



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การศึกษาพัฒนาสมบัติการกระด้างกระดอนของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต

เขต

Improvement of Rebound Resilience Properties in Ethylene-Vinyl Acetate Foam

ชื่อนิสิต นายวิศรุต เกียรติอมรวงศ์ เลขประจำตัว 6033092923

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาพัฒนาสมบัติการกระด้างกระคองของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต

Improvement of Rebound Resilience Properties in Ethylene-Vinyl
Acetate Foam

โดย

นายวิศรุต เกียรติอมรวงศ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

โครงการ การศึกษาพัฒนาสมบัติการกระด้างกระตอนของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์

โดย นายวิศรุต เกียรติอมรวงศ์

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

- | | |
|--|------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.นवलพรรณ จันทศิริ | ประธานกรรมการ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์ วรรณสุภากุล | กรรมการ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล | อาจารย์ที่ปรึกษา |

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล)
อาจารย์ที่ปรึกษา



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ โฮვნ)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 28 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2563...

ชื่อโครงการ การศึกษาพัฒนาสมบัติการกระเด็นกระดอนของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์

ชื่อนิสิตในโครงการ นายวิศรุต เกียรติอมรวงศ์ เลขประจำตัว 6033092923

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการพัฒนาสมบัติการกระเด็นกระดอนของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (อีวีเอ) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด โดยศึกษาผลของตัวแปรที่สำคัญในการผลิตโพลีเมอร์นั้นคือ ผลจากพอลิเมอร์ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามเกรดของอีวีเอ และแบ่งตามค่าดัชนีการไหล ผลของสารทำให้เกิดฟอง และผลของสารคงรูปตามลำดับ หลังจากนั้นจะนำสูตรพื้นฐานที่ได้ไปผสมกับพอลิเมอร์อีกสองชนิดคือ พอลิเอทิลีนออกทีนและยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกันเพื่อเพิ่มสมบัติการกระเด็นกระดอน โดยงานวิจัยนี้พบว่าโพลีเมอร์ที่มีการกระเด็นกระดอนสูงที่สุดคือ โพลีอีวีเอที่มีปริมาณไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 28% โดยน้ำหนัก และมีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 5 ใช้ไฮโดรคาร์บอนาไมด์เป็นสารทำให้เกิดฟอง และใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารคงรูปโดยมีค่าการกระเด็นกระดอนเท่ากับ 57% เมื่อนำมาเตรียมเป็นโพลีคอมพอสิตของอีวีเอ-พอลิเอทิลีนออกทีน-ยางธรรมชาติในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 70:15:15 พบว่าสามารถเพิ่มสมบัติการกระเด็นกระดอนได้เท่ากับ 60% ตลอดจนช่วยพัฒนาสมบัติความต้านทานต่อการขีดถู ความต้านทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด แต่เมื่อเตรียมยางธรรมชาติแล้วพบว่าโพลีเมอร์ที่มีสีเหลืองอ่อนซึ่งลดความเหลืองได้โดยการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพิ่มเติมจากเดิม แต่พบว่าโพลีเมอร์ได้นี้มีการขยายตัวที่ลดลงอย่างมากจึงได้แนะนำไว้ว่าอาจแก้ไขโดยการเติมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์, พอลิเอทิลีนออกทีน, ยางธรรมชาติ, โพลี, สมบัติการกระเด็นกระดอน

Project Title Improvement of Rebound Resilience Properties in Ethylene-Vinyl Acetate Foam

Student Name Visarut Kiatamornvong Student ID 6033092923

Advisor Name Assistant Professor Varawut Tangpasuthadol, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2020

Abstract

This study aimed to develop the rebound resilience property of ethylene vinyl acetate (PEVA) foam using compression molding process. Key parameters relating to form production that were evaluated were as follows, effect of polymer grade classified by vinyl acetate (VA) content and melt flow index, types of blowing agents and curing agents. The obtained foam-base formula were then blended with poly(ethylene octene) and natural rubber with the goal to enhance their rebound resilience properties. It appeared that the PEVA foam with the best rebound resilience property of 57% was obtained when the VA content was 28%, PEVA melt flow index of 5, and using azodicarbonamide, and dicumyl peroxide as foaming and curing agents, respectively. Then, a composite foam of PEVA-poly(ethylene octene)-natural rubber with the ratio of 70:15:15 could achieve the resilience property as high as 60%. In addition, abrasion resistance, tear and tensile strength were also improved. It was, however, found that the resulting composite foam was pale yellow in color, which could be reduced by adding a higher amounts of titanium dioxide (TiO₂). Furthermore, the expansion ratio was significantly reduced but it was recommended that this can be solved by adding a more foaming agent.

Keywords: Ethylene-Vinyl Acetate, Poly(ethylene octene), Natural rubber, Foam, Rebound resilience

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านสถานที่ เครื่องมือ และวัสดุดิบ สำหรับการทำงานวิจัย อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือและการแนะแนวทางในการทำวิจัย จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วรารุณี ตั้งพสุธาตล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและแนะแนวทางในการทำรายงาน รวมถึงการจัดทำรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

นอกจากนี้ ขอขอบคุณ บริษัท อินโนเวชั่น กรุ๊ป (ประเทศไทย) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 4 เดือน (เดือนมิถุนายน ถึงกันยายน พ.ศ. 2563) รวมถึงคุณฟาติละห์ ฮามะ และคุณธีรภัทร ต้นประเสริฐ พนักงานที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และมิตรสหายทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำรายงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งครูบาอาจารย์ ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาการทั้งหลายให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำรายงานวิจัยฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีดำเนินงาน	2
1.6 ทฤษฎีและการทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
1.6.1 โฟมพลาสติก (plastic foams)	4
1.6.2 การจำแนกประเภทของโฟม (foam classification)	4
1.6.2.1 จำแนกตามลักษณะของเซลล์หรือโครงสร้าง (structural configurations)	4
1.6.2.2 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ (physical properties)	5
1.6.2.3 จำแนกตามประเภทพลาสติก [6]	5
1.6.3 สารเคมีที่มีองค์ประกอบสำคัญในการเกิดโฟม	6
1.6.3.1 พอลิเมอร์ (polymer) หรือสารตั้งต้น	6
1.6.3.2 สารคงรูป (curing agent)	8
1.6.3.3 สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) [25-27]	10
1.6.4 ทฤษฎีการเกิดโฟม	12
1.6.4.1 กระบวนการเกิดฟองแก๊ส	12
1.6.4.2 กระบวนการเติบโตของฟองแก๊ส	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.6.4.3	14
บทที่ 2 การทดลอง	15
2.1	15
2.2	18
2.3	20
2.3.1	23
2.3.2	23
2.3.3	24
2.3.4	26
2.3.4.1	26
2.3.4.2	26
2.3.4.3	26
2.3.4.4	27
2.3.4.5	27
2.3.4.6	31
2.3.4.7	32
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	33
3.1	33
3.1.1	33
3.1.1.1	33
3.1.1.2	35
3.1.1.3	36
3.1.1.4	38
3.1.1.5	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1.6 ความแข็ง (hardness)	40
3.1.1.7 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)	41
3.1.1.8 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)	42
3.1.1.9 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	45
3.1.1.10 การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)	46
3.1.2 ผลของดัชนีหลอมไหลต่อสมบัติของโฟม	47
3.1.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)	47
3.1.2.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)	47
3.1.2.3 ลักษณะโครงสร้างสัณฐาน (morphology)	48
3.1.2.4 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)	50
3.1.2.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)	51
3.1.2.6 ความแข็ง (hardness)	52
3.1.2.7 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)	52
3.1.2.8 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)	53
3.1.2.9 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	55
3.1.2.10 การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)	56
3.2 ศึกษาผลของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) แต่ละชนิดที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน	57
3.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)	58
3.2.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) และความแข็ง (hardness)	61
3.2.3 ลักษณะโครงสร้างสัณฐาน (morphology)	62
3.2.4 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)	63
3.3 ศึกษาผลของสารคงรูป (curing agent) แต่ละชนิดที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน	64
3.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)	64
3.3.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3	ลักษณะโครงสร้างสีฐาน (morphology)	65
3.3.4	ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)	67
3.3.5	ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)	67
3.3.6	ความแข็ง (hardness)	68
3.3.7	สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)	69
3.3.8	สมบัติเชิงกล (mechanical properties)	69
3.3.9	การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	71
3.3.10	การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)	72
3.4	ศึกษาผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน	73
3.4.1	ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)	73
3.4.2	อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)	74
3.4.3	ลักษณะโครงสร้างสีฐาน (morphology)	75
3.4.4	ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)	77
3.4.5	ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)	78
3.4.6	ความแข็ง (hardness)	78
3.4.7	สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)	79
3.4.8	สมบัติเชิงกล (mechanical properties)	80
3.4.9	การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	82
3.4.10	การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)	83
บทที่ 4	สรุปผลการทดลอง	84
4.1	สรุปผลการทดลอง	84
4.2	ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในอนาคต	84
	เอกสารอ้างอิง	86
	ประวัติผู้วิจัย	89

สารบัญญัตินี้

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของเม็ดพลาสติก PEVA จากบริษัททีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)	15
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเม็ดพลาสติก PEVA จากบริษัทอื่น ๆ	15
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)	16
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติของสารคงรูป (curing agent) โดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์	17
ตารางที่ 2.5 สมบัติของ polyolefin elastomer (POE) ที่ใช้ คือ poly(ethylene octene)	17
ตารางที่ 2.6 สูตรโฟมคอมพาวด์พอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต	21
ตารางที่ 2.7 สภาวะที่ใช้ทดสอบการเสียรูปหลังจากการอัด (compression set)	31
ตารางที่ 3.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ VA	34
ตารางที่ 3.2 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณดัชนีการไหล (melt flow index)	47
ตารางที่ 3.3 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)	58
ตารางที่ 3.4 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตตเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารคงรูป	64
ตารางที่ 3.5 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนและชนิดพอลิเมอร์ผสม	74
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบโฟม PEVA บริสุทธิ์ กับโฟมผสม PEVA/POE/NR ในอัตราส่วน 70:15:15 โดยน้ำหนัก	85

สารบัญรูป

	หน้า
ภาพที่ 1.1 สัณฐานโครงสร้างของโฟม (ก) เซลล์ปิด (ข) เซลล์เปิด [6]	4
ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างสัณฐานโครงสร้างของโฟม (ก) ชนิดยืดหยุ่น (ข) ชนิดแข็ง [8]	5
ภาพที่ 1.3 ปฏิกิริยา polymerization สังเคราะห์พอลิเอทิลีนไวนิลเอซีเตต (PEVA)	6
ภาพที่ 1.4 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนออกทีน	7
ภาพที่ 1.5 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	8
ภาพที่ 1.6 สายโซ่โมเลกุลและการเชื่อมขวาง	9
ภาพที่ 1.7 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสารคงรูปประเภทเปอร์ออกไซด์ (peroxide)	9
ภาพที่ 1.8 จำลองการเชื่อมขวางสารคงรูปประเภทเปอร์ออกไซด์ (peroxide) บนสายโซ่โมเลกุล [24]	10
ภาพที่ 1.9 แสดงโครงสร้างของเซลล์ที่ขั้นตอนการขยายตัวของฟองแก๊สต่าง ๆ	14
ภาพที่ 2.1 ชิ้นงานทดสอบ tensile strength และ tear strength แบบต่าง ๆ	25
ภาพที่ 2.2 ชิ้นงานทดสอบ split tear ที่ตัดปลายความยาวประมาณ 2 นิ้ว	25
ภาพที่ 2.3 ชิ้นงานทดสอบสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	25
ภาพที่ 2.4 ชิ้นงานทดสอบ (ก) ความต้านทานการขัดถู (abrasion) ตามมาตรฐาน DIN (ข) การกระด้างกระดอน (rebound resilience)	25
ภาพที่ 2.5 การทดสอบการสมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)	27
ภาพที่ 2.6 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ tensile strength	27
ภาพที่ 2.7 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624	28
ภาพที่ 2.8 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ trousers tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624	29
ภาพที่ 2.9 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ split tear	29
ภาพที่ 2.10 ลักษณะการจัดวางชิ้นงานทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	30
ภาพที่ 2.11 แสดงการทดสอบความต้านทานการขัดถู (DIN abrasion)	31
ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างกราฟการคงรูป cure curve ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 28%	34
ภาพที่ 3.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับจากสูตรเดียวกัน	35
ภาพที่ 3.3 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	36
ภาพที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟม PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยเปรียบเทียบผลของปริมาณ VA ที่แตกต่างกัน	37
ภาพที่ 3.5 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลเอซีเตต (PEVA) เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	38
ภาพที่ 3.6 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	39
ภาพที่ 3.7 ค่าความถ่วงจำเพาะ หรือความหนาแน่นของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.8 ค่าความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	41
ภาพที่ 3.9 ค่าการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	42
ภาพที่ 3.10 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	43
ภาพที่ 3.11 ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	44
ภาพที่ 3.12 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	45
ภาพที่ 3.13 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	46
ภาพที่ 3.14 ความต้านทานต่อขัดถู (abrasion) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน	46
ภาพที่ 3.15 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	48
ภาพที่ 3.16 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของค่า MFI ที่แตกต่างกัน	49
ภาพที่ 3.17 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	50
ภาพที่ 3.18 ความสามารถการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	51
ภาพที่ 3.19 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	51
ภาพที่ 3.20 ค่าความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	52
ภาพที่ 3.21 ค่าการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	53
ภาพที่ 3.22 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	54
ภาพที่ 3.23 ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	54
ภาพที่ 3.24 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	55
ภาพที่ 3.25 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	56
ภาพที่ 3.26 ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน	57
ภาพที่ 3.27 กราฟการคงรูป cure curve ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% โดยใช้ p,p'-oxybisbenzensulfonylhydrazine (OBSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)	59
ภาพที่ 3.28 กราฟการคงรูป cure curve ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% โดยใช้ p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)	59
ภาพที่ 3.29 โฟม PEVA ที่ใช้ p,p'-oxybisbenzensulfonylhydrazine (OBSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง	60
ภาพที่ 3.30 แสดงโฟม PEVA ที่ใช้ p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง	60

สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.31 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกัน	61
ภาพที่ 3.32 ความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกัน	61
ภาพที่ 3.33 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟม PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของชนิด สารทำให้เกิดฟอง	62
ภาพที่ 3.34 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลเอซีเตต (PEVA) ที่ใช้ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกัน	63
ภาพที่ 3.35 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	65
ภาพที่ 3.36 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟม PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของชนิดสารคงรูป	66
ภาพที่ 3.37 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	66
ภาพที่ 3.38 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	67
ภาพที่ 3.39 ค่าความถ่วงจำเพาะ หรือความหนาแน่นของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	68
ภาพที่ 3.40 ความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	68
ภาพที่ 3.41 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	69
ภาพที่ 3.42 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	70
ภาพที่ 3.43 ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	70
ภาพที่ 3.44 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	71
ภาพที่ 3.45 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	72
ภาพที่ 3.46 ความต้านทานการขัดถู (abrasion) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน	72
ภาพที่ 3.47 กราฟการคงรูป cure curve ของโฟมที่มีอัตราส่วนพอลิเอทิลีนไวนิลเอซีเตต (PEVA) ต่อ ยางธรรมชาติ (NR) เท่ากับ 70 : 30	74
ภาพที่ 3.48 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	75
ภาพที่ 3.49 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟมเอทิลีน PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของพอลิเมอร์ผสม	76
ภาพที่ 3.50 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	77
ภาพที่ 3.52 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	77

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.52 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	78
ภาพที่ 3.53 ความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	79
ภาพที่ 3.54 สมบัติการกระเด็นกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	79
ภาพที่ 3.55 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	80
ภาพที่ 3.56 ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	81
ภาพที่ 3.57 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	82
ภาพที่ 3.58 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	82
ภาพที่ 3.59 ความต้านทานการขีดถู (abrasion) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน	83
ภาพที่ 4.1 โฟมคอมพอสิตของอีวีเอ-พอลิเอทิลีนออกทีน-ยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปแล้ว	84

สัญลักษณ์และคำย่อ

ADC	azodicarbonamide
CRI	ดัชนีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป (cure rate index)
DCP	dicumyl peroxide
PEVA	พอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์
MFI	ค่าดัชนีการไหล (melt flow index)
NR	ยางธรรมชาติ
OBSH	p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSH)
Phr	parts per hundred rubber
POE	พอลิเอทิลีนออกทีน
t_{c90}	เวลาที่ใช้ในการคงรูปไปได้ร้อยละ 90
t_{s2}	เวลาที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาการคงรูป (scorch time)
TSH	p-toluenesulfonyl hydrazine
VA	ไวนิลแอลกอฮอล์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ในปัจจุบันพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในการชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ หรือ PEVA ซึ่งเป็นโพลีพลาสติกที่ผ่านกระบวนการเหมือนเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) โดยมีสมบัติบางประการเหมือน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene) แต่มีสมบัติที่เด่นกว่า คือ ความยืดหยุ่น และความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นจึงนิยม PEVA นำไปทำเป็น แผ่นดูดซับเสียง ฟิล์มห่ออาหาร ฉนวน และที่สำคัญคือ ใช้เป็นพื้นรองเท้ากีฬาในส้น midsole เนื่องจาก PEVA มีสมบัติที่ดีกว่ายาง คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ทนทานต่อความต้านทานโอโซน รวมถึงการลดต้นทุน [1] จึงทำให้หลาย ๆ ยี่ห้อรองเท้า ให้ความสำคัญกับการนำ PEVA ไปใช้เป็นส่วนประกอบ เช่น รองเท้าวิ่ง เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดในเรื่องความดึงเครียดหรือความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) จึงต้องนำมาผสมกับยางบางชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าว เช่น การผสมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์กับยางธรรมชาติ [2]

ในงานวิจัยของ Wang และคณะ ได้ศึกษาปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับชนิดและปริมาณของสารฟุ้งหรือสารทำให้เกิดฟอง ชนิดและปริมาณของสารเชื่อมขวาง หรือสารคงรูป รวมถึงผสมเข้ากับพอลิเอทิลีนออกทีน ซึ่งผลการศึกษาพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อสมบัติเชิงกล [3] จึงคิดว่าถ้ามีการศึกษาในโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ อาจช่วยพัฒนาสมบัติเชิงกล รวมถึงสมบัติการกระด้าง กระดอนได้

โครงการนี้จึงสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติการกระด้างกระดอนของโพลี PEVA เพื่อนำไปใช้เป็นพื้นรองเท้ากีฬาในส้น midsole โดยในการปรับปรุงสมบัติของโพลี PEVA จะต้องมีความเข้าใจในสูตรพื้นฐานของโพลี PEVA จึงต้องศึกษาผลเกรดของ PEVA รวมถึงตัวแปรต่าง ๆ คือ สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent), สารคงรูป (curing agent) และ modifier ที่นำมาผสมเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการกระด้างกระดอนของ PEVA เนื่องจากการเพิ่มสมบัตินี้ ต้องเพิ่มความสามารถในการเชื่อม (cross-link) ซึ่งจะทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ลดลง [3-4] นอกจากนี้การผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความสามารถการหลอมสูงช่วยเพิ่มสมบัติการกระด้างกระดอนได้ รวมถึงโครงสร้างทางสัณฐานที่ต่างกันอาจส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อปรับปรุงสมบัติการกระด้างกระดอนของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.1.1. ศึกษาผลของเกรด PEVA ที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน
- 1.1.2. ศึกษาผลชนิดของสารทำให้เกิดฟองที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน
- 1.1.3. ศึกษาผลชนิดของสารคงรูปที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน
- 1.1.4. ศึกษาผลของ modifier ที่สามารถช่วยเพิ่มสมบัติการกระด้างกระดอนใน PEVA

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้โฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) ที่มีสมบัติการกระด้างกระดอนมากขึ้น

1.5 วิธีดำเนินงาน

ก. แผนการศึกษา

1. ค้นคว้าศึกษาข้อมูล จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี
 - 1.1 ทบทวนเนื้อหาองค์ประกอบที่สำคัญในกระบวนการผลิตโฟม
 - 1.2 ศึกษารวบรวมงานวิชาการที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาสมบัติของโฟม
 - 1.3 ศึกษากระบวนการทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติที่จำเป็นของโฟม
 - 1.4 จัดเตรียมสารเคมีที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการบดผสม
2. ทดลองศึกษาผลของ grade ของ PEVA ที่มีต่อสมบัติการกระด้างกระดอน
 - 2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน
 - บด PEVA กับ สารเคมี
 - ทดสอบการเชื่อมโยง (cure characteristics)
 - อัดขึ้นรูป
 - ตัดสไลด์โฟม ความหนา 4, 10, 12.5, 20 mm เพื่อนำไปตัดชิ้นงานทดสอบ
 - 2.2 วัดอัตราส่วนการขยายตัว (expansion Ratio) และ การหดตัว (shrinkage)
 - 2.2 ทดสอบสมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)
 - 2.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล
 - การทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412
 - การทดสอบความยืดตัว (elongation)
 - การทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624 trousers tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624/DIN 53507-A และ split tear ตามมาตรฐาน DIN 53507-B (ขนาดชิ้นทดสอบ 150x25.4x20.0 mm)
 - การทดสอบความแข็งกด (hardness)
 - การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)
 - 2.4 ทดสอบสมบัติการต้านทานการขัดถู (abrasion) ตามมาตรฐาน DIN

2.5 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วย optical microscope

3. ปรับความแข็งแต่ละสูตรให้ใกล้เคียงกับ 50 shore C
4. ทดลองศึกษาผลของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) แต่ละชนิด (ขั้นตอนตามข้อ 2)
5. ทดลองศึกษาชนิดของสารคงรูป (curing agent) (ขั้นตอนตามข้อ 2)
6. ศึกษา modifier ที่นำมาผสมกับ PEVA (ขั้นตอนตามข้อ 2)
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนรายงาน
8. ออกแบบการนำเสนองานวิจัย

ข. ระยะเวลาที่ศึกษา

ขั้นตอนดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินงาน (เริ่ม เดือนมิถุนายน 2563)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. ค้นคว้าศึกษาข้อมูล จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี	—————															
2. ทดลองศึกษาผลของ grade ของ PEVA ที่มีต่อสมบัติการกระเดื่อง			—————													
3. ปรับความแข็งแต่ละสูตรให้ใกล้เคียงกับ 50 shore C			—————													
4. ทดลองศึกษาผลของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) แต่ละชนิด				—————												
5. ทดลองศึกษาชนิดของสารคงรูป (curing agent)					—————											
6. ศึกษา modifier ที่นำมาผสมกับ PEVA							—————									
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนรายงาน											—————					
8. ออกแบบการนำเสนองานวิจัย														—————		

1.6 ทฤษฎีและการทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 โฟมพลาสติก (plastic foams)

โฟมพลาสติก หรือ โฟมพอลิเมอร์ (polymeric foam) หรือ เอกซ์แพนเด็ดพลาสติก (expanded plastic) หรือสามารถเรียกสั้น ๆ ได้ว่า โฟม หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงแก๊สเล็ก ๆ อยู่จำนวนมากกระจายอยู่ในเนื้อ [6] ซึ่งเกิดจากการที่พลาสติกขยายตัวหรือมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) ลักษณะทางกายภาพจะประกอบด้วยตั้งแต่ 2 เฟส (phase) ขึ้นไป คือ เฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง (solid polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกของสารฟู (blowing agent) [7] ซึ่งในส่วนนี้เองทำให้พลาสติกเกิดการขยายตัวและลดความหนาแน่นลง จึงทำให้โฟมมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้อาจมีการเติมสารอื่นลงไป เช่น สารตัวเติม (fillers)

1.6.2 การจำแนกประเภทของโฟม (foam classification)

1.6.2.1 จำแนกตามลักษณะของเซลล์หรือโครงสร้าง (structural configurations)

1.6.2.1.1 โฟมเซลล์ปิด (closed-cell foam)

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่าหน้าต่างเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ แต่การเคลื่อนที่ของแก๊สจะกระทำโดยการแพร่ผ่านผนังเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ก) โดยโฟมชนิดนี้จะแข็งแรงเหมาะในการนำไปใช้งานเป็นฉนวนความร้อน

1.6.2.1.2 โฟมเซลล์เปิด (opened-cell foam)

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ซึ่งแก๊สสามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ข) โดยโฟมชนิดนี้มีสมบัติยืดหยุ่น ทำให้เหมาะในการทำวัสดุกันกระแทก



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1.1 สัณฐานโครงสร้างของโฟม (ก) เซลล์ปิด (ข) เซลล์เปิด [6]

1.6.2.2 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ (physical properties)

1.6.2.2.1 โฟมยืดหยุ่น (flexible foam)

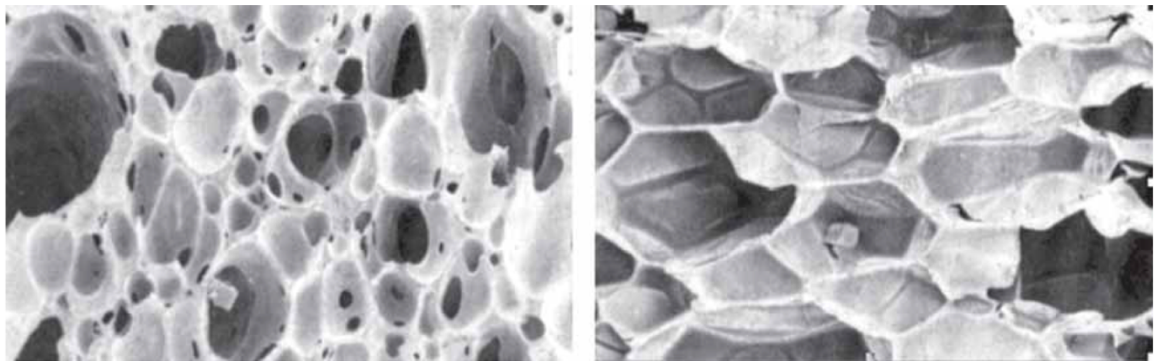
โฟมมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature : T_g) ที่ต่ำ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่าย เช่น โฟมยาง (elastomeric foam) ดังรูปที่ 1.2 (ก)

1.6.2.2.2 โฟมชนิดแข็ง (rigid foam)

โฟมอยู่ในสถานะผลึก (crystalline state) แต่ถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (amorphous state) จะมีอุณหภูมิสภาพแก้วที่สูง มีลักษณะแข็ง และไม่คืนตัวเมื่อถูกกด ดังรูปที่ 1.2 (ข)

1.6.2.2.3 โฟมชนิดกึ่งแข็ง (semi-rigid foam)

มีลักษณะอยู่ทั้งสองแบบ โดยโฟมชนิดนี้มีมอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ที่สูง กว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น และมีความเค้นความเครียด (stress-strain) คล้ายโฟมยืดหยุ่น



(ก)

(ข)

ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างสัณฐานโครงสร้างของโฟม (ก) ชนิดยืดหยุ่น (ข) ชนิดแข็ง [8]

1.6.2.3 จำแนกตามประเภทพลาสติก [6]

1.6.2.3.1 โฟมเทอร์โมเซต (thermoset foam)

เป็นโฟมพลาสติกที่เตรียมจากพลาสติกเทอร์โมเซต จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น โฟมโพลียูรีเทน

1.6.2.3.2 โฟมเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic foam)

เป็นโฟมที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย เช่น โฟมโพลีเอทิลีน

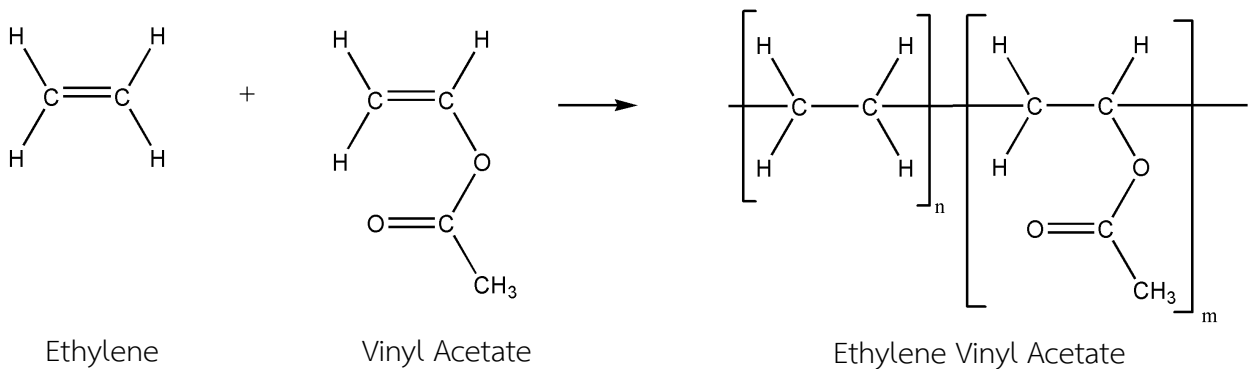
1.6.3 สารเคมีที่มีองค์ประกอบสำคัญในการเกิดโฟม

1.6.3.1 พอลิเมอร์ (polymer) หรือสารตั้งต้น

1.6.3.1.1 พอลิพอลิเอทิลีนไวนิลแอสีเตต poly(ethylene-vinyl acetate), PEVA

เป็น copolymer ที่เกิดจาก เอทิลีน (ethylene) กับ ไวนิลแอสีเตต (vinyl acetate) โดยเกรดของ PEVA จะแบ่งได้จากปริมาณของไวนิลแอสีเตต (VA) ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติด้านการยืดหยุ่น (elasticity) โดยแบ่งได้ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. สัดส่วนของ VA ต่ำ ไม่เกิน 4% จะเหมือนโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) โดยมีสมบัติที่มันกว่า PE แต่อ่อนนิ่มและยืดหยุ่น จึงใช้เป็นฟิล์มห่ออาหาร
2. สัดส่วนของ VA ปานกลาง 4%-30% เป็น thermoplastic elastomer
3. สัดส่วนของ VA สูง เกินกว่า 60% เป็น ethylene-vinyl acetate rubber



ภาพที่ 1.3 ปฏิกิริยา polymerization สังเคราะห์พอลิเอทิลีนไวนิลแอสีเตต (PEVA)

- สมบัติที่สำคัญของพอลิพอลิเอทิลีนไวนิลแอสีเตต

- น้ำหนักเบา ลอยน้ำ และกันน้ำ
- เป็นฉนวนกันความร้อนได้
- เก็บเสียงรับแรงกระแทกได้ดี
- มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม โอโซน อากาศ ทำให้มีอายุการใช้งานนาน
- มีความยืดหยุ่น (elongation) และคืนตัวสูง ไม่สามารถแตกหักได้ง่าย
- ขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามการใช้งานได้

- การนำไปใช้ประโยชน์ [19]

พอลิพอลิเอทิลีนไวนิลแอสีเตตถูกนำไปใช้งานได้หลากหลาย โดยแบ่งการนำไปใช้ตามกระบวนการผลิตได้ดังนี้

- ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยกระบวนการอัดรีด (extruded product) ได้แก่ หลอด, ท่อหุ้มสายไฟและสายเคเบิล, และแผ่นฟิล์ม

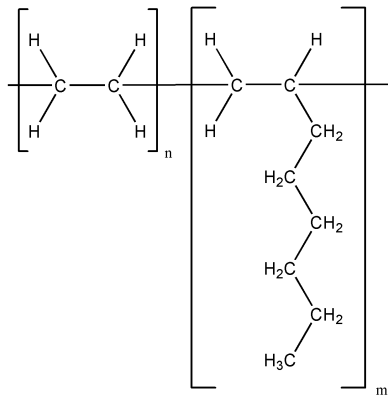
- ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยกระบวนการอัดแบบ (molded product) ได้แก่ของเด็กเล่น, อุปกรณ์ที่ใช้ในการแพทย์, ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการกีฬา, บรรจุภัณฑ์, ปะเก็น (gasket application) เนื่องจาก PEVA มีความยืดหยุ่น (elasticity), ทนน้ำมันได้ดี, มีกลิ่นน้อยและมีความเป็นพิษน้อย (low toxicity)
- ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยกระบวนการรีด (calendered goods) ได้แก่แผ่นลามิเนต, ฟิล์ม, แผ่นผ้ายาง (tapes) และบรรจุภัณฑ์
- ผลิตภัณฑ์พิเศษต่าง ๆ เช่น ถุงมือผ่าตัด (surgical gloves) ใช้ในงานเคลือบบนกระดาษและผ้าที่ตกแต่งบนรองเท้า

● ข้อจำกัด

- สำหรับการใช้งานภายนอก สีจะซีดก่อนวัสดุจะเสื่อมคุณภาพ
- ไม่สามารถเติมกลิ่นหอมได้
- ค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ (tensile strength)
- ไม่ทนทานต่อสารเคมีจำพวกอะโรมาติกและฮาโรเจนไฮโดรคาร์บอน และการสลายตัวจากความร้อน

1.6.3.1.2 พอลิเอทิลีนออกทีน poly(ethylene octene), POE

เป็น polyolefin elastomer (POEs) ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท Dow Chemical co.,Ltd โดยที่ ethylene-octene copolymer (EOC) คือ elastomer ที่มีเอทิลีน (ethylene) เป็น based ดังนั้นจึงสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับ polyolefin ชนิดอื่นเช่น PE และ PP เป็นต้น นอกจากนี้การที่มี octene เป็น copolymer เป็นสาเหตุของความเป็นผลึกที่ต่ำลงและทำให้ความยืดหยุ่นสูง



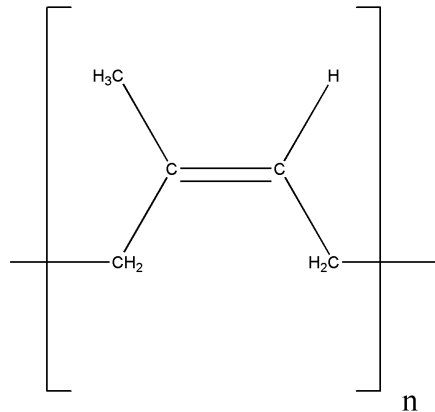
ภาพที่ 1.4 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนออกทีน

● ข้อดี [20]

- ช่วยพัฒนาสมบัติการกระด้างกระดอน
- การหดตัวด้วยความร้อนต่ำ (lower shrinkage)
- เบากว่าเมื่อเทียบกับโพลีที่มีความแข็งเท่ากัน
- พัฒนาสมบัติความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance)

1.6.3.1.3 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

เป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน มีโครงสร้างโมเลกุลทางเคมีเป็น ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) ตามภาพที่ 1.5 นอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีสมบัติเชิงกลดี มีความยืดหยุ่น (elastic) สูง มีความเหนียว (toughness) มีความต้านทานต่อการขีดถู (abrasion resistance) สูง และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะและสิ่งทอได้ดี จึงสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายมากขึ้น [21]



ภาพที่ 1.5 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

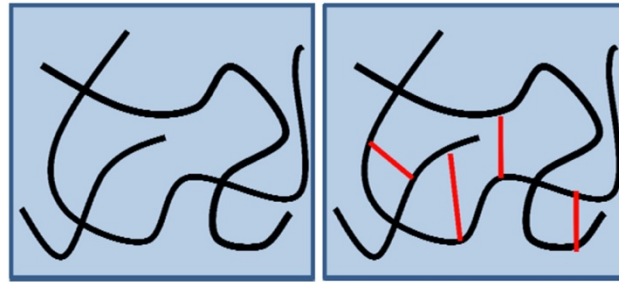
- ข้อเสีย

- มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย

1.6.3.2 สารคงรูป (curing agent)

คือ สารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมขวางโดยการสร้างพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุล ตามภาพที่ 1.6 พันธะที่เกิดขึ้นอาจเป็นซัลเฟอร์อะตอมหรือพันธะคาร์บอนคาร์บอน เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมขวางเนื่องจาก PEVA ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุลสายโซ่จึงไม่สามารถใช้ระบบซัลเฟอร์ในการคงรูปได้

ในกระบวนการผลิตโฟมพลาสติกสามารถทำได้โดยการเติมสารคงรูปที่เป็นสารประเภทเปอร์ออกไซด์เพื่อเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เพราะในกระบวนการขยายตัวของโฟมต้องมีการเชื่อมขวางผนังของฟองที่เกิดขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อให้ฟองที่ขยายตัวเสถียร และยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากความร้อน



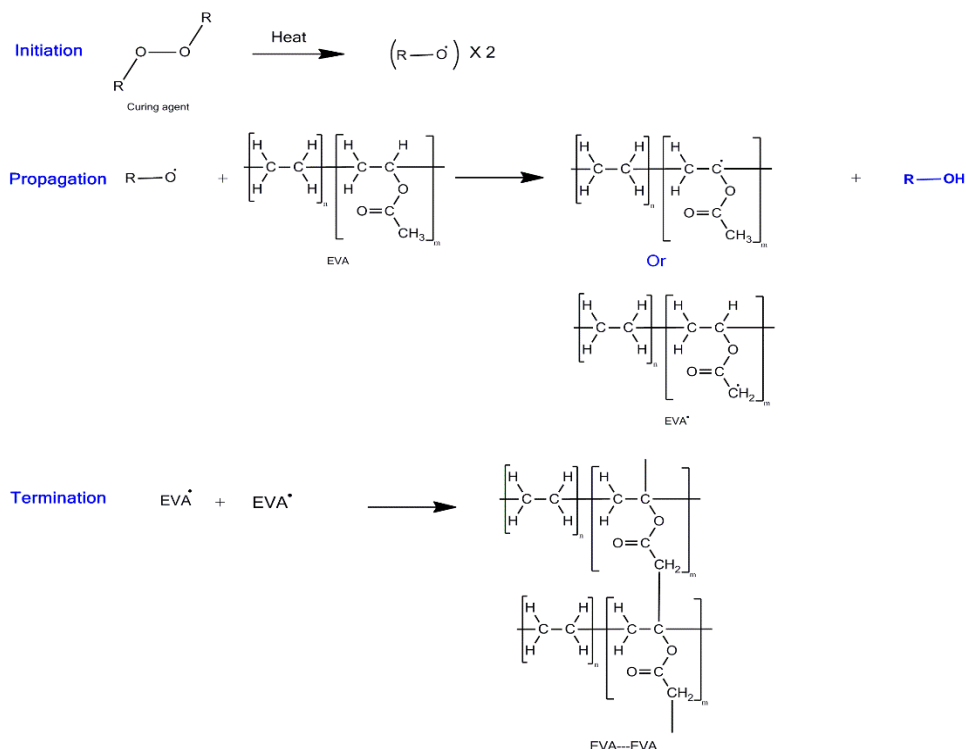
ภาพที่ 1.6 สายโซ่โพลีเมอร์และการเชื่อมขวาง

ที่มา: https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/32682/1/Chen_Nan_201206_PhD_thesis.pdf

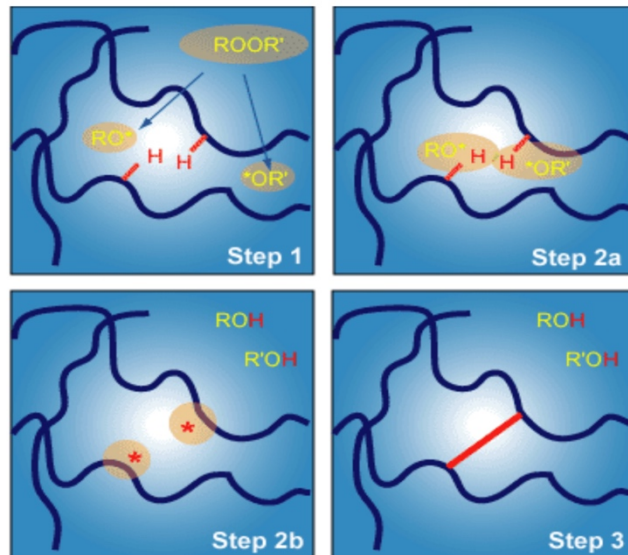
- ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ (peroxide vulcanization)

สามารถใช้ได้กับโพลีเมอร์ที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ แต่มีต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางที่คงรูปได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ [22] โดยมีกลไกการวัลคาไนซ์ PEVA ด้วยเปอร์ออกไซด์ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน [17,23]

1. เปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical)
2. อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับ PEVA ด้วยการดึงไฮโดรเจนอะตอมจาก PEVA ทำให้ PEVA เกิดเป็นอนุมูลอิสระ
3. PEVA ที่มีอนุมูลอิสระหรือ radical เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างโพลีเมอร์ของ PEVA เกิดเป็นพันธะคาร์บอน



ภาพที่ 1.7 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสารคงรูปประเภทเปอร์ออกไซด์ (peroxide)



ภาพที่ 1.8 จำลองการเชื่อมขวางสารคงรูปประเภทเปอร์ออกไซด์ (peroxide) บนสายโซ่โพลิเมอร์ [24]

1.6.3.3 สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) [25-27]

คือ สารเคมีที่สามารถผลิตแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต โดยแก๊สที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ภายใต้ความดัน เมื่อความดันลดลงแก๊สจึงเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเซลล์รูพรุนหรือโฟมขึ้นในเนื้อพลาสติก โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามกลไกหรือปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดแก๊ส คือเชิงกายภาพและเชิงเคมี

ก. สารทำให้เกิดฟองเชิงกายภาพ (physical blowing agents)

สารประเภทนี้ให้แก๊สออกมาโดยการเปลี่ยนสถานะทางกายภาพ (physical state) ของตัวมันเอง ซึ่งโดยทั่วไปอาจเป็นแก๊ส ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาจเป็นสารประกอบเคมีที่สามารถให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการเชิงกายภาพ เช่น การกลายเป็นไอการ desorption หรืออาจเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ

สารฟูเชิงกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

(1) ของเหลวที่ระเหยได้ง่าย

มีจุดเดือดต่ำ และจะกลายเป็นแก๊สโดยการเพิ่มอุณหภูมิ และ/หรือลดความดันในระบบ เช่น สารประกอบอะลิฟาติกฮาโลจีเนต และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลกอฮอล์ สารประกอบอีเธอร์ เป็นต้น

(2) ของแข็ง (solids sorbent)

เป็นระบบของของแข็งที่อิ่มตัวไปด้วยแก๊สและจะให้แก๊สออกมาเมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ เช่น activated carbon ที่มีโครงสร้าง ultramicroporous แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ (clay) และสารประกอบจำพวกซิลิเกต เป็นต้น

ข. สารฟูเชิงเคมี (chemical blowing agents)

สารประเภทนี้จะให้แก๊สออกมาโดยผ่านปฏิกิริยาเคมีซึ่งจะเป็นประเภทสารทำให้เกิดฟองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและย้อนกลับไม่ได้ (irreversible) แต่มีบางกรณีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- (1) สารประกอบเคมีที่ให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่สามารถย้อนกลับได้ เช่น เกลืออินทรีย์ และอนินทรีย์ของแอมโมเนีย สารประกอบไปคาร์บอนเนต/คาร์บอนเนตของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ธ ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารฟูกุ่มนี้แสดงได้ดังสมการที่ 1.1

เมื่อ AB - แทนสารฟูหรือสารทำให้เกิดฟอง

C - แทนส่วนที่เหลือ (residue)

G - ผลผลิตที่เป็นแก๊ส



- (2) สารประกอบเคมีที่ให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สามารถผันกลับได้ เช่น สารประกอบแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลิฟาติกอะโซ และไดอะโซ สารประกอบไดอะโซมิน เป็นต้น ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารฟูกุ่มนี้แสดงดังสมการที่ 1.2



- (3) ของผสมของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่ให้แก๊สโดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบ เช่น ของผสมระหว่างโซเดียมไนไตรท์กับแอมโมเนียมคลอไรด์ ของผสมของกรดโอเลอิกกับซิงค์คาร์บอนเนต เป็นต้น ปฏิกิริยาสลายตัวทางความร้อนของสารฟูกุ่มนี้แสดงได้ ดังสมการที่ 1.3



สารทำให้เกิดฟองที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ สารประกอบเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (ADC) เป็นของแข็งที่มีสีส้มจนถึงสีเหลืองอ่อนขึ้นอยู่กับการขนาดของอนุภาค มีความหนาแน่นประมาณ 1.65 กรัม/ลบ.ซม. โดยทั่วไปจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ใดๆ แต่จะละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide) ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิสลายตัวในอากาศประมาณ 190 - 240 องศาเซลเซียส โดยปริมาณแก๊สที่ให้ออกมาประมาณ 270 มิลลิลิตร/กรัม และประกอบไปด้วย

แก๊สไนโตรเจน (N₂)

65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	32	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	3	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบเอโซจะมีค่าสูงมาก แต่สามารถทำให้อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าต่ำลงได้ โดยวิธีที่ใช้กันทั่วไปคือ การใช้สารเติมแต่ง วิธีนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยสารเติมแต่งดังกล่าวเรียกว่า คิกเกอร์ (kicker) ได้แก่ สารประกอบพอลิออล สารประกอบยูเรียสารประกอบแอมีน กรดอินทรีย์ เบสอินทรีย์ และสารประกอบโลหะ สารคิกเกอร์จะช่วยให้อุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบเอโซไคคาร์โบนาไมด์ลดลงเมื่อปริมาณการใช้สารคิกเกอร์เพิ่มมากขึ้น

1.6.4 ทฤษฎีการเกิดโฟม

ระบบที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โฟมมีด้วยกัน 3 ขั้นตอน

- ขั้นตอนแรกคือ การเกิดฟองแก๊ส (bubble formation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดนิวเคลียสของฟองแก๊สขึ้นในพอลิเมอร์หลอมเหลว
- ขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊ส (bubble growth) เป็นกระบวนการที่ฟองแก๊สเกิดการเติบโตและเกิดการเสถียร
- กระบวนการเสถียรของฟองแก๊ส (bubble stabilization) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เฟสของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งผ่านกระบวนการ crosslink หรือโดยการ cooling ทำให้ได้ระบบโครงสร้างของเซลล์ที่เสถียร

1.6.4.1 กระบวนการเกิดฟองแก๊ส

ถ้าฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า self-nucleation แต่ส่วนมากจำเป็นที่จะต้องมีการเติมอนุภาคของแข็งขนาดเล็กเช่น ผงแป้ง (talc) หรือซิลิกา ลงไปในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็น nucleating agent เพื่อควบคุมขนาดและการกระจายตัวของเซลล์ แต่ในกระบวนการที่ไม่มีการเติม nucleating agent เฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวมักประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองแก๊สสามารถเติบโตต่อไปได้โดยไม่ต้องมีการเกิดฟองแก๊สขึ้นใหม่

การเกิดฟองแก๊สในระบบของเหลวนั้นค่า free energy (ΔF) ของระบบจำเป็นที่จะต้องมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการ 1.4

$$\Delta F = \gamma A \quad (1.4)$$

เมื่อ γ คือ แรงตึงผิวของของเหลว

A คือ พื้นที่ของผิวสัมผัสทั้งหมด

จากสมการแสดงให้เห็นว่าถ้าของเหลวมีแรงตึงผิวที่ต่ำจะทำให้ฟองแก๊สสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ง่าย การเติม nucleating agent จะมีผลทำให้เกิดฟองแก๊สได้ง่ายขึ้น เนื่องจาก nucleating agent จะช่วยลดแรง

ดึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลวหรืออาจไปทำให้เกิดช่องว่าง (void) ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส

1.6.4.2 กระบวนการเติบโตของฟองแก๊ส

เมื่อความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงจะทำให้โอกาสในการเกิดฟองแก๊สขึ้นใหม่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง แก๊สที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงแพร่เข้าไปในฟองแก๊สทำให้ฟองแก๊สเกิดการขยายตัว เริ่มแรกฟองแก๊สจะมีลักษณะเป็นทรงกลมและเกิดการขยายตัว เนื่องจากผลของความแตกต่างของความดัน (ΔP) ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ที่สมดุลความดันแก๊สในฟองแก๊สทรงกลมจะมีค่ามากกว่าความดันของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบซึ่งค่าความแตกต่างของความดันที่สมดุลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1.5

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1.5)$$

เมื่อ γ คือ แรงตึงผิว

r คือรัศมีของฟองแก๊ส

ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ของฟองแก๊สขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าฟองแก๊สขนาดใหญ่ ทำให้ฟองแก๊สขนาดเล็กมีแนวโน้มจะลดความแตกต่างของความดัน โดยการขยายขนาดอย่างรวดเร็วทั้งโดยการไปรวมตัวกับฟองแก๊สอื่น ๆ หรือโดยการแพร่ของแก๊สจากพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าไป ซึ่งความแตกต่างของค่าความดันในฟองแก๊สขนาดเล็กและฟองแก๊สขนาดใหญ่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1.6

$$\Delta P_d = 2\gamma \left(\frac{1}{r_1} \right) - \left(\frac{1}{r_2} \right) \quad (1.6)$$

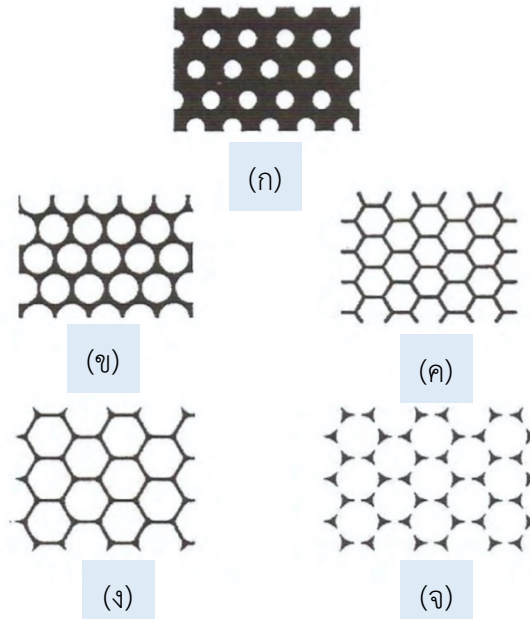
เมื่อ ΔP_d คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างเซลล์ที่มีรัศมี r_1 และ r_2

อัตราการเติบโตของเซลล์จะขึ้นอยู่กับพฤติกรรม viscoelastic ของวัสดุพอลิเมอร์ ความดันแก๊สขนาดของเซลล์ และอัตราการแพร่ของ foaming agents ผ่านผนังเซลล์ของพอลิเมอร์

ระบบที่มีเซลล์ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของเซลล์อย่างสม่ำเสมอจะเกิดได้เมื่อระบบมีแรงตึงผิวต่ำ โดยภาพที่ 1.9(ก) จะแสดงให้เห็นว่าฟองแก๊ส เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์หลอมเหลว ถ้าทำให้โฟมเสถียร โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งที่สภาวะนี้จะทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นสูง แต่หากปริมาณของฟองแก๊สยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปดังแสดงในภาพที่ 1.9(ข) จะทำให้โฟมมีความหนาแน่นลดลง สำหรับฟองแก๊สที่มีลักษณะเป็นทรงกลมโฟมจะมีความหนาแน่นลดลงเมื่อฟองแก๊สมาอยู่ใกล้กันมากขึ้น

เมื่อฟองแก๊สเกิดการขยายตัวต่อไปจนกระทั่งสัมผัสกัน ความดันภายในฟองแก๊สจะผลักเซลล์ให้เกิดการรวมตัวกัน พอลิเมอร์หลอมเหลวจึงถูกผลักออกไปอยู่ในช่องว่างด้านข้างและเซลล์เปลี่ยนรูปร่างกลายเป็นแบบ pentagonal dodecahedron ที่รูปร่างของผนังเซลล์แต่ละด้านเป็น polyhedral ที่มีความหนาแน่นเท่ากันในแต่ละระนาบ เมื่อพิจารณาใน 2 มิติ เซลล์จะมีรูปร่างเป็นแบบ hexagonal honeycomb ดังแสดงในภาพที่ 1.9(ค) ลักษณะโครงสร้างของเซลล์นั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์หลอมเหลว เช่น ความ

หนืดและพลังงานที่ผิวหน้า แรงโน้มถ่วงและแรงดันของแก๊สที่ดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไปอยู่บริเวณรอยต่อของเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 1.9(ง) ที่สถานะดังกล่าวโฟมที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด แต่ที่ผนังเซลล์อาจเกิดการแตกออกได้ทำให้เซลล์ที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ระดับการแตกออกของผนังเซลล์ที่แตกต่างกันจะทำให้ได้โฟมที่มีปริมาณเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1.9(จ) ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของฟองแก๊สระหว่างเกิดการขยายตัวคือ ชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว อัตราเร็วในการขยายตัวของฟองแก๊ส ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ความแตกต่างของความดันภายในฟองแก๊ส และการมีสิ่งเจือปน เช่น อนุภาคของแข็ง ของเหลวหรือแก๊สไปรบกวนการเติบโตของฟองแก๊ส



ภาพที่ 1.9 แสดงโครงสร้างของเซลล์ที่ขึ้นตอนการขยายตัวของฟองแก๊สต่าง ๆ

1.6.4.3 กระบวนการเสถียรของฟองแก๊ส

ฟองแก๊สจะถูกทำให้เสถียรได้ทั้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์เมทริกซ์กลายเป็นGelation หรือโดยอิทธิพลทางกายภาพด้วยการหล่อเย็น พอลิเมอร์หลอมเหลวให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอ่อนตัวเพื่อป้องกันการเกิดการไหลของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ทำให้รูปร่างของฟองแก๊สเสถียรไปเนื่องจากการเกิดการไหลของโฟมหรือ เนื่องจากน้ำหนักของโฟม ทำให้โครงสร้างของเซลล์โฟมกลายเป็นแบบ anisotropy ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ โฟมแก๊สภายในเซลล์โฟมจะอยู่ในสภาวะสมดุลเป็นระยะเวลาหนึ่งภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิและความดันที่ล้อมรอบ ทำให้สมบัติของโฟมเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการเกิดการแพร่ของอากาศเข้าไปทดแทนแก๊สภายในเซลล์ สภาวะดังกล่าวจะเกิดการลดลงเมื่อแก๊สที่อยู่ภายในเซลล์คืออากาศหรือเป็นแก๊สที่มีสมบัติคล้ายกับอากาศ เช่น แก๊สไนโตรเจน แต่หากแก๊สที่ใช้เป็นไฮโดรคาร์บอนจะทำให้เกิดการแพร่ของแก๊สออกมาภายนอกมากกว่าอัตราการแพร่ของอากาศ เข้าไปในเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้โครงสร้างของโฟมมีแนวโน้มจะเสถียรหลังการผลิต

บทที่ 2

การทดลอง

2.1 สารเคมี

2.1.1 พอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต poly(ethylene vinyl acetate), PEVA
โดยมีสมบัติแสดงตามตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเม็ดพลาสติก PEVA จากบริษัทพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)

Physical properties	Polene N8038	Polene SV1055	Polene MV1055	Standard
ปริมาณ vinyl acetate (%)	18	28	28	-
Melt flow index (2.16kg/190°C)	2.3	20	8	ASTM D1238 (g/10 min)
Density (g/cm ³)	0.941	0.952	0.953	ASTM D1505
Tensile strength at yield (MPa)	4.5	-	2.5	ASTM D638
Tensile strength at break (MPa)	24	17	23	ASTM D638
Ultimate elongation (%)	820	860	840	ASTM D638
Hardness shore-D	37	28	25	DIN 53505

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเม็ดพลาสติก PEVA จากบริษัทอื่น ๆ

Physical properties	EC28005	ELVAX 40W	Standard
ปริมาณ vinyl acetate (%)	28	40	-
Melt flow index (2.16kg/190°C)	5	52	ASTM D1238 (g/10 min)
Density (g/cm ³)	0.951	0.965	ASTM D1505
Tensile strength at yield (MPa)	-	-	ASTM D638
Tensile strength at break (MPa)	13.5	5.2-6.2	ASTM D638
Ultimate elongation (%)	800	1000-1300	ASTM D638 และ ASTM D1708
Hardness shore-A	79	40	ASTM D2240

2.1.2 สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) มี 3 ชนิด คือ

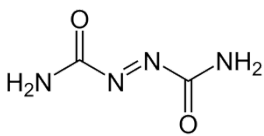
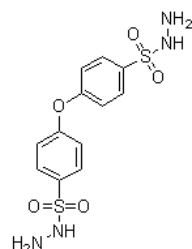
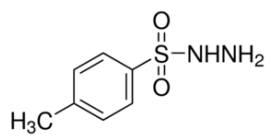
2.1.2.1 เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (azodicarbonamide, ADC) ($C_2H_4N_4O_2$)

2.1.2.2 p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSH) ($C_{12}H_{14}N_4O_5S_2$)

2.1.2.3 p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH) ($CH_3C_6H_4SO_2NHNH_2$)

โดยมีสมบัติแตกต่างกัน ตามตารางที่ 2.3 [29]

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)

Properties	Azodicarbonamide (ADC)	p,p'-oxybisbenzen sulfonylhydrazine (OBSH)	p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH)
โครงสร้างทางเคมี			
Decomposition temperature (°C)	190-220	152-162	143
Yield gas (ml/g)	220	125	120
Gas ที่พบส่วนใหญ่	N ₂	N ₂	N ₂

2.1.3 สารเชื่อมโยง (curing agent) มี 3 ชนิด คือ

2.1.3.1 dicumyl peroxide (DCP) ($C_{18}H_{22}O_2$)

2.1.3.2 1,3 Bis-(t-butylperoxy-iso-propyl)benzene ($C_{20}H_{34}O_4$) หรือ VUL-CUP[®] 40KE

2.1.3.3 2,5-di-methyl-2,5-di(t-butyl peroxy)hexane ($C_{16}H_{34}O_4$) หรือ LUPEROX[®] 101

โดยมีสมบัติแตกต่างกัน ตามตารางที่ 2.4 [29]

2.1.4 สังกะสีออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยทำให้เกิดฟองและเป็นสารกระตุ้น

2.1.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO₂) ทำหน้าที่เป็นสารให้สีขาว (pigment)

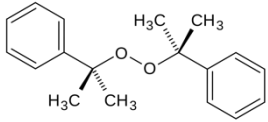
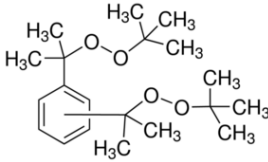
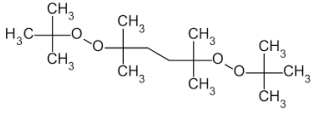
2.1.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO₃)

2.1.7 กรดสเตียริก (stearic acid)

2.1.8 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

2.1.9 poly(ethylene octene) หรือ ENGAGE[™] 8200 [20]

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติของสารคงรูป (curing agent) โดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์

Properties	Dicumyl peroxide (DCP)	1,3 bis-(t-butylperoxy-isopropyl) benzene หรือ VUL-CUP® 40KE	2,5-di-methyl-2,5-di(t-butylperoxy)hexane หรือ LUPEROX® 101
โครงสร้างทางเคมี			
สูตรโมเลกุล	$C_{18}H_{22}O_2$	$C_{20}H_{34}O_4$	$C_{16}H_{34}O_4$
Active oxygen	5.92 %	9.45 %	10.25-10.47 %
Self-accelerating decomposition temperature (°C)	90	70	86

ตารางที่ 2.5 สมบัติของ polyolefin elastomer (POE) ที่ใช้ คือ poly(ethylene octene)

Physical Properties	Engage 8200	Standard
Density (g/cm ³)	0.870	-
Melt flow index (2.16kg/190°C)	5	ASTM D1238 (g/10 min)
Mooney viscosity (ML 1+4 @ 121°C)	8	ASTM D1646
Total crystallinity (%)	19	ASTM D638
DSC melting peak (°C) (Rate 10°C/min)	59	
Glass transition temperature (°C)	-53	
Ultimate tensile strength at break (MPa)	5.7	ASTM D638
Ultimate elongation (%) (508 mm/min)	>600	ASTM D638 และ ASTM D1708
Durometer hardness Shore-A	66	ASTM D2240

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

	<u>แบบ/รุ่น</u>	<u>ผู้ผลิต</u>
2.2.1 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (intermix-type internal mixer) ขนาด 3L	NRDR-WAT	Well Shyang Machinery
2.2.2 เครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ขนาด 8 นิ้ว	P-RM8-01	HSU Fengiron Factory Co., Ltd.
2.2.3 เครื่องอัดเป่า (compression molding) ขนาด 150 tone	TYC-V-12-3RT-2-S-PCD	Tung-Yu
2.2.4 เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง หรือการสึกของยาง แบบ rotorless (moving die rheometer, MDR)	EKT-2000P	Extron Tek Co., Ltd.
2.2.5 เครื่องสำหรับตัดสไลด์โฟม (auto sole cutting)	-	United Chen Industrial Co., Ltd.
2.2.6 เครื่องมือสำหรับวัดความแข็ง (durometer) แบบ shore C ball type	SRIS-0101 GS-701N	Teclock
2.2.7 เครื่องมือหาความหนาแน่น หรือค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) และเครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง	XS204	Mettler-Toledo
2.2.8 เครื่องมือสำหรับตัดชิ้นงานทดสอบ (die cutter)	-	Hung Ta Instrument Co., Ltd.
2.2.9 เครื่องมือทดสอบสมบัติแรงดึง (universal testing machine)	91202 TPD-2730	TensiTech
2.2.10 เครื่องมือทดสอบแรงดึง (tensile tester)	5966 S2669	Instron
2.2.11 เครื่องมือทดสอบการขัดถู ตามมาตรฐาน DIN (abrasion tester)	-	Hung Ta Instrument Co., Ltd.
2.2.12 เครื่องมือตัดชิ้นงานทดสอบ (drill press)	P-Drill-01 ZJ4110	Komaki
2.2.13 เครื่องมือทดสอบการกระด้างกระดอน (resiliometer)	-	Instron
2.2.14 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (vernier caliper)	-	Mitutoyo
2.2.15 เครื่องมือวัดความหนา (thickness gauge)	Sylvac Ultra Digit Mark IV	Fowler
2.2.16 เครื่องชั่งสารเคมี ทศนิยม 1 ตำแหน่ง	SB16001	Mettler Toledo
2.2.17 เครื่องชั่งสารเคมี ทศนิยม 3 ตำแหน่ง	SB302s/Fact	Mettler Toledo

2.2.18 ตู้อบความร้อน hot air oven สำหรับ

ทดสอบการหดตัว (shrinkage) และสมบัติ

-

-

การเสียรูปหลังการอัด (compression set)

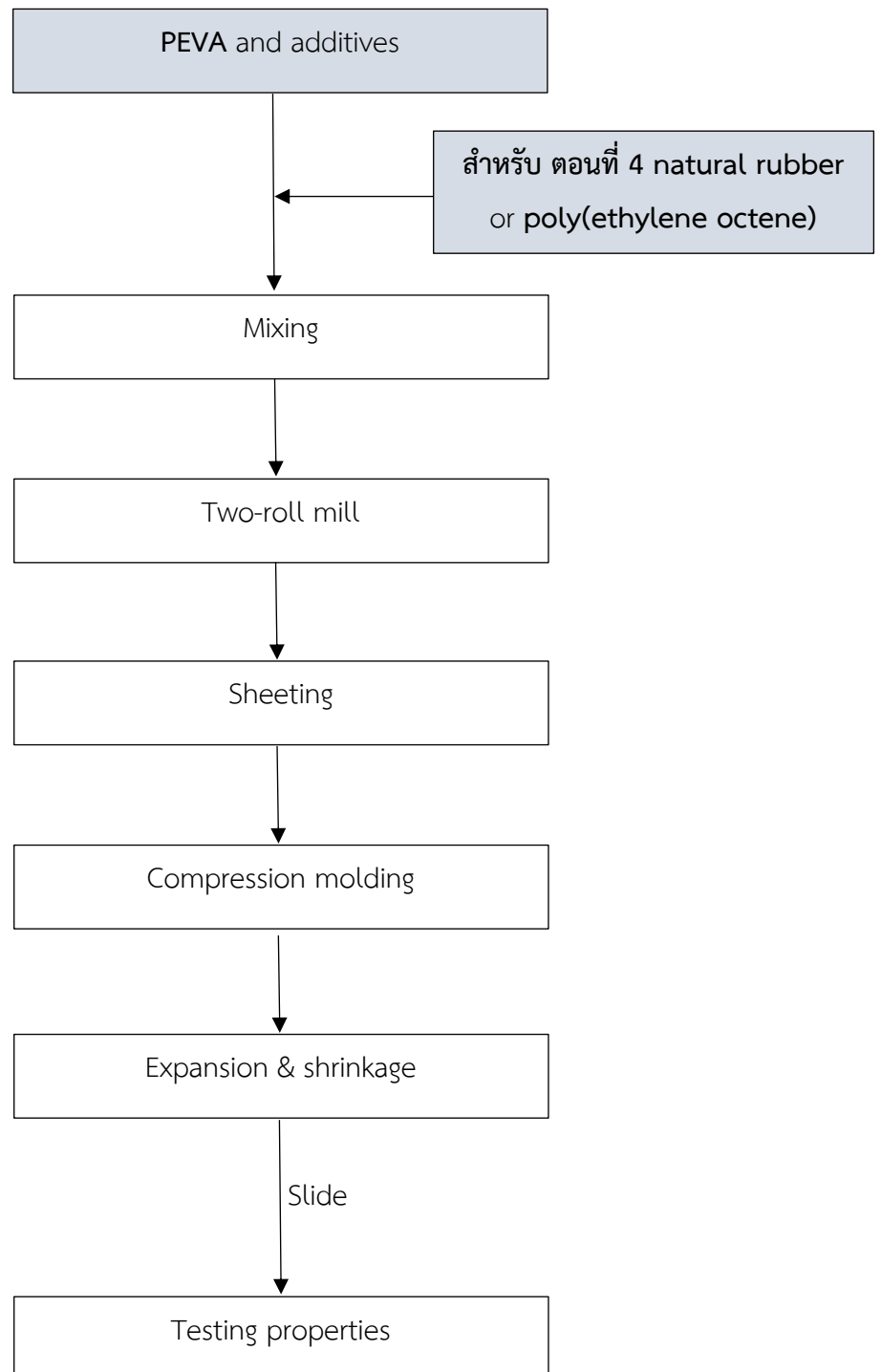
2.2.19 die cut สำหรับตัดโฟมชิ้นงานทดสอบ

- tensile strength ตามมาตรฐาน ASTM D412
- tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624
- trousers tear ตามมาตรฐาน ASTM D624
- square die cutter ขนาด W=5mm, L=5mm
- split tear test

2.2.20 กล้องถ่ายภาพจุลทรรศน์ (optical microscope)

2.3 วิธีการทดลอง

แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนในการผสมและขึ้นรูปโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์



ตารางที่ 2.6 สูตรโพลีคอมพาว์นพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต

ตอนที่	Compound Name	Polymer					Blowing			Curing			Filer				Total						
		Poly(ethylene vinyl-acetate (PEVA)			Natural Rubber	Poly(ethylene octene) Engage 8200	ADC	OBSH	TSH	DCP	VUL-CUP® 40KE	LUPEROX® 101	ZnO	TiO ₂	CaCO ₃	Stearic acid							
		%VA	MFI	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr		phr					
1	EVA A1-01	18	2.3	100													5	1	1	5	8	-	120
	EVA A1-02			100													3	1	1	5	10	1	120
	EVA A2-01	28	20	100													5	1	1	5	10	-	122
	EVA A2-02			100													2	1	5	10	1	120	
	EVA A2-03			100													2	1.5	5	10	1	120.5	
	EVA A3-01	28	8	100													5	1	1	5	10	-	122
	EVA A3-02			100													2	1.5	5	10	1	120.5	
	EVA A4	28	5	100													2	1.5	5	10	1	120.5	
	EVA A5-01	40	52	100													2	2	5	10	2	122	
	EVA A5-02			100													2	2.5	5	10	2	122.5	

ตอนที่	Compound Name	Polymer					Blowing			Curing			Filer				Total	
		Poly(ethylene vinyl acetate (PEVA)			Natural Rubber	Poly(ethylene octene) Engage 8200	ADC	OBSH	TSH	DCP	VUL-CUP® 40KE	LUPEROX® 101	ZnO	TiO ₂	CaCO ₃	Stearic acid		
		%VA	MFI	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr	phr		
2	EVA B1	28	5	100			2	-	-	1.5				1	5	10	1	120.5
	EVA B2			100			-	2	-	1.5				1	5	10	1	120.5
	EVA B3			100			-	-	2	1.5				1	5	10	1	120.5
3	EVA C1	28	5	100			2			1.5	-	-	1	5	10	1	120.5	
	EVA C2			100			2			-	1.5	-	1	5	10	1	120.5	
	EVA C3			100			2			-	-	1.5	1	5	10	1	120.5	
4	Pure EVA	28	5	100	-	-	2			1.5				1	5	10	1	120.5
	EVA D1			70	-	30	2			1.5				1	5	10	1	120.5
	EVA D2			70	15	15	2			1.5				1	5	10	1	120.5
	EVA D3			70	30	-	2			1.5				1	5	10	1	120.5

2.3.1 การเตรียมโฟมคอมพาวน์ PEVA

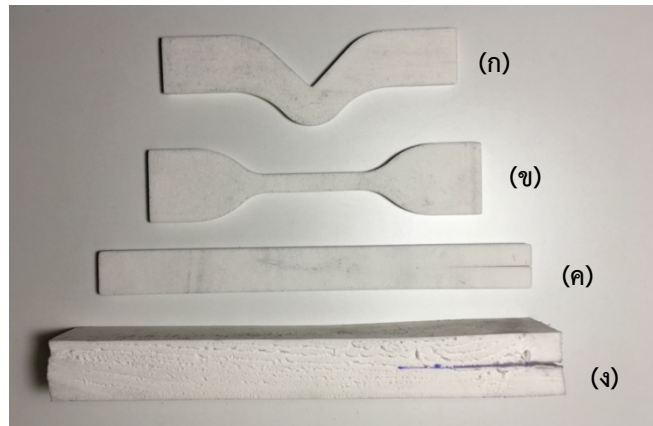
1. ชั่งสารเคมีตามแต่ละสูตรโดยมีปริมาณสารเคมีโดยรวมอยู่ที่ 80% ของเครื่องผสม ดังแสดงตามตารางที่ 2.6
2. เทสารเคมีผสมรวมกันโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม สารเติมแต่งต่าง ๆ ไว้ด้วยกัน แยกจากสารทำให้เกิดฟองรวมกับสารคงรูป โดยสูตรที่ใช้ยางธรรมชาติต้องผ่านการบดให้นิ่ม (mastication) เป็นเวลา 30 วินาที
3. ชั้นแรกเท PEVA พร้อมกับสารเติมแต่งอื่น ๆ ลงในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) โดยใช้ความเร็ว rotor speed เท่ากับ 60 rpm บดผสมให้เข้ากันโดยยังไม่เติมสารทำให้เกิดฟองและสารคงรูป บดผสมจนถึงอุณหภูมิ 90°C
4. เมื่อถึงอุณหภูมิ 90°C ตรวจสอบเม็ด PEVA หลอมละลายจนหมด สังเกตได้จากกราฟของเครื่องผสมจะมีลักษณะตกลงมานั้นแสดงว่า PEVA หลอมเหลวจนหมดแล้ว จึงเติมสารทำให้เกิดฟองและสารคงรูป บดผสมให้เข้ากัน
5. เมื่อผสมเข้ากันแล้วและอุณหภูมิถึง 100°C จึงนำโฟมคอมพาวน์ออกจากเครื่องผสมแล้วนำไปรีดด้วยเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) โดยปรับความเร็วให้เหมาะสมตามต้องการ
6. จากนั้นตัดให้เป็นแผ่นขนาดเล็กเพื่อนำไปใช้ในการอัดขึ้นรูปในขั้นตอนถัดไป
7. ทดสอบสมบัติการคงรูปของ compound ด้วยเครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง หรือการสุกของยาง แบบ rotorless (moving die rheometer, MDR)

2.3.2 การอัดขึ้นรูปโฟม PEVA

1. ติดตั้งโมลด์/แม่พิมพ์ขึ้นรูปโฟมขนาดความกว้าง 10 cm ความยาว 15 cm ความหนา 1 cm บนเครื่องอัดเบ้า (compression molding) ขนาด 150 tone โดยอบให้ความร้อนกับโมลด์ขึ้นรูปโฟมที่อุณหภูมิ 160°C
2. ตรวจสอบเช็คอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิวัสดุให้ได้อุณหภูมิที่มากกว่าหรือเท่ากับ 160°C
3. ชั่งแผ่นโฟมคอมพาวน์ปริมาณ 240 g ต่อหนึ่งครั้งการขึ้นรูป โดยระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป คือ นำค่า t_c (ระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปไปได้ 90%) ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง MDR แล้วบวกเวลาเพิ่มไปอีก 1-2 นาที ซึ่งจะใช้เวลาเท่ากับ 15 นาที
4. เมื่อขึ้นรูปโฟมเสร็จแล้วและครบตามเวลาที่ตั้งไว้ ให้นำแผ่นโฟม PEVA ที่ได้มาใช้แผ่นเหล็กทับไว้เพื่อไม่ให้โฟมงอ

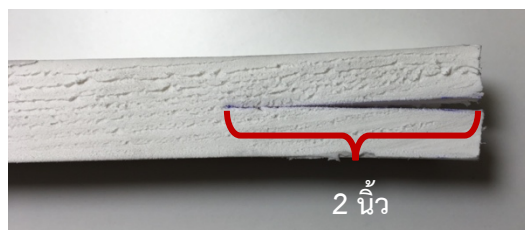
2.3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. ตัดขอบแผ่นโฟม PEVA ก่อนแล้วนำไปสไลด์ให้เป็นแผ่นบางให้ได้ความหนาตามต้องการด้วยเครื่องตัดสไลด์โฟม (auto sole cutting)
2. วัดความหนารวมของโฟมด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์
3. สไลด์เพื่อเปิดผิวหน้าแผ่นโฟมออกไปก่อน
4. ปรับความหนาส่วนบนของเครื่องตัดสไลด์โฟมเป็นความหนาของชิ้นงานที่ต้องการโดยมีขนาดเท่ากับ 4, 10, 12.5 mm ตามลำดับ โดยที่ควรลบความหนาส่วนล่างออก 2-3 mm เพื่อให้โฟมไหลได้ดีขึ้น และปรับความหนาส่วนล่างโดยใช้ความส่วนบนลบออกจากความหนารวม
5. นำแผ่นโฟมแต่ละขนาดไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบดังนี้
 - **แผ่นโฟมหนาขนาด 4 mm**
 - ทดสอบความทนทานแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412 เป็นรูปดัมเบลล์ ตามภาพที่ 2.1(ข)
 - ความต้านทานการฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624 ตามภาพที่ 2.1(ก)
 - Trousers tear strength รูปกางเกง ตามมาตรฐาน DIN 53507-A และ ASTM D624 ตามภาพที่ 2.1(ค) ทั้ง 3 ชิ้นงานใช้ตัดเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ (die cutter)
 - **แผ่นโฟมหนาขนาด 10 mm**
 - ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ตัดโดยใช้หัวขนาดใหญ่ แล้วขีดกากบาทที่กึ่งกลาง ตามภาพที่ 2.3 ด้วยเครื่องเจาะชิ้นงานทดสอบ (drill press)
 - ทดสอบการสึกหรอ (abrasion) ตามมาตรฐาน DIN ตามภาพที่ 2.4(ก) ตัดโดยใช้หัวขนาดเล็กด้วยเครื่องเจาะชิ้นงานทดสอบ
 - **แผ่นโฟมหนาขนาด 12.5 mm**
 - Split Tear test ตามมาตรฐาน DIN 53507-B โดยใช้ P-die 23 ที่มีขนาด 150 x 25.4 x 20.0 mm ตามภาพที่ 2.2(ง) โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ (die cutter) แล้วใช้คัตเตอร์กรีดบริเวณปลายชิ้นงานโฟมความยาวประมาณ 2 นิ้ว ทางด้านความหนาตามภาพที่ 2.2
 - ทดสอบการกระด้างกระดอน (rebound resilience) โดยใช้ square die cutter ขนาด W=5mm, L=5mm ตามภาพที่ 2.4(ข) ใช้ตัดเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ (die cutter)



ภาพที่ 2.1 ชิ้นงานทดสอบ tensile strength และ tear strength แบบต่าง ๆ

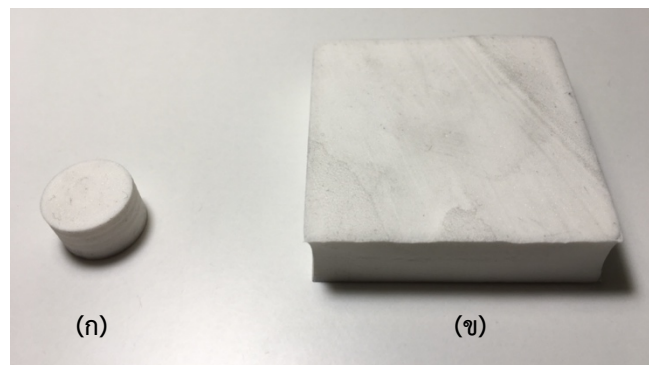
- (ก) สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624 Die C
- (ข) สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412 Die C
- (ค) Trousers tear strength ตามมาตรฐาน DIN 53507-A และ ASTM D624
- (ง) Split tear test ตามมาตรฐาน DIN 53507-B



ภาพที่ 2.2 ชิ้นงานทดสอบ split tear ที่ตัดปลายความยาวประมาณ 2 นิ้ว



ภาพที่ 2.3 ชิ้นงานทดสอบสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)



ภาพที่ 2.4 ชิ้นงานทดสอบ (ก) ความต้านทานการขัดถู (abrasion) ตามมาตรฐาน DIN
(ข) การกระเด็นกระดอน (rebound resilience)

2.3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2.3.4.1 การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

1. ตัดชิ้นจากโคมคอมพาวนด์น้ำหนักประมาณ 4-5 กรัม ไปทดสอบด้วยเครื่อง moving die rheometer ตามมาตรฐาน ASTM D5289
2. มีสภาวะที่ใช้ทดสอบคือ อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 30 นาที
3. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ แสดงเป็นกราฟการวัลคาไนซ์ (cure curve)

สมบัติที่ได้จากกราฟ คือ

- ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, M_L)
- ค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque, M_H)
- ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time, t_{s2})
- ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ไป 90 เปอร์เซ็นต์ (cure time, t_{c90})

2.3.4.2 การวัดอัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)

นำโคมที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้า (compression molding) แล้วมาวัดขนาดของช่องตารางบนโคมด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยกำหนดให้ขนาดตารางบนแม่พิมพ์มีความกว้างกับความยาว เท่ากับ 1x1 cm ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราส่วนการขยายตัวของโคมได้ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนการขยายตัว} = \frac{\text{ขนาดช่องตามความกว้างหรือความยาวของโคมที่ขยายตัว (mm)}}{\text{ขนาดช่องของแม่พิมพ์ (mm)}} \times 100\%$$

2.3.4.3 การวัดค่าการหดตัว (shrinkage)

1. วัดช่องตารางความยาวและความกว้าง ของแผ่นโคมที่นำมาทดสอบด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ จำนวนทั้งหมด 3 ช่องที่บริเวณต่างกันแล้วเขียนกำหนดจุดไว้ จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยจึงได้ความยาวเป็น L_0 และความกว้าง W_0
2. นำโคมเข้าเตาอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 60 นาที
3. เมื่อครบเวลาแล้วเอาออกจากเตาอบให้ความร้อน ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดช่องตารางของแผ่นโคม ตามตำแหน่งเดิมทั้ง 3 ก่อนหน้า จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยจึงได้ความยาวเป็น L และความกว้าง W

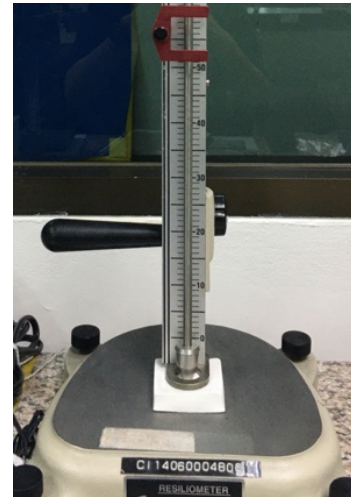
$$\text{การหดตัวตามความยาว} = \frac{\text{ความยาวก่อนอบ (} L_0 \text{)} - \text{ความยาวหลังอบ (} L \text{)}}{\text{ความยาวก่อนอบ (} L_0 \text{)}} \times 100\%$$

$$\text{การหดตัวตามความกว้าง} = \frac{\text{ความกว้างก่อนอบ (} W_0 \text{)} - \text{ความกว้างหลังอบ (} W \text{)}}{\text{ความกว้างก่อนอบ (} W_0 \text{)}} \times 100\%$$

4. จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวตามความกว้างและความยาว จึงได้เป็นค่าการหดตัวเฉลี่ย (shrinkage) ของตัวอย่าง

2.3.4.4 การทดสอบสมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ตามมาตรฐาน ASTM D2632

นำชิ้นงานทดสอบมาวางทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบการกระด้างกระดอน (resiliometer) ตามภาพที่ 2.5 โดยการปล่อยลูกตุ้มไปตามแนวตั้งแล้วอ่านค่าเมื่อลูกตุ้มกระด้างขึ้นมาที่จุดสูงสุดอีกครั้ง โดยที่ 3 ครั้งแรกจะไม่อ่านค่า ให้อ่านค่าในครั้งที่ 4-6



ภาพที่ 2.5 การทดสอบการสมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)

2.3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties)

■ การทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และการยืดตัว (elongation) ตามมาตรฐาน ASTM D412 และ DIN 53543

- นำชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ ที่มีความหนา $4.0\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (tensile tester) ใช้หัวจับแบบความดันลมและ load ที่ 1kN โดยตั้งค่าดังนี้ gauge length เท่ากับ 20.00 mm, calibration point หรือ clamp distance เท่ากับ 250.0 mm และ อัตราเร็วการดึงของเครื่อง เท่ากับ 100 mm/min
- วัดความกว้างและความหนาบริเวณกึ่งกลางด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ กรอกราค่าใส่ที่โปรแกรม จากนั้นใส่ชิ้นงานทดสอบไว้ดังภาพที่ 2.6 แล้วจึงกดปุ่ม start test เพื่อเริ่มการดึง



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ tensile strength

- ทำการทดลองซ้ำจนครบทั้ง 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง

ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength)

$$\text{Tensile strength} = \frac{F}{A}$$

F = แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นงานทดสอบขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ (ตารางเซนติเมตร)

ค่า modulus

$$\text{Modulus} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \frac{F \times L_0}{A \times \Delta L}$$

F = แรง (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดรับแรง (ตารางเมตร)

ΔL = ส่วนที่ยืดออกของวัสดุ (เมตร)

L = ความยาวปกติของวัสดุ (เมตร)

ค่าความยืดหยุ่น (elongation)

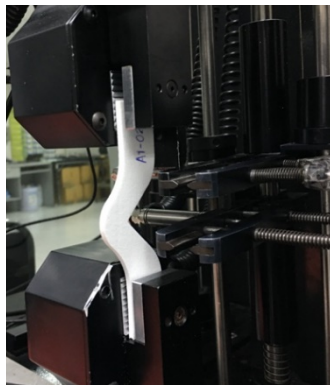
$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

L = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบ เมื่อยืดขาด (เซนติเมตร)

L_0 = ระยะห่างระหว่างเส้นเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบ (เซนติเมตร)

■ การทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624

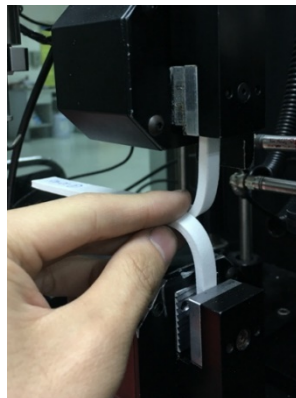
- นำชิ้นงานทดสอบ tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624 Die C วัดความหนาด้วยเครื่องมือวัดความหนา (thickness gauge) แล้วจึงใส่ชิ้นงานทดสอบไว้กับเครื่องมือทดสอบสมบัติแรงดึง (universal testing machine) ดังภาพที่ 2.7 กรอกราค่าความหนาในหน่วยมิลลิเมตร (mm) ลงโปรแกรม แล้วกด run test เพื่อเริ่มการดึง
- ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง



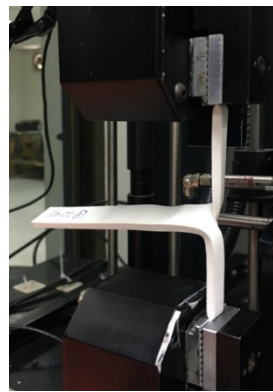
ภาพที่ 2.7 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624

■ การทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาดแบบ trousers tear strength ตามมาตรฐาน DIN 53507-A และ ASTM D624

1. นำชิ้นงานทดสอบ trousers tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624 วัดความหนาด้วยเครื่องมือวัดความหนา (thickness gauge) แล้วจึงใส่ชิ้นงานทดสอบไว้กับเครื่องมือทดสอบสมบัติแรงดึง (universal testing machine) ดังภาพที่ 2.8
2. กรอกรอกค่าความหนาในหน่วย mm ลงโปรแกรมแล้วกด run test เพื่อเริ่มการดึง
3. ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.8 ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ trousers tear strength ตามมาตรฐาน ASTM D624

(ก) วิธีการใส่ชิ้นงานทดสอบ

(ข) การทดสอบ trousers tear strength

■ การทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาดแบบ split tear ตามมาตรฐาน DIN 53507-B

1. ชิ้นงานทดสอบ ที่มีขนาด 150 x 25.4 x 20.0 mm ไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (tensile tester) ใช้หัวจับแบบความดันลมและ load ที่ 1kN โดยตั้งค่าดังนี้ calibration point หรือ clamp distance เท่ากับ 250.0 mm และอัตราเร็วการดึงของเครื่อง เท่ากับ 100 mm/min
2. วัดความกว้างบริเวณกึ่งกลางด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ กรอกรอกค่าใส่ที่โปรแกรม จากนั้นใส่ชิ้นงานทดสอบไว้ดังภาพที่ 2.9 แล้วจึงกดปุ่ม start test เพื่อเริ่มการดึง



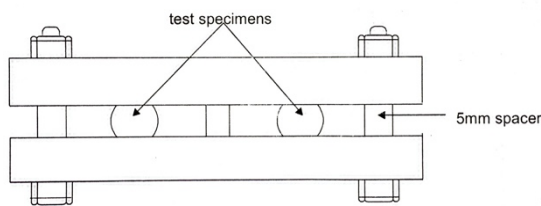
ภาพที่ 2.9 ลักษณะการใส่ชิ้นงาน
ทดสอบ split tear

■ การทดสอบความแข็งกต (hardness)

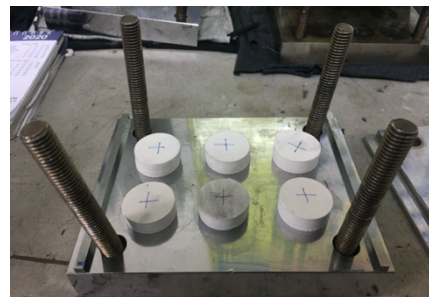
นำแผ่นโฟมที่ยังไม่เปิดผิวและแผ่นโฟมที่เปิดผิวออกแล้วมาวัดความแข็ง ด้วยเครื่องมือสำหรับวัดความแข็ง (durometer) แบบ shore C ball type

■ การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395-B

1. นำชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา $10\text{mm} \pm 0.2\text{ mm}$ และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง $26\text{mm} \pm 0.2\text{ mm}$ โดยตัดออกจากบริเวณที่ต่างกันของแผ่นโฟม
2. วัดความหนาของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องมือวัดความหนา (thickness gauge) เป็นความหนาเริ่มต้น (d_0) และวัดหนาของ spacer bar (d_s) โดยใช้ spacer ที่มีความกว้าง 5 mm
3. วางชิ้นงานทดสอบบนอุปกรณ์ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ตามภาพที่ 2.10 ชั้นสกรูยึดติดกับแผ่นเหล็ก
4. วางอุปกรณ์ทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ในตู้อบความร้อนที่ 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสำหรับที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



(ก) [9]



(ข)

ภาพที่ 2.10 ลักษณะการจัดวางชิ้นงานทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

5. หลังจากครบเวลาที่กำหนด เอาอุปกรณ์ทดสอบออกจากตู้อบความร้อน เอาชิ้นงานทดสอบออกจากอุปกรณ์ทดสอบ
6. วางชิ้นงานทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานเย็นตัวลง
7. เมื่อครบเวลาจึงวัดความหนาหลังการอบ (d_1) ด้วยเครื่องมือวัดความหนา (thickness gauge)
8. คำนวณค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set, CS) ตามสูตรด้านล่าง

$$\%CS = \frac{d_0 - d_1}{d_0 - d_s} \times 100\%$$

โดยที่ d_0 = ความหนาก่อนอบ ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

d_1 = ความหนาหลังอบ ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

d_s = ความกว้างของ spacer ณ %compress

9. หาค่าเฉลี่ยค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของตัวอย่าง

ตารางที่ 2.7 สภาวะที่ใช้ทดสอบการเสียรูปหลังจากการอัด (compression set)

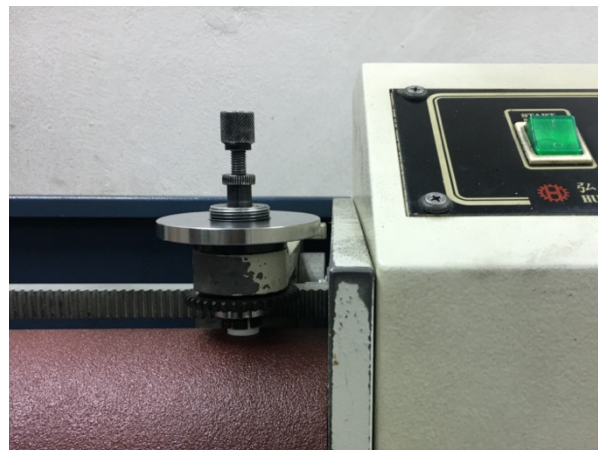
สภาวะที่	สภาวะที่ใช้ทดสอบ	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส, °C)	เวลา (ชั่วโมง)
1	50	6
2	23±2	24

2.3.4.6 การทดสอบความต้านทานการขัดถู (DIN abrasion) ตามมาตรฐาน DIN EN ISO 1183-1

1. ทำเครื่องหมายที่จุดกึ่งกลางระยะทางการเคลื่อนที่ของเครื่อง DIN Abrasion
2. ชั่งชิ้นงานทดสอบก่อนการทดสอบ (m_1) และหาค่าความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่น (specific gravity, SG) ตามมาตรฐาน DIN 53479-A
3. ใส่ load ที่ 500 g จากนั้นใส่ชิ้นงานทดสอบที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 mm (ในการทดลองนี้ใช้แผ่นโฟมที่มีความหนา 10 mm) บริเวณ specimen holder โดยให้ชิ้นงานทดสอบยื่นออกมาจากขอบ 2.0 ± 0.2 mm ดังภาพที่ 2.11(ก)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.11 แสดงการทดสอบความต้านทานการขัดถู (DIN abrasion)

(ก) ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบ

(ข) ตำแหน่งการเริ่มการทดสอบความต้านทานการขัดถู

4. วาง specimen holder ลงให้ชิ้นงานที่ทดสอบสัมผัสกับกระดาษทรายที่ตำแหน่งเริ่มดังภาพที่ 2.11(ข) และเปิดเครื่องเริ่มการทำงานให้ specimen holder เคลื่อนที่ไปจนถึงจุดกึ่งกลางที่ทำการเครื่องหมายไว้

5. จากนั้นกดหยุดแล้วยก specimen holder ขึ้นออกจากกระดาดทราย นำชิ้นงานทดสอบออกจาก specimen holder จากนั้นใช้แปรงปัดฝุ่นและเศษผงจากการทดสอบออกให้หมด
6. แล้วนำชิ้นงานทดสอบไปชั่งเป็นน้ำหนักหลังทำการทดสอบ (m_2)
7. คำนวณค่าความต้านทานการขัดถูได้จากสูตรดังนี้

$$Abrasion(\%) = \frac{m_1 - m_2}{SG} \times \frac{1000}{S_A} \times 200$$

m_1 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบในหน่วยกรัม

m_2 = น้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบในหน่วยกรัม

SG = ค่าความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นของชิ้นงาน

สำหรับค่า S_A หาได้จากการทดสอบ standard elastomer ทำการทดสอบหาน้ำหนักที่สูญเสียไป 3 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยใช้ load 100 N หรือ 1 kg และให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ไปจนถึงสิ้นสุด

8. ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง

2.3.4.7 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือ ความหนาแน่น (density)

ตามมาตรฐาน JIS K6268

1. ตัดชิ้นงานมีน้ำหนักประมาณ 1-5 กรัม ไปหาค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักหาค่าความถ่วงจำเพาะ (density gravitimeter)
2. นำชิ้นงานมาชั่งในอากาศก่อน แล้วตามด้วยชั่งในน้ำ
3. ค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานจึงหาได้จากสูตร

$$Specific\ gravity(g/cm^3) = \frac{W}{W - W_1}$$

W = น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในอากาศ (กรัม)

W_1 = น้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในน้ำ (กรัม)

บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ศึกษาผลของเกรดพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน

ตอนที่ 1 ของงานวิจัยได้ทำการอัดขึ้นรูปโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) ที่มีปริมาณไวนิลแอลกอฮอล์ต่างกัน ได้แก่ 18%, 28% และ 40% ตามลำดับ รวมไปถึง PEVA ที่มีอัตราการหลอมไหล (melt flow index) ต่างกัน คือ 5, 8 และ 20 ตามมาตรฐาน ASTM D1238 (g/10 min) โดยการเปรียบเทียบสมบัติการกระด้างกระดอน ความต้านทานการขีดถู สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานการยืด ความต้านทานการฉีกขาด ค่ามอดูลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดขาดด้วยเครื่อง universal testing machine รวมไปถึงศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา จากนั้นจึงเลือกสูตรที่ให้ผลการทดลองดีที่สุดเพื่อใช้เป็นพอลิเมอร์สำหรับตอนอื่น ๆ ถัดไป

โดยแบ่งการอภิปรายผลการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อ ได้ดังนี้

1. ผลของปริมาณ VA ต่อสมบัติของโฟม
2. ผลของค่าหลอมไหลต่อสมบัติของโฟม

3.1.1 ผลของปริมาณ VA ต่อสมบัติของโฟม

3.1.1.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

เมื่อทำการศึกษาสมบัติการคงตัวของโฟม PEVA ในสูตรต่าง ๆ ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณ VA พบว่า เวลาที่ใช้ในการคงรูปหรือการเชื่อมขวางที่ร้อยละ 90 (t_{c90}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ VA สูงขึ้น โดยพบว่า 18%VA จะมี t_{c90} ต่ำสุด โดยที่ทั้ง 3 สูตรใช้เวลา t_{c90} ประมาณ 11-13 นาที (ตารางที่ 3.1) และจะเลือกใช้เวลาที่ 15 นาทีในการขึ้นรูปโฟม ซึ่งจะเป็นจุดที่สูงสุดของกราฟคงรูปตามภาพที่ 3.1 เพราะการคงรูป ณ จุดนี้โฟมจะมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม [10] เช่นเดียวกับระยะเวลาสกอรั t_{s2} มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณ VA มากขึ้น

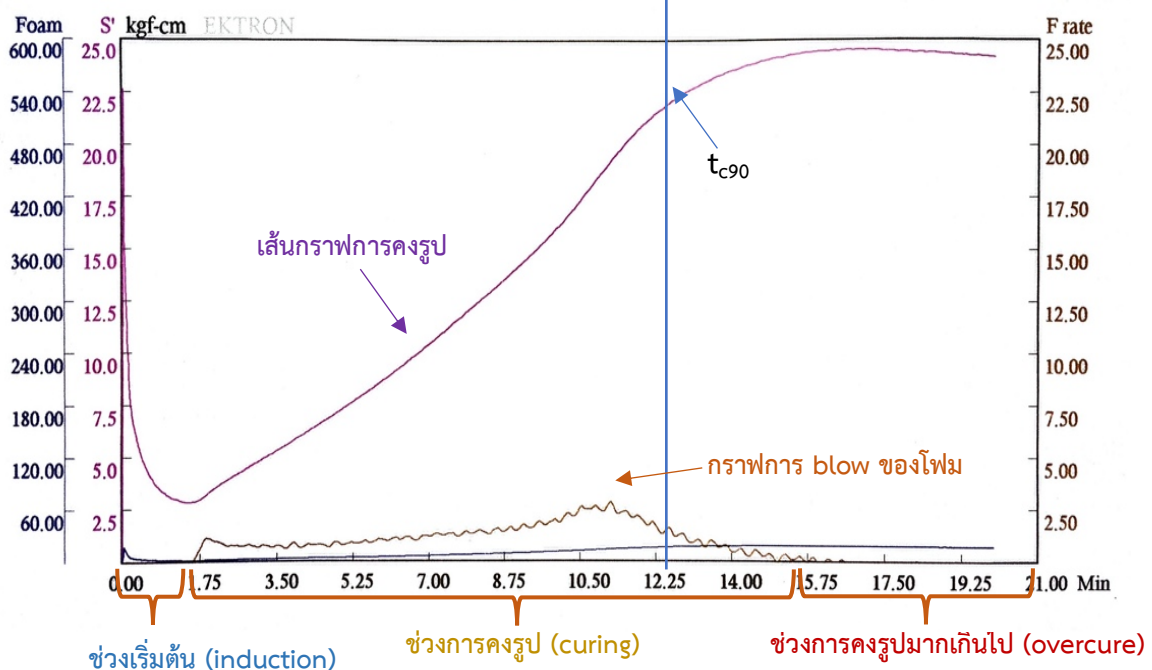
แต่เมื่อพิจารณาค่า crosslink density พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้นซึ่งไม่สอดคล้องกับทฤษฎี คือเมื่อปริมาณ VA มากขึ้นน่าจะส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงและอัตราการเชื่อมขวางมากขึ้น เพราะว่าบริเวณที่เกิดการเชื่อมขวางที่เป็นไปได้สูงจะอยู่บนตำแหน่งคาร์บอนของ methyl บนหมู่ acetate หรือบนหมู่ methylidyne เกิดเป็น 3°radical ซึ่งมีความเสถียรจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าบน ethylene [14] ตามภาพที่ 1.7 (หน้า 9)

ตารางที่ 3.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณ VA

ปริมาณ VA (%)	Scorch time, t_{s_3} (min)	Cure time, t_{c90} (min)	Cure rate index, CRI	Minimum torque, M_L (kgf/cm)	Maximum torque, M_H (kgf/cm)	ΔM
18 (35 shore C)	3.04	11.27	12.15	2.80	30.12	27.32
18 (53 shore C)	3.59	11.02	13.5	3.32	27.68	24.36
28 (55 shore C)	3.08	12.49	10.6	2.83	24.57	21.74
40 (30 shore C)	5.41	13.23	12.8	1.18	8.01	6.83
40 (41 shore C)	3.45	13.30	10.2	1.41	11.8	10.39

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บบอกค่าความแข็ง (hardness) แบบ shore C ชนิด ball type

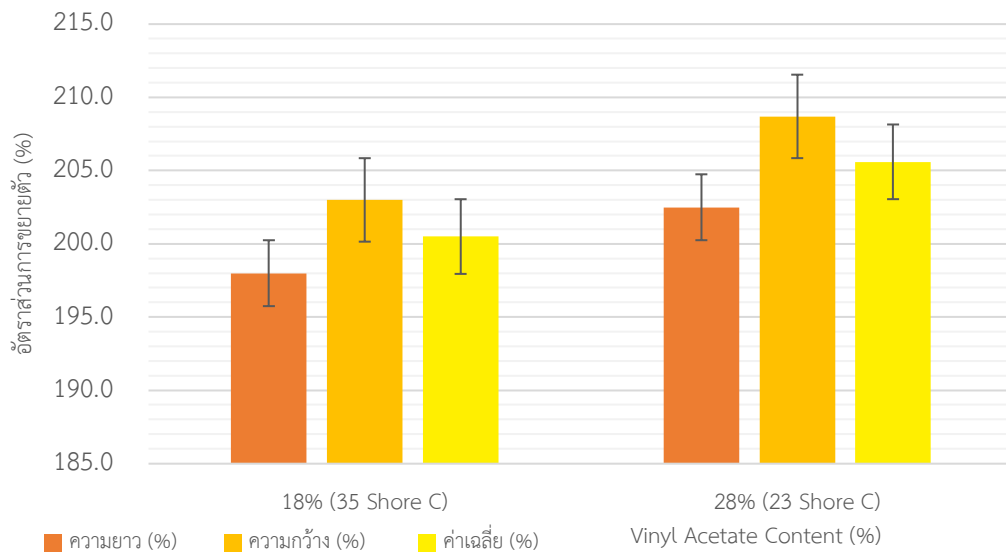
Date	Compound no.	Lot no	Batch no	ML	TS1	TS2	TC50	TC90	MH	QC
020/07/22	160X20	EVA A4	1	2.83	2-20	3-08	8-50	12-49	24.57	PASS



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างกราฟการคงรูป cure curve ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 28%

3.1.1.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)

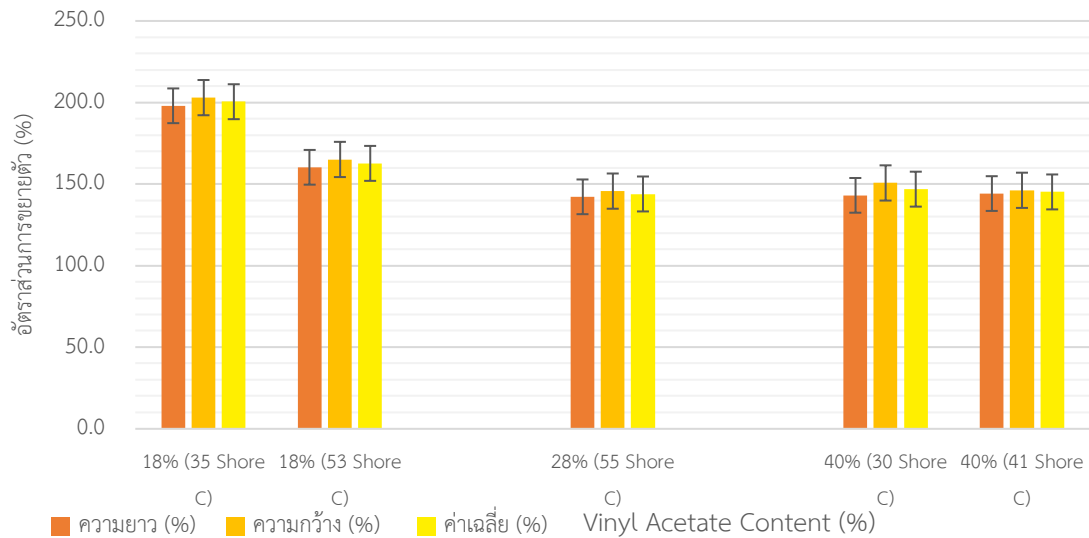
ในส่วนแรกเราศึกษาแนวโน้มอัตราการขยายตัวของปริมาณ VA แตกต่างกัน แต่ค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกันและสารเคมีอื่น ๆ เท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณ VA สูงขึ้น ค่า expansion ratio มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 3.2 ส่งผลให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามเนื่องจากเมื่อปริมาณ VA สูงขึ้นแสดงว่าโครงสร้างโมเลกุลมีปริมาณผลึกลดลง ทำให้ที่ 28% VA จะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าเมื่อใช้สูตรที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความแข็งโดยการเพิ่มสารคงรูปและลดสารทำให้เกิดฟอง ตามภาพที่ 3.3 ซึ่งเป็นผลของอัตราส่วนการขยายตัวเมื่อปรับสูตรแล้วได้ความแข็งเป็น 50 shore C



ภาพที่ 3.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรเดียวกัน

สำหรับ 18% VA ถ้าใช้สูตรนี้จะทำให้ความแข็งยังไม่ถึงตามที่ต้องการคือ 50 shore C จึงต้องปรับลดปริมาณสารทำให้เกิดฟองจาก 5 phr ไปเป็น 3 phr ส่งผลให้อัตราส่วนการขยายตัวลดลงจาก 200.5% ไปเป็น 162.7% ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแข็งของโฟมจากเดิมที่ 35 ไปเป็น 53 shore c เนื่องจากการลดปริมาณการเกิดแก๊สที่ทำให้เกิดโฟม และทำให้จำนวนที่เกิดเซลล์ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งเท่ากันประมาณ 50 ± 5 shore C 28%VA มีอัตราส่วนการขยายตัวที่น้อยกว่า 18%VA เพราะที่ปริมาณ 18%VA, 28%VA และ 40%VA ถ้าใช้ปริมาณสารทำให้เกิดฟองและสารเชื่อมขวางเท่ากัน ส่งผลให้ความแข็งไม่เท่ากันโดยโฟมที่มีปริมาณ VA น้อยจะมีความแข็งมากที่สุด แต่เมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น ความแข็งจึงลดลง เนื่องจากความเป็นผลึกที่ลดลงและความยืดหยุ่นที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณ VA สูง ทำให้ต้องปรับสูตรโดยปรับปริมาณ สารทำให้เกิดฟองและสารเชื่อมขวางเพื่อให้ได้ความแข็งที่ใกล้เคียงกันแล้วใช้เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลได้

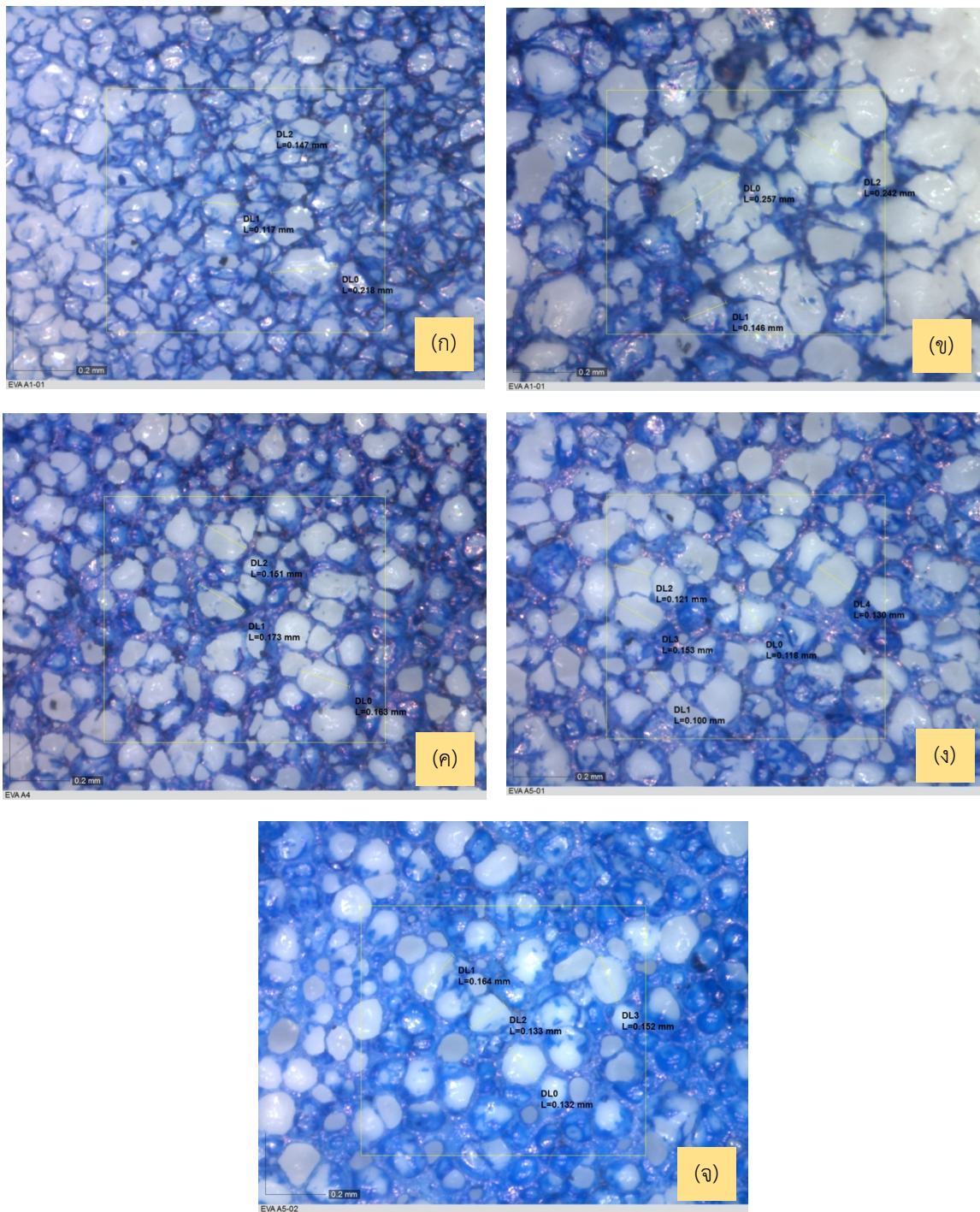


ภาพที่ 3.3 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

3.1.1.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (morphology)

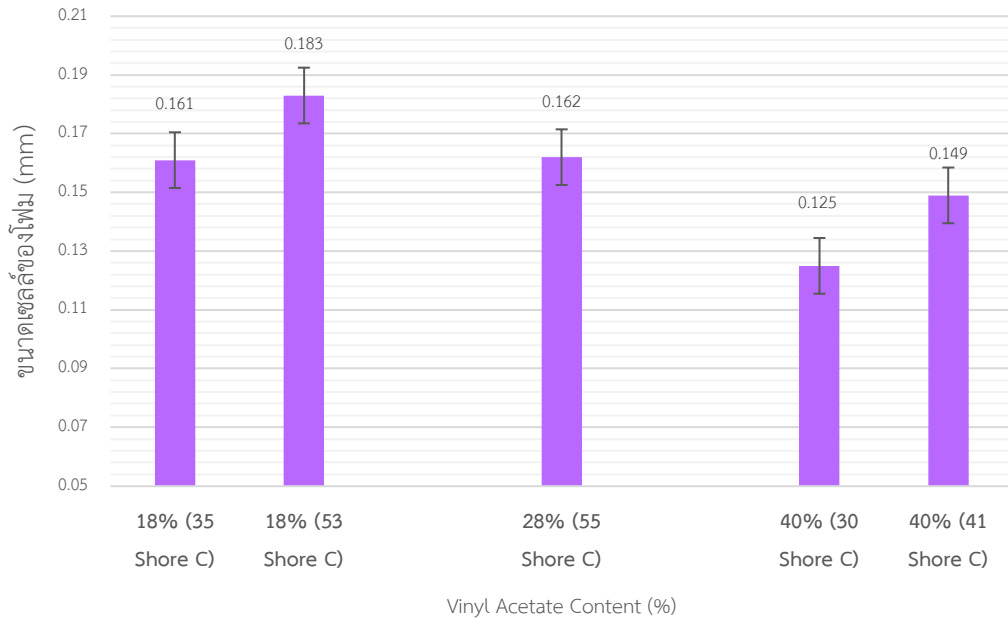
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของโฟม PEVA โดยการเปรียบเทียบผลของปริมาณ VA พบว่าเทียบที่ความแข็งใกล้เคียงกันเท่ากับ 50 ± 5 shore C เมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น ขนาดของเซลล์จะกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่และความเป็นผลึกที่ลดลง เมื่อ VA มากขึ้นทำให้ขนาดของเซลล์มีขนาดเล็กลง ทั้ง 3 สูตรที่มีปริมาณ VA เท่ากับ 18%, 28%, และ 40% เซลล์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแบบเซลล์ปิด และเป็นรูปวงรี นอกจากนี้เซลล์ที่พบในโฟม PEVA มีขนาดที่ไม่เท่ากัน โดยสามารถหาค่าเฉลี่ยขนาดของเซลล์ได้ตามภาพที่ 3.5

โฟมที่มีปริมาณ 18%VA ที่มีความแข็ง 35 shore C ตามภาพที่ 3.4(ก) มีขนาดเซลล์เท่ากับ 0.161 mm เมื่อปรับลด blowing agent ทำให้มีขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้นเท่ากับ 0.183 mm ส่งผลให้มีความแข็ง 53 shore C ในทางเดียวกันโฟมที่มีปริมาณ 40%VA และมีความแข็ง 30 shore C ตามภาพที่ 3.4(ง) มีขนาดเซลล์เท่ากับ 0.125 mm และเมื่อความแข็งเพิ่มเป็น 41 shore C มีขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นเป็น 0.149 mm ตามภาพที่ 3.4(จ) อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง จะส่งผลให้เกิดแก๊สขึ้นปริมาณมาก จึงเกิดเซลล์จำนวนมากในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจำนวนเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะมากขึ้น เป็นผลให้ขนาดเซลล์ลดลง [18] ดังภาพที่ 3.4(ก) และ (ข)



ภาพที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างผิวของโพลีเมอร์ PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยเปรียบเทียบผลของปริมาณ VA ที่แตกต่างกัน

- (ก) เมื่อใช้ PEVA ที่มีปริมาณ VA 18%wt โดยที่ความแข็ง 35 shore C
- (ข) เมื่อใช้ PEVA ที่มีปริมาณ VA 18%wt โดยที่ความแข็ง 53 shore C
- (ค) เมื่อใช้ PEVA ที่มีปริมาณ VA 28%wt โดยที่ความแข็ง 55 shore C
- (ง) เมื่อใช้ PEVA ที่มีปริมาณ VA 40%wt โดยที่ความแข็ง 30 shore C
- (จ) เมื่อใช้ PEVA ที่มีปริมาณ VA 40%wt โดยที่ความแข็ง 41 shore C



ภาพที่ 3.5 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอสีเทต (PEVA) เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

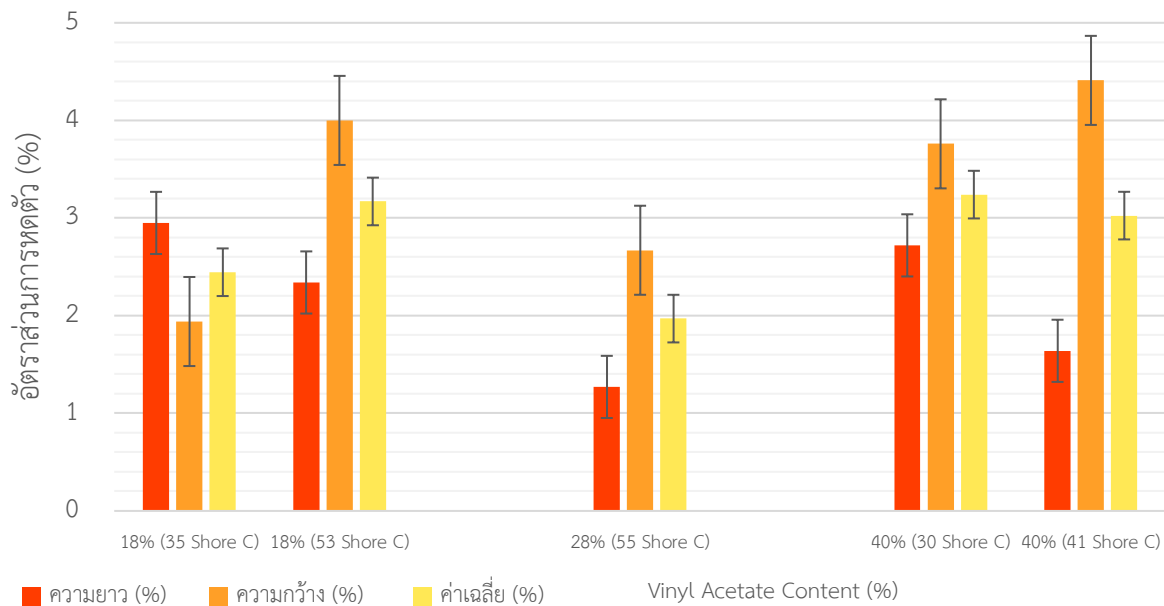
3.1.1.4 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)

ตามทฤษฎีเมื่อปริมาณไวนิลแอสีเทตมากขึ้นน่าจะส่งผลให้การหดตัวน้อยลงเมื่อเทียบกับความแข็งเท่ากัน แต่ในการศึกษานี้พบว่า 40%VA จะไม่เป็นไปตามทฤษฎี (ภาพที่ 3.6) เนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์ PEVA ที่นำมาใช้มีค่า melt flow index เท่ากับ 52 สูงกว่า 18%VA (MFI=2.3) และ 28%VA (MFI=8) ซึ่งทำให้ค่าการหดตัวสูง เพราะว่าเมื่อ MFI สูงแสดงว่าสายโซ่โมเลกุลค่อนข้างสั้น (น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ดี ทำให้เมื่อได้รับความร้อนจึงมีการหดตัวที่สูงกว่ามาก

ที่ค่าความแข็งประมาณ 50 Shore C เท่ากันโฟมที่มี 18%VA มีค่าความสามารถการหดตัวด้วยความร้อนที่มากกว่า 28%VA โดยที่ 18%VA มีค่าเท่ากับ 3.2% ในขณะที่ 28%VA มีค่าเท่ากับ 2.0% สามารถอธิบายได้ดังนี้คือเมื่อเปรียบเทียบโฟมทั้งสอง โฟม 18%VA จะมีปริมาณ ethylene มากกว่าแบบ 28%VA ซึ่งส่วนของพอลิเมอร์ที่เป็น polyethylene นี้จะจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (เกิดผลึก) ได้มากกว่าส่วนของ polyVA ด้วย ดังนั้นโฟม 18%VA จึงหดตัวกลับในระหว่างการเกิดผลึกได้มากกว่าโฟมอีกชนิดหนึ่งด้วย [12] ดังนั้นถ้าสายโซ่โมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวมากเช่นใน 18%VA จึงพบการหดตัวที่สูงขึ้น

นอกจากนี้ยังเกิดจากปริมาณของสารเชื่อมโยง (crosslink content) ได้ คือ เมื่อความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากขึ้น ดูจากค่า ΔM ในตารางที่ 3.1 ส่งผลให้ค่าการหดตัวลดลง เพราะว่าโครงสร้างสามารถทนต่อความร้อนได้มากกว่า แต่ในทางกลับกันเมื่อปริมาณความหนาแน่นการเชื่อมโยงน้อย เมื่อสายโซ่โมเลกุลได้รับความร้อนจะเกิดการเคลื่อนที่ได้มากจึงจัดเรียงตัวให้แนบชิดมากที่สุดทำให้พื้นที่ว่างลดลง ส่งผลให้การหดตัวสูงขึ้น เช่น 18%VA ที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลด blowing agent ทำให้มีความหนาแน่นของโฟมมากขึ้นแต่ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง ส่งผลต่อความสามารถการหดตัวโดยสูงขึ้นจาก 2.4% ที่ความแข็ง 35 เป็น 3.2% ที่ความแข็ง 53

ที่ 40%VA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารคงรูป ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากขึ้น จึงส่งผล
ให้ความสามารถในการหดตัวลดลงจาก 3.2% เป็น 3.0%



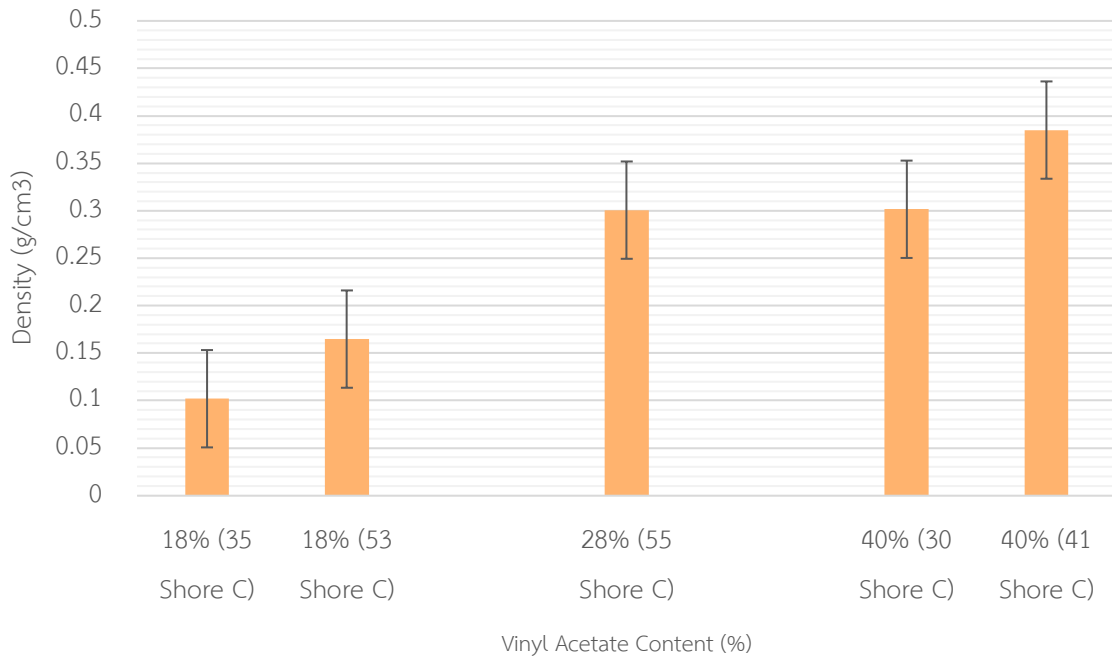
ภาพที่ 3.6 ความสามารถการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

3.1.1.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)

เมื่อทำการศึกษามวลของปริมาณ VA ต่อค่าความถ่วงจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบจากปริมาณ VA ที่ต่างกัน ตามภาพที่ 3.7 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะมีความสัมพันธ์กับค่า expansion ratio และความหนาแน่นของพอลิเมอร์ เมื่อปริมาณ VA มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นมากขึ้น มีสาเหตุมาจาก expansion ratio ที่จะลดลง แสดงว่าโฟมขยายตัวออกได้น้อย ทำให้เกิดช่องขนาดเล็กจึงกักเก็บอากาศได้ลดลง ความหนาแน่นจึงมากขึ้น

เช่นเมื่อเทียบที่ระดับความแข็งเท่ากันที่ความแข็งประมาณ 50 shore C 18%VA มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.1649 g/cm^3 แต่เมื่อเป็น 28%VA มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.3007 g/cm^3 ในทางเดียวที่ความแข็ง 30 shore C พบว่า 40%VA มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.3016 g/cm^3 มากกว่า 18%VA ที่มีความหนาแน่น 0.1021 g/cm^3

เมื่อค่า expansion ration เท่ากัน เช่นที่พบใน 28%VA และ 40%VA แต่ค่าความถ่วงจำเพาะต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างจากความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ทำให้ความหนาแน่นของโฟม 40%VA มีความหนาแน่นมากกว่า 28%VA

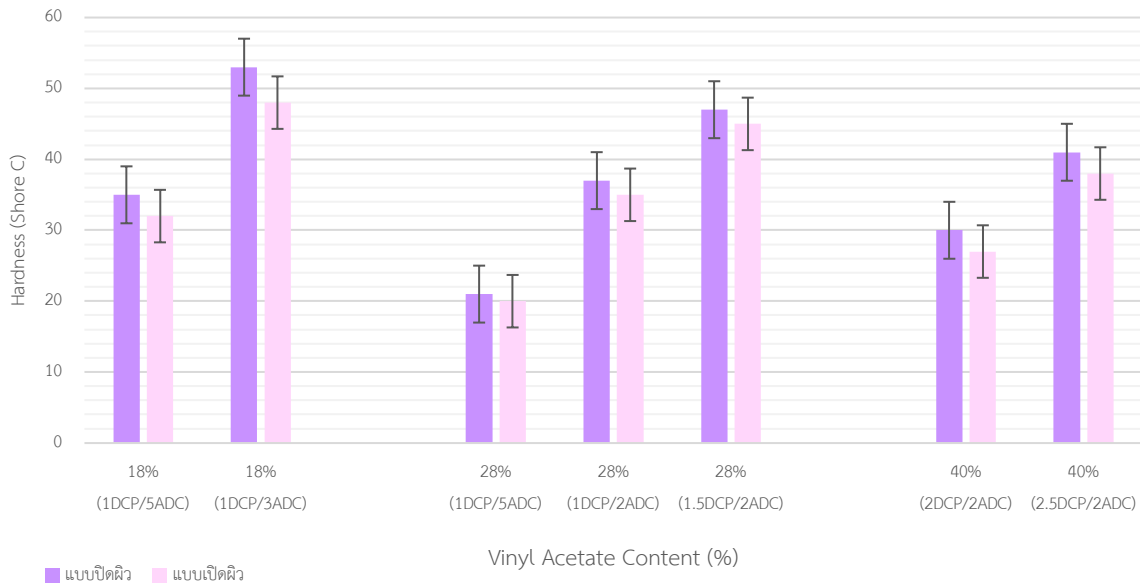


ภาพที่ 3.7 ค่าความถ่วงจำเพาะ หรือความหนาแน่นของโพลี PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

3.1.1.6 ความแข็ง (hardness)

เมื่อทำการศึกษามวลของปริมาณ VA ต่อค่าความแข็ง โดยการเปรียบเทียบปริมาณ VA ต่างกัน และสารเคมีเท่ากัน โดยใช้เครื่องวัดความแข็ง durometer shore C ชนิด ball type วัด 2 แบบคือ แบบเปิดผิว และไม่เปิดผิว จากภาพที่ 3.8 พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณ VA ลดลง แต่สำหรับ 40%VA จะไม่เป็นตามทฤษฎีเนื่องจากค่า MFI เท่ากับ 52 สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 28%VA และ 18%VA

เมื่อเทียบจากปริมาณของสารคงรูปและสารให้เกิดฟองเท่ากันโดยใช้สูตรเดียวกัน กล่าวคือ ที่ใช้ปริมาณ DCP 1 phr และ ADC 5 phr จะเห็นว่า 18%VA มีความแข็งเท่ากับ 35 มากกว่า 28%VA มีความแข็งเท่ากับ 21 เมื่อวัดแบบปิดผิว ในทางเดียวกันเมื่อวัดแบบเปิดผิวความแข็งลดลงมาเล็กน้อยมาอยู่ที่ 32 สำหรับ 18%VA มากกว่า 28%VA ที่เท่ากับ 20 รวมทั้งที่ใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr และ ADC 2 phr พบว่า 28%VA มีความแข็งมากกว่า 40% แสดงว่า ความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ VA ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ VA ลดลงส่งผลให้ระดับความเป็นผลึก (degree of crystalline) เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างความเป็นผลึกของ PEVA ถูกกำหนดโดยหมู่ acetate เนื่องจากมีความเกะกะ (bulky) มากกว่าหมู่ ethylene ดังนั้น ส่วนของ polyethylene มาจัดเรียงตัวกันได้หนาแน่นกว่าส่วนของ polyVA นอกจากนี้ ความแข็งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อลดปริมาณสารทำให้เกิดฟอง และเพิ่มสารคงรูป



ภาพที่ 3.8 ค่าความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

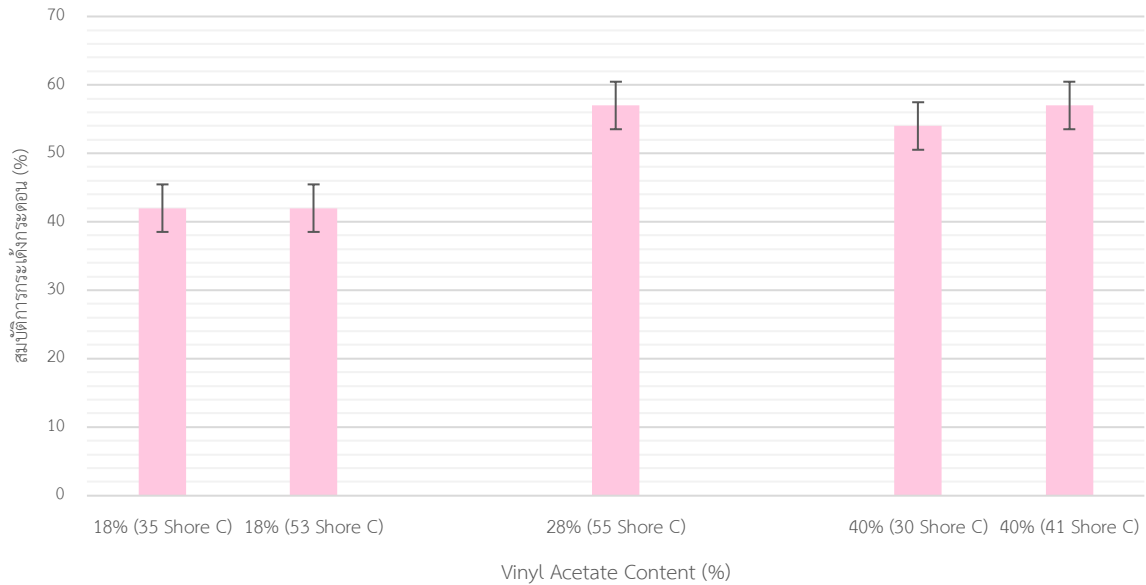
3.1.1.7 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)

สมบัติการกระด้างกระดอนเป็นความสามารถในการกลับคืนสู่รูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วหลังจากที่ยางได้รับการเปลี่ยนแปลงชั่วคราว ในส่วนพลังงานที่ไม่กลับคืน คือพลังงานกลที่สูญเสียไปในรูปความร้อน

เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ VA ที่มีต่อสมบัติการกระด้างกระดอน โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณ VA ต่างกัน ตามภาพที่ 3.9 ในการวิจัยนี้พบว่า โฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA ต่ำจะมีค่าการกระด้างกระดอนต่ำด้วย เป็นผลมาจากโครงสร้างสายโซ่โพลิเมอร์ที่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่เมื่อปริมาณโครงสร้างผลึกมากส่งผลต่อความสามารถในการยืดหยุ่นของผนังเซลล์ของโฟม [15] ทำให้สมบัติการกระด้างกระดอนได้ลดลง เช่นใน 18%VA มีการกระด้างกระดอนน้อยกว่า 28%VA

ที่ปริมาณ 18%VA มีค่าการกระด้างกระดอนเท่ากับ 42 ในขณะที่ 28%VA มีค่าการกระด้างกระดอนมากกว่าอยู่ที่ 57% ซึ่งใกล้เคียงกับที่ 40%VA ที่มีค่าการกระด้างกระดอนเท่ากับ 57% โดยคาดว่าที่ 28%VA อาจเป็นขีดความสามารถสูงสุดในการกระด้างกระดอน รวมถึงที่ 40%VA มีความยืดหยุ่นที่สูงมากอาจส่งผลให้สูญเสียพลังงานที่ใช้ในการกลับคืนรูปเดิมได้

นอกจากนี้พบว่าค่าความแข็งไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอนเช่น ที่ 18%VA มีค่าการกระด้างกระดอนที่ 35 และ 53 Shore C เท่ากับ 42%



ภาพที่ 3.9 ค่าการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

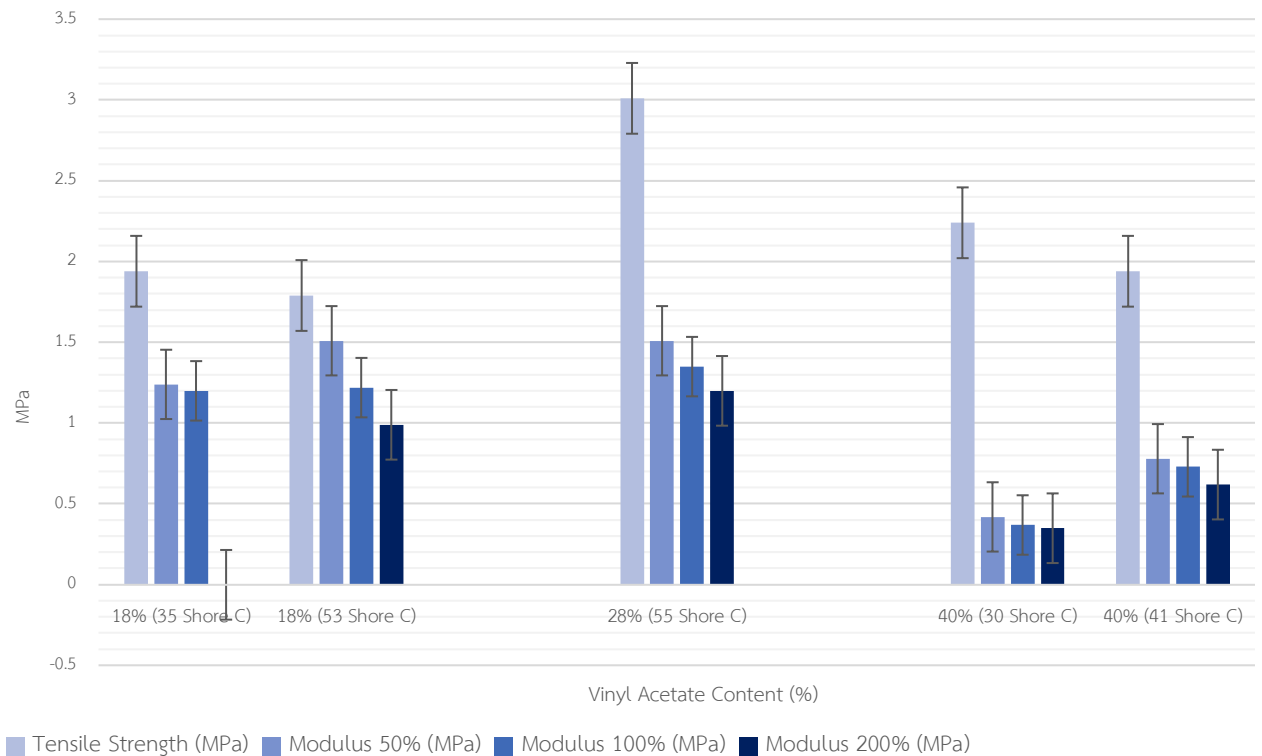
3.1.1.8 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

■ ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ VA ต่อค่าความทนทานแรงดึง (tensile strength) โดยเปรียบเทียบปริมาณ VA ต่างกัน ตามภาพที่ 3.10 พบว่า ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น เพราะว่า แรงดึงดูระหว่างข้อของแต่ละสายโซ่โมเลกุลมีมากขึ้น สามารถพิจารณาจากค่า ΔM ในตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถบอกความหนาแน่นการเชื่อมขวางของสารคงรูปได้อย่างคร่าว ๆ พบว่าเมื่อปริมาณ VA มากขึ้น ค่า ΔM ลดลงเนื่องจากปริมาณผลึกน้อยลง ส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่ามอดูลัสมีผลในแนวโน้มเดียวกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณสารคงรูป (peroxide) เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความหนาแน่นการเชื่อมโยง (crosslink density) ให้มากขึ้นจึงทำให้ความทนทานต่อแรงดึงมากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ค่าหนึ่งและจะลดลง เนื่องจากพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้อย่างจำกัด เมื่อเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น เป็นผลให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และเมื่อไม่สามารถกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลให้แตกหักได้ง่าย [13]

เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งเท่ากัน พบว่า ที่ความแข็งเท่ากับ 50 ± 5 shore c 18%VA มีค่า tensile เท่ากับ 1.79 MPa น้อยกว่า 28%VA มีค่า tensile เท่ากับ 3.01 MPa เช่นเดียวกับกรณีที่ความแข็งเท่ากับ 30 ± 5 shore c 18%VA มีค่า tensile เท่ากับ 1.94 MPa น้อยกว่า 40%VA ค่า tensile เท่ากับ 2.24 MPa และจากการทดลองพบว่าที่ปริมาณ 28%VA มีความทนทานแรงดึงสูงสุด เพราะว่าที่ 40%VA มีค่า MFI สูงกว่า 28%VA และ 18%VA มาก ทำให้เมื่อค่า MFI สูง แสดงว่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (สายโซ่สั้น) จึงส่งผลให้แรงที่เกี่ยวข้องของสายโซ่สั้นลงส่งผลให้ค่า tensile ลดลง

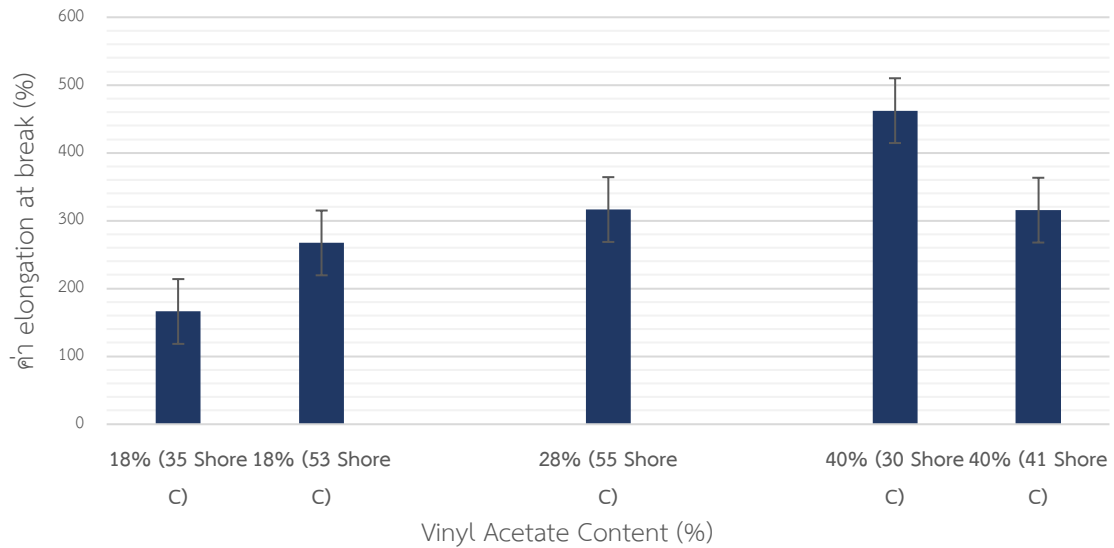


ภาพที่ 3.10 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus) ของโพลี PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

■ ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break)

เมื่อทำการศึกษาค่าผลของปริมาณ VA ต่อค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break) ตามภาพที่ 3.11 พบว่า โพลี PEVA ที่มีปริมาณ VA มาก ส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาดสูง แสดงว่า PEVA มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) มากขึ้น หรือมีผลึกลดลง สายโซ่โมเลกุลของ PEVA จึงเคลื่อนที่ได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ค่า ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด สูงขึ้น

40%VA มีความยืดหยุ่นสูงสุดเท่ากับ 462.3% รองลงมาเป็น 28%VA เท่ากับ 316.5% และ 18%VA เท่ากับ 267.3% อีกทั้งเมื่อโครงสร้างแข็งแรงลดลง ส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่นลดลงไปด้วย เช่น ที่ 18%VA ความแข็ง 53 shore C ค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 267.3% เมื่อความแข็งลดลงเป็น 35 shore C ค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 166.2%



ภาพที่ 3.11 ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break) ของโพลี PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

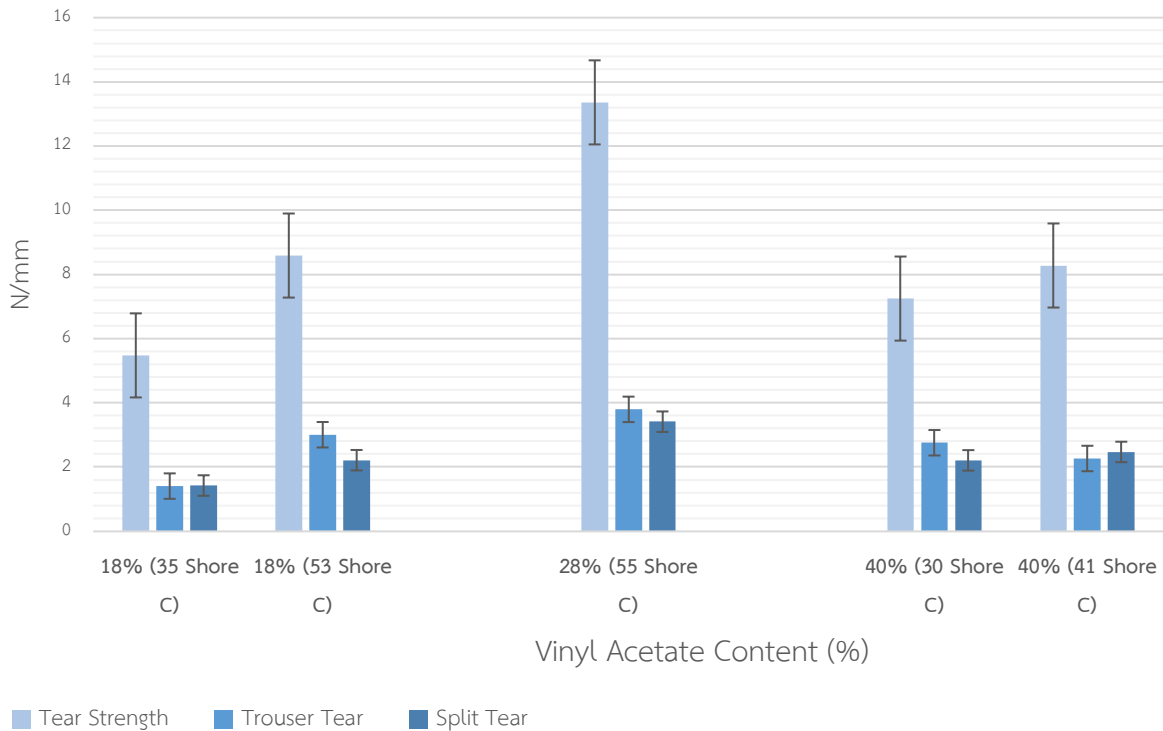
■ ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance)

เมื่อทำการศึกษาลงของปริมาณ VA ต่อค่าความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ตามภาพที่ 3.12 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบ 18%VA และ 28%VA ความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้นเมื่อปริมาณ VA เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม 40%VA ไม่เป็นไปตามแนวโน้มมีสาเหตุจากค่า MFI ที่สูงกว่าทำให้แรงที่เกี่ยวข้องกันของสายโซ่ น้อยกว่า เมื่อเทียบกับ 18%VA และ 28%VA ที่มีค่า MFI ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่า tear strength ลดลง

เมื่อแสดงความต้านทานการฉีกขาดแบบ tear die B ตามมาตรฐาน ASTM D624 ที่ความแข็ง ใกล้เคียงกัน เพราะเมื่อความแข็งมากขึ้นแสดงว่ามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจึงสามารถทนทานต่อแรงฉีกขาดได้มากขึ้น เป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วของแต่ละสายโซ่โมเลกุลมีมากขึ้น สังเกตได้จากค่า ΔM ในตารางที่ 3.1 ลดลงเมื่อปริมาณ VA มากขึ้น ทำให้ความเป็นผลึกลดลง

ความแข็ง 50 ± 5 shore C สังเกตเห็นว่า 18%VA มีค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 8.59 N/mm น้อยกว่า 28%VA ที่มีความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 13.36 N/mm

เช่นเดียวกับกรณีความต้านทานการฉีกขาดแบบ trousers tear และ split tear เมื่อความแข็งเป็น 50 ± 5 shore C ที่ 18%VA มีค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 3.01 และ 2.21613 N/mm น้อยกว่า 28%VA ที่มีค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 3.8 และ 3.41618 N/mm



ภาพที่ 3.12 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโพลี PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

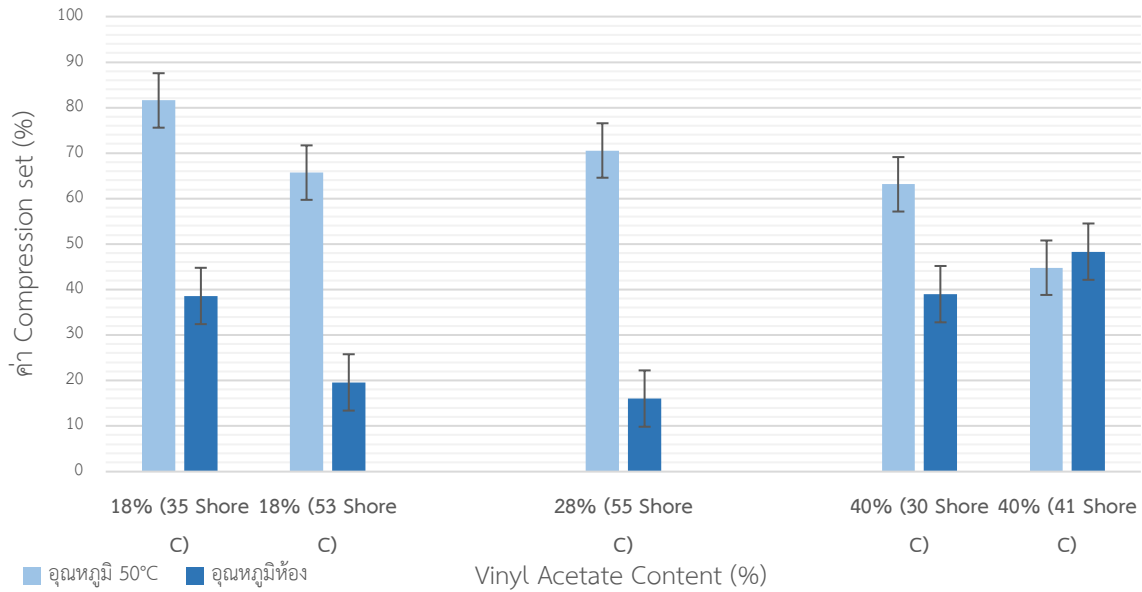
3.1.1.9 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด คือ ความสามารถในการกลับคืนสู่รูปเดิมหลังจากการเสียรูป ซึ่งเป็นการวัดความยืดหยุ่นในการเชื่อมขวางของโพลี โดยที่ค่า compression set (CS) น้อย แสดงว่ามีความยืดหยุ่นสูง

เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ VA ต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) จากภาพที่ 3.13 ทดสอบที่ 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่อปริมาณ VA มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลง โดยเป็นผลมาจากความหนาแน่นการเชื่อมโยงและความเป็นผลึก

เมื่อเทียบที่ความแข็งเท่ากัน เมื่อปริมาณ VA สูง แสดงว่าความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง สังเกตได้จากค่า ΔM ในตารางที่ 3.1 ที่ลดลง และความเป็นผลึกที่ลดลงโมเลกุลสายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ดี ทำให้หลังจากได้รับแรงอัดสามารถกลับคืนรูปได้ดี ได้แก่ ที่ 18%VA ความแข็ง 35 shore C มีค่า CS เท่ากับ 81.57% (ที่ 50°C) และ 38.60% (ที่อุณหภูมิห้อง) เมื่อเพิ่มความแข็งเป็น 53 shore C มีค่า CS เท่ากับ 65.71% (ที่ 50°C) และ 19.60% (ที่อุณหภูมิห้อง) ในขณะที่ 28%VA มีค่า CS น้อยกว่า

นอกจากนี้พบว่าที่ 40%VA จะให้ค่า CS ต่ำสุด และที่อุณหภูมิห้อง ความแข็งเท่ากับ 30 shore C จะมีค่า CS เท่ากับ 39.0% น้อยกว่าที่ความแข็ง 41 shore C มีค่า CS เท่ากับ 48.34% ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากค่า ΔM ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่ามีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลลดลงและหลังจากได้รับแรงอัดจึงคืนรูปได้ช้าลง

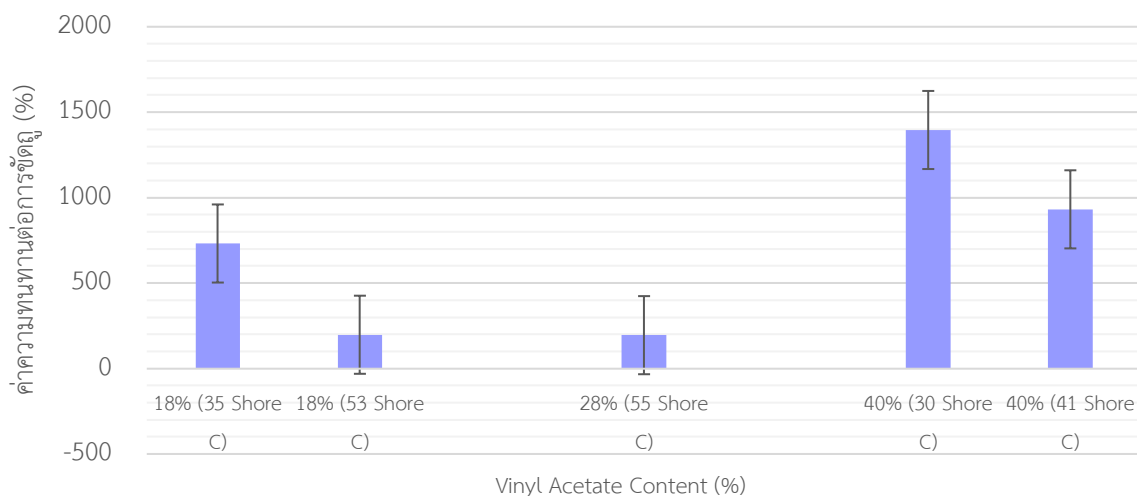


ภาพที่ 3.13 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

3.1.1.10 การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)

เมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ VA ต่อความต้านทานการขัดถู ตามภาพที่ 3.14 พบว่า ปริมาณ VA ไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานการขัดถู แต่จะพบความแตกต่างอย่างมากที่ปริมาณ VA 40% เป็นผลมาจากความแข็งที่น้อยของพอลิเมอร์ ทำให้ทนทานต่อขัดถูได้น้อย (ค่า abrasion มาก)

ที่ปริมาณ 18%VA และ 28%VA จะให้ค่าความทนทานต่อการขัดถูต่ำสุดอยู่ที่ 198.5% และ 196% ตามลำดับ (เมื่อใช้ความแข็งเท่ากับ 50 ± 5 shore C) แสดงว่าพื้นผิวของโฟม PEVA สามารถทนทานต่อการขัดถูได้มาก นอกจากนี้เมื่อความแข็งมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานการขัดถูลดลง อาจมีสาเหตุมาจาก โฟม PEVA มีความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้นทำให้บริเวณผิวหน้าสามารถต้านทานการขัดถูได้มากขึ้น และคาดว่าผลของปริมาณ VA อาจไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการขัดถู



ภาพที่ 3.14 ความต้านทานต่อขัดถู (abrasion) ของโฟม PEVA เมื่อปริมาณ VA ต่างกัน

จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของโฟม PEVA โดยการเปรียบเทียบปริมาณ VA ต่างกัน จากตอนที่ 3.1.1 พบว่า 28%VA จะมีค่า rebound resilience มากที่สุด ใกล้เคียงกับ 40%VA แต่เนื่องจากความนิ่ม เป็นผลมาจากความแข็ง (ความแข็งเริ่มต้น) ที่น้อยมากของพอลิเมอร์เองทำให้ไม่สามารถปรับความแข็งตามที่ต้องการได้ จึงเลือกใช้ 28%VA เท่ากัน แต่ปรับเปลี่ยนค่า melt flow index ต่างกัน สำหรับตอนศึกษาผลของดัชนีหลอมไหล (melt flow index) ต่อสมบัติของโฟม PEVA

3.1.2 ผลของดัชนีหลอมไหลต่อสมบัติของโฟม

3.1.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

เมื่อทำการศึกษาสมบัติการคงตัวของโฟม PEVA ในสูตรต่าง ๆ ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป เพื่อเปรียบเทียบผลของดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) พบว่า t_{s2} และ t_{c90} ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 3 ค่า MFI เช่นเดียวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางไม่แตกต่างกัน ซึ่งเวลา t_{c90} อยู่ในช่วงเวลา 10-13 นาทีจึงใช้เวลา 15 นาทีเป็นเวลาในการขึ้นรูป และที่เวลา 15 นาทีเป็นจุดสูงสุดของกราฟการคงรูป นอกจากนี้พบว่า ผลของค่า MFI ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลงเมื่อค่า MFI สูงขึ้น

ตารางที่ 3.2 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณดัชนีการไหล (melt flow index)

อัตราการหลอมไหล (melt flow index) (g/10 min)	Scorch time, t_{s2} (min)	Cure time, t_{c90} (min)	Cure rate index, CRI	Minimum torque, M_L (kgf/cm)	Maximum torque, M_H (kgf/cm)	ΔM
5 (55 shore C)	3.08	12.49	10.6	2.83	24.57	21.74
8 (21 shore C)	3.08	12.29	10.9	2.74	25.84	23.1
8 (55 shore C)	2.58	12.15	10.4	2.36	23.67	21.31
20 (21 shore C)	3.28	12.55	10.8	1.61	18.85	17.24
20 (37 shore C)	5.11	12.35	13.81	1.40	14.38	12.98
20 (47 shore C)	3.21	13.33	9.88	1.66	19.56	17.90

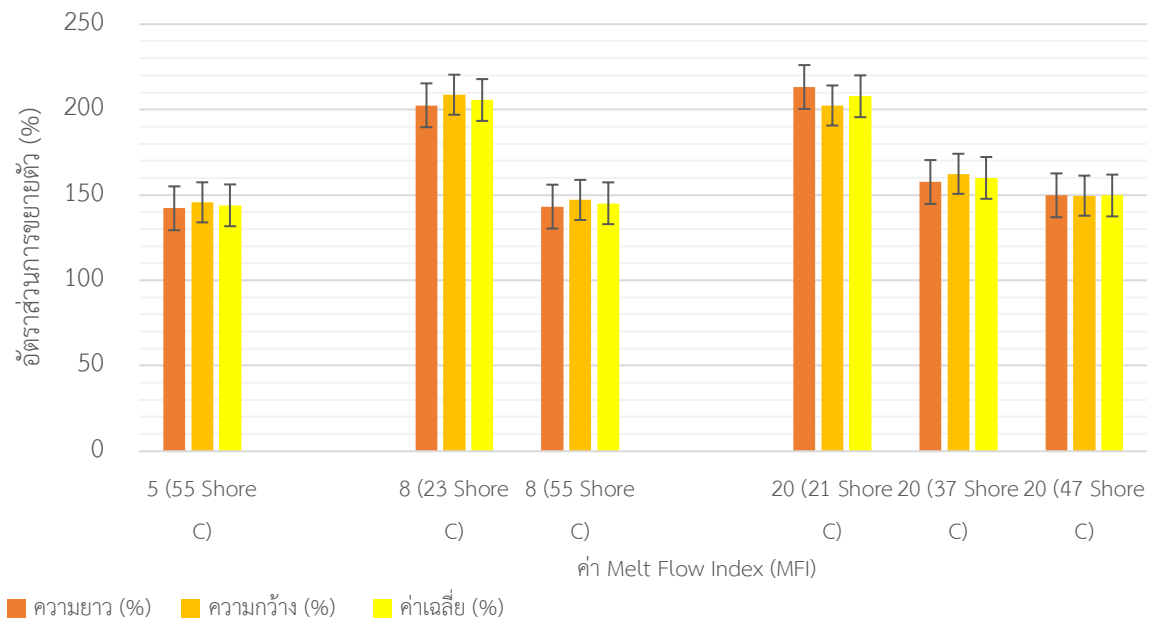
หมายเหตุ ค่าในวงเล็บบอกค่าความแข็ง (hardness) แบบ shore C ชนิด ball type

3.1.2.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)

เมื่อทำการศึกษาผลของดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) ต่ออัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) โดยการเปรียบเทียบที่ค่า MFI ต่าง ๆ แต่สารเคมีอื่น ๆ เท่ากัน ตามภาพที่ 3.15 พบว่า เมื่อปริมาณ MFI เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนการขยายตัวสูงขึ้น เพราะว่าถ้าโฟม PEVA ที่มีค่า MFI มากแสดงว่ามีความหนืดน้อย (น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) จึงสามารถไหลได้มากจึงขยายตัวออกได้มากขึ้น

ที่ความแข็ง 50 ± 5 Shore C ค่า MFI เท่ากับ 20 จะมีค่า expansion ratio มากสุดเท่ากับ 149.7% น้อยลงมาคือ MFI เท่ากับ 8 มีค่า expansion ratio เท่ากับ 145.2% และ MFI เท่ากับ 5 มีค่า expansion ratio น้อยสุดเท่ากับ 144.0%

เมื่อความแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการขยายตัวลดลง เช่นที่ระดับความแข็งประมาณ 23 ± 5 shore C มีค่าอัตราส่วนการขยายตัวเท่ากับ 205.6% สำหรับ MFI เท่ากับ 8 และ 207.8% สำหรับ MFI เท่ากับ 20 และเมื่อความแข็งเพิ่มเป็น 50 ± 5 shore C มีค่าอัตราส่วนการขยายตัวลดลงเป็น 149.7% สำหรับ MFI เท่ากับ 20 เช่นเดียวกับที่ สำหรับ MFI เท่ากับ 5 อัตราส่วนการขยายตัวเท่ากับ 144.0%



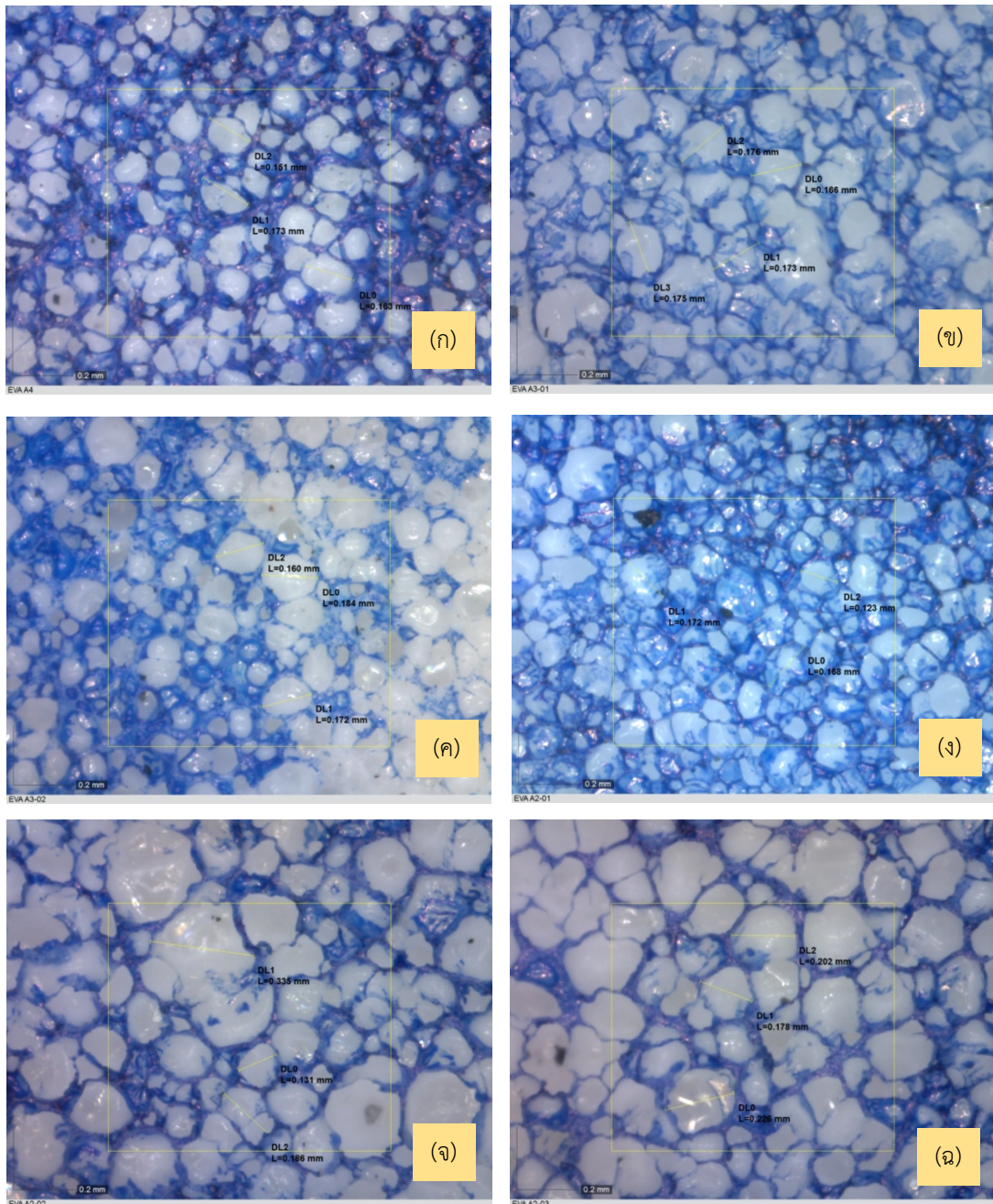
ภาพที่ 3.15 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (morphology)

เมื่อทำการศึกษาพื้นผิวโครงสร้างโฟม PEVA โดยการเปรียบเทียบผลของค่า melt flow index ของโฟม พบว่า ขนาดเซลล์มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อดัชนีการไหลมากขึ้น เพราะว่า การไหลดีทำให้เซลล์ของโฟมขยายขนาดได้ดี ตามภาพที่ 3.17 โดยที่แต่ละเซลล์ของโฟม เป็นลักษณะเซลล์ปิด มีรูปร่างเป็นวงรี

ที่ค่าความแข็งเท่ากัน 50 ± 5 Shore C เช่น ค่า MFI เท่ากับ 5 มีขนาดเซลล์เฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 0.162 mm ตามภาพที่ 3.16(ก) ค่า MFI เท่ากับ 8 มีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 0.172 mm ตามภาพที่ 3.16(ค) และค่า MFI เท่ากับ 20 มีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 0.202 mm

นอกจากนี้เมื่อลดปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้น เช่นที่ค่า MFI เท่ากับ 20 ที่ความแข็ง 21 shore C มีขนาดเซลล์เท่ากับ 0.154 mm ตามภาพที่ 3.16(ง) และเมื่อความแข็งเป็น 47 shore C มีขนาดเซลล์เท่ากับ 0.202 mm ตามภาพที่ 3.16(ฉ)



ภาพที่ 3.16 ลักษณะโครงสร้างผิวของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของค่า MFI ที่แตกต่างกัน

(ก) เมื่อใช้ PEVA ที่ค่า Melt flow index เท่ากับ 5 โดยที่ความแข็ง 55 shore C

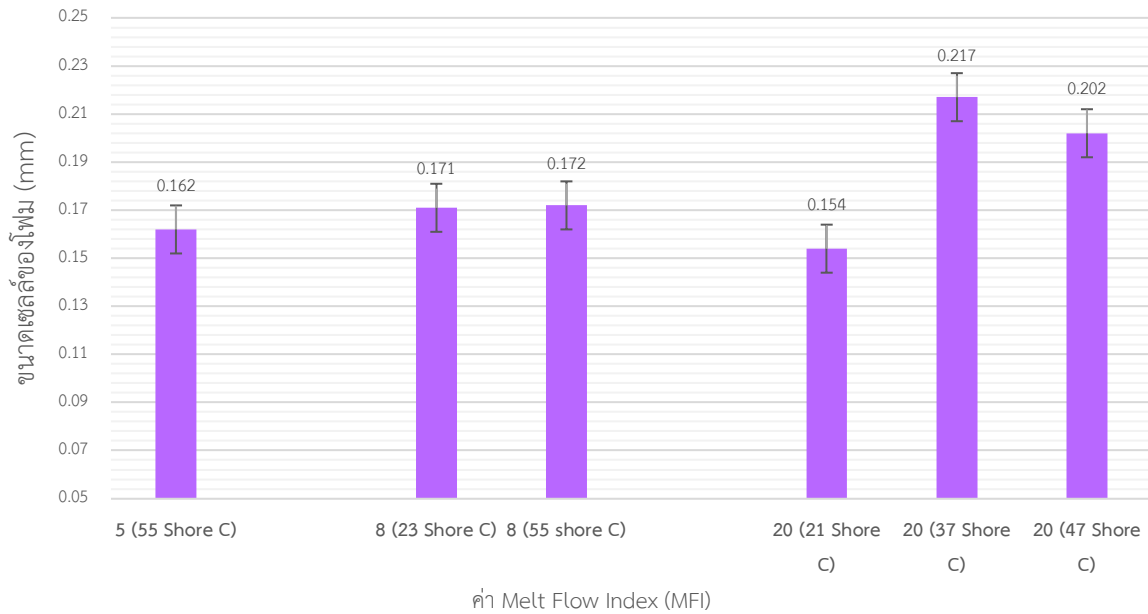
(ข) เมื่อใช้ PEVA ที่มีค่า Melt flow index เท่ากับ 8 โดยที่ความแข็ง 23 shore C

(ค) เมื่อใช้ PEVA ที่มีค่า Melt flow index เท่ากับ 8 โดยที่ความแข็ง 55 shore C

(ง) เมื่อใช้ PEVA ที่มีค่า Melt flow index เท่ากับ 20 โดยที่ความแข็ง 21 shore C

(จ) เมื่อใช้ PEVA ที่มีค่า Melt flow index เท่ากับ 20 โดยที่ความแข็ง 37 shore C

(ฉ) เมื่อใช้ PEVA ที่มีค่า Melt flow index เท่ากับ 20 โดยที่ความแข็ง 47 shore C

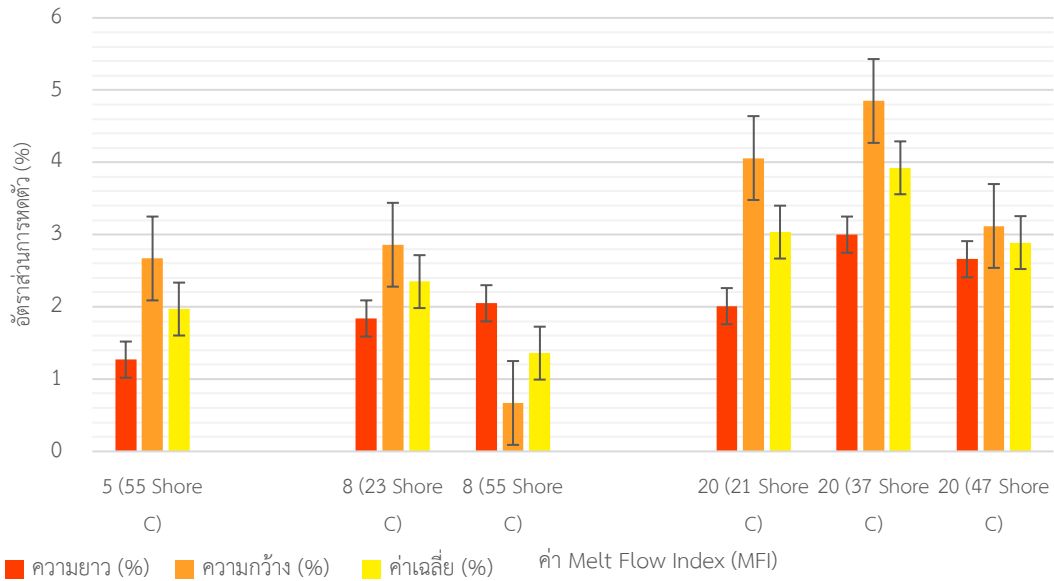


ภาพที่ 3.17 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.4 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)

เมื่อทำการศึกษารายละเอียดของค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ต่อความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) โดยเปรียบเทียบค่า MFI ต่าง ๆ ตามภาพที่ 3.18 พบว่า การหดสูงขึ้นตามปริมาณ MFI เพราะค่าดัชนีการหลอมไหลสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ถ้า MFI สูงแสดงว่ามีการไหลได้ง่ายจึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ คือ สายโซ่โมเลกุลสั้น ส่งผลให้เมื่อได้รับความร้อนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า ทำให้การหดตัวเกิดได้ง่ายเมื่อพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลน้อย สัมพันธ์กับค่า MFI สูงการหดตัวจึงมากขึ้น

เมื่อเทียบจากความแข็งที่เท่ากัน เช่นในกรณีที่มีความแข็งประมาณ 20 shore C มีค่าความสามารถการหดตัวด้วยความร้อนเท่ากับ 2.4% สำหรับ MFI 8 และ 3.0% สำหรับ MFI 20 เช่นเดียวในกรณีที่มีความแข็งประมาณ 50 shore C มีค่าความสามารถการหดตัวด้วยความร้อนเท่ากับ 2.0% สำหรับ MFI 5 และ 2.9% สำหรับ MFI 20

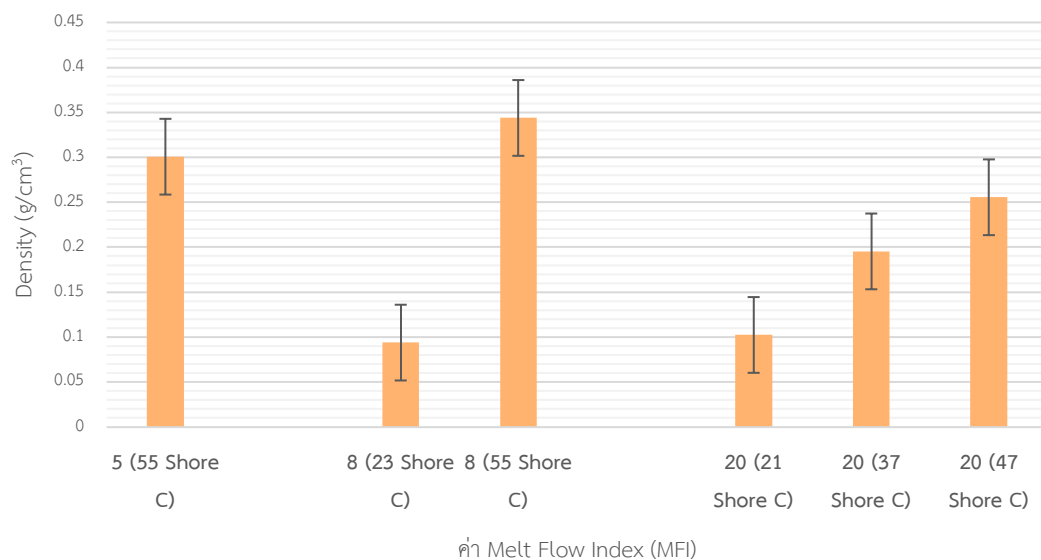


ภาพที่ 3.18 ความสามารถหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)

เมื่อทำการศึกษาค่าดัชนีการหลอมไหล (melt flow index, MFI) ต่อค่าความถ่วงจำเพาะ ตามภาพที่ 3.19 พบว่า ค่าดัชนีการหลอมไหลไม่ได้มีผลต่อความหนาแน่น เช่น ที่ความแข็งประมาณ 20 shore C ค่า MFI=8 ความหนาแน่นเท่ากับ 0.0940 g/cm^3 ใกล้เคียงกับ 0.1025 g/cm^3 ของค่า MFI=20

เมื่อดูจากผลของค่าอัตราส่วนการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้น พบว่า ค่าความหนาแน่นไม่ได้เป็นไปตามแนวโน้ม จึงคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่ใช้ต่างกัน

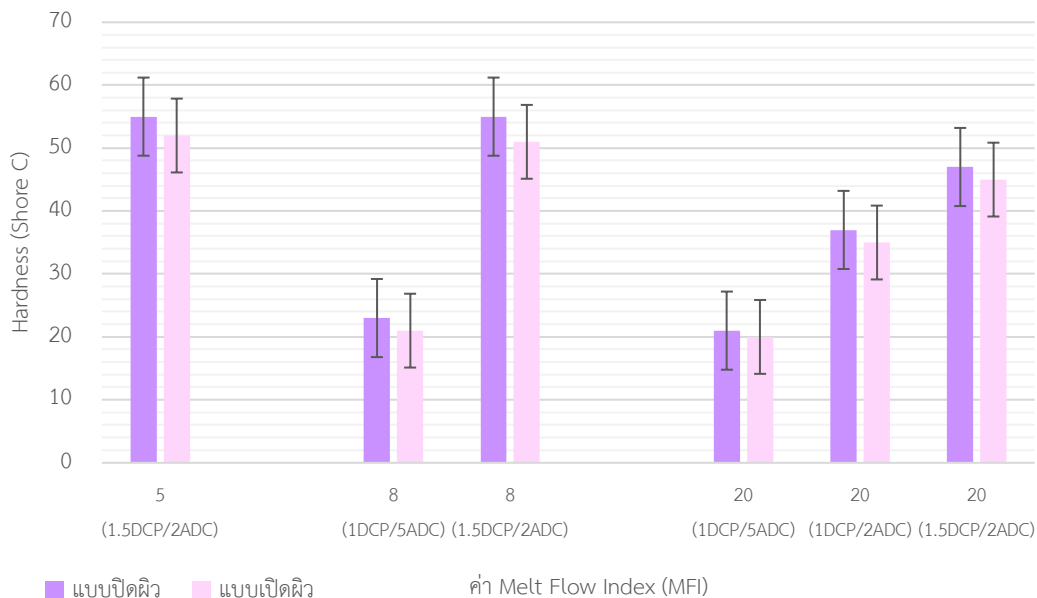


ภาพที่ 3.19 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density) ของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.6 ความแข็ง (hardness)

เมื่อทำการศึกษามูลของค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ต่อค่าความแข็ง ตามภาพที่ 3.20 พบว่า ค่าดัชนีการหลอมไหลยังส่งผลเล็กน้อยกับค่าความแข็งของโพลีเมอร์ PEVA ดังนี้ โดยที่ค่า MFI มากกว่าจะมีความแข็งที่น้อยกว่า

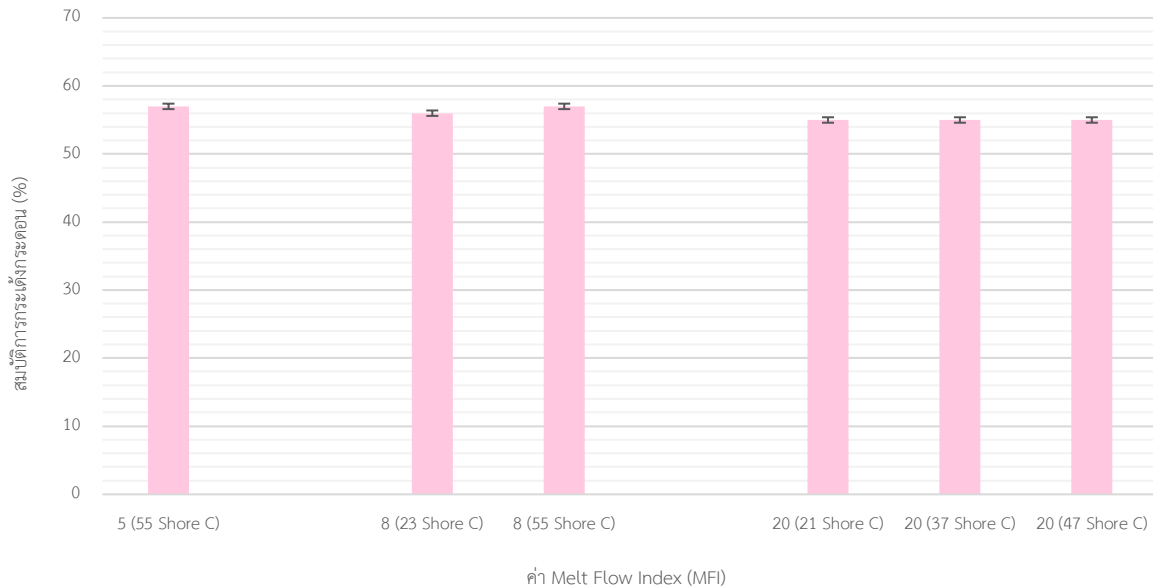
ที่ปริมาณ DCP 1.5 phr และ ADC 2 phr จะพบว่า เมื่อ MFI เท่ากับ 20 จะมีความแข็งเป็น 47 (45 แบบเปิดผิว) และ MFI เท่ากับ 8 มีความแข็งเป็น 55 (51 แบบเปิดผิว) ในขณะที่ MFI เท่ากับ 5 มีความแข็งเป็น 55 (52 แบบเปิดผิว) รวมทั้งที่ ปริมาณ DCP 1 phr และ ADC 5 phr เมื่อ MFI เท่ากับ 20 จะมีความแข็งเป็น 21 (20 แบบเปิดผิว) ในขณะที่ MFI เท่ากับ 8 มีความแข็งเป็น 23 (21 แบบเปิดผิว) จึงสามารถบอกได้ว่า ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า MFI ลดลง



ภาพที่ 3.20 ค่าความแข็ง (hardness) ของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.7 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)

เมื่อทำการศึกษามูลของค่าดัชนีการหลอมไหลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน โดยการเปรียบเทียบค่า MFI ต่างกัน ตามภาพที่ 3.21 พบว่า ค่าดัชนีการหลอมไหลของโพลีเมอร์ PEVA ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการกระด้างกระดอน เพราะว่าสมบัติการกระด้างกระดอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณผลึกภายในสายโซ่โพลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อใช้ 28%VA ที่มีปริมาณผลึกเท่ากันจึงไม่ส่งผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน ที่ MFI เท่ากับ 20, 8 และ 5 มีค่าการกระด้างกระดอนเท่ากับ 55%, 57% และ 57% ตามลำดับ



ภาพที่ 3.21 ค่าการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.8 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

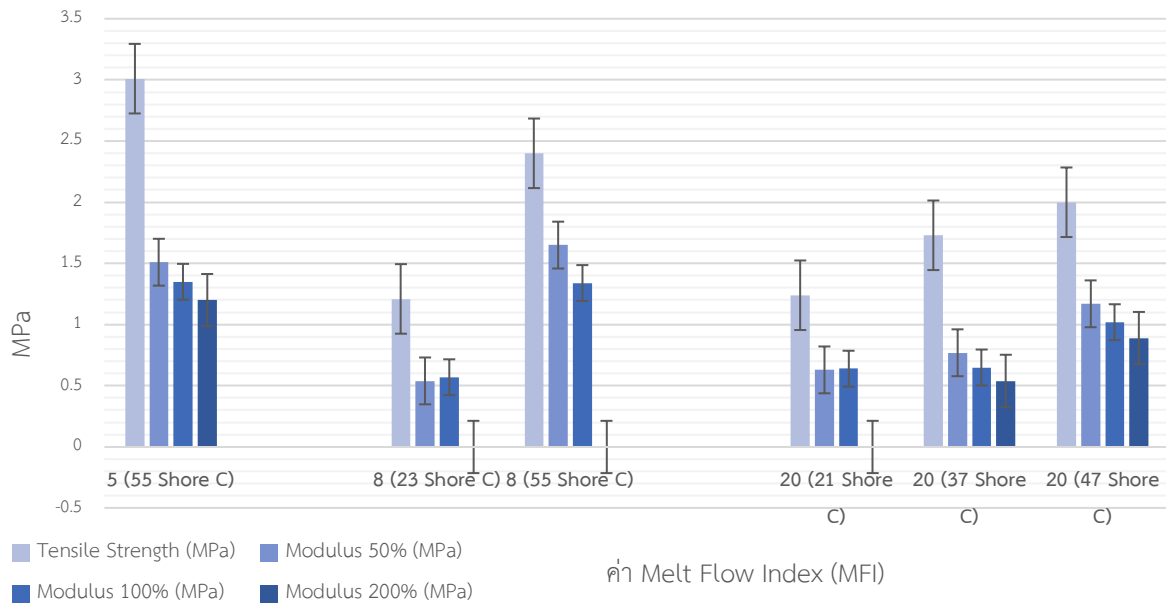
■ ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

เมื่อทำพิจารณาผลของดัชนีการหลอมไหลต่อความทนทานต่อแรงดึง โดยทำการศึกษา PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% แต่มีค่าดัชนีการหลอมไหลต่างกัน จากภาพที่ 3.22 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ความแข็งเท่ากัน ปริมาณ MFI สูงขึ้นทำให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลง เพราะค่า MFI เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง (สายโซ่สั้น) ทำให้แรงที่เกี่ยวข้องพันกันของสายโซ่ลดลง ส่งผลให้ค่า tensile ลดลง

เปรียบเทียบกับที่ความแข็งเท่ากันประมาณ 50 shore C เมื่อค่า MFI เท่ากับ 5, 8 และ 20 มีค่าความทนทานแรงดึงเท่ากับ 3.01, 2.40 และ 2.00 MPa ตามลำดับ

ที่ปริมาณ VA เท่ากันที่ 28% และค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากัน พบว่าเมื่อลดปริมาณ blowing agent และเพิ่ม curing agent เพื่อให้ความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงมากขึ้น เนื่องจากส่วนที่เป็นเนื้อ solid มีปริมาตรที่เท่ากันมากขึ้นจึงทำให้โฟม PEVA มีความแข็งแรงมากขึ้น

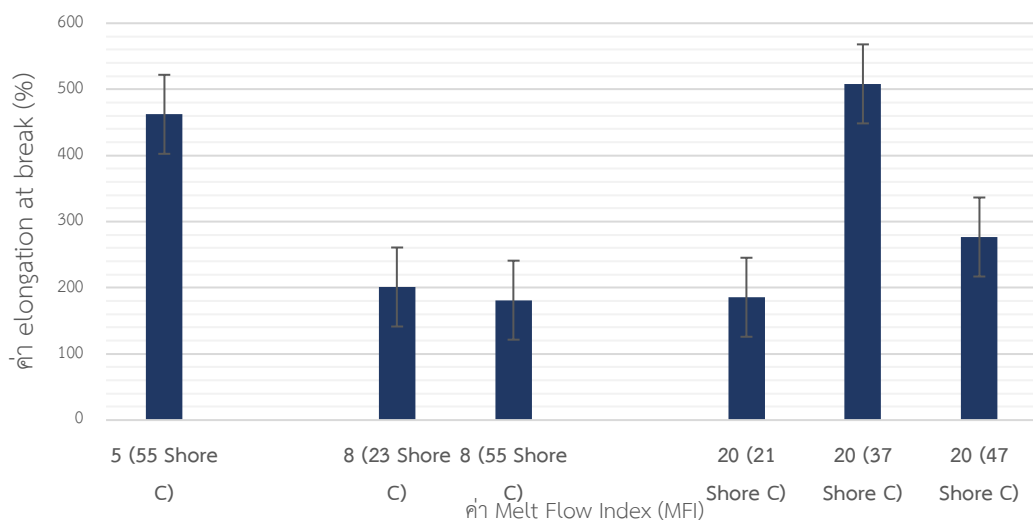
ที่ MFI เท่ากับ 20 เท่ากัน เมื่อโครงสร้างแข็งมากขึ้นส่งผลให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังส่งผลให้ค่ามอดุลัสสูงขึ้นเนื่องจากต้องใช้แรงในการดึงสูงขึ้น เช่นที่ความแข็ง 21, 37 และ 47 shore C มีค่าทนทานต่อแรงดึงเท่ากับ 1.24, 1.73 และ 2.00 MPa ตามลำดับ และ ค่ามอดุลัสที่ 100% เท่ากับ 0.64, 0.65 และ 1.02 MPa ตามลำดับ



ภาพที่ 3.22 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus) ของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

■ ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break)

เมื่อทำพิจารณาผลของดัชนีการหลอมไหลต่อความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (%elongation) โดยทำการศึกษา PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% แต่มีค่าดัชนีการหลอมไหลต่างกัน จากภาพที่ 3.23 พบว่า เมื่อค่า MFI เพิ่มขึ้น หมายความว่าน้ำหนักโมเลกุลลดลง แสดงว่าสายโซ่สั้นลง จึงยืดหยุ่นได้ลดลง เมื่อ MFI สูง จะมีความยืดหยุ่น ณ จุดขาดต่ำกว่า MFI ต่ำ เช่น ในกรณีที่มีความแข็งใกล้เคียงกัน MFI เท่ากับ 20 มี %elongation เท่ากับ 276.8% น้อยกว่า MFI เท่ากับ 5 ซึ่งมีความยืดหยุ่นเท่ากับ 462.3% ในขณะที่ MFI เท่ากับ 8 มีความยืดหยุ่นเท่ากับ 181.3% ซึ่งน้อยกว่า MFI เท่ากับ 5 และ 20 อาจมีสาเหตุมาจากขนาดของเซลล์ที่เล็ก (ผนังเซลล์หนา) จำนวนมากกว่าเมื่อเทียบจากพื้นที่เดียวกัน ทำให้ค่า elongation ลดลง [28]



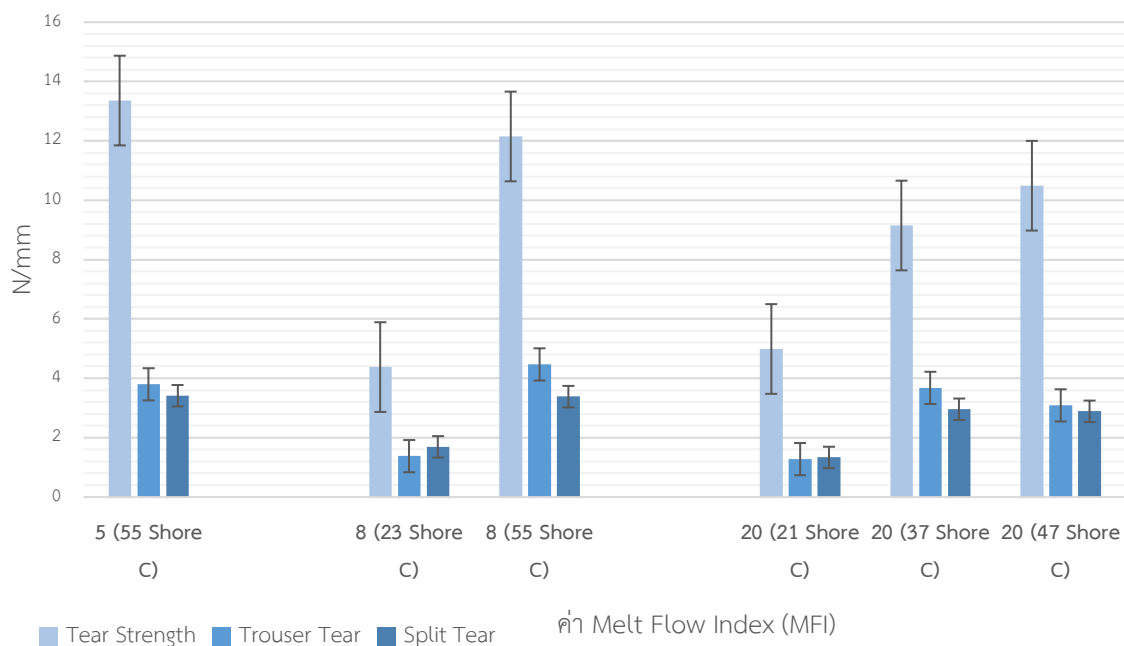
ภาพที่ 3.23 ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

■ ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance)

เมื่อทดลองศึกษาผลของค่าดัชนีการหลอมไหลต่อความต้านทานการฉีกขาด โดยการเปรียบเทียบ โฟม PEVA ที่มีค่าดัชนีการหลอมไหลต่างกัน ตามภาพที่ 3.24 พบว่าค่า MFI เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการฉีกขาดลดลง เนื่องจากผลของน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงเมื่อค่า MFI เพิ่มขึ้นแสดงว่าสายโซ่โมเลกุลลดลง ความต้านทานการฉีกขาดลดลง

ที่ระดับความแข็งเท่ากับ 50 ± 5 shore C ค่าดัชนีการหลอมไหลต่างกัน ความทนทานแรงฉีกขาดจะสูงที่สุดเมื่อ MFI เท่ากับ 5 g/10min ซึ่งให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 13.36 N/mm ตามมาด้วย MFI เท่ากับ 8 และ MFI เท่ากับ 20 มีค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 12.15 และ 10.49 N/mm ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลจากความต้านทานแบบ split tear และ trouser Tear

นอกจากนี้การเพิ่มสารคงรูปและลดสารทำให้เกิดฟอง เพื่อต้องการเพิ่มความแข็ง ส่งผลให้ความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้น เช่นที่ค่า MFI เท่ากับ 20 มีค่าความแข็งเท่ากับ 21, 37 และ 47 shore C มีค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 4.99, 9.15 และ 10.49 ตามลำดับ



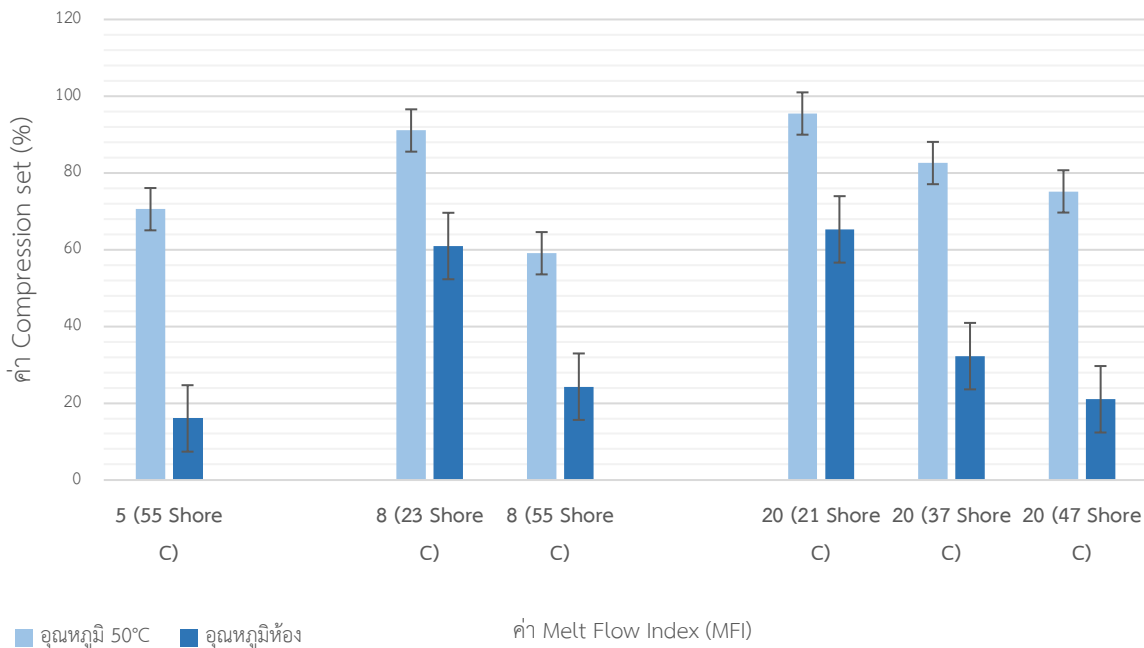
ภาพที่ 3.24 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโฟม PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.9 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

เมื่อทำการศึกษาผลของดัชนีการหลอมไหลต่อค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด โดยเปรียบเทียบโฟมที่มีดัชนีการหลอมไหลต่างกัน จากภาพที่ 3.25 พบว่า ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า MFI สูงขึ้นเป็นมาจากการหนาแน่นการเชื่อมโยง (crosslink density) ดูได้จากค่า ΔM ในตารางที่ 3.2 จะลดลง

เมื่อค่า MFI สูงขึ้น เพราะว่าเมื่อโมเลกุลสายโซ่สั้นขึ้นทำให้แรงระหว่างสายโซ่ลดลงส่งผลต่อความเป็น elastic ได้ลดลง (ค่า CS สูง)

ที่ความแข็ง 50 ± 5 shore C พบว่า MFI=5 มีค่า CS เท่ากับ 70.57% (ที่ 50°C) และ 16.05% (ที่อุณหภูมิห้อง) ในทางเดียวกัน MFI=20 มีค่า CS เท่ากับ 75.2% (ที่ 50°C) และ 21.04% (ที่อุณหภูมิห้อง) ในขณะที่ ค่า MFI=8 ค่า CS เท่ากับ 59.09% (ที่ 50°C) ซึ่งน้อยกว่า MFI=5 อาจเป็นผลมาจากเซลล์ของโพลี PEVA ที่มีลักษณะขนาดเล็ก (ผนังเซลล์หนา) เรียงชิดติดกันอัดแน่นภายในโพลี ส่งผลดีต่อความสามารถในการกลับคืนรูปได้ดี [28] (ค่า CS ต่ำ) และ 21.04% (ที่อุณหภูมิห้อง)



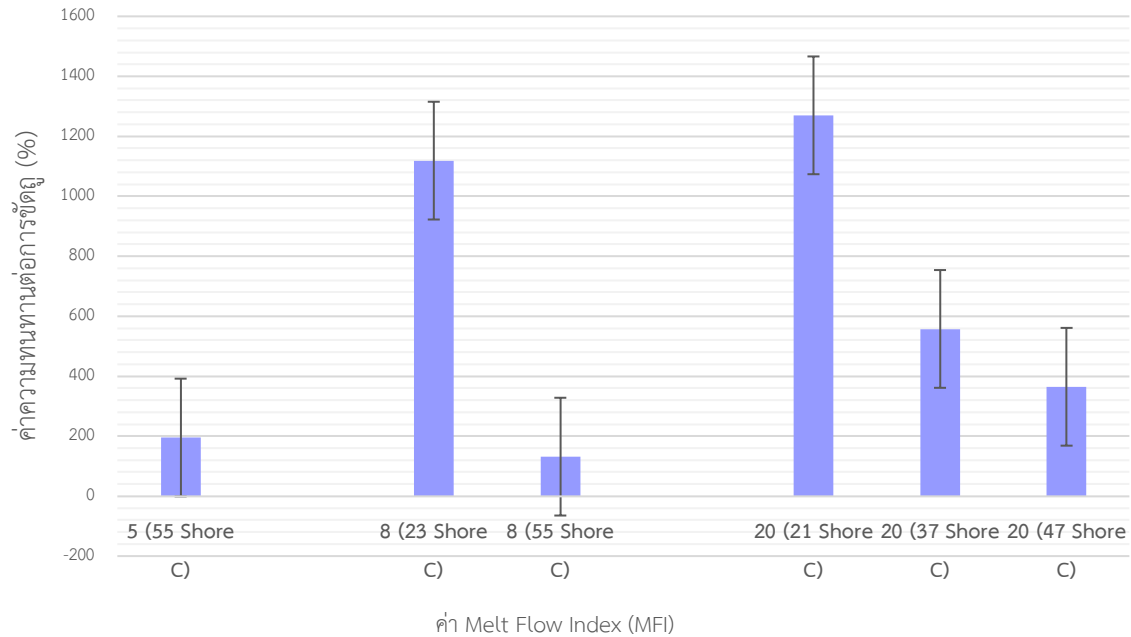
ภาพที่ 3.25 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของโพลี PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

3.1.2.10 การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)

เมื่อพิจารณาผลของค่าดัชนีการหลอมไหลต่อความต้านทานการขัดถู (abrasion) จากภาพที่ 3.26 พบว่า ค่าดัชนีการหลอมไหลส่งผลต่อค่าความต้านทานการขัดถู โดยที่เมื่อค่าดัชนีการหลอมไหลลดลง ทำให้ค่าความต้านทานการขัดถูลดลง แสดงว่าต้านทานขัดถูมากขึ้น

เมื่อเทียบจากค่าความแข็งเท่ากัน เช่น ที่ความแข็ง 50 ± 5 shore C เมื่อ MFI=20 มีค่าความต้านทานการขัดถูเท่ากับ 365.2% แต่ MFI=5 ค่าความต้านทานการขัดถูเท่ากับ 196% และที่ความแข็ง 21-23 shore C เมื่อ MFI=20 มีค่าความต้านทานการขัดถูเท่ากับ 1270% แต่ MFI=5 ค่าความต้านทานการขัดถูลดลงเหลือเท่ากับ 1119%

นอกจากนี้พบว่า MFI=8 มีค่าความต้านทานการขัดถูเท่ากับ 132.3% อาจมีสาเหตุมาจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ที่อัดแน่นและเป็นระเบียบ คือเซลล์มีขนาดเล็ก (ผนังเซลล์หนา) [28] ทำให้ทนทานต่อการขัดถูได้ดี



ภาพที่ 3.26 ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion) ของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อค่า MFI ต่างกัน

จากตอนที่ 3.1.1 และ 3.1.2 สรุปได้ว่าโพลีเมอร์ PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% และค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 5 g/10min มีสมบัติการกระด้างกระดองดีที่สุด รวมถึงสมบัติอื่น ๆ ที่ดีกว่าค่าดัชนีการหลอมไหล 8 และ 20g/10min เช่นความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength), ความยืดหยุ่น (elongation) และการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด รวมถึงค่าความต้านทานการขัดถู (abrasion) ในระดับที่ดีที่สุด

3.2 ศึกษาผลของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) แต่ละชนิดที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอง

ตอนที่ 2 ของงานวิจัยเป็นการศึกษาผลของชนิดสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อโพลีเมอร์ PEVA โดยทำการเปรียบเทียบชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกันได้แก่ azodicarbonamide (ADC), p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH) และ p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSh) ซึ่งมีสมบัติทางเคมีที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัว ปริมาณแก๊สที่ให้ได้โดยเลือกใช้ 28% ไวนิลแอกซีเทต ที่ได้จากตอนที่ 1 เป็นพอลิเมอร์ PEVA และปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่ใช้เท่ากัน โดยการเปรียบเทียบสมบัติการกระด้างกระดอง รวมไปถึงศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา จากนั้นจึงเลือกสูตรที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเพื่อใช้เป็นสารทำให้เกิดฟองสำหรับตอนถัดไป

3.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

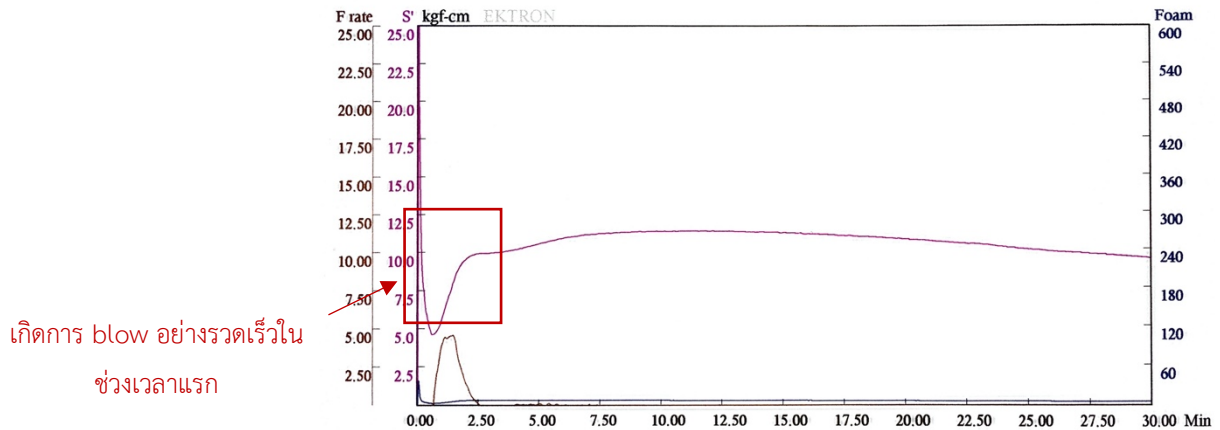
เมื่อศึกษาสมบัติการคงตัวของโพลีเมอร์ PEVA ที่มีสารทำให้เกิดฟองต่างชนิดกันด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยใช้อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่า โพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้ ADC เป็นสารทำให้เกิดฟองมีค่า t_{c90} และค่า t_{s2} สูงที่สุด โดยมีอัตราการเชื่อมขวางน้อยที่สุดอยู่ที่ 10.6 เพราะว่า ADC มีอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ 190-220°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่ใช้ในแตกตัวให้แก๊สออกมา ในทางตรงข้าม OBSH มีค่า t_{c90} และ t_{s2} ต่ำสุด ทำให้มีค่า CRI สูงสุด เนื่องจาก OBSH มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 152-162°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำ แสดงว่าที่อุณหภูมิที่ต่ำทำให้ OBSH เกิดการแตกตัว ซึ่งตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ในการสลายพันธะ จะเกิดพลังงานความร้อนออกมาทำให้ในระบบมีพลังงานมากขึ้น ส่งผลต่อการเชื่อมขวางของโพลีเมอร์ PEVA ได้เร็วมากขึ้น

นอกจากนี้ TSH ที่มีอุณหภูมิในการสลายตัวใกล้เคียงกับ OBSH คือ มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 143°C แต่ใช้เวลามากกว่า OBSH มีสาเหตุมาจาก อัตราการเกิดโพลีเมอร์จากกราฟการคงรูปของ TSH ตามภาพที่ 3.28 จะให้แก๊สที่น้อยกว่าสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่น้อยกว่ากราฟของ OBSH ตามภาพที่ 3.27 แสดงว่า TSH จะสลายตัวแล้วให้พลังงานที่น้อยกว่า OBSH ส่งผลให้ TSH มีค่า t_{c90} , t_{s2} และ cure rate ต่ำกว่า OBSH ทำให้ OBSH มีอัตราการเชื่อมขวางที่สูงที่ตามมาด้วย TSH และ ADC ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ลักษณะการเชื่อมโยงของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)

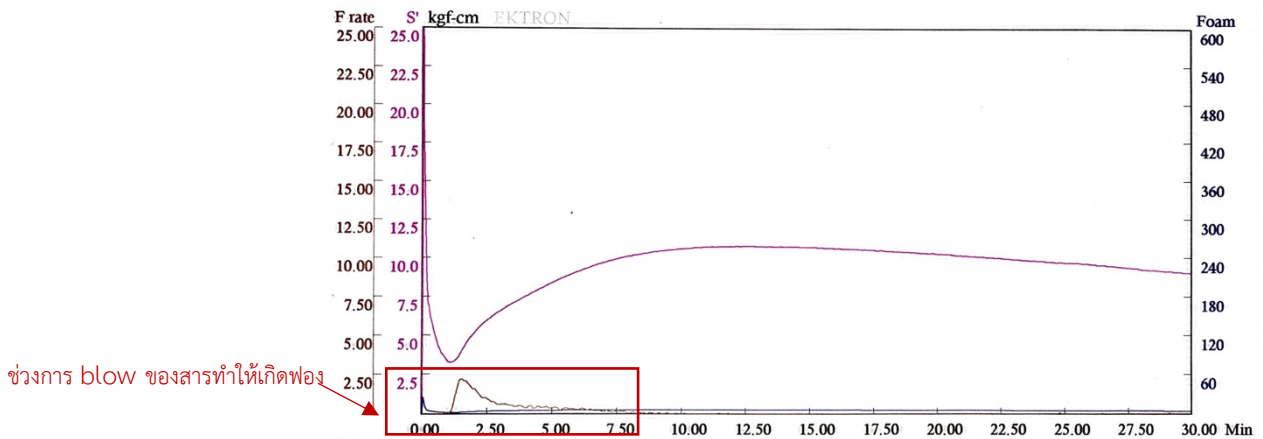
ชนิด blowing agent	Scorch time, t_{s2} (min)	Cure time, t_{c90} (min)	Cure rate index, CRI	Minimum torque, M_L (kgf/cm)	Maximum torque, M_H (kgf/cm)	ΔM
Azodicarbonamide (ADC)	3.08	12.49	10.6	2.83	24.57	21.74
p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSH)	1.11	5.21	24.4	4.63	11.44	6.81
p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH)	2.03	7.41	18.6	3.27	10.82	7.55

te	Compound no.	Lot no	Batch no	ML	TS1	TS2	TC50	TC90	MH	QC
10/07/27	160X30	EVA B2	1	4.63	1-01	1-11	1-28	5-21	11.44	PASS



ภาพที่ 3.27 กราฟการคงรูป cure curve ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% โดยใช้ p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)

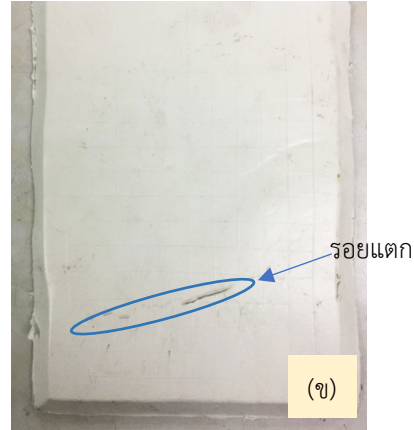
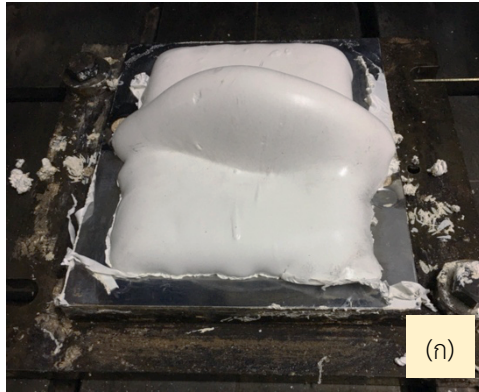
e	Compound no.	Lot no	Batch no	ML	TS1	TS2	TC50	TC90	MH	QC
0/08/05	160X30	EVA B3	1	3.27	1-39	2-03	3-24	7-41	10.82	PASS



ภาพที่ 3.28 กราฟการคงรูป cure curve ของโฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% โดยใช้ p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent)

จากภาพที่ 3.27 แสดงกราฟการเชื่อมขวางของโฟม PEVA ที่ใช้ OBSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง พบว่าเกิดแก๊สเป็นจำนวนมากในช่วงประมาณ 2 นาทีแรก และค่า t_{c90} อยู่ที่ประมาณ 5.21 กราฟสูงสุดอยู่ที่เวลาประมาณ 9 นาที จึงเลือกใช้ 160°C เป็นเวลา 9 นาทีในการขึ้นรูปโฟม PEVA ผลปรากฏว่า โฟม PEVA ที่ขึ้นไม่ สามารถเอาออกจากแม่พิมพ์โฟมได้ ดังแสดงตามภาพที่ 3.29(ก) อาจมีสาเหตุมาจากบางส่วนของโฟมยังเกิดการเชื่อมขวางไม่สมบูรณ์จึงเหนียวติดกับแม่พิมพ์ จากนั้นจึงลองปรับ condition โดยใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็น 165°C เป็นเวลา 15 นาที พบว่าโฟมที่ผิวหน้าบางส่วนยังคงเชื่อมขวางไม่สมบูรณ์ จึงเกิดเป็นรอยแตกที่ผิวหน้าของโฟม ตามภาพที่ 3.29(ข) แต่เมื่อเพิ่มเวลาไปอีกโฟม PEVA กลับติดที่แม่พิมพ์มากขึ้น คาดว่าเกิดจากการที่โฟมเกิดแก๊สจำนวนมากอย่างรวดเร็วทำให้โฟมขยายตัวเร็วก่อนที่ PEVA จะเกิดการเชื่อมขวางสมบูรณ์ ทำให้

เซลล์แตกจึงอัดแน่นเหนียวติดอยู่ในแม่พิมพ์จึงไม่สามารถหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้ จึงใช้โพลีที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบสมบัติการกระด้างกระดอนเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับในพบในโพลี PEVA ที่ใช้ TSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง

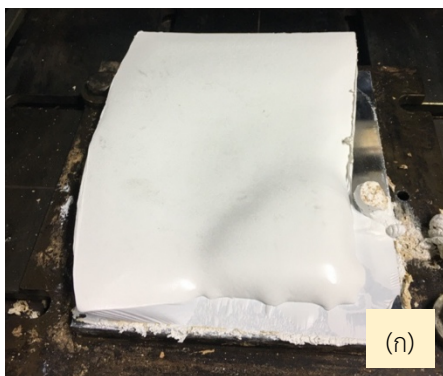


ภาพที่ 3.29 โพลี PEVA ที่ใช้ p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSH) เป็นสารทำให้เกิดฟอง

(ก) โพลี PEVA ติดกับแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโพลี

(ข) โพลี PEVA ที่ขึ้นรูปได้เกือบสมบูรณ์ โดยใช้อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 15 นาที

จากภาพที่ 3.28 จะสังเกตได้ว่าจากกราฟการคงรูปของโพลี มีอัตราการเกิดโพลีน้อยมากเมื่อเทียบกับโพลีที่ใช้ blowing agent ชนิดอื่น ซึ่งเมื่อขึ้นรูปโพลี โดยใช้อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 10 นาที พบว่าโพลีไม่สามารถหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้ ดังภาพที่ 3.30 (ก) อีกทั้งพบว่าบริเวณที่ติดกับแม่พิมพ์มีลักษณะเป็นรู ลักษณะเซลล์เปิด ตามภาพที่ 3.30 (ข) มีสาเหตุมาจากการเชื่อมขวางที่ช้ากว่าการ blow ของ blowing agent ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกทำให้เซลล์ของโพลีไม่สามารถกักเก็บแก๊สให้อยู่ภายในโพลีได้ เช่นเดียวกับในกรณีของโพลี PEVA ที่ใช้ OBSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง



ภาพที่ 3.30 แสดงโพลี PEVA ที่ใช้ p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH)

เป็นสารทำให้เกิดฟอง

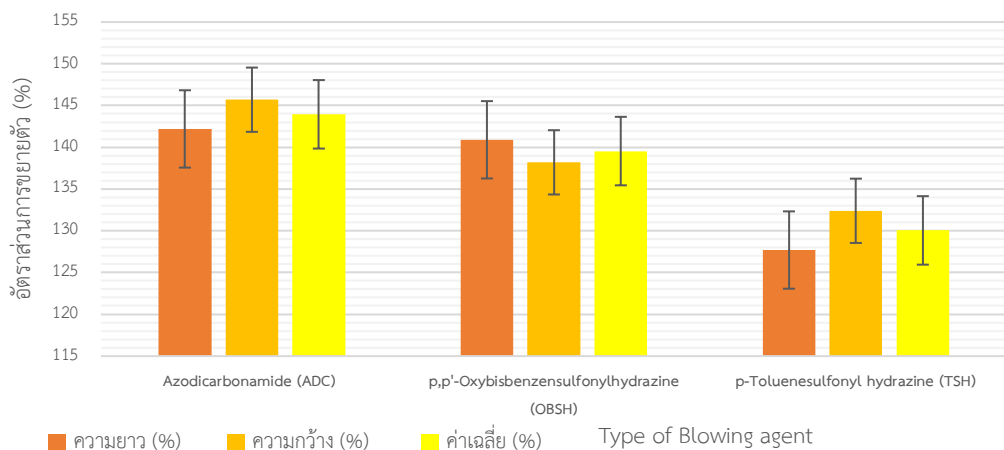
(ก) โพลี PEVA ติดกับแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโพลี

(ข) บริเวณบางส่วนผิวหน้าโพลี PEVA ที่เกิดเป็นเซลล์แบบเปิด

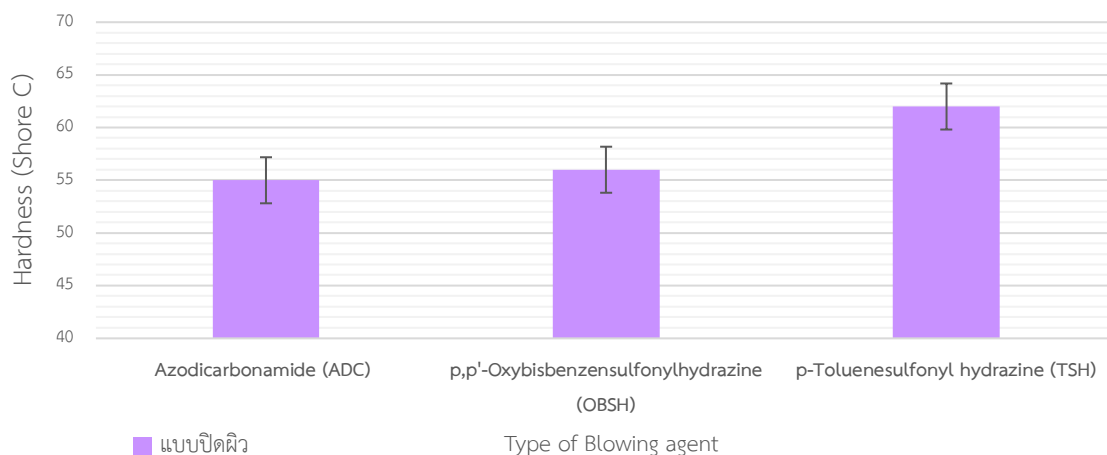
3.2.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) และความแข็ง (hardness)

เมื่อทำการศึกษารสผลของชนิดสารทำให้เกิดฟองต่ออัตราส่วนการขยายตัว และความแข็ง โดยใช้ปริมาณสารเคมีอื่น ๆ เท่ากันแต่ต่างกันที่ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) พบว่า อัตราการขยายตัวมีความสัมพันธ์กับความแข็ง (hardness) คือเมื่ออัตราการขยายตัวน้อยลงส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

อัตราส่วนการขยายตัวมากที่สุด เมื่อใช้ ADC เป็น blowing agent โดยมีค่าเท่ากับ 143.95% และทำให้ความแข็งต่ำที่สุดเท่ากับ 55 shore C เพราะ ADC ให้ปริมาณแก๊สมากที่ใน 3 นาที ตามภาพที่ 3.31 อีกทั้ง TSH จะให้ค่าอัตราการขยายตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 130.05% ส่งผลให้ค่าความแข็งมากที่สุดอยู่ที่ 62 shore C (ภาพที่ 3.32) เพราะว่า สมบัติของ TSH ที่ให้ปริมาณแก๊สต่ำ และแก๊สบางส่วนสลายตัวก่อนที่จะเกิดการคงรูป เช่นเดียวกับ OBSH ให้ปริมาณแก๊สต่ำจึงทำให้อัตราส่วนการขยายตัวลดลง เท่ากับ 139.55% และทำให้ความแข็งเป็น 56 shore C



ภาพที่ 3.31 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกัน

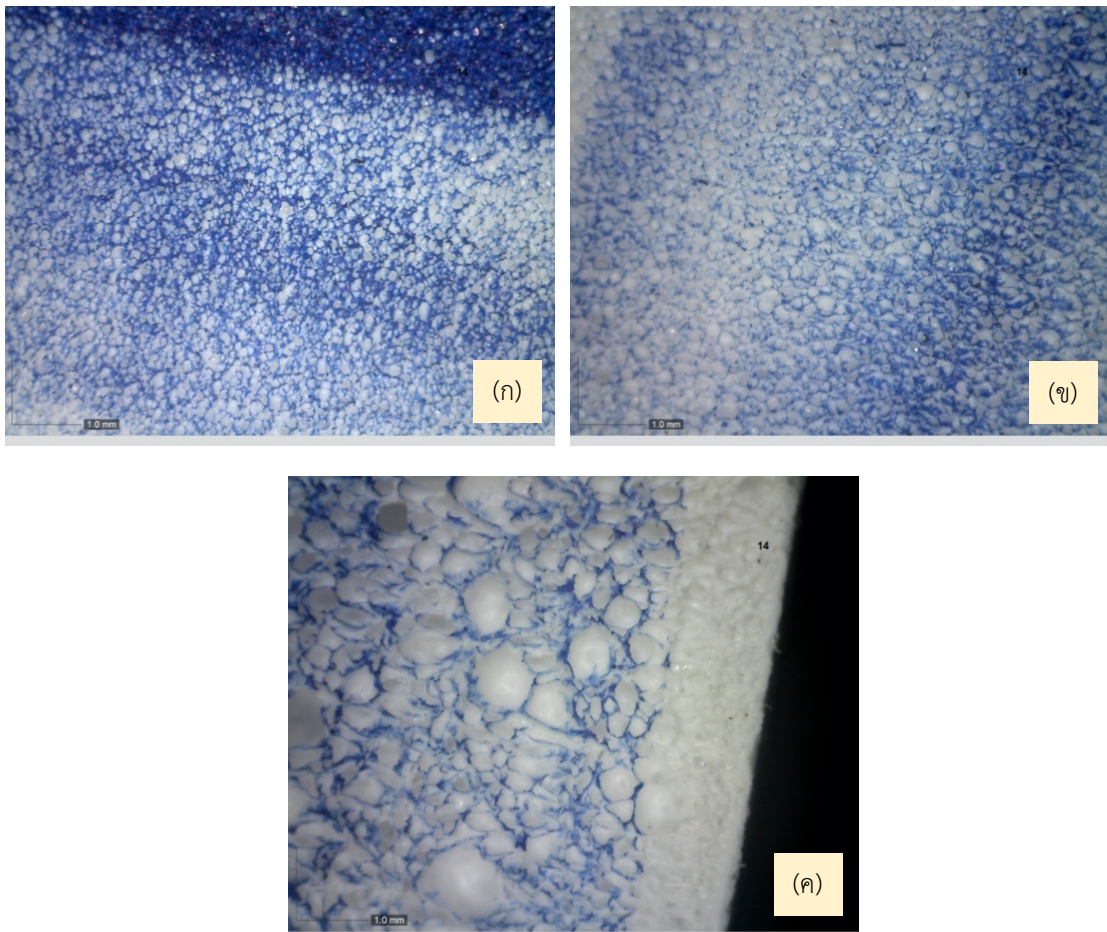


ภาพที่ 3.32 ความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกัน

3.2.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (morphology)

เมื่อทำการศึกษาจากลักษณะพื้นผิวของโฟม PEVA ตามภาพที่ 3.34 แสดง โดยที่ (ก) เมื่อใช้ ADC เป็น blowing agent (ข) เมื่อใช้ OBSH เป็น blowing agent (ค) เมื่อใช้ TSH เป็น blowing agent พบว่าทั้ง 3 โฟมมีเซลล์เป็นแบบปิด (closed-cell foam) เหมือนกันทั้งหมด และใน TSH จะพบว่าผิวหน้าเซลล์บางส่วนจะเป็นเซลล์ผิวแบบเปิด (opened-cell foam) ซึ่งเกิดจากการที่เกิดการคงรูปก่อนที่จะเกิดแก๊ส ทำให้ไม่สามารถกักเก็บแก๊สไว้ภายในเซลล์ได้เซลล์จึงแตกออก เกิดเป็นรูที่ผิวโฟม

นอกจากนี้ขนาดของเซลล์โฟม TSH จะมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่าชนิดอื่น บางเซลล์มีขนาดเล็ก และจัดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบดังภาพที่ 3.34 ค) ในทางตรงข้ามขนาดของเซลล์โฟมที่ใช้ ADC เป็นสารทำให้เกิดฟอง จะมีขนาดเล็กจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบดังภาพที่ 3.34 (ก) เช่นเดียวกับที่พบใน OBSH ที่จะพบบางเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ ตามภาพที่ 3.34(ข) ดังนั้นขนาดเซลล์ของโฟม PEVA จึงส่งผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน



ภาพที่ 3.33 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟม PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของชนิดสารทำให้เกิดฟอง

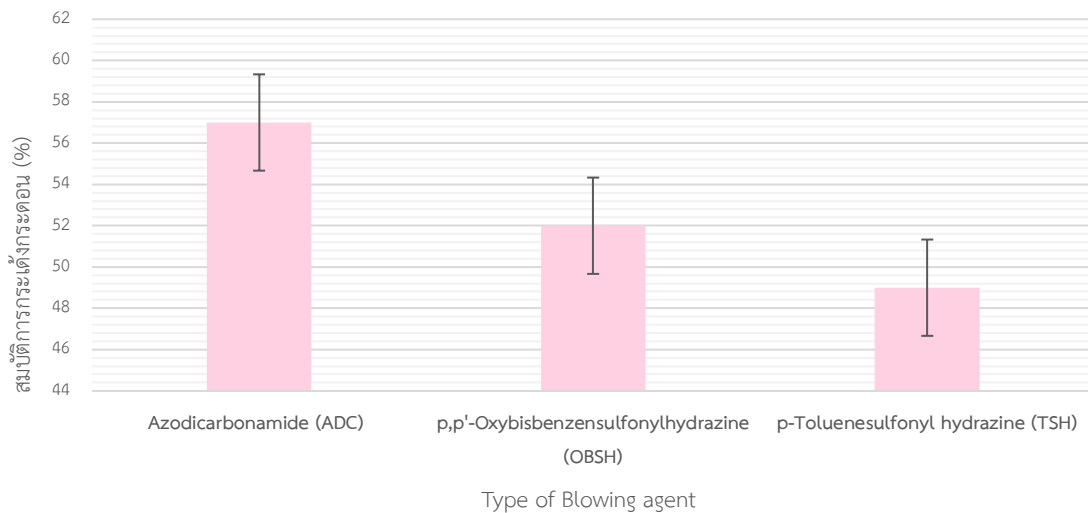
(ก) เมื่อใช้ azodicarbonamide (ADC) เป็น blowing agent

(ข) เมื่อใช้ p,p'-oxybisbenzenesulfonylhydrazine (OBSH) เป็น blowing agent

(ค) เมื่อใช้ p-toluenesulfonyl hydrazine (TSH) เป็น blowing agent

3.2.4 สมบัติการกระเต็งกระดอน (rebound resilience)

เมื่อทำพิจารณาผลของชนิดของสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติการกระเต็งกระดอน จากภาพที่ 3.34 พบว่าโฟม PEVA ที่ใช้ ADC เป็น blowing agent จะให้ค่าการกระเต็งกระดอนสูงสุดอยู่ที่ 57% เนื่องจากขนาดของเซลล์ที่เกิดเป็นโฟมมีขนาดเล็กและมีความเป็นระเบียบอัดแน่นอยู่ในโฟม จึงอาจส่งผลให้ไม่สูญเสียพลังงานและทำให้การกระเต็งกระดอนได้ดี ในขณะที่โฟม PEVA ที่ใช้ OBSH และ TSH จะมีค่าการกระเต็งกระดอนน้อยลงมาอยู่ที่ 52% และ 49% ตามลำดับ โดยใน TSH มีค่าที่น้อยสุดอาจมีสาเหตุมาจากขนาดของเซลล์ที่ใหญ่และเล็กเรียงกันอยู่ไม่อัดแน่นภายในโฟมทำให้สูญเสียพลังงานออกไป ทำให้ค่าการกระเต็งกระดอนลดลง



ภาพที่ 3.34 สมบัติการกระเต็งกระดอน (rebound resilience) ของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) ที่ใช้ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ต่างกัน

จากตอนที่ 3.2 ศึกษาผลของชนิดสารทำให้เกิดฟอง สามารถสรุปได้ว่า azodicarbonamide (ADC) จะมีสมบัติการกระเต็งกระดอนดีที่สุด รวมถึงอัตราการขยายตัวมากที่สุด ในขณะที่ OBSH และ TSH ไม่สามารถขึ้นรูปได้จึงไม่สามารถทดสอบสมบัติอื่น ๆ ได้

3.3 ศึกษาผลของสารคงรูป (curing agent) แต่ละชนิดที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอน

ตอนที่ 3 ของงานวิจัยเป็นการศึกษาผลของชนิดสารคงรูปที่มีต่อโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) โดยการเปรียบเทียบชนิดของสารคงรูป (curing agent) ต่างกัน โดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide) เนื่องจากโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล จึงไม่สามารถใช้ซัลเฟอร์ (sulphur) ในการเชื่อมขวางได้ ได้แก่ dicumyl peroxide (DCP), 1,3 Bis-(t-butylperoxy-iso-propyl)benzene (VUL-CUP® 40KE) และ 2,5-Dimethyl-2,5-di(t-butyl peroxy)hexane (LUPEROX® 101) ซึ่งมีสมบัติทางเคมีที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัว ปริมาณออกซิเจนที่ให้ (active oxygen) โดยเลือกใช้ 28% ไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ได้จากตอนที่ 1 เป็นพอลิเมอร์ PEVA และสารทำให้เกิดฟองเป็น azodicarbonamide (ADC) (จากตอนที่ 2) โดยการเปรียบเทียบสมบัติการกระด้างกระดอน ความต้านทานการขีดถู สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานการยืด ความต้านทานการฉีกขาด ค่ามอดูลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดขาด ด้วยเครื่อง universal testing machine รวมไปถึงศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยา จากนั้นจึงเลือกสูตรที่ให้ผลการทดลองดีที่สุดเพื่อใช้เป็นสารคงรูปสำหรับตอนถัดไป

3.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

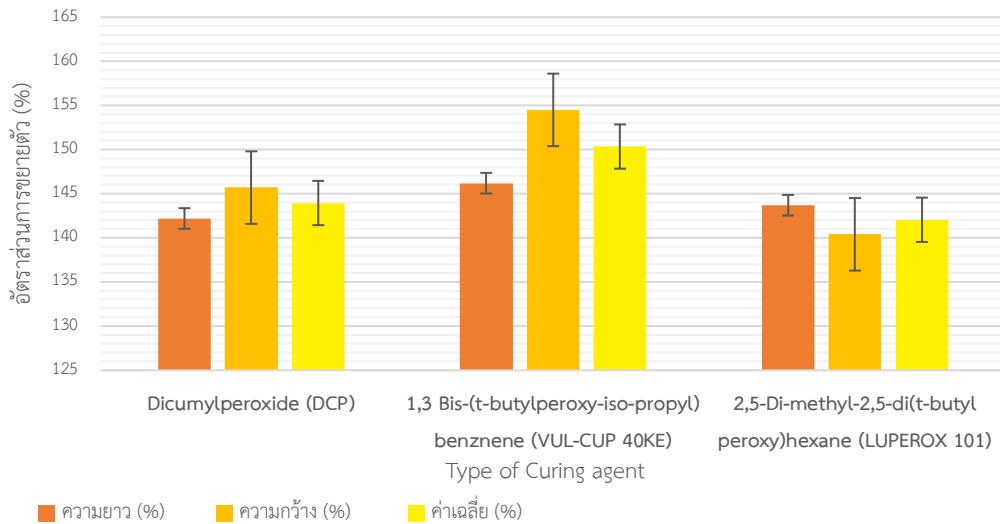
เมื่อทำการทดลองขึ้นรูปโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเชื่อมขวาง (crosslinked) ได้จากเครื่อง moving die rheometer (MDR) ด้วยอุณหภูมิที่ทดลองคือ 160°C เป็นเวลา 30 นาทีพบว่า อัตราการเชื่อมขวางของโพลีทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 10.6-11.4 อีกทั้งโพลีที่ใช้ VUL-CUP® 40KE เป็นสารคงรูปจะมีค่า t_{c90} มากกว่าอยู่ที่ 15.42 min ทำให้ต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปโพลีมากกว่าโดยใช้เวลา 20 นาที (ช่วงสูงสุดของกราฟ) ในขณะที่ใช้ DCP และ LUPEROX® 101 จะมีค่า t_{c90} ใกล้เคียงกันอยู่ที่ 12.49 และ 12.35 ตามลำดับ จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูป 15 นาที นอกจากนี้จากการหาความสัมพันธ์ของ minimum และ maximum torque ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นการเชื่อมขวาง พบว่า VUL-CUP® 40KE มีค่าที่น้อยกว่า โพลีที่ใช้ DCP และ LUPEROX® 101 เพราะว่า VUL-CUP® 40KE จะมีจำนวน peroxide เพียง 40% ทำให้ความหนาแน่นลดลงจึงส่งผลต่อสมบัติของโพลี เช่น ค่าความแข็ง (hardness)

ตารางที่ 3.4 ลักษณะการเชื่อมโยงของโพลีเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารคงรูป (curing agent)

ชนิด curing agent	Scorch time, t_s (min)	Cure time, t_{c90} (min)	Cure rate index, CRI	Minimum torque, M_L (kgf/cm)	Maximum torque, M_H (kgf/cm)	ΔM
Dicumyl peroxide (DCP)	3.08	12.49	10.6	2.83	24.57	21.74
VUL-CUP® 40KE	6.09	15.42	10.7	2.42	19.94	17.52
LUPEROX® 101	3.59	12.35	11.4	1.85	21.86	20.01

3.3.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)

เมื่อพิจารณาผลของชนิดของสารคงรูปต่ออัตราส่วนการขยายตัว จากการทดลองตามภาพที่ 3.35 พบว่า โฟม PEVA ที่ใช้ DCP และ LUPEROX® 101 เป็นสารคงรูปมีค่าอัตราส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกันโดยอยู่ที่ 143.95% และ 142.05% ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้ VUL-CUP® 40KE เป็นสารคงรูปทำให้มีค่าอัตราส่วนการขยายตัวมากกว่าอยู่ที่ 150.35% เพราะว่า VUL-CUP® 40KE มีปริมาณ peroxide อยู่ที่ 40% เมื่อเทียบกับ DCP ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการเชื่อมขวางของเปอร์ออกไซด์ ทำให้การขยายของโฟมเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ peroxide ที่ใช้ในการคงรูปลดลง รวมถึงจำนวนออกซิเจนภายในโครงสร้างโมเลกุลของสารคงรูปและ active oxygen ไม่ส่งผลอัตราส่วนการขยายตัวของโฟม

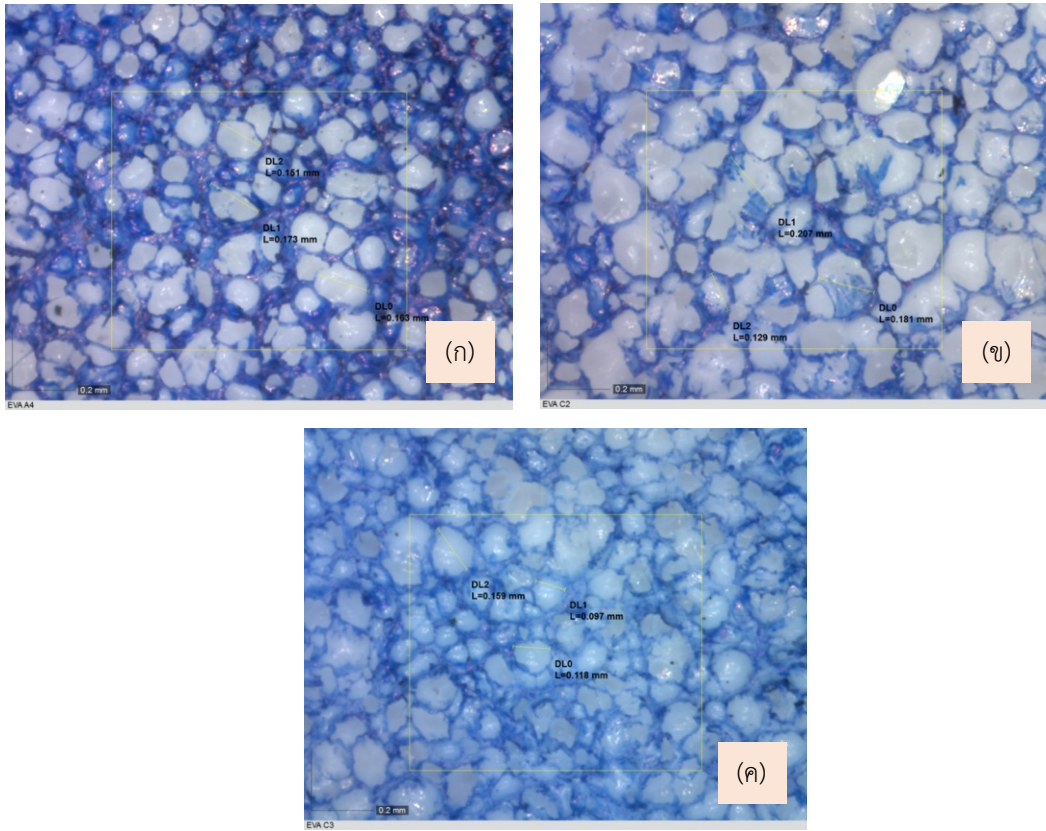


ภาพที่ 3.35 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (morphology)

เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์โฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) โดยการเปรียบเทียบชนิดของสารคงรูป (curing agent) พบว่าทั้ง 3 สูตรมีเซลล์เป็นแบบปิด (closed-cell) โฟมที่ใช้ VUL-CUP 40KE เป็น curing agent ตามภาพที่ 3.37(ข) มีขนาดเซลล์เฉลี่ยที่ใหญ่กว่าโฟมชนิดอื่น เพราะว่าเซลล์สามารถขยายตัวออกไปได้มากกว่าจากการที่ปริมาณของ peroxide มีเพียง 40% เมื่อเทียบกับ DCP และ LUPEROX® 101 โดยมีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 0.172 mm

ในทางตรงข้ามภาพที่ 3.37 (ก) และภาพที่ 3.37 (ค) เป็นเซลล์ของโฟม DCP และ LUPEROX® 101 ตามลำดับ มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นเซลล์ที่อัดแน่นทั้งโครงสร้างเซลล์ขนาดเล็ก-ใหญ่ นอกจากนี้จากภาพที่ 3.38 ขนาดเซลล์ของโฟมที่ใช้ LUPEROX® 101 มีขนาดเฉลี่ยเล็กที่สุดเท่ากับ 0.125 mm และมีผนังเซลล์ที่บางกว่าเมื่อใช้ DCP มีขนาดเซลล์เฉลี่ยเท่ากับ 0.162 mm ซึ่งมีผนังเซลล์ที่หนากว่า

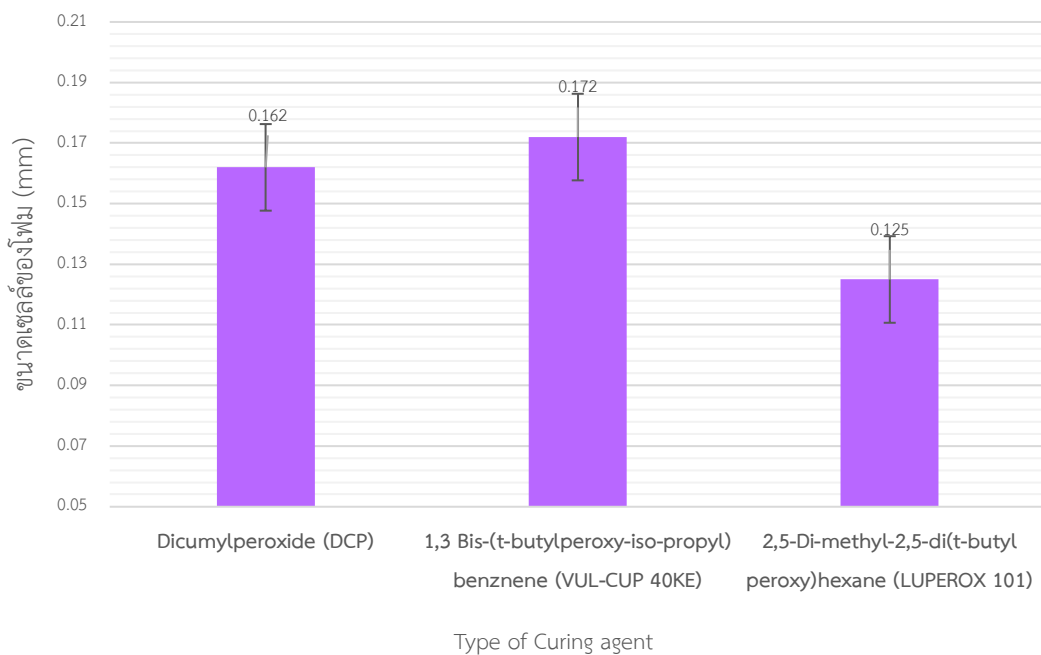


ภาพที่ 3.36 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟม PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบผลของชนิดสารคงรูป

(ก) เมื่อใช้ dicumyl peroxide (DCP) เป็น curing agent

(ข) เมื่อใช้ 1,3 bis-(t-butylperoxy-iso-propyl) benzene (VUL-CUP 40KE) เป็น curing agent

(ค) เมื่อใช้ 2,5-di-methyl-2,5-di(t-butyl peroxy)hexane (LUPEROX 101) เป็น curing agent

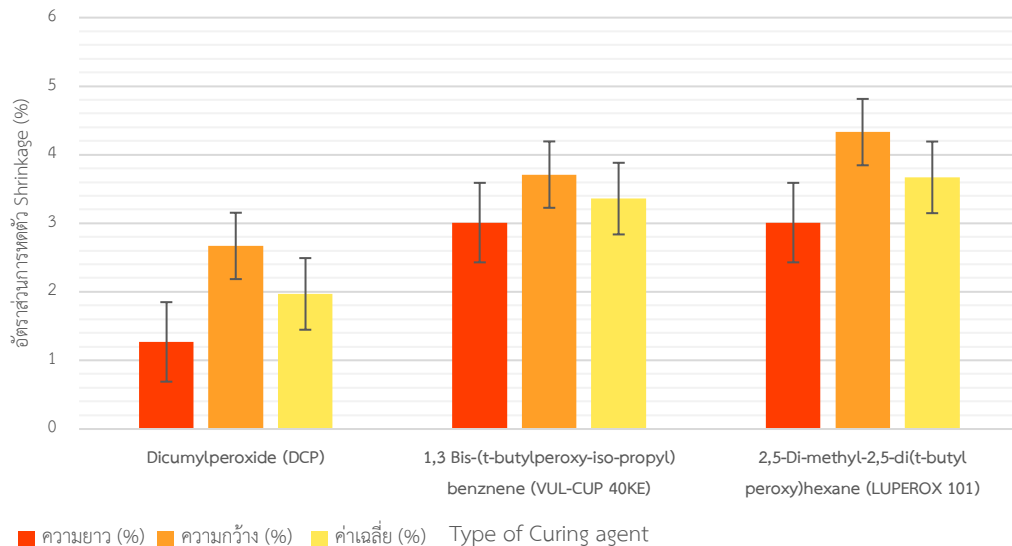


ภาพที่ 3.37 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.4 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)

เมื่อทำการศึกษาค่าผลของชนิดสารคงรูปต่อความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน โดยใช้โพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้สารคงรูปเปอร์ออกไซด์ชนิดต่างกัน แต่ใช้ปริมาณเท่ากัน จากภาพที่ 3.38 พบว่า โพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้ DCP เป็นสารคงรูปจะมีค่าความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนน้อยที่สุด เท่ากับ 1.97% เพราะว่ามีโมเลกุลของ DCP มีโมเลกุลออกซิเจนอยู่ 2 ตัวต่อ 1 โมเลกุล DCP ซึ่งออกซิเจนเป็นจุดที่ใช้ในการเชื่อมขวางจึงส่งผลต่อความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนได้ลดลง เมื่อจุดเชื่อมขวางลดลง

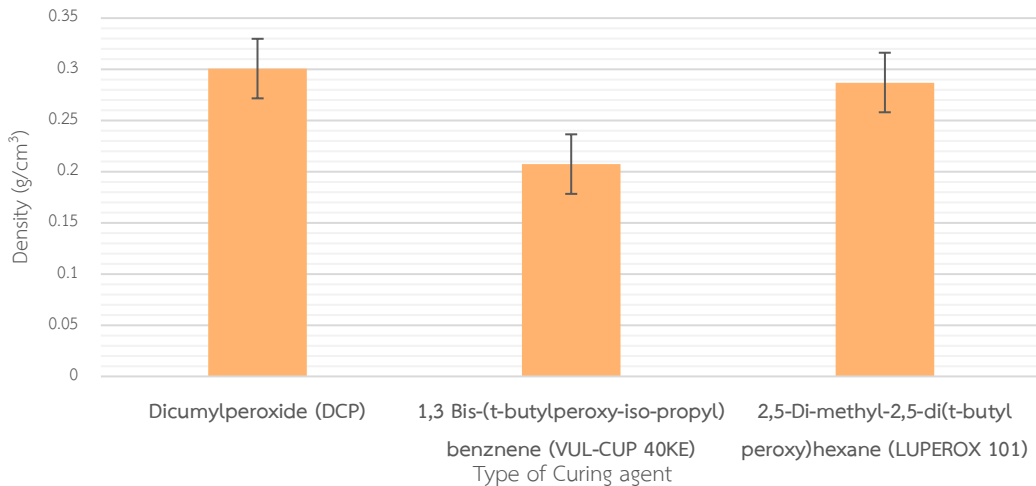
ในทางตรงข้ามโมเลกุลของ VUL-CUP® 40KE และ LUPEROX® 101 มีโมเลกุลออกซิเจนอยู่ 4 ตัวต่อ 1 โมเลกุล แสดงว่าจะมีจุดที่ใช้ในการเชื่อมขวางมากขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนมากกว่าใช้ DCP โดยพบอยู่ที่ 3.36% และ 3.67% สำหรับ VUL-CUP® 40KE และ LUPEROX® 101 ตามลำดับ อีกเนื่องจากปริมาณของ peroxide ใน VUL-CUP® 40KE มี 40% ทำให้ปริมาณสารเชื่อมขวางน้อยกว่า LUPEROX® 101 ทำให้พบความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนน้อยกว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 3.38 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)

เมื่อทำการศึกษาค่าผลของชนิดสารคงรูปต่อค่าความถ่วงจำเพาะ จากภาพที่ 3.39 พบว่าโพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้สารคงรูปต่างกัน ปริมาณของออกซิเจนภายในโมเลกุลของสารคงรูปไม่มีผลต่อความหนาแน่น จึงพบโพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้ DCP มีความหนาแน่นมากที่สุดอยู่ที่ 0.3007 g/cm^3 มากกว่าเมื่อใช้ LUPEROX® 101 เล็กน้อยที่ 0.2871 g/cm^3 ในทางตรงข้าม โพลีเมอร์ที่ใช้ VUL-CUP® 40KE มีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.2074 g/cm^3 เป็นผลมาจากอัตราส่วนการขยายตัว ถ้าสารคงรูปที่ให้อัตราการขยายที่มากส่งผลให้ความหนาแน่นน้อย

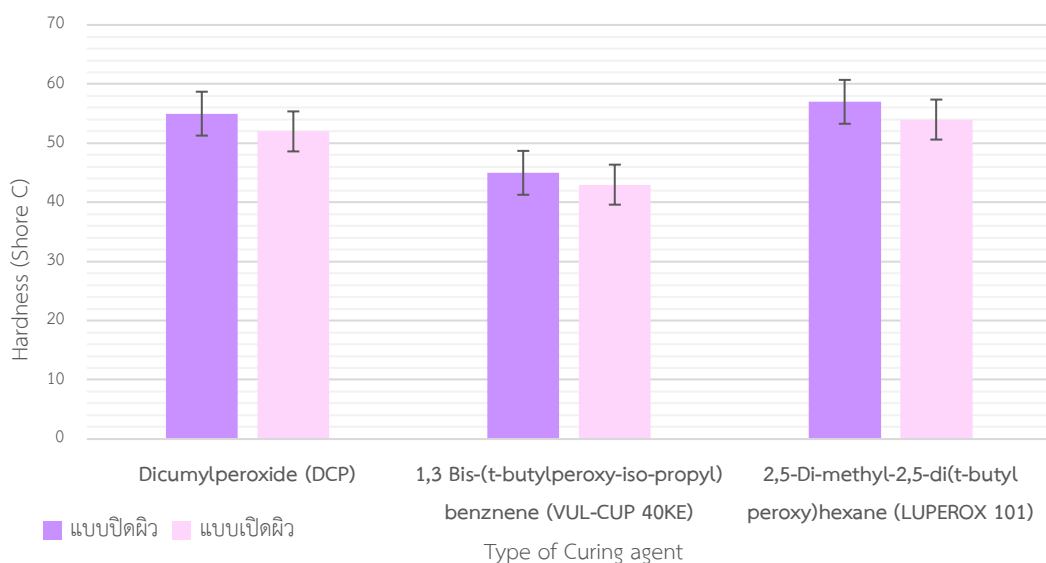


ภาพที่ 3.39 ค่าความถ่วงจำเพาะ หรือความหนาแน่นของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.6 ความแข็ง (hardness)

เมื่อทำการศึกษามวลของชนิดสารคงรูปต่อความแข็งจากภาพที่ 3.40 ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) คือ ปริมาณของออกซิเจนภายในโมเลกุลของสารคงรูปไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง ซึ่งพบว่า DCP และ LUPEROX[®] 101 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 55 shore C แบบปิดผิว (52 แบบเปิดผิว) สำหรับ DCP และ LUPEROX[®] 101 เท่ากับ 57 shore C แบบปิดผิว (54 แบบเปิดผิว)

ในขณะที่เมื่อใช้ VUL-CUP[®] 40KE ที่มีปริมาณ peroxide อยู่เพียง 40% เมื่อเทียบกับ DCP ทำให้ค่าความแข็งลดลงไปอยู่ที่ 45 Shore C แบบปิดผิว (43 แบบเปิดผิว) เพราะว่าเมื่อปริมาณ peroxide ลดลงแสดงว่ามีความหนาแน่นของโฟมลดลงทำให้ค่าความแข็งลดลง

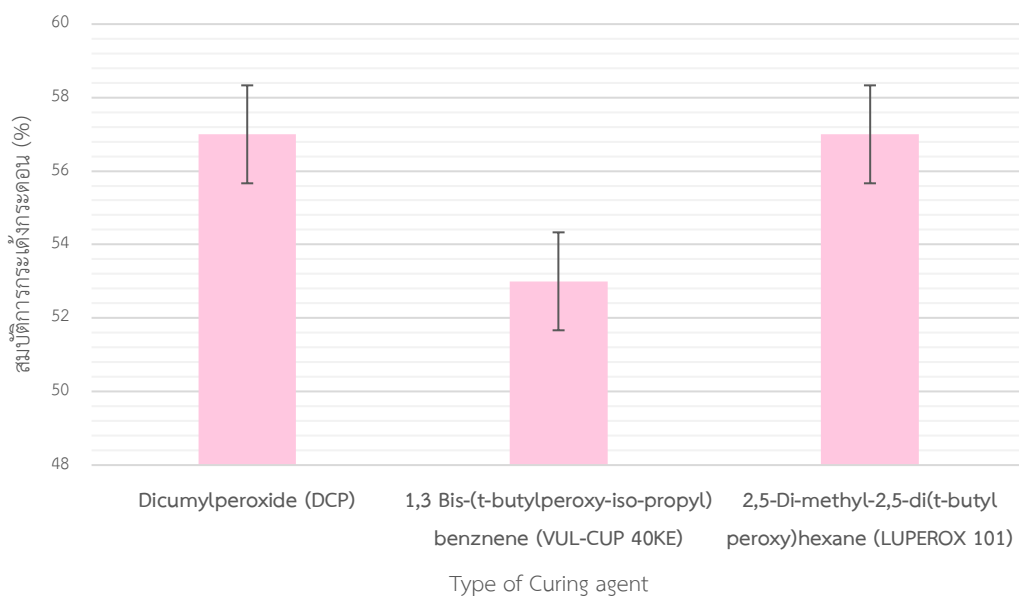


ภาพที่ 3.40 ความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.7 สมบัติการกระด้างกระดอง (rebound resilience)

เมื่อทำพิจารณาผลของชนิดสารคงรูปต่อสมบัติการกระด้างกระดอง ตามภาพที่ 3.41 พบว่าสมบัติการกระด้างกระดองของโพลีเมอร์ PEVA เมื่อใช้ DCP และ LUPEROX® 101 เป็นสารคงรูปที่สัดส่วน phr เท่ากันจะมีค่าการกระด้างกระดองเท่ากันอยู่ที่ 57%

ในทางตรงข้ามเมื่อใช้ VUL-CUP® 40KE ใช้สัดส่วน phr เท่ากันแต่จะเห็นว่าได้ค่าการกระด้างกระดองต่ำกว่าอยู่ที่ 53% เนื่องจากปริมาณ peroxide ที่ใช้ในการเชื่อมขวางมีน้อยกว่า 40% เมื่อเทียบกับ DCP จึงสามารถบอกได้ว่า ชนิดของสารคงรูปในระบบ peroxide รวมทั้งจำนวนออกซิเจนในโมเลกุล ไม่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอง แต่ปริมาณของเปอร์ออกไซด์ของสารคงรูปจะส่งผลต่อสมบัติการกระด้างกระดอง เมื่อปริมาณ peroxide ลดลงทำให้สมบัติการกระด้างกระดองลดลง



ภาพที่ 3.41 สมบัติการกระด้างกระดอง (rebound resilience) ของโพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

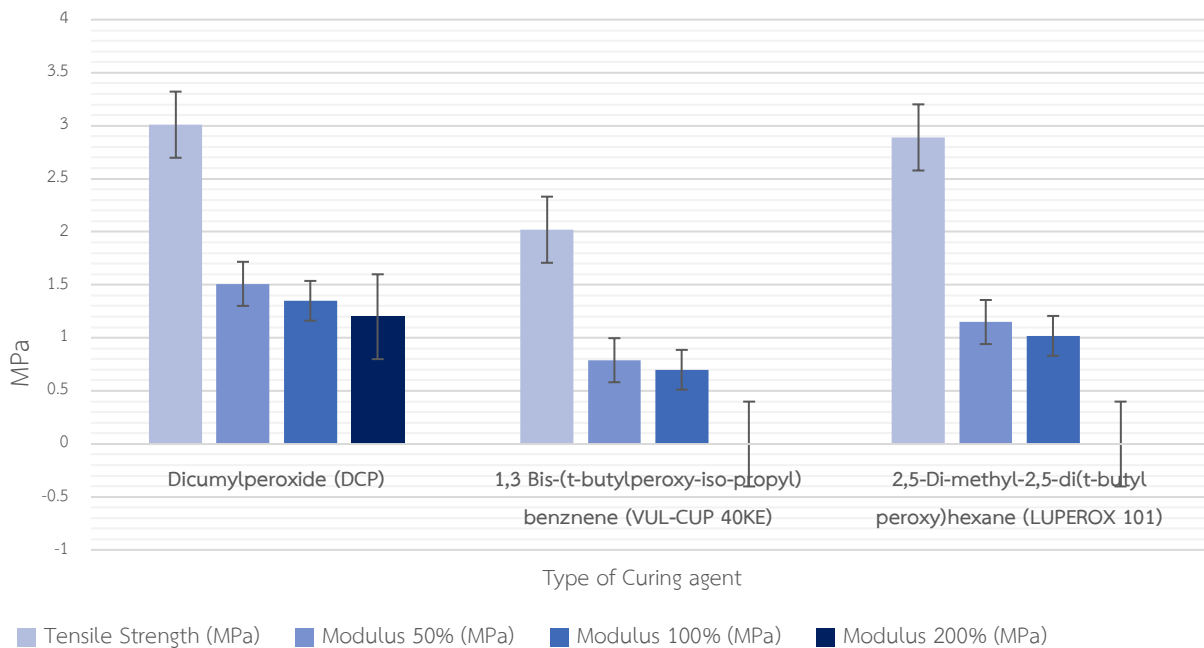
3.3.8 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

■ ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

เมื่อทำการศึกษาผลของชนิดสารคงรูปต่อความทนทานแรงดึง ภาพที่ 3.42 พบว่า โพลีเมอร์ PEVA ที่ใช้ DCP มีค่าความทนทานต่อแรงดึงมากที่สุด เป็นผลมาจากความหนาแน่นการเชื่อมขวาง ซึ่งดูได้จากค่า ΔM ในตารางที่ 3.4 ที่มากที่สุด จะมีความต้านทานในการดึงมากที่สุด ซึ่งในกรณีของมอดูลัสก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

จากความหนาแน่นการเชื่อมขวางจากมากไปน้อยคือ DCP > LUPEROX® 101 > VUL-CUP® 40KE จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงเท่ากับ 3.01, 2.89 และ 2.02 MPa ตามลำดับ

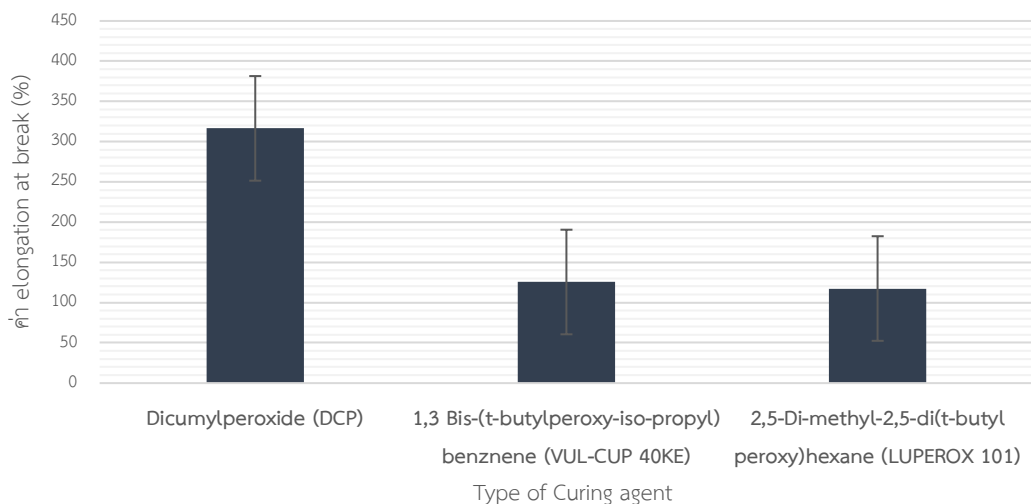
เช่นเดียวกันส่งผลให้ค่ามอดูลัสลดลง เมื่อความหนาแน่นการเชื่อมขวางต่ำ เช่น มอดูลัสที่ 100% ของ VUL-CUP® 40KE มีค่าเท่ากับ 0.70 MPa แต่เมื่อปริมาณเปอร์ออกไซด์ในสารคงรูปมากขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้น คือเมื่อใช้ LUPEROX® 101 มอดูลัสที่ 100% มีค่าเท่ากับ 1.02 MPa และค่ามอดูลัสมากที่สุดเมื่อใช้ DCP มีค่าเท่ากับ 1.35 MPa



ภาพที่ 3.42 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของโพลี PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

■ ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break)

เมื่อทำการศึกษาค่าผลของชนิดสารคงรูปต่อความยืดหยุ่น ณ จุดขาด โดยเปรียบเทียบโพลี PEVA ที่ใช้สารคงรูปในระบบ peroxide คนละชนิดกัน โดยที่ใช้สัดส่วนของสารคงรูปเท่ากัน จากภาพที่ 3.43 พบว่าเมื่อใช้ DCP เป็นสารคงรูป จะมีค่าความยืดหยุ่นสูงสุด เท่ากับ 316.5% เพราะว่า DCP จะมีออกซิเจนอยู่ 2 อะตอมต่อโครงสร้าง 1 โมเลกุล ซึ่งจะน้อยกว่าที่พบใน LUPEROX® 101 และ VUL-CUP® 40KE ที่พบออกซิเจนทั้งหมด 4 อะตอม ส่งผลต่อความแข็งแรงในโครงสร้างของโพลีทำให้ลดความสามารถในการยืดหยุ่น ทำให้พบค่าความยืดหยุ่นอยู่ที่ 117.5% และ 125.6% ใน LUPEROX® 101 และ VUL-CUP® 40KE ตามลำดับ และใน LUPEROX® 101 มีค่าความยืดหยุ่นน้อยสุดมีสาเหตุมาจากผนังเซลล์ที่บาง [28]



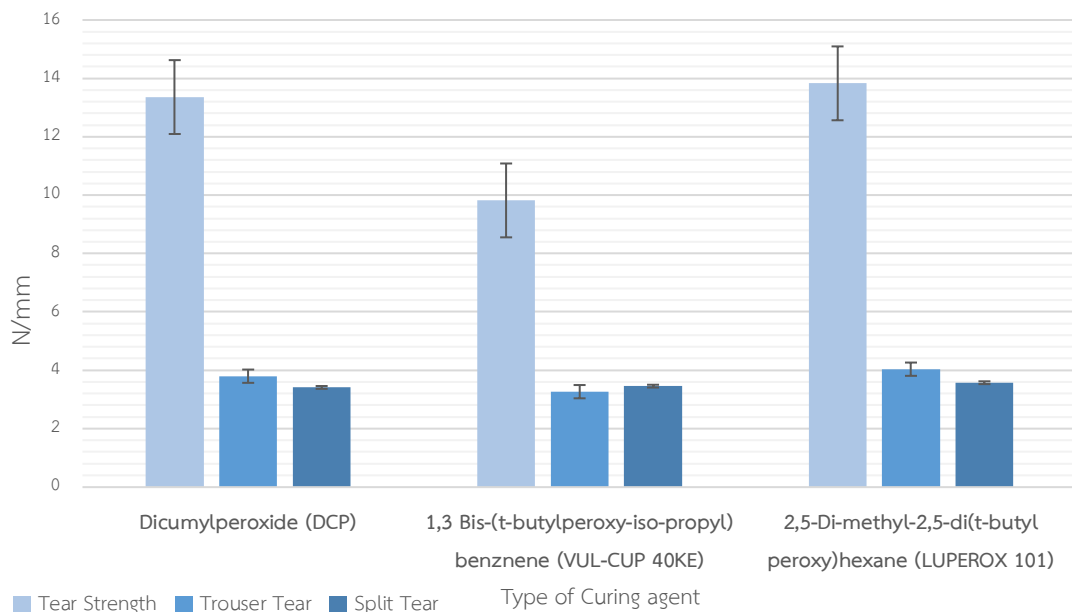
ภาพที่ 3.43 ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break) ของโพลี PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

■ ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance)

เมื่อทำการศึกษามลของชนิดสารคงรูปต่อความต้านทานการฉีกขาด ตามภาพที่ 3.44 พบว่าความต้านทานการฉีกขาดเป็นผลมาจากความหนาแน่นการเชื่อมขวางซึ่งดูได้จาก ΔM ในตารางที่ 3.4 โดยโพลี PEVA ที่มีค่า ΔM มากส่งผลให้ความต้านทานการฉีกขาดสูง เช่น โพลีที่ใช้ DCP และ LUPEROX[®] 101

โพลี PEVA ที่ใช้ LUPEROX[®] 101 เป็นสารคงรูป มีค่าความต้านทานการฉีกขาดมากที่สุดทั้ง 3 แบบ tear strength die-B, trouser tear และ split tear คือ 13.83, 4.04 และ 3.57703 N/mm ตามลำดับ เพราะว่าจากปริมาณของออกซิเจนอะตอมที่มากกว่า DCP อยู่ 2 อะตอมต่อโครงสร้างจึงพบความแตกต่างเล็กน้อยของค่าความทนทานแรงฉีกขาด โดยใน DCP จะเท่ากับ 13.36, 3.80 และ 3.41618 N/mm ตามลำดับ

ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกันมากดังเช่นใน VUL-CUP[®] 40KE ที่จะมี 40% ของเปอร์ออกไซด์เมื่อเทียบกับ DCP และความหนาแน่นการเชื่อมขวางต่ำกว่าชนิดอื่น ทำให้ความทนทานต่อแรงฉีกขาดลดลง เท่ากับ 9.82, 3.27 และ 3.45950 N/mm ตามลำดับ เพราะว่าเมื่อพันธะในการเชื่อมโยงลดลงทำให้สามารถทนแรงฉีกขาดได้น้อย และความแข็งแรงลดลงหรือความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลง ทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย

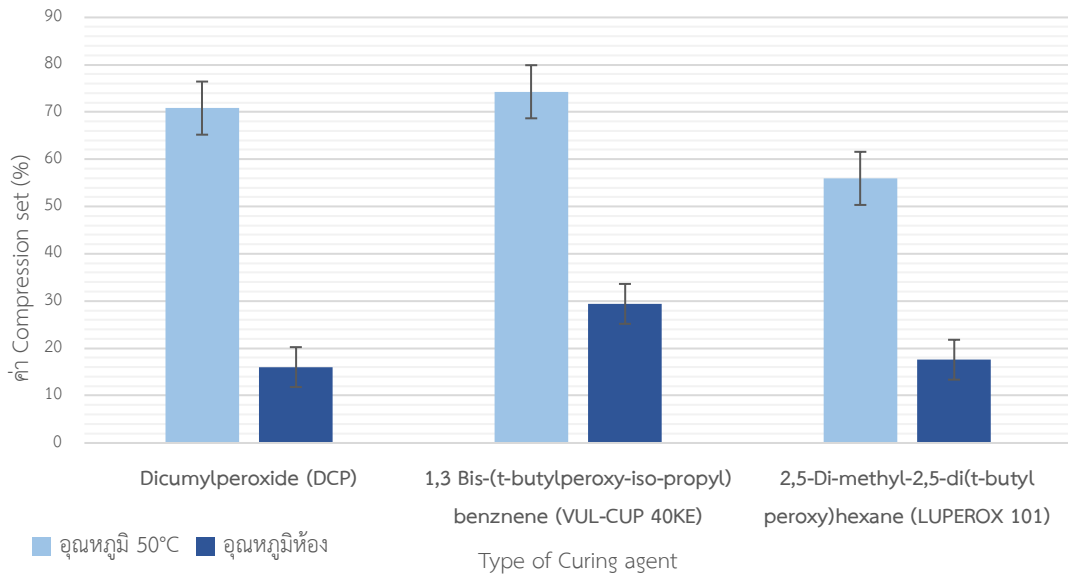


ภาพที่ 3.44 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโพลี PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.9 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

เมื่อทำการศึกษามลของชนิดสารคงรูปต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด จากภาพที่ 3.45 พบว่า โพลี PEVA ที่ใช้ LUPEROX[®] 101 มีค่า compression set (CS) ต่ำสุด เท่ากับ 55.96% (ที่อุณหภูมิ 50°C) แสดงว่ามีความสามารถในการกลับคืนรูปเดิมมากที่สุด ในทางตรงข้ามเมื่อใช้ DCP เป็นสารคงรูปมีค่า CS เท่ากับ 70.82% พอ ๆ กับเมื่อใช้ VUL-CUP[®] 40KE เท่ากับ 74.28% เมื่อใช้อุณหภูมิ 50°C แต่เมื่อทดลองที่

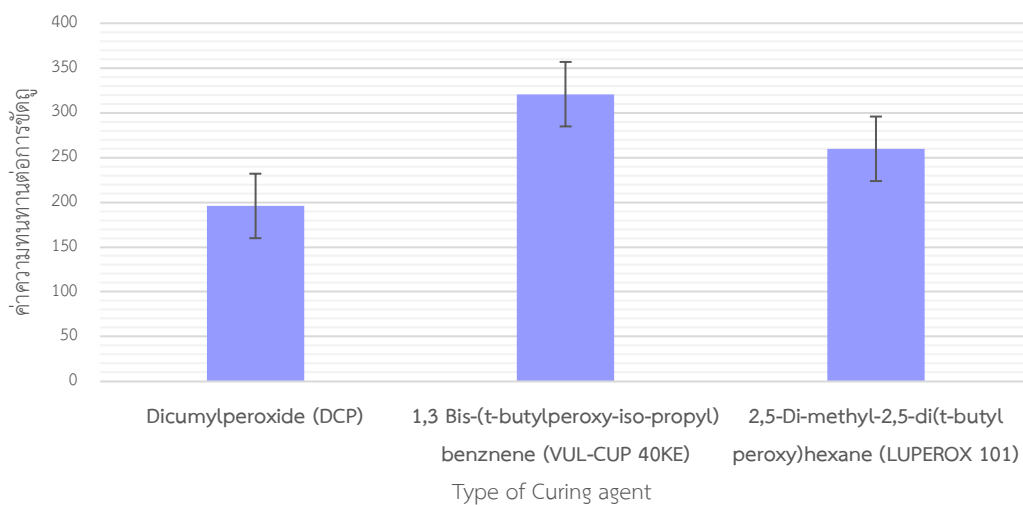
อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อใช้ DCP เป็นสารคงรูปจะมีค่า CS ต่ำสุดเท่ากับ 16.05% ใกล้เคียงกับเมื่อใช้ LUPEROX® 101 เท่ากับ 17.61% ในทางตรงข้ามเมื่อใช้ VUL-CUP® 40KE จะมีค่า CS เท่ากับ 29.42%



ภาพที่ 3.45 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลี PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

3.3.10 การทดสอบความต้านทานการขีดถู (abrasion)

เมื่อทำการศึกษามูลของชนิดสารคงรูปต่อความต้านทานการขีดถู ภาพที่ 3.46 พบว่าเมื่อใช้ DCP จะมีความต้านทานการขีดถูมากที่สุด คือค่า abrasion น้อยที่สุด เท่ากับ 196% ตามมาด้วยใช้ LUPEROX® 101 ค่า abrasion เท่ากับ 259.8% และเมื่อใช้ VUL-CUP® 40KE มีค่า abrasion มากที่สุดเท่ากับ 320.8% เนื่องจากมีปริมาณเปอร์ออกไซด์น้อยกว่าสารคงรูปชนิดอื่นจึงส่งผลต่อความแข็งแรงที่ผิวของโพลี PEVA ทำให้ความต้านทานต่อการขีดถูได้น้อย จึงพบค่า abrasion สูงสุด และคาดว่า DCP มีการจัดเรียงตัวของเซลล์โพลีหนาแน่นและเป็นระเบียบมีผนังเซลล์ที่หนา น่าจะทำให้สามารถต้านทานการขีดถูได้มากขึ้น



ภาพที่ 3.46 ความต้านทานการขีดถู (abrasion) ของโพลี PEVA ที่ใช้ชนิดของสารคงรูปต่างกัน

จากตอนที่ 3.3 ศึกษาผลของชนิดสารคงรูป พบว่า โฟม PEVA ที่ใช้ dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารคงรูป มีสมบัติการกระด้างกระตอนดีที่สุด รวมถึงสมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานการขีดถู, ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน, ความทนทานต่อแรงดึงและความยืดหยุ่น ณ จุดขาด นอกจากนี้เมื่อทำการเทียบสัดส่วน phr ปริมาณเปอร์ออกไซด์ให้เท่ากันใน VUL-CUP® 40KE พบว่า โฟมที่ขึ้นรูปมีอัตราส่วนการขยายตัวที่ต่ำจนแทบไม่ขยายตัว จึงไม่สามารถนำมาใช้ทดสอบเทียบสมบัติกับโฟมชนิดอื่นได้

3.4 ศึกษาผลของพอลิเมอร์ผสมที่มีผลต่อสมบัติการกระด้างกระตอน

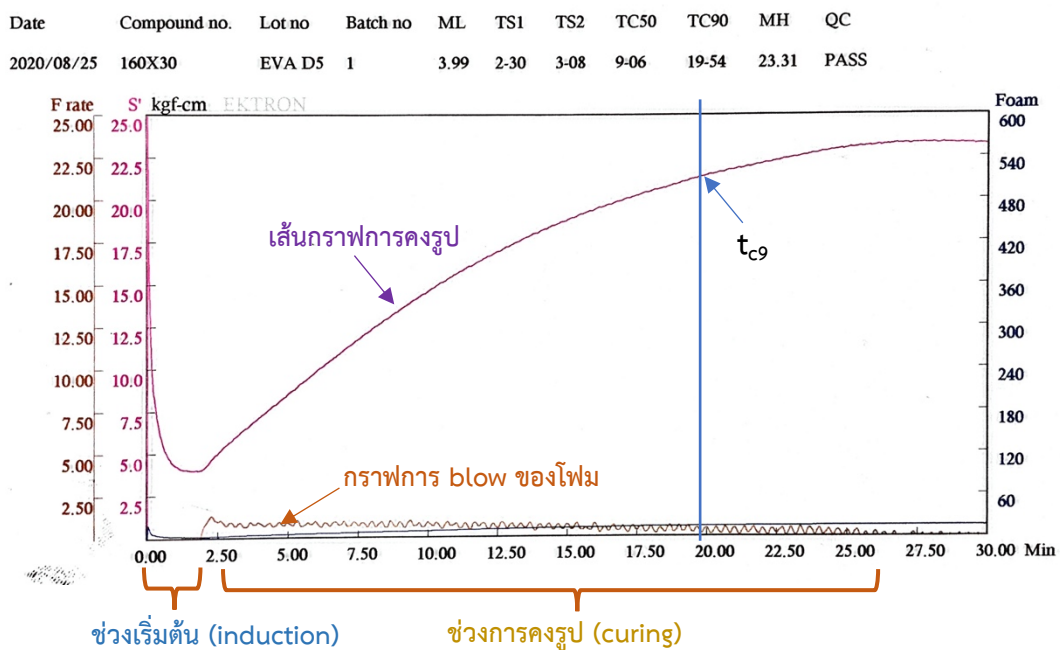
ตอนที่ 4 ของงานวิจัยได้ทำการอัดขึ้นรูปโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต (PEVA) ที่นำไปผสม (blend) กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ได้แก่ poly(ethylene octene) (Engage 8200) และยางธรรมชาติ (natural rubber) โดยใช้อัตราส่วนของ PEVA/POE/NR ดังนี้ 100/0/0, 70/30/0, 70/15/15, และ 70/0/30 โดยการเปรียบเทียบสมบัติการกระด้างกระตอน ความต้านทานการขีดถู สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานการยืด ความต้านทานการฉีกขาด ค่ามอดูลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดขาด ด้วยเครื่อง universal testing machine รวมไปถึงศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา

3.4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

เมื่อทำการศึกษาสมบัติการคงตัวของโฟม PEVA ในสูตรต่าง ๆ ต่อพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยางธรรมชาติทำให้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น และส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของโฟม PEVA ลดลง โดยที่ระยะเวลาในการ scorch ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม เพราะว่ายางธรรมชาติมีความหนืดกว่า poly(ethylene octene) และ PEVA ทำให้ต้องใช้เวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 3.5 โฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30POE พบว่ามีเวลา t_{c90} เท่ากับ 11.44 จึงใช้เวลาในการขึ้นรูปเท่ากับ Pure PEVA คือ 15 นาที ในขณะที่โฟม 70PEVA/15POE/15NR และ 70PEVA/30NR มีเวลา t_{c90} เท่ากับ 18.35 และ 19.54 ตามลำดับ ใช้เวลาในการขึ้นรูปเป็น 25 นาทีซึ่งเป็นจุดสูงสุดของกราฟการคงรูป ดังภาพที่ 3.31 ในทางตรงข้ามเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นส่งผลต่อความหนาแน่นการเชื่อมขวางของโฟมลดลง เพราะว่าจากโครงสร้างทางเคมีของ poly(ethylene octene) เป็นโมเลกุลแบบกิ่งโดยมีตำแหน่งที่โอกาสเกิด radical ได้ 2 ตำแหน่ง คือ บริเวณ hydrogen ของ tertiary carbon ที่เชื่อมกับ octene กับหมู่ methyl ของ octene และเชื่อมกันได้อย่างอัดแน่นมากกว่าในขณะที่ยางธรรมชาติเกิด radical ได้ที่ตำแหน่ง methine cis-carbon [14] จึงทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง

ตารางที่ 3.5 ลักษณะการเชื่อมโยงของโฟม PEVA เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนและชนิดพอลิเมอร์ผสม

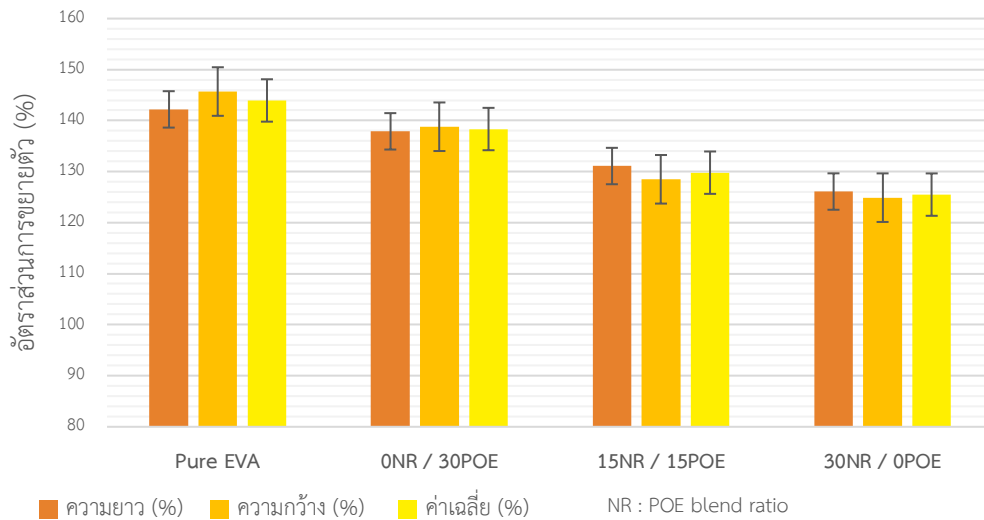
สูตร	Scorch time, t_{s_5} (min)	Cure time, t_{c90} (min)	Cure rate index, CRI	Minimum torque, M_L (kgf/cm)	Maximum torque, M_H (kgf/cm)	ΔM
Pure PEVA	3.08	12.49	10.6	2.83	24.57	21.74
70PEVA/ 30POE	3.01	11.44	11.9	2.92	25.50	22.58
70PEVA/ 15POE /15NR	3.08	18.35	6.55	3.07	23.57	20.50
70PEVA/ 30NR	3.08	19.54	6.08	3.99	23.31	19.32



ภาพที่ 3.47 กราฟการคงรูป cure curve ของโฟมที่มีอัตราส่วนพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต (PEVA) ต่อ ยางธรรมชาติ (NR) เท่ากับ 70 : 30

3.4.2 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio)

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์อื่นที่นำมาผสมกับ PEVA ต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัว ตามภาพที่ 3.48 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติอัตราส่วนการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความหนืดของยางธรรมชาติและน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากทำให้โครงสร้างของโฟมขยายตัวออกได้น้อยกว่าโฟมที่ไม่ผสม NR คือโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR/0POE มีอัตราส่วนการขยายตัวเท่ากับ 125.5% น้อยกว่าโฟมมีอัตราส่วน 70PEVA/0NR/30POE มีอัตราส่วนการขยายตัวเท่ากับ 138.35% และนอกจากนี้พบว่าโฟมที่ผสม PEVA อย่างเดียวที่มีการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นมีค่าอัตราส่วนการขยายตัวมากที่สุด คือ 143.95% มากกว่าโฟม PEVA ผสมทั้ง 3 อัตราส่วน

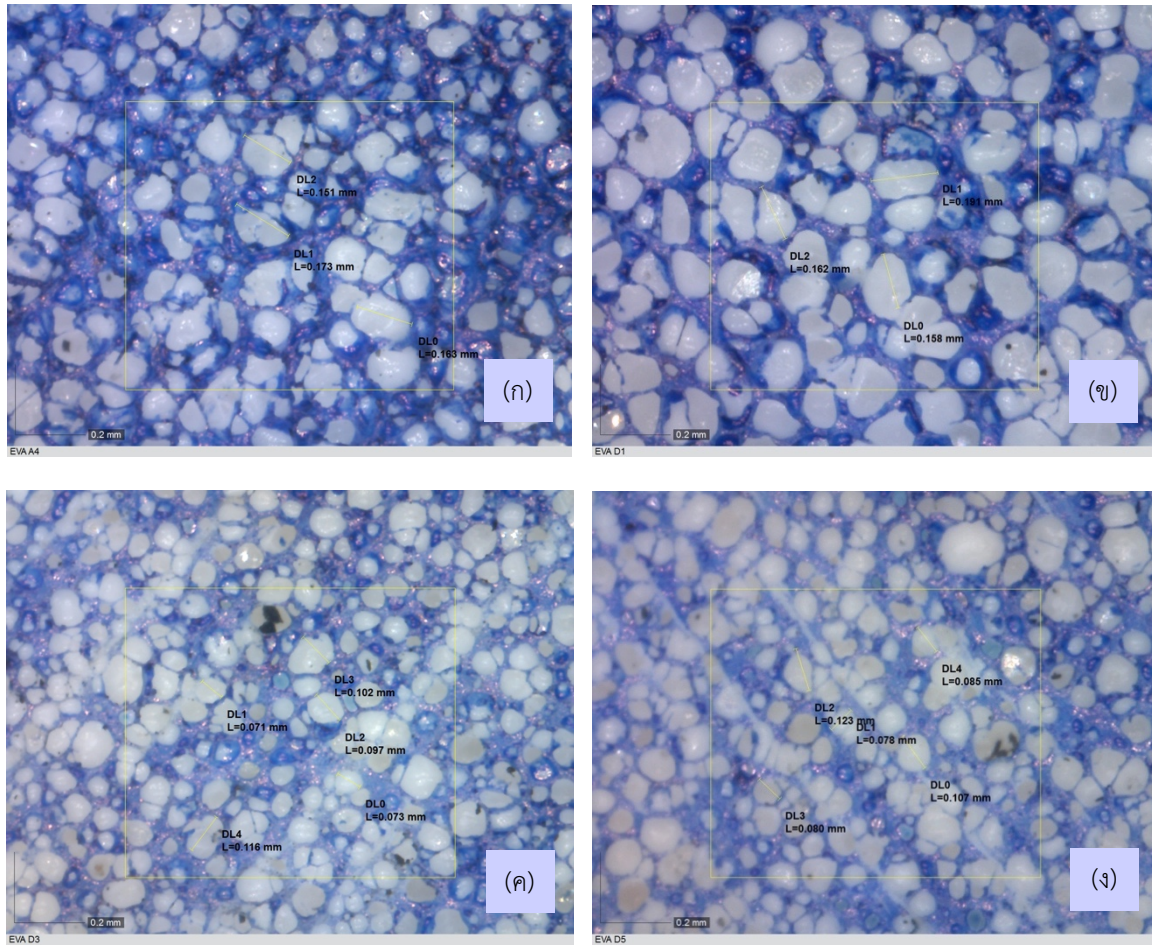


ภาพที่ 3.48 อัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio) ของโพลี PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.3 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (morphology)

เมื่อทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเซลล์โพลี PEVA โดยเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม คือ ยางธรรมชาติกับ poly(ethylene octene) พบว่า เมื่อนำโพลี PEVA ไปผสมกับยางธรรมชาติจะทำให้ขนาดของเซลล์โพลีลดลง เพราะความหนืดที่มากขึ้นจากยางธรรมชาติส่งผลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของเซลล์ จากภาพที่ 3.50 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดของเซลล์โพลี คือ โพลี PEVA ที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่นมีขนาดเฉลี่ย 0.162 mm ในทางตรงข้ามโพลี PEVA ที่มีอัตราส่วน NR (70EA/15NR/15POE และ 70PEVA/30NR/0POE) มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.090 mm

นอกจากนี้โพลีที่นำไปผสมพอลิเมอร์มีขนาดของเซลล์ที่เป็นวงกลมกว่าโพลี PEVA ที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่นซึ่งจะเป็นรูปร่างและรูปร่างเหลี่ยมดังภาพที่ 3.49(ก) รวมทั้งโพลีที่ใช้อัตราส่วน 70PEVA/0NR/30POE ตามภาพที่ 3.49(ข) มีขนาดเซลล์เฉลี่ยที่ใหญ่ที่สุด เท่ากับ 0.170 mm ในภาพที่ 3.49(ค) และ ภาพที่ 3.49(ง) เซลล์ประกอบด้วยขนาดเล็กมีการจัดเรียงที่เป็นระเบียบและอัดแน่นภายในโครงสร้างโพลี



ภาพที่ 3.49 ลักษณะโครงสร้างผิวของโฟมเอทิลีน PEVA ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์

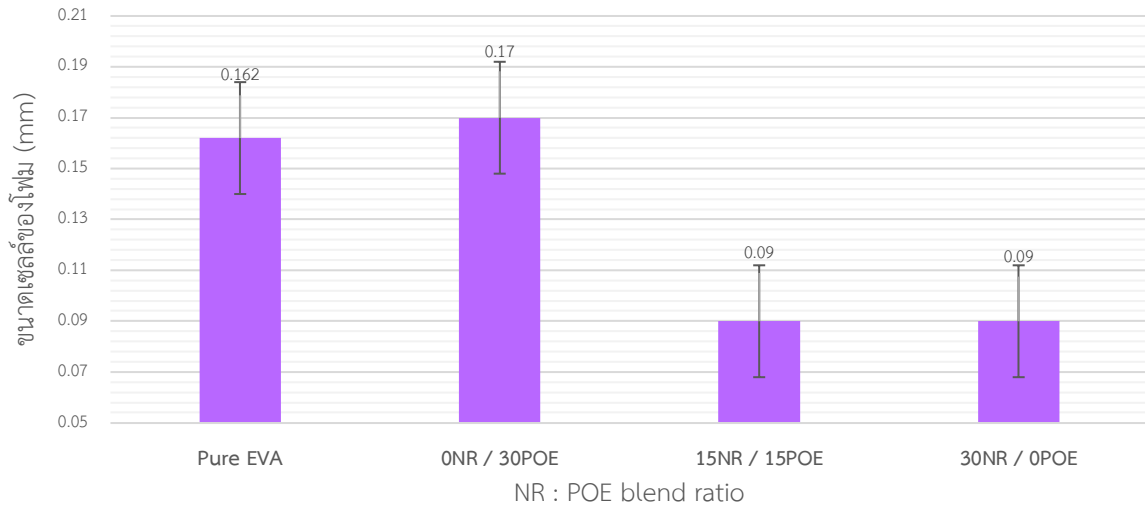
โดยเปรียบเทียบผลของพอลิเมอร์ผสม

(ก) เมื่อโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลเอซีเตต (PEVA) ที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่น

(ข) เมื่อโฟมที่มีอัตราส่วน PEVA: ยางธรรมชาติ (NR): poly(ethylene octene) (POE) เท่ากับ 70/0/30

(ค) เมื่อโฟมที่มีอัตราส่วน PEVA: ยางธรรมชาติ (NR): poly(ethylene octene) (POE) เท่ากับ 70/15/15

(ง) เมื่อโฟมที่มีอัตราส่วน PEVA: ยางธรรมชาติ (NR): poly(ethylene octene) (POE) เท่ากับ 70/30/0

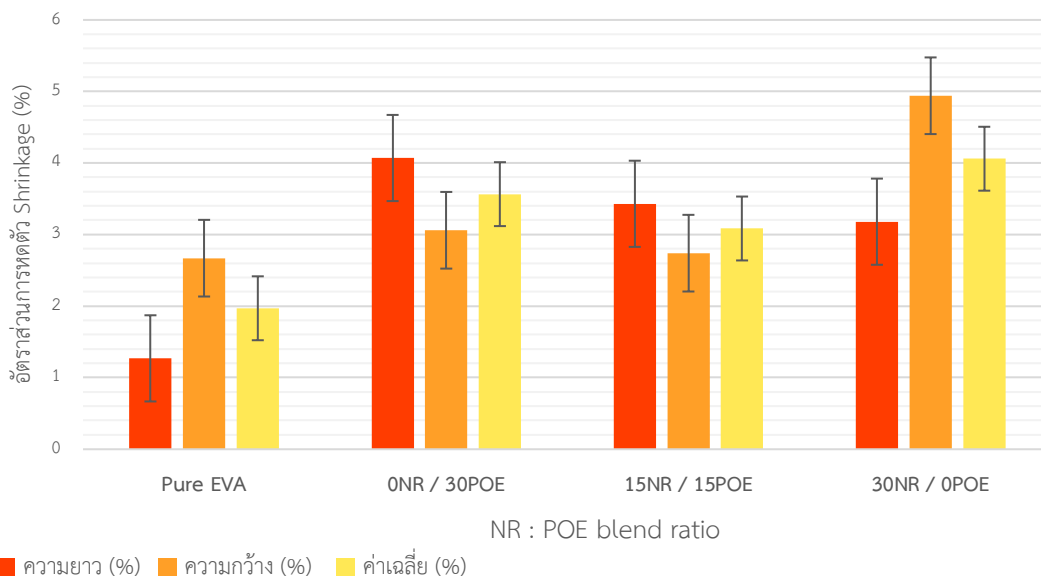


ภาพที่ 3.50 ขนาดเซลล์ (cell size) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.4 ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage)

จากภาพที่ 3.51 แสดงผลการศึกษ้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมกับความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน พบว่า เมื่อโฟม PEVA ที่ผสมกับพอลิเมอร์อื่น ทั้ง 3 สูตร ให้ค่าการหดตัวที่มากขึ้น เพราะว่า POE มีปริมาณผลึกเท่ากับ 19% ทำให้โฟมมีปริมาณผลึกสูงขึ้น ส่งผลให้การหดตัวจึงเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อนำโฟม PEVA มาผสมยางธรรมชาติ (70PEVA/30NR) จะมีค่าความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 4.06% เพราะว่า NR มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ในทางตรงข้ามถ้าใช้โฟมที่ผสมกับ POE (70PEVA/30POE) มีค่าความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนน้อยกว่าโฟมที่ผสมกับ NR คือ 3.565% แต่นำไปผสมกับทั้งสองเป็นโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/15NR/15POE พบว่ามีค่าความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อนน้อยกว่า โฟม PEVA ผสม เท่ากับ 3.085%

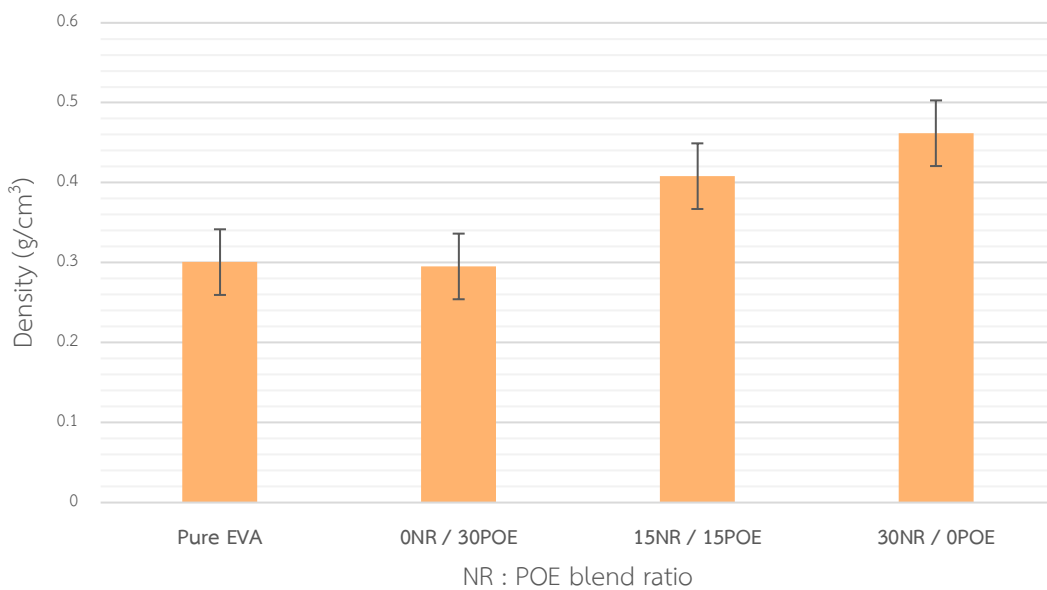


ภาพที่ 3.51
ความสามารถในการหดตัวด้วยความร้อน (shrinkage) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

■ ความยาว (%) ■ ความกว้าง (%) ■ ค่าเฉลี่ย (%)

3.4.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่น (density)

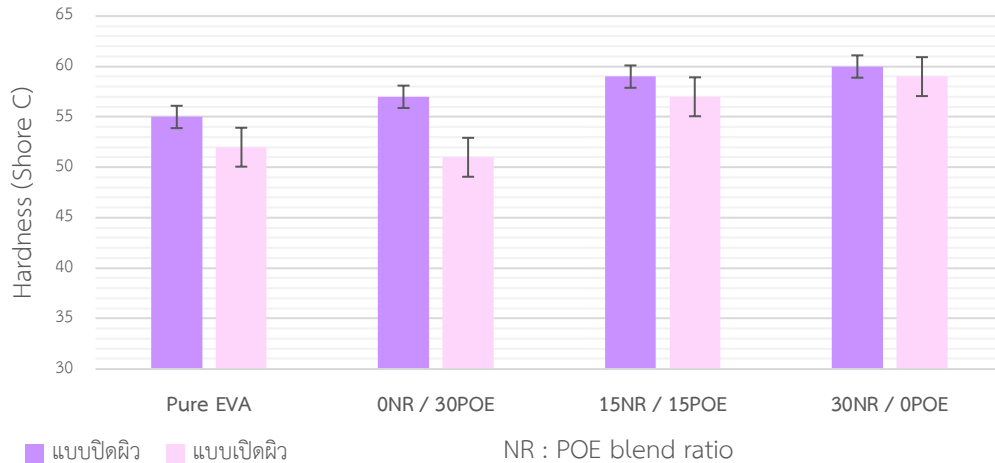
ภาพที่ 3.52 จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับ PEVA พบว่า โฟม PEVA ที่ไม่ผสมพอลิเมอร์อื่น กับ โฟม PEVA ที่ผสมกับ poly(ethylene octene) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากันคือ 0.3007 g/cm^3 สำหรับ pure PEVA และ 0.2953 g/cm^3 สำหรับโฟม 70PEVA/30POE นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยางธรรมชาติจะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก poly(ethylene octene) มีความหนาแน่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ คือ POE มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.870 g/cm^3 ในขณะที่ NR มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.920 g/cm^3 และเป็นผลมาจากการขยายตัวที่ต่ำกว่าของโฟมที่มีส่วนผสมของ NR



ภาพที่ 3.52 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.6 ความแข็ง (hardness)

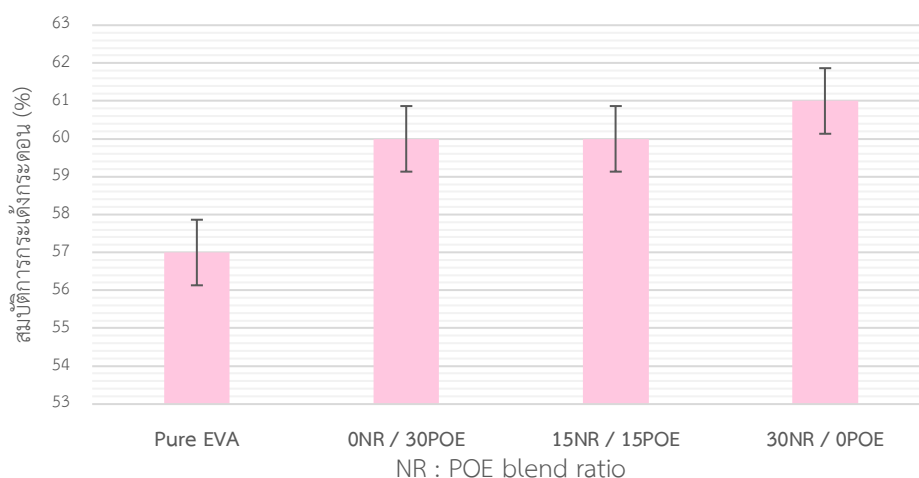
จากการศึกษาผลของความแข็ง (hardness) ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสมกับ PEVA ดังภาพที่ 3.53 โดยพบว่า โฟม PEVA ผสมทั้ง 3 สูตรมีค่าความแข็งสูงกว่า โฟม PEVA อย่างเดียว โดยที่โฟม PEVA ที่ผสม 30 phr POE มีค่าความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 57 shore C แบบปิดผิว (51 shore C แบบเปิดผิว) ลำดับถัดมาเป็น โฟม PEVA ผสม 15 NR กับ 15 POE เพิ่มขึ้นมา 2 shore C แบบปิดผิว (มีค่าความแข็ง เท่ากับ 57 shore C แบบเปิดผิว) ความแข็งที่สุดเป็นโฟม PEVA ที่ผสม 30 phr NR มีค่าความแข็งเท่ากับ 60 shore C แบบปิดผิว (59 shore C แบบเปิดผิว) โดยความแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่โฟมมีอัตราส่วนการขยายตัวลดลง



ภาพที่ 3.53 ความแข็ง (hardness) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.7 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience)

จากการศึกษาสมบัติการกระด้างกระดอนที่มีผลต่อพอลิเมอร์ผสมกับ PEVA พบว่าโฟม PEVA ผสมทั้ง 3 สูตรช่วยเพิ่มความสามารถในการกระด้างกระดอน ตามภาพที่ 3.54 เพราะจากผลของขนาดเซลล์กับการจัดเรียงตัวโดยพบว่า โฟม PEVA ที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่นจะพบขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่าโฟมพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 สูตร นอกจากนี้อาจเกิดจากโครงสร้างผลึกที่ส่งผลต่อความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ กล่าวคือเมื่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสายโซ่ถูกจำกัดโดยโครงสร้างในการเชื่อมขวาง ทำให้ค่าความสามารถในการกระด้างกระดอนลดลง [15] ซึ่งในโครงสร้างของ POE จะมีความเป็นผลึกลดลงหรือความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น เพราะว่า POE มีสายโซ่กิ่ง ความเป็นผลึกลดลงกว่าโครงสร้างของ PEVA ส่งผลให้ทั้ง 3 สูตรมีค่าการกระด้างกระดอนเพิ่มขึ้นเป็น 60% สำหรับโฟม ที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30POE เท่ากับโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/15POE/15POE และ 61% พบในโฟม PEVA ที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR เพราะผลจากความยืดหยุ่นของผนังเซลล์อย่างธรรมชาติ



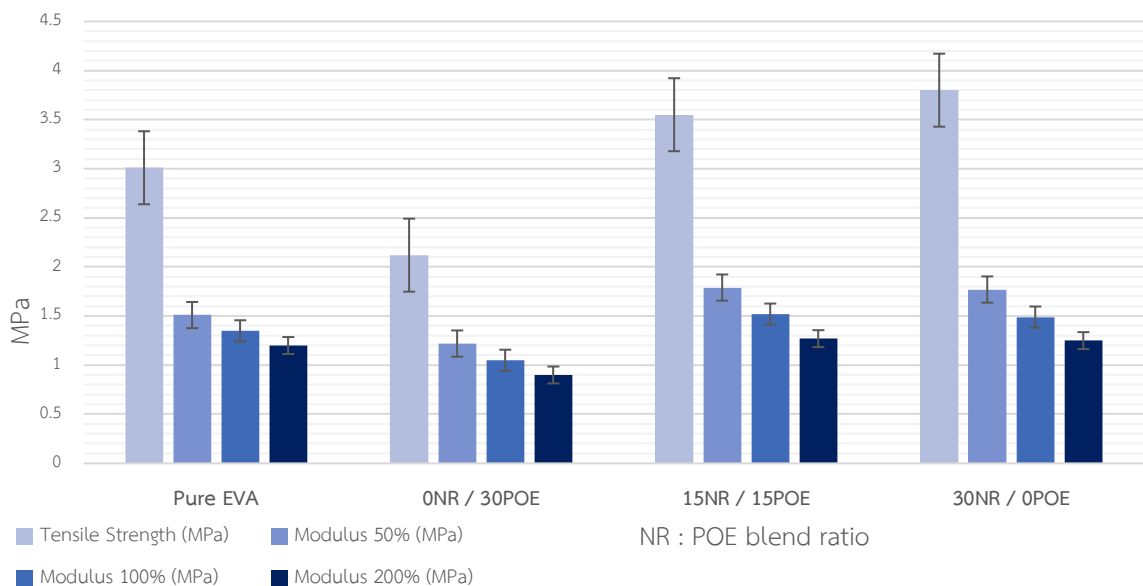
ภาพที่ 3.54 สมบัติการกระด้างกระดอน (rebound resilience) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.8 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

■ ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

เมื่อศึกษาผลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมต่อความทนทานต่อแรงดึง ตามภาพที่ 3.55 พบว่า ความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติและความทนทานแรงดึงมากขึ้นกว่า โฟม PEVA ที่ไม่ได้ผสม นั่นคือ 3.55 MPa สำหรับโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/15POE/15NR และมากขึ้นเป็น 3.80 MPa เมื่อโฟมที่ใช้อัตราส่วน 70PEVA/30NR

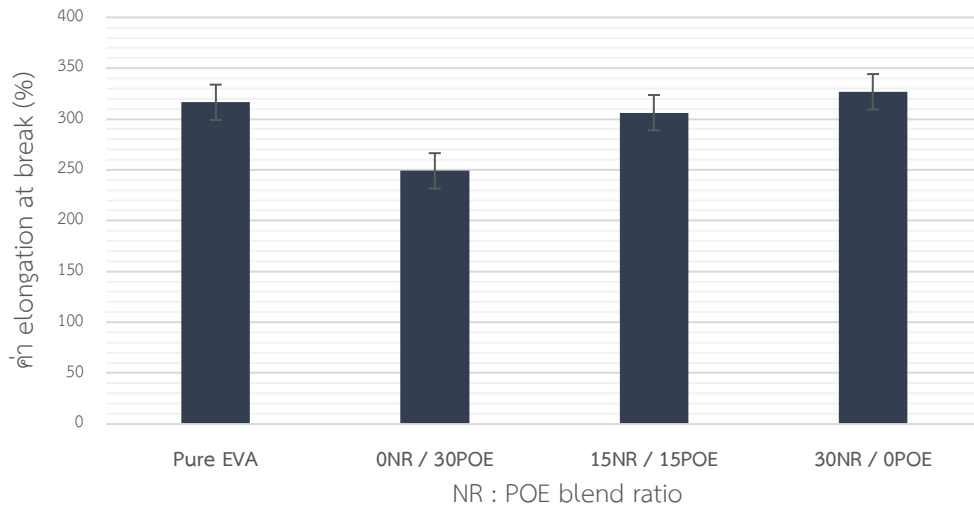
ในขณะที่โฟมที่มี POE อยู่ 30 phr ผสมอยู่ด้วยมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง อยู่ที่ 2.12 MPa เพราะว่าสมบัติของยางธรรมชาติสามารถจัดเรียงตัว (strength hardening) เมื่อถูกแรงดึงทำให้มีความทนทานต่อแรงดึงยิ่งมากขึ้น [16] รวมถึงผลของขนาดเซลล์ที่ลดลงทำให้ความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น [28] นอกจากนี้ ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความทนทานต่อแรงดึง โดยพบว่า ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 3.55 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

■ ร้อยละความยืดหยุ่น ณ จุดขาด (elongation at break)

เมื่อทำการศึกษาผลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมต่อค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ตามภาพที่ 3.56 พบว่า ค่าความยืดหยุ่น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) คือ ความยืดหยุ่นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนในการผสมของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้โฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR มีค่าความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น คือจาก 316.5% ของโฟม PEVA ที่ไม่ได้ผสมเป็น 326.9% สำหรับโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR ในทางตรงข้ามเมื่อใช้โฟมที่มีอัตราส่วนของ 70PEVA/30NR ทำให้ความสามารถในการยืดหยุ่นลดลงเป็น 249.1% เพราะว่าจากสมบัติของ poly(ethylene octene) มีความเป็นผลึกต่ำกว่า PEVA ทำให้ความสามารถการยืดหยุ่นได้น้อยลง



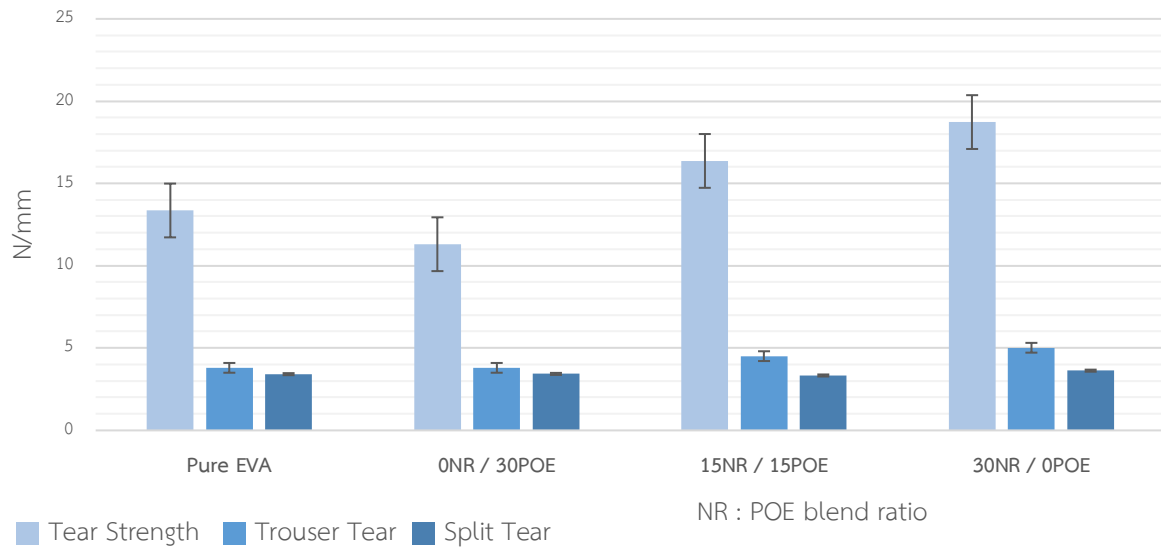
ภาพที่ 3.56 ความยืดหยุ่น ณ จุดขาดของโพลีเอทิลีนผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

■ ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance)

เมื่อทำการศึกษาความทนทานต่อแรงฉีกขาดในแบบต่าง ๆ คือ tear strength die B, trouser tear, และ spilt tear โดยการเปรียบเทียบผลอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ตามภาพที่ 3.57 พบว่า ผลความทนทานแบบ tear strength die B กับ trouser tear มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติที่นำมาผสมมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้น เพราะว่าสมบัติของยางธรรมชาติสามารถจัดเรียงตัว (strength hardening) เมื่อถูกแรงดึงทำให้มีความทนทานต่อแรงฉีกขาดมากขึ้น [16] รวมถึงผลของขนาดเซลล์ที่ลดลงทำให้ความทนทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น [28]

ในโพลีเอทิลีนผสม NR (โพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วน 70PEVA/15NR/15POE เท่ากับ 16.37 N/mm และแบบ trouser tear เท่ากับ 4.51 N/mm โพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR เท่ากับ 18.73 N/mm และแบบ trouser tear เท่ากับ 5.02 N/mm) มีค่าความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นจากโพลีเอทิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่น

ในทางตรงข้ามโพลีเอทิลีนที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30POE มีค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดแบบ tear strength die B เท่ากับ 11.31 N/mm ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าโพลีเอทิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่น และในแบบ trouser tear และ spilt tear มีค่าความทนทานแรงฉีกไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับโพลีเอทิลีนที่ไม่ได้ผสมพอลิเมอร์อื่น

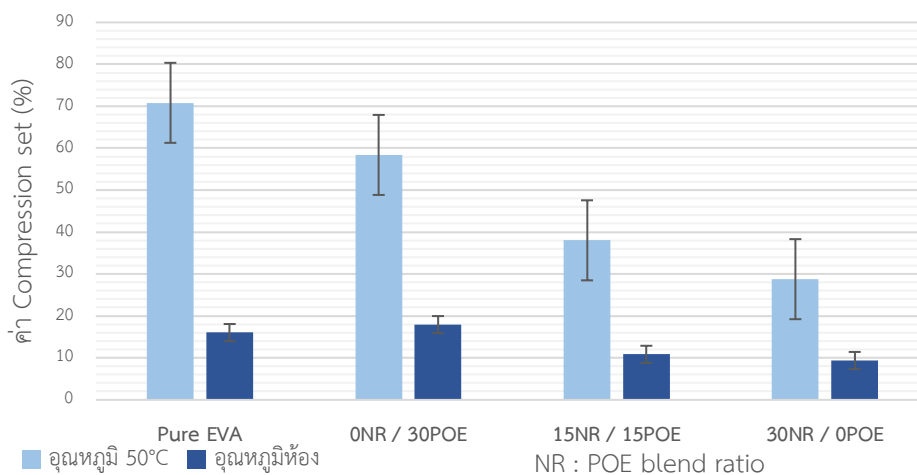


ภาพที่ 3.57 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) ของโพลี PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.9 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)

ค่า compression set คือค่าที่บ่งบอกความสามารถของยางในการรักษาสมบัติความยืดหยุ่น หลังจากได้รับแรงกดเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งค่า CS ยิ่งน้อยแสดงว่า ยางยังคงสามารถรักษาความยืดหยุ่นได้ดี [10]

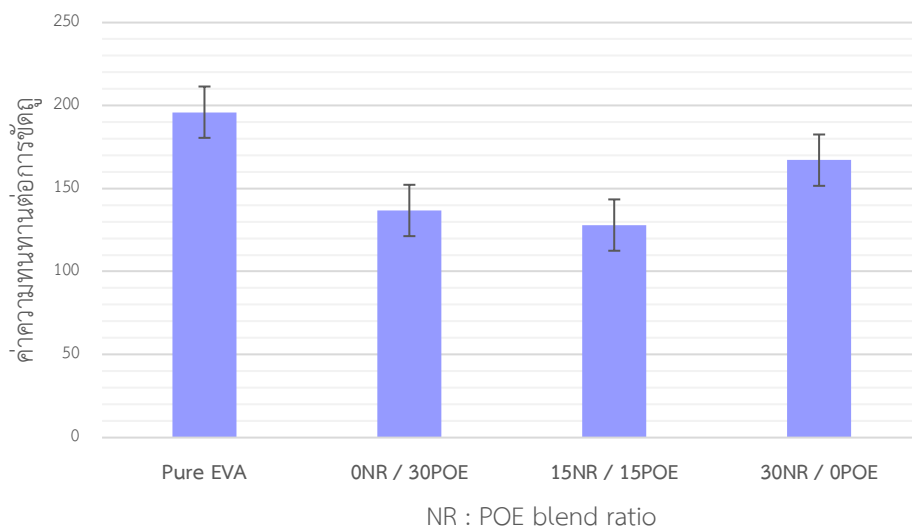
เมื่อทำการศึกษาผลการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) โดยการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C และที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบผลจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสม พบว่า โพลีนำไปผสมพอลิเมอร์อื่นทั้ง 3 สูตรช่วยพัฒนาสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดให้ดีขึ้น โดยมีค่า CS ลดลง และโพลีที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR มีค่า CS ต่ำสุดเท่ากับ 28.78% ที่อุณหภูมิ 50°C (9.39% ที่อุณหภูมิห้อง) เพราะว่ายางธรรมชาติมีสมบัติในการยืดหยุ่นได้ดีกว่า POE และ PEVA รวมทั้งโพลีที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า CS ลดลงคือ ความสามารถในการกลับคืนสู่รูปเดิมหลังจากการแรงอัดดีขึ้น ตามภาพที่ 3.58 โพลีที่มีอัตราส่วน 70PEVA/15NR/15POE มีค่า CS เท่ากับ 38.04% ที่อุณหภูมิ 50°C (10.86% ที่อุณหภูมิห้อง) และโพลีที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30POE มีค่า CS เท่ากับ 58.40% ที่อุณหภูมิ 50°C (17.94% ที่อุณหภูมิห้อง)



ภาพที่ 3.58 การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลี PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

3.4.10 การทดสอบความต้านทานการขัดถู (abrasion)

เมื่อทำการศึกษาผลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับความทนทานต่อการขัดถู ตามภาพที่ 3.59 พบว่า โฟม PEVA ที่ผสมพอลิเมอร์อื่นทั้ง 3 สูตร มีค่าความทนทานต่อการขัดถูต่ำกว่า โฟม PEVA อย่างเดียว แสดงว่า โฟม PEVA ผสมทั้ง 3 สูตรช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขัดถูให้ดีขึ้น เพราะว่ามีสมบัติของยางธรรมชาติและ poly(ethylene octene) สามารถทนทานต่อการขัดถูได้ดี โดยพบว่าโฟมที่ผสม POE มีค่า abrasion เท่ากับ 136.8% สามารถทนทานต่อการขัดถูได้มากกว่าโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/30NR มีค่า abrasion เท่ากับ 167.1% นอกจากนี้เมื่อนำมาผสมทั้ง 2 พอลิเมอร์เป็นโฟมที่มีอัตราส่วน 70PEVA/15NR/15POE ซึ่งมีค่า Abrasion ใกล้เคียงกับโฟมที่ผสม 70PEVA/30POE เท่ากับ 128.0%



ภาพที่ 3.59 ความต้านทานการขัดถู (abrasion) ของโฟม PEVA ผสมที่มีอัตราส่วน NR ต่อ POE ต่างกัน

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

4.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพัฒนาสมบัติการกระด้างกระดองของโฟมพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเตต ด้วยการเปรียบเทียบเกรดของ PEVA, ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง (blowing agent), ชนิดของสารคงรูป (curing agent) และ โพลีเมอร์ modifier ที่นำมาผสม พบว่า สูตรเคมีของโฟม PEVA คอมพาวนด์ที่ไม่ผสมโพลีเมอร์อื่นที่ดีที่สุด คือ โฟม PEVA ที่มีปริมาณ VA 28% และค่าดัชนีการหลอมไหล 5 (g/10min), azodicarbonamide (ADC) เป็นสารทำให้เกิดฟอง และ dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารคงรูป

นอกจากนี้เมื่อไปทำการผสมโพลีเมอร์อื่น คือ โฟมคอมพอสิตของอีวีเอ-พอลิเอทิลีนออกทีน-ยางธรรมชาติ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 70:15:15 ช่วยพัฒนาสมบัติการกระด้างกระดองได้ดีขึ้น 5.26% เมื่อเทียบกับโฟม PEVA บริสุทธิ์ รวมถึงสมบัติความต้านทานต่อการขีดถูดีขึ้น 34.7% ตลอดจนสมบัติอื่น ๆ ตามตารางที่ 4.1 แต่โฟมคอมพอสิตของอีวีเอ-พอลิเอทิลีนออกทีน-ยางธรรมชาติ มีข้อเสียจากสีของยางธรรมชาติที่มีสีเหลืองทำให้โฟมไม่ได้สีขาวตามที่ต้องการ รวมถึงความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลที่สูงจากยางธรรมชาติทำให้การขยายตัวของโฟมลดลง

4.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในอนาคต

ในโฟมคอมพอสิตของอีวีเอ-พอลิเอทิลีนออกทีน-ยางธรรมชาติในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 70:15:15 พบว่ามีสีเหลืองอ่อนอาจแก้ไขโดยการเพิ่มสารเติมแต่งสี เช่น เติมน้ำ TiO_2 เพิ่มขึ้นจากสูตรเดิมในกรณีต้องการโฟมสีขาว และสารเติมแต่งสีอื่นตามที่ต้องการ

นอกจากนี้ในส่วนของค่า expansion ratio ที่ลดลง อาจแก้ไขโดยเพิ่มเวลาในการนวด/บด (mastication) ให้นานขึ้น รวมถึงการปรับสูตรโดยการเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟอง



ภาพที่ 4.1 โฟมคอมพอสิตของอีวีเอ-พอลิเอทิลีนออกทีน-ยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปแล้ว

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบโฟม PEVA บริสุทธิ์ กับโฟมผสม PEVA/POE/NR ในอัตราส่วน 70:15:15 โดยน้ำหนัก

Properties		Pure PEVA foam	PEVA/POE/NR blends foam	Percentage difference
Expansion ratio (%)		143.95	129.80	-9.83%
Rebound resilience (%)		57	60	+5.26%
Shrinkage (%)		1.97	3.09	+56.9%
Density (g/cm ³)		0.3007	0.4082	+35.7%
Hardness (shore C)		55	59	+7.27%
Tensile strength (MPa)	ASTM D412	3.01	3.55	+17.9%
Elongation (%)		316.5	306.3	-3.22%
Tear strength (N/mm)	ASTM D624	13.36	16.37	+22.5%
	Trouser tear	3.80	4.51	+18.7%
	Split tear	3.41618	3.33608	-2.34%
Abrasion resistance (%)		196	128	-34.7%
Compression set (%)	50°C	70.82	38.04	-46.3%
	Room temperature	16.05	10.86	-32.3%

หมายเหตุ *เลขสีแดง แสดงว่าสมบัติลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hilyard N.C., Cunningham A., A Low Density Cellular Plastics: Physical Basis of Behavior, Chapman and Hall, New York, 1994
- [2] Kim M., Park C., Chowdhury S.R., Kim G., Physical Properties of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (PEVA)/Natural rubber (NR) Blend Based Foam, Journal of Applied Polymer Science, 2004, 94(5), 2212-2216.
- [3] Wang W., Gong W., Zheng B., Preparation of Low-Density Polyethylene Foams with High Rebound Resilience by Blending with Polyethylene-Octylene Elastomer, Polymer Engineering and Science 2013, 53(12), 2527-2534.
- [4] Ghasemi I., Rasmussen H.K., Szabo P., Morshedjian J., An Investigation on Rheology of Peroxide Cross-Linking of Low Density Polyethylene, Iranian Polymer Journal, 2005, 14(8), 715-720
- [5] จินตนา สীগวิวัฒน์, การศึกษาวิธีการหาปริมาณไวนิลแอซีเทตในเอทิลีน-ไวนิลแอซีเทตโคโพลิเมอร์. Retrieved from. http://lib3.dss.go.th/fulltext/Vichakran/vichakran_ped_0059.pdf (accessed 20.06.04)
- [6] ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์, โฟมพลาสติก. Retrieved from. https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238_74-78.pdf (accessed 20.06.04)
- [7] Klemperer D., Frisch K. C., Handbook of Polymeric Foam Technology, Hanser Publisher, New York, 1991
- [8] Woods G., The ICI Polyurethanes book, ICI and John Wiley & Sons, New York, 1987
- [9] Addidas Group Laboratory Procedure Manual (Footwear)
- [10] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย และ ชาศริต สิริสิงห, ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี, 2550
- [11] Najib N.N., Ariff Z.M., Manan N.A., Bakar A.A., Sipaut C.S., Effect of Blowing Agent Concentration on Cell Morphology and Impact Properties of Natural Rubber Foam, Journal of Physical Science, 2009, 20(1), 13-25
- [12] ธงศักดิ์ แก้วประกอบ, อิทธิพลของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ที่มีต่อการหดตัวด้วยความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนไวนิลแอซีเทต, วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551
- [13] สุภิญญา โคตรมา, อิทธิพล แรงขีด, นุชนาฏ ฦ ระนอง, การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมยาง

- [14] Boczkowska A., *Advanced Elastomers – Technology, Properties and Applications*, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2012
- [15] Wang W., Gong W., Zheng B., Improving Viscoelasticity and Rebound Resilience of Crosslinked Low-Density Polyethylene Foam by Blending with Ethylene Vinyl Acetate and Polyethylene-Octene Elastomer, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2016, 22(1), 61-71.
- [16] Ahmad H.S., Ismail H., A. Rashid A., Ethylene Vinyl Acetate as Compatibilizer on Cure Characteristics and Mechanical Properties of (Natural Rubber)/(Recycled Acrylonitrile-Butadiene Rubber) blends. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2017, 23(2), 135-141.
- [17] Posadas P., Fernández-Torres A., Chamorro C., Mora-Barrantes I., Rodríguez A., González L., Valentín J.L, Study on Peroxide Vulcanization Thermodynamics of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Rubber Using 2,2,6,6,-Tetramethylpiperidinyloxy Nitroxide, *Polymer International*, 2013, 62, 909-918.
- [18] Najib N.N, Manan N.A., Ariff Z.M., Azhar A.B., Coswald S.S., Effect of Blowing Agent Concentration on Cell Morphology and Impact Properties of Natural Rubber Foam, *Journal of Physical Science*, 2009, 20(1), 13-25
- [19] จินตนา ลีกิจวัฒน์, การศึกษาวิธีการหาปริมาณไวนิลแอซีเตตในเอทิลีน-ไวนิลแอซีเตตโคโพลิเมอร์ Retrieved from. http://lib3.dss.go.th/fulltext/Vichakran/vichakran_ped_0059.pdf (accessed 20.09.09)
- [20] Dow Chemical Company, ENGAGE™ Polyolefin Elastomers Retrieved from. <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/catalog-selguide/777/777-088-01-engage-polyolefin-elastomer-product-selection-guide.pdf> (accessed 20.09.09)
- [21] Rubber Intelligence Unit, ยางธรรมชาติ (natural rubber) Retrieved from. http://rubber.oie.go.th/box/Article/1300/RIU-NR_1300_1.pdf (accessed 20.09.09)
- [22] Rubber Intelligence Unit, เทคโนโลยีการคงรูปร่าง (vulcanization) Retrieved from. <http://rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=3405> (accessed 20.09.09)
- [23] Class J.B., Dluzneki P.R., Vulcanization of Rubber-B. Peroxides, in: *Basic Elastomer Technology*, The Rubber Division American Chemical Society, Akron, USA 2001, pp. 191-207.
- [24] Precopio F.M., Gilbert A.R., Curable Polyethylene Composition Comprising a Peroxide Containing Tertiary Carbon Atoms and a Filler and Process of Curing Same, Patent US2888424, 1959.

- [25] Gatcher R., Muller H., *Plastics Additives Handbook* 4th Edition, Hanser Publisher, Munich Germany, 1993.
- [26] Sims G. L. A., Jafaar H. A. S., "A chemical blowing agent system (CBAS) based on azodicarbonamide", In *Journal of Cellular Plastic*, 1994, 30, 175-188.
- [27] Jafaar H. A. S., Sims G. L. A., "Thermal decomposition of azodicarbonamide", In *Cellular Polymers*, 1993, 12, 303-316.
- [28] Chen J., Yang L., Chen D., Mai Q., Wang M., Wu L., Kong P., *Cell Structure and Mechanical Properties of Microcellular PLA Foams Prepared via Autoclave Constrained Foaming*, *Cellular Polymers*, 2020, 1-18.
- [29] Elastomer Division JSR Corporation, *JSR Handbook*, JSR Corporation, Tokyo, Japan

ประวัติผู้วิจัย

นายวิศรุต เกียรติมอรวงค์ เกิดเมื่อวันที่ 10 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอัสสัมชัญสมุทรปราการ. จังหวัดสมุทรปราการ เมื่อปีการศึกษา 2559 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2560 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 39/147 ตำบล/แขวงบางแก้ว อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ รหัสไปรษณีย์ 10540 อีเมล jojovisarut1998@gmail.com