



การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพนมอย่างผสมระหว่าง양ธรรมเนียมชาติกับ양คอลลอโรพรีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพนยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพ  
รีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

THE PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF NR/CR BLEND FOAM



By

MR. Lueruang ANGSUPANICH

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University



620920013 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ยางผสม NR/CR, โฟมยางผสม, การต้านทานการติดไฟ, สารฟู, สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

นาย ลือเรือง อังสุพานิช: การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์ฉาย ทองปิ่น

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางคลอโรพรีน (CR) และศึกษาการเตรียมโฟมยางผสมระหว่าง NR กับ CR เนื่องจากต้องการที่จะปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น ความทนทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว สมบัติทางความร้อน และสมบัติการต้านทานการติดไฟ เป็นต้น โดยโฟมยางเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย การทดลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 ตอน โดยตอนแรกเป็นการศึกษาระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมสำหรับยางผสม NR/CR ที่อัตราส่วนผสม 100/0, 50/50 และ 0/100 ตอนที่ 2 ศึกษาของผสม NR/CR ที่ปริมาณ CR ตั้งแต่ 0-100% โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์ที่ได้จากตอนแรก ตอนที่ 3 ปรับปรุงลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางผสม โดยใช้ nano silica และ IR-g-MA ร่วมกัน ปริมาณ 10 phr และ 5 % โดยน้ำหนักของยาง NR ตามลำดับ และตอนสุดท้ายเป็นการศึกษาการเตรียมโฟมยางผสม NR/CR โดยใช้ สารฟู 2 ชนิด ได้แก่ 4,4'-Oxybis(benzenesulfonyl hydrazide), OBSH และ Azodicarbonamide, ADC เพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งในการผสมยาง NR กับ CR โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งและผสมสารเคมีจนเป็นเนื้อเดียวกันได้ออกมาเป็นยางคอมปาวด์ NR/CR จากผลการทดลองในตอนแรกพบว่าระบบวัลคาไนซ์ที่ประกอบด้วย ZnO/MgO/Stearic acid/CBS/TMTD/ ETU/sulphur : 5/2/2/1/0.5/0.5/2.2 phr ให้สมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลที่ดี ตอนที่ 2 แสดงสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/CR ที่ปริมาณ CR 0-100% พบว่ายางทั้งสองเกิดการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน ในตอนที่ 3 จึงเป็นการปรับปรุงลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางผสม NR/CR โดยใช้ nano silica และ IR-g-MA เป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ จะทำหน้าที่เป็น Physical และ Chemical compatibilizer ตามลำดับ ทำให้วัฏภาคของยางที่เป็นวัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลง ซึ่งลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัฏภาค CR มีผลต่อพฤติกรรมการคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดยเฉพาะสมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ตอนสุดท้ายในงานวิจัยพบว่าโครงสร้างของเซลล์โฟม ขนาดเซลล์ และความหนาแน่นของเซลล์ ขึ้นอยู่กับสารฟูและอัตราส่วนของยางผสม สมบัติการทนทานต่อแรงดึง ความแข็ง และการยุบตัวเนื่องแรงกดอัด ก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางผสมเช่นกัน จากผลการทดสอบ LOI และ UL94 การติดไฟและลามไฟขึ้นอยู่กับปริมาณของยาง CR และที่อัตราส่วน CR 80-100% จะมีค่า LOI สูงกว่า 21% และ UL94 อยู่ในระดับ V1-V0

620920013 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : NR/CR blend, Sponge rubber blend, Flame resistance, Blowing agent, Compatibilizer

MR. LUERUANG ANGSUPANICH : THE PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF NR/CR BLEND FOAM THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHANCHAI THONGPIN, Ph.D.

This research was aimed to study the rubber blends between natural rubber (NR) and chloroprene rubber (CR). The formulation of NR/CR blends and preparation of rubber foam or rubber sponge were carried out. The objectives of this type of foam were to improve some properties such as resistance to non-polar solvents, thermal properties and flame resistance properties. Due to their lightweight and low density material the foam should be able used in various applications. This research was divided into 4 parts, firstly to study appropriate curing systems for NR/CR blends systems by focusing on NR/CR ratios at 100/0, 50/50 and 0/100. Secondly, after finding the appropriated curing system, the variation of CR contents; from 0 to 100% CR contents were revealed. The third part of the research was to improve rubber blend morphology by the incorporation of nano silica and IR-g-MA with 10 phr. and 5 % with respect to rubber, respectively. The final part of the work was focused on the preparation of NR/CR obtained from 4th part to prepared rubber foam using 2 types of blowing agents which are 4,4'-Oxybis(benzenesulfonyl hydrazide), OBSH and Azodicarbonamide, ADC for comparison. In the first part NR and CR was blended on a two roll mills and curing additives were added during mixing obtaining NR/CR compounds. It was found that curing system which consists of ZnO/MgO/Stearic acid/CBS/TMTD/ETU/sulfur with the contents of 5/2/2/1/0.5/0.5/2.2 phr., was found to give good curing properties including times and mechanical properties. The second part of the work revealed cure characteristic, mechanical properties of NR/CR blends with various CR contents. With the incorporation of nano silica and IR-g-MA, blends morphology was found to be improved elucidated by SEM micrographs. Both nano silica and IR-g-MA facilitated distribution phase to be smaller. Phase morphology of CR was found to influence cure characteristic behavior, mechanical and thermal properties especially thermal ageing. Function of nano silica and IR-g-MA were as physical and chemical compatibilizer respectively. The final part of the research indicated that cell structure of the foam including cell size, cell density and density of the foam are dependent upon both types of blowing agent and blend compositions. Tensile properties, tear strength hardness and compression set confirmed the dependence between those properties and blend compositions. In term of LOI and UL94 the rating of flaming and fire spreading were depending on CR contents. However, blend with CR contents, especially 80-100 % showed LOI higher than 21 as well as UL94 rating were at V1-V0.



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ และความอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ฝ่าย ที่มีส่วนสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ซึ่งต้องขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์ฉาย ทองปิ่น อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตลอดจนการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้มีความถูกต้องอย่างละเอียด จนสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ตลอดจนอบรมสั่งสอน ให้แง่คิดที่ดี อดทนและดูแล ผู้วิจัยด้วยความปรารถนาดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตาเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุตศิริ เหมศรี, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เหมชะปะบุตร และรองศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์ ที่สละเวลาในการตรวจสอบและแนะนำแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์ เพื่อนำมาปรับปรุงงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนให้ความรู้ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียรระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ผู้ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือ การเบิก และการสั่งซื้อสารเคมี และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ผู้ที่คอยให้ความช่วยเหลือซ่อมแซมบำรุงเครื่องมือ คุณลูกกวาง อุณศิริ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร อีกทั้งบริษัทอินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางคลอโรพรีน ซิลิกาและสารฟูล และบริษัทเอเอฟซูเปอร์เซลส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารฟูล

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อน พี่และน้องนักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นาย ลือเรือง อังสุพานิช



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ท
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction) .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems) .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research).....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ความรู้เกี่ยวกับยางธรรมชาติ (Natural rubber).....	4
2.2 การวัลคาไนเซชัน (Vulcanization).....	9
2.2.1 ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur system).....	10
2.2.2 ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide system) .....	11
2.2.3 ระบบที่ใช้สารเคมีอื่น ๆ .....	12
2.3 ความรู้เกี่ยวกับยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber) .....	13
2.3.1 การผลิตคลอโรพรีนมอนอเมอร์ .....	13
2.3.2 การสังเคราะห์น้ำยางคลอโรพรีน .....	14

2.3.3 การจัดแบ่งเกรดยางคลอโรพรีน.....	17
2.3.4 สมบัติของยางคลอโรพรีนและการนำไปใช้งาน.....	20
2.3.5 การผสมสารเคมียางในยางคลอโรพรีน.....	20
2.4 ความรู้เกี่ยวกับโฟม .....	23
2.4.1 การจำแนกประเภทของโฟม (Foam Classification).....	23
2.4.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam Formation).....	25
2.4.3 ประโยชน์และการใช้งานของโฟม.....	28
2.5 ความรู้เกี่ยวกับสารฟู่ (Blowing agent).....	29
2.5.1 Physical blowing agent (PBAs).....	29
2.5.2 Chemical blowing agents (CBAs).....	30
2.6 ยางผสม (Rubber blend) .....	32
2.7 นาโนซิลิกา (Nanosilica).....	34
2.7.1 รูปแบบซิลิกา.....	36
2.7.2 ประโยชน์ซิลิกา.....	38
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	64
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	64
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	65
3.3 วิธีการทดลอง.....	67
3.4 การทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์.....	71
3.4.1 การทดสอบความหนืดของยาง (Mooney viscosity).....	71
3.4.2 การศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง (Cure characteristics) .....	71
3.4.3 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงยืด (Tensile properties).....	72
3.4.4 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear properties) .....	73

3.4.5 การทดสอบการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัด (Compression set).....	73
3.4.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness).....	74
3.4.7 การทดสอบความหนาแน่น (Density).....	74
3.4.8 การทดสอบความทนทานต่อการบวมตัว (Swelling ratio).....	74
3.4.9 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology).....	75
3.4.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties).....	75
3.4.11 การทดสอบความสามารถในการติดไฟ (Flammability properties) .....	76
3.4.11.1 Limiting oxygen index (LOI).....	76
3.4.11.2 Underwriters Laboratories 94V (UL-94).....	76
3.4.12 การทดสอบการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Thermal aging).....	78
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	79
4.1 ตอนที่ 1 การศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสม .....	79
4.1.1 การทดสอบหาความหนืดของยาง .....	79
4.1.2 ผลการทดสอบ Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบ การคงรูปทั้ง 2 ระบบ .....	81
4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate .....	88
4.1.4 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate.....	91
4.1.5 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate.....	95
4.1.6 สมบัติความแข็งของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate.....	96
4.1.7 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate .....	96
4.1.8 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate	98
4.1.9 สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate .....	99
4.2 ตอนที่ 2 การศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend .....	104

4.2.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่ปริมาณ CR ต่าง ๆ.....	104
4.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR/CR vulcanizate.....	109
4.2.3 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR/CR Vulcanizate.....	112
4.2.4 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง NR/CR vulcanizate.....	114
4.2.5 สมบัติความแข็งของยาง NR/CR vulcanizate.....	116
4.2.6 สมบัติการสลายตัวด้วยความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate ด้วยเทคนิค TGA..	116
4.2.7 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอินของยาง NR/CR vulcanizate.....	119
4.3 ตอนที่ 3 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR.....	121
4.3.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	121
4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	126
4.3.3 ความหนาแน่นโดยรวมของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	130
4.3.4 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	131
4.3.5 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	133
4.3.6 สมบัติความแข็งของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	135
4.3.7 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	136
4.3.8 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอินของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	139
4.3.9 สมบัติการติดไฟของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA โดยเทคนิค LOI และ UL-94 test.....	141

4.3.10 สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Thermal aging) ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	144
4.4 ตอนที่ 4 การศึกษาผลของชนิดของ Blowing agent ต่อโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน .....	150
4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent .....	150
4.4.2 ความหนาแน่นของเซลล์ (cell density) และความหนาแน่นของโฟม (density of the foam) ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent .....	159
4.4.3 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent .....	160
4.4.4 ความทนทานต่อการฉีกขาดของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent .....	164
4.4.5 สมบัติความแข็งของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent .....	166
4.4.6 สมบัติการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัด (compression set) ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent.....	168
4.4.7 สมบัติการติดไฟของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent โดยเทคนิค LOI และ UL-94 test .....	170
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	173
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	173
5.1.1 ตอนที่ 1 การศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสม.....	173
5.1.2 ตอนที่ 2 การศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend.....	173
5.1.3 ตอนที่ 3 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR .....	174
5.1.4 ตอนที่ 4 การศึกษาผลของชนิดของ Blowing agent ต่อโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน .....	175

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	176
ภาคผนวก.....	177
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการวิเคราะห์การทดสอบต่าง ๆ.....	178
ภาคผนวก ข แสดงตัวอย่างการคำนวณ.....	205
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ.....	209
รายการอ้างอิง.....	219
ประวัติผู้เขียน.....	227



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานยางแท่งชั้นต่าง ๆ [8].....	7
ตารางที่ 2.2 การผลิตยางคลอโรพรีนกลุ่มที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบโดยการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันที่อุณหภูมิ 40 °C [16].....	15
ตารางที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิการพอลิเมอไรเซชันต่อสัดส่วนโครงสร้างไอโซเมอร์ริกของยางคลอโรพรีน [16].....	16
ตารางที่ 2.4 สมบัติในการคอมพาวด์ของยางคลอโรพรีนเกรดต่าง ๆ [1] .....	18
ตารางที่ 2.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคลอโรพรีนเกรดต่าง ๆ [1].....	18
ตารางที่ 2.6 เกรดยางคลอโรพรีนของบริษัทต่าง ๆ [1].....	19
ตารางที่ 2.7 สมบัติของ PBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [24] .....	30
ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติของ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [24] .....	32
ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดและระบบผลึกของซิลิกา [27, 28].....	37
ตารางที่ 2.10 สูตรการผสมของ NR/DCSBR และ NR/CR.....	40
ตารางที่ 2.11 สูตรการผสมของ NR/vCR และ NR/rCR.....	43
ตารางที่ 2.12 สูตรการผสมของ CR/NR.....	47
ตารางที่ 2.13 แสดงสมบัติเชิงกลของ CR/NR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ .....	49
ตารางที่ 2.14 Cure characteristic ของยางคอมพาวด์ BR NR NBR และคอมพาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder.....	50
ตารางที่ 2.15 แสดงขนาดเซลล์โฟม (Cell size) และขนาดผนังเซลล์โฟม (Cell wall) ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR.....	51
ตารางที่ 2.16 ผลของ PEG ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางคลอโรพรีนที่ AC 10 phr .....	56
ตารางที่ 2.17 ผลของ PEG ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางคลอโรพรีนที่อัตราส่วน AC/OBSH เท่ากับ 9.5/0.5 .....	56

ตารางที่ 2.18 ผลของ PEG ต่ออัตราการบวมตัว .....	57
ตารางที่ 2.19 แสดงค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนและเวลา Mastication ที่แตกต่างกัน .....	58
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของ UL-94 แต่ละประเภท .....	77
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางแต่ละชนิด .....	80
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า $T_{onset}$ , $T_{endset}$ , $T_{dmax}$ และ Char residue จากการทดสอบ TGA ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบการคงรูปที่ต่างกัน .....	97
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า $T_{onset}$ , $T_{endset}$ , $T_{dmax}$ และ Char residue จากการทดสอบ TGA ของยาง NR/CR vulcanizate .....	118
ตารางที่ 4.4 $T_{onset}$ , $T_{dmax}$ และ $T_{endset}$ จากผลการทดสอบ TGA ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA .....	138
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า LOI และ UL-94 จากการทดสอบสมบัติการติดไฟของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA .....	143
ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลของ Blowing agent .....	154
ตารางที่ 4.7 UL-94 rating ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent .....	171





## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [3].....	4
รูปที่ 2.2 การเกิดการเชื่อมโยงพันธะในโมเลกุลยาง [13].....	9
รูปที่ 2.3 พันธะการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติกับกำมะถัน [12].....	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของยางคลอโรพรีน [15].....	13
รูปที่ 2.5 ยางคลอโรพรีน [16].....	13
รูปที่ 2.6 การผลิตคลอโรพรีนมอนอเมอร์ [16].....	14
รูปที่ 2.7 กระบวนการสังเคราะห์ยางพอลิคลอโรพรีน [16].....	16
รูปที่ 2.8 ลักษณะของโครงสร้างไอโซเมอริกของยางคลอโรพรีน [16].....	17
รูปที่ 2.9 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วย ZnO [13].....	22
รูปที่ 2.10 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนเมื่อเติม Ethylene thiourea (ETU) [13] ...	22
รูปที่ 2.11 สันฐานโครงสร้างของโฟม (a) เซลล์เปิด และ (b) เซลล์ปิด [20].....	24
รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการเกิดโฟม [21] .....	25
รูปที่ 2.13 แผนภาพขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [24] .....	28
รูปที่ 2.14 รูปแบบลักษณะทางสันฐานวิทยาของยางผสมที่ประกอบด้วยยางสองชนิด คือ A และ B, สารตัวเติม (C), พลาสติกไซเซอร์ (P) และการเชื่อมโยง (X) ที่เกิดขึ้น [26] .....	33
รูปที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของซิลิกา [27].....	35
รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา [28] .....	39
รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Cure index กับอัตราส่วนผสมของ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน .....	40
รูปที่ 2.18 มอดูลัสที่ 100% strain ของ NR/DCSBR และ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมัน .....	41
รูปที่ 2.19 Compression set ของ NR/DCSBR และ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	41

รูปที่ 2.20 Hardness ของ NR/DCSBR และ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมัน	42
รูปที่ 2.21 แสดงค่า Scorch time และ Cure time ของ NR/vCR และ NR/rCR blend	43
รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับ NR/CR blend ratio	44
รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Elongation at break กับ NR/CR blend ratio	44
รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling percentage กับ NR/CR blend ratio	45
รูปที่ 2.25 ภาพ SEM ของพื้นผิวรอยแตกหักจากการทดสอบ Tensile ของ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	46
รูปที่ 2.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Mooney viscosity กับ CR/NR blend ratio	47
รูปที่ 2.27 ภาพ SEM ของ (a) NR เต็มซิลิกา, (b) CR/NR 50/50 เต็มซิลิกา และ (c) CR เต็มซิลิกา	48
รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Scorch time ( $t_{s2}$ ) และ Optimum cure time ( $t_{c90}$ ) กับ CR/NR blend ratio	48
รูปที่ 2.29 ภาพ AFM ของ CR/NR blend ที่อัตราส่วน (a) 75/25, (b) 50/50 และ (c) 25/75	49
รูปที่ 2.30 ภาพ SEM ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย A,a). F-BR, B,b). F-NR, C,c). F-NBR, D,d). F-80/0/20, E,e). F-60/20/20, G,g). F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20	52
รูปที่ 2.31 ภาพ SEM ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย E,e). F-60/20/20, G,g). F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20	53
รูปที่ 2.32 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR โดย A). F-BR, B). F-NR, C). F-NBR, D). F-80/0/20, E). F-60/20/20, G). F-40/40/20, H). F-20/60/20 และ I). F-0/80/20	54
รูปที่ 2.33 ผลของ Blowing agent ต่อสมบัติเชิงกลของโพลียางคลอโรพรีน (a) Tensile strength และ Tear strength และ (b) Elongation at break และ Hardness	55
รูปที่ 2.34 ภาพ SEM ของโครงสร้างเซลล์ (a) AC บริสุทธิ์ และ (b) AC/OBSH ที่อัตราส่วน 9.5/0.5	56

รูปที่ 2.35 สันฐานวิทยาของโครงสร้างเซลล์ที่อัตราส่วนของ PEG แตกต่างกัน (a) 0.3 phr (b) 0.6phr (c) 0.9 phr และ (d) 1.2 phr .....	57
รูปที่ 2.36 แสดงภาพถ่าย SEM ของยางผสม NR/SBR ที่ไม่เติมและเติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH หรือ ADC ที่ 6 phr โดยใช้สารเติมแต่งที่ต่างกัน.....	60
รูปที่ 2.37 ภาพ SEM ของโพลียเอทิลีนที่เติมสารก่อให้เกิดฟองต่างกัน .....	61
รูปที่ 2.38 กราฟเปรียบเทียบค่า Hardness ของโพลียเอทิลีนที่เติมสารก่อให้เกิดฟองต่างกัน....	62
รูปที่ 2.39 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของโพลียเอทิลีนที่เติมสารก่อให้เกิดฟองต่างกัน	63
รูปที่ 3.1 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบล [36] .....	72
รูปที่ 3.2 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแบบมูม [38] .....	73
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเผาไหม้โดยเทคนิค UL94 [37]..	77
รูปที่ 4.1 Mooney viscosity ของยางธรรมชาติเกรด STR 5L และยางคลอโรพรีน เกรด M-30 ที่ผ่านการ Masticated เป็นเวลา 0 และ 30 นาที.....	80
รูปที่ 4.2 Cure characteristic curve ของ (a) ยางคอมปาวด์ NR, (b) ยางคอมปาวด์ CR และ(c) ยางคอมปาวด์ NR/CR ด้วยระบบ S1 และ S2 .....	82
รูปที่ 4.3 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วย ZnO [13].....	84
รูปที่ 4.4 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนเมื่อเติม Ethylene thiourea (ETU) [13].....	85
รูปที่ 4.5 สมบัติการคงรูปของของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในระบบ S1 และ S2 (a) Scorch time, (b) Cure time, (c) Minimum torque, (d) Maximum torque, (e) Delta torque และ (f) Cure rate index .....	86
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของ TMTD [45].....	87
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของยาง NR, CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบ S1 (ไม่มี ') และระบบ S2 (มี ').....	90
รูปที่ 4.8 Stress-Strain curve ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2 .....	91
รูปที่ 4.9 Secant modulus at (a) 100%, (b) 200% และ (c) 300 strain ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2.....	93

รูปที่ 4.10 (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2 .....	94
รูปที่ 4.11 (a) Load-Extension curve และ (b) Tear strength ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2.....	95
รูปที่ 4.12 ค่า Hardness ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2.....	96
รูปที่ 4.13 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบการคงรูปที่ต่างกัน (a) TGA curve และ (b) DTG curve .....	97
รูปที่ 4.14 %Swelling ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบการคงรูปที่ต่างกัน (a) เริ่มจนถึง equilibrium และ (b) ช่วง 0-10 ชั่วโมง .....	98
รูปที่ 4.15 Secant modulus at (a) 100%, (b) 200% และ (c) 300% strain ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S2 ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน .....	100
รูปที่ 4.16 (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S2 ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน .....	101
รูปที่ 4.17 Tear strength ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S2 ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน .....	102
รูปที่ 4.18 ค่า Hardness (Shore A) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน .....	103
รูปที่ 4.19 Cure characteristic curves ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนผสม (a) 100/0, (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50, (g) 40/60, (h) 30/70, (i) 20/80, (j) 10/90, และ (k) 0/100.....	105
รูปที่ 4.20 สมบัติการคงรูปของของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) Scorch time, (b) Cure time, (c) Minimum Torque, (d) Maximum Torque, (e) Delta Torque และ (f) Cure rate index .....	107
รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM ของ NR/CR blend vulcanizate ที่มีปริมาณ CR 0-100 %.....	111
รูปที่ 4.22 (a) Stress-Strain curve, (b) Secant modulus, (c) Tensile strength และ (d) Elongation at break ของ NR/CR vulcanizate ที่มีปริมาณ CR 0-100 % .....	113

รูปที่ 4.23 (a) Load-Extension curve และ (b) Tear strength ของ NR/CR vulcanizate ที่มีปริมาณ CR 0-100 % .....	115
รูปที่ 4.24 Hardness (Shore A) ของยาง NR/CR vulcanized ที่ปริมาณยาง CR 0-100%.....	116
รูปที่ 4.25 (a) TGA thermogram และ (b) DTG ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ปริมาณ CR 0-100 % .....	117
รูปที่ 4.26 %Swelling ของยาง NR/CR vulcanizate ในโทลูอีน (a) เริ่มต้นถึง equilibrium และ (b) ช่วง 0-10 ชั่วโมง.....	119
รูปที่ 4.27 Cure characteristic curves ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนผสม (a) 100/0, (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50, (g) 40/60, (h) 30/70, (i) 20/80, (j) 10/90 และ (k) 0/100 ที่มีการเติม IR-g-MA และ nano silica.....	122
รูปที่ 4.28 (a) Scorch time, (b) Cure time, (c) Minimum torque, (d) Maximum torque, (e) delta torque และ (f) cure rate index ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	123
รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีปริมาณยาง CR 0-100 % ไม่มี (ไม่มีเครื่องหมาย ') และ มี (มีเครื่องหมาย ') การเติม nano silica และ IR-g-MA.....	129
รูปที่ 4.30 ค่าความหนาแน่นของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA .....	130
รูปที่ 4.31 (a) Stress-strain curve, (b)-(d) Secant modulus, (e) Tensile strength และ (f) Elongation at break ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	131
รูปที่ 4.32 Load-Extension curve (a) และ Tear strength (b) ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติมและไม่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	134
รูปที่ 4.33 ค่า Hardness (Shore A) ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	135
รูปที่ 4.34 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate DTG curves ของ NR/CR vulcanizate (a) ที่ไม่เติม และ (b) ที่เติม nano silica และ IR-g-MA .....	136

รูปที่ 4.35 %Swelling ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA (a) เริ่มต้นถึง equilibrium และ (b) ช่วง 0 ถึง 10 ชั่วโมง.....	139
รูปที่ 4.36 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ equilibrium ของยางผสม NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	140
รูปที่ 4.37 ค่า LOI ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA.....	142
รูปที่ 4.38 Secant modulus ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ที่ (a) 100%, 200% และ (c) 300% strain ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน.....	146
รูปที่ 4.39 (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA และ ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน.....	146
รูปที่ 4.40 Tear strength ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน.....	148
รูปที่ 4.41 ค่า Hardness (Shore A) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ที่มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน.....	149
รูปที่ 4.42 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent.....	153
รูปที่ 4.43 การกระจายขนาดเซลล์เชิงสถิติของโฟมยาง cNR/CR ที่มีปริมาณยาง CR 0-100 % และมี OBSH (ไม่มี ' ) หรือ ADC (มี ' ) เป็น blowing agent.....	158
รูปที่ 4.44 ขนาดของเซลล์โฟมจากยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent.....	158
รูปที่ 4.45 (a) ความหนาแน่นของเซลล์ และ (b) ความหนาแน่นของโฟม ของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent.....	159
รูปที่ 4.46 Stress-Strain ของโฟมยาง cNR/CR ที่เติม (a) OBSH เปรียบเทียบกับ (b) ADC เป็น Blowing agent.....	161

รูปที่ 4.47 (a) Secant modulus ที่ 300 % strain, (b) tensile strength, และ(c) elongation at break ของโฟมยาง cNR/CR ที่เติม OBSH เปรียบเทียบกับที่เติม ADC เป็น blowing agent..... 162

รูปที่ 4.48 ความทนทานต่อการฉีกขาดของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็นBlowing agent (a) Load-Extension curve และ (b) Tear strength ..... 165

รูปที่ 4.49 ค่า Hardness (Shore A) ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent ..... 166

รูปที่ 4.50 ค่า Compression set ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent ..... 168

รูปที่ 4.51 ค่า LOI ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent170



## บทที่ 1

### บทนำ (Introduction)

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems)

โฟม เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโพรงอากาศหรือรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ในเนื้อ ในการผลิตจะใช้สารฟู (Blowing agent) ทำให้พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวและลดความหนาแน่นโดยรวมลง โฟมจึงมีน้ำหนักเบา และมีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ ในปัจจุบันวัสดุประเภทโฟมได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา นุ่ม รองรับน้ำหนักได้ดี ซึ่งโฟมยางจัดเป็นหนึ่งในวัสดุประเภทโฟมที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมักใช้ทำผลิตภัณฑ์จำพวก หมอน ที่นอน เบาะนั่ง แผ่นรองพื้นรองเท้า วัสดุกันกระแทก เป็นต้น วัสดุโฟม มีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน เช่น โฟมยาง มีสมบัติเด่นในเรื่องความยืดหยุ่นที่ดี เมื่อได้รับแรง จะเกิดการยืดออกและคืนตัวกลับได้เมื่อเอาแรงออก จึงถูกนำไปใช้เป็นวัสดุกันกระแทก พื้นรองเท้า แผ่นปูพื้น ซิล เป็นต้น แต่วัสดุโฟมยางธรรมชาติมีข้อจำกัดในเรื่องของการไม่ทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ เช่น น้ำมันปิโตรเคมี เบนซิน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ทำให้ยางเกิดการบวมตัวและส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง และอีกข้อจำกัดหนึ่งที่สำคัญคือการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging Properties) ยางธรรมชาติมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ยางเกิดการยืดตัว และเกิดเป็นรอยแตกเล็ก ๆ จำนวนมาก จนทำให้ยางเสื่อมสภาพไปในที่สุด

ยางคลอโรพรีนมีสมบัติทั่วไปคล้ายกับยางธรรมชาติ คือ มีความยืดติดกันได้ดี ความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาดค่อนข้างสูง เนื่องจากยางคลอโรพรีนสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกยืด เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ มีสมบัติการต้านทานการติดไฟ เพราะยางคลอโรพรีนมีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเปลวไฟจะดับเองหลังจากนำออกจากเปลวไฟ นอกจากนี้อะตอมของคลอรีนยังช่วยทำให้ยางคลอโรพรีนทนต่อสภาพอากาศ ความร้อน โอโซน และแสงแดดได้ดี ยางคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขี้เพราะประกอบด้วยอะตอมของคลอรีน ทำให้ยางคลอโรพรีนมีความทนต่อน้ำมันและสารเคมี จึงเหมาะสำหรับนำเอายางคลอโรพรีนมาปรับปรุงจุดด้อยของยางธรรมชาติได้ดี

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำยางธรรมชาติมาปรับปรุงให้มีความต้านทานต่อความร้อน น้ำมัน โอโซน และสมบัติเชิงกล เพื่อทำให้นำไปใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น โดยการนำเอายางธรรมชาติมาผสมกับยางคลอโรพรีน เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพ (Aging



properties) ซึ่งยางคลอโรพรีนสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากอากาศ โอโซน ความร้อน และแสงแดดได้ดี เพราะยางชนิดนี้มีคลอรีนอะตอมเป็นองค์ประกอบ และสมบัติความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด (Tensile and Tear Strength) ค่อนข้างดี เนื่องจากโมเลกุลของยาง CR มีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล ทำให้สร้างแรงดึงดูดระหว่างขั้วของยางคลอโรพรีน ยางชนิดนี้จึงสามารถทนทานต่อแรงดึงได้ดี มีความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and Chemical Resistance) ซึ่งยางคลอโรพรีนสามารถทนการบวมต่อน้ำมัน และกรด-ด่าง เจือจาง ได้ปานกลางถึงดี จึงมีความน่าสนใจและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังสามารถช่วยเหลือเกษตรกรสวนยางพาราและเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าเอาอย่างธรรมชาติมาใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติอีกทางหนึ่งได้เช่นกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research)

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic), ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphological characteristic), สมบัติเชิงกล (Mechanical properties), และสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของโฟมยางผสม

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟ (Flame resistance) ของโฟมยางผสม

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการที่จะศึกษาการผสมระหว่าง NR กับ CR และนำมาเตรียมเป็นยางโฟม (rubber sponge/rubber foam) ซึ่งระบบ vulcanization ที่ใช้จะเป็นระบบ sulphur โดยยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน จะมีความสามารถทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน โทลูอินและน้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น โดยจะศึกษาอัตราส่วนที่แตกต่างกันของยางผสม โดยที่มีผลต่อสมบัติและความสามารถในการเกิดเป็นโฟม ในงานวิจัยจะมีข้อจำกัดดังนี้

1. การผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่อง Two roll mill

2. Masticate NR (เกรด STR 5L) เป็นเวลา 20 นาที ก่อนผสมกับยางคลอโรพรีน (เกรด M-30) โดยมีอัตราส่วนที่ศึกษาเท่ากับ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100

3. Vulcanizing additives มี 2 ระบบ ดังนี้

1) Zinc oxide 5 phr, Magnesium oxide 2 phr, Stearic acid 3 phr, CBS 0.5 phr, TMTM 1 phr และ Sulphur 2.5 phr ตามลำดับ

2) Zinc oxide 5 phr, Magnesium oxide 2 phr, Stearic acid 2 phr, CBS 1 phr, TMTD 0.5 phr, ETU 0.5 phr และ Sulphur 2.2 phr ตามลำดับ

4. ใช้ Physical Compatibilizer คือ Nano silica และ Chemical Compatibilizer คือ IR-g-MA

5. สารฟูที่ใช้มี 2 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบ คือ OBSH กับ ADC

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนได้

1.4.2 ทราบถึงผลการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

1.4.3 ทราบถึงผลการศึกษาด้านทานการติดไฟของโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

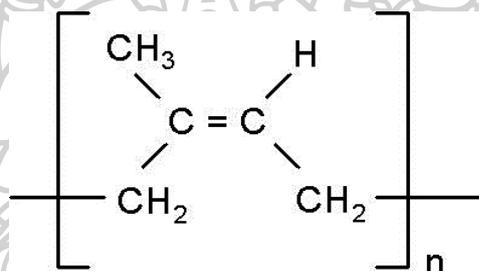


## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติหรือยางพาราส่วนมากได้มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Braziliensis* โดยโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ คือ cis-1,4-polyisoprene ประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบโซ่ตรง) โดยที่ n (Repeating unit) มีค่าตั้งแต่ 15,000-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition Temperature;  $T_g$ ) อยู่ที่ประมาณ  $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยโครงสร้าง cis-1,4-polyisoprene แสดงดังรูปที่ 2.1 [2-7]



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [3]

#### ยางแปรรูปขั้นต้น [4]

ยางแปรรูปขั้นต้นได้มาจากวัตถุดิบ คือ น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดจากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวข้นคล้ายน้ำมัน ต้องเติมสารรักษาสภาพน้ำยางไม่ให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการหรือก่อนการนำไปใช้งาน ซึ่งการนำน้ำยางสดมาแปรรูปเป็นยางแปรรูปขั้นต้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1.) ยางแห้ง โดยแบ่งตามกรรมวิธีในการผลิตเป็น 3 ประเภท คือ

1.1) ยางแบบธรรมดา ผลิตโดยวิธีดั้งเดิม ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ

1.2) ยางแบบระบุคุณภาพมาตรฐาน ผลิตโดยมีเงื่อนไขในการระบุคุณภาพมาตรฐานตามสากล ได้แก่ ยางแท่งมาตรฐาน

ยางแท่ง (Block rubber) หรือ มาตรฐานยางแท่งที่เรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) คือ ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากน้ำยางสดและยางแห้ง ซึ่งเป็นวัตถุดิบยางที่มีคุณภาพดี จะทำให้ได้ยาง

แท่งที่มีเกรดสูง และสมบัติทางกายภาพที่ดี โดยเฉพาะค่า Po, PRI และ ค่าความเหน็ด ซึ่งเป็นสมบัติที่ผู้ใช้ต้องการและเป็นตัวกำหนดมาตรฐานในการซื้อขาย [8]

#### ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากน้ำยางสด [8]

ยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด จะเป็นยางแท่งที่มีสมบัติทางกายภาพสูง มีความสะอาด ความยืดหยุ่นและความเหน็ดสูง ส่วนมากจึงนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง เช่น ล้อยางเครื่องบิน ล้อยางรถยนต์ ล้อยางเรเดียลทุกชนิด อีกทั้งยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด ยังมีสีค่อนข้างใสสวย เหมาะสำหรับการผลิตจำพวกผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสันต่าง ๆ เช่น ยางรัดของ ยางรัดผม และอุปกรณ์กีฬาชนิดต่าง ๆ รวมทั้ง เป็นส่วนประกอบของปากกา แปรงสีฟัน และสินค้าอื่น ๆ อีกมากมาย

น้ำยางสดที่นำมาผลิตยางแท่ง จะต้องมีการควบคุมคุณภาพทุกขั้นตอนเป็นอย่างดี โดยยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด มี 4 เกรด ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่น คือ ปริมาณสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนต่ำ ความอ่อนตัวเริ่มแรก (หรือ ที่เรียกว่า ค่า Po ; Initial Plasticity) สูง, ค่าดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity Retention Index, PRI) สูง แต่จะแตกต่างกันในเรื่องของปริมาณสิ่งสกปรกและค่าสี (ค่าสีจะระบุเฉพาะยางแท่ง STR XL และ STR 5L เท่านั้น) การที่บริษัทผู้ผลิตยางล้อ เลือกใช้ยางแท่งที่ทำจากน้ำยางสด มาผลิตยางล้อรถ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูง มีคุณสมบัติต่าง ๆ ดีเด่นเป็นพิเศษ ทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์จึงจำหน่ายได้ราคาสูงกว่า นับเป็นสินค้าคุณภาพอยู่ในตลาดบน

ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากน้ำยางสด มี 4 เกรด คือ

1. ยางแท่ง STR XL จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.02% และ มีค่าสี ไม่เกิน 4 หน่วยโลวิบอนด์
2. ยางแท่ง STR 5L จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.04% และ มีค่าสี ไม่เกิน 6 หน่วยโลวิบอนด์
3. ยางแท่ง STR 5 จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.04% (ไม่จำกัดค่าสี จึงสามารถนำไปใช้กับ ผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ที่ไม่เน้นสีสันมากนัก)
4. ยางแท่ง STR 5CV จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.04% (ไม่จำกัดค่าสี จึงสามารถนำไปใช้กับ ผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ที่ไม่เน้นสีสันมากนัก)

### ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากยางแห้ง [9]

ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากยางแห้ง หรือวัตถุดิบยางที่จับตัวกันแล้ว เช่น ยางแผ่นดิบ ยางก้อน ถ้วย ยางก้นถ้วย ยางแผ่นรมควัน และเศษยางชนิดต่าง ๆ จะมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่สม่ำเสมอ และมักแปรปรวนตามความหลากหลายของวัตถุดิบยางแห้งที่ผลิตจากยางแห้ง แบ่งออกเป็น 4 เกรด ซึ่งยางแท่งทุกชั้น จะระบุค่าปริมาณสิ่งสกปรก ความอ่อนตัวเริ่มแรก ดัชนีความอ่อนตัว ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งระเหย และปริมาณไนโตรเจน

ยางแท่งที่ผลิตจากยางแห้ง แบ่งออกเป็น 4 เกรด คือ

1. ยางแท่ง STR 10 มีค่าปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน 0.08% สำหรับค่า Po และ PRI ไม่เกิน 30 และ 50 ตามลำดับ ได้มาจากการนำยางก้อนถ้วย และยางแผ่นดิบคุณภาพดีมาผลิต ทำให้สมบัติด้าน Po, PRI และปริมาณสิ่งสกปรกดีกว่า ยางแท่ง STR 20

2. ยางแท่ง STR 10 CV

3. ยางแท่ง STR 20 เป็นยางแท่งที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่เป็นเศษยางเป็นส่วนใหญ่ผสมกับยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย หรือ ยางแผ่นรมควัน จะจำกัดค่าปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน 0.16% สำหรับค่า Po และ PRI ไม่เกิน 30 และ 40 ตามลำดับ

4. ยางแท่ง STR 20 CV

ยางแท่ง CV (Constant Viscosity) นับเป็นยางแท่งที่มีความหนืดคงที่ ด้วยการเติมสารควบคุมความหนืด ทำให้ยางแท่งมีความหนืดอยู่ในระดับที่ควบคุมได้ เช่น ยางแท่ง CV60 ยางจะมีค่าความหนืดอยู่ที่ 55-67 หน่วย เป็นต้น ซึ่งการควบคุมความหนืดจะช่วยลดพลังงานในขั้นตอนการบดผสมยางกับสารเคมี ในกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานยางแท่งชั้นต่าง ๆ [8]

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

\* เป็นขีดจำกัดสำหรับผู้ใช้งาน เมื่อผู้ผลิตต้องมีปริมาณสิ่งระเหย ไม่เกิน 0.05 %

\*\* ขีดจำกัดของผู้ผลิต คือ

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

STR 10 CV มีค่าความหนืด 60 (+7, -5)

STR 20 CV มีค่าความหนืด 65 (+7, -5)

1.3) ยางแบบอื่น ๆ ที่มีวิธีการผลิตเฉพาะตัว เพื่อให้ได้ผลผลิตเหมาะสมกับงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ หรือเพื่อวัตถุประสงค์จะปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางที่มีความหนืดคงที่ ยางเทอร์โมพลาสติก ยางอีพอกซีไดซ์ ยางผง ยางเหลว เป็นต้น

2.) ของเหลว ได้แก่ น้ำยางข้น ซึ่งมี 2 ประเภท คือ

2.1) น้ำยางข้นธรรมดาที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยสารเคมีหรือวิธีการใด ๆ เพื่อให้โมเลกุลของยางเปลี่ยนไป

2.2) น้ำยางข้นที่ผ่านกระบวนการตัดแปรด้วยสารเคมี หรือการฉายรังสีให้โมเลกุลของยางเปลี่ยนแปลงเรียกว่า “น้ำยางคงรูป” หรือ “น้ำยางพรีวัลคาไนซ์”

### สมบัติของยางธรรมชาติ [8, 10]

1. อุณหภูมิในการใช้งานของยางธรรมชาติสามารถใช้งานอยู่ในช่วง -55 ถึง +100 °C
2. ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงมาก เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เมื่อปล่อยแรงออกยางจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว
3. ความเหนียวติดกัน (Sticky) ยางธรรมชาติมีสมบัติที่เยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน
4. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้สามารถเกิดผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง โดยค่าความทนทานแรงดึงของยางธรรมชาติมีค่าประมาณ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น และด้วยสมบัติดังกล่าวทำให้ยางธรรมชาติยังทนต่อการฉีกขาดได้ดีอีกด้วย
5. ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับยางชนิดอื่น ๆ
6. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก
7. ความทนต่อของเหลวและสารเคมี เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ยางจะเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางดังกล่าวทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง และด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเคมี หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ
8. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging Properties) ยางธรรมชาติมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ยางเกิดการยืดตัว และเกิดเป็นรอยแตกเล็ก ๆ จำนวนมาก จนทำให้ยางเสื่อมสภาพไปในที่สุด
9. การกระด้างกระดอน (Rebound Resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูงมาก และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงสะสมความร้อนระหว่างการใช้งานต่ำ

### ผลิตภัณฑ์ยาง [2-4]

อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางจัดเป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำ แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

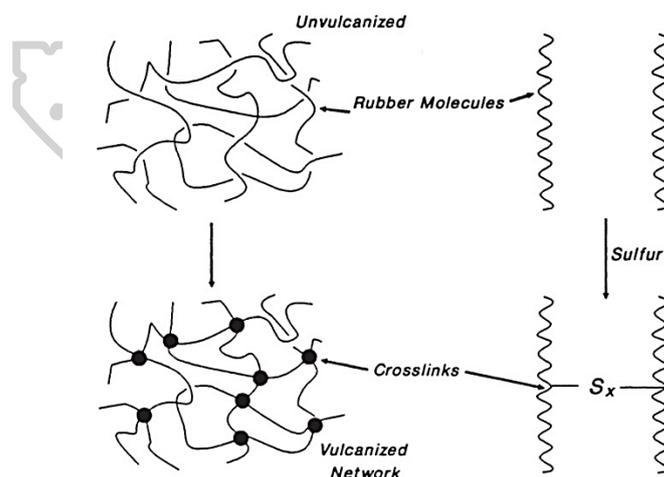
1. กลุ่มยางล้อยานยนต์ ประกอบด้วยยางล้อรถยนต์ รถบรรทุก รถที่ใช้ในอุตสาหกรรม และการเกษตร รถจักรยานยนต์ รถจักรยาน และยางล้อเครื่องบิน
2. กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางใช้ในงานวิศวกรรมหรือใช้ในอุตสาหกรรม ประกอบด้วยชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนยางอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ยางใช้ในงานก่อสร้าง สายพาน ท่อยางและลูกกลิ้งยาง

3. กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางจากน้ำยางข้นประกอบด้วยถุงมือ ถุงยางอนามัย เส้นด้ายยางยืด ลูกโป่ง และอุปกรณ์ที่ใช้ในทางการแพทย์ เช่น สายสวนปัสสาวะ สายน้ำเกลือ

4. กลุ่มผลิตภัณฑ์ยางอื่น ๆ ประกอบด้วยรองเท้ายาง พื้นรองเท้า ยางรัดของ ผลิตภัณฑ์กีฬา และของเล่น เป็นต้น

## 2.2 การวัลคาไนเซชัน (Vulcanization)

กระบวนการวัลคาไนซ์ คือ กระบวนการการเปลี่ยนแปลงยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่สามารถคงตัวให้เป็นอย่างที่รักษารูปร่างได้ในลักษณะยืดหยุ่น (Elastic) หรือแข็งตึง (Stiffness) โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะไม่เหลว เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะไม่แข็ง ไม่เหนียวติดกัน และไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เพราะก้ำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลนี้เรียกว่าการเกิดพันธะเชื่อมโยง (Crosslink) ปัจจุบันการวัลคาไนเซชันในยางส่วนใหญ่เกิดจากการเติมสารวัลคาไนซ์ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้ก้ำมะถัน (Sulphur system) ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide system) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่น ๆ เช่น โลหะออกไซด์ (Metal oxide system) เป็นต้น [11, 12]



รูปที่ 2.2 การเกิดการเชื่อมโยงพันธะในโมเลกุลยาง [13]



### 2.2.1 ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur system)

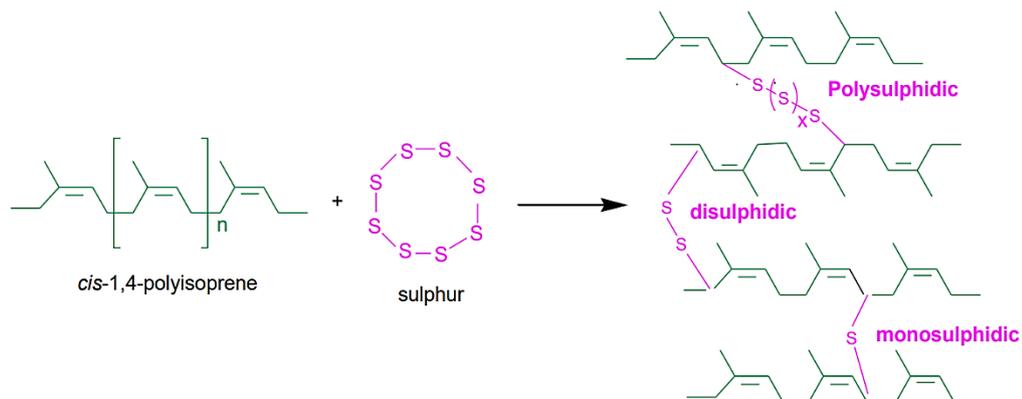
ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันของยางธรรมชาติมีอยู่ 3 ระบบด้วยกัน คือ

2.2.1.1 ระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ (Conventional Vulcanized System, C.V.) เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบทั้งหมด แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม (Polysulphidic crosslink) จึงผลต่อสมบัติทางเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานการล้าดี และส่งผลต่อสมบัติในความทนทานในการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านทานต่อสมบัติการถดถอยของสมบัติหลังได้รับความร้อน (Reversion) ในขณะที่สมบัติด้านความทนทานต่อความร้อน การต้านความเสื่อมสภาพ และสมบัติการจัดเรียงตัวเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ของยางจะด้อยกว่าระบบอื่น ๆ

2.2.1.2 ระบบวัลคาไนซ์แบบมีประสิทธิภาพ (Efficiently Vulcanized System, E.V.) ระบบนี้ใช้กำมะถันน้อย แต่ใช้สารตัวเร่งในปริมาณที่มาก หรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันเชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งอะตอม (Monosulphidic crosslink) หรือสองอะตอม (Disulphidic crosslink) เท่านั้น ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ แต่จะทำให้ยางมีความต้านทานต่อการถดถอยของสมบัติหลังได้รับความร้อน (Reversion) ดี สมบัติในด้านการทนทานต่อความร้อนดี และสมบัติการจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัดดี

2.2.1.3 ระบบวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficiently Vulcanized System, Semi-E.V.) ระบบนี้ใช้กำมะถันและสารตัวเร่งกึ่งกลางระหว่างระบบวัลคาไนซ์แบบปกติกับระบบวัลคาไนซ์แบบมีประสิทธิภาพ ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนระหว่างทั้งสองระบบนี้

พันธะการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติจะแตกต่างกันตามปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งที่ใช้ กล่าวคือ การวัลคาไนซ์ระบบปกติจะให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก (Polysulphidic crosslink) ส่วนการวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพส่วนใหญ่จะเกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบไดซัลไฟดิก (Disulphidic crosslink) และการวัลคาไนซ์ระบบประสิทธิภาพส่วนใหญ่จะเกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบโมนอสัลไฟดิก (Monosulphidic crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พันธะการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติกับกำมะถัน [12]

การที่พันธะการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางแตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางหลังการวัลคาไนซ์แตกต่างกันด้วย โดยการวัลคาไนซ์ระบบปกติจะมีพันธะการเชื่อมโยงของกำมะถันอยู่หลายอะตอมส่งผลให้สมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อแรงดึงดี ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานการล้าดี และมีสมบัติในการต้านทานในการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก ซึ่งดีกว่าการวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพ และการวัลคาไนซ์ระบบมีประสิทธิภาพตามลำดับ แต่สมบัติการทนทานต่อความร้อน (Heat aging) สมบัติหลังจากได้รับความร้อน (Reversion) และสมบัติการคืนตัวหลังการกดของยางจะด้อยกว่าอีกสองระบบ โดยการวัลคาไนซ์ระบบประสิทธิภาพจะใช้กำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งในปริมาณมาก ทำให้การใช้กำมะถันเกิดการเชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่แต่ละพันธะการเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น จะทำให้ยางมีสมบัติหลังได้รับความร้อนดี [12, 14]

### 2.2.2 ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide system)

ระบบวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นระบบที่สามารถใช้ได้กับยางทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบที่ใช้กำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่ายางที่ได้จากระบบที่ใช้กำมะถัน นอกจากนี้แล้วเปอร์ออกไซด์ยังเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย ทำให้มีอุปสรรคต่อการขนย้ายและการเก็บรักษา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์จึงนิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ที่ไม่มีพันธะคู่ (เช่น EPM, EVA, CPE หรือ Q เป็นต้น) หรือยางที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น HNBR และ EPDM) สำหรับยางไดอีนอื่น ๆ ที่มีพันธะคู่จึงยังคงใช้ระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ยกเว้นในกรณีที่ต้องการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนได้ดี และมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำเท่านั้น

เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์กับระบบที่ใช้กำมะถัน

#### ข้อดี

- ไม่เกิดการ blooming ของสารเคมี
- ยางไม่เกิดการเปลี่ยนสี โดยเฉพาะยางใส เมื่อสัมผัสกับแสง UV
- สามารถใช้เปอร์ออกไซด์ในการวัลคาไนซ์ร่วม (Co-vulcanization) ระหว่างยางกับพอลิเมอร์

ชนิดอื่นได้ง่าย

- สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำ
- ทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

#### ข้อเสีย

- ไม่เหมาะกับการใช้คงรูปยางที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน
- เกิดการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลยาง ส่งผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ
- เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่นได้ง่ายทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์

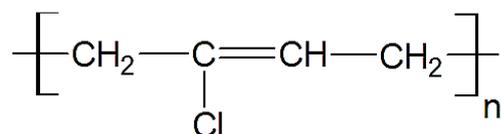
### 2.2.3 ระบบที่ใช้สารเคมีอื่น ๆ

นอกจากระบบหลัก ๆ ที่นิยมใช้ 2 ระบบ คือ ระบบกำมะถันและระบบเปอร์ออกไซด์ ยังมีการคงรูปยางด้วยระบบอื่น ๆ เช่น การคงรูปยางด้วยระบบรังสี ซึ่งเป็นระบบที่ฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา โดยเมื่อถูกฉายรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Radicals) และจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน ไม่มีสารเคมีตกค้างในผลิตภัณฑ์ เหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนยางที่ใช้ทางการแพทย์ และยังมีระบบที่มีการใช้โลหะออกไซด์ (แมกนีเซียมออกไซด์ ร่วมกับซิงค์ออกไซด์)

ในการคงรูปของยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber ; CR) หรือการใช้สารประกอบในกลุ่มของควิโนนไดออกไซด์ ซึ่งสารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซด์นิยมใช้เป็นสารคงรูปยาง เนื่องจากสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้ง่าย ส่งผลให้ยางเกิดการคงรูปอย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้กำมะถัน โดยยางที่ได้จะมีความสามารถในการทนต่อความร้อนและไอน้ำสูง ตัวอย่างของสารประเภทนี้ได้แก่ เบนโซควิโนนไดออกไซด์ (p-Benzo quinonedioxime, BDO) และไดเบนโซควิโนนไดออกไซด์ (Dibenzoquinonedioxime, DDO) ซึ่งนิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง IIR เป็นต้น นอกจากนี้ยังมี

สารอื่น ๆ เช่น ระบบที่ใช้ไดไอโซไซยานต (Diisocyanate) และไดเอมีน (Diamine) เป็นสารวัลคาไนซ์อีกด้วย [14]

### 2.3 ความรู้เกี่ยวกับยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของยางคลอโรพรีน [15]

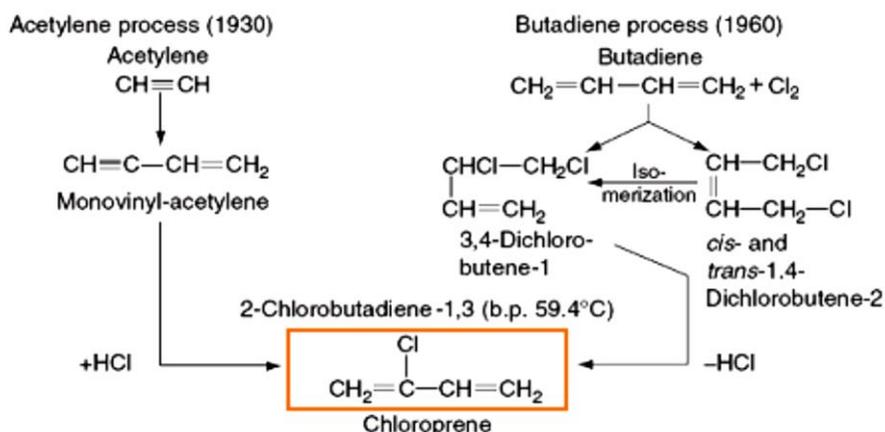
ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber) นับเป็นยางสังเคราะห์ชนิดแรกที่เกิดขึ้นในเชิงการค้าและยังคงใช้กันจนถึงปัจจุบัน บริษัท DuPont เป็นผู้ผลิตยางคลอโรพรีนรายใหญ่มาตั้งแต่ปี พ.ศ.2475 จนถึง พ.ศ.2503 ต่อมาจึงได้มีบริษัท Bayer เริ่มผลิตยางคลอโรพรีนที่มีชื่อทางการค้าว่า Baypren ออกมาจำหน่าย และตามมาด้วยผู้ผลิตในประเทศญี่ปุ่น 2-3 บริษัท ได้แก่ บริษัท Denka Kagaku ผลิตยางคลอโรพรีนที่มีชื่อทางการค้าว่า Denka และบริษัท Toya Soda ผลิตยางคลอโรพรีนที่มีชื่อทางการค้าว่า Skyprene เป็นต้น [14-16]



รูปที่ 2.5 ยางคลอโรพรีน [16]

#### 2.3.1 การผลิตคลอโรพรีนมอนอเมอร์

กระบวนการผลิตคลอโรพรีนมอนอเมอร์เดิมจะใช้กระบวนการที่ใช้อะเซทิลีนเป็นสารตั้งต้น (Acetylene process) แต่เนื่องจากเป็นระบบที่มีการลงทุนสูงและควบคุมการแลกเปลี่ยนอะเซทิลีนได้ยาก จึงได้เปลี่ยนมาใช้ระบบใหม่ คือ “กระบวนการที่ใช้บิวทาไดอินเป็นสารตั้งต้น (Butadiene process)” ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์คลอโรพรีนมอนอเมอร์ในปัจจุบัน เพราะเป็นกระบวนการที่ปลอดภัยและสามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [13, 14]



รูปที่ 2.6 การผลิตคลอโรพรีนมอนอเมอร์ [16]

### 2.3.2 การสังเคราะห์น้ำยางคลอโรพรีน

น้ำยางคลอโรพรีนเป็นน้ำยางสังเคราะห์ชนิดแรกที่ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) (ดังแสดงในรูปที่ 7) สารเคมีที่ใช้ในระบบนี้ ได้แก่

1. โคมอนอเมอร์ (Comonomer) ที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก ได้แก่ คลอโรพรีน
2. ตัวกลาง (Dispersing media) ได้แก่ น้ำ
3. สารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ได้แก่ สบู่ ทำหน้าที่ลดความตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิด

สภาวะอิมัลชัน

4. สารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ที่สามารถละลายน้ำได้ ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
5. สารย้ายลูกโซ่ (Chain transfer agent) ทำหน้าที่ควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้ ได้แก่ สารจำพวกเมอร์แคปแทน (Mercaptan; RSH)

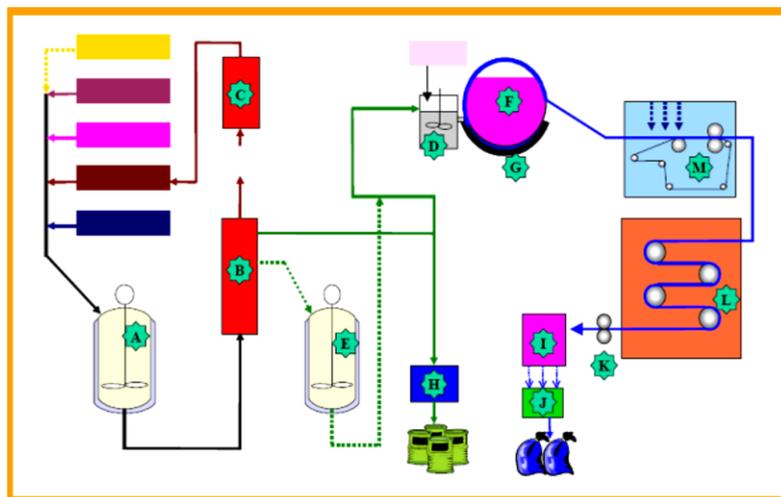
ในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.7 เป็นการพอลิเมอไรเซชันน้ำยางคลอโรพรีนแบบอิมัลชันที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ โดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากรูปที่ 7 ในถังกวน A จะมีการเติมคลอโรพรีนมอนอเมอร์ลงไปก่อน จากนั้นจึงเติมกำมะถัน กรดโรซิน และน้ำที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมอัลคิลเนฟทาซีนซัลโฟเนต ละลายอยู่ในสารละลายชั้นตอนนี้จะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดโรซินและโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นสบู่คาร์บอกซิเลต ที่มีชื่อว่า โซเดียมเรซินेट ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งจะหันเข้าด้านใน และหมู่คาร์บอกซิเลตที่ชอบน้ำจะหันออกด้านนอก โดยส่วนของสบู่ที่เป็นโซ่ไฮโดรคาร์บอนนั้นจะเกาะอยู่บริเวณผิวรอบหยดคลอโรพรีนมอนอเมอร์ ทำให้หยดคลอโรพรีนมีความเสถียรและไม่เกิดการรวมตัวกันในขณะที่กระจายตัวอยู่ในน้ำอิมัลชันที่ได้จะถูกกวนให้กระจาย

หลังจากนั้นจึงค่อยเติมโพแทสเซียมเพอร์ออกไซด์ซัลเฟต ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการพอลิเมอไรส์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 40 °C และจะต้องกวนสารละลายในถังปฏิกิริยาตลอดเวลา เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการ (เกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ถึงร้อยละ 91 และมีความถ่วงจำเพาะ 1.069) จึงเติมสารเทตระเอทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ เพื่อหยุดปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชัน จากนั้นนำน้ำยางคลอโรพรีนที่ได้มาพักไว้ในถัง B เพื่อให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง แยกมอนอเมอร์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากลับไปใช้ใหม่ในถัง C และน้ำยางคลอโรพรีนบางส่วนจะถูกนำไปผลิตเป็นยางคลอโรพรีน ซึ่งน้ำยางคลอโรพรีนที่ได้จากการพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 40 °C (ถัง H) จะมีปริมาณสัดส่วนของโครงสร้างไอโซเมอริก ดังตารางที่ 2.3 และรูปที่ 8 โดยทั่วไปโครงสร้างของยางคลอโรพรีนจะประกอบด้วยโครงสร้างแบบ trans มากกว่า และมีโครงสร้างแบบ cis บางส่วน ซึ่งสมบัติของผลิตภัณฑ์จากยางคลอโรพรีนที่ได้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลทั้งปริมาณและสัดส่วนของ cis/trans ความยาวของสายโซ่โมเลกุล และปริมาณการเชื่อมโยง โดยกลไกหลักที่ทำให้โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลง ได้แก่

1. สภาวะการพอลิเมอไรส์ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ และกระบวนการพอลิเมอไรส์
2. ตัวช่วยในการพอลิเมอไรส์ เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสายโซ่ตัดแปรง (Chain modifier) โคมอนอเมอร์ และอิมัลซิไฟเออร์ เป็นต้น [16]

ตารางที่ 2.2 การผลิตยางคลอโรพรีนกลุ่มที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบโดยการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันที่อุณหภูมิ 40 °C [16]

สูตรผสม	น้ำหนักโดยมวล(กรัม)
ยางคลอโรพรีน	100
โรซิน (N wood)	4
กำมะถัน	0.6
น้ำ	150
โซเดียมอัลคิลแนฟทาไลน์ซัลโฟเนต	0.7
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.8
โพแทสเซียมเพอร์ออกไซด์ซัลเฟต	0.2-1.0



รูปที่ 2.7 กระบวนการสังเคราะห์ยางพอลิคลอโรพรีน [16]

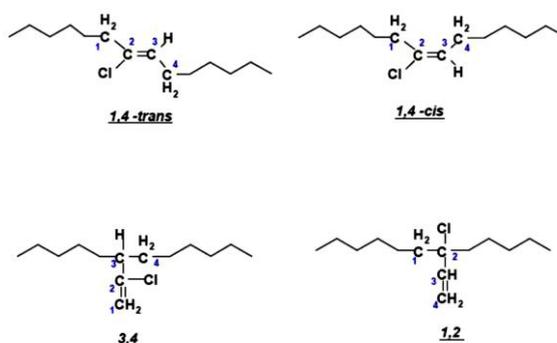
โดย A) การพอลิเมอไรเซชัน B) ถังสกัดแยก C) การทำให้บริสุทธิ์ D) การทำให้เป็นกลาง E) เพปไทเซชัน F) ลูกกลิ้งหล่อเย็น (-15 °C) G) การทำให้จับตัวด้วยความเย็น H) น้ำยางข้น I) เครื่องตัด J) เครื่องกรองเศษ K) เครื่องรีดลาย L) เครื่องอบแห้ง และ M) เครื่องล้า

ตารางที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิการพอลิเมอไรเซชันต่อสัดส่วนโครงสร้างไอโซเมอร์ของยางคลอโรพรีน [16]

อุณหภูมิการพอลิเมอไรเซชัน(°C)	สัดส่วนโครงสร้างไอโซเมอร์(%)			
	1,2	3,4	cis-1,4	trans-1,4
-40	0.9	0.3	5	94
10	1.1	1	9	84
40	1.6	1	10	86,81
100	2.4	2.4	13	71

จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิการพอลิเมอไรเซชันจะมีผลต่อโครงสร้างของยางคลอโรพรีน (ดังรูปที่ 2.8) ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของยางจะมีผลโดยตรงต่อการเกิดผลึก ความยืดหยุ่นและสมบัติทางกายภาพของยาง การพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีสัดส่วนของ trans-1,4 ในปริมาณสูง ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดผลึกสูงขึ้นตามไปด้วย โดยยางที่โครงสร้างแบบ trans-1,4 สูง จึงเหมาะสำหรับนำไปผลิตกาวที่ต้องการสมบัติเหนียวติดในทันที การเพิ่มอุณหภูมิการพอลิเมอไรเซชันให้สูงขึ้นจะทำให้มีปริมาณ trans-1,4 ลดลง ปริมาณ cis-1,4 และปริมาณโครงสร้างไอโซ

เมอริก 1,2 และ 3,4 เพิ่มขึ้น น้ำยางคลอโรพรีนที่สังเคราะห์ได้จะมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ ยางไฮโปลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นและเร็วขึ้น ทำให้การเกิดผลึกของยางต่ำลง [1]



รูปที่ 2.8 ลักษณะของโครงสร้างไอโซเมอริกของยางคลอโรพรีน [16]

### 2.3.3 การจัดแบ่งเกรดยางคลอโรพรีน

ยางคลอโรพรีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ และในแต่ละกลุ่มยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็นเกรดต่าง ๆ ได้อีก ดังนี้

1. ยางคลอโรพรีนกลุ่มที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Sulphur-modified หรือ Thiuram-modified หรือ S-grades) กลุ่มนี้จะใช้กำมะถันเป็นตัวควบคุมขนาดโมเลกุล โดยกำมะถันที่เติมเข้าไปจะทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วม (Copolymerization) และแทรกอยู่ในสายไฮโปลิเมอร์ในรูปของ  $S_x$  ( $x = 2-6$ ) จากนั้นจึงเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทูเรมไดซัลไฟด์ลงไป ตัวอย่างยางคลอโรพรีนของบริษัท DuPont ได้แก่ยางชนิด G

2. ยางคลอโรพรีนกลุ่มที่ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Non-sulphur-modified หรือ General purpose grades) สามารถแบ่งเป็น 2 เกรดด้วยกันคือ

- เกรด Mercaptan modified (M-grades) ยางกลุ่มนี้จะใช้สาร n-dodecyl mercaptan เติมลงไปเพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลยางกลุ่มนี้ ให้มีความหนืดมูนนี้ (ML 1+4 ที่ 100 °C) ประมาณ 30-140 MU และการเกิดผลึกมีตั้งแต่เล็กน้อยไปจนถึงปานกลาง การผสมกับสารเคมีอื่น ๆ จะสามารถเกิดได้เร็วกว่าและเกิดความร้อนต่ำกว่า

- เกรด Xanthogen-Disulfide (XD-grades) เป็นกลุ่มที่ผลิตด้วยโมดิไฟเออร์ชนิดพิเศษ (special modifier) ยางกลุ่มนี้จะมีความหยุ่นตัวต่ำหรือมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง CR เกรด M ทำให้สามารถทำการอัดรีด (Calendar) หรือการเอ็กซ์ทรูดได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ความดันระหว่างการผสมยังลดลง ส่งผลทำให้คอมพาวด์มีความต้านทานการสกรอชดีขึ้น



3. ยางคลอโรพรีนกลุ่ม Precrosslinked Grades เป็นเกรดที่ประกอบด้วยพอลิคลอโรพรีนที่สามารถละลายได้ (Soluble polychloroprene) และพอลิคลอโรพรีนที่เชื่อมโยงพันธะ (Crosslinked polychloroprene) ซึ่งการทำ Precrosslink จะช่วยลดความเป็นยางหรือความหยุ่นตัวของยางดิบหรือยางคอมพาวด์ลง ทำให้ยางคลอโรพรีน กลุ่มนี้มีการบวม (Swell) ต่ำหลังจากการเอ็กซ์ทรูด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีผิวเรียบ ซึ่งปริมาณการ Precrosslink ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อสมบัติของยางคอมพาวด์และช่วยปรับปรุงการวัลคาไนซ์ [17]

การเลือกใช้ยางคลอโรพรีนเกรดต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการคอมพาวด์และสมบัติการวัลคาไนซ์ที่ต้องการเป็นสิ่งสำคัญ ตารางที่ 2.4 แสดงยางคลอโรพรีนเกรดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับสมบัติของยางคอมพาวด์ที่ต้องการ ขณะที่ ตารางที่ 2.5 เป็นการเลือกเกรดยางคลอโรพรีนให้ได้สมบัติการวัลคาไนซ์ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2.4 สมบัติในการคอมพาวด์ของยางคลอโรพรีนเกรดต่าง ๆ [1]

สมบัติ	เกรด
ช่วยในการผลิตดีที่สุดใน	เกรดที่มีความหนืดต่ำหรือเกรด Precrosslinked
การบดดีที่สุดใน	เกรด S
การเหนียวติดดีที่สุดใน	เกรด S ที่เป็นเกรดที่มีการตกผลึกต่ำ
ความแข็งแรงมากที่สุดใน	เกรดที่ตกผลึกเร็วปานกลาง เกรดที่มีความหนืดสูง
คอมพาวด์มีการยืดตัวได้สูง	เกรดที่มีความหนืดสูงหรือเกรด XD
ความสามารถในการเอ็กซ์ทรูดดีที่สุดใน	เกรด Precrosslinked

ตารางที่ 2.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคลอโรพรีนเกรดต่าง ๆ [1]

สมบัติ	เกรด
ความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดได้ดีที่สุดใน	เกรด M และเกรด XD
การเสีयरูปถาวรหลังกดอัดต่ำที่สุดใน	เกรด M
ความทนต่อความร้อนได้ดีที่สุดใน	เกรด M
ความทนต่ออนุมูลมีต่ำได้ดีที่สุดใน	เกรด M และเกรด XD ที่มีการตกผลึกช้า
ความยืดหยุ่นสูงสุด	เกรด S
สมบัติเชิงพลวัตดีที่สุดใน	เกรด S และเกรด XD
การยึดติดกับเส้นใยและโลหะได้ดีที่สุดใน	เกรด S

ตารางที่ 2.6 เกรดยางคลอโรพรีนของบริษัทต่าง ๆ [1]

บริษัทผลิต	DuPont		Bayer		Denki Kagaku Kogyo		Enichem		Showa DDE Mfg		TOSOH Corporation	
	Neoprene	M.V.	Neoprene	M.V.	Denka Chloroprene	M.V.	Butaclor	M.V.	Neoprene	M.V.	Skyprene	
ชื่อทางการค้า	เกรด	M.V.		M.V.	เกรด	M.V.	เกรด	M.V.	เกรด	M.V.	M.V.	
		เกรด	M.V.								เกรด	M.V.
<b>กลุ่มที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ(sulfur-modified grades)</b>												
ชนิดที่ตกผลึกช้า	GW	45	510	45	DCR	45	SC-202	45	GW	43	R-10	45
	GRT	45	611	45	PS-40	50	SC-10	43	GRT	47	-	-
	GNA	50	712	43	PM-40	50	-	-	GS	47	R-22	45
<b>กลุ่มที่ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ(general purpose grades)</b>												
ชนิดที่ตกผลึกช้า	WRT-M1	38	110	45	S-40V	48	MC-10	45	WRT	45	B-5	49
	WRT-M2	46	111	42	S-40V41	48	MC-20	46	WX-J	46	B-5A	45
	W	49	210	45	M-40/41	48	MC-30	46	W	46	B-30	49
ชนิดที่ตกผลึกปานกลาง	WM-1	38	211	39	M-30/31	38	MC-31	37	WM-1	37	B-31	40
	<b>กลุ่ม Precrosslinked</b>											
ชนิดที่ตกผลึกช้า	WB	47	214	55	ES-70	75	DE-102	48	WKK	80	E-20H	64
	TRT	47	215	50	ES-40	43	-	-	TRT	46	E-20H	48
ชนิดที่ตกผลึกปานกลาง	TW	48	235	95	MT-40	48	DE-302	48	TW	46	E-33	48
	TW-100	93			MT-100	95	DE-305	92	TW-100	95		

### 2.3.4 สมบัติของยางคลอโรพรีนและการนำไปใช้งาน

สมบัติโดยทั่วไปของยาง CR [1, 14]

- อุณหภูมิการใช้งาน ยาง CR สามารถใช้งานได้ที่ อุณหภูมิ  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - ความเหนียวติดกัน (Tack) ยาง CR มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน จึงไม่เกิดปัญหารอยต่อของชิ้นงานระหว่างการขึ้นรูป
  - ความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด (Tensile and Tear Strength) เนื่องจากโมเลกุลของยาง CR มีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้สามารถเกิดผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ยางชนิดนี้จึงสามารถทนต่อแรงดึงได้ดี
  - การติดไฟ (Flammability) ยางชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นในด้านการลามไฟ นั่นคือ เปลวจะดับเอง หลังจากที่น่าเปลวไฟออกไป (Self-Extinguish) เนื่องจากยางชนิดนี้มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (ทั้งนี้การดับไฟจะขึ้นกับปริมาณของคลอรีน)
  - ความทนต่อการเสื่อมสภาพ (Aging properties) ยาง CR สามารถทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากอากาศ โอโซน ความร้อน และแสงแดดได้ดี เนื่องจากยางชนิดนี้มีคลอรีนอะตอมเป็นองค์ประกอบ
  - ความเป็นฉนวน (Insulation) ยางชนิดนี้มีค่าความเป็นฉนวนต่ำ ไม่เหมาะกับการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก สายไฟ หรือสายเคเบิล แต่เหมาะสมในการออกแบบมาเป็นแผ่นยางนำไฟฟ้าหรือกึ่งนำไฟฟ้า
  - ความทนต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and Chemical Resistance) ยาง CR สามารถทนการบวมพองต่อน้ำมัน และกรด-ด่าง เจือจาง ได้ปานกลาง ถึงดี
- ยางคลอโรพรีนมีสมบัติที่หลากหลาย โดยโดดเด่นทั้งในเรื่องของการทนต่อสภาพอากาศ ความร้อน โอโซน และแสงแดด อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในเรื่องของการป้องกันการลามไฟ ดังนั้น ยาง CR จึงนิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ อาทิ เช่น แผ่นยางเรียบ, แผ่นยางมีลาย, ซีล, ประเก็น, ท่อยาง, ยางไดอะแฟรม, ฟองน้ำ อีกทั้งยังสามารถนำมาเสริมแรงเป็นแผ่นยางเสริมผ้าใบได้อีกด้วย

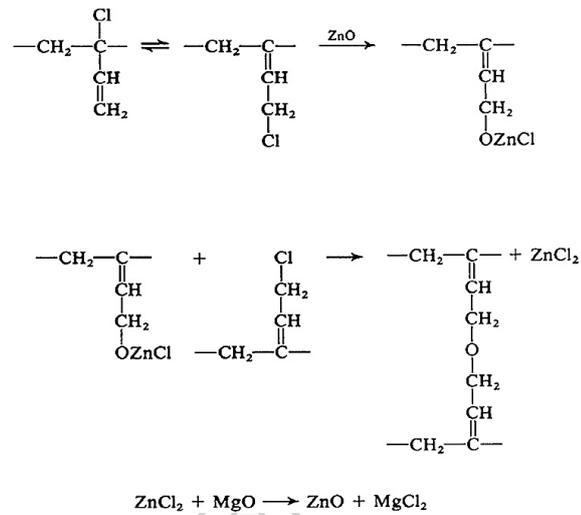
### 2.3.5 การผสมสารเคมียางในยางคลอโรพรีน

ยางคลอโรพรีนมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากยางไดอีนชนิดอื่น ๆ ในด้านการคงรูปเพราะแม้ว่ายางชนิดนี้จะมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลก็ตาม แต่อะตอมของคลอรีนที่มีอยู่ในโมเลกุลซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (EN) สูงจะเข้าไปดึงอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณพันธะคู่ ทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่นั้นมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ลดลง เป็นเหตุให้ไม่สามารถคงรูปยางคลอโรพรีนได้ด้วยการใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปเหมือนกับที่ใช้ในการคงรูปยางธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ยางชนิด

นี้จึงไม่สามารถใช้ระบบการคงรูปร่างกำมะถันหรือเปอร์ออกไซด์ได้ แต่จะใช้โลหะออกไซด์ในการคงรูปร่าง โดยทั่วไปจะใช้ระบบการคงรูปที่ประกอบด้วย MgO และ ZnO เนื่องจากยางคลอโรพรีนดูดซึมน้ำได้ค่อนข้างมาก ดังนั้นในการใช้งานบางประเภทจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของยาง คลอโรพรีนให้มีการดูดซึมน้ำต่ำลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ออกไซด์ของตะกั่ว เช่น PbO หรือ Pb<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (ในปริมาณ 20 phr หรือสูงกว่านี้) แทนการใช้ MgO และ ZnO

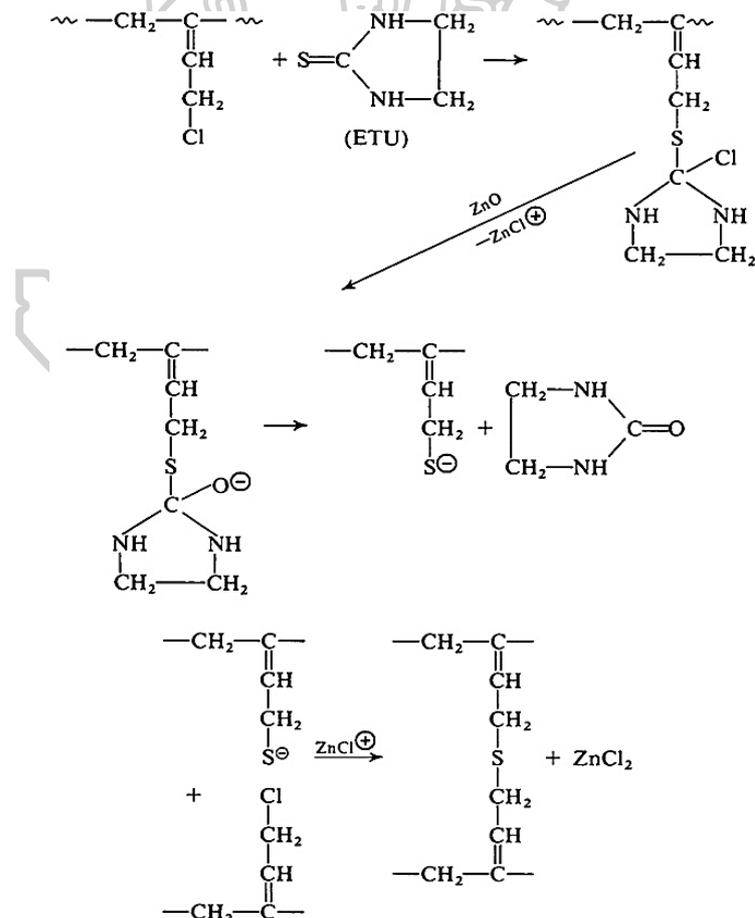
สำหรับยางคลอโรพรีนบางเกรดที่มีกำมะถันหรือไฮยูเรมเป็นองค์ประกอบ การใช้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว พบว่าการคงรูปก็สามารถให้อัตราเร็วในการคงรูปที่สูงเพียงพอ การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นลงไปแม้ว่าจะทำให้อัตราเร็วในการคงรูปของยางสูงขึ้นแต่ในเวลาเดียวกันก็เพิ่มโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดยางตายในระหว่างกระบวนการผลิตได้เช่นกัน ในทางตรงกันข้ามสำหรับยางคลอโรพรีนเกรดที่มีเมอแคพเทนเป็นองค์ประกอบ นอกจากโลหะออกไซด์แล้วจำเป็นต้องเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นลงไป ซึ่งสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไปกับยางชนิดอื่น ๆ นั้นจะไม่มีประสิทธิภาพกับยางคลอโรพรีน สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากกับยางคลอโรพรีน ได้แก่ Ethylene thiourea (ETU) (ปริมาณการใช้โดยประมาณ ตั้งแต่ 0.5-1.0 phr) แต่ว่าชนิดนี้มีความเป็นพิษสูง ปัจจุบันนิยมใช้ Diethylene thiourea (DETU) หรือสารประกอบจำพวก thioketones และ thiadiazines แทน

นอกจากยางคลอโรพรีนจะมีระบบการคงรูปที่แตกต่างจากยางชนิดอื่น ๆ แล้ว ยางคลอโรพรีนยังมีโอกาสที่จะตายได้ง่ายในระหว่างการแปรรูป ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผสมยางจะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิของการผสมให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ (ควรใช้น้ำหล่อเย็นตลอดเวลา) และควรใช้ระยะเวลาในการผสมให้สั้นที่สุด โดยทั่วไปอุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมไม่ควรสูงเกิน 130 °C ส่วนลำดับการเติมนั้นก็ควรเติม MgO ในตอนต้นของการผสมเพื่อป้องกันการเกิดยางตาย แต่ ZnO และสารตัวเร่งปฏิกิริยาควรเติมในตอนท้ายของการผสม โดยการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีน เกรด mercptan ด้วย ZnO และ MgO หลังจากอะตอมคลอรีนหลุดออกจากสายโซ่ ZnO จะเกิดการเชื่อมโยงผ่านการจัดเรียง allylic carbon ของไอโซเมอร์ในตำแหน่ง 1,2 แสดงดังรูป 2.9 โดยแมกนีเซียมออกไซด์จะทำหน้าที่จับกับกรดที่เกิดขึ้น [13, 18, 19]



รูปที่ 2.9 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วย ZnO [13]

การเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงโดยใช้ Organic accelerators ตัวอย่างเช่น Ethylene thiourea แสดงดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนเมื่อเติม Ethylene thiourea (ETU) [13]

## 2.4 ความรู้เกี่ยวกับโฟม

โฟม เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโพรงอากาศหรือรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อ ในการผลิตจะใช้สารฟุ้ง (Blowing agent) ทำให้พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวและลดความหนาแน่นโดยรวมลง โฟมจึงมีน้ำหนักเบา และมีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ โดยมีได้ตั้งแต่โฟมชนิดแข็งไปจนถึงชนิดยืดหยุ่น ซึ่งในบางกรณี เนื้อโฟมอาจมีสารอื่นเติมลงไป เช่น สารเสริมแรง (Reinforcing agent) เช่น เส้นใย (Fiber) หรือ สารตัวเติม (Filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ), เม็ดแก้ว (Glass microsphere) และแป้ง (Starch) ต่าง ๆ เป็นต้น [20, 21]

### 2.4.1 การจำแนกประเภทของโฟม (Foam Classification)

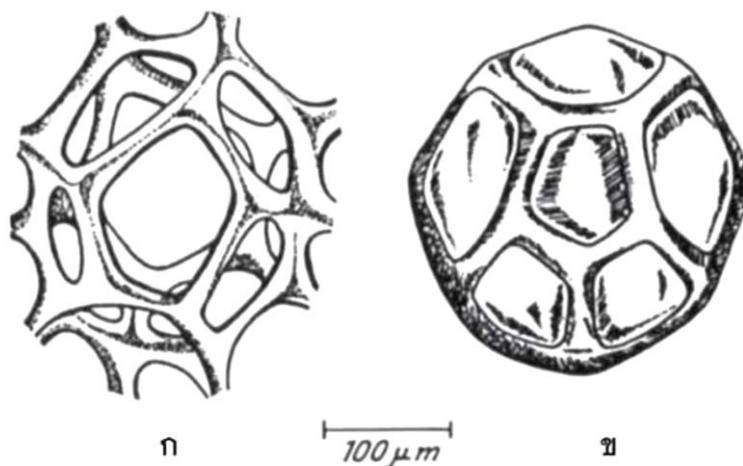
โฟมสามารถจำแนกได้ในหลายลักษณะดังต่อไปนี้

#### 1. ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะของเซลล์

1.1) โฟมเซลล์เปิด (Open-Cell Foam) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ซึ่งก๊าซสามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น ๆ ได้ (รูปที่ 2.11) โดยทั่วไป โฟมเซลล์เปิดจะเตรียมจากเทคนิคความดันต่ำ (Low-pressure technique) ภายใต้ภาวะบรรยากาศ โฟมที่มีสัญญาณโครงสร้างแบบนี้มีสมบัติยืดหยุ่น ทำให้เหมาะในการใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ ที่นอน บรรจุก๊าซ และวัสดุกันกระแทก เป็นต้น

1.2) โฟมเซลล์ปิด (Closed-Cell Foam) สัญญาณโครงสร้างของเซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่า หน้าต่างเซลล์ ทำให้ก๊าซไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ แต่การเคลื่อนที่ของก๊าซจะกระทำโดยการแพร่ผ่านผนังเซลล์ (รูปที่ 2.11) โดยปกติโฟมเซลล์ปิดจะเตรียมโดยเทคนิคที่ใช้ความดันสูง (High-pressure technique) และโฟมแบบนี้จะแข็งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ เหมาะในการนำไปใช้งานเป็นพวกตัวฉนวนความร้อน ลูกฟุ้งลอย และฟองน้ำในเสื้อชูชีพ เป็นต้น

ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะพบโครงสร้างของเซลล์ทั้ง 2 ชนิดอยู่ร่วมกัน กล่าวคือ ไม่มีโฟมใดที่ได้เป็นโฟมเซลล์เปิดหรือโฟมเซลล์ปิดโดยสมบูรณ์ ความแตกต่างระหว่างโฟมเซลล์เปิดและโฟมเซลล์ปิด โดยโฟมเซลล์เปิดจะประกอบด้วยโครงสร้างเป็นแกนคล้าย ๆ เสาค้ำหรือแกนค้ำ (Strut) ขณะที่โฟมเซลล์ปิดจะมีหน้าต่าง (Window) หรือเยื่อบาง ๆ (Membrane) เชื่อมปิดระหว่างแกนค้ำ พฤติกรรมเชิงกลของระบบขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโฟมเซลล์เปิดต่อโฟมเซลล์ปิด เช่น ถ้าโฟมมีสัดส่วนของโฟมเซลล์ปิดที่สูงจะทำให้โฟมมีค่าความแข็ง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) ที่สูง



รูปที่ 2.11 สัมฐานโครงสร้างของโฟม (a) เซลล์เปิด และ (b) เซลล์ปิด [20]

## 2. ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

2.1) โฟมยืดหยุ่น (Flexible Foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass-transition temperature:  $T_g$ ) ที่ต่ำ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่าย เช่น โฟมยาง (Elastomeric foam) โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีการเติมพลาสติกไซเซออร์ (Plasticized Polyvinyl Chloride, PPVC) และโฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่น (Polyurethane Elastomer) เป็นต้น

2.2) โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะอยู่ในสถานะผลึก (Crystalline state) หรือถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous state) จะมีอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้ว (Glass transition temperature:  $T_g$ ) ที่สูง มีลักษณะที่แข็งไม่คืนตัวเมื่อถูกกดหรือบีบ เช่น โฟมพอลิโอเลฟิน (Polyolefin foam) โฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene foam) โฟมพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate foam) โฟมฟีนอลิก (Phenolic foam) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (Rigid polyurethane foam) เป็นต้น

2.3) โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-Rigid Foam) มีลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น กล่าวคือโฟมชนิดนี้จะมีมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ที่สูงกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น แต่มีพฤติกรรมทางความเค้นความเครียด (Stress-strain behavior) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง

## 3. ประเภทของโฟมจำแนกตามประเภทของพลาสติก

3.1) โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset Foam) เป็นโฟมพลาสติกที่เตรียมจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต จึงสามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ยาก เพราะต้องอาศัยการรีไซเคิล

ด้วยกระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อน โฟมชนิดนี้ที่รู้จักกันดี ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน โฟมอีพอกซี และโฟมฟีนอลิก เป็นต้น

3.2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Foam) โฟมประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ง่าย เช่น โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ และโฟมพอลิเอทิลีน เป็นต้น

#### 2.4.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam Formation)

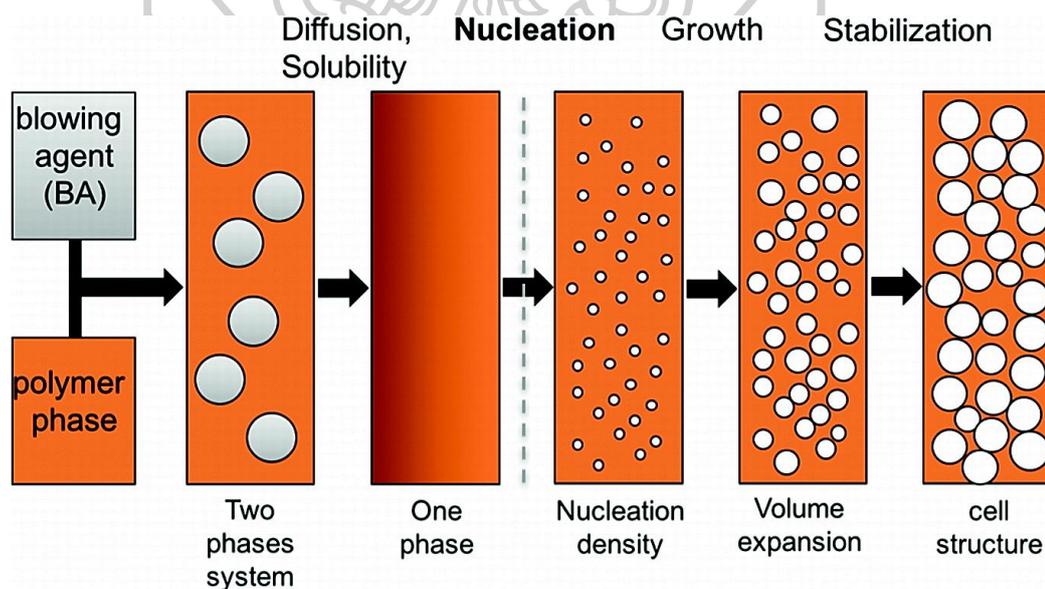
โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธีโดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือกระบวนการขยายตัว (Expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

##### ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (Bubble Formation or Initiation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว กระบวนการการเกิดฟองนี้จะเรียกว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ

1) การเกิดนิวเคลียสในตนเอง (Self-nucleation) คือ ฟองก๊าซจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์ เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

2) กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Process) คือ ฟองก๊าซจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (Liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่าสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) [21-24]



รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการเกิดโฟม [21]



การทำให้พอลิเมอร์เกิดฟองก๊าซในโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

1) การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมี จากการผสมสารฟูที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์ และให้ความร้อนทำให้สารฟูสลายตัวเกิดเป็นก๊าซขึ้น เช่น ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นต้น

2) การเกิดฟองก๊าซเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ก๊าซจะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งก๊าซจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) และการเชื่อมขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานเนต (Isocyanate) กับน้ำ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น

3) การลดความดัน เป็นการขยายตัวของก๊าซในเนื้อพอลิเมอร์ โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ ตัวอย่าง เช่น การอัดรีด (Extrusion) โฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS)

4) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อนกับสารที่เป็นของเหลว ตัวอย่างของสารฟูที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) เป็นต้น

5) การใช้ตัวเติมชั่วคราว วิธีนี้ไม่มีการผลิตก๊าซขึ้นแต่จะใช้อนุภาคของแข็งผสมกับพอลิเมอร์แล้วขึ้นรูปเป็นพลาสติกแข็ง จากนั้นจะ (Each) สารตัวเติมออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีเซลล์เปิดเกิดขึ้น วิธีนี้มักใช้ในการเตรียมโฟมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE foam) เนื่องจาก PTFE เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการขยายตัวได้ยาก

6) การเก็บกักก๊าซเชิงกล คือการทำให้เกิดฟองก๊าซ โดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว แล้วทำให้แข็งตัว โดยสารเร่งปฏิกิริยาและความร้อน ทำให้เกิดการกักฟองก๊าซไว้ในเนื้อพลาสติก วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่า และมีข้อเสีย คือโฟมที่ได้จะมีเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ

7) การเติมไมโครสเฟียร์เป็นการเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (Hollow microspheres) ในพอลิเมอร์ ซึ่งไมโครสเฟียร์ ดังกล่าวอาจเป็นเม็ดแก้วหรือเม็ดพลาสติก โดยส่วนใหญ่จะเป็นการผสมเม็ดฟีนอลิก (Phenolic spheres) ในพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ขณะเกิดการบ่ม (Curing)

## ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (Bubble Growth)

การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของก๊าซจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองก๊าซ ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองก๊าซหรือเซลล์ ( $\Delta P$ ) แรงตึงผิวที่สัมผัส ( $\gamma$ ) และรัศมีของฟอง ( $r$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.1

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.1)$$

ค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น (Growing) การแตกของผนังเซลล์ (Breaking the wall separating cells) หรือการแพร่ของสารฟูจากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังฟองที่มีขนาดใหญ่ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ 2.2

$$\Delta P_{1,2} = 2\gamma \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.2)$$

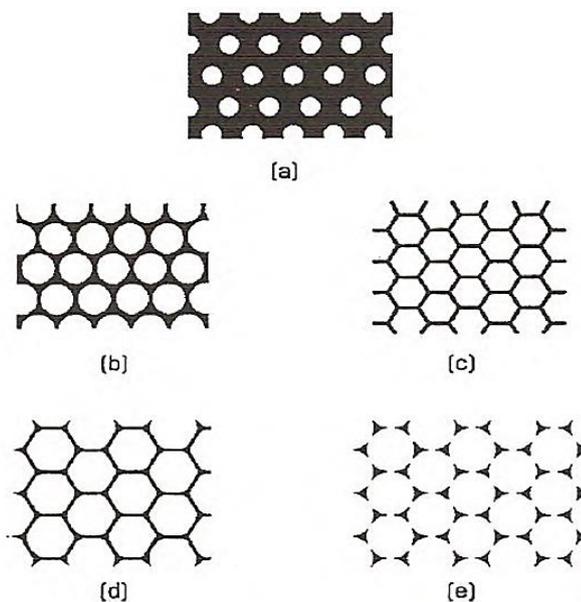
เมื่อ  $\Delta P_{1,2}$  คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟองเท่ากับ  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ

### ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรหรือการคงรูปของฟอง (Bubble Stability)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลว อาจจะไม่เสถียรและยุบตัว ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยหนึ่งคือการถ่ายเทของเหลว (Drainage) จากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (Cell junction) โดยขณะที่ฟองกำลังขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์ทำให้เกิดผนังเซลล์และสัน (Ribs) ของเซลล์ขึ้น เมื่อการขยายตัวเกิดต่อไปอีก ของเหลวจะเกิดการถ่ายเทไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์มากขึ้น ถ้าการถ่ายเทของเหลวในลักษณะนี้ยังคงเกิดต่อไปจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์และถ้าทำให้ระบบโฟมขณะนี้เสถียรจะทำให้ได้โฟมพลาสติกแบบเซลล์เปิด

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้ระบบโฟมเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม วิธีทำให้ภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการเกิดโฟมพอลิเมอร์ของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสภาพแก้ว เพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์จากชั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) การเติบโต (Growth) ของฟองก๊าซ และการขยายตัวของก๊าซในระบบพอลิเมอร์เหลวสามารถแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.13 (a) การเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลม (b) ฟองก๊าซเติบโตมากขึ้น ส่งผลให้โฟมมีความหนาแน่นลดลง (c) ฟองก๊าซขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้รูปร่างของฟองเปลี่ยนเป็นทรงสิบสองหน้าซึ่งแต่ละหน้าเป็นรูป 5 เหลี่ยม (Pentagonal dodecahedron) แต่หากมองเป็น 2 มิติจะเห็นเป็น 6 เหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Hexagonal honey comb) (d) โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็น

แบบเซลล์ปิดซึ่งอาจเกิดการแตก (Rupture) ของผนังเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น และ (e) ผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัณฐานโครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด [20, 24, 25]



รูปที่ 2.13 แผนภาพขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [24]

### 2.4.3 ประโยชน์และการใช้งานของโฟม

1. ฉนวนความร้อน (Thermal Insulation) ส่วนใหญ่จะพบในอุตสาหกรรมตู้เย็น ฉนวนความร้อนบนหลังคา ฝากระป๋องน้ำร้อน และในท่อบางประเภท ลักษณะของโฟมที่ใช้ในงานนี้มักเป็นโฟมชนิดเซลล์ปิด เช่น โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง
2. บรรจุภัณฑ์ (Packaging) เช่น ใช้เป็นกล่องโฟมใส่อาหาร (โฟมพอลิสไตรีน) โฟมกันกระแทกสำหรับบรรจุสินค้า
3. ทำเบาะหรือนวม (Cushioning) ส่วนมากจะเป็นโฟมชนิดยืดหยุ่น เช่น โฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น โฟมพอลิเอทิลีน เป็นต้น เพราะโฟมเหล่านี้มีความสามารถในการยืดหดที่สูง (high resilience) สามารถรับแรงและกระจายแรงได้ดี
4. วัสดุลอยตัว (Buoyancy) ตัวอย่างเช่น ฟองลอยบริเวณท่าเรือหรือในทะเล กระดานโต้คลื่น และเสื้อชูชีพ เป็นต้น
5. วัสดุดูดซับและป้องกันเสียง (Sound Absorption and Insulation) มักมีการใช้งานตามห้องอัดเสียง โรงภาพยนตร์ และห้องประชุมต่าง ๆ โดยโฟมที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

6. งานโครงสร้าง (Structure) เช่น ทำเฟอร์นิเจอร์ทำโครงสร้างของเครื่องบิน หรือยานอวกาศ เป็นต้น

7. การประยุกต์ใช้แบบอื่น ๆ เช่น ใช้เป็นไส้กรอง (Filter) ใช้ในงานถมที่ตามคอสะพาน และทำผ้าก๊อช (Gauze) เป็นต้น

## 2.5 ความรู้เกี่ยวกับสารฟลู (Blowing agent)

สารทำให้เกิดฟอง คือ สารที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงและปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อนหรือในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาคัลคาไนซ์ ก๊าซที่ปล่อยออกมาจะทำให้ยางมีรูพรุนหรือมีฟองกระจายอยู่ทั่วไปเรียกว่า ยางฟองน้ำ (Sponge) โดยสารเกิดฟอง (Blowing agent) นั้นสามารถเป็นได้ทั้งแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง โดยจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเกิดแก๊สกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ความดัน โดยเมื่อความดันลดลงแก๊สจะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นเซลล์ขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์ สามารถแบ่ง Blowing agent ได้เป็น 2 แบบคือ Physical blowing agent และ Chemical blowing agent [20-22]

### 2.5.1 Physical blowing agent (PBAs)

Physical blowing agent คือของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำซึ่งกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างแบบโฟม PBAs มักเป็นของเหลวที่มีราคาถูก และมีข้อดี คือเมื่อกลายเป็นก๊าซจะไม่เหลือสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ซึ่งอาจมีผลต่อสีและสมบัติของพอลิเมอร์ได้ แต่ PBAs มีข้อเสีย คือเก็บรักษายากจึงต้องมีอุปกรณ์พิเศษเข้ามาช่วยเพื่อใช้ในการผลิตโฟม โดยการใช้ PBAs ในการผลิตโฟมนั้นมี 2 วิธี คือ

1. ฉีดก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เข้าไปในพอลิเมอร์ที่มีความดันสูง โดยแก๊สจะเกิดการขยายตัวเมื่อความดันของระบบลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวตาย

2. เติมของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำลงไปผสมในพอลิเมอร์ ซึ่งของเหลวที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน ฮาโลจิเนตไฮโดรคาร์บอน (ประกอบด้วย Freons และ CFC) และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ

ตารางที่ 2.7 สมบัติของ PBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [24]

Physical Blowing agent	Molecular weight (g mol <sup>-1</sup> )	Density at 25 °C (g/cm <sup>3</sup> )	Boiling point (°C)
Butanes	58.00	0.579	-0.5
Pentanes	72.15	0.613	30-38
Hexanes	86.17	0.658	65-70
Isohexanes	86.17	0.655	55-62
Heptanes	100.20	0.68	96-100
Benzenes	78.11	0.874	80-82
Toluene	92.13	0.862	110-112
Methyl chloride	50.49	0.952	-23.8
Methylene chloride	84.94	1.325	40.0
Trichloroethylene	134.40	1.466	87.2
Dichloroethylene	98.97	1.245	83.5
Trichlorofluoromethane (CCl <sub>3</sub> F)-Freon 11	137.38	1.476	23.8
Dichlorodifluoromethane (CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )-Freon 12	120.93	1.311	-29.8
Trifluorochloromethane (CClF <sub>3</sub> )-Freon 13	104.47	0.85	-81.4

### 2.5.2 Chemical blowing agents (CBAs)

Chemical blowing agents คือ สารประกอบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนแล้วปลดปล่อยก๊าซออกมาเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนการเกิดปฏิกิริยากับ CBAs ด้วยกันเองหรือการเกิดปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่น ๆ CBAs ที่ใช้กันอยู่ ส่วนมากจะอยู่ในรูปของแข็ง โดยจะแบ่ง CBAs เป็น 2 ประเภทคือ

- Exothermic chemical blowing agents เป็น CBAs ที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซไนโตรเจน

- Endothermic chemical blowing agents เป็น CBAs ที่จะดูดความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดย CBAs ทั้งสองแบบที่ใช้กันมากจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. สารประกอบที่ปล่อยก๊าซออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับได้ CBAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ได้แก่สารประกอบจำพวก Ammonium salt ของ Inorganic, Organic acids, สารประกอบของ Bicarbonates, Carbonates ของ Alkaline และ Alkaline earth metals โดยการสลายตัวของสารประกอบประเภทที่ปล่อยก๊าซออกมาแสดงดังสมการที่ 2.3



จากสมการที่ 2.3 คือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน จากสมการปฏิกิริยาผันกลับได้ทำให้ปริมาณก๊าซในระบบลดลงซึ่งอาจส่งผลให้แรงดันภายในเซลล์ของโพลีเมอร์เกิดการหดตัว

2. สารประกอบที่ปล่อยก๊าซออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับไม่ได้ CBAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ได้แก่สารประกอบจำพวก Aromatic, Aliphatic-aromatic, Aliphatic-azo, Diazo และ Diazonamides และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ จะเกิดการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงแสดงดังสมการที่ 2.4



ส่วนมากก๊าซที่ได้จะเป็น  $N_2$ ,  $CO_2$  และ  $NH_3$  โดยปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนตาม สมการที่ 2.4 นั้นมักจะเป็นปฏิกิริยาแบบ First-order แบบผันกลับไม่ได้

3. CBAs ที่อยู่ในรูปของผสมที่ปลดปล่อยก๊าซออกมาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ระหว่างแต่ละองค์ประกอบ โดยปฏิกิริยาการปลดปล่อยก๊าซของผสมจะแสดงในสมการที่ 2.5



ตัวอย่างของ CBAs ชนิดนี้คือปฏิกิริยาระหว่าง Sodium nitrile กับ Ammonium chloride และปฏิกิริยาระหว่าง Acid ทั้งที่เป็นกรดอินทรีย์ เช่น Stearic acid และ Oleic acid เป็นต้น และทั้งที่เป็นกรดอนินทรีย์ เช่น Hydrochloric sulfuric acid และ Orthophosphoric acid เป็นต้น กับ Carbonates หรือ กับโลหะหมู่ 2 และ 3 ในตารางธาตุ โดยสมบัติของ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงดังตารางที่ 2.8 [20, 22]

ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติของ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [24]

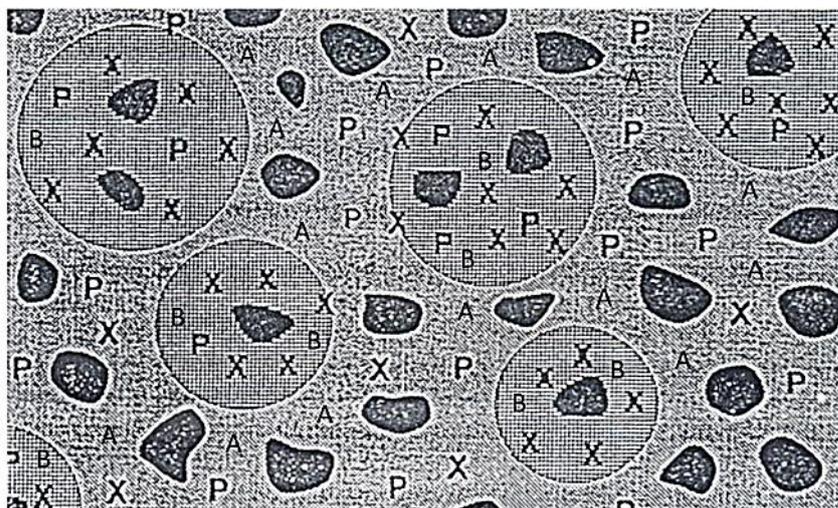
Chemical foaming agents	Decomposition range in air (°C)	Gas Yield (cm <sup>3</sup> /g)	Used mainly with
Azodicarbonamide	205-215	220	PVC, PE, PP, PS, ABS
Modified azodicarbonamide	155-220	150-220	PVC, PE, PP, EVA, PS
4,4'-Oxybis-(benzenesulfonyl hydrazide)	150-160	125	PVC, PE, EVA
Diphenylsulfone 3,3'-disulfohydrazide	155	110	PVC, PE, EVA
Diphenylene oxide 4,4'-disulfohydrazide	175-180	120	PVC, PE, EVA
Trihydrazinotriazine	275	225	PE, PP, ABS, PA
p-Toluenesulfonyl semicarbazide	228-235	140	PE, PP, PS, ABS, PA
5-Phenyltriazole	240-250	190	ABS, PPO, PC, PA, PBTP
Isatoic anhydride	210-225	115	PS, ABS, PA, PPO

## 2.6 ยางผสม (Rubber blend)

การเตรียมยางผสมเป็นการปรับปรุงหรือพัฒนาให้ได้อย่างที่มีสมบัติดีขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในงานเฉพาะด้านได้ ซึ่งในการเตรียมยางผสมนั้น จะเป็นการนำยางสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องผสมแบบเปิดหรือแบบปิด แล้วนำยางผสมที่ได้ไปวัลคาไนซ์เพื่อให้ยางคงรูปหรือให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง ซึ่งในการเตรียมยางผสมจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของยางผสม ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางผสม ได้แก่

1) อัตราส่วนของยางแต่ละชนิดในยางผสม สามารถควบคุมได้ง่าย โดยจะแบ่งลักษณะสัณฐานวิทยา (Phase morphology) ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1) ชนิดของเฟส (Phase type) จะมี 2 ชนิด คือ เฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) และเฟสกระจาย (Dispersion phase) กล่าวคือ อยางชนิดหนึ่งจะกระจายตัวอยู่ในอยางอีกชนิดหนึ่ง โดยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอยางแต่ละชนิดที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอยางผสมที่ประกอบด้วยอยางสองชนิด คือ A และ B, สารตัวเติม (C), พลาสติไซเซอร์ (P) และการเชื่อมโยง (X) ที่เกิดขึ้น [26]

1.2) ขนาดของเฟส (Phase size) จะควบคุมได้ค่อนข้างยาก ขึ้นอยู่กับการเตรียมอยางผสม โดยในการผสมจะใช้แรงเฉือนสูง เพื่อให้ได้เฟสกระจายที่มีขนาดเล็ก แต่ในอยางบางชนิดสายโซ่จะขาดในระหว่างที่ทำการผสม ซึ่งจะทำให้ผสมได้ง่ายขึ้น (แต่เมื่อผสมนานขึ้นเฟสกระจายจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการกำหนดเวลาในการผสม เพราะในขณะที่ทำการผสมอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น

2) แรงตึงผิวระหว่างเฟส (Interfacial tension) จะเป็นตัวกำหนดขนาดของเฟสกระจาย กล่าวคือ ถ้าแรงตึงผิวระหว่างเฟสมีค่าต่ำ เฟสกระจายก็จะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงเฉือนที่ใช้ อยางบางชนิด (เช่น NR, SBR, BR) เป็นอยางที่ไม่มีขั้ว มีค่าคงที่ของการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกัน และมีค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสต่ำ ถ้าค่าคงที่ของการละลายของอยาง 2 ชนิด มีค่าแตกต่างกันมากจะมีค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสสูง และเฟสกระจายจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถผสมอยางทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกันได้

2.1) การยึดติดระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) และการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของอยางทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวระหว่างเฟส ถ้าค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสมีค่าสูงจะทำให้การผสมอยางทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันทำได้ยาก และโอกาสที่จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของอยางทั้งสองชนิดก็จะน้อยลง ทำให้อยางทั้งสองชนิดหลุดหรือแยกจากกันได้ง่ายขึ้น



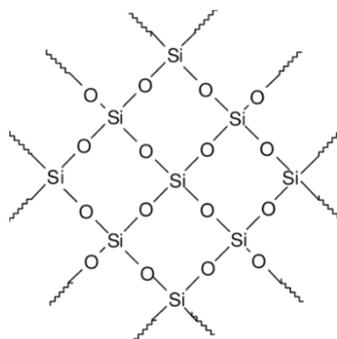
3) การกระจายตัวของสารตัวเติม สารตัวเติมจะกระจายตัวอยู่ระหว่างทั้งสองเฟสอย่างสม่ำเสมอ สารตัวเติมที่ใช้ทั่วไป เช่น เขม่าดำ จะเตรียมให้อยู่ในลักษณะของมาสเตอร์แบทช์ ซึ่งจะควบคุมปริมาณของเขม่าดำได้ง่าย โดยปกติยางจะทำปฏิกิริยากับผิวของเขม่าดำได้ดีมาก แต่ในยางผสมบางชนิดเขม่าดำจะกระจายได้ค่อนข้างยาก

4) การกระจายตัวของพลาสติกไซเซเซอร์ จะมีผลต่อสมบัติของยางผสมเช่นกัน โดยที่พลาสติกไซเซเซอร์จะกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ แต่จะกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องมากกว่า

5) การกระจายตัวของการเชื่อมโยง ถ้าการเชื่อมโยงระหว่างเฟสในยางผสมไม่สม่ำเสมอ จะทำให้สมบัติทางกายภาพของยางผสมมีค่าต่ำ สาเหตุที่ทำให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีตำแหน่งที่จะเกิดการเชื่อมโยงแตกต่างกันมากเกินไป ดังนั้นในยางที่มีความไม่อมัตว์สูง จึงต้องเติมซัลเฟอร์ลงไปเพื่อช่วยในการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง เช่น ซัลเฟอร์ สารตัวเร่ง และสารประกอบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์ ยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของการเชื่อมโยง (การกระจายตัวของการเชื่อมโยงสามารถนำไปศึกษา ลักษณะความหนาแน่นของการเชื่อมโยงได้) [3, 26]

## 2.7 นาโนซิลิกา (Nanosilica)

ซิลิกอนไดออกไซด์ หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า ซิลิกา เป็นสารประกอบของซิลิกอน และออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสี หรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่นและรส พบมากในดิน หิน และเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน อาทิ เป็นสารดูดซับความชื้น เป็นสารเพิ่มความเงา เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น และเป็นวัสดุที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติและเกิดจากการสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.15 ซิลิกาจะปรากฏอยู่ในรูปแบบของผลึก และมักอยู่ในรูปแบบของควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างลักษณะทางกายภาพของซิลิกานั้น สามารถแบ่งได้เป็นสามแบบ คือ ผลึก (crystalline) อสัณฐาน (amorphous) และ อสัณฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous) วัสดุนาโนซิลิกาโดยทั่วไปแล้วมีรูปแบบเป็นอสัณฐานสังเคราะห์ หรือที่เรียกว่า synthetic amorphous silica (SAS) โดยได้มาจากวิธีการสังเคราะห์ 3 วิธี ดังนี้ [25, 27]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างทางเคมีของซิลิกา [27]

### 1. วิธีการสังเคราะห์โดยให้ความร้อน (Thermal route)

โดยมาจากการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในสถานะก๊าซของสารคลอโรซิลเลน (Chlorosilanes) ภายใต้เปลวไฟของออกซิเจน หรือ ไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส

### 2. วิธีการสังเคราะห์โดยวิธีเปียก (Wet route)

โดยการตกตะกอนของซิลิกา และซิลิกาเจลหรือซิลิกาแอโรเจล ซึ่งเกิดจากการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และเกิดการตกตะกอนของ synthetic amorphous silica (SAS) จากสารละลายไฮเดียมซิลิเกต โดยซิลิกาที่ได้จะอยู่ในรูปแบบบอัสฐาน

### 3. วิธีการสังเคราะห์โดยวิธีซิลิกาโซล (silica sols)

สังเคราะห์โดยวิธีซิลิกาโซล (Silica sols) หรือที่เรียกว่า Colloidal silica โดยซิลิกาโซลเป็นซิลิกาที่อยู่ในรูปแบบบอัสฐานที่มีกระจายตัวในของเหลว โดยทั่วไปคือ น้ำ โดยซิลิกาโซลนี้เกิดจากการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon tetrachloride) ในน้ำ หรือในสารละลายที่เป็นพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของสารละลายไฮเดียมซิลิเกตวิธีการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกาคือ วิธีเปียก (ตกตะกอน) และวิธีให้ความร้อน โดย Synthetic amorphous silica ที่ได้จากสองวิธีนี้จะมีลักษณะสมบัติที่ต่างกันจึงมีรหัสของ CAS No. ที่แตกต่าง ซิลิกาในรูปแบบ amorphous silica จะมีขนาดเล็กในช่วง 100-1000 นาโนเมตรและมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มจึงเป็นที่เรียกกันในนามของ อนุภาคนาโนซิลิกา (Silica nanoparticles, SNPs) ในปัจจุบันได้มีการผลิตให้ SAS มีขนาดเล็กมากขึ้น โดยขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกาในปัจจุบันมีขนาดเล็กถึง 10-25 นาโนเมตร การสังเคราะห์ด้วยการให้ความร้อนทำให้สามารถผลิตอนุภาคนาโนซิลิกาได้เล็กถึง 2 นาโนเมตร ขนาดของรูพรุนของนาโนซิลิกามักอยู่ในช่วง Mesoporous ซึ่งมีขนาดประมาณ 2-50 นาโนเมตร หรืออาจอยู่ในรูปไม่มีรูพรุนได้ อนุภาคนาโนซิลิกาไม่ละลายน้ำ เมื่อปรากฏในน้ำจะอยู่ในรูป  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  โดยลักษณะพื้นผิวของซิลิกาจะเป็นลักษณะมีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) หรือมีความเป็นขั้วสูง ซึ่งสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีพันธะกับซิลิกอน หรือที่

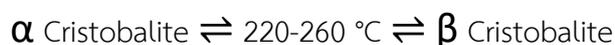
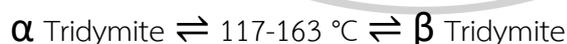
เรียกกันว่าเป็นของกลุ่ม Silanols ในอนุภาคซิลิกา ซึ่งกลุ่มนี้จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนร่วมกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคซิลิกามีลักษณะสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี ซึ่งลักษณะสมบัตินี้ได้ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่าง ๆ

### 2.7.1 รูปแบบซิลิกา

1. ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) เป็นซิลิกาที่พบในรูปแบบสินแร่ มีการจัดเรียงอะตอมของโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ และต่อเนื่องมีรูปร่างเป็นระบบผลึกที่แน่นอนภายใต้ความดันปกติ มี 3 รูปแบบ

- ควอร์ตซ์ (Quartz) เป็นรูปที่พบมากที่สุด อุณหภูมิเสถียรน้อยกว่า 870 องศาเซลเซียส
- ไทรดิไมท์ (Tridymite) อุณหภูมิเสถียรที่ 870-1,470 องศาเซลเซียส
- คริสโตบาไลท์ (Cristobalite) อุณหภูมิเสถียรที่ 1,470 องศาเซลเซียส และหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,713 องศาเซลเซียส

ผลึกทั้งสามรูปนี้ สามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้โดยการให้ความร้อนหรือลดอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง (Inversion) นี้มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะมีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างใหม่ ส่วนแบบที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็ว พันธะเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้เร็ว โดย  $\alpha$ -quartz ที่อุณหภูมิ 573 °C จะเปลี่ยนเป็น  $\beta$ -quartz ได้อย่างรวดเร็ว ส่วน Quartz ที่มีความบริสุทธิ์สูง ที่อุณหภูมิ 870 °C จะสามารถเปลี่ยนเป็น Cristobalite ได้ แต่หากมีสิ่งเจือปนสูง จะสามารถเปลี่ยนเป็น  $\alpha$ -tridymite ที่อุณหภูมิ 870 °C และค่อยเปลี่ยนแปลงเป็น  $\alpha$ -cristobalite ที่อุณหภูมิ 1,470 °C ต่อ และหากได้รับอุณหภูมิสูงประมาณ 1,713 °C ก็จะทำให้เกิดการหลอมเหลวขึ้น ส่วนในระหว่างการทำให้เย็นลง พบว่า Tridymite และ Cristobalite จะไม่เปลี่ยนมาเป็น Quartz ตามเงื่อนไขปกติ แต่จะมีการเปลี่ยนมาเป็น  $\gamma$ -tridymite และเปลี่ยนเป็น  $\beta$ -cristobalite อย่างรวดเร็ว ดังสมการด้านล่าง



ผลึกทั้ง 3 ชนิด เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ โดย Cristobalite ที่สามารถสังเคราะห์ได้ เช่น Keatite, Coesite, Stishovite และ Silica

ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดและระบบผลึกของซิลิกา [27, 28]

ชนิดซิลิกา	ระบบผลึก	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
$\beta$ -quartz	trigonal	2.65
$\alpha$ -quartz	hexagonal	2.53
$\gamma$ -tridymite	orthorhombic	2.26
$\beta$ -tridymite	hexagonal	-
$\alpha$ -tridymite	hexagonal	2.22
$\beta$ -cristobalite	tetragonal	2.32
$\alpha$ -cristobalite	cubic	2.20

## 2. ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)

เป็นซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (Biogenic silica) และสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปไม่แน่นอน และไม่เป็ผลึก มีการจัดเรียงของอะตอมภายในโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือแอนไฮเดรต (Anhydrate) มีพันธะหลายรูปแบบ เช่น Siloxane (Si-O-Si), Silanol (Si-O-H), Silane (-Si-H), Organic silicon (-Si-O-R / -Si-C-R)

วิธีการสังเคราะห์จะสามารถสังเคราะห์ได้ โดยการให้ความร้อนจนเกิดสภาวะกลายเป็นไอ และการตกตะกอนของสารละลาย แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1) ซิลิกาแก้ว (Silica glass หรือ) วิเทรียสซิลิกา (Vitreous silica) มีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่มีรูพรุน ผลิตโดยการหลอมผลึกของซิลิกาอสัณฐานแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง

2) ซิลิกาเจล (Silica gel) มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนสูง มีโครงสร้างรูพรุนที่เป็นแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวที่มาก โดยแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

- อะควาเจล (Aqua gel) มีลักษณะที่เป็นเจลเหลว ภายในมีน้ำอยู่มาก เตรียมได้จากสารละลาย

- อัลโคเจล (Alco gel) มีลักษณะเป็นเจล เตรียมได้จากอัลคอกซี-ไซเลน

- ซีโรเจล (Xero gel) มีลักษณะเป็นเจลที่แห้ง เกิดจากมีการกำจัดน้ำออกด้วยวิธีการระเหย โครงสร้างไม่เปลี่ยนไปจากเดิม

- แอโรเจล (Aero gel) มีลักษณะเป็นเจลที่แห้ง น้ำหรือตัวทำละลายถูกกำจัดด้วยวิธีการสกัดแบบซูเปอร์คริติคอลล (Super critical fluid extraction) เตรียมได้จากกระบวนการทำแห้ง อนุกรมมิเหนือจุดวิกฤต

3) ซิลิกาผง (Powder silica) เป็นซิลิกาที่เตรียมได้จากการให้ความร้อนจนเกิดสภาวะกลายเป็นไอ และการตกตะกอนของสารละลายที่มีลักษณะการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูง เมื่อตกตะกอนจะได้ซิลิกาที่มีมีขนาดเล็กมาก และมีพื้นที่ผิวสูง

– อะควาจีนิค (Aqua genic) เตรียมได้จากการตกตะกอนในสารละลายหรือเตรียมได้จากอะควาเจล

– ไพโรจีนิค (Pyro genic) เตรียมได้โดยการระเหยของซิลิกา โดยใช้เปลวไฟหรือการอาร์ค (Arc) ในสถานะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน จะมีการเกิดการรวมตัวกันทางกายภาพหรือเกิดจากการรวมตัวกันทางเคมีของไอสารประกอบซิลิคอนจากเปลวไฟของไฮโดรเจนกับออกซิเจน

– ไบโोजีนิค (Bio genic) เป็นประเภทของอะควาจีนิคชนิดพิเศษประเภทหนึ่ง ซึ่งมักจะพบในพืชและไดอะตอม

## 2.7.2 ประโยชน์ซิลิกา

### 1. ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica)

– ซิลิกาเป็นวัตถุดิบสำหรับเป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง

### 2. ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica)

– ใช้เป็นองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา

– ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์อย่าง พลาสติก และพอลิเมอร์ เป็นต้น

– ใช้เป็นสารเพิ่มแรงยึดติดในผลิตภัณฑ์กาว

– ใช้เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว

– ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น จารบี หมึกพิมพ์ สี ยา และ

เครื่องสำอาง เป็นต้น

– ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้สารที่ไม่ละลายกันผสมเข้ากันได้ดี เช่น น้ำกับน้ำมัน

– ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดโฟม

– ใช้เป็นสารปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

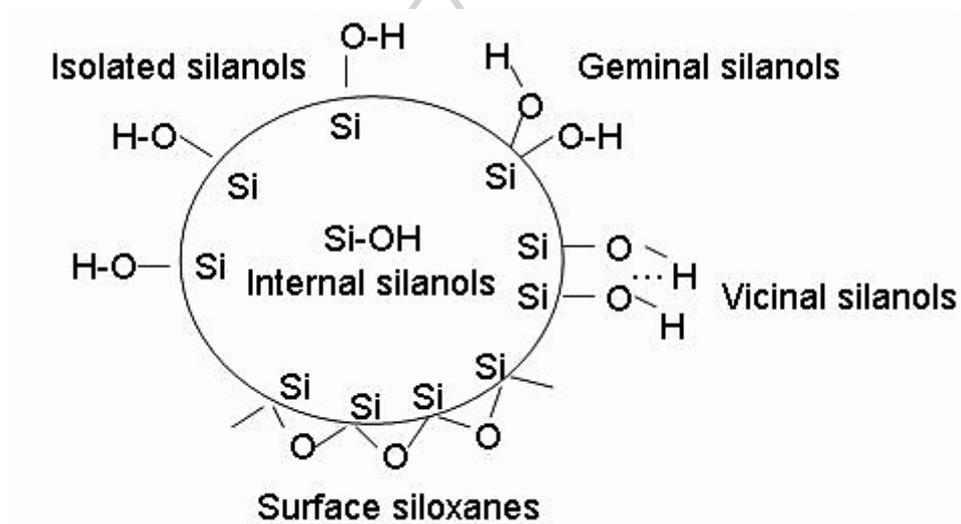
– ใช้เป็นสารเพิ่มความเงา

– ใช้เป็นสารดูดความชื้น

– ใช้เป็นสารเติมแต่ง

ซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในปริมาณมาก พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขี้และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ สูง ดังนั้นซิลิกาจึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับสารเคมีต่าง ๆ ที่มาเกาะบนพื้นผิวได้ดี ความชื้นในซิลิกาจะ

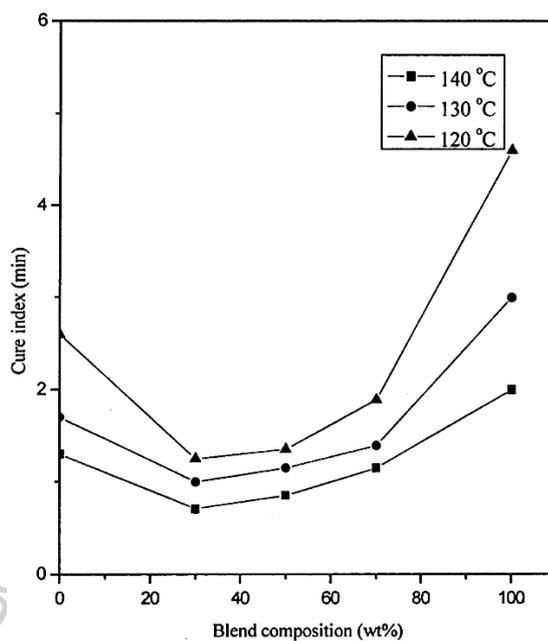
ส่งผลต่อสมบัติของยางระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป ถ้าความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น ซิลิกาก็จะแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อย เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางด้วยระบบ กำมะถันโดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นต่างก็จะยาวนาน (ทั้งระยะเวลาสกอ์ชและระยะเวลาในการ คงรูป) เพราะซิลิกาที่อิมมัตว์ด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาการคงรูปทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาใน ปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้และหมู่ไฮดรอกซิลยังทำให้ซิลิกาชอบดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็น ต่าง เช่น DPG และ DOTG จึงทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในยางมีปริมาณลดลง ดังนั้นจึงต้องเพิ่ม ปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ เพื่อชดเชยให้กับปริมาณที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของซิลิกาอย่างไร ก็ดีน้ำหรือความชื้นมักมีความว่องไวต่อการถูกดูดซับได้ดีกว่าสารอื่น ๆ [28]



รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา [28]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ M.T. Ramesan และคณะ [29] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติในการคงรูปของยาง (Cure characteristics) และสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวทาไดอีนดัดแปลงด้วยไดคลอโรคาร์บีน (DCSBR) และยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน (CR)



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Cure index กับอัตราส่วนผสมของ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.10 สูตรการผสมของ NR/DCSBR และ NR/CR

Ingredients	Phr
Rubber blend <sup>a</sup>	100
Stearic acid	2.0
Zinc oxide	5.0
Antioxidant TDQ <sup>b</sup>	1.0
Magnesium oxide	2.0
CBS <sup>c</sup>	1.0
TMTD <sup>d</sup>	0.5
ETU <sup>e</sup>	0.5
Sulfur	2.2

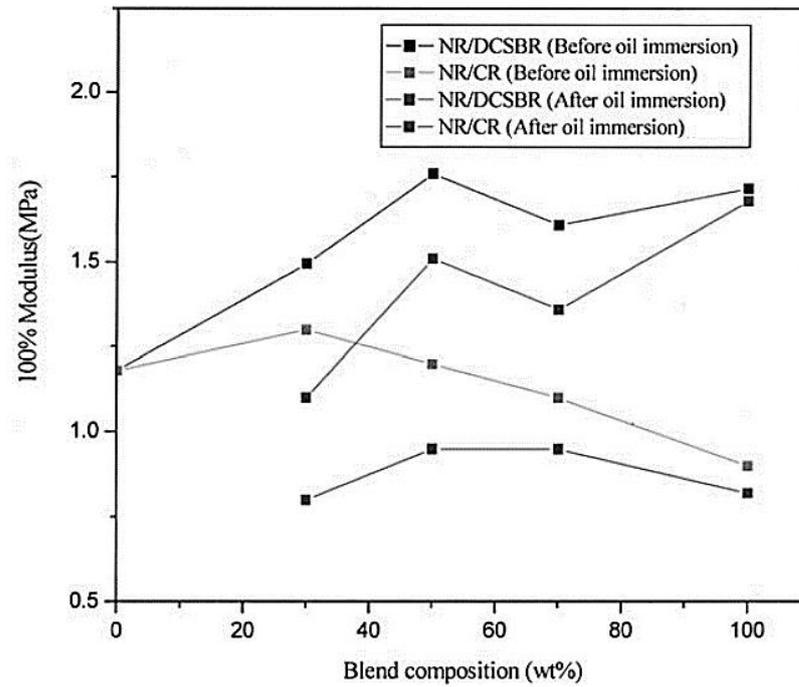
<sup>a</sup> NR/DCSBR and NR/CR were used with blend ratio of 100/0, 70/30, 50/50, 30/70, 0/100.

<sup>b</sup> 2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline.

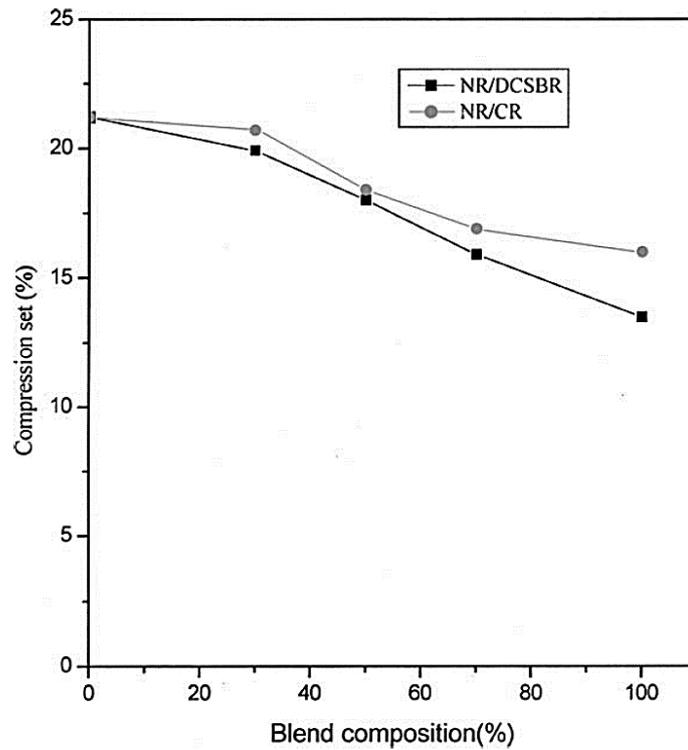
<sup>c</sup> *N*-Cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide.

<sup>d</sup> Tetramethylthiuram disulfide.

<sup>e</sup> Ethylene thiourea.

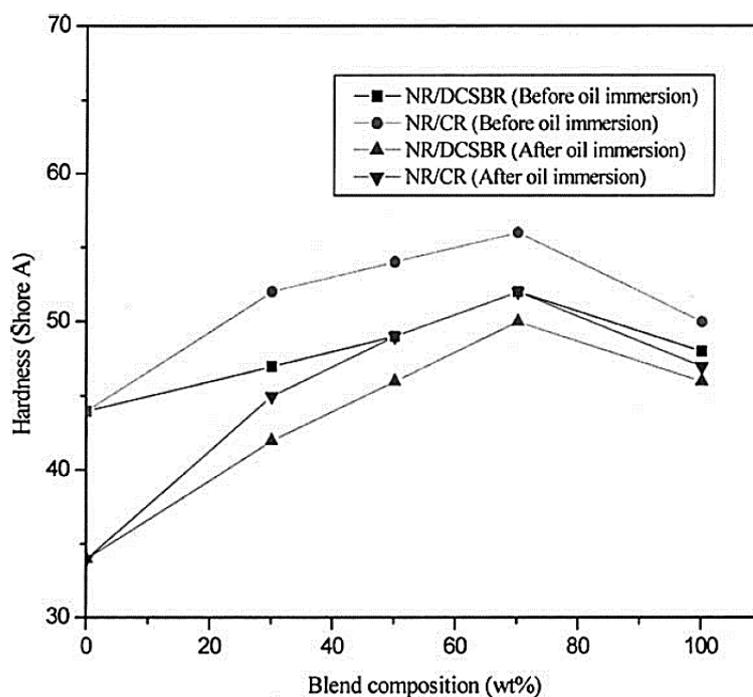


รูปที่ 2.18 มอดูลัสที่ 100% strain ของ NR/DCSBR และ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมัน



รูปที่ 2.19 Compression set ของ NR/DCSBR และ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ





รูปที่ 2.20 Hardness ของ NR/DCSBR และ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนและหลังการแช่น้ำมัน

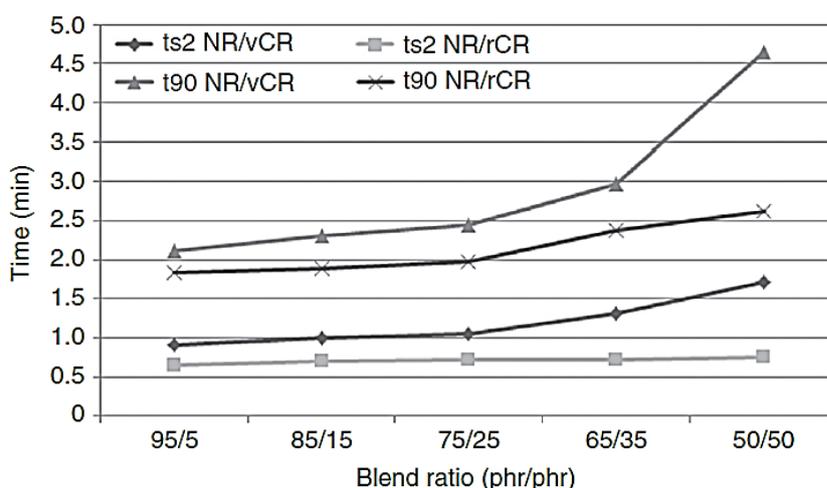
จากรูปที่ 2.17 ผลการทดสอบสมบัติในการคงรูปของยางและสมบัติเชิงกล พบว่า Cure index เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ CR เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ Cure index ของ NR/CR blend ลดลง และจากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าค่ามอดูลัสที่ 100% strain จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง tensile modulus สูงสุดของ NR/DCSBR อยู่ที่ 50% ส่วน NR/CR ค่า Tensile modulus สูงสุดอยู่ที่ 30% เนื่องจากเมื่อยางได้รับแรงดึงจึงเหนียวทำให้เกิดผลึกส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น และยังสามารถแสดงถึงความเข้ากันได้ของยางทั้งสอง ส่วนสมบัติ Compression set ที่แสดงในรูปที่ 2.19 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ NR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก NR มีความยืดหยุ่นสามารถคืนตัวกลับได้ดีและค่า Compression set ของ NR/CR จะสูงกว่า NR/DCSBR ในทุกอัตราส่วน และสมบัติความแข็งที่แสดงในรูปที่ 2.20 จากผลที่ได้แสดงว่าทั้ง NR/DCSBR และ NR/CR ความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ NR เพิ่มขึ้น หลังจากการแช่น้ำมันจะเห็นได้ว่าสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัสและความแข็งจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณของ NR เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมระหว่าง NR/DCSBR และ NR/CR ซึ่งทำให้คุณสมบัติการต้านทานน้ำมันดีขึ้น

ในงานวิจัยของ Siti Z. Salleh และคณะ [30] เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนต่าง ๆ ของยางคลอโรพรีนบริสุทซ์ (vCR) และยางคลอโรพรีนรีไซเคิล (rCR) โดยมีปริมาณคาร์บอนแบล็ค (CB) คงที่ ต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน (NR/CR) โดยผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำเอายางคลอโรพรีนที่ผ่านการใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อช่วยลดปัญหาของขยะ เนื่องจากการ

กำจัดขยะในทุก ๆ ปี พบว่ายังเป็นปัญหาขยะที่เพิ่มมากขึ้นและสร้างแรงกดดันทางกฎหมายในการรีไซเคิล นอกจากนี้การผสมพอลิเมอร์โดยเฉพาะอีลาสโตเมอร์กับขยะรีไซเคิลสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นถนน สนามเด็กเล่น กาว ชิ้นส่วนรถยนต์ได้ และยังสามารถช่วยลดในเรื่องของต้นทุนได้อีกด้วยพร้อมปรับปรุงวัสดุรีไซเคิลที่ผสมแล้วจะถูกแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สาเหตุหลักในการผสมยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน คือ การปรับปรุงการทนต่อโอโซน ความร้อนและน้ำมัน ซึ่งถ้าหากใช้ยางคลอโรพรีนอย่างเดียวจะมีราคาแพงจึงนำเอายางธรรมชาติเข้ามาผสม เนื่องจากมีราคาถูกและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และเนื่องจากยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนมีความเข้ากันได้ยากเนื่องจากความแตกต่างในความมีขี้ผึ้ง จึงนำเอาคาร์บอนแบล็ค (CB) ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสม

ตารางที่ 2.11 สูตรการผสมของ NR/vCR และ NR/rCR

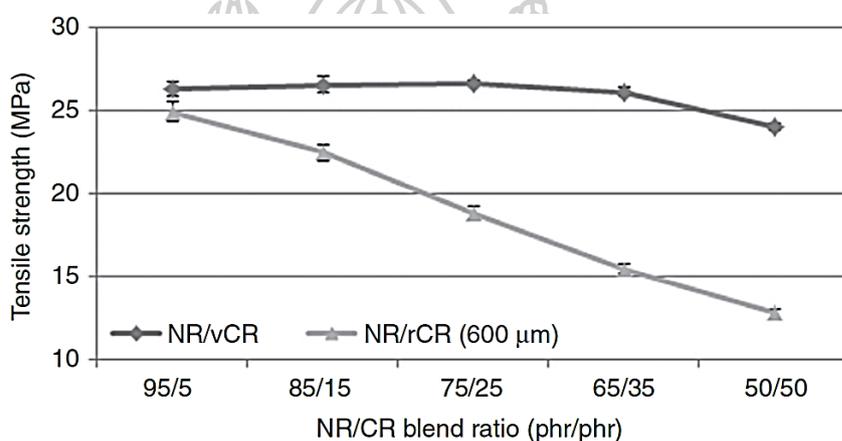
Ingredients	Content (phr)
NR/CR <sup>1</sup>	95/5, 85/15, 75/25, 65/35, 50/50
Zinc oxide	5.0
Stearic acid	3.0
CBS	0.5
TMTM	1.0
Magnesium oxide	2.0
Sulfur	2.5
CB (N330)	30.0



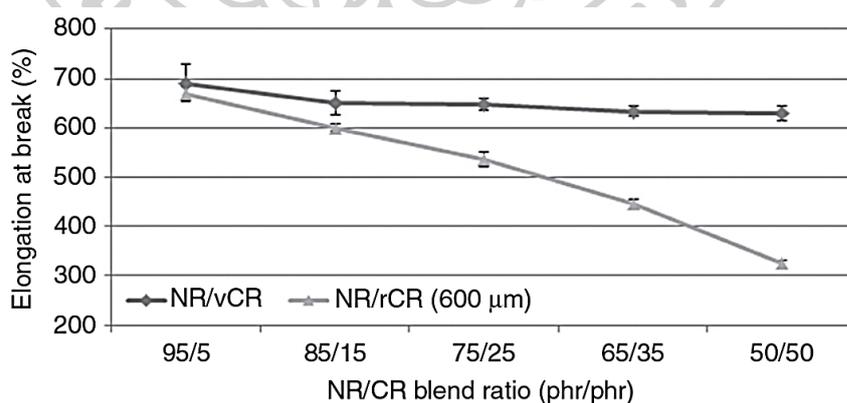
รูปที่ 2.21 แสดงค่า Scorch time และ Cure time ของ NR/vCR และ NR/rCR blend

จากรูปที่ 2.21 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนของ vCR และ rCR เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ายางผสมใช้เวลาในการเกิดพันธะเชื่อมโยง

นานขึ้น อาจเกี่ยวข้องกับสายโซ่ที่ไม่อิ่มตัวในยาง ในการศึกษาในระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งในระบบซัลเฟอร์จะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่ที่ไม่อิ่มตัวในอีลาสโตเมอร์ จะต้องการ Allylic carbon มากขึ้น เพื่อมาสร้างพันธะเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ ซึ่งจำนวนของ Allylic carbon ในหนึ่งหน่วยซ้ำของยางธรรมชาติจะมี 3 Allylic carbon ส่วนในยางคลอโรพรีนจะมี 2 Allylic carbon จึงเป็นปัจจัยส่งผลให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นได้ช้า และอะตอมของคลอรีนในโมเลกุลของ CR เป็นสาเหตุทำให้พันธะคู่ใน CR ไม่เกิดปฏิกิริยาในระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งจากรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่า  $t_{s2}$  และ  $t_{c90}$  ของ NR/rCR สั้นกว่า NR/vCR เนื่องจากใน rCR ยังมีสารตั้งต้นและสารเติมแต่งที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้นและ rCR มีการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการก่อนหน้าซึ่งจะลดความสามารถในการไหลลง



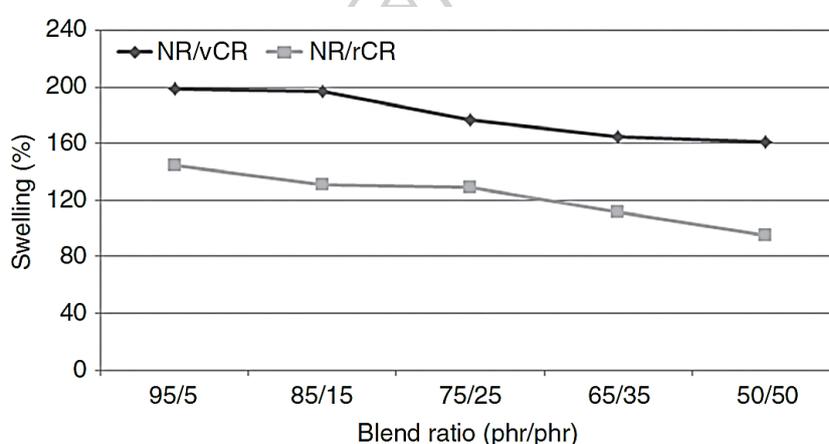
รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับ NR/CR blend ratio



รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Elongation at break กับ NR/CR blend ratio

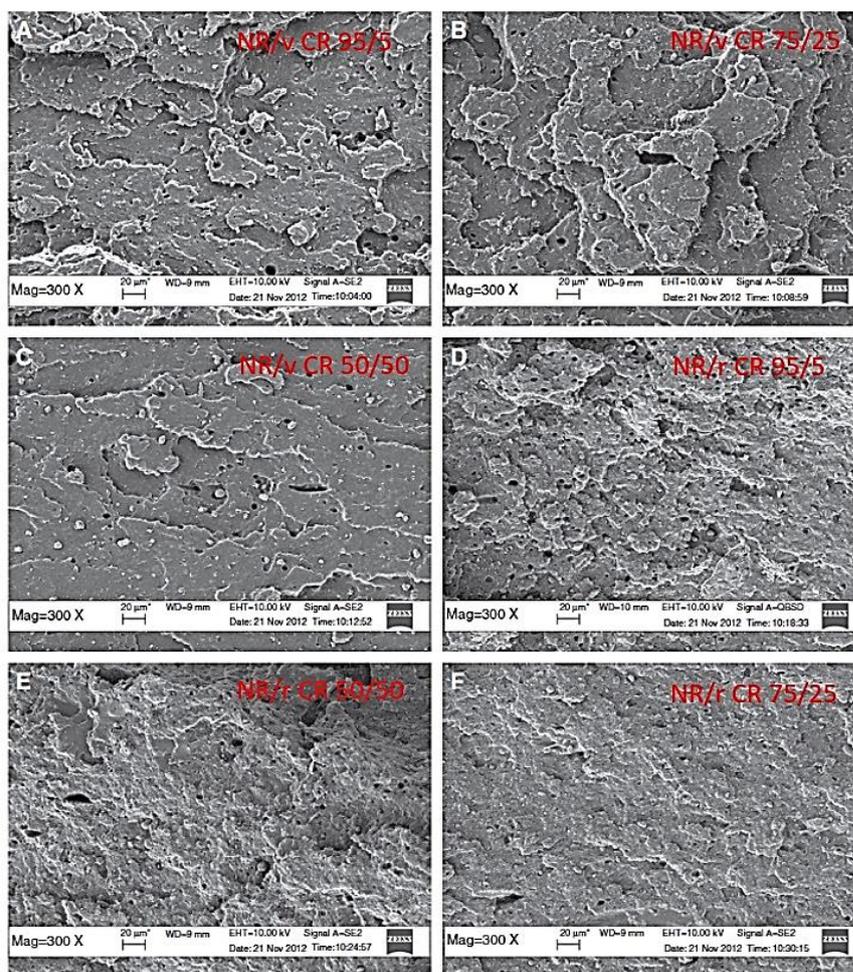
จากรูปที่ 2.22 จะเห็นได้ว่า Tensile strength ของ NR/vCR จะเพิ่มขึ้นจนถึง vCR ที่ 25 phr และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเติมมากกว่า 25 phr แสดงให้เห็นว่าที่ NR/vCR อัตราส่วนเท่ากับ 75/25 มีความเข้ากันได้ดีที่สุดในที่สุด ซึ่งแตกต่างจากการเติม rCR จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราส่วนของ rCR

เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะยางคลอโรพรีนรีไซเคิลมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการเชื่อมโยงแบบ Monosulfide และ Disulfide crosslink มากกว่า Polysulfide ในยาง เนื่องจากมีการบ่มเร็วขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Scorch time และ Cure time ในรูปที่ 2.21 และยางคลอโรพรีนรีไซเคิลมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าเนื่องจากการสลายตัวของสายโซ่ จึงทำให้ยางที่ผสมยางคลอโรพรีนรีไซเคิล มีความทนทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าเมื่อผสมยางคลอโรพรีนบริสุทธิ์ จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าค่า Elongation at break ของทั้ง NR/CR blend ทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของ CR เพิ่มขึ้น แต่ของ rCR จะมีแนวโน้มที่ลดลงมากกว่า อาจเป็นเพราะยางคลอโรพรีนรีไซเคิลมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิด Monosulfide และ Disulfide crosslink มากกว่า Polysulfide ในยาง ตามที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling percentage กับ NR/CR blend ratio

จากรูปที่ 2.24 เป็นการทดสอบการบวมตัวจากการแช่ตัวอย่างในโทลูอีน จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ CR เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มการบวมตัวลดลง เนื่องจากความเป็นขี้ของคลอโรพรีนอะตอมใน CR ซึ่งเพิ่มความต้านทานต่อตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน และสังเกตได้ว่าในยางผสม NR/rCR มีการบวมตัวที่ต่ำกว่า NR/vCR เนื่องจากยางคลอโรพรีนรีไซเคิลมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิด Monosulfide และ Disulfide crosslink มากกว่า Polysulfide ในยาง เนื่องจากมีการบ่มเร็วขึ้นซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Scorch time และ Cure time ในรูปที่ 2.21 และยางคลอโรพรีนรีไซเคิลมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าเนื่องจากการสลายตัวของสายโซ่ จึงทำให้ยางที่ผสมยางคลอโรพรีนรีไซเคิลมีการเกิดเชื่อมโยงกันที่หนาแน่นมากกว่า vCR ทำให้ NR/rCR ละลายในโทลูอีนได้ยากกว่าและแทรกเข้าไปในระหว่างสายโซ่ได้ยากกว่า NR/vCR



รูปที่ 2.25 ภาพ SEM ของพื้นผิวรอยแตกหักจากการทดสอบ Tensile ของ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

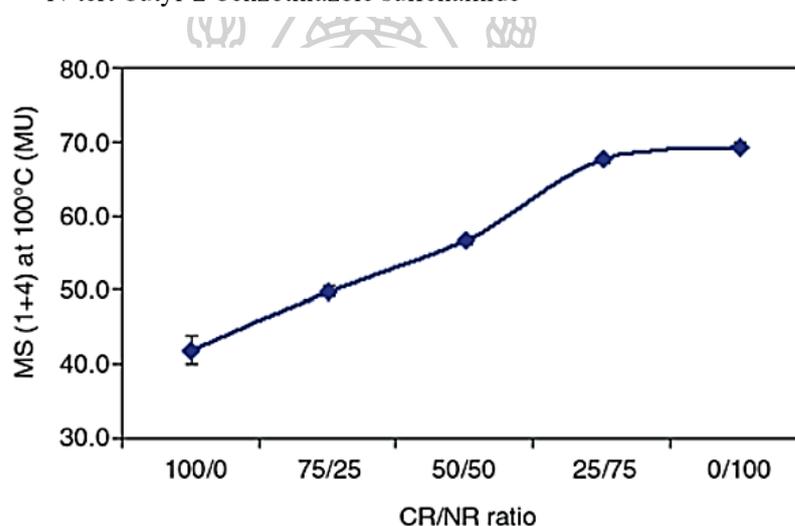
พื้นผิวรอยแตกหักจากการทดสอบ Tensile ของ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นว่ายางผสม NR/vCR ที่อัตราส่วน 75/25 พบว่าพื้นผิวที่ฉีกขาดมากที่สุด (รูปที่ 2.25B) จะสอดคล้องกับผลการทดสอบ Tensile (รูปที่ 2.22) ที่อัตราส่วน 75/25 จะมีค่า Tensile strength สูงที่สุด แสดงว่าทั้งสองวัสดุมีการยึดเกาะและกระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนในยางผสม NR/rCR จะมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีพื้นผิวที่ฉีกขาดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ NR/vCR ซึ่งในยางผสม NR/rCR ที่อัตราส่วน 50/50 จะมีพื้นผิวที่ฉีกขาดน้อยที่สุด แสดงว่าเมื่ออัตราส่วนของ rCR เพิ่มขึ้นทำให้การต้านทานแรงดึงลดลง

ในงานวิจัยของ P. Sae-oui และคณะ [31] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนผสมของยางคลอโรพรีน กับยางธรรมชาติ (CR/NR) ต่อสมบัติเชิงกล การต้านทานต่อความร้อน น้ำมัน และโอโซน โดยใช้ซิลิกา เป็นสารตัวเติมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้และสารเสริมแรง

ตารางที่ 2.12 สูตรการผสมของ CR/NR

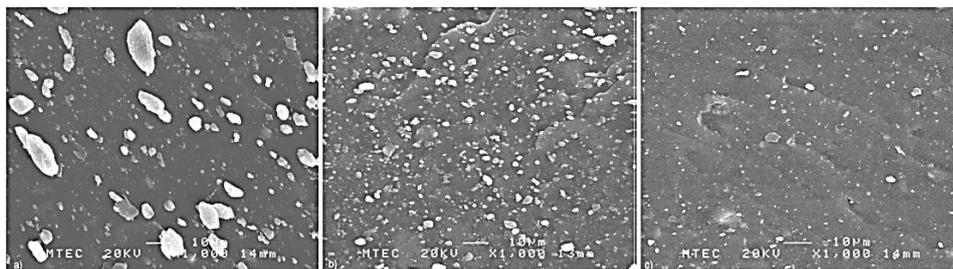
Ingredient	Loading (parts per hundred of rubber, phr)				
	Polychloroprene (CR)	100	75	50	25
Natural rubber (NR)	0	25	50	75	100
Zinc Oxide	5	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1	1
Magnesium Oxide	4	4	4	4	4
Silica	30	30	30	30	30
TBBS*	1	1	1	1	1
Ethylene thiourea	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Sulfur	2	2	2	2	2

\*N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide

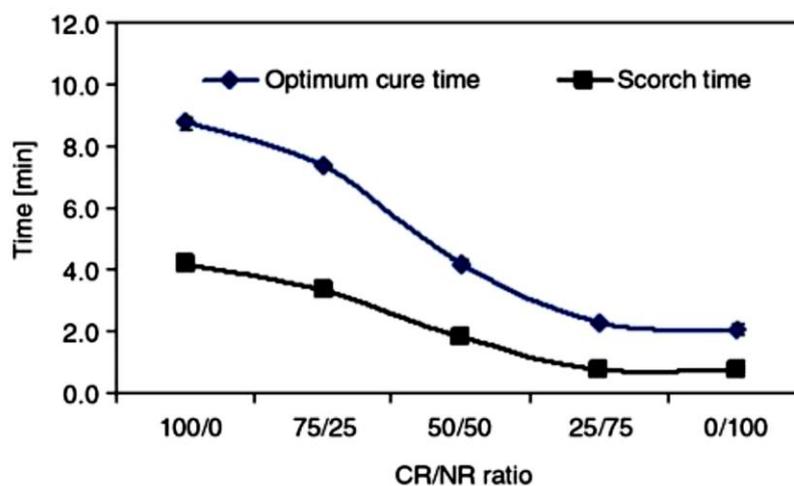


รูปที่ 2.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Mooney viscosity กับ CR/NR blend ratio

จากรูปที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าความหนืดของยางผสมจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้น เนื่องจาก NR มีความหนืดสูงเพราะมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาว ทำให้ CR ที่มีความหนืดต่ำจะถูกแทนที่ด้วยยาง NR ที่มีความหนืดสูง และเมื่อทำการเติมซิลิกาทำให้ความหนืดของยางเพิ่มสูงขึ้น เป็นเพราะซิลิกากระจายตัวได้ไม่ดี เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วสูง ในขณะที่ NR เป็นอีลาสโตเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นอันตรกิริยาของยางกับสารตัวเติม (rubber-filler interaction) จึงค่อนข้างต่ำ ในทางตรงกันข้ามกลุ่มไฮดรอกซิลหรือไฮลันอลบนพื้นผิวซิลิกาสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนต่อกันและกัน จึงส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาร่วมระหว่างฟิลเลอร์และฟิลเลอร์ (filler-filler interaction) ที่แข็งแกร่ง ทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ยากจึงกระจายตัวได้ไม่ดี อย่างไรก็ตามซิลิกาสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางคลอโรพรีนได้ดี เนื่องจาก CR มีอะตอมของคลอรีนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮลันอล บนพื้นผิวซิลิกาได้ จึงทำให้ซิลิกากระจายตัวใน CR ได้ดีกว่าใน NR ซึ่งสังเกตได้ภาพ SEM (รูปที่ 2.27)



รูปที่ 2.27 ภาพ SEM ของ (a) NR เต็มซิลิกา, (b) CR/NR 50/50 เต็มซิลิกา และ (c) CR เต็มซิลิกา



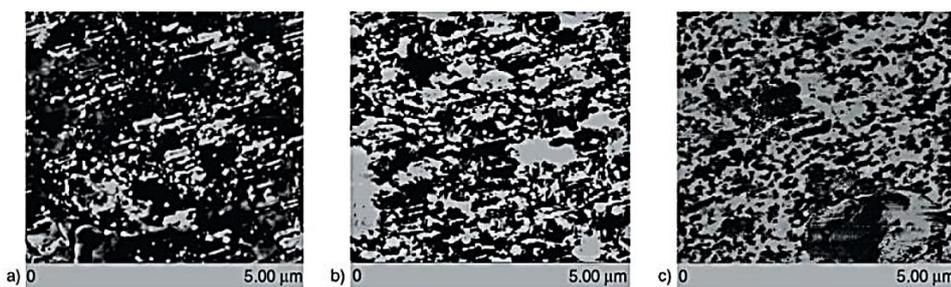
รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Scorch time ( $t_{s2}$ ) และ Optimum cure time ( $t_{c90}$ ) กับ CR/NR blend ratio

จากรูปที่ 2.28 จะเห็นได้ว่า Scorch time ( $t_{s2}$ ) และ Optimum cure time ( $t_{c90}$ ) มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้น เนื่องจากในพันธะคู่ของ NR สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้เร็วกว่า CR แม้ว่าอัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม สืบเนื่องจากการวัดความแตกต่างของแรงบิด (MH-ML) ซึ่งใน CR บริสุทธิ์ก็สามารถเกิดการเชื่อมโยงจาก Conventional vulcanization และเกิดการเชื่อมโยงระหว่างกลุ่มไซลันอลบนพื้นผิวซิลิกา กับ allylic ตรงคลอรีนอะตอมของ CR และยังพบว่าซิลิกาทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติลดลง เนื่องจากกลุ่มซิลันอลบนพื้นผิวซิลิกาสามารถดูดซับ zinc complex และ amine accelerator ทำให้หน่วงในการเกิดวัลคาไนเซชัน

ตารางที่ 2.13 แสดงสมบัติเชิงกลของ CR/NR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

CR/NR Blend ratio	Tensile strength [MPa]	100% Modulus [MPa]	Hardness [Shore A]
100/0	25.8±0.5	1.54±0.05	59.9±0.4
75/25	23.8±0.9	1.35±0.03	57.1±0.6
50/50	24.0±1.0	1.14±0.06	53.2±0.4
25/75	18.2±1.0	1.07±0.04	51.7±0.6
0/100	12.4±1.1	0.92±0.02	50.3±1.2

จากตารางที่ 2.13 เป็นการศึกษาสมบัติการทนต่อแรงดึงและความแข็งของยางวัลคาไนซ์ จะเห็นได้ว่าค่า Tensile strength ของ NR จะมีค่าต่ำสุด เนื่องจากซิลิกาที่เติมลงไปกระจายตัวได้ไม่ดี เพราะอันตรกิริยาระหว่างตัวเติมกับยาง (rubber-filler interaction) นั้นเกิดได้ไม่ดีและความหนาแน่นในการเชื่อมโยงต่ำ ซึ่งจากผลการทดสอบการทนทานต่อแรงดึงและความแข็ง จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนของ NR เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 2.29 ภาพ AFM ของ CR/NR blend ที่อัตราส่วน (a) 75/25, (b) 50/50 และ (c) 25/75

จากการศึกษาสมบัติพื้นผิวของ CR/NR ด้วยเทคนิค AFM ในรูปที่ 2.29 พบว่า ที่อัตราส่วน CR/NR ที่ 75/25 และ 50/50 จะเห็นว่า CR เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง (แสดงโดยพื้นที่มืด) และ NR เป็นวัสดุภาคที่กระจาย (แสดงโดยพื้นที่สว่าง) แต่ที่อัตราส่วนผสมของ CR/NR ที่ 25/75 เกิดการกลับวัสดุภาคระหว่าง CR กับ NR ซึ่ง NR จะกลายเป็นวัสดุภาคต่อเนื่องส่วน CR จะเป็นวัสดุภาคที่กระจาย อาจสังเกตได้จากค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งที่อัตราส่วนผสมของ CR/NR ที่ 25/75 จะมีการลดลงอย่างมาก เป็นเพราะซิลิกาทำให้เกิดการหน่วงในการเกิดวัลคาไนเซชันของ NR ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง เป็นผลทำให้ค่ามอดูลัสและความแข็งลดลง

ในงานวิจัยของ Chinnawin K. [22] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติ ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน และสารเติมแต่งที่มีขนาดระดับนาโนต่อการเกิดโพมยางบิวทาไดอีน ยางผสม NR กับ BR มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นที่ดี และมีความทนทานต่อการขัดถูสูง



อย่างไรก็ตามยางผสม BR/NR ยังมีสมบัติบางประการที่ต้องปรับปรุง เช่น ความทนทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง ซึ่งยาง NBR เป็นยางที่มีขี้ผึ้ง จึงถูกเลือกมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางผสม BR/NR โดยผสมยางแต่ละชนิดใน kneader mixer และเติมสารเคมี คือ ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur : 5/2/1.5/2 phr ซึ่งในการเตรียม โฟมยางมีสาร Blowing agent คือ CTP/Silica/EW : 0.5/30/10 phr

ตารางที่ 2.14 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder

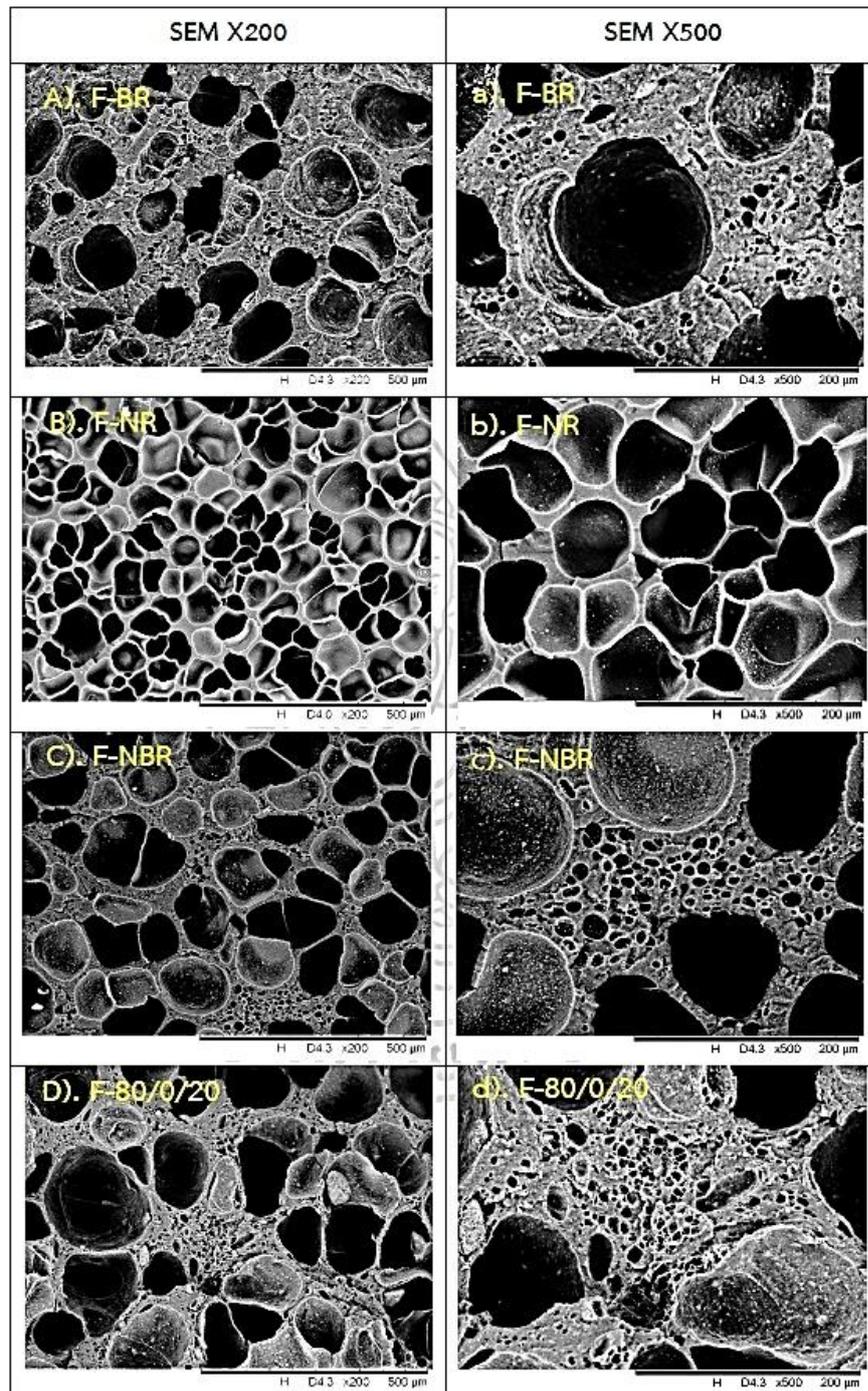
	สูตรยางคอมปาวด์และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder							
	BR	NR	NBR	80/0/20	60/20/20	40/40/20	20/60/20	0/80/20
$t_{s2}$ [min: sec]	10:57 ±0:30	6:41 ±0:16	9:11 ±0:16	10:22 ±0:17	81:46 ±0:15	6:49 ±0:10	5:35 ±0:03	4:19 ±0:04
$t_{c90}$ [min: sec]	53:07 ±0:29	8:20 ±0:34	14:56 ±0:39	24:15 ±0:40	17:56 ±0:31	13:16 ±0:09	10:45 ±0:05	8:04 ±0:14
CRI	1.4	55.9	18.4	7.2	11	15	19.6	26
$\Delta$ torque [dNm]	1.32 ±0.06	0.43 ±0.10	1.68 ±0.03	1.44 ±0.05	1.44 ±0.04	1.63 ±0.03	1.77 ±0.08	1.61 ±0.12

จากตารางที่ 2.14 Cure characteristics ความเร็วในการเกิดการวัลคาไนซ์ของโฟมยาง NR > NBR > BR ตามลำดับ และความเร็วในการเกิดวัลคาไนซ์ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า  $\Delta$ torque ของโฟมยาง NBR มีค่ามากที่สุด รองมาคือโฟมยาง BR และ NR ตามลำดับ โดยพบว่าค่า  $\Delta$ torque ของโฟมยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.15 แสดงขนาดเซลล์โพลีเมอร์ (Cell size) และขนาดผนังเซลล์โพลีเมอร์ (Cell wall) ของโพลีเมอร์ BR NR NBR และโพลีเมอร์ผสม BR/NR/NBR

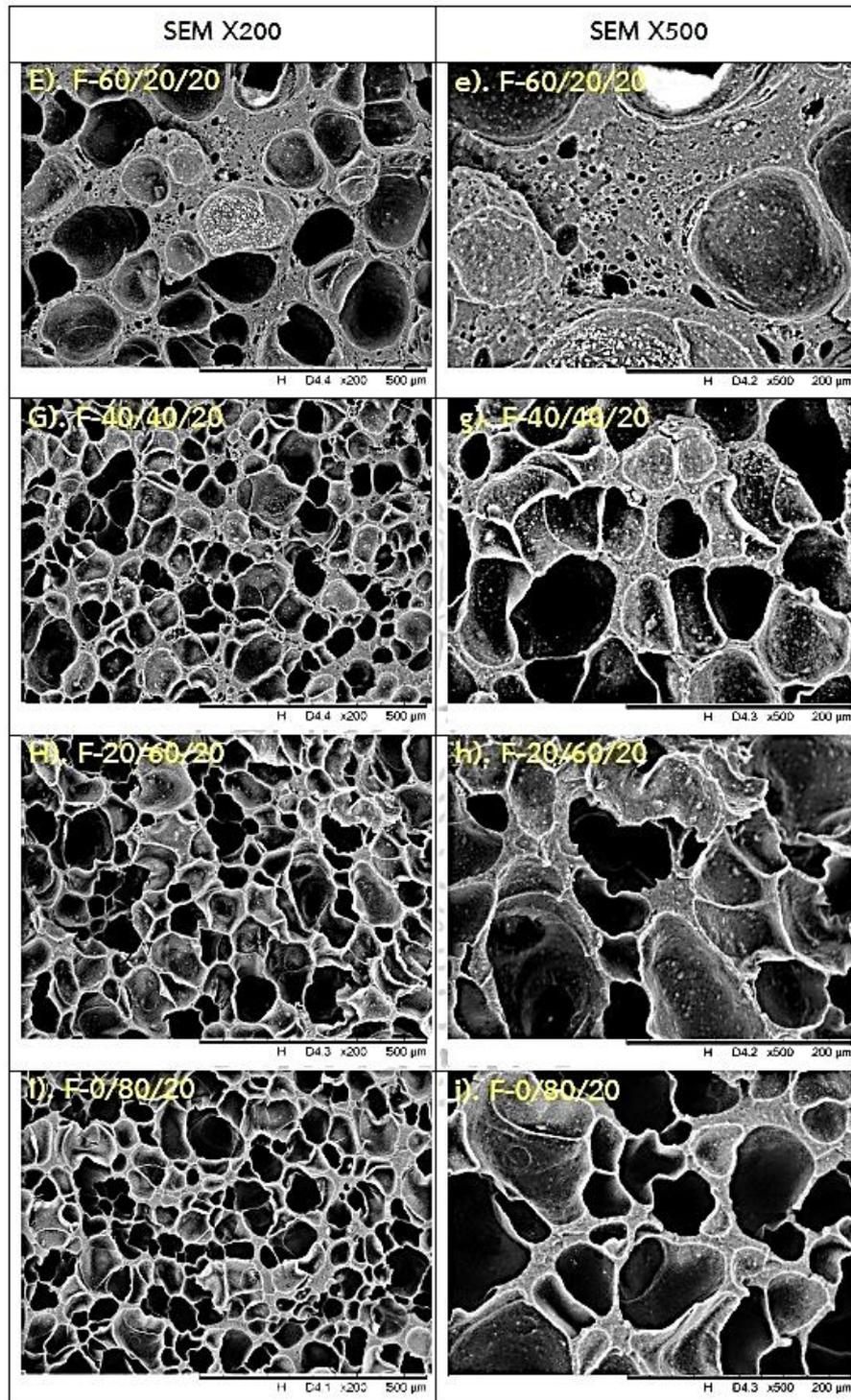
สูตร	Cell size, $\mu\text{m}$		Cell wall, $\mu\text{m}$	
	Average	SD	Average	SD
F-BR	99.89	29.86	92.01	40.80
F-NR	62.88	14.97	10.83	4.47
F-NBR	93.38	20.90	58.74	24.80
F-80/0/20	114.47	31.80	60.89	38.24
F-60/20/20	111.60	28.13	39.79	18.87
F-40/40/20	61.78	13.93	18.42	8.03
F-20/60/20	76.35	24.68	13.33	7.39
F-0/80/20	64.42	19.65	14.77	5.42

จากรูปที่ 2.30 และรูปที่ 2.31 ซึ่งแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสม และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ แสดงให้เห็นว่าเซลล์ของโพลีเมอร์ในทุกอัตราส่วนแสดงลักษณะเซลล์โพลีเมอร์เป็นรูปแบบของเซลล์ปิด (Closed-cell structure) โดยเมื่อดูจากกราฟการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ (Cell size distribution, รูปที่ 2.32) แสดงให้เห็นถึงขนาดของเซลล์โพลีเมอร์แต่ละอัตราส่วนซึ่งพบว่าขนาดเซลล์โพลีเมอร์ค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราส่วนการผสม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการผสม Silica ทำหน้าที่เป็น Nucleating agent โดยในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปนั้น เมื่ออย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งทำให้ BA เกิดการแตกตัวในขณะที่ Silica ที่กระจายตัวอยู่ในทุกส่วนของยางผสม ยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง โดย Silica นั้นมีความสามารถในการดูดซับสารละลายได้ดี จะทำการดูดซับสาร BA ที่กำลังละลายอยู่ในเนื้อยางทำให้ BA สามารถกระจายได้ทั่วถึงทุกส่วนของยาง ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์ (ตารางที่ 2.15 และรูปที่ 2.30-2.32) พบว่าโพลีเมอร์แต่ละอัตราส่วนมีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์ที่ต่างกัน โดยโพลีเมอร์ NR มีจำนวนเซลล์โพลีเมอร์มากที่สุด กล่าวคือมีขนาดเซลล์โพลีเมอร์กับผนังเซลล์โพลีเมอร์ที่เล็กที่สุด รองลงมาคือโพลีเมอร์ NBR และ BR ตามลำดับ โดยสำหรับโพลีเมอร์ผสมนั้นขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์เล็กลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มสูงขึ้น

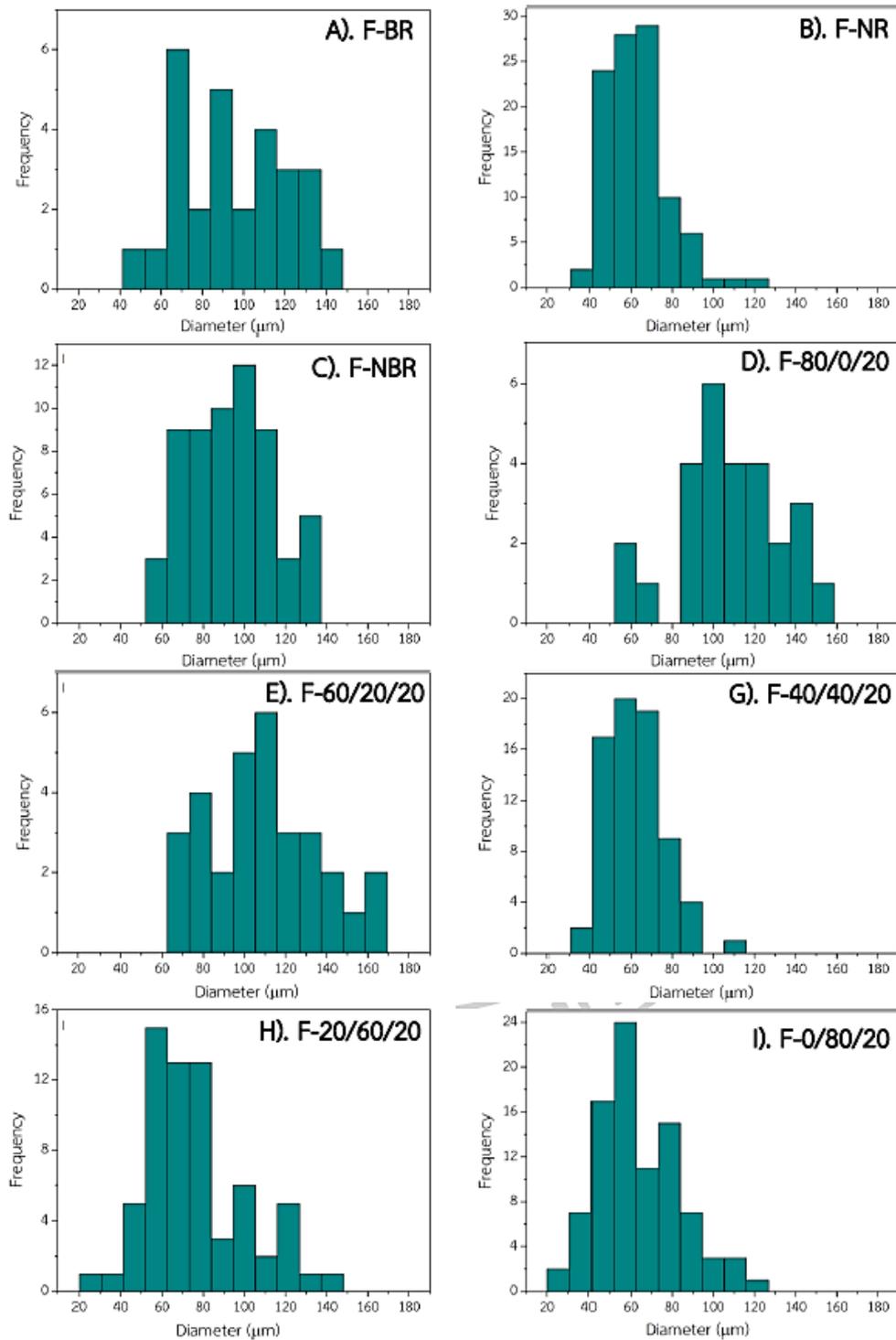


รูปที่ 2.30 ภาพ SEM ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย A,a). F-BR, B,b). F-NR, C,c). F-NBR, D,d). F-80/0/20, E,e). F-60/20/20, G,g).

F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20

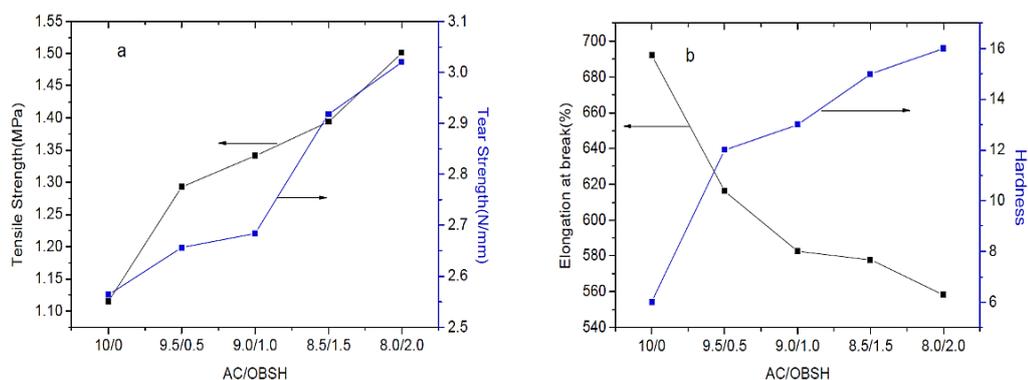


รูปที่ 2.31 ภาพ SEM ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย E,e). F-60/20/20, G,g). F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20



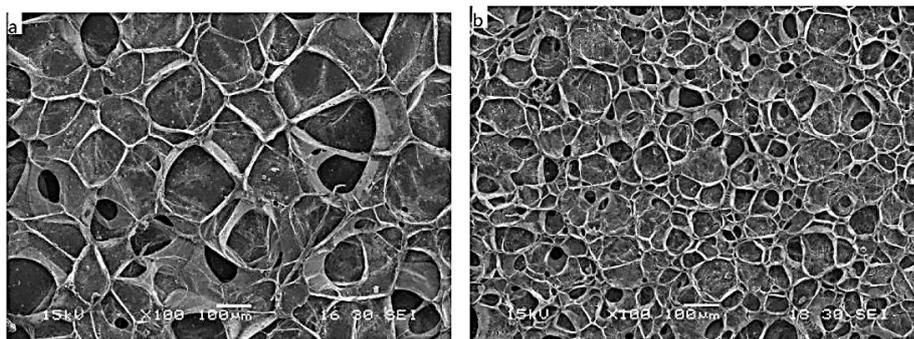
รูปที่ 2.32 การกระจายตัวของขนาดเซลล์ไฟเบอร์ BR NR NBR และไฟเบอร์ผสม BR/NR/NBR โดย A). F-BR, B). F-NR, C). F-NBR, D). F-80/0/20, E). F-60/20/20, G). F-40/40/20, H). F-20/60/20 และ I). F-0/80/20

ในงานวิจัยของ Y. Hongling และคณะ [32] ได้ศึกษาผลของสารฟูและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ต่อโครงสร้างเซลล์ลูลาร์ (Cellular Structure) และสมบัติเชิงกลของยางคลอโรพรีน ศึกษาโฟมแบบเซลล์ปิดของโฟมยางคลอโรพรีนโดยใช้ Azodicarbonamide (AC) และ Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSH) เป็นสารฟู จะใช้การผสมของสารฟูระหว่าง AC/OBSH มีประสิทธิภาพมากกว่า AC บริสุทธิ์ เนื่องจากโฟมยางคลอโรพรีนที่ได้มีความพรุนของเซลล์มากขึ้น อย่างสม่ำเสมอและกระจายเซลล์ได้ดีขึ้น การเตรียมโฟมยางคลอโรพรีนด้วย AC/OBSH มีความต้านทานแรงดึงและแรงฉีกขาดดีกว่าและมีความแข็งสูงกว่า AC บริสุทธิ์ ส่วนพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่ตัดแปลงจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สามารถเร่งกระบวนการคงรูปและการเกิดโฟมได้พร้อมกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของ PEG ทำให้โฟมยางคลอโรพรีนมีอัตราการขยายเซลล์ ขนาดของเซลล์เล็กลงและมีความนุ่มขึ้น



รูปที่ 2.33 ผลของ Blowing agent ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางคลอโรพรีน (a) Tensile strength และ Tear strength และ (b) Elongation at break และ Hardness

จากการศึกษาผลของ Blowing agent ต่อสมบัติเชิงกลของยางคลอโรพรีน แสดงในรูปที่ 2.33 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนของ OBSH เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาดและความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ค่า Elongation at break ลดลง เนื่องจาก OBSH จะเร่งกระบวนการคงรูปมากกว่ากระบวนการเกิดโฟม จึงทำให้เร่งกระบวนการคงรูปขึ้นเมื่อปริมาณของ OBSH เพิ่มขึ้น และสังเกตได้จากภาพ SEM ในรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าโครงสร้างของเซลล์ที่ใช้ AC/OBSH มีความสม่ำเสมอของเซลล์มากกว่า AC บริสุทธิ์และมีขนาดเซลล์ที่เล็กกว่า โดยเซลล์มีโครงสร้างรูพรุนที่ละเอียดมีการเชื่อมต่อกับผนังอื่น ๆ รอบข้าง ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.34 ภาพ SEM ของโครงสร้างเซลล์ (a) AC บริสุทธิ์ และ (b) AC/OBSH ที่อัตราส่วน 9.5/0.5

ตารางที่ 2.16 ผลของ PEG ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางคลอโรพรีนที่ AC 10 phr

PEG	Tensile strength(MPa)	Tear Strength(N/mm)	Elongation at break(%)	Hardness (Shore C)
0	0.808	2.928	571.4	15
0.3	0.577	1.848	602.3	10
0.6	0.641	1.910	633.6	9
0.9	0.570	1.935	673.3	8
1.2	0.625	1.993	722.7	8

ตารางที่ 2.17 ผลของ PEG ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางคลอโรพรีนที่อัตราส่วน AC/OBSH เท่ากับ 9.5/0.5

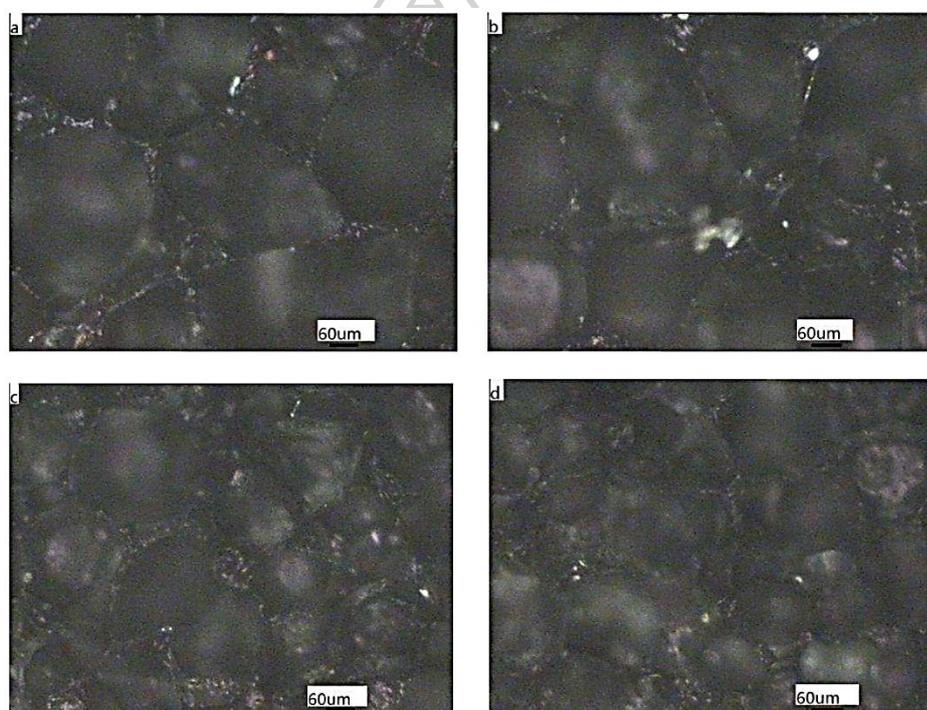
PEG(phr)	Tensile strength(MPa)	Tear Strength(N/mm)	Elongation at break(%)	Hardness (Shore C)
0	1.452	3.217	616.43	12
0.3	1.348	2.655	645.25	11
0.6	1.294	2.359	673.58	11
0.9	1.158	1.966	708.29	10
1.2	1.035	1.739	732.66	10

จากการศึกษาผลของ PEG ต่อสมบัติเชิงกลของโฟมยางคลอโรพรีนที่ AC 10 phr และที่อัตราส่วน AC/OBSH เท่ากับ 9.5/0.5 แสดงในตารางที่ 2.16 และ 2.18 ตามลำดับ จะพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาดและความแข็งลดลง เมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้น จะสอดคล้องกับอัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้นแสดงในตารางที่ 2.18 แต่ค่า elongation at break เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้น ซึ่ง PEG จะมีการปรับปรุงไฮโดรโฟบิซิตีของ ZnO ทำให้มีความเข้ากันกับเมทริกซ์ของยางได้มากขึ้นและทำให้ ZnO ช่วยในการเกิดกระบวนการคงรูปและกระบวนการเกิดโฟมได้ดีขึ้น เนื่องจากกลุ่มไฮดรอกซิลที่บริเวณพื้นผิวของ ZnO มีอันตรกิริยากับ PEG เพื่อสร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้ ZnO กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่งผล

ให้สารในการเกิดโฟมเกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่กระบวนการบ่มและกระบวนการเกิดโฟมได้เร็วขึ้น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของโครงสร้างเซลล์ที่อัตราส่วนของ PEG ต่างกันแสดงในรูปที่ 2.35 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของเซลล์ลดลงในช่วงแรกจนค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2.18 ผลของ PEG ต่ออัตราการบวมตัว

PEG content(phr)	0	0.3	0.6	0.9	1.2
Swell ratio/%	34-40	47-50	56-65	62-70	65-71



รูปที่ 2.35 สัณฐานวิทยาของโครงสร้างเซลล์ที่อัตราส่วนของ PEG แตกต่างกัน (a) 0.3 phr (b) 0.6phr (c) 0.9 phr และ (d) 1.2 phr

ในงานวิจัยของ N. Sombatsompop และคณะ [33] ศึกษาอิทธิพลของ Mastication time ต่อสมบัติการไหลของยางธรรมชาติ โดยวัดความหนืดของยางที่เวลา Mastication แตกต่างกันคือ 10, 20, 25 และ 30 นาที ตามลำดับ ด้วยเครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) พบว่าที่เวลา Mastication เมื่อยางธรรมชาติมากขึ้นส่งผลให้ความหนืดของยางธรรมชาติมีค่าลดลง โดยที่ 30 นาที เป็นค่าความหนืดที่ต่ำและเหมาะสมต่อกระบวนการผสมขึ้นต่อไป เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางถูกทำให้สั้นลงโดยกระบวนการ Mastication เมื่อความหนืดของยางลดลง ส่งผลให้ค่าความหนืด



ระหว่างยางกับพลาสติกมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นทำให้การผสมเข้ากันได้ดี และสารเคมีที่เติมในกระบวนการผสมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมีการกำหนดค่า Mooney ของยางธรรมชาติก่อนผสมอยู่ที่ประมาณ 20ML(1+4) 100°C เพื่อให้การผสมในแต่ละสูตรการผสมมีความสามารถในการผสม และเกิดการกระจายตัวของสารผสมที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 2.19 แสดงค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนและเวลา Mastication ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเฉือนและเวลา Mastication ทำให้ค่าความหนืดของยางลดลง เนื่องจากเมื่อให้อัตราการเฉือนและเวลา Mastication นานขึ้นส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางค่อย ๆ สั่นลง ยางจึงมีความสามารถในการไหลมากขึ้น อีกทั้งเกิดจากการให้ความร้อนและแรงเฉือนเข้าไปทำให้ยางเกิดการขาดกันของสายโซ่โมเลกุลได้ง่ายขึ้น ทำให้ความหนืดที่วัดได้จึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.19 แสดงค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนและเวลา Mastication ที่แตกต่างกัน

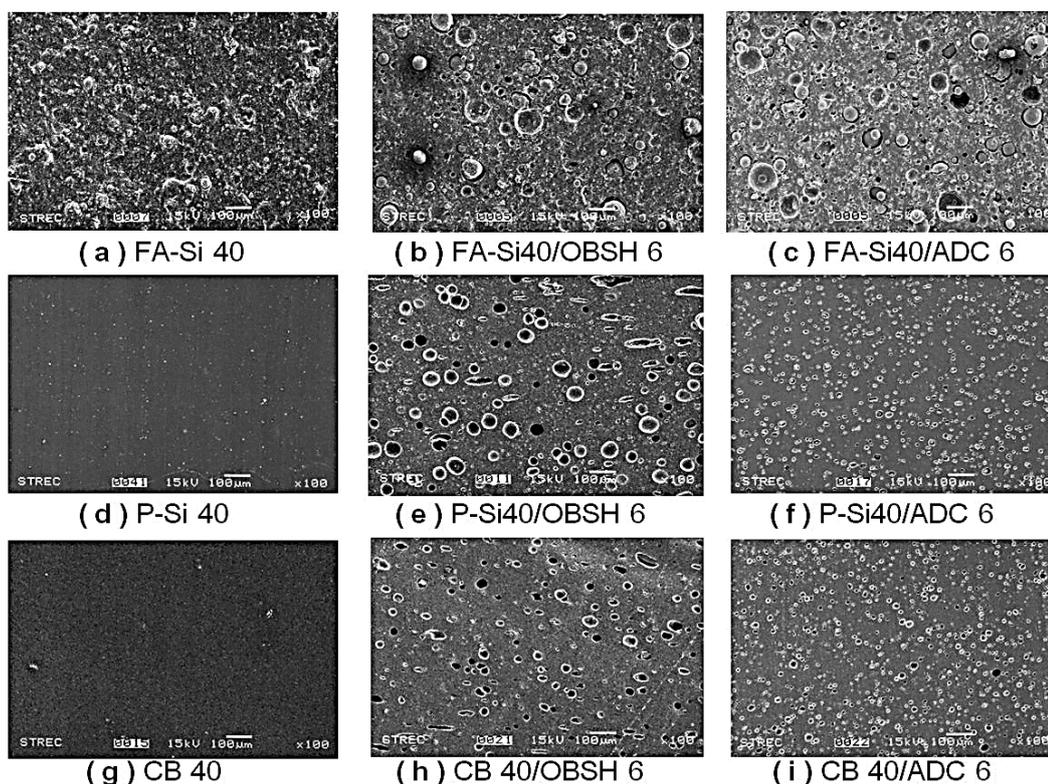
Wall shear rate (s <sup>-1</sup> )	Apparent viscosity (/10 <sup>3</sup> N.s.m <sup>2</sup> )			
	Mastication time			
	10 min	20 min	25 min	30 min
4	18.1	19.4	19.4	18.1
8	12.3	11.7	11.7	9.7
13	9.3	10.1	9.6	7.8
21	7.0	7.1	7.1	5.7
42	4.1	4.3	4.1	3.7
83	2.4	2.5	2.3	2.3
125	2.1	1.9	1.7	1.7

ในงานวิจัยของ Kritsara K. และคณะ [34] ศึกษาผลของประเภทและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองทางเคมีในยางผสมที่เป็นโพลีเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่อัตราส่วนยางผสมเท่ากัน (1:1) ที่มีผลต่อสมบัติการคงรูป เชิงกล และทางโครงสร้างจุลภาค โดยใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรราไซด์ (Oxybis benzene sulfonyl hydrazide; OBSH) และเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azo dicarbonamide; ADC) ที่ปริมาณ 0-10 phr สารเติมแต่งที่ใช้คือ ผงถั่วลอยก ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วนคงที่ 40 phr โดยที่ผงถั่วลอยกและผงซิลิกา ทำการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ผลการทดลองพบว่า เวลาในการคงรูป ความหนาแน่น สมบัติเชิงกลของยางผสมลดลงตามปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง โดยที่ OBSH มีประสิทธิภาพสูงกว่าสาร

ทำให้เกิดฟอง ADC ยางผสมที่เติมผงเขม่าดำมีขนาดของเซลล์ฟองขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมที่เติมผงซิลิกา และผงเถ้าลอย ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมไม่มีผลต่อสมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด แต่สมบัติความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดลดลง เมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี

การตรวจสอบยางผสม NR/SBR ที่เติมและไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณ 6 phr ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณ 40 phr ด้วยภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 2.36 พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองในยางผสม NR/SBR ที่เติมซิลิกา หรือผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง มีลักษณะพื้นผิวชิ้นงานยางผสมที่เกิดจากการตัดที่มีความสม่ำเสมอและเรียบ เนื่องจากอนุภาคของสารเติมแต่งมีขนาดอนุภาคเล็กและสามารถเข้ากับเนื้อยางได้ดี ขณะที่อนุภาคผงเถ้าลอยส่วนมากมีขนาดใหญ่เกิดผิวหน้าตัดที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน Si69 แล้ว ในขณะการบดผสมอาจเกิดการแตกย่อยของอนุภาคเถ้าลอยเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงอีก ซึ่งอนุภาคของเถ้าลอยขนาดเล็กที่แตกย่อยออกมานี้ เป็นส่วนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน จึงทำให้มีการยึดเกาะระหว่างอนุภาคยางกับสารเติมแต่ง (Rubber filler interaction) ที่ลดลง นอกจากนี้ยังเกิดการรวมตัวกัน (Coalescence) ของฟองก๊าซรอบๆ ผิวอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพของฟองก๊าซจนเกิดเป็นช่องว่างรอบ ๆ อนุภาคผงเถ้าลอยชัดเจน



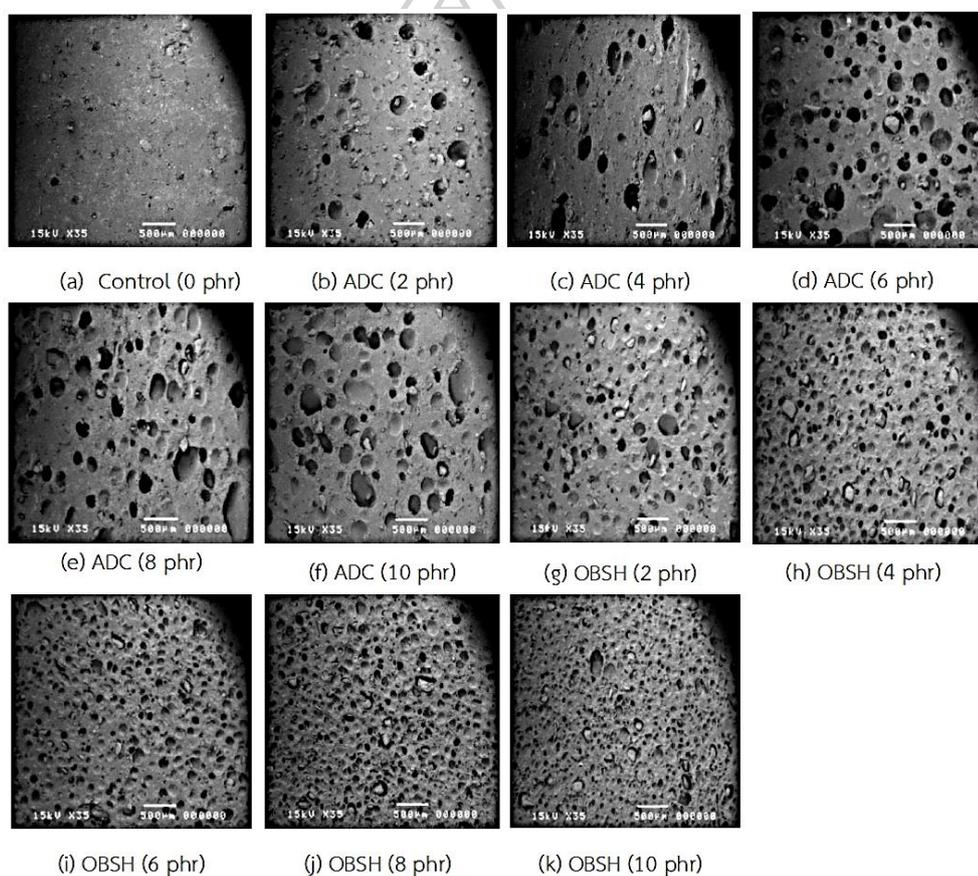


รูปที่ 2.36 แสดงภาพถ่าย SEM ของยางผสม NR/SBR ที่ไม่เติมและเติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH หรือ ADC ที่ 6 phr โดยใช้สารเติมแต่งที่ต่างกัน

ในงานวิจัยของ Darinya M. และคณะ [35] มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารก่อฟองต่อสมบัติของโพลียาเอทิลีนที่ใส่ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 30 phr โดยใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด ได้แก่ อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC) และออกซิซิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSH) ที่ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8, และ 10 phr พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองส่งผลให้เวลาในการคงรูปโพลียาเอทิลีนเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของโพลียาเอทิลีนลดลง โดยที่ในกรณีของการใช้สารก่อฟอง OBSH โพลียาเอทิลีนจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟอง ในขณะที่การใช้สารก่อฟองชนิด ADC โพลียาเอทิลีนจะมีความแข็งแรงต่ำสุดที่การใช้สารก่อฟอง 2 phr หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณ ADC ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่า OBSH ให้โพลียาเอทิลีนที่มีจำนวนและความสม่ำเสมอของรูพรุนมากกว่า ADC

จากรูปที่ 2.37 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพลียาเอทิลีนที่ใส่ร่าสกัดน้ำมันที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 ไมครอน ในปริมาณ 30 phr โดยแปรชนิดและปริมาณสารก่อฟอง ได้แก่ ADC และ OBSH ในปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 35 เท่า พบว่าชนิดและปริมาณสารก่อฟองนั้นมีผลต่อลักษณะโครงสร้างเซลล์หรือ

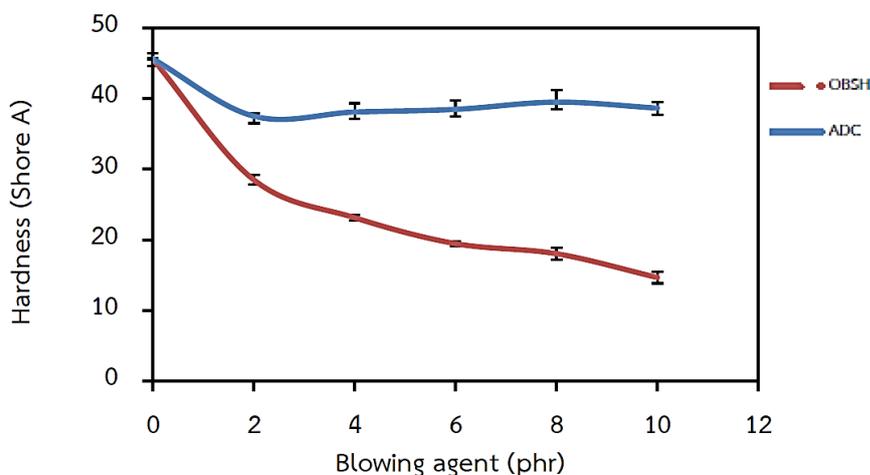
โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของยางโฟม ซึ่งสารก่อฟอง OBSH ให้จำนวนรูพรุน และการกระจายตัวที่มากกว่า ADC อาจเนื่องมาจาก OBSH สลายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C ทำให้ปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกมามากขึ้นตามปริมาณสารก่อฟอง สังเกตจากรูปที่ 2.36 (g) - (k) จากที่รูพรุนของยางโฟมมีขนาดใหญ่และกระจายตัวได้ไม่ดี จะเริ่มมีขนาดเล็กลงและการกระจายตัวดีขึ้นตามปริมาณ OBSH ที่เพิ่มขึ้น ส่วนสารก่อฟอง ADC ให้จำนวนรูพรุนน้อย แต่ขนาดรูพรุนใหญ่กว่า OBSH และเมื่อเพิ่มปริมาณ ADC มากกว่า 6 phr พบว่าลักษณะเซลล์ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนอาจเป็นเพราะ ADC สลายตัวได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ ADC (150-200 °C) สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ OBSH (150-160 °C)



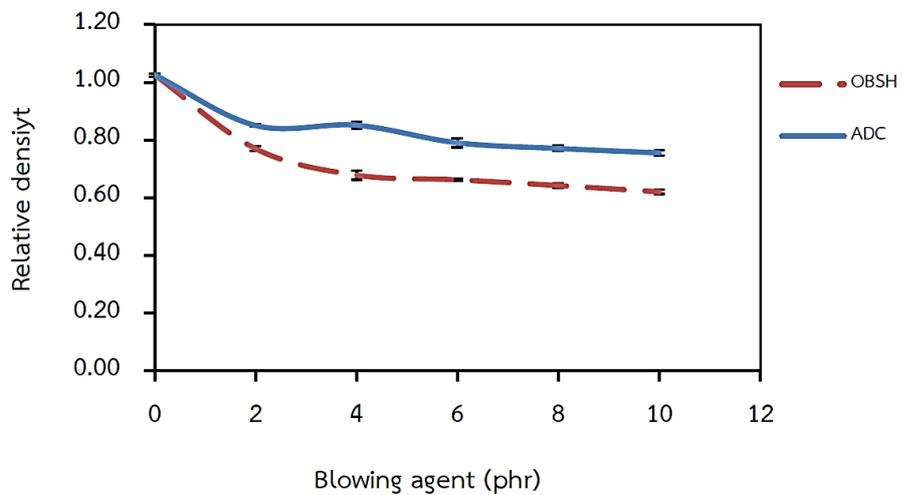
รูปที่ 2.37 ภาพ SEM ของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้สารก่อให้เกิดฟองต่างกัน

จากรูปที่ 2.38 แสดงว่าโฟมยางที่เติมสารก่อฟองชนิด OBSH ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารก่อฟองที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากยางที่เติม OBSH จะมีปริมาณรูพรุนที่มากขึ้น เมื่อปริมาณของ OBSH เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ยางมีความแข็งลดลงซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นที่ลดลงด้วย (รูปที่ 2.39) ในขณะที่ยางที่เติม ADC ที่ 2 phr ค่าความแข็งจะลดลงจากนั้นมีแนวโน้มคงที่ เมื่อ

เพิ่มปริมาณ ADC เป็น 4, 6, 8 และ 10 phr เนื่องจากปริมาณ ADC ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณรูพรุนเพียงเล็กน้อย สังเกตได้จากรูปที่ 2.37 จึงทำให้ค่าความแข็งของยางที่ใช้ ADC มีแนวโน้มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากรูปที่ 2.39 แสดงค่าความหนาแน่นของโฟมยาง พบว่าความหนาแน่นของโฟมยางลดลงตามปริมาณสารก่อฟองที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารก่อฟองเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซภายในเนื้อยางทำให้ภายในเนื้อยางเกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากเป็นผลทำให้ยางมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งจะเห็นว่าสารก่อฟองชนิด OBSH จะทำให้เกิดฟองได้มากกว่า ADC สังเกตได้จากรูปที่ 2.37 แสดงภาพถ่าย SEM พบว่าโฟมยางที่เติม OBSH มีจำนวนรูพรุนมากกว่า ดังนั้นยางที่เติม OBSH จึงมีความหนาแน่นน้อยกว่ายางที่เติมสารก่อฟองชนิด ADC เหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากในการคงรูปยางใช้อุณหภูมิ 150 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ OBSH สามารถสลายตัวได้ดีกว่า ADC โดย OBSH มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 150-160 °C และ ADC มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า OBSH โดย ADC มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 150-200 °C ส่งผลทำให้ ADC เกิดการสลายตัวได้ไม่เต็มความสามารถ จึงทำให้ยางที่เติมสารก่อฟองชนิด OBSH มีความหนาแน่นน้อยกว่ายางที่เติม ADC



รูปที่ 2.38 กราฟเปรียบเทียบค่า Hardness ของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้สารก่อให้เกิดฟองต่างกัน



รูปที่ 2.39 กราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้สารก่อให้เกิดฟองต่างกัน



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.) ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) เกรด STR 5L จากบริษัท พี เจ รับเบอร์ จำกัด ประเทศไทย
- 2.) ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber; CR) เกรด M-30 จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย
- 3.) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) จากบริษัท อูทิสเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นหรือสารเสริมตัวเร่ง (Activator)
- 4.) กรดสเตียริก (Stearic acid) จากบริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นหรือสารเสริมตัวเร่ง (Activator)
- 5.) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO) จากบริษัท เอเพกซ์ เคมีเคิล จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นหรือสารเสริมตัวเร่ง (Activator)
- 6.) ไสโคลเฮกซิลเบนโซไทอาโซล-2-ซัลโฟนาไมด์ (N-Cyclohexylbenzothiazol-2-sulphenamide; CBS) จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (Accelerator)
- 7.) เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram Disulfide; TMTD) จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (Accelerator)
- 8.) เตตระเมทิลไทยแรมโมนอสัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram monosulphide; TMTM) จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (Accelerator)
- 9.) เอทิลีน ไธโอยูเรีย (Ethylene thiourea; ETU) จากบริษัท เอเพกซ์ เคมีเคิล จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (Accelerator)
- 10.) กำมะถัน (Sulphur; S<sub>8</sub>) จากบริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป (Vulcanising agent)
- 11.) นาโนซิลิกา (Nano silica) เกรด Ultrasil VN3 จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Physical Compatibilizer)

12.) พอลิไอโซพรีน-กราฟต์-มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polyisoprene-graft-maleic anhydride; IR-g-MA) จากบริษัทซิกม่า-อัลดริช จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Chemical Compatibilizer)

13.) ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรไรด์ (Oxy bisbenzenesulphonyl hydrazide; OBSH) จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent)

14.) เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide; ADC) จากบริษัท A.F. Supercell Co.,Ltd ประเทศไทย ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.) เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) บริษัท LabTech รุ่น LRM-S-110/T3E ประเทศไทย

2.) เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดแรงดัน (Compression molding machine) รุ่น PR1D-W300L350 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย ประเทศไทย

3.) เครื่องวัดความหนืดของยาง (Mooney Viscometer) บริษัท GÖTTFERT ประเทศเยอรมนี

4.) เครื่องตัดชิ้นงาน (Pneumatic sample cutting) รุ่น CUT-W150L200-ST150 จากบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย

5.) เครื่องศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง (Moving die rheometer, MDR) รุ่น M2000 บริษัท GOTECH ประเทศไทย

6.) เครื่องมือศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น Model 5969 จากบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

7.) เครื่องมือทดสอบความแข็ง ได้แก่ Hardness Testing Machine จากบริษัท PTC Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา

8.) เครื่องมือศึกษาความหนาแน่น ได้แก่ เครื่อง Density kit รุ่น ME-DNY-4 จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



9.) เครื่องมือศึกษาลักษณะสัณฐานทางวิทยา ได้แก่ เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น TM 3030 บริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น

10.) เครื่องมือศึกษาสมบัติทางความร้อน ได้แก่ Thermogravimetric analysis (TGA 7) บริษัท Perkin Elmer ประเทศไทย

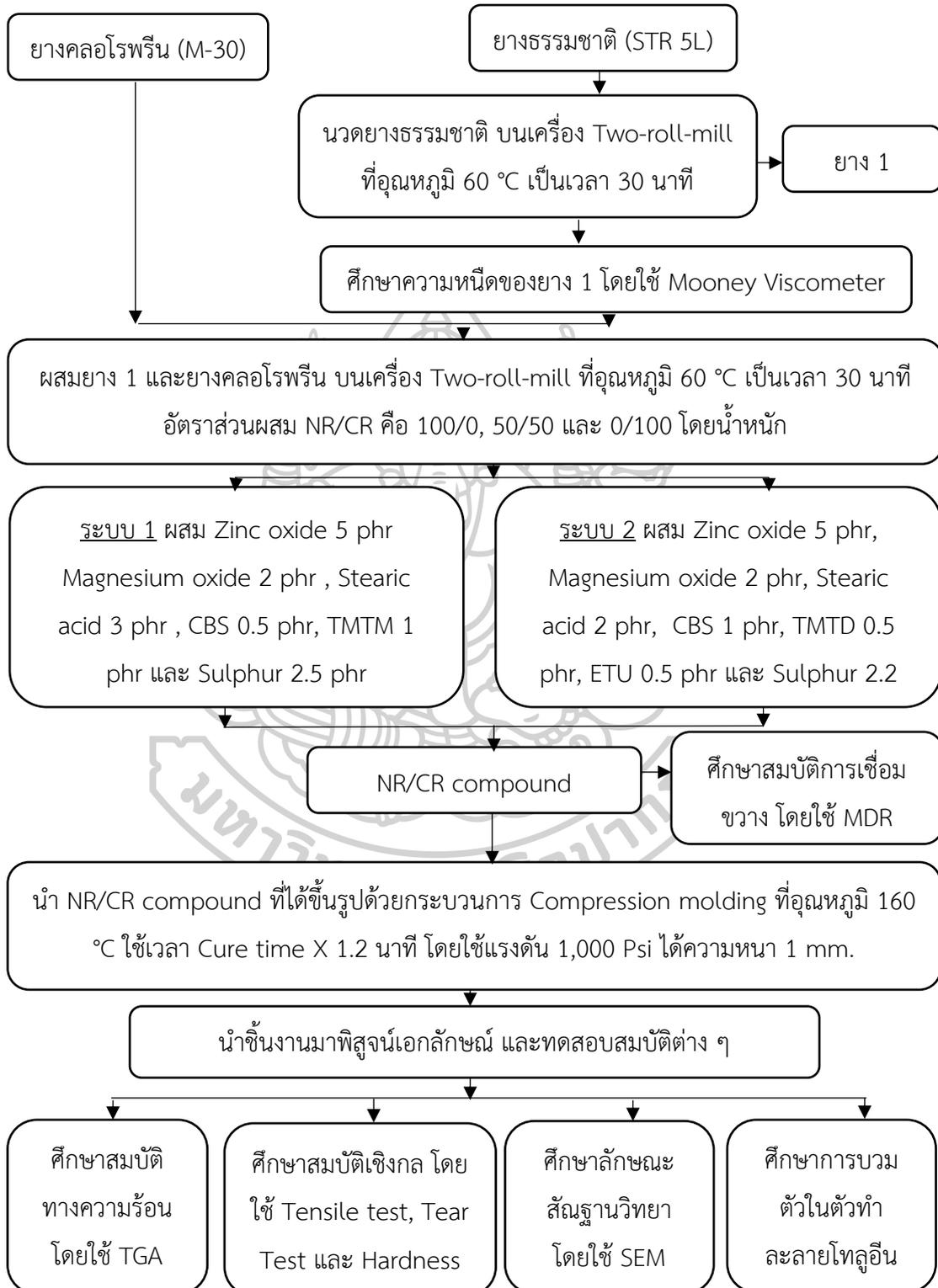
11.) เครื่องมือศึกษาความสามารถในการคืนรูปร่าง ได้แก่ Compression set

12.) เครื่องมือศึกษาสมบัติการต้านทานการติดไฟ ได้แก่ Limiting Oxygen Index (LOI) และ UL-94 (Underwriters Laboratories 94V)

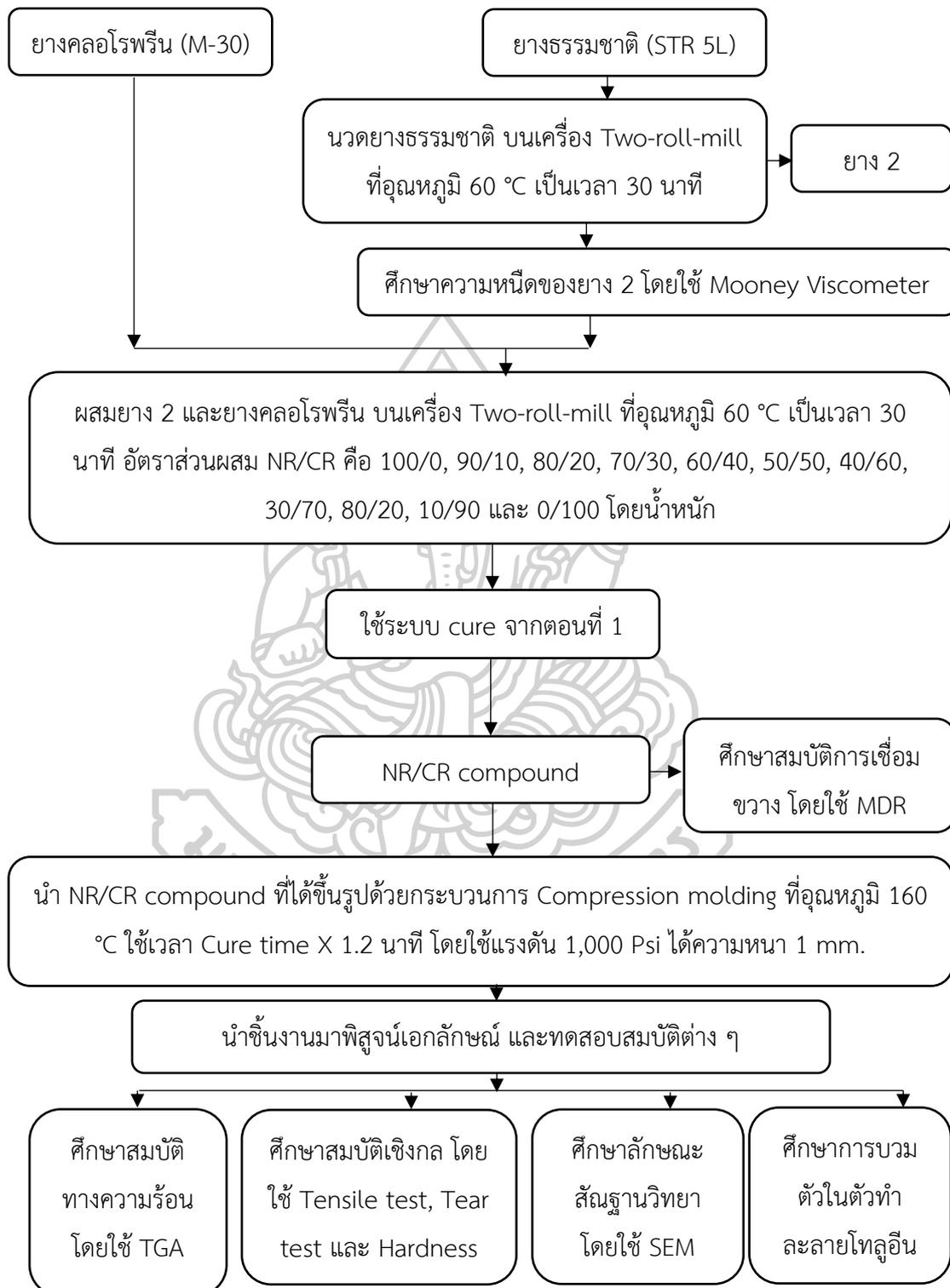


### 3.3 วิธีการทดลอง

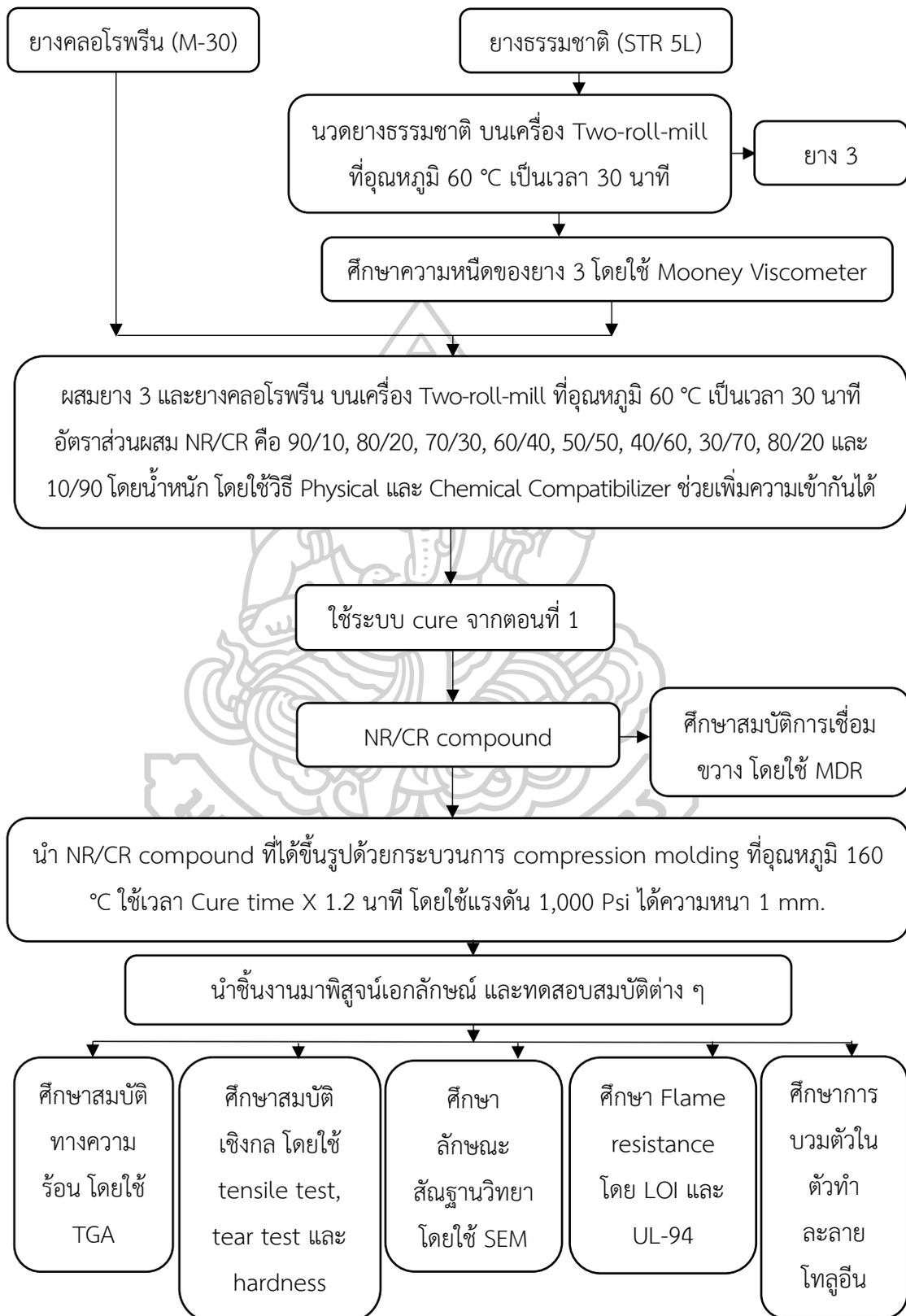
ตอนที่ 1 การศึกษาระบบ Cure ที่เหมาะสมของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน



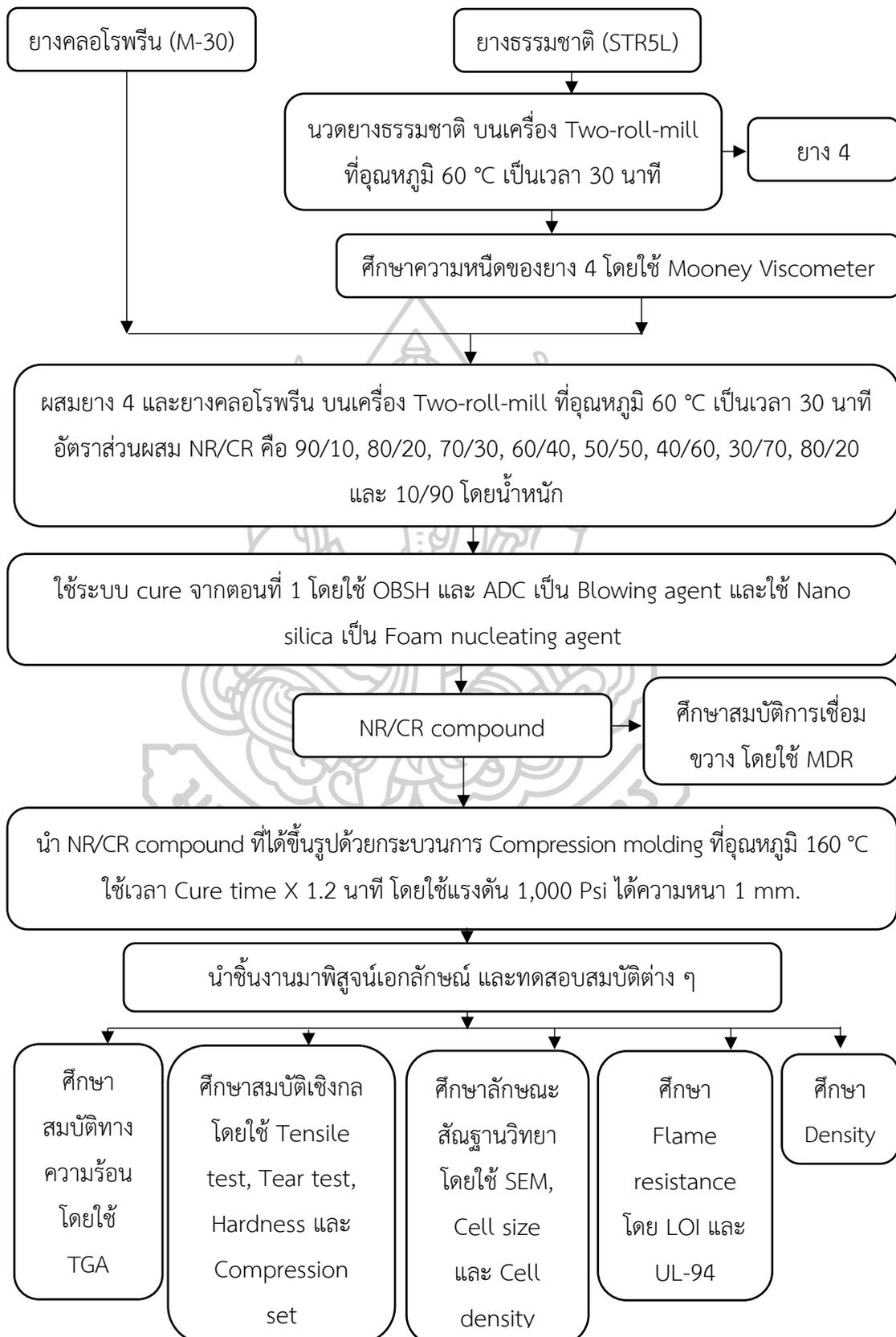
**ตอนที่ 2** การศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend



**ตอนที่ 3** การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR



**ตอนที่ 4** การศึกษาผลของชนิดของ Blowing agent ต่อโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน



### 3.4 การทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

#### 3.4.1 การทดสอบความหนืดของยาง (Mooney viscosity)

การทดสอบความหนืดของยางทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) บริษัท GÖTTFERT ประเทศเยอรมนี โดยใช้ในการทดสอบความหนืดของยางดิบ ตามมาตรฐาน ASTM D1646 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 100 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบโดยการอุ่นยาง 1 นาที แล้วทำการทดสอบใช้เวลา 4 นาที ข้อมูลที่ได้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา และแสดงผลการทดสอบมีรายละเอียด ดังนี้

50 ML (1+4) 100 °C

โดยที่ 50 M คือ ค่าความหนืดที่วัดได้

L คือ จานโลหะขนาดใหญ่ที่ใช้ทดสอบ (S คือ จานโลหะขนาดเล็ก)

1 คือ เวลาในการอุ่นชิ้นงานตัวอย่าง มีหน่วยเป็นนาที (min)

4 คือ เวลาทดสอบ มีหน่วยเป็นนาที (min)

100 °C คือ อุณหภูมิในการทดสอบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

#### 3.4.2 การศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง (Cure characteristics)

ลักษณะการคงรูปของยางคอมปาวด์ ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) จากบริษัท Gotech รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 ในการทดสอบใช้ชิ้นทดสอบประมาณ 5 กรัมต่อการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเป็นรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งจะได้ค่า Scorch time ( $ts_2$ ), Cure time ( $tc_{90}$ ), Minimum Torque (ML), Maximum Torque (MH), Delta Torque ( $DT = MH - ML$ ) และ Cure rate index (CRI) ซึ่งค่า CRI นั้นคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.1

$$CRI = \frac{100}{tc_{90} - ts_2} \quad (3.1)$$

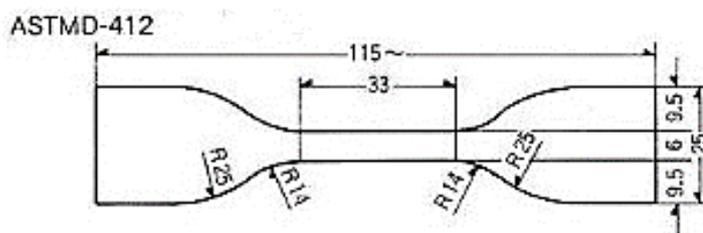
โดยที่ Cure rate index (CRI) คือ อัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized

Scorch time ( $ts_2$ ) คือ เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการ Vulcanized มีหน่วยเป็นนาที (min)

Cure time ( $tc_{90}$ ) คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป มีหน่วยเป็นนาที (min)

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงยืด (Tensile properties)

การทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงดึงยืด ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine จากบริษัท Instron engineering corporation รุ่น Instron 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยตัวชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบล แบบ die C ดังแสดงในรูปที่ 3.1 [36, 37] ใช้ Load cell ในการดึง 5 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยแสดงผลเป็น Stress-strain curve ซึ่งจะได้ค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Secant modulus ในขณะที่ค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Secant modulus สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบล [36]

$$\text{Tensile strength} = \frac{F(\text{maximum load})}{A} \quad (3.2)$$

โดยที่ Tensile strength คือ ความทนทานต่อแรงดึงยืด มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

F คือ แรงที่ใช้ดึงจนขาดหรือแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานขาด มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ( $\text{mm}^2$ )

$$\% \text{Elongation at break} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ %Elongation at break คือ ระยะยืดตัว ณ จุดขาด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร (mm/mm)

L คือ ระยะที่ชิ้นงานทดสอบสามารถยืดได้จนขาด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

$L_0$  คือ ระยะกำหนดก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

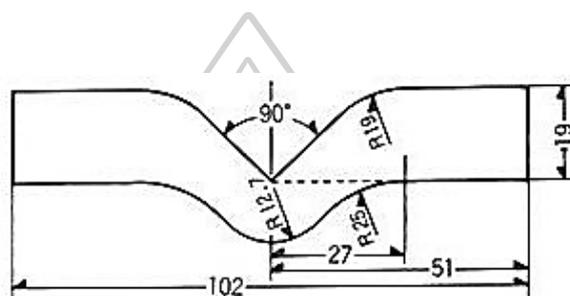
$$\text{Secant modulus} = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ดึงที่ระยะยืด 100%, 200% และ 300% จากระยะเดิม มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ( $\text{mm}^2$ )

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear properties)

การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด ซึ่งทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine จากบริษัท Instron engineering corporation รุ่น Instron 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยตัดชิ้นทดสอบตามตัวอย่างแบบมุมที่ไม่มีรอยบากตรงมุม ดังแสดงในรูปที่ 3.2 [37, 38] ใช้ Load cell ในการดึง 5 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยแสดงผลเป็น Load-extension curve ซึ่งจะได้ค่า Tear strength จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.2 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแบบมุม [38]

$$\text{Tear strength} = \frac{F}{d} \quad (3.5)$$

โดยที่ Tear strength คือ ความทนทานต่อการฉีกขาด มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm)

F คือ แรงที่ใช้ดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานขาด มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

d คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

### 3.4.5 การทดสอบการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัด (Compression set)

การทดสอบการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัดของโฟมยาง ตามมาตรฐาน ASTM D1056 โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง x ยาว x หนา เป็น  $20 \times 20 \times 15$  มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกดให้ความหนาของชิ้นงานลดลง 50 % และเก็บไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำโฟมยางออกจากแผ่นกดอัดทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงวัดความหนา จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณ %Compression set ตามสมการที่ 3.6

$$\% \text{Compression set} = \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_n} \times 100 \quad (3.6)$$



โดยที่ Compression set คือ ค่าการยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงกดอัด มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$T_0$  คือ ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

$T_i$  คือ ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

$T_n$  คือ ความหนาของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

### 3.4.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็งของยาง ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester, Durometer) จากบริษัท PTC instruments รุ่น 473 ประเทศสหรัฐอเมริกา ตาม ASTM D2240 โดยใช้หัวทดสอบแบบ Shore A และ Load ขนาด 1 กิโลกรัม

### 3.4.7 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของยางและโฟมยาง ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Density kit จากบริษัท METTLER TOLEDO รุ่น ME-DNY-4 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ การทดสอบความหนาแน่นโดยตัดชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งรายงานผลการทดสอบเป็นค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ )

### 3.4.8 การทดสอบความพองตัวต่อการบวมตัว (Swelling ratio)

การทดสอบการบวมตัวของยางที่ผ่านการคงรูป โดยทำการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายโทลูอีน หลังจากนั้นวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนไปทุก ๆ 15 นาที จำนวน 12 ครั้ง, ทุก ๆ 30 นาที จำนวน 6 ครั้ง, ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง, ทุก ๆ 6 ชั่วโมง จำนวน 2 ครั้ง และทุก ๆ 8 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง หลังจากนั้นคำนวณค่า %Swelling ดังสมการที่

3.7

$$\%Swelling = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ %Swelling คือ ร้อยละการบวมตัวของชิ้นงานเทียบกับก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น %

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นกรัม (g)

$W_t$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นกรัม (g)

### 3.4.9 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) จากบริษัท Hitachi high-technologies รุ่น TM3030 ประเทศญี่ปุ่น โดยนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ไนโตรเจนเหลวจนอยู่ในสภาวะเย็นยิ่งยวด (Cryogenic fracture) หรือตัวอย่างทดสอบอยู่ในสภาวะ glassy state และทุบให้แตก จากนั้นนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นวางตัวอย่าง (stub) ที่มีกระดาษคาร์บอนวางเพื่อให้อื่นติดกับแท่นดังกล่าว แล้วจึงนำไปเคลือบด้วยทอง (Au) โดยใช้การ sputtering หลังจากเคลือบแล้วนำ stub ตัวอย่างวางบนที่วางตัวอย่างใน chamber ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นเปิดเครื่องดูดอากาศใน chamber เพื่อให้เป็นสุญญากาศ เพื่อเกิดลำอิเล็กตรอนเมื่อเริ่มจ่าย voltage 15 kV เลือกตำแหน่งที่ต้องการบันทึกภาพ ปรับกำลังขยาย แล้วจึงบันทึกภาพ สำหรับยางผสม morphology สามารถใช้ศึกษาลักษณะความเข้ากันได้ของยางผสม สำหรับโพลิเมอร์ผสมจะใช้ศึกษาลักษณะของเซลล์โพลิเมอร์และความหนาแน่นของเซลล์โพลิเมอร์ โดยคำนวณจากสมการที่ 3.8 และการศึกษาการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลิเมอร์ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม ImageJ

$$\text{Cell density } (N_f) = \left( \frac{n \cdot M^2}{A} \right)^{3/2} \quad (3.8)$$

โดยที่  $N_f$  คือ ความหนาแน่นของเซลล์โพลิเมอร์ มีหน่วยเป็นจำนวนเซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cell/cm<sup>3</sup>)

$n$  คือ จำนวนเซลล์ใน SEM photomicrograph

$M$  คือ กำลังขยายใน SEM photomicrograph

$A$  คือ พื้นที่ใน SEM photomicrograph

### 3.4.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น TGA7HT ซึ่งหลักการจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกับอุณหภูมิ ใช้ตัวอย่างชิ้นงานในรูปยางผสมที่ผ่านการ vulcanized ปริมาณ 4-7 มิลลิกรัม ช่วงอุณหภูมิทดสอบ 50-700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

### 3.4.11 การทดสอบความสามารถในการติดไฟ (Flammability properties)

#### 3.4.11.1 Limiting oxygen index (LOI)

Limiting oxygen index (LOI) คือ ดัชนีชี้วัดความสามารถในการติดไฟ (flammability) โดยวัดจากปริมาณต่ำสุดของออกซิเจนในบรรยากาศ ที่วัสดุสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอากาศประกอบด้วยแก๊สออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ ถ้าวัสดุมีค่า LOI ต่ำกว่า 21 ก็จะจัดอยู่ในประเภทที่เผาไหม้ได้ ในขณะที่วัสดุที่มีค่า LOI สูงกว่า 21 ก็จะจัดอยู่ในประเภทที่ดับไฟได้ด้วยตัวเอง ยิ่งวัสดุมีค่า LOI สูงก็จะมีสมบัติการต้านทานการติดไฟที่ดี โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863-91 โดยวางชิ้นงานทดสอบตามแนวตั้งในกระบอกแก้วที่มีแก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับไนโตรเจน จากนั้นจุดไฟเผาชิ้นงานทดสอบ ปรับปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปจนถึงระดับชิ้นงานเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง และคำนวณค่า LOI ตามสมการที่ 3.10

$$LOI = \frac{[O_2]}{[O_2]+[N_2]} \times 100 \quad (3.10)$$

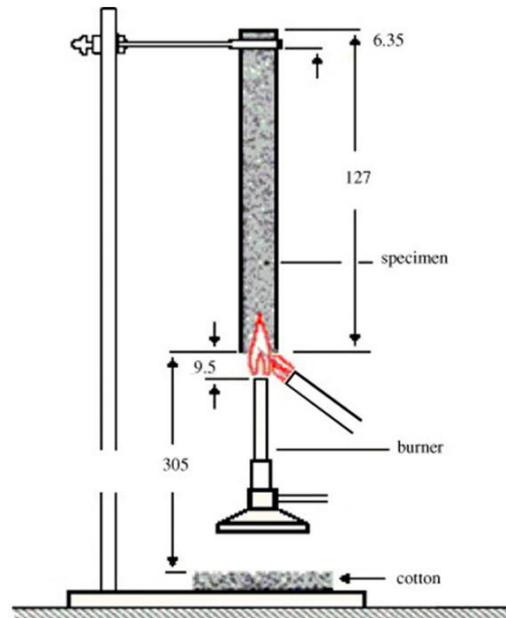
เมื่อ *LOI* คือ ดัชนีออกซิเจนหรือปริมาณต่ำสุดของออกซิเจนที่วัสดุสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$[O_2]$  คือ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน มีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที (L/min)

$[N_2]$  คือ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน มีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที (L/min)

#### 3.4.11.2 Underwriters Laboratories 94V (UL-94)

Underwriters Laboratories 94V (UL-94) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบการลามไฟของวัสดุ โดยเผาไหม้ในแนวตั้ง ใช้ชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10 × 127 × 3.2 มิลลิเมตร จัดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3 [39] โดยทำการจุดไฟ 10 วินาที แล้วเอาไฟออกจากชิ้นงานจับเวลาในการติดไฟจนไฟดับ บันทึกเป็นค่า  $t_1$  และเว้นระยะสัก 1 นาที จุดไฟอีกครั้งเป็นเวลา 10 วินาที แล้วเอาไฟออกจากชิ้นงานจับเวลาในการติดไฟจนไฟดับ บันทึกเป็นค่า  $t_2$  และสุดท้ายเว้นระยะสัก 1 นาที จุดไฟอีกครั้งเป็นเวลา 10 วินาที แล้วเอาไฟออกจากชิ้นงานจับเวลาในการติดไฟจนไฟดับ บันทึกเป็นค่า  $t_3$  ตลอดจนบันทึกการหยดลงของวัสดุหลอมเพื่อนำไปจัดระดับว่าอยู่ในเกณฑ์ใด ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ UL94 V0, UL94 V1 และ UL94 V2 โดยที่สามารถแบ่งประเภทของแต่ละประเภทได้ตาม ตารางที่ 3.1 ซึ่ง UL94 V0 จะมีสมบัติการต้านทานการติดไฟที่ดีที่สุด รองลงมาคือ UL94 V1 และ UL94 V2



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการเผาไหม้โดยเทคนิค UL94 [37]

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของ UL-94 แต่ละประเภท

สมบัติ	ชั้นคุณภาพ (Classification)		
	V-0	V-1	V-2
$t_1$ หรือ $t_2$ ของแต่ละตัวอย่าง (วินาที)	$\leq 10$	$\leq 30$	$\leq 30$
$t_1$ บวก $t_2$ ของทั้ง 5 ตัวอย่างรวมกัน (วินาที)	$\leq 50$	$\leq 250$	$\leq 250$
$t_2$ บวก $t_3$ ของทั้ง 5 ตัวอย่างรวมกัน (วินาที)	$\leq 30$	$\leq 60$	$\leq 60$
การลามไฟทั้งแบบมีเปลวไฟและไม่มีเปลวไฟจนถึงตัวจับ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สำลิลูกติดไฟจากประกายหรือหยดของวัสดุ	ไม่มี	ไม่มี	มี

### 3.4.12 การทดสอบการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Thermal aging)

เตรียมชิ้นงานในการทดสอบการดึงยึดและการฉีกขาด แล้วนำมาบ่มเร่งสภาวะในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D-573 เมื่อบ่มเร่งสภาวะดังกล่าวแล้วจึงนำชิ้นงานออกมาจากตู้อบ จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติการดึงยึดและการฉีกขาดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM D412 และ ASTM D624 ตามลำดับ โดยใช้ Load cell ในการดึง 5 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งจะได้ผลออกมาในรูปค่า Secant modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Tear strength และทดสอบความแข็ง (Hardness(Shore A))



## บทที่ 4

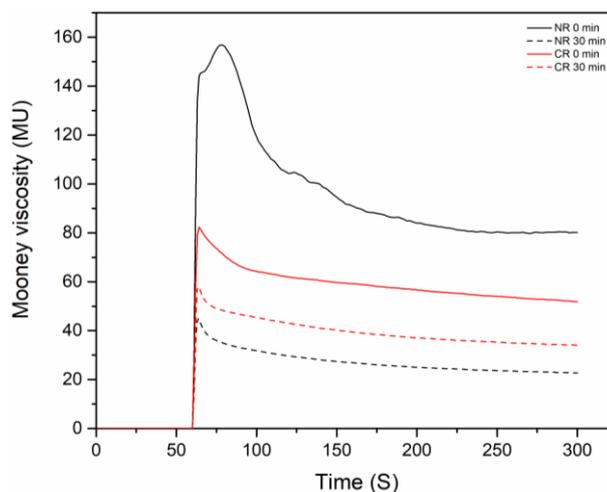
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ตอนที่ 1 การศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสม

ในงานวิจัยตอนนี้จะเป็นการเลือกระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางคลอโรพรีน (CR) เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิด Crosslink ของยางทั้ง 2 ชนิดนี้ มีความว่องไวและปริมาณการเกิด Crosslink ที่แตกต่างกัน [22, 40] ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติของยาง Vulcanizate โดยในการศึกษาตอนนี้ จะกำหนดอัตราส่วนของ NR/CR เท่ากับ 100/0, 50/50 และ 0/100 ซึ่งจะแบ่งระบบวัลคาไนซ์ออกเป็น 2 ระบบ โดยระบบที่ 1 จะใช้สารเคมี ZnO/MgO/Stearic acid/CBS/TMTM/Sulphur เท่ากับ 5/2/3/0.5/1/2.5 phr และระบบที่ 2 จะใช้สารเคมี ZnO/MgO/Stearic acid/CBS/TMTD/ETU/Sulphur เท่ากับ 5/2/2/1/0.5/0.5/2.2 phr สมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย ความหนืดของยาง ลักษณะการคงรูป ลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการบวมตัวของยาง เพื่อนำมาพิจารณาหาระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในตอนถัดไป

##### 4.1.1 การทดสอบหาความหนืดของยาง

สำหรับการผสมยางนั้นโดยทั่วไปแล้วยางที่ผสมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการบดยางเพื่อทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง ส่งผลให้ความหนืดของยางลดลงก่อนผสมสารเคมี โดยเฉพาะยางธรรมชาติ จะทำการลดความหนืดใกล้เคียงกันกับยางคลอโรพรีน ซึ่งจะทำให้ยางทั้งสองผสมเข้ากันได้ดีขึ้น เพื่อลดปัญหาความไม่เข้ากันทางความหนืดของการผสมระหว่างยางต่างชนิดกัน [22] ในการทดสอบหาความหนืดของยางดิบ คือ ยางธรรมชาติ เกรด STR 5L และยางคลอโรพรีน เกรด M-30 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยเครื่อง Mooney viscometer ทำการทดสอบโดยการอุ่นยาง 1 นาที แล้วทำการทดสอบใช้เวลา 4 นาที ข้อมูลที่ได้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา จะสามารถอ่านค่าความหนืดมูนนี่ในช่วงที่กราฟเริ่มคงที่ ซึ่งจะได้ออกมาเป็นค่า Mooney viscosity โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Mooney viscosity ของยางธรรมชาติ เกรด STR 5L และยางคลอโรพรีน เกรด M-30 ที่ผ่านการ Masticated เป็นเวลา 0 และ 30 นาที

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางแต่ละชนิด

ชนิดของยาง	Mastication time (min)	Mooney viscosity (ME)
NR เกรด SRT 5L	0	80.2
NR เกรด SRT 5L	30	22.8
CR เกรด M-30	0	51.9
CR เกรด M-30	30	34.1

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่ายางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [2-4] ความสามารถในการไหลขณะผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นหรือสารเคมีต่าง ๆ เป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องทำให้ความหนืดของยางธรรมชาติลดลงด้วยกระบวนการ Mastication ในการทดลองนี้จะใช้เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two-roll-mill) โดยการให้แรงเฉือน ความร้อน และการตัด ซึ่งจะช่วยให้สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการขาดออก น้ำหนักโมเลกุลของยางจะลดลง เป็นผลให้ความหนืดมีค่าลดลง ในงานวิจัยนี้จะใช้เวลาในการ Masticated 30 นาที ค่าความหนืดมูนนี่ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

จากผลการทดสอบความหนืดของยางธรรมชาติ เกรด STR 5L และยางคลอโรพรีน เกรด M-30 ที่ไม่ผ่านการ Masticated และที่ผ่านการ Masticated เป็นเวลา 30 นาที นั้นมีค่า Mooney viscosity เท่ากับ 80.2, 22.8, 51.9 และ 34.1 MU ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความหนืดของยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนมีค่าลดลง เมื่อยางผ่านการ Masticate แต่ยางธรรมชาติจะมีการตอบสนองต่อการ Masticate ที่มากกว่า กล่าวคือ เมื่อบดยางธรรมชาติเป็นเวลา 30 นาที ยาง

ธรรมชาติจะมีแนวโน้มของความหนืดมูนนี้ที่ลดลงมากกว่ายางคลอโรพรีน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติเกิดการขาดออกจากกันได้ง่ายกว่า เกิดเป็นอนุโมลิสระ ได้ง่ายกว่ายาง CR ทำให้ขนาดโมเลกุลของยางจึงสั้นลงได้มากกว่ายาง CR [25, 33]

#### 4.1.2 ผลการทดสอบ Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปทั้ง 2 ระบบ

การเตรียมยางคอมปาวด์ เริ่มต้นจากการผสมยางกับสารเคมี ด้วยเครื่องบดผสมแบบลูกกลิ้ง โดยมีอุณหภูมิการผสม  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  และใช้ friction ratio เท่ากับ 1:1.2 ทำการผสมยางและสารเคมีจนกระจายเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นยางคอมปาวด์ออกมา โดยใช้เวลาผสมไม่เกิน 10 นาที จากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบ Cure characteristic ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงเป็นกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา จากกราฟจะได้ค่า Scorch time ( $ts_2$ ), Cure time ( $tc_{90}$ ), Minimum Torque (ML), Maximum Torque (MH), Delta Torque (DT) และ Cure rate index (CRI) จากนั้นจึงนำยางคอมปาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดด้วยความร้อนและแรงดัน (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาในการขึ้นรูปทดสอบ เท่ากับ  $(\text{Cure time, } tc_{90}) \times 1.2$  ที่ได้จากการทดสอบ MDR ในงานวิจัยตอนนี้จะเป็นการเลือกระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางคลอโรพรีน (CR) โดยเปรียบเทียบระบบวัลคาไนซ์ออกเป็น 2 ระบบ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

โดยทั่วไปแล้ว Cure characteristic curve ของยางคอมปาวด์ จะเห็นได้ว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง ที่สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง [41] คือ

1. ช่วงเริ่มต้น (Processing) เมื่อยางได้รับความร้อน ยางก็จะนิ่มลงทำให้แรงบิดลดลงในช่วงแรก จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุด หรืออีกนัยหนึ่งคือมีค่าแรงบิด (torque) ต่ำที่สุด และจะมีค่าคงที่อยู่ ณ จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ซึ่งจุดที่มีค่าแรงบิดต่ำที่สุดนี้ จะเรียกว่า Minimum Torque (ML)

2. ช่วงการวัลคาไนซ์ (Curing) เมื่อยางคอมปาวด์ได้รับความร้อนและแรงบิดเป็นเวลานานขึ้น ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ต่อไป ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้น หรือแรงบิดเพิ่มสูงขึ้น เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มบิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ เรียกว่า “เวลาสกอร์ช (Scorch time)” และใช้สัญลักษณ์เป็น  $ts_2$  เวลาสกอร์ชเป็นค่าเวลาที่แสดงถึงเวลาที่ยางยังสามารถไหล เข้าไปยังแบบ ณ



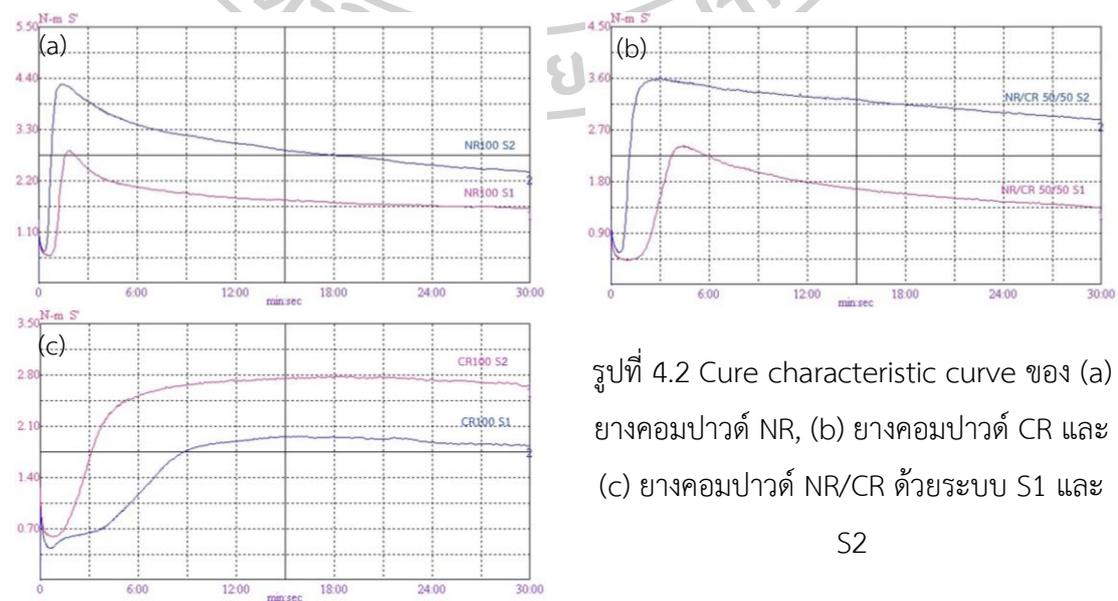
อุณหภูมินั้น ๆ หรือเป็นเวลาที่ยางคอมปาวด์เกิดการคงรูปไป 2% ซึ่งเป็นเวลาที่ปลอดภัยในกระบวนการผลิต

เมื่อทำการทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามระดับของการวัลคาไนซ์ จนกระทั่งถึงจุดที่การวัลคาไนซ์เกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ เวลาจุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดจะเรียกว่า Maximum Torque (MH) ซึ่งจะเป็นค่าแรงบิดที่แสดงถึงแรงบิดตาย ขณะยางวัลคาไนซ์สูงที่สุด หากให้เวลาในการทดสอบผ่านจุดสูงสุดนี้ไป จะเป็นช่วง Over cure สำหรับช่วงเวลาที่ยางเกิดการวัลคาไนซ์ เรียกว่า “เวลาในการคงรูป (Cure time) โดยเวลาในการที่ยางเกิดการวัลคาไนซ์ 90 % ใช้สัญลักษณ์เป็น  $tc_{90}$  จะเป็นเวลาที่นำมาใช้เป็นเวลาในการขึ้นรูปของยางคอมปาวด์ในการทดลองนี้ อย่างไรก็ตาม  $tc_{90}$  จากการทดสอบ MDR นั้น จะนำมาคูณด้วย 1.2 เพื่อเป็นเวลาในการขึ้นรูปยางเพื่อชดเชยแรงเฉือน ซึ่งไม่มีในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding

3. เป็นช่วงของการวัลคาไนซ์ที่มากเกินไป (Overcure) เมื่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดที่ใช้ในการบิดยาง อาจคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเรียกพฤติกรรมนี้ว่าเกิด “Plateau” แต่ในบางกรณีอาจพบว่าค่าแรงบิดที่ใช้ในการบิดยาง อาจจะสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ เรียกว่าเกิด “Marching” หรืออาจจะมีค่าแรงบิดของยางลดลงเรื่อย ๆ เรียกว่ามีการเกิด “Reversion” ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรผสมสารเคมีในยางคอมปาวด์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางคอมปาวด์ NR ยางคอมปาวด์ NR และ ยางคอมปาวด์ NR/CR ซึ่งได้ผลการทดลองเป็น cure characteristic curves ดังแสดงในรูปที่

4.2



รูปที่ 4.2 Cure characteristic curve ของ (a) ยางคอมปาวด์ NR, (b) ยางคอมปาวด์ CR และ (c) ยางคอมปาวด์ NR/CR ด้วยระบบ S1 และ

S2

จาก Cure characteristic curve ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปทั้ง 2 ระบบ ในรูปที่ 4.2 จะพบว่า Cure characteristic curve ของยางคอมปาวด์ NR ในรูปที่ 4.2 (a) แสดงพฤติกรรมเกิดการเกิด Reversion หลังจากยางคอมปาวด์เกิดวัลคาไนซ์สมบูรณ์แล้ว โดยจะเกิด Reversion ในทั้งสองระบบการคงรูป ซึ่งเกิดจากความร้อนทำให้พันธะ Polysulfide เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับหรือแตกออก การเสื่อมสภาพภายใต้ความร้อนเกิดเนื่องจากพลังงานพันธะระหว่างซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์ มีค่าน้อยกว่าพลังงานพันธะระหว่างคาร์บอนกับซัลเฟอร์ เพราะที่อะตอมของซัลเฟอร์จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่ 2 คู่ เมื่ออะตอมของซัลเฟอร์มาสร้างพันธะต่อกันจะทำให้พันธะที่เกิดระหว่างซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์ไม่เสถียร ทำให้เมื่อได้รับความร้อนพันธะระหว่างซัลเฟอร์จะเกิดการแตกออกได้ง่าย [22] ดังนั้นค่าแรงบิดจึงมีค่าลดลง

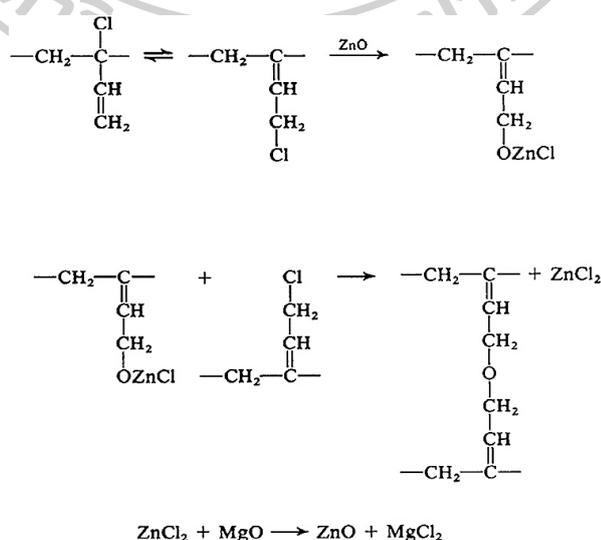
สำหรับยางคอมปาวด์ CR นั้น cure characteristic curve แสดงในรูปที่ 4.2 (c) ซึ่งจะปรากฏพฤติกรรมของกราฟแบบ Marching โดยจะปรากฏในทั้งสองระบบการคงรูปเช่นกัน สำหรับปรากฏการณ์การเกิด marching นั้น อาจมีสาเหตุ 2 ประการ โดยประการที่ 1 เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเกิด vulcanization ด้วยระบบ sulfur ของยาง CR นั้น เกิดได้ยากกว่า NR แม้ยาง CR จะมีพันธะคู่ในทุก ๆ หน่วยซ้ำในโมเลกุลของยางก็ตาม แต่ในปฏิกิริยา vulcanization ด้วยกำมะถัน ยางจำเป็นต้องมี allylic carbon เพื่อสร้างพันธะเชื่อมโยงกับซัลเฟอร์ แม้จำนวนของ allylic carbon ในหนึ่งหน่วยซ้ำยาง CR จะมี 2 allylic carbon แต่อะตอมของคลอรีนในหน่วยซ้ำนี้ จะทำให้พันธะคู่ในโมเลกุลของยาง CR มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นในช่วง Overcure ยาง CR สามารถเกิดการ Crosslink ต่อได้อีก ส่งผลให้แรงบิดค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา [42] เหตุผลประการที่ 2 คือ ในการเกิด vulcanization ของยาง CR นั้น โมเลกุลของยาง CR สามารถเกิด crosslink ได้ในระบบที่มีโลหะออกไซด์ เช่น ZnO ดังที่อธิบายไว้โดย Olejnik และคณะ [43]

เมื่อพิจารณา Cure characteristic curve ของยางคอมปาวด์ NR/CR จะปรากฏพฤติกรรมการเกิด Reversion ในช่วง Over cure ทั้งสองระบบการคงรูป ในรูป 4.2 (b) เช่นกัน แต่การ reversion มีอัตราการลดลงของค่าแรงบิดต่ำกว่า กรณีของยางคอมปาวด์ NR เนื่องจากเป็นยางคอมปาวด์ที่มียาง CR ผสมอยู่ 50% และจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่ายางคอมปาวด์ CR มีการเกิด Marching หลังจากการเกิด optimum cure ดังนั้น marching นี้ จะ balance ค่าแรงบิดของทั้งระบบให้ปรากฏไปทาง plateau

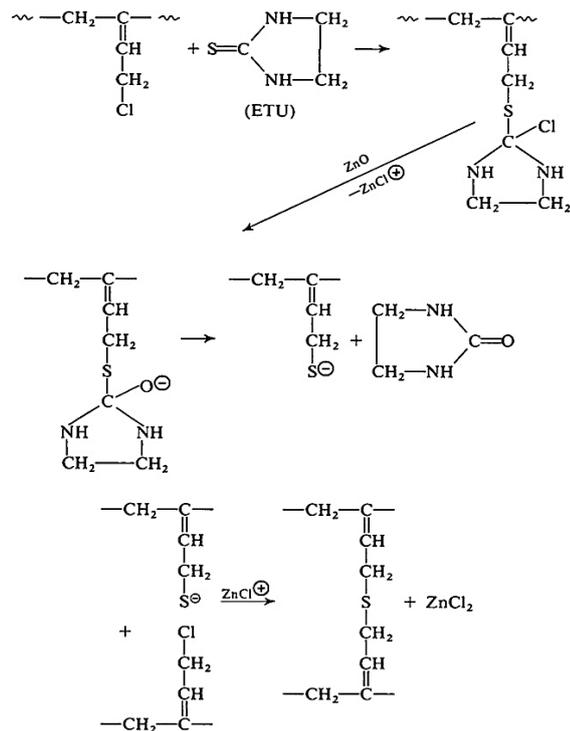
เมื่อเปรียบเทียบระบบวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ NR จะเห็นได้ว่ายางคอมปาวด์ระบบที่ 2 เมื่อเกิดการ vulcanize สมบูรณ์ cure characteristic curve จะมีค่าแรงบิดสูงสุดที่สูงกว่าระบบ vulcanize ที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากมีการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) คือ TMTD แทน TMTM ที่มีในระบบ vulcanization ที่ 1 โดย TMTD เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไฮยูเรมไดซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่มีสมบัติเป็นสารให้กำมะถัน (Sulfur donor) [44] ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง ปฏิกิริยาการเกิด vulcanization เป็นแบบ efficient vulcanization

สำหรับยางคอมปาวด์ CR พบว่าระบบ vulcanization ที่ 2 จะมีค่าแรงบิดที่สูงกว่าระบบ vulcanization ที่ 1 เนื่องจากในระบบที่ 2 จะมีการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) คือ เอทิลีนไดโอยูเรีย (ETU) เพิ่มเข้าไปในสูตรด้วย ซึ่งสารเคมีนี้จะช่วยเร่งการคงรูปในยางคลอโรพรีนและจะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับซิงค์ออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์และการเชื่อมโยงของสายโซ่ในระบบ vulcanization ที่ 2 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในระบบ vulcanization ที่ 1

ยางคอมปาวด์ NR/CR พบว่าระบบ vulcanization ที่ 2 จะมีค่าแรงบิดที่สูงกว่าระบบ vulcanization ที่ 1 เช่นกัน เนื่องจากในระบบที่ 2 มีการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) คือ TMTD มีผลต่อ vulcanization ยาง NR และเอทิลีนไดโอยูเรีย (ETU) ซึ่งมีผลต่อ vulcanization ยาง CR ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์และการเชื่อมโยงของสายโซ่ในยางผสม NR/CR ในระบบ vulcanization ที่ 2 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในระบบ vulcanization ที่ 1

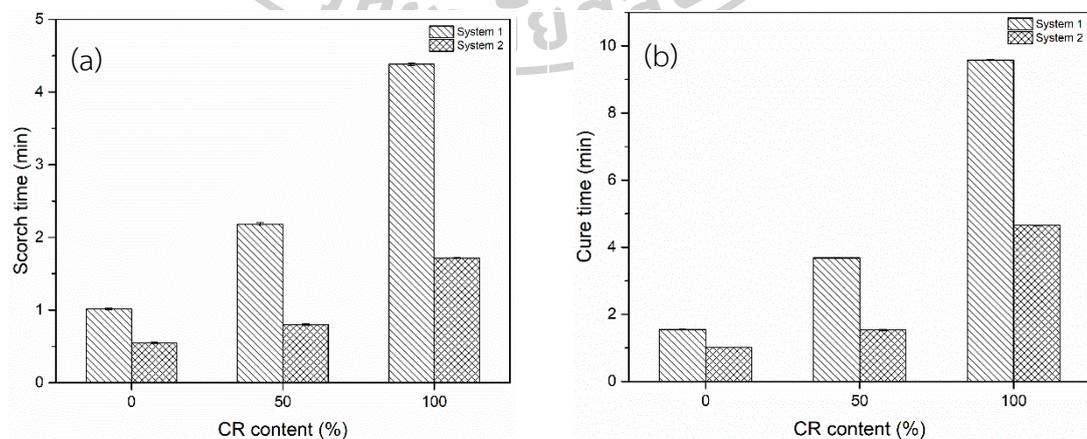


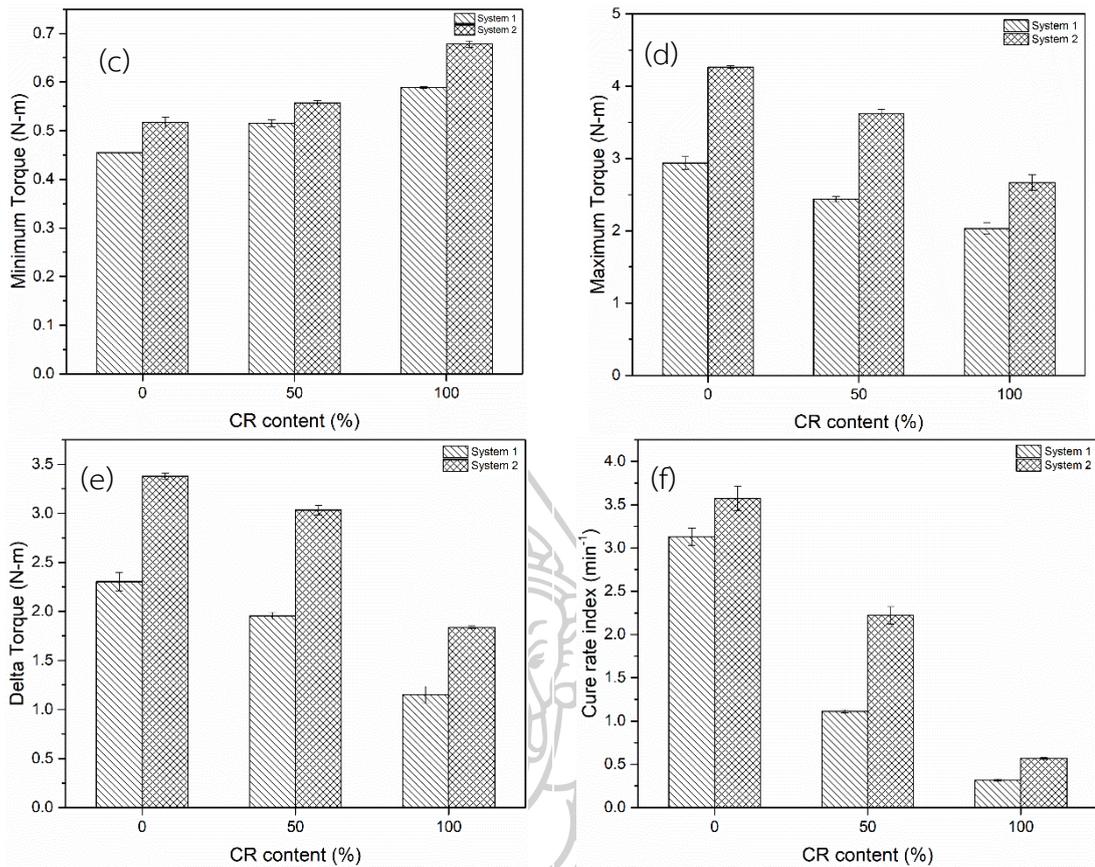
รูปที่ 4.3 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนด้วย ZnO [13]



รูปที่ 4.4 แสดงปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยางคลอโรพรีนเมื่อเติม Ethylene thiourea (ETU) [13]

จาก cure characteristic curve ที่แสดงในรูปที่ 4.2 ผู้วิจัยได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ Scorch time ( $t_{s2}$ ), Cure time ( $t_{c90}$ ), Minimum torque (ML), Maximum torque (MH), Delta torque (DT), และ Cure rate index (CRI) มาเปรียบเทียบโดยพล็อตเป็นกราฟแท่งของค่าพารามิเตอร์ ที่กล่าวมาในข้างแต่ละชนิด และยางผสม ของสูตรยาง 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) – (f)



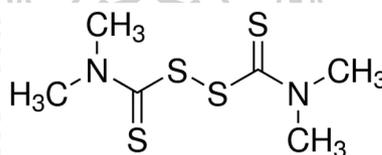


รูปที่ 4.5 สมบัติการคงรูปของของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในระบบ S1 และ S2 (a) Scorch time, (b) Cure time, (c) Minimum torque, (d) Maximum torque, (e) Delta torque และ (f) Cure rate index

**Scorch time ( $ts_2$ )** พิจารณา Scorch time ( $ts_2$ ) ในรูปที่ 4.5 (a) ซึ่งค่า  $ts_2$  หมายถึง ช่วงเวลาที่ยางคอมปาวด์ยังคงสามารถไหล และขึ้นรูปได้อย่างปลอดภัย ณ อุณหภูมิที่เลือกทดสอบ และเลือกเป็นอุณหภูมิในการขึ้นรูป หรือเป็นเวลาที่ยางคอมปาวด์เกิดการเชื่อมขวางไป 2% จากผลการทดลองที่พล็อตเปรียบเทียบโดยพิจารณา ระบบ vulcanization 1 จะเห็นได้ว่าค่า  $ts_2$  ของยางคอมปาวด์ NR มีค่าน้อยกว่า  $ts_2$  ของยาง CR ซึ่งเป็นผลจากสารเคมีที่ทำให้เกิด crosslink สามารถละลายได้ดีในยาง NR โดยเกิดการละลายใน NR ได้ดีกว่าใน CR หากพิจารณาโครงสร้างของ CR ซึ่งในหน่วยซ้ำจะมีโครงสร้างเป็น  $-\text{[CH}_2\text{-CH=C(Cl)-CH}_2\text{]}-$  ดังนั้นระหว่างโมเลกุลจะสามารถเกิดพันธะระหว่างชั้น แบบ hydrogen bonding ในทุกหน่วยซ้ำ ทำให้ CR มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่แรงมาก ส่งผลให้ยาง CR มีการอัดตัวกันระหว่างสายโซ่แน่นกว่ายาง NR หรือกล่าวได้ว่า มีความเป็นขี้สูง กว่า NR มาก สารเคมีที่เติมลงไปจึงละลายเข้าไปใน CR ได้ยากกว่า เหตุผลประการที่ 2 ที่ทำให้ยาง NR เริ่มเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า CR คือ ในโครงสร้างของหน่วยซ้ำของ NR จะมี 3 allylic carbon ส่วนใน

ยาง CR จะมี 2 allylic carbon [29] ดังนั้น NR จะสามารถเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า scorch time ของ NR จึงเร็วกว่าของ CR ดังนั้นยางผสม NR/CR scorch time จะอยู่ระหว่าง เวลา scorch ของ NR และ CR

สำหรับระบบ Vulcanization 2 ค่า  $ts_2$  ของ NR CR และ NR/CR blend จะมีค่าลดลง หรือ เกิดการ scorch ได้เร็วขึ้นนั้น เป็นผลมาจากใน vulcanization 2 มีการเติมสารเร่ง (Accelerator) TMTD ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.6 TMTD นี้ยังทำหน้าที่เป็น sulfur donor ทำให้ยาง NR เกิดปฏิกิริยา vulcanization ได้มีประสิทธิภาพดี [43] นอกจากนี้ ในระบบ vulcanization ที่ 2 นี้ยังมีการเติม ethylene thiourea หรือ ETU ซึ่งช่วยเร่งให้ CR เกิดการ vulcanize ได้เร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.4



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของ TMTD [45]

**Cure time ( $tc_{90}$ )** เมื่อพิจารณาค่า  $tc_{90}$  ที่แสดงในรูปที่ 4.5 (b) ค่า  $tc_{90}$  หมายถึง เวลาที่ยางคอมปาวด์เกิดการคงรูปไป 90% จากผลการทดลอง พบว่ายาง NR มีค่า  $tc_{90}$  ต่ำกว่ายาง CR อันมีความหมายว่า NR สามารถเกิดการ vulcanize ได้เร็วกว่ายาง CR ซึ่ง มีเหตุผลเช่นเดียวกับกรณี scorch time ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น กล่าวคือ เป็นผลมาจากความเป็นขั้วสูงของ CR ทำให้ความสามารถในการละลายของสารเคมีเข้าไปในยาง CR น้อยกว่าใน NR และประการที่สอง คือ ปริมาณของ Allylic carbon ในยาง NR มีมากกว่าในยาง CR หากทำการเปรียบเทียบ ระบบ vulcanization ผลการทดลองแสดงว่าระบบที่ 2 จะแสดง cure time สั้นกว่า ระบบที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากการที่ระบบ vulcanization ที่ 2 มีสารเร่งปฏิกิริยา TMTD และ ETU ซึ่งทำหน้าที่เร่งให้ปฏิกิริยา vulcanization ทั้งใน NR และ CR เกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น

**Minimum Torque (ML)** เมื่อพิจารณาค่า ML ในรูปที่ 4.5 (c) ค่า ML หมายถึง ค่าแรงบิดต่ำที่สุดที่แสดงใน cure characteristic curve โดย ML เป็นค่าที่สามารถแสดงถึงแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของยางหรือความสามารถในการไหลยางคอมปาวด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ายาง CR มีค่า ML สูงกว่า NR ซึ่งเป็นผลมาจากยาง CR มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่แข็งแกร่งกว่า NR แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลนี้เกิดจากการที่หน่วยซ้ำของ CR มีอะตอมของคลอรีน 1 อะตอม ส่งผลให้ยาง CR มีค่า ML ที่มากกว่ายาง NR สำหรับยางผสม NR/CR จะมีค่าอยู่ระหว่างค่า ML ยาง NR และยาง CR เมื่อ

พิจารณาระบบวัลคาไนซ์ พบว่าค่า ML ในระบบ vulcanization ที่ 2 มีค่าสูงกว่า ML ในระบบ vulcanization ที่ 1 ด้วยเหตุผลของการที่ ระบบ vulcanization ที่ 2 มีสารเคมี TMTD และ ETU อยู่ในยางคอมปาวด์

**Maximum Torque (MH)** เมื่อพิจารณาค่า MH ในรูปที่ 4.5 (d) ค่า MH หมายถึง จุดที่แรงบิดมีค่าสูงสุดบน cure characteristic curve ค่า MH มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) และค่ามอดูลัส (Secant modulus) ของยาง NR vulcanizate [46, 47] พิจารณาผลการทดลองในงานวิจัยนี้ จะพบว่า ยาง NR compound เมื่อทดสอบ MDR จะมีค่า MH สูงที่สุดในขณะที่ยาง CR compound มีค่า MH ต่ำที่สุด จากผลการทดลองที่ปรากฏนี้ แสดงโดยนัยว่ายาง NR มี crosslink density สูงที่สุด เนื่องจากสาเหตุที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น กล่าวคือ การละลายของสารเคมีและปริมาณของ allylic carbon การที่ยางคอมปาวด์มี TMTD และ ETU จะทำให้ การเกิด vulcanization เกิดได้มากขึ้นและทำให้ crosslink density มีเพิ่มขึ้นด้วย

**Delta torque (DT)** เมื่อพิจารณาค่า DT ในรูปที่ 4.5 (e) ค่า DT หมายถึงค่าผลต่างของแรงบิดระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด (MH-ML) ซึ่งค่า DT มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและค่ามอดูลัส

**Cure rate index (CRI)** เมื่อพิจารณาค่า CRI ในรูปที่ 4.5 (f) ค่า CRI หรือดัชนีอัตราเร็วคำนวณได้จากสมการ  $CRI = 100 \times 1 / (\text{cure time} - \text{scorch time})$  หาก cure time - scorch time แล้วเวลาสั้น ค่า CRI จะมีค่าสูง ดังนั้น CRI นี้จึงสามารถแสดงนัยยะ ถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ จากผลการทดลองพบว่ายาง NR compound ในทั้งสอง vulcanization system มีค่า CRI สูงที่สุด และยาง CR compound มีค่า CRI ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณายางผสม NR/CR compound พบว่าค่า CRI ของยางผสมมีค่าอยู่ระหว่างยาง NR compound และยาง CR compound และหากเมื่อพิจารณาระบบวัลคาไนซ์ พบว่าค่า CRI ในระบบ vulcanization ที่ 2 มีค่าสูงกว่าในระบบ vulcanization ที่ 1 ด้วยเหตุผลที่กล่าวแล้วข้างต้น

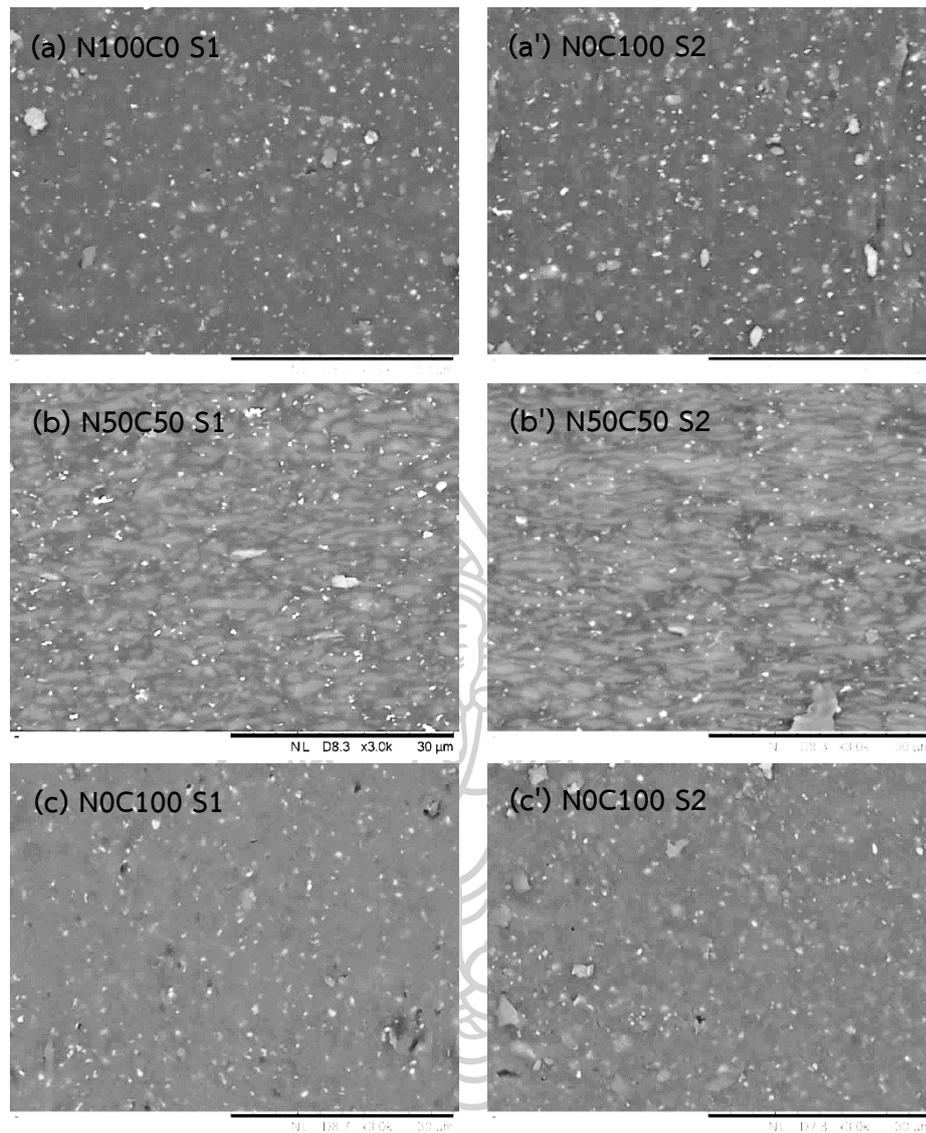
#### 4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลวจนอยู่ในสภาวะเย็นยิ่งยวด แล้วทำให้แตก (Cryogenic fracture) อีกนัยยะหนึ่งคือ ทำให้ตัวอย่างทดสอบอยู่ในสภาวะ glassy state และทุบให้แตก แล้วจึงศึกษาผิวของยางบริเวณที่แตกหักนั้น จากนั้นนำชิ้นทดสอบเคลือบผิวด้วยทอง (Au) ด้วยเทคนิค sputtering การทดสอบตัวอย่างทำภายใต้สภาวะ

สูญญากาศ โดยใช้ voltage 15 kV เลือกตำแหน่งที่ต้องการปรับกำลังขยาย ลักษณะของผลที่ได้เป็นภาพ 2 มิติจาก Back Scattered Electron (BSE) แล้วบันทึกภาพ ในการศึกษาผิวของยางที่แตกหักนี้ จะสามารถวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา ความเข้ากันได้ของยางผสม ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางที่ vulcanized แล้ว ดังแสดงดังรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่ผิวแตกหักของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ทั้งระบบ vulcanization ที่ 1 และ 2 จากผลการทดลองพบว่ายาง NR และ CR vulcanizate มีลักษณะเป็นผิวราบเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาที่ยาง NR/CR vulcanizate จากการ vulcanized ทั้งสองระบบ จะสามารถสังเกตเห็นการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน โดยวัฏภาคที่สว่างเป็นวัฏภาคของ CR และวัฏภาคมืดเป็นของ NR ซึ่งเกิดจากการที่ยางทั้ง 2 ชนิดมีสภาพขั้วที่แตกต่างกันอย่างมากรวมเข้ากันได้ยาก หากพิจารณาสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) สารประกอบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การละลายใกล้เคียงกันจะสามารถละลายเข้ากันได้ดี แต่หากค่าสัมประสิทธิ์การละลายต่างกันมาก จะสามารถละลายเข้ากันได้ยาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การละลายของยาง NR และยาง CR มีค่าเท่ากับ 19.8 และ 16.6 ตามลำดับ [48] จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การละลายมีค่าต่างกัน ประมาณ 3 หน่วย จึงทำให้ยางทั้งสองมีความเข้ากันได้ยาก และยังเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน NR/CR เท่ากับ 50/50 ยาง NR จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) และยาง CR จะเป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) เนื่องจากยาง NR มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่ายาง CR (จากการทดสอบวัดความหนาแน่นของยางทั้ง 2 ชนิด โดยใช้วิธีการชั่งในน้ำ เปรียบเทียบกับการชั่งในอากาศโดยใช้ Density kit ประกอบกับเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง โดย NR และ CR มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.97 และ 1.24 g/cm<sup>3</sup> ตามลำดับ ด้วยเหตุผลนี้ จึงพบว่าในยางผสมระหว่าง NR กับ CR ที่มีอัตราส่วนการผสมโดยน้ำหนัก 50:50 ยาง NR จะปรากฏเป็น Continuous phase ซึ่งระบบ vulcanization ที่เลือกในการเตรียม จะไม่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของยางที่ vulcanized แล้ว ดังแสดงในรูป 4.7 (b) และ (b')



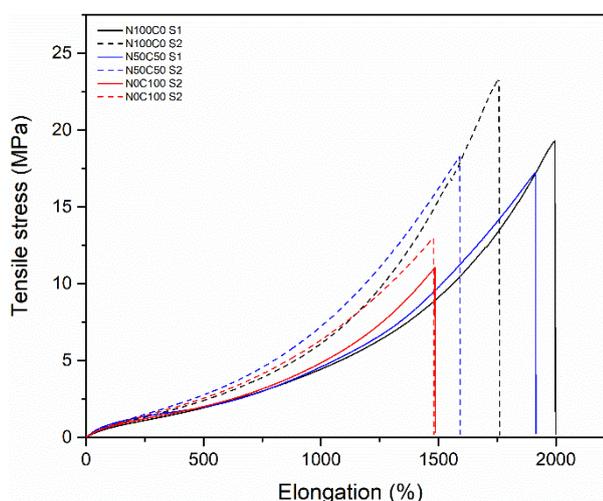


รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของยาง NR, CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบ S1 (ไม่มี ' ) และระบบ S2 (มี ' )

การปรากฏวิภูภาคมืด ของ NR vulcanizate และสว่างของ CR vulcanizate นั้น เป็นผลจากการที่ ยาง CR มี อะตอมของ Cl ที่มีเลขอะตอมสูงกว่า  $\text{CH}_3$  ทำให้เมื่อมีการ scan electron beam จะเกิดการกระเจิงของ electron ออกมาจำนวนมาก [49] ทำให้วิภูภาคของ CR vulcanizate สว่างมากกว่าวิภูภาค NR vulcanizate

#### 4.1.4 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

การศึกษาสมบัติความทนทานต่อการแรงดึง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยทดสอบมาตรฐาน ASTM D412 ด้วย Load cell ขนาด 5 kN อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็น Stress-Strain curve จากกราฟจะได้ค่า Secant modulus, Tensile strength และ %Elongation at break จาก Stress-Strain curve ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8



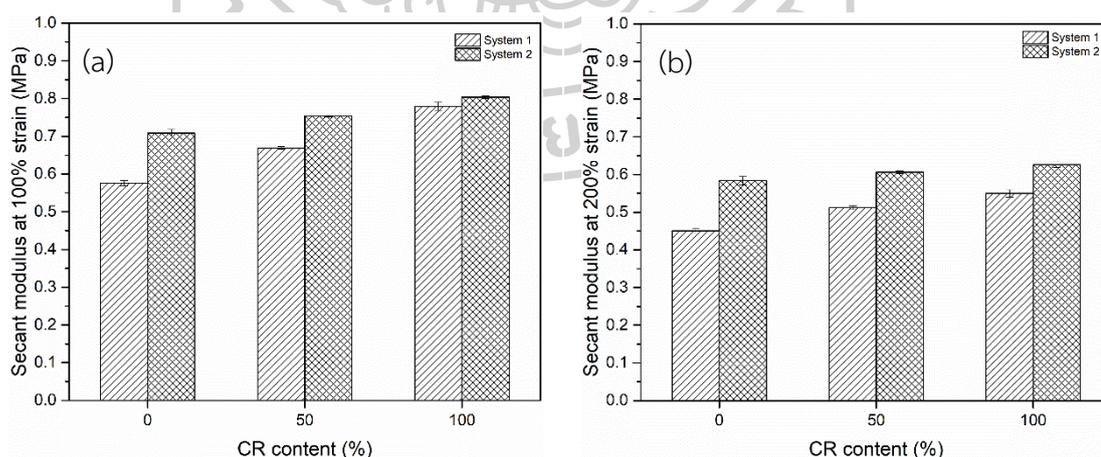
รูปที่ 4.8 Stress-Strain curve ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2

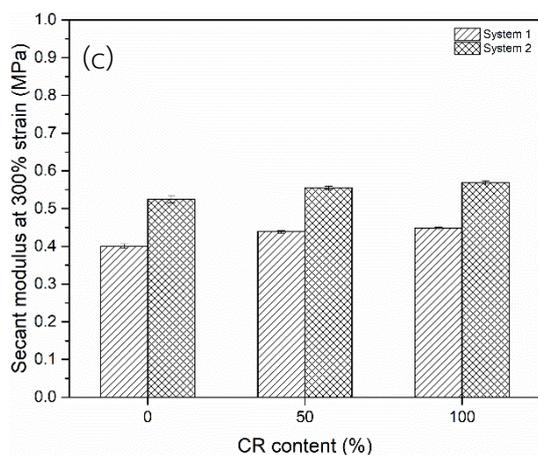
จากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดง Stress-Strain curves ของยาง NR CR และยางผสม NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2 จากกราฟ หากเปรียบเทียบชนิดของยาง vulcanizate โดยพิจารณา N100C0 S1 กับ N0C100 S1 หรือแม้แต่น100C0 S2 กับ N0C100 S2 จะพบว่ายางทั้ง 2 ชนิด สามารถแสดงให้เห็นการเกิด Stress induced crystallization [50] ทำให้ยาง vulcanizate ทั้ง 2 ชนิด มีสมบัติเชิงกลที่ดี และ CR vulcanizate มีสมบัติการดึงยึดที่คล้ายคลึงกับยาง NR ดังที่ได้มีรายงานไว้ แต่ยาง NR จะมีข้อด้อยในเรื่องของความทนทานต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายไม่มีขั้วและสมบัติ heat aging เมื่อนำยาง CR ผสมกับ NR ในอัตราส่วน 1:1 หรือ 50:50 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง vulcanizate จะลดลง ดังจะเห็นได้จากกราฟของ N50C50 S1 และ N50C50 S2 ทั้งนี้เป็นผลจากการแยกวัฏภาคของยางทั้ง 2 ดังที่แสดงไว้ใน รูปที่ 4.7 (b) และ (b') หากพิจารณาผลของระบบ vulcanization จาก Stress-Strain curve จะพบว่า curve จะมีการเลื่อนไปในทิศทางที่มี tension stress สูงขึ้น แต่ความสามารถในการยืดตัวลดลง ซึ่งหากย้อนกลับไปพิจารณาผลการทดสอบ MDR นั้นได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่า การที่ในระบบ vulcanization ที่ 2 ซึ่งมีการเติม

TMTD และ ETU จะทำให้ทั้ง NR และ CR เกิดปฏิกิริยา vulcanization ได้ดี โดย TMTD จะทำหน้าที่เสริมประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาในยาง NR สำหรับ ETU จะทำหน้าที่เสริมประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาในยาง CR ทำให้ผลการทดสอบ MDR มี delta torque เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึง crosslink density ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางในระบบ vulcanization ที่ 2 นี้ มีความต้านทานการดึงยืดสูง และการที่มี crosslink density สูงนี้ ทำใหยางยืดตัวได้น้อยลง ดังแสดงในกราฟ N100C0 S2 และ N0C100 S2 อนึ่ง สำหรับ N50C50 S2 จะยืดตัวได้เท่ากับ N50C50 S1 ซึ่งเป็นผลจากการที่ยาง NR มีความสามารถในการเกิด vulcanization กับ sulfur ได้ดีกว่า CR

จาก Stress-Strain curves สามารถได้มาซึ่งค่า secant modulus, tensile strength และ elongation at break ของยาง vulcanizate แสดงในรูปที่ 4.9 -4.10 ตามลำดับ

**มอดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus)** โดยปกติแล้ว modulus เป็นอัตราส่วนระหว่าง Tensile stress ต่อ Tensile strain สำหรับยางที่ผ่านการคงรูปแล้วจะรายงานเป็นค่า Secant modulus ซึ่งเป็นค่าความชันของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นของกราฟไปที่จุดที่สนใจบน Stress-Strain curve กล่าวคือที่ elongation ค่าไหน ค่า modulus ดังกล่าวจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณ crosslink เกิดขึ้นในยาง [46, 47] นอกจากนี้ Secant modulus ยังแสดงถึงความแข็งของเนื้อยาง หรือคือ Hardness ดังนั้นยางที่มีค่า Secant modulus สูง ยางจะมีความแข็งสูงกว่ายางที่มีค่า Secant modulus ต่ำกว่า secant modulus ที่รายงานโดยทั่วไป จะเป็นค่า secant modulus ที่ 100 200 และ 300 % strain ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a)-(c)





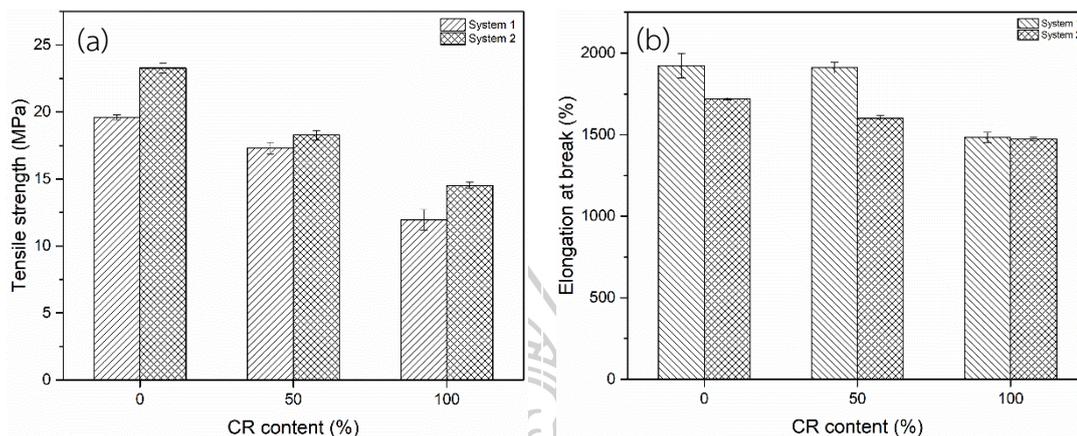
รูปที่ 4.9 Secant modulus at (a) 100%, (b) 200% และ (c) 300 strain ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2

จากรูปที่ 4.9 (a)-(c) พิจารณา secant modulus โดยภาพรวม จะพบว่าค่ามอดูลัสของยาง CR vulcanizate มีค่าสูงกว่ายาง NR vulcanizate จากผลการทดสอบ ยาง compound ด้วย MDR ที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ว่ายาง NR compound มี MH และ DT สูงกว่ายาง CR compound แสดงโดยนัยว่า NR vulcanizate จะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากกว่ายาง CR compound แม้ว่ายาง (พิจารณาจากค่า MH และ DT ในตารางที่ ก.1) อย่างไรก็ตาม ค่า MH และ DT ที่ปรากฏเป็นค่าที่วัดที่อุณหภูมิ 160 °C เมื่อยาง vulcanizate เย็นตัวลง อิทธิพลของการที่ CR มี Cl อยู่ในทุกหน่วยซ้ำ ซึ่งการที่มี Cl ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของยาง CR กล่าวคือ เกิดแรง dipole-dipole interaction ทำให้โมเลกุลของ CR สามารถยึดตัวกันได้แน่นกว่าโมเลกุลของยาง NR ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของยาง CR เคลื่อนที่ได้ยากและมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR [30] ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ยาง CR vulcanizate มี secant modulus ที่สูงกว่า NR vulcanizate

เมื่อพิจารณาผลของระบบ vulcanization จะพบว่า Secant modulus ของ vulcanization ระบบที่ 2 จะสูงกว่าระบบที่ 1 เนื่องจาก vulcanization ระบบที่ 2 มีการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ TMTD มีผลต่อปฏิกิริยา vulcanization ยาง NR และ ETU มีผลต่อปฏิกิริยา vulcanization ยาง CR ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ใน vulcanization ระบบที่ 2 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า vulcanization ในระบบที่ 1

**สมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)** สำหรับ Tensile strength คือค่าแรงเค้น (Stress) สูงสุด ณ จุดขาด (Tensile strength at break) ของยาง vulcanizate โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อ Tensile strength นั้น นอกจากจะเป็นชนิดและปริมาณของยางที่ผสมแล้ว ชนิดและปริมาณ crosslink ยังมีผลต่อสมบัตินี้ ซึ่งชนิดและปริมาณของ crosslink นั้นขึ้นกับระบบ vulcanization ค่า Tensile strength ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 4.10 (a) ซึ่งพบว่ายาง CR vulcanizate มีค่า Tensile strength ต่ำกว่ายาง NR vulcanizate ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

ว่า Isoprene base rubber สามารถเกิดปรากฏการณ์ Stress-induced crystallization ได้มากกว่ายางชนิดอื่นๆ ซึ่งรวมถึงยาง CR ด้วย [31] สำหรับยางผสม NR/CR มีค่า Tensile strength อยู่ระหว่างยาง NR และยาง CR



รูปที่ 4.10 (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2

เมื่อพิจารณาผลของระบบ vulcanization จากผลการทดลองพบว่า ยางที่ vulcanized ด้วย vulcanization ระบบที่ 2 จะมีค่า Tensile strength สูงกว่าในระบบ vulcanization ที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากการเติม TMTD และ ETU ซึ่งมีผลทำให้เกิดการ vulcanize แบบมีประสิทธิภาพ

**สมบัติการยืดออก ณ จุดขาด (Elongation at break)** เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการยืดตัวออก และสะท้อนถึงความสามารถในการเกิด Stress induced crystallization โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยางที่เป็น Isoprene based rubber เนื่องจากถ้ายางสามารถยืดได้มาก โอกาสในการเกิด Stress induced crystallization จะเกิดขึ้นได้มาก สมบัติการยืดตัวของยาง vulcanizate ที่ศึกษาในงานวิจัยตอนนี้ แสดงดังรูปที่ 4.10 (b)

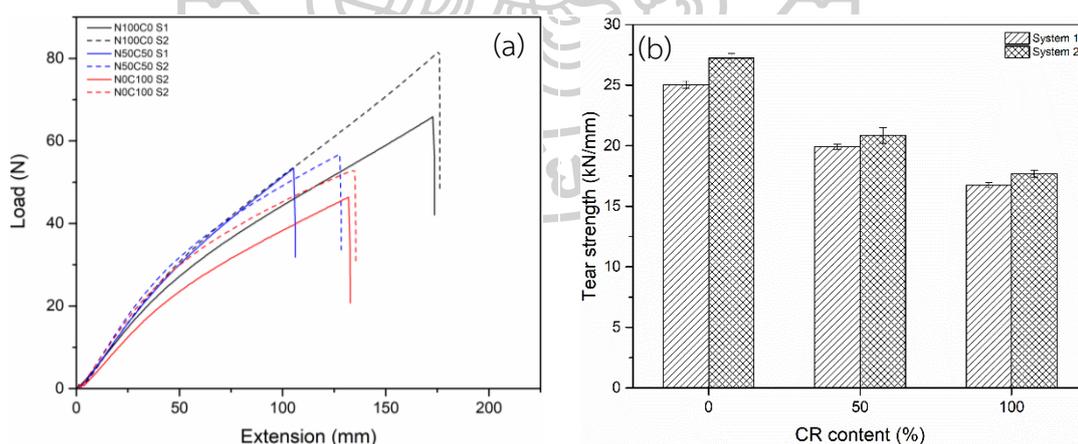
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า Elongation at break ของยาง NR vulcanizate จะมีค่าสูงกว่า CR vulcanizate เนื่องจากความสามารถในการยืดตัวของยาง ซึ่งมาจากโครงสร้างที่เป็นแบบ random coil ของ NR ขณะที่ยาง CR vulcanizate แม้จะมีลักษณะของ Stress-Strain curve ที่เหมือนกับยาง NR แต่การที่ยาง CR มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง ความสามารถในการยืดตัวจึงน้อยกว่า NR เมื่อนำ NR กับ CR มาผสมกัน ความสามารถในการยืดตัวจึงอยู่ระหว่าง NR กับ CR อีกทั้งการแยกภูมิภาคของยางทั้งสองชนิดเมื่อนำมาผสมกัน ยังมีผลต่อ elongation at break ที่ต่ำกว่า NR อีกด้วย เมื่อพิจารณาผลของระบบ vulcanization จะพบว่ายางที่ vulcanized ด้วย

ระบบที่ 2 จะมี elongation at break ที่ต่ำกว่าระบบที่ 1 เป็นผลจากการ vulcanize ด้วยระบบที่ 2 จะเกิด crosslink ชนิด mono และ disulfide มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการยืดตัวน้อยลง [41]

#### 4.1.5 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

การในการศึกษาสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง vulcanizate ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D624 ด้วย Load cell ขนาด 5 kN และอัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลที่ได้จากเป็น Load-extension curve จากกราฟจะได้อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลที่ได้จากเป็น Load-extension curve จากกราฟจะได้อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลที่ได้จากเป็น Load-extension curve จากกราฟจะได้อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยผลที่ได้จากเป็น Load-extension curve จากกราฟจะได้อัตราการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.11 (a) เป็นกราฟแสดง Load-Extension จากการทดสอบ tear ของ N100C0 N50C50 และ N0C100 ซึ่งจะเห็นได้ว่ายาง NR มีความสามารถในการต้านทานการฉีกขาดได้สูงกว่า CR (N100>C100) ซึ่งตรงกับที่ R.J Schaefer [51] ได้รายงานไว้ เมื่อนำ NR ผสมกับ CR ความทนทานต่อการฉีกขาดจึงอยู่ระหว่างยางทั้ง 2 ชนิด เมื่อมีการเติม TMTD และ ETU การ vulcanize จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น ดังแสดงเป็นค่าของ tear strength ในรูปที่ 4.11 (b)

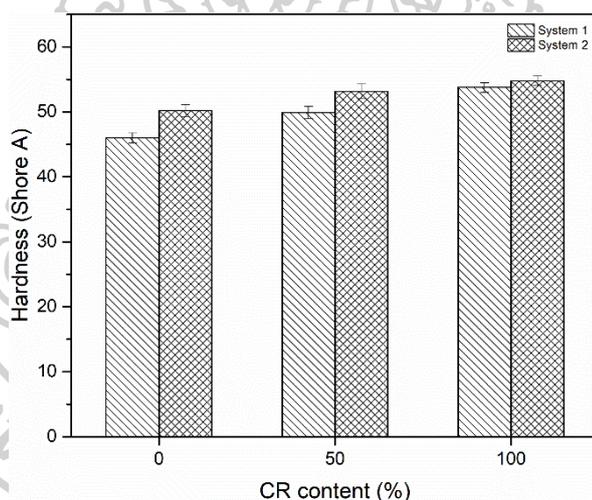


รูปที่ 4.11 (a) Load-Extension curve และ (b) Tear strength ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2

#### 4.1.6 สมบัติความแข็งของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

สมบัติความแข็งของยาง ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester, Durometer) ตาม ASTM D2240 โดยใช้หัวทดสอบแบบ Shore A ความแข็งนี้เป็นสมบัติที่ผิวของวัสดุ ค่าที่วัดได้ รายงานเป็นค่าความแข็ง หน่วยเป็น Shore A ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12

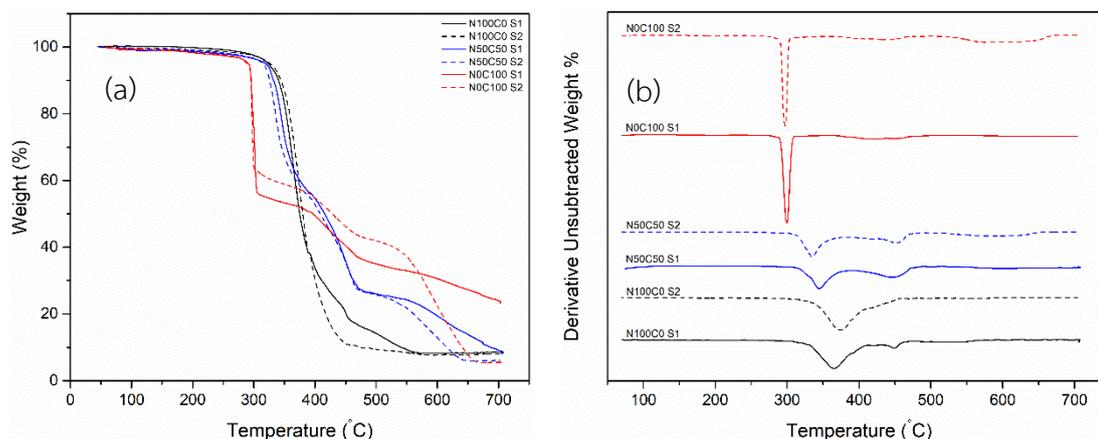
จากรูปจะพบว่าความแข็งของยาง CR vulcanizate มีค่าสูงกว่ายาง NR vulcanizate ซึ่งเป็นผลจากการที่ยาง CR จะมีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล ทำให้มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของยาง CR ที่แข็งแรงกว่ายาง NR ส่งผลให้ยาง CR มีความแข็งมากกว่ายาง NR ขณะที่ยางผสมระหว่าง NR กับ CR มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง CR กับ NR เมื่อพิจารณาผลของระบบ vulcanization จะเห็นว่าค่าความแข็งของระบบ vulcanization ที่ 2 จะสูงกว่าระบบที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากการเกิด vulcanization ที่มีประสิทธิภาพจากการเติม TMTD และ ETU ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.12 ค่า Hardness ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S1 และ S2

#### 4.1.7 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

การทดสอบสมบัติทางความร้อนหรือเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ซึ่งหลักการจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกับอุณหภูมิ ใช้ตัวอย่างชิ้นงานในรูปยางที่ผ่านการ Vulcanized ช่วงอุณหภูมิทดสอบ 50-700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน แสดงในรูปแบบเทอร์โมแกรมแบบ TGA curve และ DTG curve ตามรูปที่ 4.13 (a) และ 4.13 (b) ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบการคงรูปที่ต่างกัน (a) TGA curve และ (b) DTG curve

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า  $T_{onset}$ ,  $T_{endset}$ ,  $T_{dmax}$  และ Char residue จากการทดสอบ TGA ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบการคงรูปที่ต่างกัน

Materials \ property	NR		NR/CR		CR	
	Sys 1	Sys 2	Sys 1	Sys 2	Sys 1	Sys 2
$T_{onset1}$ (°C)	330.50	339.43	321.06	316.01	291.86	293.04
$T_{endset1}$ (°C)	400.80	410.05	370.13	353.45	306.60	300.80
$T_{dmax1}$ (°C)	365.13	374.36	345.06	334.87	298.64	297.20
$T_{onset2}$ (°C)	-	-	407.37	423.08	372.77	383.52
$T_{endset2}$ (°C)	-	-	471.84	469.52	456.86	466.48
$T_{dmax2}$ (°C)	-	-	447.32	452.76	426.33	438.63
Char residue (%)	8.40	7.99	9.15	6.04	24.05	17.65

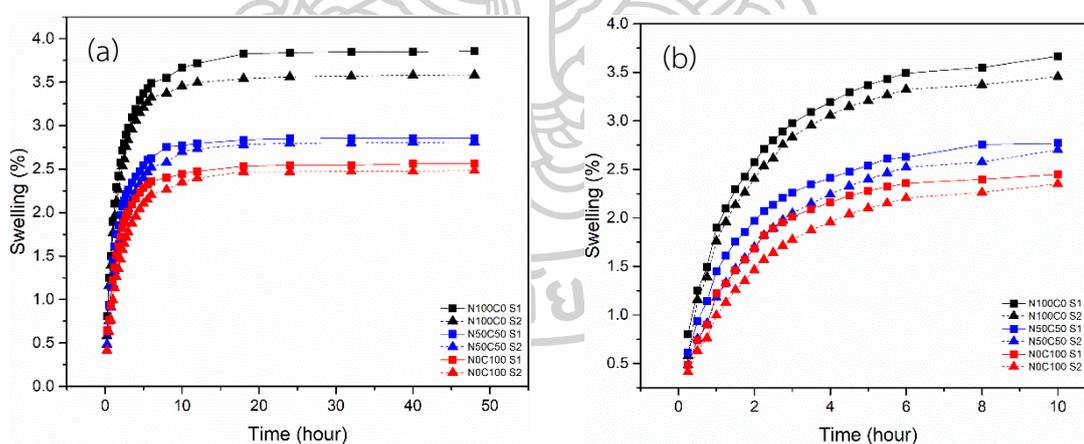
ในผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง TGA จากรูปที่ 4.13 (a)-(b) และตารางที่ 4.2 พบว่ายาง NR จะมีการสลายตัวในขั้นเดียว (One-step decomposition) [52] ในขณะที่ยาง CR จะมีการสลายตัวสองขั้น (Two-step decomposition) โดยขั้นแรกเป็นการสลายตัวของคลอรีนอะตอมออก ด้วยกระบวนการดีไฮโดรคลอรีนชัน (Dehydrochlorination) และขั้นที่สองเป็นการสลายตัวในส่วนของสายโซ่หลัก [26] เมื่อดูที่ยาง NR ทั้งในระบบการคงรูปที่ 1 และ 2 จะมีการสลายตัวในขั้นเดียว (One-step decomposition) ที่อุณหภูมิประมาณ 365.13 และ 374.36 °C ตามลำดับ และยาง CR ทั้งในระบบการคงรูปที่ 1 และ 2 จะมีการสลายตัวสองขั้น (Two-step



decomposition) โดยขั้นแรกจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 291.86 และ 293.04 °C ตามลำดับ ส่วนการสลายตัวขั้นที่ 2 จะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 426.33 และ 438.63 °C ตามลำดับ ส่วนที่อัตราส่วนผสม NR/CR ทั้งในระบบการคงรูปที่ 1 และ 2 จะมีการสลายตัวสองขั้น (Two-step decomposition) โดยขั้นแรกจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 345.06 และ 334.87 °C ตามลำดับ ส่วนการสลายตัวขั้นที่ 2 จะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 447.32 และ 452.76 °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองระบบการคงรูปจะมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันต่างมีนัยสำคัญ

#### 4.1.8 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

การทดสอบการบวมตัวของยางที่ผ่านการคงรูป โดยทำการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายโทลูอีน หลังจากนั้นวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนไปทุก ๆ 15 นาที จำนวน 12 ครั้ง, ทุก ๆ 30 นาที จำนวน 6 ครั้ง, ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จำนวน 6 ครั้ง, ทุก ๆ 6 ชั่วโมง จำนวน 2 ครั้ง และทุก ๆ 8 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง หลังจากนั้นคำนวณค่า %Swelling ดังสมการที่ 3.7 จากนั้นนำค่า Swelling ที่ได้มา Plot กราฟเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.14 %Swelling ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบการคงรูปที่ต่างกัน (a) เริ่มจนถึง equilibrium และ (b) ช่วง 0-10 ชั่วโมง

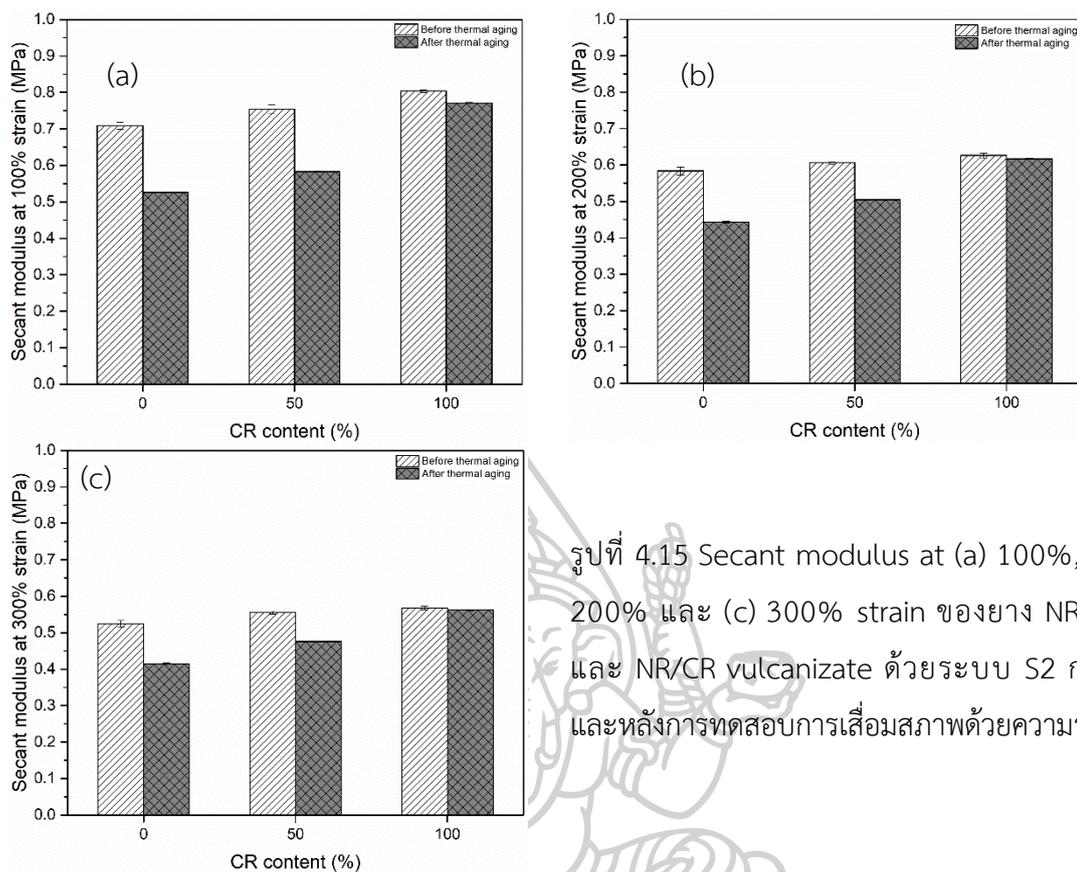
การบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ต่างกัน ในรูปที่ 4.14 (a) แสดงให้เห็นว่ายางทุกอัตราส่วนเริ่มมี %Swelling คงที่ (เข้าสู่ equilibrium) เมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง โดยในช่วงแรกในรูปที่ 4.14 (b) แสดงให้เห็นถึงอัตราการดูดซับโทลูอีนของยาง ซึ่งยาง NR สามารถดูดซับตัวทำละลายได้เร็วที่สุดและมากที่สุด

เนื่องจากว่าตัวทำละลายที่ใช้ในการทดสอบการบวมตัวนั้นคือโทลูอินซึ่งไม่มีขี้ ทำให้สามารถที่จะแทรกซึมผ่านเข้าไปในยาง NR ได้ง่ายกว่าเพราะยาง NR จะมีขี้ต่ำกว่ายาง CR โดยที่ยาง CR จะมีการบวมตัวน้อยที่สุด ยาง NR จะมีการบวมตัวมากที่สุด ส่วนยางผสม NR/CR จะมีการบวมตัวอยู่ระหว่างยาง NR และยาง CR ดังเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น และเมื่อพิจารณาระบบวัลคาไนซ์ของทั้งสองระบบ พบว่าในระบบที่ 2 ในที่ทุกอัตราส่วนผสมจะการบวมตัวที่ต่ำกว่าในระบบที่ 1 เนื่องจากมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงที่มากกว่า

จากผลการศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสมของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง CR โดยจะกำหนดอัตราส่วนของ NR/CR เท่ากับ 100/0, 50/50 และ 0/100 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการศึกษา Cure characteristic ของยางที่มีระบบการคงรูปที่ต่างกัน พบว่าระบบการคงรูปที่ 2 จะสามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์และความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบการคงรูปที่ 1 ในทุกอัตราส่วน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางคงรูปในระบบที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติการทนทานต่อแรงดึง สมบัติการทนทานต่อแรงฉีกขาด และความแข็ง ของยางคงรูปในระบบที่ 2 จะมีค่าที่สูงกว่ายางคงรูปในระบบที่ 1 ในทุกอัตราส่วน ในขณะที่สมบัติทางความร้อนของยางคงรูปในระบบที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนสุดท้าย สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอินจะเห็นได้ว่ายางคงรูปในระบบที่ 2 จะมีการบวมตัวที่ต่ำกว่ายางคงรูปในระบบที่ 1 เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า ซึ่งจากสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบการคงรูปที่ 2 มีความเหมาะสมที่จะเลือกนำมาไปศึกษาต่อไป และทดสอบสมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนเพิ่มเติม

#### 4.1.9 สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate

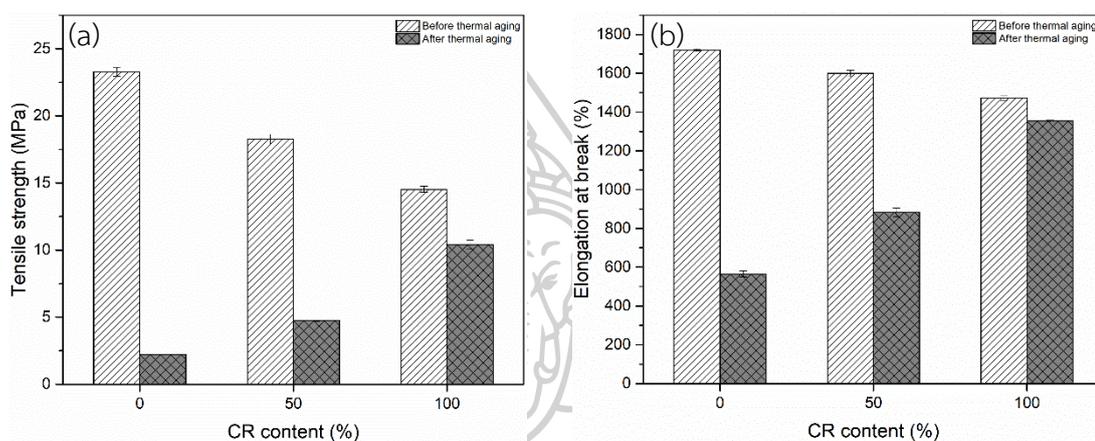
นำระบบการคงรูปที่เหมาะสมมาศึกษาสมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบการดึงยึดและการฉีกขาด แล้วนำมาบ่มแรงสภาวะในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D-573 เมื่อบ่มแรงสภาวะดังกล่าวแล้วจึงนำชิ้นงานออกมาจากตู้อบ จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติการดึงยึดและการฉีกขาด ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ตามมาตรฐาน ASTM D412 และ ASTM D624 ตามลำดับ โดยใช้ Load cell ในการดึง 5 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งจะได้ผลออกมาในรูปค่า Secant modulus, Tensile strength, %Elongation at break และ Tear strength และทดสอบความแข็ง (Hardness(Shore A))



รูปที่ 4.15 Secant modulus at (a) 100%, (b) 200% และ (c) 300% strain ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S2 ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่า Secant modulus ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ด้วยระบบการคงรูปที่ 2 ทั้งก่อนและหลังให้ความร้อน 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าในกรณียาง CR หลังบ่มเร่งสภาพด้วยความร้อนแล้วค่ามอดูลัสลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเชื่อมโยงของยาง CR เพิ่มขึ้นขณะได้รับความร้อน เพราะยังมีสารคงรูปหลงเหลือจากการคงรูปก่อนหน้าและยางคลอโรพรีนมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ สอดคล้องกับผลการทดสอบ Cure characteristic รูปที่ 4.2 (c) จะเห็นได้ว่าจากหลังเกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์แล้วยังทดสอบต่อไปในช่วง Overcure ทำให้กราฟที่ได้เป็นแบบ Marching ซึ่งแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา ส่วนกรณีของยาง NR จะสังเกตเห็นว่าค่ามอดูลัสลดลงจากเดิมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเกิดการหลุดออกของพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางขณะได้รับความร้อน เป็นเช่นนี้เพราะการคงรูปในงานวิจัยนี้เป็นระบบการคงรูปด้วยกำมะถันแบบปกติ (Conventional Vulcanized System; C.V.) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสลายตัวให้ซัลเฟอร์ได้ คือ TMTD เป็นผลทำให้ในระบบการคงรูปของยางมีปริมาณของกำมะถันที่มากเกินไป ส่งผลให้มีลักษณะการเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage) ซึ่งการเชื่อมโยงในลักษณะนี้จะง่ายต่อการเสื่อมสภาพภายใต้ความร้อน เนื่องจากพลังงานพันธะระหว่างซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์จะมีค่าน้อยกว่าพลังงานพันธะระหว่างคาร์บอนกับซัลเฟอร์ เพราะที่อะตอมของซัลเฟอร์

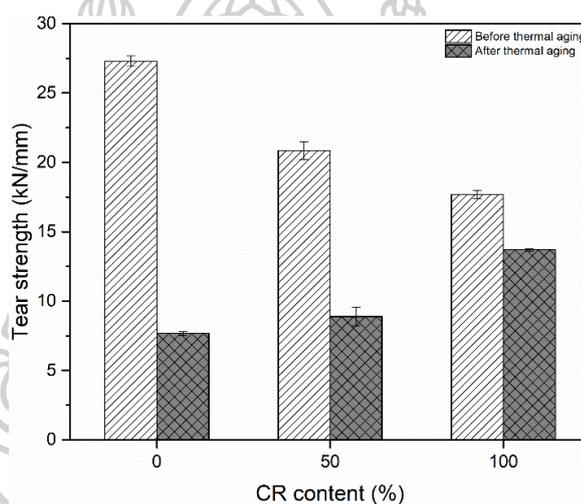
จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่ 2 คู่ เมื่ออะตอมของซัลเฟอร์มาสร้างพันธะต่อกันจะทำให้พันธะที่เกิดระหว่างซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์ไม่เสถียร ทำให้เมื่อได้รับความร้อนพันธะระหว่างซัลเฟอร์จะเกิดการแตกออกได้ง่าย [22] เป็นเหตุทำให้ค่ามอดูลัสของยาง NR หลังการบ่มแรงสภาวะลดลงอย่างมาก ส่วนยางผสม NR/CR มีค่ามอดูลัสลดลงจากเดิมเป็นอย่างมากเช่นกัน เนื่องจากที่สัดส่วนยางผสม 50/50 ยาง NR จะเป็นวิภาคต่อเนื่อง เพราะยาง NR มีความความหนาแน่นที่น้อยกว่ายาง CR ทำให้ยางผสม NR/CR มีค่ามอดูลัสลดลงอย่างมาก ตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.16 (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S2 ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

ค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบการคงรูปที่ 2 ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a) ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า Tensile strength หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน เนื่องจากการแตกออกของพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางขณะได้รับความร้อนด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาก่อนหน้า ด้วยปริมาณกำมะถันที่ใช้ในระบบการคงรูปมีมากเกินไปจึง ส่งผลให้ลักษณะของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางเกิดเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage) ซึ่งพันธะดังกล่าวจะมีความไม่เสถียรต่อความร้อนจึงสามารถเกิดการเสื่อมสภาพต่อความร้อนได้ง่าย [26, 53] และพบว่ายาง NR จะมีการลดลงของค่า Tensile strength หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนมากที่สุด ยาง CR มีการลดลงของค่า Tensile strength หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนน้อยที่สุด ส่วนยางผสม NR/CR การลดลงของค่า Tensile strength หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนอยู่ระหว่างยาง NR และยาง CR

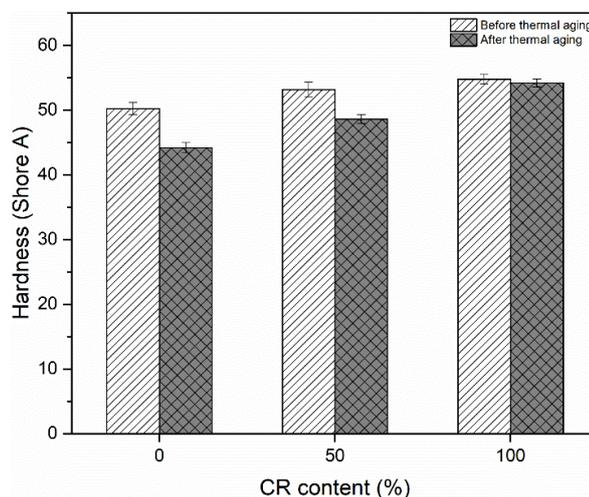
ค่าการยืดออก ณ จุดขาด (Elongation at break) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบการคงรูปที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (b) ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า Elongation at break หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน เนื่องจากการแตกออกของพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางขณะได้รับความร้อนด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาก่อนหน้า และพบว่ายาง NR จะมีการลดลงค่า Elongation at break หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนมากที่สุด ยาง CR มีการลดลงค่า Elongation at break หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนน้อยที่สุด ส่วนยางผสม NR/CR การลดลงค่า Elongation at break หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนอยู่ระหว่างยาง NR และยาง CR ซึ่งค่าการยืดออก ณ จุดขาดจะสัมพันธ์กับค่าความทนทานต่อแรงดึง ดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.17 Tear strength ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบ S2 ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบการคงรูปที่ 2 ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า Tear strength หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน เนื่องจากการแตกออกของพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางขณะได้รับความร้อนด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาก่อนหน้า ด้วยปริมาณกำมะถันที่ใช้ในระบบการคงรูปมีมากเกินไปจึง ส่งผลให้ลักษณะของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางเกิดเป็นแบบพอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic linkage) ซึ่งพันธะดังกล่าวจะมีความไม่เสถียรต่อความร้อนจึงสามารถเกิดการเสื่อมสภาพต่อความร้อนได้ง่าย [53] และพบว่ายาง NR จะมีการลดลงค่า Tear strength หลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนมากที่สุด ยาง CR มีการลดลงค่า Tear strength หลังการบ่มแรงสภาวะ

ด้วยความร้อนน้อยที่สุด ส่วนยางผสม NR/CR การลดลงค่า Tear strength หลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนอยู่ระหว่างยาง NR และยาง CR ซึ่งค่าความทนทานต่อการฉีกขาดจะสัมพันธ์กับค่าความทนทานต่อแรงดึง ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.18 ค่า Hardness (Shore A) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

ค่าความแข็ง (Hardness Shore A) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanizate ด้วยระบบการคงรูปที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า Hardness หลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เนื่องจากการแตกออกของพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางขณะได้รับความร้อน ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาก่อนหน้า และพบว่ายาง NR จะมีการลดลงค่า Hardness หลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนมากที่สุด ยาง CR มีการลดลงค่า Hardness หลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนน้อยที่สุด ส่วนยางผสม NR/CR การลดลงค่า Hardness หลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนอยู่ระหว่างยาง NR และยาง CR ซึ่งค่าความแข็งจะสัมพันธ์กับค่ามอดูลัส ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

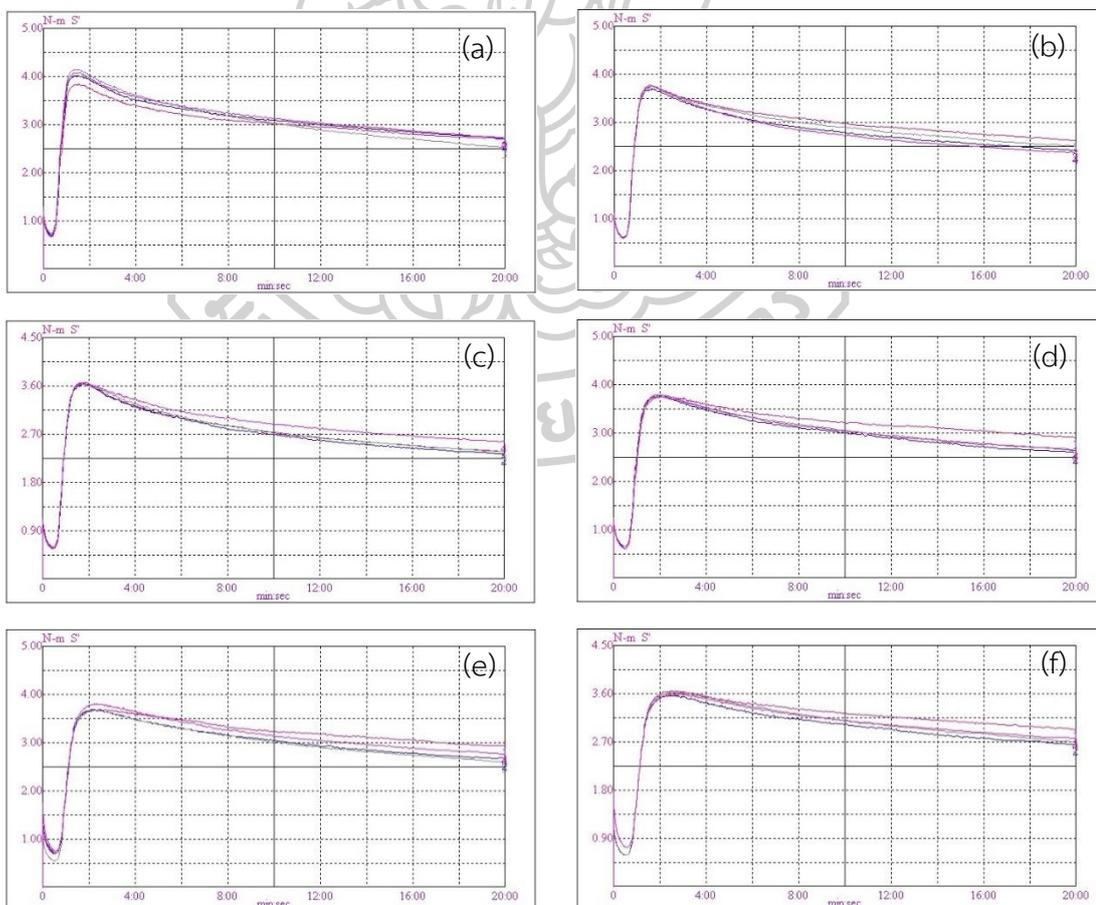
## 4.2 ตอนที่ 2 การศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend

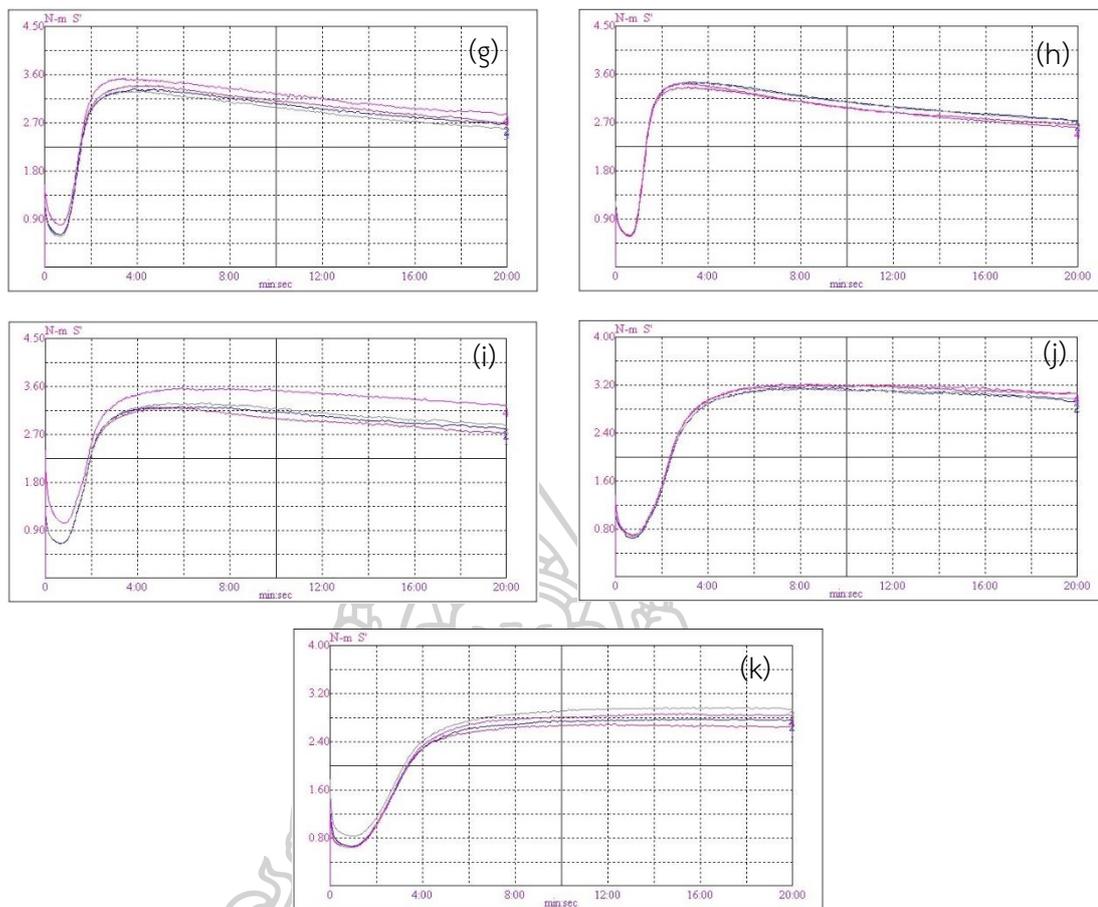
งานวิจัยในตอนนี้เป็นการศึกษาของ NR/CR blends ที่ vulcanized ด้วยระบบ vulcanization ที่ 2 โดยจะศึกษาอัตราส่วนของ NR กับ CR ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ N100C0 N90C10 จนถึง NOC100 เป็นต้น ปกติแล้วธรรมชาติของยางสองชนิดนี้มีการวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน [40] และจากการทดลองก่อนหน้านี้ ทำให้พบว่ายาง NR กับยาง CR เกิดปฏิกิริยา Crosslink ที่มีความว่องไวต่างกัน และปริมาณการเกิด Crosslink ที่ต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติของยาง Vulcanizate

สมบัติที่ศึกษาในงานวิจัยตอนนี้ประกอบด้วย ลักษณะการคงรูป ลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการบวมตัวของยาง เช่นเดียวกับการทดลองในตอนที่ 1

### 4.2.1 Cure characteristic ของยางคอมพาวด์ NR/CR ที่ปริมาณ CR ต่าง ๆ

ลักษณะการคงรูปของยาง NR/CR blend ซึ่งแสดงเป็นกราฟที่พล็อตระหว่างแรงบิดกับเวลา ในการทดสอบยางผสมด้วย MDR ที่อุณหภูมิ 160 °C แสดงดังรูปที่ 4.19





รูปที่ 4.19 Cure characteristic curves ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนผสม (a) 100/0, (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50, (g) 40/60, (h) 30/70, (i) 20/80, (j) 10/90, และ (k) 0/100

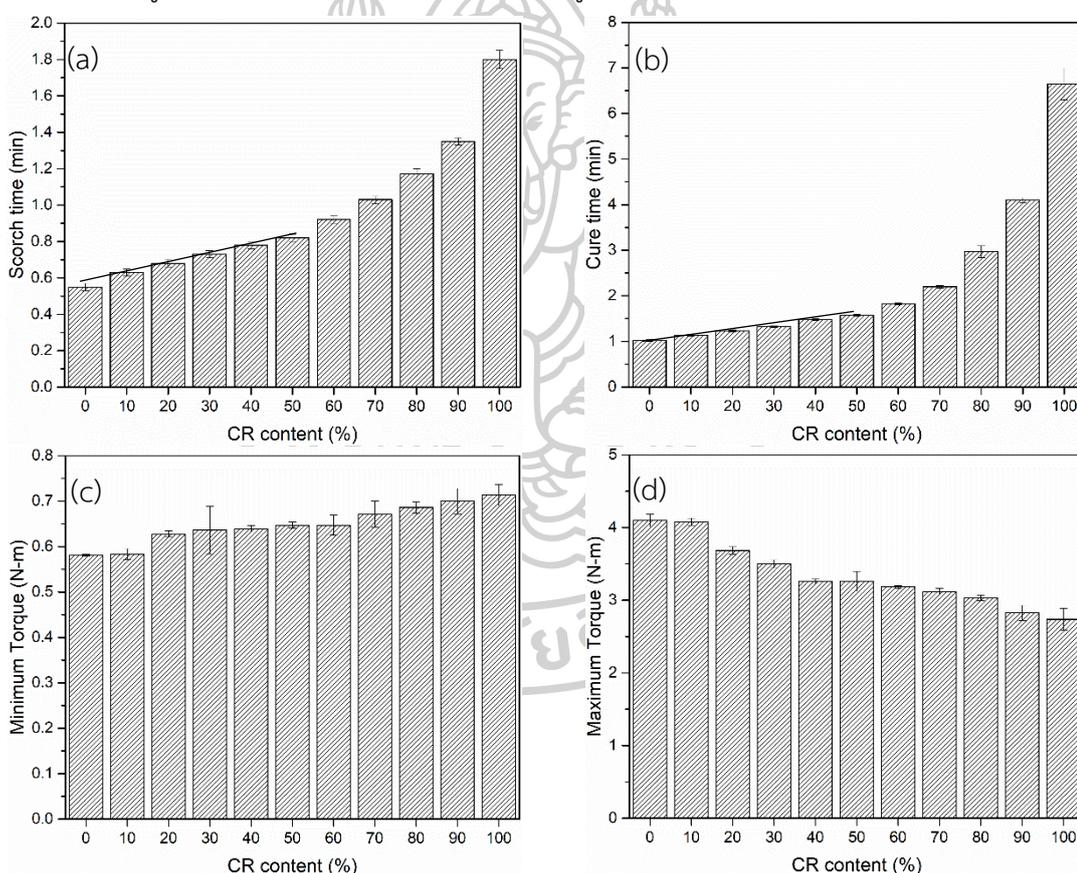
จากกราฟที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ลักษณะหลังการเกิด vulcanization ถึงจุดสูงสุดของยางคอมปาวด์ เมื่อเวลาผ่านไป ยังคงปรากฏการเกิด reversion ซึ่งแสดงถึงชนิดของ crosslink ที่มี polysulfide และเมื่อมียาง CR ในคอมปาวด์มากขึ้นจะเกิดปรากฏการณ์ของการ reversion ที่น้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อเป็นยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณยาง CR 100 % ลักษณะของยางที่ vulcanized แล้วเมื่อได้รับความร้อนต่อเนื่อง จะไม่เกิด reversion ซึ่งแสดงให้เห็นถึงชนิดของ crosslink ในยาง CR ไม่ได้เป็นแบบ polysulfide โดย A.Y. Coran [13] ได้อธิบายไว้ว่า สำหรับยาง CR ระบบที่มี ZnO สามารถทำให้เกิดการ vulcanization ได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะเกิดที่บริเวณหน่วยซ้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา polymerization แบบ 1,2 addition และพันธะที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา crosslink เป็นพันธะชนิด  $-C-O-C$  ในกรณีที่มีสารตัวเร่งเสริมแบบ ethylene thiourea จะ

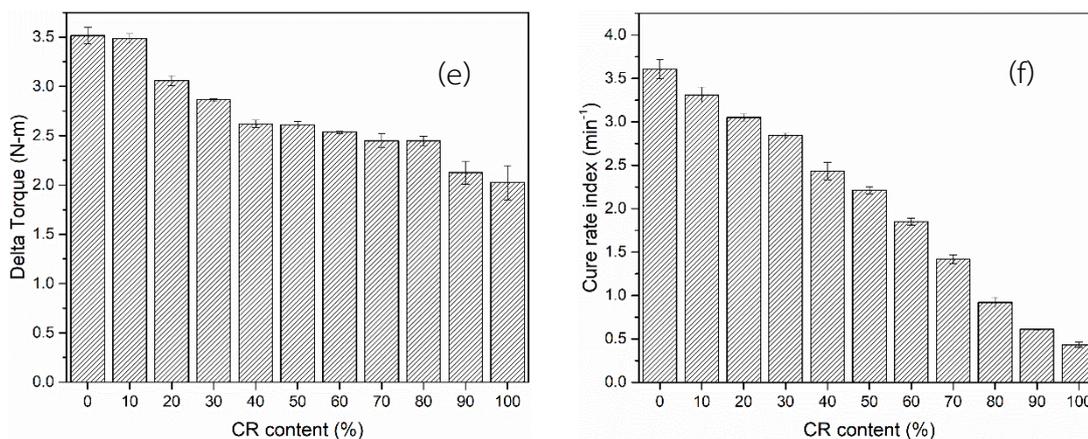


เร่งให้ vulcanization เกิดขึ้นที่ บริเวณ vinyl side group และเกิด crosslink ประเภท mono sulfide [41] ซึ่งจะไม่เกิด reversion

จาก Cure characteristic curves ที่ได้จากการทดสอบ MDR นี้ ทำให้ได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่  $ts_2$ ,  $tc_{90}$ , ML, MH, delta torque (DT) และ CRI ของยางผสม NR/CR ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาพล็อตเพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณยาง CR ที่มีต่อพฤติกรรมเกิดการเกิด vulcanization แสดงดังรูปที่ 4.19

จากกราฟในรูปที่ 4.19 จะได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ ก.5 และผู้วิจัยได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนระหว่าง NR กับ CR ที่มีต่อสมบัติการ คงรูปของยาง compound NR/CR ได้ในรูปที่ 4.20





รูปที่ 4.20 สมบัติการคงรูปของของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) Scorch time, (b) Cure time, (c) Minimum Torque, (d) Maximum Torque, (e) Delta Torque และ (f) Cure rate index

**Scorch time และ cure time** : จากผลการทดสอบ MDR ในรูปที่ 4.20 (a)-(b) เมื่อเปรียบเทียบยาง NR (NR/CR ที่ N100C0) กับ CR (NR/CR ที่ N0C100) พบว่า ยาง NR compound มีค่า  $t_{s2}$  น้อยกว่ายาง CR ซึ่งเป็นผลมาจากสารเคมีสำหรับทำให้เกิดปฏิกิริยา vulcanization สามารถละลายใน NR ได้ดีกว่ายาง CR การที่ยาง CR มีความเป็นขี้ที่มาจากคาร์บอนคลอไรด์ เป็นหมู่ข้างเคียงในทุกหน่วยซ้ำของโมเลกุลจึงทำให้มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก มีผลทำให้การละลายของ sulfur เข้าไปในยาง CR ได้น้อยกว่าในยาง NR และยังมีผลทำให้พันธะคู่ในโมเลกุลของยาง CR ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ต่ำกว่า NR [29] นอกจากนั้นแล้ว หากพิจารณาเปรียบเทียบโมเลกุลของยาง NR กับยาง CR จะเห็นว่าโมเลกุลของยาง NR มี allylic carbon ถึง 3 ตำแหน่ง ขณะที่ยาง CR มี allylic carbon ดังกล่าวเพียง 2 ตำแหน่ง และยังมีอิทธิพลของ Cl ที่อยู่ใกล้เคียงด้วย ดังนั้นการเริ่มเกิดปฏิกิริยา Vulcanization ของยาง CR จึงเริ่มได้ช้ากว่า NR [30] ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ เมื่อผสมที่มีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น เวลาในการสกอ์ของยางจึงเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.20 (a)

สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งคือ ในช่วงปริมาณยาง CR ในยางผสมที่ 0-50 % นั้น การเพิ่มขึ้นของเวลาสกอ์จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น (linearly increased) แต่เมื่อปริมาณยาง CR ในยางผสมเพิ่มเป็น 60-100 % การเพิ่มขึ้นของเวลาสกอ์จะมีลักษณะแนวโน้มเป็น exponential ซึ่งอาจเป็นผลจากลักษณะของวัฏภาคของยางทั้ง 2 ชนิด ที่เกิดการกระจายตัวแตกต่างกันในระหว่างการผสมและ vulcanization โดยเมื่อผสมมีปริมาณยาง CR ที่มากขึ้นจะทำให้เกิดสัณฐานของวัฏภาคยางที่เป็น sea-island และ co-continuous ซึ่งจะได้กล่าวในตอนต่อไป พิจารณาค่า Cure time ( $t_{c90}$ ) ในรูปที่ 4.20 (b) พบว่ายาง NR มีค่า  $t_{c90}$  ต่ำกว่ายาง CR ซึ่งเป็นผลจากความว่องไวใน

การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในระบบการคงรูปแบบก้ำมะถันได้เร็วกว่ายาง CR ซึ่ง ซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยากับสายโซ่ที่ไม่อิ่มตัวในพอลิเมอร์ โดยจะต้องการ Allylic carbon มากขึ้น เพื่อมาสร้างพันธะเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ ซึ่งจำนวนของ Allylic carbon ในหนึ่งหน่วยซ้ำของยาง NR จะมี 3 Allylic carbon ส่วนในยาง CR จะมี 2 Allylic carbon และอะตอมของคลอรีนจะทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลง จึงเป็นปัจจัยส่งผลให้ยาง CR เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ได้ช้ากว่ายาง NR [52]

พิจารณาค่า Cure time ( $tc_{90}$ ) ที่แสดงในรูปที่ 4.20 (b) พบว่ายาง NR มีค่า  $tc_{90}$  ต่ำกว่ายาง CR ซึ่งเป็นผลจากความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในระบบการคงรูปแบบก้ำมะถันได้เร็วกว่ายาง CR ซึ่ง ซัลเฟอร์จะทำปฏิกิริยากับสายโซ่ที่ไม่อิ่มตัวในพอลิเมอร์ โดยจะต้องการ Allylic carbon มากขึ้นเพื่อมาสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลแบบซัลเฟอร์ ซึ่งจำนวนของ Allylic carbon ในหนึ่งหน่วยซ้ำของยาง NR จะมี 3 Allylic carbon ส่วนในยาง CR จะมี 2 Allylic carbon นอกจากนี้อะตอมของคลอรีนจะทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลง ทั้งสองส่วนนี้เป็นปัจจัยส่งผลให้ยาง CR เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลด้วย sulfur ได้ช้ากว่ายาง NR [29, 52]

**Minimum และ Maximum torques** พิจารณาค่า Minimum Torque (ML) ในรูปที่ 4.20 (c)-(d) จะเห็นได้ว่ายางผสมที่มียาง CR 100% มีค่า ML สูงที่สุด และยางผสมที่มียาง CR 0% หรือยาง NR 100% มีค่า ML ต่ำที่สุด ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่า ยาง CR มีแรงระหว่างขั้วที่เกิดระหว่างสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากยาง CR มีอะตอมของคลอรีนอยู่ในทุกหน่วยซ้ำในโมเลกุล จึงทำให้ในระหว่างการหลอม ยาง CR มีความหนืดมากกว่ายาง NR หรืออีกนัยหนึ่ง ML คือ ค่าแรงบิดต่ำสุดในระหว่างการทดสอบ MDR สูงกว่า ML ของยาง NR และมีค่าสูงที่สุดนั่นเอง ค่านี้สะท้อนถึงความหนืดของยางผสมในระหว่างการหลอม สำหรับยางผสม NR/CR จะพบว่าเมื่อยางผสมมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นค่าแรงบิดต่ำสุดหรือ ML จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของยาง CR ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวแล้ว

สำหรับค่า Maximum Torque (MH) ในรูปที่ 4.20 (d) จะพบว่ายาง NR มีค่า MH สูงที่สุด ขณะที่ยาง CR มีค่า MH ต่ำที่สุด ค่า MH นี้สะท้อนถึงแรงบิดที่ใช้บิดตายขณะที่ยางเกิดการ vulcanize สูงสุดแล้ว เนื่องจากยาง NR มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์และมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากกว่ายาง CR จึงทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง CR มีค่าน้อยกว่ายาง NR ดังนั้นในยาง NR/CR จะพบว่าค่า MH มีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนของยาง CR เพิ่มขึ้น

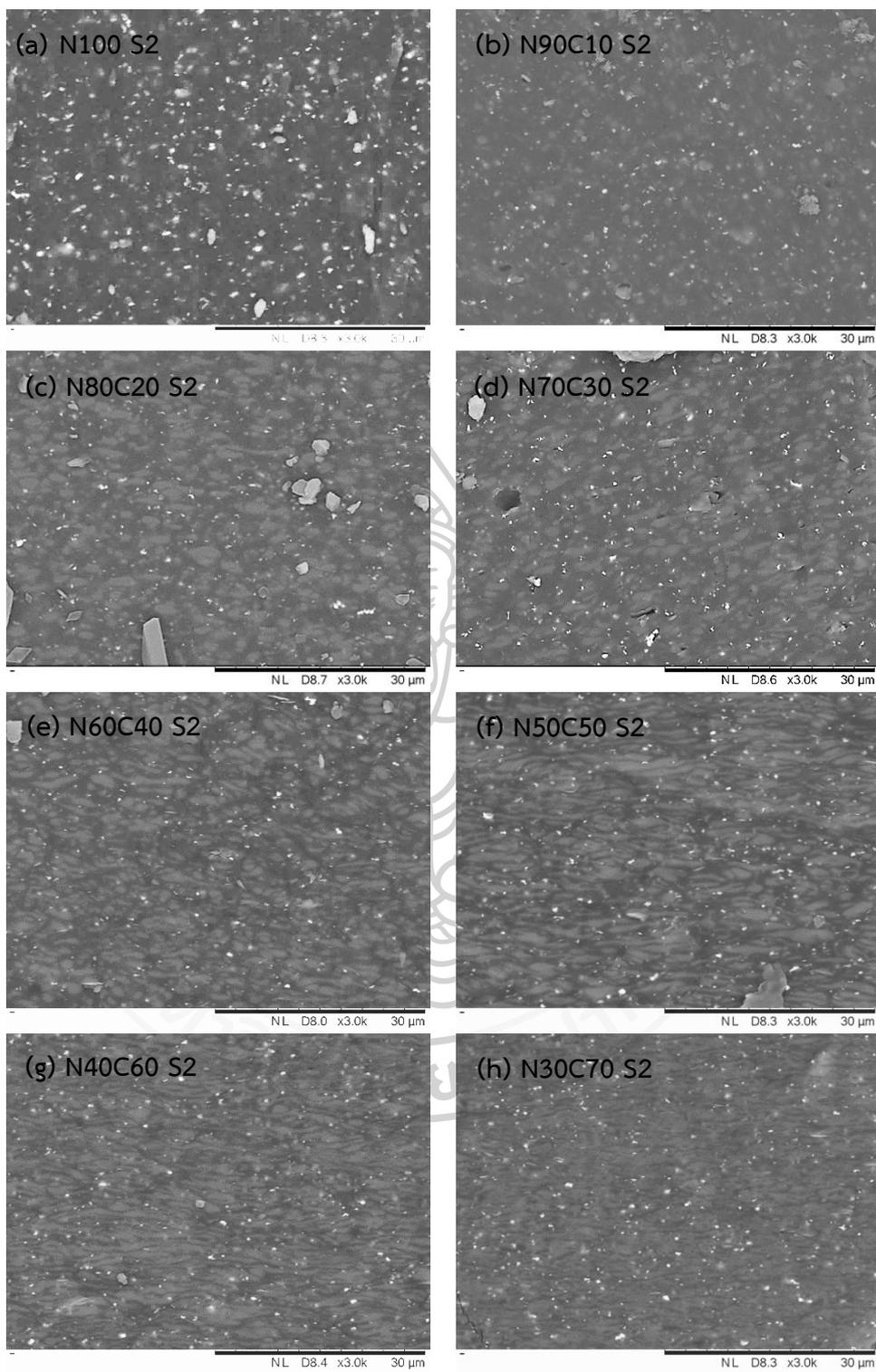
[54] อย่างไรก็ตาม ผล MH ที่ได้นี้โดยทั่วไปจะสัมพันธ์กับ crosslink density ของยาง vulcanizate แต่ต้องคำนึงถึงด้วยว่า ผลใน MDR นี้เป็น MH ของยางผสมที่ vulcanize แล้วที่อุณหภูมิ 160 °C ขณะทำการทดสอบ ซึ่งจะไม่เท่ากับ Secant modulus ของยางที่ได้จากการทดสอบ tension ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากยาง CR มี  $T_g$  สูงกว่ายาง NR และยังมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงด้วย จึงส่งผลต่อความแข็งแรง (secant modulus) ของยาง CR ด้วย [29]

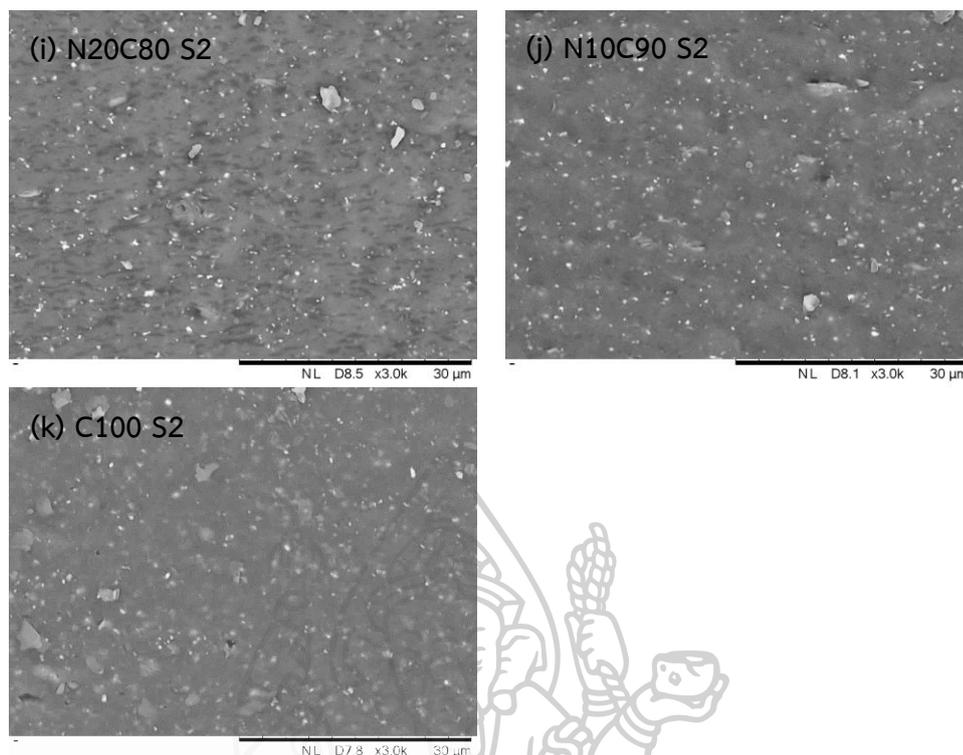
**Delta Torque (DT)** ค่า DT คือผลต่างระหว่าง MH และ ML และจะสะท้อนให้ทราบถึง modulus ของยางที่ vulcanized แล้ว ผลจากการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.20 (e) จะเห็นได้ว่ายาง NR 100 % หรือ N100C0 มีค่า DT สูงที่สุด ขณะที่ยาง CR 100 หรือ N0C100 มีค่า DT ต่ำที่สุด ด้วยเหตุผลที่ได้อธิบายมาข้างต้น สำหรับยางผสม NR/CR นั้นจะพบว่าค่า DT ลดลงเมื่อสัดส่วนของยาง CR เพิ่มขึ้นเนื่องจากปัจจัยของ crosslink ที่เกิดขึ้นน้อยลงในวัฏภาคยาง CR นั่นเอง

**Cure rate index (CRI)** เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ของยางคอมปาวด์ [29] ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.20 (f) จากผลการทดลองพบว่ายาง NR มีค่า CRI สูงสุด และยาง CR มีค่า CRI ต่ำสุด และสำหรับยางผสม NR/CR พบว่ายางผสมที่มีปริมาณ CR เพิ่มขึ้น ดัชนีอัตราเร็วในการเกิด vulcanization มีค่าลดลง ดังเหตุผลที่ได้กล่าวข้างต้น

#### 4.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR/CR vulcanizate

โดยปกติสมบัติของยางผสม นอกจากจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของยางที่มาผสมกัน ระบบ vulcanization แล้ว ยังขึ้นอยู่กับสัณฐานวิทยาของของยางผสมที่ vulcanize แล้วด้วยเช่นกัน [40] สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการผสมยาง NR กับยาง CR ซึ่งมีความเป็นขั้วที่แตกต่างกันมาก อีกทั้งความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ด้วยระบบกำมะถันยังแตกต่างกันอย่างมากด้วย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/CR ที่ผ่านการคงรูป โดยศึกษาจากรอยแตกหักในสภาวะเย็นยิ่งยวด (cryogenic fractured surface) ด้วยเทคนิค SEM ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.21





รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM ของ NR/CR blend vulcanizate ที่มีปริมาณ CR 0-100 %

จากผลการทดลองพบว่ายาง N100C0 และยาง N0C100 มีลักษณะเป็นผิวราบเรียบ เนื้อยางปรากฏเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีการแยกวัฏภาค ยกเว้น บริเวณที่เป็นร่องรอยของสารเติมแต่งเช่น ZnO และเมื่อเป็นยาง N90C100 ถึง N10C90 จะเริ่มเห็นการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน เนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกันของยาง NR กับยาง CR หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์การละลาย มีค่าใกล้เคียงกันก็จะสามารถละลายเข้ากันได้ดีและหากค่าสัมประสิทธิ์การละลายห่างกันมากขึ้นก็จะสามารถละลายเข้ากันได้ยากขึ้น) ของยางทั้งสองชนิด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การละลายของยาง NR และยาง CR มีค่าเท่ากับ 19.8 และ 16.6 ตามลำดับ [42] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การละลายของยางทั้งสองชนิดมีค่าต่างกันมาก ยางทั้งสองชนิดจึงมีความสามารถในการเข้ากันได้ยาก สำหรับภาพถ่าย SEM วัฏภาคมืดแสดงส่วนที่เป็นยาง NR และวัฏภาคที่สว่างแสดงถึงส่วนที่เป็นยาง CR

พิจารณา สัณฐานวิทยาของ NR/CR N90C10 ถึง N10C90 เมื่อปริมาณ NR ลดลงจาก 100 จนถึง 60 % จะพบว่า วัฏภาคของยาง CR จะเป็นวัฏภาคกระจายและมีขนาดของวัฏภาคที่ค่อนข้างใหญ่ ซึ่งหากพิจารณากลับไปที่คุณลักษณะของการ cure ที่ปรากฏว่า scorch time และ cure time ของยางในช่วงอัตราส่วนนี้มีระยะเวลาที่สั้น ซึ่งจะทำให้ยาง NR เกิดการ set ตัวที่เร็ว (เพราะเกิดการ crosslink เร็ว) การไหลตัวของวัฏภาค CR จึงยากทำให้เห็นวัฏภาคของ CR โดยส่วนมากมีขนาดใหญ่

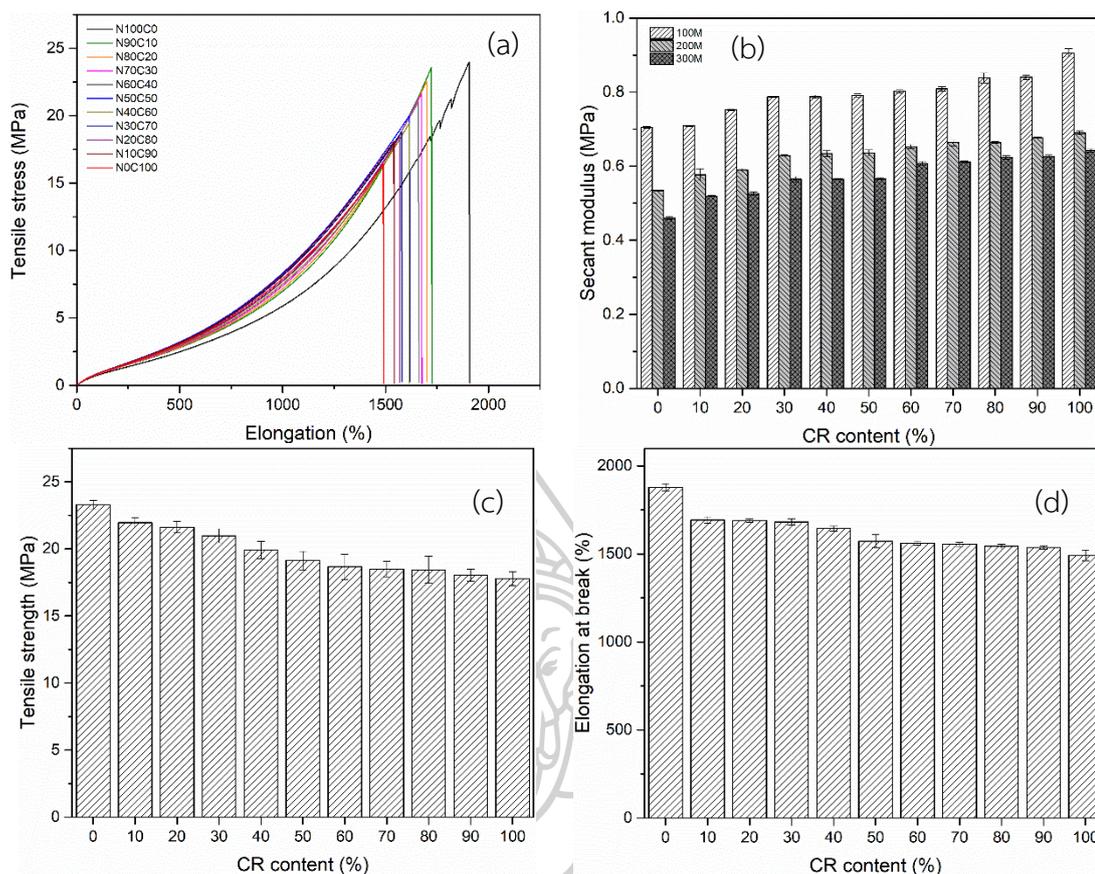
เมื่อปริมาณยาง NR ในยางผสมน้อยลง กล่าวคือ 50 และ 40 % ยางผสม เริ่มแสดงลักษณะของการที่ ยาง NR เริ่มกลับไปเป็นวัฏภาคกระจาย แต่การที่ยาง NR เกิดการ cure ได้เร็ว แต่ปริมาณมีน้อย ในทางกลับกัน CR มีปริมาณมากขึ้น แต่การเกิดปฏิกิริยาการ cure เกิดได้ช้ากว่า จึงเห็นวัฏภาคของ ยาง CR ยืดออก และเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อยาง CR เพิ่มขึ้นเป็น 60 % ลักษณะของวัฏภาค CR กับ NR ในอัตราส่วนนี้จึงมีแนวโน้มไปเป็น co-continuous และยังคงมีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบนี้ใน อัตราส่วน 30/70 ยาง CR จะเป็นวัฏภาคหลักเมื่อมีปริมาณ 80 % ขึ้นไป ซึ่งเป็นผลจากพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ออกมาแล้ว รวมถึงผลของความหนาแน่นของยาง CR ที่มีมากกว่ายาง NR ซึ่งมี ผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของยางผสมเช่นกัน

#### 4.2.3 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR/CR Vulcanizate

จากยาง NR/CR vulcanizate ที่ขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Compression molding ผู้วิจัยได้นำมา ตัดเป็น Dumbbell type C และทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ได้ผลเป็น Stress-Strain curves และจาก curves จะได้พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ secant modulus, tensile strength และ elongation at break ดังแสดงในรูปที่ 4.22

จากรูปที่ 4.22 (a) แสดงกราฟ Stress-Strain ของยาง NR/CR vulcanizate อัตราส่วน ตั้งแต่ CR 0-100 % จะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟ ยังคงแสดงพฤติกรรม Stress-induced crystallization ไม่ว่าจะเป็น N100C0 จนถึง N0C100 ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของ CR vulcanizate ที่คล้ายกับยางธรรมชาติมากที่สุด [50] อย่างไรก็ตาม จากลักษณะโครงสร้างของ โมเลกุลการมีอยู่ของอะตอม Cl ในหน่วยซ้ำของ CR ทำให้ยาง NR/CR ที่มีปริมาณ CR เพิ่มขึ้น ทำให้ ยาง NR/CR มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น อนึ่งความว่องไวต่อการเกิด vulcanization และ ปริมาณของ crosslink จะมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงดึงเช่นกัน

*Secant modulus* รูปที่ 4.22 (b) ของยาง NR/CR blend vulcanizate พบว่าค่าซีแคนท์ มอดูลัส ของยาง N0C100 มีค่าสูงกว่ายาง N100C0 ซึ่ง เป็นผลมาจากยาง CR จะมีอะตอมของ คลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างขั้วที่แข็งแรง สายโซ่โมเลกุล ของยาง CR จึงสามารถยึดตัวกันได้แน่นกว่าโมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยากและมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR ทำให้มีค่ามอดูลัสสูงกว่ายาง NR ส่วนยางผสม NR/CR มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยาง CR ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.22 (a) Stress-Strain curve, (b) Secant modulus, (c) Tensile strength และ (d) Elongation at break ของ NR/CR vulcanizate ที่มีปริมาณ CR 0-100 %

**Tensile strength** ความทนทานต่อการดึงยึดที่จุดขาดของยาง NR/CR แสดงในรูปที่ 4.22 (c) จากผลการทดลองพบว่ายาง NOC100 มีค่า Tensile strength ต่ำกว่ายาง N100C0 เนื่องจากเป็นยาง NR สามารถเกิด Stress-induced crystallization ขณะถูกดึงยึดได้มากกว่ายาง CR (สังเกตจาก Stress-Strain curve) ส่วนยางผสม NR/CR มีค่า Tensile strength ลดลงตามอัตราส่วนของยาง CR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง NR เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ ยาง CR ลงไปใน NR/CR tensile strength จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยาง CR ซึ่งเป็นผลจากเหตุ 2 ประการคือ 1 กรณียางผสมที่มี CR 10-50 % จะพบว่า tensile strength จะมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด พร้อมกับความสามารถในการยึดตัวของยางผสมลดลง หากกลับไปพิจารณาภาพถ่าย SEM ที่แสดงให้เห็นสัณฐานวิทยาของยาง NR/CR จะเห็นว่าที่อัตราส่วนของยางผสมที่มี CR 10-50% วัฏภาคยาง NR เป็นวัฏภาคหลัก (ต่อเนื่อง) ขณะที่ CR เป็นวัฏภาครอง และมีขนาดใหญ่ ณ อุณหภูมิที่ทดสอบนี้ วัฏภาคยาง CR จะมีความแข็งมากกว่ายาง NR ดังนั้น การยึดตัวของยางผสมจึงลดลงด้วยการขัดขวางของอนุภาค CR ด้วยเหตุนี้เอง จึงเป็นที่มาของเหตุผลที่ 2 คือ ความสามารถในการยึดตัวที่ลดลง ทำให้ความสามารถ



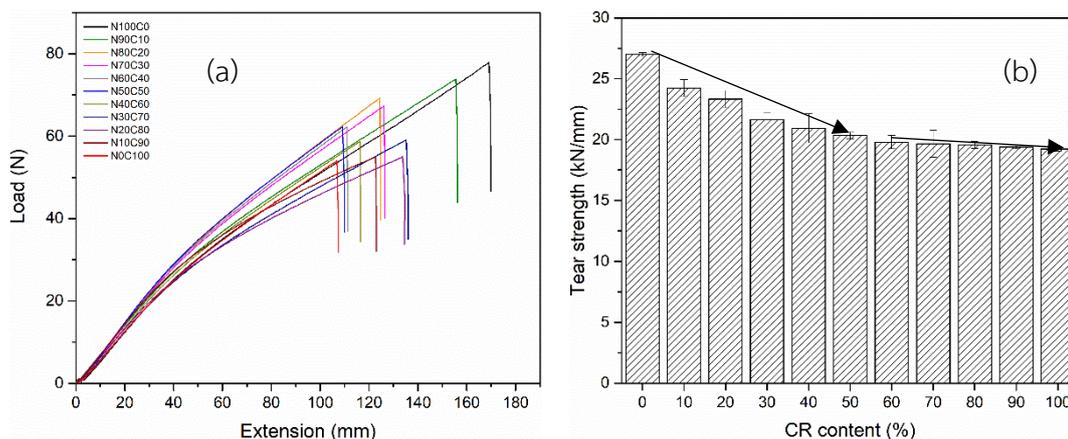
ในการเกิด Stress-induced crystallization ลดลงด้วย สำหรับ CR นั้น การที่ยางชนิดนี้มีอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่แข็งแรง ทำให้การยืดตัวเกิดได้น้อยกว่ายาง NR เมื่อปริมาณของ CR เพิ่มขึ้น จาก 60-90 % จาก ภาพถ่าย SEM จะพบว่าวัฏภาค CR แม้จะยังไม่เป็นวัฏภาคหลัก แต่มีการยืดออกของอนุภาคยาง CR อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นสมบัติการดึงยืด จึงถูกควบคุมด้วยวัฏภาคของ CR ดังนั้นจึงพบว่า tensile strength ของ NR/CR ที่ปริมาณ CR 60-90 % นั้นมีการเพิ่มขึ้นในระดับที่ไม่มากเหมือนที่ปริมาณ CR 10-50%

**Elongation at break** การยืดตัว ณ จุดขาดของยาง NR/CR แสดงดังรูปที่ 4.22 (d) ซึ่งจะเห็นว่าค่าการยืดออก ณ จุดขาดของ NR/CR ลดลงเมื่อ ปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง CR สามารถจัดเรียงโมเลกุลไปตามแนวแรงดึง เกิดพฤติกรรมแบบ Stress-induced crystallization จึงช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยางขณะดึงยืด ทำให้มีความสามารถในการทนทานแรงดึงมากขึ้น ส่วนยาง CR มีความสามารถจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงดึงได้น้อยกว่ายาง NR เนื่องจากยาง CR จะมีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล และสามารถเกิด อันตรกิริยาระหว่างขั้ว ในระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ ยาง CR จึงยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR ส่วนยางผสม หากพิจารณา NR/CR ค่า Elongation at break จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ CR เพิ่มขึ้น

#### 4.2.4 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง NR/CR vulcanizate

โดยทั่วไปสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางผสมนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่นำมาผสม, crosslink density, ชนิดของ crosslink และที่สำคัญคือ ลักษณะพื้นฐานของยางผสม [40] ปัจจัยเรื่องพื้นฐานวิทยาของยางผสมที่ vulcanized แล้วนี้ มีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมการฉีกขาดมาเช่นกัน ผลการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของยาง NR/CR vulcanizate ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.23

Tear resistance หรือ Tear strength ของยางคือแรงดึงสูงสุดที่ต้องใช้ในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง โดยให้แรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับ plain ของการฉีกขาด แรงนี้เป็นแรงต้านทานการเติบโตของรอยตัดเมื่อได้รับแรงดึง ซึ่งมีหน่วยเป็น kN/mm มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D 412 ความทนทานกับการฉีกขาดของยางผสม NR/CR รูปที่ 4.23 เป็นกราฟที่พล็อตระหว่างแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบซึ่งตัดเป็นรูปตัว C (ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ตอนที่ 3.4.4)



รูปที่ 4.23 (a) Load-Extension curve และ (b) Tear strength ของ NR/CR vulcanizate ที่มี ปริมาณ CR 0-100 %

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) เนื่องจากการเปิดออกของรอยแตก (crack propagate) ของยาง NR/CR vulcanizate แสดงในรูปที่ 4.23 จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่ายาง N100C0 มีค่า Tear Strength สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ อัตราส่วนผสมอื่น ๆ และ N0C100 พิจารณากรณี N100C0 กับ N0C100 หากพิจารณาในเชิงโมเลกุลของยาง NR ซึ่งมีโครงสร้างแบบยุ่งเหยิงและเกี่ยวพันกัน (random and entanglement) เมื่อมี crosslink การเกี่ยวพันกัน จะคลายออกจากกันยากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการให้แรงกระทำแบบ tension หรือแรงกระทำแบบฉีกหรือ tear ซึ่งในกรณีหลังนี้กลไกการขาดของตัวอย่างอาศัยการเกิด shear หรือแรงเฉือนร่วมด้วย [36] จากขึ้นทดสอบที่มีลักษณะเป็นตัว C บริเวณมุมของตัวอย่างทดสอบจะเป็นจุดที่แรงกระทำทั้งหมดมารวมอยู่ ดังนั้นเมื่อทำการดึงตัวอย่างทดสอบ แรงที่มารวมจะทำให้เกิดการ crack จากนั้น จะเกิดแรงเฉือนในแนวขวาง หากสัณฐานหรือเนื้อของตัวอย่างทดสอบมีความต่อเนื่อง ตัวอย่างทดสอบจะสามารถทนแรงฉีกขาดได้มาก

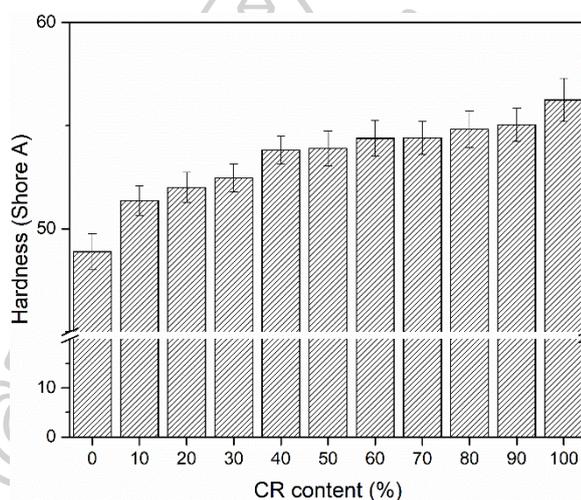
พิจารณากรณีของยาง CR หรือ N0C100 ซึ่งเป็นยางที่แข็งกว่ายาง NR เมื่อให้แรงกระทำจึงเห็นว่ายางชนิดนี้มีความสามารถในการต้านแรงได้ดีกว่ายาง N100C0 แต่เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางชนิดนี้ต่ำกว่า NR การยืดตัวออก จึงน้อยกว่า ทำให้มีความทนทานต่อการฉีกขาดที่ต่ำกว่า NR หรือ N100C0 นั่นเอง

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่าหากสัณฐานของตัวอย่างทดสอบมีความต่อเนื่องจะทำให้มีความสามารถในการทนต่อแรงฉีกขาดได้มาก ดังนั้น เมื่อยาง NR มีวัฏภาคของ CR ซึ่งเป็นวัฏภาคที่แข็งกว่า เมื่อถูกดึงให้เกิดการฉีกออกที่บริเวณรอยต่อของวัฏภาคยางผสม จะทำให้เริ่มเกิด void ขณะทำการให้แรงกระทำ จึงทำให้ยางผสมฉีกขาดได้ง่ายขึ้น tear strength จึงลดลง แต่เมื่อปริมาณยาง

CR เพิ่ม จนทำให้วัฏภาคของยาง CR ในยางผสมมีลักษณะยึดตัว (ดูภาพถ่ายจาก SEM รูปที่ 4.21) ทำให้ที่ปริมาณยาง CR 60% ขึ้นไป มีอัตราการลดลงของค่า tear strength ที่น้อยกว่า ยางผสมที่มีปริมาณยาง CR 10-50% (สังเกตจากเส้นลูกศรสีดำ ในรูป 4.23 (b))

#### 4.2.5 สมบัติความแข็งของยาง NR/CR vulcanizate

โดยทั่วไปสมบัติความแข็งสามารถสะท้อนถึง modulus ของยาง vulcanizate อย่างไรก็ตามความแข็งจะวัดเพียงที่ผิว ดังนั้นจึงไม่ใช่สมบัติของ bulk rubber vulcanizate [51] ความแข็งของยางผสม NR/CR ทดสอบโดยใช้หัวกด indenter แบบหัวตัด โดยมีหน่วยเป็น Shore A ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24



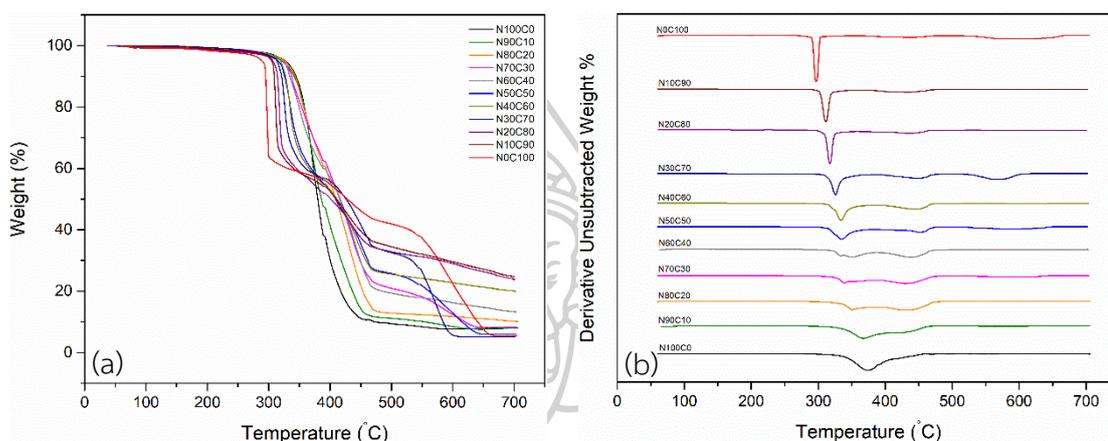
รูปที่ 4.24 Hardness (Shore A) ของยาง NR/CR vulcanized ที่ปริมาณยาง CR 0-100%

รูปที่ 4.24 จะพบว่ายาง N0C100 หรือคือยาง CR 100% มีความแข็ง (Hardness) ในหน่วย Shore A มากกว่ายาง NR ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วกล่าวคือยาง CR มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง อันเนื่องมาจากยาง CR มีอะตอม Cl อยู่ในทุกหน่วยซ้ำ ยาง CR จึงสามารถยึดตัวกันแน่น ส่งผลให้โมเลกุลมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR เมื่อยางผสม NR/CR มีปริมาณ CR เพิ่มขึ้น จะทำให้ NR/CR มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความแข็งจะสัมพันธ์กับค่าซีแคนท์มอดูลัสของยาง (Secant modulus) ดังที่ได้กล่าวแล้ว

#### 4.2.6 สมบัติการสลายตัวด้วยความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate ด้วยเทคนิค TGA

โดยทฤษฎีแล้ว ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์นั้นนักวิทยาศาสตร์จะทดสอบด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA) ตามนิยามแล้ว thermal stability ของ polymer คือ ความสามารถในการต้านทานความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ โดยจะต้องคงไว้ซึ่งสมบัติ

ๆ ที่อุณหภูมินั้น ๆ โดยทั่วไป thermal stability ของ polymer จะทดสอบติดตามด้วย thermogravimetric analysis [55] ในงานวิจัยนี้ จึงศึกษา thermal stability ของ NR/CR เนื่องจากการที่ CR มี Cl atom อยู่ในทุกหน่วยซ้ำ จะนำมาซึ่งการสลายตัวทางความร้อนที่แตกต่างไปจาก NR ผลการทดสอบ TGA ของ NR/CR และสามารถแสดงเป็นกราฟ DTA แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 (a)-(b) ตามลำดับ และผลจากการวิเคราะห์ อุณหภูมิในการเริ่มการสลายตัว อุณหภูมิการสลายตัวเร็วที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.25 (a) TGA thermogram และ (b) DTG ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ปริมาณ CR 0-100 %

สมบัติทางความร้อนที่ได้ศึกษาโดยเทคนิค TGA ของยาง NR/CR vulcanizate โดยมีปริมาณ CR 0-100% ในขั้นตอนนี้ แสดงในรูปที่ 4.25 (a) และกราฟ derivative (DTG) ซึ่งได้จากอนุพันธ์ของปริมาณมวลที่สลายตัวต่ออุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.25 (b) จาก thermogram จะพบว่า อุณหภูมิมีการลดลงของมวลของยางผสมเมื่อตัวอย่างทดสอบได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของยางเมื่อได้รับความร้อน [39] หากพิจารณารูป TGA และตารางที่ 4.3 ของ N100C0 ซึ่งเป็นยาง NR 100 % แสดงขึ้นของการสลายตัวของ NR เพียงขั้นตอนเดียว โดยมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการลดลงของมวล อยู่ที่ประมาณ 339 °C ขณะที่ N0C100 ซึ่งเป็นยาง CR 100% แสดงการสลายตัวภายใต้ความร้อน 2 ขั้นตอน ทั้งนี้กลไกในการสลายตัวของ CR เป็นไปตามปฏิกิริยาที่ได้กล่าวไว้ในตอนที่ 4.1 ซึ่งจะพบว่าในขั้นตอนการสลายตัวขั้นแรกมีอุณหภูมิเริ่มต้น ซึ่งเป็นขั้นที่ CR เริ่มมีการลดลงของมวลอย่างรวดเร็วปรากฏที่ประมาณ 293 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเริ่มการสลายตัวของ CR อันเกิดจากปฏิกิริยา dehydrochlorination [26] เกิดขึ้นก่อนที่ยาง NR จะเกิดการสลายตัว ดังนั้นเมื่อผสมยาง CR เข้ากับยาง NR จึงปรากฏอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของยางผสมลดลงจากที่พบในยาง NR 100 % สำหรับการสลายตัวขั้นที่ 2 ของยาง CR นั้นเกิดจากโมเลกุลของ CR หลังปลดปล่อย HCl แล้วเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยมีลักษณะของ Unsaturation และวงแหวน

เกิดขึ้น Borros และคณะ [56] ได้กล่าวไว้ว่าหลังจาก CR ปลดปล่อย HCl โมเลกุลจะมีสัดส่วนของ H ที่ลดลง โครงสร้างของสายโซ่ที่ปรากฏหลังจากการปลดปล่อย HCl แล้วมีลักษณะคล้าย carbon black ซึ่งจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเกิดการสลายตัวของ CR ในขั้นที่ 2 นี้ จะมี peak ที่เป็นช่วงกว้างมาก เนื่องจากขณะที่ได้รับความร้อนในสภาวะที่เป็นแก๊สไนโตรเจนในช่วงอุณหภูมินี้ อาจมีการเกิด graphitization ของโมเลกุลทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้นอีก ดังปรากฏ อุณหภูมิการสลายตัวสุดท้าย ( $T_{endset2}$ ) ของ CR สูงถึง 466 °C เช่นเดียวกับที่ Borros และคณะ [56] ได้ศึกษาไว้ สำหรับยาง NR นั้น เมื่อเกิดการสลายตัวภายใต้ความร้อน ไม่มีการเกิดโมเลกุลที่มีพันธะคู่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้าย จึงปรากฏที่ต่ำกว่าของยาง CR กล่าวคือปรากฏที่ 410 °C

พิจารณาค่า  $T_{dmax}$  ซึ่งเป็นค่า inflection point บนกราฟ TGA และค่าที่จุด peak ของกราฟ DTG โดยปกติแล้ว ณ. อุณหภูมินี้ เป็นจุดที่เกิดการสลายตัวเร็วที่สุดของพอลิเมอร์ ในกรณี N100C0 จะพบว่า  $T_{dmax}$  ของยาง NR อยู่ที่ประมาณ 374 °C หากเป็นกรณีของยาง CR จะปรากฏค่า  $T_{dmax}$  2 ค่า กล่าวคือที่ 297 °C และประมาณ 439 °C

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า  $T_{onset}$ ,  $T_{endset}$ ,  $T_{dmax}$  และ Char residue จากการทดสอบ TGA ของยาง NR/CR vulcanizate

Property	$T_{onset1}$ (°C)	$T_{endset1}$ (°C)	$T_{dmax1}$ (°C)	$T_{onset2}$ (°C)	$T_{endset2}$ (°C)	$T_{dmax2}$ (°C)
NR/CR						
N100C0	339.43	410.05	374.36	-	-	-
N90C10	336.04	463.70	367.67	448.73	490.11	465.42
N80C20	339.71	374.34	351.47	398.29	466.13	434.83
N70C30	329.23	366.04	340.17	395.23	464.82	433.41
N60C40	323.08	376.87	349.50	400.46	465.25	439.66
N50C50	315.06	355.78	334.87	420.05	452.39	469.97
N40C60	318.07	350.48	334.05	400.76	467.60	444.71
N30C70	311.82	339.99	325.57	398.85	471.90	448.74
N20C80	306.09	328.14	317.34	395.32	463.69	437.08
N10C90	299.99	322.10	311.33	379.84	468.28	434.00
N0C100	293.04	300.80	297.20	383.52	466.48	438.63

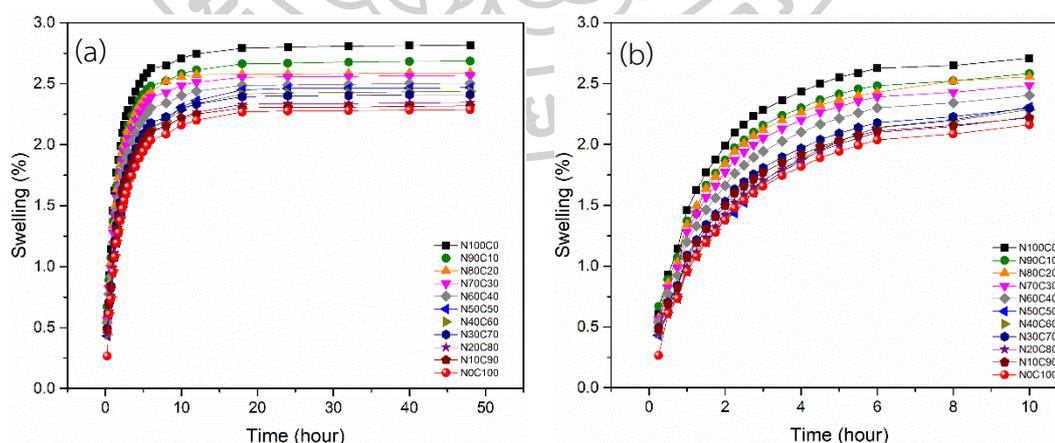
ในสำหรับยางผสม NR/CR พิจารณาปริมาณ CR 10-90 % จะพบว่า เมื่อยางผสมมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มแรกของพอลิเมอร์ผสม ( $T_{onset1}$ ) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ CR เนื่องจากในกรณียางผสม วัฏภาคของยาง CR ในยางผสม จะเกิดการสลายตัวขั้นที่ 1 ก่อน เช่น ยางผสม N90C10  $T_{dmax1}$  ปรากฏที่อุณหภูมิ 367 °C ซึ่งต่ำกว่า อุณหภูมิ  $T_{dmax1}$  ของยาง N100C0 และจะลดลงไปอีกเมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น

พิจารณาการสลายตัวในขั้นที่ 2 ซึ่งเป็นการสลายตัวขั้นที่ 2 ของยาง CR โดยเกิดการสลายตัวของสายโซ่หลักของยาง CR จะพบว่า ในกรณีของ N90C10  $T_{onset2}$  ปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่า N100C0 ซึ่งเป็นอิทธิพลของการมีอยู่ของยาง NR และจะพบว่า  $T_{onset2}$  จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณยาง CR ในยางผสมเพิ่มขึ้น

สำหรับอุณหภูมิที่ยาง CR มีการสลายตัวสูงสุด  $T_{dmax2}$  (น้ำหนักลดลงเร็วที่สุด) นั้นพบว่าเมื่อยาง CR มีสัดส่วนในยางที่มีการกระจายตัวในยาง NR  $T_{dmax2}$  จะมีค่าสูง และจะลดลงเมื่อยาง CR เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.3 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อวัฏภาคของยาง CR กระจายอยู่ในยาง NR การสลายตัวของยาง CR จะช้าลงและเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้น

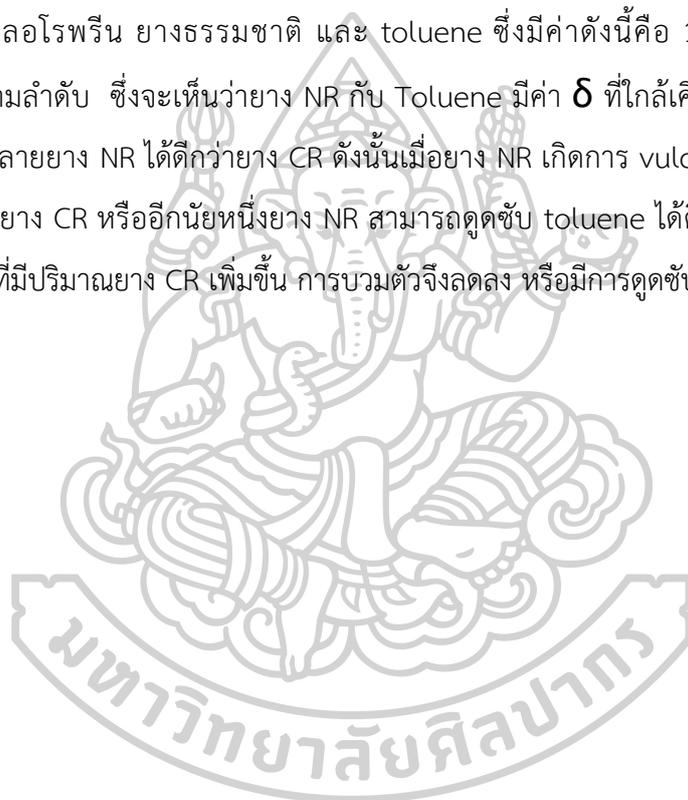
#### 4.2.7 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยาง NR/CR vulcanizate

เป็นที่ทราบกันดีว่ายาง CR เป็นยางที่มีขี้ผึ้งสูง ดังนั้นจะมีการบวมตัวใน toluene น้อยกว่ายาง NR [30, 42] ดังนั้น เมื่อผสม CR ลงใน NR การบวมตัวใน toluene ของยาง NR ที่ผสมยาง CR จึงลดลง ผลการทดสอบการบวมตัวของ NR/CR แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 %Swelling ของยาง NR/CR vulcanizate ในโทลูอีน (a) เริ่มต้นถึง equilibrium และ (b) ช่วง 0-10 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบการบวมตัวของยางผสม ที่แสดงในรูปที่ 4.26 (a) ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวอันเกิดจากการดูดซับ Toluene ของยาง NR/CR ไปจนถึง equilibrium แสดงให้เห็นว่ายาง NR/CR ในทุกอัตราส่วนผสม เริ่มมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวคงที่ (เข้าสู่ equilibrium) เมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง โดยในช่วงแรกของการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักสามารถแสดงอัตราเร็วในการดูดซับ toluene ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.26 (b) จากรูปจะพบว่า NR/CR ที่มีปริมาณ CR 0% สามารถดูดซับ toluene ได้รวดเร็วที่สุด (สังเกตจากความชันของกราฟ ในรูปที่ 4.26 (b) ในช่วง 0-3 ชั่วโมงแรก) และปริมาณของ toluene ที่ถูกดูดซับมากที่สุด หากพิจารณาความสัมพันธ์การละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) ของยางคลอโรพรีน ยางธรรมชาติ และ toluene ซึ่งมีค่าดังนี้คือ 19.8, 16.6 และ 17.8  $(\text{J}/\text{cm}^3)^{1/2}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ายาง NR กับ Toluene มีค่า  $\delta$  ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น Toluene จึงสามารถละลายยาง NR ได้ดีกว่ายาง CR ดังนั้นเมื่อยาง NR เกิดการ vulcanized จึงเกิดการบวมตัวได้มากกว่ายาง CR หรืออีกนัยหนึ่งยาง NR สามารถดูดซับ toluene ได้ดีกว่ายาง CR ดังนั้นยางผสม NR/CR ที่มีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น การบวมตัวจึงลดลง หรือมีการดูดซับ toluene ลดลง [42]

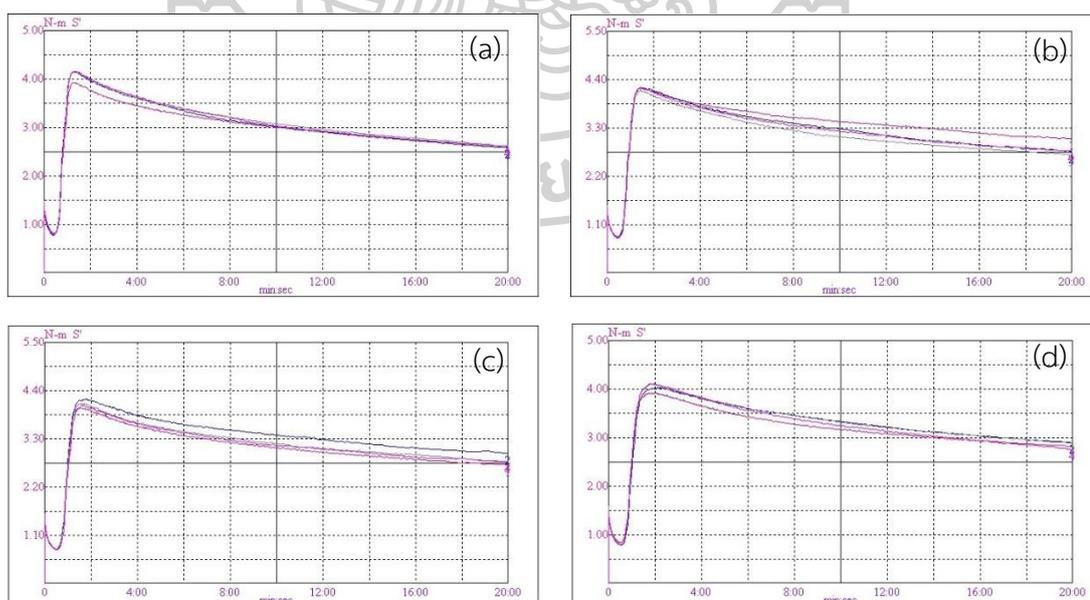


### 4.3 ตอนที่ 3 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR

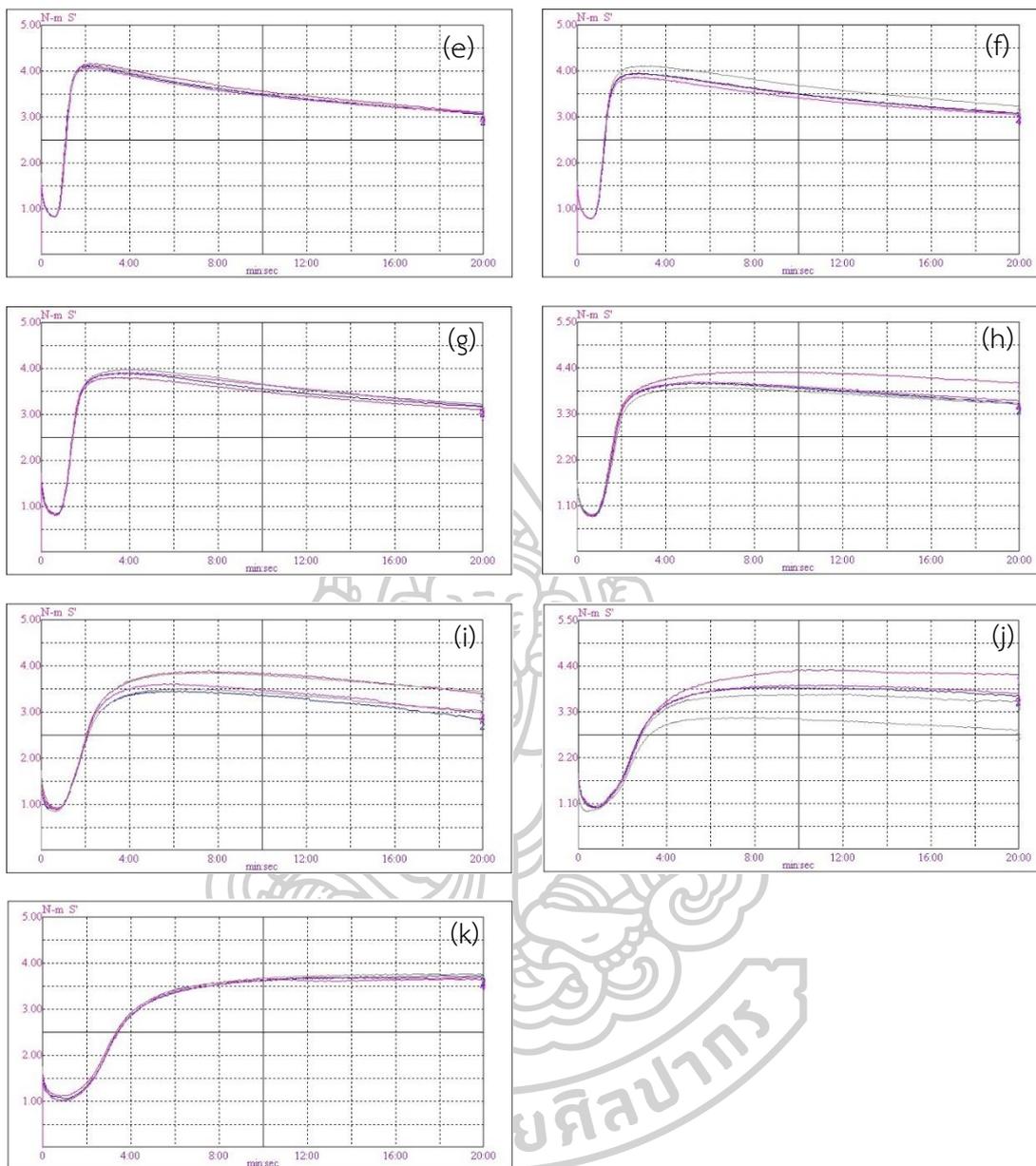
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/CR ซึ่งภาพถ่าย SEM ปรากฏชัดเจนว่า ยาง NR และยาง CR มีความไม่เข้ากัน ดังนั้นในงานวิจัยตอนนี้จึงเป็นความพยายามที่จะทำให้วัสดุภาคของยาง CR เกิดการกระจายตัวดีขึ้นในวัสดุภาคของ NR โดยจะใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) 2 ชนิดคือ nano silica ในปริมาณ 10 phr ซึ่งสารนี้ จะทำหน้าที่เป็น Physical compatibilizer และมีการเติมในปริมาณ IR-g-MA 5 %wt ของ NR ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Chemical compatibilizer โดยมีการผสมยาง CR ปริมาณ 0-100 % และระบบ vulcanization เป็นระบบ system 2 สมบัติที่ศึกษามีดังต่อไปนี้คือ ลักษณะการคงรูป ลักษณะสัณฐานวิทยา ความหนาแน่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการบวมตัวของยาง และสมบัติการต้านทานการติดไฟ

#### 4.3.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

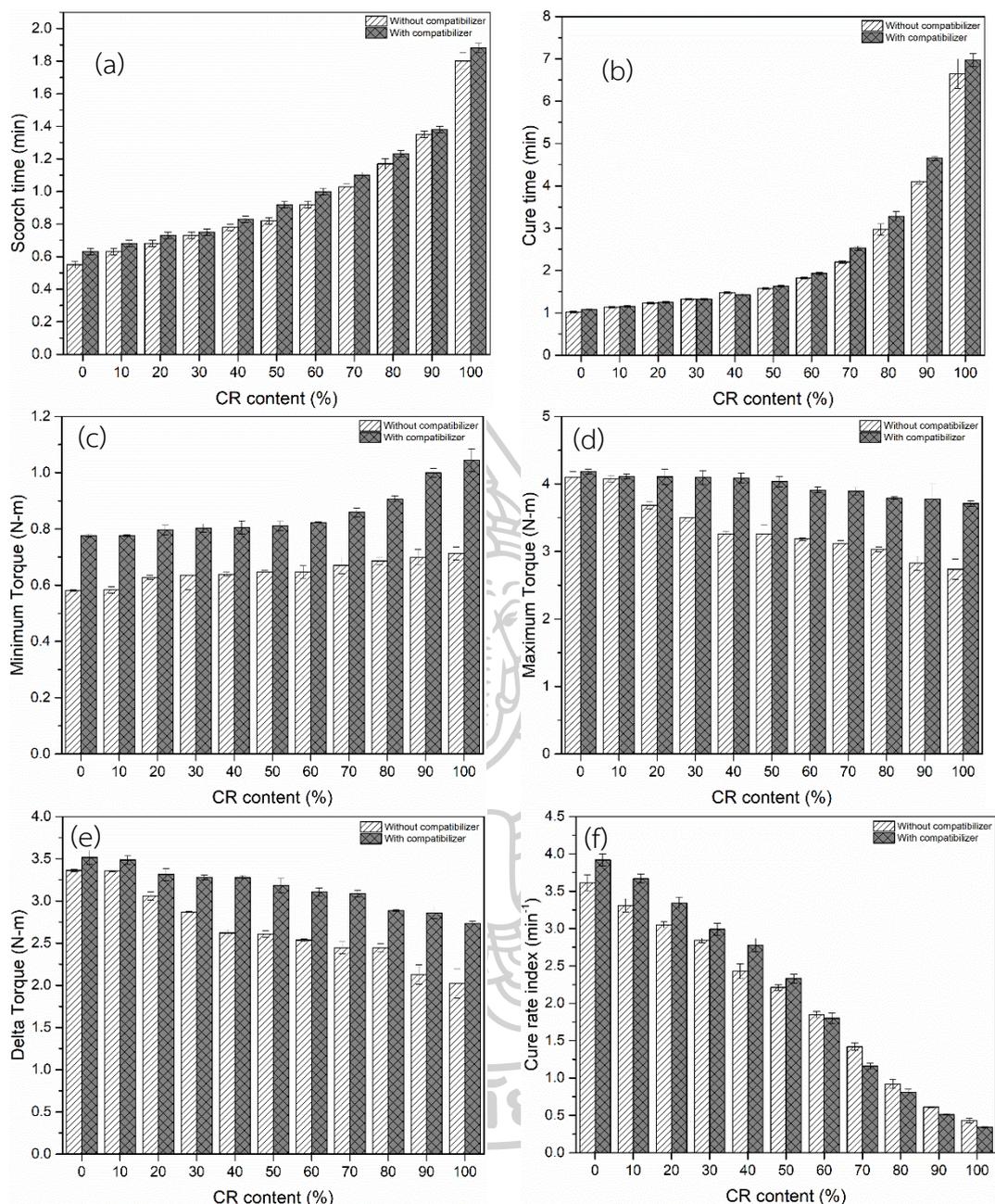
สำหรับยางคอมปาวด์ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA นั้น เมื่อทดสอบยางคอมปาวด์ด้วยเทคนิค MDR จะได้กราฟ cure characteristic curves แสดงในรูปที่ 4.27 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ ก.9 จากนั้นผู้วิจัยได้นำมาจัดทำเป็นกราฟแท่ง แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์กับยางผสมที่ไม่ได้เติม compatibilizer โดย c ที่อยู่ด้านหน้าหมายถึงมีการเติม compatibilizers







รูปที่ 4.27 Cure characteristic curves ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่อัตราส่วนผสม (a) 100/0, (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, (f) 50/50, (g) 40/60, (h) 30/70, (i) 20/80, (j) 10/90 และ (k) 0/100 ที่มีการเติม IR-g-MA และ nano silica



รูปที่ 4.28 (a) Scorch time, (b) Cure time, (c) Minimum torque, (d) Maximum torque, (e) delta torque และ (f) cure rate index ของยางคอมปาวด์ NR/CR ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA

**Scorch time:** ดังแสดงในตารางที่ ก.9 และรูปที่ 4.28 (a) แสดง  $ts_2$  ของยางผสม พิจารณายาง cN100C0 ปรากฏค่าของ  $ts_2$  ที่เร็วที่สุด ขณะที่ยาง cNOC100 มีค่า  $ts_2$  นานที่สุด ด้วยเหตุผลที่กล่าวแล้วในตอนต้นของงานวิจัยนี้ เมื่อมีการเติม IR-g-MA และ nano silica พบว่าค่า  $ts_2$  ใช้เวลานานขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งยาง cNOC100 ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA เกิด scorch ข้ำ

ลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเติมนาโนซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือไฮเลนอล (-OH) ที่ผิวของอนุภาคในปริมาณมาก พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขั้วซิลิกาจะดูดซับสารเคมีต่าง ๆ ให้มาเกาะบนผิว ทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยา vulcanization เวลาในเกิด scorch จึงนานขึ้น [57-59] แม้จะมีการเติม IR-g-MA ซึ่งยางชนิดนี้ จะทำให้วัสดุภาคยาง NR และยาง CR สามารถเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งจะกล่าวในตอนการศึกษาขั้นพื้นฐานต่อไป สำหรับกรณี ยางผสม NR/CR ที่มียาง CR 10-90 % nano silica จะมีอิทธิพลต่อการเริ่มเกิด vulcanization เช่นกัน อย่างไรก็ตาม การเติม IR-g-MA ทำให้วัสดุภาคยาง CR มีการกระจายตัวได้ดีขึ้นในวัสดุภาคยาง NR ทำให้สารเคมีเกิดการกระจายตัวได้ดี ทำให้เวลาในการสกอรัชยาวนานกว่าเดิมเพียงเล็กน้อย

**Cure time:** พารามิเตอร์ cure time ที่ได้จากการทดสอบ MDR แสดงในตารางที่ ก.9 และรูปที่ 4.28 (b) พบว่ายาง cN100C0 ปรากฏค่า  $t_{c90}$  เร็วกว่ายาง cN0C100 ซึ่งเป็นผลมาจากความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ของ NR ที่ดีกว่ายาง CR ดังได้กล่าวแล้วในตอนต้น และการมียาง CR ผสมใน NR จะปรากฏค่า  $t_{c90}$  ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณยาง CR ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับอิทธิพลของการมี nano silica และ IR-g-MA เกิด scorch ใน NR/CR นั้น จะทำให้  $t_{c90}$  นานขึ้นเนื่องจากความเป็นขั้วบนผิว nano silica จะทำให้เกิดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยา vulcanization จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้า [31, 52] นอกจากนี้การมีอยู่ของ IR-g-MA ทำให้วัสดุภาคของ CR เกิดการกระจายตัวได้ดี มีพื้นผิวสัมผัสกับสารเคมีมากขึ้น จึงเกิดการปฏิกิริยา vulcanization ได้มากขึ้นจึงเห็นได้ว่าอิทธิพลของ nano silica ถูกชดเชยจากการกระจายตัวของวัสดุภาคของยางที่ดีขึ้นจากการเติม IR-g-MA

**Minimum Torque (ML):** ตารางที่ ก.9 และรูปที่ 4.28 (c) แสดงค่าแรงบิดต่ำที่สุด ซึ่งค่านี้สะท้อนความสามารถในการไหลของยางขณะหลอมตัว จากผลการทดลองจะเห็นว่ายาง cN100C0 ปรากฏค่า ML ต่ำที่สุด ขณะที่ cN0C100 มีค่า ML สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของยาง CR ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนก่อนหน้า สำหรับยางผสม NR/CR ที่มีเปอร์เซ็นต์ของยาง CR เพิ่มขึ้นจะพบว่ายางผสมมีค่า ML เพิ่มขึ้น ตามปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้น และจะปรากฏอีกว่าค่า ML ของยางผสมที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทำให้ ML ของยางผสมเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนของยาง CR ที่เพิ่มขึ้น

พิจารณากรณีที่ยางผสมมี nano silica จะทำให้ ML เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากบนผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือไฮเลนอล (-OH) อยู่บนผิวในปริมาณมากทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันและต้านการไหลของยาง อีกประการหนึ่งการมีวัสดุภาคของ IR-g-MA ทำให้ยาง CR เกิดการกระจาย

ตัวดี ทำให้ขัดขวางการไหลของยาง NR ML ในระบบที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA จึงสูงกว่าระบบที่ไม่เติม นอกจากนั้นยังพบว่ายางผสมที่มีปริมาณยาง CR 70-90 % และมีการเติม nano silica และ IR-g-MA มี ML สูงกว่า ยางผสมสูตรเดียวกันที่ไม่เติม nano silica และ IR-g-MA ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของยาง CR มีการกระจายตัวที่ดีมากขึ้น

**Maximum Torque (MH):** ผลการทดสอบ MH ของ NR/CR แสดงในตารางที่ ก.9 และรูปที่ 4.28 (d) ซึ่งค่านี้สะท้อนถึง extent of vulcanization และ crosslink density [46, 47] จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ายาง cN100C0 มีค่า MH สูงที่สุด และยาง cN0C100 มีค่า MH ต่ำที่สุด และเมื่อมีการผสมยาง CR ลงในยาง NR ที่ปริมาณ 10-90% ค่า MH ลดลง ตามปริมาณของยาง CR ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับในตอนก่อนหน้านี ซึ่งเหตุผลมาจากการละลายของสารเคมี และความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ที่ต่างกันของยาง 2 ประเภทนี้

ยางผสม NR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ซึ่งเขียนสัญลักษณ์ว่า cNR/CR จากการทดสอบ MDR ของยางคอมปาวด์พบว่า MH จะมีค่าเพิ่มขึ้น กรณี NR/CR ที่มีปริมาณของยาง CR สูงขึ้น ค่า MH จะสูงขึ้น และจะสูงขึ้นมากเมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มจาก 20-90 % ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ยาง CR มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นมากในยาง NR ด้วย แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีอนุภาค nano silica และ IR-g-MA ในยางผสม

**Delta Torque (DT):** ผลต่างระหว่าง MH กับ ML คือค่า delta torque ซึ่งแสดงถึง crosslink density และสะท้อนถึง modulus ของยาง vulcanizate [47] ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.9 และรูปที่ 4.28 (e) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ายาง cN100C0 มีค่า DT สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่ายาง cN100C0 มีปริมาณการเกิด crosslink มากที่สุด และยาง cN0C100 มีค่า DT ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณ crosslink ที่เกิดน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ของวัลคาไคยาง NR นั้นเอง เมื่อพิจารณาของผสมที่มีปริมาณยาง CR ที่เพิ่มขึ้น DT มีค่าลดลงไปตามปริมาณยาง CR ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาในวัลคาไคยาง CR ที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่ายาง NR

สำหรับยางผสม NR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA นั้นจะมีค่า delta torque ที่สูงกว่าระบบที่ไม่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ซึ่งเป็นผลมาจากการมีสารทั้ง 2 ชนิด ทำให้ยางเกิดการกระจายตัวมากขึ้น การกระจายตัวที่ดีขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ทำให้ปฏิกิริยา vulcanization จะเกิดได้ดีขึ้น อนึ่ง จะต้องคำนึงถึงด้วยว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความต่างแรงบิด

ดังกล่าว การมีส่วนร่วมของแรงบิดที่สูงขึ้นของ nano silica นั้น ได้ถูกตัดออกไปจากการลบกัณ (MH-ML) เรียบร้อยแล้วดังนั้น ค่า DT จึงสะท้อนให้เห็น crosslink ที่เพิ่มขึ้น อย่างแท้จริง

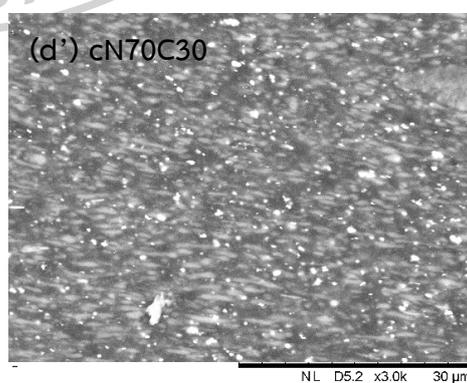
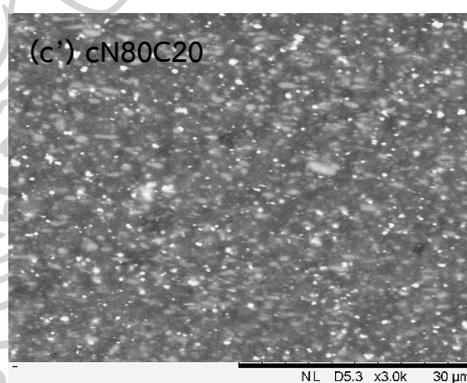
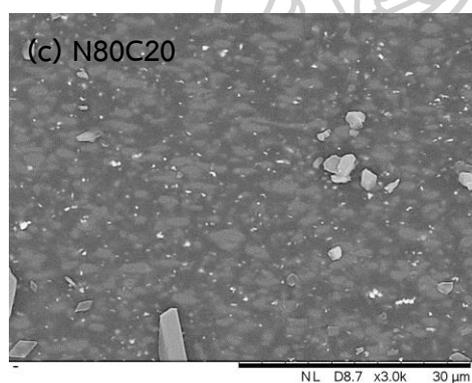
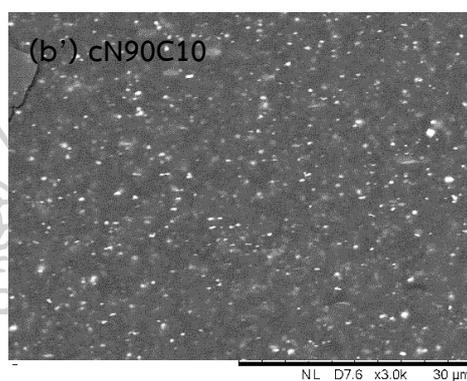
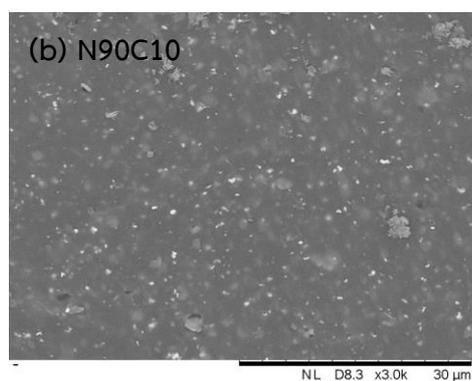
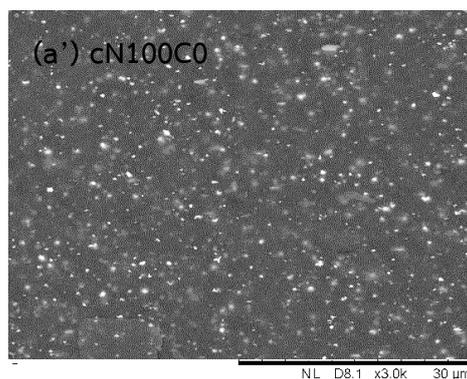
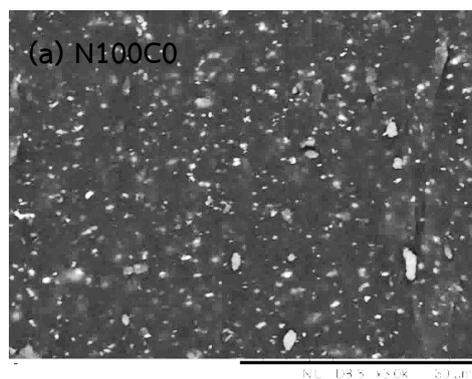
**Cure rate index (CRI):** ค่าดัชนีอัตราการ cure ผลการทดสอบนี้ ดังแสดงในตารางที่ ก.9 และรูปที่ 4.28 (f) จากผลการทดลองพบว่ายาง cN100C0 มีค่า CRI สูงที่สุด และยาง cN0C100 มีค่า CRI ต่ำที่สุด สำหรับยางผสม เมื่อยางผสมมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นค่า CRI จะลดลง

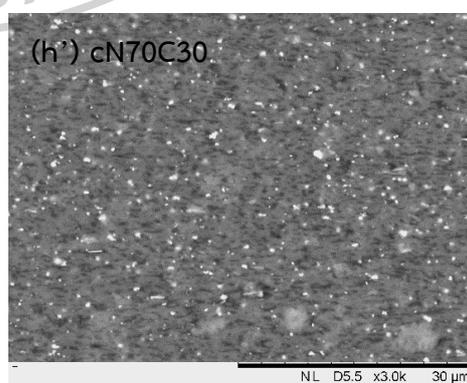
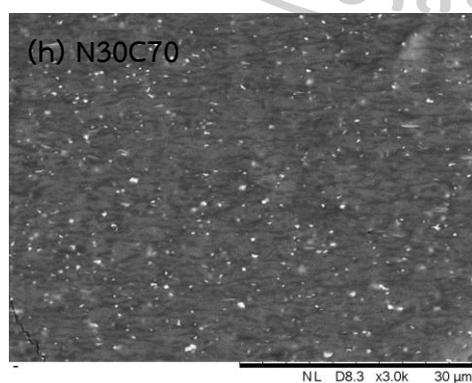
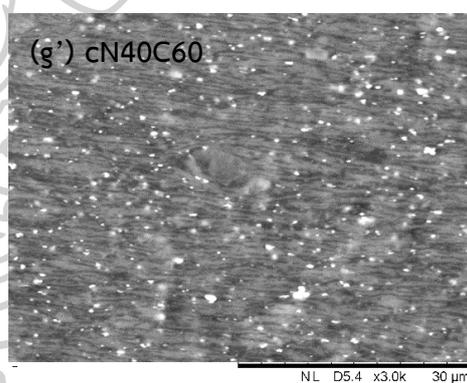
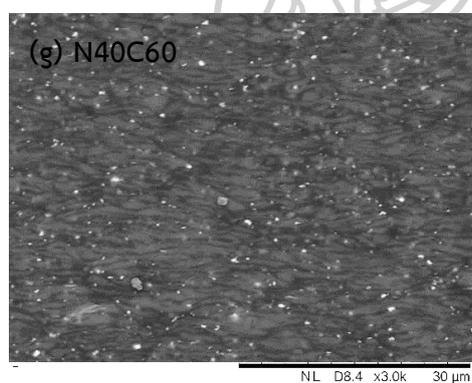
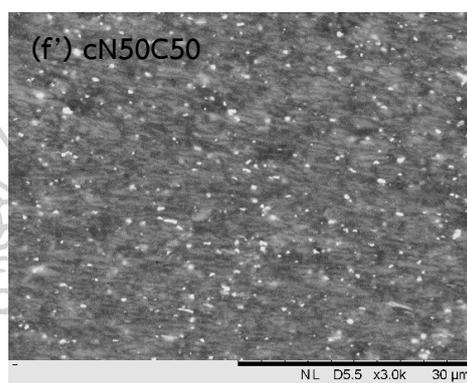
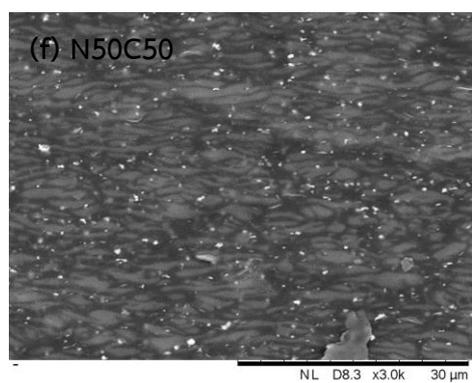
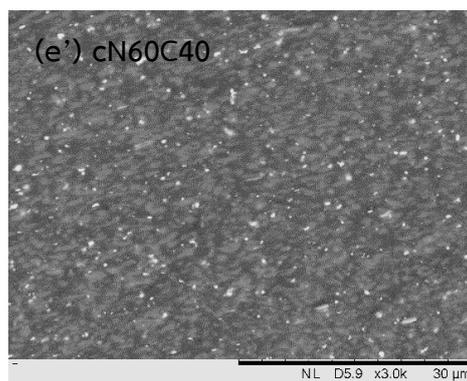
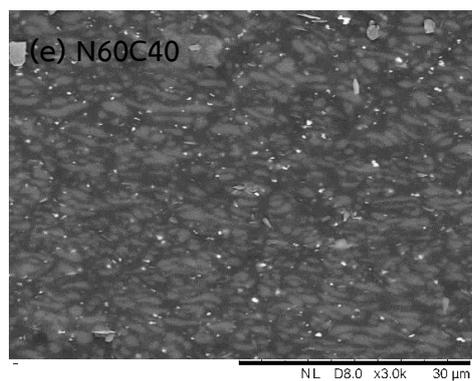
เมื่อมีการเติม nano silica และ IR-g-MA ลงในยาง NR/CR กรณียางผสมที่มีปริมาณยาง CR 0-50 % ค่า CRI จะสูงกว่า ยาง NR/CR ที่ไม่ได้เติม nano silica และ IR-g-MA ในกรณีนี้ เป็นผลจากการที่การมี nano silica ทำให้เกิดการ shear สูงขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสของยาง CR จะเพิ่มมากขึ้นทำให้ยาง CR เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น

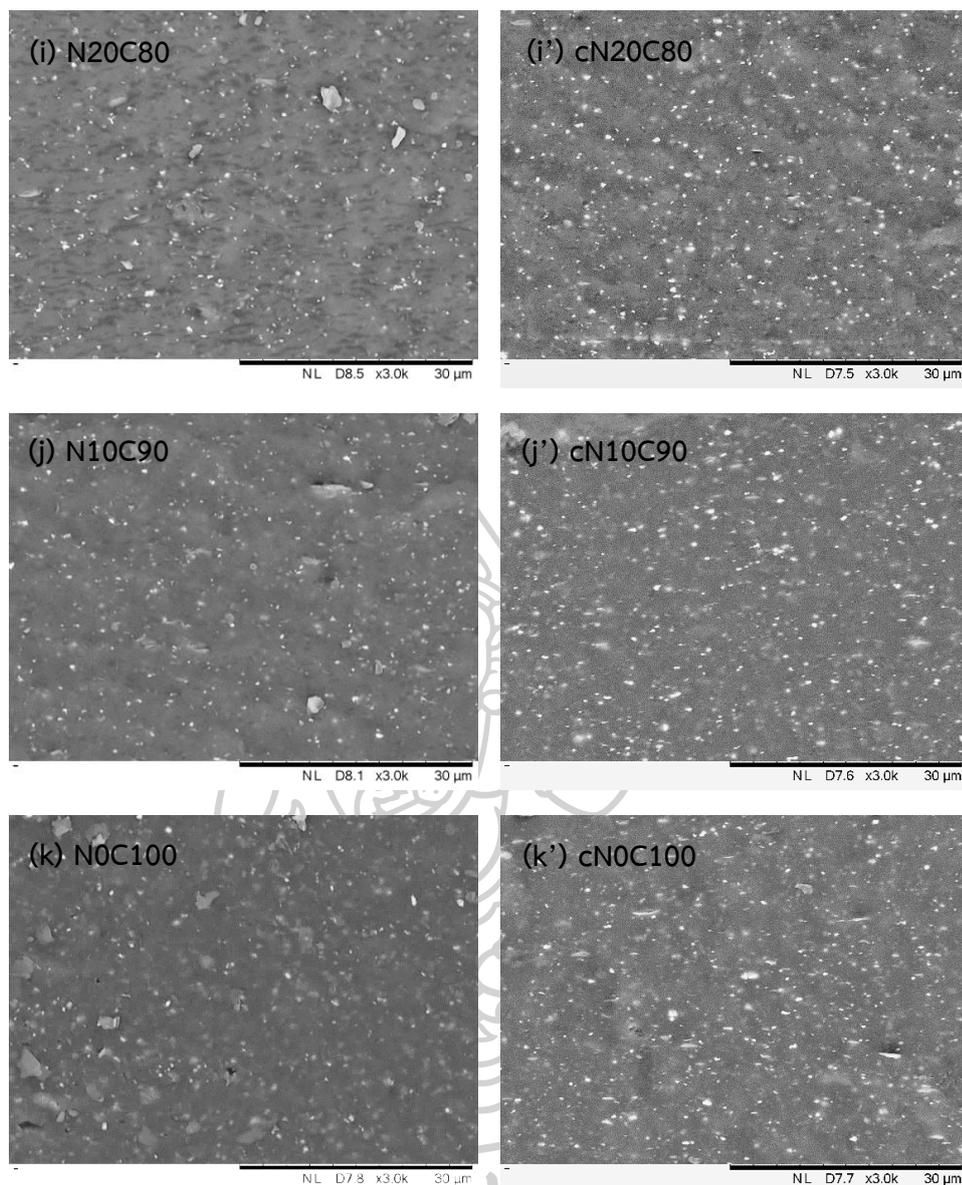
ที่อัตราส่วนยาง CR เพิ่มขึ้นกล่าวคือ 60-100 % จะพบว่าค่า CRI ของยางผสมที่เติม nano silica และ IR-g-MA มีค่าต่ำกว่ายาง NR/CR ที่ไม่ได้เติม nano silica และ IR-g-MA ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ที่ช้าลงของยาง CR และอิทธิพลของ nano silica จะหน่วงทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้า เนื่องจากการดูดซับสารเคมีไว้ แต่การที่มี IR-g-MA ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างวัฏภาค NR กับวัฏภาค CR ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงเกิดความสมดุลทำให้เห็นการลดลงของ CRI เพียงเล็กน้อย อนึ่ง ในระบบนี้ สภาวะการผสม จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ผู้วิจัยไม่ได้ติดตามศึกษาปัจจัยดังกล่าวในงานวิจัยนี้

#### 4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมนั้น เทคนิค SEM เป็นเทคนิคที่ได้นำมาใช้ในการศึกษาของผสม NR/CR โดยศึกษาผิวหน้าที่แตกหักในสภาวะเย็นยิ่งยวด โดยผิวหน้าของตัวอย่างยางผสมที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA เปรียบเทียบกับที่ไม่ได้เติม nano silica และ IR-g-MA แสดงดังรูปที่ 4.29 (a)-(k) และ (a')-(k')







รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีปริมาณยาง CR 0-100 % ไม่มี (ไม่มีเครื่องหมาย ') และมี (มีเครื่องหมาย ') การเติม nano silica และ IR-g-MA

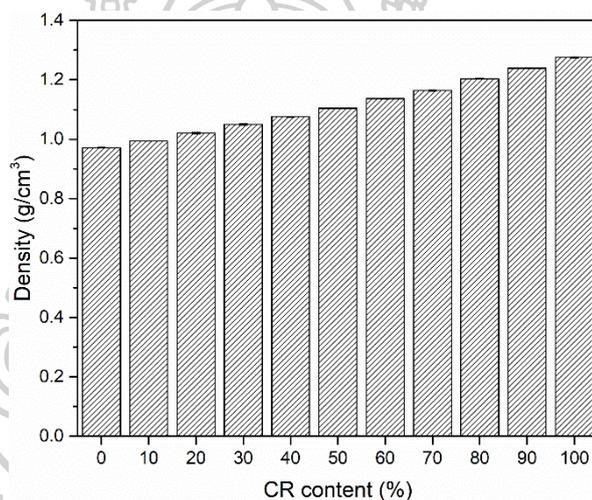
จากรูปที่ 4.29 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/CR ที่ vulcanizate แล้ว และมีปริมาณยาง CR 0-100% ที่ไม่เติม และเติม nano silica และ IR-g-MA จากผลการทดลองปรากฏว่า ยาง cN100C0 และ cN0C100 มีลักษณะเป็นผิวยาวเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน อาจเห็นอนุภาคของ ZnO และ nano silica ที่เกาะกลุ่มกันอยู่บ้าง และเมื่อพิจารณาที่ยางผสม NR/CR ที่มีการเติมยาง CR 10-90% จะเห็นการแยกวัฏภาค เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วที่ต่างกันของยางทั้ง 2 ชนิด เมื่อมีการผสม nano silica และ IR-g-MA ลงยาง NR/CR ซึ่งใช้สัญลักษณ์ cNR/CR จะพบว่าวัฏภาคของ



ยาง CR จะถูกทำให้เล็กลง (สังเกตจากอนุภาคสว่าง) เนื่องจากการผสม nano silica ทำให้มีแรงเฉือนสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่า ML ที่สูงขึ้น นอกจากนั้นการมี IR-g-MA จะช่วยทำให้วัฏภาคของยาง CR สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง CR กับยาง NR ได้ดีขึ้น ด้วยความช่วยเหลือของ IR-g-MA สำหรับ NR/CR ที่มีปริมาณ ยาง CR ตั้งแต่ 60 % ขึ้นไป วัฏภาคยาง CR จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติด้านอื่นต่อไป

#### 4.3.3 ความหนาแน่นโดยรวมของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาความหนาแน่นของยางด้วยการชั่งน้ำหนักในอากาศ และในน้ำ โดยผลการทดสอบความหนาแน่นของยางผสมแสดงในรูปที่ 4.30

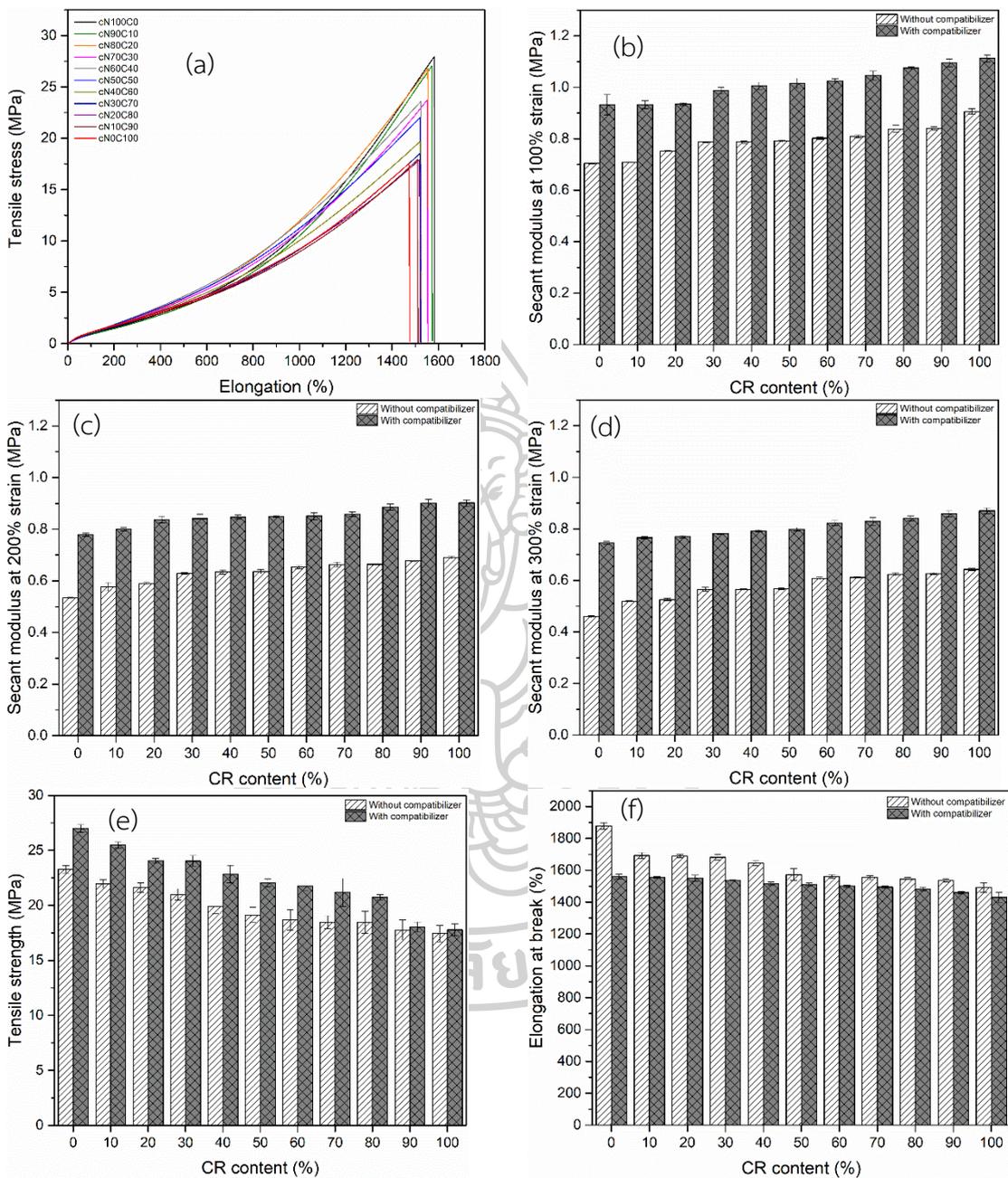


รูปที่ 4.30 ค่าความหนาแน่นของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

โดยปกติยาง NR มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  และยาง CR มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $1.23 \text{ g/cm}^3$  จากผลการศึกษาความหนาแน่น (Density) ของยางผสม NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ในรูปที่ 4.30 พบว่าค่าความหนาแน่นของ NR/CR เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง CR มีความหนาแน่นสูงกว่ายาง NR ด้วยเหตุจากการที่ยาง CR มีมวลของหนึ่งหน่วยซ้ำเท่ากับ  $88.5 \text{ g/mol}$  สำหรับยาง NR มีมวลหน่วยซ้ำเท่ากับ  $54 \text{ g/mol}$  CR จึงมีน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่ายาง NR อีกประการหนึ่ง การที่ยาง CR มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลสูง ทำให้โครงสร้างของยาง แน่นขึ้น จึงส่งผลต่อความหนาแน่นด้วยเช่นกัน

4.3.4 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano

silica และ IR-g-MA



รูปที่ 4.31 (a) Stress-strain curve, (b)-(d) Secant modulus, (e) Tensile strength และ (f) Elongation at break ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-

MA

ผลการศึกษาอิทธิพลของ nano silica และ IR-g-MA ต่อสมบัติการดึงยึดของ NR/CR vulcanizate ที่มี ปริมาณยาง CR 0-100 % แสดงดังรูปที่ 4.31 (a) โดย secant modulus, tensile strength และ elongation at break แสดงดังรูปที่ 4.31 (b)-(f)

จาก Stress-Strain curves ของยางผสม NR/CR vulcanizate ที่มียาง CR ปริมาณ 0-100 % และมีการเติม nano silica และ IR-g-MA แสดงในรูปที่ 4.31 (a) จากกราฟ จะเห็นว่าความสามารถในการเกิด Stress induced crystallization ของยางผสม ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ไม่ว่าจะเป็ น N100C0 หรือ N0C100 และยางผสมที่มียาง CR 10-90 % ทุกส่วนผสม ยังสามารถยึดตัวไปได้มากกว่าหรือเท่ากับ 1400 % ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของทั้งยาง NR และยาง CR [29]

**Secant modulus:** ของยาง NR/CR จากกราฟรูปที่ 4.31 (b) จะพบว่าค่า secant modulus ของยาง cN100C0 ซึ่งเป็นยาง N100C0 ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA มีค่าสูงกว่ายาง N100C0 โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 MPa เช่นเดียวกับงานวิจัยของ C. Kaewna [22] ที่พบว่าเมื่อเติม nano silica แล้วมีผลทำให้ค่า secant modulus ของยางเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของ nano silica มีความแกร่งมากกว่ายาง จึงเป็นการเสริมแรงให้กับยาง สำหรับกรณีของ cN0C100 พบว่าค่า secant modulus สูงกว่า N0C100 ประมาณ 0.2 MPa เช่นกัน จากค่าผลต่างของ secant modulus ที่เพิ่มในขนาดเท่า ๆ กันนี้ แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของ nano silica และ IR-g-MA ที่เติมในปริมาณเท่ากันนี้ทำให้ secant modulus นั้นเพิ่มขึ้นเท่า ๆ กันในทุกอัตราส่วนการมีอยู่ของ nano silica และ IR-g-MA นั้น จะมีผลต่อ crosslink ในระดับที่น้อยกว่า อิทธิพลจากการเสริมแรง

พิจารณายางผสม NR/CR ที่มีปริมาณยาง CR 10-90 % จะพบว่า secant modulus มีค่าเพิ่มขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เติม nano silica และ IR-g-MA เช่นกัน สำหรับระบบผสมแล้ว โดยทั่วไปลักษณะสัณฐานของการกระจายตัวของวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม จะมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม จากภาพถ่าย SEM ที่แสดงในรูปที่ 4.29 จะพบว่า เมื่อมีการเติม nano silica และ IR-g-MA ในยางผสม จะมีการกระจายของวัฏภาคยาง CR ใน NR ดีขึ้นมาก ดังจะเห็นในรูปที่ 4.29 (h')-(j') ซึ่งจะมีผลต่อค่า secant modulus ให้เพิ่มขึ้นกว่าระดับที่ควรจะเป็นเล็กน้อย

**ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength):** แสดงในรูปที่ 4.31 (c) พบว่ายาง CR มีค่า Tensile strength ต่ำกว่ายาง NR เนื่องจากเป็นยาง NR มีโครงสร้างเป็นแบบ Isoprene base ทำให้สามารถเกิดปรากฏการณ์ Strain hardening ได้มากกว่ายาง CR ส่วนยางผสม NR/CR มีค่า Tensile strength ลดลงตามอัตราส่วนของยาง CR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง NR สามารถจัดเรียงโมเลกุลไปตาม

แนวแรงดึง เกิดพฤติกรรมแบบ Stress-induced crystallization จึงช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยางขณะดึงยืด ทำให้มีความสามารถในการทนทานแรงดึงมากขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น

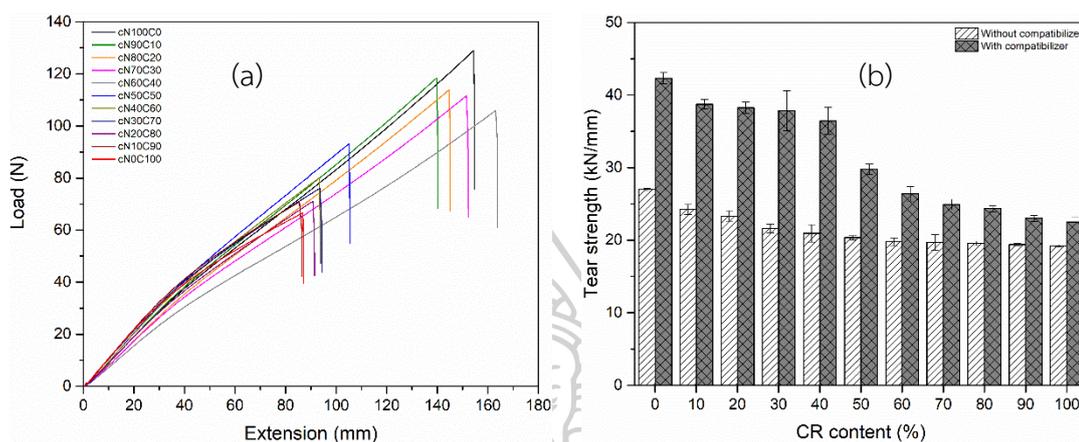
เมื่อมีการเติม nano silica และ IR-g-MA ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เติม nano silica และ IR-g-MA แสดงได้ว่าการเติม nano silica และ IR-g-MA ทำให้ยาง CR สามารถกระจายตัวในยาง NR ได้มากขึ้น พิจารณากรณีที่ยาง CR ปริมาณ 0-30 % อนุภาคของยาง CR เกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคที่เล็กลง เมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น 40-90 % อนุภาคของยาง CR เล็กลง และเริ่มยืดออกเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ขณะที่ปริมาณยาง CR 90 % วัฏภาคของยาง NR ถูกปิดบังไปด้วย CR ซึ่งทำให้ความแตกต่างระหว่าง tensile strength ของ NR/CR ที่เติมและไม่เติม nano silica และ IR-g-MA ไม่ได้ต่างกันมากนัก

**ความสามารถในการยืดตัว (Elongation at break):** เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.31 (d) จะเห็นได้ว่าในกรณี cN100C0 การมีอยู่ของอนุภาค nano silica ส่งผลต่อความสามารถในการยืดตัวของยางอย่างมาก โดย nano silica จะไปขัดขวางการยืดตัวของยาง NR ทำให้ elongation at break ลดลง เนื่องจากขณะดึงยืดเกิด void ระหว่างวัฏภาคยางกับ nano silica อย่างไรก็ตาม เมื่อมีปริมาณของ CR อยู่ใน NR 10-40 % elongation at break ของยางผสมมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาค แต่การเติม nano silica และ IR-g-MA ประกอบกับการกระจายตัวของยาง CR และการเกิด crosslink ของยางผสมที่มากขึ้น ทำให้การลดลงของ elongation at break เทียบกับยางผสมที่ไม่ได้เติม nano silica และ IR-g-MA ไม่มาก เมื่อเทียบกับ secant modulus และ tensile strength ละ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยางผสมที่มีปริมาณยาง CR 50 % ขึ้นไป จะพบว่ายางผสมที่มี nano silica และ IR-g-MA มีการลดลงของ elongation at break เพียงเล็กน้อยหรือ ระดับของการลดลง ไม่ต่างจาก N0C100

#### 4.3.5 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

ในการทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด ขึ้นทดสอบจะมีรูปทรงแบบ C (Die C) ซึ่งขณะทดสอบจะต้องใช้แรงดึง จนบริเวณตรงกลางตัวอย่างเกิดการ crack ซึ่งเนื้อยางจะเปิดออก และแรงกระทำที่ทำต่อขึ้นทดสอบจะลดลง และค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ขณะที่ขึ้นทดสอบเกิดการแผ่ขยายของรอยฉีกขาด ซึ่งกราฟที่ได้จากการทดสอบ เป็นกราฟระหว่าง Force และ displacement ดังนั้น tear strength คือแรงสูงสุดที่ตัวอย่างทดสอบต้องการก่อนเกิดการฉีกขาด จากกลไกที่กล่าวมาหากยางใด

ๆ มี tensile strength สูง จะมีความสามารถในการต้านทานการฉีกขาดที่ดี นอกจากนั้นแล้ว ในบางชนิดหนึ่ง ๆ crosslink density มีผลต่อ tear strength เช่นกัน [46] สำหรับยางผสม สันฐานวิทยาของยางผสมจะมีผลต่อ tear strength ด้วยเช่นกัน ผลการทดสอบ tear resistance ของยางผสม NR/CR ได้มาเป็นค่า tear strength ซึ่งผลการทดสอบแสดงดัง รูปที่ 4.32 (a) และ (b)



รูปที่ 4.32 Load-Extension curve (a) และ Tear strength (b) ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติมและไม่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

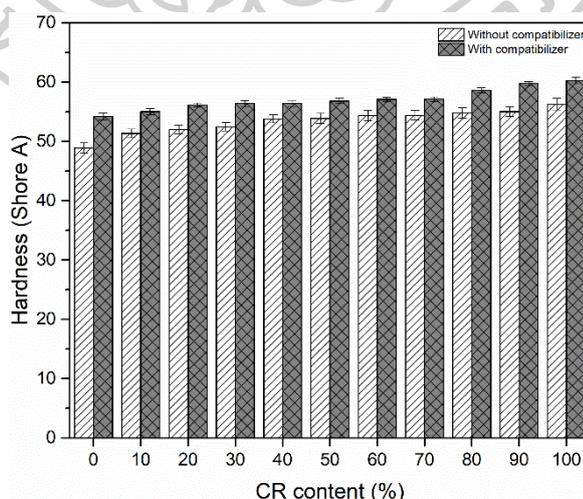
จากรูปที่ 4.32 (a) และ (b) แสดงกราฟระหว่าง Load และ extension ในการดึงตัวอย่างทดสอบจนเกิดการฉีกขาด และค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยาง NR/CR เปรียบเทียบระหว่าง NR/CR ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่ายาง NR มีค่า Tear Strength สูงกว่ายาง CR หรือเกิดการยืดตัวได้มากกว่า เนื่องจากยาง NR สามารถจัดเรียงโมเลกุลไปตามแนวแรงดึง เกิดพฤติกรรมแบบ Stress-induced crystallization จึงช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยางเมื่อถูกดึงยืด และทำให้มีความสามารถในการทนทานต่อการฉีกขาดได้สูง สำหรับยาง CR ก็สามารถจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงดึงได้ และสามารถเกิด Stress induced crystallization ได้เช่นกัน แต่น้อยกว่ายาง NR ซึ่งเป็นผลมาจากการมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง ทำให้มีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR หากพิจารณาความแตกต่างของ tear strength ของยาง CR จะต่ำกว่ายาง NR ประมาณ 10 kN/mm พิจารณายางผสม NR/CR พบว่ามีค่า Tear Strength ลดลงเมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเติม nano silica และ IR-g-MA จะพบว่า tear strength มีค่าสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง cN100C0 มีค่า tear strength เพิ่มขึ้นมากกว่า 40 kN/mm ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลจากการที่ยางผสมมีปริมาณการเกิด crosslink ที่สูงขึ้น (crosslink density) และมี tensile strength ที่สูงขึ้น ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า การมี nano silica และ IR-g-MA โดย nano silica ทำให้ยางมีความต้านทานต่อการดึงยืดเพิ่มมากขึ้น

ยิ่งระบบยางผสมที่มี IR-g-MA สามารถทำให้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเกิดได้ดี [57] และทำให้ tear strength เพิ่มสูงขึ้นจาก กรณีที่ไม่ได้เติม nano silica และ IR-g-MA

กรณีที่เป็น NR/CR เมื่อมีการเพิ่มยาง CR เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างยาง NR กับยาง CR แต่เมื่อมีการเติม nano silica และ IR-g-MA วัฏภาคยาง CR เกิดการกระจายตัวในยาง NR ได้มากขึ้น (ภาพ SEM ในตอนที่ 4.3.2) และมีการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ที่มากขึ้นจึงทำให้ tear strength เพิ่มขึ้น หากพิจารณาปริมาณยาง CR 10-40 % การเติม nano silica และ IR-g-MA ทำให้ยาง CR มีขนาดอนุภาคเล็ก และมีการกระจายตัวที่ดี จึงส่งผลให้ tear strength สูงขึ้นมาก แต่อยู่ในระดับ ประมาณ 20 kN/mm แต่เมื่อมีปริมาณยาง CR 50 % ขึ้นไป ยาง CR มีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบต่อเนื่องร่วมกัน และยังมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นกล่าวคือ 60-90 % ยาง CR จะมีสัณฐานวิทยาเป็นวัฏภาคหลัก ดังนั้นยางผสมจึงมี tear strength ลดลง สำหรับยาง N0C100 ที่มี nano silica และ IR-g-MA ผสมอยู่ทำให้เกิดปฏิกิริยา vulcanization ที่เพิ่มขึ้น tear strength จึงเพิ่มขึ้น

#### 4.3.6 สมบัติความแข็งของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

สมบัติความแข็งของยางขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนก่อนหน้านี้นว่า ยาง CR มีความแข็งมากกว่ายาง NR เนื่องจากโครงสร้างของยาง CR ที่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล นอกจากนั้น crosslink density ในยางทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นด้วย [46] ผลการทดสอบความแข็งของยาง NR/CR ที่ไม่มี และมีการเติม nano silica และ IR-g-MA แสดงดังรูปที่ 4.33



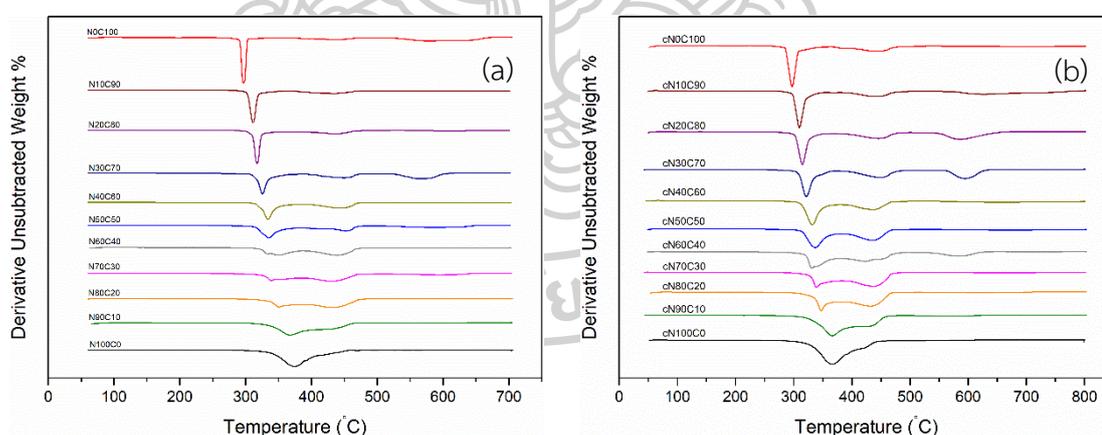
รูปที่ 4.33 ค่า Hardness (Shore A) ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA

จากรูปที่ 4.33 พบว่าค่าความแข็ง (Hardness (Shore A)) ของยาง N100C0 มีค่าต่ำที่สุด ขณะที่ความแข็งของยาง NOC100 มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากยาง CR มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสูง ดังที่กล่าวไว้แล้วในหลายตอนก่อนหน้านี้ กรณียาง cN100C0 มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ค่าความแข็งของยางดังกล่าวเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการมี nano silica อยู่ในยาง และการที่มี IR-g-MA ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่าง NR กับ nano silica ที่ดีขึ้น เช่นเดียวกับกรณี cNOC100

สำหรับยาง NR/CR ที่มีปริมาณยาง CR ต่างๆ และมีการเติม nano silica และ IR-g-MA ค่าความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมยาง CR และการเติม nano silica และ IR-g-MA และจะสังเกตได้ว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นมีค่าเท่า ๆ กัน ซึ่งแสดงให้เห็นโดยนัยว่าความแข็งของตัวอย่างทดสอบ เป็นผลมาจากการเติม nano silica และ IR-g-MA

#### 4.3.7 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

ผลการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของยางผสม NR/CR ด้วยเทคนิค TGA โดยเปรียบเทียบ กราฟ DTG ของ NR/CR ที่ไม่มีและ มี nano silica และ IR-g-MA ผลการทดสอบแสดง ดังรูปที่ 4.34 (a) และ (b) ตามลำดับ รวมถึงพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.34 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate DTG curves ของ NR/CR vulcanizate (a) ที่ไม่เติม และ (b) ที่เติม nano silica และ IR-g-MA

ผลการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ซึ่งในตอนนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะ DTG ของยางผสม ที่ไม่มีการเติม และเติม nano silica และ IR-g-MA เปรียบเทียบกัน ในรูป 4.34 (a) และ 4.34 (b) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นขั้นตอนการสลายตัวของยาง NR/CR ที่ปรากฏเช่นเดียวกับในตอนก่อนหน้านี้ ทั้ง

ใน N100C0, NOC100 และยางผสมสูตรอื่น ๆ หากพิจารณาเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ TGA ในตารางที่ 4.4 จะพบว่าอุณหภูมิ  $T_{onset}$ ,  $T_{dmax}$  และ  $T_{endset}$  มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ

อนึ่ง IR-g-MA ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของเหลวหนืด แสดงว่าเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่ายาง NR และยาง CR อีกทั้งการสลายตัวของ IR-g-MA นี้จะเหนี่ยวนำให้ยาง NR สลายตัวได้เร็วขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเติมลงในยาง NR/CR จึงทำให้ยางมี  $T_{onset}$  ต่ำลง แต่สำหรับกรณี ยาง NR/CR ที่มีปริมาณของ CR สูง กล่าวคือ 70% ขึ้นไป การเติม nano silica และ IR-g-MA ทำให้วัฏภาคของ CR มีความต่อเนื่องและเป็นวัฏภาคหลัก (ภาพ SEM รูปที่ 4.29) จึงทำให้ อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดขั้นที่ 2 ( $T_{dmax2}$ ) ซึ่งเป็นการสลายตัวของยาง CR ปรากฏที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการมีอยู่ของอนุภาค nano silica ซึ่งซิลิกาจะดูดซับความร้อนไว้ในตัว ทำให้ยางบริเวณรอบข้างได้รับความร้อนช้าลง จึงมีผลให้อุณหภูมิการสลายตัวในขั้นนี้สูงขึ้นเล็กน้อย [60] สำหรับอิทธิพลของ IR-g-MA ในระดับอุณหภูมินี้ น่าจะหมดไปเนื่องจาก อุณหภูมิสลายตัวสุดท้ายของ IR-g-MA อยู่ที่ 200-300 °C [61]



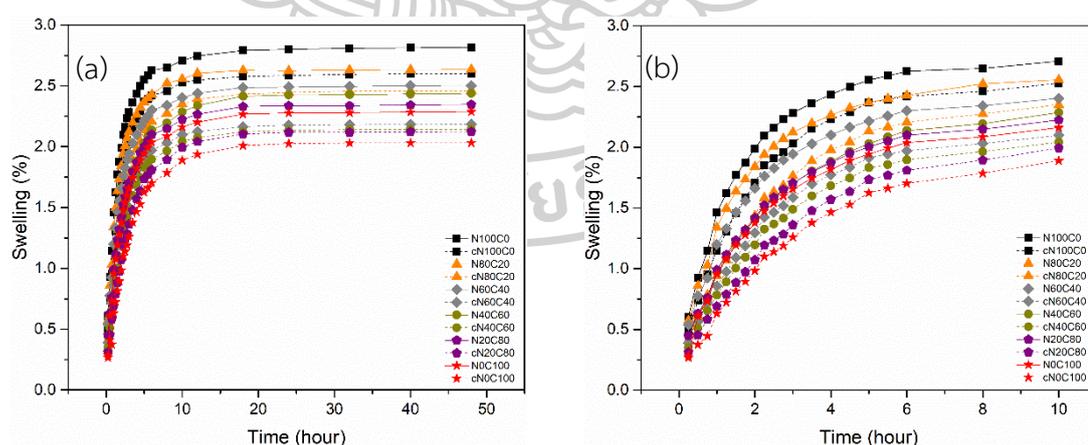


ตารางที่ 4.4  $T_{onset}$ ,  $T_{dmax}$  และ  $T_{endset}$  จากผลการทดสอบ TGA ของยาง NR/CR vulcanizate ที่เติมและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA

CR content	$T_{onset1}$ (°C)		$T_{dmax1}$ (°C)		$T_{endset1}$ (°C)		$T_{onset2}$ (°C)		$T_{dmax2}$ (°C)		$T_{endset2}$ (°C)	
	ไม่	มี	ไม่	มี	ไม่	มี	ไม่	มี	ไม่	มี	ไม่	มี
0	339.43	329.35	374.36	366.81	410.05	418.29	-	-	-	-	-	-
10	336.04	344.65	367.67	365.68	463.70	395.22	448.73	444.99	465.42	461.16	490.11	486.40
20	339.71	336.73	351.47	347.86	374.34	362.37	398.29	392.85	434.83	434.27	466.13	459.29
30	329.23	331.30	340.17	340.59	366.04	351.27	395.23	396.59	433.41	439.13	464.82	463.17
40	323.08	320.87	349.50	334.31	376.87	366.05	400.46	387.90	439.66	424.22	465.25	467.96
50	315.06	316.75	334.87	337.08	355.78	358.71	420.05	395.85	469.97	436.93	452.39	461.53
60	318.07	314.67	334.05	348.41	350.48	331.76	400.76	395.19	444.71	437.56	467.60	463.14
70	311.82	310.84	325.57	333.94	339.99	322.14	398.85	397.79	448.74	449.88	471.90	473.14
80	306.09	302.88	317.34	314.63	328.14	327.15	395.32	393.65	437.08	446.60	463.69	473.41
90	299.99	298.34	311.33	309.67	322.10	322.04	379.84	394.39	434.00	442.13	468.28	472.96
100	293.04	285.72	297.20	297.33	300.80	308.81	383.52	370.61	438.63	444.04	466.48	474.64

#### 4.3.8 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

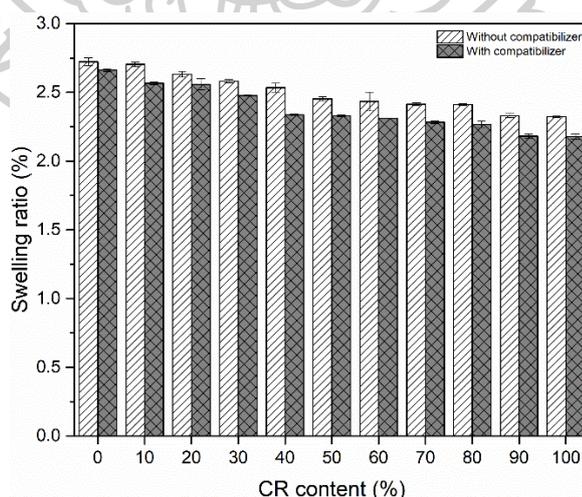
เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า สำหรับยาง NR เมื่อมีการเกิด crosslink ยาง NR จะไม่ละลายในตัวทำละลาย Toluene แต่จะเกิดการบวมตัวหรือ swell โดยยางจะดูดซับ toluene ไว้ทำให้เกิดการบวมตัว ปริมาณ Toluene ที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิด crosslink (crosslink density) [62] นอกจากปริมาณการเกิด crosslink จะมีผลต่อการบวมตัวแล้ว หากมีการผสมยางที่มีขั้วเข้ากับยาง NR จะมีผลทำให้การดูดซับ toluene ลดลง [63] ในทำนองเดียวกัน หากมีการเติมสาร inorganic หรือ เส้นใย หรือ อื่น ๆ ที่มีความสามารถในการดูดซับ toluene ต่ำ เช่น silica, cellulose และ fiber ฯลฯ จะทำให้การดูดซับ toluene ลดลงเช่นกัน [30] ในงานวิจัยตอนนี้เป็น การเติม nano silica และ IR-g-MA ลงใน NR/CR ที่มีปริมาณยาง CR 0-100% จะทำให้การบวมตัวของยางใน toluene ลดลงเมื่อผสมมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น ดังที่ได้ทราบในตอนต้นที่ 4.2 และเมื่อมีการเติม nano silica ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งก็จะทำให้การดูดซับ toluene ของยางผสมน้อยลง สำหรับการเติม IR-g-MA ลงไปด้วยนั้นด้วยวัตถุประสงค์จะทำให้ยาง CR กับยาง NR สามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้นกล่าวคือทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของยาง CR ใน NR หรืออีกนัยหนึ่งเมื่อยาง CR เป็นวัฏภาคหลัก ยาง NR จะสามารถกระจายได้ดีในยาง CR ผลการทดลองในตอนต้นนี้ แสดงดังภาพที่ 4.35



รูปที่ 4.35 %Swelling ของยาง NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA (a) เริ่มต้นถึง equilibrium และ (b) ช่วง 0 ถึง 10 ชั่วโมง

ในรูปที่ 4.35 (a) ผู้วิจัยขอเลือกเฉพาะบางอัตราส่วนของ NR/CR ที่ไม่มีการเติม และมีการเติม nano silica และ IR-g-MA เพื่อทำการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของการบวมตัวของยางผสม จากกราฟเส้นทึบซึ่งแสดงการดูดซับ toluene ของยาง ซึ่งจะพบว่าเมื่อมี nano silica จะ

ทำให้การดูดซับ toluene เกิดซ้างและปริมาณการดูดซับ toluene น้อยลงด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ N100C0 และ N0C100 ซึ่งเป็นสาเหตุจากการมีอนุภาคของของแข็ง ซึ่ง nano silica มีความเป็นขั้วสูง และยังเป็นของแข็งจึงไม่ยอมให้ toluene ซึมผ่าน และเนื้อของยางที่จะดูดซับ toluene บางส่วนถูกแทนที่ด้วย silica จึงทำให้การดูดซับลดลง สำหรับผลของการเติม IR-g-MA นั้นจะทำหน้าที่ร่วมกับ nano silica โดยในระหว่างผสม nano silica จะทำให้ยาง CR เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้น และทำให้ยาง CR เกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาคเล็กลง ดังจะเห็นได้จากภาพ SEM ในตอนที่ 4.3.2 รูปที่ 4.29 การที่อนุภาคของยาง CR เล็กลงและเกิดอันตรกิริยากันได้ดีขึ้นด้วยอิทธิพลของ IR-g-MA นี้ จะทำให้ อัตราการดูดซับ toluene ของยางผสมลดลงมาก ดังจะเห็นได้จากรูป 4.35 (b) (เปรียบเทียบเส้นทึบ : ไม่มี nano silica และ IR-g-MA กับเส้นประ : มี nano silica และ IR-g-MA) หากย้อนกลับไปพิจารณาภาพถ่าย SEM ของยางผสมที่มียาง CR 50 % ขึ้นไป จะพบว่าวิถุภาคของยาง CR เริ่มมีความต่อเนื่องและมองเห็นเป็นวิถุภาคหลักมากขึ้น ซึ่งทำให้ Toluene แพร่ไปยังวิถุภาคยาง NR ได้ยากมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณของ toluene ที่ถูกแพร่เข้าไปน้อยลง ยิ่งปริมาณของ CR มากขึ้น เช่นที่ cN80C20 ถึง cN20C80 จะมีการลดลงของการบวมตัวมากขึ้นตามปริมาณยาง CR หากทำการเปรียบเทียบค่าการบวมตัวที่ equilibrium ของยาง NR/CR สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งในภาพจะพบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยาง NR/CR ใน toluene ที่ equilibrium จะลดลงและจะลดลงมากเมื่อปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการกระจายตัวของ CR ที่ดีขึ้นและความเข้ากันได้ของยาง NR กับยาง CR ที่มากขึ้นนั่นเอง



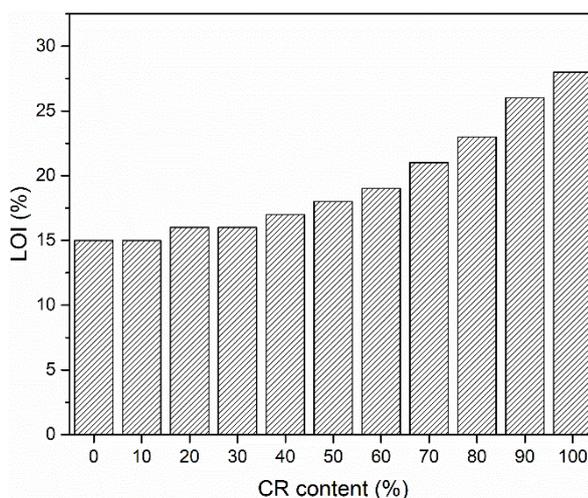
รูปที่ 4.36 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ equilibrium ของยางผสม NR/CR vulcanizate ที่ไม่มีและมีการเติม nano silica และ IR-g-MA

#### 4.3.9 สมบัติการติดไฟของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA โดยเทคนิค LOI และ UL-94 test

Limiting oxygen index (LOI) คือดัชนีชี้วัดความสามารถในการติดไฟ (Flammability) โดยวัดจากค่าความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์ต่ำสุดของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศที่ใช้ทำให้วัสดุชิ้นที่ทดสอบนั้นติดไฟลาม ไม่ดับไปเอง หรือสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากในอากาศปกติประกอบด้วยแก๊สออกซิเจน 21 % ถ้าวัสดุมีค่า LOI ต่ำกว่า 21 % ก็จะจัดอยู่ในประเภทที่เผาไหม้ได้ในขณะที่วัสดุที่มีค่า LOI สูงกว่า 21 % ก็จะจัดอยู่ในประเภทที่ดับไฟได้ด้วยตัวเอง หากวัสดุมีค่า LOI สูง แสดงให้เห็นว่าวัสดุนั้นมีสมบัติการต้านทานการติดไฟที่ดี โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863-91 ในการทำการทดสอบ ชิ้นทดสอบจะถูกวางตามแนวตั้งในกระบอแก้วที่มีแก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับไนโตรเจน จากนั้นจุดไฟเผาชิ้นงานทดสอบ ปรับปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปจนถึงระดับชิ้นงานเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง และคำนวณค่า LOI ตามสมการที่ 3.9 ตอนที่ 3.4.11

สมบัติการเผาไหม้อีกอย่างหนึ่งคือการลามไฟ ที่ทดสอบตาม Underwriters Laboratories 94V (UL-94) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบการลามไฟของวัสดุ โดยเผาไหม้ในแนวตั้ง ใช้ชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $10 \times 127 \times 3.2$  มิลลิเมตร จัดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3 ในตอนที่ 3.4.11 โดยทำการจุดไฟที่ชิ้นทดสอบเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำไฟออกจากชิ้นทดสอบ จับเวลาในการติดไฟจนเปลวไฟดับ บันทึกเป็นค่า  $t_1$  และเว้นระยะอีก 1 นาที จุดไฟอีกครั้งเป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไฟออกจากชิ้นตัวอย่างจับเวลาในการติดไฟจนไฟดับ บันทึกเป็นค่า  $t_2$  และสุดท้ายเว้นระยะอีก 1 นาที จุดไฟอีกครั้งเป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไฟออกจากชิ้นทดสอบ จับเวลาในการติดไฟจนไฟดับ บันทึกเป็นค่า  $t_3$  ตลอดจนบันทึกการหยดของวัสดุหลอมว่ามีหรือไม่ มีลักษณะอย่างไร (dripping) เพื่อนำไปจัดระดับเกณฑ์ของการลามไฟ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ UL94 V0, UL94 V1 และ UL94 V2 โดยที่สามารถแบ่งประเภทของแต่ละประเภทได้ตาม ตารางที่ 3.1 ในตอนที่ 3.4.11 ซึ่ง UL94 V0 จะมีสมบัติการต้านทานการติดไฟที่ดีที่สุด รองลงมาคือ UL94 V1 และ UL94 V2 [39]

สำหรับสมบัติ LOI และการลามไฟของยางผสม NR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA แสดงดังรูปที่ 4.37 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 ค่า LOI ของยาง NR/CR และ NR/CR vulcanized ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

จากผลการศึกษาสมบัติการติดไฟของยางผสม NR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ด้วยเทคนิค LOI และ UL-94 test แสดงในรูปที่ 4.33 และตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณออกซิเจนน้อยที่สุดที่ทำให้ยาง NR/CR vulcanizate ลุกติดไฟ (LOI) สำหรับยาง cN100C0 มีค่า LOI ประมาณ 15% cN0C100 มีค่า LOI อยู่ที่ประมาณ 27.9 % ซึ่งสูงกว่า 21 % แสดงให้เห็นว่ายาง CR มีความสามารถในการต้านการติดไฟต่อเนื่อง เนื่องจากยาง CR มีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง เมื่อได้รับความร้อนจากเปลวไฟยาง CR จะเกิดการสลายตัวปลดปล่อย HCl โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เหลือจะก่อตัวเป็นสารที่มีโครงสร้างที่มีความไม่อิ่มตัว และมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงหรือ carbonaceous compound เกิดขึ้นที่ผิวหน้า เรียกกระบวนการนี้ว่า pyrolysis ซึ่งมีความเป็นฉนวนความร้อนและป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับยาง ดังนั้นยาง CR จึงต้องมีการเติมออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง

สำหรับยางผสม NR/CR หรือยาง NR ที่มี CR เพิ่มเข้าไป จะทำให้ค่า LOI เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของ LOI ไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้น จะเห็นว่ายิ่งเพิ่มปริมาณยาง CR ยิ่งทำให้การเพิ่มของ LOI เป็นแบบ exponential ซึ่งอาจเป็นผลจากลักษณะสัณฐานวิทยาของ NR/CR ที่มีปริมาณยาง CR สูงกว่า 50 % ภูมิภาคของ CR จะมีการกระจายตัวที่ดี และมีลักษณะเป็นภูมิภาคหลัก และปกคลุมภูมิภาคของยาง NR จึงทำให้สมบัติ LOI เพิ่มขึ้นแบบ exponential

สำหรับการทดสอบการลามไฟแบบ UL 94 โดยให้ชิ้นตัวอย่างในแนว Vertical แบ่งการลามไฟเป็น 3 ระดับ กล่าวคือ คือ UL94 V0, UL94 V1 และ UL94 V2 โดยที่สามารถแบ่งประเภทของ

แต่ละประเภทได้ตาม ตารางที่ 3.1 ซึ่ง UL94 V0 จะมีสมบัติการต้านทานการติดไฟที่ดีที่สุด รองลงมาคือ UL94 V1 และ UL94 V2

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง V-2 มีลักษณะการเผาไหม้ที่เมื่อจุดไฟ ไฟจะหยุดภายใน 30 วินาทีและมีการหยุดของพอลิเมอร์หลอมและเปลวไฟลุกต่อเนื่อง V-1 ไฟติดแล้วลุกต่อเนื่อง มีการหยุดของพลาสติกแต่ไม่ติดไฟ V-0 มีเกิดติดไฟ และดับได้ภายใน 10 วินาที มีพลาสติกหยุดแต่ไม่มีเปลวไฟ [37] ตารางที่ 4.5 แสดงค่า LOI และ UL-94 จากการทดสอบสมบัติการติดไฟของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

สูตร	LOI (%)	UL-94 Classification
cN100C0	14.8	V-2
cN90C10	15.3	V-2
cN80C20	15.9	V-2
cN70C30	16.2	V-2
cN60C40	17.2	V-2
cN50C50	18.0	V-2
cN40C60	19.2	V-2
cN30C70	20.9	V-2
cN20C80	23.2	V-1
cN10C90	26.1	V-0
cN0C100	27.9	V-0

เมื่ออัตราส่วนของยาง CR เพิ่มขึ้นทำให้ยางคงรูปมีความสามารถในการต้านทานการลุกไหม้ได้ดีขึ้น จากผลการทดลอง ในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้อีกว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ NR/CR ที่สูงกว่า 20/80 ขึ้นไปจะไม่ติดไฟในสภาวะบรรยากาศ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนน้อยที่สุดที่ทำให้ยางคงรูปลุกติดไฟ (LOI) มีค่าเท่า 23.2 ซึ่งมากกว่าปริมาณออกซิเจนในอากาศ คือ 21.0 หากนำไปใช้งานทั่วไป ก็จะมีความสามารถในการต้านทานการติดไฟที่สูง

สำหรับผลการทดสอบการลามไฟ ซึ่งทดสอบด้วย UL-94 สำหรับยาง cN100C0 มีอัตราการลามไฟอยู่ในเกณฑ์ V-2 สำหรับลักษณะการลามไฟระดับ V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 นั้น เมื่อยางถูกเปลวไฟเผาไหม้ตามเวลาที่กำหนดและนำขึ้นทดสอบออกจากเปลวเพลิงสังเกตเวลาในการลุกไหม้ต้องหยุดภายใน 30 วินาที อนุญาตให้หยุดเกิดการลุกไหม้ ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า

ยาง cN100C0 และยางผสมที่มียาง CR 10-70 % มีสมบัติการลามไฟในอัตรา (rating) V-2 แม้ว่ายางผสมจะมียาง CR ผสมอยู่ถึง 70 % แล้วก็ตาม หากกลับไปพิจารณาภาพถ่าย SEM จะเห็นว่า วัฏภาคยาง CR มีการกระจายตัวดีมากขึ้นเมื่อมีการเติม nano silica และ IR-g-MA แต่กระนั้นการเกิด dripping หรือการหยดของยาง NR ขณะเผาไหม้อาจเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมี IR-g-MA ผสม จะทำให้ยาง NR ไหลได้ดี จึงเกิด dripping ได้มากกว่ายาง NR ที่ไม่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ดังนั้นยาง cNR/CR จึงจัด rating อยู่ใน V-2 จนถึงอัตราส่วน cN30C70 แม้ว่ายาง CR จะมีลักษณะเป็นวัฏภาคหลักต่อเนื่องแล้วก็ตาม

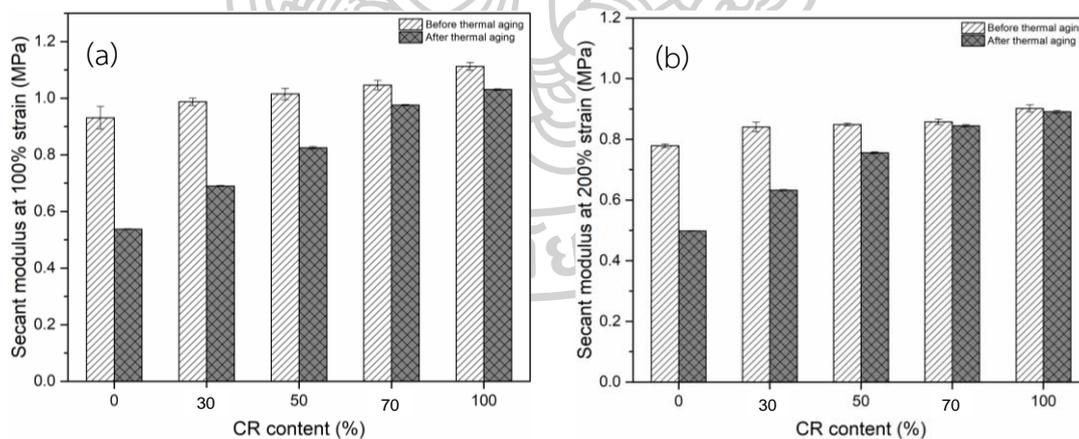
ธรรมชาติของยาง CR เป็นยางที่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากเมื่อได้รับเปลวไฟ แล้วนำเปลวไฟออก จะไม่เกิดการลุกลามต่อเนื่องและมีของแข็งสีดำ (carbonaceous compound) ปกคลุมผิว ทำให้การหยดของยาง cN20C80 ไม่เกิดขึ้น (V-1 เกิดการดับไฟภายในเวลาน้อยกว่า 30 วินาที และไม่มีหยดของยาง) ปริมาณยาง CR ที่ 80 % นี้สามารถช่วยต่อต้านการลามไฟได้ดีขึ้น เมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นเป็น 90 % การดับไฟได้ด้วยตัวเองจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นกล่าวคือไฟจะดับภายในเวลาน้อยกว่า 10 วินาที โดย rating ของการลามไฟ เป็น V-0 เนื่องจากวัฏภาคหลักของยางผสมคือยาง CR ซึ่งทำให้เมื่อยางเมื่อถูกเผาไหม้จะมี carbonaceous compound ปกคลุมที่ผิวของชิ้นทดสอบ ทำให้กระบวนการ pyrolysis หยดลง การลุกไหม้ของชิ้นทดสอบจึงหยุดลงด้วย

#### 4.3.10 สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Thermal aging) ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA

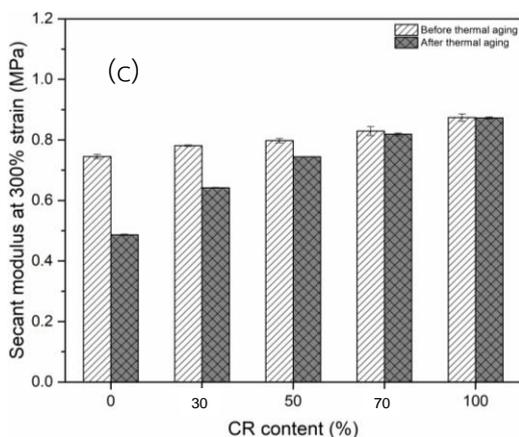
เป็นที่ทราบกันดีว่า ยาง NR และยาง CR เป็นยาง diene base ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการยืด ความสามารถในการทนต่อสารเคมี [53] อย่างไรก็ตามการนำยางมาใช้ประโยชน์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาในการใช้งาน กล่าวคือหากระยะเวลาการใช้งานจะเกิดการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม หรือแม้แต่การมีสิ่งแวดล้อมกระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น เช่นการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา oxidation กับออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อน จะทำให้เราเห็นการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสภาพได้เร็วและชัดเจนยิ่งขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งการเสื่อมสภาพคือการที่วัสดุหนึ่ง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือแม้แต่ทางเคมีที่อาศัยระยะเวลาหนึ่ง ๆ หากต้องการให้เห็นการเปลี่ยนแปลงนั้นเร็วและชัดเจนยิ่งขึ้นจะต้องทำการเร่งสภาวะ เป็นต้น โดยทั่วไปการเกิดการเสื่อมสภาพ หรือ aging ของวัสดุนั้น สามารถเกิดขึ้นจากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น physical หรือ chemical aging [39, 53] สำหรับ chemical aging นั้นเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุกับปัจจัยในสิ่งแวดล้อม เช่น oxygen ความชื้น เป็นต้น ซึ่ง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปอย่างช้า ๆ (long period of time) ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่กำหนด service time สำหรับยางที่เป็น diene based elastomer นั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุล จะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับ oxygen แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการที่ oxygen จะเข้าถึงพันธะคู่ได้ง่ายเพียงใด ซึ่งโดยปกติแล้วยาง CR เป็นยางที่ทนต่อการเกิด oxidation ได้ดีกว่ายาง NR เนื่องจากการมี Cl อยู่ในทุกหน่วยซ้ำนั่นเอง ดังนั้นยาง CR จึงทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal aging resistance) [16] มากกว่ายาง NR เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิด oxidation ที่พันธะคู่ได้เร็วขึ้นด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา thermal aging resistance ของยาง cNR/CR ที่มีปริมาณยาง CR ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.38-4.41

อนึ่ง สมบัติความสามารถในการทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน กับสมบัติหรือพฤติกรรมของการสลายตัวภายใต้ความร้อนในสภาวะเฉื่อยนี้มีความหมายแตกต่างกัน โดยสมบัติแรกนั้นจะทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง (อาจปรับให้อยู่ในสภาวะแรงเช่นที่ 100 °C) แล้วติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมบัติในช่วงเวลานาน (เช่น 72 ชั่วโมง) สำหรับสมบัติประการหลัง จะเป็นการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง อาจทำการติดตามการสลายตัวที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal scan testing) หรือเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยจนถึงอุณหภูมิ 700-800 °C (หรือ temperature scan testing)



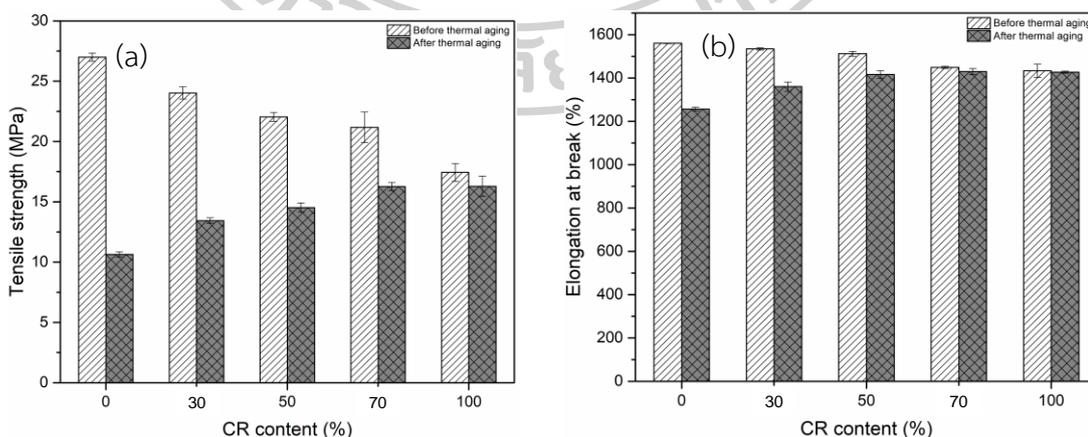




รูปที่ 4.38 Secant modulus ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ที่ (a) 100%, 200% และ (c) 300% strain ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

**ซีแคนท์มอดูลัส (Secant modulus):** จากรูปที่ 4.38 แสดงค่าซีแคนท์มอดูลัส ที่ 100, 200 และ 300 % strain ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีปริมาณยาง CR 0-100 % ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนที่ 100 °C ในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ายาง cN100C0 ซึ่งมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนทำให้ค่าซีแคนท์มอดูลัส ลดลงมากกว่ายาง cN0C100 ดังที่ได้เกริ่นไว้ก่อนหน้านี้ว่า ยาง CR มีความสามารถในการทนต่อการเกิด oxidation ที่อุณหภูมิสูง หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความต้านทานต่อการเกิด oxidation ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่ายาง NR เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางผสม cNR/CR จะมีความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณยาง CR มากขึ้น

**ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength):** สมบัติ tensile strength ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทั้งก่อนและหลังการทดสอบความทนทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน แสดงในรูปที่ 4.39 (a)

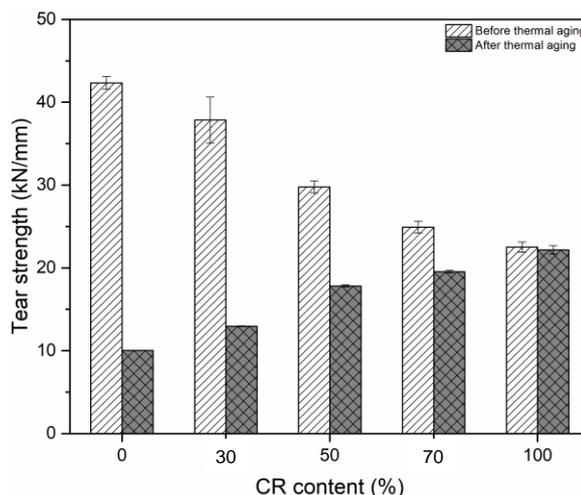


รูปที่ 4.39 (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA และ ก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

จากรูป สังเกตได้ว่าค่า Tensile strength ของยาง cN100C0 หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนจะลดลงมาก ขณะที่ cN0C100 มีการลดลงของ tensile strength น้อยกว่ามาก หรือเกือบคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด oxidation ที่ถูกเร่งด้วยความร้อนของยาง NR ซึ่งเกิดมากกว่าในยาง CR [53] การเกิด oxidation ที่พันธะคู่ของยางธรรมชาตินี้ทำให้โมเลกุลขาดสั้นลงความสามารถในการต้านทานแรงดึงจึงลดลงด้วย อีกประการหนึ่ง พันธะของการเชื่อมโยงหรือ crosslink ที่เกิดในยางธรรมชาติ เป็นพันธะแบบ polysulfide เป็นจำนวนมากซึ่งพันธะชนิดนี้ทนความร้อนได้น้อยดังจะเห็นได้จากการเกิดปรากฏการณ์ reversion ในการทดสอบ MDR (ตอนที่ 4.3.1) ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลทำให้ tensile strength ของยางผสมที่มียาง NR มีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ยาง cN0C100 ทั้งความสามารถในการเกิด oxidation ที่น้อยกว่าเนื่องจากการมี Cl ในหน่วยซ้ำ และจากผลการทดสอบ MDR พบว่าไม่พบการเกิด reversion ขณะทดสอบหลัง optimum cure นั้น แสดงให้เห็นถึงพันธะเชื่อมโยงเป็นพันธะที่ทนต่อความร้อน ดังนั้นในยางผสม cNR/CR จึงมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่ลดลงเมื่อปริมาณยาง CR ในยางผสมเพิ่มมากขึ้น

**การยืดออก ณ จุดขาด (Elongation at break):** สมบัติการยืดออกของยาง cNR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.39 (b) จากรูปจะสังเกตได้ว่าค่า Elongation at break ของยาง cN100C0 มีค่าลดลง จาก 1550 เป็น 1250 % ขณะที่ยาง cN0C100 ค่าดังกล่าวหลังการทดสอบ ไม่แตกต่างจากก่อนการทดสอบความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ พิจารณากรณียาง cN100C0 ซึ่งเป็นยาง NR 100 % ดังได้กล่าวแล้วว่า ยาง NR มีพันธะคู่ที่ไวต่อการเกิด oxidation และยังมีพันธะเชื่อมโยงเป็น polysulfide ดังนั้นจึงเกิดการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนมากกว่า ยาง cN0C100 ซึ่งเป็นยาง CR 100 % แม้เป็นยาง diene based rubber แต่มี Cl อะตอมที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยา oxidation เกิดได้ยาก ดังนั้นจึงเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนและ oxidation ได้น้อยกว่ายาง NR สำหรับยางผสมที่มียาง NR และยาง CR นั้น จะเห็นว่า elongation at break มีการลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพน้อยลงเมื่อยางผสมมี CR เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว

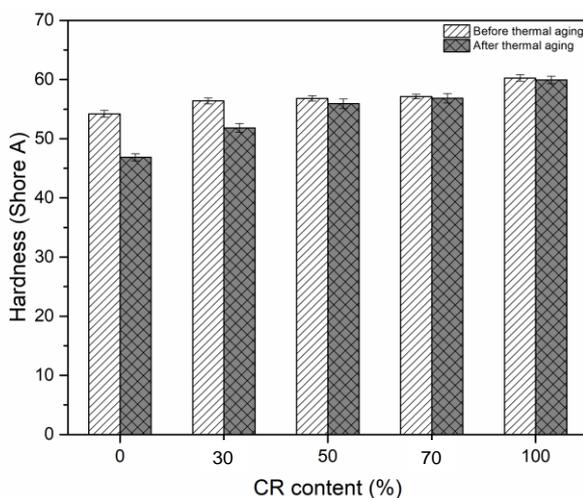
**สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength):** tear strength ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 Tear strength ของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า Tear strength หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนยาง cN100C0 ซึ่งเป็นยาง NR 100% ซึ่งค่า tear strength ลดลงถึง 75 % ขณะที่ยาง cN0C100 ค่าดังกล่าวลดลงน้อยมาก ดังที่กล่าวไว้ในตอนก่อนหน้าแล้วว่าสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางนั้นขึ้นกับ crosslink type crosslink density การฉีกขาดของโมเลกุล และการแตกออกของพันธะการเชื่อมโยงก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความทนทานต่อการฉีกขาดนี้ด้วยเช่นกัน อนึ่งการเกิด oxidation ทำให้สายโซ่ยางหลักเกิดการขาดออกได้ [53, 64] และขณะเดียวกัน polysulfide linkage ซึ่งเป็นพันธะเชื่อมโยงใน cN100C0 เกิดการแตกออกได้ง่าย และยางนี้ยังเกิด oxidation ได้ง่ายกว่ายาง cN0C100 ด้วย จึงเป็นเหตุให้ยาง cN100C0 เกิดการเสื่อมสภาพ และ tear strength ลดลงมาก ขณะที่ยาง cN0C100 เป็นยางที่ทนต่อการเกิด oxidation และพันธะเชื่อมโยงไม่เสื่อมสภาพได้ง่าย ดังนั้น tear strength จึงมีค่าลดลงน้อยมาก ดังนั้น ในยางผสม cNR/CR การลดของ tear strength เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยางจึงน้อยลงเมื่อยางผสมมียาง CR เพิ่มขึ้นนั่นเอง

**สมบัติความแข็ง (Hardness, Shore A):** ความแข็งของยาง NR/CR vulcanizate ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ค่า Hardness (Shore A) ของยาง NR CR และ NR/CR vulcanized ที่มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อน

จากรูปสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของยาง cN100C0 หลังการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนมีค่าลดลงประมาณ 13 % ขณะที่ยาง cN0C100 มีค่าความแข็งลดลง 1.6 % ซึ่งเป็นผลจากการเสื่อมสภาพที่ผิวอันเกิดจากปฏิกิริยา oxidation และการแตกออกของพันธะเชื่อมโยง ซึ่งเกิดได้มากในยาง cN100C0 แต่ยาง cN0C100 นั้นเกิดปฏิกิริยาทั้ง 2 นี้ น้อยกว่ามาก จึงทำให้ความแข็งลดลงน้อยมาก และเช่นกัน ยางผสม cNR/CR ที่มียาง CR เพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยา oxidation และ reversion ของพันธะเชื่อมโยงน้อยลง ความแข็งของยางผสมจึงไม่ลดลงมาก หรืออีกนัยหนึ่ง ความแข็งของยางลดลงน้อยเมื่อมียาง CR ในยางผสมเพิ่มขึ้น

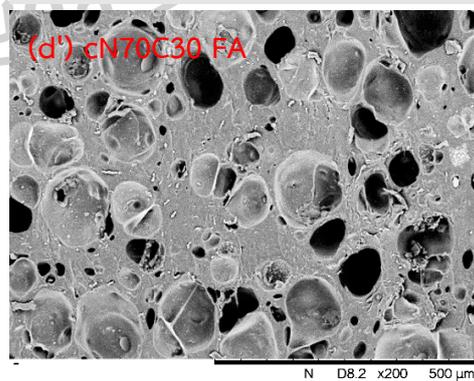
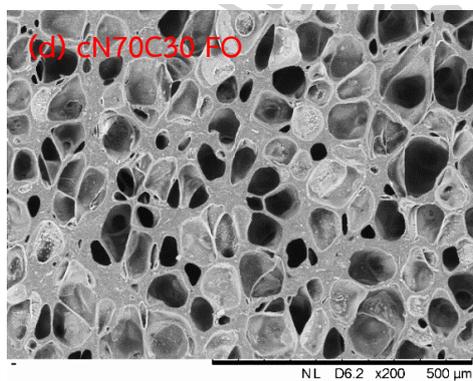
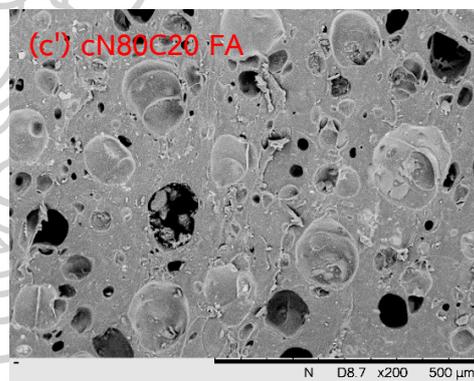
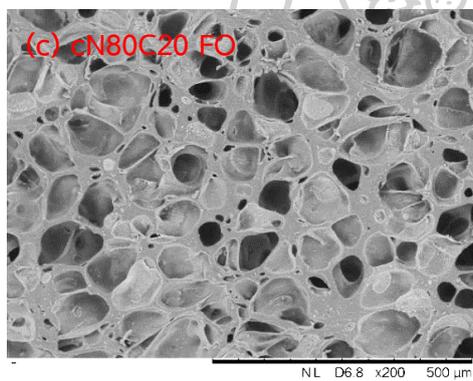
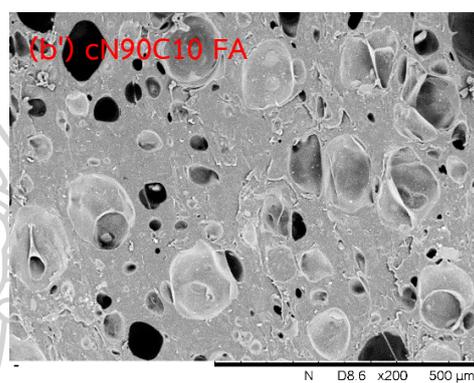
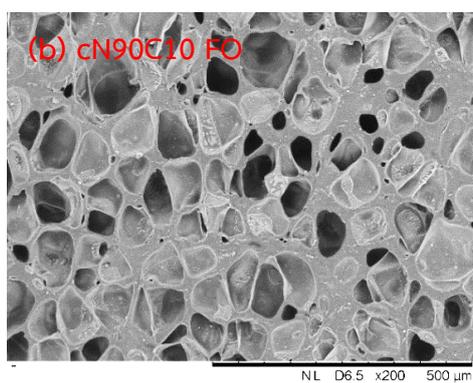
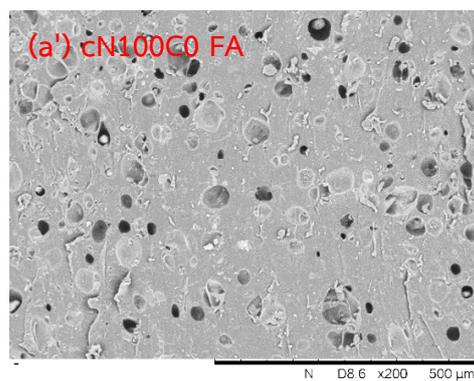
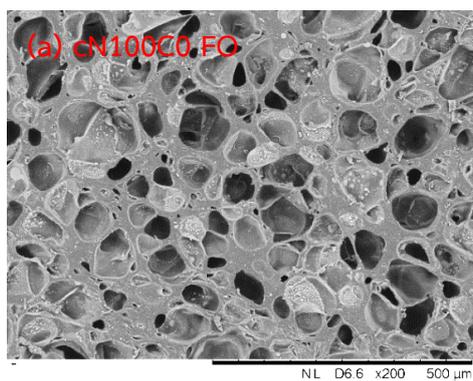
#### 4.4 ตอนที่ 4 การศึกษาผลของชนิดของ Blowing agent ต่อโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ กับยางคลอโรพรีน

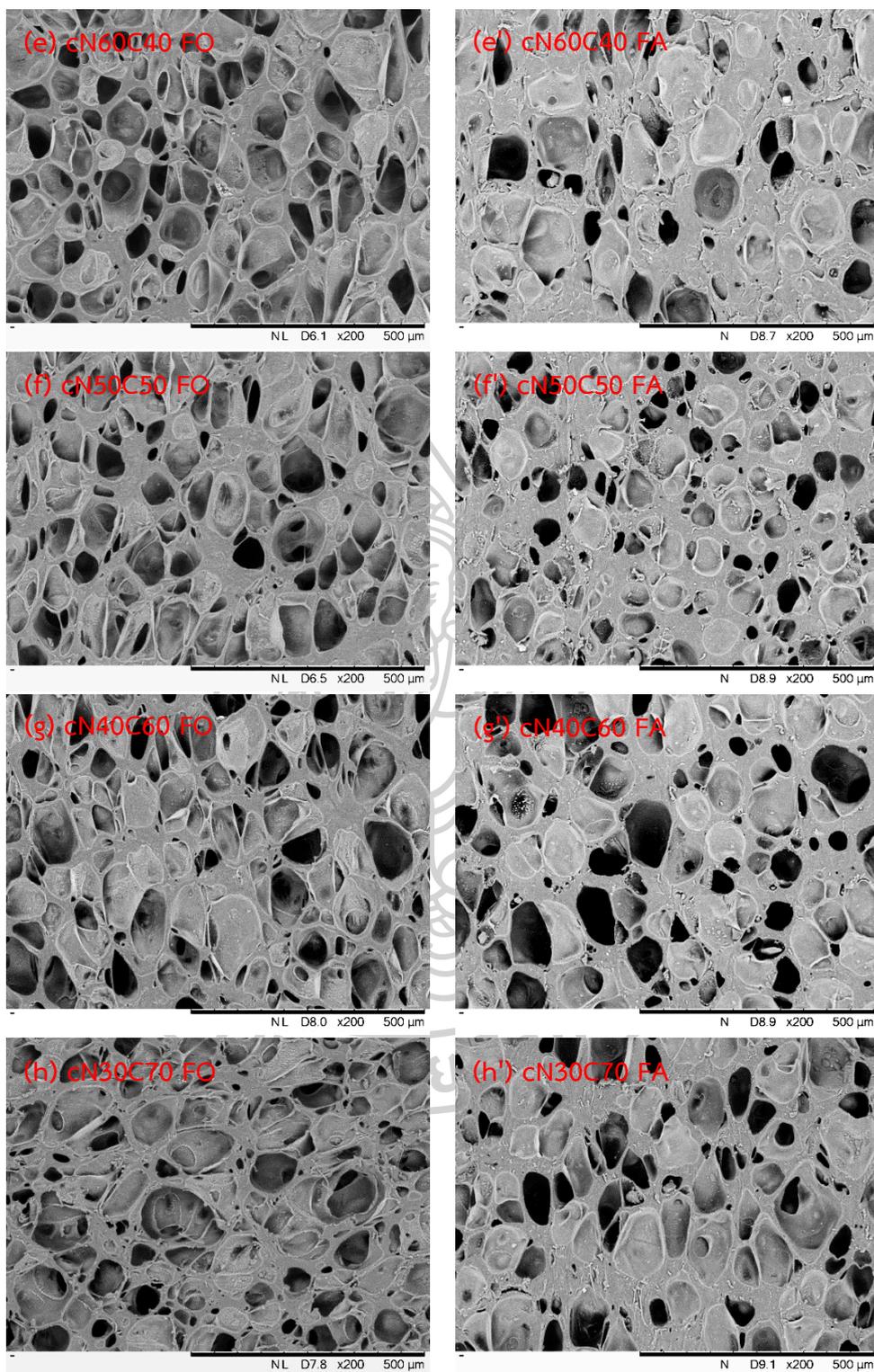
เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า วัสดุโฟม หรือ cellular materials มีข้อดีในเรื่องน้ำหนักเบา และสมบัติของโฟมขึ้นอยู่กับสมบัติของเนื้อวัสดุที่เป็นผนังโฟม วัสดุโฟมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ใน application ต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ เช่น ดูดซับพลังงาน ความร้อน หรือเสียง เป็นต้น

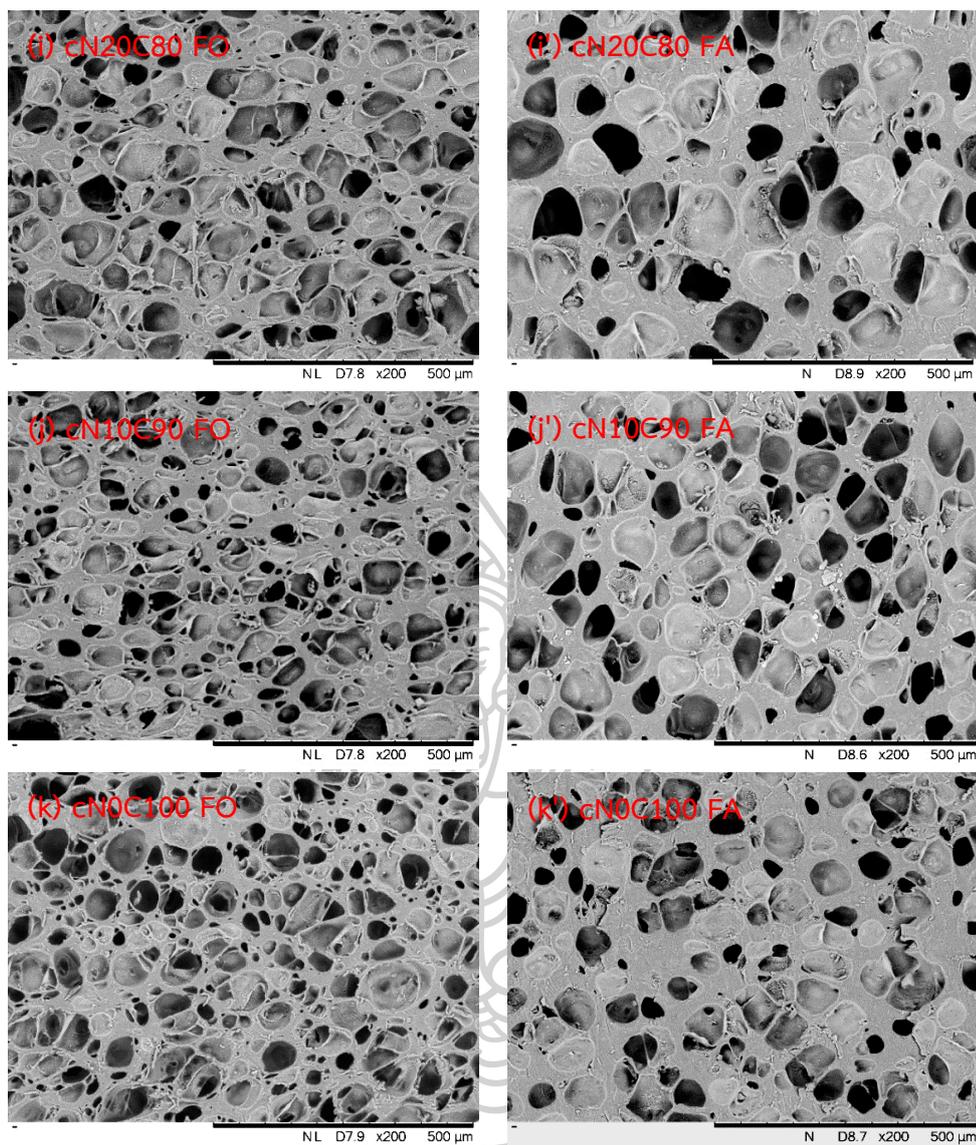
ในงานวิจัยตอนนี้จะเป็นการการเตรียมโฟมจากยางผสม NR/CR โดยนำยางสูตรผสมเดียวกัน กับที่ศึกษาในตอนที 3 โดยยาง compound กับสารเคมีและสารฟู (Blowing agent) ชนิด OBSH (4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide) เปรียบเทียบกับ ADC (Azodicarbonamide) ปริมาณ 10 phr ซึ่งมีการผสมยาง NR กับยาง CR ปริมาณ 0-100 % โดยน้ำหนักเช่นกัน ซึ่งมีการเติม nano silica และ IR-g-MA ในปริมาณเดียวกับที่เติมในตอนที 3 อนึ่ง ยางคอมปาวด์ที่ผสมในตอนนีได้มีการนำมาศึกษา cure characteristic ด้วยเช่นกัน ข้อมูล cure characteristic จะไม่รายงานในตอนนี เนื่องจากข้อมูลเหมือนกับในตอนที 3 เมื่อได้ยางคอมปาวด์ที่มีสารฟูเรียบร้อยแล้ว นำมาขึ้นรูปเป็น โฟม แล้วศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของโฟม โดยสูตรโฟม แทนด้วย cNxxCyy FO ซึ่ง c แทนการที่ยางคอมปาวด์มี nano silica และ IR-g-MA โดย Nxx แทนยาง NR และ % ของยาง NR, Cxx แทนยาง CR และ % ของยาง CR, F แทนโฟม O และ A แทน blowing agent ชนิด OBSH และ ADC ตามลำดับ สมบัติที่ศึกษา ได้แก่ สัณฐานวิทยาของโฟม, cell density, foam density, สมบัติเชิงกล, การคืนตัว เนื่องจากแรงกด (compression set), ความแข็ง และสมบัติการติดไฟ

##### 4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

โฟมที่ได้จากการขึ้นรูป นำโฟมที่ได้มาตัดด้วยมีดคม แล้วนำมาเคลือบด้วยทองจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปตรวจสอบลักษณะของเซลล์โฟมด้วย SEM รูปที่ 4.42 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟม และเซลล์โฟม และรูปที่ 4.43 แสดงขนาดและความถี่ของขนาดของเซลล์โฟม และรูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของเซลล์โฟมจากการเติมสารฟู 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน





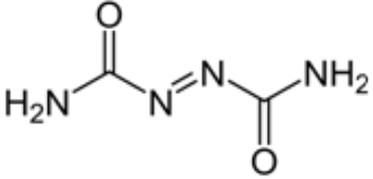
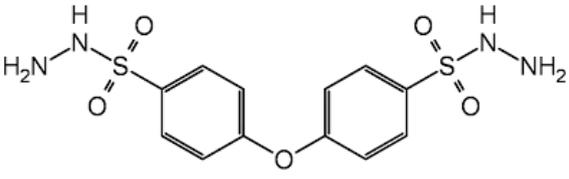


รูปที่ 4.42 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

จากรูปที่ 4.42 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม nano silica และ IR-g-MA และมีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC ซึ่ง blowing agent ทั้ง 2 ชนิด มีโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 4.6



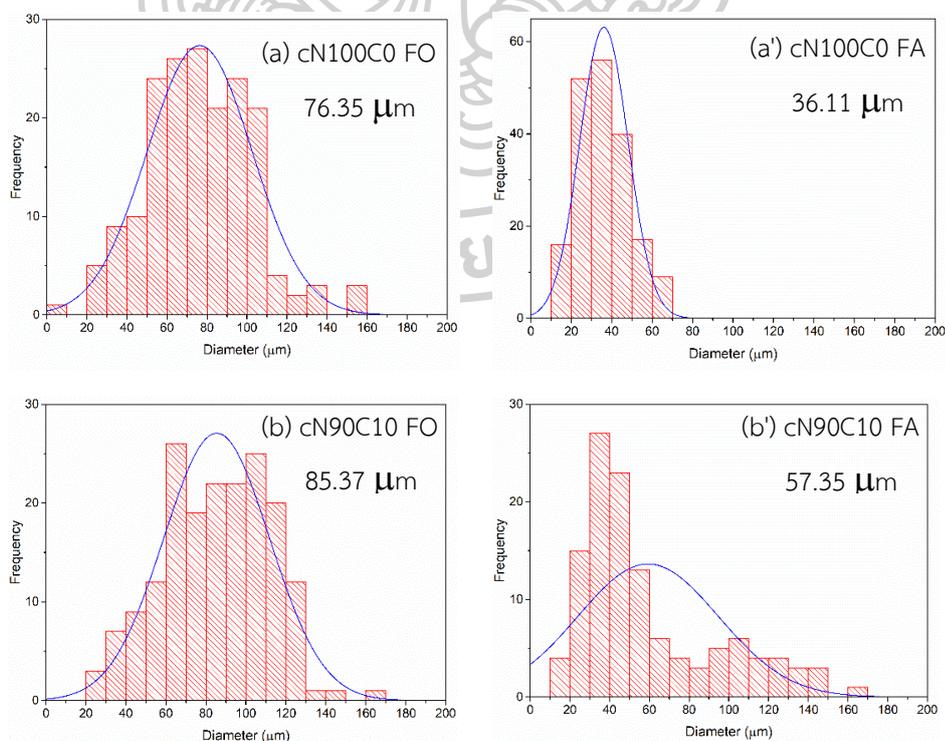
ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลของ Blowing agent

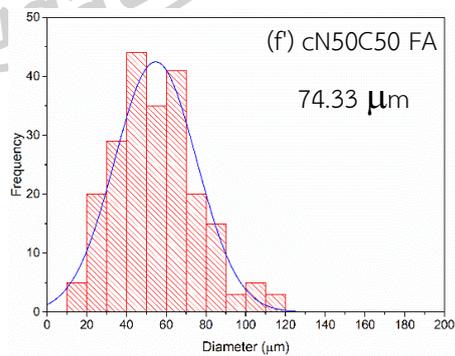
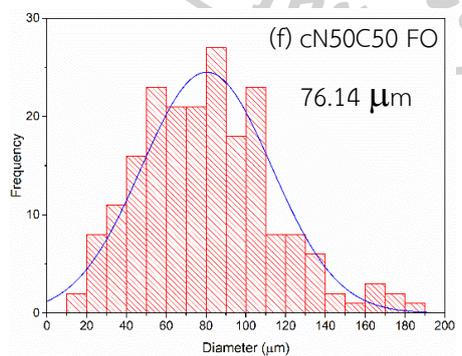
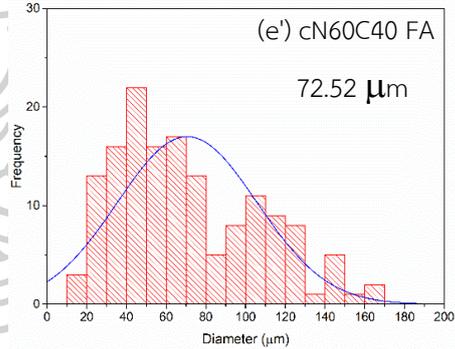
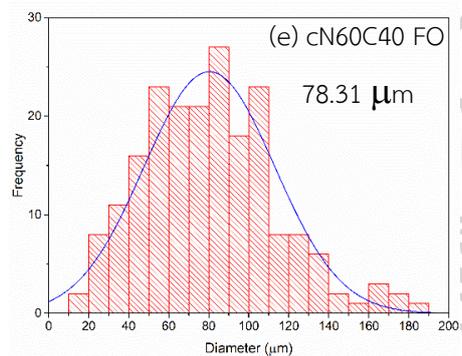
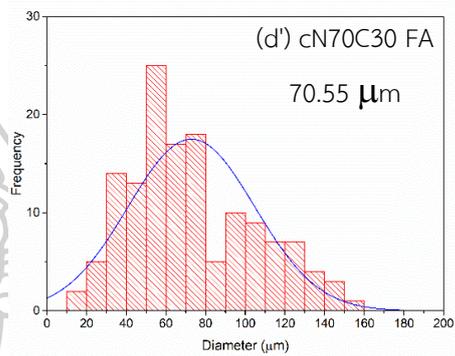
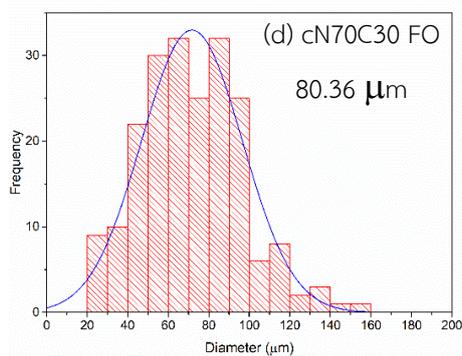
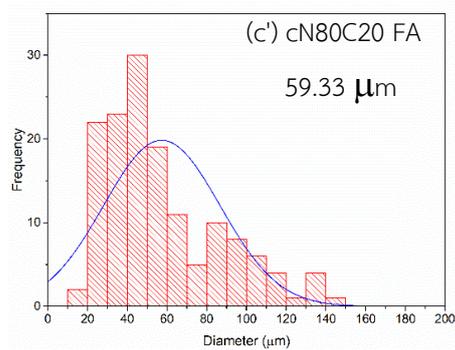
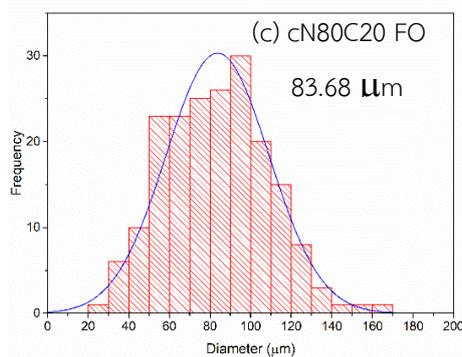
 <p>Azodicarbonamide (ADCA หรือ ADC) อุณหภูมิการแตกตัว 205-215 (270 ml/g)</p>	 <p>4,4'-Oxybis (Benzenesulfonyl Hydrazide) (OBSH) อุณหภูมิการแตกตัว 205-215 (270 ml/g) 155-165 (160 ml/g)</p>
--	--

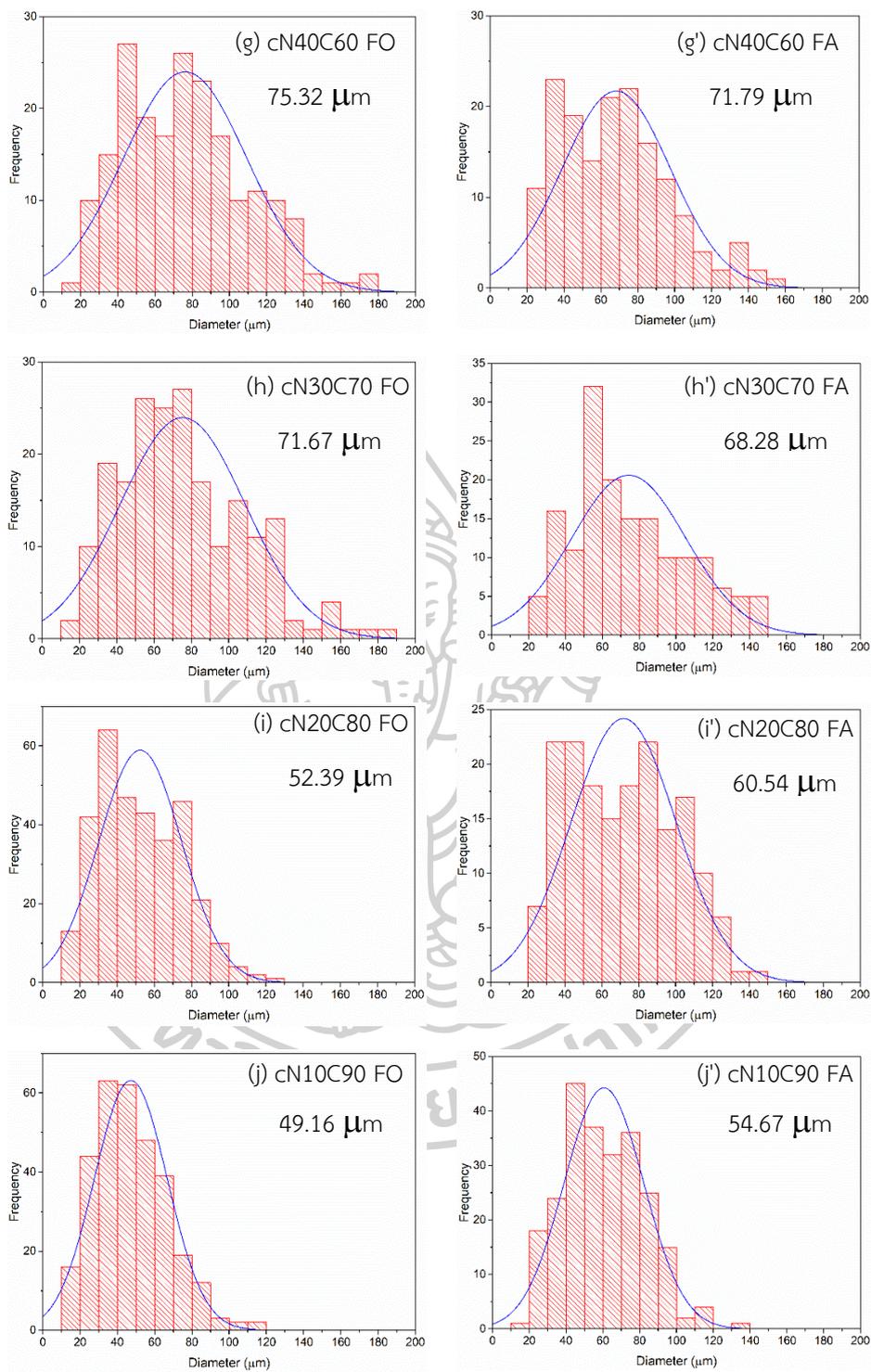
หากพิจารณาภาพถ่ายจาก SEM ในรูปที่ 4.42 จะเห็นได้ว่าโฟมที่เตรียมจากยางผสม cNR/CR ที่ได้จากการเติม OBSH เป็น blowing agent มีปริมาณของเซลล์ในโฟมมากกว่ากรณีที่เตรียมจากการเติม ADC เป็น blowing agent และยางผสมมีอัตราส่วนของยาง CR 0-70 % เซลล์โฟมมีขนาดของยางผสมที่เติม ADC มีขนาดเล็กกว่า กรณีการเติม OBSH (พิจารณารูปที่ 4.42 ประกอบ) เมื่อปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้นเป็น 80-100 % ขนาดของเซลล์ในโฟมที่มี ADC เป็น blowing agent จะมีขนาดใหญ่กว่า เซลล์โฟมของยางที่มี OBSH เป็น blowing agent

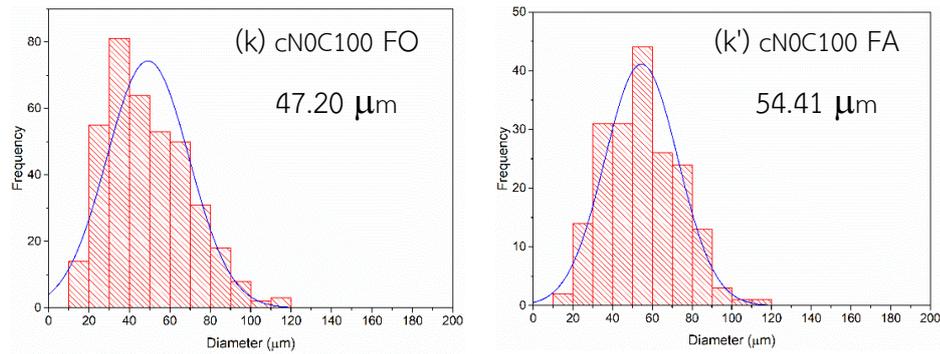
พิจารณากรณียางมี OBSH เป็น blowing agent จากผลการทดสอบ SEM จะพบว่าขนาดของเซลล์โฟม จะลดลงเมื่อยางผสม cNR/CR มีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายของ OBSH ในยาง CR น้อยกว่าการละลายของ OBSH ในยาง NR หากพิจารณาลักษณะการคงรูป ยาง CR มีค่า  $ts_2$  และค่า  $tc_{90}$  สูง ใช้เวลาในการคงรูปนาน (พิจารณาจากผลการทดสอบ Cure characteristic ในตารางที่ ก.14) ทำให้สารฟูที่กระจายตัวอยู่สลายตัวก่อนที่จะเกิดการคงรูป อีกทั้งการใช้ nano silica ซึ่งทำหน้าที่เป็น nucleating agent สำหรับการเกิดฟองในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปได้ แต่ยาง CR สามารถเกิดอันตรกิริยากับ nano silica ผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมของคลอรีนกับหมู่ไฮดรอกซิลของ nano silica ทำให้ซิลิกากระจายตัวได้ดีในวัฏภาคยาง CR ซึ่งในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปนั้น เมื่อยางได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C (OBSH สลายตัวได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 150-160 °C) [32, 44] ปริมาณแก๊สที่ปลดปล่อยอยู่ที่ 160 ml/g อุณหภูมิที่แตกตัวนี้สารฟูเกิดการแตกตัวในขณะที่ nano silica กระจายตัวอยู่ในทุกส่วนของยางผสม ยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง โดยซิลิกานั้นมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีได้ดี จะทำการดูดซับสารฟูที่กำลังสลายตัวอยู่ในเนื้อยางทำให้สารฟูสามารถกระจายได้ทั่วในทุกส่วนของเนื้อยาง ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก และสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน

สำหรับยาง cNR/CR ที่มี ADC เป็น blowing agent จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะของ เซลล์โฟม ทั้งขนาดและปริมาณของเซลล์ที่เกิด ปรากฏในภาพถ่าย SEM นั้นแตกต่างไปจากกรณีของ การเติม OBSH อนึ่ง สำหรับโฟมที่ใช้ ADC เป็นสารพูนั้น ขนาดของเซลล์จะเปลี่ยนแปลงโดยมี ลักษณะเป็นระฆังคว่ำ กล่าวคือ กรณีที่ยาง cNR/CR มี NR 100% ขนาดของเซลล์จะเล็กที่สุดอยู่ที่ ประมาณ 36  $\mu\text{m}$  หากพิจารณาที่ตัวของ ADC มีอุณหภูมิการแตกตัวอยู่ที่ 205-215  $^{\circ}\text{C}$  [32, 34] และ มีปริมาณแก๊ส 270 ml/g ซึ่งในการขึ้นรูปโฟมจะใช้อุณหภูมิ 160  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่ง ADC ยังแตกตัวได้น้อย แต่ ยางได้เกิดการ vulcanize ไปแล้ว จึงทำให้ปรากฏเซลล์โฟมที่ขนาดเล็กและจำนวนเซลล์ต่อหน่วย พื้นที่มีน้อย เมื่อ cNR/CR มีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบ MDR (ตอนที่ 4.3.1) ได้ แสดงไว้ว่าเมื่อยางผสมมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น  $ts_2$  และค่า  $tc_{90}$  จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในระหว่างการขึ้น รูปโฟม ADC มีโอกาสในการแตกตัวและปลดปล่อยแก๊สเพิ่มขึ้น ทำให้เซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดของเซลล์โฟมยังเล็กกว่ากรณีการเติม OBSH เป็นสารพูนี้อาจเนื่องจาก ADC ยังแตกตัวได้ไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตามที่ยางผสม cNR/CR ที่มีปริมาณยาง CR 80 % ขึ้นไปพบว่าโฟมที่มีการเติม ADC จะมี ขนาดเซลล์ใหญ่กว่าโฟมที่มีการเติม OBSH ซึ่งเป็นผลมาจาก nano silica มีการกระจายตัวและเกิด อันตรกิริยาที่ดีกับยาง CR และ ADC ยังสามารถละลายได้ดีในยาง CR จึงทำให้โฟมที่มียาง CR 80- 100 % นี้มีขนาดมากกว่าโฟมที่มี OBSH เป็นสารพูนี้อีก

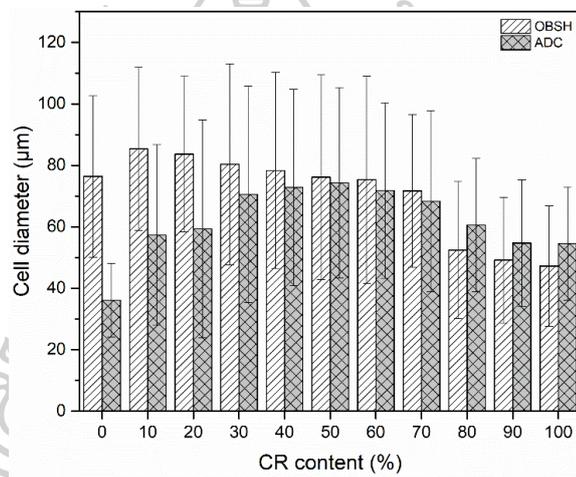






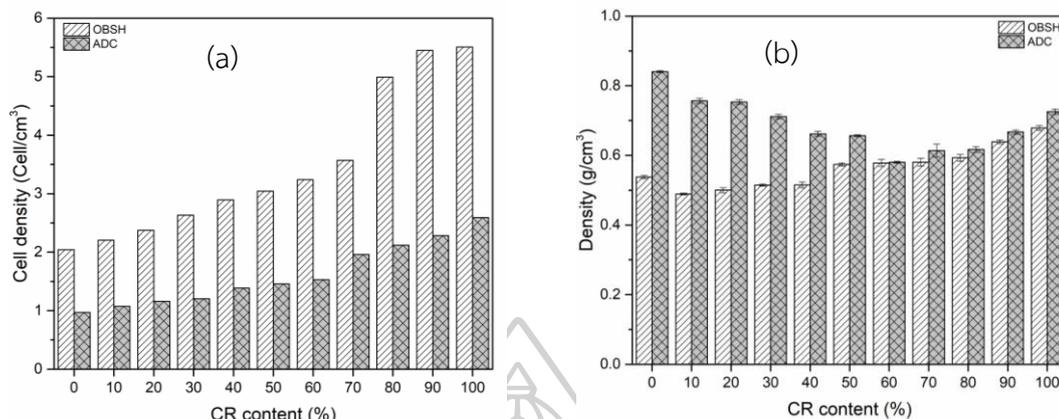


รูปที่ 4.43 การกระจายขนาดเซลล์เชิงสถิติของโฟมยาง cNR/CR ที่มีปริมาณยาง CR 0-100 % และมี OBSH (ไม่มี ') หรือ ADC (มี ') เป็น blowing agent



รูปที่ 4.44 ขนาดของเซลล์โฟมจากยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

#### 4.4.2 ความหนาแน่นของเซลล์ (cell density) และความหนาแน่นของโฟม (density of the foam) ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent



รูปที่ 4.45 (a) ความหนาแน่นของเซลล์ และ (b) ความหนาแน่นของโฟม ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี การเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

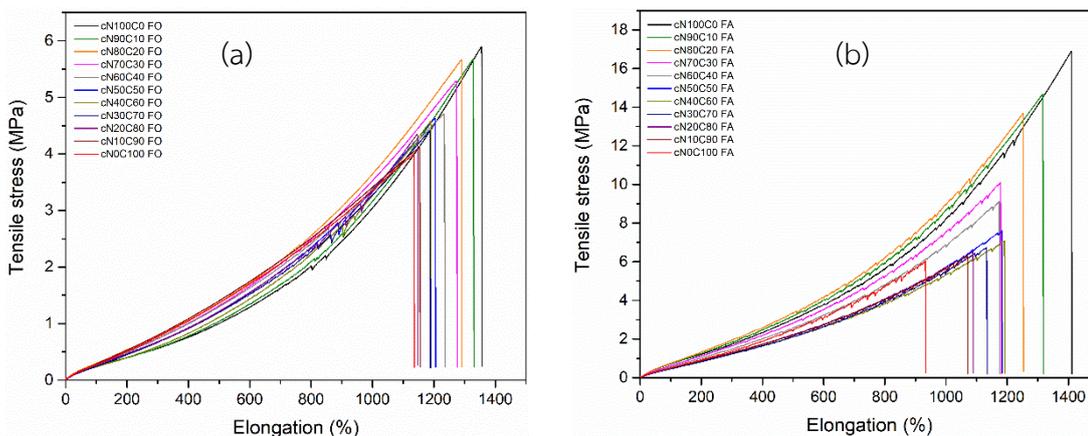
**ความหนาแน่นของเซลล์ (cell density)** ของโฟม จากรูปที่ 4.45 (a) จะเห็นว่า โฟมยางที่เตรียมจากการเติม OBSH เป็น blowing agent มีความหนาแน่นของเซลล์ ที่มากกว่าโฟมยางที่เติม ADC เป็น blowing agent หากกลับไปพิจารณาภาพถ่าย SEM ของโฟมในรูปที่ 4.42 (a')-(f) จะเห็นว่าในเนื้อโฟมที่เติม ADC นั้นมีจำนวนฟองที่ปรากฏในภาพถ่ายน้อย เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.42 (a)-(f) ซึ่งเป็นผลจากการแตกตัวให้แก๊สของ ADC เกิดได้ช้าและน้อยที่อุณหภูมิการขึ้นรูปโฟมนี้ [34] จึงทำให้โฟมมีปริมาณแก๊สน้อยและเกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ได้น้อยเช่นกัน จึงทำให้มีจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่ากรณีของโฟมยางที่เติม OBSH เป็น blowing agent เมื่อเพิ่มปริมาณยาง CR ลงไปในยางผสมนั้น การมียาง CR จะทำให้ยางคอมปาวด์ที่ได้มีทั้ง  $ts_2$  และ  $tc_{90}$  ที่นานขึ้น ดังนั้น blowing agent จะมีการกระจายตัวที่ดี อีกทั้งการมี nano silica ที่กระจายตัวได้ดีมากขึ้น เมื่อมียาง CR เพิ่มมากขึ้น โอกาสในการกระจายตัว และแตกตัวให้แก๊สของ blowing agent จะมากขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากกรณีของยางผสมที่มี CR 80-100 % ขนาดของเซลล์โฟมในโฟมที่มี OBSH และโฟมที่มี ADC จะมีขนาดที่เล็กลงและ cell density ที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของโฟม นอกจากนั้นแล้ว หากสังเกตโฟมที่เตรียมโดยมี ADC ผสมเซลล์จะมีความหนาแน่นมากกว่า ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลในที่สุด [32, 34]

**ความหนาแน่น (density) ของโฟม** โดยทั่วไปแล้วสำหรับโฟม หากจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าสูง ย่อมทำให้ความหนาแน่นต่ำ แต่พิจารณาโฟมยางที่เติม OBSH สำหรับยางผสมนี้ การมียาง CR จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง CR มีความหนาแน่นสูงกว่ายาง NR (ข้อมูลตอนที่ 4.3.3 ) ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.45 (b) แต่ในกรณีของโฟมยางผสมที่มี

การเติม ADC เป็น blowing agent นั้น ความหนาแน่นของเซลล์โฟมจะขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สที่แตกตัว (แม้จะไม่ได้วัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น แต่พิจารณาจากอุณหภูมิในการขึ้นรูป) ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 160 °C นี้ ADC ยังไม่สามารถแตกตัวให้แก๊สได้เต็มที่ [32] อีกทั้ง  $ts_2$  และ  $tc_{90}$  ของยางคอมปาวด์สั้น ปริมาณแก๊สและฟองจึงเกิดน้อย ทำให้เซลล์โฟมหนา หรืออีกนัยหนึ่งมีเนื้อของยางอยู่มากดังนั้น ความหนาแน่นของโฟมจึงสูงกว่าของยางที่มี OBSH เป็น blowing agent อย่างมาก จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ยางผสมเกิดโฟมจากการเติม ADC จะมีความหนาแน่นลดลง เมื่อยาง CR เพิ่มขึ้นถึง 60 % นั้นเป็นผลจากการที่ ฟองแก๊สเกิดเพิ่มขึ้นจากการแตกตัวในขณะขึ้นรูปโฟม เนื่องจาก ADC สามารถแพร่ไปในเนื้อยางได้นานขึ้น เนื่องจากเมื่อมียาง CR ในยางผสมมากขึ้นนั้น  $ts_2$  และ  $tc_{90}$  ของยางคอมปาวด์จะนานขึ้น ทำให้การละลายและการกระจายตัวของ ADC รวมถึงการแตกตัวสะสมของแก๊สเกิดมากขึ้น ทำให้โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นลดลง トラバเมื่อปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้นเป็น 70 -100 % เซลล์มีขนาดเล็กลงไปเรื่อย ๆ แต่มีความหนาแน่นของเซลล์เพิ่มขึ้น แสดงถึงปริมาณยาง CR มีผลต่อการกระจายตัวของสารฟู่ และต่อความหนาแน่นของเซลล์ ซึ่งที่อัตราส่วนตั้งแต่ยาง CR 60 %ขึ้นไปนี้ ยาง CR จะเป็นวัฏภาคหลัก ดังนั้นโฟมยางผสมที่มียาง CR 60 % ขึ้นไปนี้ ความหนาแน่นของโฟมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณยาง CR

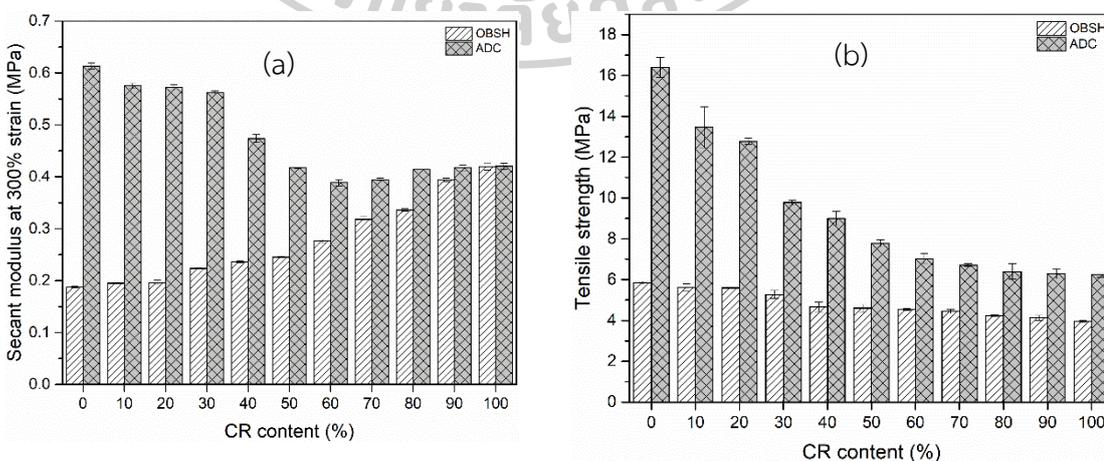
#### 4.4.3 สมบัติความทนทานต่อแรงดึงของโฟมยาง cNR/CR ที่มีการเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

ความสามารถในการทนต่อแรงดึงของวัสดุโฟมนั้น ขึ้นอยู่กับเนื้อของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะชนิดของพอลิเมอร์ ปริมาณการเกิด crosslink สารตัวเติม ว่าสามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง หรือทำหน้าที่เป็น plasticizer และแน่นอน คือ สันฐานวิทยาของโฟม หากโฟมที่ผนังเซลล์หนา จะมีความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงดึงได้ดี [35] สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทดสอบความทนทานต่อแรงดึงของโฟมยางผสม cNR/CR ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยจะไม่ทำการ normalize ตามความหนาแน่นของวัสดุ (specific tensile properties) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.46-4.47

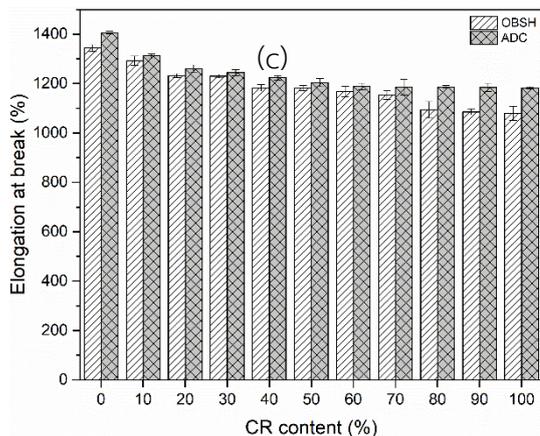


รูปที่ 4.46 Stress-Strain ของโฟมยาง cNR/CR ที่เติม (a) OBSH เปรียบเทียบกับ (b) ADC เป็น Blowing agent

จากรูปที่ 4.46 ซึ่งแสดงกราฟ Stress-Strain ของโฟม จะเห็นได้ว่า ยางผสมเมื่อเตรียมเป็น โฟม สมบัติจะลดลงมาก (เปรียบเทียบกับยาง cNR/CR ในตอนที่ 4.3.4) ซึ่งเป็นผลจากการที่เนื้อยาง ถูกแทนที่ด้วยฟองอากาศ จึงใช้แรงคั้นน้อยลงในการทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการยืดตัวแต่ ความสามารถในการยืดตัวยังใกล้เคียงค่าเดิม โดยโฟมยังสามารถแสดงพฤติกรรมการเกิด Stress induced crystallization เนื่องจากยางยังคงมีผนังของเซลล์โฟมที่ยึดต่อเนื่องและเนื้อยางยังคงเป็น อีลาสโตเมอร์เหมือนเดิม กล่าวคือ เนื้อยางยังคงมี crosslink type และ crosslink density ไม่ เปลี่ยนแปลงเนื่องจากยังคงมีสารเคมีสำหรับการ vulcanize เหมือนเดิม สำหรับพารามิเตอร์ที่ได้จาก กราฟ stress-strain โดยในตอนนี้จะนำเสนอเพียง secant modulus ที่ 300 %strain, tensile strength at break และ elongation at break ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.47







รูปที่ 4.47 (a) Secant modulus ที่ 300 % strain, (b) tensile strength, และ (c) elongation at break ของโฟมยาง cNR/CR ที่เติม OBSH เปรียบเทียบกับที่เติม ADC เป็น blowing agent

**Secant Modulus:** ของโฟม cNR/CR ที่มี OBSH เป็น blowing agent ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.47 (a) จากผลการทดลองจะเห็นว่า ซีแคนท์มอดูลัสของโฟมยาง cNOC100 ซึ่งมียาง CR 100 % มีค่าสูงกว่าโฟมยาง cN100C0 แม้ว่าจากการทดสอบ MDR ค่า MH และ DT (ในตารางที่ ก.14) จะมีค่าสูงก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลมาจากยาง CR มีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบในทุกหน่วยซ้ำ ทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก ส่งผลให้โมเลกุลของยาง CR เคลื่อนไหวได้ยากและมีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR ดังนั้น ยางผสมที่มีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น โฟมยาง cNR/CR มีค่าซีแคนท์มอดูลัส ณ อุณหภูมิห้อง เพิ่มขึ้นตามปริมาณยาง CR กรณีของยางผสมที่มีปริมาณยาง CR 70% ขึ้นไปนั้น nano silica จะกระจายตัวได้ดีมาก เนื่องจาก NR และยาง CR สามารถเกิดอันตรกิริยากับซิลิกาผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมของคลอรีนกับหมู่ไฮดรอกซิลในซิลิกาทำให้โฟมยางที่ได้มีความแข็งได้มากขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยาง CR เพิ่มขึ้น และนั่นทำให้ nano silica สามารถเสริมแรงยางได้ดี จึงทำให้การเพิ่มขึ้นของซีแคนท์มอดูลัสเบี่ยงเบนจากการเพิ่มขึ้นในเชิงเส้นเล็กน้อย

สำหรับโฟมยาง cNR/CR ที่มี ADC เป็น blowing agent สูงกว่าโฟมยาง ที่มีการเติม ADC เป็น blowing agent จากความหนาแน่นของเซลล์ในโฟมต่ำ ขณะที่ความหนาแน่นสูง และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟม จะเห็นว่าโฟมมีเนื้อพอลิเมอร์ค่อนข้างมาก (ภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.42) ดังนั้นเมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างโฟมทดสอบจะมีเนื้อพอลิเมอร์ที่รับแรงกระทำมาก ดังนั้นความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหรือซีแคนท์มอดูลัสจึงสูง [35, 65] เมื่อความหนาแน่นของเซลล์ (cell density) เพิ่มขึ้นความหนาแน่นของผนังเซลล์ลดลง ดังนั้นความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปจึงลดลง จากรูปที่ 4.47 (a) จะเห็นได้ว่า secant modulus ของโฟมที่มี ADC เป็น blowing agent จะมีค่าลดลงจาก cN100C0 - cN40C60 หากพิจารณาโฟมยางในกลุ่มนี้ จะพบว่าโฟมมีขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับความหนาแน่นของเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนาแน่นของโฟมลดลง นั่นหมายถึงผนังของเซลล์ที่บางลง ด้วยเหตุนี้ secant modulus จึงลดลง เมื่อพิจารณาโฟมที่มียางผสมในอัตราส่วน

cN30C70 - cN0C100 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ยางผสมมียาง CR เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ขนาดของเซลล์โฟมเริ่มลดลงอีกครั้ง และเป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดของเซลล์ในโฟมใกล้เคียงกับโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent ความหนาแน่นของเซลล์ในโฟมเริ่มเพิ่มขึ้น และการลดลงของความหนาแน่นของโฟมมีลักษณะที่ชะลอตัว ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นอิทธิพลของยาง CR กับการเกิดฟองโดยการทำงานของ ADC กับ OBSH เริ่มมีอิทธิพลไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่า ณ อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 160 °C นี้ ADC จะไม่สามารถแตกตัวให้แก๊สได้อย่างเต็มที่ เพราะอุณหภูมิยังไม่สูงพอ แต่การที่ยางคอมปาวด์มีเวลาในการ cure ที่นานขึ้น ทำให้มีการสะสมของแก๊สที่ค่อย ๆ แตกตัวมาจาก ADC เพิ่มมากขึ้น พร้อมกับมีการกระจายของสารนี้ในเนื้อยางได้ดีขึ้น และมากขึ้นในยางผสมที่มีอัตราส่วนของยาง CR 70-100 % นี้ ดังนั้นในยางผสมที่มี CR 70-100 % นี้จึงแสดงค่า secant modulus ของโฟมที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ CR ที่มีอยู่ในโฟม

**Tensile strength** รูปที่ 4.47 (b) แสดงค่า tensile strength ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เป็น blowing agent จากผลการทดลองโดยทั่วไป จะพบว่า tensile strength ของวัสดุโฟมมีค่าต่ำกว่ายางที่ vulcanized แล้ว เนื่องจากมีฟองอากาศแทรกอยู่ในเนื้อยางทำให้ความสามารถในการรับแรงน้อยลง แต่การที่ผนังเซลล์ของโฟมที่เป็นโฟมแบบเซลล์ปิด มีความต่อเนื่องกันจึงทำให้โฟมยังสามารถเกิดการยึดได้เหมือนเดิมหรือใกล้เคียงค่าเดิม

พิจารณาโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent และมีสูตร cN100C0 หรือโฟมที่มียาง NR 100 % มีค่า Tensile strength สูงกว่า cN0C100 เนื่องจากเป็นยาง NR เป็นยาง Isoprene base rubber มีการจัดเรียงโมเลกุลแบบ random coil เมื่อได้รับแรงกระทำจะสามารถเกิด strain hardening หรือ stress induced crystallization ได้มากกว่ายาง CR สำหรับยางผสม cNR/CR มีค่า Tensile strength จะมีค่าลดลงเมื่อยางผสมมียาง CR เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง CR สามารถจัดเรียงโมเลกุลไปตามแนวแรงดึง หรือแสดงพฤติกรรม Stress-induced crystallization ได้น้อยกว่ายาง NR นอกจากนั้นวัฏภาคของยางผสมที่เป็นผนังของเซลล์โฟม ก็มีส่วนในการทำให้ Tensile strength ลดลงอีกด้วย

สำหรับโฟม cNR/CR ที่มี ADC เป็น blowing agent นั้นมีค่า Tensile strength ที่สูงกว่าโฟมที่มี OBSH เป็น Blowing agent หากกลับไปพิจารณาภาพถ่าย SEM จะพบว่าตัวอย่างโฟม มีผนังเซลล์หนา จึงทำให้ความหนาแน่นของเซลล์น้อยและต่ำกว่าโฟม cNR/CR ที่มี OBSH เป็น blowing agent จึงทำให้โฟมยางที่มี ADC เป็น blowing agent มีค่า tensile strength สูงกว่ายางโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent จากผลการทดลองยังพบอีกว่าโฟมจากยาง cNR/CR มีค่า

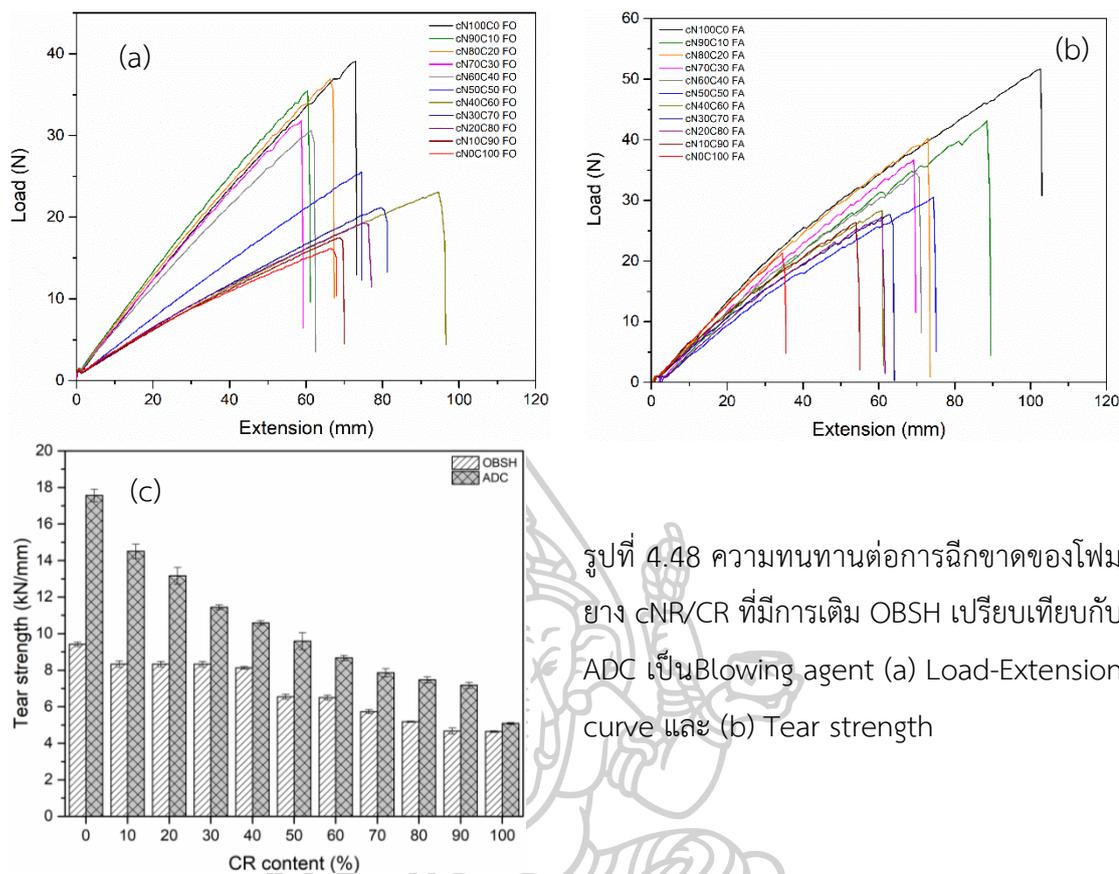
tensile strength ลดลง เมื่อโฟมมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นตามเหตุผลที่ได้กล่าวในตอนก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามจากขนาดของเซลล์ที่มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.44 และความหนาแน่นของโฟม เป็นไปตามรูปที่ 4.45 ดังนั้นการลดลงของค่า tensile strength จึงไม่ได้เป็นเชิงเส้นแบบที่พบในโฟมยางที่มี OBSH เป็น blowing agent

**Elongation at break** รูปที่ 4.47 (c) แสดงผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของโฟมยาง cNR/CR จะเห็นได้ว่าค่าการยืดออก ณ จุดขาดของโฟม cN100CR0 มีค่าสูงที่สุด และจะมีค่าลดลง เมื่อยาง CR เพิ่มขึ้น หนึ่งความสามารถในการยืดตัวของยางนั้นขึ้นกับชนิดของยาง crosslink types และ crosslink density สำหรับยาง vulcanizate ที่ทำเป็นโฟมเป็นยางที่ vulcanized ด้วยระบบ semi efficient vulcanization ซึ่งมีชนิดของการเชื่อมโยงทั้ง polysulfide และ mono, di sulfide (ผลการทดลอง heat aging ตอนที่ 4.3.10) ซึ่งชนิดของการเชื่อมโยงแบบนี้รวมทั้งเป็นยาง NR ทำให้มีความสามารถในการยืดได้ดีมาก เมื่อ cNR/CR มีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น elongation at break จะลดลง เนื่องจากความสามารถในการยืดตัวของยาง CR มีน้อยกว่ายาง NR แม้ว่าตัวอย่างทดสอบจะเป็นโฟมซึ่งมีฟองอากาศ แต่การที่โฟมเป็นแบบเซลล์ปิด ผนังของเซลล์มีความต่อเนื่องยึดโยงกัน จึงทำให้ยางโฟมยังคงความสามารถในการยืดตัวได้สูงกว่า 1000 % strain

เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดของ blowing agent จากผลการทดสอบ cell density ของโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent นั้นมี cell density มากกว่า โฟมที่มี ADC เป็น blowing agent ซึ่งเป็นผลทำให้ foam density ของโฟมยางชนิดหลังมีค่าสูงกว่า อีกทั้งผนังเซลล์โฟมของยางชนิดหลังจะหนากว่า จึงส่งผลให้ยางโฟมมีความสามารถในการยืดได้ดีกว่า ยางโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent

#### 4.4.4 ความทนทานต่อการฉีกขาดของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent

ดังที่ได้กล่าวในตอนที่ 4.3.5 ถึงสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดนั้นโดยทั่วไปเมื่อให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบที่ตัดเป็นรูปตัว C นั้นแรงกระทำส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดการ crack จากนั้น แรงกระทำส่วนต่อมาจะทำให้รอย crack เกิดการแผ่ขยายจนชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน แต่สำหรับวัสดุโฟม เมื่อถูกตัดให้เป็นรูปตัว C จะมีรอยเปิดของยางอยู่ก่อนเนื่องจากมีฟองอากาศ ดังนั้นเมื่อให้แรงกระทำจะทำให้เกิดการแผ่ขยายของรอยฉีก จึงพบว่า tear strength มีค่าต่ำกว่ายาง cNR/CR ดังแสดงในรูปที่ 4.48 และเปรียบเทียบกับความทนทานต่อการฉีกขาดกับยาง ในตอนที่ 4.3.5



รูปที่ 4.48 ความทนทานต่อการฉีกขาดของโพลีเมียง cNR/CR ที่มี การเติม OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent (a) Load-Extension curve และ (b) Tear strength

จากรูปที่ 4.48 (a)-(b) แสดงกราฟ load กับ extension ของโพลีเมียง cNR/CR ที่มี OBSH และ ADC เป็น blowing agent ตามลำดับ จากกราฟดังกล่าวจะพบว่า โพลีเมียงมี load ที่ใช้ในการดึงขึ้นทดสอบ รวมถึง extension ที่ต่ำกว่าของยง cNR/CR ในตอนที่ 4.3.5 อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น นอกจากนั้นยังพบอีกว่า โพลีเมียงที่มี OBSH เป็น blowing agent แสดง load extension ที่ต่ำกว่า โพลีเมียงที่มี ADC เป็น blowing agent ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากโพลีเมียงที่มี ADC เป็น blowing agent มี cell density ที่น้อยกว่า ผนังเซลล์ของโพลีเมียงที่หนากว่า ความทนทานต่อการฉีกขาด โดยพิจารณาจาก load สูงสุด จึงสูงกว่านั่นเอง

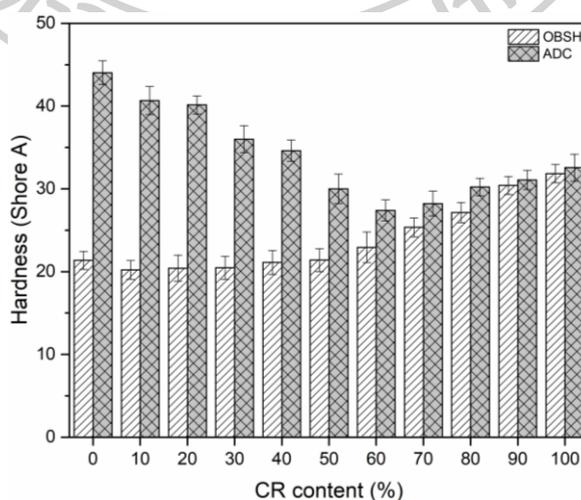
สำหรับค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของโพลีเมียงหรือค่า Tear Strength ของโพลีเมียง cNR/CR ที่มี OBSH และ ADC เป็น Blowing agent ซึ่งแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.48 (c) จะพบว่าโพลีเมียง cNR/CR สูตร cN100C0 มีค่า Tear Strength สูงที่สุด โพลีเมียง cN0C100 มีค่า Tear Strength ต่ำที่สุด เนื่องจากยง cN100C0 หรือโพลีเมียง NR 100 % ผนังเซลล์โพลีเมียงที่เป็นยงสามารถจัดเรียงโมเลกุลไปตามแนวแรงดึง เกิดปรากฏการณ์ Stress-induced crystallization จึงช่วยเสริมทำให้ยงแข็งแรง จึงมีความทนทานการฉีกขาด สำหรับโพลีเมียง cN0C100 สามารถจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงดึงได้น้อยกว่ายง NR เนื่องจากยง CR มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงกว่า จึงเกิด

การยึดตัวได้ยากกว่า tear strength จึงต่ำกว่าโฟม cN100C0 พิจารณากรณีโฟมยาง cNR/CR เมื่อมียาง CR ผสมลงใน NR tear strength จึงลดลงตามปริมาณยาง CR ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบโฟมที่มี blowing agent ที่แตกต่างกัน ดังที่ได้พบผลการทดสอบจากภาพถ่าย SEM foam's cell density และ density ของโฟม โดยที่โฟมที่เติม ADC เป็น blowing agent มีผนังของเซลล์ที่หนากว่า เนื่องจาก cell density ที่น้อยกว่า จึงทำให้ density ของโฟมมากกว่า และจึงทำให้ tear strength ของโฟมที่เติม ADC นี้มีพื้นที่รับแรงกระทำมากกว่า ซึ่งทำให้ค่าดังกล่าวสูงกว่า ยางโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent

#### 4.4.5 สมบัติความแข็งของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent

ดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้นที่ 4.3.6 ว่าสมบัติความแข็งนั้น อยู่กับชนิดของยาง และยาง CR มีความแข็งมากกว่ายาง NR เนื่องจากโครงสร้างของยาง CR ที่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล นอกจากนั้น crosslink density ในยางทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นด้วย [46] อย่างไรก็ตาม เมื่อยางนั้นมีฟองอากาศเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อยาง ย่อมทำให้ความแข็งของยางนั้นลดลง ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.49 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.33 ในตอนที่ 4.3.6) อนึ่งในการทดสอบค่าความแข็งของโฟมนั้นปกติแล้วจะไม่ทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบความแข็งชนิด Shore A เนื่องจากโฟมเป็นวัสดุนิ่ม และมีฟองอากาศอยู่ภายใน (sponge/cellular rubber) โดยปกติแล้วจะทดสอบด้วย Durometer ชนิด Asker C [66] เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความแข็งของโฟมยางกับยาง ในการทดลองตอนนี้จึงใช้ Durometer ชนิด Shore A ในการทดสอบความแข็งของโฟม



รูปที่ 4.49 ค่า Hardness (Shore A) ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent

ค่าความแข็ง Hardness ชนิด Shore A เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งที่บริเวณผิวของวัสดุ ซึ่งได้แสดงค่าความแข็งที่ผิวไว้ดังรูปที่ 4.49 จากผลการทดสอบพบว่าความแข็งของโฟม cNR/CR ที่มี OBSH เป็น blowing agent มีค่าที่มากขึ้น เมื่อมีปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง CR เป็นยางที่แข็งกว่ายาง NR และการที่โมเลกุลมีอะตอมของคลอรีนในทุกหน่วยซ้ำทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยาง CR ในทุกหน่วยซ้ำ โมเลกุลสามารถอัดตัวกันได้แน่น ทำให้ยาง CR มีความยืดหยุ่นน้อยกว่ายาง NR ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นที่ 4.3.6 ปรากฏการณ์ที่พบอีกประการหนึ่งในโฟมบางระบบนี้คือ ค่าความแข็งของโฟมเพิ่มเมื่อยาง CR เพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากกรณีของโฟมยางที่มี ADC เป็น blowing agent สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอย่างหนึ่งคือ สำหรับ blowing agent ชนิด OBSH นี้จะทำงานได้ดี ณ อุณหภูมิที่ขึ้นรูปโฟมนี้ ดังนั้น ปัจจัยเรื่องความสามารถในการแตกตัวของ OBSH ในพอลิเมอร์และเกิดเป็นฟองอากาศในยาง จึงไม่มีความแข็งจึงขึ้นกับปริมาณของยาง CR ในวัสดุโฟม ซึ่งจะแตกต่างจากกรณีโฟมที่มี ADC เป็น blowing agent ในกรณีนี้ ADC ไม่สามารถแตกตัวให้แก๊สได้หมด เนื่องจากอุณหภูมิที่ขึ้นรูปต่ำอุณหภูมิการทำงานของ ADC มาก ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจึงขึ้นกับเวลาในการสกอร์ชและการ cure ของเนื้อยาง ซึ่งสะท้อนออกมาเป็นลักษณะของฟองอากาศในเนื้อยาง ขนาดของเซลล์โฟม ความหนาของผนังเซลล์ของโฟม cell density และ density ของโฟม

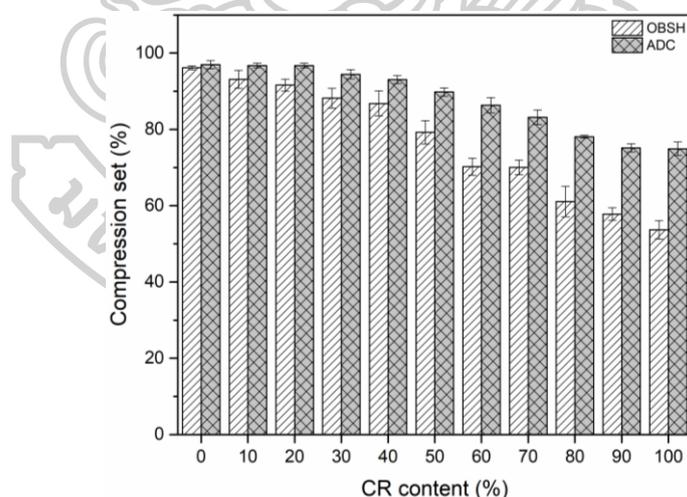
หากพิจารณา cell density ของโฟม ในรูปที่ 4.45 จะเห็นว่าโฟมที่มี ADC เป็น blowing agent มีค่าน้อยกว่ากรณี OBSH นั้นหมายถึง density ของโฟมที่สูงกว่า และผนังของเซลล์ในโฟมที่มากกว่า จึงมีผลทำให้โฟมที่มี ADC มีค่าความแข็งที่มากกว่าโฟมที่มี OBSH เป็น blowing agent อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะในโฟม cNR/CR ที่มี ADC เป็น blowing agent จะพบว่าความแข็งของโฟมขึ้นอยู่กับปริมาณของยาง CR ในทิศทางที่ต่างกัน ดังนี้ กรณีที่ยางมีปริมาณยาง CR 0-60% ที่อัตราส่วนช่วงนี้ พบว่าเมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น ขนาดของเซลล์โฟมจะใหญ่ขึ้น cell density เพิ่มขึ้น ขณะที่ density ของโฟมลดลง ซึ่งนั่นหมายถึงผนังเซลล์ที่บางลง ทำให้ความแข็งลดลงเมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น

หากพิจารณาขนาดของเซลล์ของโฟมและ cell density ในระบบ ADC ในรูปที่ 4.45 จะพบว่ามีความเล็กกว่า และน้อยกว่าในโฟมระบบ OBSH ดังนั้นความแข็งของโฟมระบบ ADC จึงมากกว่าของระบบ OBSH สำหรับยางที่มีปริมาณยาง CR 70 % ขึ้นไปนั้น จะพบว่าเซลล์โฟมระบบ ADC มีขนาดเล็กลงอีกครั้ง และขนาดใกล้เคียงกับของโฟมยางระบบ OBSH นอกจากนี้ density ของโฟมยางระบบ ADC ยังเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้น และสูงกว่าโฟมยางระบบ OBSH

นอกจากนั้นหากพิจารณาจากภาพถ่าย SEM โฟมยางระบบ ADC มีผนังเซลล์ที่หนา จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของโฟมระบบนี้สูงกว่าความแข็งแรงของโฟมยางระบบ OBSH

#### 4.4.6 สมบัติการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัด (compression set) ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent

ค่า Compression set เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการคืนตัวกลับ หลังได้รับแรงกดอัด ภายใต้อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ซึ่งจะแสดงโดยนัยถึงสมบัติความเป็น elastic ของโฟม โดยโฟมยางที่มีค่า Compression set มาก แสดงว่ามีความสามารถในการคืนได้น้อย (มีการเปลี่ยนแปลงความหนาจากเดิมมาก) และในทางตรงกันข้ามถ้าโฟมยางมีค่า Compression set น้อย แสดงว่าโฟมยางสามารถคืนตัวกลับได้มาก (มีการเปลี่ยนแปลงความหนาจากเดิมน้อย) ซึ่งค่า Compression set แสดงให้เห็นถึงการเกิด Permanent deformation (การเสียรูปถาวรของวัสดุ) ของโฟมยางหลังจากถูกกดอัดภายใต้อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง และในช่วงเวลาหนึ่ง ความสามารถในการคืนตัวนี้มีความสำคัญมากต่อวัสดุโฟม หรือ cellular materials เนื่องจากการประยุกต์นำวัสดุประเภทนี้ไปใช้โดยส่วนมากจะเป็นประเภท cushion ซึ่งต้องอาศัยความสามารถในการคืนตัวที่ดี รูปที่ 4.50 แสดงผลการทดสอบ compression set ของโฟมยางในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.50 ค่า Compression set ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการคืนตัวของวัสดุนั้น ขึ้นอยู่กับ compression stress ช่วงเวลาในการให้แรงกด และอุณหภูมิที่ทดสอบ โดยปกติสามารถทำการทดสอบโดยความคุมระยะการกดหรือระยะที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการ deform (controlled deflection) หรือ โดยการควบคุมแรงกด (controlled compressive force) ในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบแบบ controlled

deflection ซึ่งสำหรับโฟมยาง หรือ ยางโฟม compressive strength จะขึ้นอยู่กับ bulk density, cell size และการมีสารเสริมแรงหรือไม่ อย่างไรก็ตามสมบัติความเป็นอีลาสติกมีความสำคัญต่อความสามารถในการคืนตัวของโฟมเช่นกัน ซึ่งความเป็นอีลาสติกของยางขึ้นอยู่กับ crosslink density (กรณีที่สารเติมแต่งอื่น ๆ เท่ากัน) หากเป็นยางผสม ความเป็นอีลาสติกจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง และ อัตราส่วนของยางผสม [46]

รูปที่ 4.50 แสดงค่า Compression set ของโฟมยางผสม cNR/CR ที่ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH และ ADC เป็น Blowing agent พบว่าโฟมยาง cN100C0 มีค่า compression set มากที่สุด หรือ เกิด permanent deformation มากที่สุดในทางกลับกัน โฟมยาง cN0C100 มีค่า compression set น้อยที่สุด สามารถคืนตัวกลับได้มากที่สุด พิจารณาระบบในการคงรูปยางที่ใช้เป็นระบบที่ใช้กำมะถันแบบปกติ (Conventional Vulcanized System; CV) ซึ่งพันธะการเชื่อมโยงที่ได้เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslink) เมื่อได้รับความร้อนขณะกดอัด ความร้อนจะทำให้พันธะการเชื่อมโยงระหว่างซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์เกิดการแตกออก หรืออีกนัยหนึ่ง polysulfide linkage มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ เนื่องจากพลังงานพันธะระหว่าง S-S มีค่าต่ำ จึงเกิดการแตกออกได้ง่าย [41, 53] ดังนั้นความเป็นอีลาสติกของยางจึงลดลง สำหรับกรณี cN0C100 การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นโดย sulfur นั้นเกิดได้น้อย เนื่องจากการละลายของ sulfur เข้าไปในยาง CR ไม่ดีเท่ากับในยาง NR ดังนั้นพันธะของการเชื่อมโยงที่เกิดเป็นการกระตุ้น (boost) ด้วย ETU และเกิดพันธะแบบ mono และ disulfide crosslink ซึ่งทนต่อความร้อนได้ดีกว่า (ดูผลการทดสอบ heat aging ในตอนที่ 4.3.10 ประกอบ) และอีกเหตุผลหนึ่งคือยาง NR มีสมบัติการทนต่อความร้อนได้ต่ำกว่ายาง CR เมื่อได้รับความร้อนส่งผลให้ปลายสายโซ่เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งมีความว่องไวในการจับตัวกับออกซิเจน ทำให้ปลายสายโซ่ที่ขาดไม่สามารถรวมตัวกลับดังเดิมได้ ส่งผลให้ความสามารถในการคืนตัวกลับลดลง [22]

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความสามารถในการคืนตัวกลับดีขึ้น เมื่อขนาดของเซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเซลล์โฟมมีลักษณะกลมและผนังเซลล์เชื่อมต่อกันเป็นร่างแหจำนวนมาก ส่งผลให้ความสามารถในการคืนตัวกลับที่ดีกว่าโฟมที่มีลักษณะเซลล์โฟมขนาดใหญ่ [25]

เมื่อเปรียบเทียบโฟมยางที่มี OBSH เป็น Blowing agent เปรียบเทียบกับ ADC พบว่าโฟมที่มี blowing agent ชนิดหลัง เกิด permanent deformation ได้มากกว่ากรณีแรก หากพิจารณาโฟมยางระบบ ADC แม้เซลล์โฟมจะมีขนาดเล็ก แต่มีจำนวนน้อย หรือ cell density มีค่าน้อย ดังนั้นผนังเซลล์โฟมจะหนามาก อย่างไรก็ตาม ADC ที่ยังคงเหลืออยู่ในปริมาณมากหลังจากการขึ้นรูปที่

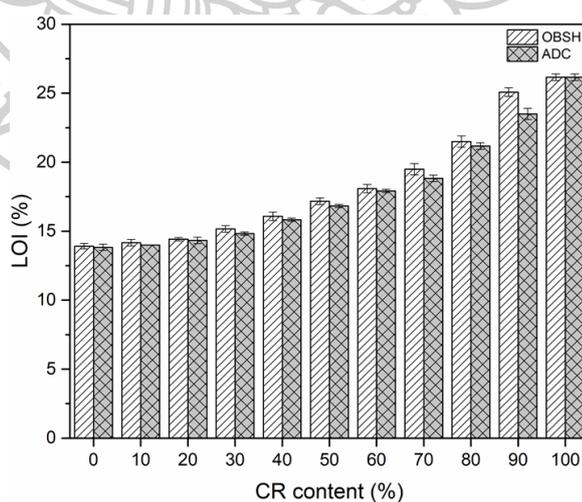


อุณหภูมิ 160 °C อาจทำหน้าที่เป็น plasticizer ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการ slip ผ่านกันได้ ขณะทำการทดสอบ compression set ที่อุณหภูมิสูง โฟมยางในระบบ ADC จึงเกิด permanent deformation ได้มากกว่า โฟมยางระบบ OBSH และเมื่อเพิ่มปริมาณยาง CR ในยางผสม การเกิด permanent deformation ลดลงเนื่องจากเนื้อยางมีพันธะ mono และ disulfide เพิ่มขึ้นทนความร้อนได้ดีขึ้น อีกทั้งเซลล์ของโฟมระบบนี้เริ่มมีขนาดที่ลดลงอีกครั้ง และ cell density ที่เพิ่มขึ้นมาก จึงทำให้ permanent deformation ลดลง

อย่างไรก็ตาม โฟมยางระบบ ADC มีการเกิด permanent deformation ที่สูงกว่า โฟมยางระบบ OBSH โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณยาง CR 60% ขึ้นไป ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มี ADC เหลืออยู่ในเนื้อยาง และทำหน้าที่เป็น plasticizer ให้กับเนื้อยางนั่นเอง

#### 4.4.7 สมบัติการติดไฟของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น Blowing agent โดยเทคนิค LOI และ UL-94 test

**Limiting Oxygen Index:** ได้กล่าวไว้แล้วในตอน 4.3.9 ว่า Limiting oxygen index (LOI) คือดัชนีชี้วัดความสามารถในการติดไฟ โดยวัดจากค่าความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์ต่ำสุดของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศที่ใช้ทำให้วัสดุชิ้นที่ทดสอบนั้นติดไฟลาม ไม่ดับไปเอง หรือสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง วัสดุที่มีค่า LOI สูงกว่า 21 % ก็จะจัดอยู่ในประเภทที่ดับไฟได้ด้วยตัวเอง ผลการทดสอบ LOI ของโฟมที่มีการเติม OBSH และ ADC เป็น blowing agent แสดงดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 ค่า LOI ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

จากผลการทดสอบ LOI ของโฟมที่แสดงในรูปที่ 4.51 โดยเปรียบเทียบค่า LOI ของยางที่แสดงในตอน 4.3.9 จะพบว่าค่า LOI มีค่าลดลงเล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากโฟมมีเนื้อยางที่ลดลง

นอกจากนี้พฤติกรรมการติดไฟของโฟม ยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม กล่าวคือ เมื่อปริมาณของยาง CR เพิ่มขึ้นค่า LOI จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง CR มีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง เมื่อได้รับเปลวไฟหรือการเผาไหม้จะก่อตัวเป็นถ่านขึ้นบริเวณพื้นผิวทำให้มีความเป็นฉนวนความร้อน และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับยาง จึงทำให้โฟมยางที่มีอัตราส่วนของยาง CR เพิ่มขึ้นทนการลามไฟได้มากขึ้น หากเปรียบเทียบโฟมยางในระบบ OBSH จะพบว่ามีความ LOI สูงกว่า โฟมยางระบบ ADC หรือกล่าวอีกอย่างว่า โฟมระบบ ADC ติดไฟได้ง่ายกว่าเล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากโฟมยางระบบ OBSH อาจเป็นผลมาจากการมีอยู่ของ ADC ที่เหลือหรือแตกตัวไม่หมด แพร่มาที่ผิวด้านในติดไฟง่าย

**UL-94:** ผลการทดสอบ UL-94 โดยนำเสนอเป็น rating ของโฟมยางแสดงในตารางที่ 4.7 ผลการทดลองในตอนนี ผู้วิจัยอธิบายความหมายของ rating อีกครั้งเพื่อความเข้าใจ ผลการทดสอบการลามไฟ ซึ่งทดสอบด้วย UL-94 สำหรับโฟมยาง cN100C0 มีอัตราการลามไฟอยู่ในเกณฑ์ V-2 สำหรับลักษณะการลามไฟระดับ V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 นั้น เมื่อยางถูกเปลวไฟเผาไหม้ตามเวลาที่กำหนดและนำชิ้นทดสอบออกจากเปลวเพลิงสังเกตเวลาในการลุกไหม้ต้องหยุดภายใน 30 วินาที อนุญาตให้หยดของพอลิเมอร์เกิดการลุกไหม้ ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 จะเห็นว่ายาง cN100C0 และยางผสมที่มียาง CR 10-70 % มีสมบัติการลามไฟในอัตรา (rating) V-2 แม้ว่ายางผสมจะมียาง CR ผสมอยู่ถึง 70 % แล้วก็ตาม ซึ่งผลการทดสอบ โฟมยางก็ให้ผลเช่นเดียวกับในยางผสม ตารางที่ 4.7 UL-94 rating ของโฟมยาง cNR/CR ที่มี OBSH เปรียบเทียบกับ ADC เป็น blowing agent

สูตร	UL-94 Classification	
	OBSH	ADC
Blowing agent		
cN100C0	V-2	V-2
cN90C10	V-2	V-2
cN80C20	V-2	V-2
cN70C30	V-2	V-2
cN60C40	V-2	V-2
cN50C50	V-2	V-2
cN40C60	V-2	V-2
cN30C70	V-2	V-2

cN20C80	V-1	V-1
cN10C90	V-1	V-1
cN0C100	V-0	V-0

ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนที่ 4.3.9 ว่ายาง CR เป็นยางที่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากเมื่อได้รับเปลวไฟ แล้วนำเปลวไฟออก จะไม่เกิดการลุกลามต่อเนื่อง เนื่องจากมีของแข็งสีดำ (carbonaceous compound) ปกคลุมผิว ทำให้การหดของยาง cN20C80 ไม่เกิดขึ้น (V-1 เกิดการดับไฟภายในเวลาน้อยกว่า 30 วินาทีและไม่มีหยดของยาง) ซึ่งจะพบปรากฏการณ์เช่นเดียวกันในโฟมยางทั้ง 2 ระบบ จึงสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณยาง CR ที่ 80 % นี้สามารถช่วยต่อต้านการลามไฟได้ดี เมื่อปริมาณยาง CR เพิ่มขึ้นเป็น 90 % การดับไฟได้ด้วยตัวเองจะยิ่งดีขึ้น เพราะมีปริมาณยาง CR มากขึ้น ดังนั้นในกรณีของยางทดสอบ UL-94 จึงพบว่าไฟจะดับภายในช่วงเวลาน้อยกว่า 10 วินาที โดย rating ของการลามไฟ เป็น V-0 แต่เมื่อเป็นโฟมยาง UL-94 rating โฟมจากยาง cN10C90 อยู่ในระดับ V-1 ซึ่งหมายความว่าโฟมยาง สามารถติดไฟได้นานกว่ายาง คือ เปลวไฟลุกลามต่อเนื่องได้นานกว่า 10 วินาทีแต่ภายใน 30 วินาทีเปลวไฟจึงจะดับดังนั้นจึงถูกจัดเป็นแบบ V-1 หากพิจารณาเปรียบเทียบกับ solid rubber ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจากเปลวไฟ จะเกิด carbonaceous compound ปกคลุมที่ผิวจนหมด ขณะที่ เมื่อวัสดุโฟมได้รับเปลวไฟ บริเวณที่สัมผัสกับเปลวไฟเกิดการเผาไหม้แล้วเกิด carbonaceous compound เกิดที่ผิวที่สัมผัสกับเปลวไฟก่อน เนื้อพอลิเมอร์ที่ผนังเซลล์ลึกเข้าไปภายในฟองยังเกิดการเผาไหม้ช้ากว่า ทำให้ยังสามารถเกิดการลุกลามต่อเนื่องไปได้อีก ไฟจะดับลงเมื่อเกิด carbonaceous compound อย่างทั่วถึงทั้งผิวทางด้านนอกและด้านในของโฟม ดังนั้นการดับไฟด้วยตัวเองจึงช้าลง UL94 rating จึงถูกจัดเป็น V-1 อย่างไรก็ตามกรณี cN0C100 นั้น เซลล์มีขนาดเล็ก cell density น้อย และ density ของโฟมสูง นั้นแสดงถึงเนื้อยาง CR ที่มีมาก เมื่อเกิดการเผาไหม้ จะเกิด carbonaceous compound มากกว่าจึงสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง หรือสามารถดับไฟได้ภายใน 10 วินาที จึงยังคง rating อยู่ที่ V-0 [37]

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ตอนที่ 1 การศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสม

จากการศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสมของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน โดยจะกำหนดอัตราส่วนของ NR/CR เท่ากับ 100/0, 50/50 และ 0/100 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการศึกษา Cure characteristic ของยางที่มีระบบการคงรูปที่ต่างกัน พบว่าระบบการคงรูปที่ 2 มีการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์และการเชื่อมโยงของสายโซ่ที่สูงกว่าระบบการคงรูปที่ 1 และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางคงรูปในระบบที่ 2 จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติการทนทานต่อแรงดึง สมบัติการทนทานต่อการฉีกขาด และความแข็งของยางคงรูปในระบบที่ 2 จะมีค่าที่สูงกว่ายางคงรูปในระบบที่ 1 ในทุกอัตราส่วน และสมบัติทางความร้อนของยางคงรูปในระบบที่ 2 จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางคงรูปในระบบที่ 1 และส่วนสุดท้ายสมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนจะเห็นได้ว่ายางคงรูปในระบบที่ 2 จะมีการบวมตัวที่ต่ำกว่ายางคงรูปในระบบที่ 1 เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า ซึ่งจากสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบการคงรูปที่ 2 มีความเหมาะสมที่จะเลือกนำไปศึกษาต่อไป

##### 5.1.2 ตอนที่ 2 การศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend

จากการศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend โดยการศึกษาผลของ Cure characteristic พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเกิดได้เร็วขึ้นและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/CR ระหว่าง 90/10 ถึง 10/90 จะเห็นการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วที่ต่างกัน ยังสังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน NR/CR ต่ำกว่า 40/60 ลงมายางธรรมชาติจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องและยางคลอโรพรีนจะเป็นวัฏภาคกระจาย แต่ที่อัตราส่วน NR/CR สูงกว่า 40/60 ขึ้นไปจะเกิดการกลับกันของวัฏภาคทั้งสอง สมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดออก ณ จุดขาด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่สมบัติทางความร้อน พบว่าที่อัตราส่วนผสม NR/CR ตั้งแต่ 90/10 ถึง 10/90 จะมีการสลายตัวสองขั้น (two-step decomposition) โดยขั้นแรกจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่วนการสลายตัวขั้นที่สองจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อ

อัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น และส่วนสุดท้ายสมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีน จะเห็นได้ว่าค่าการบวมตัวลดต่ำลง เมื่อส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น

### 5.1.3 ตอนที่ 3 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR

จากการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR โดยการศึกษาผลของ Cure characteristic พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเกิดได้ช้าลงจากตอนที่ 2 เล็กน้อย เนื่องจากมีการเติมนาโนซิลิกาเข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และค่าผลต่างของแรงบิดที่เพิ่มสูงขึ้นจากตอนที่ 2 ทำให้ซิลิกาที่เติมเข้าไปส่งผลให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นและแสดงได้ว่ายางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/CR ระหว่าง 90/10 ถึง 10/90 จะเห็นการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วที่ต่างกัน จะสังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน NR/CR ต่ำกว่า 40/60 ลงมายางธรรมชาติจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องและยางคลอโรพรีนจะเป็นวัฏภาคกระจาย แต่ที่อัตราส่วน NR/CR สูงกว่า 40/60 ขึ้นไปจะเกิดการกลับกันของวัฏภาคทั้งสอง และวัฏภาคกระจายมีขนาดที่เล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น เมื่อมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดออก ณ จุดขาด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลทั้งหมดมีค่าที่สูงกว่าในตอนที่ 2 ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่ายางทั้งสองมีความเข้ากันมากขึ้น เมื่อมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนพบว่าที่อัตราส่วนผสม NR/CR ตั้งแต่ 90/10 ถึง 10/90 จะมีการสลายตัวสองขั้น (two-step decomposition) โดยขั้นแรกจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่วนการสลายตัวขั้นที่สองจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น และส่วนสุดท้ายสมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีน จะเห็นได้ว่าค่าการบวมตัวลดต่ำลง เมื่อส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ซึ่งการบวมตัวที่ทุกอัตราส่วนผสมจะมีค่าการบวมตัวที่ต่ำกว่าในตอนที่ 2

#### 5.1.4 ตอนที่ 4 การศึกษาผลของชนิดของ Blowing agent ต่อโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน โดยในตอนนี้จะเปรียบเทียบ OBSH กับ ADC เป็น Blowing agent ซึ่งการศึกษาผลของ Cure characteristic พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเกิดได้เร็วขึ้นและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางผสมแสดงให้เห็นว่าเซลล์ของโฟมยางในทุกอัตราส่วนผสม แสดงลักษณะเซลล์โฟมเป็นแบบเซลล์ปิด ทั้งที่ใช้ OBSH และ ADC เป็น Blowing agent และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมที่แสดงในแต่ละอัตราส่วน พบว่าที่ใช้ OBSH เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นขนาดของเซลล์โฟมจะมีขนาดเล็กลง แต่ความหนาแน่นของเซลล์โฟมและความหนาแน่นของโฟมยางจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ใช้ ADC เมื่ออัตราส่วนของโฟมยางผสม cNR/CR ช่วง 100/0 ถึง 50/50 เซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะที่โฟมยางผสม cNR/CR ช่วง 40/60 ถึง 0/100 เซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง แต่ความหนาแน่นของเซลล์โฟมเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ในส่วนสมบัติเชิงกลของโฟมยางที่ใช้ OBSH เป็น Blowing agent ได้แก่ ค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าการยืดออก ณ จุดขาด ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่า Compression set มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่วนโฟมยางที่ใช้ ADC เป็น Blowing agent สมบัติเชิงกลคล้ายกับโฟมยางที่ใช้ OBSH แต่ค่ามอดูลัสและความแข็ง มีค่าลดลงในช่วง NR/CR ตั้งแต่ 100/0 ถึง 40/60 ในทางกลับกันเมื่ออัตราส่วน NR/CR มากกว่า 40/60 ค่ามอดูลัสและความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของโฟมยาง เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการต้านทานการติดไฟ พบว่าทั้งโฟมยาง OBSH และ ADC มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ cNR/CR ที่สูงกว่า 20/80 ขึ้นไปจะไม่ติดไฟในสภาวะบรรยากาศ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนน้อยที่สุดที่ทำให้ยางคงรูปลุกติดไฟ (LOI) มีค่าสูงกว่า 21% ซึ่งมากกว่าปริมาณออกซิเจนในอากาศ คือ 21 หากนำไปใช้งานทั่วไปก็จะมีความสามารถในการต้านทานการติดไฟที่สูง และผลการทดสอบ UL-94 อยู่ในเกณฑ์ V-1 ขึ้นไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน

5.2.1 โพลีเมอร์ที่ใช้ ADC เป็น Blowing agent ทำให้ขนาดเซลล์โพลีเมอร์และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ผนังเซลล์โพลีเมอร์ที่หนาส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นสูง เมื่อมีอัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สูง ทำให้มีเวลาในการคงรูปที่สั้น แต่สารฟลูออโรโพลิเมอร์สลายตัวในช่วงกว้างและสลายตัวได้ช้าในช่วงอุณหภูมิที่ทำการขึ้นรูป ดังนั้นควรใช้สารฟลูออโรโพลิเมอร์สลายในช่วงแคบและสลายตัวได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป







## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลผลการวิเคราะห์การทดสอบต่าง ๆ

## ก.1 ตอนที่ 1 การศึกษาระบบการคงรูปที่เหมาะสม

## ก.1.1 ผลการทดสอบของ Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปทั้ง 2 ระบบ

ตารางที่ ก.1 แสดง Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปทั้ง 2 ระบบ

Materials property	NR		NR/CR		CR	
	Sys 1	Sys 2	Sys 1	Sys 2	Sys 1	Sys 2
ts <sub>2</sub> [min: sec]	1:01 ± 0.01	0:33 ± 0.01	2:11 ± 0.02	0:48 ± 0.01	4:23 ± 0.02	1:43 ± 0.01
tc <sub>90</sub> [min: sec]	1:33 ± 0.01	1:01 ± 0.01	3:41 ± 0.01	1:32 ± 0.02	9:35 ± 0.01	4:39 ± 0.01
Minimum Torque [N-m]	0.4551 ± 0.0005	0.5153 ± 0.0066	0.5174 ± 0.0103	0.5575 ± 0.0051	0.5889 ± 0.0021	0.6780 ± 0.0023
Maximum Torque [N-m]	2.9372 ± 0.0881	4.2642 ± 0.0206	2.4362 ± 0.0381	3.6223 ± 0.0562	2.0339 ± 0.0759	2.6646 ± 0.1077
Delta Torque [N-m]	2.3027 ± 0.0908	3.3785 ± 0.0286	1.9556 ± 0.0355	3.0316 ± 0.0480	1.5105 ± 0.0848	1.8381 ± 0.0121
CRI [min <sup>-1</sup> ]	3.13 ± 0.10	3.57 ± 0.14	1.11 ± 0.02	2.22 ± 0.10	0.32 ± 0.01	0.57 ± 0.01

ก.1.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูป  
ในระบบการคงรูปทั้ง 2 ระบบ

ตารางที่ ก.2 แสดงค่า Secant Modulus ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่  
ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 1 และ 2

สูตร	100% Secant Modulus (MPa)	200% Secant Modulus (MPa)	300% Secant Modulus (MPa)
N100C0 S1	0.5759 ± 0.0062	0.4508 ± 0.0068	0.4003 ± 0.0055
N100C0 S2	0.7088 ± 0.0090	0.5836 ± 0.0111	0.5244 ± 0.0089
N50C50 S1	0.6689 ± 0.0034	0.5119 ± 0.0050	0.4389 ± 0.0034
N50C50 S2	0.7544 ± 0.0026	0.6060 ± 0.0037	0.5551 ± 0.0042
N0C100 S1	0.7791 ± 0.0107	0.5502 ± 0.0094	0.4478 ± 0.0027
N0C100 S2	0.8037 ± 0.0035	0.6264 ± 0.0072	0.5682 ± 0.0048

ตารางที่ ก.3 แสดงค่า Tensile strength, %Elongation at break, Tear strength และ  
Hardness (Shore A) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบ  
การคงรูปที่ 1 และ 2

สูตร	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break (mm/mm)	Tear strength (kN/mm)	Hardness (Shore A)
N100C0 S1	19.603 ± 0.178	19.22 ± 0.74	25.042 ± 0.303	45.97 ± 0.78
N100C0 S2	23.285 ± 0.342	17.20 ± 0.06	27.228 ± 0.379	50.22 ± 0.93
N50C50 S1	17.299 ± 0.426	19.10 ± 0.33	19.930 ± 0.211	49.87 ± 0.95
N50C50 S2	18.269 ± 0.354	16.00 ± 0.17	20.847 ± 0.645	53.15 ± 1.13
N0C100 S1	11.946 ± 0.769	14.82 ± 0.32	16.725 ± 0.227	53.78 ± 0.75
N0C100 S2	14.526 ± 0.224	14.72 ± 0.12	17.695 ± 0.284	54.77 ± 0.72

ก.1.3 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง  
คลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 1 และ 2

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอ  
โรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 1 และ 2

สูตร	%Swelling
N100C0 S1	365.870 ± 18.143
N100C0 S2	294.128 ± 13.821
N50C50 S1	308.106 ± 5.490
N50C50 S2	255.750 ± 9.305
N0C100 S1	272.653 ± 6.044
N0C100 S2	245.740 ± 2.115

## ก.2 การศึกษาผลของ NR/CR ratio ต่อสมบัติของ NR/CR blend

### ก.2.1 ผลการทดสอบของ Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปที่ 2

ตารางที่ ก.5 แสดง Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปที่ 2

Property Materials	ts <sub>2</sub> [min: sec]	tc <sub>90</sub> [min: sec]	Minimum Torque [N-m]	Maximum Torque [N-m]	Delta Torque [N-m]	CRI [min <sup>-1</sup> ]
N100C0	0:33 ± 0:01	1:01 ± 0:01	0.5809 ± 0.0018	4.0964 ± 0.0868	3.5155 ± 0.0850	3.61 ± 0.11
N90C10	0:38 ± 0:01	1:08 ± 0:01	0.5835 ± 0.0118	4.0754 ± 0.0515	3.4865 ± 0.0493	3.31 ± 0.09
N80C20	0:41 ± 0:01	1:14 ± 0:01	0.6277 ± 0.0071	3.6855 ± 0.0508	3.0578 ± 0.0501	3.05 ± 0.04
N70C30	0:44 ± 0:01	1:19 ± 0:01	0.6360 ± 0.0526	3.5005 ± 0.0550	2.8644 ± 0.0131	2.84 ± 0.03
N60C40	0:47 ± 0:01	1:29 ± 0:01	0.6390 ± 0.0070	3.2599 ± 0.0312	2.6209 ± 0.0382	2.43 ± 0.10
N50C50	0:49 ± 0:01	1:34 ± 0:01	0.6469 ± 0.0067	3.2580 ± 0.1366	2.6089 ± 0.0382	2.21 ± 0.04
N40C60	0:55 ± 0:01	1:49 ± 0:01	0.6471 ± 0.0222	3.1823 ± 0.0146	2.5352 ± 0.0168	1.85 ± 0.04

N30C70	1:02 ± 0:01	2:12 ± 0:02	0.6710 ± 0.0290	3.1188 ± 0.0461	2.4478 ± 0.0705	1.42 ± 0.05
N20C80	1:10 ± 0:02	2:58 ± 0:08	0.6857 ± 0.0121	3.0316 ± 0.0381	2.3459 ± 0.0479	0.92 ± 0.06
N10C90	1:21 ± 0:01	4:06 ± 0:03	0.6999 ± 0.0279	2.8265 ± 0.1037	2.1266 ± 0.1158	0.61 ± 0.01
N0C100	1:48 ± 0:03	5:39 ± 0:21	0.7130 ± 0.0236	2.7372 ± 0.1497	2.0241 ± 0.1733	0.43 ± 0.03

ก.2.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูป  
ในระบบการคงรูปที่ 2

ตารางที่ ก.6 แสดงค่า Secant Modulus ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่  
ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2

สูตร	100% Secant Modulus (MPa)	200% Secant Modulus (MPa)	300% Secant Modulus (MPa)
N100C0	0.7044 ± 0.0023	0.5343 ± 0.0018	0.4599 ± 0.0046
N90C10	0.7086 ± 0.0013	0.5767 ± 0.0165	0.5192 ± 0.0017
N80C20	0.7522 ± 0.0016	0.5890 ± 0.0047	0.5254 ± 0.0045
N70C30	0.7870 ± 0.0008	0.6282 ± 0.0032	0.5650 ± 0.0074
N60C40	0.7873 ± 0.0047	0.6338 ± 0.0078	0.5651 ± 0.0018
N50C50	0.7910 ± 0.0042	0.6356 ± 0.0086	0.5667 ± 0.0030
N40C60	0.8017 ± 0.0046	0.6525 ± 0.0058	0.6076 ± 0.0049
N30C70	0.8087 ± 0.0058	0.6633 ± 0.0092	0.6112 ± 0.0025
N20C80	0.8378 ± 0.0139	0.6635 ± 0.0024	0.6233 ± 0.0048
N10C90	0.8400 ± 0.0061	0.6772 ± 0.0015	0.6264 ± 0.0036
N0C100	0.9058 ± 0.0114	0.6896 ± 0.0048	0.6423 ± 0.0040

ตารางที่ ก.7 แสดงค่า Tensile strength, %Elongation at break, Tear strength และ Hardness (Shore A) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2

สูตร	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break (mm/mm)	Tear strength (kN/mm)	Hardness (Shore A)
N100C0	23.285 ± 0.342	18.78 ± 0.20	27.002 ± 0.165	48.88 ± 0.88
N90C10	21.956 ± 0.381	16.92 ± 0.19	24.241 ± 0.701	51.36 ± 0.73
N80C20	21.620 ± 0.424	16.90 ± 0.10	23.335 ± 0.712	52.00 ± 0.73
N70C30	20.985 ± 0.526	16.82 ± 0.16	21.633 ± 0.601	52.46 ± 0.69
N60C40	19.919 ± 0.653	16.44 ± 0.13	20.936 ± 1.194	53.81 ± 0.69
N50C50	19.125 ± 0.684	15.72 ± 0.37	20.346 ± 0.263	53.89 ± 0.84
N40C60	18.661 ± 0.929	15.62 ± 1.08	19.794 ± 0.544	54.38 ± 0.86
N30C70	18.477 ± 0.594	15.54 ± 0.11	19.663 ± 1.099	54.40 ± 0.81
N20C80	18.449 ± 1.014	15.44 ± 0.11	19.582 ± 0.291	54.82 ± 0.89
N10C90	18.035 ± 0.454	15.36 ± 0.09	19.392 ± 0.133	55.03 ± 0.81
N0C100	17.779 ± 0.532	14.92 ± 0.30	19.231 ± 0.166	56.24 ± 1.05

ก.2.3 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2

ตารางที่ ก.8 แสดงค่าการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2

สูตร	%Swelling
N100C0	272.361 ± 2.885
N90C10	270.483 ± 1.525
N80C20	263.146 ± 2.130
N70C30	258.229 ± 1.356
N60C40	253.501 ± 3.259
N50C50	245.299 ± 1.379
N40C60	243.378 ± 0.688
N30C70	241.459 ± 1.015

N20C80	241.148 ± 0.713
N10C90	233.163 ± 1.443
N0C100	232.341 ± 0.443

### ก.3 การศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR และ CR

#### ก.3.1 ผลการทดสอบของ Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

ตารางที่ ก.9 แสดงผล Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ NR CR และ NR/CR ที่มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Property Materials	ts <sub>2</sub> [min: sec]	tc <sub>90</sub> [min: sec]	Minimum Torque [N-m]	Maximum Torque [N-m]	Delta Torque [N-m]	CRI [min <sup>-1</sup> ]
cN100C0	0:38 ± 0:01	1:04 ± 0:01	0.7758 ± 0.0053	4.1843 ± 0.0311	3.3614 ± 0.0149	3.92 ± 0.08
cN90C10	0:41 ± 0:01	1:09 ± 0:01	0.7763 ± 0.0029	4.1145 ± 0.0368	3.3590 ± 0.0119	3.67 ± 0.06
cN80C20	0:44 ± 0:01	1:15 ± 0:01	0.7961 ± 0.0171	4.1051 ± 0.1146	3.3132 ± 0.0707	3.34 ± 0.08
cN70C30	0:45 ± 0:01	1:19 ± 0:01	0.8034 ± 0.0147	4.0964 ± 0.1008	3.2788 ± 0.0294	2.99 ± 0.08
cN60C40	0:50 ± 0:01	1:26 ± 0:01	0.8059 ± 0.0236	4.0890 ± 0.0723	3.2748 ± 0.0284	2.78 ± 0.09
cN50C50	0:55 ± 0:01	1:38 ± 0:01	0.8102 ± 0.0167	4.0338 ± 0.0763	3.1812 ± 0.0857	2.33 ± 0.06
cN40C60	1:00 ± 0:01	1:56 ± 0:02	0.8233 ± 0.0018	3.9118 ± 0.0398	3.1059 ± 0.0503	1.80 ± 0.07
cN30C70	1:06 ± 0:01	2:32 ± 0:03	0.8589 ± 0.0161	3.8913 ± 0.0588	3.0872 ± 0.0402	1.16 ± 0.04
cN20C80	1:14 ± 0:01	3:17 ± 0:07	0.9069 ± 0.0107	3.7926 ± 0.0155	2.8857 ± 0.0118	0.81 ± 0.04

cN10C90	1:23 ±	4:39 ±	0.9997 ±	3.7763 ±	2.8581 ±	0.51 ±
	0:01	0:03	0.0163	0.2229	0.0701	0.01
cN0C100	1:53 ±	6:58 ±	1.0444 ±	3.7092 ±	2.7306 ±	0.34 ±
	0:02	0:09	0.0410	0.0415	0.0322	0.01

**ก.3.2 สมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูป  
ในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)**

ตารางที่ ก.10 แสดงค่า Secant Modulus ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

สูตร	100% Secant Modulus (MPa)	200% Secant Modulus (MPa)	300% Secant Modulus (MPa)
cN100C0	0.931 ± 0.040	0.779 ± 0.006	0.745 ± 0.007
cN90C10	0.932 ± 0.015	0.800 ± 0.007	0.766 ± 0.005
cN80C20	0.934 ± 0.006	0.837 ± 0.013	0.769 ± 0.005
cN70C30	0.987 ± 0.013	0.841 ± 0.016	0.781 ± 0.002
cN60C40	1.006 ± 0.014	0.847 ± 0.008	0.792 ± 0.003
cN50C50	1.015 ± 0.020	0.849 ± 0.004	0.798 ± 0.007
cN40C60	1.024 ± 0.010	0.851 ± 0.014	0.822 ± 0.010
cN30C70	1.046 ± 0.017	0.858 ± 0.009	0.829 ± 0.015
cN20C80	1.074 ± 0.006	0.886 ± 0.012	0.840 ± 0.010
cN10C90	1.095 ± 0.016	0.899 ± 0.016	0.858 ± 0.011
cN0C100	1.112 ± 0.014	0.902 ± 0.012	0.870 ± 0.012

ตารางที่ ก.11 แสดงค่า Tensile strength, %Elongation at break, Tear strength และ Hardness (Shore A) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

สูตร	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break (mm/mm)	Tear strength (kN/mm)	Hardness (Shore A)
cN100C0	26.996 ± 0.342	15.6 ± 0.14	42.332 ± 0.762	54.21 ± 0.57
cN90C10	25.481 ± 0.273	15.56 ± 0.06	38.736 ± 0.687	55.04 ± 0.53
cN80C20	24.052 ± 0.231	15.5 ± 0.19	38.243 ± 0.783	56.14 ± 0.34
cN70C30	24.024 ± 0.500	15.34 ± 0.05	37.849 ± 2.792	56.39 ± 0.48
cN60C40	22.852 ± 0.800	15.16 ± 0.09	36.458 ± 1.850	56.40 ± 0.52
cN50C50	22.045 ± 0.368	15.12 ± 0.11	29.765 ± 0.733	56.82 ± 0.46
cN40C60	21.760 ± 0.400	15.00 ± 0.07	26.383 ± 0.999	57.10 ± 0.37
cN30C70	21.172 ± 1.272	14.94 ± 0.05	24.918 ± 0.724	57.14 ± 0.36
cN20C80	20.737 ± 0.240	14.82 ± 0.11	24.328 ± 0.434	58.62 ± 0.41
cN10C90	17.757 ± 0.910	14.6 ± 0.07	23.0192 ± 0.424	59.78 ± 0.36
cN0C100	17.435 ± 0.740	14.3 ± 0.31	22.514 ± 0.609	60.26 ± 0.53

ก.3.3 สมบัติการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

ตารางที่ ก.12 แสดงค่าการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

สูตร	%Swelling
cN100C0	266.229 ± 1.025
cN90C10	256.714 ± 1.040
cN80C20	255.885 ± 4.005
cN70C30	247.732 ± 0.256
cN60C40	233.830 ± 0.548
cN50C50	232.888 ± 0.540



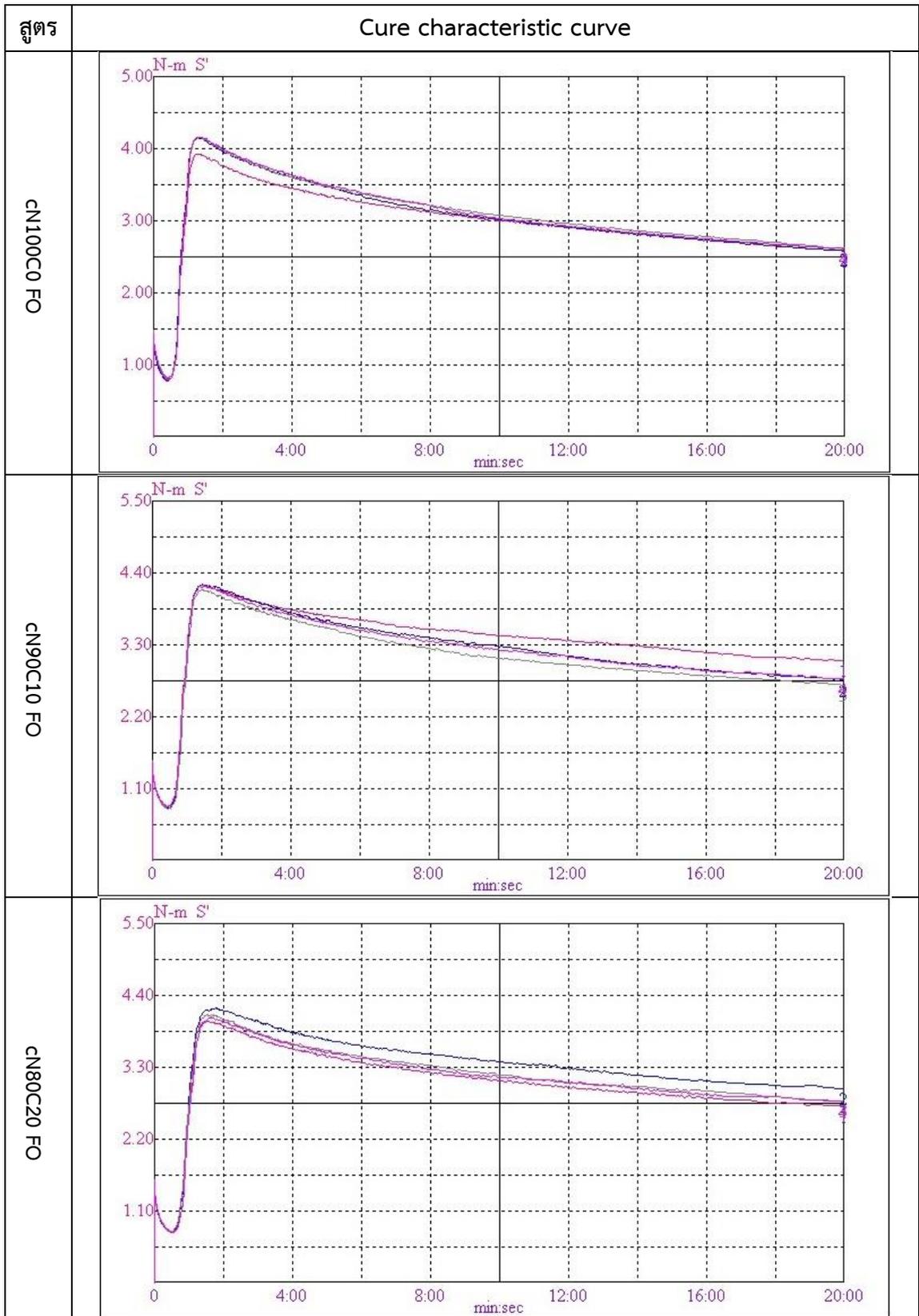
cN40C60	231.212 ± 0.192
cN30C70	228.338 ± 1.037
cN20C80	226.752 ± 2.266
cN10C90	217.933 ± 1.972
cN0C100	218.221 ± 1.462

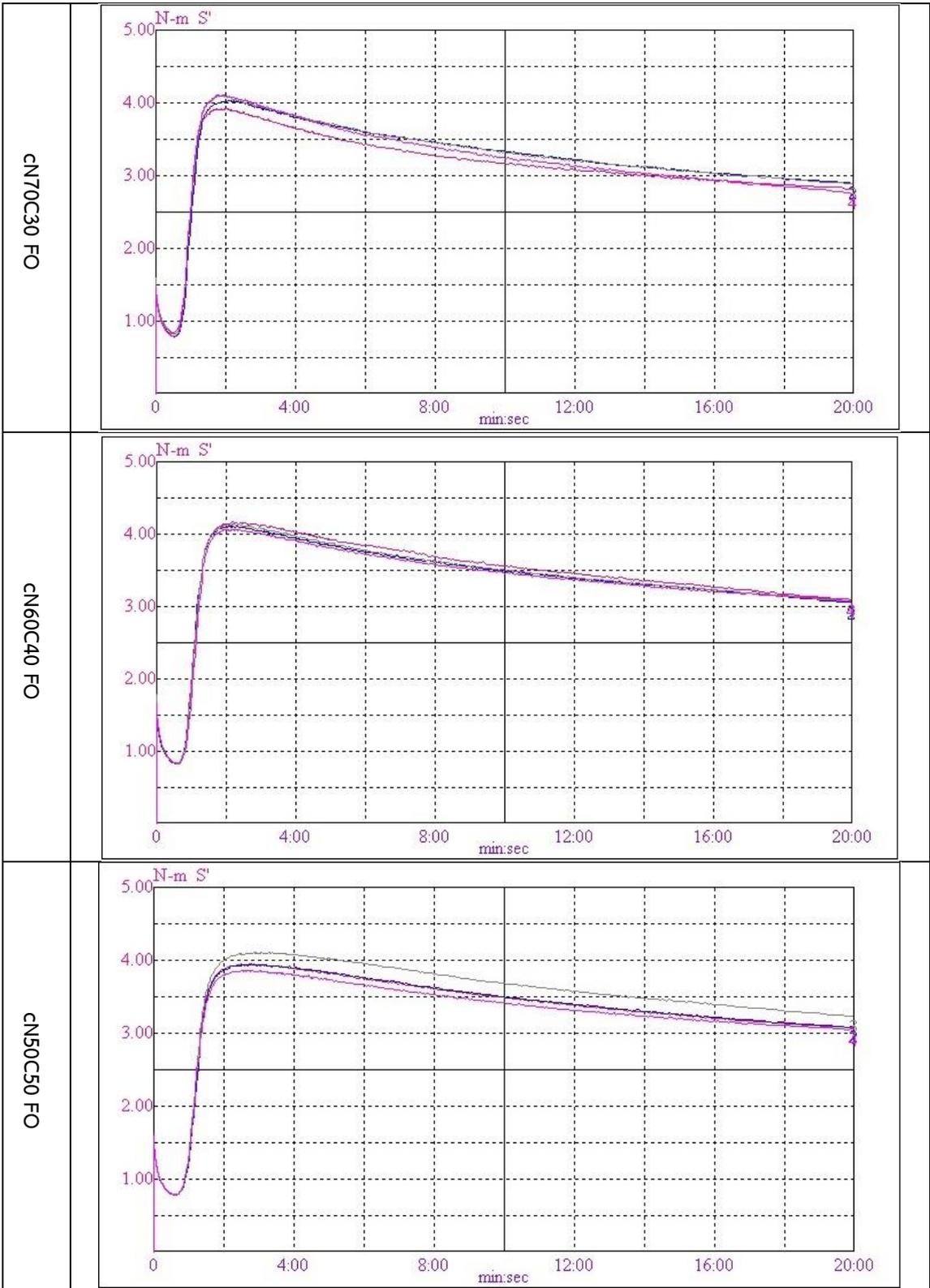
ก.3.4 สมบัติความหนาแน่นโดยรวมของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ตารางที่ ก.13 แสดงความหนาแน่นโดยรวมของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูปในระบบการคงรูปที่ 2 มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

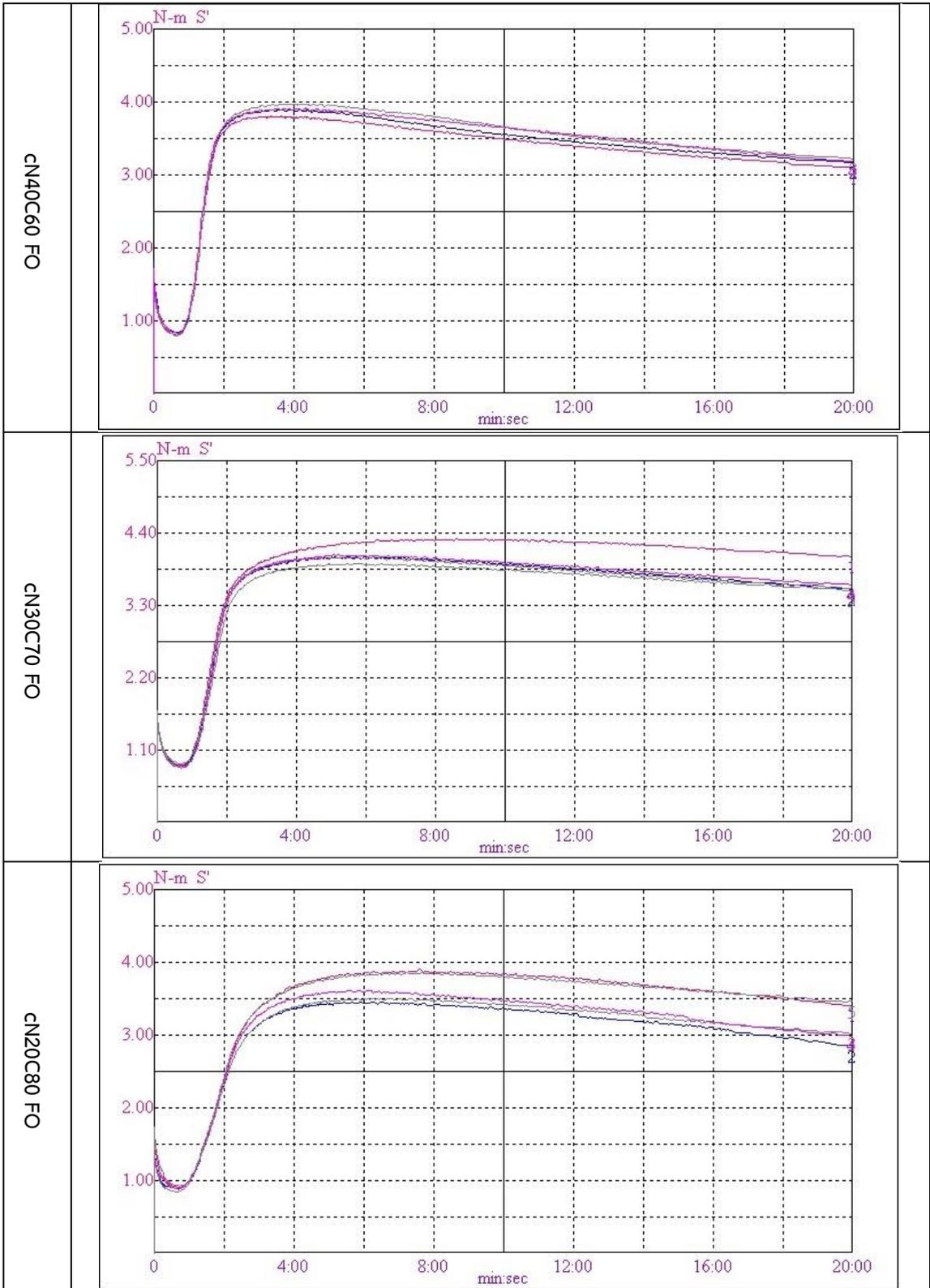
สูตร	Density (g/cm <sup>3</sup> )
cN100C0	1.011 ± 0.001
cN90C10	1.038 ± 0.002
cN80C20	1.062 ± 0.001
cN70C30	1.082 ± 0.003
cN60C40	1.117 ± 0.002
cN50C50	1.142 ± 0.012
cN40C60	1.175 ± 0.003
cN30C70	1.212 ± 0.002
cN20C80	1.247 ± 0.002
cN10C90	1.284 ± 0.001
cN0C100	1.319 ± 0.001

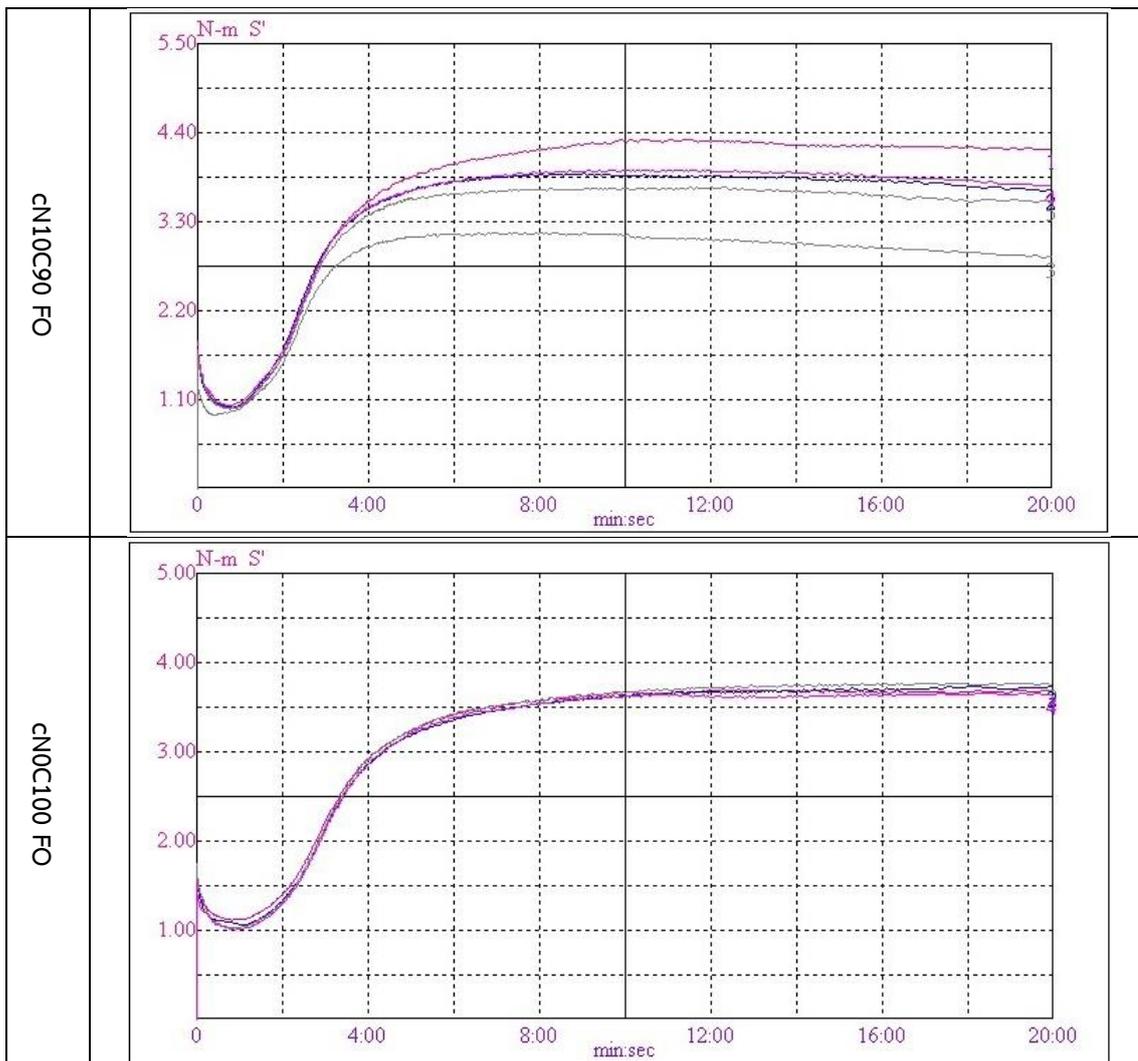
ก.4 การศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

ก.4.1 ผลการทดสอบของ Cure characteristic ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent









รูปที่ ก.1 Cure characteristic curve Cure characteristic ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

ตารางที่ ก.14 แสดง Cure characteristic ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

Property Materials	ts <sub>2</sub> [min: sec]	tc <sub>90</sub> [min: sec]	Minimum Torque [N-m]	Maximum Torque [N-m]	Delta Torque [N-m]	CRI [min <sup>-1</sup> ]
cN100C0 FO	0:40 ± 0:01	1:08 ± 0:01	0.7758 ± 0.0053	4.1843 ± 0.0311	3.3614 ± 0.0149	3.64 ± 0.07
cN90C10 FO	0:46 ± 0:01	1:14 ± 0:01	0.7763 ± 0.0029	4.1145 ± 0.0368	3.3590 ± 0.0119	3.60 ± 0.06

cN80C20 FO	0:47 ± 0:01	1:17 ± 0:01	0.7961 ± 0.0171	4.1051 ± 0.1146	3.3132 ± 0.0707	3.31 ± 0.05
cN70C30 FO	0:48 ± 0:01	1:22 ± 0:01	0.8034 ± 0.0147	4.0964 ± 0.1008	3.2788 ± 0.0294	2.94 ± 0.01
cN60C40 FO	0:52 ± 0:01	1:32 ± 0:01	0.8059 ± 0.0236	4.0890 ± 0.0723	3.2748 ± 0.0284	2.45 ± 0.09
cN50C50 FO	0:55 ± 0:01	1:43 ± 0:02	0.8102 ± 0.0167	4.0338 ± 0.0763	3.1812 ± 0.0857	2.06 ± 0.04
cN40C60 FO	1:02 ± 0:01	2:02 ± 0:02	0.8233 ± 0.0018	3.9118 ± 0.0398	3.1059 ± 0.0503	1.66 ± 0.07
cN30C70 FO	1:05 ± 0:01	2:37 ± 0:06	0.8589 ± 0.0161	3.8913 ± 0.0588	3.0872 ± 0.0402	1.10 ± 0.08
cN20C80 FO	1:09 ± 0:01	3:19 ± 0:11	0.9069 ± 0.0107	3.7926 ± 0.0155	2.8857 ± 0.0118	0.77 ± 0.07
cN10C90 FO	1:23 ± 0:01	4:47 ± 0:13	0.9997 ± 0.0163	3.7763 ± 0.2229	2.8581 ± 0.0701	0.49 ± 0.03
cN0C100 FO	1:46 ± 0:04	5:50 ± 0:11	1.0444 ± 0.0410	3.7092 ± 0.0415	2.7306 ± 0.0322	0.41 ± 0.02

ก.4.2 สมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

ตารางที่ ก.15 แสดงค่า Secant Modulus ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

สูตร	100% Secant Modulus (MPa)	200% Secant Modulus (MPa)	300% Secant Modulus (MPa)
cN100C0 FO	0.2232 ± 0.0047	0.1958 ± 0.0024	0.1876 ± 0.0014
cN90C10 FO	0.2258 ± 0.0025	0.2001 ± 0.0024	0.1952 ± 0.0014
cN80C20 FO	0.2414 ± 0.0007	0.2008 ± 0.0044	0.1964 ± 0.0044
cN70C30 FO	0.2443 ± 0.0019	0.2265 ± 0.0013	0.2236 ± 0.0014
cN60C40 FO	0.2635 ± 0.0021	0.2437 ± 0.0032	0.2362 ± 0.0016

cN50C50 FO	0.2671 ± 0.0040	0.2463 ± 0.0020	0.2455 ± 0.0014
cN40C60 FO	0.2961 ± 0.0030	0.2730 ± 0.0021	0.2764 ± 0.0027
cN30C70 FO	0.3464 ± 0.0078	0.3239 ± 0.0026	0.3178 ± 0.0053
cN20C80 FO	0.3851 ± 0.0025	0.3474 ± 0.0035	0.3362 ± 0.0028
cN10C90 FO	0.4448 ± 0.0041	0.3931 ± 0.0026	0.3946 ± 0.0034
cN0C100 FO	0.4624 ± 0.00712	0.4251 ± 0.0066	0.4192 ± 0.0063

ตารางที่ ก.16 แสดงค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Tear strength ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

สูตร	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break (mm/mm)	Tear strength (kN/mm)
cN100C0 FO	5.841 ± 0.064	13.44 ± 0.13	9.424 ± 0.123
cN90C10 FO	5.607 ± 0.180	12.93 ± 0.19	8.338 ± 0.167
cN80C20 FO	5.594 ± 0.037	12.32 ± 0.08	8.334 ± 0.145
cN70C30 FO	5.264 ± 0.1983	12.30 ± 0.07	8.329 ± 0.146
cN60C40 FO	4.661 ± 0.234	11.83 ± 0.13	8.130 ± 0.066
cN50C50 FO	4.607 ± 0.182	11.82 ± 0.11	6.544 ± 0.133
cN40C60 FO	4.532 ± 0.043	11.68 ± 0.22	6.500 ± 0.129
cN30C70 FO	4.447 ± 0.107	11.54 ± 0.18	5.736 ± 0.109
cN20C80 FO	4.245 ± 0.0405	10.94 ± 0.34	5.183 ± 0.031
cN10C90 FO	4.130 ± 0.125	10.85 ± 0.11	4.670 ± 0.163
cN0C100 FO	3.955 ± 0.057	10.80 ± 0.28	4.641 ± 0.035

ตารางที่ ก.17 แสดงค่า Hardness (Shore A) และ %Compression set ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

สูตร	Hardness (Shore A)	%Compression set
cN100C0 FO	21.36 ± 1.09	96.16 ± 0.53
cN90C10 FO	20.21 ± 1.12	93.11 ± 2.36
cN80C20 FO	20.42 ± 1.58	91.60 ± 1.61
cN70C30 FO	20.47 ± 1.39	88.19 ± 2.59
cN60C40 FO	21.11 ± 1.44	86.79 ± 3.26

cN50C50 FO	21.39 ± 1.37	79.24 ± 3.08
cN40C60 FO	22.94 ± 1.85	70.20 ± 2.24
cN30C70 FO	25.36 ± 1.14	70.04 ± 1.94
cN20C80 FO	27.15 ± 1.21	61.08 ± 3.98
cN10C90 FO	30.42 ± 1.09	57.81 ± 1.64
cN0C100 FO	31.85 ± 1.10	53.69 ± 2.43

ก.4.3 สมบัติการกระจายตัวของขนาดเซลล์และความหนาแน่นของเซลล์โฟมของโฝม  
ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing  
agent

ตารางที่ ก.18 แสดงค่า Cell diameter และ Cell density ของโฝมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

สูตร	Cell diameter ( $\mu\text{m}$ )	Cell density ( $\text{cell}/\text{cm}^3$ )
cN100C0 FO	76.346 ± 26.271	2.0414
cN90C10 FO	85.373 ± 26.520	2.20409
cN80C20 FO	83.679 ± 25.403	2.37406
cN70C30 FO	80.358 ± 32.709	2.63345
cN60C40 FO	78.307 ± 31.879	2.89461
cN50C50 FO	76.137 ± 33.265	3.04458
cN40C60 FO	75.318 ± 33.630	3.24019
cN30C70 FO	71.670 ± 24.926	3.56818
cN20C80 FO	52.391 ± 22.276	4.99174
cN10C90 FO	49.159 ± 20.402	5.44903
cN0C100 FO	47.200 ± 19.581	5.50591

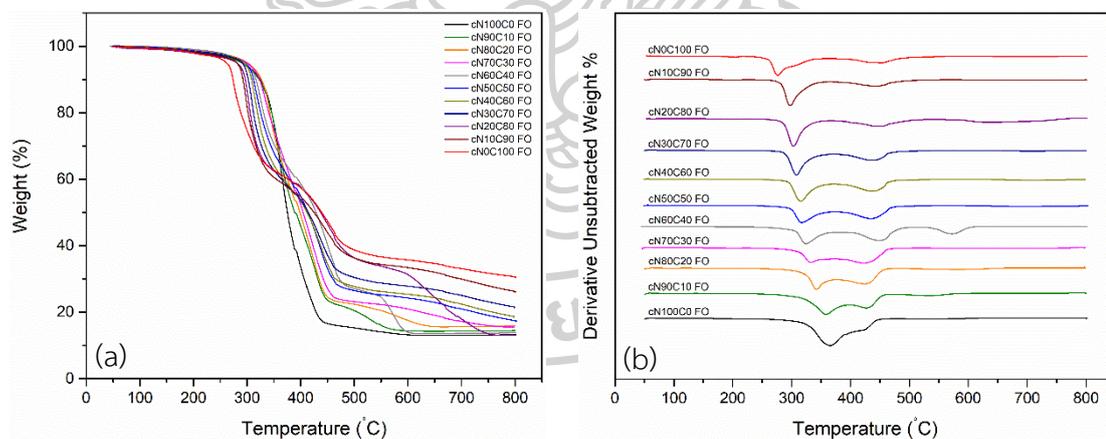
ก.4.4 สมบัติความหนาแน่นโดยรวมของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน  
ที่ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

ตารางที่ ก.19 แสดงค่าความหนาแน่นโดยรวมของโฝมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพ  
รีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent



สูตร	Density (g/cm <sup>3</sup> )
cN100C0 FO	0.538 ± 0.005
cN90C10 FO	0.489 ± 0.002
cN80C20 FO	0.500 ± 0.007
cN70C30 FO	0.514 ± 0.004
cN60C40 FO	0.515 ± 0.008
cN50C50 FO	0.574 ± 0.004
cN40C60 FO	0.578 ± 0.010
cN30C70 FO	0.581 ± 0.011
cN20C80 FO	0.593 ± 0.010
cN10C90 FO	0.639 ± 0.005
cN0C100 FO	0.679 ± 0.006

ก.4.5 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent



รูปที่ ก.2 สมบัติทางความร้อนของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

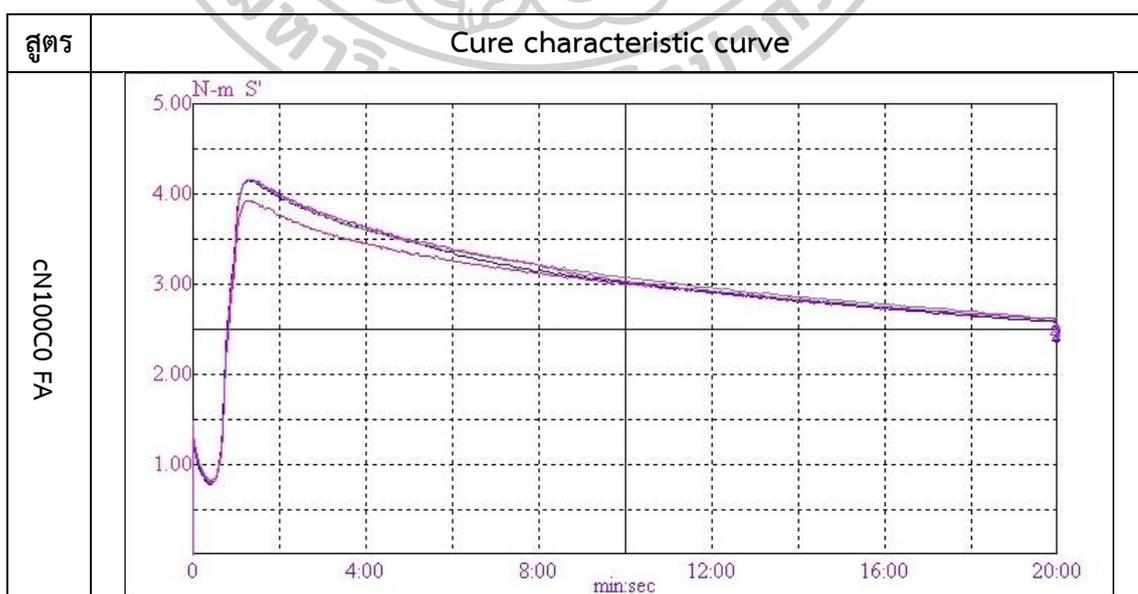
(a) TGA curve และ (b) DTG curve

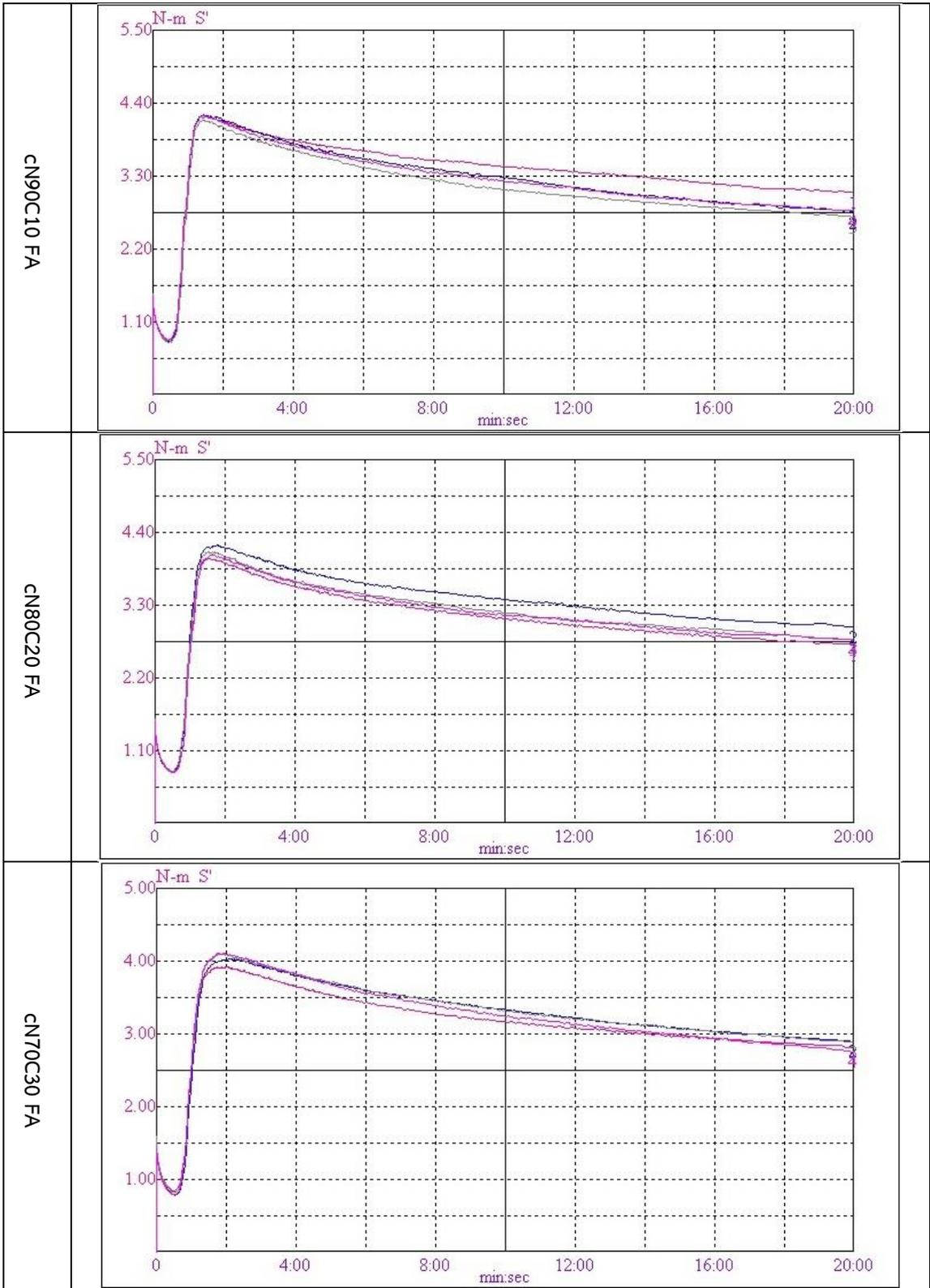
ตารางที่ ก.20 แสดงค่า  $T_{onset}$ ,  $T_{endset}$ ,  $T_{dmax}$  และ Char residue จากการทดสอบ TGA ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ OBSH เป็น Blowing agent

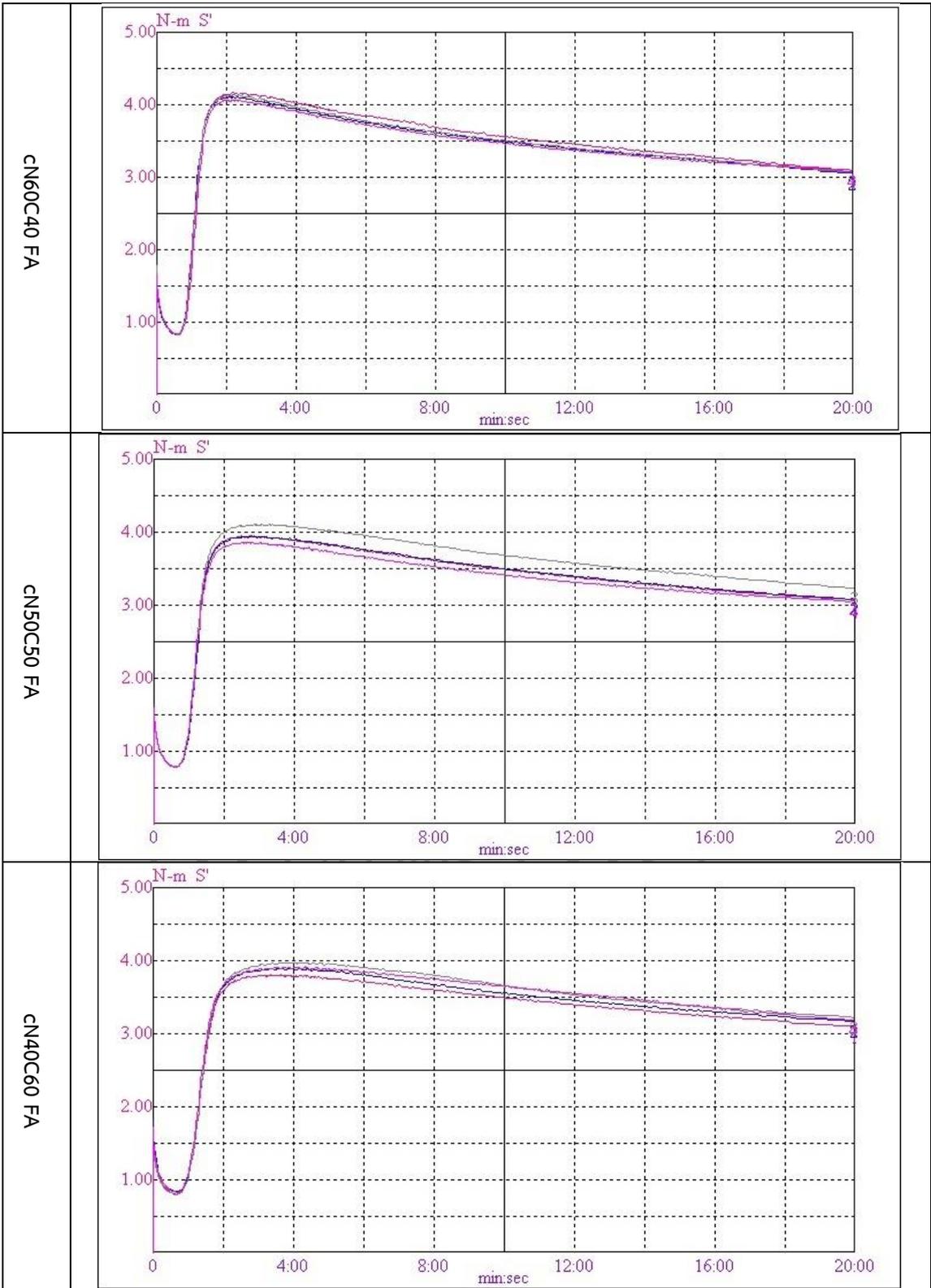
Property Materials	T <sub>onset1</sub> (°C)	T <sub>end1</sub> (°C)	T <sub>max1</sub> (°C)	T <sub>onset2</sub> (°C)	T <sub>end2</sub> (°C)	T <sub>max2</sub> (°C)	Char residue (%)
cN100C0 FO	328.29	443.18	365.03	-	-	-	13.28
cN90C10 FO	335.81	382.92	358.57	404.26	449.03	429.92	14.52
cN80C20 FO	329.84	358.77	341.89	382.25	448.08	427.97	15.96
cN70C30 FO	319.94	353.05	331.83	384.50	454.67	426.32	15.58
cN60C40 FO	307.70	356.29	324.00	406.66	475.98	450.45	13.87
cN50C50 FO	300.87	351.99	317.04	390.68	464.33	436.09	17.18
cN40C60 FO	296.20	343.12	315.46	392.41	462.76	437.59	18.47
cN30C70 FO	291.06	330.06	308.04	388.38	464.21	437.68	21.36
cN20C80 FO	287.24	323.46	303.27	386.24	484.84	446.73	13.16
cN10C90 FO	282.86	320.25	297.57	385.48	476.93	443.83	26.03
cN0C100 FO	262.02	299.35	276.53	401.12	474.32	453.39	30.47

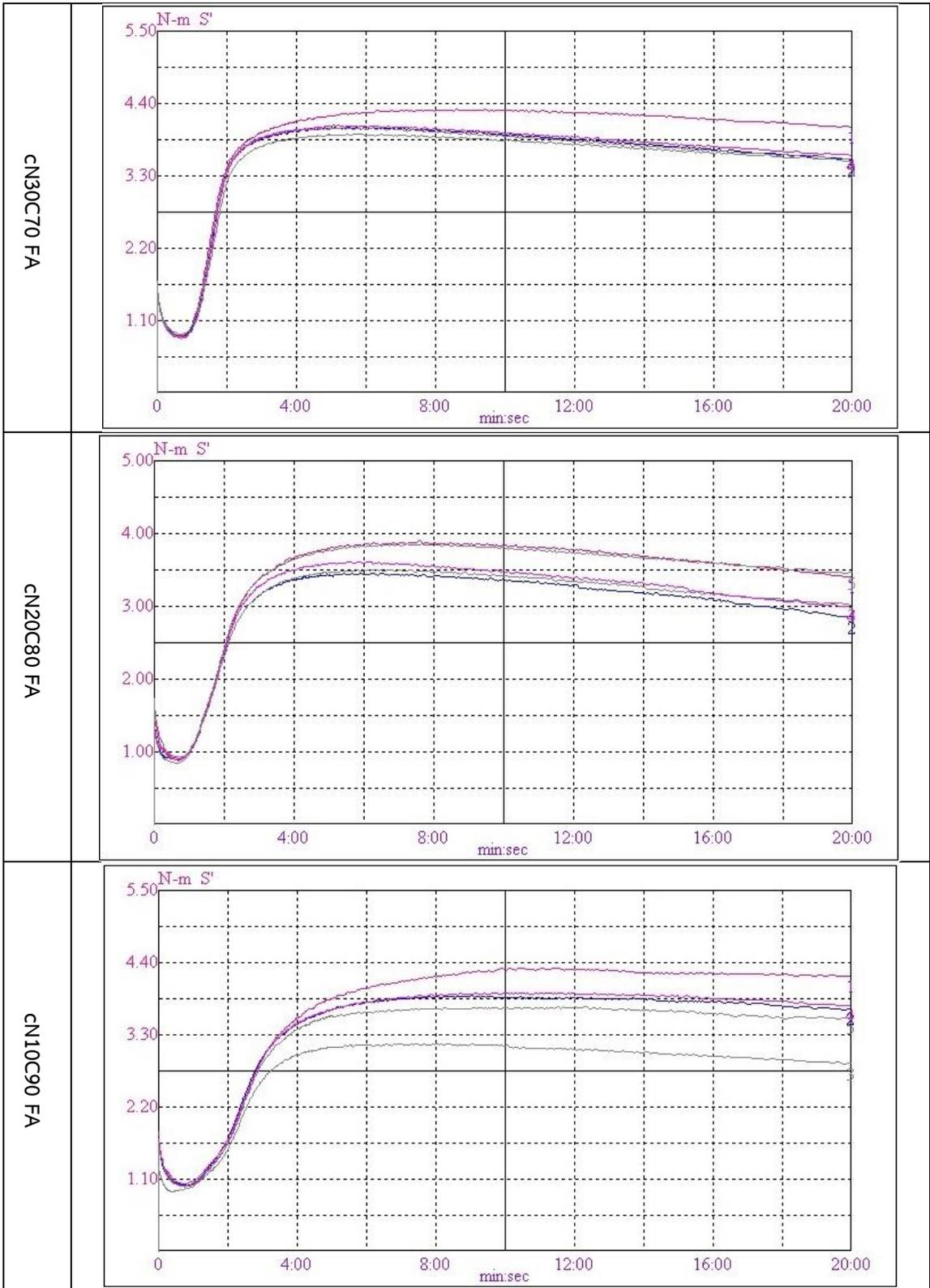
ก.5 การศึกษาผลของชนิดของ Blowing agent ต่อโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

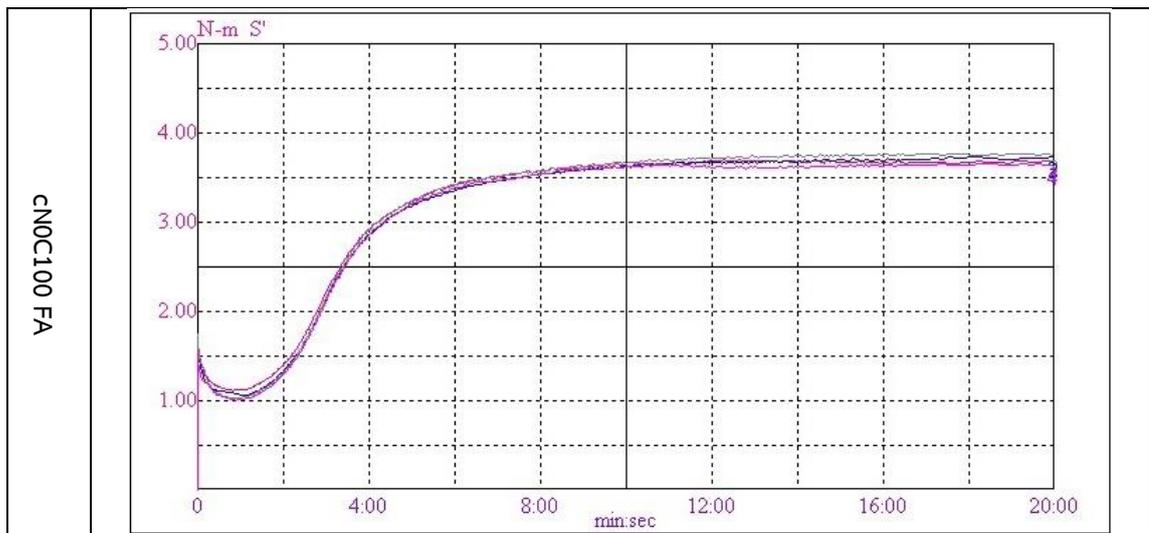
ก.5.1 ผลการทดสอบของ Cure characteristic ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent











รูปที่ ก.3 Cure characteristic curve Cure characteristic ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

ตารางที่ ก.21 แสดง Cure characteristic ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR ที่ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

Property Materials	ts <sub>2</sub> [min: sec]	tc <sub>90</sub> [min: sec]	Minimum Torque [N-m]	Maximum Torque [N-m]	Delta Torque [N-m]	CRI [min <sup>-1</sup> ]
cN100C0 FA	0:40 ± 0:01	1:08 ± 0:01	0.7758 ± 0.0053	4.1843 ± 0.0311	3.3614 ± 0.0149	3.64 ± 0.07
cN90C10 FA	0:46 ± 0:01	1:14 ± 0:01	0.7763 ± 0.0029	4.1145 ± 0.0368	3.3590 ± 0.0119	3.60 ± 0.06
cN80C20 FA	0:47 ± 0:01	1:17 ± 0:01	0.7961 ± 0.0171	4.1051 ± 0.1146	3.3132 ± 0.0707	3.31 ± 0.05
cN70C30 FA	0:48 ± 0:01	1:22 ± 0:01	0.8034 ± 0.0147	4.0964 ± 0.1008	3.2788 ± 0.0294	2.94 ± 0.01
cN60C40 FA	0:52 ± 0:01	1:32 ± 0:01	0.8059 ± 0.0236	4.0890 ± 0.0723	3.2748 ± 0.0284	2.45 ± 0.09
cN50C50 FA	0:55 ± 0:01	1:43 ± 0:02	0.8102 ± 0.0167	4.0338 ± 0.0763	3.1812 ± 0.0857	2.06 ± 0.04
cN40C60 FA	1:02 ± 0:01	2:02 ± 0:02	0.8233 ± 0.0018	3.9118 ± 0.0398	3.1059 ± 0.0503	1.66 ± 0.07

cN30C70 FA	1:05 ± 0:01	2:37 ± 0:06	0.8589 ± 0.0161	3.8913 ± 0.0588	3.0872 ± 0.0402	1.10 ± 0.08
cN20C80 FA	1:09 ± 0:01	3:19 ± 0:11	0.9069 ± 0.0107	3.7926 ± 0.0155	2.8857 ± 0.0118	0.77 ± 0.07
cN10C90 FA	1:23 ± 0:01	4:47 ± 0:13	0.9997 ± 0.0163	3.7763 ± 0.2229	2.8581 ± 0.0701	0.49 ± 0.03
cN0C100 FA	1:46 ± 0:04	5:50 ± 0:11	1.0444 ± 0.0410	3.7092 ± 0.0415	2.7306 ± 0.0322	0.41 ± 0.02

ก.5.2 สมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

ตารางที่ ก.22 แสดงค่า Secant Modulus ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

สูตร	100% Secant Modulus (MPa)	200% Secant Modulus (MPa)	300% Secant Modulus (MPa)
cN100C0 FA	0.6993 ± 0.0059	0.6327 ± 0.0102	0.6133 ± 0.0061
cN90C10 FA	0.6965 ± 0.0025	0.5943 ± 0.0045	0.5756 ± 0.0044
cN80C20 FA	0.6760 ± 0.0078	0.5876 ± 0.0037	0.5725 ± 0.00457
cN70C30 FA	0.6670 ± 0.0030	0.5871 ± 0.0049	0.5626 ± 0.0029
cN60C40 FA	0.5458 ± 0.0029	0.4838 ± 0.0020	0.4738 ± 0.0079
cN50C50 FA	0.5180 ± 0.0062	0.4432 ± 0.0053	0.4175 ± 0.0010
cN40C60 FA	0.4461 ± 0.0018	0.4340 ± 0.0018	0.3888 ± 0.0060
cN30C70 FA	0.4806 ± 0.0034	0.4369 ± 0.0080	0.3948 ± 0.0029
cN20C80 FA	0.5001 ± 0.0074	0.4474 ± 0.0023	0.4143 ± 0.0007
cN10C90 FA	0.5054 ± 0.0025	0.4491 ± 0.0058	0.4172 ± 0.0055
cN0C100 FA	0.5315 ± 0.0176	0.4749 ± 0.0079	0.4204 ± 0.0058

ตารางที่ ก.23 แสดงค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Tear strength ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

สูตร	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break (mm/mm)	Tear strength (kN/mm)
cN100C0 FA	16.400 ± 0.506	14.06 ± 0.05	17.567 ± 0.340
cN90C10 FA	13.465 ± 0.998	13.12 ± 0.08	14.506 ± 0.387
cN80C20 FA	12.779 ± 0.167	12.60 ± 0.16	13.163 ± 0.449
cN70C30 FA	9.777 ± 0.092	12.44 ± 0.13	11.442 ± 0.125
cN60C40 FA	9.000 ± 0.355	12.24 ± 0.09	10.587 ± 0.127
cN50C50 FA	7.784 ± 0.165	12.04 ± 0.17	9.591 ± 0.463
cN40C60 FA	7.021 ± 0.249	11.88 ± 0.13	8.676 ± 0.138
cN30C70 FA	6.716 ± 0.071	11.87 ± 0.32	7.855 ± 0.225
cN20C80 FA	6.392 ± 0.382	11.86 ± 0.05	7.473 ± 0.172
cN10C90 FA	6.291 ± 0.239	11.84 ± 0.17	7.183 ± 0.157
cN0C100 FA	6.239 ± 0.118	11.82 ± 0.04	5.086 ± 0.043

ตารางที่ ก.24 แสดงค่า Hardness (Shore A) และ %Compression set ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

สูตร	Hardness (Shore A)	%Compression set
cN100C0 FA	44.03 ± 1.42	96.99 ± 1.05
cN90C10 FA	40.66 ± 1.69	96.75 ± 0.58
cN80C20 FA	40.14 ± 1.09	96.72 ± 0.62
cN70C30 FA	36.00 ± 1.63	94.44 ± 1.22
cN60C40 FA	34.62 ± 1.29	93.06 ± 1.03
cN50C50 FA	30.00 ± 1.79	89.81 ± 1.09
cN40C60 FA	27.40 ± 1.27	86.37 ± 1.99
cN30C70 FA	28.23 ± 1.48	83.19 ± 1.92
cN20C80 FA	30.23 ± 1.05	78.07 ± 0.36
cN10C90 FA	31.08 ± 1.17	75.14 ± 1.03
cN0C100 FA	32.56 ± 1.62	74.92 ± 1.78



ก.5.3 สมบัติการกระจายตัวของขนาดเซลล์และความหนาแน่นของเซลล์โฟมของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent ตารางที่ ก.25 แสดงค่า Cell diameter และ Cell density ของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

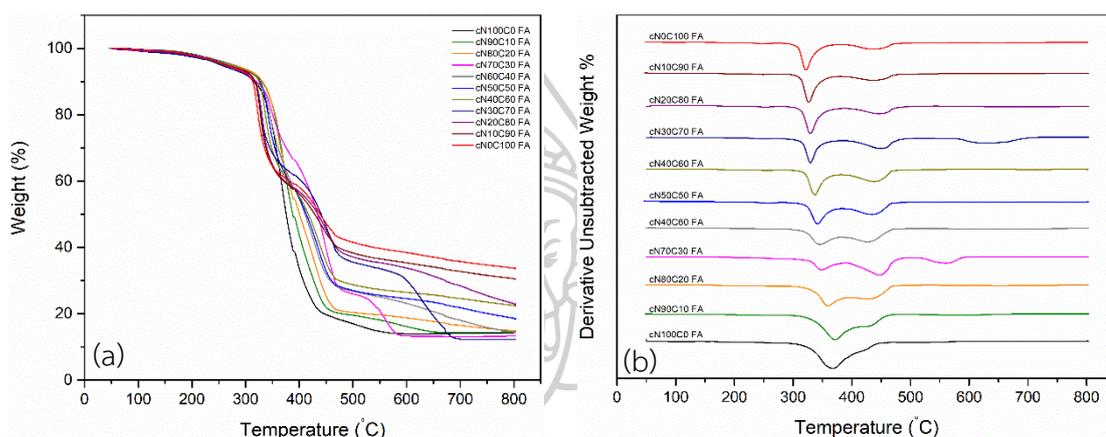
สูตร	Cell diameter ( $\mu\text{m}$ )	Cell density ( $\text{cell}/\text{cm}^3$ )
cN100C0 FA	36.114 $\pm$ 12.008	0.9683
cN90C10 FA	57.349 $\pm$ 29.349	1.0739
cN80C20 FA	59.334 $\pm$ 35.386	1.1609
cN70C30 FA	70.546 $\pm$ 35.196	1.2053
cN60C40 FA	72.817 $\pm$ 31.915	1.3882
cN50C50 FA	74.333 $\pm$ 30.998	1.4590
cN40C60 FA	71.794 $\pm$ 28.551	1.5309
cN30C70 FA	68.284 $\pm$ 29.407	1.9597
cN20C80 FA	60.541 $\pm$ 21.652	2.1193
cN10C90 FA	54.671 $\pm$ 20.666	2.2830
cN0C100 FA	54.510 $\pm$ 18.435	2.5934

ก.5.4 สมบัติความหนาแน่นโดยรวมของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent ตารางที่ ก.26 แสดงค่าความหนาแน่นโดยรวมของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ผ่านการคงรูป โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

สูตร	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
cN100C0 FA	0.841 $\pm$ 0.003
cN90C10 FA	0.756 $\pm$ 0.007
cN80C20 FA	0.753 $\pm$ 0.006
cN70C30 FA	0.712 $\pm$ 0.006
cN60C40 FA	0.662 $\pm$ 0.007
cN50C50 FA	0.657 $\pm$ 0.003
cN40C60 FA	0.580 $\pm$ 0.003

cN30C70 FA	$0.614 \pm 0.018$
cN20C80 FA	$0.617 \pm 0.008$
cN10C90 FA	$0.667 \pm 0.006$
cN0C100 FA	$0.725 \pm 0.008$

ก.5.5 สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent



รูปที่ ก.4 สมบัติทางความร้อนของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

(a) TGA curve และ (b) DTG curve

ตารางที่ ก.27 แสดงค่า  $T_{onset}$ ,  $T_{endset}$ ,  $T_{dmax}$  และ Char residue จากการทดสอบ TGA ของโฟมยาง NR CR และ NR/CR โดยใช้ ADC เป็น Blowing agent

Property Materials	$T_{onset1}$ (°C)	$T_{endset1}$ (°C)	$T_{dmax1}$ (°C)	$T_{onset2}$ (°C)	$T_{endset2}$ (°C)	$T_{dmax2}$ (°C)	Char residue (%)
cN100C0 FA	327.26	417.58	368.79	-	-	-	14.31
cN90C10 FA	333.30	418.37	371.44	394.85	486.70	459.64	14.57
cN80C20 FA	343.43	382.39	359.15	401.42	455.20	434.38	14.79
cN70C30 FA	332.42	348.58	372.69	404.22	472.38	447.47	13.29
cN60C40 FA	328.11	345.25	372.34	393.94	457.44	429.77	14.34
cN50C50 FA	326.47	362.58	341.72	397.70	460.64	435.58	18.36
cN40C60 FA	322.71	355.56	336.85	396.82	464.19	439.37	22.31
cN30C70 FA	316.37	345.13	329.38	402.38	475.61	450.81	12.36

cN20C80 FA	314.95	347.31	329.14	403.32	474.86	447.58	22.69
cN10C90 FA	313.36	343.79	326.62	392.41	468.64	438.22	30.32
cN0C100 FA	312.61	331.99	321.03	402.68	467.68	439.29	33.57



**ภาคผนวก ข**  
**แสดงตัวอย่างการคำนวณ**

**ข.1 การศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง**

ลักษณะการคงรูปของยาง ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) จากบริษัท Gotech รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 ในการทดสอบใช้ชิ้นงานประมาณ 5 กรัมต่อหนึ่งการทดสอบ ซึ่งรายงานผลการทดสอบเป็นค่า Scorch time ( $ts_2$ ), Cure time ( $tc_{90}$ ),  $\Delta$ Torque และ Cure rate index (CRI)

$$CRI = \frac{100}{tc_{90} - ts_2}$$

เมื่อ Cure rate index (CRI) คือ อัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized

Scorch time ( $ts_2$ ) คือ เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการ Vulcanized มีหน่วยเป็น วินาที

Cure time ( $tc_{90}$ ) คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป มีหน่วยเป็น วินาที

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า CRI จากสูตร N100 S1 ซึ่งมีค่า Scorch time ( $ts_2$ ) เท่ากับ 1:01 นาที และ Cure time ( $tc_{90}$ ) เท่ากับ 1:33 นาที

แปลงจากนาทีเป็นวินาที Scorch time ( $ts_2$ ) เท่ากับ 1:01 = 60+1 = 61 วินาที

Cure time ( $tc_{90}$ ) เท่ากับ 1:33 = 60+33 = 93 วินาที

จาก

$$CRI = \frac{100}{tc_{90} - ts_2}$$

$$CRI = \frac{100}{93 - 61} = \frac{100}{32} = 3.125$$

ดังนั้น CRI เท่ากับ 3.125

**ข.2 การทดสอบความทนทานต่อการบวมตัว (Swelling)**

ในการศึกษาความหนาแน่นของโครงสร้างเชื่อมโยงของยางผสม และโฟมยางผสมที่ผ่านการคงรูป ซึ่งศึกษาผ่านการทดสอบการบวมตัว โดยตัดชิ้นงานเป็นสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ และไปแช่ในโทลูอีนเป็นเวลา 7 วันเพื่อให้เกิดการบวมตัวอย่างสมบูรณ์ และชั่งน้ำหนักหลังแช่โทลูอีน โดยแต่ละอัตราส่วนผสมมีการทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง และนำค่า %Swelling มาเฉลี่ย

$$\%swelling = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100$$

เมื่อ %Swelling คือ ร้อยละการบวมตัวของชิ้นงานเทียบกับก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น %

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม (g)

$W_t$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม (g)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า %swelling จากสูตร C100 S2 ซึ่งมีค่าน้ำหนักของชิ้นงานก่อนการแช่ในสารละลาย เท่ากับ 0.5653 กรัม และน้ำหนักของชิ้นงานหลังการแช่ในสารละลาย เท่ากับ 1.9583 กรัม

ซึ่ง  $W_0$  เท่ากับ 0.5653 กรัม และ  $W_t$  เท่ากับ 1.9583 กรัม

จาก

$$\%swelling = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100$$

$$\%swelling = \frac{1.9583 - 0.5653}{0.5653} \times 100 = 246.418$$

ดังนั้น %swelling เท่ากับ 246.418

### ข.3 การทดสอบการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัด

การทดสอบการคืนตัวเนื่องจากแรงกดอัดของโฟมยาง ตามมาตรฐาน ASTM D1056 โดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง x ยาว x หนา เป็น 20 x 20 x 15 mm. จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกดให้ความหนาของชิ้นงานลดลง 50 % และเก็บไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

$$\%Compression\ set = \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_n} \times 100$$

เมื่อ %Compression set คือ การยุบอยู่ตัว มีหน่วยเป็น %

$T_0$  คือ ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

$T_i$  คือ ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

$T_n$  คือ ความหนาของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า %Compression set จากสูตร FA-N100 S2 ซึ่งมีค่าความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ เท่ากับ 13.88 มิลลิเมตร ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ เท่ากับ 6.49 มิลลิเมตร และความหนาของชิ้นงานขณะทดสอบ เท่ากับ 6.20 มิลลิเมตร

ซึ่ง  $T_0$  เท่ากับ 13.88 มิลลิเมตร,  $T_i$  เท่ากับ 6.49 มิลลิเมตร และ  $T_n$  เท่ากับ 6.20 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{จาก } \% \text{Compression set} &= \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_n} \times 100 \\ \% \text{Compression set} &= \frac{13.88 - 6.49}{13.88 - 6.20} \times 100 = 0.962 \end{aligned}$$

ดังนั้น %Compression set เท่ากับ 0.962

#### ข.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) จากบริษัท Hitachi high-technologies รุ่น TM3030 ประเทศญี่ปุ่น โดยนำชิ้นงานไปแช่ในไนโตรเจนเหลวและชุบให้แตก จากนั้นนำไปเคลือบด้วยทอง (Au) แล้วนำชิ้นงานเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อถ่ายภาพ ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ด้วยกระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยสำหรับยางผสม (Rubber blend) ใช้ศึกษาลักษณะความเข้ากันได้และพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานจากการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการดึงยึดและความทนทานต่อการฉีกขาด โดยสำหรับโฟมยางผสมจะใช้ศึกษาขนาดของเซลล์โฟม (Cell size) ขนาดของผนังเซลล์ (Cell wall) ความหนาแน่นของเซลล์โฟม (Cell density) และศึกษาการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม ImageJ

$$\text{Cell density } (N_f) = \left( \frac{n \cdot M^2}{A} \right)^{3/2}$$

เมื่อ  $N_f$  คือ ความหนาแน่นของเซลล์โฟม มีหน่วยเป็นจำนวนเซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cell/cm<sup>3</sup>)

$n$  คือ จำนวนเซลล์ใน SEM photomicrograph

$M$  คือ กำลังขยายใน SEM photomicrograph

$A$  คือ พื้นที่ใน SEM photomicrograph

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Cell density ( $N_f$ ) จากสูตร FO-C100 S2 ซึ่งมีจำนวนเซลล์ใน SEM photomicrograph เท่ากับ 223 เซลล์ กำลังขยายใน SEM photomicrograph 200 เท่า ขนาดความกว้างของ SEM photomicrograph เท่ากับ 679.887  $\mu\text{m}$  และความยาว SEM photomicrograph เท่ากับ 906.516  $\mu\text{m}$

ซึ่ง  $n$  เท่ากับ 200 cell,  $M$  เท่ากับ 200

แปลงหน่วยจาก  $\mu\text{m}$  เป็น  $\text{cm}$  ซึ่ง  $1 \mu\text{m}$  เท่ากับ  $0.0001 \text{ cm}$  จะได้

ขนาดความกว้างของ SEM photomicrograph เท่ากับ  $679.887 \times 0.0001 = 0.0680 \text{ cm}$

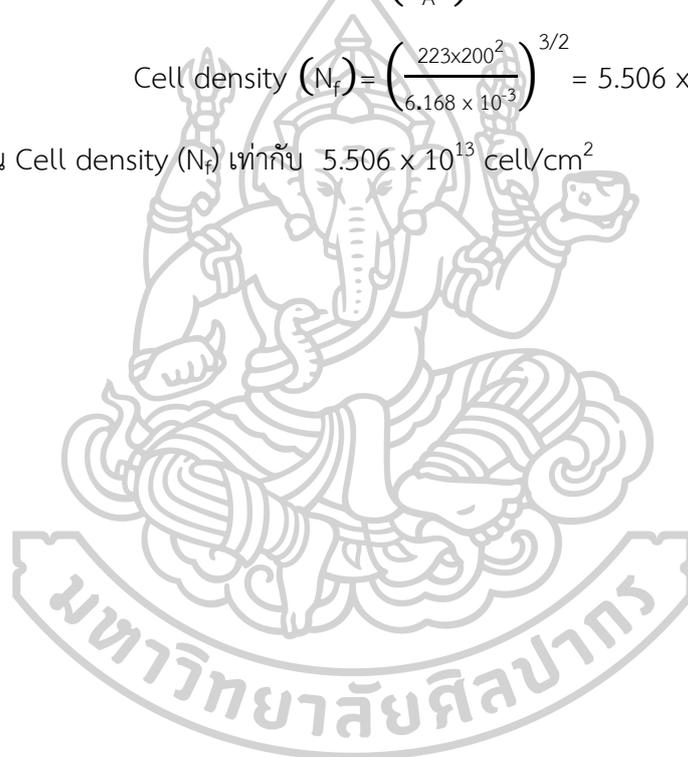
ความยาว SEM photomicrograph เท่ากับ  $906.516 \times 0.0001 = 0.0907 \text{ cm}$

$A$  เท่ากับ ความกว้าง  $\times$  ความยาว เท่ากับ  $0.0680 \times 0.0907 = 6.168 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$

จาก 
$$\text{Cell density } (N_f) = \left( \frac{n \cdot M^2}{A} \right)^{3/2}$$

$$\text{Cell density } (N_f) = \left( \frac{223 \times 200^2}{6.168 \times 10^{-3}} \right)^{3/2} = 5.506 \times 10^{13} \text{ cell/cm}^2$$

ดังนั้น Cell density ( $N_f$ ) เท่ากับ  $5.506 \times 10^{13} \text{ cell/cm}^2$



## ภาคผนวก ค

### การนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ

ค.1 ผลการนำเสนอ Oral presentation ในงานวิจัยในงานประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 11 (2021) หัวข้อเรื่อง “คุณลักษณะเฉพาะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน” จัดขึ้นในวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2564 ที่บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**คุณลักษณะเฉพาะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน**

Cure characteristics and mechanical properties of natural rubber and chloroprene rubber blend foam

สื่อเรื่อง อังสุพานิช<sup>1</sup> และ จันทร์ฉาย ทองปิ่น<sup>1</sup>

Lueruang Angsupanich<sup>1</sup> and Chanchai Thongpin<sup>1</sup>

#### บทคัดย่อ

โฟมยางเป็นยางที่มีฟองอากาศโดยใช้สารทำให้เกิดฟองเป็นวัสดุสร้างก๊าซ ข้อดีของโฟมยางคือน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพในการกันกระแทก รองรับน้ำหนักได้ดี เป็นฉนวนกันความร้อน ดูดซับเสียงได้ดีและช่วยในการลดต้นทุน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ส่วนแรกของงานวิจัยคือการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและแรงฉีกขาดลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางคลอโรพรีนในช่วงอัตราส่วนที่น้อยกว่า 60 phr เฟสของยางธรรมชาติจะเป็นเฟสต่อเนื่อง ส่วนของยางคลอโรพรีนจะเป็นเฟสกระจาย เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนมากกว่า 60 phr จะเกิดการกลับของเฟสของทั้งสอง ส่วนที่สองเป็นการศึกษากำหนดรูปโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน โดยใช้ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSh) เป็นสารทำให้เกิดฟอง พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นและมีขนาดของเซลล์โฟมที่เล็กลง

**คำสำคัญ** : ยางธรรมชาติ, ยางคลอโรพรีน, โฟมยาง, ยางผสม NR/CR

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม 73000 ประเทศไทย  
Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhonpathom, 73000, Thailand



### Abstract

Foam rubber is a rubber that contains air bubbles using a foaming agent as a gas-generating material. The advantage of foam rubber is its lightweight. It is effective in shockproof, good weight support as insulation. It absorbs sound well and helps in reducing costs. This research aims to study the preparation of foam rubber mixture between natural rubber and chloroprene rubber. The first part of the research was to study the compatibility of rubber compounds between natural rubber and chloroprene rubber. It was found that when the ratio of chloroprene rubber increased, it resulted in an increase in the retention time. And when the ratio of chloroprene rubber is increased, the tensile strength and tear strength are reduced, while the hardness increases. The morphology of chloroprene rubber in the ratio less than 60 phr, the natural rubber phase is the continuous phase. Chloroprene rubber is the dispersed phase. When the ratio of chloroprene rubber is greater than 60 phr, a reversal of both rubber phases occurs. The second part is a study on the forming of foam rubber mixed with natural rubber and chloroprene rubber, using oxybisbenzene sulfonylhydroxide (OBSH) as a foaming agent. found that when the ratio of chloroprene rubber increased This results in increased foam density and smaller foam cell sizes.

**Keyword:** Natural rubber, Chloroprene rubber, Foam rubber, NR/CR blends

### บทนำ

โฟมเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีโพรงอากาศหรือรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อ ในการผลิตจะใช้สารฟู (Blowing agent) ทำให้พอลิเมอร์เกิดการขยายตัว และลดความหนาแน่นโดยรวม โฟมจึงมีน้ำหนักเบา และมีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ ในปัจจุบันวัสดุประเภทโฟมได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา นุ่ม รองรับน้ำหนักได้ดี ซึ่งโฟมยางจัดเป็นหนึ่งในวัสดุประเภทโฟมที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมักใช้ทำผลิตภัณฑ์จำพวก หมอน ที่นอน เบาะนั่ง แผ่นรองพื้นรองเท้า และวัสดุกันกระแทก เป็นต้น วัสดุโฟม มีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน เช่น โฟมยาง มีสมบัติเด่นในเรื่องความยืดหยุ่นที่ดี เมื่อได้รับแรงจะเกิดการยืดออกและคืนตัวกลับเมื่อเอาแรงออก จึงถูกนำไปใช้เป็นวัสดุกันกระแทก พื้นรองเท้า แผ่นปูพื้น และซีล เป็นต้น (เจตริน และจันทร์ฉาย, 2562) แต่วัสดุโฟมยางธรรมชาติมีข้อจำกัดในเรื่องของการไม่ทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมันปิโตรเคมี เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ทำให้ยางเกิดการบวมตัว และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง และอีกข้อจำกัดหนึ่งที่สำคัญคือการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging Properties) ยางธรรมชาติมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ยางเกิดการยืดตัว และเกิดเป็นรอยแตกเล็ก ๆ จำนวนมาก จนทำให้ยางเสื่อมสภาพไปในที่สุด (ชินวินท์ และจันทร์ฉาย, 2560)

ยางคลอโรพรีนมีสมบัติทั่วไปคล้ายกับยางธรรมชาติคือมีความยืดติดกันได้ดี ความทนทานต่อแรงดึงและการขีดข่วนค่อนข้างสูง เนื่องจากยางคลอโรพรีนสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืดเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ (กรรณิกา และคณะ, 2550) มีสมบัติการต้านทานการติดไฟ เพราะยางคลอโรพรีนมีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบทำให้ยางมีสมบัติในการทนต่อเปลวไฟ มีความเป็นฉนวน ซึ่งเปลวไฟจะดับเองหลังจากนำออกจากเปลวไฟ นอกจากนี้ อะตอมของคลอรีนยังช่วยทำให้ยางคลอโรพรีนทนต่อสภาพอากาศ ความร้อน โอโซน และแสงแดดได้ดี ยางคลอโร

พรีนจึงเป็นยางที่มีขั้วที่ประกอบด้วยอะตอมของคลอรีน ส่งผลให้มีความทนต่อน้ำมันและสารเคมี จึงเหมาะสำหรับนำเอายางคลอโรพรีนมาปรับปรุงจุดด้อยของยางธรรมชาติได้ดี (Sae-oui et al., 2007)

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำยางธรรมชาติมาปรับปรุงให้มีความต้านทานต่อความร้อน น้ำมัน โอโซน และสมบัติเชิงกล เพื่อทำให้นำไปใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น โดยการนำเอายางธรรมชาติมาผสมกับยางคลอโรพรีน เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากอากาศ โอโซน ความร้อน และ แสงแดด ได้ดี (Aging properties) มีความทนต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดสูง (Tensile and Tear Strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางคลอโรพรีนมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้สามารถเกิดผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยึด มีความทนต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and Chemical Resistance) ได้ปานกลางถึงดี และมีความสามารถในการต้านทานการติดไฟ จึงมีความน่าสนใจและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังสามารถช่วยเหลือเกษตรกรสวนยางพารา และเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าเอายางธรรมชาติมาใช้งานได้หลากหลายมากขึ้นหรือเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติอีกทางหนึ่งได้เช่นกัน

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน
2. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะการคงรูป ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสม

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### วัสดุ

ยางธรรมชาติ เกรด STR5L จากบริษัท ที เจ รับบอร์ จำกัด, ยางคลอโรพรีน เกรด M-30, โซโคลเฮกซิลเบนโซไทอาโซล-2-ซัลโฟนาไมด์ (CBS), เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ (TMTD), ซิลิกา เกรด Ultrasil VN3 และ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSh) จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด, แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และเอทิลีนไรโอยูเรีย (ETU) จากบริษัท เอเพกซ์ เคมิคัล จำกัด, กรดสเตียริก, ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกำมะถัน (S<sub>8</sub>) จากบริษัทศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด, และพอลิไอโซพรีน-กราฟต์-มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (IR-g-MA) จากบริษัทชิกมา-อัลติริช (ประเทศไทย) จำกัด

#### การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ขั้นตอนแรกเริ่มทำการบดผสมยางระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่อัตราส่วน 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80 และ 0/100 (phr/phr) ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แล็บเทคเอนจิเนียริ่ง จำกัด รุ่น LRM-S-110 โดยกำหนดให้อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทำการเติมซิลิกา, พอลิไอโซพรีน-กราฟต์-มาเลอิกแอนไฮไดรด์, ซิงค์ออกไซด์, แมกนีเซียมออกไซด์, กรดสเตียริก, โซโคลเฮกซิลเบนโซไทอาโซล-2-ซัลโฟนาไมด์, เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์, เอทิลีนไรโอยูเรีย, กำมะถัน และออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ ปริมาณ 10/5 (% โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ)/5/2/2/1/0.5/0.5/2.2 และ 10 phr ตามลำดับ (Ramesan et al., 2005) ผสมให้กระจายจนเป็นเนื้อเดียวกัน และนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบลักษณะเฉพาะการคงรูปของยางที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) จากบริษัท Gotech รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D5298 จากนั้นนำยางคอมพาวด์มาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดัน 1000 psi ด้วยเครื่องขึ้นรูปกดอัดด้วยความดัน (Compression molding) บริษัท Chareon Tut ประเทศ

ไทย รุ่น PR1D-W300L350 ประเทศไทย ใช้แม่พิมพ์ขนาดความกว้าง 135 มิลลิเมตร ความยาว 195 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร เอาอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปไปตัดเป็นชิ้นงานในการทดสอบแรงดึงและการฉีกขาด เป็นรูปดัมเบลล์ (type C) และรูปตัววี (V shape) ตามลำดับ ด้วยเครื่อง PNEUMATIC SAMPLE CUTTER บริษัท Chareon Tut ประเทศไทย รุ่น CUT-W150L200-ST 150 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Hardness durometer (Shore A) บริษัท PTC instruments รุ่น 473 ประเทศสหรัฐอเมริกา ทดสอบแรงดึง (Tensile) และการฉีกขาด (Tear) ด้วยเครื่อง Universal testing machine บริษัท Instron engineering corporation รุ่น Instron 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ASTM D412 และ ASTM D624 ตามลำดับ ใช้ Load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน และอัตราในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) บริษัท Hitachi high-technologies รุ่น TM3030 ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งชิ้นงานต้องนำไปแช่ในโตรเจนเหลว จนกระทั่งชิ้นงานแข็งตัว จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาหักแล้วทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบ ส่วนการศึกษาขนาดของเซลล์โฟมและความหนาแน่นของเซลล์โฟมสามารถคำนวณดังสมการที่ 1 โดยใช้ใบมีดที่มีความคมตัดแล้วทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม ImageJ และทดสอบการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set) เป็นการทดสอบสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยาง ตามมาตรฐาน ASTM D1056 โดยใช้เครื่องกดด้วยแรงดันตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 20 x 20 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกดอัดให้ความหนาของชิ้นงานลดลง 50% เก็บไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ซึ่งค่า %Compression set สามารถคำนวณดังสมการที่ 2 และทดสอบการบวมตัว (%Swelling) ของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ โดยนำไปแช่ในโหลอื่นเป็นเวลา 1 วันและบันทึกน้ำหนักก่อนและหลังแช่ เพื่อนำไปคำนวณหาค่า %Swelling ซึ่งสามารถคำนวณดังสมการที่ 3 และทดสอบสมบัติการต้านทานการติดไฟ โดยทดสอบ Limiting Oxygen Index (LOI) เพื่อวัดปริมาณต่ำสุดของออกซิเจนที่ทำให้วัสดุสามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863-91 ซึ่งค่า LOI สามารถคำนวณดังสมการที่ 4

$$\text{Cell density } (N_f) = \left( \frac{n \cdot M^2}{A} \right)^{3/2} \quad (1)$$

เมื่อ  $N_f$  คือ ความหนาแน่นของเซลล์โฟม มีหน่วยเป็นจำนวนเซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cell}/\text{cm}^3$ )

$n$  คือ จำนวนเซลล์ใน SEM photomicrograph

$M$  คือ กำลังขยายใน SEM photomicrograph

$A$  คือ พื้นที่ใน SEM photomicrograph

$$\% \text{Compression set} = \frac{T_0 - T_f}{T_0 - T_n} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ %Compression set คือ การเสียรูปหลังการกดอัด มีหน่วยเป็น %

$T_0$  คือ ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

$T_f$  คือ ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

$T_n$  คือ ความหนาของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

$$\% \text{ Swelling} = \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ %Swelling คือ ร้อยละการบวมตัวของชิ้นงานเทียบกับก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น %

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม (g)

$W_f$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม (g)

$$LOI = \frac{[O_2]}{[O_2] + [N_2]} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ LOI คือดัชนีออกซิเจน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$[O_2]$  คืออัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน มีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที (L/min)

$[N_2]$  คืออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน มีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที (L/min)

### ผลและวิจารณ์

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะการคงรูปของยางคอมพาวด์ NR CR และยางผสม NR/CR ที่มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

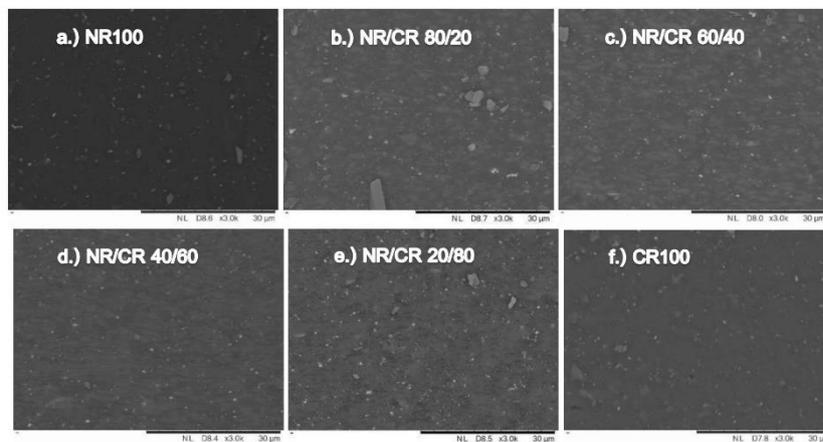
ปริมาณ CR (phr)	ts <sub>2</sub> [sec]	tc <sub>90</sub> [sec]	CRI	DT(MH-ML) [N-m]
0	38.00 ± 0.00	63.50 ± 0.50	3.92 ± 0.07	3.3624 ± 0.0171
20	44.75 ± 1.30	74.75 ± 0.83	3.33 ± 0.08	3.2904 ± 0.0364
40	49.75 ± 0.83	85.75 ± 0.83	2.78 ± 0.09	3.2376 ± 0.0377
60	60.25 ± 0.43	116.00 ± 2.12	1.79 ± 0.07	3.0874 ± 0.0612
80	73.67 ± 0.94	196.67 ± 6.65	0.81 ± 0.03	2.8857 ± 0.0118
100	113.33 ± 0.47	408.00 ± 9.90	0.34 ± 0.01	2.6907 ± 0.0378

จากข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เวลาสกอริช (ts<sub>2</sub>) และเวลาในการคงรูป (tc<sub>90</sub>) เพิ่มขึ้น (Salleh et al., 2019) เนื่องจากโครงสร้างของยางคลอโรพรีนมีส่วนที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติ และในระบบที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งในระบบซัลเฟอร์จะจับกับสายโซ่ที่ไม่มีตัวในยางจะต้องการ Allylic carbon มากขึ้นเพื่อมาสร้างพันธะเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ ซึ่งจำนวนของ Allylic carbon ในหนึ่งหน่วยซ้ำของยางธรรมชาติจะมี 3 Allylic carbon ส่วนในยางคลอโรพรีนจะมี 2 Allylic carbon เป็นปัจจัยส่งผลให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นได้ช้า ยังส่งผลให้ค่าดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) และค่าความแตกต่างของแรงบิด (DT) ลดลงด้วย ซึ่งค่าความแตกต่างของแรงบิดสามารถบ่งบอกถึงการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลยางที่ลดลง (Ramesan et al., 2005)

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

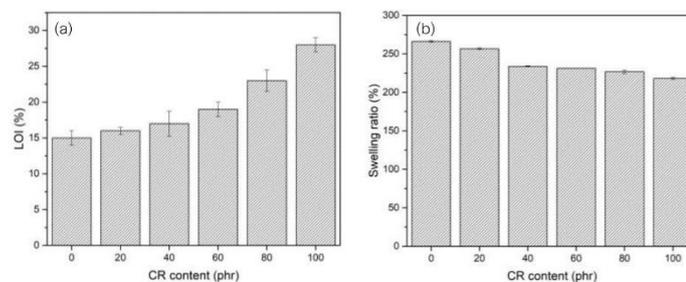
ปริมาณ CR (phr)	Tensile strength (MPa)	100% Secant modulus (MPa)	%Elongation at break	Tear strength (kN/mm)	Hardness (Shore A)
0	26.773 ± 0.362	0.9158 ± 0.0059	1544 ± 5.48	37.754 ± 0.975	54.21 ± 0.57
20	23.816 ± 0.390	0.8726 ± 0.0253	1538 ± 13.04	41.947 ± 1.058	56.40 ± 0.52
40	22.032 ± 0.452	1.0429 ± 0.0113	1462 ± 20.49	36.458 ± 1.850	56.39 ± 0.48
60	21.349 ± 0.237	1.0238 ± 0.0025	1610 ± 21.21	24.739 ± 0.585	57.14 ± 0.36
80	20.736 ± 0.240	1.0781 ± 0.0052	1660 ± 12.25	24.329 ± 0.434	58.62 ± 0.41
100	18.442 ± 0.446	1.0945 ± 0.0064	1532 ± 8.37	22.167 ± 0.287	60.26 ± 0.53

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) มีค่าลดลง เนื่องจากการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลยางที่ลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นจะสอดคล้องกับข้อมูลในตารางที่ 1 และยังคงส่งผลให้ค้ำมอดุลัส (Secant modulus) และความแข็งที่ผิว (Hardness) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น พบว่ายางคลอโรพรีนมีความแข็งที่ผิวมากกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางคลอโรพรีนมีส่วนประกอบของอะตอมคลอรีนทำให้มีความแข็งแกร่งในโครงสร้าง (Salleh et al., 2013)



รูปที่ 1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

จากรูปที่ 1 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าเมื่อมีการผสมยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติจะเกิดการแยกกันของวัฏภาค เนื่องจากยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนมีความเป็นขั้วที่ต่างกัน จึงมีการเติมซิลิกาและพอลิไอโซพรีน-กราฟต์-มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสม จะเห็นได้ว่าอนุภาคของยางที่เป็นวัฏภาคกระจายจะมีขนาดเล็กลง และในช่วงอัตราส่วนที่ยางคลอโรพรีนน้อยกว่า 60 phr วัฏภาคของยางธรรมชาติจะเป็นวัฏภาคแบบต่อเนื่อง ส่วนยางคลอโรพรีนจะเป็นวัฏภาคแบบกระจาย เมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนมากกว่า 60 phr จะเกิดการกลับวัฏภาคของยางทั้งสอง (Sae-oui et al., 2007)



รูปที่ 2 (a) กราฟแท่งแสดงข้อมูลการทดสอบสมบัติการต้านทานการติดไฟ (LOI) และ (b) กราฟแท่งแสดงข้อมูลการบวมตัว (%Swelling) ของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

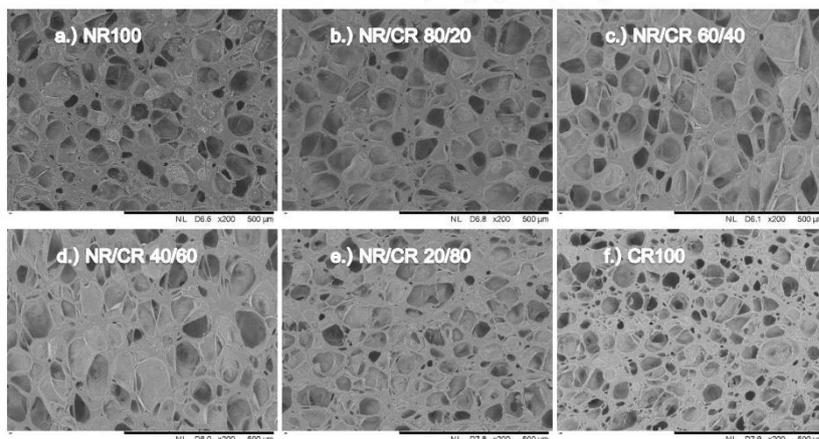
จากการศึกษาการทดสอบสมบัติการต้านทานการติดไฟ (LOI) และการทดสอบการบวมตัว (Swelling) ของยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่ผ่านการวัลคาไนซ์และมีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ แสดงในรูปที่ 2(a) และ 2(b) ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ค่า LOI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ทำให้เมื่อทดสอบการติดไฟจะเกิดเป็นเขม่าและถ่านก่อดำขึ้นบริเวณพื้นผิวของยาง ส่งผลให้เกิดเป็นอุณหภูมิความร้อนและยับยั้งการเผาไหม้ และเปลวไฟจะดับเอง เมื่อนำเปลวไฟออก (Self-Extinguish) และเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ค่าการบวมตัวของยาง (%Swelling) มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากยางคลอโรพรีนมีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ทำให้มีความเป็นขั้วที่สูงจึงบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนได้น้อยกว่ายางธรรมชาติ (Ramesan et al., 2005)

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลของโฟมยาง NR CR และโฟมยางผสม NR/CR ที่อัตราส่วนต่างกัน

ปริมาณ CR (phr)	Tensile strength (MPa)	100% Secant modulus (MPa)	%Elongation at break	Tear strength (kN/mm)	Hardness (Shore A)	compression set (%)
0	5.841 ± 0.064	0.2414 ± 0.0007	1344 ± 13.42	5.183 ± 0.031	21.36 ± 1.09	96.160 ± 0.534
20	4.535 ± 0.157	0.2443 ± 0.0019	1204 ± 16.73	5.326 ± 0.163	20.42 ± 1.58	91.604 ± 1.605
40	3.691 ± 0.176	0.2232 ± 0.0047	1260 ± 15.81	6.500 ± 0.129	20.47 ± 1.39	86.789 ± 3.258
60	4.419 ± 0.143	0.2961 ± 0.0030	1224 ± 8.94	8.334 ± 0.145	22.94 ± 1.85	70.200 ± 2.242
80	6.059 ± 0.080	0.3851 ± 0.0025	1312 ± 8.37	8.329 ± 0.146	27.15 ± 1.21	61.076 ± 3.982
100	5.513 ± 0.113	0.4448 ± 0.0041	1244 ± 13.42	9.424 ± 0.123	31.85 ± 1.10	53.692 ± 2.431

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมยาง NR CR และโฟมยางผสม NR/CR ที่อัตราส่วนต่างกัน แสดงในตารางที่ 3 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (Tensile strength) แต่ค่าความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) มีค่าเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ค่ามอดุลัส (Secant modulus) และความแข็งที่ผิว (Hardness) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของเซลล์โฟม (Cell size) มีขนาดเล็กและความหนาแน่นของเซลล์โฟม (Cell density) เพิ่มขึ้นจึงทำให้เนื้อโฟมยางมีความแข็งมากขึ้นสอดคล้องกับข้อมูลในรูปที่ 3 และตารางที่ 4 และค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set) มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้เร็วทำให้เวลา

ในการคงรูปมีค่าน้อย พันธะการเชื่อมโยงโมเลกุลเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก เมื่อมีการให้ความร้อนภายใต้การกดอัดทำให้ พันธะการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบพอลิซัลฟิดิกเกิดการแตกออกเป็นพันธะการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบไดซัลฟิดิกและมอนอซัลฟิดิก จึงทำให้มีความสามารถให้การคืนตัวต่ำ (Hongling et al., 2012)



รูปที่ 3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โฟมยาง NR CR และยางผสม NR/CR ที่อัตราส่วนต่างกัน ตารางที่ 4 แสดงความหนาแน่น ขนาดของเซลล์โฟม และความหนาแน่นของเซลล์โฟม ของโฟมยาง NR CR และโฟมยางผสม NR/CR ที่อัตราส่วนต่างกัน

ปริมาณ CR (phr)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Cell size (µm)	Cell density (10 <sup>13</sup> cell/cm <sup>3</sup> )
0	0.500 ± 0.007	83.679 ± 25.40	2.041
20	0.515 ± 0.008	80.358 ± 32.71	2.374
40	0.538 ± 0.005	76.347 ± 26.27	3.015
60	0.574 ± 0.004	76.137 ± 33.27	3.240
80	0.578 ± 0.010	52.391 ± 22.28	4.992
100	0.679 ± 0.007	49.159 ± 20.40	5.506

จากข้อมูลความหนาแน่น ขนาดของเซลล์โฟม และความหนาแน่นของเซลล์โฟม ของโฟมยาง NR CR และโฟมยางผสม NR/CR ที่อัตราส่วนต่างกันแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของโฟมยาง (Density) และความหนาแน่นของเซลล์โฟม (Cell density) เพิ่มขึ้น แต่ขนาดของเซลล์โฟม (Cell size) มีขนาดเล็กลงเนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยาควตาคาไนซ์ได้เร็วส่งผลให้เนื้อยางไม่สามารถไหลได้และสารทำให้เกิดฟองสลายตัวได้ช้ากว่าจึงเกิดเป็นก๊าซสะสมอยู่ภายในเซลล์ส่งผลให้เซลล์ที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น (Temna et al., 2014)

## สรุป

จากผลศึกษาลักษณะเฉพาะการคงรูป ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เวลาสกอรัชและเวลาในการคงรูปของยางเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ค่าต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสและความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นของโฟมยางและความหนาแน่นของเซลล์โฟมเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของเซลล์มีขนาดเล็กลงตามอัตราส่วนของคลอโรพรีนที่เพิ่มขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- ชินวินท์ แก้วนะ, และจันทร์ฉาย ทองปิ่น. (2560). อิทธิพลของสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติ ยางอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน และสารเติมแต่งระดับนาโนต่อการเกิดโฟมยางบิวทาไดอีน. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร. 140 หน้า.
- เจตริน เจริญตา, และจันทร์ฉาย ทองปิ่น. (2562). การเตรียมโฟมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซท จากพอลิเมอรัลธรรมชาติ. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร. 125 หน้า.
- กรรณิกา หัตถปะนิตย์, ชาศรีดิ สิริสิงห์, และพงษ์ธร แซ่ฮุย. (2550). ผลของเอทิลีนโอยูเรีย (ETU) ต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีน (CR) และยางธรรมชาติ (NR) ที่เสริมแรงด้วยซิลิกา. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว ปีที่ 23. ฉบับที่ 2. หน้า 78-91.
- P. Sae-oui, C. Sirisinha, and K. Hatthapanit. (2007). Effect of blend ratio on aging, oil, and ozone resistance of silica-filled chloroprene rubber/natural rubber (CR/NR) blends. *Express Polymer Letters*. p. 8-14.
- S.Z. Salleh, H. Ismail, and Z. Ahmad. (2013). Study on the effect of virgin and recycled chloroprene rubber (vCR and rCR) on the properties of natural rubber/chloroprene rubber (NR/CR) blends. *Journal of Polymer Engineering*. 33(9). p. 803-811.
- Y. Hongling, W. Ting, L. Heng, and Z. Baicun. (2012) Effect of Blowing Agent and Polyethylene Glycol on Cellular Structure and Mechanical Properties of Chloroprene Rubber. *Applied Mechanics and Materials*. 217-219. p. 517-521.
- K. Temna, N. Saetunga, and A. Saetung. (2014). Preparation and properties of sponge rubber based on natural rubber and cassava starch. *Advanced Materials Research*. 931-932. p. 68-72.
- M.T. Ramesan, R. Alex, and N.V. Khanh. (2005). Studies on the cure and mechanical properties of blends of natural rubber with dichlorocarbene modified styrene-butadiene rubber and chloroprene rubber. *Reactive & Functional Polymers*. 62. p. 41-50.



- S. Z. Salleh, H. Ismail, and Z. Ahmad. (2013). Study on the effect of virgin and recycled chloroprene rubber (vCR and rCR) on the properties of natural rubber/chloroprene rubber (NR/CR) blends. *Journal of Polymer Engineering*. 33(9). p. 803–811.
- I. Surya, and M. Z. Siswarni. (2019). Crosslink density and rheometric behaviour of natural rubber/chloroprene rubber blends. *Materials Science and Engineering*. 505. p. 1-5.

## รายการอ้างอิง

1. CR – POLYCHLOROPRENE (NEOPRENE). เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <https://polymerdatabase.com/Elastomers/Chloroprene.html>
2. ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR) และยางผสม (Rubber blend). เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2287/7/278866\\_ch2.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2287/7/278866_ch2.pdf)
3. ยางธรรมชาติ (natural rubber). เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2623/7/271312\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2623/7/271312_ch1.pdf)
4. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR). เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [http://rubber.oie.go.th/box/Article/1300/RIU-NR\\_1300\\_1.pdf](http://rubber.oie.go.th/box/Article/1300/RIU-NR_1300_1.pdf)
5. ภัณฑิลา ภูมिरะเบียบ. ชนิดของยางและการใช้งาน. เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <http://www.dss.go.th/images/st-article/pep-8-2556-rubbertype.pdf>
6. N. Saetung. Natural Rubber: Application as Starting Materials to Replace the Use of Raw Materials from Petroleum. Department of Materials Science and technology Faculty of Science Prince of Songkla University. 2014.
7. ภัณฑิลา ภูมिरะเบียบ. สารเคมีสำหรับยาง (Additives for Rubber). เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <http://www.dss.go.th/images/st-article/pep-8-2556-afr.pdf>
8. มาตรฐานยางแห่งประเทศไทย. เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2563. เข้าถึงได้จาก [http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2033/2/299622\\_app.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2033/2/299622_app.pdf)
9. P. Wongthong and S. Kiatkamjornwong. Chemical Modifications of Natural Rubber. เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <http://opac02.rbru.ac.th/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=3397>
10. มาตรฐานยางแท่ง (Standard Thai Rubber). เข้าถึงเมื่อ 20 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <http://heiphar.blogspot.com/2014/10/STR-Standard-Thai-Rubber.html>
11. สมบัติทั่วไปของยางสังเคราะห์. เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <http://rubber.oie.go.th/box/Article/21039/1.%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%B1%E0%B9%88%E0%B8%A7%E0%B9%84%E0%B8%9B%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%87>

- E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B9%8C.pdf
12. Vulcanization. เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2293/7/272796\\_ch2.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2293/7/272796_ch2.pdf)
  13. A.Y. Coran. Vulcanization. The Science and Technology of Rubber. 3 3 7 -3 8 1 . 2013.
  14. เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์. เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <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>
  15. CR Rubber. เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <https://www.mdr-thai.com/cr-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD/>
  16. ชินรัตน์ ลากพลุณษอนันต์. ยางคลอโรพรีน. เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก <http://mahidolrubber.org/files/CR.pdf>
  17. W. Yung-Aoon and E. Kalkornsurapranee. Enhancing Properties of Vulcanized Natural Rubber using Glutaraldehyde as Crosslinking Agent. Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology. Prince of Songkla University. 2017.
  18. P. Sirilhappornjareon and C. Thongpin. To study of composite materials between chloroprene rubber and abrasives materials for jewelry base. Department of Materials Science and Engineering Graduate School. Silpakorn University. 2008.
  19. E. Fuchs, K.S. Reinartz and Leverkusen. Improvement of the Crosslinking of Polychloroprene. Elastomere und kunststoffe. 53. 419-425. 1998.
  20. ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์. โฟมพลาสติก. เข้าถึงเมื่อ 7 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238\\_74-78.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238_74-78.pdf)
  21. Foams. เข้าถึงเมื่อ 28 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-12903-3\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-12903-3_10)
  22. C. Kaewna and C. Thongpin. Effect of NR, NBR composition and nanofiller on BR foaming. Department of Materials Science and Engineering Graduate School.

- Silpakorn University. 2017.
23. M.O. Okoroafor and K.C. Frisch. Introduction to foams and foam formation. Handbook of plastic foams: types, properties, manufacture and applications. New Jersey: William Andrew Publishing/Noyes. 1-10. 1995.
  24. P. Nakkharat and S. Hemsri. Development of biofoam from wheat gluten and wheat starch blend for food packaging. Department of Materials Science and Engineering Graduate School. Silpakorn University. 2016.
  25. J. Charoenta and C. Thongpin. Bio-base thermoplastic vulcanizate foam. Department of Materials Science and Engineering Graduate School. Silpakorn University. 2020.
  26. T. Witinuntakit and S. Poompradub. Mechanical and thermal properties of natural rubber/dichlorocarbene modified butadiene rubber blends. Department of Chemical Technology Faculty of Science Chulalongkorn University. 2014.
  27. ซิลิกา (Silica/SiO<sub>2</sub>) และประโยชน์ซิลิกา. เข้าถึงเมื่อ 15 กันยายน 2564. เข้าถึงได้จาก <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2/>
  28. S. Ek, E.I. Iiskola and L. Niinisto. A <sup>29</sup>Si and <sup>13</sup>C CP/MAS NMR Study on the Surface Species of Gas-Phase-Deposited  $\gamma$ -Aminopropylalkoxysilanes on Heat-Treated Silica. The Journal of Physical Chemistry. 108. 11454-11463. 2004.
  29. M.T. Ramesan, R. Alex and N.V. Khanh. Studies on the cure and mechanical properties of blends of natural rubber with dichlorocarbene modified styrene-butadiene rubber and chloroprene rubber. Reactive and Functional Polymers. 62(1). 41-50. 2005.
  30. S.Z. Salleh, H. Ismail and Z. Ahmad. Study on the effect of virgin and recycled chloroprene rubber (vCR and rCR) on the properties of natural rubber/chloroprene rubber (NR/CR) blends. Journal of Polymer Engineering. 33(9). 803-811. 2013.
  31. P. Sae-oui, C. Sirisinha and K. Hatthapanit. Effect of blend ratio on aging, oil and ozone resistance of silica-filled chloroprene rubber/natural rubber (CR/NR) blends. Express Polymer Letters. 1(1). 8-14. 2007.

32. H.L. Yi, T. Wei, H. Lin and B. Zheng. Effect of Blowing Agent and Polyethylene Glycol on Cellular Structure and Mechanical Properties of Chloroprene Rubber. *Applied Mechanics and Materials*. 217. 517-521. 2012.
33. N. Sombatsompop, P. Rungrattawachai, N. Bouvaree and K. Eaksrisakul. Effect of mastication time on flow patterns of natural rubber in the barrel of a capillary rheometer. *Polymer Testing*. 20. 317-320. 2001.
34. กฤษรา คงนวล, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ เอกชัย วิมลมาลา. สมบัติยางเซลลูลาร์จากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์เสริมแรงโดยผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ. การประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุ ครั้งที่ 6. 1. 1-8. 2552.
35. ดริญญา มุลชัย, เกียรติภูมิ นามวิเศษ และ ครรชิต ดุมา. อิทธิพลของสารก่อฟองต่อสมบัติของโพลียางธรรมชาติที่ใช้อุณหภูมิเป็นสารตัวเติม. รายงานการประชุมวิชาการ ประจำปี 2560 1. 286-294. 2560.
36. Y. Staudta, C. Odenbreita and J. Schneiderb. Failure behaviour of silicone adhesive in bonded connections with simple geometry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 82. 126-138. 2018.
37. L. Wan, C. Deng, Z.Y. Zhao, H. Chen and Y.Z. Wang. Flame Retardation of Natural Rubber. *Strategy and Recent Progress Polymer*. 12. 1-24. 2020.
38. A.R. Abdulwahhab and R.K. Jassim. The Effect of Aloe vera Extract on Adherence of *Candida albicans* and Other Properties of Heat Cure Denture Soft Lining Material. *Int J Med Res Health Sci*. 7. 94-103. 2018.
39. F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J.M. Lopez-Cuesta and Ph. Dubois. New prospects in flame retardant polymer materials. From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering*. 63. 100-125. 2009.
40. C.F. Antunes, M. van Duin and A.V. Machado. Effect of crosslinking on morphology and phase inversion of EPDM/PP blends. *Materials Chemistry and Physics*. 133(1). 410-418. 2012.
41. P. Ghosh, S. Katara and P. Patkar. Sulfur vulcanization of natural rubber for benzothizole accelerated formulations from reaction mechanisms to a rational kinetic model. *Rubber chemistry and technology*. 76. 593-689. 2003.
42. M.V. Duin and H. Dikland. A chemical modification approach for improving the oil resistance of ethyleneepropylene copolymers. *Polymer Degradation and*

- Stability 92. 2287-2293. 2007.
43. A. Smejda-Krzewicka, A. Olejnik and K. Strzelec. The effect of metal oxide on the cure, morphology, thermal and mechanical characteristics of chloroprene and butadiene rubber blends. *Polymer Bulletin*. 77(8). 4131-4146. 2019.
  44. H. Bayat and M. Fasihi. Curing characteristics and cellular morphology of natural rubber/silica composite foams. *Polymer Bulletin*. 1. 44-49. 2019.
  45. M.A. Radwan. TMTD Wild Mammal Repellent: Review and Current Status. Reprinted from forest science. 15. 439-445. 1969.
  46. D.Y. Kim, J.W. Park, D.Y. Lee and K.H. Seo. Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound via Accelerators and Reinforcement. *Polymers (Basel)*. 12(9). 1-14. 2020.
  47. C.T. Hiranobe, G.D. Ribeiro and G.B. Torres. Cross-Linked Density Determination of Natural Rubber Compounds by Different Analytical Techniques. *Materials Research*. 24(1). 1-9. 2021.
  48. Accelerators and Accelerator systems. เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2563. เข้าถึงได้จาก [https://www.akrochem.com/pdf/technical\\_papers/accelerators\\_part\\_two.pdf](https://www.akrochem.com/pdf/technical_papers/accelerators_part_two.pdf)
  49. A. Bootza, V. Vogelb, D. Schubertb and J. Kreutera. Comparison of scanning electron microscopy, dynamic light scattering and analytical ultracentrifugation for the sizing of poly(butyl cyanoacrylate) nanoparticles. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 57(2). 369-375. 2004.
  50. M. Tosaka, S. Poompradub, S. Murakami, S. Kohjiya, Y. Ikeda, S. Toki, I. Sics and B.S. Hsiao. Orientation and Crystallization of Natural Rubber Network as Revealed by WAXD Using Synchrotron Radiation. *Soft condensed matter and biophysics*. 37(9). 3299-3309. 2004.
  51. E. Cyril, M. Harris and G. Piersol. Chapter 33 Mechanical Properties of Rubber. *Shock & Vibration Handbook*. 1-18. 2002.
  52. K. Hatthapanit, C. Sirisinha and P. Sae-oui. Effect of Ethylene Thiourea on Properties of Silica-Filled CR/NR Blend. *SWU Sci*. 23. 78-91. 2007.
  53. B. Moon, J. Lee, S. Park and C.S. Seok. Study on the Aging Behavior of Natural Rubber/Butadiene Rubber (NR/BR) Blends Using a Parallel Spring Model. *Polymers (Basel)*. 10(6). 1-10. 2018.

54. I. Surya and M.Z. Siswarni. Crosslink density and rheometric behaviour of natural rubber/chloroprene rubber blends. 1<sup>st</sup> International Conference on Industrial and Manufacturing Engineering. 505. 1-5. 2019.
55. R.E. Florin, D.W. Brown, L.A. Hymo and J.D. Michaelson. Factors Affecting the Thermal Stability of Polytetrafluoroethylene. Journal of Research of the National Bureau of Standards. 53. 121-130. 1954.
56. S. Borros and N. Agullo. Qualitive and Quantitative determination of the polymer content in rubber formulations. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 67. 513-522. 2002.
57. P. Tangudom, N. Sombatsompop and S. Thongsang. Cure characteristics and mechanical properties of rubbers filled with silica hybrid filler. The 4th Science Research Conference. 1. 44-49. 2012.
58. F.M. Helaly and S.H. el-sabbagh. Bone Meal Waste and  $\text{Ca}(\text{HPO}_4)_2$  as Reinforcing Filler for NR and CR and their Blends Compared with Conventional White Filler. Journal of elastomers and plastics. 34. 335-348. 2002.
59. K. Hatthapanit, T. Wantana and P. Sae-oui. Influence of Chlorinated Paraffin on Properties of Silica-Filled CR/NR Blend. SWU Sci. 24. 50-64. 2008.
60. Z.X. Zhang, Y.N. Li, Q. Chen, B. Lu, Z. Xin and J.K. Kim. Thermal, Morphological, and Physicomechanical Properties of (Chlorinated Polyethylene Rubber)/(Chloroprene Rubber) Blends. Journal of vinyl and additive technology. 18-23. 2015.
61. T. Montanheiroa, F. Passadora, M. Oliveira, N. Duran and A. Lemesa. Preparation and Characterization of Maleic Anhydride Grafted Poly(Hydroxybutirate-CO-Hydroxyvalerate) – PHBV-g-MA, Materials Research. 19(1). 229-235. 2016.
62. G. Hoti, F. Caldera, C. Cecone, A.R. Pedrazzo, A. Anceschi, S.L. Appleton, Y.K. Monfared and F. Trotta. Effect of the Cross-Linking Density on the Swelling and Rheological Behavior of Ester-Bridged beta-Cyclodextrin Nanosponges. Materials (Basel). 14(3). 1-20. 2021.
63. S.H. Botros and A.M. El Sayed. Swelling behavior of NR/EPDM rubber blends under compression strain. Journal of Applied Polymer Science. 82(12). 3052-3057. 2001.

64. P. Sae-oui, C. Sirisinha, U. Thepsuwan and K. Hatthapanit. Dependence of mechanical and aging properties of chloroprene rubber on silica and ethylene thiourea loadings. *Journal of elastomers and plastics*. 43. 185-193. 2007.
65. W. Pechuraia, T. Muansupan and P. Seawlee. Effect of Foaming Temperature and Blowing Agent Content on Cure Characteristics. Mechanical and Morphological Properties of Natural Rubber Foams. *Advanced Materials Research*. 844. 454-457. 2014.
66. Durometer & IRHD Hardness Tester. เข้าถึงเมื่อ 14 มิถุนายน 2565. เข้าถึงได้จาก <http://teclock.co.jp/wordpress/wp-content/uploads/2017/05/10Durometer.pdf>







## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ลือเรือง อังสุพานิช
วัน เดือน ปี เกิด	30 มีนาคม 2540
สถานที่เกิด	ตรัง
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	194 หมู่ที่ 3 ตำบลสุโสะ อำเภอปะเหลียน จังหวัดตรัง 92120
ผลงานตีพิมพ์	ผลการนำเสนอ Oral presentation ในงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ บัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 11 (2021) หัวข้อเรื่อง “คุณลักษณะเฉพาะการ คงรูปและสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน” จัดขึ้นในวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2564 ที่บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

