

การพัฒนาฟิล์มโพลีไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตเป็นตัวรับรู้อุณหภูมิ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE/NATURAL RUBBER NANOCOMPOSITE FILMS AS THERMAL SENSOR



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยาง
	ธรรมชาตินาโนคอมพอสิตเป็นตัวรับรังสีอุณหภูมิจ
โดย	น.ส.อัญญา พวงสุวรรณ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະชีมา)

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

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

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริญญา แก้ววัฒนนะ)



# # 5872079623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: ELECTRON BEAM RADIATION, NATURAL RUBBER, VULCANIZATION, POLYDIACETYLENE

Aunphicha

Phuangsuwan

:

DEVELOPMENT OF POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE/NATURAL RUBBER NANOCOMPOSITE FILMS AS THERMAL SENSOR. Advisor: Asst. Prof. Prof. Kanoktip Boonkerd Co-advisor: Assoc. Prof. Prof. Nisanart Traiphol

The objective of this study was to develop the suitable curing for preparing poly(PCDA)/ZnO/rubber nanocomposites film with practical tensile strength and solvent resistance but still possessing thermochromic response. For sulfur curing system, it was found that amount of accelerator TBzTD and curing temperature and time played an important role on the degree of curing. When curing at 100 °C for 3 hours and adding 2 and 4 phr of TBzTD for NR and ENR film, the rubber film with highest tensile strength and solvent resistance can be obtained. For poly(PCDA)/ZnO/rubber nanocomposites films prepared by the above condition, the films still showed blue color similar to the pure poly(PCDA)/ZnO nanocomposites but slightly opaque. UV-vis absorption spectrum of poly(PCDA)/ZnO nanocomposites embedded inside the rubber matrix were similar to those of pure one. When poly(PCDA)/ZnO/rubber nanocomposite films prepared NR and ENR solution were heated, the initial thermochromic response was observed at 80 °C which was 20 °C higher than the pure poly(PCDA)/ZnO nanocomposites. However, the irreversibility in color transition was unobviously different. For electron beam curing system, it was found that the obtained films had higher tensile strength and solvent resistance than the ones obtained by sulfur curing. For rubber films prepared from the solution without adding any chemical, the optimum curing condition was EB radiating at 250 kGy then heating at 50 °C for 1 hour. For rubber films prepared from the compounded NR latex, the optimum curing condition was EB radiating at 20 kGy then heating at 50 °C for 1 hour. Both poly(PCDA)/ZnO/NR and poly(PCDA)/ZnO/ENR nanocomposite films from the solutions also showed the initial thermochromic response at 80 °C. However, poly(PCDA)/ZnO/NR nanocomposite films from the compounded latex showed the initial thermochromic response at 60 °C. Even though the films from compounded latex gave highest tensile strength, when heating up to 75 °C and above, their color changed permanently. Therefore, from this study it was suggested that to prepare poly(PCDA)/ZnO/rubber nanocomposites films for using as a thermochromic sensing film, the curing by EB radiation was superior to the sulfur curing. This was because the film can be formed without adding any chemical, giving clear blue color film. Moreover, poly(PCDA)/ZnO/rubber nanocomposite films had highest strength and solvent resistance.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer  
Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล ทุนวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาแนวทางการดำเนินงานวิจัย แนวทางการแก้ไขปัญหา และสนับสนุนในการจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนการเอาใจใส่ดูแล จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และสนับสนุนในการจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
ทุนส่งเสริมและสนับสนุนกลุ่มวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช กลุ่มขับเคลื่อนการวิจัย (Special Task Force for Activating Research (STAR))

เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทำวิจัย เจ้าหน้าที่ศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องอนุภาคอิเล็กตรอนบีมพลังงานสูงและเจ้าหน้าที่แผนกวิจัยและพัฒนาพอลิเมอร์ บริษัทวิจัยและพัฒนาพอลิเมอร์ จำกัด ซึ่งคอยให้คำปรึกษา และอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง

รุ่นพี่ เพื่อน และบุคลากร ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ป้า และพี่สาว ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสรรค์สร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

อันภิษา พวงสุวรรณ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้ .....	3
บทที่ 2 .....	4
วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 พอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene, PDA).....	4
2.1.1 สมบัติและกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน .....	5
2.1.2 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน .....	6
2.2 พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมโพสิต (Polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite, PDA/ZnO).....	8
2.3 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR).....	9
2.3.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex).....	10

2.3.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ.....	10
2.3.1.2 ส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC).....	11
2.3.1.3 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non rubber content).....	13
2.3.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ .....	13
2.3.2.1 น้ำยางข้น (Concentrated latex) .....	14
2.3.2.2 ยางธรรมชาติแห้ง (Dry natural rubber).....	15
2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ.....	16
2.3.4 การตัดแปรงยางธรรมชาติ (Modified natural rubber).....	17
2.3.4.1 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) .....	19
2.3.5 ยางคงรูป (Cured rubber).....	21
2.3.5.1 การคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur cured).....	22
2.3.5.2 การคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (Peroxide cured) .....	22
2.3.5.3 การคงรูปด้วยรังสี (Radiation cured).....	23
2.3.6 ยางคอมพาวด์ (Rubber compound).....	25
2.3.6.1 การออกสูตรเคมียาง (Compounding formulation).....	25
2.3.6.2 สารเคมีสำหรับยาง.....	26
2.4 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์ .....	31
2.4.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy) .....	31
2.4.2 ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) .....	34
2.4.3 การทดสอบการบวมตัว (Swelling test).....	35
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 .....	44
วิธีการดำเนินการวิจัย .....	44
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47



3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 48

3.3 ขั้นตอนการทดลอง ..... 48

    3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ..... 48

        3.3.1.1 การเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน ..... 48

        3.3.1.2 การเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน ..... 49

        3.3.1.3 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ..... 49

        3.3.1.4 ศึกษาสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในรูปของแข็ง ..... 50

    3.3.2 การเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกัมมะถัน ..... 50

    3.3.3 การเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ..... 53

    3.3.4 การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มบางและฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ..... 58

    3.3.5 การศึกษาการบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ของฟิล์มบางและฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ..... 59

    3.3.6 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต... 59

    3.3.7 การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ..... 60

บทที่ 4 ..... 61

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง ..... 61

    4.1 การดูดกลืนแสงและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ..... 61

4.1.1 การดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและไนโทลูอิน .....	61
4.1.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เมื่ออยู่ในรูปของฟิล์ม .....	63
4.2 ผลของปริมาณสารคงรูปและภาวะที่ใช้ในการคงรูปอย่างต่อเนื่องเชิงกลและระดับการบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยาง .....	65
4.2.1 ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน .....	66
4.2.1.1 ฟิล์มยางธรรมชาติ .....	66
4.2.1.2 ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....	69
4.2.2 ระบบการคงรูปด้วยการฉายรังสีลำอิเล็กตรอน .....	75
4.2.2.1 ฟิล์มยางธรรมชาติจากสารละลายยางธรรมชาติ .....	75
4.2.2.2 ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....	78
4.2.2.3 ฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร .....	81
4.3 การดูดกลืนแสงและพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต .....	85
4.3.1 การดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต .....	90
4.3.1.1 การดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกำมะถัน .....	90
4.3.1.2 การดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน .....	92
4.3.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต .....	94
4.3.2.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกำมะถัน .....	94
4.3.2.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน .....	99

บทที่ 5 .....	108
สรุปผลการวิจัย .....	108
5.1 พิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ค้งรูปด้วยกำมะถัน.....	108
5.2 พิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ค้งรูปด้วยรังสีลำอิเล็คตรอน .....	109
บรรณานุกรม.....	111
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก.....	117
สมบัติเชิงกล.....	117
ภาคผนวก ข.....	143
สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลาย.....	143
ประวัติผู้เขียน.....	154



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA).....	4
รูปที่ 2.2 การเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลโดยใช้ PCDA เป็นสารตั้งต้น.....	5
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ.....	6
รูปที่ 2.4 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน (ก) แบบผันกลับไม่ได้ และ (ข) แบบผันกลับได้ เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน .....	7
รูปที่ 2.5 การเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนของพอลิไดแอเซทิลีนกับที่ผิวของ อนุภาคซิงก์ออกไซด์ .....	8
รูปที่ 2.6 การเตรียมพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต.....	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4 polyisoprene) .....	10
รูปที่ 2.8 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ.....	12
รูปที่ 2.9 พันธะคู่ (C=C) และตำแหน่งแอลิลลิคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	18
รูปที่ 2.10 การตัดแปรงยางธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ.....	18
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์.....	19
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ .....	20
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอิพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติอิพอกไซด์ .....	20
รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาคงรูปร่างด้วยกำมะถัน.....	22
รูปที่ 2.15 กระบวนการแตกตัวเป็นประจุของอะตอมสารที่ถูกรังสี .....	23
รูปที่ 2.16 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law).....	32
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง .....	34
รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) .....	35
รูปที่ 2.19 การตอบสนองของฟิล์ม PDA/PVA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	36

รูปที่ 2.20	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลิบริสุทธี และ (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เมื่อทำการปรับค่า pH ของสารแขวนลอย ในตัวกลางที่เป็นน้ำ.....	37
รูปที่ 2.21	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลิบริสุทธี และ (ข) poly (PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารแขวนลอย ที่ทำการเติมเอทานอล เข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	37
รูปที่ 2.22	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลิบริสุทธี (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวกลางที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ และ (ค) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ในการเพิ่มและลดอุณหภูมิระหว่าง 25 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส.....	38
รูปที่ 2.23	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลิบริสุทธี (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวกลางที่เป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ค) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ในการเพิ่ม และลดอุณหภูมิต่าง ๆ และ (ง) การเปลี่ยนสี ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิห้อง.....	39
รูปที่ 2.24	โครงสร้างของมอนอเมอร์ไดแอเซทิลีน 5,7-hexadecadiynoic acid (HDDA), 10,12-tricosadiynoic acid, (TCDA) และ 10,12-pentacosadiynoic (PCDA).....	40
รูปที่ 2.25	การตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ก) poly(PCDA) เวสเซลิบริ (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต (ค) poly(TCDA) เวสเซลิบริ (ง) poly(TCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และ (จ) poly(HDDA)/ZnO .....	40
รูปที่ 2.26	พฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่าง ๆ (ก) toluene + PS, (ข) toluene + PMMA, (ค) toluene + PE (ง) water + PVA ที่ อุณหภูมิ 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส และหลังเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง .....	41
รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยระบบกัมมะถัน.....	45
รูปที่ 3.2	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	46
รูปที่ 3.3	แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและไนโตรเจน .....	51

รูปที่ 3.4 เครื่องเร่งอิเล็กตรอนบีมพลังงานสูง (electron beam) รุ่น MB 20-16 .....	53
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength tester) Zwick/Roell รุ่น Z010.....	58
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างทดสอบรูปดัมเบลล์ของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต .....	59
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและไนโทลูอิน.....	63
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส.....	64
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การผันกลับได้ของสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง .....	64
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อความทนต่อแรงดึงของ ฟิล์มยางธรรมชาติ .....	66
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อร้อยละการบวมตัวไนโทลูอินของ ฟิล์มยางธรรมชาติ .....	67
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ.....	68
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อร้อยละการบวมตัวไนโทลูอินของ ฟิล์มยางธรรมชาติ.....	69
รูปที่ 4.8 การปรากฏสีแดงของแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต เมื่อคงรูปที่ อุณหภูมิ 110 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	69
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อความทนต่อแรงดึงของ ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....	70
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อร้อยละการบวมตัวไนโทลูอินของ ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....	71
รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อความทนต่อแรงดึงของ .....	72
รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อร้อยละการบวมตัวไนโทลูอินของ .....	72

รูปที่ 4.13 (ก) ความทนต่อแรงดึงและ (ข) ร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน.....	73
รูปที่ 4.14 ผลการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ต่อความทนแรงดึงของฟิล์ม ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน .....	74
รูปที่ 4.15 ผลของการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ต่อร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนของ ฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน.....	75
รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ .....	76
รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติ .....	78
รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....	79
รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ .....	80
รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตร.....	82
รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตร.....	83
รูปที่ 4.22 ผลการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตต่อความทนแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนและ อบให้ความร้อน.....	84
รูปที่ 4.23 ผลการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตต่อร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนของ ฟิล์มยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่คงรูปด้วยรังสี ลำอิเล็กตรอนและอบให้ความร้อน .....	85

รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ใน  
 สารละลายยางธรรมชาติที่เติมสารคงรูปด้วยกำมะถันและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR  
 นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปแล้วเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO  
 นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน..... 91

รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ใน  
 สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เติมสารคงรูปด้วยกำมะถันและฟิล์ม  
 poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปแล้วเทียบกับสารแขวนลอย  
 poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน..... 91

รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต  
 ในสารละลายยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต  
 ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพ  
 อสิตในโทลูอีน ..... 93

รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ใน  
 สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต  
 ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO  
 นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน..... 93

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR  
 นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและคงรูปด้วยกำมะถัน..... 95

รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียม  
 จากสารละลายยางธรรมชาติและคงรูปด้วยกำมะถัน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่  
 อุณหภูมิห้อง ..... 96

รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR  
 นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และ  
 คงรูปด้วยกำมะถัน ..... 97

รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต  
 ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และคงรูปด้วยกำมะถัน เมื่อได้รับความ  
 ร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง..... 98



- รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (ก) 1.65 phr (ข) 0.83 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและ คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ..... 100
- รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (ก) 1.65 phr (ข) 0.83 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและคกรูปด้วยรังสี ลำอิเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง..... 102
- รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (ก) 2.49 phr (ข) 1.24 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ อีพอกไซด์และคกรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน..... 103
- รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (ก) 2.49 phr (ข) 1.24 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และคกรูป ด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง..... 104
- รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและคกรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ..... 106
- รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและคกรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้ง ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง..... 107

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำยางธรรมชาติโดยเฉลี่ย .....	11
ตารางที่ 2.2 การใช้งานยางธรรมชาติอิพอกไซด์ .....	21
ตารางที่ 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	47
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	48
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนต่าง ๆ สารคงรูปสำหรับการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติแห้ง.....	52
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนต่าง ๆ สารคงรูปสำหรับการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ .....	53
ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรถุงมือแพทย์ .....	57
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากการคงรูปด้วย กำมะถัน .....	86
ตารางที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากการคงรูปด้วย รังสีลำอิเล็กตรอน.....	87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาวัสดุสำหรับใช้ในเทคโนโลยีตรวจจับ (Sensing technology) ได้รับความนิยมนับเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้สารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ เช่น พอลิไดแอเซทิลีน-เวลิเคิล เนื่องจากพอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้ง่ายในน้ำผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์โดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตภายใต้ภาวะที่เหมาะสม สมบัติเด่นของพอลิไดแอเซทิลีน คือสามารถเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงได้เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือเกิดการจับตัวกับสารบางชนิด ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยรอบ การเปลี่ยนสีเนื่องจากสภาพความเป็นกรด-เบสที่เปลี่ยนไป การเปลี่ยนสีเมื่ออยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ การเปลี่ยนสีเนื่องจากได้รับความเค้นเชิงกล หรืออาจเกิดการเปลี่ยนสีเนื่องจากโมเลกุลหรือไอออนต่าง ๆ เป็นต้น โดยกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลนั้นเกิดขึ้นได้เนื่องจากเมื่อโมเลกุลได้รับสิ่งกระตุ้นจะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกเกิดการแตกออกส่งผลทำให้สายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัวเป็นผลให้อิเล็กตรอนในสายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากจึงต้องใช้ระดับพลังงานที่สูงเพิ่มขึ้นการปรากฏสีของโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตจึงต่างออกไป ด้วยเหตุนี้ทำให้พอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลมีความน่าสนใจสำหรับประยุกต์เป็นตัวรับรู้เพื่อตรวจจับอุณหภูมิ โดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนสีซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า<sup>(1, 2)</sup> เบื้องต้นพอลิไดแอเซทิลีนที่เตรียมได้จะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยในน้ำซึ่งไม่สะดวกในการนำไปใช้งานจึงมีการเตรียมให้อยู่แบบของแผ่นฟิล์มโดยใช้พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนให้อยู่ในรูปแผ่นฟิล์มสำหรับตรวจจับความร้อนโดยใช้ยางธรรมชาติเป็นเมทริกซ์ทำให้ได้แผ่นฟิล์มตรวจจับที่มีความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามในการใช้งานยางธรรมชาติจำเป็นต้องทำให้เกิดเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นแบบร่างแหหรือที่เรียกว่าเทอร์โมเซตเสียก่อนทั้งนี้เพื่อให้ยางมีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึงความทนต่อการสึกหรอและความทนต่อการฉีกขาดเกิดที่สูงขึ้น ลดการบวมตัวในตัวทำละลายลงอีกทั้งทำให้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและรักษารูปร่างได้ดี ซึ่งการคงรูปร่างสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกและถูกที่สุดคือ การคงรูปร่างด้วยกำมะถัน แต่การใช้กำมะถันเป็นสารคงรูปร่าง จำเป็นต้องเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เทตระเมทิลไทยูรามไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) หรือ เทตระเบนซิลไทยูรามไดซัลไฟด์ (Tetrabenzylthiuram disulfide, TBzTD) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ ซิงค์ออกไซด์และ

กรดสเตียริก และต้องมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งความร้อนที่ให้เพื่อให้ให้ยางเกิดการคงรูปต้องไม่ทำให้สีของพอลิไดอะเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร จากข้อจำกัดข้างต้นทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้จากการวิจัยก่อนหน้านี้มีปริมาณการคงรูปที่ต่ำ แผ่นฟิล์มเกิดการบวมตัวค่อนข้างสูงเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและมีสมบัติความทนต่อแรงดึงต่ำ

นอกจากนี้การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยระบบกัมมะถันยังมีระบบวัลคาไนซ์โดยใช้วิธีการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น การฉายรังสีลำอิเล็กตรอนซึ่งกระบวนการคงรูปด้วยรังสีนั้นสามารถทำให้โมเลกุลของยางเกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ด้วยพันธะคาร์บอน-คาร์บอนกระบวนการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน (Electron Beam, EB) เป็นเทคนิคที่ให้อัตราเร็วในการคงรูปสูงมาก ซึ่งข้อดี คือไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานต่ำ ไม่ก่อให้เกิดรังสีตกค้าง สามารถควบคุมการผลิตลำอิเล็กตรอนได้ รังสีลำอิเล็กตรอนมีพลังงานในการทะลุทะลวงสูงจึงทำให้สามารถคงรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาให้เกิดความสม่ำเสมอมากกว่าการคงรูปด้วยระบบกัมมะถัน<sup>(3)</sup>

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและพัฒนาระบบคงรูปเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มยางพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นโดยจะทำการปรับปรุงสารเคมีในการคงรูปด้วยกัมมะถันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และศึกษาแนวทางเลือกการคงรูปยางด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ทั้งจากสารละลายยางธรรมชาติ สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาแผ่นฟิล์มสำหรับเป็นวัสดุตรวจวัดอุณหภูมิต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาสูตรสารประกอบยางที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มยางพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต
2. หาภาวะการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนเพื่อให้ยางธรรมชาติเกิดการคงรูปที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มยางพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

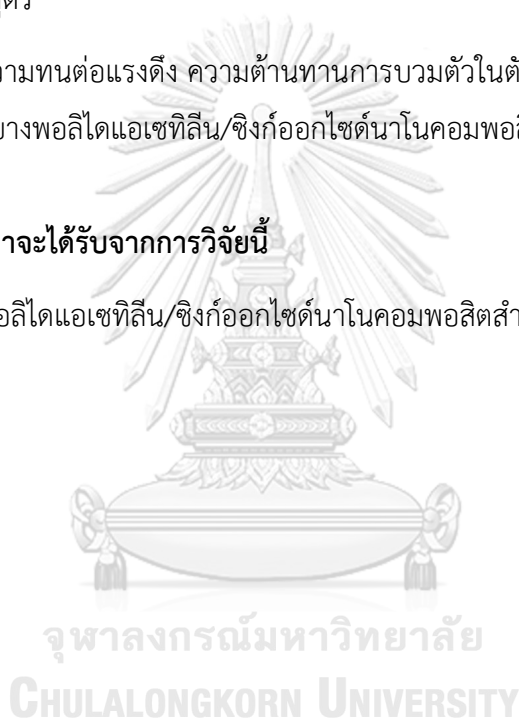
1. พัฒนาสูตรสารประกอบยางและศึกษาหาภาวะในการคงรูปยางซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ นาโนคอมพอสิต จากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปยางด้วยการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณรังสี อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต จากสารละลายยางธรรมชาติ สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และ น้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

3. ทดสอบความทนต่อแรงดึง ความต้านทานการบวมตัวในตัวทำละลาย และการตอบสนองต่ออุณหภูมิ ของฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้ฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตสำหรับใช้เป็นตัวรับรู้อุณหภูมิ



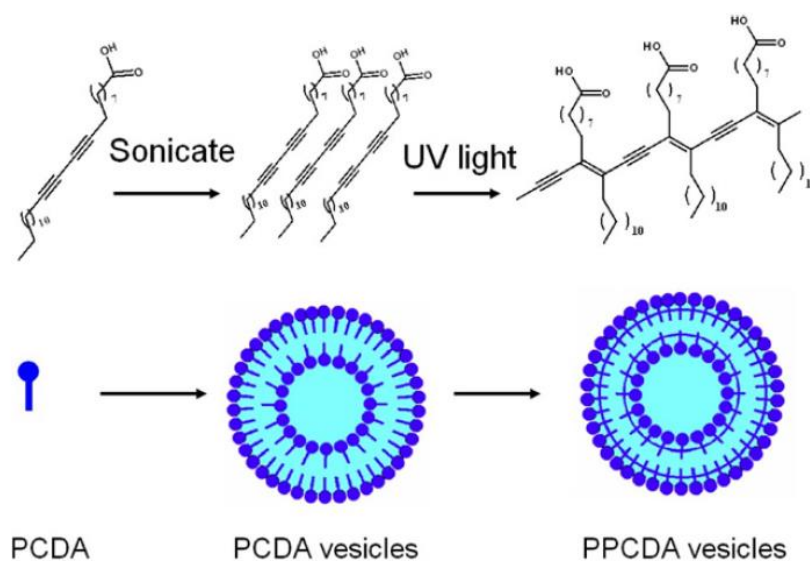
## บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

### 2.1 พอลิไดอะเซทิลีน (Polydiacetylene, PDA)

พอลิไดอะเซทิลีนเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่อยู่ในลักษณะของอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตร มีสมบัติเชิงแสงที่โดดเด่น โดยเฉพาะสมบัติการเปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งสมบัตินี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์มีแนวคิดที่จะนำพอลิไดอะเซทิลีนมาประยุกต์ใช้เป็นตัว รับรู้ ด้านการตรวจวัดตัวอย่างมอนอเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์เป็นพอลิไดอะเซทิลีน ได้แก่ 10,12-เพนตะโคซะไดอานโนอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic acid, PCDA) มีสูตรโมเลกุล  $C_{25}H_{42}O_2$  ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากรูปจะเห็นได้ว่าไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์เป็นแอมฟิฟิลิกโมเลกุล (amphiphilic molecule) ซึ่งในโครงสร้างของโมเลกุลจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่มีขั้ว (hydrophilic head) แสดงสมบัติชอบน้ำ และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic tail) แสดงสมบัติ ไม่ชอบน้ำ ทำให้เมื่ออยู่ในน้ำโมเลกุลของไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เวสิเคิล (bilayer vesicle) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมที่ประกอบด้วยโมเลกุลแอมฟิฟิลิก 2 ชั้น โดยอาศัยกระบวนการอัลตราโซนิกส์ (sonication) หรือการเขย่า (shaking) เข้าร่วมด้วย จึงทำให้เกิดลักษณะเวสิเคิลขึ้นมาได้ ซึ่งโมเลกุลแอมฟิฟิลิกจะหันปลายด้านที่ไม่มีขั้วเข้าหากัน และหันปลายด้านที่มีขั้วเข้าสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำ จากนั้นเมื่อฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตภายใต้ภาวะที่เหมาะสมจะเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้ พอลิ(10,12-เพนตะโคซะไดอานโนอิกแอซิด) (poly 10,12-pentacosadiynoic acid, PPCDA) ขึ้นโดยพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่เตรียมได้จะมี สีน้ำเงินเข้ม แสดงดังรูปที่ 2.2



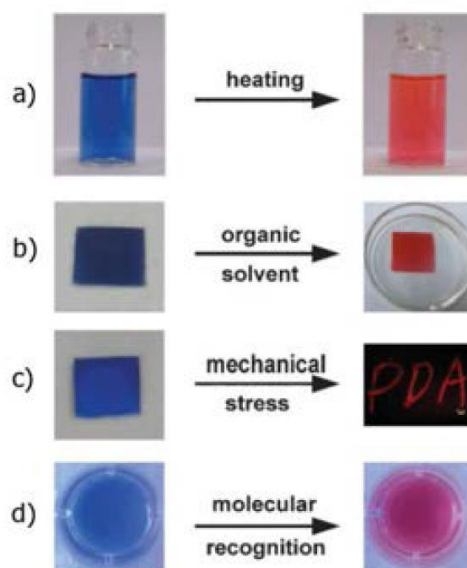
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA)



รูปที่ 2.2 การเตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลโดยใช้ PCDA เป็นสารตั้งต้น<sup>(4)</sup>

### 2.1.1 สมบัติและกลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีน

พอลิไดอะเซทิลีนมีสมบัติเด่นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก คือ สมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก เช่น ความร้อน ความเค้นเชิงกล ความเป็นกรด-เบส หรือตัวทำละลาย เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยปกติแล้วเมื่อพอลิไดอะเซทิลีนได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงโดยค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดรูปแบบสีฟ้า (blue form) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 620 ถึง 640 นาโนเมตร และรูปแบบสีแดง (red form) ในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นได้ จากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดคลื่นและรูปร่างของสเปกตรากการดูดกลืนแสง<sup>(5)</sup>



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนสีของพอลิโดแอะเซทิลีนเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ<sup>(6)</sup>

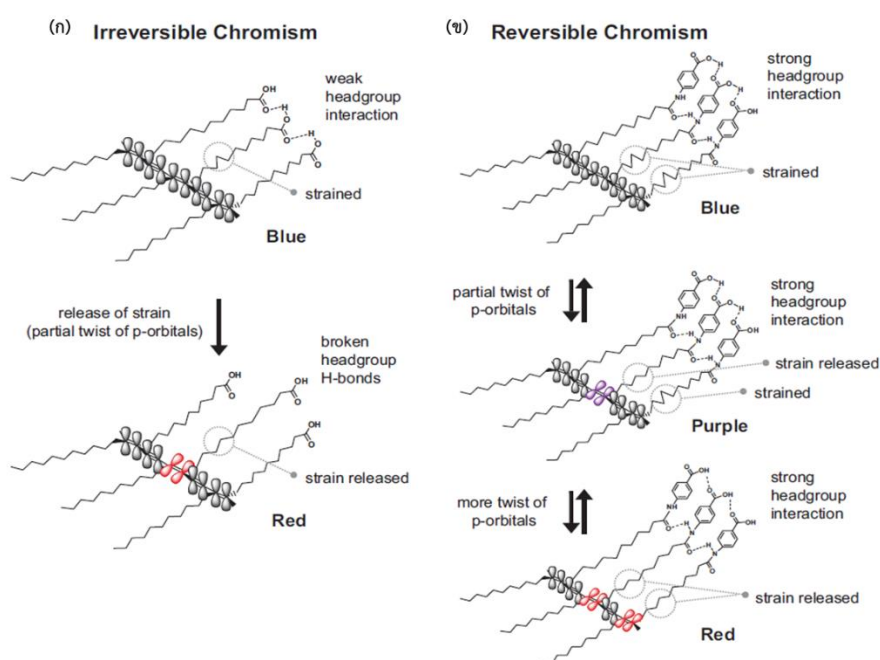
### 2.1.2 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิโดแอะเซทิลีนเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน<sup>(2)</sup>

กลไกการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ของพอลิโดแอะเซทิลีนเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อนแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าการเกิดอันตรกิริยาที่ส่วนหัว (head group) ของสายโซ่ เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่างส่วนหัวอยู่ติดกัน เป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสายโซ่เมทิลีนในโครงสร้างของพอลิโดแอะเซทิลีน ซึ่งเกิดการจัดเรียงตัวอย่างบิดเบี้ยวของโครงสร้างได้ในขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต จึงทำให้เกิดความเครียดเชิงกลขึ้นมา ดังนั้นเมื่อพอลิโดแอะเซทิลีนได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวเกิดการแตกออกส่งผลให้สายโซ่หลักเกิดการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลทำให้โครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัวและระยะคอนจูเกตลดลง เมื่ออิเล็กตรอนในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสถานะของอิเล็กตรอน ทำให้มีการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป จึงเกิดการเปลี่ยนสีของพอลิโดแอะเซทิลีนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง

กลไกการเปลี่ยนสีในรูปแบบผันกลับได้ของพอลิโดแอะเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อนแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าพอลิโดแอะเซทิลีนมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างส่วนหัวมีความแข็งแรงมาก สามารถรูปร่างอยู่ได้แม้จะได้รับความร้อนสูงมากก็ตาม โดยเมื่อมีการให้ความร้อนจนทำให้สารละลายพอลิโดแอะเซทิลีนเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง ความเครียดเชิงกลที่โซ่ข้างจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นสาเหตุให้สายโซ่หลักที่มีลักษณะแบบ



คอนจูเกตเกิดการบิดตัวไปบางส่วน และเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นสายโซ่หลักจะมีการบิดตัวมากขึ้นจนระยะคอนจูเกตลดลง จึงทำให้สถานะอิเล็กทรอนิกส์ทรอนและการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้พอลิไดแอเซทิลีนเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีแดงโดยไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่ส่วนหัว ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องจึงสามารถเปลี่ยนจากเฟสสีแดงกลับเป็นสีน้ำเงินได้ง่าย

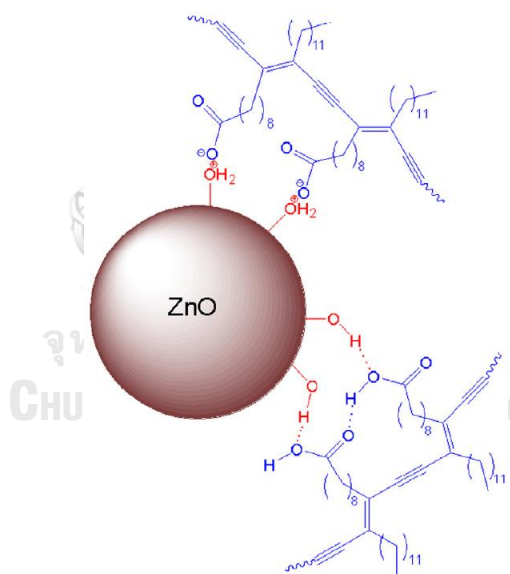


รูปที่ 2.4 กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน (ก) แบบผันกลับไม่ได้ และ (ข) แบบผันกลับได้ เมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน<sup>(2)</sup>

จากกลไกการเปลี่ยนสีที่ได้กล่าวมาข้างต้นการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำที่พื้นผิวของเวสสิเคิลจะส่งผลต่อสมบัติการเปลี่ยนสี ดังนั้นการเติมอนุภาคระดับนาโนเข้าไปในระบบพอลิไดแอเซทิลีนเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างส่วนหัวตัวอย่างเช่น การเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต มีพฤติกรรมเปลี่ยนสีที่ต่างไปจากพอลิไดแอเซทิลีนทั่วไป

## 2.2 พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมโพสิต (Polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite, PDA/ZnO)<sup>(7, 8)</sup>

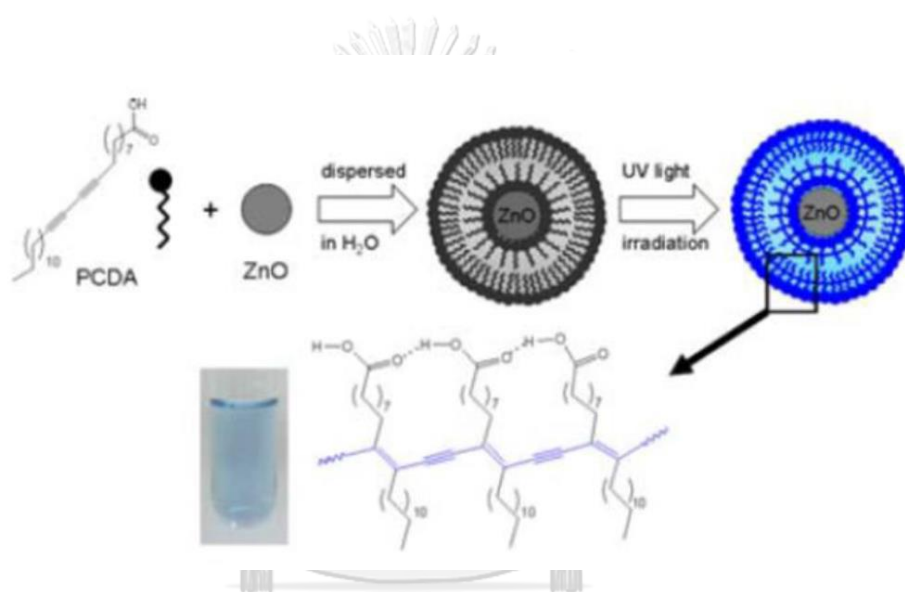
การเติมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมโพสิต เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเตรียมสารแขวนลอย ทั้งนี้นอกจากจะช่วยพัฒนาความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์แล้วยังทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแตกต่างไปจากเดิม ตัวอย่างของอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ที่น่าสนใจ คือ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO) โดยประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในน้ำจะประกอบไปด้วยกลุ่มของ Zn-OH, Zn-OH<sub>2</sub><sup>+</sup> และ Zn-O<sup>-</sup> โดยสัดส่วนของหมู่เหล่านี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย ถ้าค่าพีเอช (pH) น้อยกว่า 7 ที่ผิวของซิงก์ออกไซด์จะมีหมู่ Zn-OH และ Zn-OH<sub>2</sub><sup>+</sup> อยู่เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ที่ส่วนหัวจะ สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ได้ โดยเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนของพอลิไดอะเซทิลีนกับที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์<sup>(8)</sup>

การเตรียมพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมโพสิต เริ่มต้นจากการเตรียมไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ให้มีความบริสุทธิ์ โดยการนำไปละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำผงซิงก์ออกไซด์ผสมกับน้ำ และนำไปอัลตราโซนิกส์โพรบ (probe) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี แล้วผสมไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์กับ

สารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์เข้าด้วยกัน ทำการอัลตราโซนิกส์ที่อุณหภูมิ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยในขั้นตอนนี้ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการกระจายตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ และเริ่มเกิดการจัดเรียงตัวบริเวณของผิวของซิงก์ออกไซด์เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (ionic interaction) และพันธะไฮโดรเจน ทำให้ไดอะเซทิลีนสามารถยึดเกาะอยู่บนผิวของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ได้ นำสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตภายใต้ภาวะที่เหมาะสมไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการรวมการพอลิเมอไรเซชันขึ้นและได้เป็นพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 2.6



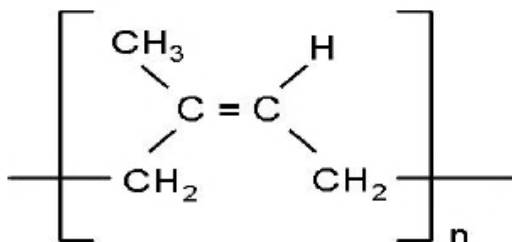
รูปที่ 2.6 การเตรียมพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต<sup>(7)</sup>

เนื่องจากพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้ส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปแบบของสารแขวนลอยจึงทำให้มีข้อจำกัด เช่น อายุการใช้งาน และความเสถียรในการเปลี่ยนสี เพราะเกิดการตกตะกอนของอนุภาคในสารละลาย ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาการเตรียมพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ให้อยู่ในรูปแบบฟิล์มโดยการฝังตรึง (embedding) พอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ลงในเมทริกซ์ต่าง ๆ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinylalcohol, PVA) และยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) เป็นต้น

### 2.3 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)<sup>(9)</sup>

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยมีสูตรทางเคมี คือ  $C_5H_8$  มีชื่อทางเคมีว่า ไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คือประมาณ 50,000 ถึง

3,000,000 และมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้างจึงทำให้ยางธรรมชาติมีลักษณะกระบวนการแปรรูปที่ดีเลิศ (excellent process behavior)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4 polyisoprene)

อย่างไรก็ตามจากสูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติจะเห็นว่าเป็นไฮโดรคาร์บอนล้วนจึงทำให้ไม่มีสภาพความเป็นขั้ว และเนื่องจากแต่ละหน่วยของไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) และหมู่อัลฟาเมทธิลีน ( $\alpha$ -methylene group) จึงทำให้พันธะคู่ของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาทำให้สามารถออกซิไดซ์ได้ง่าย และทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนต่อการเกิดออกซิเดชัน

### 2.3.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)<sup>(10-13)</sup>

น้ำยางสดที่ได้มาจากการกรีดจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นเหมือนน้ำนมมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 ถึง 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบส 6.5 ถึง 7.0 ความหนืดของน้ำยางมีค่าประมาณ 12 ถึง 15 เซนติพอยส์ (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 เซนติพอยส์) และอาจมีค่าแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยางนอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกเช่นพันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง เป็นต้น

#### 2.3.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

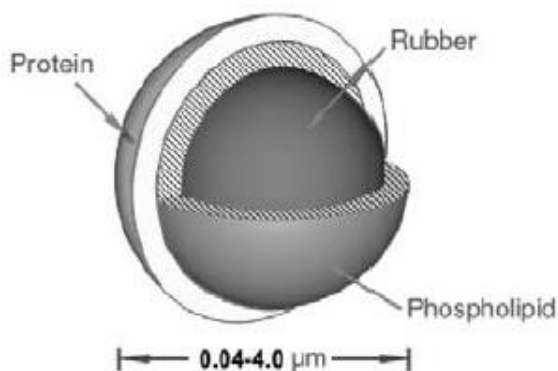
น้ำยางธรรมชาติ เป็นสารไม่บริสุทธิ์ มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ในน้ำยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง ร้อยละ 35 และ ส่วนที่ไม่ใช่ยาง ร้อยละ 65

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำยางธรรมชาติโดยเฉลี่ย<sup>(13)</sup>

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27-48
เนื้อยางแห้ง	25-45
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-1.25
เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

2.3.1.2 ส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ส่วนของเนื้อยางแห้งมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้

1. อนุภาคยาง ในน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยอนุภาคยางขนาดต่าง ๆ อนุภาคยางถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมัน และโปรตีน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยโปรตีนนี้จะอยู่ชั้นนอก และอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.5 โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วยสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปค่อนข้างกลมหรือคล้ายลูกแพร์ มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมากอยู่ระหว่าง 0.04 ถึง 4 ไมครอน อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดเกิน 0.4 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของต้นยางที่เจริญเติบโตเต็มที่ที่มีค่าประมาณ 1 ไมครอน (หรือ 1,000 อังสตรอม, °A) เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง พบว่าอนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง ซึ่งสามารถแยกออกโดยการทำให้จับตัวเป็นก้อนด้วยกรด



รูปที่ 2.8 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ<sup>(14)</sup>

2. โปรตีน ส่วนของสารพวกโปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางมีอยู่ประมาณร้อยละ 25 ของโปรตีน ทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 50 จะอยู่ในชั้นน้ำ และร้อยละ 25 จะปะปนอยู่ในส่วนของสารลูทอยด์ โปรตีนส่วนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่เป็นชนิดแอลฟากลูบูลิน ( $\alpha$ -Globulin) และฮีวิน (Hevein) ส่วนนอกสุดของอนุภาคยางมีโปรตีนห่อหุ้มอยู่ประมาณร้อยละ 1 ของอนุภาคยาง ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนชนิดแอลฟากลูบูลิน ซึ่งไม่ละลายในน้ำกลั่นแต่ละลายในกรดต่างและเกลือ มีค่า Isoelectric point ที่ pH เท่ากับ 4.8 ดังนั้นอนุภาคยางรวมตัวกันอย่างรวดเร็วที่ pH ของแอลฟากลูบูลินละลายน้อยที่สุด สำหรับโปรตีนที่ห่อหุ้มผิวรอบนอกของอนุภาคยางซึ่งเป็นโปรตีนพวกฮีวิน สามารถละลายในน้ำได้ มีค่า Isoelectric point ที่ pH เท่ากับ 4.5 จะป้องกันอนุภาคยางมารวมตัวกันเมื่อมีการสูญเสีย น้ำ เช่น การเติมแอลกอฮอล์ หรือกรดอะซิติก อนุภาคยางจะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนเรียก Coagulum แยกออกจากส่วนของเซรุ่มโปรตีนบนผิวของอนุภาคยางนี้มีส่วนประกอบของกำมะถันอยู่ประมาณร้อยละ 5 ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพจะเกิดการบูดเน่าโดยโปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน (Mercaptan) ทำให้มีกลิ่นเหม็น

3. ไขมันซึ่งอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิดชนิด  $\alpha$ -Lecithin โดยเชื่อว่าทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง น้ำยางในภาวะที่เป็นต่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ประมาณร้อยละ 0.6 ขึ้นไป ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (long chain fatty acid) ซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้ยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น แต่กรณีที่มีแอมโมเนียปริมาณน้อยประมาณร้อยละ 0.2 ในน้ำยางการไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยาง จึงจำเป็นต้องเพิ่มสบู่หรือสารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษา น้ำยางเพิ่มขึ้นลงไป

### 2.3.1.3 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non rubber content)

1. ส่วนที่เป็นน้ำ หรือเซรัม (Serum) เซรัมของน้ำยาง มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยสารชนิดต่าง ๆ คือ คาร์โบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้ง และน้ำตาลมีอยู่ในน้ำยางประมาณร้อยละ 1 น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดควิบราซิทอล (Quebrachitol) มีน้ำตาลชนิด กลูโคส ซูโครส ฟรุคโตสปริมาณเล็กน้อย น้ำตาลเหล่านี้จะถูกแบคทีเรียใช้เป็นอาหาร เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายตัวให้กรดโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ๆ (short chain fatty acid) ทำให้น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพและรวมตัวเป็นก้อนกรดเหล่านี้เป็นกรดที่ระเหยได้ง่าย (Volatile fatty acid, VFA) ประกอบด้วยกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดโฟสโฟโอนิกเป็นต้น ดังนั้น ค่า VFA จึงเป็นตัวเลขที่บ่งถึงความสามารถในการรักษาสภาพของน้ำยางโดยมาตรฐานสากลของน้ำยางชั้น กำหนดให้มีค่า VFA ไม่เกิน 0.2 หน่วยโปรตีน และกรดอะมิโนเป็นส่วนที่อยู่ในเซรัมของน้ำยาง มีค่า Isoelectric point หลายค่า โปรตีนที่มีค่า Isoelectric point สูงสามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพ โปรตีนที่พบกันมากในน้ำยางสดส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภทแอลฟาไกลูโบลิน ซึ่งมีคุณสมบัติของสารตรงผิวของโมเลกุลมีความว่องไว (surface active) ดังนั้นโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างรอยเชื่อมต่อของน้ำ-อากาศ และน้ำมัน-น้ำ

### 2. ส่วนของลูทอยด์ และสารอื่น ๆ

- ลูทอยด์เป็นอนุภาคค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 ถึง 3 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเยื่อบาง ๆ ภายในเยื่อบางนี้จะมีทั้งสารละลาย และสารที่แขวนลอย มีค่า pH เท่ากับ 5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 3 และมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ร้อยละ 2 นอกจากนี้ส่วนของสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 และมีสารโพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลือง หรือสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ

- อนุภาคเพรย์-วิสลิง เป็นสารไม่ใช่ยางมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ซึ่งทำให้งางมีสีเหลืองเข้มสามารถตัวแอมโมเนีย และแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรัม

### 2.3.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันเป็นวัตถุดิบที่ได้จากการแปรรูปขั้นต้นของน้ำยางสดจากต้นยางพารา โดยทั่วไปสามารถนำมาแปรรูปเป็นยางดิบได้ 2 แบบ คือ

### 2.3.2.1 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารานั้น มีเนื้อยางเพียงร้อยละ 30 ถึง 40 ส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำชะส่วนใหญ่และสารอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานและง่ายต่อการขนส่ง จึงได้เตรียมน้ำยางธรรมชาติให้อยู่ในรูปของน้ำยางธรรมชาติข้น โดยการนำน้ำยางธรรมชาติไปผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นและแยกส่วนที่ไม่ใช่ยางออกไป สำหรับวิธีการผลิตน้ำยางธรรมชาติข้นมีด้วยกัน 4 วิธี ดังนี้

1. การระเหยน้ำ (evaporation) วิธีนี้ต้องมีการเติมสารที่ทำให้ให้น้ำยางธรรมชาติคงตัว (stabilizer) เช่น potassium soap ในถ้งน้ำยางธรรมชาติ แล้วให้ความร้อนรอบ ๆ ถ้ง เมื่อน้ำระเหยไปน้ำยางธรรมชาติข้นที่ได้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 75 ปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 caustic potash ร้อยละ 1.5 และสารที่ทำให้ให้น้ำยางธรรมชาติคงตัวกับโปรตีนประมาณร้อยละ 13.5 วิธีนี้เหมาะกับการขนย้ายน้ำยางธรรมชาติในระยะทางไกล

2. การทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีนี้มีการเติมสารทำให้เกิดครีม (creaming agent) เช่น sodium alginate, locust bean gum, dum karaya, gum tragacanth เป็นต้น โดยสารทำให้เกิดครีมจะไปพอกหรือเคลือบผิวของอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยมาที่ผิวของน้ำยางธรรมชาติ จะทำให้ได้น้ำยางธรรมชาติข้นที่มีความบริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา

3. การปั่นเหวี่ยง (centrifuging) วิธีนี้เป็นการใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูงแยกเนื้อยางออกจากส่วนที่เป็นเซรุ่ม ทำให้ได้น้ำยางธรรมชาติข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 60 ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม

4. การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electro decantation) วิธีนี้จะใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยแยกส่วนของเนื้อยางออกจากส่วนของเซรุ่มโดยจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวกลงในน้ำยางธรรมชาติที่มีการเติมสารช่วยให้ยางธรรมชาติคงตัว จากนั้นอนุภาคยางที่มีประจุลบหุ้มอยู่จะเคลื่อนตัวไปหาขั้วบวกบริเวณผิวของน้ำยางธรรมชาติ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและต้องใช้งเงินลงทุนสูง

หลังจากผ่านกระบวนการข้างต้นจะได้น้ำยางธรรมชาติข้นที่มีเนื้อยางอยู่ประมาณร้อยละ 60 ซึ่งน้ำยางธรรมชาติข้นโดยทั่วไปจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

1. น้ำยางธรรมชาติข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) เป็นระบบที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียสูง ซึ่งอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.7 ต่อน้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติ



2. น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia, LA) เป็นระบบที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียต่ำ ซึ่งอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.2 ต่อน้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติ และใช้สารเคมีบางชนิดรวมด้วย เช่น เตทตระเมทิลไฮยูเรมไดซัลไฟด์ ร่วมกับซิงก์ออกไซด์ เป็นต้น

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติชั้นนี้ด้วยกันหลากหลายชนิด เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย หมอน ที่นอน สายน้ำเกลือ เส้นด้ายยางยืด เป็นต้น ดังนั้นการเลือกใช้น้ำยางธรรมชาติชั้นทั้งสองชนิดนี้ ควรคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต ความเหมาะสมในกรรมวิธีการผลิตเพื่อที่จะเลือกใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.3.2.2 ยางธรรมชาติแห้ง (Dry natural rubber)

ยางธรรมชาติในรูปของยางแห้งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของกรรมวิธีการผลิต คือ

1. การผลิตยางแบบธรรมดา (conventional rubber process) ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ และยางสกีม แต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

- ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet, RSS) เป็นยางแผ่นที่ทำให้แห้งโดยการใช้ความร้อน และปล่อยให้ควันเข้าไปเคลือบผิวของแผ่นยาง เพื่อป้องกันเชื้อรา ยางรมควันที่แห้งแล้วจะถูกคัดเลือกเพื่อจัดชั้นยางด้วยการใช้สายตา (Visual grading) ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญมาก พิจารณาจากการขึ้นรา การรมควัน ฟองอากาศ สิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ

- ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheet, ADS) เป็นยางแผ่นใสและมีสีจาง มีขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับยางแผ่นรมควัน แต่มีการควบคุมการผลิตที่เข้มงวดกว่า แผ่นยางถูกทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนที่ปราศจากควันไฟ และไม่มีการเติมสารใด ๆ นอกจากสารที่ยอมรับ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ และพาราไนโตรฟินอล

- ยางเครพ (Crepe rubber) สามารถผลิตได้จากน้ำยางสดและน้ำยางแห้ง ทำให้ได้ยางเครพที่มีคุณภาพต่างกัน การผลิตยางเครพในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ เครพชนิดคุณภาพดี เรียกว่า เครพสีจาง (Pale crepe) และเครพขาว ผลิตจากน้ำยางที่จับตัวภายใต้การควบคุม และระมัดระวังในกระบวนการผลิต สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงในการผลิต คือ สีของน้ำยาง การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่จะทำให้งามีสีคล้ำ และเครพชนิดคุณภาพต่ำ เรียกว่า เครพสีน้ำตาล (Brown crepe)

- ยางสกีม (Skim rubber) การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการปั่นเป็นการแยกส่วนของน้ำออกจากน้ำยาง ทำให้ได้น้ำยางข้นกับส่วนที่เป็นของเหลวที่ยังมีเนื้อเยื่ออยู่ประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 ส่วนที่เป็นของเหลวนี้นี้เรียกว่า หางน้ำยาง (Skim latex) สามารถนำหางน้ำยางมาแปรรูปเป็นยางแท่งแบบสกีมบล็อก (Skim block) หรือแบบสกีมเครพ (Skim crepe)

2. การผลิตยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน (Technically specified rubber process) ผลิตโดยมีเงื่อนไขการระบุคุณภาพมาตรฐานสากล ได้แก่ ยางแท่ง มีรายละเอียดดังนี้

- ยางแท่ง (Technically specified rubber, TSR หรือ Block rubber) เป็นยางที่ปรับปรุงรูปแบบของการผลิตยางธรรมชาติ ลดระยะเวลาการผลิต ปรับปรุงวิธีการหีบห่อให้ทันสมัยเหมาะกับการขนส่งและการใช้งาน ประกอบด้วยชั้นยาง 8 ชั้น คือ STR XL, STR 5L, STR 5, STR 5 CV, STR 10, STR 10 CV, STR 20 และ STR 20 CV

นอกจากนี้ ยังมียางแบบอื่น ๆ ที่มีวิธีการผลิตเฉพาะตัว เพื่อให้ได้ผลผลิตเหมาะสมกับงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ หรือเพื่อวัตถุประสงค์จะปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ เช่น ยางที่มีความหนืดคงที่ ยางที่มีสมบัติพิเศษในกระบวนการผลิตยางผสมน้ำมัน ยางเทอร์โมพลาสติก ยางอโฟกซิไดซ์ ยางผง และยางเหลว เป็นต้น

### 2.3.3 สมบัติของยางธรรมชาติ<sup>(15)</sup>

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการขีดถู ความเหนียวติดกัน และสมบัติเชิงพลวัต เป็นต้น ทำให้ง่ายธรรมชาติเหมาะกับการใช้งานในเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง สมบัติโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง โดยสามารถกลับคืนสู่รูปร่างที่มีขนาดเท่าเดิมหรือขนาดใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากการที่มีแรงภายนอกมากกระทำ

2. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูง เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดการตกลึกเมื่อได้รับแรงดึง เชื่อกันว่าการเกิดผลึกนี้ช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงทั้งก่อนและหลังการทำให้คงรูป

3. ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูง เนื่องจากความสามารถในการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึงของยางธรรมชาติโดยผลึกที่

เกิดขึ้นนี้จะมีการเรียงตัวในแนวเดียวกับแรงดึง และตั้งฉากกับรอยฉีกขาดทำให้ขีดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น

4. สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน และยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) สูงมากอีกด้วย

5. การกระด้างกระดอง (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดองที่สูงมาก และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยางจะมีการสูญเสียพลังงานต่ำ เมื่อถูกใช้ใน งานทางไดนามิกส์ ยางธรรมชาติจะมีความร้อนสะสมต่ำด้วย ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะสำหรับการผลิตยางล้อรถที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน

6. ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการขัดถูที่ดี

7. ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติมีความเหนียวติดกันสูง โดยเฉพาะในยางที่ไม่ได้ผ่านการคงรูป สามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะ และสิ่งทอ

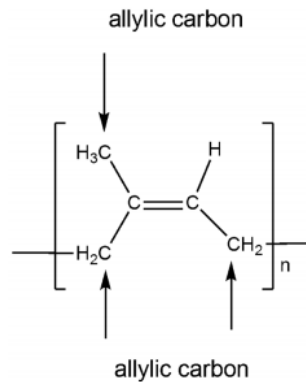
8. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยยางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง  $1 \times 10^{15}$  ถึง  $2 \times 10^{15}$  โอห์ม-เซนติเมตร

9. ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) ยางธรรมชาติไม่สามารถทนทานต่อสารเคมีที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งต่าง ๆ เช่น เบนซีน โทลูอีน และเฮกเซน เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของยางธรรมชาติ ทำให้ถูกละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง แต่ยางธรรมชาติจะทนต่อตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้ง เช่น อะซิโตน และแอลกอฮอล์

#### 2.3.4 การดัดแปรยางธรรมชาติ (Modified natural rubber)<sup>(12, 16)</sup>

การดัดแปรยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงและเพิ่มสมบัติของยางธรรมชาติเป็นกระบวนการที่น่าสนใจจึงมีการศึกษาและวิจัยอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติคือ cis-1, 4-polyisoprenic unit ที่มีพันธะคู่ระหว่าง อะตอมของคาร์บอน (C=C) อยู่ทุกหน่วยซ้ำ และมีแอลลิลิกคาร์บอน (allylic carbon) ซึ่งเป็นตำแหน่งคาร์บอนที่อยู่ถัดจากพันธะคู่อยู่จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้น จึงสามารถนำยางธรรมชาติไปดัดแปรโมเลกุลได้ 2 แบบ ตามชนิดของการเกิดปฏิกิริยา คือ ชนิดที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาแบบเติม (addition reaction) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของ

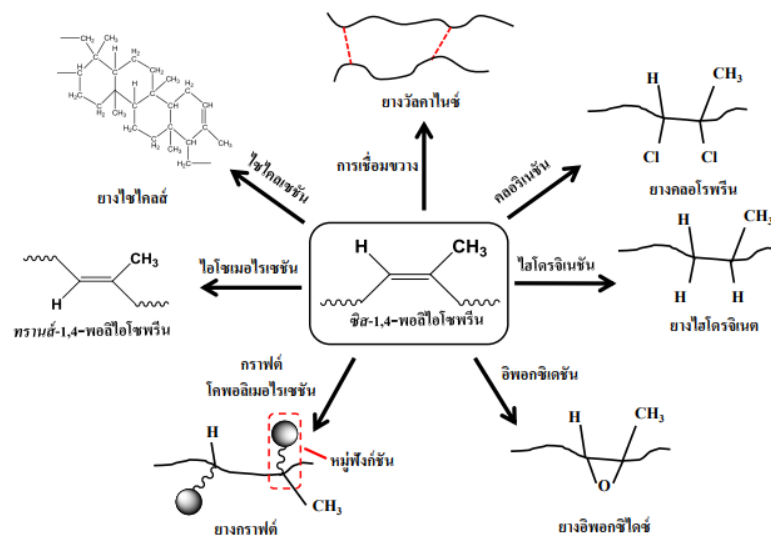
อะตอมคาร์บอน และชนิดที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ (substitution reaction) ที่ตำแหน่งแอลลิลิกคาร์บอน



รูปที่ 2.9 พันธะคู่ (C=C) และตำแหน่งแอลลิลิกคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ<sup>(16)</sup>

ยางธรรมชาติดัดแปรเป็นการนำยางธรรมชาติมาปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยกระบวนการทางเคมีโดยทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบริเวณพันธะคู่ของโครงสร้างยางธรรมชาติซึ่งมีความไม่อิ่มตัวสูง ทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันภายในโมเลกุลหรือการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมลงไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอน ทำให้เกิดพันธะเคมีใหม่ที่มีลักษณะร่วมกันระหว่างยางธรรมชาติกับหมู่ฟังก์ชันที่ได้เติมเข้าไป เช่น การเติมหมู่คลอรีน การเติมไฮโดรเจนให้กับพันธะคู่ การเกิดวงแหวน การเติมหมู่ออกซิเจนของออกซิเจน หรือการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่ของยางธรรมชาติ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10

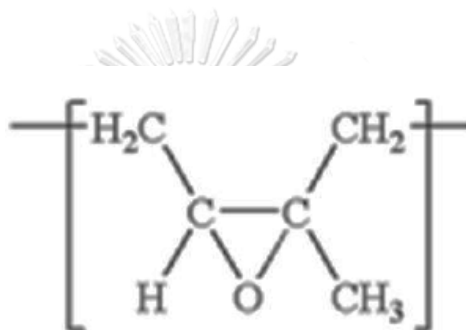
### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 การดัดแปรยางธรรมชาติด้วยวิธีต่าง ๆ<sup>(12)</sup>

### 2.3.4.1 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR)<sup>(17-21)</sup>

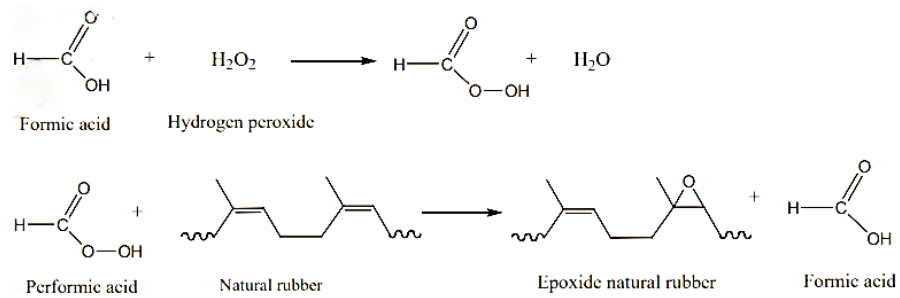
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดจากการดัดแปรยางธรรมชาติโดยการลดพันธะคู่ที่มีอยู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติลงและให้มีวงแหวนอีพอกไซด์เข้าไปแทน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนั้นโมเลกุลใหม่ที่ได้จะยืดหยุ่น และเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความทนต่อน้ำมันและความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศดีขึ้น ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งยางธรรมชาติ อีพอกไซด์ทางการค้าจะมีอยู่ 2 เกรด ตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้าง คือ ร้อยละ 25 และ 50 (ENR25 และ ENR50 ตามลำดับ)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

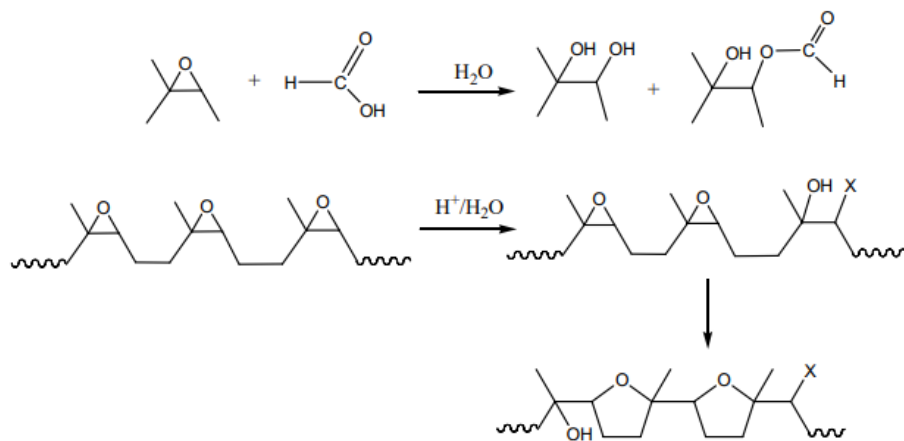
#### - การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เตรียมจากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation reaction) ของยางธรรมชาติ โดยใช้กรดเปอร์อะซิติก หรือ กรดเปอร์ฟอร์มิก ซึ่งกรดดังกล่าวข้างต้นอาจจะเตรียมให้เกิดเป็นเปอร์เอซิดก่อนนำไปใช้งานหรือจะให้เกิดเอซิดขณะทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (in-situ epoxidation) ก็ได้ อัตราส่วนโดยโมลของกรดเปอร์ฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.5 การเกิดเปอร์เอซิดในขณะทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์<sup>(21)</sup>

การใช้กรดอะซิติกจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เช่น กรดซัลฟิวริกหรือกรดซัลโฟนิก เป็นต้น เพื่อช่วยให้เกิดเป็นเปอร์เอไซด์ได้เร็วขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันของกรดเปอร์ฟอร์มิกกับโมเลกุลของยางธรรมชาติซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจึงต้องควบคุมปฏิกิริยาอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเปิดวงแหวนอ็อกไซด์ซึ่งสามารถเกิดได้สองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือ แบบแรกเป็นการแตกของหมู่อ็อกไซด์อย่างง่ายซึ่งจะได้ไกลคอล (glycol) และไฮดรอกซีเอสเทอร์ (hydroxyester) ส่วนแบบที่สองจะเกิดในพอลิเมอร์ที่มีหมู่อ็อกไซด์อยู่ติดกัน เมื่อเกิดการเปิดวงแหวนอ็อกไซด์จะได้วงแหวนอีเทอร์ (cyclic ether) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอ็อกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติอ็อกไซด์<sup>(21)</sup>

### - สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

จากการตัดแปรรูปโครงสร้างยางธรรมชาติให้เป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีสภาพความเป็นขี้ผึ้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ที่มีในโครงสร้างโมเลกุล ส่งผลให้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทนทานต่อสารละลายไม่มีขี้ผึ้งและน้ำมันได้มากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศอีกด้วย จากสมบัติเด่นข้างต้นของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ทำให้สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การใช้งานยางธรรมชาติอีพอกไซด์

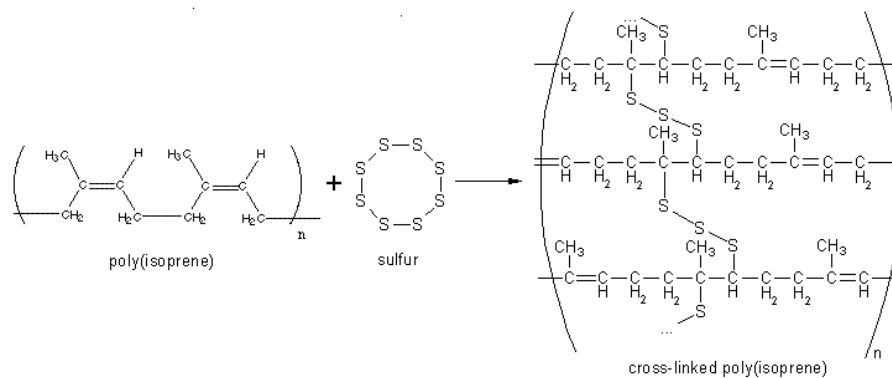
สมบัติเด่น	การใช้งาน	เกรดของยางอีพอกไซด์
ทนทานต่อน้ำมัน	ท่อ ข้อต่อ และสายยาง	ENR25, ENR50
การซึมผ่านอากาศต่ำ	แบลตเตอร์ ยางโนเคลือบภายในท่อ	ENR25
เสริมประสิทธิภาพได้ด้วยซิลิกา	ใช้งานที่ที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ไม่ต้องการให้เป็นสีดำ	ENR25
มีความต้านทานต่อการหมุนต่ำ	ดอกยางรถยนต์ พื้นยางพื้นรองเท้ากีฬา	ENR25, ENR50
การหน่วง	ป้องกันการสั่นของเครื่อง และใช้งานกับเครื่องกลทางวิศวกรรม	ENR25, ENR50
การติดประสาน	กาว เคลือบสายพาน PVC	ENR25, ENR50

### 2.3.5 ยางคกรูป (Cured rubber)

ยางคกรูป (cured rubber) หรือ ยางวัลคาไนซ์ (vulcanized rubber) เป็นการตัดแปรงยางโดยการเติมสารที่ช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (crosslink) ตรงตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาในโครงสร้างของยางซึ่งก็คือ บริเวณพันธะคู่เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น การวัลคาไนซ์ยางที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ การคกรูปด้วยกำมะถัน (sulfur cured) การคกรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (peroxide cured) และการคกรูปด้วยรังสี (radiation cured)

### 2.3.5.1 การคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur cured)<sup>(22, 23)</sup>

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปสามารถเกิดขึ้นได้เร็วและอย่างคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้ นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลัก คือไม่สามารถใช้ในการคงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน หรือยาง EPM ปฏิกิริยาคงรูปยางด้วยกำมะถันดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาคงรูปยางด้วยกำมะถัน<sup>(23)</sup>

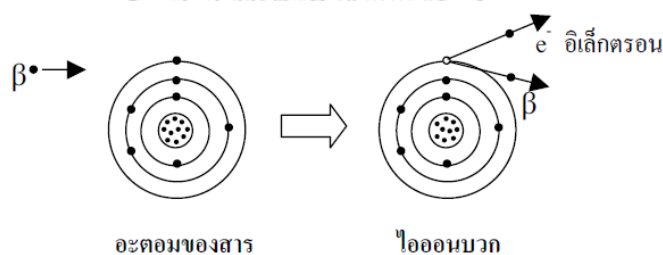
### 2.3.5.2 การคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (Peroxide cured)<sup>(24)</sup>

การคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับยางที่มีพันธะคู่ เช่น ยางซิลิโคน และยางที่ไม่มีพันธะคู่หรือพวกที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่ไวต่อปฏิกิริยา ระบบนี้จะมีต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยกำมะถัน อีกทั้งเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตรายเพราะสามารถระเบิดได้ การขนย้าย และเก็บรักษาจึงต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการคงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล เช่น EPM, EVA, CPE เป็นต้น หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น เช่น HNBR, EPDM สำหรับยางอื่น ๆ ยังคงนิยมการคงรูปด้วยกำมะถันมากกว่า เพื่อป้องกันการเกิดอันตราย



### 2.3.5.3 การคงรูปด้วยรังสี (Radiation cured)<sup>(25)</sup>

ปัจจุบันได้มีการนำรังสีต่าง ๆ มาใช้ในการคงรูปอย่างมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam) เนื่องจากลำอิเล็กตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นแต่มีความถี่สูงทำให้มีพลังงานและความสามารถในการทะลุทะลวงสูง และมีอัตราเร็วในการคงรูปสูงมาก และมีความสม่ำเสมอมากกว่าการคงรูปด้วยระบบก้ำมะถัน ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการคงรูปที่ใช้พลังงานน้อยสำหรับการคงรูปอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนนั้นเมื่อฉายรังสีลงบนวัสดุจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนวงนอกสุดที่โคจร รอบนิวเคลียสของวัสดุ และเกิดการหลุดออกจากอะตอมได้เป็นไอออนบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) อิเล็กตรอน บางตัวที่ได้รับพลังงานจากรังสีจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และมีพลังงานสูงขึ้น ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังนั้นเมื่อฉายรังสีเข้าไปในน้ำยาง สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นทั้งการตัดสายโซ่ (Chain scission) และการเชื่อมโยงโมเลกุล ซึ่งเกิดการจับพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C bond) ไปพร้อม ๆ กัน ยางจะเปลี่ยนลักษณะจากเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซต

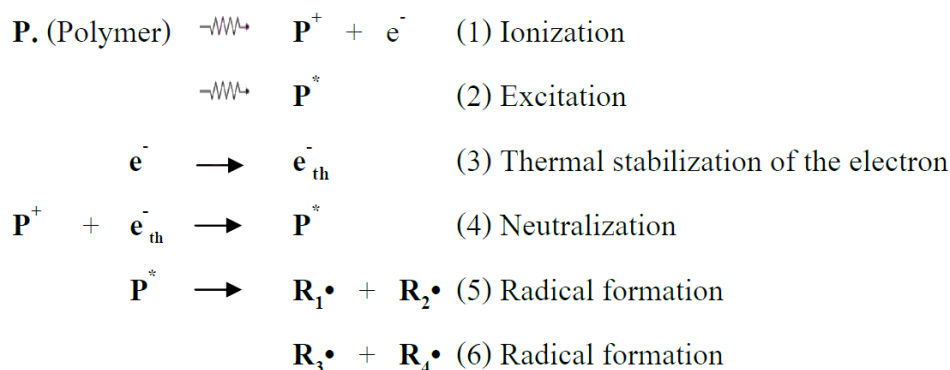


รูปที่ 2.15 กระบวนการแตกตัวเป็นประจุของอะตอมสารที่ถูกรังสี<sup>(25)</sup>

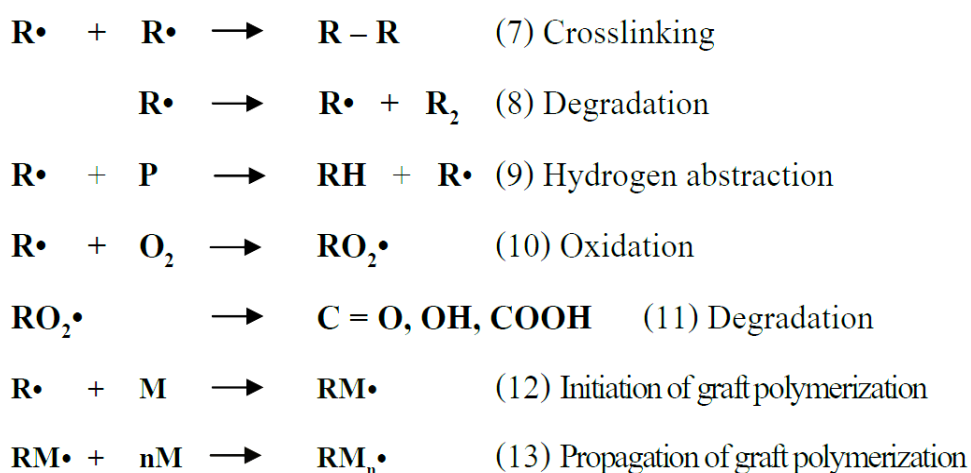
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการฉายรังสี<sup>(26)</sup>

ขั้นตอนแรกของการฉายรังสีไปยังพอลิเมอร์ทำให้เกิดคู่อิออน (สมการที่ 1) และพอลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้น (สมการที่ 2) ปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นมาก ใช้เวลาน้อยกว่า  $10^{-6}$  วินาที อิเล็กตรอน ไอออน และพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป (สมการที่ 3 และ 4) พอลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้นจะแตกออกเป็น 2 อนุมูลอิสระ (สมการที่ 5 และ 6) ปฏิกิริยาในสมการที่ 5 นำไปสู่การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์



ขั้นตอนที่สอง อนุภาคที่ว่องไวสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับอนุภาค  
 กันเองหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของตัวกลางได้ เช่น ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลในสมการที่ 7  
 หรือเกิดการเสื่อมสภาพในสมการที่ 8 ถ้าตัวกลางในการฉายรังสีมีโมเลกุลที่ไม่อึดตัวที่สามารถจะ  
 เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ อนุมูลอิสระจะเข้าไปทำปฏิกิริยาตรงพันธะคู่ของโมเลกุลทำให้  
 เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบตอกกิ่ง (grafting) ดังสมการที่ 12 และ 13



การเกิดครอสลิงค์ (crosslinking) และการเสื่อมสลายของโมเลกุล  
 พอลิเมอร์ใช้หลักความเกะกะ (steric effect) ของโมเลกุลพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่เกิดการเสื่อมสลาย  
 จะมีความร้อนในการเกิดพอลิเมอร์ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณที่ไม่คิดผลของความเกะกะนั้น  
 นอกจากนี้สายโซ่มีหมู่เกะกะทำให้เกิด Franck-Rabinowitch cage effect กล่าวคือ พวก active  
 species จะไม่รวมตัวกันเองแต่จะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ในตัวเองขาดได้ง่ายขึ้น สำหรับพอลิเมอร์  
 ที่เกิดการเสื่อมสลายโดยรังสีนี้ยังพบว่า เมื่อให้ความร้อนจะเกิดโฟโตไลซิสเป็นมอนอเมอร์ได้ดีด้วย  
 สำหรับพอลิเมอร์ที่ไม่มีหมู่ข้าง ๆ สายโซ่เกะกะจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ตามแนวแกน

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระขึ้นที่สายโซ่โดยรังสี จึงมีโอกาทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่อีกสายโซ่หนึ่งที่อยู่เคียงข้างได้จึงเกิดการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ได้โดยง่าย

### 2.3.6 ยางคอมพาวด์ (Rubber compound)<sup>(22, 27)</sup>

ยางคอมพาวด์ คือการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น แล้วบดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน พร้อมทั้งจะขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ การจะผลิตยางคอมพาวด์ต้องอาศัยเทคโนโลยีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการออกสูตรเคมียางและการผสมยาง เพื่อให้ได้ยางคอมพาวด์ที่นำไปขึ้นรูปและคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามที่ต้องการ

#### 2.3.6.1 การออกสูตรเคมียาง (Compounding formulation)

การออกสูตรเคมียางให้เหมาะสมนั้นเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพ และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ การออกสูตรเคมียางที่ดีนั้นต้องอาศัย ความรู้เกี่ยวกับสมบัติและการใช้งานของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด ต้องรู้หน้าที่การทำงานของสารเคมีต่าง ๆ รวมทั้งต้องมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องจักรที่ใช้ในการผสม และการแปรรูปด้วยจุดประสงค์หลักของการออกสูตรเคมียางมีดังนี้ เพื่อให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ตามที่ต้องการ (Processability) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามที่ต้องการ (Properties) และเพื่อควบคุมต้นทุน/ราคาตามที่ต้องการ (Price) โดยทั่วไปส่วนประกอบต่าง ๆ ในสูตรเคมียางประกอบด้วย

1. ยาง ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR) ยางผสม (Blends) หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer, TPE)
2. สารวัลคาไนซ์ ได้แก่ สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)
3. สารตัวเติม (Fillers) เช่น เขม่าดำ (Carbonblack) ซิลิกา (Silica) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) เคลย์ (Clay) เป็นต้น
4. สารทำให้ยางนิ่ม และสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and processing aids)
5. สารป้องกันยางเสื่อม (Antioxidant)
6. สารอื่น ๆ เช่น สี (Pigments) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) และสารหน่วงการติดไฟ (Flame retardants)

### 2.3.6.2 สารเคมีสำหรับยาง

#### - สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)

สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารเคมีที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อย เพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางคงรูปเร็วขึ้น เพื่อลดเวลาในการคงรูปลง และทำให้ยางคงรูปมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นมากสำหรับการคงรูปด้วยกำมะถันสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นกลุ่มดังนี้

1. เมอร์แคปโต (Mercapto) สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้ดีกับยางหลายประเภททำให้ยางมีระยะเวลาสกรอซันและมีอัตราเร็วในการคงรูปปานกลาง ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไทโอะโซล (2-mercaptobenzothiazole, MBT) และไดเบนโซไทโอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide, MBTS)

2. เบนโซไทโอะโซลซัลฟิनाไมด์ (Benzothiazole sulfenamide) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอซันที่ยาวขึ้นแต่ให้อัตราเร็วในการคงรูปที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้นยางคงรูปที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูงมีความยืดหยุ่นดีและมีความต้านทานการล้าตัวสูง ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทโอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-Cyclohexyl-2-Benzothiazole Sulfonamide, CBS) บิวทิลเบนโซไทโอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-Tertbutyl-2-Benzothiazole Sulfonamide, TBBS)

3. ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการคงรูป ทำให้ระยะเวลาสกรอซัน และเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการคงรูปนานเกินไป ยางที่ได้มีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นสูงมาก และไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยน จึงสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc Dimethyldithiocarbamate, ZDMC) ซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc Diethyldithiocarbamate, ZDEC) และซิงก์ไดเบนซิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc Dibenzylidithiocarbamate, ZBEC) เป็นต้น

4. ไทยูแรม (Thiurams) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการคงรูปที่สูงมากและให้ระยะเวลาสกรอซันที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ เทตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide, TMTD) เทตระเมทิลไทยูแรมโมโนซัลไฟด์

(tetramethylthiuram monosulfide, TMTM) และเททระเบนซิลโทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetrabenzylthiuram disulfide, TBzTD) เป็นต้น

5. กัวนิติน (Guanidines) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิแต่จะใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่น ๆ ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิติน (Diphenylguanidine, DPG) ไดโทลิลกัวนิติน (Dio-Tolylguanidine, DOTG) และ โทลิลไบกัวนิติน (O-Tolylbiguanide, OTBG) อย่างไรก็ตามการออกสูตรเคมีบางส่วนใหญ่มักใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่าเพื่อให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานแบบเสริมกัน (Synergistic effect) ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปสูงขึ้นเรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary accelerator)” และเรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณน้อยกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary accelerator)”

- สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (Activators and retarders)

1. สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators) คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ ซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริกโดยทั่วไปนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

2. สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อยืดระยะเวลาสกอรัช ลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษาของคอมพาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างของสารหน่วงปฏิกิริยาได้แก่

- สารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดเช่น พะทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic- anhydride) กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) และกรดมาลิก (Maleic acid)

- ไซโคลเฮกซิลโทโอพะทาลิไมด์ (Cyclohexyl- N-Thiophthalimide, CTP) สารหน่วงชนิดนี้เป็นสารหน่วงที่เพิ่มระยะเวลาสกอรัชของยางคอมพาวด์โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ซึ่งต่างจากสารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด

#### - สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพเติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์นิยมเติมลงไปปริมาณ 1-3 phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสียาง เช่นกลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน (Amine derivatives) และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของฟินอล (Phenol derivatives) โดยสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการปกป้องยางสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง ตัวอย่างของสารป้องกันการเสื่อมสภาพได้แก่ ไอโซโพรพิลพินิลพินิลลีนไดเอมีน (N-Isopropyl-N'-Phenyl-P-Phenylenediamine, IPPD) ไดเมทิลบิวทิลพินิลพินิลลีนไดเอมีน (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-P-Phenylenediamine, 6PPD) พอลิเมอร์ของไตรเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (2,2,4-Trimethyl-1,2-Dihydroquinoline, TMO) ไดบิวทิลครีโซล (2,6-Ditert.butyl-P-Cresol, BHT) และสไตรีนเตฟีนอล (Styrenated Phenol, SPH) เป็นต้น

#### - สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือเพื่อลดต้นทุน ฯลฯ สารตัวเติมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ 1) สารตัวเติมเสริมแรงได้แก่ เขม่าดำและซิลิกา 2) สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงได้แก่ ดินขาว ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต ฯลฯ

1. เขม่าดำ (Carbon black) เป็นสารเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง มีหลายเกรด โดยแต่ละเกรดจะมีสมบัติพื้นฐานโดยเฉพาะขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ พื้นที่ผิว และโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นเขม่าดำแต่ละเกรดจึงมีความสามารถในการเสริมแรงไม่เท่ากันจึงควรเลือกใช้เกรดของเขม่าดำให้เหมาะสมกับ กระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์

2. ซิลิกา (Silica) ซิลิกาเป็นสารตัวเติมอีกชนิดที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า แต่เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ซิลานอลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีความเป็นขี้สูง ซิลิกาจึงแตกตัว และเข้ากับยางที่ไม่มีขี้ได้ยาก นอกจากนี้หมู่ซิลานอลยังสามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดการคงรูปได้ช้าลง และมีระดับของการคงรูปต่ำลง ดังนั้นจึงต้องเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ซิลานอล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine) หรือเฮกซะเมทิลีนเททระมีน (Hexamethylene Tetramine, HEXA) รวมถึง

การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบส เช่น DPG หรือ DOTG ลงไปนอกจากนั้นต้องมีการเติมสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ลงไปเพื่อให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้นทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น

3. สารตัวเติมอื่น ๆ ได้แก่ ดินขาวหรือเคลล์ (Clay) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ทัลคัม (Talcum) สารเหล่านี้ไม่เสริมแรงจนถึงเสริมแรงได้ปานกลางขึ้นกับขนาดของอนุภาค แต่จะช่วยลดต้นทุนและทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่าย

- สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (Plasticizers and processing aids)

1. สารทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers) หมายถึง สารเคมีที่เติมลงไปเพื่อให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้นหรือมีความหนืดต่ำลง ทำให้กระบวนการผลิตรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากจะช่วยลดความหนืดของยางคอมพาวด์แล้วยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติดกัน ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยางได้ด้วย การเลือกใช้ชนิดของสารทำให้ยางนิ่มจำเป็นต้องพิจารณา ความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ การตกสี และราคา สารทำให้ยางนิ่มสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

- น้ำมันมิเนอร์ล (Mineral oils) จัดเป็นสารทำให้ยางนิ่มกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะมีราคาถูก และสามารถผสมเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) น้ำมันแนฟเทนิค (Naphthenic oil) และน้ำมัน อะโรมาติก (Aromatic oil)

- ไชพาราฟิน (Paraffin wax) ไชพาราฟินมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายน้ำมันพาราฟินิกแต่น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงเปลี่ยนสภาพ กลายเป็นของแข็ง ไชพาราฟินเกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนไชพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากโอโซน

- สารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ (Synthetic plasticizers) สารกลุ่มนี้นิยมใช้น้อยเพราะมีราคาค่อนข้างสูง จึงนำไปใช้กับยางบางประเภทที่ไม่สามารถเข้ากันได้หรือเข้ากับน้ำมันมิเนอร์ลได้น้อย สารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติด และไม่ให้ยางเปลี่ยนสี แต่ส่วนใหญ่จะทำให้ยางคงรูปมีความแข็งลดลง และมีสมบัติแรงดึงที่ด้อยลง แต่ก็ทำให้ยางคงรูปมีสมบัติการกระด้างกระดอน และสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น ตัวอย่างของสารทำให้ยางนิ่มสังเคราะห์ได้แก่ คลอรีเนตพาราฟิน (Chlorinated paraffins) ไทโอบิวไทริกเอซิด

บิวทิลเอสเทอร์ (Thiobutyric Acid Butylester) ไดออกทิลพะทาเลต (Diocetylphthalate, DOP) ไดไอโซออกทิลพะทาเลต (Diisooctylphthalate, DIOP) และไดไอโซโนนิลพะทาเลต (Diisononylphthalate, DINP)

- สารอื่น ๆ

1. สี (Pigments) สีที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สีอินทรีย์ และสีอนินทรีย์ โดยสีอนินทรีย์จะให้สีที่มีความสว่างสดใสน้อยกว่าสีอินทรีย์ แต่มีความทนทานต่อสภาพอากาศ และสารเคมีสูงกว่าสีอินทรีย์มาก และยังมีราคาถูกกว่า อีกด้วย ตัวอย่างของสีอนินทรีย์ที่ใช้กันมากได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO<sub>2</sub>) เหล็กออกไซด์ (Iron Oxides) โครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide) และแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide) สีอินทรีย์แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงและให้สีที่สว่างสดใสกว่าสีอนินทรีย์ แต่ว่ามีข้อเสียหลักคือไม่ทนต่อความร้อน ไขมัน กรด และด่าง มีราคาแพง และสีบางตัวยังอาจก่อให้เกิดปัญหาการบลูมได้อีกด้วย ตัวอย่างของสีอินทรีย์ได้แก่ azodyes และ phthalocyanide dyes

2. สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) คือ สารที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง และปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อนหรือในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของรูปตัวอย่างของสารทำให้เกิดฟองได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate) เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide; ADC) เบนซีนซัลโฟไฮดราไซด์ (Benzenesulfohydrazide; BSH) และเบนซีนไดซัลโฟไฮดราไซด์ (Benzene-1,3- Disulfohydrazide)

3. สารหน่วงไฟ (Flame retardants) เป็นสารเคมีที่ช่วยหน่วงการติดไฟของผลิตภัณฑ์ โดยสารเคมีนี้จะสลายตัวทำให้ แก๊ส หรือสารที่ไม่ติดไฟเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างสารหน่วงการติดไฟได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)<sub>3</sub>) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)<sub>2</sub>) และแอนติโมนีออกไซด์ (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

4. สารดูดความชื้น (Desiccants) คือ สารที่กำจัดความชื้นที่มีอยู่ในยางให้หมดไปก่อนการคงรูป ตัวอย่างสารดูดความชื้นเช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO)



## 2.4 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่ใช้ยางธรรมชาติ 3 รูปแบบ คือ น้ำยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติแห้ง และยางธรรมชาติอิมพอกไซด์เป็นพอลิเมอร์สำหรับขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม โดยเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์มีดังต่อไปนี้ (1) อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy) ใช้ในการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต (2) สมบัติการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิด้วยภาพถ่าย ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีของฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต เมื่อได้รับความร้อนและเมื่อกลับสู่ภาวะเดิมที่อุณหภูมิห้อง (3) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ใช้ในการศึกษาความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ เพื่อดูสมบัติเชิงกลของฟิล์ม (4) การบวมตัวในตัวทำละลาย (Swelling test) ใช้ในการศึกษาความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์และความสามารถในการคงรูปร่างของฟิล์มที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ใช้โพลูอินเป็นตัวทำละลายสำหรับทดสอบการบวมตัว โดยหลักการของเทคนิคดังกล่าวข้างต้นแสดงดังต่อไปนี้

### 2.4.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy)<sup>(28-31)</sup>

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 180 ถึง 400 นาโนเมตร และแสงขาวในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งจะถูกดูดกลืนหรือทะลุผ่านสารตัวอย่างที่จะทำการศึกษา โดยค่าความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ ชนิดและความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสี จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้จึงทำให้เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยหลักการพื้นฐานของเครื่องมือคือ เมื่อสารตัวอย่างถูกฉายแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลที่มีพลังงานที่เหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลดูดกลืนแสงบางส่วนแล้วเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state) ที่มีพลังงานต่ำกว่าไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ที่มีพลังงานที่สูงกว่า โดยแสงอิเล็กตรอนดูดกลืนนั้นจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุล แสงบางส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเกิดการสะท้อน (reflection) การกระเจิง (scattering) และส่วนที่เหลือจะทะลุผ่าน (transmittance) สารตัวอย่างออกมา เมื่อทำการวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนมาจากสารตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างได้

กฎการดูดกลืนแสงของแลมเบิร์ต (Lambert's law) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 มีความ  
ว่า “แสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนไม่  
ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง แต่จะขึ้นอยู่กับความหนาของตัวกลาง” ดังสมการ

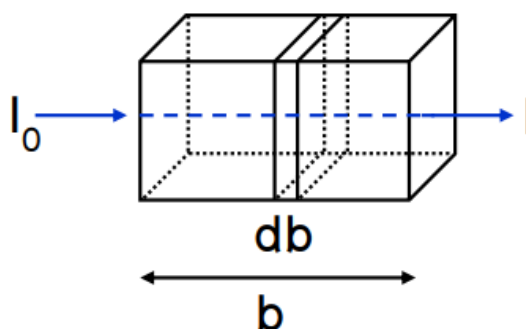
$$\log \frac{I_0}{I} = \frac{k}{2.303} b$$

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงเมื่อเริ่มตกกระทบสาร

$I$  คือ ความเข้มแสงหลังผ่านสารตัวกลาง

$b$  คือ ความหนาของตัวกลางความสัมพันธ์ระหว่างความหนาตัวกลางและการดูดกลืนแสง

$k$  คือ ค่าคงตัวปฏิกิริยา (proportional constant)



รูปที่ 2.16 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)<sup>(28)</sup>

กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวไว้ว่า “อัตราการลดลงของความเข้มของแสงที่ถูก  
ดูดกลืน เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร” ดังสมการ

$$A = \epsilon bc$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

$\epsilon$  คือ ค่าโมลาร์แอบซอร์บิวิตี (molar absorptivity) หน่วย  $\text{dm}^3 \text{cm}^{-1} \text{g}^{-1}$

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วย  $\text{gdm}^{-3}$  หรือ  $\text{mol L}^{-1}$  หรือ molar

กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและความหนาของสารละลายตัวกลาง

กำหนดให้ค่าการส่องผ่านของแสง (transmittance, T) เป็นดังสมการ

$$T = \frac{I_0}{I} \text{ หรือ } \%T = \frac{I_0}{I} \times 100$$

$$\%T = \log[(I/I_0) \times 100] = 2 + \log(I/I_0)$$

จากค่าการดูดกลืนแสง (absorbance, A) เป็นดังสมการ

$$A = \log \frac{I_0}{I}$$

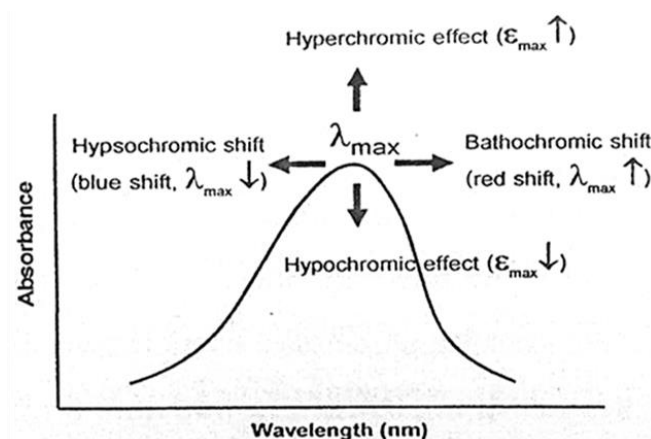
$$\log \%T = 2 - A$$

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

เมื่อ T คือ ค่าการส่องผ่านแสง

กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต จะใช้ได้ต่อเมื่อแสงที่ส่องผ่านสารตัวอย่างต้องเป็นแสงเอกรงค์ (monochromatic radiation) กระบวนการดูดกลืนแสงของแต่ละอนุภาคนั้นต้องไม่ขึ้นแก่กัน นั่นคือสารละลายจะต้องเจือจางและสารละลายที่นำไปวัดต้องเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน

เมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลได้รับพลังงานในช่วงแสงที่เหมาะสมจะเกิดการดูดกลืนแสงไว้เพื่อให้เกิดการทรานซิชัน ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณของการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นจะแสดงผลออกมาในรูปของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เมื่อสารตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไปจะส่งผลให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดหลักและรูปร่างของสเปกตรัม หากสเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น เรียกว่า การเกิด Red shift และในทางตรงกันข้ามหากค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นที่สั้นลง เรียกว่า การเกิด Blue shift และการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดหลักไปที่ตำแหน่งความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hyperchromic effect ส่วนการเลื่อนตำแหน่งไปที่ความเข้มการดูดกลืนแสงลดลง จะเรียกว่า hypochromic effect ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง<sup>(28)</sup>

#### 2.4.2 ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)<sup>(32-35)</sup>

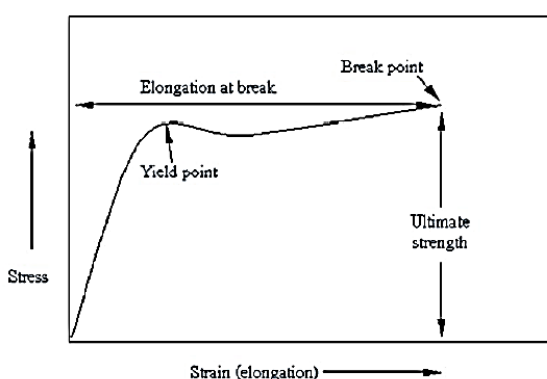
ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอกโดยอาศัยความสัมพันธ์กันระหว่างความเค้น (Stress,  $\sigma$ ) กับความเครียด (Strain,  $\epsilon$ ) โดยความเค้นคือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งมีหน่วยเป็น  $N/m^2$  หรือ Pa และความเครียดคือ สัดส่วนระหว่างระยะยืดตัวต่อความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบซึ่งมีหน่วยเป็น m/m หรือไม่มีหน่วย ความเค้นและความเครียดเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ตามลำดับ ดังนี้

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

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

จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์จะพบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงนั้นวัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปร่างแบบอิลาสติก (elastic behavior) นั่นคือ เมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะ

กลับไปมีขนาดเท่าเดิมจนเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปเส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง ซึ่งวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนผ่านจุดที่มีค่าความเค้นสูงสุดวัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ที่จุดคราก (yield point) จะเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (yield stress) หรือ yield strength เป็นค่าที่แบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูปและที่จุดสุดท้ายของกราฟคือ ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาด (tensile strength at break) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)<sup>(35)</sup>

#### 2.4.3 การทดสอบการบวมตัว (Swelling test)<sup>(36, 37)</sup>

การทดสอบการบวมตัวเป็นการวัดความสามารถในการบวมตัวของวัสดุในตัวทำละลายหรือสารเคมีที่สนใจโดยดูจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการแช่วัสดุในสารละลายตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อดูความสามารถของความทนทานต่อการแทรกซึมของตัวทำละลายนั้น ๆ ทั้งยังสามารถบอกได้ถึงปริมาณการคงรูปในยางได้โดยการแช่ยางที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในโหลอื่นเป็นระยะเวลาตามต้องการหลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักยางที่ผ่านการแช่ในโหลอื่น หากยางมีปริมาณการบวมตัวน้อยน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปไม่มากแสดงว่ามีความทนทานต่อโหลอื่นและมีปริมาณการคงรูปสูงเนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างโดยร้อยละการบวมตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ Swelling (%) คือ ร้อยละการบวมตัว

$W_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นมีหน่วยเป็นกรัม

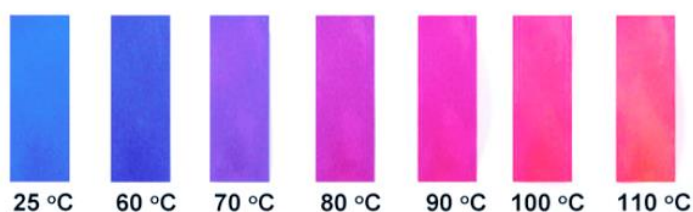
$W$  คือ น้ำหนักหลังแช่ในตัวทำละลายมีหน่วยเป็นกรัม

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาประสิทธิภาพของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลได้รับความสนใจ และมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะสมบัติเด่นในด้านการเปลี่ยนสีที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความเป็นกรด-เบส, การเติมตัวทำละลายหรือโมเลกุลต่าง ๆ เพื่อเหมาะสำหรับการใช้งานด้านการตรวจวัดที่ผ่านมามีเอกสารงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

ในปี ค.ศ. 2009 Yoon และคณะ<sup>(38)</sup> ได้เตรียมพอลิไดอะเซทิลีนในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ในน้ำในพอลิเมอร์เมทริกซ์ บนแผ่นกระจก บน เส้นใย ในรูปของไมโครฟลูอิดิกส์และบนตัวแลกเปลี่ยนพลังงานแรโซแนนซ์ และศึกษาการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนที่เตรียมได้ จากงานวิจัยนี้พบว่าพอลิไดอะเซทิลีนที่อยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์และที่ถูกตรึงอยู่บนพื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ ยังคงสามารถเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงได้เมื่อพอลิไดอะเซทิลีนในรูปแบบฟิล์มได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.19

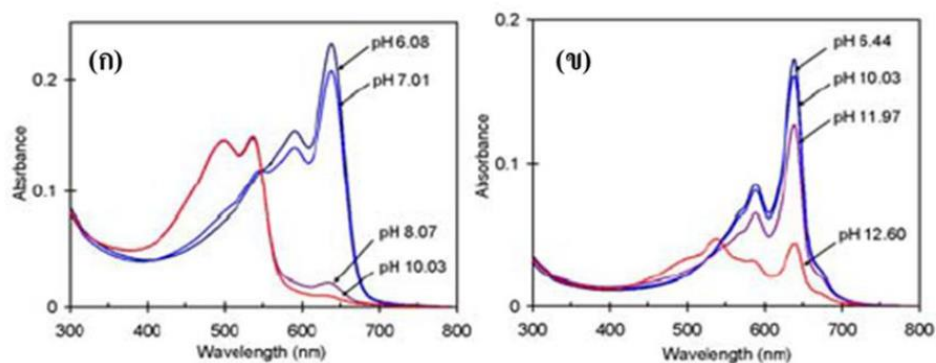
### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



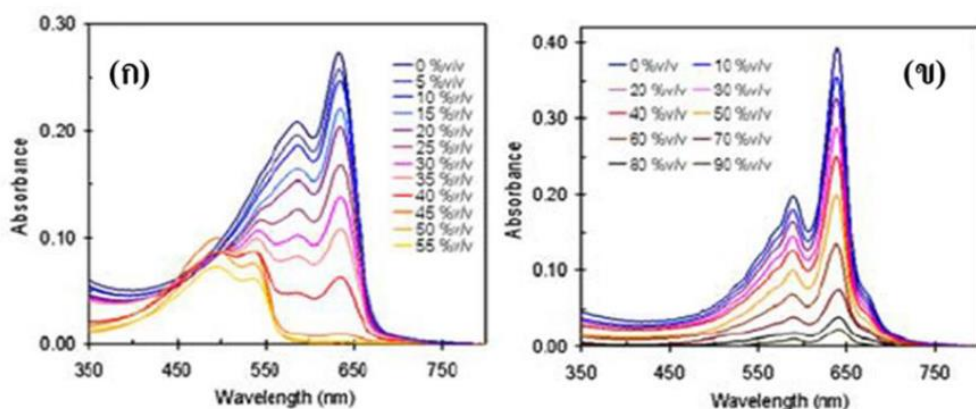
รูปที่ 2.19 การตอบสนองของฟิล์ม PDA/PVA ที่อุณหภูมิต่าง ๆ<sup>(38)</sup>

ในปีค.ศ. 2010 Rungruangviriya และคณะ<sup>(7)</sup> ได้ศึกษาการเตรียมพอลิไดอะเซทิลีน (PDA) โดยซิงก์ออกไซด์เป็นอนุภาคอยู่ภายในและล้อมรอบด้วยมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดอานอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic, PCDA) จากนั้นได้ทำการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อให้เกิดเป็นพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต เมื่อนำไปทดสอบสมบัติการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็น

สีแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์กับพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต พบว่าพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์เกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ประมาณ 8 ในขณะที่พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต จะเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH สูงขึ้น ประมาณ 12.6 และยังพบว่า การเติมเอธานอลลงไปในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์ประมาณร้อยละ 45 โดยปริมาตร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสี แต่เมื่อเติมเอธานอลถึงร้อยละ 90 ในสารละลายพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต พบว่าสีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.20 และ 2.21

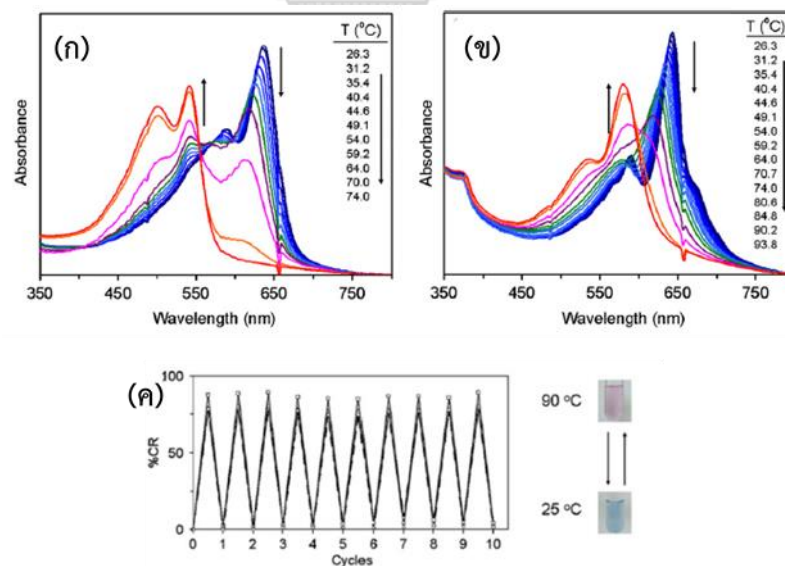


รูปที่ 2.20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์ และ (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เมื่อทำการปรับค่า pH ของสารแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำ<sup>(7)</sup>



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์ และ (ข) poly (PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในสารแขวนลอยที่ทำการเติมเอธานอลเข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ<sup>(7)</sup>

ในปี ค.ศ. 2011 Traiphol และคณะ<sup>(8)</sup> ได้ศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีจากอุณหภูมิของ พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต พบว่าพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ที่ 90 องศาเซลเซียส และสามารถผันกลับได้ แตกต่างกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน บริสุทธิ์ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 74 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับได้ เนื่องจากการเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์เข้าไปในระบบ จะทำให้เกิดการอัตรกิริยาที่แข็งแรงที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ และ หมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นสายโซ่หลักซึ่งเกิดเปลี่ยนแปลง โครงสร้างที่อุณหภูมิสูงจะสามารถคลายตัวกลับสู่ระนาบเดิมได้ หลังจากอุณหภูมิลดอุณหภูมิลงจนถึง อุณหภูมิห้องดังแสดงในรูปที่ 2.22 และเมื่อทดสอบการเปลี่ยนต่ออุณหภูมิในรูปแบบฟิล์มบางของ พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต โดยฝังตรงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนสี 2 ขั้นตอน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขั้นตอนแรกเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยเป็นการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ และขั้นที่สองเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่จาก สีม่วงเป็นสีแดงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 145 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.23

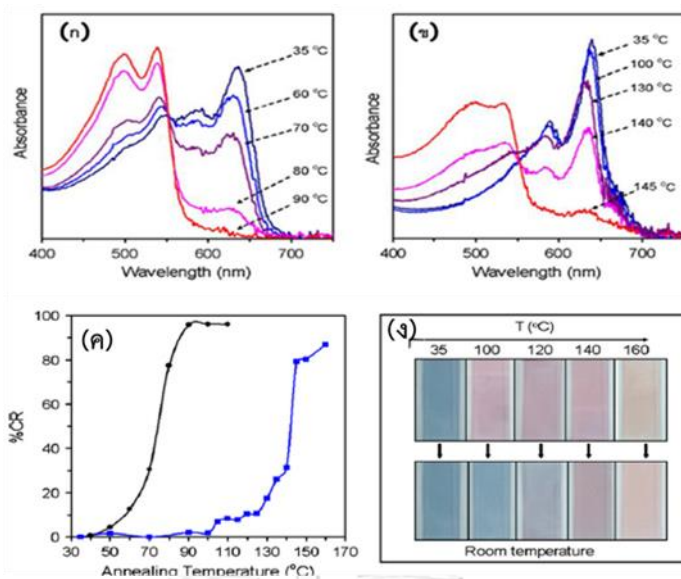


รูปที่ 2.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์

(ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวกลางที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ และ

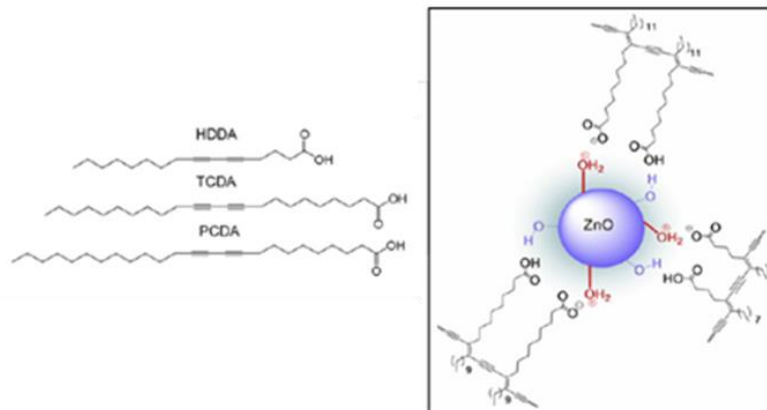
(ค) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ในการเพิ่มและลดอุณหภูมิระหว่าง 25 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส<sup>(8)</sup>



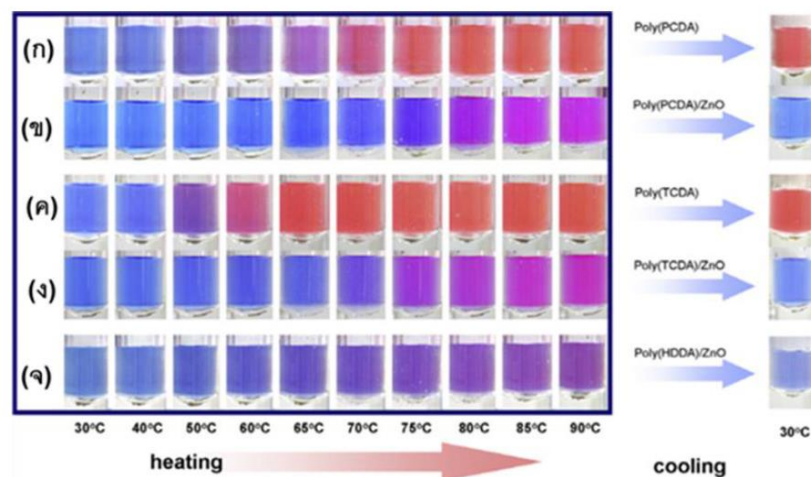


**รูปที่ 2.23** สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์ี  
 (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในตัวอย่างที่เป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์  
 (ค) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ในการเพิ่มและลดอุณหภูมิต่าง ๆ และ (ง) การเปลี่ยนสี  
 ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิสูงสุดอุณหภูมิห้อง<sup>(8)</sup>

ในปี ค.ศ. 2013 Chanakul และคณะ<sup>(39)</sup> ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต โดยเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ดังนี้ 5,7-เฮกซะเดคไดออยน์โนอิกแอซิด (5,7-hexadecadiynoic acid, HDDA), 10,12-ไตรโคซะไดออยน์โนอิกแอซิด (10,12-tricosadiynoic acid, TCDA) และ 10,12-เพนตะโคซะไดออยน์โนอิกแอซิด (10,12-pentacosadiynoic, PCDA) ที่มีโครงสร้างเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 เมื่อเตรียมเป็นสารแขวนลอยและนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่าเกิดการตอบสนองของอุณหภูมิซึ่งการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกัน โดยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ PCDA, TCDA และ HDDA เกิดการเปลี่ยนสีออกชมพูอมม่วงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และสามารถผันกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แต่พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์ีที่เตรียมจาก PCDA และ TCDA เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.25 พบว่าพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ต่าง ๆ สามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของมอนอเมอร์ไดโอเอเซทีลีน 5,7-hexadecadiynoic acid (HDDA), 10,12-tricosadiynoic acid, (TCDA) และ 10,12-pentacosadiynoic (PCDA)<sup>(39)</sup>

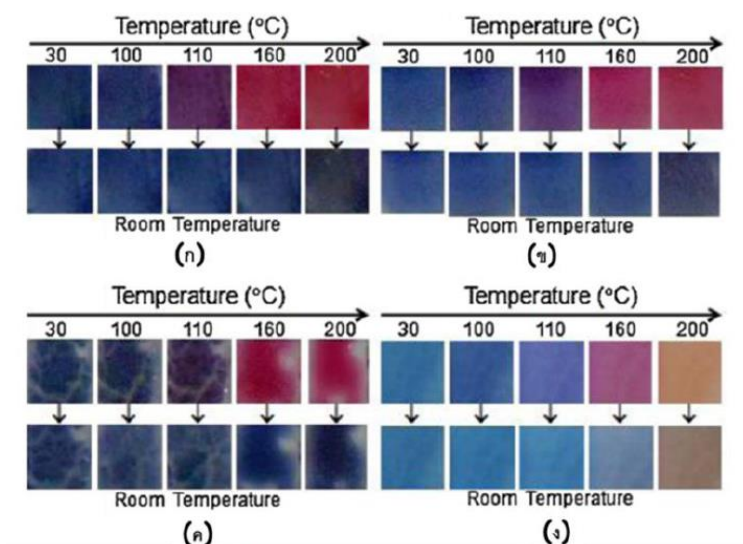


รูปที่ 2.25 การตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิต่าง ๆ

(ก) poly(PCDA) เวสซีเคิล (ข) poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต (ค) poly(TCDA) เวสซีเคิล (ง) poly(TCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และ (จ) poly(HDDA)/ZnO<sup>(39)</sup>

ในปี ค.ศ. 2015 Toommee และคณะ<sup>(40)</sup> ได้ศึกษาผลของการเติมสารช่วยกระจายตัวต่อสมบัติการเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนของแผ่นฟิล์มพอลิไดโอเอเซทีลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่าง ๆ ดังนี้ PS, PMMA, PE และ PVA โดยเตรียมแผ่นฟิล์มด้วยวิธี drop casting เบื้องต้นพบว่า เมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวส่งผลให้การตกตะกอนของพอลิไดโอเอเซทีลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ในตัวทำละลายที่หลากหลายใช้เวลานานขึ้นเพื่อพิจารณาสมบัติการเปลี่ยนสีเนื่องจากความร้อนของแผ่นฟิล์มพอลิไดโอเอเซทีลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต

ในพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ พบว่าแผ่นฟิล์มที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัวเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่าระบบที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัวและที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส พบว่าสีของแผ่นฟิล์มจะไม่สามารถผันกลับได้อีกต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.26



**รูปที่ 2.26** พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่าง ๆ (ก) toluene + PS, (ข) toluene + PMMA, (ค) toluene + PE (ง) water + PVA ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส และหลังเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง<sup>(40)</sup>

ในปี ค.ศ. 2015 วิภาวี ปัญญานันทกิตต์<sup>(41)</sup> ได้ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีด้วยความร้อนของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่ผสมกับยางธรรมชาติในรูปแบบต่าง ๆ คือ ยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางข้น น้ำยางข้นผสมสารคงรูป สารละลายยางธรรมชาติทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูป และสารละลายยางธรรมชาติอิมัลชันทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูป ซึ่งแผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะยึดหยุ่นที่ดี จากการศึกษาพบว่า เมื่อเติมสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ลงในน้ำยางข้นเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงทันที เมื่อทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสารคงรูปจะเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ส่วนพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอิมัลชันทั้งที่มีและไม่มีสารคงรูปเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิ 180 และ 160 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากสมบัติทางกายของฟิล์มที่เตรียมได้พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้จากสารละลาย

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไม่เกิดการคงรูปเนื่องจากไม่สามารถเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งเป็นสารคงรูปได้ในปริมาณที่สูงมากพอเพราะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางชั้นผสมสารคงรูปมีความทนต่อแรงดึงมากที่สุดแต่ปริมาณการคงรูปยังไม่สูงเนื่องจากยางมีระดับการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนสูง

จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาพบว่า การเตรียมฟิล์มของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต ผ่านกระบวนการคงรูปโดยการใช้กัมมะถันเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน ต้องเติมสารเคมีในการคงรูปในปริมาณน้อยและให้ความร้อนในการคงรูปที่เวลาสั้น ๆ ทำให้แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานการบวมตัวในตัวทำละลายน้อยตามไปด้วย เป็นที่ทราบกันดีว่า สมบัติของยางที่ผ่านการคงรูปนั้นขึ้นกับภาวะของกระบวนการคงรูปเป็นอย่างมาก ทั้งในเรื่องของเวลา อุณหภูมิ สูตรของสารเคมีที่ใช้ อัตราเร็วในการเกิดการคงรูป ปัจจุบันได้มีการนำรังสีต่าง ๆ มาใช้ในการคงรูปยางมากขึ้น เช่น รังสีแกมมา และ รังสีลำอิเล็กตรอนเป็นต้นเนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้อัตราเร็วในการคงรูปสูงมาก และมีความสม่ำเสมอมากกว่าการคงรูปด้วยระบบกัมมะถัน

ในปี ค.ศ. 2008 พิไลพร หนูทองคำ<sup>(42)</sup> ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มยางที่มีความใสจากน้ำยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยรังสีแกมมาโดยการเติมสารละลาย Carboxy methyl cellulose (CMC) ทำการแยกชั้นด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง ใช้แรงเหวี่ยง 12,500 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่า การเติมสารละลาย CMC ที่ผ่านการฉายรังสี 3 กิโลเกรย์ ปริมาณ 2 phr ลงในน้ำยางธรรมชาติ จะได้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะใสมีค่าการส่องผ่านของแสง 37.07 และช่วยเพิ่มค่าความต้านทานการดึง นอกจากนี้การเติมสารป้องกันการเสื่อม  $\alpha$ -tocopherol acetate 1 phr ส่งผลให้ฟิล์มยางที่ได้มีค่าการส่องผ่านแสงลดลง จาก 37.07 เป็น 34.43

ในปี ค.ศ. 2009 Komgrit และคณะ<sup>(43)</sup> ศึกษาปริมาณรังสีแกมมาและผลของสารไวต่อปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ คือ n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene ( $C_2Cl_4$ ) และ trichloromethane ( $CHCl_3$ ) ต่อการคงรูปยางในน้ำยางธรรมชาติ การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ การศึกษาหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม เริ่มจากการผสมน้ำยางธรรมชาติกับ n-BA ในปริมาณ 5 phr ทำการฉายรังสีแกมมาปริมาณรังสี 10 กิโลเกรย์ ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 25, 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนสองคือ การศึกษาหาค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสม ทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำยางที่ผสมด้วยสารไวต่อปฏิกิริยาเพียงหนึ่งชนิดกับหลายชนิด นำไปฉายรังสีแกมมาในปริมาณรังสีที่แตกต่างกันคือ 10, 12, 14 และ 16 กิโลเกรย์ กับ 14, 16, 18, 20 และ 22 กิโลเกรย์ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิที่

เหมาะสม คือ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีหรือเพิ่มชนิดของสารไวต่อปฏิกิริยา จะสามารถเพิ่มจำนวน Cross-link density ได้อีกด้วย

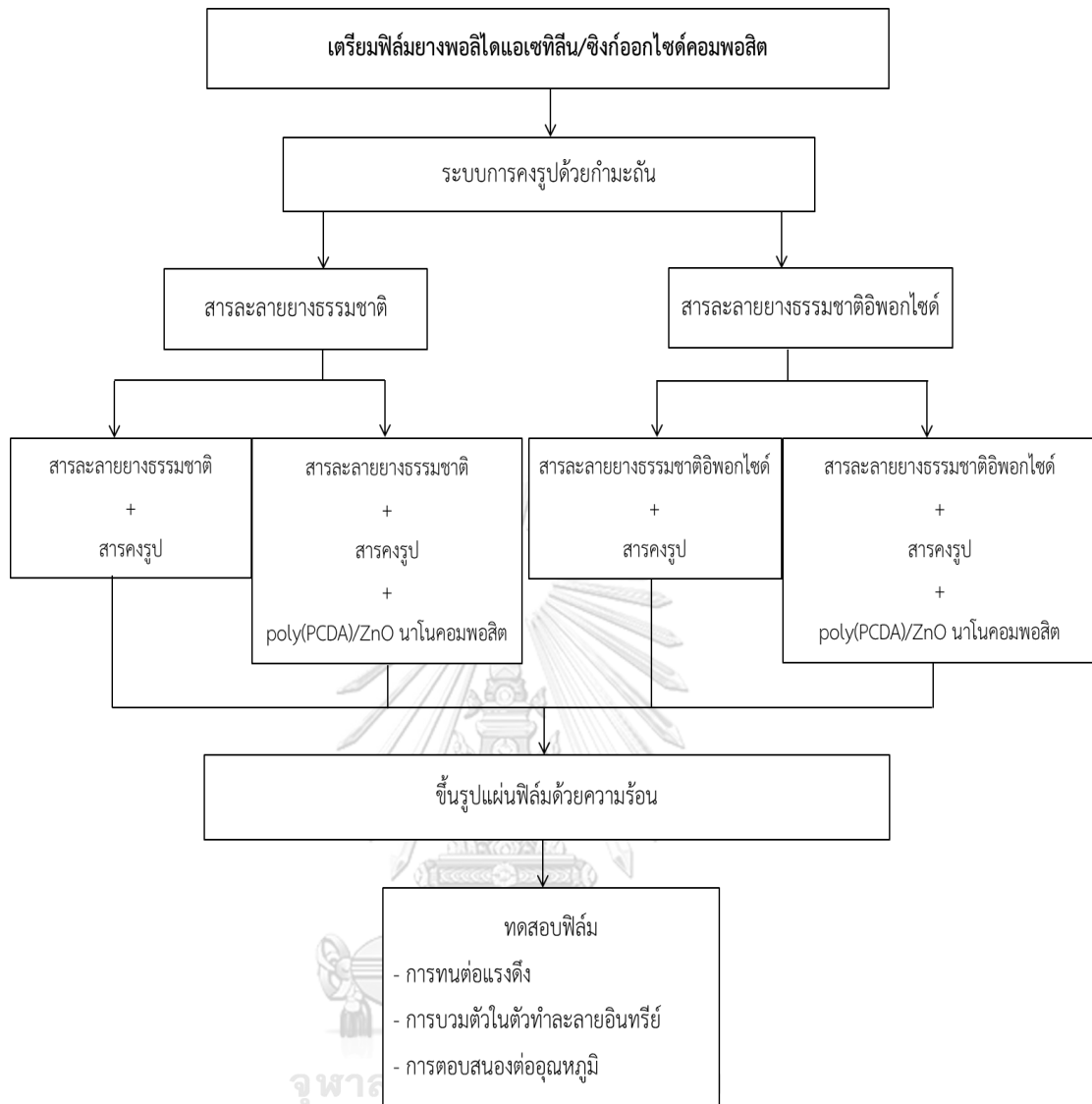
ในปี ค.ศ. 2010 Chakraborty และคณะ<sup>(25)</sup> ศึกษาการใช้รังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยา การคงรูปของน้ำยางธรรมชาติ (NRL) ผสมกับน้ำยางสังเคราะห์สไตรีนบิวตะไดอิน (SBRL) โดยผสม NRL กับ SBRL ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจนผสมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ข้ามคืน จากนั้นนำไปฉาย รังสีแกมมาที่อัตรา 7 กิโลเกรย์ต่อชั่วโมง จากนั้นนำน้ำยางผสมที่ผ่านการฉายแสงมาขึ้นรูปเป็น แผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปล้างและอบให้แห้ง นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ พบว่า แรงที่ใช้ในการดึงแผ่นฟิล์มจนขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ SBRL เพิ่มขึ้น และ ปริมาณรังสีเพิ่มสูงขึ้นถึง 15 กิโลเกรย์ ถ้าอัตราปริมาณการฉายรังสีมากเกินไปแรงที่ใช้ในการดึงจน ขาดจะลดลง เนื่องจากการเสื่อมสภาพ (Degradation) ของกระบวนการเชื่อมขวาง นอกจากนี้ยัง พบว่า เมื่ออัตราส่วนของ SBRL ใน NRL เพิ่มขึ้น จะทำให้น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการสลายตัวที่ อุณหภูมิสูง (Temperature weight loss) มีค่าเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาต่อยอดเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มยางพอลิไดอะแซทิลีน/ ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ที่มีปริมาณการคงรูปที่สูงขึ้น โดยนอกจากจะทำการปรับสูตรสารเคมี ยางให้มีปริมาณการคงรูปด้วยกำมะถันสูงยิ่งขึ้นแล้วยังศึกษาความเป็นไปได้ในการคงรูปยางธรรมชาติ ด้วยวิธีการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนโดยจะทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปยาง

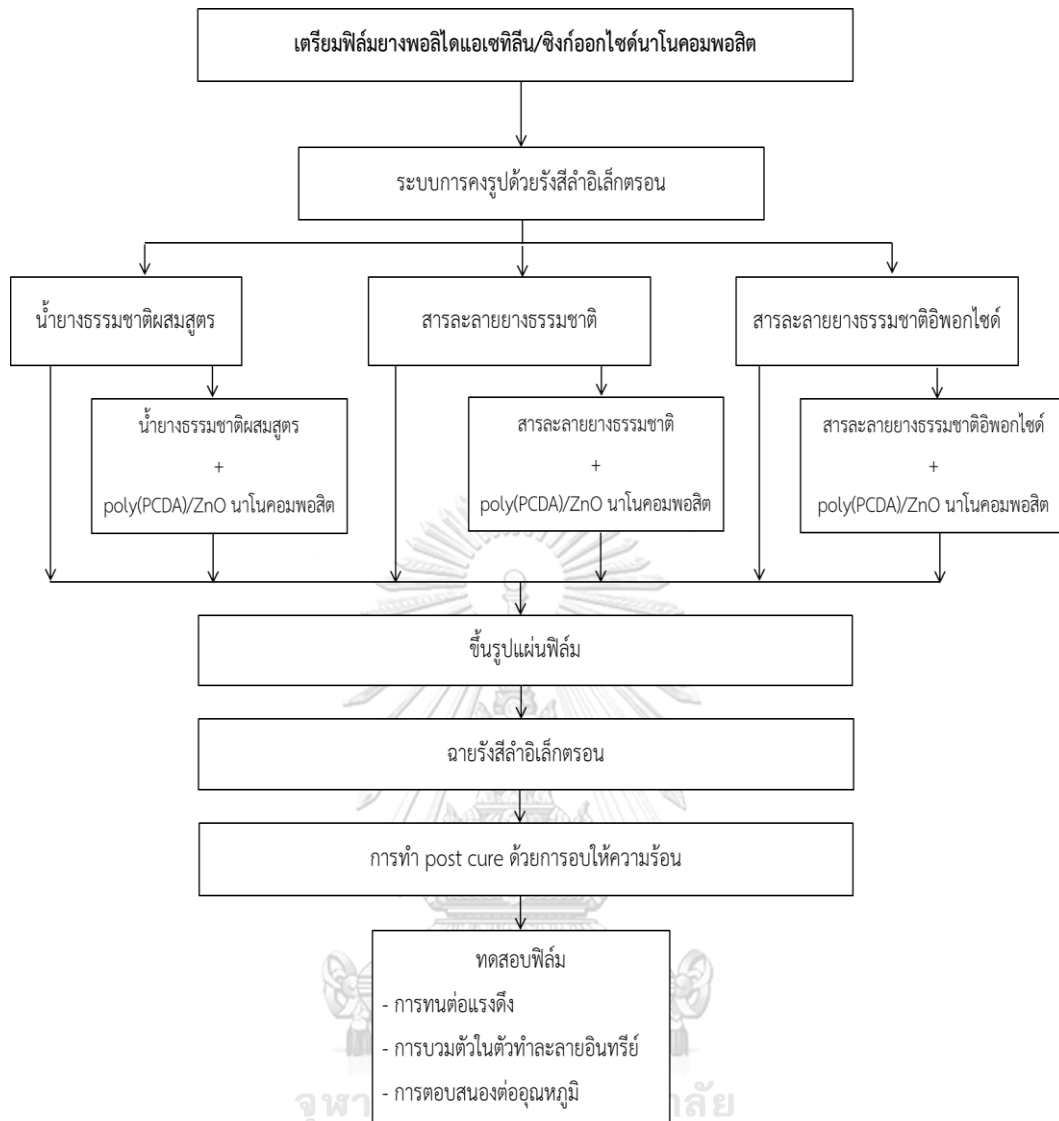
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาระบบการคงรูปยางเพื่อใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ให้มีสมบัติเชิงกลที่สูงและร้อยละการบวมตัวที่ต่ำ อีกทั้งสามารถตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีได้ดี โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการออกแบบสูตรสารเคมีในการคงรูปแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ด้วยกำมะถันเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยจะทำการทดลองในสารละลายของยางธรรมชาติและสารละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และส่วนที่สอง จะศึกษาการคงรูปแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ซึ่งยางธรรมชาติที่ใช้ได้แก่สารละลายของยางธรรมชาติ สารละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร จากนั้นทำการเปรียบเทียบความทนต่อแรงดึง ความต้านทานการบวมตัวในตัวทำละลาย และผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากกระบวนการคงรูปต่าง ๆ โดยแผนผังแผนการดำเนินการวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยระบบก้ำมะถัน



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต



### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต
ยางธรรมชาติแห้ง	STR 5L	Sakdarongreungkij Co.,Ltd.
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง	ENR 25	San-Thap International Co.,Ltd.
น้ำยางผสมสูตร	สำหรับบ่มมือ ทางการแพทย์	สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA)	AR	Sigma-Aldrich Co.,LLC.
ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	ทางการค้า	NANO MATERIALS TECHNOLOGY Co.,Ltd.
คลอโรฟอร์ม	AR	RCI Labscan Co.,Ltd.
น้ำปราศจากไอออน	-	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทลูอิน	AR	RCI Labscan Co.,Ltd.
เตตระเบนซิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (TBzTD)	ทางการค้า	Sunsine Chemical Co.,Ltd.
กรดสเตียริก	ทางการค้า	F.B. THAILAND.,Ltd.
กำมะถัน	ทางการค้า	Utids Enterprise Co.,Ltd.

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
เครื่องกวนแบบเชิงกล (mechanical stirrer)	EUROSTAR รุ่น RW-20
ตู้อบ (hot air oven)	Memmer รุ่น UNB 400
เครื่องชั่งดิจิทัล (digital balance) ทศนิยมสี่ตำแหน่ง	Mettler Toldo รุ่น AB204-S/FACT
เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Vis spectrophotometer)	Analytik Jena รุ่น Specord S 100B
เครื่องอัลตราโซนิคส์โพรบ (ultrasonic probe)	Sonic & Materials รุ่น VCX 130 Vibra-cell
เครื่องอัลตราโซนิคส์ (ultrasonic bath)	Elmasonic รุ่น S30H
เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength tester)	Zwick/Roell รุ่น Z010
เครื่องเร่งอิเล็กตรอนบีมพลังงานสูง (electron beam)	Mevex Corporation Ltd. รุ่น MB 20-16

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

3.3.1.1 การเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารแขวนลอยของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน โดยใช้ 10,12-pentacosadiynic acid (PCDA) เป็นมอนอเมอร์ มีค่าความเข้มข้นของ PCDA 1 มิลลิโมลาร์ และมีปริมาณของซิงก์ออกไซด์คิดเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ PCDA ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. คำนวณและชั่ง PCDA และซิงก์ออกไซด์ โดยกำหนดปริมาณของน้ำที่ปราศจากไอออนเท่ากับ 20 มิลลิลิตร
2. เตรียม PCDA บริสุทธิ์ โดยการนำไปละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มด้วยเครื่อง ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที และกรองด้วยไมลอนฟิลเตอร์ขนาด 0.45 ไมโครเมตร เพื่อกำจัดอนุภาค PCDA มอนอเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส
3. ผสมซิงก์ออกไซด์กับน้ำที่ปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง ultrasonic probe เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้อนุภาคซิงก์ออกไซด์เกิดการกระจายตัว
4. ผสมสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้ลงใน PCDA บริสุทธิ์ที่เตรียมไว้ แล้วนำไปเข้าเครื่อง ultrasonic bath ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้จากข้างต้นมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นห่อด้วยกระดาษฟอยด์เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกครบถ้วนแล้วเก็บเข้าตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำสารแขวนลอยผสมไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำที่ปราศจากไอออน

### 3.3.1.2 การเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน

1. นำสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำที่ปราศจากไอออนไประเหยแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 วัน
2. เติมโทลูอีนปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์นาโนคอมพอสิตที่แห้งแล้ว
3. นำไปเข้าเครื่อง ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน

### 3.3.1.3 ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีน สามารถศึกษาด้วยเครื่อง UV-Vis

Spectrophotometer โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตรโดยใช้น้ำปราศจากไอออนและโทลูอินเป็น blank ตามลำดับ

3.3.1.4 ศึกษาสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในรูปของแข็ง

การเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในรูปของแข็งสามารถศึกษาได้โดยการหยดตัวอย่างลงบนกระจกสไลด์ประมาณ 2 มิลลิลิตร ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจะได้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งเป็นเฟสเดียวกันคล้ายฟิล์มมีขนาดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร และยาวประมาณ 1 เซนติเมตร นำตัวอย่างที่ได้ไปให้ความร้อนในตู้อบ จากนั้นถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มแต่ละครั้งในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยถ่ายภาพทุก 5 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกและถ่ายภาพทุก 10 องศาเซลเซียส ในช่วงท้าย เพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสีในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นอกจากนี้ฟิล์มที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องหลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิก็นำมาถ่ายภาพเช่นกันเพื่อดูความสามารถในการผันกลับสีสู่อุณหภูมิห้อง

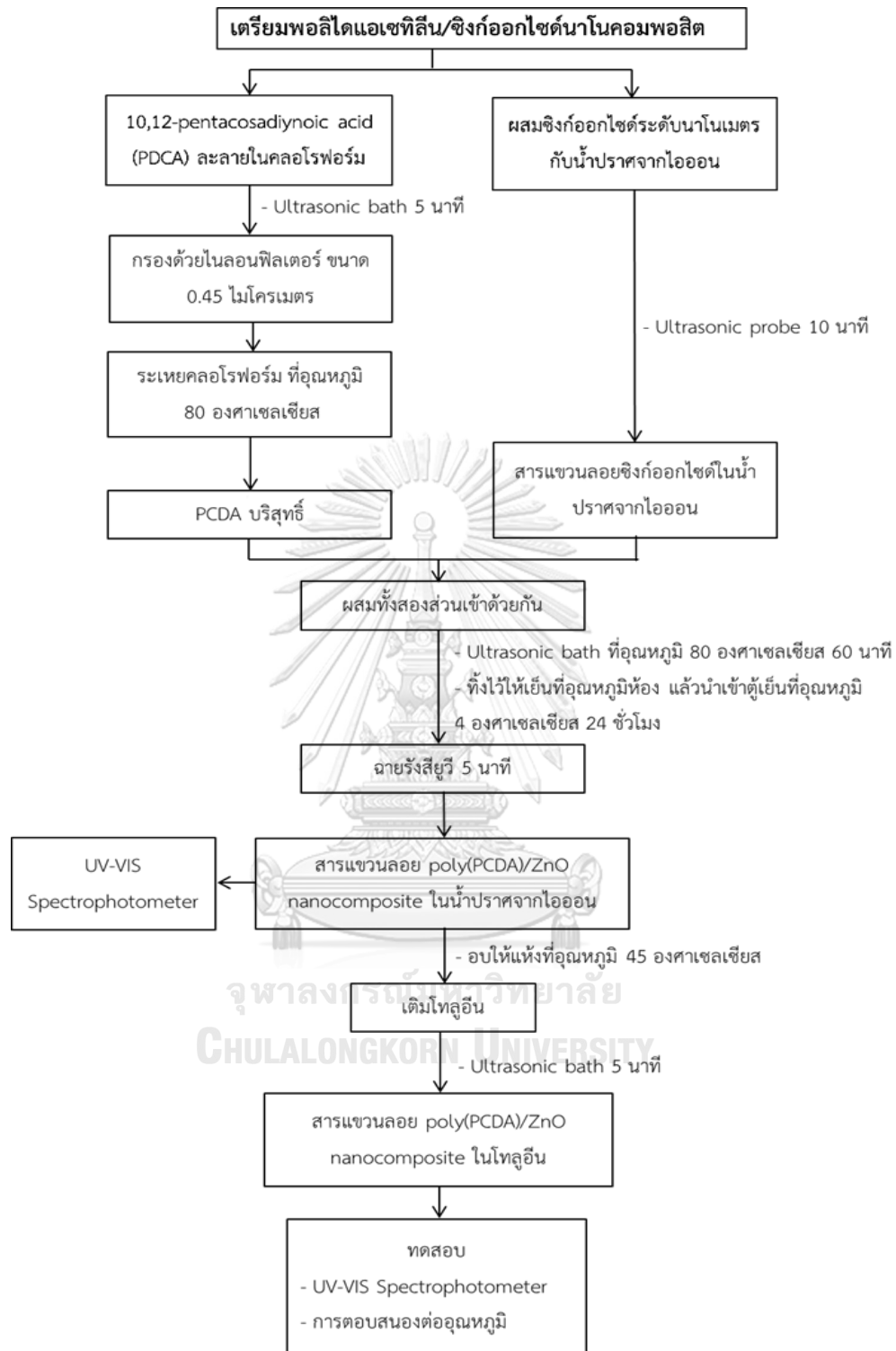
ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและโทลูอิน สามารถลำดับขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.3

### 3.3.2 การเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกัมมะถัน

ในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาหาสูตรสารประกอบที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ซึ่งยางธรรมชาติที่ใช้ ได้แก่ ยางธรรมชาติแห้ง และยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง ซึ่งจะทำให้การศึกษาอิทธิพลของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้การคงรูปเกิดขึ้นได้ดีทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีดังรายละเอียดต่อไปนี้

- การเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติแห้งโดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกัมมะถัน

1. ละลายยางธรรมชาติแห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอิน โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติ
2. เติมสารคงรูปอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติผสมสูตร



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโพลีเอิน

**ตารางที่ 3.3** อัตราส่วนต่าง ๆ สารคงรูปสำหรับการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติแห้ง

สารเคมี (phr)	สูตรยาง			
	1	2	3	4
ยางธรรมชาติแห้ง	100	100	100	100
ซิงค์ออกไซด์	3	3	3	3
กรดสเตียริก	1	1	1	1
เทพรเมทิลไทยแรมโดซิลไฟด์	2	3	4	5
กำมะถัน	1.5	1.5	1.5	1.5

\*ยางธรรมชาติแห้งเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายยางธรรมชาติ

3. นำละลายสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน กำหนดให้มีพอลิไดออกเซทิลีน/ซิงค์ออกไซด์นาโนคอมพอสิต ปริมาณ 1.65 phr แล้วผสมกับสารละลายยางธรรมชาติที่ได้จากข้อ 2 โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

4. ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้อ 3 ลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ตั้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

5. ศึกษาอุณหภูมิ และระยะเวลาในการคงรูปแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติแห้ง โดยทำการแปรอุณหภูมิ คือ 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส และแปรเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ

- การเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งโดยใช้ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน

1. ละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอิน โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

2. เติมสารคงรูปยางดังแสดงในตารางที่ 3.4 จะได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร

**ตารางที่ 3.4** อัตราส่วนต่าง ๆ สารคงรูปสำหรับการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์

สารเคมี (phr)	สูตรยาง			
	1	2	3	4
ยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง	100	100	100	100
ซิงก์ออกไซด์	3	3	3	3
กรดสเตียริก	1	1	1	1
เทตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์	2	3	4	5
กำมะถัน	1.5	1.5	1.5	1.5

\*ยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

3. นำละลายสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน โดยกำหนดให้มี poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ปริมาณ 2.49 phr แล้วผสมกับสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตรที่ได้จากข้อ 2 โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว

### 3.3.3 การเตรียมฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยใช้ระบบการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

สำหรับการศึกษาในส่วนนี้การคงรูปยางจะใช้รังสีลำอิเล็กตรอนด้วยเครื่องเร่งอิเล็กตรอนบีมพลังงานสูง (electron beam) รุ่น MB 20-16 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยอัตราการปล่อยรังสี (dose rate) จะอยู่ที่ 10 กิโลเกรย์ต่อนาที ระดับปริมาณรังสีอิเล็กตรอนที่ใช้ในการคงรูปยางอยู่ที่ 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ ตามลำดับ



**รูปที่ 3.4** เครื่องเร่งอิเล็กตรอนบีมพลังงานสูง (electron beam) รุ่น MB 20-16

สำหรับกระบวนการคงรูปอย่างด้วยรังสีลำอเล็กตรอนจะทำการศึกษาโดยใช้สารละลายของยางธรรมชาติ สารละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

-การเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอลิตที่เตรียมจากยางธรรมชาติ  
แห้งโดยใช้ระบบการคงรูปด้วยรังสีลำอเล็กตรอน

สำหรับการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอลิตจากยางธรรมชาติแห้งด้วยรังสีลำอเล็กตรอนในการคงรูปด้วยสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1: การเตรียมแผ่นฟิล์มยางเพื่อใช้ในคงรูปด้วยรังสีลำอเล็กตรอน

1. ละลายยางธรรมชาติแห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอิน โดยใช้เครื่องกวนผสมสารได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติ

2. ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทสารละลายยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากข้างต้นลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปฉายรังสีลำอเล็กตรอนโดยทำการแปรปริมาณการฉายรังสีลำอเล็กตรอนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มผ่านการฉายรังสีลำอเล็กตรอนแล้วไปอบในตู้อบ โดยจะทำการแปรอุณหภูมิและเวลาในการอบ ดังนี้ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

4. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลและระดับการบวมตัวในตัวทำละลาย

ส่วนที่ 2: การเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอลิต

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปอย่างด้วยรังสีลำอเล็กตรอนจากส่วนที่ 1 ก็จะทำการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอลิตโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ละลายยางธรรมชาติแห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอิน โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติ

2. ละลายสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอลิตในโทลูอิน โดยกำหนดให้มี poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอลิต ในปริมาณ 0.83 และ 1.65 phr แล้วผสมกับสารละลายยางธรรมชาติที่ได้จากข้อ 1 โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียว



3. ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้ จากข้อ 2 ลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

4. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ทำการคงรูปร่างด้วยการรังสีโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่จากการศึกษาในส่วนของ 1

5. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่อไป

- การเตรียมฟิล์ม  $poly(PCDA)/ZnO/ENR$  นาโนคอมพอสิต จากยางธรรมชาติ อีพอกไซด์แห้งโดยใช้ระบบการคงรูปร่างด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

สำหรับการเตรียมฟิล์ม  $poly(PCDA)/ZnO/ENR$  นาโนคอมพอสิต จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้งโดยใช้รังสีลำอิเล็กตรอนในการคงรูปร่างด้วยสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1: การเตรียมแผ่นฟิล์มยางเพื่อใช้ในคงรูปร่างด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

1. ละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอีน โดยใช้เครื่องกวนผสมสาร ได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

2. ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมได้ลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปฉายรังสีลำอิเล็กตรอนโดยทำการแปรปริมาณการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มผ่านการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนแล้วไปอบในตู้อบ โดยจะทำการแปรอุณหภูมิและเวลาในการอบ ดังนี้ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

ส่วนที่ 2: การเตรียมฟิล์ม  $poly(PCDA)/ZnO/ENR$  นาโนคอมพอสิต

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปร่างด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนจากส่วนที่ 1 ก็จะทำการเตรียมฟิล์ม  $poly(PCDA)/ZnO/ENR$  นาโนคอมพอสิตโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์แห้ง 5 กรัม ด้วยโทลูอีน โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนได้เป็นสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

2. ละลายสารแขวนลอย  $poly(PCDA)/ZnO$  นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน โดยกำหนดให้มี  $poly(PCDA)/ZnO$  นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 1.24 และ 2.49 phr แล้ว

ผสมกับสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จากข้อ 1 โดยใช้เครื่องกวนผสมสารจนเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน

3. ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้จากข้อ 2 ลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

4. นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาทำการคงรูปอย่างด้วยการฉายรังสีโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่จากการศึกษาในส่วนของที่ 1

5. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่อไป

- การเตรียมฟิล์ม  $poly(PCDA)/ZnO/NR$  นาโนคอมพอสิต จากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรโดยใช้ระบบการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

สำหรับการเตรียมฟิล์ม  $poly(PCDA)/ZnO/NR$  นาโนคอมพอสิต จากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรโดยใช้รังสีลำอิเล็กตรอนในการคงรูปด้วยสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1: การเตรียมแผ่นฟิล์มยางโดยการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

1. นำน้ำยางธรรมชาติโดยมีสูตรน้ำยางดังตารางที่ 3.5 มาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

2. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปฉายรังสีลำอิเล็กตรอน โดยทำการแปรปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอนที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กิโลเกรย์ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้มาอบให้ความร้อนโดยการแปรอุณหภูมิและเวลา ดังนี้ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

3. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลและระดับการบวมตัว

ในตัวทำละลาย

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรถุงมือแพทย์

สาร	น้ำหนัก (กรัม)
น้ำยางธรรมชาติชั้น	167
10% โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์	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

ส่วนที่ 2: การเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปร่างด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนจาก ส่วนที่ 1 ก็จะทำการเตรียมฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ผสมน้ำยางผสมสูตรกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน 0.07 phr โดยกวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมสารจนสารแขวนลอยทั้งสองเป็นเนื้อเดียวกัน

2. จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยการเทสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้ลงบนแบบกระจกที่มีขนาด กว้าง 9.20 เซนติเมตร ยาว 12.20 เซนติเมตร และลึก 0.70 เซนติเมตร ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ทำการคงรูปร่างด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่จากการศึกษาในส่วนที่ 1

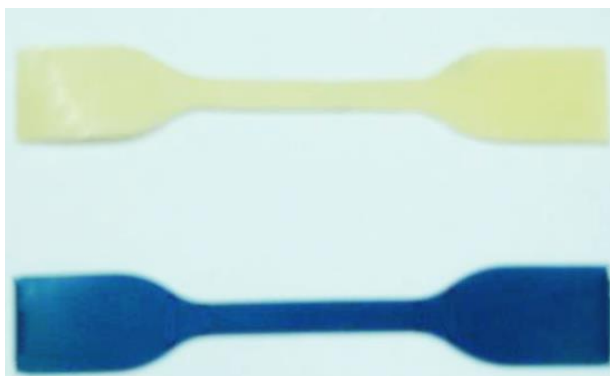
4. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่อไป

### 3.3.4 การศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบ ที่ผ่านการคงรูปด้วยกำมะถันและคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength tester) Zwick/Roell รุ่น Z010 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยอัตราเร็วในการดึงทดสอบอยู่ที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที และขึ้นทดสอบ ถูกตัดเป็นรูปร่างดัมเบลล์ตามแบบ ISO 37 type IV ตัวอย่างขึ้นทดสอบของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สำหรับในการทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิดจะ ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง และรายงานผลออกมาเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength tester) Zwick/Roell รุ่น Z010



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างทดสอบรูปดัมเบลล์ของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

### 3.3.5 การศึกษาการบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

สำหรับการบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ของฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากยางธรรมชาติทั้ง 3 รูปแบบ ที่ผ่านการคงรูปด้วยกำมะถันและการคงรูปด้วยรังสีลําอเล็กตรอน สามารถทดสอบได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. นำแผ่นฟิล์มยางและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้ข้างต้น มาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยตัดให้มีขนาด 1 x 1 เซนติเมตร
2. ชั่งน้ำหนักของแผ่นฟิล์มจากนั้นนำมาแช่ในสารละลายโทลูอีน ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน
3. ทำการชั่งน้ำหนักฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไป โดยร้อยละการบวมตัวสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

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

โดย W คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่บวมในโทลูอีน และ  $W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างแห้ง

### 3.3.6 การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ และสารละลายยางธรรมชาติอพอไซด์ที่มีการคงรูปด้วยระบบกำมะถันและคงรูปด้วยรังสีลําอเล็กตรอน ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล

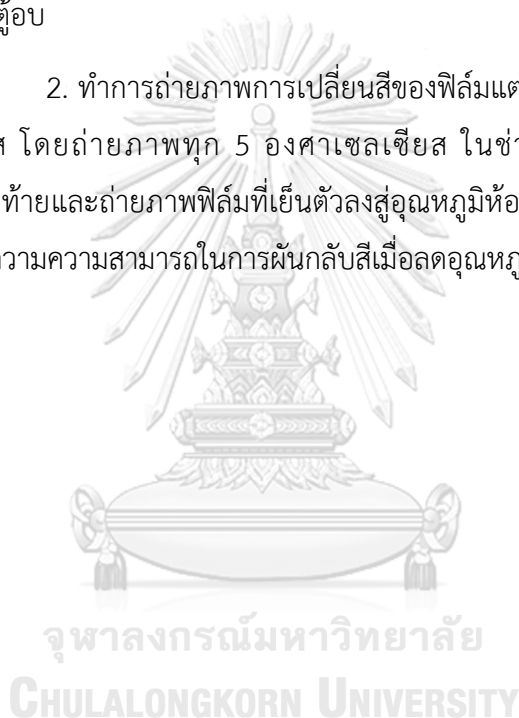
สเปกโตรโฟมิเตอร์ (UV/Vis spectrophotometer) Analytik Jena รุ่น Specord S 100B โดยใช้ โทลูอินและกระจกสไลด์เป็น blank ตามลำดับ

### 3.3.7 การศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

การตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต สามารถทดสอบได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. นำฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมด้วยวิธีต่าง ๆ ไปให้ความร้อนโดยใช้ตู้อบ

2. ทำการถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มแต่ละชนิด ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยถ่ายภาพทุก 5 องศาเซลเซียส ในช่วงแรก และถ่ายภาพทุก 10 องศาเซลเซียส ในช่วงท้ายและถ่ายภาพฟิล์มที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้องหลังจากได้รับความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิเพื่อดูความสามารถในการผันกลับสีเมื่อลดอุณหภูมิสู่อุณหภูมิห้อง



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและพัฒนาระบบคงรูปยางเพื่อนำมาใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยในส่วนแรกจะทำการปรับสูตรสารเคมีในการคงรูปด้วย กัมมะถันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยใช้เวลาในการคงรูปให้สั้นลงและศึกษาการคงรูปยางด้วยรังสี ลำอิเล็กตรอน ทั้งจากสารละลายของยางธรรมชาติ สารละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และ น้ำยางธรรมชาติผสมสูตร โดยภาวะในการคงรูปที่เหมาะสมจะต้องเป็นภาวะการคงรูปที่ให้แผ่นฟิล์ม ยางที่มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงและร้อยละการบวมตัวในตัวทำละลายต่ำ และจะต้องไม่ทำให้ฟิล์ม ยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เกิดการเปลี่ยนอย่างถาวรระหว่างขั้นตอนการเตรียม เมื่อได้ ภาวะที่เหมาะสมในการคงรูปยางแล้วก็จะทำการเตรียมฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และศึกษาพฤติกรรมของการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากการกระบวนการคงรูปต่าง ๆ กัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา แผ่นฟิล์มสำหรับเป็นวัสดุตรวจวัดอุณหภูมิต่อไปในอนาคต ซึ่งผลการทดลองแสดงสามารถแบ่งออกได้ เป็นส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การดูดกลืนแสงและพฤติกรรมของการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ ของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

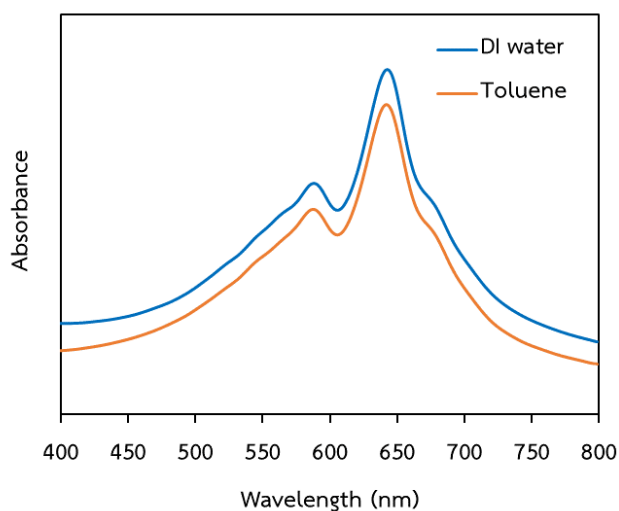
##### 4.1.1 การดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำ ปราศจากไอออนและในโทลูอีน

ในงานวิจัยนี้เบื้องต้นได้ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายโทลูอีนเทียบกับน้ำปราศจาก ไอออนต่อสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความยาวคลื่นที่เกิดการ ดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ในสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยหากการเปลี่ยนตัวทำละลายส่งผลต่อการ จัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกต (conjugation length) ของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้างของสาร แขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ค่าความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดก็จะ เปลี่ยนตำแหน่งไป ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสง (absorption band) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่น สูงกว่า เรียกว่า การเกิด red shift จะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ หากตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงปรากฏที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า จะเรียกว่า การเกิด blue shift จะแสดงถึงการลดลงของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิไดแอเซทิลีน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า

ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน ปรากฏที่ความยาวคลื่น 643 นาโนเมตร และปรากฏยอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 675 นาโนเมตร และสำหรับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน จะพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 645 นาโนเมตร และปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร และมีแถบการดูดกลืนแสงเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 675 นาโนเมตร<sup>(40)</sup>

ผลจากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีน ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้พบว่า สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร และแถบการดูดกลืนเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่น ประมาณ 665 นาโนเมตร สำหรับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน มีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงสุด 640 นาโนเมตร ปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร และแถบการดูดกลืนเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่น ประมาณ 670 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้<sup>(41)</sup> โดยสามารถกล่าวได้ว่า การใช้โทลูอีนเป็นตัวกลางไม่เกิดการรบกวนโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอีน ปรากฏการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน อีกทั้งเมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นโทลูอีน สารแขวนลอยที่ได้ยังคงมีสีน้ำเงินเข้มและกระจายตัวได้ดีเมื่อเทียบกับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้โทลูอีนในการเตรียมสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต และสำหรับเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออน ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

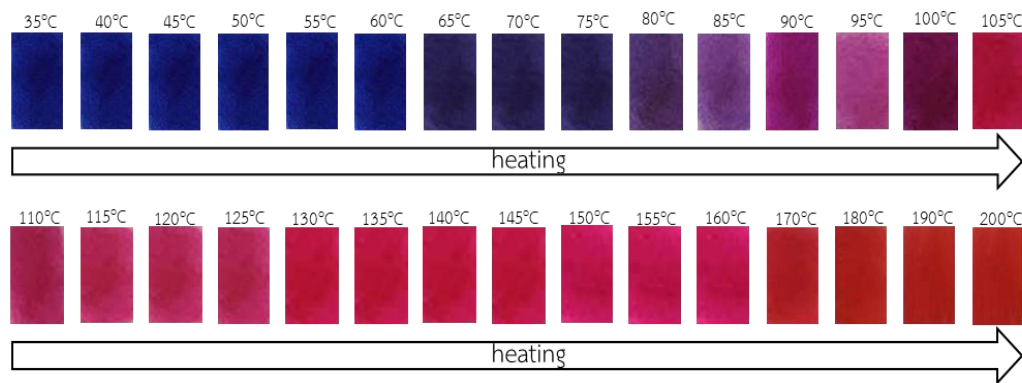




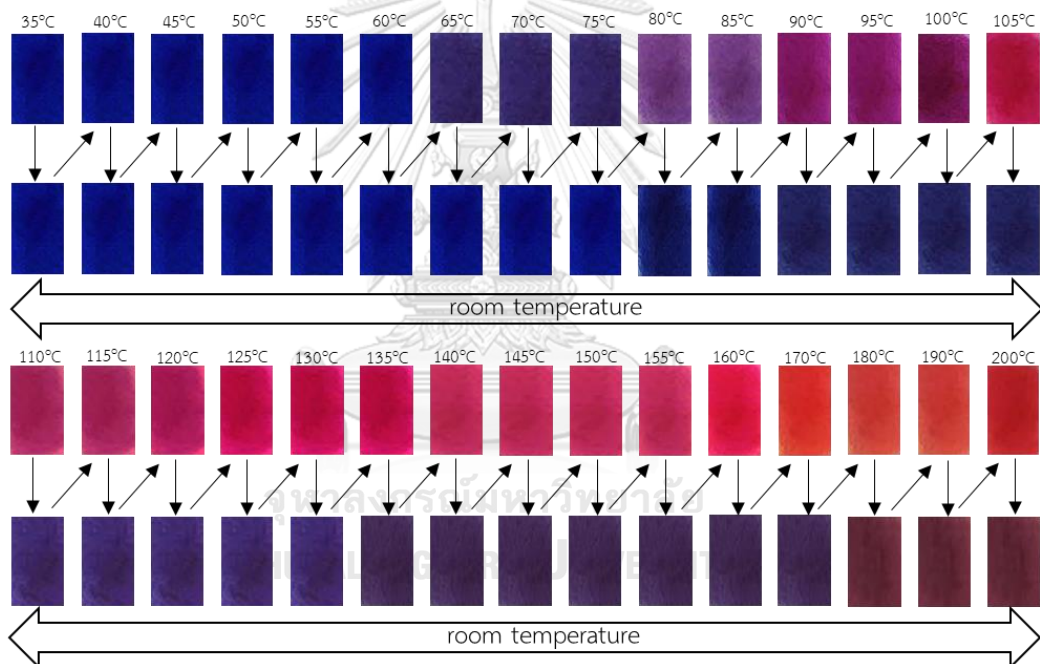
**รูปที่ 4.1** สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนและในโทลูอิน

#### 4.1.2 พฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เมื่ออยู่ในรูปของฟิล์ม

เนื่องจากระบบการคงรูปอย่างไม่ว่าจะเป็นการคงรูปด้วยกัมมะถันหรือรังสีลำอิเล็กตรอนล้วนแต่ต้องให้ความร้อนกับยางทั้งชิ้น ดังนั้นในเบื้องต้นจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เพียงอย่างเดียวก่อน โดยทำการหยด poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน ลงบนกระจกสไลด์และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง พฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส และพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยในช่วงแรกของการทดลองจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงท้ายของการทดลองจะเพิ่มทีละ 10 องศาเซลเซียส และในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะคงไว้ที่อุณหภูมินั้น ๆ เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า เมื่อ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ได้รับความร้อนจะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมชมพูในช่วงอุณหภูมิ 65 ถึง 95 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนแดงเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลไหม้ สำหรับพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยการให้ความร้อนด้วยเตาอบในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง

200 องศาเซลเซียส ซึ่งทำการศึกษาโดยการถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่แต่ละอุณหภูมิ จากนั้นนำ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ออกจากเตาอบทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการถ่ายภาพอีกครั้ง และทำซ้ำแบบเดิมในทุกช่วงอุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่า ที่ช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 105 องศาเซลเซียส poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต แสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะแสดงการเปลี่ยนสีและการผันกลับสีได้แบบไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เมื่อ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง จะมีสีม่วงอมแดงบางส่วน และในช่วงอุณหภูมิ 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส พบว่า poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ปรากฏสีน้ำตาลไหม้ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปร่างจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ซึ่งผลการทดลองพบว่าควรมีค่าต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะทำการศึกษากาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปร่าง

#### 4.2 ผลของปริมาณสารคงรูปและภาวะที่ใช้ในการคงรูปร่างต่อสมบัติเชิงกลและระดับการบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยาง

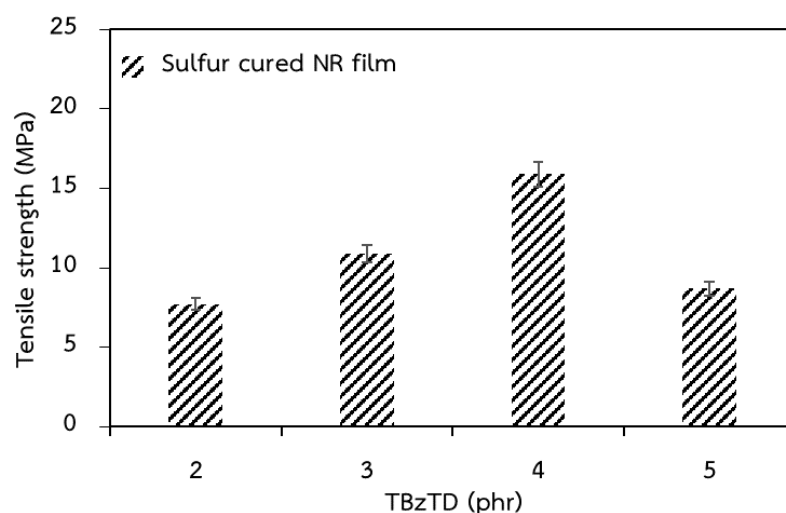
สำหรับการศึกษาผลของปริมาณสารคงรูปและภาวะที่ใช้ในการคงรูปร่างต่อสมบัติเชิงกลและร้อยละการบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามระบบการคงรูปที่ใช้ ซึ่งได้แก่ การคงรูปร่างด้วยสารคงรูปกำมะถันและการคงรูปร่างด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน การทดลองในส่วนแรกจะทำการศึกษาจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด ซึ่งจะทำการศึกษาผลของปริมาณสารคงรูปและภาวะที่ใช้ในการคงรูปต่อสมบัติเชิงกลและร้อยละการบวมตัวของแผ่นฟิล์มยางชนิดต่าง ๆ จากนั้นจึงนำสูตรยางและภาวะการคงรูปที่ให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมมาใช้เตรียมเป็นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรม การตอบสนองต่อการเปลี่ยนต่ออุณหภูมิในขั้นตอนต่อไป ส่วนที่ 2 จะเป็นการใช้รังสีลำไอเล็กตรอนในการคงรูปร่าง ซึ่งเมื่อทำการฉายรังสีลำไอเล็กตรอนแล้ว จะต้องทำการให้ความร้อนกับยางเพื่อทำให้การคงรูปเกิดอย่างสมบูรณ์ขึ้น โดยในส่วนที่ 2 จะทำการศึกษากับน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร สารละลายยางธรรมชาติ และสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด ซึ่งจะทำการศึกษาผลของปริมาณรังสีลำไอเล็กตรอนที่ฉาย รวมไปถึงอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนต่อสมบัติเชิงกลและร้อยละการบวมตัวของแผ่นฟิล์มยางชนิดต่าง ๆ เมื่อได้ภาวะการคงรูปร่างด้วยรังสีลำไอเล็กตรอนที่ให้แผ่นฟิล์มยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จึงทำการเตรียมแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรม การตอบสนองต่อการเปลี่ยนต่ออุณหภูมิในขั้นตอนต่อไป

## 4.2.1 ระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน

### 4.2.1.1 फिल्मยางธรรมชาติ

- ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD

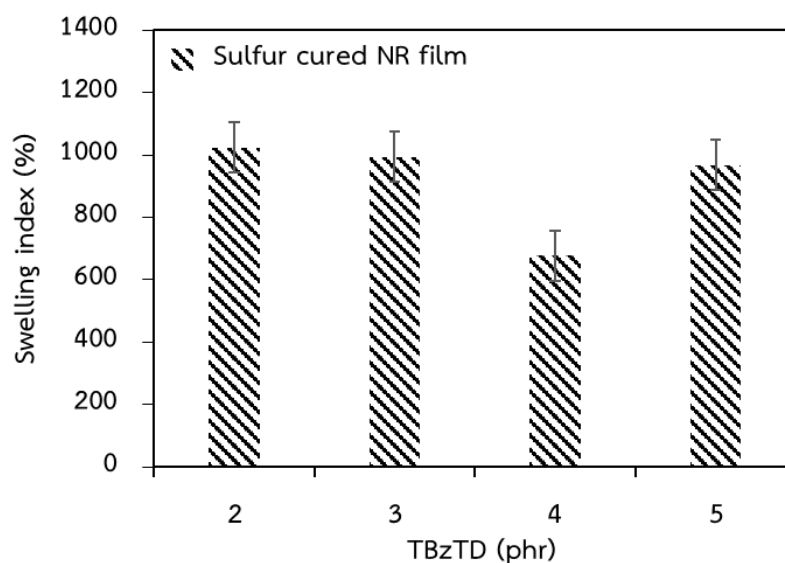
สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เตตระเบนซิล-ไทอูแรมไดซัลไฟด์ (Tetrabenzyl thiuram disulphide หรือเรียกโดยย่อ ว่า TBzTD) จัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้เนื่องจากเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปที่ไม่ก่อให้เกิดไนโตรซามีนซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ก่อมะเร็ง รูปที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณ TBzTD ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติ เมื่อคงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า การเติม TBzTD ในปริมาณ 2 phr ฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 7.72 MPa และเมื่อเพิ่มปริมาณ TBzTD เป็น 3 และ 4 phr ค่าความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ TBzTD 4 phr ฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 15.89 MPa อย่างไรก็ตามหากเพิ่มปริมาณ TBzTD จาก 4 และ 5 phr พบว่าฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงลดลง



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ

รูปที่ 4.5 แสดงผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD ต่อร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนของฟิล์มยางธรรมชาติ โดยค่าร้อยละการบวมตัวแปรผกผันกับปริมาณการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ยาง กล่าวคือ ยิ่งค่าร้อยละการบวมตัวมากแสดงว่าเกิดการเชื่อมขวาง

ระหว่างสายโซ่อย่างต่ำ จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ปริมาณการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่อย่างจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 2 ถึง 4 phr จากนั้นจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD จากผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ว่า สาเหตุที่ฟิล์มยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ในปริมาณ 5 phr มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าฟิล์มยางที่คงรูปด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ในปริมาณ 4 phr ก็เนื่องมาจากฟิล์มยางที่ได้มีระดับการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ที่ต่ำกว่า

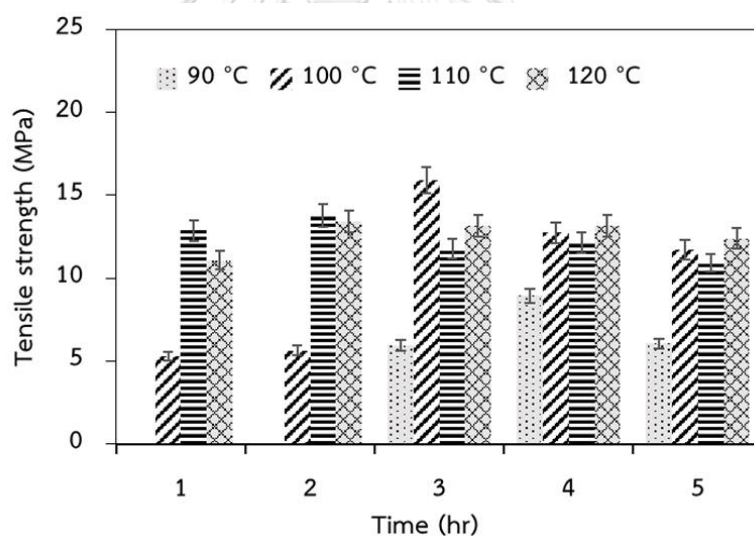


รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนของฟิล์มยางธรรมชาติ

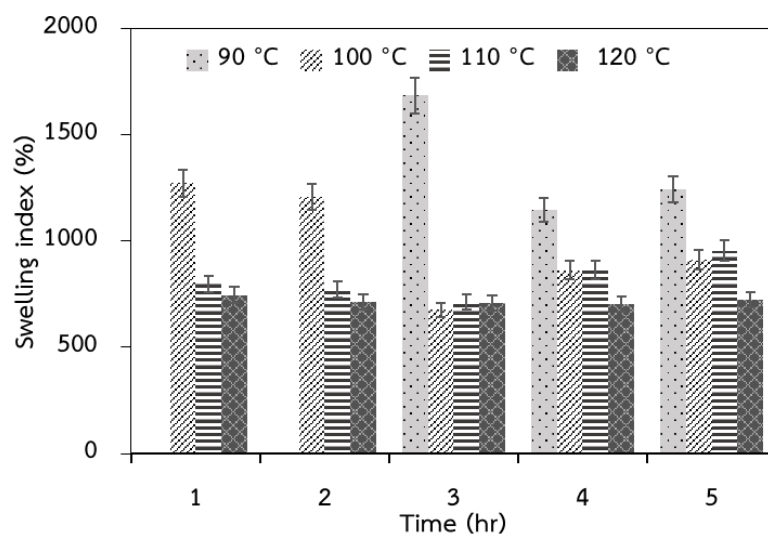
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY  
- ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูป

รูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปในช่วง 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ต่อค่าความทนต่อแรงดึงและร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติที่คงรูปก้ำมะถันโดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ในปริมาณ 4 phr ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ทุกช่วงเวลา และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ฟิล์มยางธรรมชาติไม่สามารถเกิดการคงรูปได้ จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มยางธรรมชาติที่มีการคงรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 15.89 MPa ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าฟิล์มยางธรรมชาติที่มีการคงรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 677.30

ซึ่งหมายความว่าฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้มีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่หรือการคงรูปมากที่สุด การเพิ่มอุณหภูมิในการคงรูปให้สูงขึ้นสามารถช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคงรูปให้สั้นลงถึงแม้ว่าค่าความทนแรงดึงที่ได้จะต่ำกว่าของฟิล์มยางธรรมชาติที่มีการคงรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เล็กน้อยก็ตาม จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติที่คงรูปที่อุณหภูมิ 110 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 13.79 และ 13.42 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อลองทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่า แผ่นฟิล์มที่ได้เปลี่ยนเป็นสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ของยางธรรมชาติจากสารละลาย คือการใช้สูตรยางที่ผสมกรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr กำมะถัน 1.5 phr และใช้ TBzTD ในปริมาณ 4 phr โดยภาวะที่สามารถให้แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดโดยไม่รบกวนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะอยู่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อร้อยละการบวมตัวในโพลูอินของฟิล์มยางธรรมชาติ



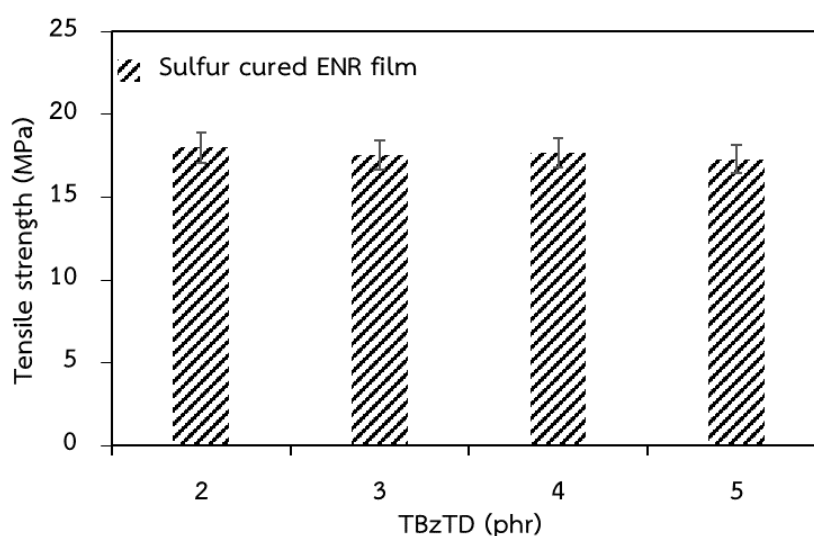
รูปที่ 4.8 การปรากฏสีแดงของแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต เมื่อคงรูปที่อุณหภูมิ 110 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.2.1.2 ฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์

- ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBZTD

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นยางธรรมชาติที่มีการแทนที่พันธะคู่ในโครงสร้างด้วยวงแหวนอิพอกไซด์หรือหมู่ออกซิเจนส่งผลให้ยางมีความทนทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วสูงขึ้น ดังนั้นยางธรรมชาติดัดแปรชนิดนี้จึงสามารถนำไปใช้งานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากผลการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้านี้<sup>(41)</sup> โดยได้ใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในการคงรูป แต่ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่สามารถใส่ได้น้อยมากเนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้

สภาพกรด-เบสมีค่าต่ำซึ่งเป็นสิ่งกระตุ้นที่ทำให้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างถาวร ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงมีความทนต่อแรงดึงน้อยมาก ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงจะทำการคงรูปฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน โดยจะหาปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูป TBzTD ที่เหมาะสำหรับการคงรูปยางธรรมชาติอีพอกไซด์ด้วยกำมะถัน ภาวะการคงรูปที่ใช้ในการทดลองส่วนนี้จะอยู่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า การเติม TBzTD ในปริมาณต่าง ๆ ทำให้ได้ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความทนต่อแรงดึงต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

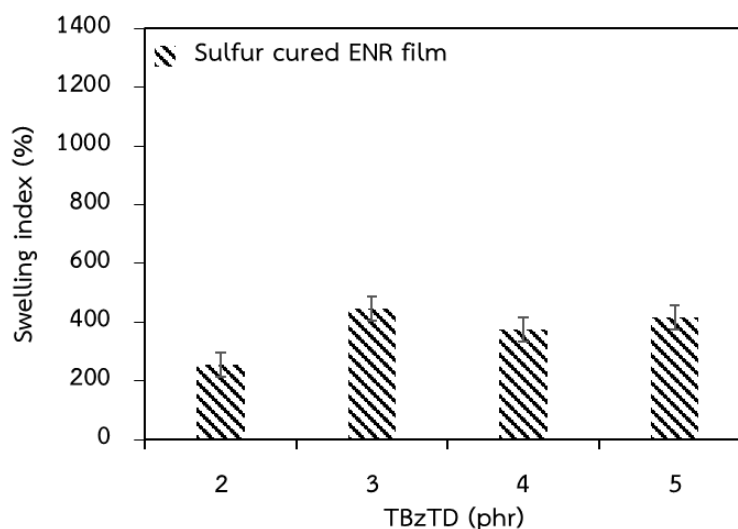


รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ร้อยละการบวมตัวของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยาคงรูป TBzTD ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เติมสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป TBzTD ในปริมาณ 2 phr มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับร้อยละ 256.36 ดังนั้นปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป TBzTD ที่เหมาะสมสำหรับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในการศึกษานี้จะอยู่ที่ 2 phr





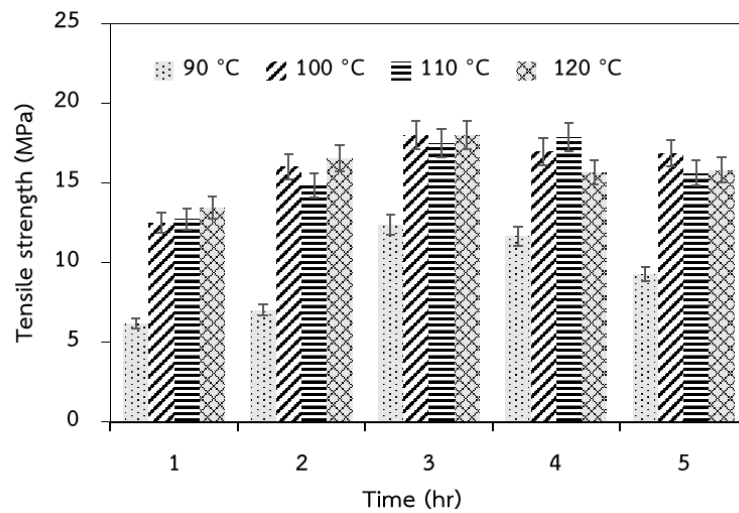
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ต่อร้อยละการบวมตัวในโพลูอินของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์

- ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูป

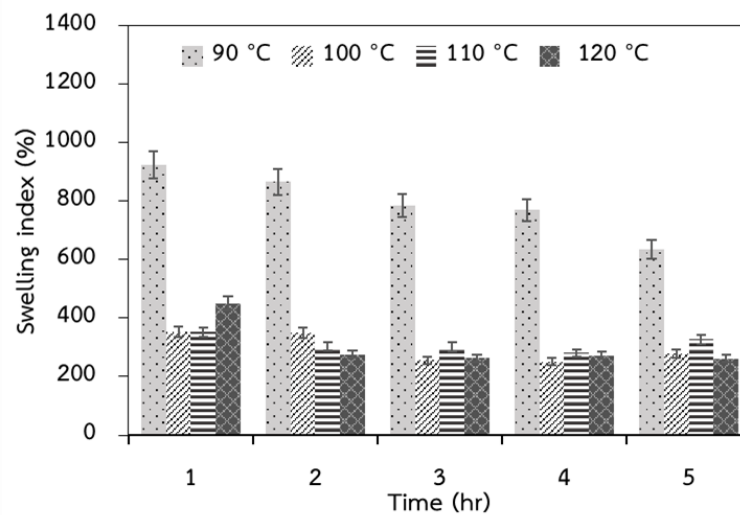
รูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูป ในช่วง 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส และเวลาในช่วง 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ต่อค่าความทนต่อแรงดึงและร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปกำมะถันโดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD ในปริมาณ 2 phr จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทุกช่วงเวลาไม่สามารถคงรูปได้เช่นเดียวกับกรณีของฟิล์มยางธรรมชาติ ในขณะที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทุกช่วงเวลายางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเกิดการคงรูปได้ ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากพันธะคู่หน่วยซ้ำที่ติดกับหน่วยซ้ำที่เป็นวงแหวนอีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันที่สูงกว่า<sup>(44)</sup> แต่อย่างไรก็ตามการคงรูปที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่ทุกช่วงเวลาจะให้ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 พบว่า การคงรูปเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ทุกอุณหภูมิ มีแนวโน้มที่จะได้ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด อีกทั้งยังพบว่ค่าความทนต่อแรงดึงของยางที่คงรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ ยกเว้นที่ 90 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ในรูปที่ 4.12 พบว่า ประสิทธิภาพในการคงรูปอย่างทีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำที่สุดทุกช่วงเวลา เนื่องจากยางที่ได้จากภาวะการคงรูปข้างต้นมีร้อยละการบวมตัวในโพลูอินมากที่สุด สำหรับการคงรูปที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า การคงรูปเป็นเวลา

1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง พิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่าร้อยละการบวมตัวต่างกันเล็กน้อย โดยฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการบวมในโทลูอีนต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 256.36

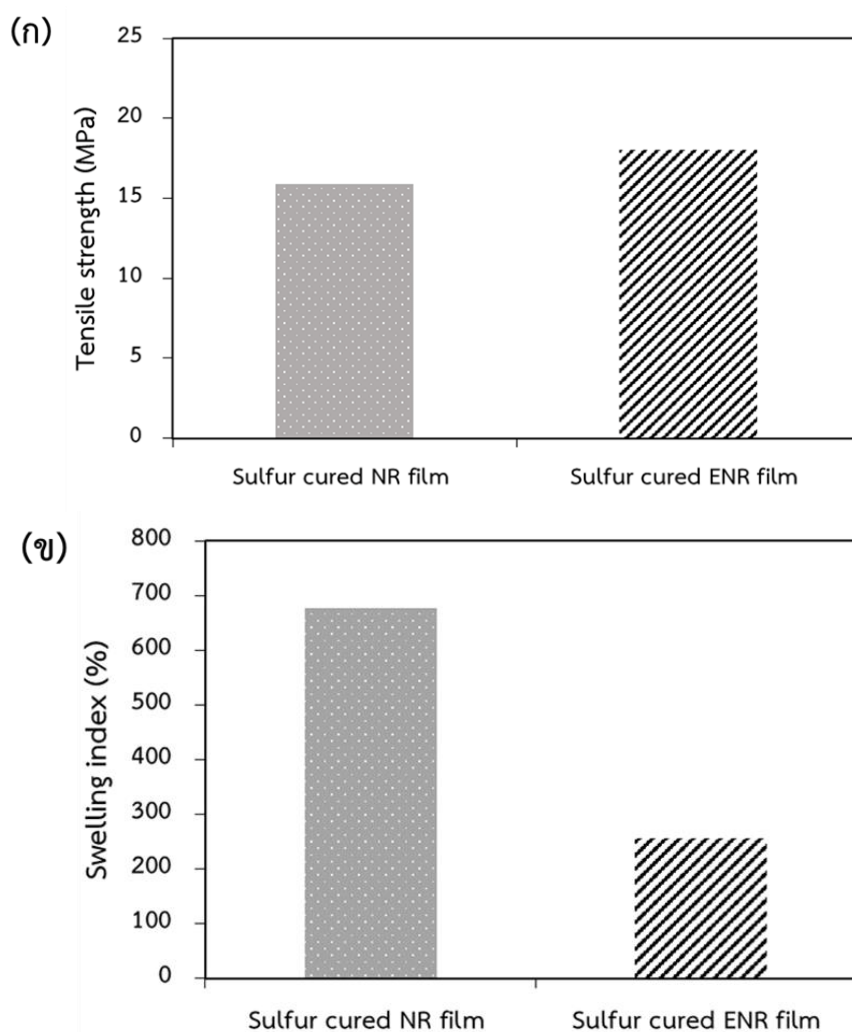


รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์



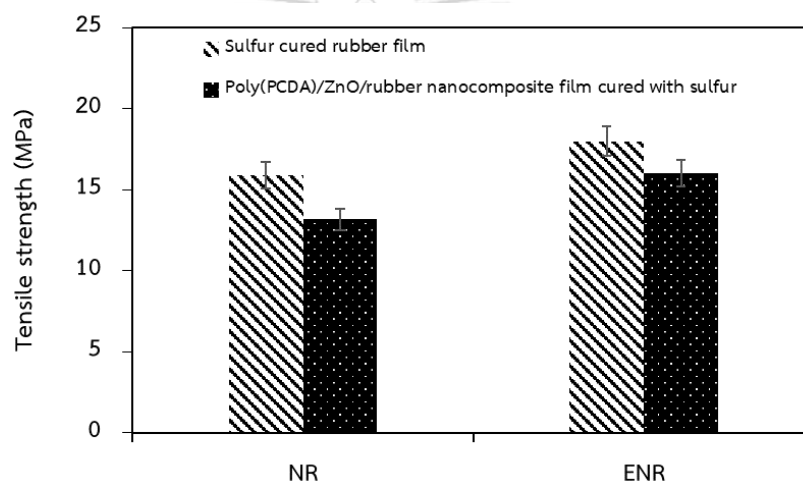
รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปต่อร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์

รูปที่ 4.13 (ก) เปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดึง และ (ข) เปรียบเทียบร้อยละการบวมตัวในโพลูอีนของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากสูตรและภาวะการคงรูปที่ดีที่สุด จะเห็นว่า ฟิล์มยางธรรมชาติมีค่าความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อตัวทำละลายต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการคงรูปด้วยกำมะถันของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดได้ดีกว่า เนื่องจากพันธะคู่ในหน่วยซ้ำที่อยู่ถัดจากหน่วยซ้ำที่มีวงแหวนอีพอกไซด์มีความไวต่อปฏิกิริยาการคงรูปมากกว่า

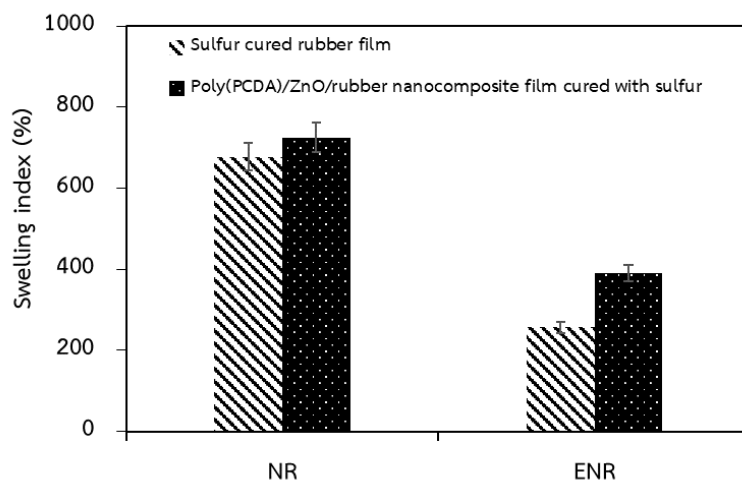


รูปที่ 4.13 (ก) ความทนต่อแรงดึงและ (ข) ร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงผลของการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 1.65 และ 2.49 phr ต่อความทนแรงดึงและร้อยละการบวมตัวใน โทลูอินของฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ผ่านการคงรูปด้วยกำมะถันโดยใช้ ภาวะการคงรูปที่เหมาะสมตามที่ผลการทดลองก่อนหน้านี้ จากรูปจะเห็นว่า การเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ส่งผลทำให้ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มที่ได้ลดลง โดยฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 13.16 MPa ในขณะที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 16.02 MPa ซึ่งสาเหตุที่ ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางลดลงก็เนื่องมาจากการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ส่งผลทำให้ปริมาณการคงรูปของฟิล์มยางลดลงซึ่งพิจารณาได้จากร้อยละการบวมตัวที่มากขึ้นในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ผลการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ต่อความทนแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน



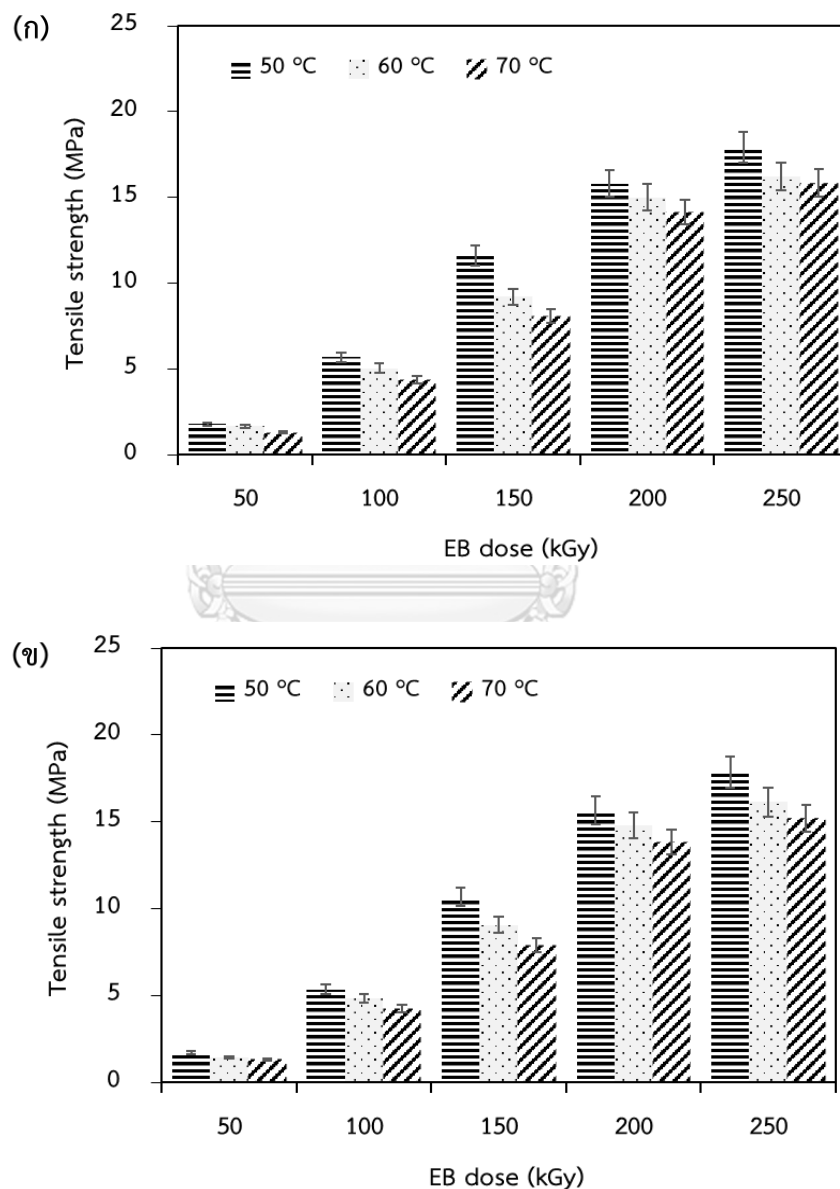
รูปที่ 4.15 ผลของการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ต่อร้อยละการบวมตัวในโพลูอินของฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่คงรูปด้วยกำมะถัน

#### 4.2.2 ระบบการคงรูปอย่างด้วยการฉายรังสีลําอเล็กตรอน

##### 4.2.2.1 ฟิล์มยางธรรมชาติจากสารละลายยางธรรมชาติ

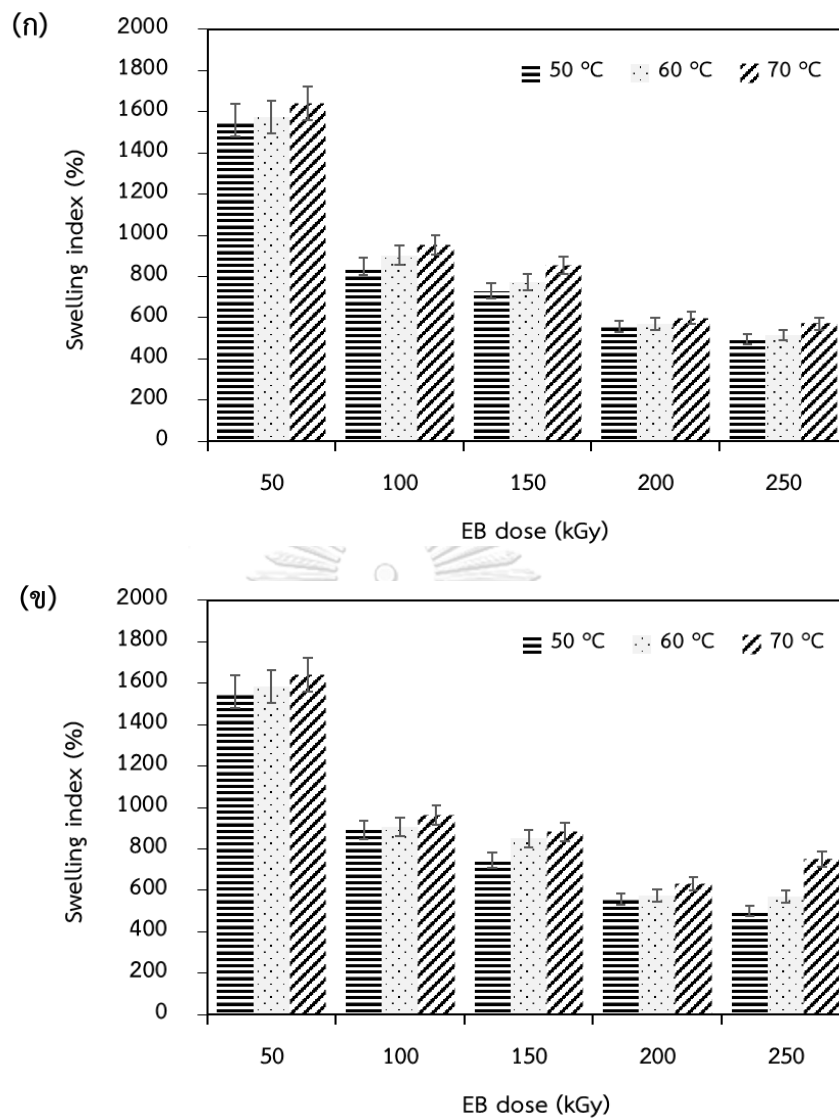
สำหรับการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปยางธรรมชาติด้วยรังสีลําอเล็กตรอน จะพิจารณาจากสมบัติความทนต่อแรงดึงและร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้ โดยฟิล์มยางธรรมชาติจะเตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติในโพลูอิน เทสารละลายยางธรรมชาติลงในแม่พิมพ์กระจก ตั้งทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนได้เป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้ไปฉายรังสีลําอเล็กตรอนในปริมาณต่าง ๆ กัน ดังนี้ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ โดยทั่วไปการคงรูปอย่างด้วยการฉายรังสีสามารถทำได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนหรือเติมสารคงรูปใด ๆ อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของการทำ post cure ด้วยความร้อนด้วย โดยนำฟิล์มยางที่ผ่านการฉายรังสีลําอเล็กตรอนแล้วไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทันที่ เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง พิจารณาจากรูปที่ 4.16 พบว่า ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติที่ผ่านการฉายรังสีลําอเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน โดยที่ 250 กิโลเกรย์ ให้ฟิล์มยางธรรมชาติที่ทนต่อแรงดึงมากที่สุด และที่ทุก ๆ ปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน การทำ post cure สามารถเพิ่มความทนต่อแรงดึงให้กับฟิล์มยางธรรมชาติได้ โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะให้ฟิล์มยางธรรมชาติที่ทนต่อแรงดึงมากกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำอื่น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการอบที่อุณหภูมิสูงเกินอาจส่งผลทำให้สายโซ่ยางเกิดการตัดขาดเนื่องจากความร้อนขึ้นได้ และเมื่อพิจารณาผลของเวลาในการอบให้ความร้อน การอบให้ความร้อน

เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ฟิล์มยางที่มีความทนต่อแรงดึงที่สูงกว่าการอบที่ 2 ชั่วโมง เล็กน้อย การอบให้ความร้อนเป็นเวลานานเกินไปอาจทำให้สายโซ่ยางขาดได้เช่นเดียวกับการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกิน ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติในโทลูอีนด้วยการฉายรังสีอีเล็กตรอนในปริมาณ 250 กิโลเกรย์ และ ทำการ post cure ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากทำให้ได้ฟิล์มยางที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 17.91 MPa



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณรังสีอีเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ

รูปที่ 4.17 แสดงผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่า ร้อยละการบวมตัวของฟิล์มที่ฉายรังสีลำอิเล็กตรอนในปริมาณที่แตกต่างกันจะมีค่าต่างกัน โดยร้อยละการบวมตัวจะลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน สำหรับฟิล์มยางธรรมชาติที่ฉายรังสีลำอิเล็กตรอนที่ 250 กิโลเกรย์ มีร้อยละการบวมตัวในโทลูอินต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาผลของการทำ post cure จะเห็นได้ว่า การทำ post cure สามารถลดร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติในโทลูอิน หรืออาจกล่าวได้ว่า การทำ post cure ทำให้ฟิล์มยางธรรมชาติเกิดการคงรูปหรือเกิดการเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทำ post cure ที่อุณหภูมิสูงหรือนานเกินไปส่งผลทำให้การบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติในโทลูอินมากขึ้น ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากในภาวะดังกล่าวสายโซ่ยางเกิดการตัดขาดขึ้น ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงการแทรกตัวของโทลูอินเข้าไประหว่างสายโซ่จึงเกิดได้ดียิ่งขึ้น การบวมตัวจึงเกิดได้มากขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 เป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าร้อยละการบวมตัวค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และฟิล์มยางธรรมชาติที่อบให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีร้อยละการบวมตัวในโทลูอินต่ำสุด ฟิล์มยางที่ฉายรังสีลำอิเล็กตรอนในปริมาณ 250 กิโลเกรย์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นฟิล์มยางธรรมชาติที่มีร้อยละการบวมตัวในโทลูอินต่ำที่สุด อยู่ที่ 496.62 ดังนั้นสาเหตุที่ฟิล์มยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนด้วยภาวะข้างต้นมีความทนต่อแรงดึงสูงสุดก็เนื่องมาจากมีระดับการคงรูปภายในโครงสร้างมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มยางธรรมชาติที่ผ่านการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนและให้ความร้อนที่เหมือนกันแต่เพิ่มเวลาในการให้ความร้อนเป็น 2 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการบวมตัวในโทลูอินสูงกว่าเล็กน้อยโดยมีค่าอยู่ที่ 502.04 ซึ่งเป็นผลให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำลงเล็กน้อย



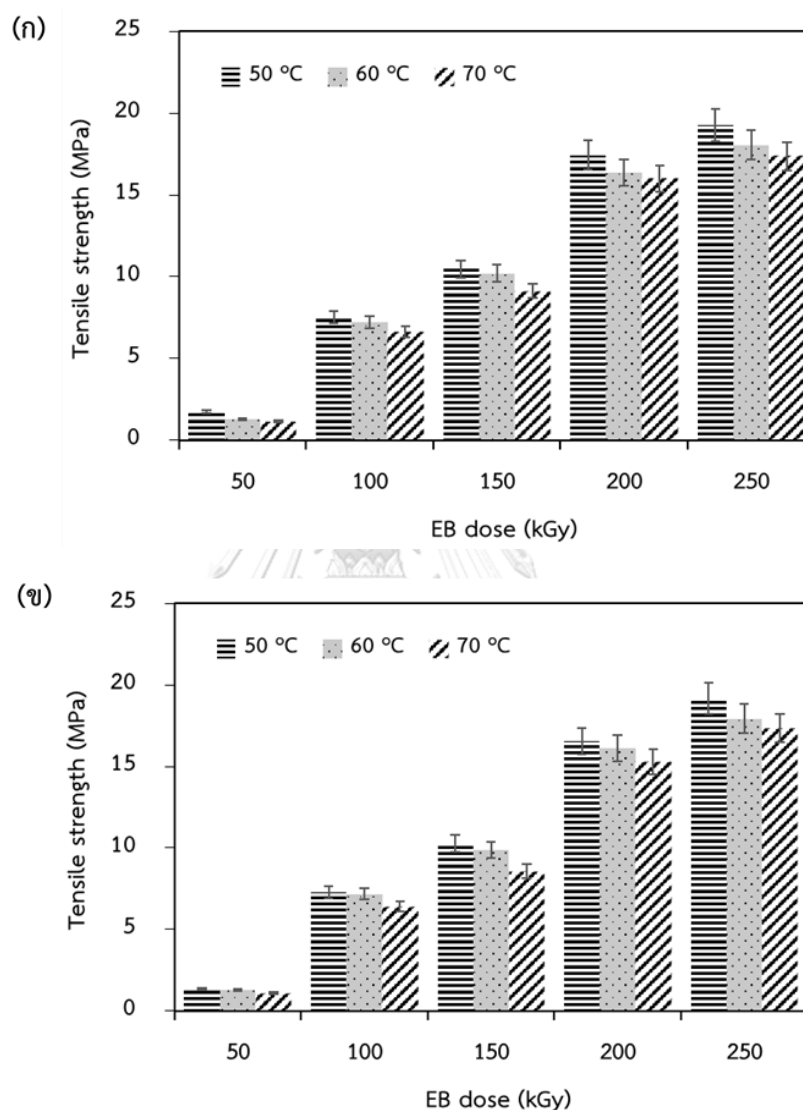
รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติ

#### 4.2.2.2 ฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์จากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์

รูปที่ 4.18 แสดงผลของปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน และการทำ post cure ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ พบว่า ผลที่ได้คล้ายคลึงกับกรณีฟิล์มยางธรรมชาติ กล่าวคือ ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน การทำ post cure ด้วยการอบให้ความร้อนช่วยทำให้ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์เพิ่มขึ้นได้ โดยภาวะที่เหมาะสมคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งฟิล์มที่



ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 250 กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงที่สุด เท่ากับ 19.27 MPa ในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็น 2 ชั่วโมง ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อยโดยอยู่ที่ 19.19 MPa

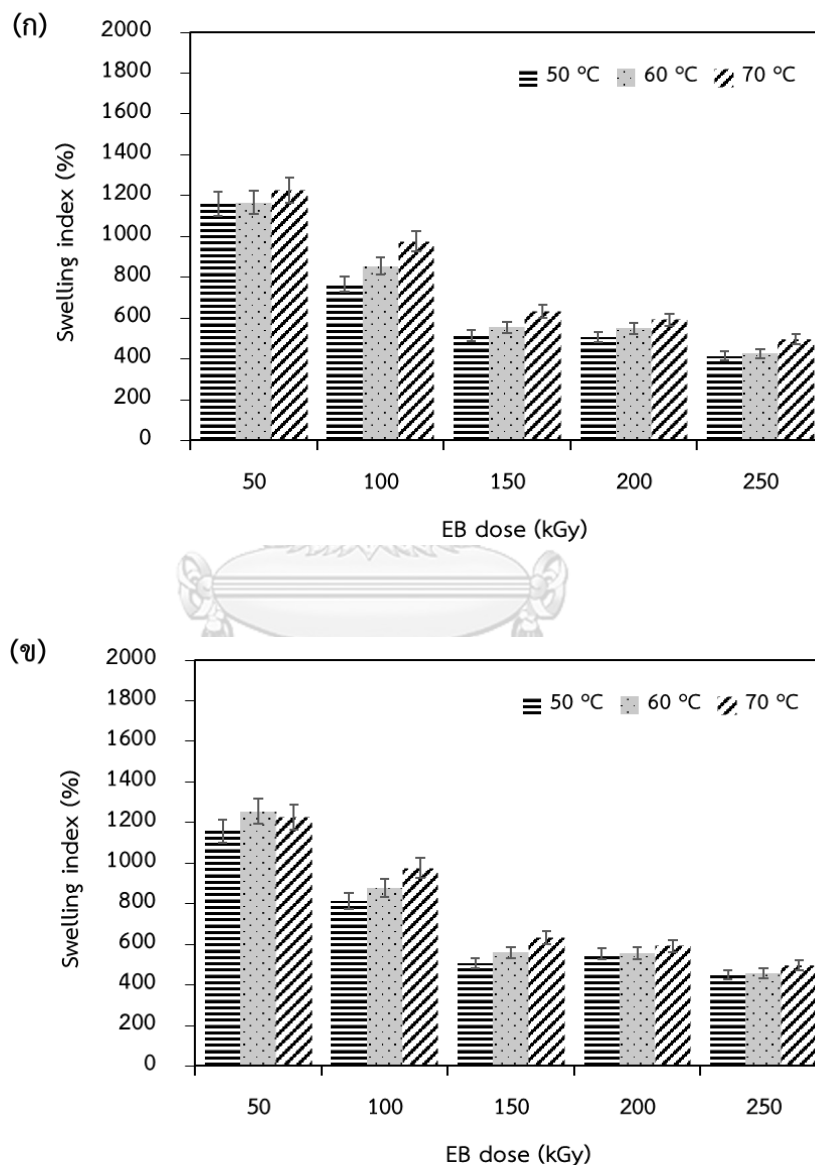


รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปอย่างที (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติอพอกไซด์

ร้อยละการบวมตัวในโพลูอินของฟิล์มยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนในภาวะต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า ฟิล์มยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 250 กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 414.45 และ 449.57 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าภาวะอื่น ๆ ซึ่งการที่ฟิล์มยาง

ธรรมชาติอ็อกไซด์ที่ได้มีค่าร้อยละการบวมตัวต่ำกว่าภาวะอื่น ๆ เป็นผลทำให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่า

ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปฟิล์มยางธรรมชาติอ็อกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอ็อกไซด์ในโทลูอีน คือ การฉายรังสีลําอเล็กตรอนในปริมาณ 250 กิโลเกรย์ และ ทำการ post cure ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เช่นเดียวกันกับฟิล์มยางธรรมชาติที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



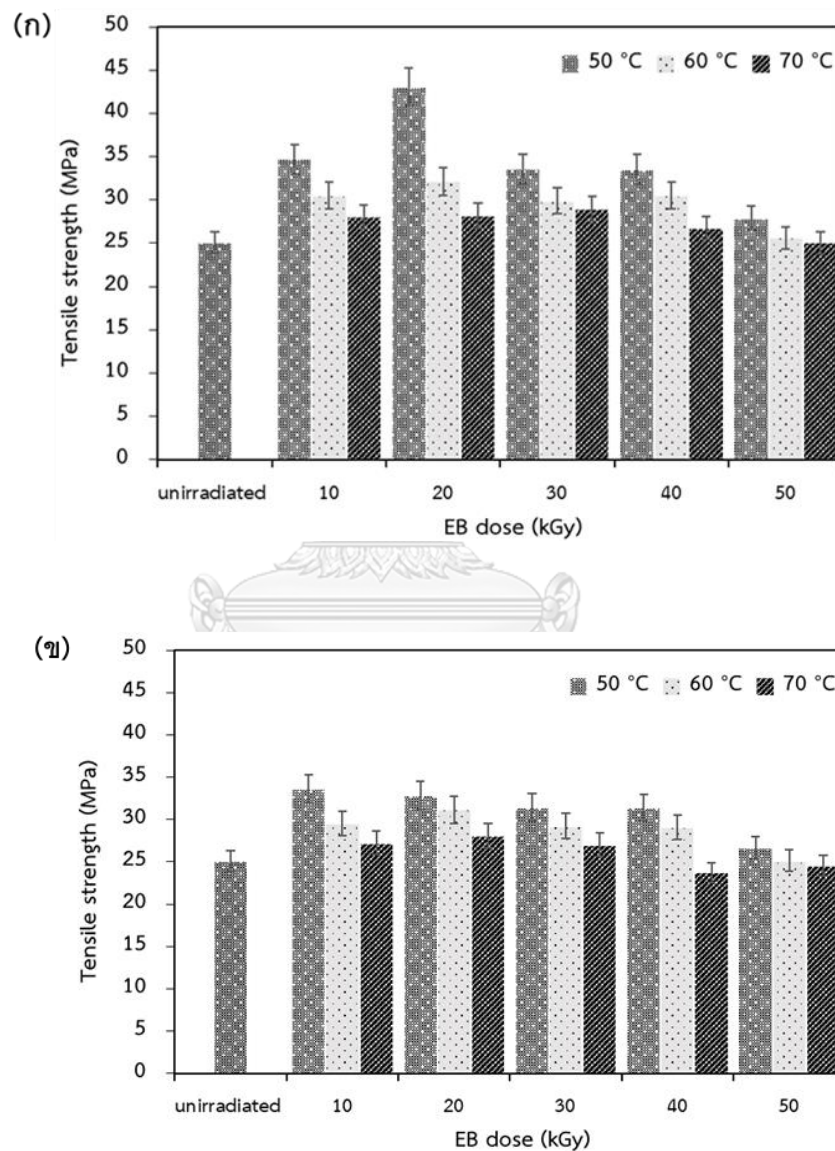
รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติอ็อกไซด์

#### 4.2.2.3 พิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

การใช้น้ำยางธรรมชาติในการเตรียม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีน้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงสามารถเติมในน้ำยางได้โดยตรง โดยไม่ต้องนำมากระจายตัวในโทลูอินซึ่งเป็นตัวทำละลายของยางใหม่ อย่างไรก็ตาม สำหรับการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้เตรียม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์ม ปัญหาที่พบเบื้องต้นคือ น้ำยางธรรมชาติที่มีจำหน่ายจะอยู่ในรูปน้ำยางข้นซึ่งมีการเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพสารแขวนของอนุภาคยางในน้ำและลดจำนวนแบคทีเรียซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำยางเน่าเสีย โดยแอมโมเนียที่เติมทำให้สภาพกรด-เบส มีค่าสูง เมื่อเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ลงในน้ำยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงอย่างถาวรทันที ดังนั้นจึงไม่สามารถนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้ได้โดยตรง ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้น้ำยางธรรมชาติผสมสูตรซึ่งก็คือน้ำยางข้นที่มีการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไป (ตารางที่ 3.5) โดยการเติมสารเคมีส่งผลให้สภาพกรด-เบส มีค่าต่ำลง ทำให้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่เกิดการเปลี่ยนสีทันทีเมื่อเติมลงในน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้น้ำยางธรรมชาติผสมสูตรแทนน้ำยางธรรมชาติปกติ โดยขั้นแรกจะทำการเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยาง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปฉายรังสีลำไอเล็กตรอนในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 กิโลเกรย์ และอบให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

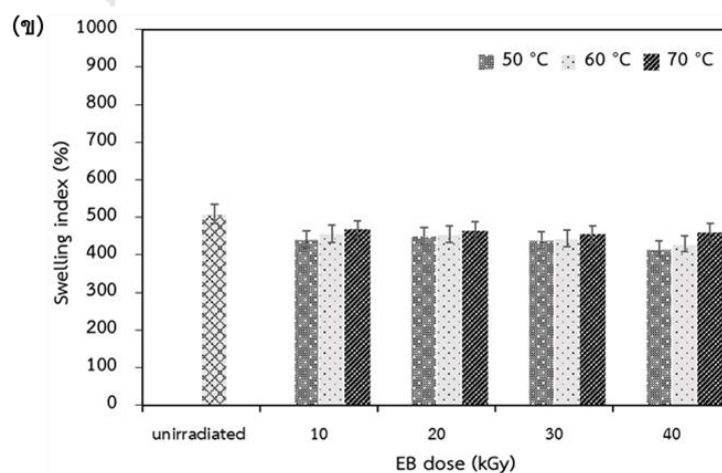
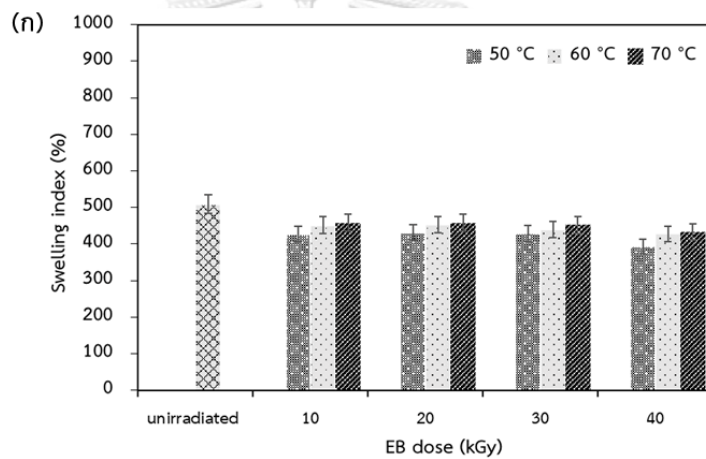
จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตรที่ไม่ได้ผ่านการฉายแสงแต่อบให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการให้ความร้อนทำให้ยางเกิดการคงรูปด้วยสารคงรูปกำมะถัน เป็นผลให้ฟิล์มยางที่ได้มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 25.10 MPa อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า ความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตรจะมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นหากมีการฉายรังสีลำไอเล็กตรอนร่วมด้วย โดยพิจารณาแผ่นฟิล์มที่ฉายรังสีลำไอเล็กตรอนแล้วอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่า การเพิ่มปริมาณรังสีลำไอเล็กตรอนจาก 10 เป็น 20 กิโลเกรย์ จะทำให้ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตรเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากยังคงเพิ่มปริมาณรังสีลำไอเล็กตรอน จาก 20 เป็น 30, 40 และ 50 กิโลเกรย์ พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ฉายรังสีลำไอเล็กตรอนในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า ความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มที่ฉายรังสีลำไอเล็กตรอนแล้วอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการอบให้ความร้อนกับแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตรที่ผ่านการฉายรังสีแล้วต่อค่าความทนต่อแรงดึง ในกรณีของฟิล์มยางทั้งยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซต์ในหัวข้อก่อนหน้านี้จะเห็นว่าการเพิ่มเวลา

จาก 1 เป็น 2 ชั่วโมง ส่งผลให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความทนต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามในกรณีของฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมน้ำยางผสมสูตร พบว่า การเพิ่มเวลามีแนวโน้มทำให้ได้ค่าความทนต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกรณีที่อบย่างที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สำหรับการเตรียมฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตร พบว่า ภาวะที่ให้ฟิล์มที่มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงที่สุดคือ การฉายรังสีลําอําลีเล็กตรอนในปริมาณ 20 กิโลเกรย์ และอบให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 1 ชั่วโมง โดยค่าความทนต่อแรงดึงที่ได้มีค่าสูงถึง 43.06 MPa



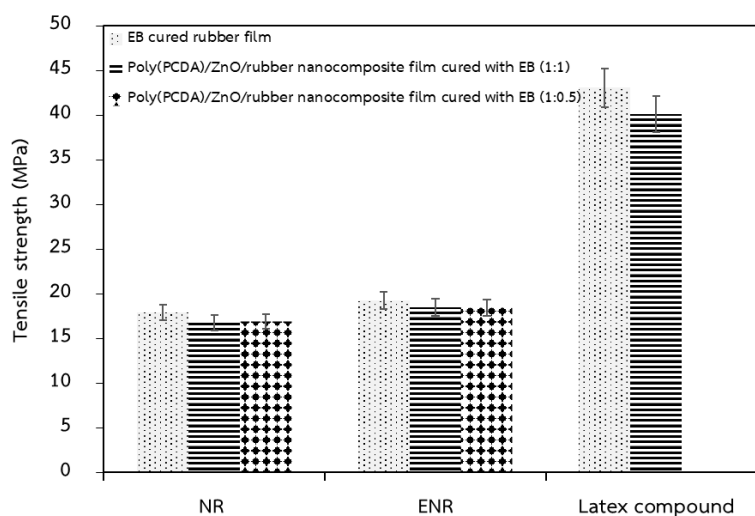
รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณรังสีลําอําลีเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตร

รูปที่ 4.21 แสดงร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่คงรูปด้วยรังสีลําอเล็กตรอนและอบให้ความร้อนที่ภาวะต่าง ๆ กัน จากการทดลองพบว่า ฟิล์มที่ไม่มีการฉายรังสีแต่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพียงอย่างเดียวมีค่าการบวมตัวอยู่ที่ร้อยละ 509.19 ซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มยางที่ฉายรังสีลําอเล็กตรอนร่วมกับการอบให้ความร้อน ผลที่ได้บ่งชี้ว่า การฉายรังสีลําอเล็กตรอนร่วมกับการอบให้ความร้อนจะทำให้ฟิล์มยางเกิดการคงรูปได้สูงขึ้น โดยภาวะการคงรูปที่ทำให้ได้ฟิล์มที่มีการคงรูปสูงสุดคือ การฉายรังสีลําอเล็กตรอนในปริมาณ 20 กิโลเกรย์ และอบให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยค่าร้อยละการบวมที่ได้จะอยู่ที่ 431.23 เมื่อพิจารณาร่วมกับสมบัติความทนต่อแรงดึง สามารถสรุปได้ว่าภาวะข้างต้นเป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มยางน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

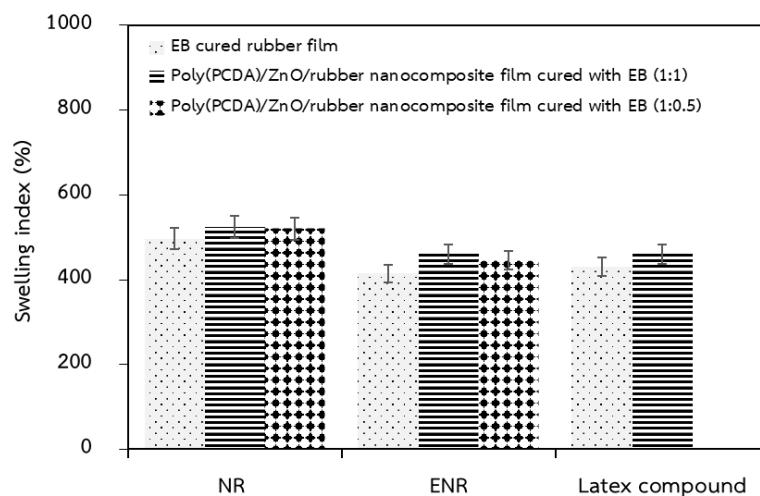


รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณรังสีลําอเล็กตรอน อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง ต่อร้อยละการบวมตัวของฟิล์มยางธรรมชาติจากน้ำยางผสมสูตร

รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงผลของการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 1.65, 0.83, 2.49, 1.24 และ 0.07 phr ต่อความทนแรงดึงและร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนของฟิล์มยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เตรียมจากสารละลาย และฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่ผ่านการคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอนโดยใช้ภาวะการคงรูปที่เหมาะสมตามที่ผลการทดลองก่อนหน้านี้ จากรูปจะเห็นผลที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีของฟิล์มยางที่ด้วยกำมะถัน กล่าวคือ การเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ส่งผลทำให้ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มที่ได้ลดลง โดย ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายมีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 16.77 MPa ในขณะที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 18.48 MPa และ ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 40.08 MPa ซึ่งสาเหตุที่ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มยางลดลงก็เนื่องมาจากการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ส่งผลทำให้ปริมาณการคงรูปของฟิล์มยางลดลงซึ่งพิจารณาได้จากร้อยละการบวมตัวที่มากขึ้นในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 ผลการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตต่อความทนแรงดึงของฟิล์มยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอนและอบให้ความร้อน





**รูปที่ 4.23** ผลการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตต่อร้อยละการบวมตัวในโพลูอินของฟิล์มยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอนและอบให้ความร้อน

#### 4.3 การดูดกลืนแสงและพฤติกรรม การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

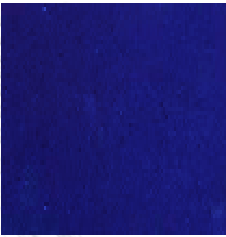
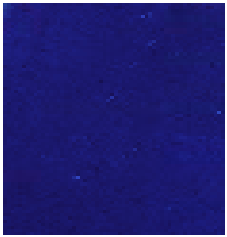
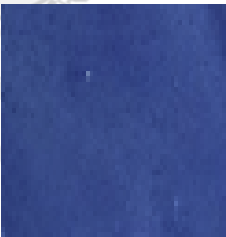
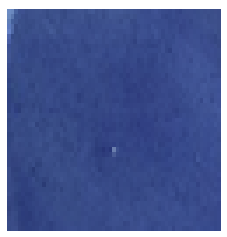
จากผลการทดลองสมบัติที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นทำให้ทราบถึงภาวะการคงรูปฟิล์มด้วยกำมะถันและรังสีลำไอเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นตัวรับรู้อุณหภูมิได้จริงในอนาคต ในส่วนของการทดลองนี้จะแสดงถึงพฤติกรรม การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสีของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยลักษณะของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากระบบการคงรูปต่าง ๆ กัน ก่อนที่จะนำไปทดสอบมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากการคงรูปด้วย  
กัมมะถัน



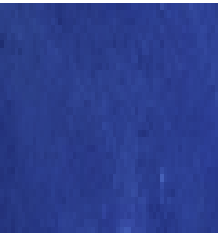
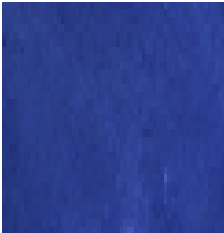
ชนิดของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต			สีของฟิล์ม
ชื่อฟิล์ม	ส่วนประกอบ/ภาวะการคงรูป	pH	
Poly(PCDA)/ZnO/NR nanocomposite	สารละลายยางธรรมชาติผสมสูตรในโทลูอีน (steraic 1 phr + ZnO 3 phr + TBzTD 4 phr + sulfur 1.5 phr) + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน 1.65 phr	7	
	คงรูปที่อุณหภูมิ 100 °C 3 ชั่วโมง		
Poly(PCDA)/ZnO/ENR nanocomposite	สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ผสมสูตร ในโทลูอีน (steraic 1 phr + ZnO 3 phr + TBzTD 2 phr + sulfur 1.5 phr) + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน 2.49 phr	7	
	คงรูปที่อุณหภูมิ 100 °C 3 ชั่วโมง		




ตารางที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

ชนิดของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต			สีของฟิล์ม	
ชื่อฟิล์ม	ภาวะการคงรูป	pH	ก่อนฉายรังสีลำอิเล็กตรอน	หลังฉายรังสีลำอิเล็กตรอน
Poly(PCDA)/ZnO/NR nanocomposite	สารละลายยางธรรมชาติในโทลูอีน + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน 1.65 phr	7		
	ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 250 kGy อบที่อุณหภูมิ 50 °C 1 ชั่วโมง		สีน้ำเงินเข้มและใส	สีน้ำเงินเข้มและใส
Poly(PCDA)/ZnO/NR nanocomposite	สารละลายยางธรรมชาติในโทลูอีน + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน 0.83 phr	7		
	ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 250 kGy อบที่อุณหภูมิ 50 °C 1 ชั่วโมง		สีน้ำเงินอ่อนและใส	สีน้ำเงินอ่อนและใส

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ชนิดของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต			สีของฟิล์ม	
ชื่อฟิล์ม	ภาวะการคงรูป	pH	ก่อนฉายรังสีลำอิเล็กตรอน	หลังฉายรังสีลำอิเล็กตรอน
Poly(PCDA)/ZnO/ENR nanocomposite	สารละลายยางธรรมชาติ อิพอกไซดไนโทลูอิน + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน 2.49 phr	7		
	ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 250 kGy อบที่อุณหภูมิ 50 °C 1 ชั่วโมง		สีน้ำเงินเข้มและใส	สีน้ำเงินเข้มและใส
Poly(PCDA)/ZnO/ENR nanocomposite	สารละลายยางธรรมชาติ อิพอกไซดไนโทลูอิน + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน 1.24 phr	7		
	ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 250 kGy อบที่อุณหภูมิ 50 °C 1 ชั่วโมง		สีน้ำเงินอ่อนและใส	สีน้ำเงินอ่อนและใส

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ชนิดของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต			สีของฟิล์ม	
ชื่อฟิล์ม	ภาวะการคงรูป	pH	ก่อนฉายรังสีลำอิเล็กตรอน	หลังฉายรังสีลำอิเล็กตรอน
Poly(PCDA)/ZnO/NR Nanocomposite (preparing from Latex)	น้ำยางธรรมชาติผสมสูตร + สารแขวนลอย Poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำ 0.07 phr	9		
	ฉายรังสีลำอิเล็กตรอน 20 kGy อบที่อุณหภูมิ 50 °C 1 ชั่วโมง		สีน้ำเงินและชุน	สีน้ำเงินและชุน

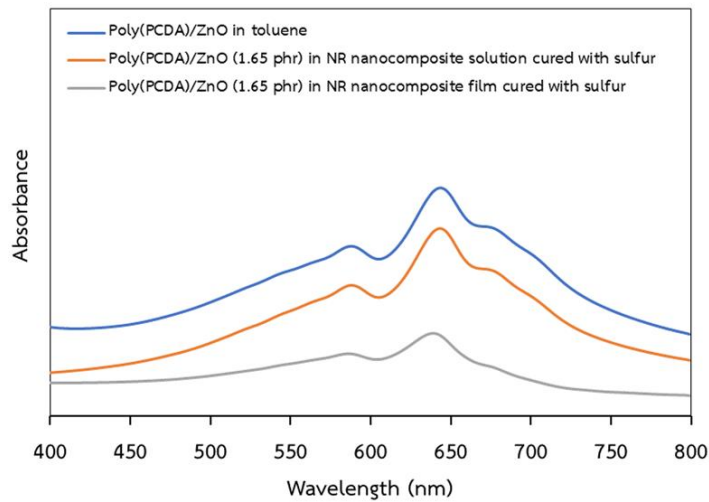
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยสารคงรูปกัมมะถันจะมีสีน้ำเงินตามสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต อย่างไรก็ตามแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะชุนเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมสารเคมีต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย กรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TBzTD 2 และ 4 phr และสารคงรูปกัมมะถัน 1.5 phr ในแผ่นฟิล์ม เมื่อพิจารณาลักษณะของแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนจากตารางที่ 4.2 พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์จะมีสีน้ำเงินและใส ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการเติมสารเคมี ใด ๆ ลงไป สำหรับกรณีฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร พบว่า มีสีน้ำเงิน มีลักษณะชุนเช่นเดียวกับกับแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยสารคงรูปกัมมะถัน

#### 4.3.1 การดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

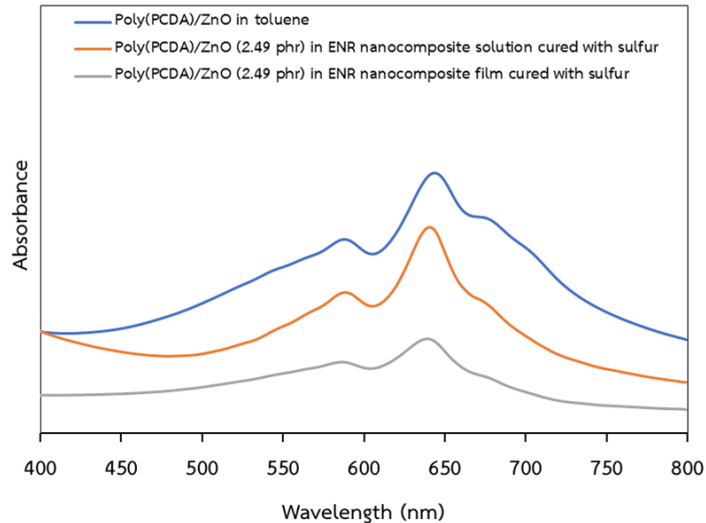
ถึงแม้ว่าแผ่นฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะปรากฏสีน้ำเงินเช่นเดียวกับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เพื่อเป็นการยืนยันว่าสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เติมลงไปใยยางและผ่านกระบวนการด้วยวิธีต่าง ๆ ยังคงเหมือน การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะถูกตรวจสอบและเปรียบเทียบกับของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

4.3.1.1 การดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกำมะถัน

การดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO/NR และ poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ในรูปสารแขวนลอยก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม และการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR และ poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกำมะถันถูกเปรียบเทียบกับดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยในโทลูอีน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ซึ่งพบว่า สารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่ว่าจะอยู่ในสารละลายยางธรรมชาติหรือสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และแผ่นฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกำมะถันที่เตรียมจากยางทั้ง 2 ชนิด มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร และมีแถบการดูดกลืนเล็ก ๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 นาโนเมตร เช่นเดียวกันกับการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมสารคงรูปด้วยระบบกำมะถันและยางทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทั้งที่ในรูปของสารละลายยางก่อนการคงรูป หรือในรูปแบบฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการคงรูปโดยการให้ความร้อนแล้ว ผลที่ได้ข้างต้นบ่งชี้ว่าโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่ได้ถูกรบกวนแต่อย่างใด



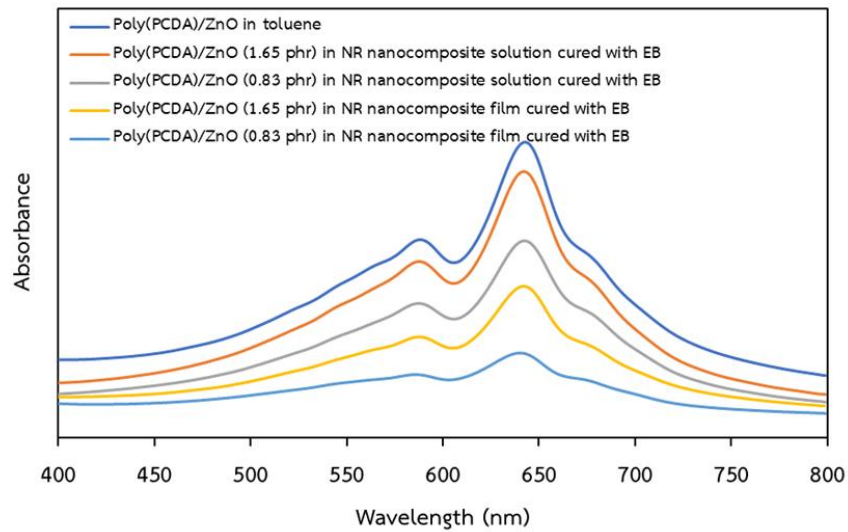
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในสารละลายยางธรรมชาติที่เติมสารคงรูปด้วยกำมะถันและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปแล้วเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน



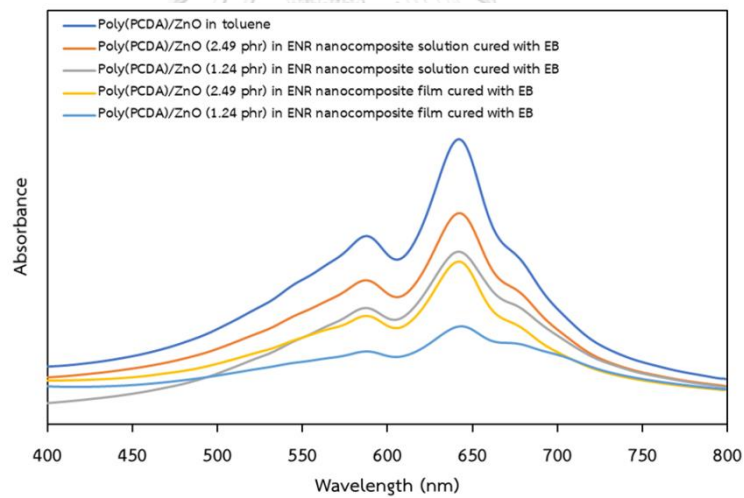
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เติมสารคงรูปด้วยกำมะถันและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปแล้วเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน

#### 4.3.1.2 การดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน

การดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO/NR และ poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ในรูปสารแขวนลอยก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม และการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR และ poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน ถูกเปรียบเทียบกับ การดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยในโทลูอีน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 สำหรับกรณีการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในน้ำยางผสมสูตรก่อนการคงรูปและการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มที่คงรูปแล้ว พบว่า ไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากน้ำยางผสมสูตรมีลักษณะขุ่นทำให้ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัด ในขณะที่เมื่อทำเป็นแผ่นฟิล์มแล้ว เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนแสง พบว่า ไม่ปรากฏพีคการดูดกลืนใด ๆ เลย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เติมในระบบนี้ค่อนข้างน้อย อีกทั้งในน้ำยางผสมสูตรมีการเติมสารเคมีอื่น ๆ นอกจากสารที่ใช้ในการคงรูปด้วยกัมมะถัน ซึ่งปริมาณสารเคมีโดยรวมจะมากกว่า ซึ่งสารเหล่านี้อาจรบกวนการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทำให้ไม่ปรากฏการดูดกลืนแสงใด ๆ จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นได้ว่า การฉายรังสีลำไอเล็กตรอนไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต แต่อย่างไร ลักษณะการดูดกลืนแสงของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในสารละลายและแผ่นฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ผ่านการคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอนยังคงปรากฏพีคที่ความยาวคลื่นเดิม ไม่ว่าจะเตรียมจากยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ก็ตาม



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในสารละลายยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำอเล็กตรอนเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำอเล็กตรอนเทียบกับสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน

จากการทดลองในส่วนนี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า โครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่ได้ถูกรบกวนแต่อย่างใด ไม่ว่าจะอยู่ในยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในรูปแบบของสารแขวนลอยหรือในรูปแบบฟิล์มที่ผ่านการคงรูปทั้งการคงรูปด้วยกัมมะถันและการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ดังนั้นการนำไปพัฒนาเป็นแผ่นฟิล์มตรวจวัดการตอบสนองที่เกิดจากสิ่งกระตุ้นที่ได้รับเท่านั้น

#### 4.3.2 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

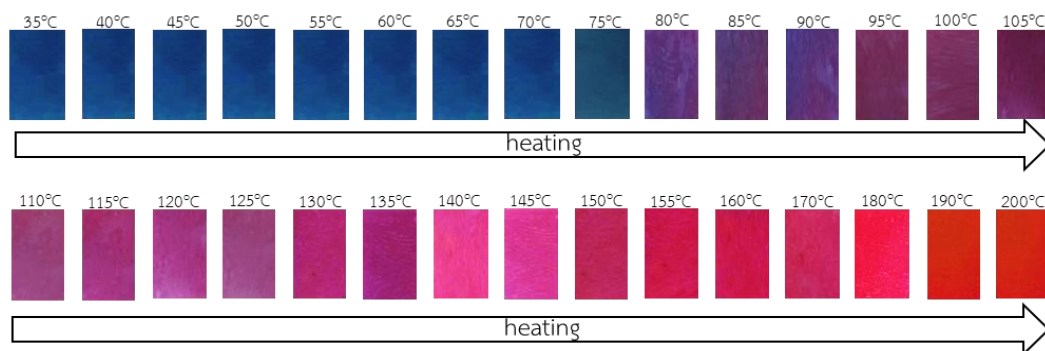
สำหรับการศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะพิจารณาจากอุณหภูมิที่เริ่มเห็นการเปลี่ยนสีและการผันกลับได้ของสี โดยจะทำการให้ความร้อนกับแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ด้วยเตาอบในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยในช่วงแรกของการทดลองจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงท้ายของการทดลองจะเพิ่มทีละ 10 องศาเซลเซียส และในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะคงไว้ที่อุณหภูมินั้น ๆ เป็นเวลา 5 นาที สำหรับการศึกษากการผันกลับสีได้ของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต จะศึกษาตามขั้นตอนจากที่กล่าวมาข้างต้น แต่จะเพิ่มขั้นตอนการนำฟิล์มออกจากเตาอบทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการบันทึกภาพของแผ่นฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

##### 4.3.2.1 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกัมมะถัน

- ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต

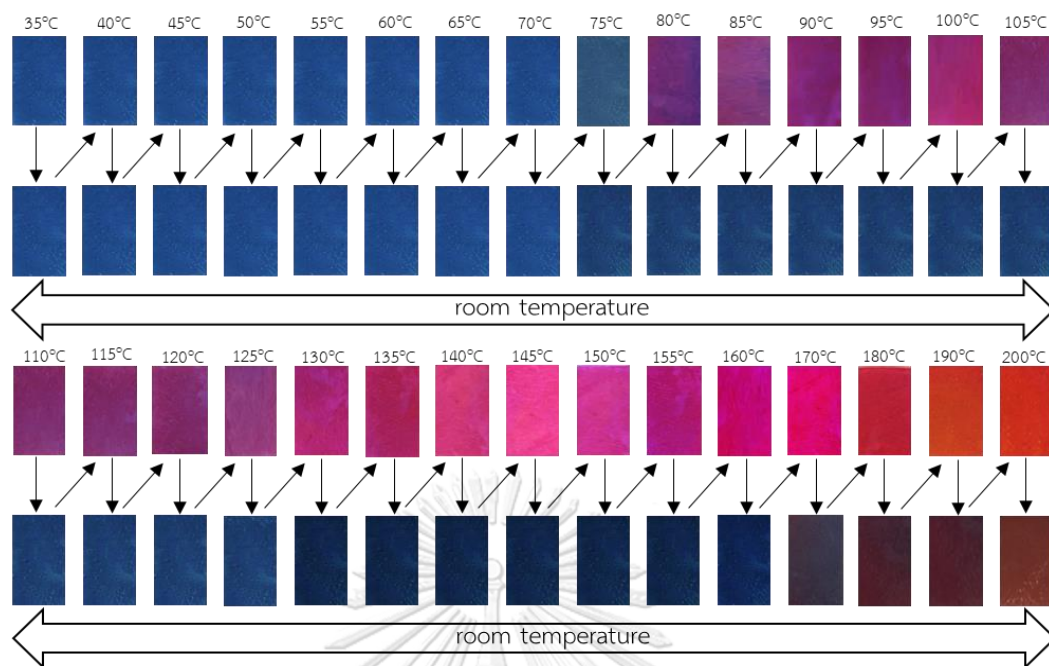
พฤติกรรม การ เปลี่ยน สี ต่ อ อุณหภูมิ ของ ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและคงรูปด้วยกัมมะถัน โดยการเติมกรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr TBzTD 4 phr กัมมะถัน 1.5 phr และ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโพลีเอทิลีน 1.65 phr แสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า เมื่อให้ความร้อนฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต จะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 95 จนถึง 105 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีแดงอมส้ม





**รูปที่ 4.28** ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและคงรูปด้วยกำมะถัน

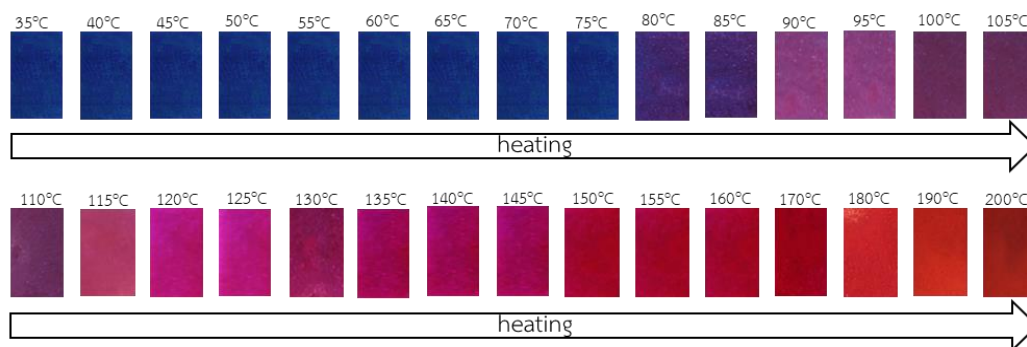
เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ข้างต้นพบว่า เมื่อให้ความร้อนฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่ช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 125 องศาเซลเซียส และทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องในทุกช่วงอุณหภูมินั้น ๆ ฟิล์มสามารถแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์โดยมีสีน้ำเงินจากการสังเกตด้วยตาเปล่า อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ฟิล์มจะผันกลับได้บางส่วนในช่วงอุณหภูมิ 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส โดยจากการทิ้งฟิล์มให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องพบว่าฟิล์มมีสีม่วงเข้มอมน้ำเงิน ซึ่งต่างไปจากสีน้ำเงินตั้งต้น จนกระทั่งที่ช่วงอุณหภูมิ 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ไม่สามารถแสดงการการผันของกลับสีได้ โดยเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง พบว่าสีของฟิล์มปรากฏเป็นสีน้ำตาลแทน ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและคงรูปด้วยกำมะถัน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

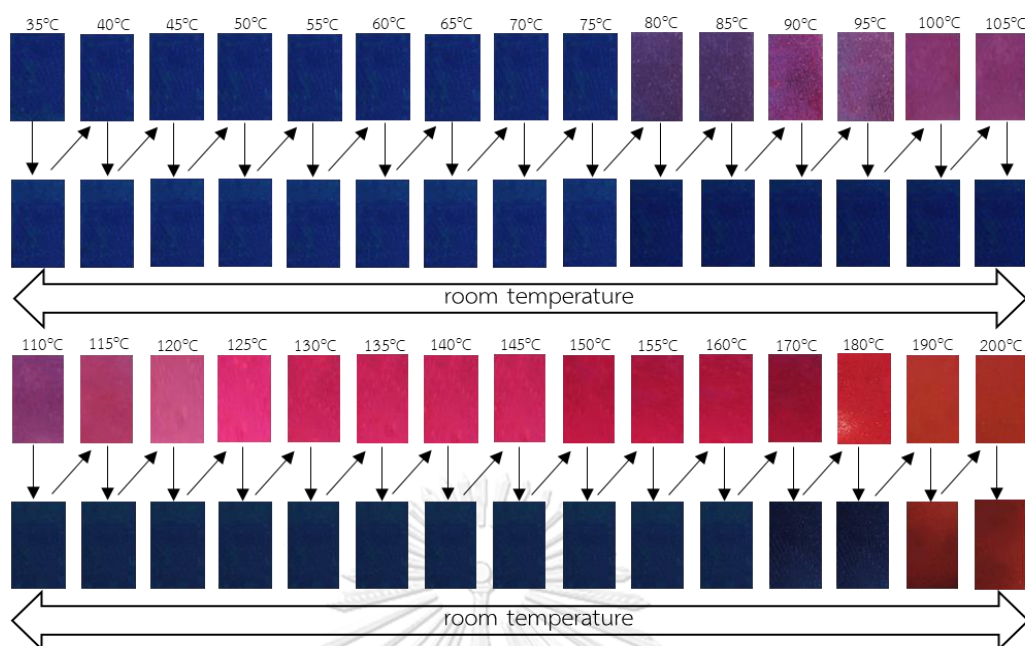
- ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต

พฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์คงรูปด้วยกำมะถัน โดยการเติมกรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr TBzTD 2 phr กำมะถัน 1.5 phr และจากนั้นผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในโทลูอีนปริมาณ 2.49 phr แสดงในรูปที่ 4.30 จากผลการทดลองพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต พบว่า เมื่อให้ความร้อนฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต จะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 95 ถึง 110 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีแดงส้มที่เกิดจากการไหม้ของฟิล์ม



**รูปที่ 4.30** ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และคงรูปด้วยกำมะถัน

เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ข้างต้นพบว่า เมื่อให้ความร้อนฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่ช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 105 องศาเซลเซียส และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มสามารถแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์โดยมีสีน้ำเงิน เช่นเดิม จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ฟิล์มสามารถผันกลับได้บางส่วนในช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 180 องศาเซลเซียส จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อทิ้งฟิล์มให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มปรากฏสีน้ำตาลไหม้ซึ่งไม่สามารถแสดงการเปลี่ยนสีแบบการผันกลับได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์และคงรูปด้วยกำมะถัน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต กับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต จะเห็นแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าชนิดของยางซึ่งเป็นเมทริกซ์ให้กับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต กับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ พบว่า ฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทั้งสองชนิด มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสีและการผันกลับได้ของสีสูงกว่า poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้<sup>(41)</sup> โดยสาเหตุอาจเกิดจากสายโซ่ของเข้าไปขัดขวางการขยับและการเคลื่อนที่ของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่อยู่ในเนื้ออย่างจึงสังเกตเห็นที่อุณหภูมิสูงขึ้น

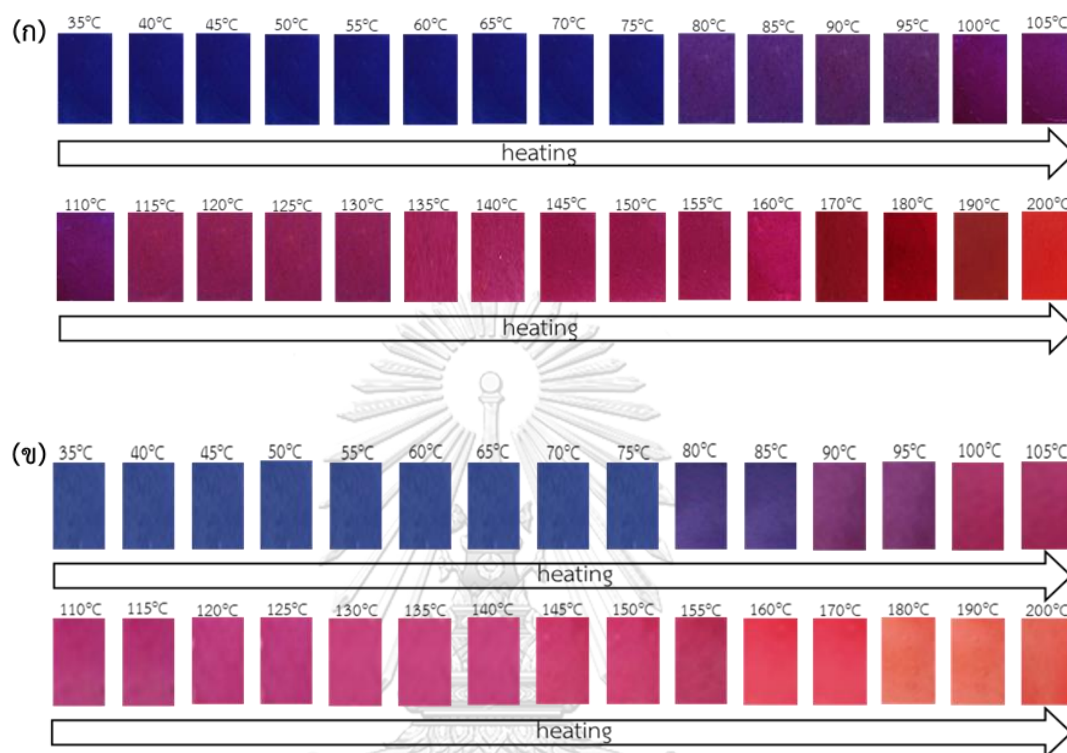
4.3.2.2 พฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ชนิดต่าง ๆ ที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ทำได้โดยการนำสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอีน ผสมกับสารละลายยางธรรมชาติหรือสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ หรือนำสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในน้ำปราศจากไอออนมาผสมกับน้ำยางธรรมชาติผสมสุตร จากนั้นเทใส่แบบกระจกและทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ทำการคงรูปฟิล์มด้วยการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนจากนั้นอบให้ความร้อนตามลำดับ จากนั้นถ่ายภาพพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ โดยการให้ความร้อนด้วยเตาอบช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 200 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกของการทดลองจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงท้ายของการทดลองจะเพิ่มทีละ 10 องศาเซลเซียส และในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะคงไว้ที่อุณหภูมินั้น ๆ เป็นเวลา 5 นาที อีกทั้งยังได้ศึกษาพฤติกรรมการผันกลับสีได้ของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยทำการศึกษาตามขั้นตอนจากที่กล่าวมาข้างต้น แต่เพิ่มขั้นตอนการนำฟิล์มออกจากเตาอบทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการถ่ายภาพเพื่อสังเกตการเปลี่ยนสีในทุก ๆ ช่วงอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

- ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติที่มีการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน จะศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่มีการผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 1.65 phr และ 0.83 phr เบื้องต้นพบว่า การเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในปริมาณ 1.65 phr จะได้ฟิล์มที่มีสีน้ำเงินเข้มกว่าการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในปริมาณ 0.83 phr และฟิล์มทั้งสองตัวอย่างมีลักษณะฟิล์มที่ใสเหมือนกันทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยเมื่อให้ความร้อนฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต จะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงเล็กน้อยที่ช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียสขึ้นไป พบว่า ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.32 โดยปริมาณ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่ต่างกันไม่ได้ส่งผล

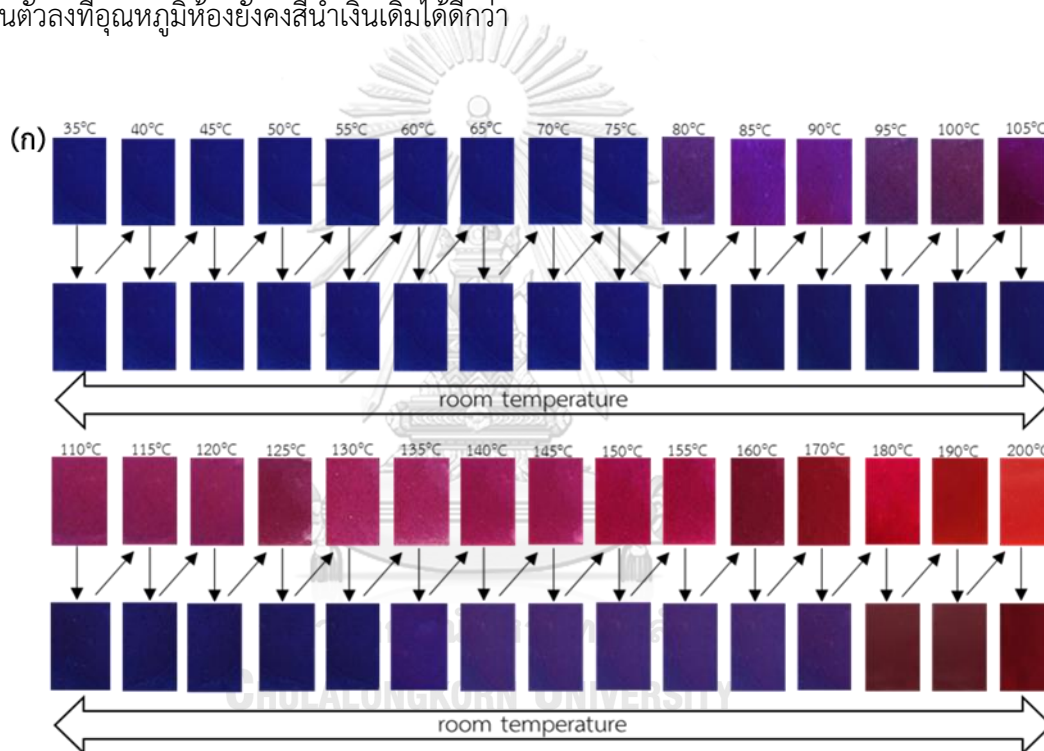
พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิแต่อย่างไร แต่การเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ใน ปริมาณที่มากกว่า ทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนสีได้ชัดเจน

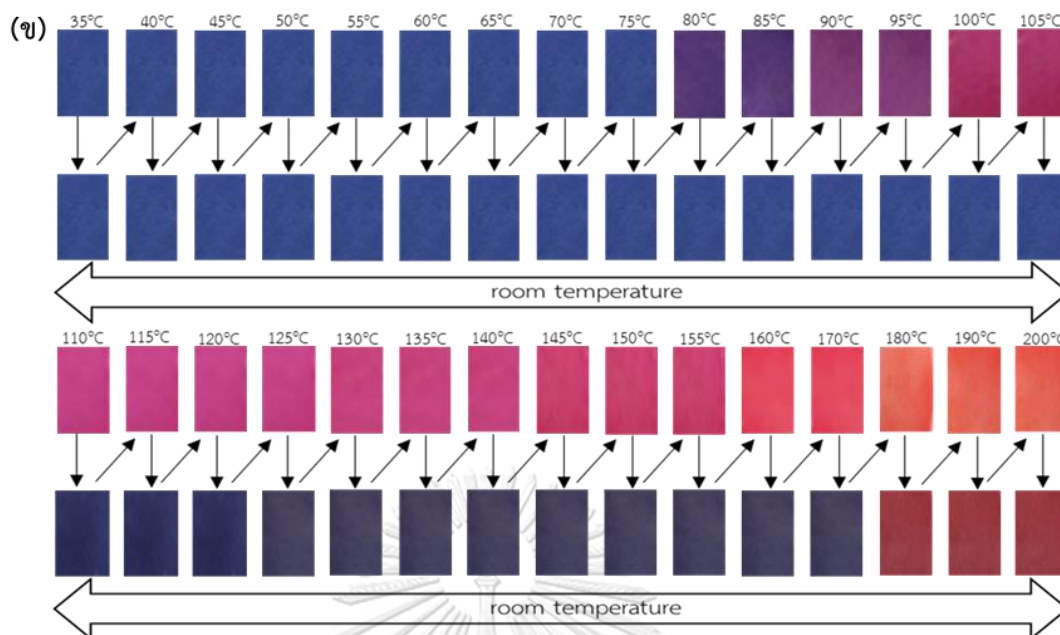


รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (ก) 1.65 phr (ข) 0.83 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและ ครงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการณ์ผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติมีการคงรูปด้วยรังสี ลำอิเล็กตรอน จากการทดลองพบว่า พฤติกรรมการณ์ผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่มี poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ผสมในปริมาณ 1.65 phr เมื่อมีการให้ความร้อนฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียส ฟิล์มสามารถแสดงพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์โดยมีสีน้ำเงิน จากนั้นที่ช่วงอุณหภูมิ 135 ถึง 170 องศาเซลเซียส ฟิล์มสามารถผันกลับสีได้บางส่วนแบบไม่สมบูรณ์ และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ฟิล์มไม่สามารถผันกลับสีได้อีกโดยเมื่อฟิล์มเย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าฟิล์มปรากฏสีแดงเข้มอมน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.33 (ก) และในส่วนของพฤติกรรมการณ์ผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพ-

สีที่มี poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ผสมในปริมาณ 0.83 phr แสดงในรูปที่ 4.33 (ข) สามารถผันกลับสีได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 105 องศาเซลเซียส เมื่อฟิล์มเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องจะมีสีน้ำเงิน และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสขึ้นไป พบว่า ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มอมส้ม อีกทั้งเมื่อฟิล์มเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องจะมีสีน้ำตาล จากการทดลองในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนไปของเฉดสีจะเห็นได้ชัดเจนตามปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยเมื่อเปรียบเทียบการผันกลับสีได้ของฟิล์มจะเห็นว่า การเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณที่มากกว่าจะช่วยทำให้สังเกตเห็นการผันกลับสีได้ดีกว่า ซึ่งหมายความว่า การใช้ฟิล์มยางที่เติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณที่สูงกว่าสามารถใช้ตรวจซ้ำ ๆ ได้มากกว่า เนื่องจากเมื่อใช้แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องยังคงสีน้ำเงินเดิมได้ดีกว่า



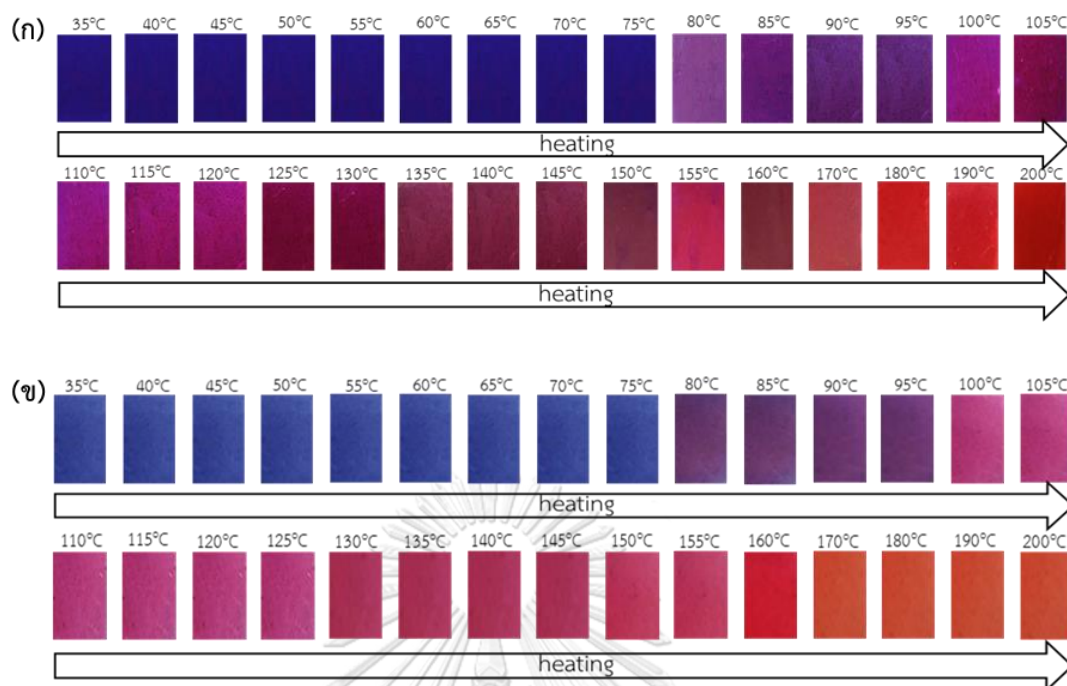


รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต  
 (ก) 1.65 phr (ข) 0.83 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและคงรูปด้วยรังสี  
 ลำอเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

- ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต

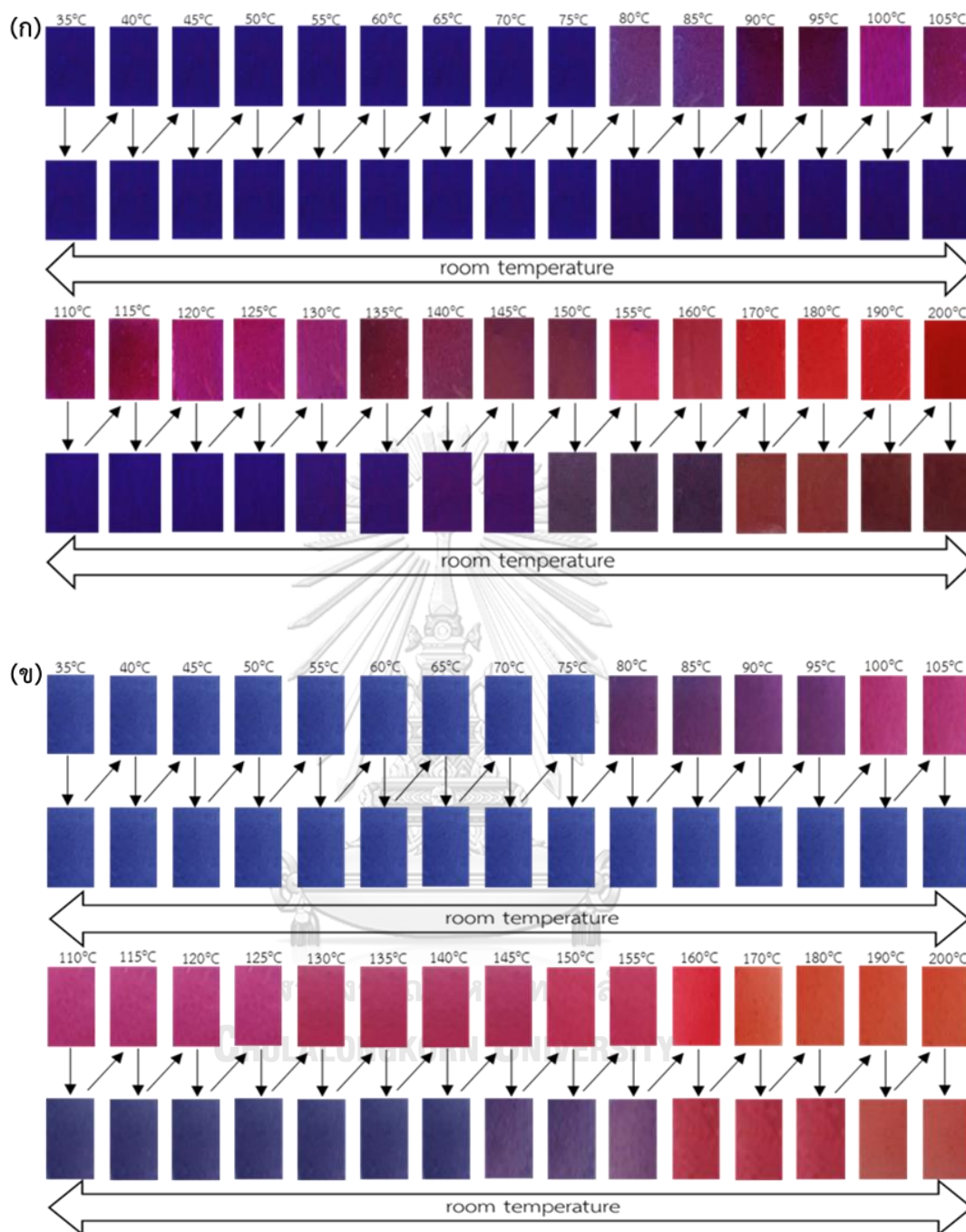
สำหรับพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีการคงรูปด้วยรังสีลำอเล็กตรอน โดยจะใช้ฟิล์มที่มีการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 2.49 phr และ 1.24 phr เบื้องต้นพบว่า การผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 2.49 phr จะได้ฟิล์มที่มีสีน้ำเงินเข้มกว่าการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 1.24 phr และการคงรูปด้วยลำอเล็กตรอนทำให้ได้ฟิล์มที่มีสีน้ำเงินและใสเหมือนกัน ทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากการสังเกตการเปลี่ยนสีพบว่า เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 100 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างเห็นได้ชัดเจน และฟิล์มเกิดการเปลี่ยนเป็นสีแดงอมส้มที่เกิดจากการไหม้ของฟิล์มที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.34





**รูปที่ 4.34** ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (ก) 2.49 phr (ข) 1.24 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ อิพอกไซด์และคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน

สำหรับพฤติกรรมการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีการคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน แสดงในรูปที่ 4.35 จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการผันกลับสีได้ของฟิล์มยางนาโนคอมพอสิต ที่เติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 2.49 phr และ 1.24 phr ที่ช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 105 องศาเซลเซียส ฟิล์มสามารถผันกลับสีได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเมื่อฟิล์มเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องจะมีสีน้ำเงิน และที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสขึ้นไป ฟิล์มไม่สามารถผันกลับสีได้ จากการทดลองในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่า การเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณที่มากกว่าจะช่วยทำให้สังเกตเห็นการผันกลับสีได้ดีกว่า แต่ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมเปลี่ยนสีแต่อย่างไร ดังแสดงในรูปที่ 4.35



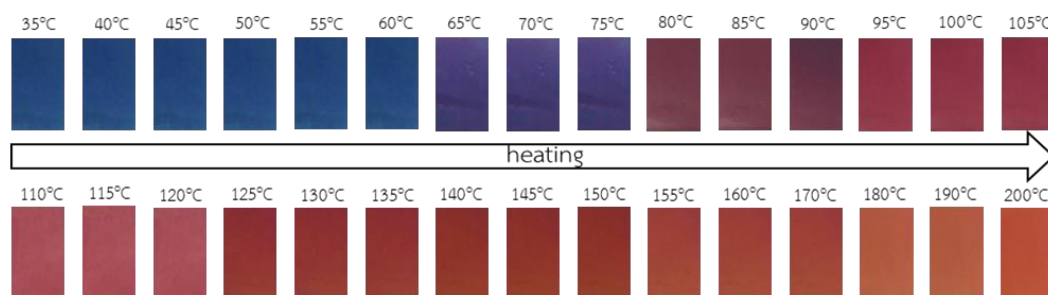
รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (ก) 2.49 phr (ข) 1.24 phr ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์และคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่า พิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต มีการเติมปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต มากกว่า เนื่องจากว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ละลายในโทลูอีนยากกว่ายางธรรมชาติเกรด STR 5 L ที่ใช้ในการทดลองนี้จึงทำให้ต้องใช้ปริมาณโทลูอีนที่สูงกว่า เมื่อทำการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ลงไปในสารละลายจึงทำให้สีเจือจางกว่า ทำให้ต้องใช้ปริมาณของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต มากขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต กับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต พบว่า อุณหภูมิสูงสุดที่สีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต สามารถผันกลับอย่างสมบูรณ์จะต่ำกว่าฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ประมาณ 25 องศาเซลเซียส

- ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจาก  
น้ำยาง ผสมสูตร

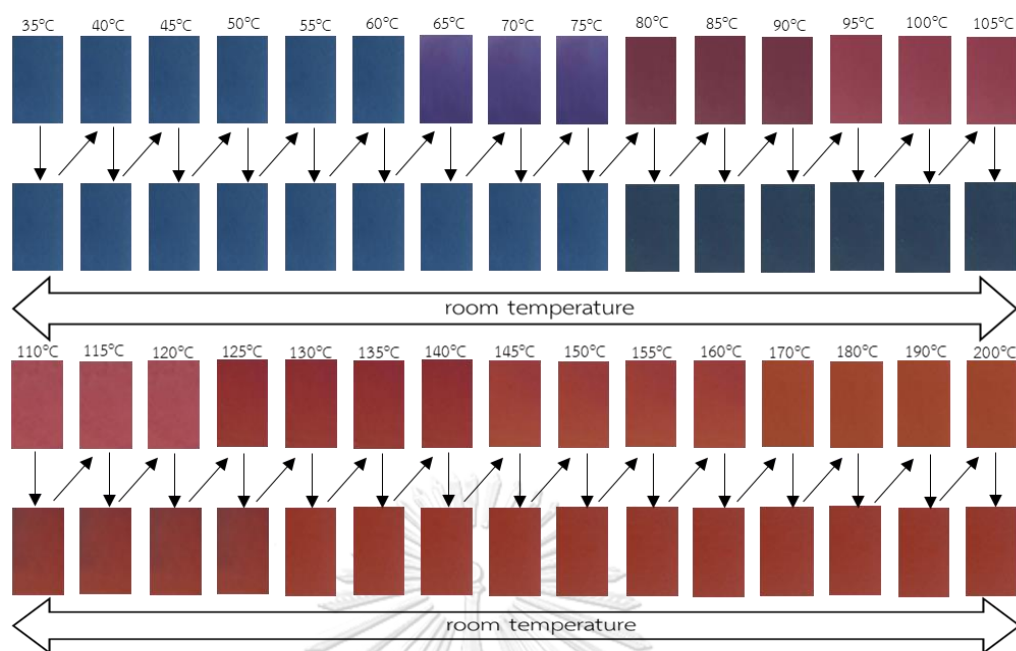
สำหรับพฤติกรรมที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรและมีการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน โดยเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณ 0.07 phr เบื้องต้นพบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้จะมีสีน้ำเงินเช่นกันแต่มีลักษณะขุ่นเนื่องมาจากภายในน้ำยางธรรมชาติมีการสารตัวเติมหลายชนิดทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์ม ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ยากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จากการพฤติกรรมที่เปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรพบว่า เมื่อให้ความร้อนฟิล์มจะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรพบว่าใกล้เคียงกับของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ กล่าวคือเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลาย จะเห็นได้ว่าฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ลงในน้ำยางซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำทำให้เกิดการเกี่ยวพันกัน ไม่เหมือนในกรณีที่เติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ลงในสารละลายของยาง เมื่อไม่มีการเกี่ยวพันกับการเปลี่ยนสีของ

poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในเนื้อเยื่อที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรจึงแสดงพฤติกรรมเดิมคือ เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินอุณหภูมิเดิม



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรและมีการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 75 องศาเซลเซียส ฟิล์มสามารถผันกลับสีได้อย่างสมบูรณ์ โดยจะเห็นว่าฟิล์มเป็นตัวอุณหภูมิที่ห้องจะมีสีน้ำเงิน จากนั้นฟิล์มจะผันกลับสีได้บางส่วนในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 105 องศาเซลเซียส และไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิขึ้นที่ 110 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 4.37 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมเปลี่ยนสีของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรกับฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากระบบอื่น พบว่า ความสามารถในการผันกลับได้ของสีจะต่ำกว่าโดยจะเห็นอุณหภูมิที่สีผันกลับได้อย่างสมบูรณ์จะอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สีเปลี่ยนเป็นแดงอย่างถาวรจะอยู่ที่ 110 องศาเซลเซียส เท่านั้น ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากการเติมสารเคมีชนิดต่าง ๆ มากกว่าระบบอื่น อีกทั้งค่าความกรด-เบส ตั้งต้นสูงกว่าระบบอื่น ทำให้การผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติดีกว่าระบบอื่นก็เป็นได้



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายแสดงการผันกลับสีได้ของฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางผสมสูตรและคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจพัฒนาสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อตัวทำละลายของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ให้ดียิ่งขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้อุณหภูมิที่ได้มีความทนทานมากยิ่งขึ้น การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปยางซึ่งใช้เป็นเมทริกซ์ให้กับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยภาวะดังกล่าวจะต้องรบกวนพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต น้อยที่สุด ระบบการคงรูปที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรก เป็นการศึกษากระบวนการคงรูปยางด้วยกัมมะถันซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยได้ทำการปรับสูตรสารเคมีต่าง ๆ อีกทั้งศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป สำหรับในส่วนที่สองเป็นการศึกษากระบวนการคงรูปยางด้วยรังสีลิวทียมไอออนซึ่งเป็นแนวทางเลือกใหม่ในการพัฒนาสมบัติเชิงกลของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นฟิล์มจาก 3 รูปแบบ ดังนี้คือ สารละลายยางธรรมชาติ สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 5.1 ฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยกัมมะถัน

จากการพัฒนาหาสูตรสารเคมีและภาวะในการคงรูปด้วยกัมมะถันที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต พบว่าสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อตัวทำละลายของฟิล์มยางที่ได้มีค่าที่ดีมากขึ้น โดยสำหรับฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติได้มีการพัฒนาสูตรจากเดิม โดยการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD จาก 2 phr เป็น 4 phr และเติมสารเคมีอื่นร่วมดังนี้ กรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr และกัมมะถัน 1.5 phr โดยทำการคงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงชันงานวิจัยก่อนหน้านี้จาก 6.26 เป็น 13.16 ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากกระบวนการคงรูปที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้ยางที่มีค่าร้อยละการบวมตัวต่ำลงคือ ลดลงจาก 1383.45 เป็น 724.77 ซึ่งหมายความว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต เกิดการคงรูปได้สูงกว่า สำหรับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ได้ทำการเปลี่ยนระบบการคงรูปจากเดิมที่ใช้มาเลิกแอนไฮไดรต์เป็นสารคงรูปมาเป็นการคงรูปด้วยระบบกัมมะถันแทน โดยใช้สูตรสารเคมีที่มีการเติมกรดสเตียริก 1 phr ซิงก์ออกไซด์ 3 phr TBzTD 2 phr และกัมมะถัน 1.5 phr และทำการคงรูปที่อุณหภูมิ

100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า พิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีสมบัติความทนต่อแรงดึงสูงซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ จาก 0.44 เป็น 18.00 MPa ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากกระบวนการคงรูปที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR ที่มีค่าร้อยละการบวมตัวต่ำลงเป็น 390.15 ซึ่งจากเดิมฟิล์มที่เตรียมได้เป็นเจลในโทลูอินภายใน 1 วัน นั้นหมายความว่า พิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีระดับการคงรูปที่สูงกว่า เมื่อเกิดการคงรูปที่สูงกว่า การที่จะทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปก็ต้องให้แรงกระทำมากกว่า ค่าความทนต่อแรงดึงจึงสูงกว่านั่นเอง

เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง พฤติกรรมการเปลี่ยนสี และผันกลับสีต่ออุณหภูมิของฟิล์ม ยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้ พบว่า พิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ มีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตบริสุทธิ์ในโทลูอิน ซึ่งการเติมสารเคมีสำหรับการคงรูปด้วยกำมะถันและการผ่านกระบวนการคงรูปด้วยความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยพฤติกรรมการเปลี่ยนสีและผันกลับสีต่ออุณหภูมิของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทั้งสองชนิด มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสีและการผันกลับได้ของสีสูงกว่า poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากสายโซ่ของยางธรรมชาติเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของ poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ยากขึ้นและทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นการเปลี่ยนสีจึงปรากฏที่อุณหภูมิสูงขึ้น

## 5.2 พิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน

ในการพัฒนาฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต โดยการคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน พบว่า มีขั้นตอนการเตรียมที่ง่าย ไม่ต้องเติมสารเคมีคงรูปใด ๆ สามารถเตรียมได้โดยการผสม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิตในโทลูอิน กับสารละลายยางธรรมชาติหรือสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ได้เลย อีกทั้งฟิล์มที่เตรียมได้ยังมีสีน้ำเงินและมีลักษณะใสกว่าการคงรูปด้วยกำมะถันอีกด้วย ทำให้การปรากฏสีน้ำเงินของแผ่นฟิล์มชัดเจนกว่า โดยการคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอนพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีลำไอเล็กตรอน ความทนต่อแรงดึงจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าการบวมตัวจะลดลง สำหรับฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยาง จะมีค่าความทนต่อแรงดึงมากที่สุดและมีร้อยละการบวมตัวในโทลูอินต่ำที่สุด เมื่อทำการฉายรังสีลำไอเล็กตรอนที่ 250 กิโลเกรย์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขณะที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต จากน้ำยางธรรมชาติผสมสุตร จะมีค่าความทนต่อแรงดึง

มากที่สุดและมีร้อยละการบวมตัวในโพลูอินต่ำที่สุด เมื่อทำการฉายรังสีลำอิเล็กตรอนที่ 20 กิโลเกรย์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต จากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร เป็นฟิล์มที่ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่าฟิล์มยางที่เตรียมจากสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจากระดับการคงรูปที่ได้มีค่าสูงกว่า

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนสีและผันกลับสีต่ออุณหภูมิ พบว่า ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต และ ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลาย เริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร เริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากว่าน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรมีการเติมสารเคมีชนิดต่าง ๆ มากกว่าระบบอื่น มีค่าความเป็นกรด-เบสที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ลงในน้ำยางซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำทำให้ไม่เกิดการเกี่ยวพันกัน จึงทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้ไม่เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อพิจารณาความสามารถในการผันกลับของสี จะเห็นว่า poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ไม่สามารถผันกลับสีได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต 20 องศาเซลเซียส และการเติม poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ในปริมาณต่าง ๆ กันไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มเห็นการเปลี่ยนสี แต่จะทำให้สามารถสังเกตเห็นอุณหภูมิที่ผันกลับสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้นยิ่งเติมมากก็จะสังเกตเห็นได้ง่ายกว่า สำหรับ ฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรที่คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน พบว่า ความสามารถในการผันกลับได้ของสีจะด้อยลงโดยเห็นว่าอุณหภูมิที่สีผันกลับได้อย่างสมบูรณ์จะอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส เท่านั้น ซึ่งต่ำกว่า ฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมได้จากระบบอื่น ๆ ซึ่งมีสาเหตุเดียวกันจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์โดยภาพรวมแล้วพบว่า ฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายของยางธรรมชาติและสารละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ที่ทำการคงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอนเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นตัวรับรู้อุณหภูมิมากที่สุด เนื่องจากการคงรูปด้วยวิธีนี้ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งฟิล์มที่เตรียมได้ยังมีสีน้ำเงินและมีลักษณะใสสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีได้อย่างชัดเจน



## บรรณานุกรม

1. Sun X, Chen T, Huang S, Cai F, Chen X, Yang Z, et al. UV-Induced Chromatism of Polydiacetylenic Assemblies. *The journal of physical chemistry b*. 2010;114:2379–82.
2. Ahn DJ, Lee S, Kim J-M. Rational Design of Conjugated Polymer Supramolecules with Tunable Colorimetric Responses. *Advanced Functional Materials*. 2009;19(10):1483-96.
3. ศูนย์ข้อมูล SMEs Knowledge Center. ลำโพงอิเล็กทรอนิกส์เพื่อปรับปรุงคุณภาพ [Online]. 2558 [cited 2018 27 March]. Available from: <http://www.onartgroup.com/Article/0328.pdf>.
4. Potisatityuenyong A, Tumcharern G, Dubas ST, Sukwattanasinitt M. Layer-by-layer assembly of intact polydiacetylene vesicles with retained chromic properties. *J Colloid Interface Sci*. 2006;304(1):45-51.
5. Okada S, Peng S, Spevak W, Chartych D. Color and Chromism of Polydiacetylene Vesicles. *Accounts of Chemical Research*. 1998;31:229-39.
6. Kim JM, Lee YB, Chae SK, Ahn DJ. Patterned Color and Fluorescent Images with Polydiacetylene Supramolecules Embedded in Poly(vinyl alcohol) Films. *Advanced Functional Materials*. 2006;16(16):2103-9.
7. Rungruangviriyi N, Traiphol N. Versatile Route for Preparation of Polydiacetylene/ZnO Nanocomposites and Their Colorimetric Response to pH and Ethanol. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2010;20:35-41.
8. Traiphol N, Rungruangviriyi 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. วิภาวี พัฒนกุล. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ [Online]. 2559 [cited 2018 1 April]. Available from: [http:// rubberthai.com/yang/administrator/jour/98.pdf](http://rubberthai.com/yang/administrator/jour/98.pdf).

10. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. น้ํายางธรรมชาติ. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน (Natural rubber : Production and applications). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย:กรุงเทพฯ; 2549.
11. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. ข้อมูลวิชาการยางพารา [Online]. [cited 2018 1 April ]. Available from: <http://www.rubberthai.com/book/file/69.pdf>
12. สุวดี ก้องพารากุล. เทคโนโลยีการตัดแปรงยางธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้. วารสาร วิทยาศาสตร์ มช. 2556;41:567- 81.
13. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. น้ํายางสด. การผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber production). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี; 2547.
14. Blackley DC. Type of latices. In: Polymer Latices Science and Technology Se, editor. Chapman & Hall, London; 1997.
15. จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. สมบัติของยางธรรมชาติ. เทคโนโลยียางธรรมชาติ (Natural rubber technology) ความรู้ใหม่เกี่ยวกับยางธรรมชาติ จากโครงสร้างโมเลกุลถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ : เทคโนโลยีนิช คอมมิวนิเคชั่นส์; 2553
16. Phinyocheep P, editor Advances in Chemical Modification of Natural Rubber. Rubber Conference Proceedings : Advances in Natural Rubber Science and Technology; 2013; Bangkok, Thailand.
17. Davey JE, Loadman MJR. A chemical demonstration of the randomness of epoxidation of natural rubber. British Polymer Journal. 1984;16:8-13.
18. Thitithammawong A, Noordermeer JWM, Kaesaman A, Nakason C. Influence of compatibilizers on the rheological, mechanical, and morphological properties of epoxidized natural rubber/polypropylene thermoplastic vulcanizates. Journal of Applied Polymer Science. 2008;107(4):2436-43.
19. Radhakrishnan Nair MN, Biju PK, Thomas GV, Gopinathan Nair MR. Blends of PVC and epoxidized liquid natural rubber: Studies on impact modification. Journal of Applied Polymer Science. 2009;111(1):48-56.
20. Chuayjuljit S, Yaowsang C, Na-Ranong N, Potiyaraj P. Oil resistance and physical properties of in situ epoxidized natural rubber from high ammonia concentrated latex. Journal of Applied Polymer Science. 2006;100(5):3948-55.

21. Baker CSL, Gelling IR. Epoxidized Natural Rubber in Development of Rubber Technology. London; 1987.
22. สถาบันพลาสติก. เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์ [Online]. 2013 [cited 2018 8 April ]. Available from:  
<http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239/%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%9E%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%94%E0%B9%8C.pdf>.
23. วัลคาไนเซชัน [Online]. [cited 2018 8 April ]. 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>
24. การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยเพอร์ออกไซด์ [Online]. [cited 2018 8 April ]. Available from:  
[http://rubber.oie.go.th/box/ELib\\_Document/3752/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%A5%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B9%84%E0%B8%99%E0%B8%8B%E0%B9%8C%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%98%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%8A%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B8%94%E0%B9%8C.pdf](http://rubber.oie.go.th/box/ELib_Document/3752/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%A5%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B9%84%E0%B8%99%E0%B8%8B%E0%B9%8C%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%98%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%8A%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B8%94%E0%B9%8C.pdf).
25. Chakraborty SK. Electron beam radiation for improved quality and productivity. Tire Technology International; 2010.
26. Makuuchi K. An Introduction to Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex. Bangkok: T.R.I. Global Co., Ltd; 2003.
27. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย. เทคโนโลยีการออกสูตรเคมียาง (Compounding Formulation) [Online]. 2011 [cited 2018 1 April ]. Available from:  
<http://www.rubbercenter.org/files/rtec/compound-RTEC.pdf>.

28. สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) [Online]. [cite 2018 12 March ]. Available from: [http://www.appliedchem.mju.ac.th/goverment/25590629090647\\_appliedchem/Doc\\_25590804165321\\_206535.pdf](http://www.appliedchem.mju.ac.th/goverment/25590629090647_appliedchem/Doc_25590804165321_206535.pdf)
29. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Absorption spectrophotometer) [Online]. [cited 2018 12 March ]. Available from: <https://home.kku.ac.th/chuare/12/spectrophotometer.pdf>.
30. รศ.ดร.ชิตติมา รุกขไชยศิริกุล. สเปกโทรสโกปีอินทรีย์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง; 2559.
31. UV-Visible Spectroscopy (UV-Vis) [Online]. [cited 2018 12 March]. 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. stress-strain curve [Online]. [cited 2018 12 March ]. Available from: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/products/metrics-and-basics-mechanics>.
33. ทดสอบแรงดึง [Online]. [cited 2018 12 March ]. 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).
34. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. การทดสอบแรงดึง [Online]. [cited 2018 12 March ]. Available from: [http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/Tensile\\_Test.pdf](http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/Tensile_Test.pdf).
35. กราฟความเค้น-ความเครียด [Online]. [cited 2018 12 March ]. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0628/deformation-%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A2%E0%B8%B0%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%99%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B8%9B>.
36. การบวมตัว [Online]. [cited 2018 12 March]. Available from: <http://chemsci.kku.ac.th/choosak/MD/polymermd.pdf>.
37. swelling [Online]. [cited 2018 12 March ]. Available from: <http://www.smithersrapra.com/testing-services/by-material/rubber-and-elastomer-physical-testing/volume-swell>.

38. Yoon B, Lee S, Kim JM. Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. *Chem Soc Rev.* 2009;38(7):1958-68.
39. Chanakul 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.
40. 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.
41. วิภาวี ปัญญานันทกิตติ. พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์/ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิตฟิล์ม และการตอบสนองด้านการตรวจวัดสี: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2558.
42. พิไลพร หนูทองคำ. การเตรียมฟิล์มยางที่มีความใสจากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสี: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2551.
43. R.Komgrit<sup>1</sup>, C.Thawat, B.Tripob, T.Wirach, editors. Effect of gamma radiation dose and sensitizer on the physical properties of irradiated natural rubber latex. *Nuclear Science and Technology Conference; 2009; Mahesorn Hall SCB Park Plaza Bangkok.*
44. Poh BT, Tan BK. Mooney scorch time of epoxidized natural rubber. *Journal of Applied Polymer Science.* 1991;42(5):1407-16.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## สมบัติเชิงกล

ก-1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ คงรูปด้วยกำมะถัน โดยเปรียบเทียบปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD 2, 3, 4 และ 5 phr คงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-1.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณ TBzTD (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	2	7.0	10.00	6.11	7.36	8.13	7.72	±1.47
ฟิล์มNR	3	10.2	10.6	10.4	11.7	11.5	10.88	±0.68
ฟิล์มNR	4	14.37	15.13	16.83	15.83	17.32	15.89	±1.21
ฟิล์มNR	5	9.90	8.10	8.14	8.43	8.90	8.69	±54.77
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	4	13.72	12.60	12.90	13.10	13.50	13.16	±0.45



ตาราง ก-1.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณ TBzTD (phr)	ยังส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	2	2.44	0.58	1.18	1.64	0.30	1.11	±1.04
ฟิล์มNR	3	1.28	2.07	3.01	3.64	2.56	2.51	±0.90
ฟิล์มNR	4	0.10	1.52	0.55	1.46	1.09	0.94	±0.61
ฟิล์มNR	5	2.08	2.06	0.39	2.39	0.54	1.27	±1.28
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	4	0.18	1.48	0.52	1.42	0.95	0.91	±0.56

ตาราง ก-1.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณ TBzTD (phr)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	2	1100	1000	1000	1000	1000	1020	±44.72
ฟิล์มNR	3	1200	1100	1100	1300	1300	1200	±100.00
ฟิล์มNR	4	1300	1200	1650	1550	1700	1480	±219.66
ฟิล์มNR	5	1400	1300	1300	1350	1350	1340	±41.83
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	4	1500	1250	1300	1350	1400	1360	±96.18

ก-2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ คงรูปด้วยกำมะถัน โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-2.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	90	1	-	-	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	2	-	-	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	3	4.00	8.00	5.10	6.00	6.60	5.94	±1.51
ฟิล์มNR	90	4	10.5	7.82	7.54	9.61	9.20	8.93	±1.24
ฟิล์มNR	90	5	4.20	7.80	6.70	5.10	6.50	6.06	±1.42
ฟิล์มNR	100	1	4.00	6.60	5.88	4.20	5.80	5.30	±1.14
ฟิล์มNR	100	2	5.20	6.36	5.50	6.02	5.10	5.64	±0.54
ฟิล์มNR	100	3	14.37	15.13	16.83	15.83	17.32	15.89	±1.21
ฟิล์มNR	100	4	14.00	13.69	13.76	11.37	10.92	12.75	±1.48
ฟิล์มNR	100	5	11.97	11.04	10.29	11.85	13.47	11.72	±1.19
ฟิล์มNR	110	1	15.02	13.39	12.88	10.07	12.97	12.87	±1.78
ฟิล์มNR	110	2	15.15	14.19	13.04	11.43	15.16	13.79	±1.58
ฟิล์มNR	110	3	11.07	11.60	13.90	11.40	10.90	11.77	±1.22
ฟิล์มNR	110	4	12.70	12.50	10.50	11.40	12.00	11.82	±0.89
ฟิล์มNR	110	5	11.20	10.50	10.20	10.70	12.00	10.92	±0.70
ฟิล์มNR	120	1	11.50	10.20	11.70	10.60	11.40	11.08	±0.65
ฟิล์มNR	120	2	14.10	12.60	14.70	13.60	12.10	13.42	±1.07
ฟิล์มNR	120	3	15.70	12.00	13.30	12.60	12.20	13.16	±1.50
ฟิล์มNR	120	4	15.50	12.40	11.60	13.90	12.30	13.14	±1.56
ฟิล์มNR	120	5	11.10	13.50	11.10	13.40	12.90	12.40	±1.21

ตาราง ก-2.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	90	1	-	-	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	2	-	-	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	3	0.83	-0.24	-0.13	0.88	0.76	0.42	±0.56
ฟิล์มNR	90	4	-0.98	0.65	0.36	-0.37	1.53	0.24	±0.96
ฟิล์มNR	90	5	0.61	1.50	0.58	0.58	0.30	0.71	±0.46
ฟิล์มNR	100	1	0.40	0.58	1.80	1.25	0.26	0.86	±0.65
ฟิล์มNR	100	2	0.22	0.48	0.57	1.57	0.82	0.73	±0.52
ฟิล์มNR	100	3	0.10	1.52	0.55	1.46	1.09	0.94	±0.61
ฟิล์มNR	100	4	0.26	1.18	1.32	2.55	0.18	1.10	±0.96
ฟิล์มNR	100	5	2.32	0.26	0.64	0.41	0.25	0.78	±0.88
ฟิล์มNR	110	1	0.48	0.86	1.42	1.84	0.33	0.99	±0.64
ฟิล์มNR	110	2	0.77	0.26	1.27	0.42	0.49	0.64	±0.40
ฟิล์มNR	110	3	0.14	-0.10	1.63	1.33	2.00	1.00	±0.93
ฟิล์มNR	110	4	0.11	-1.41	0.68	1.22	0.14	0.15	±0.98
ฟิล์มNR	110	5	-2.44	1.17	1.91	0.04	2.59	0.65	±1.97
ฟิล์มNR	120	1	2.06	1.28	0.64	2.07	0.01	1.21	±0.90
ฟิล์มNR	120	2	0.10	0.38	0.11	0.11	1.56	0.45	±0.64
ฟิล์มNR	120	3	0.87	2.07	-0.19	-0.01	0.52	0.65	±0.90
ฟิล์มNR	120	4	2.84	0.75	-0.15	0.10	-0.05	0.70	±1.25
ฟิล์มNR	120	5	-0.12	2.56	1.34	2.39	-0.54	1.13	±1.42

ตาราง ก-2.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	90	1	-	-	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	2	-	-	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	3	1100	1100	1000	1100	1100	1080	±44.72
ฟิล์มNR	90	4	1100	1200	1300	1900	1200	1340	±320.93
ฟิล์มNR	90	5	1100	1500	1000	1100	1100	1160	±194.93
ฟิล์มNR	100	1	1100	1000	1000	1100	1000	1040	±54.77
ฟิล์มNR	100	2	1100	1000	1200	1500	1300	1220	±192.35
ฟิล์มNR	100	3	1300	1200	1650	1550	1700	1480	±219.66
ฟิล์มNR	100	4	1200	1400	1100	1500	1500	1340	±181.66
ฟิล์มNR	100	5	1300	1100	1300	1200	1100	1200	±100.00
ฟิล์มNR	110	1	1300	980	1000	1400	1600	1256	±265.86
ฟิล์มNR	110	2	1400	1200	1400	1600	1400	1400	±141.42
ฟิล์มNR	110	3	1100	1000	1000	1000	1000	1020	±44.72
ฟิล์มNR	110	4	1200	1300	1300	1100	1500	1280	±148.32
ฟิล์มNR	110	5	1300	1150	1000	1150	1500	1220	±189.08
ฟิล์มNR	120	1	1300	1150	1300	1250	1300	1260	±65.19
ฟิล์มNR	120	2	1500	1400	1500	1350	1300	1410	±89.44
ฟิล์มNR	120	3	1200	1000	1100	1000	1000	1060	±89.44
ฟิล์มNR	120	4	1500	1150	1150	1350	1250	1280	±148.32
ฟิล์มNR	120	5	1000	1000	1100	1500	1500	1220	±258.84

ก-3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์ คงรูปด้วยกำมะถัน โดยเปรียบเทียบปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD 2, 3, 4 และ 5 phr คงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-3.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณ TBzTD (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	2	21.80	15.11	16.20	18.65	18.24	18.00	±2.57
ฟิล์มENR	3	16.60	18.60	17.40	16.30	18.80	17.54	±1.13
ฟิล์มENR	4	17.50	17.70	16.00	19.30	18.00	17.70	±1.18
ฟิล์มENR	5	18.50	17.30	16.60	16.80	17.50	17.34	±0.74
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	2	16.60	17.70	15.60	13.90	16.30	16.02	±1.41

ตาราง ก-3.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณ TBzTD (phr)	ยังส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	2	2.70	0.68	2.98	1.20	2.02	1.92	±0.97
ฟิล์มENR	3	0.23	0.06	0.54	2.10	-0.35	0.51	±0.94
ฟิล์มENR	4	-0.14	1.31	1.32	0.52	1.89	0.98	±0.79
ฟิล์มENR	5	0.66	-0.23	-0.08	1.38	1.80	0.71	±0.89
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	2	0.28	1.52	0.28	-0.06	1.76	0.75	±0.83

ตาราง ก-3.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณ TBzTD (phr)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	2	1700	1400	1500	1700	1600	1580	±130.38
ฟิล์มENR	3	1400	1600	1300	1430	1600	1466	±131.45
ฟิล์มENR	4	1400	1400	1200	1500	1500	1400	±122.47
ฟิล์มENR	5	1600	1500	1400	1400	1500	1480	±83.67
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	2	1600	1700	1500	1100	1600	1500	±234.52

ก-4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์ คงรูปด้วยกำมะถัน โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-4.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	90	1	6.70	9.80	6.30	4.30	3.70	6.16	±2.40
ฟิล์มENR	90	2	4.40	9.60	8.30	6.82	6.00	7.02	±2.01
ฟิล์มENR	90	3	13.40	10.80	10.10	11.9	15.70	12.38	±2.24
ฟิล์มENR	90	4	11.20	10.10	15.10	10.40	11.50	11.66	±2.01
ฟิล์มENR	90	5	6.30	9.00	9.60	9.75	11.70	9.27	±1.95
ฟิล์มENR	100	1	12.40	11.60	14.80	11.00	12.70	12.50	±1.45
ฟิล์มENR	100	2	16.10	16.35	15.90	16.80	14.93	16.02	±0.69
ฟิล์มENR	100	3	21.80	15.11	16.20	18.65	18.24	18.00	±2.57
ฟิล์มENR	100	4	18.10	17.90	16.20	18.55	14.10	16.97	±1.83
ฟิล์มENR	100	5	18.75	14.40	16.45	17.69	17.06	16.87	±1.62

ตาราง ก-4.1 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	110	1	12.44	11.58	16.59	10.81	12.19	12.72	±2.25
ฟิล์มENR	110	2	13.63	17.18	13.60	11.69	18.16	14.85	±2.71
ฟิล์มENR	110	3	18.67	18.41	15.31	18.72	16.34	17.49	±1.57
ฟิล์มENR	110	4	16.74	19.84	17.22	18.57	17.06	17.89	±1.30
ฟิล์มENR	110	5	15.94	13.66	16.17	15.93	16.43	15.63	±1.12
ฟิล์มENR	120	1	16.98	11.50	11.50	10.70	16.54	13.44	±3.05
ฟิล์มENR	120	2	11.60	17.40	19.50	16.70	17.50	16.54	±2.95
ฟิล์มENR	120	3	17.00	18.00	17.20	22.60	15.20	18.00	±2.77
ฟิล์มENR	120	4	17.60	12.40	16.70	15.90	15.70	15.66	±1.97
ฟิล์มENR	120	5	16.57	15.27	17.90	16.50	12.80	15.81	±1.92

ตาราง ก-4.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ที่เตรียมจากสารละลายธรรมชาติอีพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ยังส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	90	1	1.37	0.38	1.49	2.76	0.48	1.30	±0.96
ฟิล์มENR	90	2	0.62	2.51	0.21	1.40	0.11	0.97	±1.00
ฟิล์มENR	90	3	1.41	1.39	1.27	1.77	0.23	1.21	±0.58
ฟิล์มENR	90	4	1.14	1.07	1.04	0.31	0.63	0.84	±0.36
ฟิล์มENR	90	5	1.60	0.23	0.70	4.45	1.21	1.64	±1.65
ฟิล์มENR	100	1	0.97	0.29	0.04	0.66	1.54	0.70	±0.59
ฟิล์มENR	100	2	4.33	0.05	0.34	2.39	1.17	1.66	±1.75
ฟิล์มENR	100	3	2.70	0.68	2.98	1.20	2.02	1.92	±0.97
ฟิล์มENR	100	4	2.48	2.48	1.23	2.23	1.15	1.91	±0.67
ฟิล์มENR	100	5	0.55	1.50	0.60	1.12	0.05	0.76	±0.56
ฟิล์มENR	110	1	0.92	0.25	0.65	0.87	1.67	0.87	±0.52

ตาราง ก-4.2 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ยังส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	110	2	1.23	0.63	1.65	0.39	0.49	0.88	±0.54
ฟิล์มENR	110	3	0.73	1.81	1.18	2.44	2.41	1.71	±0.75
ฟิล์มENR	110	4	0.17	2.56	1.64	0.19	1.10	1.13	±1.01
ฟิล์มENR	110	5	0.30	0.27	0.07	0.53	3.17	0.87	±1.30
ฟิล์มENR	120	1	0.50	1.81	0.09	0.38	1.53	0.86	±0.76
ฟิล์มENR	120	2	1.22	-0.79	0.25	-0.49	1.81	0.40	±1.10
ฟิล์มENR	120	3	0.68	-1.13	1.16	4.32	0.05	1.02	±2.04
ฟิล์มENR	120	4	-0.24	0.30	0.28	0.04	0.38	0.15	±0.25
ฟิล์มENR	120	5	-0.15	-0.36	1.21	1.39	1.16	0.65	±0.83

ตาราง ก-4.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายธรรมชาติอีพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	90	1	1000	900	900	1000	1000	960	±54.77
ฟิล์มENR	90	2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	±0
ฟิล์มENR	90	3	1400	1400	1300	1200	1200	1300	±100.00
ฟิล์มENR	90	4	1400	1100	1400	1300	1300	1300	±122.47
ฟิล์มENR	90	5	1600	1100	1400	1400	1200	1340	±194.94
ฟิล์มENR	100	1	1650	1400	1800	1400	1650	1580	±175.36
ฟิล์มENR	100	2	1300	1000	1000	1300	1300	1180	±164.32
ฟิล์มENR	100	3	1700	1400	1500	1700	1600	1580	±130.38
ฟิล์มENR	100	4	1500	1200	1100	1300	1500	1320	±178.89
ฟิล์มENR	100	5	1300	1800	1600	1600	1100	1480	±277.49
ฟิล์มENR	110	1	1100	1100	1000	1100	1100	1080	±44.72
ฟิล์มENR	110	2	1300	1300	1300	1300	1500	1340	±89.44



ตาราง ก-4.3 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	110	3	1100	820	870	1500	1300	1118	±287.09
ฟิล์มENR	110	4	1400	1300	1400	1400	1300	1360	±54.77
ฟิล์มENR	110	5	1600	1600	1600	1700	1200	1540	±194.94
ฟิล์มENR	120	1	1400	1100	1100	1000	1100	1140	±151.66
ฟิล์มENR	120	2	1000	1500	1650	1350	1500	1400	±247.49
ฟิล์มENR	120	3	1350	1500	1400	1600	1300	1430	±120.42
ฟิล์มENR	120	4	1700	1000	1550	1450	1400	1420	±261.25
ฟิล์มENR	120	5	1500	1450	1700	1550	1400	1520	±115.11

ก-5 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน โดยฉายรังสีลำไอเล็กตรอนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-5.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/1	50	0.91	2.02	3.30	1.21	1.66	1.82	±0.93
ฟิล์มNR	50/1	100	5.63	5.36	6.21	5.37	5.90	5.69	±0.36
ฟิล์มNR	50/1	150	10.40	10.80	12.50	12.60	11.80	11.62	±0.99
ฟิล์มNR	50/1	200	15.10	15.90	15.80	15.89	16.38	15.81	±0.46
ฟิล์มNR	50/1	250	17.40	18.20	18.30	17.60	18.06	17.91	±0.39
ฟิล์มNR	50/2	50	1.90	1.22	1.88	2.47	1.11	1.72	±0.56
ฟิล์มNR	50/2	100	5.14	5.92	5.07	5.43	5.32	5.38	±0.34
ฟิล์มNR	50/2	150	11.50	10.50	10.10	10.80	10.50	10.68	±0.52
ฟิล์มNR	50/2	200	15.23	15.22	16.88	15.93	15.09	15.67	±0.75

ตาราง ก-5.1 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/2	250	17.40	17.92	17.79	18.43	17.90	17.89	±0.37
ฟิล์มNR	60/1	50	1.70	0.98	1.94	2.02	1.81	1.69	±0.42
ฟิล์มNR	60/1	100	4.90	5.08	4.86	5.16	5.31	5.06	±0.19
ฟิล์มNR	60/1	150	8.65	9.31	9.41	9.59	9.18	9.23	±0.36
ฟิล์มNR	60/1	200	15.00	14.16	15.50	15.30	15.10	15.01	±0.51
ฟิล์มNR	60/1	250	16.17	16.42	15.83	15.77	17.04	16.25	±0.52
ฟิล์มNR	60/2	50	1.20	1.88	1.68	1.08	1.49	1.47	±0.33
ฟิล์มNR	60/2	100	5.58	4.59	5.51	4.58	3.94	4.84	±0.70
ฟิล์มNR	60/2	150	9.31	8.87	9.05	9.27	8.88	9.08	±0.21
ฟิล์มNR	60/2	200	15.78	14.01	14.22	14.20	15.71	14.78	±0.88
ฟิล์มNR	60/2	250	15.58	16.60	16.03	17.60	14.87	16.14	±1.03
ฟิล์มNR	70/1	50	1.07	1.01	0.70	1.95	1.86	1.32	±0.55
ฟิล์มNR	70/1	100	4.02	4.38	4.58	5.04	4.00	4.40	±0.43
ฟิล์มNR	70/1	150	8.06	8.01	7.48	8.19	8.76	8.10	±0.46
ฟิล์มNR	70/1	200	14.20	14.68	14.20	13.20	14.58	14.17	±0.59
ฟิล์มNR	70/1	250	15.20	15.80	15.40	15.27	17.56	15.85	±0.99
ฟิล์มNR	70/2	50	1.58	1.78	1.73	0.67	0.98	1.35	±0.50
ฟิล์มNR	70/2	100	4.45	4.50	4.60	4.68	2.96	4.24	±0.72
ฟิล์มNR	70/2	150	8.33	6.32	7.46	8.73	8.70	7.91	±1.03
ฟิล์มNR	70/2	200	14.25	13.55	14.84	13.57	13.00	13.84	±0.71
ฟิล์มNR	70/2	250	14.96	14.78	15.80	15.40	15.10	15.21	±0.40

ตาราง ก-5.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/1	50	0.27	0.33	0.34	0.99	0.34	0.45	±0.30
ฟิล์มNR	50/1	100	1.94	1.45	1.04	0.71	0.08	1.04	±0.71
ฟิล์มNR	50/1	150	0.95	0.17	0.49	2.62	1.01	1.05	±0.94
ฟิล์มNR	50/1	200	2.28	0.56	0.74	1.12	1.43	1.23	±0.68
ฟิล์มNR	50/1	250	1.73	1.29	0.6	0.21	2.54	1.27	±0.92
ฟิล์มNR	50/2	50	0.90	0.31	0.11	0.57	0.23	0.42	±0.32
ฟิล์มNR	50/2	100	1.07	0.20	1.11	0.45	0.59	0.68	±0.40
ฟิล์มNR	50/2	150	1.07	0.93	0.10	0.07	1.37	0.71	±0.59
ฟิล์มNR	50/2	200	0.88	0.53	0.19	0.68	2.19	0.89	±0.77
ฟิล์มNR	50/2	250	0.29	0.26	1.39	1.04	2.34	1.06	±0.86
ฟิล์มNR	60/1	50	0.32	0.30	1.18	1.13	0.13	0.61	±0.50
ฟิล์มNR	60/1	100	0.1	2.74	0.42	0.14	0.18	0.72	±1.14
ฟิล์มNR	60/1	150	0.28	0.81	0.71	0.15	1.76	0.74	±0.63
ฟิล์มNR	60/1	200	1.34	1.62	0.46	0.23	0.24	0.78	±0.65
ฟิล์มNR	60/1	250	1.46	0.04	1.06	1.38	1.18	1.02	±0.57
ฟิล์มNR	60/2	50	0.05	0.96	0.22	0.31	1.26	0.56	±0.52
ฟิล์มNR	60/2	100	0.35	0.09	0.73	1.35	0.59	0.62	±0.47
ฟิล์มNR	60/2	150	0.23	0.02	1.99	1.55	0.36	0.83	±0.88
ฟิล์มNR	60/2	200	1.95	1.04	0.74	0.41	1.20	1.07	±0.58
ฟิล์มNR	60/2	250	0.7	0.32	1.1	1.59	1.77	1.10	±0.60
ฟิล์มNR	70/1	50	1.51	0.32	1.8	0.23	0.08	0.79	±0.80
ฟิล์มNR	70/1	100	-	0.77	1.27	1.23	0.21	0.87	±0.50
ฟิล์มNR	70/1	150	0.87	1.55	1.59	0.43	1.01	1.09	±0.49
ฟิล์มNR	70/1	200	1.76	1.88	0.16	0.40	1.44	1.13	±0.80
ฟิล์มNR	70/1	250	1.63	1.50	1.04	0.49	1.02	1.14	±0.45

ตาราง ก-5.2(ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ยั้งส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	70/2	50	0.03	1.42	0.77	0.05	0.45	0.54	±0.58
ฟิล์มNR	70/2	100	2.07	0.63	0.23	0.84	0.22	0.80	±0.76
ฟิล์มNR	70/2	150	0.23	1.06	0.41	1.90	0.54	0.83	±0.67
ฟิล์มNR	70/2	200	0.21	1.01	0.37	1.69	1.13	0.88	±0.60
ฟิล์มNR	70/2	250	0.96	1.48	1.05	1.09	0.29	0.97	±0.43

ตาราง ก-5.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/1	50	800	700	800	650	650	720.0	±75.83
ฟิล์มNR	50/1	100	1200	1100	1100	1200	1100	1140	±54.77
ฟิล์มNR	50/1	150	1700	1400	1500	1500	1400	1500	±122.47
ฟิล์มNR	50/1	200	1700	1700	1700	1600	1700	1680	±44.72
ฟิล์มNR	50/1	250	1900	1600	1700	1500	1800	1700	±158.11
ฟิล์มNR	50/2	50	710	690	840	590	680	702	±89.83
ฟิล์มNR	50/2	100	1000	1100	1000	1200	1000	1060	±89.44
ฟิล์มNR	50/2	150	1400	1200	1200	1200	1400	1280	±109.54
ฟิล์มNR	50/2	200	1600	1600	1600	1500	1500	1560	±54.77
ฟิล์มNR	50/2	250	1600	1600	1600	1700	1700	1640	±54.77
ฟิล์มNR	60/1	50	650	640	710	740	750	698	±50.70
ฟิล์มNR	60/1	100	1000	1100	1100	1100	1000	1060	±54.77
ฟิล์มNR	60/1	150	1200	1200	1200	1400	1400	1280	±109.54
ฟิล์มNR	60/1	200	1500	1600	1500	1500	1600	1540	±54.77

ตาราง ก-5.3 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	60/1	250	1500	1700	1700	1600	1500	1600	±100.00
ฟิล์มNR	60/2	50	730	760	560	670	700	684	±77.01
ฟิล์มNR	60/2	100	900	910	1100	800	900	922	±109.18
ฟิล์มNR	60/2	150	1200	1300	1200	1300	1300	1260	±54.77
ฟิล์มNR	60/2	200	1500	1500	1400	1300	1400	1420	±83.67
ฟิล์มNR	60/2	250	1450	1500	1500	1600	1450	1500	±61.24
ฟิล์มNR	70/1	50	680	670	680	600	630	652	±35.64
ฟิล์มNR	70/1	100	880	850	880	880	900	878	±17.89
ฟิล์มNR	70/1	150	1300	1200	1100	1300	1200	1220	±83.67
ฟิล์มNR	70/1	200	1400	1500	1400	1400	1400	1420	±44.72
ฟิล์มNR	70/1	250	1500	1500	1300	1600	1400	1460	±114.02
ฟิล์มNR	70/2	50	620	780	690	600	500	638	±104.50
ฟิล์มNR	70/2	100	850	890	800	800	810	830	±39.37
ฟิล์มNR	70/2	150	1200	1200	1200	1200	1200	1200	±0.00
ฟิล์มNR	70/2	200	1400	1200	1300	1600	1400	1380	±148.32
ฟิล์มNR	70/2	250	1600	1300	1400	1500	1500	1460	±114.02

ก-6 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติอพอกไซต์ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ อพอกไซต์ คงรูปด้วยรังสีลําอเล็กตรอน โดยฉายปริมาณรังสีลําอเล็กตรอนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-6.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติอพอกไซต์ ที่เตรียมจาก สารละลายยางธรรมชาติอพอกไซต์

ชนิด ฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่า เฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	50/1	50	1.17	1.12	1.92	2.58	1.80	1.72	±0.60
ฟิล์มENR	50/1	100	7.52	6.32	7.60	7.90	8.40	7.55	±0.77
ฟิล์มENR	50/1	150	10.10	10.30	10.90	10.60	10.50	10.48	±0.30
ฟิล์มENR	50/1	200	16.80	16.62	18.66	17.75	17.37	17.44	±0.82
ฟิล์มENR	50/1	250	20.50	19.30	18.62	18.60	19.34	19.27	±0.77
ฟิล์มENR	50/2	50	1.19	0.54	1.98	1.70	0.78	1.24	±0.60
ฟิล์มENR	50/2	100	7.58	8.67	6.32	6.78	7.10	7.29	±0.90
ฟิล์มENR	50/2	150	10.40	10.20	10.30	10.00	10.50	10.28	±0.19
ฟิล์มENR	50/2	200	17.57	16.50	16.91	15.50	16.29	16.55	±0.77
ฟิล์มENR	50/2	250	18.30	19.84	19.10	19.40	19.30	19.19	±0.57
ฟิล์มENR	60/1	50	1.84	1.35	1.15	0.98	1.00	1.26	±0.35
ฟิล์มENR	60/1	100	6.57	6.57	7.74	6.88	7.68	7.22	±0.51
ฟิล์มENR	60/1	150	9.92	10.40	10.90	9.33	10.50	10.21	±0.60
ฟิล์มENR	60/1	200	17.20	16.00	14.30	16.50	17.80	16.36	±1.34
ฟิล์มENR	60/1	250	18.00	17.10	17.52	18.90	18.70	18.04	±0.76
ฟิล์มENR	60/2	50	1.80	0.90	1.70	1.08	0.79	1.25	±0.47
ฟิล์มENR	60/2	100	7.45	6.94	8.56	5.93	7.00	7.18	±0.95
ฟิล์มENR	60/2	150	9.73	9.39	9.94	11.00	9.40	9.89	±0.66
ฟิล์มENR	60/2	200	16.50	14.20	16.60	16.60	16.70	16.12	±1.08
ฟิล์มENR	60/2	250	17.20	18.80	18.10	18.20	17.40	17.94	±0.65
ฟิล์มENR	70/1	50	1.10	1.32	1.19	1.11	1.03	1.15	±0.11
ฟิล์มENR	70/1	100	7.15	6.48	6.93	6.48	6.04	6.62	±0.43

ตาราง ก-6.1 (ต่อ)

ชนิด ฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่า เฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	70/1	150	9.05	9.04	9.06	9.49	9.00	9.13	±0.20
ฟิล์มENR	70/1	200	14.90	16.90	16.75	15.80	15.70	16.01	±0.82
ฟิล์มENR	70/1	250	16.80	17.30	18.00	17.40	17.40	17.38	±0.43
ฟิล์มENR	70/2	50	0.87	1.70	0.97	0.97	0.96	1.09	±0.34
ฟิล์มENR	70/2	100	6.03	6.08	6.54	6.58	6.77	6.40	±0.33
ฟิล์มENR	70/2	150	8.22	8.40	8.59	8.90	8.65	8.55	±0.26
ฟิล์มENR	70/2	200	14.20	16.64	16.30	15.20	14.08	19.27	±1.17
ฟิล์มENR	70/2	250	18.16	16.62	18.21	17.74	15.90	17.33	±1.02

ตาราง ก-6.2 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชนิด ฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ยังส์มอดุลัส (MPa)					ค่า เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	50/1	50	0.41	1.07	0.48	1.26	0.27	0.70	±0.44
ฟิล์มENR	50/1	100	0.67	0.50	0.64	0.59	1.24	0.73	±0.29
ฟิล์มENR	50/1	150	1.04	1.17	1.11	1.70	0.49	1.10	±0.43
ฟิล์มENR	50/1	200	1.72	0.70	1.77	1.93	1.21	1.47	±0.51
ฟิล์มENR	50/1	250	2.52	1.83	0.15	1.91	1.53	1.59	±0.88
ฟิล์มENR	50/2	50	0.31	0.68	1.28	0.03	0.6	0.58	±0.47
ฟิล์มENR	50/2	100	0.20	0.15	1.10	1.30	0.22	0.59	±0.56
ฟิล์มENR	50/2	150	1.11	0.34	0.71	0.58	0.36	0.62	±0.31
ฟิล์มENR	50/2	200	0.15	1.34	1.71	2.02	0.76	1.20	±0.75
ฟิล์มENR	50/2	250	0.75	1.77	2.37	0.40	1.14	1.29	±0.79
ฟิล์มENR	60/1	50	0.36	0.58	1.59	0.04	1.14	0.74	±0.62

ตาราง ก-6.2 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ยังส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	60/1	100	1.01	1.88	0.17	1.17	0.01	0.85	±0.77
ฟิล์มENR	60/1	150	1.96	0.94	1.48	1.22	0.03	1.13	±0.72
ฟิล์มENR	60/1	200	1.73	1.19	1.98	2.10	0.13	1.43	±0.80
ฟิล์มENR	60/1	250	1.45	1.96	1.21	1.46	1.42	1.50	±0.28
ฟิล์มENR	60/2	50	0.16	0.84	1.51	0.42	0.65	0.72	±0.51
ฟิล์มENR	60/2	100	0.17	0.55	2.70	1.74	-	1.03	±1.15
ฟิล์มENR	60/2	150	1.93	1.45	0.35	1.59	0.63	1.19	±0.67
ฟิล์มENR	60/2	200	1.47	1.09	0.73	1.57	1.48	1.27	±0.35
ฟิล์มENR	60/2	250	0.47	2.25	1.71	1.51	0.76	1.34	±0.72
ฟิล์มENR	70/1	50	1.04	0.26	0.19	0.40	1.79	0.74	±0.68
ฟิล์มENR	70/1	100	1.33	0.69	0.04	0.69	1.61	0.87	±0.61
ฟิล์มENR	70/1	150	0.04	0.56	1.65	1.65	1.46	1.07	±0.73
ฟิล์มENR	70/1	200	1.44	0.87	0.64	1.60	1.10	1.13	±0.40
ฟิล์มENR	70/1	250	1.66	1.65	0.22	2.55	1.95	1.61	±0.86
ฟิล์มENR	70/2	50	0.18	1.2	0.14	0.42	0.58	0.50	±0.43
ฟิล์มENR	70/2	100	0.05	1.37	0.90	0.02	1.72	0.81	±0.77
ฟิล์มENR	70/2	150	1.38	0.13	1.77	1.15	0.24	0.93	±0.72
ฟิล์มENR	70/2	200	1.89	0.14	0.80	1.06	1.90	1.16	±0.75
ฟิล์มENR	70/2	250	2.22	2.09	1.43	1.74	0.68	1.63	±0.62



ตาราง ก-6.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่า เฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	50/1	50	1300	1300	1200	1200	1300	1260	±54.77
ฟิล์มENR	50/1	100	1400	1400	1400	1600	1400	1440	±89.44
ฟิล์มENR	50/1	150	1500	1500	1500	1500	1500	1500	±0.00
ฟิล์มENR	50/1	200	1500	1500	1500	1600	1600	1540	±54.77
ฟิล์มENR	50/1	250	1800	1700	1800	1900	1700	1780	±83.67
ฟิล์มENR	50/2	50	1200	1200	1200	1300	1200	1220	±44.72
ฟิล์มENR	50/2	100	1400	1300	1300	1300	1300	1320	±44.72
ฟิล์มENR	50/2	150	1470	1440	1540	1500	1400	1470	±53.85
ฟิล์มENR	50/2	200	1500	1500	1500	1500	1500	1500	±0.00
ฟิล์มENR	50/2	250	1800	1700	1600	1800	1800	1740	±89.44
ฟิล์มENR	60/1	50	1150	1150	1100	1300	1200	1180	±75.83
ฟิล์มENR	60/1	100	1300	1200	1300	1300	1100	1240	±89.44
ฟิล์มENR	60/1	150	1300	1400	1400	1200	1400	1340	±89.44
ฟิล์มENR	60/1	200	1600	1600	1400	1400	1400	1480	±109.54
ฟิล์มENR	60/1	250	1660	1600	1600	1500	1600	1592	±57.62
ฟิล์มENR	60/2	50	1100	1100	1170	1150	1200	1144	±43.93
ฟิล์มENR	60/2	100	1300	1200	1200	1200	1190	1218	±46.04
ฟิล์มENR	60/2	150	1200	1300	1300	1300	1200	1260	±54.77
ฟิล์มENR	60/2	200	1400	1500	1500	1500	1500	1480	±44.72
ฟิล์มENR	60/2	250	1500	1600	1600	1600	1600	1580	±44.72
ฟิล์มENR	70/1	50	1200	1200	1200	1100	1000	1140	±89.44
ฟิล์มENR	70/1	100	1300	1200	1100	1200	1200	1200	±70.71
ฟิล์มENR	70/1	150	1300	1100	1300	1300	1300	1260	±89.44
ฟิล์มENR	70/1	200	1500	1400	1400	1400	1300	1400	±70.71
ฟิล์มENR	70/1	250	1400	1600	1600	1600	1400	1520	±109.54

ตาราง ก-6.3 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่า เฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มENR	70/2	50	1200	1110	1100	1100	980	1098	±78.23
ฟิล์มENR	70/2	100	1220	1220	1160	1100	1150	1170	±50.99
ฟิล์มENR	70/2	150	1100	1300	1270	1270	1210	1230	±79.69
ฟิล์มENR	70/2	200	1300	1300	1300	1300	1300	1300	±0
ฟิล์มENR	70/2	250	1500	1500	1600	1300	1500	1480	±109.54

ก-7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร คงรูปด้วยรังสี  
ลำอิเล็กตรอน โดยฉายปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอนที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 กิโลเกรย์ อบที่  
อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส 1 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตาราง ก-7.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลาย  
น้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

ชนิด ฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่า เฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/1	-	26.2	24	24.9	25	25.1	25.04	±0.78
ฟิล์มNR	50/1	10	35.90	30.90	35.20	29.60	41.90	34.70	±4.85
ฟิล์มNR	50/1	20	49.30	47.10	42.00	34.40	42.50	43.06	±5.74
ฟิล์มNR	50/1	30	36.20	36.50	32.00	30.90	32.30	33.58	±2.58
ฟิล์มNR	50/1	40	33.33	38.20	33.90	30.40	32.00	33.57	±2.92
ฟิล์มNR	50/1	50	27.80	30.50	28.00	31.00	22.20	27.90	±3.50
ฟิล์มNR	50/2	10	33.4	33.6	32.8	35.50	32.8	33.62	±1.11
ฟิล์มNR	50/2	20	30.30	35.90	30.80	29.90	37.50	32.88	±3.55
ฟิล์มNR	50/2	30	31.10	32.80	31.90	31.50	30.00	31.46	±1.03
ฟิล์มNR	50/2	40	29.5	26.5	33.2	36.20	31.7	31.42	±3.67
ฟิล์มNR	50/2	50	21.9	27.9	29.1	30.30	24.2	26.68	±3.52

ตาราง ก-7.1 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	60/1	10	29.3	30.5	34.7	33.20	24.90	30.52	±3.80
ฟิล์มNR	60/1	20	30.90	32.40	29.90	28.90	38.70	32.16	±3.88
ฟิล์มNR	60/1	30	25.10	41.60	33.90	23.00	25.90	29.90	±7.74
ฟิล์มNR	60/1	40	30.4	28	31.6	30.00	32.70	30.54	±1.77
ฟิล์มNR	60/1	50	25.7	14.8	27	30.70	29.90	25.62	±6.39
ฟิล์มNR	60/2	10	31.80	30.20	26.20	21.70	37.80	29.54	±6.05
ฟิล์มNR	60/2	20	34.40	27.00	35.20	33.40	25.70	31.14	±4.44
ฟิล์มNR	60/2	30	28.70	23.60	31.00	33.20	29.70	29.24	±3.57
ฟิล์มNR	60/2	40	28.10	28.00	33.20	26.50	29.50	29.06	±2.55
ฟิล์มNR	60/2	50	22.70	23.30	23.30	27.00	29.30	25.12	±2.89
ฟิล์มNR	70/1	10	31.40	34.50	26.00	25.90	22.40	28.04	±4.84
ฟิล์มNR	70/1	20	29.80	31.50	24.60	32.70	22.30	28.18	±4.51
ฟิล์มNR	70/1	30	28.70	30.40	25.90	28.80	30.90	28.94	±1.96
ฟิล์มNR	70/1	40	25.70	24.10	26.70	27.40	29.80	26.74	±2.11
ฟิล์มNR	70/1	50	25.50	19.20	25.70	30.60	24.30	25.06	±4.07
ฟิล์มNR	70/2	10	30.30	30.90	25.10	24.60	25.30	27.24	±3.09
ฟิล์มNR	70/2	20	30.40	30.20	30.50	25.40	24.00	28.10	±3.14
ฟิล์มNR	70/2	30	37.90	31.00	24.20	24.20	15.10	27.02	±8.43
ฟิล์มNR	70/2	40	22.60	6.70	32.70	25.90	30.80	23.74	±10.33
ฟิล์มNR	70/2	50	23.50	24.60	20.30	28.20	26.10	24.54	±2.95

ตาราง ก-7.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) ของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/1	-	0.89	0.12	0.82	0.25	0.11	0.081	±0.62
ฟิล์มNR	50/1	10	-0.47	1.14	3.52	1.23	1.54	1.39	±1.42
ฟิล์มNR	50/1	20	0.44	2.10	3.14	0.92	-0.10	1.30	±1.31
ฟิล์มNR	50/1	30	0.60	0.64	2.60	3.85	2.01	1.94	±1.38
ฟิล์มNR	50/1	40	-1.15	-1.50	-0.19	1.45	-1.21	-0.52	±1.21
ฟิล์มNR	50/1	50	0.09	1.10	0.13	0.22	0.35	0.38	±0.42
ฟิล์มNR	50/2	10	3.9	0.06	0.72	1.86	-2.02	0.90	±2.19
ฟิล์มNR	50/2	20	-1.01	0.08	1.10	-0.90	-0.60	-0.27	±0.87
ฟิล์มNR	50/2	30	0.76	-0.47	1.97	2.84	2.42	1.50	±1.35
ฟิล์มNR	50/2	40	-1.02	0.67	0.75	0.71	1.00	0.42	±0.82
ฟิล์มNR	50/2	50	0.62	2.34	2.13	0.95	0.26	1.26	±0.93
ฟิล์มNR	60/1	10	0.54	1.79	3.91	2.65	1.51	2.08	±1.27
ฟิล์มNR	60/1	20	1.80	0.97	0.83	1.14	1.92	1.33	±0.50
ฟิล์มNR	60/1	30	3.14	1.55	2.49	2.84	-1.91	1.62	±2.06
ฟิล์มNR	60/1	40	1.65	1.44	2.38	1.6	1.38	1.69	±0.40
ฟิล์มNR	60/1	50	2.63	0.28	0.10	2.56	0.91	1.30	±1.22
ฟิล์มNR	60/2	10	0.06	0.55	0.78	0.14	0.28	0.36	±0.30
ฟิล์มNR	60/2	20	0.11	-1.47	2.56	0.71	-0.08	0.37	±1.46
ฟิล์มNR	60/2	30	2.00	0.04	1.29	3.16	0.56	1.41	±1.23
ฟิล์มNR	60/2	40	-0.02	2.79	2.11	0.50	0.56	1.19	±1.20
ฟิล์มNR	60/2	50	0.24	0.16	0.09	0.07	0.07	0.13	±0.07
ฟิล์มNR	70/1	10	2.33	0.28	0.06	0.28	0.38	0.67	±0.94
ฟิล์มNR	70/1	20	0.84	0.76	-0.57	0.21	0.00	0.25	±0.58
ฟิล์มNR	70/1	30	0.06	-0.72	1.02	-0.29	0.69	0.15	±0.71
ฟิล์มNR	70/1	40	1.49	-0.15	1.58	0.27	0.08	0.65	±0.82

ตาราง ก-7.2 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ยังสัมดูลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	70/1	50	-1.44	1.38	-0.25	1.29	1.15	0.43	±1.24
ฟิล์มNR	70/2	10	0.88	4.49	0.82	2.07	1.52	1.96	±1.51
ฟิล์มNR	70/2	20	1.58	0.94	1.67	1.11	2.61	1.58	±0.65
ฟิล์มNR	70/2	30	2.83	2.10	0.05	0.39	1.68	1.41	±1.17
ฟิล์มNR	70/2	40	-	0.42	2.75	0.46	2.62	2.17	±1.30
ฟิล์มNR	70/2	50	-0.32	-0.06	0.71	1.28	1.65	0.65	±0.84

ตาราง ก-7.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของฟิล์มยางธรรมชาติ ที่เตรียมจากสารละลายน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	50/1	-	1900	1800	1900	1800	1800	1840.0	±54.77
ฟิล์มNR	50/1	10	2100	2100	2000	2000	2100	2060.0	±54.77
ฟิล์มNR	50/1	20	2100	2100	2100	2000	2100	2080.0	±44.72
ฟิล์มNR	50/1	30	2100	2100	2000	2000	2100	2060.0	±54.77
ฟิล์มNR	50/1	40	1800	1900	1900	1800	1900	1860.0	±54.77
ฟิล์มNR	50/1	50	2100	2100	2100	2200	2100	2120.0	±44.72
ฟิล์มNR	50/2	10	2100	2100	2200	2100	2100	2120.0	±44.72
ฟิล์มNR	50/2	20	2000	2100	2000	2000	2100	2040.0	±54.77
ฟิล์มNR	50/2	30	2000	1900	2000	2000	2000	1980.0	±44.72
ฟิล์มNR	50/2	40	2000	1900	1900	2000	2000	1960.0	±54.77
ฟิล์มNR	50/2	50	1800	1900	1800	1900	1900	1860.0	±54.77
ฟิล์มNR	60/1	10	2100	2100	2100	2000	2000	2060.0	±54.77
ฟิล์มNR	60/1	20	1900	1900	1900	1900	1900	1900.0	±0.00

ตาราง ก-7.3 (ต่อ)

ชนิดฟิล์ม	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณรังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
			1	2	3	4	5		
ฟิล์มNR	60/1	30	1800	1900	1900	1800	1700	1820.0	±83.67
ฟิล์มNR	60/1	40	1800	1800	1800	1800	1800	1800.0	±0.00
ฟิล์มNR	60/1	50	1900	1600	1900	1900	1900	1840.0	±134.16
ฟิล์มNR	60/2	10	2200	2000	2100	2100	2100	2100.0	±70.71
ฟิล์มNR	60/2	20	2000	1800	2100	2000	1900	1960.0	±114.02
ฟิล์มNR	60/2	30	2000	1900	2000	2000	2000	1980.0	±44.72
ฟิล์มNR	60/2	40	1800	1900	1900	1900	2000	1900.0	±70.71
ฟิล์มNR	60/2	50	1800	1900	1800	1900	1900	1860.0	±54.77
ฟิล์มNR	70/1	10	1900	2000	1900	1800	1800	1880.0	±83.67
ฟิล์มNR	70/1	20	2000	2000	1900	2000	1900	1960.0	±54.77
ฟิล์มNR	70/1	30	2000	2000	2000	1900	2100	2000.0	±70.71
ฟิล์มNR	70/1	40	1900	1900	1800	1900	1900	1880.0	±44.72
ฟิล์มNR	70/1	50	1900	1800	1900	1900	1900	1880.0	±44.72
ฟิล์มNR	70/2	10	1800	1800	1800	1800	1900	1820.0	±44.72
ฟิล์มNR	70/2	20	2000	2000	2000	2000	1900	1980.0	±44.72
ฟิล์มNR	70/2	30	2000	1900	1900	1900	1800	1900.0	±70.71
ฟิล์มNR	70/2	40	1900	1400	1900	1900	1900	1800.0	±223.61
ฟิล์มNR	70/2	50	1900	1900	1900	2000	2000	1940.0	±54.77

ก-8 สมบัติเชิงกลของฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ สารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน โดยฉายปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอน อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงตามลำดับ

ตาราง ก-8.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) ฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณรังสี (kGy)	ความทนแรงดึง (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	17.85	16.98	16.36	16.96	15.68	16.77	±0.81
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	17.42	17.63	17.88	17.32	15.27	16.90	±0.95
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	17.89	17.87	18.84	19.39	18.41	18.48	±0.65
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	17.86	18.58	18.89	19.58	17.24	18.43	±0.91
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	20	34.20	44.60	39.40	46.70	35.50	40.08	±5.48

ตาราง ก-8.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) พิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณรังสี (kGy)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	0.83	1.35	1.29	1.53	1.57	1.31	±0.30
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	0.50	0.28	0.87	0.24	1.57	0.69	±0.55
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	1.73	0.98	0.24	0.06	1.72	0.94	±0.79
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	0.09	0.82	0.64	1.55	0.31	0.68	±0.56
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	20	1.28	2.07	3.01	3.64	2.56	2.51	±0.90



ตาราง ก-8.3 ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ฟิล์มบาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณรังสี (kGy)	ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	1700	1700	1600	1700	1500	1640	±89.44
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	1700	1700	1650	1700	1400	1630	±130.38
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	1650	1600	1650	1600	1600	1620	±27.39
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	1620	1650	1620	1700	1650	1648	±32.71
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	20	2100	2000	2100	2100	2200	2100.0	±70.71

**ภาคผนวก ข**  
**สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลาย**

ข-1 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายในระยะเวลา 7 วันของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติและสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ คงรูปด้วยกำมะถัน

ตาราง ข-1.1 การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD 2, 3, 4 และ 5 phr คงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ปริมาณ TBzTD (phr)	ร้อยละการบวมตัว				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	2	1013.11	988.28	1070.16	1023.85	±41.98
ฟิล์มNR	3	924.34	988.28	1070.16	994.26	±73.10
ฟิล์มNR	4	661.20	674.36	696.34	677.30	±17.75
ฟิล์มNR	5	966.78	959.01	978.98	968.25	±10.07
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	4	712.45	746.67	715.19	724.77	±19.01

ตาราง ข-1.2 การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ฟิล์มNR	90	1	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	2	-	-	-	-	-
ฟิล์มNR	90	3	1675.88	1724.64	1655.90	1685.47	±35.36
ฟิล์มNR	90	4	1149.01	1156.24	1137.64	1147.63	±9.38
ฟิล์มNR	90	5	1255.44	1226.26	1246.44	1242.71	±14.94
ฟิล์มNR	100	1	1277.00	1266.71	1278.42	1274.04	±6.39
ฟิล์มNR	100	2	1205.54	1208.15	1214.50	1209.40	±4.61
ฟิล์มNR	100	3	661.20	674.36	696.34	677.30	±17.75
ฟิล์มNR	100	4	872.00	843.11	876.62	863.91	±18.16
ฟิล์มNR	100	5	886.69	961.24	891.31	913.08	±41.77
ฟิล์มNR	110	1	797.50	799.48	799.21	798.73	±1.08
ฟิล์มNR	110	2	773.70	773.04	775.98	774.24	±1.54
ฟิล์มNR	110	3	725.89	701.75	719.30	715.65	±12.48
ฟิล์มNR	110	4	878.74	838.18	871.53	862.82	±21.64
ฟิล์มNR	110	5	961.95	979.40	921.57	954.31	±29.66
ฟิล์มNR	120	1	761.08	741.46	735.01	745.85	±13.58
ฟิล์มNR	120	2	707.85	725.16	712.73	715.25	±8.92
ฟิล์มNR	120	3	708.81	705.64	710.01	708.15	±2.26
ฟิล์มNR	120	4	695.62	712.96	702.08	703.55	±8.76

ตาราง ข-1.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	120	5	705.62	711.44	759.11	725.39	±29.35

ตาราง ข-1.3 การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์และฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยเปรียบเทียบปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา TBzTD คงรูปที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ปริมาณ TBzTD (phr)	ร้อยละการบวมตัว				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มENR	2	245.74	236.93	286.40	256.36	±26.39
ฟิล์มENR	3	443.49	449.92	440.86	444.76	±4.66
ฟิล์มENR	4	390.91	356.59	377.06	374.85	±17.27
ฟิล์มENR	5	439.61	397.26	408.60	415.16	±21.92
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	2	376.56	397.91	395.99	390.15	±11.81

**ตาราง ข-1.4** การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มENR	90	1	948.13	899.77	922.43	923.44	±24.20
ฟิล์มENR	90	2	856.61	849.59	891.40	865.87	±22.38
ฟิล์มENR	90	3	811.84	767.57	779.40	786.27	±22.92
ฟิล์มENR	90	4	754.24	755.66	799.52	769.81	±25.74
ฟิล์มENR	90	5	628.75	638.17	637.60	634.84	±5.29
ฟิล์มENR	100	1	338.57	336.59	389.04	354.74	±29.73
ฟิล์มENR	100	2	324.50	359.11	362.76	348.79	±21.11
ฟิล์มENR	100	3	245.74	236.93	286.40	256.36	±26.39
ฟิล์มENR	100	4	227.06	253.31	274.43	251.60	±23.73
ฟิล์มENR	100	5	290.75	281.42	265.44	279.20	±12.80
ฟิล์มENR	110	1	363.51	354.32	337.58	351.80	±13.15
ฟิล์มENR	110	2	290.78	299.87	319.81	303.48	±14.85
ฟิล์มENR	110	3	320.84	304.27	280.79	301.97	±20.12
ฟิล์มENR	110	4	299.06	306.63	234.90	280.20	±39.41
ฟิล์มENR	110	5	313.37	326.15	343.12	327.55	±14.93
ฟิล์มENR	120	1	431.74	437.54	483.15	450.81	±28.16
ฟิล์มENR	120	2	279.79	270.40	279.33	276.51	±5.29
ฟิล์มENR	120	3	288.59	233.10	265.42	262.37	±27.87

ตาราง ข-1.4 (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มENR	120	4	270.76	280.56	267.19	272.84	±6.92
ฟิล์มENR	120	5	248.85	271.78	265.94	262.19	±11.92

ข-2 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายในระยะเวลา 7 วันของฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอลสิต ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติสารละลายยางธรรมชาติอีพอกไซด์ และน้ำยางธรรมชาติผสมสูตรคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน

ตาราง ข-2.1 การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติคงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน โดยฉายปริมาณรังสีลำไอเล็กตรอนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส 1 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	50/1	50	1557.88	1559.79	1555.56	1557.74	±2.12
ฟิล์มNR	50/1	100	869.02	835.56	839.94	848.17	±18.18
ฟิล์มNR	50/1	150	735.24	726.76	725.71	729.24	±5.23
ฟิล์มNR	50/1	200	560.41	556.34	553.14	556.63	±3.64
ฟิล์มNR	50/1	250	495.89	500.00	493.97	496.62	±3.08
ฟิล์มNR	50/2	50	1587.58	1536.73	1554.32	1559.54	±25.82
ฟิล์มNR	50/2	100	866.50	898.28	908.87	891.22	±22.05
ฟิล์มNR	50/2	150	759.64	716.84	756.31	744.26	±23.81

ตาราง ข-2.1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	50/2	200	552.40	561.60	557.28	557.09	±4.60
ฟิล์มNR	50/2	250	504.49	502.18	499.44	502.04	±2.53
ฟิล์มNR	60/1	50	1564.21	1562.72	1594.53	1573.82	±17.95
ฟิล์มNR	60/1	100	903.76	897.80	909.17	903.58	±5.69
ฟิล์มNR	60/1	150	774.95	783.05	762.55	773.52	±10.33
ฟิล์มNR	60/1	200	585.49	557.42	564.09	569.00	±14.67
ฟิล์มNR	60/1	250	517.68	512.41	519.17	516.42	±3.55
ฟิล์มNR	60/2	50	1592.04	1569.37	1589.76	1583.73	±12.48
ฟิล์มNR	60/2	100	932.25	884.71	896.63	904.53	±24.73
ฟิล์มNR	60/2	150	835.78	860.14	856.54	850.82	±13.15
ฟิล์มNR	60/2	200	578.05	580.86	561.75	573.55	±10.32
ฟิล์มNR	60/2	250	591.95	555.13	566.46	571.18	±18.86
ฟิล์มNR	70/1	50	1598.92	1611.29	1605.03	1605.08	±6.19
ฟิล์มNR	70/1	100	928.01	963.35	967.17	952.84	±21.59
ฟิล์มNR	70/1	150	841.16	859.14	860.11	853.47	±10.68
ฟิล์มNR	70/1	200	575.11	610.94	610.28	598.78	±20.50
ฟิล์มNR	70/1	250	586.79	563.36	563.40	571.18	±13.51
ฟิล์มNR	70/2	50	1634.85	1627.77	1652.69	1638.44	±12.84
ฟิล์มNR	70/2	100	938.13	981.40	970.51	963.34	±22.51
ฟิล์มNR	70/2	150	889.59	878.24	876.57	881.46	±7.08

ตาราง ข-2.1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	70/2	200	631.71	625.66	643.65	633.67	±9.15
ฟิล์มNR	70/2	250	747.14	761.36	747.46	751.99	±8.12

ตาราง ข-2.2 การบวมตัวในตัวทำลายของฟิล์มยางธรรมชาติอพอกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายยางธรรมชาติอพอกไซด์ คงรูปด้วยรังสีลำไอเล็กตรอน โดยฉายปริมาณรังสีลำไอเล็กตรอนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส 1 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มENR	50/1	50	1166.47	1162.14	1150.48	1159.70	±8.27
ฟิล์มENR	50/1	100	787.87	760.91	752.24	767.01	±18.58
ฟิล์มENR	50/1	150	501.59	523.28	515.96	513.61	±11.03
ฟิล์มENR	50/1	200	522.70	509.67	485.74	506.03	±18.75
ฟิล์มENR	50/1	250	412.24	415.68	415.43	414.45	±1.92
ฟิล์มENR	50/2	50	1174.33	1140.81	1158.07	1157.74	±16.76
ฟิล์มENR	50/2	100	829.71	826.66	783.40	813.25	±25.90
ฟิล์มENR	50/2	150	504.33	508.96	503.83	505.71	±2.83
ฟิล์มENR	50/2	200	554.70	551.02	559.29	555.00	±4.14
ฟิล์มENR	50/2	250	428.75	457.55	462.40	449.57	±18.19



ตาราง ข-2.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มENR	60/1	50	1177.54	1164.05	1157.82	1166.47	±10.08
ฟิล์มENR	60/1	100	850.58	876.41	836.06	854.35	±20.44
ฟิล์มENR	60/1	150	551.07	556.94	558.58	555.53	±3.95
ฟิล์มENR	60/1	200	557.04	542.34	551.39	550.25	±7.42
ฟิล์มENR	60/1	250	436.41	432.15	408.82	425.79	±14.85
ฟิล์มENR	60/2	50	1265.05	1257.48	1241.86	1254.80	±11.83
ฟิล์มENR	60/2	100	904.36	867.97	865.20	879.18	±21.85
ฟิล์มENR	60/2	150	558.78	557.64	561.51	559.31	±1.99
ฟิล์มENR	60/2	200	555.21	563.00	552.28	556.83	±5.54
ฟิล์มENR	60/2	250	463.79	458.29	451.85	457.98	±5.98
ฟิล์มENR	70/1	50	1212.63	1238.53	1209.36	1220.17	±15.98
ฟิล์มENR	70/1	100	956.09	981.99	981.97	973.35	±14.95
ฟิล์มENR	70/1	150	568.41	576.91	586.88	577.40	±9.24
ฟิล์มENR	70/1	200	576.72	583.77	571.99	577.50	±5.93
ฟิล์มENR	70/1	250	479.08	463.06	439.50	460.54	±19.91
ฟิล์มENR	70/2	50	1221.19	1237.82	1215.36	1224.79	±11.65
ฟิล์มENR	70/2	100	963.21	996.16	965.34	974.90	±18.44
ฟิล์มENR	70/2	150	633.53	631.61	632.11	632.42	±1.00
ฟิล์มENR	70/2	200	595.38	602.20	581.82	593.13	±10.37
ฟิล์มENR	70/2	250	494.37	505.08	485.12	494.86	±9.99

**ตาราง ข-2.3** การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมสูตร  
คงรูปด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน โดยฉายปริมาณรังสีลำอิเล็กตรอนที่ 10, 20, 30, 40 และ 50  
กิโลเกรย์ อบที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส 1 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	50/1	-	501.91	506.18	519.47	509.19	±9.16
ฟิล์มNR	50/1	10	434.65	424.50	421.15	426.77	±7.03
ฟิล์มNR	50/1	20	430.49	428.89	434.29	431.23	±2.77
ฟิล์มNR	50/1	30	421.21	432.21	432.23	428.55	±6.36
ฟิล์มNR	50/1	40	389.59	391.97	395.83	392.46	±3.15
ฟิล์มNR	50/1	50	432.30	398.26	426.46	419.01	±18.20
ฟิล์มNR	50/2	10	442.57	441.85	441.61	442.01	±0.50
ฟิล์มNR	50/2	20	450.40	453.09	449.45	450.98	±1.89
ฟิล์มNR	50/2	30	435.47	440.91	442.19	439.52	±3.57
ฟิล์มNR	50/2	40	423.37	410.57	413.48	415.81	±6.71
ฟิล์มNR	50/2	50	415.93	420.56	422.30	419.60	±3.30
ฟิล์มNR	60/1	10	439.71	454.63	460.44	451.59	±10.69
ฟิล์มNR	60/1	20	442.07	455.64	459.61	452.44	±9.20
ฟิล์มNR	60/1	30	442.69	441.77	436.55	440.33	±3.31
ฟิล์มNR	60/1	40	428.27	429.89	424.64	427.60	±2.69
ฟิล์มNR	60/1	50	419.01	419.77	434.64	424.47	±8.81
ฟิล์มNR	60/2	10	458.50	450.38	461.14	456.67	±5.61
ฟิล์มNR	60/2	20	453.79	453.66	458.60	455.35	±2.82
ฟิล์มNR	60/2	30	445.50	449.65	438.20	444.45	±5.79

ตาราง ข-2.3 (ต่อ)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)/ เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ รังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ฟิล์มNR	60/1	40	428.27	429.89	424.64	427.60	±2.69
ฟิล์มNR	60/1	50	419.01	419.77	434.64	424.47	±8.81
ฟิล์มNR	60/2	10	458.50	450.38	461.14	456.67	±5.61
ฟิล์มNR	60/2	20	453.79	453.66	458.60	455.35	±2.82
ฟิล์มNR	60/2	30	445.50	449.65	438.20	444.45	±5.79
ฟิล์มNR	60/2	40	428.77	426.68	432.21	429.22	±2.79
ฟิล์มNR	60/2	50	429.07	427.13	426.65	427.62	±1.28
ฟิล์มNR	70/1	10	450.87	464.09	459.36	458.10	±6.70
ฟิล์มNR	70/1	20	460.27	462.04	452.28	458.20	±5.20
ฟิล์มNR	70/1	30	452.38	449.05	453.82	451.75	±2.45
ฟิล์มNR	70/1	40	432.53	433.83	432.95	433.10	±0.66
ฟิล์มNR	70/1	50	436.27	423.54	427.50	429.10	±6.52
ฟิล์มNR	70/2	10	461.22	471.03	471.37	467.87	±5.76
ฟิล์มNR	70/2	20	457.23	470.38	465.22	464.28	±6.63
ฟิล์มNR	70/2	30	443.75	475.00	443.78	454.18	±18.03
ฟิล์มNR	70/2	40	458.39	461.10	461.89	460.46	±1.84
ฟิล์มNR	70/2	50	464.11	462.08	458.78	461.66	±2.69

ตาราง ข-2.4 การบวมตัวในตัวทำละลายของฟิล์มยาง poly(PCDA)/ZnO นาโนคอมพอสิต คงรูป ด้วยรังสีลำอิเล็กตรอน ออปติอุณหภูมิตั้งที่ 50 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	ปริมาณรังสี (kGy)	ร้อยละการบวมตัว				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	513.66	543.30	517.65	524.87	±16.08
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	523.37	523.68	515.63	520.89	±4.56
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:1)	250	451.67	445.93	439.08	445.56	±6.30
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/ENR นาโนคอมพอสิต (1:0.5)	250	452.76	463.90	463.77	460.14	±6.39
ฟิล์ม poly(PCDA)/ZnO/NR นาโนคอมพอสิต (1:1)	20	458.93	454.37	467.36	460.22	±6.59

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอันภิษา พวงสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	30 มิถุนายน 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาในปี 2561
ผลงานตีพิมพ์	Aunphicha Phuangsuwan, Kanoktip Boonkerd, Nisanart Traiphol. Radiation Vulcanization of Polydiacetylene/Zinc Oxide/Natural Rubber Nanocomposite Films as Temperature sensor. The 24th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 9th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology Tuesday June 5, 2018, Mandarin Hotel Managed by Centre Point, Bangkok, Thailand