านี้จะไม่สามารถผันกลับได้ ซึ่งสามารถพิจารณาการผันกลับสีของ ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรได้จากรูปที่ 4.15

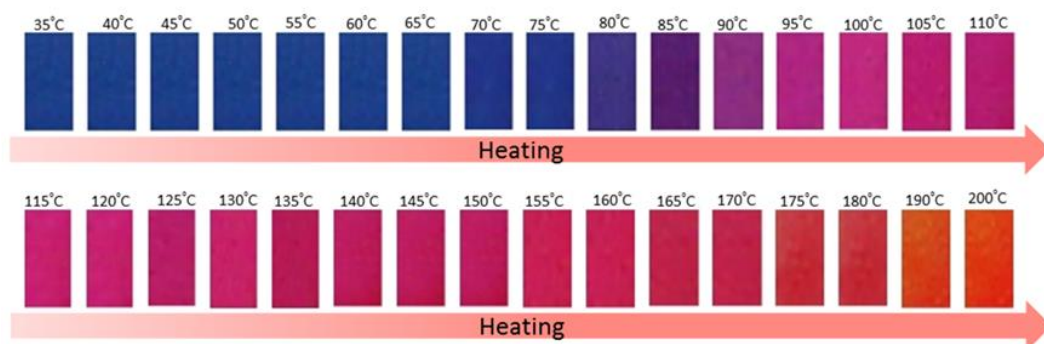


รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ จะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนที่อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

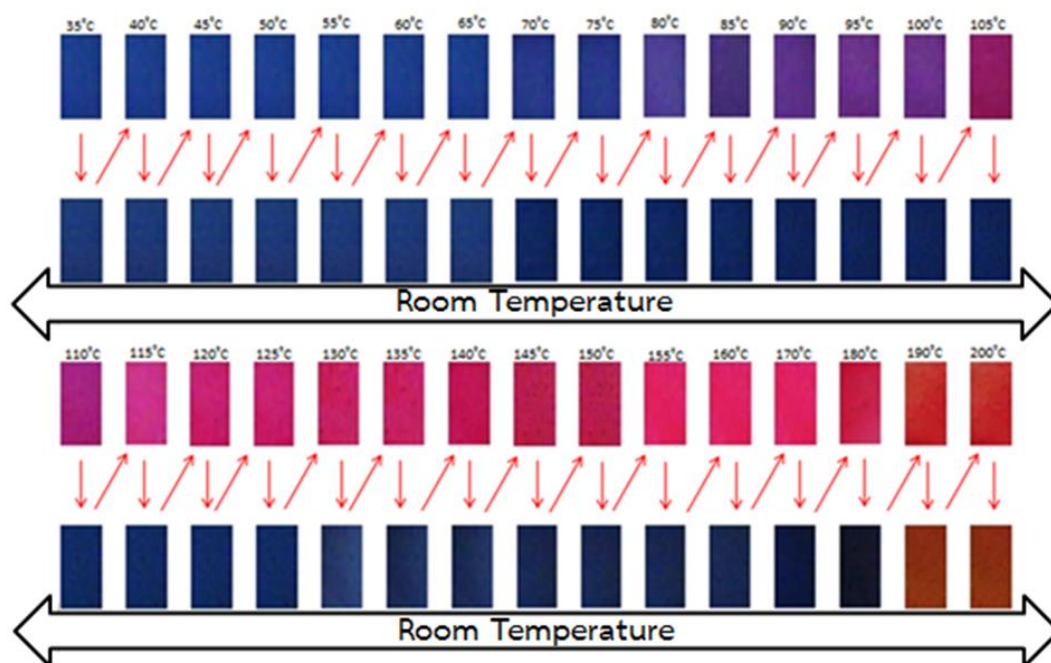
#### 4.3.3.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูป

ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติจะมีการเติมกรดเสตีริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr TBZTD 2 phr กำมะถัน 1.5 phr และใช้ปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต 0.88 phr จากการผสมสารเหล่านี้ทำให้ฟิล์มที่ได้มีสีน้ำเงินและขุ่นเล็กน้อยซึ่งน้อยกว่าฟิล์มจากน้ำยางชั้นผสมสูตร ดังนั้นฟิล์มที่ได้ยังคงมีข้อได้เปรียบในการสังเกตสีมากกว่า เมื่อให้ความร้อนแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงและกลายเป็นสีแดงที่ 180 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส

การผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปจะไม่สามารถผันกลับได้เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 180 องศาเซลเซียส การผันกลับได้บางส่วนอยู่ในช่วง 110 ถึง 180 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.17

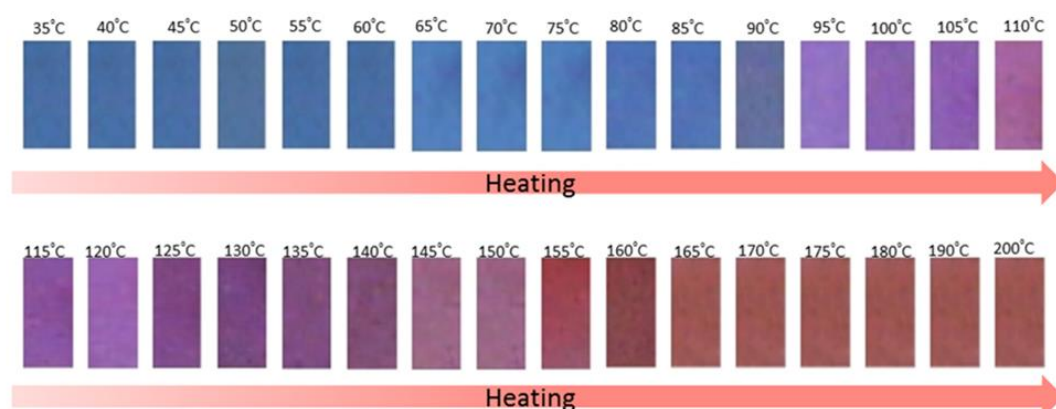


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองข้างต้น หากเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีระหว่างฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูปกับที่ไม่มีการเติมสารคงรูป จะพบว่า พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์มทั้งสองไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตไม่ว่าจะมีการเติมหรือไม่เติมสารคงรูปกับพฤติกรรม การเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ จะพบว่าการเปลี่ยนสีและการผันกลับสี ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า poly(PCDA)/ZnO นาโน คอมพอสิตบริสุทธิ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสายโซ่ยาวธรรมชาติเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีทำได้ ยากขึ้นและต้องใช้พลังงานมากขึ้น การเปลี่ยนสีจึงเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น

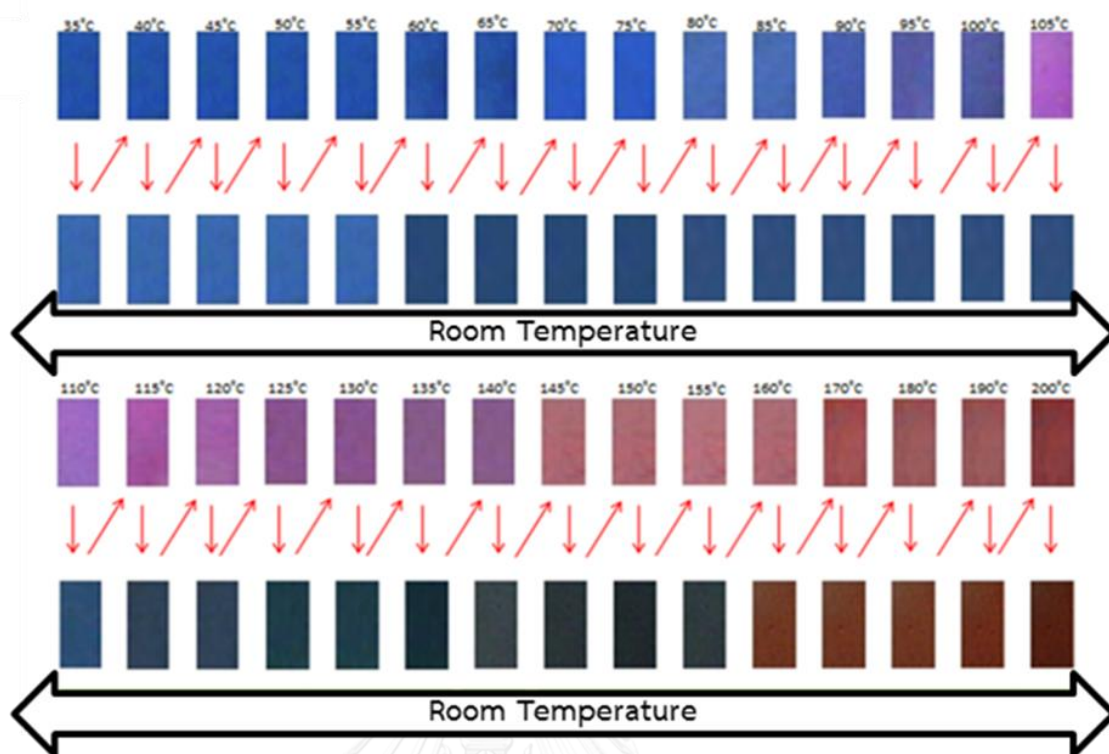
#### 4.3.3.3 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอพอกไซต์ที่มีการเติมสารคงรูป

พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอพอกไซต์ที่มีการเติมสารคงรูปนั้น มีการเปลี่ยน สีและผันกลับสีที่เหมือนกับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยาง ธรรมชาติอพอกไซต์ที่ไม่มีการเติมสารคงรูป คือเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับสีได้หากอุณหภูมิเกิน 160 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้ผสมลงไปมีน้อยมากจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีหรือไป รบกวนโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียม จากสารละลายยางธรรมชาติอพอกไซต์ที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส





รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการเติมสารคงรูปเมื่อได้รับความร้อนและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตกับการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ พบว่าการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากสายโซ่ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีทำได้ยากขึ้นและต้องใช้พลังงานมากขึ้น การเปลี่ยนสีจึงเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น

#### 4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูป

จากผลการทดลองข้างต้นถึงแม้จะสามารถเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตและแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้สามารถเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนแล้วก็ตาม แต่คุณสมบัติทางกายภาพก็เป็นอีกปัจจัยที่ต้องพิจารณาหากจะนำแผ่นฟิล์มไปใช้งานจริง ดังนั้นหลังจากที่ทราบว่า การเติมสารตัวเติมในปริมาณที่ไม่มากเกินไปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จึงได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ผ่านการคงรูปเพื่อดูความต้านทานต่อตัวทำลายอินทรีย์ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โทลูอีนซึ่งเป็นตัวทำลายที่ไม่มีขี้ มาใช้ในการทดสอบ อีกทั้งยังทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงดึง เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของฟิล์มที่เตรียมได้

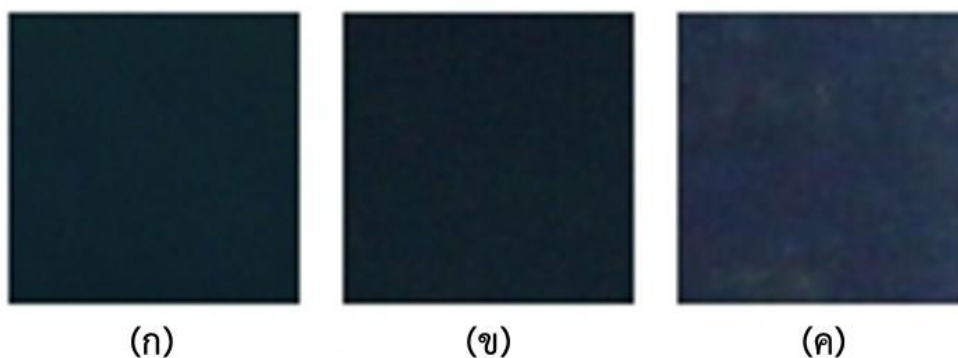
การเตรียมฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล ทำได้โดยการนำสารแขวนลอยผสมของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตกับยางธรรมชาติแต่ละชนิดจากข้างต้น เทใส่แบบกระจกที่มีขนาดกว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึกลง 0.70 เซนติเมตร ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปคงรูปด้วยความร้อนและตัดเป็นชิ้นทดสอบตามลำดับ

##### 4.4.1 สภาวะการคงรูปและสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูป

ในการทดลองส่วนนี้ได้แบ่งระบบการคงรูปยางธรรมชาติออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ใช้กัมมะถันเป็นสารคงรูปและอีกกลุ่มใช้มาเลอิกแอนไฮไดรต์ในการคงรูป โดยกัมมะถันจะใช้กับน้ำยางผสมสูตรและสารละลายยางธรรมชาติ ส่วนมาเลอิกแอนไฮไดรต์จะใช้กับสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ซึ่งการใช้กัมมะถันนั้นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการคงรูปยางดังนั้นเพื่อลดอุณหภูมิลง จึงได้ใช้สารเคมีในการเร่งการคงรูปยางธรรมชาติเพื่อช่วยให้เกิดการคงรูปที่เร็วถึงแม้จะลดอุณหภูมิลง ส่วนการเลือกใช้มาเลอิกแอนไฮไดรต์เป็นสารคงรูปสำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์เนื่องจากสามารถคงรูปได้โดยไม่ต้องมีสารเคมีตัวอื่น อีกทั้งมาเลอิกแอนไฮไดรต์สามารถคงรูปได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ จากการทดลองการคงรูปฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูปได้สภาวะการคงรูปของยางทั้ง 3 รูปแบบและสีของฟิล์มหลังการคงรูป แสดงในตารางที่ 4.4 และตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมได้แสดงในรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.4 สภาวะการคงรูปและสีที่ได้หลังจากการคงรูปของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เติมสารคงรูป

| ชนิดของฟิล์ม   | สภาวะการคงรูป                  | สีของฟิล์ม |
|--|--------------------------------|------------|
| poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต   |                                |            |
| ฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต<br>ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร                                   | ที่อุณหภูมิ 50°C<br>1 ชั่วโมง  | สีน้ำเงิน  |
| ฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต<br>ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่เติมสารคงรูป              | ที่อุณหภูมิ 100°C<br>3 ชั่วโมง | สีน้ำเงิน  |
| ฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต<br>ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์<br>ที่เติมสารคงรูป | ที่อุณหภูมิ 50°C<br>3 ชั่วโมง  | สีน้ำเงิน  |



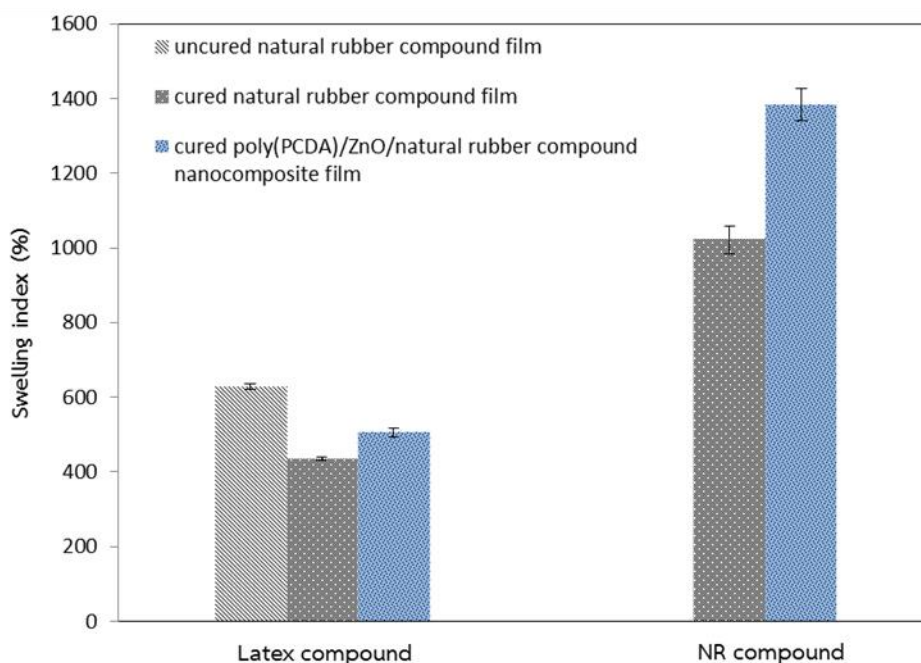
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่ผ่านการคงรูป

(ก) ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร (ข) ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติผสมสูตร และ (ค) ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร

การคงรูปเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อตัวทำละลายให้กับยาง จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากยางธรรมชาติในรูปแบบต่าง ๆ กัน สามารถผ่านกระบวนการคงรูป โดยที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่ได้ยังคงมีสีน้ำเงิน ซึ่งหมายความว่าเมื่อทำการคงรูปฟิล์มแล้ว ฟิล์มก็ยังคงสามารถใช้เป็นวัสดุตรวจวัดอุณหภูมิได้

#### 4.4.2 สมบัติการบวมตัวในโทลูอีน (Swelling index)

การทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนเป็นการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ทั้งยังสามารถบอกถึงการเกิดการคงรูปในโมเลกุลของยางธรรมชาติได้อีกด้วย โดยหากยางธรรมชาติได้ผ่านการคงรูปมา จะเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ภายในทำให้มีความต้านทานต่อการละลายหรือบวมตัวในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วมากขึ้น ในการทดลองในส่วนนี้ สามารถทำได้โดยนำตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมได้ไปแช่น้ำหนักแห้งที่แน่นอน จากนั้นนำไปแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 14 วัน เพื่อดูความสามารถในการบวมตัว โดยคิดจากน้ำหนักของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับน้ำหนักเดิม ซึ่งผลจากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แผนภูมิแท่งแสดงค่าการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและสารละลายยางผสมสูตรซึ่งแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 14 วัน

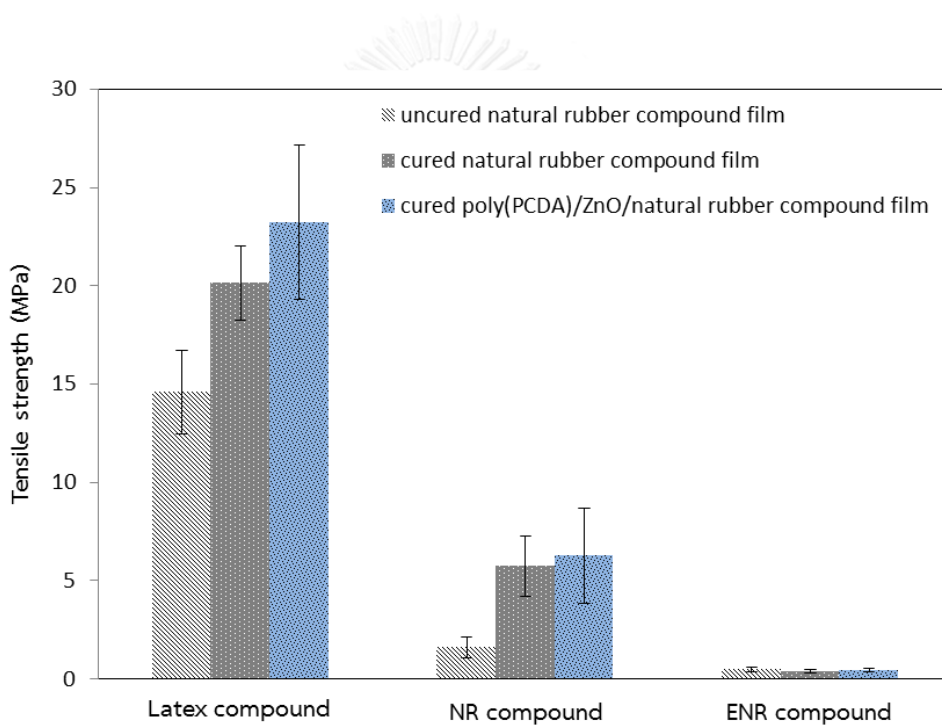
จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติอ็อกไซด์ละลายเป็นเจลในโทลูอีน ภายในเวลา 1 วัน ถึงแม้จะทำการคงรูปแต่ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่สามารถใส่ได้มีปริมาณเพียง 0.15 phr ซึ่งน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างยางธรรมชาติอ็อกไซด์ได้ สำหรับฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร พบว่าฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่ได้คงรูปมีค่าการบวมตัวร้อยละ 628.13 เมื่อผ่านการคงรูปแล้วฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าการบวมตัวร้อยละลดลงเป็น 435.82 ในขณะที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่คงรูปค่าการบวมตัวร้อยละเท่ากับ 505.37 ซึ่งมากกว่าฟิล์มยางธรรมชาติเล็กน้อย ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากการปรากฏของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต มีผลรบกวนกระบวนการคงรูปของยางทำให้การบวมตัวในตัวทำละลายเกิดมากขึ้น เมื่อพิจารณาร้อยละการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติพบว่า ฟิล์มยางธรรมชาติที่ไม่มีการคงรูปละลายเป็นเจลภายใน 1 วัน แต่เมื่อผ่านการคงรูปฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 1021.70 ในขณะที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่คงรูปค่าการบวมตัวร้อยละ 1383.45 ซึ่งมากกว่าฟิล์มยางธรรมชาติเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุตัวดูดอุนหภูมิที่ต้องการสัมผัสกับตัวทำละลายไม่มีขั้วจะเห็นว่า ฟิล์ม

poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากบวมตัวในโทลูอีนน้อยที่สุด

#### 4.4.3 สมบัติความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

สมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากยางธรรมชาติ 3 รูปแบบ คือ น้ำยางผสมสูตร สารละลายยางธรรมชาติ และสารละลายยางธรรมชาติอ็อกไซด์ แสดงในรูปที่ 4.22 จากการทดลองพบว่าฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูปนั้นมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดที่ 21.3 MPa



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร สารละลายยางผสมสูตร และสารละลายยางอ็อกไซด์ผสมสูตร

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุตรวจวัดอุณหภูมิที่อาจถูกใช้งานภายใต้แรงกระทำจะเห็นว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูปมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถทนต่อแรงดึงได้ดีที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับ การเตรียม พฏติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิ และสมบัติทางกายภาพของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต โดยมี poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตซึ่งเป็นวัสดุที่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนกระจายอยู่ในยางธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองเตรียมแผ่นฟิล์มจากยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางธรรมชาติชั้นและน้ำยางผสมสูตร ยางธรรมชาติแห้งและยางธรรมชาติอิมพอกไซด์แห้ง ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 การเตรียมพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาติ นาโนคอมพอสิต

ในการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารคงรูปใด ๆ สามารถเตรียมได้โดยการผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโพลูอินกับสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอิมพอกไซด์ในโพลูอิน ซึ่งสารแขวนลอยผสมที่ได้ยังคงมีสีน้ำเงินเช่นเดียวกับสีเริ่มต้นของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และมีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต แสดงว่าสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอิมพอกไซด์ในโพลูอินไม่รบกวนสายโซ่คอนจูเกตที่อยู่ในโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และเมื่อนำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้างต้นไปเตรียมฟิล์มและวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงก็ยังคงให้ค่าที่เหมือนกับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า ในการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมสารคงรูป ไม่สามารถเตรียมได้จากการผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำกับน้ำยางธรรมชาติชั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพ pH ของน้ำยางธรรมชาติชั้นที่มีค่าสูงทำให้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตถูกรบกวนส่งผลต่อสายโซ่คอนจูเกตที่ปิดตัวไปจึงเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงขึ้นทันที

สำหรับการเตรียมฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาติ นาโนคอมพอสิตที่มีการเติมสารคงรูป จากการทดลองพบว่า นอกจากจะเตรียมได้จากการผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโพลูอินกับสารละลายยางธรรมชาติที่มีการเติมกรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr TBzTD 2 phr และกำมะถัน 2 phr และสารละลายยางธรรมชาติอิมพอกไซด์ที่มีการเติมมาเลอิก-แอนไฮไดรด์ 0.15 phr แล้ว ยังสามารถเตรียมได้จากการผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำกับน้ำยางผสมสูตรถุงมือแพทย์ที่มีความเสถียรและใช้ทั่วไปในระบบอุตสาหกรรม เนื่องมาจากน้ำยางผสมสูตรมีการเติมสารตัวเติมที่ช่วยให้ความเสถียรและมีค่า pH ที่ต่ำกว่า จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสี

เป็นสีแดงเหมือนอย่างในน้ำยางธรรมชาติขั้นทั่วไป และเมื่อนำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้างต้นไปเตรียมฟิล์มและวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงก็ยังคงให้ค่าที่เหมือนกับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สามารถเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตได้จากน้ำยางผสมสูตร สารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ได้ อีกทั้งการเติมสารช่วยในการคงรูปไม่ได้รับกวนระบบของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จึงไม่เกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง

## 5.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีต่ออุณหภูมิของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

จากการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตซึ่งอยู่ในเฟสของแข็งรูปแบบฟิล์มพบว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูปจะเกิดการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีที่อุณหภูมิสูงกว่าของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ ในขณะที่ ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีคล้ายคลึงกับของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ พบว่าการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในฟิล์มยางธรรมชาติเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสายโซ่ของยางธรรมชาติไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคอนจูเกตในโครงสร้าง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตได้ยากขึ้น จึงต้องใช้ความร้อนที่มากขึ้นเพื่อไปกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสี ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของสายโซ่อย่างที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ต่างกันไป ในกรณีของสารละลายยาง สายโซ่ยางสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ได้ ดังนั้นเมื่อให้ความร้อน การเปลี่ยนสีจะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจาก poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น แต่ในกรณีของน้ำยาง สายโซ่ยางจะอยู่ในรูปอนุภาคที่ห่อหุ้มด้วยชั้นโปรตีนและไขมัน ทำให้สายโซ่ยางไม่สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ได้ ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนการเปลี่ยนสีจะเกิดที่อุณหภูมิลดลงคล้ายกับของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ และปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะมีผลต่อการผันกลับสีและการสังเกตสี เนื่องจากยางธรรมชาติมีสีเหลืองอ่อน ดังนั้นการเติมในปริมาณที่มากจะช่วยลดการรบกวนจากสีเหลืองอ่อนของยางธรรมชาติ อีกทั้งรูปแบบของยางธรรมชาติและส่วนประกอบของสารตัวเติมก็มีผล



เช่นกัน โดยการใช้ น้ำยาล้างฟิล์มที่ผสมสารถึงแม้จะสะดวกและเตรียมได้ง่าย แต่ฟิล์มที่ได้มีลักษณะขุ่นมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายยาง

### 5.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต

สมบัติเด่นของยางธรรมชาติคือ ความแข็งแรงทนทานและมีความยืดหยุ่นสูง แต่หากไม่ผ่านการคงรูปจะทำให้การนำไปใช้งานจริงไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงนำฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตไปผ่านการคงรูป ซึ่งหลังการคงรูปฟิล์มยังคงมีสีน้ำเงิน เมื่อทดสอบทางกายภาพของฟิล์มที่ได้ พบว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิตละลายในโทลูอีน ซึ่งบ่งชี้ว่าฟิล์มมีการคงรูปต่ำมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณสารคงรูปที่เดิมนั้นค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติความทนแรงดึงต่ำมากด้วย ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยาล้างฟิล์มเกิดการคงรูปมากที่สุด ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความทนทานต่อโทลูอีนและมีสมบัติความทนแรงดึงสูงที่สุด สำหรับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติเกิดการคงรูปน้อยกว่าฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยาล้างฟิล์มแต่มากกว่าฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต จึงมีสมบัติต่าง ๆ อยู่ระหว่างฟิล์มทั้งสองชนิด



## รายการอ้างอิง

1. Ahn, D.J., Lee, S., Kim, J. Rational design of conjugated polymer supramolecules with Tunable Colorimetric Responses. *Advanced Functional Materials*. 2009;19:1483-96.
2. Kim, J., Lee, Y.B., Chae, S.K., Ahn, D.J. Patterned color and fluorescent images with polydiacetylene supramolecules embedded in poly(vinyl alcohol) films. *Advanced Functional Materials*. 2006;16:2103-2109.
3. Charoenthai, N., Pattanatornchai, T., Wacharasindhu, S., Sukwattanasinitt, M., Traiphol, R. Roles of head group architecture and side chain length on colorimetric response of polydiacetylene vesicles to temperature, ethanol and pH. *J Colloid Interface Sci*. 2011;360(2):565-73.
4. Wacharasindhu, S., Montha, S., Boonyiseng, J., Potisatityuenyong, A., Phollookin, C., Tumcharern, G., et al. Tuning of Thermochromic Properties of Polydiacetylene toward Universal Temperature Sensing Materials through Amido Hydrogen Bonding. *Macromolecules*. 2010;43(2):716-24.
5. Yoon, B., Lee, S., Kim, J.M. Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. *Chemical Society reviews*. 2009;38(7):1958-68.
6. Chen, X., Kang, S., Kim, M.J., Kim, J., Kim Y.S., Kim, H., et al. Thin-film formation of imidazolium-based conjugated polydiacetylenes and their application for sensing anionic surfactants. *Angewandte Chemie*. 2010;49(8):1422-5.
7. Jelinek, R., Ritenberg, M. Polydiacetylenes – recent molecular advances and applications. *RSC Advances*. 2013;3(44):21192.
8. Traiphol, N., Rungruangviriyaya, N., Potai, R., Traiphol, R. Stable polydiacetylene/ZnO nanocomposites with two-steps reversible and irreversible thermochromism: the influence of strong surface anchoring. *J Colloid Interface Sci*. 2011;356(2):481-9.

9. Rungruangviriya, N., Traiphol, N. Versatile Route for Preparation of PolydiacetyleneZnO Nanocomposites and Their Colorimetric Response to pH and Ethanol. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2010;20:35-41.
10. Toommee, S., Traiphol, R., Traiphol, N. High color stability and reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite in various organic solvents and polymer matrices. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015;468:252-61.
11. Wu, S., Niu, L., Shen, J., Zhang, Q., Bubeck, C. Aggregation-induced reversible thermochromism of novel azo chromophore-functionalized polydiacetylene cylindrical micelles. *Macromolecules*. 2008;42(1):362-7.
12. Potisatityuenyong, A., Rojanathanes, R., Tumcharern, G., Sukwattanasinitt M. Electronic absorption spectroscopy probed side-chain movement in chromic transitions of polydiacetylene vesicles. *Langmuir*. 2008;24(9):4461-3.
13. Gou, M., et al. Time-temperature chromatic sensor based on polydiacetylene (PDA) vesicle and amphiphilic copolymer. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2010;150(1):406-11.
14. Su, Y-l. Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. *Reactive and Functional Polymers*. 2006;66(9):967-73.
15. ประวัติยางพารา [cited 2016 May 23]. Available from: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/para/history/index.php>.
16. ยางพาราไทย [cited 2016 23 May]. Available from: [http://www.yangparatrang.com/p/blog-page\\_162.html](http://www.yangparatrang.com/p/blog-page_162.html).
17. ยางธรรมชาติ [cited 2016 May 23]. Available from: [http://rubber.oie.go.th/box/Article/1300/RIU-NR\\_1300\\_1.pdf](http://rubber.oie.go.th/box/Article/1300/RIU-NR_1300_1.pdf).
18. พัฒนกุล ว. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. งานนิทรรศการพืชสวน; เชียงใหม่; 2554.
19. แซ่ฮุย พ. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ; 2548.
20. ก้องพารากุล ส. เทคโนโลยีการตัดแปรงยางธรรมชาติและยางประยุกตี่ใช้. วารสารวิทยาศาสตร์ มช. 2556;41:567-81.
21. Baker, C.S.L., Gelling, IR. Epoxidized Natural Rubber. In Development of Rubber Technology. *Elsevier Applied Science*. 1987;4:87.

22. Davey, J.E., Loadman, M.J.R. A chemical demonstration of the randomness of epoxidation of natural rubber. *British Polymer Journal*. 1984;16:134-8.
23. ขจรไชยกูล ว. ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย; 2549.
24. แซ่ฮุย พ, สิริสิงห ช. ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ; ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ2550.
25. วัลคาไนเซชัน [cited 2016 13 May]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%A5%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B9%84%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%8A%E0%B8%B1%E0%B8%99>.
26. peroxide crosslink [cited 2016 13 May]. Available from: [https://www.akzonobel.com/polymer/our\\_products/trigonox\\_perkadox\\_crosslinking\\_peroxides/peroxide\\_vs\\_sulfur\\_crosslinking.aspx](https://www.akzonobel.com/polymer/our_products/trigonox_perkadox_crosslinking_peroxides/peroxide_vs_sulfur_crosslinking.aspx).
27. แซ่ฮุย พ. สารเคมียาง: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ; 2548.
28. อมรสิทธิ์ แ, เพชรสม อ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ2539.
29. UV-vis spectroscopy [cited 2016 17 May]. Available from: <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm>.
30. ศรีพงษ์ ล. อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี. ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2543.
31. เครื่อง UV-vis spectrophotometer [cited 2016 17 May]. Available from: [http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s\\_sangsrichan/05UV-Visible%20Spectroscopy-UV-Vis-292557.pdf](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_sangsrichan/05UV-Visible%20Spectroscopy-UV-Vis-292557.pdf).
32. การดูดกลืนแสง [cited 2016 17 May]. Available from: [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-8.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-8.pdf).
33. Eletromagnetic diagram [cited 2016 16 May]. Available from: <http://sipcontent.blogspot.com/2015/09/electromagnetic-frequency.html>.
34. UV-vis spectrophotometer [cited 2016 13 June]. Available from: <http://www.nordicscientific.com/Lab-Testing-Instruments/Bio-Pharma-Lab-Instruments/UV-VIS-Spectrophotometer>.

35. การวิเคราะห์พอลิเมอร์ [cited 2016 2 June]. Available from: [http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer\\_Chemistry/image\\_files/chapter5\\_3.html](http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_3.html).
36. การทดสอบยาง [cited 2016 2 June]. Available from: <http://www.srubber.net/NP-21415-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%9E%E0%B8%B1%E0%B8%92%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A0%E0%B8%B1%E0%B8%93%E0%B8%91%E0%B9%8C.html>.
37. ทดสอบแรงดึง [cited 2016 18 May]. Available from: [http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-6.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-6.pdf).
38. สมบัติกายภาพพอลิเมอร์ [cited 2016 18 May]. Available from: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656%20Chapter%206%20Polymer%20testing1.pdf>.
39. stress-strain curve [cited 2016 19 May]. Available from: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/products/metrics-and-basics-mechanics>.
40. stress strain curve [cited 2016 19 May]. Available from: <http://www.engineeringintro.com/mechanics-of-structures/stress-strain-curve-explanation/>.
41. การบวมตัว [cited 2016 20 May]. Available from: <http://chemsci.kku.ac.th/choosak/MD/polymermd.pdf>.
42. swelling [cited 2016 20 May]. Available from: <http://www.smithersrapra.com/testing-services/by-material/rubber-and-elastomer-physical-testing/volume-swell>.
43. Patlolla, A., Zunino, J., Frenkel, A.I., Iqbal, Z. Thermochromism in polydiacetylene-metal oxide nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry*. 2012;22(14):7028.
44. Chanaku, I. A., Traiphol, N., Traiphol, R. Controlling the reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites by varying alkyl chain length. *J Colloid Interface Sci*. 2013;389(1):106-14.

45. Riyapan, D., Riyajan, S., Kowalczyk, A. “Green synthesis” and characterization of a maleated epoxidized natural rubber latex. *Polymer Bulletin*. 2015;72(4):671-91.



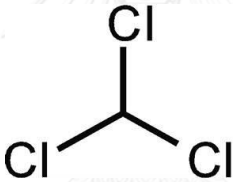


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY


ภาคผนวก ก  
สมบัติทั่วไปของสารเคมี

ตารางที่ ก-1 สมบัติทั่วไปของคลอโรฟอร์ม

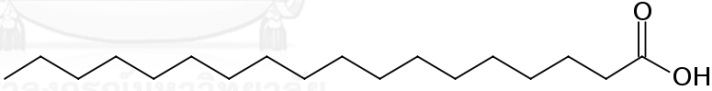
|                |   |
|----------------|---|
| ชื่อเคมี       | Chloroform<br>Trichloromethane<br>Trichloroform<br>Formyl trichloride<br>Methenyl trichloride<br>Methyl trichloride |
| สูตรเคมี       | $\text{CHCl}_3$   |
| โครงสร้าง      |                                  |
| น้ำหนักโมเลกุล | 119.37764 g/mol   |
| ความหนาแน่น    | 1.492 g/mL  |
| จุดเดือด       | 60.5-61.5°C   |
| จุดหลอมเหลว    | -63°C   |
| CAS Number     | 67-66-3   |



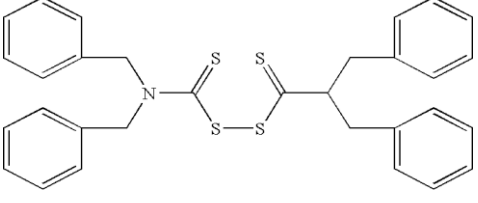
ตารางที่ ก-2 สมบัติทั่วไปของ 10,12- pentacosadiynoic acid (PCDA)

|                |  |
|----------------|--|
| ชื่อเคมี       | 10,12- pentacosadiynoic acid   |
| สูตรเคมี       | $C_{25}H_{42}O_2$  |
| โครงสร้าง      |  |
| น้ำหนักโมเลกุล | 374.60 g/mol   |
| จุดหลอมเหลว    | 65 °C  |
| CAS Number     | 66990-32-7   |

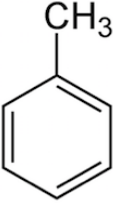
ตารางที่ ก-3 สมบัติทั่วไปของกรดสเตียริก

|                |  |
|----------------|--|
| ชื่อเคมี       | Stearic acid<br>Octadecanoic acid<br>Stearophanic acid                               |
| สูตรเคมี       | $CH_3(CH_2)_{16}COOH$  |
| โครงสร้าง      |  |
| น้ำหนักโมเลกุล | 284.48 g/mol   |
| ความหนาแน่น    | 0.9408 g/mL  |
| จุดหลอมเหลว    | 69.3 °C  |
| CAS Number     | 57-11-4  |

ตารางที่ ก-4 สมบัติทั่วไปของ Tetrabenzylthiuram disulfide (TBzTD)

|                |  |
|----------------|--|
| ชื่อเคมี       | Tetrabenzylthiuram disulfide   |
| สูตรเคมี       | $C_{30}H_{28}N_2S_4$   |
| โครงสร้าง      |  |
| น้ำหนักโมเลกุล | 544.81672 g/mol  |
| จุดหลอมเหลว    | 124 °C   |
| CAS Number     | 10591-85-2   |

ตารางที่ ก-5 สมบัติทั่วไปของโทลูอีน

|                |   |
|----------------|---|
| ชื่อเคมี       | Toluene<br>Methylbenzene<br>Toluol<br>Methylbenzol<br>Phenylmethane                 |
| สูตรเคมี       | $C_6H_5CH_3$  |
| โครงสร้าง      |  |
| น้ำหนักโมเลกุล | 92.13842 g/mol  |
| ความหนาแน่น    | 0.865 g/mL  |
| จุดเดือด       | 110-111°C   |
| จุดหลอมเหลว    | -93°C   |
| CAS Number     | 108-88-3  |

ตารางที่ ก-6 สมบัติทั่วไปของซิงก์ออกไซด์

|                |                                 |
|----------------|---------------------------------|
| ชื่อเคมี       | Zinc oxide<br>Oxozinc<br>Amalox |
| สูตรเคมี       | ZnO                             |
| น้ำหนักโมเลกุล | 81.3794 g/mol                   |
| ความหนาแน่น    | 5.606 g/mL                      |
| จุดหลอมเหลว    | 1975 °C                         |
| CAS Number     | 1314-13-2                       |



## ภาคผนวก ข

## มาตรฐานยางแท่งไทย (Standard Thai Rubber ,STR)

ตารางที่ ข-1 มาตรฐานยางแท่งชนิดต่าง ๆ

| Parameter                                | STR XL | STR 5L    | STR 5          | STR 5 CV               | STR 10           | STR 10 CV               | STR 20 | STR 20 CV            |
|--|--------|-----------|----------------|------------------------|------------------|-------------------------|--------|----------------------|
|  | น้ำยาง |           | น้ำยาง/ยางแผ่น |                        | ยางก้อน /ยางแผ่น |                         |        |                      |
| ปริมาณสิ่งสกปรก, % ไม่เกิน               | 0.02   | 0.04      | 0.04           | 0.04                   | 0.08             | 0.08                    | 0.16   | 0.16                 |
| ปริมาณเถ้า, % ไม่เกิน                    | 0.40   | 0.40      | 0.60           | 0.60                   | 0.60             | 0.60                    | 0.80   | 0.80                 |
| ปริมาณไนโตรเจน, % ไม่เกิน                | 0.50   | 0.60      | 0.60           | 0.60                   | 0.60             | 0.60                    | 0.60   | 0.60                 |
| ปริมาณสิ่งระเหย, % ไม่เกิน*              | 0.80   | 0.80      | 0.80           | 0.80                   | 0.80             | 0.80                    | 0.80   | 0.80                 |
| ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po), ไม่ต่ำกว่า  | 35     | 35        | 30             | -                      | 30               | -                       | 30     | -                    |
| ดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI), ไม่ต่ำกว่า | 60     | 60        | 60             | 60                     | 50               | 50                      | 40     | 40                   |
| สีเทียบด้วยโลวิบอนส์ ไม่เกิน             | 4.0    | 6.0       | -              | -                      | -                | -                       | -      | -                    |
| ความหนืด (Moony Viscosity)               | -      | -         | -              | **                     | -                | **                      | -      | **                   |
| รหัสชั้นใช้สี                            | ฟ้า    | เขียวอ่อน | เขียวอ่อน      | ตัวอักษรขาวบนพื้นเขียว | น้ำตาล           | ตัวอักษรขาวบนพื้นน้ำตาล | แดง    | ตัวอักษรขาวบนพื้นแดง |

\* เป็นขีดจำกัดสำหรับผู้ซื้อ ถ้าเป็นผู้ผลิตต้องมีปริมาณสิ่งระเหยไม่เกิน 0.05%

\*\* เป็นขีดจำกัดของผู้ผลิต คือ

STR 5CV มีค่าความหนืด 70 (+7,-5), 60 (+7,-5), 50 (+7,-5) และ 40 (+7,-5)

STR 10CV มีค่าความหนืด 60 (+7,-5)

STR 20CV มีค่าความหนืด 65 (+7,-5)

## ภาคผนวก ค

## สมบัติการบวมตัว

ตารางที่ ค-1 ค่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร

| ชั้นที่             | น้ำหนักก่อนแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | น้ำหนักหลังแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | ร้อยละการบวมตัว<br>(%) |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1                   | 0.0317                            | 0.2324                            | 633.12                 |
| 2                   | 0.1505                            | 1.1029                            | 632.82                 |
| 3                   | 0.1670                            | 1.1998                            | 618.44                 |
| ค่าเฉลี่ย           | -                                 | -                                 | 628.13                 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | -                                 | -                                 | ±8.39                  |

ตารางที่ ค-2 ค่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | น้ำหนักก่อนแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | น้ำหนักหลังแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | ร้อยละการบวมตัว<br>(%) |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1                   | 0.1094                            | 0.5809                            | 430.99                 |
| 2                   | 0.1071                            | 0.5790                            | 440.62                 |
| 3                   | 0.1082                            | 0.5798                            | 435.86                 |
| ค่าเฉลี่ย           | -                                 | -                                 | 435.82                 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | -                                 | -                                 | ±4.81                  |

ตารางที่ ค-3 ค่าการบวมตัวของฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | น้ำหนักก่อนแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | น้ำหนักหลังแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | ร้อยละการบวมตัว<br>(%) |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1                   | 0.0733                            | 0.4532                            | 518.28                 |
| 2                   | 0.0758                            | 0.4556                            | 501.05                 |
| 3                   | 0.0745                            | 0.4446                            | 496.78                 |
| ค่าเฉลี่ย           | -                                 | -                                 | 505.37                 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | -                                 | -                                 | ±11.38                 |

ตารางที่ ค-4 ค่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | น้ำหนักก่อนแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | น้ำหนักหลังแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | ร้อยละการบวมตัว<br>(%) |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1                   | 0.0834                            | 0.9000                            | 979.14                 |
| 2                   | 0.0925                            | 1.0600                            | 1045.95                |
| 3                   | 0.0941                            | 1.0728                            | 1040.06                |
| ค่าเฉลี่ย           | -                                 | -                                 | 1021.71                |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | -                                 | -                                 | ±36.99                 |

ตารางที่ ค-5 ค่าการบวมตัวของฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก  
ยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | น้ำหนักก่อนแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | น้ำหนักหลังแช่ในโทลูอีน<br>(กรัม) | ร้อยละการบวมตัว<br>(%) |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1                   | 0.0717                            | 1.0805                            | 1406.97                |
| 2                   | 0.1299                            | 1.9600                            | 1408.85                |
| 3                   | 0.1590                            | 2.2809                            | 1334.53                |
| ค่าเฉลี่ย           | -                                 | -                                 | 1383.45                |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | -                                 | -                                 | ±42.38                 |

## ภาคผนวก ง

## สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ง-1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตร

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.66517               | 1.12114               | 1.44845               | 1460.00        | 13.87                       |
| 2                   | 0.92363               | 1.31728               | 1.70758               | 1230.00        | 17.25                       |
| 3                   | 0.77321               | 1.13189               | 1.43631               | 1180.00        | 11.5                        |
| 4                   | 0.60688               | 0.94212               | 1.21294               | 1290.00        | 14.75                       |
| 5                   | 0.61983               | 1.06200               | 1.42468               | 1415.00        | 15.62                       |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.71774               | 1.11489               | 1.44599               | 1315.00        | 14.60                       |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.13239              | ±0.13596              | ±0.17557              | ±119.48        | ±2.13                       |

ตารางที่ ง-2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.34510               | 1.21231               | 1.70029               | 1206.25        | 21.29                       |
| 2                   | 0.54894               | 1.30590               | 1.73701               | 1050.00        | 18.92                       |
| 3                   | 0.62154               | 1.45675               | 1.93000               | 1009.40        | 17.85                       |
| 4                   | 0.48438               | 1.19285               | 1.58621               | 1193.75        | 22.58                       |
| 5                   | 0.43483               | 1.22679               | 1.69928               | 1125.00        | 20.00                       |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.48696               | 1.27892               | 1.73056               | 1116.88        | 20.13                       |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.10583              | ±0.10830              | ±0.12505              | ±86.58         | ±1.87                       |

ตารางที่ ง-3 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากน้ำ  
ยางผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.67815               | 1.46795               | 2.05095               | 1024.99        | 19.15                       |
| 2                   | 0.62859               | 1.37150               | 1.85444               | 1058.31        | 20.00                       |
| 3                   | 0.56838               | 1.43791               | 1.98071               | 1224.99        | 27.96                       |
| 4                   | 0.70476               | 1.55195               | 2.07217               | 1133.36        | 22.38                       |
| 5                   | 0.64443               | 1.48093               | 2.03993               | 1150.02        | 26.60                       |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.64486               | 1.46205               | 1.99964               | 1118.33        | 23.22                       |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.05199              | ±0.06568              | ±0.08797              | ±78.93         | ±3.92                       |

ตารางที่ ง-4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตร

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.51411               | 0.71437               | 0.80778               | 1011.76        | 1.83                        |
| 2                   | 0.51250               | 0.70168               | 0.75092               | 1170.60        | 2.42                        |
| 3                   | 0.32067               | 0.63202               | 0.67895               | 652.92         | 1.04                        |
| 4                   | 0.37552               | 0.56692               | 0.65096               | 864.72         | 1.42                        |
| 5                   | 0.30342               | 0.48639               | 0.55621               | 958.84         | 1.25                        |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.40525               | 0.62028               | 0.68897               | 931.77         | 1.59                        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.10218              | ±0.09538              | ±0.09634              | ±191.33        | ±0.55                       |



ตารางที่ ง-5 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.12513               | 0.61518               | 0.89220               | 1167.66        | 8.06                        |
| 2                   | 0.31556               | 0.66546               | 0.92994               | 841.20         | 4.25                        |
| 3                   | 0.33529               | 0.70733               | 0.99949               | 852.96         | 4.44                        |
| 4                   | 0.19809               | 0.66135               | 0.88909               | 1129.40        | 6.12                        |
| 5                   | 0.29366               | 0.67783               | 0.89594               | 1041.16        | 5.75                        |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.25355               | 0.66543               | 0.92133               | 1006.48        | 5.72                        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.08903              | ±0.03336              | ±0.04668              | ±152.62        | ±1.54                       |

ตารางที่ ง-6 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก  
ยางธรรมชาติผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.23367               | 0.54148               | 0.75776               | 1070.56        | 5.12                        |
| 2                   | 0.22050               | 0.68297               | 0.92253               | 1229.40        | 8.62                        |
| 3                   | 0.24720               | 0.71213               | 0.94843               | 1205.88        | 8.12                        |
| 4                   | 0.35968               | 0.78297               | 1.03151               | 1102.94        | 7.44                        |
| 5                   | 0.19164               | 0.64622               | 0.89083               | 641.16         | 2.00                        |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.25054               | 0.67315               | 0.91021               | 1049.99        | 6.26                        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.06438              | ±0.08908              | ±0.09993              | ±238.15        | ±2.44                       |

ตารางที่ ง-7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.36838               | 0.50626               | 0.41310               | 355.23         | 0.42                        |
| 2                   | 0.49937               | 0.55245               | 0.42194               | 365.81         | 0.53                        |
| 3                   | 0.52420               | 0.57572               | 0.59125               | 326.30         | 0.59                        |
| 4                   | 0.34893               | 0.46030               | 0.40970               | 457.86         | 0.42                        |
| 5                   | 0.29540               | 0.35771               | 0.30258               | 555.23         | 0.34                        |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.40726               | 0.49049               | 0.42771               | 412.09         | 0.46                        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.09948              | ±0.08645              | ±0.10365              | ±93.97         | ±0.10                       |

ตารางที่ ง-8 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | 0.45152               | 0.41626               | 0.42709               | 331.56         | 0.42                        |
| 2                   | 0.35273               | 0.36706               | 0.06661               | 223.67         | 0.34                        |
| 3                   | -                     | -                     | -                     | -              | 0.3                         |
| 4                   | 0.46580               | 0.45739               | -                     | 249.97         | 0.4                         |
| 5                   | 0.41625               | 0.40930               | 0.46205               | 368.38         | 0.45                        |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.42157               | 0.41250               | 0.31858               | 293.39         | 0.38                        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.05040              | ±0.03699              | ±0.21891              | ±67.89         | ±0.06                       |

ตารางที่ ง-9 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม Poly(PCDA)/ZnO/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก  
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรและผ่านการคงรูป

| ชั้นที่             | 100% โมดูลัส<br>(MPa) | 200% โมดูลัส<br>(MPa) | 300% โมดูลัส<br>(MPa) | ระยะยืด<br>(%) | ค่าความทนต่อแรงดึง<br>(MPa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1                   | -                     | -                     | -                     | -              | -                           |
| 2                   | 0.52239               | 0.51842               | 0.52197               | 400.00         | 0.54                        |
| 3                   | 0.41483               | 0.39951               | -                     | 200.31         | 0.40                        |
| 4                   | 0.49365               | -                     | -                     | 157.86         | 0.41                        |
| 5                   | 0.42739               | 0.38898               | 0.45473               | 305.26         | 0.42                        |
| ค่าเฉลี่ย           | 0.46456               | 0.43564               | 0.48835               | 265.86         | 0.44                        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ±0.05178              | ±0.07189              | ±0.04754              | ±108.79        | ±0.06                       |

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิภาวี ปัญญานันทกิตต์ เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ.2532 ที่อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปี 2558

#### ผลงานวิชาการ

Wipawee Panyanuntakit, KanoktipBoonkerd and Nisanart Traiphol. “Thermochromic response of polydiacetylene/zinc oxide/natural rubber nanocomposite films” Proceeding of the 10th International Symposium in Science and Technology 2015, August 31 – September 2, 2015, Bangkok, Thailand.