

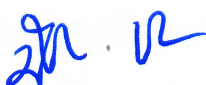
การทดแทนอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ด้วยยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสม
พอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต

สาวิตรี แก้วเกิด

งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

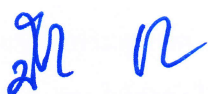
คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณา
งานนิพนธ์ของ สาวิตรี แก้วเกิด ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัย
บูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยฉัตร วัฒนชัย)

คณะกรรมการสอบงานนิพนธ์



..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยฉัตร วัฒนชัย)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สร้อยพัทธา สร้อยสุวรรณ)



..... กรรมการ
(ดร. เสถียรกรณ์ อุปเสน)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของ
มหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 12 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สำเร็จเรียบร้อยด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยฉัตร วัฒนชัย ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีเสมอมา จึงใคร่ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บริษัท โควสโตร (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษา ขอขอบพระคุณผู้บริหาร และบุคคลหลายฝ่าย ในบริษัท โควสโตร (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดระยอง ที่ให้คำปรึกษา และข้อชี้แนะ ในการทำงานนิพนธ์นี้ ให้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ ข้าพเจ้ายังได้รับความกรุณาจากห้องแลป คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนด้านวัสดุ อุปกรณ์ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงคุณสุภกิจ แก้วเกิด และ ค.ญ.ทานิชา ถุนนอก ที่ได้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สาวิตรี แก้วเกิด

57920716: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดลอม; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดลอม)

คำสำคัญ: พอลิคาร์บอเนต/เอบีเอส/ยางธรรมชาติ/คอมโพสิต

สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดลอม; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดลอม)
ในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต (SUBSTITUTE NATURAL RUBBER FOR ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE IN POLYCARBONATE BLENDS AND COMPOSITES) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: ปิยฉัตร วัฒนชัย, Ph.D. 91 หน้า. ปี พ.ศ. 2560

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) แทนอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง (Two mill roll) และใช้ทัลคัม (Talcum) เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) และอะคริลิครีบบเบอร์ (Acrylic rubber) เป็นสารปรับปรุงการทนแรงกระแทก (Impact modifier) โดยการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล อันได้แก่ ความทนแรงกระแทก โมดูลัสยืดหยุ่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความยืดหยุ่น คุณสมบัติทางความร้อน อันได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วและจุดอ่อนตัว คุณสมบัติทางการไหล ซึ่งก็คือ อัตราการไหลโดยปริมาตร และคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลอง พบว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้ยางธรรมชาติแทนเอบีเอส เนื่องจากยางธรรมชาติมีความทนต่อแรงกระแทกที่ดีมาก อีกทั้งยังสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิคาร์บอเนตได้ในปริมาณยางธรรมชาติต่ำ ๆ ที่ 5% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อปริมาณยางธรรมชาติที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณสมบัติต่าง ๆ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางกล ทัลคัมและอะคริลิครีบบเบอร์ ส่งผลให้พอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี แต่ทั้งนี้ ทัลคัมมีการจับตัวเป็นก้อน คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต/ยางธรรมชาติ/ ทัลคัม มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้ดีกับคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต/เอบีเอส/ ทัลคัม นอกจากนี้คุณสมบัติทางความร้อนและทางการไหลยังแสดงให้เห็นว่า การใช้ยางธรรมชาติแทนการใช้เอบีเอสในคอมโพสิตไม่ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ การใช้ยางธรรมชาติผสมกับพอลิคาร์บอเนตทั้งในพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต ที่อัตราส่วนที่เหมาะสมและดีที่สุด คือ ที่ 5% โดยน้ำหนัก

57920716: MAJOR: CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING; M. Eng.
(CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING)

KEYWORDS: POLYCARBONATE/ ABS/ NATURAL RUBBER/ COMPOSITES

SAWITREE KAEWKOET: SUBSTITUTE NATURAL RUBBER FOR
ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE IN POLYCARBONATE BLENDS AND
COMPOSITES. ADVISORY COMMITTEE: PIYACHAT WATTANACHAI, Ph.D., 91 P. 2017

This research investigated the possibility of using Natural Rubber (NR) instead Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) in Polycarbonate (PC) blend and composite. Polycarbonate (PC) blend and composite are prepared by two mill roll technique and Talcum is used as reinforcement and Acrylic rubber as an impact modifier. By studying and comparing mechanical properties such as Izod Impact Strength, Elastic modulus, Tensile strength. Thermal properties, such as Glass Temperature, and Vicat Softening point. Flow properties, ie, volume flow rates and dispersion of polycarbonate blend and composite by Scanning Electron Microscopy. The result shown that it was possible to use natural rubber instead of ABS. Due to the natural rubber has a very good impact resistance. It can also be mixed in the same texture as polycarbonate in low concentration of natural rubber at 5% weight. But when the amount of natural rubber is higher, it will affect homogeneity, which negatively affects the properties especially mechanical properties. Talcum and acrylic rubber are improved the homogeneous of polycarbonate/natural rubber, but the talcum is lumpy. Polycarbonate/ Natural Rubber/Talcum composite had shown the same mechanical properties when compared with composite polycarbonate/ABS/talcum. In addition, thermal and flow properties It also shows that the use of natural rubber instead of ABS in composites, does not affect the product forming process. The use of natural rubber mixed with polycarbonate in both polymer and composite, the optimal ratio and the best ratio is 5% by weight.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของงานนิพนธ์.....	1
วัตถุประสงค์ของงานนิพนธ์.....	3
ขอบเขตการทำงานนิพนธ์.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานนิพนธ์.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
พอลิเมอร์คอมโพสิต.....	5
ส่วนเมตริกซ์.....	7
ส่วนเสริมแรง.....	8
พอลิคาร์บอเนต.....	9
ยางธรรมชาติ.....	14
อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือเอบีเอส.....	27
การเสริมแรงและสารตัวเติม.....	29
คุณสมบัติของเม็ดพลาสติก.....	42
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานนิพนธ์.....	56
วัสดุอุปกรณ์.....	56
สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	57
วิธีดำเนินการวิจัย.....	57
การทดสอบคุณสมบัติของคอมโพสิต.....	60

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลงานนิพนธ์.....	63
ความทนแรงกระแทก.....	63
มอดูลัสยืดหยุ่น.....	64
ความแข็งแรงจุดครากและความแข็งแรงสูงสุด.....	65
ค่าyieldสูงสุด ณ จุดขาด.....	67
อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว.....	68
อุณหภูมิการอ่อนตัว.....	69
อัตราการไหลเชิงปริมาตร.....	70
การศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผลสม/ คอม โพลิตพอลิคาร์บอเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	71
5 สรุปผลงานนิพนธ์และข้อเสนอแนะ.....	74
สรุปผลงานนิพนธ์.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	74
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	88
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 มาตรฐานยางแท่งของไทย.....	17
2-2 การจัดกลุ่มของยางตามค่าความต้านทานต่อการขูด.....	23
3-1 อุปกรณ์และเครื่องมือหลักที่ใช้ในงานวิจัย.....	56
3-2 อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมและคอม โพลีต.....	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน.....	6
2-2 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเทอร์โมเซต.....	7
2-3 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเทอร์โมพลาสติก.....	8
2-4 หน่วยการผลิต ควบแน่น และกำจัดฟอสจีน.....	10
2-5 หน่วยปฏิกิริยาการเกิดพอลิคาร์บอนเนต และหน่วยการล้างพอลิคาร์บอนเนต.....	11
2-6 หน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้น หน่วยการฉีดและการทำเม็ดพอลิคาร์บอนเนต.....	13
2-7 สูตร โครงสร้างของยาง ENR.....	19
2-8 สูตร โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	20
2-9 ลักษณะสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	21
2-10 โมโนเมอร์ที่ใช้ผลิตเอบีเอส.....	28
2-11 โครงสร้างของเขม่าดำ.....	34
2-12 โมเดลแสดงลักษณะ โครงสร้างของซิลิกา.....	36
2-13 การทดสอบการทนแรงกระแทก.....	43
2-14 รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy.....	44
2-15 ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก.....	44
2-16 เครื่องมือทดสอบการทนแรงกระแทกของวัสดุ.....	45
2-17 การจับชิ้นงานในการทดสอบ Tensile Strength.....	46
2-18 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง.....	47
2-19 การหาค่ามอดุลัสในแบบต่าง ๆ	48
2-20 ลักษณะกราฟแรงดึง-ระยะทาง ของวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มต่าง ๆ.....	48
2-21 การเปลี่ยนแปลงลักษณะกราฟแรงดึง-ระยะทาง ของพอลิเมอร์ตามอุณหภูมิ และอัตราการดึงทดสอบ.....	49
2-22 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.....	50
2-23 การทดสอบหาค่าอุณหภูมิอ่อนตัว.....	51
2-24 เครื่องมือทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัว.....	51
2-25 หลักการวัดของ DSC.....	52

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-26 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC.....	54
4-1 ผลการทดสอบความทนแรงกระแทก.....	64
4-2 ผลการทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่น.....	65
4-3 ผลการทดสอบความแข็งแรงจุดคราก.....	66
4-4 ผลการทดสอบความแข็งแรงสูงสุด.....	67
4-5 ผลการทดสอบค่ายืดสูงสุด ณ จุดขาด.....	68
4-6 ผลการทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว.....	69
4-7 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว.....	70
4-8 ผลการทดสอบอัตราการไหลเชิงปริมาตร.....	71
4-9 พอลิเมอร์ผสม/ คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต ด้วยกำลังขยาย 500 1,000 และ 2,000 เท่า...	73

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของงานนิพนธ์

เป็นที่ทราบกันดีว่า พอลิคาร์บอเนต/ เอบีเอสอัลลอยด์ มีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่าง เนื่องจากเกิดจากการนำพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ที่มีข้อดีในเรื่องความแข็งแรง ต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (Impact strength) และความต้านทาน ความร้อน (Heat resistance) มาผสมกับเอบีเอส (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ซึ่งเป็น เทอร์โมพลาสติกและยังจัดเป็นยางสังเคราะห์ประเภทหนึ่งที่มีทั้งความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) นอกจากนี้ยังมีความเงาวาว (Gloss) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย (Process ability) ทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ และทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) รวมทั้งยังมีราคา ถูกกว่าพอลิคาร์บอเนต เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม ที่ได้ มีคุณสมบัติทางกลที่ดีและมีความเหนียวด้วยในขณะเดียวกัน

พอลิเมอร์ผสมและคอม โพลีตพอลิคาร์บอเนตและอะครีโลไนไทรล์-บิวตะไดอิน- สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) หรือ เอบีเอส (ABS) ได้ถูกผลิตมาช้านานแล้ว และถูก นำมาใช้ประโยชน์หลากหลายในปัจจุบัน โดยมีการนำมาใช้แทนอัลลอยด์จำพวกในลอน และพอลิเอสเตอร์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมอีกด้วย ทำให้มีตลาดทางการค้าที่ใหญ่ที่สุดในบรรดา พอลิเมอร์อัลลอยด์ทั้งหลาย ทั้งนี้เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตมีข้อดีในเรื่องความแข็งแรงทางกล ความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (Impact strength) และความต้านทานความร้อน (Heat resistance) แต่เพราะข้อดีเหล่านี้จึงส่งผลให้พอลิคาร์บอเนตขาดความยืดหยุ่น และขึ้นรูปได้ยาก นอกจากนี้ยัง ไม่ทนต่อสารเคมี มีความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และไม่ทนต่อความชื้น ในขณะที่ เอบีเอสเป็นเทอร์โมพลาสติกและยังจัดเป็นยางสังเคราะห์ประเภทหนึ่งที่มีทั้งความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) นอกจากนี้ยังมีความเงาวาว (Gloss) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย (Process ability) ทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ และทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) รวมทั้งยังมีราคา ถูกกว่าพอลิคาร์บอเนต เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน จะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม ที่ได้ มีคุณสมบัติทางกลที่ดีและมีความเหนียวด้วยในขณะเดียวกัน เนื่องจากพอลิคาร์บอเนต และเอบีเอสไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible) ในปัจจุบันจึงมีการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (Compatibilizer) ลงไป ทำให้อัลลอยด์พอลิคาร์บอเนตและเอบีเอสที่ได้มีคุณสมบัติดีขึ้น

อัลลอยด์ชนิดนี้ถูกนำไปใช้งานหลากหลายได้แก่ตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer case) ปรี้นเตอร์ คีย์บอร์ด จอมอนิเตอร์ โทรศัพท์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หน้าปัดรถยนต์ ชิ้นส่วนภายใน และภายนอกรถยนต์ และหมวกนิรภัย เป็นต้น เนื่องจากงานทางวิศวกรรมมีความต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี จึงมีการตัดแปลงอัลลอยด์พอลิคาร์บอเนตและเอปียเอสให้เป็นคอมโพสิต โดยการเติมสารเติมแต่ง เช่น สารเสริมแรงจำพวกเส้นใยแก้ว (Glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยหรืออนุภาคโลหะ และผงแร่ (Mineral fillers) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ อัลลอยด์พอลิคาร์บอเนตและเอปียเอส (RPT company) การเพิ่มซิลิกาลงในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ส่งผลให้ความต้านทานแรงเสียดทาน (Abrasive resistance) สูงขึ้น

เนื่องจากประเทศไทยมีการผลิตยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลกมากกว่า 20 ปี (สถาบันวิจัยยาง) และการส่งออกยางธรรมชาติสร้างรายได้ให้แก่ประเทศสูงถึงเกือบ 400,000 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2554 แต่นับจากนั้นราคายางธรรมชาติในตลาดโลกมีมูลค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบให้รายได้จากการส่งออกยางธรรมชาติเหลือเพียงไม่ถึง 200,000 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2557 นับว่าลดลงมากกว่าร้อยละ 50 ยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) โดยการกรีดลำต้นและนำเอาของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนมเรียกว่าน้ำยางสด หรือน้ำยางดิบ (Latex) ซึ่งประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของสารไอโซพรีน เมื่อผ่านกระบวนการผลิตซึ่งมีการเติมแอมโมเนีย จะทำให้เก็บไว้ได้นานและได้น้ำยางสดเข้มข้น ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า cis-1,4-polyisoprene มีสมบัติต้านทานต่อแรงดึงได้สูง ทนต่อการฉีกขาด ทนต่อการขูดขีด ยืดหยุ่นดี และไม่ละลายน้ำ แต่มีข้อด้อยคือ ยางธรรมชาติจะมีความแข็งและเปราะ ไม่ทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันเบนซิน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่มีเสถียรต่ออนุมูลอิสระ กล่าวคือ จะอ่อนแอกว่าเมื่ออนุมูลอิสระสูงและแข็งเปราะที่อนุมูลอิสระต่ำ ดังนั้นในการนำไปใช้งานจึงต้องมีการเติมสารบ่ม (Curing agent) ที่นิยมใช้คือกำมะถัน สารบ่มนี้จะส่งผลให้ยางเกิดโครงสร้างตาข่าย ส่งผลให้มีความเสถียรต่ออนุมูลอิสระและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในขณะที่เอปียเอสจัดเป็นยางสังเคราะห์ที่เป็นโคพอลิเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยมอนอเมอร์สามชนิด คือ อะครีโลไนไตรล สไตรีน และบิวทาไดอีน เป็นสารที่มีสมบัติคล้ายพลาสติก คือ ไม่ยืดหยุ่นและสามารถทำเป็นรูปทรงต่าง ๆ ตามแม่แบบได้

ยางธรรมชาติที่ผลิตได้ในประเทศไทยถูกนำมาใช้เพียงประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น (สถาบันวิจัยยาง) ส่วนที่เหลือจะถูกส่งออกในรูปยางดิบ ถ้าหากมีการนำยางธรรมชาติมาแปรรูปจะส่งผลให้มีการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมในการผลิตยางสังเคราะห์อีกด้วย อีกทั้งยางธรรมชาติยังสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่ายางสังเคราะห์ การนำยางธรรมชาติมาใช้แทนยางสังเคราะห์จึงถือว่าเป็นการเพิ่มความยั่งยืนทางเศรษฐกิจและลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำยางธรรมชาติมาผสมลงในเอปียเอสเพื่อให้ได้

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ยางพาราอีกด้วย (Caggioni) งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer) หรือทีพีอี โดยการใช้ยางธรรมชาติทดแทนยางสังเคราะห์เอบีเอส ในการผลิตพอลิเมอร์ผสม พอลิคาร์บอเนต รวมทั้งศึกษาการผลิตคอมโพสิตโดยใช้ทัลคัมและอะคริลิครีบบเบอร์ (Acrylic rubber) เป็นสารเติมแต่ง

วัตถุประสงค์ของงานนิพนธ์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการทดแทนเอบีเอสด้วยยางธรรมชาติในคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต
2. ศึกษาผลกระทบของปริมาณยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต
3. ศึกษาผลกระทบของทัลคัม (Talcum) และ อะคริลิครีบบเบอร์ (Acrylic rubber) ในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต
4. ศึกษาผลกระทบของปริมาณทัลคัมในคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต

ขอบเขตการทำงานนิพนธ์

1. เม็ดพลาสติกชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เกรด 24XX จากบริษัททรณีศึกษา
2. เอบีเอส (ABS) ที่ใช้ในการทดลอง จากบริษัททรณีศึกษา
3. ทัลคัมและ อะคริลิครีบบเบอร์ ซึ่งเป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) และสารเพิ่มการทนแรงกระแทก (Impact modifier) จากบริษัททรณีศึกษา
4. Thermal stabilizer A ซึ่งเป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน (Thermal stabilizer) จากบริษัททรณีศึกษา
5. การทดสอบการทนแรงกระแทก (Izod Impact Test) ตามมาตรฐาน ISO180: 2000
6. การทดสอบสมบัติเชิงกลทดสอบค่าความทนแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ISO 527-1
7. การทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass Transition Temperature, Tg) ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
8. การทดสอบอุณหภูมิในการอ่อนตัวของพลาสติก (Vicat Softening Temperature) ตามมาตรฐาน ISO 306
9. การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Volume Rate, MVR) ตามมาตรฐาน ISO 1133

10. ศึกษาการกระจายตัวของพอลิคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตด้วยยางธรรมชาติ
2. สามารถทดแทนและปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์อัลลอยด์ระหว่างพอลิคาร์บอเนตผสมเอปียีเอสด้วยพอลิคาร์บอเนตผสมยางธรรมชาติ
3. สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตและพอลิเมอร์อัลลอยด์พอลิคาร์บอเนตผสมเอปียีเอสด้วยคอมโพสิต
4. เพิ่มทางเลือกในการผลิตพอลิเมอร์อัลลอยด์พอลิคาร์บอเนตซึ่งจะส่งผลต่อการควบคุมต้นทุนการผลิต
5. เพิ่มมูลค่าทางธรรมชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่หนึ่งแล้วว่า เนื่องจากวัตถุประสงค์ในงานนิพนธ์นี้ คือ ศึกษาความเป็นไปได้ในการทดแทนเอปีเอสด้วยยางธรรมชาติในคอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของปริมาณยางธรรมชาติที่ล้นและอะคริลิครีบบเบอร์ในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตด้วย ดังนั้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วย ความรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์คอมโพสิต ส่วนเมตริกซ์ ส่วนเสริมแรง พอลิคาร์บอเนต ยางธรรมชาติ เอปีเอส สารเสริมแรงและสารตัวเติม คุณสมบัติของเม็ดพลาสติก นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ด้วย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พอลิเมอร์คอมโพสิต

คอมโพสิตพอลิเมอร์ (Polymer composites) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้ว จะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อยโดยส่วนใหญ่มักใช้พอลิเมอร์เป็นเมตริกซ์ วัสดุประกอบหรือคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากในปัจจุบัน เป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคอมโพสิตมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความแข็งแรงและค่ามอดูลัสต่อน้ำหนักสูง ขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะและเซรามิก คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็นสามชนิดใหญ่ ๆ ดังนี้

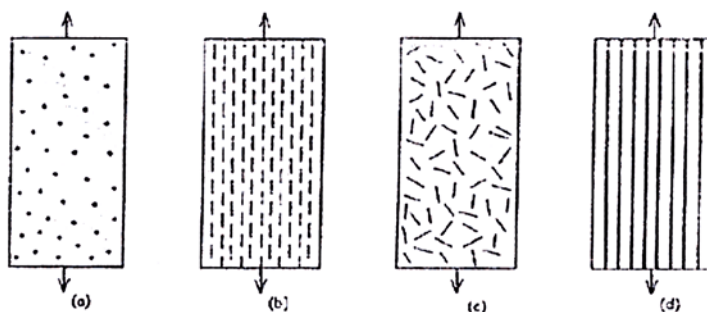
1. คอมโพสิตแบบอนุภาค (Particulate composites) เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการกระจายอนุภาคในเมตริกซ์ ซึ่งอนุภาคจะมีรูปร่างการจัดเรียงตัว และขนาดต่าง ๆ กัน อาจเป็นผง เม็ด หรือผลึก
2. คอมโพสิตแบบลามินาร์ (Laminar composites) เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากการยึดติดระหว่างแผ่นวัสดุกับเมตริกซ์ ในลักษณะคล้ายแซนวิช อัดด้วยความดันสูง ซึ่งจะได้เป็นชั้น ๆ
3. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมตริกซ์ซึ่งเส้นใยอาจเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยอินทรีย์ (Organic fibers) เส้นใยอารามิด (Aramid fibers) เส้นใยแก้ว (Glass fibers) หรือเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

คอมโพสิตจะประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วนดังนี้ (เอื้องดาว จันทร์ดร, 2548)

1. ส่วนเมตริกซ์ (Matrix phase) ซึ่งส่วนนี้จะใช้องค์ประกอบหลักของคอมโพสิตจัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เป็นส่วนที่ช่วยหล่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้

ด้วยกัน โดยทั่วไปเมตริกซ์มักจะมีความเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดุลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง หน้าที่ของเมตริกซ์ในคอมโพสิต ได้แก่ รักษาความเสถียรในรูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต รักษาการกระจายตัวของเส้นใยและแยกไม่ให้เส้นใยมารวมกัน ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำที่ระดับหนึ่ง ๆ สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังเส้นใยได้และช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและช่วยให้มีความเสถียรในตัวกลางต่าง ๆ

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) เป็นวัสดุที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็ก ๆ ก็ได้ ตัวเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibers) อาจจะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้น ดังภาพที่ 2-1 เส้นใยที่ใช้เสริมแรงคอมโพสิต เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น



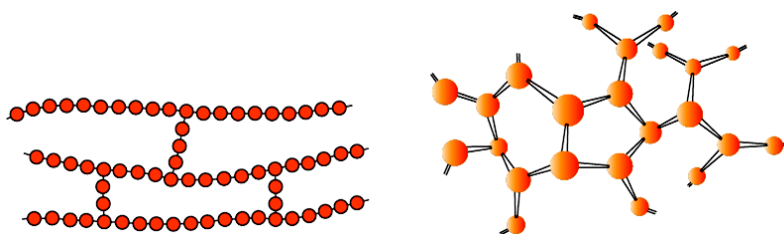
ภาพที่ 2-1 ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงต่างกัน (a) ส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาคจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (b) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (c) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยสั้น จัดเรียงตัวแบบสุ่ม และ (d) ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาว จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (เอื้องดาว จันทรังษี, 2548)

สมบัติของเส้นใยที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมแรง ควรมีลักษณะดังนี้ มีมอดุลัสยืดหยุ่นสูง เพื่อประสิทธิภาพในการเสริมแรง มีความแข็งแรงสูงซึ่งความแข็งแรงของเส้นใยแต่ละเส้นไม่ควรแตกต่างกันมาก มีความเสถียรและรับความแข็งแรงขณะจัดเก็บและขึ้นรูปได้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และพื้นผิวของเส้นใยควรมีลักษณะเหมือนกัน เนื่องจาก ปัจจัยสำคัญของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิต ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของเส้นใย ปริมาตรของเส้นใย ลักษณะรูปร่างของเส้นใยและการจัดเรียงตัวของเส้นใยในคอมโพสิต

ส่วนเมตริกซ์

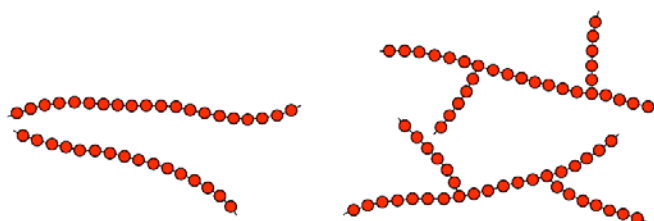
เมตริกซ์มีหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอน (Carbon metrics) เซรามิกซ์ (Ceramic metrics) แก้ว (Glass metrics) โลหะ (Metal metrics) และพอลิเมอร์ (Polymer metrics) งานนิพนธ์นี้จะกล่าวถึงแต่พอลิเมอร์เมตริกซ์เท่านั้น พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. เทอร์โมเซต (Thermoset) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตจะมีรูปทรงถาวร ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมอีกไม่ได้ และไม่ละลายในตัวทำละลาย คือ ไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าก่อนผ่านกระบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห แต่เมื่อผ่านกระบวนการโดยให้ความร้อนหรือความดันเข้าไปจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยง (Cross linking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ ดังภาพที่ 2-2 มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทน ไม่หลอม ไม่ละลาย ถ้าให้ความร้อนมาก ๆ จะไหม้เกรียมและสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อเทอร์โมเซตเรซินที่หลอมเหลวเริ่มแข็งตัวจะเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อที่แน่นอนของโครงร่างแหสามมิติ การเกิดการเชื่อมโยงจะทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานสารละลาย มีเสถียรภาพทางความร้อนและต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี คุณสมบัติเหล่านี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมโยงและน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยง ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้เมตริกซ์มีความแข็งมากหรือมีมอดูลัสยืดหยุ่นสูง แต่ถ้าเกิดการเชื่อมโยงมากแล้วน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ระหว่างการเชื่อมโยงจะลดลง ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้ยาก เกิดความเปราะ มีความเครียดต่ำมีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อยและไม่เหนียว การจัดเรียงตัวของเทอร์โมเซต เช่น พอลิเอสเทอร์เรซิน อีพ็อกซีเรซิน พอลิอิมิดเรซิน ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เป็นต้น (Callister & Rethwisch, 2009)



ภาพที่ 2-2 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเทอร์โมเซต (Callister & Rethwisch, 2009)

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้และเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวหลาย ๆ ครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (Semi-Crystalline thermoplastic) เทอร์โมพลาสติกจะไม่เกิดการเชื่อมโยง ดังนั้น ความแข็งแรงเป็นผลโดยตรงจากคุณสมบัติของหน่วยซ้ำ หรือมอนอเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลที่สูง เทอร์โมพลาสติก ออสัณฐานจะมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งจะส่งผลคล้ายกับการเกิดการเชื่อมโยง และในพอลิเมอร์ที่สามารถตกผลึกได้ก็จะมีการจัดเรียงตัวที่ดี ทำให้เมตริกซ์มีความแข็งแรง สมบัติของ เทอร์โมพลาสติกจะขึ้นกับองศาความเป็นผลึก สัณฐานวิทยาและการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งจะขึ้นกับภาวะในการผลิตการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอไมด์ พอลิสไตรีน พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน พอลิคาร์บอเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ อะคริลิก พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Callister & Rethwisch, 2009) เป็นต้น ข้อดีของการใช้เทอร์โมพลาสติก คือ มีวิธีการผลิตหลายวิธี เวลาในการผลิตน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมเซต ความแข็งแรงในการกดอัดดีหลังจากได้รับแรงกระแทก ไม่ดูดความชื้น ข้อเสียของการใช้เทอร์โมพลาสติก คือ สมบัติเชิงกล ทางเคมีทางความร้อนและทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทางเลือกจำเพาะเจาะจง



ภาพที่ 2-3 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเทอร์โมพลาสติก (Callister & Rethwisch, 2009)

ส่วนเสริมแรง

เส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในคอมโพสิต สามารถแบ่งเป็น

1. เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เมื่อผสมลงในพอลิเมอร์จะทำให้ได้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น ใยแก้วที่นำมาใช้เสริมแรงจะมีลักษณะเฉพาะที่ดี คือ มีความแข็งแรงสูง มีรูปทรงที่เสถียร เป็นฉนวนความร้อน-เย็นได้ดี ไม่ดูด

ความชื้น ทนทานต่อการผุกร่อน ขึ้นรูปง่ายและมีราคาค่อนข้างถูก แก้วที่ใช้สำหรับทำใยแก้ว ที่นับว่าสำคัญที่สุดมีอยู่สองประเภท คือ E (Electrical) glass และ S (High strength) glass

2. เส้นใยธรรมชาติ เป็นอินทรีย์วัตถุที่สำคัญหาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อย ๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิตและเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่น ๆ

พอลิคาร์บอเนต (POLYCARBONATE, PC)

ไบเออร์ไทย (2553) ได้อธิบายกระบวนการผลิตกล่าวว่า พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เป็นพอลิเอสเทอร์ของกรดคาร์บอนิกที่มีหน่วยไดออล (Carbonic acid with a diol) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารบิสฟีนอล เอ (4,4 Dihydroxy diphenyl-2,2 propane or Bisphenol A, BPA) ในรูปของสารละลายโซเดียมบิสฟีนอเลต (Na-BPA) กับฟอสจีน (Phosgene) ในตัวทำละลายผสมของเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) และคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene, CB) โดยจะได้เกลือ (Sodium chloride, NaCl) เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม

1. ขั้นตอนการผลิตพอลิคาร์บอเนต

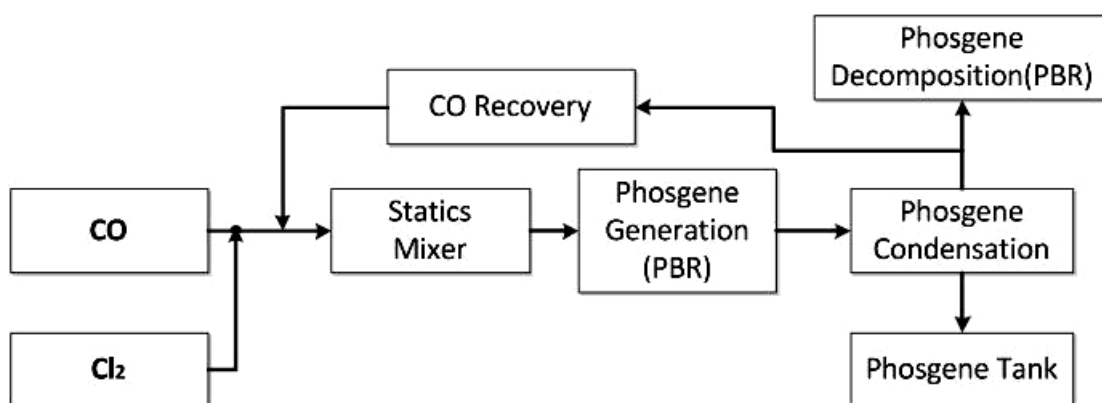
1.1 หน่วยการผลิต ควบแน่น และกำจัดฟอสจีน (Phosgene generation, Condensation and Decomposition)

ในการผลิตฟอสจีน ก๊าซคลอรีน (Cl_2) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นฟอสจีนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไหลต่อเนื่อง (Packed bed reactor) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อหลาย ๆ ท่อขนานกัน ภายในท่อจะบรรจุด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจะมากกว่าปริมาณตามทฤษฎี ประมาณร้อยละ 2-3 และนำระบบดึงก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO Recovery) มาใช้ เพื่อให้อัตราป้อนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง รวมถึงลดการระบายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สู่บรรยากาศ (ความเข้มข้นต่ำเดิม) หลักการของการนำคาร์บอนมอนอกไซด์กลับมาใช้มีรายละเอียดดังนี้

เนื่องจากปฏิกิริยาของการเกิดฟอสจีน คือ หนึ่งโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับหนึ่งโมลของคลอรีน และเกิดเป็นฟอสจีน หนึ่งโมล แต่เพื่อป้องกันการเหลือของ

คลอรีน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ จึงต้องป้อนคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เกินพอ ประมาณร้อยละ 2

ระบบการนำคาร์บอนมอนอกไซด์กลับมาใช้ จะสามารถลดอัตราส่วนการป้อนคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อคลอรีนลงได้จาก 1.02 เหลือ 1.01 ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาจะเป็นก๊าซผสม ระหว่างฟอสจีนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลืออยู่ (เนื่องจากใช้เกินปริมาณตามทฤษฎี) และอาจมีก๊าซคลอรีนปะปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องทำให้ฟอสจีนอยู่ในรูปของของเหลว ดังนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องควบแน่นโดยการลดอุณหภูมิลงเป็น -27°C (ใช้เมธิลีนคลอไรด์ เป็นสารหล่อเย็น) หลังจากนั้น ฟอสจีนเหลวจะถูกส่งไปยังถังพักซึ่งมีการหล่อเย็นด้วย เมธิลีนคลอไรด์ เช่นกัน โดยที่ถังพักนี้จะไม่ทำหน้าที่ในการเก็บกักฟอสจีนเหลว แต่จะมีไว้เพื่อควบคุมอัตราการไหลของฟอสจีนไปยังส่วนอื่น ๆ ของกระบวนการให้มีค่าคงที่เท่านั้น (โดยปกติจะควบคุมให้ถังพักนี้มีปริมาณฟอสจีนอยู่ที่ร้อยละ 60 ของปริมาตรทั้งหมด) ดังภาพที่ 2-4



Packed bed reactor (PBR)

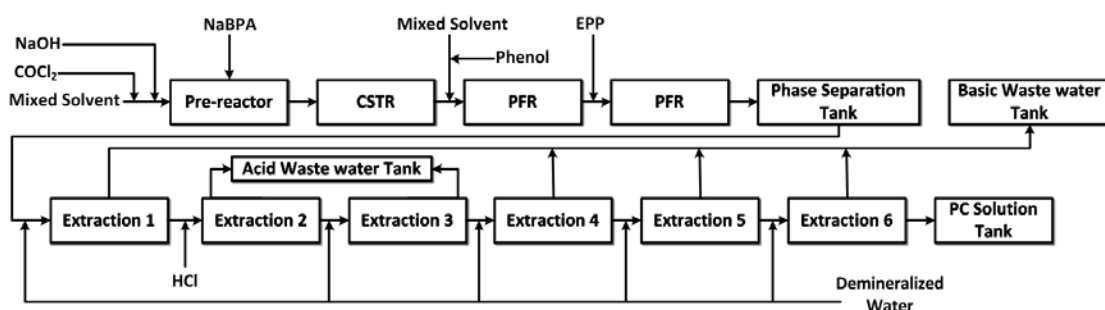
ภาพที่ 2-4 หน่วยการผลิต ควบแน่น และกำจัดฟอสจีน

1.2 หน่วยปฏิกิริยาการเกิดพอลิคาร์บอนเนต

ปฏิกิริยาการเกิดพอลิคาร์บอนเนต (PC Reaction) จะใช้ตัวทำละลายผสมเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น สารตั้งต้นและสารเติมแต่งทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์พร้อมกัน ประกอบด้วย ฟอสจีนเหลว สารละลายโซเดียมบิสฟีนอลเอต ตัวทำละลายผสมระหว่าง เมธิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride; MC) และคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene; CB) สารเร่งปฏิกิริยาเอทิลไพเพอริดีน (Ethyl piperidine) สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งใช้

สลายฟอสจีนที่เกินมา และฟีนอลใช้เป็นสารควบคุมความยาวสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิคาร์บอเนตตามต้องการ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยานอกจากพอลิคาร์บอเนตแล้ว ยังมีสารอนินทรีย์ประเภทเกลือแกง (NaCl) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกริยาสปอนนิฟิเคชัน (Sponification) ของฟอสจีนที่ไม่ทำปฏิกริยากับบิสฟีนอล เอ สารอนินทรีย์เหล่านี้ละลายอยู่ในเฟสของน้ำและแยกตัวออกจากเฟสของตัวทำละลายอินทรีย์ที่พอลิคาร์บอเนตละลายอยู่ องค์ประกอบของก๊าซเสียที่ระบายออกจากหน่วยนี้จะเหมือนกับของหน่วยการผลิต ควบแน่น และกำจัดฟอสจีนจากนั้นจะถูกส่งไปบำบัดที่หอกำจัดฟอสจีนเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2-5 หน่วยปฏิกริยาการเกิดพอลิคาร์บอเนตและหน่วยการล้างพอลิคาร์บอเนต

1.3 หน่วยการล้างพอลิคาร์บอเนต

สารละลายพอลิคาร์บอเนตจากถังปฏิกริยาจะผ่านมายังหน่วยการล้างพอลิคาร์บอเนต (PC Washing) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังล้าง 6 ชั้นต่อกัน โดยในถังแรกจะเป็นถังแยกเฟสเพื่อแยกเฟสที่เป็นสารละลายน้ำออกจากสารละลายของตัวทำละลาย น้ำที่แยกได้นี้จะมีสภาพเป็นด่างเล็กน้อย และถูกส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย เรียกว่าน้ำเสียด่าง (Basic wastewater) ส่วนสารละลายพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากการแยกเฟสครั้งแรกจะส่งไปยังถังล้างที่ 2 ซึ่งในถังนี้จะมีการเติมกรดไฮโดรคลอริกเจือจางลงไป เพื่อสกัดเอาสารเร่งปฏิกริยา EPP ออกจากเฟสของตัวทำละลาย น้ำเสียด่างนี้มีสภาพเป็นกรด (Acidic wastewater) และส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย

สารละลายพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากถังล้างที่ 2 จะส่งต่อไปยังถังล้างที่ 3 ซึ่งทำหน้าที่เดียวกับถังล้างที่ 2 ทุกประการ ยกเว้นที่ไม่ต้องเติมกรดในการล้าง น้ำเสียด่างที่แยกได้จากถังที่ 3 จะมีสภาพเป็นกรด และถูกส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย สารละลายพอลิคาร์บอเนตที่ได้จะส่งต่อไปยังถังล้างที่ 4, 5 และ 6 จะใช้น้ำปราศจากประจุ (Demineralized water) ในการล้างสารละลาย

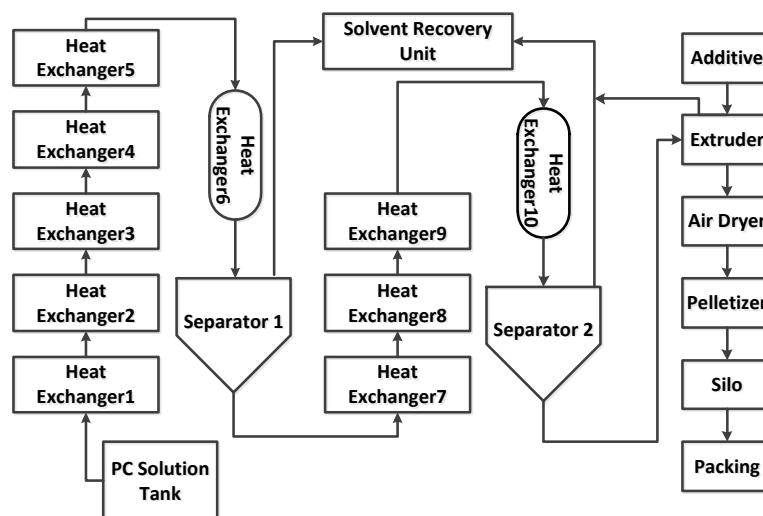
พอลิคาร์บอเนตที่ผ่านขั้นตอนการล้างแล้ว จะถูกส่งไปยังถังเก็บสารละลายพอลิคาร์บอเนต (PC Tank) ดังภาพที่ 2-5

1.4 หน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้นของพอลิคาร์บอเนต

สารละลายพอลิคาร์บอเนตที่ล้างแล้วจาก PC Tank จะส่งไปยังหน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้น (PC Pre-concentration) ซึ่งเป็นหน่วยที่ประกอบด้วย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) และเครื่องแยก (Separator) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารละลายพอลิคาร์บอเนต เพื่อระเหยตัวทำละลายออก ทำให้สารละลายพอลิคาร์บอเนตเข้มข้นขึ้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60-70

หน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้นประกอบไปด้วย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ไอน้ำและเครื่องระเหยสองชุดทำงานอย่างต่อเนื่อง สารละลายพอลิคาร์บอเนตจะผ่านเข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชุดแรกเพื่อรับความร้อนจากไอน้ำก่อนจะเข้าสู่เครื่องระเหยที่ทำงานที่อุณหภูมิ 110°C เพื่อระเหยเอาตัวทำละลายส่วนหนึ่งออกไป ซึ่งสารละลายพอลิคาร์บอเนตจากเครื่องระเหยชุดแรกนี้จะมีความเข้มข้นของพอลิคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 40 หลังจากนั้นสารละลายพอลิคาร์บอเนตจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชุดที่สองเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำและเข้าสู่เครื่องระเหยชุดที่สองซึ่งทำงานที่อุณหภูมิ 180°C เพื่อระเหยตัวทำละลายออกอีกส่วนหนึ่ง และทำให้สารละลายพอลิคาร์บอเนตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นร้อยละ 60-70 สารละลายพอลิคาร์บอเนตเข้มข้นจากหน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้นจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยการนึ่ง หน่วยเพิ่มความเข้มข้นขั้นสุดท้ายและการทำเม็ดพอลิคาร์บอเนตดังภาพที่ 2-6

ในกรณีของการดำเนินการผลิตที่สารละลายพอลิคาร์บอเนตมีความเข้มข้นและคุณภาพไม่ตรงตามที่ต้องการ สารละลายพอลิคาร์บอเนตส่วนนี้จะถูกส่งไปทำละลายใหม่โดยใช้ตัวทำละลายผสมที่ได้จากการควบแน่น แล้วส่งกลับไปยังถังป้อนสารหมุนเวียน (Recycle tank) และถังเก็บสารละลายพอลิคาร์บอเนต (PC solution tank) ในลานถัง



ภาพที่ 2-6 หน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้น หน่วยการฉีดและการทำเม็ดพอลิคาร์บอเนต

1.5 หน่วยการฉีดและการทำเม็ดพอลิคาร์บอเนต (PC Extrusion and Granulation)

สำหรับหน่วยการผลิตนี้ในโรงงานผลิตพอลิคาร์บอเนต จะมีการเติมสารเติมแต่ง เพื่อให้ได้พอลิคาร์บอเนตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เข้ามาผสมกับสารละลายพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากหน่วยเพิ่มความเข้มข้นเบื้องต้นเพื่อทำการหลอมใหม่ ซึ่งจะถูกส่งเข้าเครื่องฉีด (Extruder) ที่มีส่วนให้ความร้อน เพื่อทำให้ตัวทำละลายที่หลงเหลืออยู่ (ส่วนใหญ่จะเป็นสารคลอโรเบนซีน) ระเหยออกไป โดยระบบการแยกตัวทำละลายส่วนนี้จะประกอบไปด้วยสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการระเหยด้วยความร้อนที่ความดันปกติ และการระเหยที่สุญญากาศ โดยตัวทำละลายที่ระเหยออกไปนี้จะถูกควบแน่น และนำไปเก็บในถังเก็บตัวทำละลายผสมในลานถังเก็บสารอินทรีย์ สารละลายพอลิคาร์บอเนตเมื่อถูกแยกตัวทำละลายออกไปหมดแล้วจะเป็นสารพอลิคาร์บอเนตบริสุทธิ์ เมื่อผ่านเครื่องฉีดแล้วจะมีสภาพเป็นของเหลวหนืดและถูกฉีดออกเป็นเส้น จากนั้นพอลิคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปของเหลวจะถูกทำให้เย็นลงด้วยน้ำและทำให้แห้งด้วยการเป่าอากาศ และผ่านไปยังเครื่องตัดเม็ด (Pelletizer) เพื่อให้ได้เม็ดพลาสติกต่อไป จากนั้นเม็ดพลาสติกจะผ่านเครื่องคัดขนาด และขนส่งด้วยระบบท่อลมไปเก็บไว้ที่ไซโล (Silo) ลมที่ใช้จะเป็นอากาศ ซึ่งเมื่อผ่านออกจากไซโลแล้วอากาศส่วนนี้จะถูกกรอง ด้วยแผ่นกรองก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศดังภาพที่ 2-6

1.6 หน่วยการเก็บและการบรรจุผลิตภัณฑ์พอลิคาร์บอเนต (Silo farm and Packaging)

เม็ดพอลิคาร์บอเนตที่ได้จะถูกเก็บไว้ในไซโล เพื่อผสมผสานให้มีคุณภาพเดียวกัน และผ่านการคัดแยกคุณภาพอีกครั้ง ก่อนการบรรจุในถุงหรือกล่อง การขนถ่ายเม็ดพลาสติกทั้งหมด จะใช้ระบบลมผ่านทางตัวป้อนแบบหมุน (Rotary feeder) ซึ่งอากาศที่ใช้ในการขนถ่ายจะถูกกรอง เพื่อตัดเอาอนุภาคของเม็ดพอลิคาร์บอเนตที่อาจหลุดปะปนออกก่อนระบายสู่บรรยากาศ

2. สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิคาร์บอเนต

สมบัติที่เด่นที่สุดของพอลิคาร์บอเนต คือ ความเหนียว ความใสและมีอุณหภูมิการอ่อนตัวภายใต้แรงกดสูง การประยุกต์ใช้งานจะใช้ความเด่นเหล่านี้เป็นเกณฑ์แต่ข้อด้อยของพอลิเมอร์นี้มีหลายประการ เช่น ไม่ทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากแสงยูวี ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และสูญเสียสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ชิ้นงานจะเกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย (Callister & Rethwisch, 2009) ซึ่งจะมีผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความใส เช่น ทำกระจกนาฬิกา หรือเลนส์แว่นตา

ในทางอุตสาหกรรมมีการผลิตพอลิคาร์บอเนตหลายเกรด เช่น เกรดที่ใช้งานทั่วไปเกรดที่ใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์อาหาร เกรดที่มีการผสมผสาน (Blend) กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น และเกรดผสมเส้นใยแก้ว เพื่อใช้ในงานที่ต้องการการหดตัวของชิ้นงานต่ำและมีค่ามอดูลัสสูง กระบวนการแปรรูปพอลิคาร์บอเนตใช้กระบวนการแปรรูปทั่ว ๆ ไปที่ใช้ในการแปรรูปพลาสติก คือ การอัดรีด การฉีดเข้าเบ้า การทำขึ้นรูปด้วยความร้อน และการเป่า เป็นต้น พอลิคาร์บอเนตมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงจึงทำการแปรรูปยาก แต่พอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่ไวต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมไหลได้ดีขึ้น การประยุกต์ใช้งานพอลิคาร์บอเนต มักจะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เช่น ทำแถบสะท้อนแสง ไฟหน้า เลนส์ครอบไฟรด กล้องของมิเตอร์ กันชน และฝาครอบล้อ เป็นต้น และในอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทำข้อต่อ และตัวครอบจอยคอมพิวเตอร์ (ฐิติพร เพชรอุดม, 2550)

ยางธรรมชาติ (NATURAL RUBBER, NR)

1. รูปแบบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติหรือยางพารา ส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Brazillensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ประมาณ 30% (โดยน้ำหนัก) แฉวนลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางแห้งขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่

1.1 น้ำยาง

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็น 60% โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น โปรตีน และฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเชื้อแบคทีเรียได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบูดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียลงไป หรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่น ๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นเก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียวจะต้องใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงถึง 0.7% น้ำยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า High Ammonia Latex หรือ HA latex ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นต่ำเพียง 0.2% หรือใช้ Santobrite 0.2% เป็นต้น ซึ่งน้ำยางชนิดหลังนี้เรียกว่า Low Ammonia Latex หรือ LA latex

น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยาง โดยทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางจะต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถกำจัดน้ำออกได้ง่าย นั่นคือ ผลิตภัณฑ์นั้นต้องบาง หรือมีรูพรุนเพื่อให้ น้ำระเหยออกได้ง่ายตามรูพรุนเหล่านั้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง จุกหัวนม เบ้าหล่อปูนปลาสเตอร์ ฟองน้ำที่นอน และหมอนฟองน้ำ เป็นต้น

1.2 ยางแห้ง

ยางแห้งได้จากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกจากตัวน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

1.2.1 ยางแผ่น (Rubber Sheet)

ยางแผ่นได้จากการนำน้ำยางสดมาใส่ในตะกุง จากนั้นจึงเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเหลือเพียงประมาณ 12-18% ก่อนทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกตัวออกจากน้ำ หากทำการเจือจางมากก็จำเป็นต้องใช้กรดมากเช่นกัน โดยทั่วไปอนุภาคของน้ำยางจะเริ่มจับตัวกันหลังจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำยางอยู่ในช่วง 5.1-4.8 เรียกจุดนี้ว่า “จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point)” หลังจากนั้นจึงนำยางที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้ง นำไปล้างน้ำ แล้วจึงทำให้ง่ายแห้ง ซึ่งการทำให้ง่ายแห้งนี้อาจทำได้สองวิธี คือ

1) นำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air Dried Sheet, ADS) และ 2) นำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-72 °C เป็นเวลาประมาณ 2-3 วัน ยางแผ่นรมควันแบ่งออกเป็นชั้นต่าง ๆ ด้วยสายตาตามปริมาณสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนในยาง ตั้งแต่ชั้นที่หนึ่ง ซึ่งจัดว่าเป็นเกรดดีที่สุด ถึงชั้นที่ห้าซึ่งเป็นเกรดที่ต่ำที่สุด ส่วนยางแผ่นไม่รมควันมีชั้นเดียว หากตกชั้นก็ต้องนำไปรมควันต่อไป ภายหลังจากที่ยางแผ่นแห้งสนิท ยางแผ่นเหล่านี้ก็จะถูกนำมาอัดให้เป็นก้อน ๆ ละประมาณ 113 กิโลกรัม และก่อนส่งออกจำหน่ายก็จะมี การทาทัลคัม (Talcum) ที่บริเวณพื้นผิวของก้อนยาง เพื่อป้องกันการเกาะติดกันในระหว่างการขนส่ง ปัจจุบัน ประเทศไทยส่งออกยางพาราในรูปยางแผ่นรมควันมากที่สุดในโลก โดยมี ประเทศคู่ค้าหลัก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น ฯลฯ

1.2.2 ยางเครฟ (Crape rubber)

ยางเครฟส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยาง (เช่น ยางก้อนถ้วย เศษยางที่ติดบนเปลือกไม้หรือติดบนดิน หรือเศษจากยางแผ่นรมควัน เป็นต้น) ไปรีดในเครื่องเครฟ (Creping machine) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกไปจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำยางแผ่นที่ได้ไปผึ่งลมให้แห้ง โดยทั่วไปยางเครฟที่ผลิตได้มีหลายรูปแบบ เช่น Brown crepe, Flat bark crepe และ Blanket crepe เป็นต้น ซึ่งยางเครฟเหล่านี้มีสีค่อนข้างเข้ม และมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต

ส่วนยางเครฟขาว ซึ่งจัดเป็นยางเครฟเกรดพิเศษที่นำมาจากน้ำยาง โดยทั่วไปแล้ว ในน้ำยางจะมีสารเบต้าแคโรทีน (β -carotene) ทำให้ยางมีสีเหลืองอ่อน ดังนั้น หากต้องการผลิตยางเครฟที่มีสีขาวจึงจำเป็นต้องกำจัดสารให้สีดังกล่าวออกไป โดยการฟอกสีน้ำยางเวียสารเคมี เช่น Xylyl mercaptane (0.05 wt%) หรือ Tolylyl mercaptan (0.05 wt%) และ Sodium bisulfate (0.5-0.75 wt%) ก่อนที่จะทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันเป็นก้อน

1.3 ยางแท่ง (Technically classified rubber)

เนื่องจากยางแผ่นและยางเครฟมีการจัดชั้นด้วยสายตา ซึ่งให้ผลที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางแทน ทั้งนี้ เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่น และยางเครฟ ผ่านการทดสอบและจัดชั้น เพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแท่งจะพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ นอกจากนี้ก็อาจพิจารณาตัวแปรอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ปริมาณเถ้า คำนีความอ่อนตัว ฯลฯ ปัจจุบันประเทศไทยมีมาตรฐานยางแท่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ซึ่งแต่เดิมเรียกว่า Thai Tested Rubber (TTR) ตารางที่

2-1 แสดงข้อกำหนดในมาตรฐานยางแท่ง STR ซึ่งจะเห็นได้ว่ายางแท่งของไทยแบ่งเป็นหลายเกรด โดยอาศัยปริมาณของสิ่งสกปรกเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2-1 มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber Scheme)

ข้อกำหนด	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรก ที่เหลืออยู่บนช่องขนาด 44 ไมครอน (max 5 wt.)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า (max 5 wt.)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (max 5 wt.)	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสารละลายได้ (max 5 wt.)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่า Plasticity เริ่มต้น (P) (min.)	35	35	30	-	30	-	30	-
ค่า Plasticity Retention Index (PRI) (min.)	60	60	60	60	50	50	40	40
สี (Lovibond scale) (max.)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืดมูนนี่ ML 1+4@ 100 °C	-	-	-	*	-	**	-	***
สีของเครื่องหมาย	สีน้ำเงิน บนพื้น สีขาว	สีเขียว อ่อน	สีเขียว อ่อน	สีขาวบน พื้นสี เขียวอ่อน	สี น้ำตาล บนพื้น สีขาว	สีขาว บนพื้น สีน้ำตาล	สีแดง บนพื้น สีขาว	สีขาว บนพื้น สีแดง
สีของแผ่นฟิล์มพอลิ เอทิลีน (LDPE) ที่ใช้								
ห้อยยาง	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาวใส
สีของแถบพอลิเอทิลีน	ขาวใส	ขาวใส	ขาวทึบ	ขาวใส	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาวทึบ

ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตขึ้นมาโดยอาศัยหลักการคร่าว ๆ ดังนี้คือ เริ่มต้นนำยางมาทำให้เป็นก้อนเล็ก ๆ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. เพื่อให้ง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปด้วยน้ำและง่ายต่อการทำให้แห้งในขั้นตอนถัดไป หลังจากอบยางให้แห้งด้วยอากาศร้อนแล้ว ก็จะนำยางแห้งที่เป็นก้อนเล็ก ๆ เหล่านี้ไปอัดให้เป็นแท่งขนาดมาตรฐาน 330 x 670 x 170 มม. ที่มีน้ำหนักประมาณ 33.33 กิโลกรัม

วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR XL หรือ STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก (L ย่อมาจาก Light และ XL ย่อมาจาก extra light) จำเป็นต้องใช้ น้ำยางเป็นวัตถุดิบและใช้กรดฟอร์มิคในการทำให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันได้สภาวะที่มีการควบคุมอย่างดี หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 10 หรือ STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสิ่งเจือปนสูงและมีสีเข้มกว่า ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือเศษยาง/ชียางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยาก ต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

1.4 ยางแท่งรูปแบบอื่น ๆ

นอกจากรูปแบบต่าง ๆ ของยางธรรมชาติดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยางธรรมชาติยังสามารถผลิตให้อยู่ในรูปแบบอื่น ๆ ได้อีก เช่น

ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV (Constant viscosity) เนื่องจากยางแท่งเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน ๆ ยางจะเริ่มแข็งขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Storage hardening” ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดจากหมู่อัลดีไฮด์ (Aldehyde group) ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติเข้าไปทำปฏิกิริยาควบแน่นกันเกิดเป็นโครงสร้างสามมิติที่มีการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลยาง การที่ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก Storage hardening นี้จะแตกต่างจากการที่ยางแข็งขึ้นเนื่องจากการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) เพราะการแข็งขึ้นอันเนื่องจากการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ เป็นปรากฏการณ์ที่ย้อนกลับได้ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกในยางก็จะสลายไป ยางก็จะอ่อนตัวลง แต่การแข็งขึ้นอันเนื่องมาจาก Storage hardening เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ย้อนกลับ การเติมสารเคมี เช่น Hydroxylamine ลงไปในน้ำยางก่อนที่จะทำการเติมกรดจะช่วยป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ Storage hardening ได้ เนื่องจากสารเคมีดังกล่าวจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อัลดีไฮด์ จึงป้องกันการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ดังนั้นยางที่ได้จึงมีค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา เรียกยางดังกล่าวว่ายาง CV (Constant viscosity)

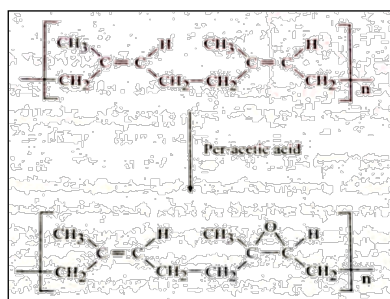
ยางที่แปรรูปได้ดี (Superior Processing Rubber, SP/PA grade) ยางชนิดนี้ได้จากการนำน้ำยางทั่วไปมาผสมกับน้ำยางที่เกิดจากการเชื่อมโยงของโมเลกุลบางส่วน (Partially crosslinked) จากนั้นจึงทำการเติมกรดให้ยางจับตัวกันแล้วจึงทำให้แห้งต่อไป ในกรณีที่นำน้ำยางทั่วไปมาผสมในสัดส่วนที่มากกว่า เช่น ผสมด้วยอัตราส่วน 80 : 20 หรือ 60 : 40 โดยน้ำหนัก ยางที่ได้จะเรียกว่า ยาง SP20 หรือ SP40 ตามลำดับ แต่สำหรับยางเกรดที่ได้จากการนำน้ำยางที่เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลบางส่วนมาผสมกับน้ำยางทั่วไปในสัดส่วนที่สูงกว่า 50% จะเรียกยางที่ได้ว่ายาง PA เช่น

ยาง PA80 หมายถึงยางที่ได้จากการใช้น้ำยางทั่วไป 20% ผสมกับน้ำยางที่เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลบางส่วน 80% เป็นต้น โดยทั่วไป ยางชนิดนี้จะมีสมบัติด้านการแปรสภาพที่ดีโดยเฉพาะการแปรรูปด้วยเทคนิคการอัดผ่านคाय การฉีด หรือการรีดด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์

ยางที่ผสมน้ำมัน (Oil Extended Natural Rubber, OENR) ยาง OENR คือ ยางธรรมชาติที่ผสมกับน้ำมันเนฟธาอิก (Naphthenic oil) หรือน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) ประมาณ 5-40 phr (Parts per hundred of rubber)

ยางธรรมชาติที่มีโปรตีนต่ำ (Deproteinized Natural Rubber, DPNR) เนื่องจากในยางธรรมชาติมีโปรตีนบางชนิดที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่แพ้โปรตีนดังกล่าวได้ โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ผู้ใช้ต้องสัมผัสกับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยตรง เช่น ถุงมือยาง เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนายางธรรมชาติเกรดใหม่ที่เรียกว่ายาง DPNR ซึ่งก็คือยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพื่อกำจัดโปรตีนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติออกไป ยางเกรดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่ายาง LN-NR (Low Nitrogen Natural Rubber) วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดโปรตีน ได้แก่ การย่อยสลายโปรตีนด้วยเอนไซม์ (Proteolytic enzymes) เช่น เอนไซม์ปาเปอีน (Papain) หรืออาจใช้ด่าง (Alkaline hydrolysis) หรือใช้น้ำร้อนในการกำจัดโปรตีนออกไป

ยาง ENR (Epoxidized Natural Rubber) ยาง ENR เป็นยางชนิดใหม่ที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางตรงบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) โดยมีระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันตั้งแต่ 10-50% ซึ่งมีโครงสร้างในภาพที่ 2-7 ยาง ENR ที่ได้จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ยางจึงทนต่อความร้อนและน้ำมัน ได้ดีขึ้น โดยที่ยางเกรดที่มีระดับของอีพอกซิเดชันสูงถึง 50% จะมีความเป็นขั้วสูงเทียบเท่ากับยาง NBR ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่ายาง ENR ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจะมีสมบัติคล้ายกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำอีกด้วย



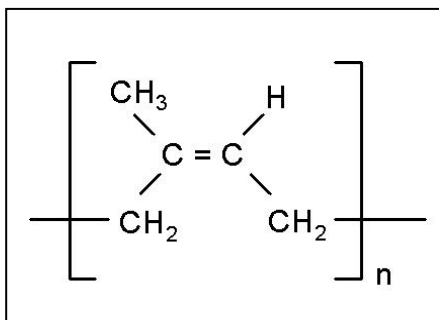
ภาพที่ 2-7 สูตรโครงสร้างของยาง ENR

ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic NR) ยางเทอร์โมพลาสติกจัดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ได้จากการนำยางธรรมชาติมาผสมกับพลาสติกบางชนิด เช่น โพลีโพรพิลีน (PP) และหลังจากทำการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยสารเคมีบางชนิดก็จะได้ยางเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติต่าง ๆ คล้ายยางแต่มีกระบวนการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติก

ยางผง (Powdered rubber) ยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปผงจะสะดวกต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ยางผงมีราคาแพงกว่าแผ่นหรือยางแท่ง ดังนั้น ยางผงจึงไม่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมยางมากนัก

2. โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2-8 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72°C นั้นหมายความว่า หากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -72°C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว

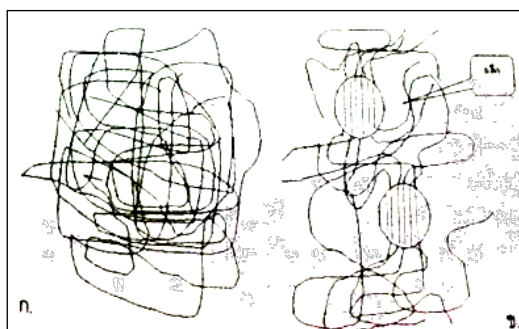


ภาพที่ 2-8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 2-8 จะเห็นว่าในหนึ่งหน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -methylene) ที่วางไว้ออกไปเพื่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์อยู่ ดังนั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือ โอโซน ทำให้ยาง

เกิดการเสื่อมสภาพ หรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจน คลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยาง (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่าง ๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

โดยทั่วไป ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของ โมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลของยางบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ (ดูภาพที่ 2-9 ประกอบ) การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่า “Low temperature crystallization” จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C เป็นเวลานาน โดยยางจะมีอัตราเร็วในการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ -26°C การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่น ๆ ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ ประเทศในเมืองหนาวจึงต้องนำยางธรรมชาติมาอบที่อุณหภูมิประมาณ $50-70^{\circ}\text{C}$ เพื่อทำให้ยางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวหรือที่เรียกว่า Strain-induced crystallization จะพบเมื่อยางถูกยืดจนมีความยาวมากกว่าความยาวตั้งต้นประมาณ 2-3 เท่า การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวของยางจะทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ ยางจะเปลี่ยนจากสภาพโปร่งแสง (Transparent) ไปเป็นทึบแสง (Opaque) ซึ่งจะสังเกตได้ง่ายในยางคงรูปที่ไม่มีสารเติมสารตัวเติม นอกจากนี้ การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขูดถูสูงขึ้น



ภาพที่ 2-9 ลักษณะสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ (ก) ในสภาวะปกติ (ข) ในสภาวะที่ถูกยืด

3. สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

3.1 ความยืดหยุ่น (Elasticity) คุณสมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

3.2 ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3.3 ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (ประมาณ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

3.4 ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

3.5 สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

3.6 ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงดีกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การจัดกลุ่มของยางตามค่าความต้านทานต่อการขูด

กลุ่มที่	ความต้านทานต่อการขูด	ยาง
1	สูงมาก	ยางพอลิยูรีเทน (AU/EU) ยางบิวตาไดอิน (BR) ยางสไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) ยางไนไตรล์ (NBR) และ ยางธรรมชาติ (NR)
2	สูง-สูงมาก	ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ยางคลอโรพรีน (CR) และยางคลอโรซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน (CSM)
3	สูง	ยางบิวไทล์ (IIR) ยางเอทิลีนอะคริลิก (Ethylene acrylic elastomer) และยางเอทิล ไวนิลอะซิเตต (Ethyl vinyl acetate elastomer)
4	ต่ำ	ยางซิลิโคน (Q)

3.7 ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{16} หรือ 10^{16} ohm.cm

3.8 ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and Chemical resistance)
เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงจะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซิน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

3.9 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties)
เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนนาน ๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวใน

ทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

3.10 การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ที่ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียงสองชนิด คือ ยางบิวตาไดอิน (BR) และยางซิลิโคน (Q)

3.11 Compression set ยางธรรมชาติมีค่า Compression set ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่า Compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไปในขณะที่ค่า Compression set ที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติ Compression set ค่อยลงด้วย

3.12 การกระด้างกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่น ๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

3.13 อุณหภูมิของการทำงาน (Service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C จนถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนาน ๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ก็จะค่อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วง ๆ เท่านั้น)

4. การผสมเคมียาง

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการทำงานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยสมบัติต่าง ๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวยืดเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง ยางผสมที่ได้หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ายาง

คอมพาวด์ (Rubber compound) จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการคงรูปยางหรือในทางเทคนิคจะเรียกว่ากระบวนการวัลคาไนซ์เซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate)” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

เนื่องจากชนิดของสารเคมีและหลักเกณฑ์ในการเลือกใช้สารเคมีและสารตัวเติมในการผสมเคมียางนั้นมีรายละเอียดค่อนข้างมาก และเนื้อหาดังกล่าวก็อยู่นอกเหนือขอบเขตของหนังสือเล่มนี้ ด้วยเหตุนี้ หนังสือเล่มนี้จึงจะกล่าวถึงหลักการ โดยทั่วไปของการผสมเคมียางธรรมชาติแต่พอสังเขปเท่านั้น

แม้ว่ายางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์หรือการใช้รังสีที่มีพลังงานสูง แต่ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันก็ยังคงเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติต้องการปริมาณกำมะถันมากกว่า แต่ต้องการปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า เพราะในยางธรรมชาติมีสารประกอบอินทรีย์บางตัวที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการคงรูปได้

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมเคมิจึงต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยาง โดยการตัดโมเลกุลของยาง (ลดน้ำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนในเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll mill) หรือในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมินี้นี้ เรียกว่า “มาสติเคชัน (Mastication)” ปรกติกการบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดี เพราะยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางก็จะเกิดการฉีกขาดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูง ยางจะมีความหนืดลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมลดลงด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องมาจากแรงเชิงกลจึงลดลง แต่ในบางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกัน โดยการเติมสารแปบไทเซอร์ (Peptizer) ลงไปเล็กน้อย เพราะสารเคมิดังกล่าวจะช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกตัดขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่

เนื่องจากการบดยางที่มากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางไม่สามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้นการบดยางจึงควรทำเท่าที่จำเป็น (ใช้เวลาให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้) เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

5. การผสมยางธรรมชาติกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้กับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่าง ๆ ได้ดี เช่น ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (IR) และยางบิวตาไดอีน (BR) นอกจากนี้ในบางครั้งอาจผสมกับยางไนไตรล์ (NBR) ได้ในระดับหนึ่ง (ควรใช้ยางไนไตรล์เกรดที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ต่ำ และถ้าเป็นไปได้ควรทำการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (Compatibilizer) ลงไปด้วยเล็กน้อย เพื่อให้ยางธรรมชาติและยางไนไตรล์เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน กล่าวคือ สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติที่จะถูกส่งผ่านไปให้ยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน สมบัติเชิงพลวัต รวมถึงความร้อนสะสมที่ต่ำในระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกัน สมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์บางประการก็จะถูกถ่ายเทให้แก่ยางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อการขูด (เมื่อผสมกับยางบิวตาไดอีน (BR)) ความทนทานต่อความร้อน (เมื่อผสมกับยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM)) ความทนทานต่อน้ำมัน (เมื่อผสมกับยางไนไตรล์ (NBR)) หรือความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน (เมื่อผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM)) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการผสมยางธรรมชาติให้เข้ากับยางสังเคราะห์นั้น ผู้ผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยางผสม อันได้แก่ ความหนืดและระบบการคงรูปของยางที่จะนำมาผสมกัน โดยทั่วไปแล้ว ก่อนที่จะนำยางทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกันนั้น ควรทำการบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดตั้งต้นใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อน เพราะจะทำให้ยางทั้งสองชนิดนั้นผสมเข้าด้วยกันได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บางตัวที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลน้อย เช่น ยางบิวไทล์ (IIR) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) ก็ควรเลือกระบบการคงรูปให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นยางทั้งสองชนิดซึ่งมีสมบัติการคงรูปที่แตกต่างกันมากนี้อาจเกิดการแยกเฟสกันในระหว่างกระบวนการคงรูปได้ การเลือกใช้ยางสังเคราะห์เกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูง อาจช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบการคงรูปได้ นอกจากความหนืดและระบบการคงรูปแล้ว ในบางกรณีที่ต้องการนำยางที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกันมาก ๆ มาผสมกัน อาจจำเป็นต้องพิจารณาถึงความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่นำมาผสมกันด้วย (โดยเฉพาะสารตัวเร่งปฏิกิริยา) เพราะสารตัวเติมหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกัน และสารเคมีเหล่านี้ก็ชอบที่จะอยู่ในเฟสของยางที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับตัวมันเองเท่านั้น ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบเหล่านี้ในยางแต่ละเฟสอาจทำให้สมบัติของยางผสมที่ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

6. การใช้งานยางธรรมชาติ

ในอดีต ยางธรรมชาติจัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลัก คือ ไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ ยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนที่ยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทยังจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต เนื่องจาก

6.1 ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารตัวเติมเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถูมือ ยาง ถูยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

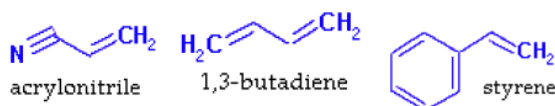
6.2 ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน ฝ้ายยาง ยางกันกระแทกทำเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

6.3 ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548)

อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน หรือเอบีเอส (ACRYLONITRILE-BUTADIENE-STYRENE, ABS)

เอบีเอส (ABS) เป็นชื่อย่อของ อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง เอบีเอสเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของโมโนเมอร์สามชนิด คือ สไตรีน (Styrene) อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และ โพลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากโมโนเมอร์สามชนิดเรียกว่า เทอร์พอลิเมอร์ (Terpolymer) โมโนเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์เอบีเอส ขึ้นมานั้น ล้วนมีผลต่อสมบัติของพลาสติกทั้งสิ้น อะครีโลไนไตรล์มีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอีนมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่าย และช่วยลดต้นทุน

เนื่องจากเอบีเอสเป็นพลาสติกที่ได้จากการนำโมโนเมอร์เมชันมาผลิต ดังแสดงในภาพที่ 2-10 ดังนั้นผู้ผลิตเอบีเอส จึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดเพื่อให้ได้สมบัติอย่างที่ต้องการ ซึ่งเอบีเอสที่จำหน่ายในท้องตลาดจะประกอบด้วยอะครีโลไนไตรล์ประมาณ 15-30% โพลิบิวทาไดอิน ประมาณ 5-30% และสไตรีนประมาณ 45-75%



ภาพที่ 2-10 โมโนเมอร์ที่ใช้ผลิตเอบีเอส

1. คุณสมบัติของเอบีเอส

โดยทั่วไปพลาสติกที่มีความแข็ง จะมีลักษณะแข็งแต่เปราะ หรือหากมีสมบัติแข็งเหนียว ก็จะมีลักษณะอ่อนนุ่มร่วมด้วย แต่ เอบีเอสแตกต่างจากพลาสติกทั่วไป เพราะเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ทำให้พลาสติกมีสมบัติทนแรงกระแทก (Impact resistance) ดี นอกจากนี้ เอบีเอสยังมีสมบัติเด่นอีกหลายเรื่อง เช่น ทนต่อแรงเสียดสี (Abrasion) คงสภาพรูปร่างได้ดี (Dimension stability) ทนความร้อน ทนสารเคมี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง (ตั้งแต่ -20°C - 80°C) และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี ซึ่งคุณสมบัติเด่นของ เอบีเอสมีดังนี้

แข็งแรงยืดหยุ่น เป็นคุณสมบัติเด่น ของ เอบีเอสหากเทียบกับ PLA ซึ่งมีความแข็งกว่าแต่เปราะ ชิ้นงานที่ทำจากการพิมพ์สามมิติ หรือ 3D Printing ที่ใช้เอบีเอสนั้นสามารถทนต่อแรงบีบ ดึงได้ดี จึงเหมาะในการใช้งานทางกลไก Engineering หรือ Mechanic เช่น ข้อต่อต่าง ๆ โช้ หรือ ตาข่าย สามารถนำไปใช้ในงานกลางแจ้งได้เนื่องจากเป็นผลผลิตจากปิโตรเลียม ทำให้ทนต่อสภาพอากาศได้ดี

มีจุดหลอมเหลวสูง คือ 200-250 องศา (สูงกว่าเมื่อเทียบกับ หากที่เทียบกับ PLA ที่อุณหภูมิ 160-220) ทำให้สามารถใช้งานในรูปที่ร้อนกว่าได้ แต่จุดเด่นนี้ก็อาจเป็นจุดด้อยได้เหมือนกัน โดยมันจะเย็นตัวช้ากว่า และ ต้องการ Heated bed หรือฐานทำความร้อนเป็นฐานชิ้นงาน

ขุ่น โดยปกติแล้วเอบีเอสจริง ๆ แล้วมีความใส แต่เมื่อใส่สีเข้าไปแล้วจะมีคุณสมบัติ ขุ่น ชิ้นงานที่เกิดจากการพิมพ์ 3 มิติมีลักษณะขุ่นทึบ เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการคุณสมบัติทึบ เช่น ภาชนะใส่ของ เป็นต้น

ตกแต่งชิ้นงานได้ง่าย ด้วยกระดาษทราย หรือ อะซิโตน (Acetone) โดยเฉพาะ อะซิโตนสามารถทำละลายเอปียเอสได้ดี เราจึงสามารถใช้ประโยชน์เช่นนี้ได้หลายแบบ เช่น หยอดอะซิโตน 2-3 หยดเพื่อต่อชิ้นงาน 2 ชิ้นเข้าด้วยกัน ใช้อะซิโตนในการทำความสะดวกชิ้นงาน จุ่มงานในอะซิโตน เพื่อให้ชิ้นงานเงาขึ้น (Glossy) หรือ เอาอะซิโตนทาบาง ๆ ที่แทนร่องชิ้นงาน เพื่อให้แกะชิ้นงานได้ง่ายเป็นต้น

2. การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

2.1 รถยนต์

พลาสติกที่จะนำมาใช้ในรถยนต์มักถูกกำหนดเกณฑ์เรื่องคุณภาพไว้ค่อนข้างสูง โดยพลาสติกต้องมีสภาพหรือรูปร่างดีไม่โก่งงอหรือบิดตัวในสภาวะที่มีความเค้น (Stress) หรือสภาพที่ต้องเผชิญการเปลี่ยนอุณหภูมิช่วงกว้าง ซึ่งเอปียเอสมีสมบัติต่าง ๆ สูง จึงรองรับสภาพการใช้งานในรถยนต์ได้ดี

2.2 เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ความต้องการเรื่องวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แตกต่างจากอุตสาหกรรมรถยนต์ วัสดุที่ใช้เป็น โครงภายนอกของเครื่องใช้ไฟฟ้านอกจากจะต้องมีความแข็งแรง ทนต่อการขีดข่วน (Scratch) และการเสียดสี (Wear) ดีแล้วยังต้องมีความสวยงาม เช็ดทำความสะอาดง่าย และไม่เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งเอปียเอสสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้

2.3 เครื่องใช้สำนักงาน

เครื่องใช้อุปกรณ์สำนักงานต้องการแบบที่ดูดีและมีสีสวยงาม ซึ่งเอปียเอสสามารถตอบสนองได้ดีเนื่องจากผสมสีสั้ได้หลากหลาย และบางเกรดก็สามารถนำมาชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ได้ผิวแวววาวเหมือนโลหะ อีกทั้งสามารถเลือกใช้กระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นผิวเป็นมันเงา หรือเรียบด้านแล้วแต่ความต้องการ

การเสริมแรงและสารตัวเติม (REINFORCEMENT AND FILLERS)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยาง เพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน ฯลฯ สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือที่เรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (Non-rein-forcing หรือ Inert fillers) หรืออาจแบ่งตามสีของสารตัวเติมได้เป็น 2 กลุ่มเช่นกัน ได้แก่ ผงเขม่าดำ และสารตัวเติมสีอ่อน

1. หลักการของการเสริมแรง (Principle of reinforcement)

การเสริมแรงในที่นี้หมายถึงความสามารถของสารตัวเติมในการเพิ่มความหนืดของยางคอมพาวด์และปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูป เช่น มอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความทนทานต่อการขูดถู เป็นต้น ในทำนองเดียวกัน ค่ามอดูลัสและความแข็งของยางก็จะเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขายและสมบัติการกระเด็นกระดอนของยางจะลดลง ดังนั้น สารตัวเติมเสริมแรง คือ สารตัวเติมที่เมื่อใส่ลงไปยางแล้วจะทำให้สมบัติของยางเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวข้างต้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) แต่สำหรับสารตัวเติมบางชนิดที่เมื่อใส่ลงไปยางแล้วทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ทำให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางคงรูปด้อยลง (หรือเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย) จะเรียกสารตัวเติมประเภทนี้ว่าสารตัวเติมไม่เสริมแรงหรือสารตัวเติมเฉื่อย ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเติมเฉื่อย ได้แก่ ทัลคัม (Talcum) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และดินขาว (Clay) เป็นต้น

การเสริมแรงที่เกิดขึ้นในยางแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน โดยทั่วไป ผลของการเสริมแรงจะเห็นได้เด่นชัดในยางสังเคราะห์ (เช่น ยาง BR SBR และ NBR) มากกว่าในยางธรรมชาติ หรือยาง CR แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง เพราะยางสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (Strain-induced crystallization) อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ การเติมสารตัวเติมเสริมแรงก็จะช่วยปรับปรุงสมบัติของยางให้ดียิ่งขึ้น แต่สำหรับยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด การเติมสารตัวเติมเสริมแรงจึงจำเป็นเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องถูกนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรม เพราะยางเหล่านี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำมากหากไม่มีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง

2. อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-Filler interaction)

ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติม โดยที่อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal's) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีค่าค่อนข้างต่ำหรืออาจอยู่ในรูปของพันธะเคมีซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของสารตัวเติม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารตัวเติมนั้น ๆ เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ยางจะมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยางจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยลง

นอกจากโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารตัวเติมแล้ว ปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่มีผลกระทบต่ออันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมคือธรรมชาติของยาง เพราะยางแต่ละชนิดจะมี

ปฏิกิริยากับสารตัวเติมแต่ละชนิดแตกต่างกัน เช่น ดินขาวหรือเคลย์จะไม่เสริมแรงในยาง NBR แต่จะให้การเสริมแรงที่ดีในยาง X-NBR เป็นต้น

3. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสริมแรงของสารตัวเติม (Factors affecting filler reinforcement) มีดังนี้

3.1 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ (Particle size and Specific surface area)

สารตัวเติมที่มีขนาดของอนุภาคเล็กจะให้การเสริมแรงแก่ยางได้ดี เพราะสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยของน้ำหนัก (หรือที่เรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ) สูง จึงทำให้พื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น สมบัติต่าง ๆ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และความต้านทานต่อการขัดถูจึงสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติม

โดยทั่วไป สารตัวเติมเสริมแรง เช่น ผงเขม่าดำจะมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กมาก และอนุภาคปฐมภูมิเหล่านี้จะไม่อยู่กันอย่างเดี่ยว ๆ แต่จะหลอม (Fused) หรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า แอกริเกต (Aggregate) อย่างไรก็ดี เนื่องจากแอกริเกตแต่ละกลุ่มก็จะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้น แอกริเกตจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า แอกริเกต (Agglomerate) ด้วยเหตุนี้ ขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องมือวัดส่วนใหญ่ (เช่น เครื่อง Mastersizer ซึ่งอาศัยการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบลงบนอนุภาคของสารตัวเติม) จึงเป็นขนาดของแอกริเกต การวัดขนาดของอนุภาคปฐมภูมิของสารตัวเติมเสริมแรงจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาก ๆ โดยทั่วไปการเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคปฐมภูมิของสารตัวเติมเหล่านี้จึงนิยมทำโดยการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะแทน วิธีที่ใช้กันมากในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะเรียกว่า BET (พัฒนาขึ้นโดย Brunauer Emmett และ Teller) โดยอาศัยหลักการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของสารตัวเติมได้จึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดได้ด้วยวิธีนี้ มีความถูกต้องสูง โดยทั่วไป สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงจะมีค่า BET จากศูนย์ถึง $10 \text{ m}^2/\text{g}$ สารตัวเติมที่เสริมแรงได้เล็กน้อย (กึ่งเสริมแรง) จะมีค่า BET จาก 10 ถึง $60 \text{ m}^2/\text{g}$ และสารตัวเติมเสริมแรงจะมีค่า BET จาก 60 ถึง $250 \text{ m}^2/\text{g}$

แม้ว่าเทคนิค BET จะวัดพื้นที่ผิวทั้งหมดของสารตัวเติม แต่ว่าโมเลกุลของยางมีขนาดใหญ่กว่าก๊าซไนโตรเจนมากจึงไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างหรือรูพรุนที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการวัดพื้นที่ผิวของสารตัวเติมที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้จึงผู้ทดสอบจำเป็นต้องทำการวัดโดยการเปลี่ยนตัวกลางจากก๊าซไนโตรเจนเป็นไอโอดีนซึ่งมีขนาดของโมเลกุลใหญ่กว่าและเรียกการทดสอบนี้ว่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption, I_2) หรืออาจ

ใช้เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) เป็นตัวกลางแทนไอโอดีนก็ได้

3.2 โครงสร้างของสารตัวเติม (Filler structure)

นอกจากขนาดของอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว โครงสร้างของสารตัวเติมก็มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการเสริมแรงเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าอนุภาคของสารตัวเติมบางชนิด เช่น ผงเขม่าดำจะไม่อยู่อย่างเดี่ยว ๆ แต่จะหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า แอ็กกรีเกต ซึ่งการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวทำให้เกิดโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่า โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ (Primary filler structure) โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะมีความแข็งแรงสูงมากและไม่สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกลในระหว่างกระบวนการผสม

อย่างไรก็ดี สารตัวเติมที่มีใช้กันอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมจะไม่ได้อยู่ในรูปของแอ็กกรีเกต เพราะแอ็กกรีเกตแต่ละก้อนก็จะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้น แอ็กกรีเกตที่เกิดขึ้นจึงชอบที่จะอยู่รวมกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า แอ็กโกลเมอเรต การรวมกลุ่มกันของแอ็กกรีเกตนี้ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่า โครงสร้างสารตัวเติมทุติยภูมิ (Secondary filler structure) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะไม่แข็งแรงและสามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกล

เนื่องจากอนุภาคปฐมภูมิของสารตัวเติมเสริมแรงส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังนั้นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิดังกล่าวจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเป็นจำนวนมาก ซึ่งปริมาตรของช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับโครงสร้างของสารตัวเติม การวัดระดับโครงสร้างของสารตัวเติมจึงสามารถทำได้โดยการใช้วิธีวัดความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) ของสารตัวเติมเพราะสารตัวเติมที่มีโครงสร้างแบบสูงหรือมีช่องว่างมากก็จะมีความสามารถในการอัดตัวได้มากเช่นกัน หรืออาจใช้เทคนิคการดูดซึมของเหลว ไดบิวทิลอะทาลเตต (Dibutylphthalate absorption, DBPA) เพราะสารตัวเติมที่มีโครงสร้างแบบสูงก็จะดูดซึมของเหลวได้ในปริมาณที่สูงด้วยเช่นกัน โดยค่าที่ได้จากการวัดจะเรียกว่าค่า DBPA ซึ่งจะแสดงในรูปของปริมาตรของไดบิวทิลอะทาลเตต (ในหน่วยมิลลิเมตร) ที่ถูกดูดซึมต่อสารตัวเติมหนัก 100 กรัม

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของสารตัวเติมที่วัดได้เป็นโครงสร้างก่อนที่จะมีการเติมเข้าไปในยาง และเนื่องจากโครงสร้างทุติยภูมิของสารตัวเติมสามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม ดังนั้นค่า DBPA ที่วัดได้จึงไม่ได้บ่งชี้ถึงระดับโครงสร้างของสารตัวเติมที่อยู่ยางอย่างแท้จริง โดยทั่วไป โครงสร้างของสารตัวเติมจะมีผลอย่างมากต่อค่าความหนืดของยาง

คอมพาวด์ จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติเชิงกลของยางคงรูป (ยกเว้น ค้ำมอดูลัส)

3.3 ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (Specific surface activity)

ปรกติสารตัวเติมจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีชนิดต่าง ๆ เกาะติดหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว เช่น บนพื้นผิวของผงเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย เช่น ฟีนอลิก (Phenolic) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ควิโนน (Quinone) คาร์บอกซิล (Carboxyl) และแล็กโทน (Lactone) รวมถึงอนุโมลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ โมเลกุลของยางได้ แต่สำหรับสารตัวเติมที่มีสีขาว เช่น ซิลิกา ส่วนใหญ่จะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีจำพวกออกไซด์ของโลหะหรือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นองค์ประกอบอยู่บนพื้นผิว

ยางที่มีความเป็นขี้สูง เช่น ยาง NBR และ CR จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพื้นผิวของสารตัวเติมที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิลหรืออะตอมของคลอรีน เป็นต้น ถ้าความว่องไวทางปฏิกิริยาของสารตัวเติมลดลงก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้อยลง เช่น เมื่อทำการปรับสภาพพื้นผิวของผงเขม่าดำด้วยกระบวนการที่เรียกว่า “Graphitization” โดยการนำผงเขม่าดำไปเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,600-3,000°C เป็นเวลาหลายชั่วโมง ความร้อนที่สูงมากเช่นนี้จะทำให้หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของผงเขม่าดำสลายตัวไป เขม่าดำก็จะสูญเสียความว่องไวทางปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของผงเขม่าดำลดลง

การวัดค่าความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิวโดยตรง ทำได้ค่อนข้างยากและยังไม่มีวิธีทดสอบที่ได้มาตรฐาน ปัจจุบันจึงนิยมใช้ปริมาณของยางบาวด์ (Bound rubber) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมเป็นตัวบ่งบอกความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว ยางบาวด์ คือ ส่วนของยางที่ไม่สามารถถูกสกัดออกมาจากสารตัวเติมได้โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม (ตัวทำละลายที่สามารถละลายยางได้ดี) ยางส่วนนี้จะเกาะติดกับสารตัวเติมในลักษณะคล้ายเจล ถ้าปริมาณของยางบาวด์สูงก็แสดงว่ามียางที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของสารตัวเติมมาก ปริมาณของยางบาวด์จึงเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าแรงดูดซับ (Adsorption forces) ที่เกิดขึ้นระหว่างยางกับสารตัวเติม ด้วยเหตุนี้ จึงนิยมใช้ปริมาณของยางบาวด์เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติม

3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH value)

แม้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารตัวเติมจะไม่ได้มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเสริมแรงในยาง แต่เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารตัวเติมส่งผลกระทบต่อลักษณะการคงรูปของยาง (สารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะหน่วงปฏิกิริยาของยาง) ดังนั้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารตัวเติมจึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางคงรูป

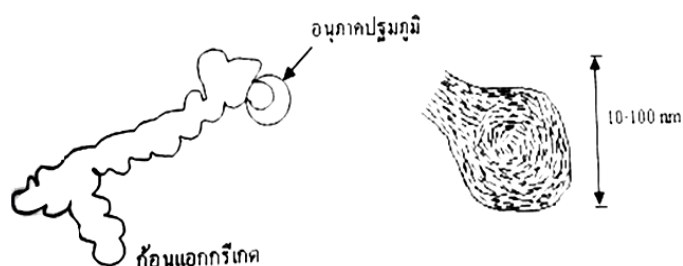
เนื่องจากสารตัวเติมเป็นของแข็ง ผู้ทดสอบจึงไม่สามารถวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง บนพื้นผิวของสารตัวเติมได้โดยตรง ดังนั้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารตัวเติมที่ระบุอยู่ในใบรับรองของบริษัทผู้ผลิตจึงไม่ใช่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แท้จริงของสารตัวเติม แต่เป็นค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำที่มีสารตัวเติมแขวนลอยอยู่ประมาณ 5-10% โดยน้ำหนัก (สำหรับวิธีการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเขม่าดำให้ดูมาตรฐาน ASTM D1512 ประกอบ)

4. ชนิดของสารตัวเติม (Type of filler)

สารตัวเติม (Fillers) มีหลายชนิดดังนี้

4.1 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำ คือ ธาตุคาร์บอน อนุภาคของผงเขม่าดำมีโครงสร้างกิ่งแกรไฟต์ นั่นคือ อะตอมของคาร์บอนจะจัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ขนานกัน (โดยเฉพาะชั้นด้านนอก) บางส่วนก็เกิดการเหลื่อมล้ำกันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกิ่งแกรไฟต์ เขม่าดำที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 10-100 นาโนเมตร ($\times 10^{-9}$ เมตร)



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างของเขม่าดำ

ผงเขม่าดำแบ่งออกได้เป็นสามชนิดหลัก ๆ ตามกรรมวิธีการผลิต ได้แก่

เฟอร์เนซแบล็ก (Furnace black) เป็นผงเขม่าดำชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผงเขม่าดำชนิดนี้ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวน (Highly aromatic oils) อนุภาคปฐมภูมิของเฟอร์เนซแบล็กมีขนาดค่อนข้างเล็ก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20-80 นาโนเมตร

เทอร์มอลแบล็ก (Thermal black) เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 °C ในภาวะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ ผงเขม่าดำชนิดนี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่ค่อนข้างใหญ่ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 120-500 นาโนเมตร และที่พื้นผิวของเขม่าดำ

ชนิดนี้ไม่มีรูพรุน เขม่าดำชนิดนี้จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิดอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ เทอร์มอลแบล็กจึงไม่เสริมแรงในยาง เพราะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูปสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เขม่าดำชนิดนี้จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติการกระด้างกระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าเฟอร์เนชแบล็ก ปัจจุบัน มีการนำเทอร์มอลแบล็กมาใช้ในอุตสาหกรรมน้อยมาก เพราะสามารถใช้เฟอร์เนชแบล็ก ซึ่งมีราคาถูกกว่าแทนได้ ส่วนใหญ่จึงนำเขม่าดำชนิดนี้มาใช้เฉพาะกรณีพิเศษเท่านั้น

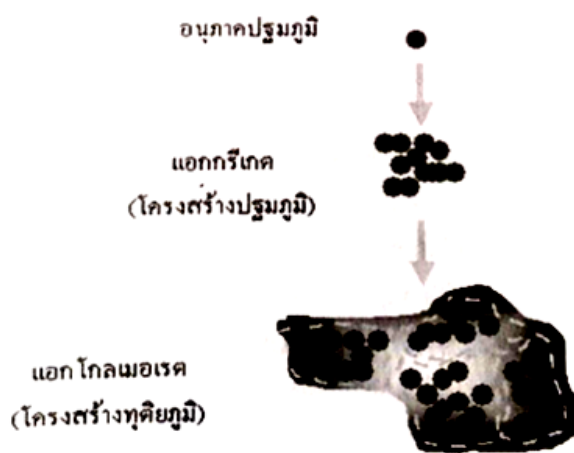
ชาแนลแบล็ก (Channel black) เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) โดยการผ่านก๊าซธรรมชาติไปยังช่องเปลวไฟ (Burner channel) เขม่าที่เกิดขึ้นจะไปเกาะบนฝาเหล็กด้านบน จากนั้นก็ทำการเก็บรวบรวมผงเขม่าดำที่ได้ อนุภาคปฐมภูมิของชาแนลแบล็กจะมีขนาดเล็กมาก (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 9-30 นาโนเมตร) และมีความเป็นกรดค่อนข้างสูงจึงมีฤทธิ์หน่วงปฏิกิริยาของรูป ปัจจุบันการนำผงเขม่าดำชนิดนี้ไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมน้อยมาก

4.2 สารตัวเติมที่มีสีอ่อน (Light colored fillers)

นอกจากเขม่าดำแล้ว ยังมีการนำสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ มาใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ เช่น ลดต้นทุนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิตหรืออาจเพื่อการเสริมแรงในยาง เป็นต้น สารตัวเติมที่มีสีอ่อนมีบทบาทสำคัญต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีเนื่องจากไม่สามารถใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในกรณีนี้ได้ โดยทั่วไป สารตัวเติมชนิดที่มีสีอ่อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

4.2.1 สารตัวเติมเสริมแรง (Active non-black fillers) หรือ ซิลิกา (SiO_2)

ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยว ๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิแต่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ที่เรียกว่า แอกรีเกต เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งโครงสร้างปฐมภูมินี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม เพราะเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง (พันธะโควาเลนต์) นอกจากนี้ แอกรีเกตของซิลิกายังชอบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ และเรียกกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่ว่า แอ็กโกลเมอเรต เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำ โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาจะมีความแข็งแรงสูงกว่า เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ที่พบในกรณีของเขม่าดำ



ภาพที่ 2-12 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา

ซิลิกาใช้กันมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางกรณียังใช้ซิลิการ่วมกับเขม่าดำเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนและเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยากับสิ่งทอ ปัจจุบัน ได้มีการนำซิลิกาไปใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เพราะซิลิกาจะทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการหมุน (Rolling resistance) ต่ำลง จึงช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

4.2.2 สารตัวเติมกึ่งเสริมแรงและสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Semi-active and inactive non-black fillers)

สารตัวเติมกลุ่มนี้ใช้กันมากเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยทั่วไปจะใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ที่มีสี หรืออาจใช้ร่วมกับเขม่าดำในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภทก็ได้ สารตัวเติมในกลุ่มนี้ที่ใช้กันมากที่สุด คือ ดินขาว (Kaolin หรือ China clay) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้สารตัวเติมกลุ่มนี้กับยางธรรมชาติ คือ สารตัวเติมเหล่านี้ต้องไม่มีโลหะหนักที่เร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็ว เช่น ทองแดง หรือแมงกานีส เป็นต้น

ซิลิเกต (Silicates) ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมซิลิเกต ซิลิเกตเหล่านี้เตรียมได้จากการตกตะกอนเช่นเดียวกับการเตรียมฟริชพิเทตซิลิกา แต่แทนที่จะตกตะกอนด้วยกรด กลับใช้เกลือของโลหะ เช่น แคลเซียมคลอไรด์หรืออะลูมิเนียมซัลเฟตแทน

แคลเซียมซิลิเกต จัดเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงที่ทำให้ยางคงรูปยังคงมี

ความยืดหยุ่นดี และไม่แข็งมากเกินไปแม้มีการเติมสารตัวเติมชนิดนี้ลงไปปริมาณมากก็ตาม แม้ว่าแคลเซียมซิลิเกตจะมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก (ซึ่งอาจมากกว่า 90%) ในขณะที่องค์ประกอบส่วนที่เหลือ คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ โซเดียม (Na) แต่ความว่องไวทางปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตจะต่ำกว่าซิลิกามาก ด้วยเหตุนี้ แคลเซียมซิลิเกตจึงทำให้ขบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายกว่า ส่วนอลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (SiO_2) และมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ โซเดียม (Na) ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยแม้ว่าจะมีความว่องไวทางปฏิกิริยาต่ำกว่าแคลเซียมซิลิเกต (ทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่า) แต่สารตัวเติมชนิดนี้ก็มีระดับของการเสริมแรงที่ต่ำกว่าซิลิกาและแคลเซียมซิลิเกตเช่นกัน

เคลย์หรือดินขาว (Clay) เป็นสารตัวเติมที่ใช้กันมากที่สุด รองจากเขม่าดำเพราะมีราคาถูก หาได้ง่าย มีคุณภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ ให้การเสริมแรงในยางได้เล็กน้อยถึงปานกลาง และทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่าย โดยเฉพาะในกระบวนการอัดผ่านคาน และการรีดด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์

แม้ว่าเคลย์จะมีอยู่หลายชนิด แต่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง คือ เกาลิน (Kaolin) หรือ ไชนาเคลย์ (China clay) ซึ่งก็คือ อะลูมิเนียมซิลิเกตที่อิมตัวด้วยน้ำ (Hydrated aluminium silicate, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เคลย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีสีขาวหรือสีครีม มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5 และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.6 g/cm^3 อนุภาคของเคลย์จะมีรูปร่างเป็นแผ่นบางรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal platelets) ซึ่งแตกต่างจากเขม่าดำซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปทรงกลม

เคลย์ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีกหลายเกรด ได้แก่

ซอฟต์เคลย์ (Soft clay) ซอฟต์เคลย์จัดเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง ที่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยสูงกว่าสองไมครอน (มีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ประมาณ $12\text{-}15 \text{ m}^2/\text{g}$) นิยมใช้ในปริมาณมาก เพื่อลดต้นทุนเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ซอฟต์เคลย์จะทำให้ยางคงรูปมีความแข็งและมีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่า แต่จะให้ค่าการกระเด็งกระดอนที่ต่ำกว่า เนื่องจากซอฟต์เคลย์มีสีไม่ขาวมากนัก จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีขาวสดใสได้

ฮาร์ดเคลย์ (Hard clay) จัดเป็นสารตัวเติมที่ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้ดีกว่าซอฟต์เคลย์ เพราะมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าสองไมครอน (มีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ประมาณ $22\text{-}26 \text{ m}^2/\text{g}$) และมีสีขาว

แคลไซน์ด์เคลย์ (Calcined clay) แคลไซน์ด์เคลย์เป็นสารตัวเติมที่ได้จากการนำฮาร์ดเคลย์ไปเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อไล่น้ำที่มีอยู่ในโครงสร้างออกไป สารตัวเติมชนิดนี้มี

ประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูง มีสีขาวมากกว่า และให้สมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าฮาร์ดเคลย์ (มีความเป็นฉนวนสูงกว่า) จึงนิยมใช้ในการผลิตยางหุ้มสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล

เคลย์เกรดพิเศษ (Treated clay) เคลย์เกรดนี้เป็นสารตัวเติมที่ได้จากการนำฮาร์ดเคลย์มาปรับสภาพผิวด้วยสารประกอบเอมีน หรือสารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่เมอแคปโตอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล แม้ว่าสารตัวเติมเต็มเกรดนี้มีสีที่ไม่ขาว แต่ก็ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูงกว่าเคลย์เกรดอื่น ๆ

เคลย์อาจมีผลในการหน่วงปฏิกิริยาของรูป เพราะเคลย์สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่างได้ (เช่นเดียวกับในกรณีของซิลิกา) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยา หรืออาจเติมสารกระตุ้นสารตัวเติม เช่น ไทโรทาโนลามีน PEG หรือ DEG ลงไปในปริมาณเล็กน้อย ปริมาณของเคลย์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับระดับของความแข็งที่ต้องการ โดยทั่วไปการเพิ่มความแข็งทุก ๆ หนึ่งหน่วย จะต้องเติมซอฟต์แวร์เคลย์ประมาณ 7-8 phr หรือ เติมฮาร์ดเคลย์ประมาณ 5-6 phr

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางมีหลายเกรดและหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดอนุภาคใหญ่ที่ไม่เสริมแรงในยาง เช่น Ground limedtone และ Ground chalk เป็นต้น จนถึงเกรดที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่จัดเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง เช่น Precipitated whiting นอกจากขนาดของอนุภาคแล้ว แคลเซียมคาร์บอเนตและชนิดยังแตกต่างกันที่สีอีกด้วย แคลเซียมคาร์บอเนตบางเกรดยังมีการเคลือบด้วยแคลเซียมสเตียเรตประมาณ 1-3% เพื่อช่วยให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถผสมเข้าไปในยางได้ง่าย และทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.50-2.65 g/cm^3 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET อยู่ในช่วง 10-30 m^2/g การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นปานกลาง ยางยังมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง แต่ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดลดลง และเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีฤทธิ์เป็นด่าง จึงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาของรูปได้เล็กน้อย

ทัลคัม (Talcum) จัดเป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด ที่ประกอบด้วยซิลิเกตของแมกนีเซียมและอะลูมิเนียม การเติมทัลคัมลงไปในยางแม้ว่าจะทำให้สมบัติของยางคงรูปด้อยลง แต่ทัลคัมก็ช่วยปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ การใช้สารคู่ควบไซเลนในการปรับสภาพผิวของทัลคัม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้ดีพอสมควร นอกจากนี้ ทัลคัมยังสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของยางคอมพาวด์ได้อีกด้วย

ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เมื่อเติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อย (1-5 phr) ซิงก์ออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป แต่ถ้าเติมลงไปปริมาณที่มากขึ้น ซิงก์ออกไซด์ก็จะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ช่วยเพิ่มความแข็งและความทนทานต่อแรงดึง ในขณะที่มีผลเพียง

เล็กน้อยต่อความยืดหยุ่นของยาง ด้วยเหตุนี้ ในบางครั้งจึงใช้ซิงค์ออกไซด์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่แข็งแต่มีความยืดหยุ่นสูง

แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide) เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงที่มีสีขาว ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นสารป้องกันไฟในยาง

อะลูมิเนียมไตรไฮดรเอต (Aluminium trihydrate, ATH) นิยมใช้เป็นสารป้องกันไฟในยางเพราะเมื่อสารตัวเติมชนิดนี้ได้รับความร้อน ก็จะปล่อยน้ำออกมา ทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟลดลง

แบเรียมเฟอร์ไรต์ (Barium ferrite) เป็นสารตัวเติมที่ใช้เติมลงไปในยางในปริมาณมากเพื่อผลิตแม่เหล็กที่หักงอได้ (Flexible magnet)

แบเรียมซัลเฟตหรือแบไรต์ (Barium sulfate or barite) จัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง มักใช้ในการลดต้นทุนและการใช้ในยางที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีสูง เช่น ยางเคลือบถัง (Tank linings) เป็นต้น สำหรับเกรดที่มีความบริสุทธิ์สูงก็สามารถใช้เป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม

แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate, Hydrated) บางครั้งเรียกว่าผงยิบซัม จัดเป็นสารตัวเติมไม่เสริมแรงที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำและมีสีขาวกว่าแบไรต์

ตะกั่ว (Lead) ที่มีความละเอียดสูงสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อให้ยางมีความทนทานต่อรังสี (Radiation) สูงขึ้น

ลิทาร์จ (Litharge, PbO) สามารถใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป และใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการให้มีค่าความถ่วงจำเพาะหรือมีความทนทานต่อรังสีสูง ๆ

ลิโทพอน (Lithopone) คือ ของผสมระหว่างซิงค์ซัลไฟด์ (Zinc sulfide) และแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) นิยมใช้เป็นสารลดต้นทุนและเพิ่มความขาวในผลิตภัณฑ์ที่มีสี

แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate, $Mg(CO)_3$) เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด นอกจากจะช่วยเสริมแรงแล้วยังช่วยทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้จากการอัดผ่านดวยมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงลดการเสียรูปทรงในระหว่างการอบคงรูปในระบบเปิด

แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เป็นผงที่มีขนาดอนุภาคเล็ก นิยมใช้เป็นสารจับกรดที่เกิดขึ้นในยางที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบโดยทั่วไป ประสิทธิภาพการทำงานของแมกนีเซียมออกไซด์จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค (หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ) เพราะถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความสามารถในการจับกรด ที่เกิดขึ้นก็จะลดลง

ผงไมกา (Mica) เป็นสารตัวเติมที่ทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น และช่วยลดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ

แกรไฟต์ (Graphite) นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง และใช้ในการลดแรงเสียดทานที่บริเวณพื้นผิว

โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulfide) สารตัวเติมชนิดนี้สามารถใช้ในการลดแรงเสียดทานที่บริเวณพื้นผิวของยางได้เช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีราคาแพงกว่า

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นสารตัวเติมที่มีสีขาวสว่าง จึงนิยมใช้เป็นสารเพิ่มสีหรือเพิ่มความสว่างสดใสให้แก่ผลิตภัณฑ์ที่มีสี ไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งออกเป็นสองเกรดย่อยตามรูปแบบของโครงสร้าง คือ อะนาเทส (Anatase) ซึ่งมีสีขาวมากเป็นพิเศษ และรูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีสีออกครีมแต่มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่า

ซิงค์คาร์บอเนต (Zinc carbonate) มีลักษณะเป็นผงสีขาวสามารถใช้เป็นสารเพิ่มสีที่มีราคาถูกแต่ให้ความสว่างสดใสได้ไม่ด้อยไปกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เป็นตัวจับกรดที่เกิดขึ้นในยางที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบได้อีกด้วย

ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) จัดเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูปชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการยางที่โปร่งแสง นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของยางคอมพาวด์ได้อีกด้วย

ใยหิน (Asbestos) มีหลายรูปแบบทั้งแบบผงและแบบเส้นใยสั้น ๆ ปรกติจะใช้เติมลงไปเพื่อทำให้ยางมีความทนทานต่อเปลวไฟและความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากใยหินมีความเป็นพิษต่ำ ต่อปอด ดังนั้น ในระหว่างการผสมจึงควรหลีกเลี่ยงการสูดดมฝุ่นของแร่ใยหินเข้าสู่ร่างกาย

ใยผ้า (Flocks) เส้นใยสั้น ๆ ของผ้าฝ้าย ไหมเทียม และไนลอน นอกจากจะ สามารถทำให้ยางคอมพาวด์แข็งมากขึ้นแล้ว ยังสามารถทำให้ยางคงรูปมีค่ามอดูลัส ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด และค่าความต้านทานต่อการขูดสูงขึ้นไปอีกด้วย

แป้งไม้ (Woodflour) ที่ได้จากการบดไม้เนื้อแข็ง ปรกติจะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีความแข็งแรงมาก ๆ และมีราคาถูก เช่น กระเบื้องยางปูพื้น เป็นต้น

สไตรีนเรซิน (Styrene resin) คือ สารตัวเติมอินทรีย์ที่เป็น โคพอลิเมอร์ระหว่าง บิวทาไดอีน (Butadiene) และสไตรีน (Styrene) โดยมีปริมาณของสไตรีนอยู่ในช่วง 50-90% โดยน้ำหนัก แต่เกรดที่ใช้กันมากจะมีสไตรีนอยู่ประมาณ 85% โดยน้ำหนัก และคงรูปมีความแข็งแรงสูง อดทนต่ออุณหภูมิห้อง โดยที่ไม่ทำให้ความหนาแน่นของยางเปลี่ยนแปลงไปมากนัก (ซึ่งไม่เหมือนกับการเติมสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ) ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของสไตรีน อย่างไรก็ตาม

ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยางคงรูปก็จะมีความแข็งแรงลดลงเพราะสไตรีนเรซินไม่ได้รวมเข้าไปอยู่ในโครงสร้างตาข่ายของยาง

เนื่องจากสไตรีนเรซินเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ไหลได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง สารตัวเติมชนิดนี้จึงช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิตของยาง อย่างไรก็ดี ในระหว่างกระบวนการผสมเคมียาง ผู้ผสมจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิในการผสมยางให้สูงกว่า 95°C (ซึ่งเป็นจุดอ่อนตัวของเรซิน) เพื่อให้สไตรีนเรซินสามารถกระจายตัวในยางได้ดี สารตัวเติมประเภทนี้นิยมใช้กันมากในยางธรรมชาติและยาง SBR

ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) ชนิดที่ใช้กันมาก คือ เรซินของอัลคิลฟีนอล ฟอรั่มอลดีไฮด์ (Alkyl phenol-formaldehyde resins) หรือฟีนอลิกเรซินชนิดที่ยังควบแน่นไม่สมบูรณ์ (Incompletely condensed phenolic resin) ซึ่งสารตัวเติมชนิดนี้จะทำหน้าที่คล้ายสารทำให้ยางนึ่ม กล่าวคือ จะช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของยางคอมพาวด์และทำให้สารตัวเติมอื่น ๆ เข้ากับยางได้ง่ายยิ่งขึ้น สำหรับฟีนอลิกเรซินบางเกรดที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาที่จะใช้เป็นสารทำให้ยางเหนียวติดกัน (Tackifier) ซึ่งจะใช้มากในยางสังเคราะห์ เพราะยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีสมบัติการเหนียวติดกันต่ำ โดยทั่วไป ฟีนอลิกเรซินนิยมใช้กับยาง NBR เพราะจะช่วยให้งาง NBR มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น กล่าวคือ ยางจะมีความแข็งแรง ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู ความต้านทานต่อการบวมพอง และความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้น แต่จะทำให้ความยืดหยุ่นและการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง ซึ่งผลเหล่านี้จะเห็นได้ว่าเด่นชัดมากขึ้นในยางที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์สูง ๆ นอกจากนี้ ฟีนอลิกเรซินยังช่วยทำให้ยางยึดติดกับโลหะได้แข็งแรงมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) นิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในยาง NBR เพื่อให้งางมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและยังช่วยปรับปรุงสมบัติการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสภาพอากาศ พอลิไวนิลคลอไรด์สามารถผสมให้เข้ากับยาง NBR ที่มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์สูง ๆ ($>25\%$) ได้โดยง่าย ยางผสมที่ได้จะทนต่อโอโซนและการบวมพองในน้ำมันได้ดีขึ้น มีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น อย่างไรก็ดี พอลิไวนิลคลอไรด์จะให้งาง NBR มีสมบัติบางประการด้อยลง โดยเฉพาะความยืดหยุ่น สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ และสมบัติการเสีรูปหลังการกดอัด เป็นต้น

4.3 สารตัวเติมอื่น ๆ (Other fillers)

นอกจากสารตัวเติมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีการนำยางผง (Crumb) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง ยางผงที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ได้จากการนำยางคงสภาพที่ใช้แล้วมาตัดและบดด้วยลูกกลิ้งบด (Cracker mill) และเครื่องบด (Grinder) สำหรับในกรณีที่ยางผงมีการปนเปื้อน

ด้วยโลหะหรือผ้าใบ (ในกรณีที่ใช้เศษยางล้อยานพาหนะเป็นวัตถุดิบในการผลิต) ก็จะทำการกำจัดสิ่งปลอมปนที่เป็นโลหะและผ้าใบออกไปโดยใช้ระบบแม่เหล็กและระบบลมหมุน (ไซโคลน) ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำยางผงไปคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) และบรรจุถุงเพื่อจำหน่ายต่อไป แม้ว่าการเติมยางผงจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต แต่ยางผงมักจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางคงรูปด้อยลง ดังนั้น ยางผงจึงจัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง

นอกจากยางผงแล้ว ยังมีการนำเส้นใยสั้น ๆ ของผ้าไหม (Silk) ผ้าฝ้าย (Cotton) หรือไหมเทียม (Rayon) มาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง ซึ่งสารตัวเติมประเภทเส้นใยสั้น ๆ เหล่านี้จะเกิดการเรียงตัว (Orientation) ไปในแนวทิศทางการไหลของยางในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เช่น ในกระบวนการอัดผ่านคाय ทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมประเภทนี้ ขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropic fillers) นั่นคือ การเสริมแรงจะเกิดขึ้นเฉพาะในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเท่านั้น (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548)

คุณสมบัติของเม็ดพลาสติก

1. คุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การตรวจวัดสมบัติของพลาสติกในการรับภาระหรือแรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ในเชิงปริมาณ เพื่อที่ผู้ใช้งานสามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้เพื่อประโยชน์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบคุณภาพ การเปรียบเทียบ หรือการจัดลำดับ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จะต้องสามารถเปรียบเทียบกันได้แม้จะทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจุดประสงค์ของการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่

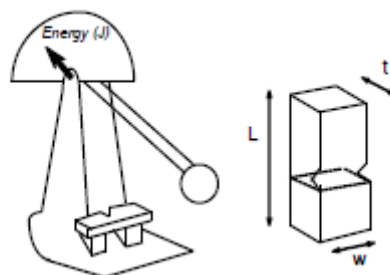
1) เพื่อพิสูจน์แนวความคิดในการออกแบบและเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ 2) เพื่อยืนยันถึงความปลอดภัยในการใช้งาน 3) เพื่อการควบคุมคุณภาพ 4) เพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของกระบวนการผลิต 5) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบและเลือกวัสดุ 6) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการทำนายถึงประสิทธิภาพในการใช้งาน 7) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิจัยและพัฒนาวัสดุชนิดใหม่

นอกจากนี้แล้ว การทดสอบสมบัติเชิงกลยังมีประโยชน์อื่นแอบแฝงอยู่อีกมากมาย เช่น ใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบสมบัติเชิงกลผลิตภัณฑ์ของกลุ่มแข่งขัน เป็นต้น โดยสำหรับในงานวิจัยนี้ ใช้การทดสอบสมบัติเชิงกลของเม็ดพลาสติก 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1.1 ความสามารถในการทนแรงกระแทกของวัสดุ (Izod impact strength)

การทดสอบสมบัติด้านการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์จะมีจุดเด่นตรงที่เป็น

การทดสอบด้วยอัตราการกระแทกด้วยความเร็วสูง โดยมีรูปแบบสองลักษณะ คือ แบบ Pendulum test และ Falling weight test



ภาพที่ 2-13 การทดสอบการทนแรงกระแทก

การทดสอบนี้ เป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุภายใต้การกระแทกมีหน่วยเป็น KJ/m^2 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทกชิ้นงานที่อยู่ในลักษณะตั้งตรงให้แตกหักออกโดยให้ชิ้นงานอยู่ในระยะที่กำหนดดังภาพที่ 2-14 ค่าความทนแรงกระแทกเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบพลาสติกเกรดต่าง ๆ และระบุให้ทราบถึงความจำเป็นในการหลีกเลี่ยงการมีมุมคมในการใช้งานชิ้นงานที่ทำด้วยวัสดุนั้น ๆ สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบหาค่า Izod impact strength ของพลาสติกโดยใช้ชิ้นงานแบบมีรอยบากรูปตัววี (V Notch type) โดยอ้างอิงมาตรฐาน ISO180: 1993 Determination of Izod impact strength

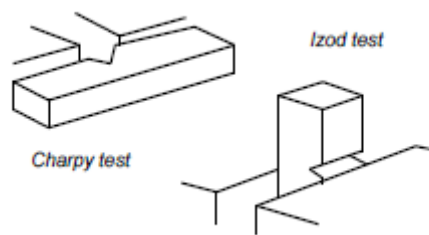
โดยจากพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็น Impact strength ได้จากสูตร

$$\text{Impact Strength} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Thickness (m)}}$$

หรือบางกรณีจะใช้

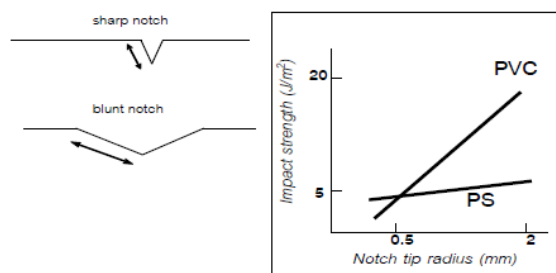
$$\text{Impact Strength} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Area Notched (m}^2\text{)}}$$

การวางชิ้นงานจะทำ ได้ 2 ลักษณะตามรูปแบบของการทดสอบ กล่าวคือ ถ้าเป็นแบบ Charpy test จะวาง แนวนอน แต่ถ้าเป็นแบบ Izod test จะวางแนวตั้ง



ภาพที่ 2-14 รูปแบบการวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy

สิ่งสำคัญหรือข้อควรระวังในการทดสอบแบบ Pendulum คือ ขนาดของรอยบาก (Notch) ต้องคงที่เพราะขนาด จะมีผลต่อค่า Impact strength ที่ได้ ตัวอย่างเช่น รอยบากที่แหลมกับ รอยบากที่ทื่อหรือป้านกว่าจะให้ค่าไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วรัศมีของ Notch tip ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ Impact strength สูงขึ้น



ภาพที่ 2-15 ผลของรอยบากต่อค่าการทนแรงกระแทก



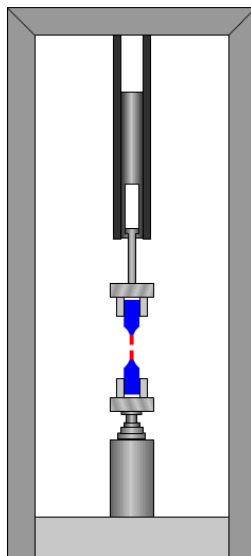
ภาพที่ 2-16 เครื่องมือทดสอบการทนแรงกระแทกของวัสดุ

1.2 การทดสอบการทนแรงดึง หรือ Tensile Strength

เป็นการทดสอบที่ขึ้นอยู่กับเวลา หรือเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงหรือความเค้นตามเวลา หรือวัดการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนรูปหรือความเครียดตามเวลา กรณีแรกเรียกว่า การทดสอบแบบ Stress relaxation ส่วนกรณีหลังเรียกว่า การทดสอบแบบ Creep test การทดสอบแบบ Creep test หรือ Stress relaxation นี้ ถือเป็น การทดสอบที่ใกล้เคียงกับสถานะการณ์ใช้งานจริงของพอลิเมอร์มากกว่า เนื่องจากการวัด Dimension stability นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ คือ ชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรงคัมเบล (Dumbbell) ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่น กรณีที่เป็นยางก็จะได้จากการตีแผ่นยางเป็นรูปคัมเบลด้วยด้าย (Die) (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ใน Compression mould) ส่วนในกรณีของพลาสติก อาจจะได้จากกระบวนการฉีด (Injection moulding) หรือได้จากการตัดแผ่นพลาสติกด้วยด้ายในทานองเดียวกันกับยาง ถ้าหากพลาสติกดังกล่าวมีความแข็งต่ำ เช่น Plasticized PVC

ในการทดสอบ จะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) ดังภาพที่ 2-20 แล้วทำการดึงยึดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยึดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง



ภาพที่ 2-17 การจับชิ้นงานในการทดสอบ Tensile Strength

ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบ คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง

จากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนามาคำนวณค่า Tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Tensile stress (ความเค้น)} &= \text{แรง (N)} / \text{พื้นที่หน้าตัดบริเวณตรงกลาง (m}^2\text{)} \\ &= F/A \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tensile strain (ความเครียด)} &= \text{ระยะยืด} / \text{ระยะความยาว gauge เริ่มต้น} \\ &= \Delta L / L_0 \text{ (dimensionless)} \end{aligned}$$

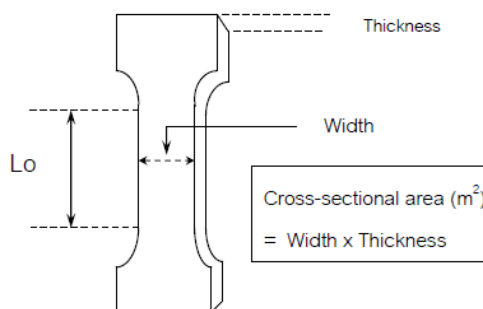
$$\text{Elongation (การยืดตัว)} = \text{ระยะยืด } (\Delta L), \text{ mm}$$

$$\text{Tensile Modulus (ความแกร่ง)} = \text{Stress} / \text{Strain (MPa)}$$

1.2.1 ค่าการยืดตัว

ภาพที่ 2-21 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูปคัมเบลสำหรับการทดสอบแรงดึง โดยในการ คำนวณค่าความเครียด (Strain) จะใช้ค่า L ต่อ L_0 ซึ่งต้องระวังด้วยว่าค่าที่ใช้ต้องเป็นค่าที่มาตรฐาน กล่าวคือ ΔL ควรวัดโดยใช้ Extensometer จะแม่นยำกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่วัสดุทดสอบเป็นยางที่จะยืดตัวได้มากจนเข้าสู่บริเวณรอยคอดของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามกรณีที่เป็น

พลาสติกแข็งอาจจะอนุโลมให้ใช้ระยะเดินทางของมือจับ (Grip) เป็น ΔL แทนได้ เนื่องจากพลาสติกแข็ง มักจะยืดตัวได้น้อยและนิ่มขนาดก่อนจะเกิดการยืดบริเวณรอยคอด



ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างขนาดและรูปทรงชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

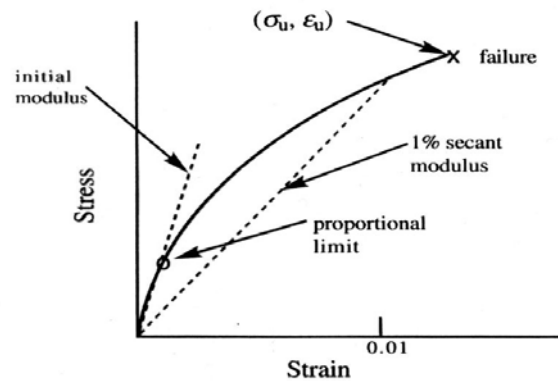
ส่วนค่า L_0 นั้นต้องดูตามมาตรฐานของ Standard method ที่ใช้ทดสอบ (ASTM D638, JIS 2000 ISO, DIN) ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีขนาดชิ้นงานไม่เท่ากัน และมีระยะเกจ (Gauge) ไม่เท่ากัน และที่สำคัญต้องไม่เข้าใจผิดว่า L_0 คือ ระยะระหว่างมือจับ หรือระยะระหว่างรอยคอด ซึ่งถ้าใช้ค่า L_0 ในการคำนวณ Strain ไม่ถูกต้อง จะทำให้ค่า Strain และโมดูลัสที่ได้คลาดเคลื่อน และอาจมีปัญหากับการนำไปใช้อ้างอิงกับตัวอย่างอื่น

1.2.2 ค่าการทนแรงดึง

ในบางครั้ง อาจจะรายงานผลการทดสอบค่าการทนแรงดึงเป็นรูปของค่า Tensile strength ซึ่งโดยปกติจะ หมายถึง ค่า Maximum tensile stress นอกจากนั้นบางกรณีอาจจะรายงานผลค่า Tensile strength ที่จุดใด ๆ ก็ได้ เช่น ที่จุดคราก (Yield point) จะได้ Tensile strength at yield หรือที่จุดขาดจะได้ Tensile strength break ส่วนคำว่า Ultimate tensile stress (หรือ Strength) จะหมายถึงค่า Strength หรือ Stress ที่จุดสูงสุดของกราฟ ซึ่งอาจจะเป็นที่ Break point หรือ Yield point ก็ได้

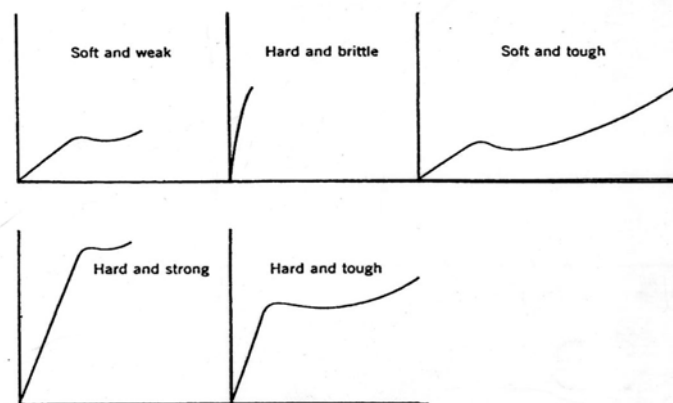
1.2.3 ค่าโมดูลัส

ค่าโมดูลัสที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ จะได้จากการคิดคำนวณจากกราฟในช่วงเส้นตรง (Linear) หรือช่วงที่ยังมีพฤติกรรมเป็นแบบอีลาสติก (ช่วงการยืดตัวหรือ Strain น้อย ๆ) และบางครั้งจะเรียกค่าโมดูลัสในแบบดังกล่าวว่า Young's modulus หรือ Initial modulus นอกจากนั้นยังมีค่า โมดูลัสอีกลักษณะหนึ่ง คือ Secant modulus ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดจากช่วงต่าง ๆ ในเส้นกราฟดังภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 การหาค่ามอดูลัสในแบบต่าง ๆ

สำหรับพฤติกรรมของกราฟ แรงกับระยะทาง (หรือ Stress-strain) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัสดุ แต่ละประเภทนั้น จะแตกต่างกันออกไป 1) วัสดุบางตัวจะนิ่ม และไม่แข็งแรง (Soft and Weak) เช่น เทียนไข พาราฟินส์ หรือ Wax 2) วัสดุบางตัวจะแข็งแต่เปราะ (Hard and Brittle) เช่น PS, PMMA 3) วัสดุบางตัวจะนิ่มแต่เหนียว (Soft and Tough) เช่น ยางธรรมชาติ NR 4) วัสดุบางตัวจะแข็งและแข็งแรง (Hard and Strong) เช่น thermosets 5) วัสดุบางตัวจะแข็งและเหนียว (Hard and Tough) เช่น Nylon, PC, Kevlar ซึ่งแต่ละชนิดจะมีกราฟทั่วไปเป็นลักษณะดังภาพที่ 2-20

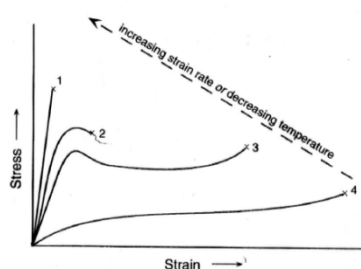


ภาพที่ 2-20 ลักษณะกราฟแรงดึง-ระยะทาง ของวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มต่าง ๆ

จะเห็นได้ว่ามีค่าที่สำคัญอยู่สามกลุ่ม คือ Soft/ Hard brittle/ Tough และ Weak/ Strong ซึ่งค่าสำคัญทั้งสามกลุ่มจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านการทนแรงดึง (Tensile parameters) สามชนิด คือ Modulus, Toughness และ Stress (Strength) ตามลำดับ

1.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วในการดึงต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

ในพฤติกรรมของกราฟแรงดึง-ระยะทาง ของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงไปถ้าหากอุณหภูมิขณะทดสอบเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 2-23 ยกตัวอย่างเช่น PMMA ซึ่งมีลักษณะแข็งและเปราะที่อุณหภูมิต่ำอาจแสดงกราฟที่มี Yield point และมีการยืดตัวมากขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60°C หรือสูงกว่านั้น หรือในทางกลับกัน ขงที่มีการยืดตัวได้มากแต่มีความแข็งต่ำก็อาจมีการยืดตัวที่ลดลง และความแข็งเพิ่มมากขึ้นถ้าหากทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า Glass transition temperature ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก



ภาพที่ 2-21 การเปลี่ยนแปลงลักษณะกราฟแรงดึง-ระยะทาง ของพอลิเมอร์ตามอุณหภูมิและอัตราการดึงทดสอบ

2. คุณสมบัติการไหล

อัตราการไหลของพลาสติก (Melt Volume Rate, MVR)

เป็นคุณลักษณะเฉพาะของการไหลของพลาสติกแต่ละชนิด ซึ่งเป็นสิ่งที่มีผลสำคัญต่อวิธีการทำผลิตภัณฑ์และการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้เทคนิคการคำนวณปริมาตรของพลาสติกในกระบอกทดสอบ (Cylinder) ภายใต้อุณหภูมิและน้ำหนักกดตามมาตรฐานกดลงบนแท่งกด (Piston) โดยให้แท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวก็จะไหลผ่านหัวตาย (Die) ออกมาดังภาพที่ 2-13 ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าที่ออกมาสามารถคำนวณให้เป็นค่าอัตราการไหล (MVR) และมีหน่วยเป็น $\text{cm}^3/10\text{min}$ สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบหาค่า MVR

ของพลาสติก โดยอ้างอิงมาตรฐาน ISO1133: 2005 (Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and The melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics)

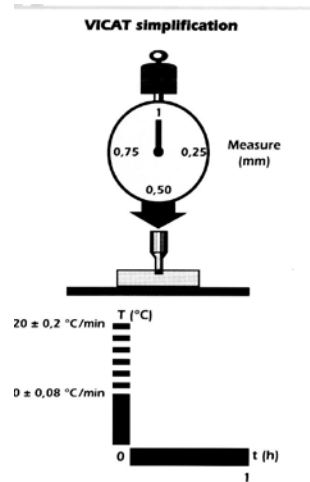


ภาพที่ 2-22 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

3. คุณสมบัติทางความร้อน

3.1 อุณหภูมิอ่อนตัว (Vicat softening temperature)

เป็นการทดสอบการทนความร้อนของพลาสติกซึ่งเป็นค่าที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตหรือการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ โดยการทำให้ชิ้นงาน (Specimen) ถูกกดทับด้วยเข็ม (Needle) หรือ Standard indenter ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกยาว 3 มม. หน้าตัดเป็นวงกลมมีพื้นที่ 1.000 ± 0.015 ตร.มม. กดลงไปบนเนื้อพลาสติกจนลึก 1 ± 0.01 มม. ภายใต้แรงที่กำหนด และในขณะเดียวกัน ก็มีการเพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่คง ดังภาพที่ 2-15 ผลการทดสอบมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) สำหรับในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาตรฐาน ISO306: 2004 (Determination of Vicat softening temperature, VST) โดยใช้ Method B120 (force 50 N and a heating rate of 120°C/h.)



ภาพที่ 2-23 การทดสอบหาค่าอุณหภูมิอ่อนตัว



ภาพที่ 2-24 เครื่องมือทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัว

3.2 การทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือ T_g

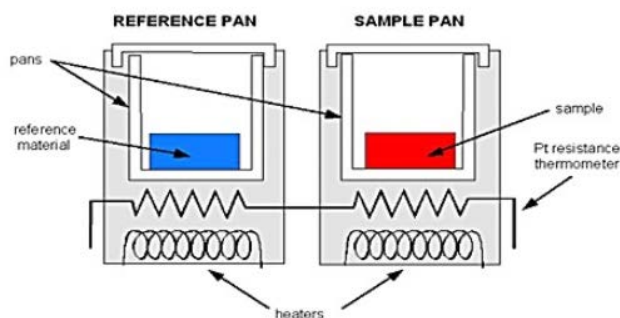
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือ T_g คือ อุณหภูมิที่สารโมเลกุลใหญ่อย่างพวกพอลิเมอร์ เปลี่ยนสถานะจากแก้ว (Glassy state) ไปเป็นสถานะยาง (Rubbery state) โดยที่ถ้าพอลิเมอร์นั้นอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่า T_g นั้นจะมีลักษณะแข็งเหมือนแก้ว ในขณะที่ถ้าอยู่ในอุณหภูมิสูงกว่าค่า T_g นั้นจะมีลักษณะอ่อนนุ่ม หยุน เหมือนยาง ตัวอย่างเช่น Polystyrene (PS) นั้นมีค่า T_g ประมาณ 90°C เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง (~20-35°C) จะมีลักษณะแข็งเปราะเหมือนแก้ว ในขณะที่ยางธรรมชาติ จะมีค่า T_g ประมาณ -72°C เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง ยางธรรมชาติจะนิ่มหยุนเหมือนยาง

แต่ถ้านำมาแช่ในไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิประมาณ -210°C จนถึง -196°C ก็จะทำให้ยางธรรมชาตินั้นมีลักษณะแข็งเปราะเหมือนแก้วเช่นกัน

การทดสอบ T_g เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ความร้อน (Thermal analysis) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดหนึ่งที่วัดสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของสารต่าง ๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry หรือเรียกย่อ ๆ ว่า DSC ซึ่งวัดอุณหภูมิและ Heat flow จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Thermal transition) ของวัสดุ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic processes) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat capacity changes)

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่าเครื่อง DSC เป็นแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal transition) ของสารตัวอย่าง ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม

หลักพื้นฐานของ DSC คือ นำถาดมา 2 ถาด คือ ถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample pan) และถาดอ้างอิง (Reference pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่าวางอยู่ข้างกันไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ชนิดเดียวกัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-25 เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10°C ต่อ 1 นาที) โดยจะควบคุมให้ความร้อนถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง



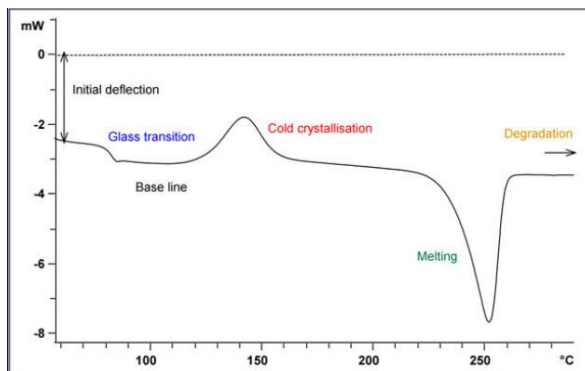
ภาพที่ 2-25 หลักการวัดของ DSC

หลังการให้ความร้อน อุณหภูมิของธาตุทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างมีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ธาตุอ้างอิงไม่มี การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างมีสสารในปริมาณที่มากกว่าธาตุอ้างอิง นั่นหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อนธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ธาตุอ้างอิง เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างจะต้องทำงานหนักกว่า Furnace ที่อยู่ใต้ธาตุอ้างอิง คือ มันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก Furnace ทั้งสองนี้ คือ หน้าหลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ Furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น 10°C ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C) หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบ คือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ)

ความร้อนที่ไหลสารตัวอย่าง (Heat flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ไหลสารตัวอย่างและถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (Milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ไหลสารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อน ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าที่ให้ธาตุอ้างอิงเพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างและ ธาตุอ้างอิงให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง ธาตุที่บรรจุสารตัวอย่างมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง ธาตุอ้างอิงนั้น ขึ้นอยู่กับว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic



ภาพที่ 2-26 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันทิมา ศิประเสริฐกุล (2554) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และยางธรรมชาติ (NR) จากการที่ PLA เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความอึดและแข็งแรงสูง แต่เปราะ จึงทำการผสมกับยางธรรมชาติเพื่อช่วยเพิ่มความเหนียว พบว่า ยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความเหนียวแบบดึงและความทนต่อแรงกระแทกให้กับ PLA ได้โดยสัมพันธ์กับโครงสร้างเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่ได้เมื่อใช้ปริมาณยางและปัจจัยการขึ้นรูปต่าง ๆ ทั้งนี้ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 10% โดยน้ำหนัก ผสมที่อุณหภูมิ 180°C ด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ซึ่งให้ขนาดอนุภาคยางเท่ากับ 2.23 μm กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อเมทริกซ์ PLA แสดงสมบัติด้านความเหนียวดังกล่าวสูงที่สุด เมื่อปริมาณยางสูงกว่า 10% โอกาสการรวมตัวของอนุภาคยางขณะผสมมีสูงขึ้น ทำให้ได้อนุภาคขนาดใหญ่และกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ในด้านสมบัติทางความร้อน การผสมยางธรรมชาติแทบไม่ส่งผลต่อปริมาณผลึกของ PLA แม้ว่าจะเอื้อต่อการเกิดผลึกที่มีความสมบูรณ์สูงกว่า

ระพีพันธ์ แดงตันกี (2552) ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหลและพฤติกรรมการบวมตัวของยางธรรมชาติ ผสมสารตัวเติมซิลิกาและออร์กาโนเคลย์ ซึ่งเป็นผลกระทบของสารคู่ควบไซเลน โดยการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนนี้และวัดสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ พบว่ายางธรรมชาติ ที่ผสมซิลิกา 40 ส่วน เมื่อเทียบกับปริมาณยางทั้งหมด 100 ส่วน ที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณร้อยละ 5 (โดยน้ำหนักของซิลิกา) มีความหนืดหมุนนี้ การไหลแบบเนียน การไหลแบบยืดดึงและการบวมตัวลดลงกว่าการไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ในยางธรรมชาติ ที่ผสมไฮบริดฟิลเลอร์ปริมาณรวมของไฮบริดฟิลเลอร์ 40 ส่วน ซึ่งอัตราส่วนของออร์กาโนเคลย์ (C) และซิลิกา (S) ดังนี้ C30 : S10, C20 : S20 และ C10 : S30 โดยเติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณร้อยละ 5 (โดยน้ำหนักของซิลิกา) พบว่ายางธรรมชาติผสมไฮบริดฟิลเลอร์

มีการไหลแบบเฉือนอยู่ในช่วงระหว่างยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมเพียงชนิดเดียว ส่วนการไหลแบบยืดดึงมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติผสมโมโนฟิลเลอร์และการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน

โอบเอื้อ อิมวิทยา (2543) ศึกษาการนำเขม่าดำ (N330, N550 และ N660)

และแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ STR 5L เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมเหล่านี้ต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของยางรองแทนเครื่องจักรจากผลการทดลอง พบว่า การใช้เขม่าดำ N330 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด จะให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงได้นำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ร่วมกับเขม่าดำ N330 เพื่อลดต้นทุนการผลิต จากผลการศึกษาทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล พบว่าการใช้เขม่าดำ N330 ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 45/ 15 ส่วนต่ออย่าง 100 ส่วน จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมาะสำหรับการทำยางรองแทนเครื่องจักรมากที่สุด

สิรินภา ดอกเกียง (2553) ศึกษาการลดต้นทุนการผลิตโดยการหาปริมาณคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) ที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกผสมพอลิคาร์บอเนตและเอบีเอส โดยวิธีออกแบบการทดลองงานมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of experiment) เพื่อศึกษาหาปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกผสมพอลิคาร์บอเนตและเอบีเอส สีดำ 4 เกรด โดยการใช้วิธีออกแบบการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยเดียว (Single factor analysis of variance) ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองซึ่งมีระดับของพารามิเตอร์ทั้งสิ้น 4 ระดับ คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็ก ที่ 0.75% ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้ในปัจจุบัน และลดปริมาณลงเป็น 0.6%, 0.5% และ 0.4% ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าปริมาณ Carbon black ที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านสีและคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับทุกผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาจากข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์พบว่าทุกความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็กทำให้คุณสมบัติของพลาสติก ทั้งทางด้านสีและคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกยังอยู่ในข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลาสติกผสมพอลิคาร์บอเนตและเอบีเอส สีดำทั้ง 4 เกรด คือ 0.4% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถของกระบวนการทั้งในระยะสั้นและระยะยาว และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากถึง 1,288,000 บาทต่อปี

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานนิพนธ์

วัสดุอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานนิพนธ์นี้ ดังแสดงตามตารางที่ 3-1 ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องแลปมหาวิทยาลัยบูรพา และห้องปฏิบัติการบริษัทกรณีศึกษา

ตารางที่ 3-1 อุปกรณ์และเครื่องมือหลักที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อเครื่องมือ	บริษัทที่ผลิต	รุ่น	ประเทศผู้ผลิต
เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)	Sartarius	CP2245	เยอรมัน
เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)	Sartarius	BP6100	เยอรมัน
ตู้อบชนิดสูญญากาศ	Heraeus	VT6130M	เยอรมัน
ตู้อบชนิดหมุนเวียนอากาศ	TPS	DC336-JY-PM	สหรัฐอเมริกา
เครื่องตัดพลาสติก	Accucutter	Blade stabilizer	สหรัฐอเมริกา
Circulation air oven	Worldco	HERAEUS : UT 6200	สหรัฐอเมริกา
เครื่อง Injection machine	Arburg	370C 2000-800	เยอรมัน
แม่พิมพ์ชิ้นงานทดสอบ Tensile	Hannoway	-	จีน
แม่พิมพ์ชิ้นงานทดสอบ Izod impact strength	Hannoway	-	จีน
เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two mill roll)	NA-Rongchai Engineering	NAL RM 110	ไทย
เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)	Zwick	Z010TH	เยอรมัน
เครื่องทดสอบ VST	Coesfeld	COESFELD : IC6	เยอรมัน
เครื่องทดสอบ Izod impact test	Zwick	2011 ZWICK/ROELL	เยอรมัน
Melt flow rate indexer (MVR)	Zwick	AFlow	เยอรมัน

ตารางที่ 3-1 (ต่อ)

ชื่อเครื่องมือ	บริษัทที่ผลิต	รุ่น	ประเทศผู้ผลิต
Differential scanning calorimetry (DSC)	Mettler Toledo	METTLER : DSC823e	เยอรมัน
Scanning electron microscope	FEI	Quanta 200 FEG	สหรัฐอเมริกา
เครื่องบดพลาสติก	NA-Rongchai Engineering	NAC 5	ไทย

สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานนิพนธ์นี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทกรณิศศึกษา โดยมีรายการดังต่อไปนี้

- เม็ดพลาสติกเกรด 24XX ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตพอลิคาร์บอเนตของบริษัทกรณิศศึกษา
- ยางธรรมชาติแบบแท่ง เกรด STR 5L จากบริษัท ไทยฮั่ว จำกัด
- เอบีเอส (ABS) ที่ใช้ในการทดลองจากบริษัทกรณิศศึกษา
- สารทลคัม ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) ได้จากบริษัทกรณิศศึกษา
- อะคริลิกรับเบอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มการทนแรงกระแทก (Impact modifier) ได้จากบริษัทกรณิศศึกษา
- Thermal stabilizer A ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน (Thermal stabilizer) ได้จากบริษัทกรณิศศึกษา

วิธีดำเนินการวิจัย

- การผสมพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่หนึ่ง วัตถุประสงค์ในงานนิพนธ์นี้ คือ ศึกษาความเป็นไปได้ในการทดแทนเอบีเอสด้วยยางธรรมชาติในคอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของปริมาณยางธรรมชาติทลคัมและอะคริลิกรับเบอร์ ในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต และคอมโพลิตพอลิคาร์บอเนตด้วย ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต จึงมีด้วยกันทั้งหมด 10 สูตรด้วยกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3-2

ตาราง 3-2 อัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมและคอมโพลิต

สูตร	ชื่อตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก					
		PC24xx	NR	ABS	Talcum	TS A	AR
1	PC 100	100	-	-	-	-	-
2	PC95+NR5	94.9	5	-	-	0.1	-
3	PC90+NR10	89.9	10	-	-	0.1	-
4	PC85+NR15	84.9	15	-	-	0.1	-
5	PC92.5+NR5+Talcum2.5	92.4	5	-	2.5	0.1	-
6	PC90+NR5+Talcum5	89.9	5	-	5.0	0.1	-
7	PC87.5+NR5+Talcum7.5	87.4	5	-	7.5	0.1	-
8	PC80+NR15+Talcum5	79.9	15	-	5	0.1	-
9	PC83+NR15+AR2	82.9	15	-	-	0.1	2
10	PC90+ABS5+Talcum5	89.9	-	5	5	0.1	-

หมายเหตุ: PC คือ พอลิคาร์บอเนต NR คือ ยางธรรมชาติ ABS คือ เอบีเอส TS A คือ Thermal Stabilizer A AR คือ อะคริลิครีบบเบอร์

การทดลองนี้ ได้ออกแบบมาเพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณยางธรรมชาติ ปริมาณ ทัลคัม และผลกระทบของอะคริลิครีบบเบอร์ โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

PC 100 เป็นพอลิคาร์บอเนต 100% เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์อ้างอิง

PC95 + NR5, PC90 + NR10, PC85 + NR15 เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณยางธรรมชาติในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติ

PC85 + NR15, PC80 + NR15 + Talcum5 และ PC83 + NR15 + AR2 เพื่อศึกษาผลกระทบของทัลคัม และอะคริลิครีบบเบอร์

PC90 + NR5 + Talcum5 และ PC90 + ABS5 + Talcum5 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทดแทนเอบีเอส ด้วยยางธรรมชาติ

หมายเหตุ: มีการเติม Thermal stabilizer A ซึ่งเป็น Thermal stabilizer ปริมาณ 0.1% โดย น้ำหนัก แต่จะไม่กล่าวถึงในผลการทดสอบ เนื่องจากปริมาณการเติมค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับ ส่วนผสมอื่น ๆ

การผสมพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต ด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง หรือ Two mill roll ที่อุณหภูมิ 250°C โดยขั้นตอนการผสม ดังนี้

1.1 ชั่งส่วนผสมตามตารางที่ 3-2

1.2 ใส่พอลิคาร์บอเนตเข้าไปในเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง จนพอลิคาร์บอเนต หลอมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที

1.3 ใส่ยางธรรมชาติ และรอประมาณ 5 นาที จนพอลิเมอร์ผสมผสมเข้ากันดี

1.4 ใส่ Thermal stabilizer A และสำหรับพอลิคาร์บอเนต คอมโพลิต ที่ต้องเติม เอบีเอส ทัลคัมและอะคริลิครีบบอร์ให้ใส่พร้อมกันในขั้นตอนนี้ หลังจากนั้นรอประมาณ 5 นาที ให้ ส่วนผสมผสมเข้ากันดี

1.5 รีดพอลิเมอร์ผสม/คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต ออกจากเครื่องผสมแบบเปิดสอง ลูกกลิ้ง จากขั้นตอนนี้ จะได้พอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นก้อน

2. การบดพอลิเมอร์ผสม/คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต

นำพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมแบบเปิด สองลูกกลิ้ง ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อน และทิ้งให้ไว้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง บดพลาสติกและกรองผ่านตะแกรงขนาด 8 มม. จะได้พอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนตที่มี ลักษณะเป็นชิ้นเล็ก ๆ

3. การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม/คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต

ในขั้นตอนนี้ จะเป็นการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนตเป็นชิ้นงาน (Specimen) ตามชนิดการทดสอบโดยพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากการบด ต้องผ่านการอบใน Circulation air oven ที่อุณหภูมิ $90 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปขึ้น รูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่อง Injection molding ชื่อ Arburg Injection molding machine ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้น รูป มี 2 แบบ คือ

3.1 ชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 527-1 ซึ่งมีรูปร่างเป็นคัมเบลแบบ 1A หนา 4 มม. สำหรับใช้ในการทดสอบการทนแรงดึง หรือ Tensile strength และการศึกษาการกระจายตัวของ พอลิเมอร์

3.2 ชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 180 ซึ่งมีรูปร่างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 10 มม. ยาว 80 มม. และหนา 4 มม. สำหรับการทดสอบการทดสอบการทนแรงกระแทกหรือ Impact strength และการทดสอบอุณหภูมิของการอ่อนตัวหรือ Vicat

ส่วนการทดสอบอัตราการใช้โพลีเอทิลีน หรือ MVR และทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือ Tg สามารถใช้พอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลีเมอร์คาร์บอนเนต ที่ได้จากการบดนำไปทดสอบได้เลยโดยไม่ต้องขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน

การทดสอบคุณสมบัติของคอมโพลีเมอร์

1. การทดสอบการทนแรงกระแทก (Izod impact strength)

การทดสอบการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลีเมอร์คาร์บอนเนต ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 180 การทนแรงกระแทกเป็นการวัดความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของวัสดุภายใต้การกระทบมีหน่วยเป็น kJ/m^2 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระทบ (Pendulum impact) ชิ้นงานที่อยู่ในลักษณะตั้งตรงให้แตกหักออกโดยให้ชิ้นงานอยู่ในระยะที่กำหนด ทั้งแบบบาก (Notched) หรือ ไม่บาก (Unnotched) ทั้งนี้ค่าการทนแรงกระแทก ใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการใช้งานพลาสติก เนื่องจากอุณหภูมิก็มีผลสำคัญต่อความทนแรงกระทบของพลาสติก โดยพลาสติกบางชนิดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมที่มีความเหนียวเป็นแบบเปราะได้เมื่ออุณหภูมิลดลง

การเตรียมชิ้นงาน เตรียมจาก Injection molding อย่างน้อยจำนวน 12 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง ก่อนการทดสอบ ต้องทำการ Notched หรือบากชิ้นงาน ด้วยเครื่อง Notching machine model BH023.ZNO.003/2011 แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 10\%$ เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาทีก่อนทำการทดสอบ โดยใช้ลูกตุ้มขนาด 2.75 J

2. การทดสอบการทนแรงดึง หรือ Tensile strength

การทดสอบการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลีเมอร์คาร์บอนเนต ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 527 กล่าวคือ เก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบในห้องที่ทำการวัดและควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงอาศัยการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคาน โดยหัวจับด้านล่างถูกยึดอยู่กับที่ และหัวจับด้านบนจะยึดติดกับคานที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะเกิดการหมุนของแท่งเกลียวเหล็กที่อยู่ภายในโครงรับคาน ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถควบคุมค่าความเร็วได้ ซึ่งการทดลองนี้ใช้ความเร็วในการดึงที่ 50 มม.ต่อนาที เมื่อมีการดึงเกิดขึ้นชิ้นงานที่ทดสอบจะถูกยึดออก และเกิดการต่อต้านแรงที่กระทำจากคาน ดังนั้นหัววัดแรงที่ติดกับคานจะทำหน้าที่วัดแรงแล้วส่งข้อมูลไปยังหน่วยแสดงผลเป็นตัวเลขและกราฟ

สำหรับชิ้นทดสอบชนิด 1B มีความยาวพิกัด (Gauge length, L_0) 50 มม. ความกว้างของชิ้นทดสอบ ในช่วงความยาวพิกัด 100 มม. ทำการวัดความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ

ในช่วงความยาวพิคัด เพื่อนำค่าไปคำนวณพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (Cross sectional area) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการทดสอบการทนแรงดึงผลิตโดยบริษัท Zwick รุ่น Z010TH ทำการทดสอบ 5 ชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลิตพอลิคาร์บอเนต แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบน

3. การทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g)

การทดสอบ T_g เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ความร้อน (Thermal analysis) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดหนึ่งที่วัดสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของสารต่าง ๆ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry หรือเรียกย่อ ๆ ว่า DSC ซึ่งวัดอุณหภูมิและ Heat flow จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Thermal transition) ของวัสดุ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic processes) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat capacity changes)

การเตรียมตัวอย่าง ทำโดย ตัวอย่างขนาด 10-15 mg จะถูกบีบให้แบน และบรรจุใน Aluminum crucible pan ขนาด 40 μ L จากนั้นนำไปวัดด้วยเครื่อง DSC ที่ผลิตโดยบริษัท METTLER รุ่น DSC823e การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม และลดอุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิที่คงที่ที่ 10°C ต่อนาที โดยเริ่มต้นที่ 25°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C

4. การทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (Vicat softening point, VSP)

เป็นการทดสอบการทนความร้อนของพลาสติก การวิเคราะห์แบบ Flatwise position การทดสอบ Vicat softening โดยการทำให้ชิ้นงานถูกกดทับด้วย Needle หรือ Standard indenter ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกยาว 3 มม. หน้าตัดเป็นวงกลมมีพื้นที่ 1.000 ± 0.015 ตร.มม. กดลงไปบนเนื้อพลาสติกจนลึก 1 ± 0.01 มม. ภายใต้แรงที่กำหนด และในขณะเดียวกัน ก็มีกรเพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่คงที่ สำหรับการทดสอบ การเตรียม Specimen เตรียมจาก Injection molding โดยขนาดของ Specimen ต้องมีขนาดกว้างอย่างน้อย 10 มม. และหนาอย่างน้อย 3 มม. แต่ไม่เกิน 6.5 มม. โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 306 ด้วย Method B120 โดยใช้ แรง 50 N และมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 120°C ต่อชั่วโมง ด้วยเครื่อง Testing machine HDT/VICAT APPARATUS#4 รุ่น Coesfeld: IC6+

5. การทดสอบอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Melt volumn-Flow rate, MVR)

เป็นการหาลักษณะเฉพาะของการไหลของพลาสติก โดยการหลอมเหลวพลาสติกในกระบอกทดสอบ (Barrel) การคำนวณปริมาตรของพลาสติกภายใน Barrel ขณะที่เกิดการกดโดยน้ำหนักภายใต้สภาวะที่กำหนด คือ อุณหภูมิ น้ำหนักกด ขนาดของ Barrel die และ Piston ภายในระยะเวลาหนึ่ง ค่าที่คำนวณได้มีหน่วยเป็น $\text{cm}^3/10\text{min}$ ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าที่ออกมาสามารถคำนวณให้เป็น MFR หรือ MVR ได้จากการคำนวณกับค่า Melt density ของพลาสติกแต่ละชนิด ณ ที่สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น ๆ

การทดสอบ โดยการอบตัวอย่างประมาณ 6-10 กรัม เพื่อไล่ความชื้นด้วยเครื่อง Moisture Balance ที่ $105\pm 3^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องที่ผลิตโดยบริษัท Zwick รุ่น AFlow ที่ Condition $240\pm 3^\circ\text{C}$ โดยใช้ Die ขนาดความยาว 8.000 ± 0.025 มม. และ 2.095 ± 0.005 มล.

6. การศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม/คอมพอสิตพอลิคาร์บอเนต ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

การศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม/คอมพอสิตพอลิคาร์บอเนต ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope ยี่ห้อ Crest Nanosolution รุ่น Quanta 200 FEG โดยได้ศึกษาภาพด้วยกำลังขยายภาพจากเลนส์ 500, 1,000 และ 2,000 เท่า ด้วย HV เท่ากับ 15 kV

การเตรียมชิ้นงาน ใช้ชิ้นงานเดียวกับการทดสอบการทนแรงดึง โดยนำชิ้นงานไปตัดและวิเคราะห์ตรงส่วนหน้าตัด (Cross section) ของชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลงานนิพนธ์

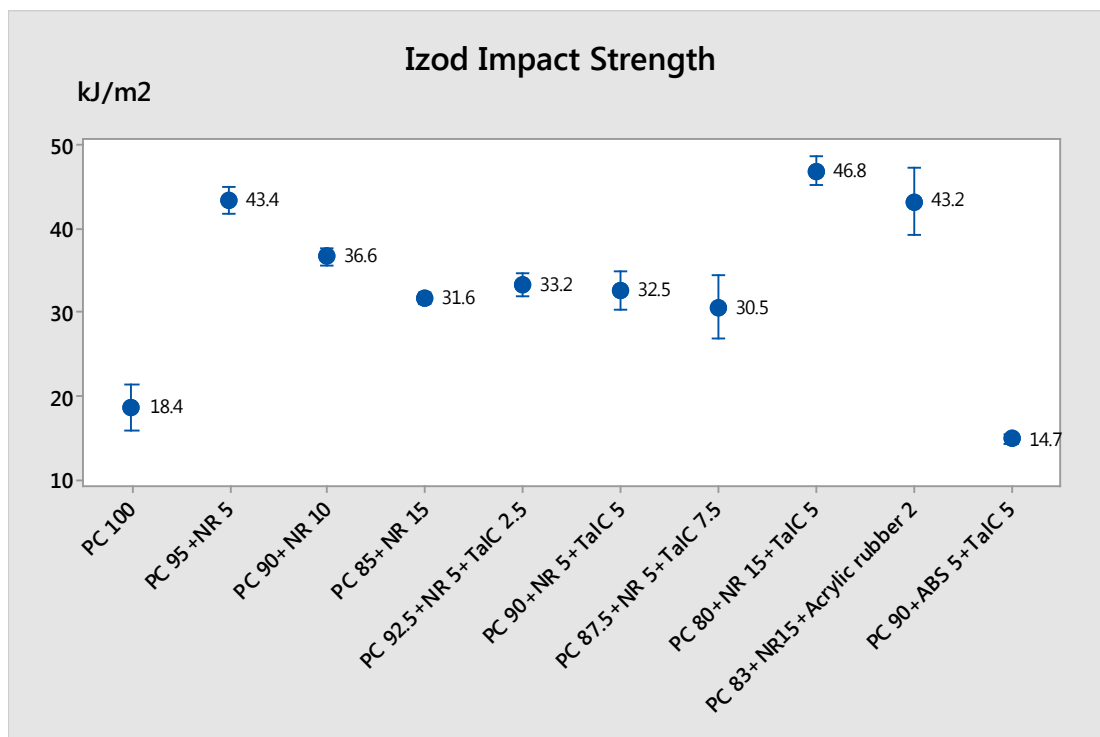
ในงานวิจัยนี้ ได้มีการนำยางธรรมชาติมาใช้แทนเอบีเอส เพื่อการศึกษาคุณสมบัติพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต ทั้งนี้โดยคาดหวังว่ายางธรรมชาติจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตให้ดีขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตที่ได้ นอกจากจะมีราคาที่ถูกลงแล้ว ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

จากขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่สาม ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ และผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้แล้ว สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง ซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้

ความทนแรงกระแทก (IMPACT STRENGTH)

จากการศึกษา พบว่า เมื่อมีการใช้ยางธรรมชาติแทนเอบีเอส ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นมาก (ประมาณ 125%) ดังแสดงในภาพที่ 4-1 ทั้งนี้เป็นเพราะยางธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ดีในด้านการทนต่อแรงกระแทก อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณยางธรรมชาติที่ผสมลงในพอลิคาร์บอเนตมากขึ้น จะส่งผลให้ความทนแรงกระแทกลดลง โดยลดลงประมาณ 15% ต่อปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น 5% ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต 95% และยางธรรมชาติ 5% อยู่ที่ประมาณ 43 kJ/m^2 แต่เมื่อมีการลดปริมาณพอลิคาร์บอเนตลงเล็กน้อยและเติมทัลคัมซึ่งเป็นสารเสริมแรงลงไปในช่วง 2.5-7.5% (ตัวอย่างที่ 4-6) พบว่าความทนแรงกระแทกลดลงอยู่ในช่วง $30-33 \text{ kJ/m}^2$ โดยที่การลดลงของความทนแรงกระแทกน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากการลดลงของปริมาณพอลิคาร์บอเนต และการแยกวัฏภาค (เฟส) ของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณทัลคัมส่งผลต่อการลดลงของแรงกระแทกเพียงเล็กน้อย แต่เป็นที่น่าแปลกใจที่การผสมทัลคัมลงไป 5% ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต 80% และยางธรรมชาติ 15% และการผสมอะคริลิครีลเรซิน ซึ่งเป็นสารเสริมแรงลงไป 2% ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต 83% และยางธรรมชาติ 15% ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มี พอลิคาร์บอเนต 85% และยางธรรมชาติ 15% สูงขึ้นอย่างมากถึง 48 และ 37% ตามลำดับ ทั้ง ๆ ที่ปริมาณพอลิคาร์บอเนตลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะทัลคัมและอะคริลิครีลเรซินช่วยให้พอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติผสมกัน ได้เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นดังจะเห็นได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.8 จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าการเบี่ยงเบนของผลการทดลองมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิเมอร์ผสม

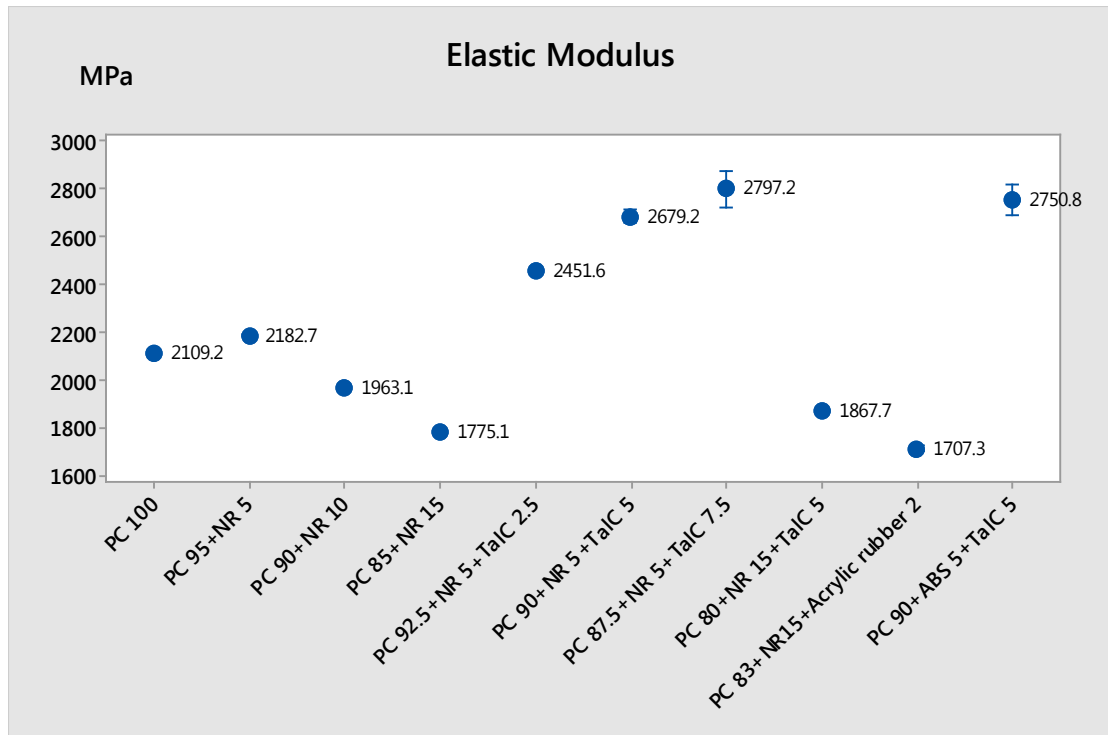
และคอม โพลีตด้วยเทคนิคการผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบความทนแรงกระแทก (Izod impact strength)

มอดูลัสยืดหยุ่น (ELASTIC MODULUS)

เมื่อมีการผสมยางธรรมชาติลงในพอลิคาร์บอเนตในปริมาณที่ต่ำ (5%) ไม่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่นดังแสดงในภาพที่ 4-2 อย่างไรก็ตาม ในทำนองเดียวกันกับผลจากความทนแรงกระแทก ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น โดยมีค่าลดลงประมาณ 10% ต่อการเพิ่มยางธรรมชาติ 5% แต่เนื่องจากทลคัมเป็นสารเสริมแรง การผสมทลคัมในช่วง 2.5-7.5% ลงในพอลิเมอร์ผสมที่มียางธรรมชาติ 5% ส่งผลให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของทลคัม (เพิ่มขึ้น 12-28%) แต่สำหรับอะคริลิครีบบเบอร์ซึ่งเป็นสารเสริมแรง ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มค่ามอดูลัสยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ยางธรรมชาติผสมลงในพอลิคาร์บอเนต/ ทลคัมคอม โพลีตแทนเอบีเอส ในปริมาณที่เท่ากัน ไม่ทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลง เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของพอลิคาร์บอเนต/ เอบีเอส/ ทลคัม คอม โพลีตกับคอม โพลีต พบว่า ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของพอลิคาร์บอเนต/ เอบีเอส/ ทลคัมคอม โพลีต มีค่าต่ำกว่าถึง 15%

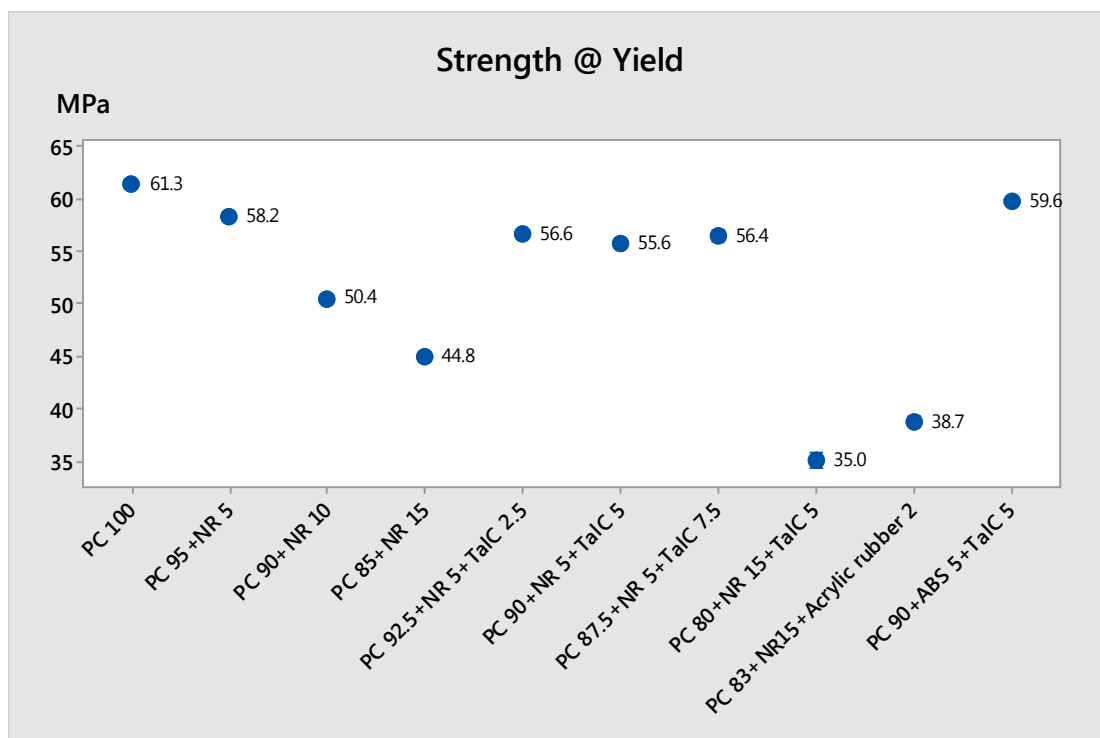


ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)

ความแข็งแรงจุดครากและความแข็งแรงสูงสุด (YIELD STRENGTH AND TENSILE STRENGTH)

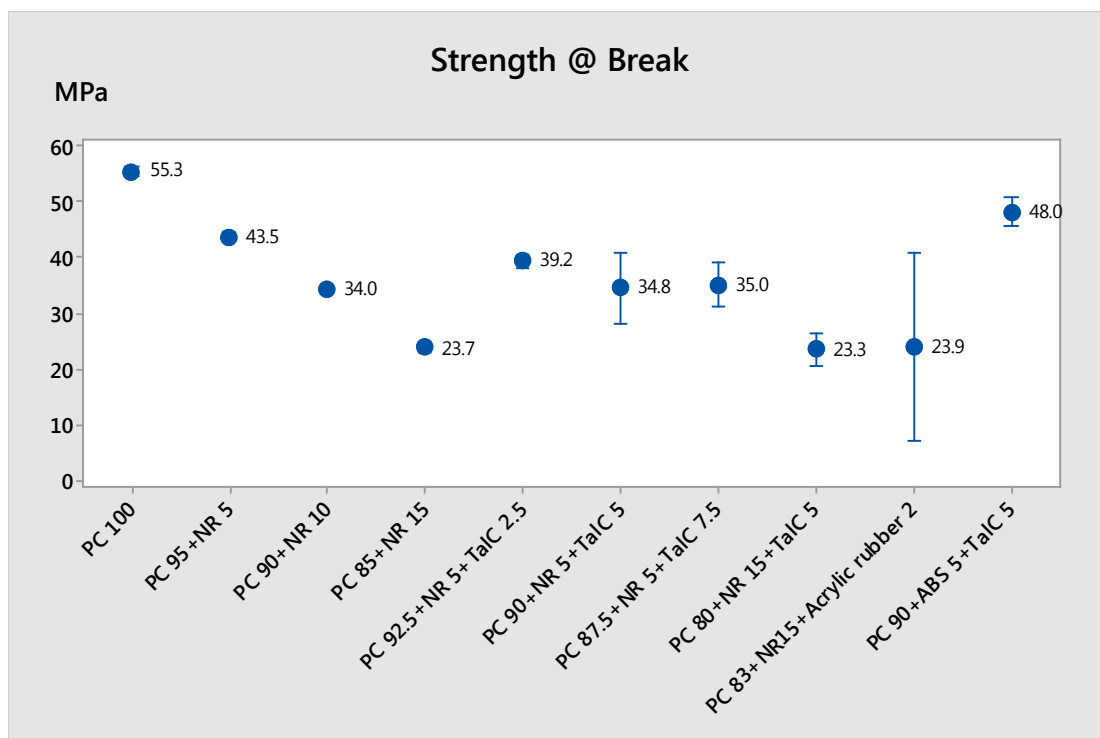
ภาพที่ 4-3 และ 4-4 แสดงความแข็งแรงจุดครากและความแข็งแรงสูงสุดตามลำดับการผสมยางธรรมชาติลงในพอลิคาร์บอเนต ส่งผลให้ความแข็งแรงจุดครากลดต่ำลง ทั้งนี้เพราะยางธรรมชาติมีความแข็งแรงต่ำกว่าพอลิคาร์บอเนตตามการคาดการณ์ เช่นเดียวกับความทนแรงกระแทกและมอดูลัสยืดหยุ่น ความแข็งแรงจุดครากของพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติมีค่าลดลงประมาณ 12% ต่อการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ 5% แต่ที่น่าแปลกใจคือ เมื่อมีการผสมทัลคัมในปริมาณ 2.5-7.5% ลงไปเพื่อให้ได้พอลิคาร์บอเนต/ยางธรรมชาติ/ทัลคัมคอมโพสิต พบว่าความแข็งแรงจุดครากมีค่าลดลงเล็กน้อย (ประมาณ 3%) ซึ่งความแข็งแรงจุดครากที่ลดลงน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณพอลิคาร์บอเนตที่ลดลงเล็กน้อย และปริมาณทัลคัมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงจุดคราก การไม่เสริมแรงในด้านความแข็งแรงจุดครากของทัลคัมสามารถยืนยันได้จากผลการทดลองของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตที่ปริมาณยางธรรมชาติ 15% นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอะครีลิคเรบเบอร์ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงจุดครากเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบพอลิคาร์บอเนต/ ยางธรรมชาติ/ ทัลคัมคอมโพสิต และพอลิคาร์บอเนต/ เอบีเอส/ ทัลคัมคอมโพสิต ที่ปริมาณองค์ประกอบเท่ากัน พบว่าเอบีเอสคอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงจุดครากสูงกว่ายางธรรมชาติคอมโพสิตอยู่ประมาณ 7% และยางธรรมชาติคอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงจุดครากสูงกว่าเอบีเอสคอมโพสิตอยู่ประมาณ 8%



ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบความแข็งแรงจุดคราก (Strength @ Yield)

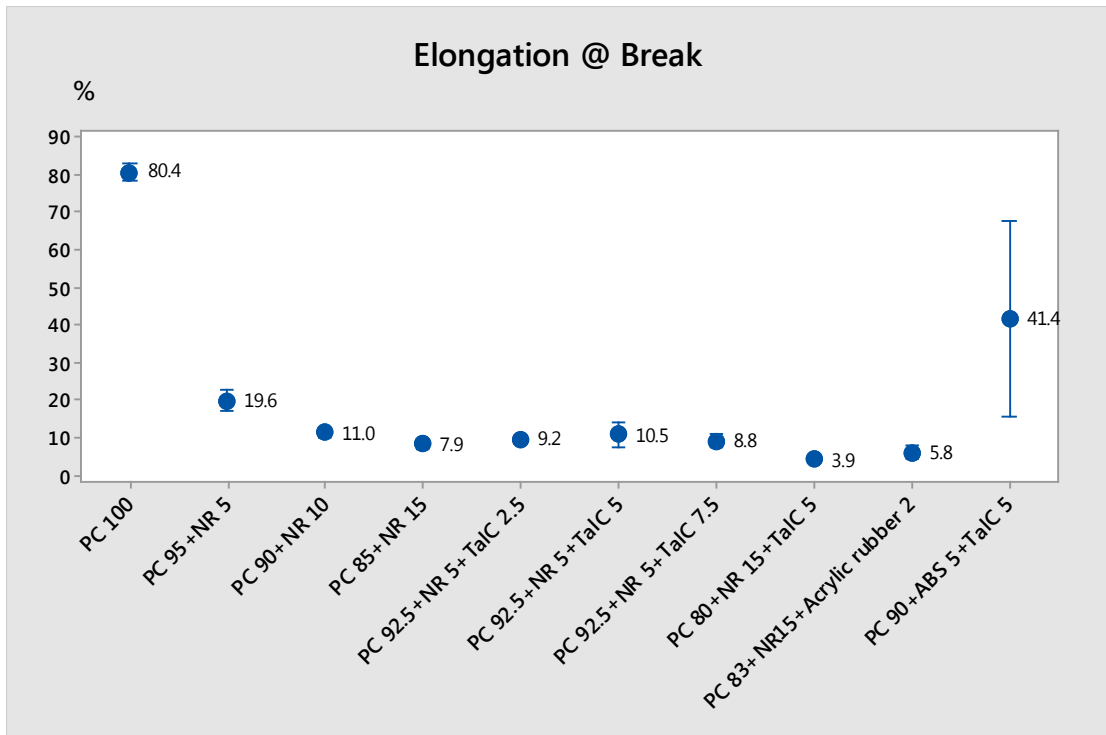
ในทำนองเดียวกัน ผลการทดลองความแข็งแรงสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกับความแข็งแรงจุดคราก กล่าวคือ ความแข็งแรงสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต/ ยางธรรมชาติ มีค่าลดลงตามปริมาณยางธรรมชาติและทัลคัม และอะคริลิครีบบเบอร์ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงสูงสุด ในขณะที่คอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยเอบีเอสมีค่าความแข็งแรงสูงสุดสูงกว่าคอมโพสิตที่มียางธรรมชาติในปริมาณที่เท่ากันอย่างมาก (ประมาณ 30%)



ภาพที่ 4-4 ผลการทดสอบความแข็งแรงสูงสุด (Strength @ Break)

ค่ายืดสูงสุด ณ จุดขาด (ELONGATION @ BREAK)

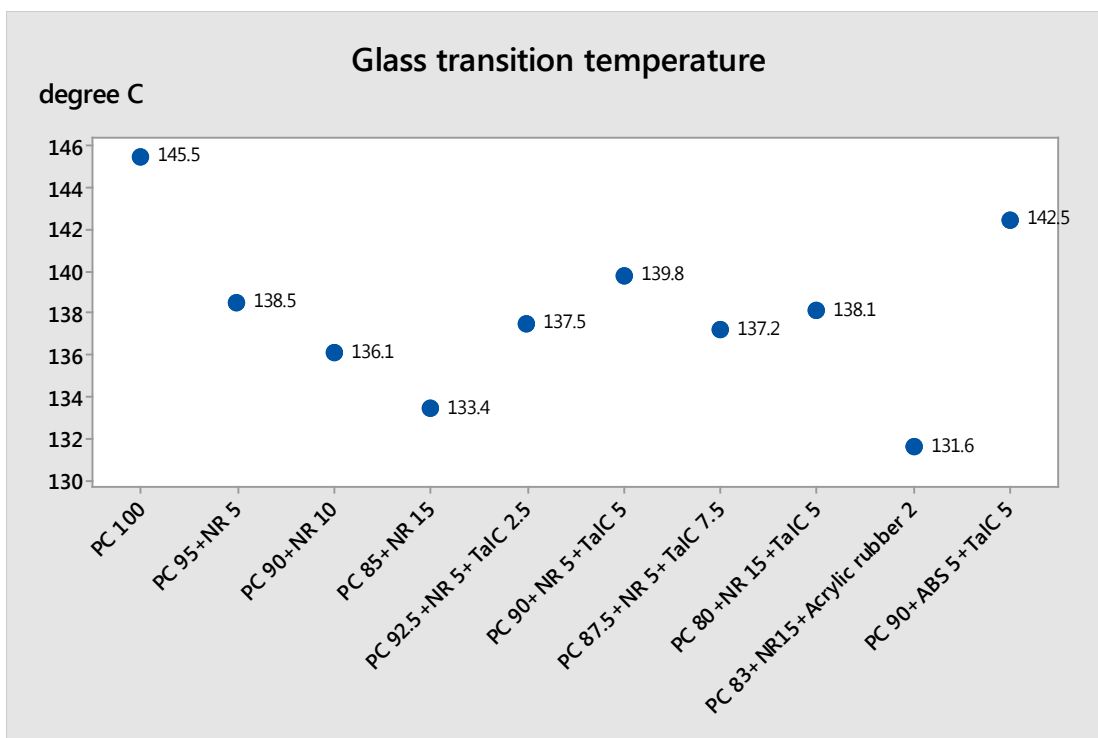
เนื่องจากพอลิคาร์บอเนตมีความเหนียวมากและมีการยืดตัวได้ดี การผสมยางธรรมชาติและเอบีเอสลงไปส่งผลให้ค่ายืดสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยเฉพาะสำหรับพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต/ ยางธรรมชาติ ที่มีค่าลดลงถึง 4 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4-5 เมื่อมีการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ ค่ายืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต/ ยางธรรมชาติ มีค่าลดลงเล็กน้อยตามปริมาณยางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าทัลคัมและอะคริลิครีบบเบอร์ส่งผลให้ความยืดหยุ่นของคอมโพสิตลดลงเกือบ 50% ในขณะที่คอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยเอบีเอสมีค่าความยืดหยุ่นสูงสุดสูงกว่าคอมโพสิตที่มียางธรรมชาติในปริมาณที่เท่ากันอย่างมากถึงเกือบ 4 เท่า และยังมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนต/ ยางธรรมชาติถึง 2 เท่า อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองของพอลิคาร์บอเนต/ เอบีเอส/ ทัลคัมคอมโพสิตมีค่าเบี่ยงเบนที่สูงมาก ทั้งนี้จะเป็นเพราะการที่พอลิคาร์บอเนต/ เอบีเอส/ ทัลคัมคอมโพสิต มีการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบค่ายืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation @ Break)

อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (GLASS TRANSITION TEMPERATURE, T_g)

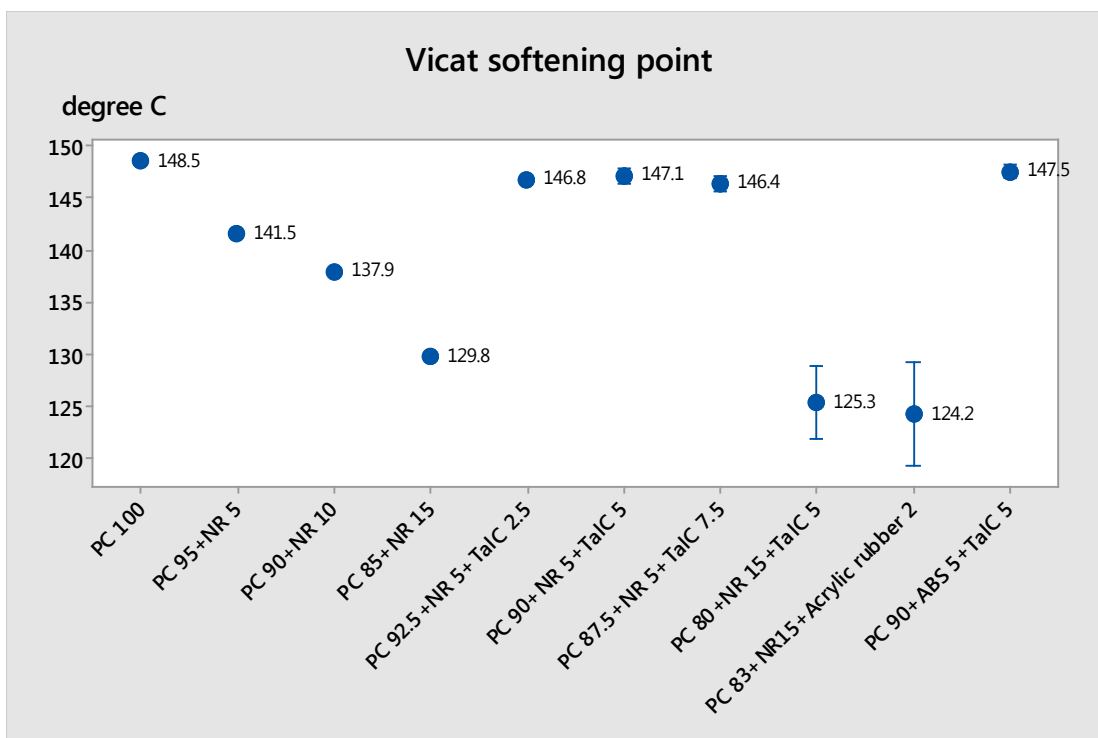
นอกจากการใช้ยางธรรมชาติทดแทนเอบีเอส จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตแล้ว ยังส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเช่นกัน จากภาพที่ 4-5 แสดงค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต พบว่าการผสมเอบีเอสและยางธรรมชาติลงในพอลิคาร์บอเนต ส่งผลให้ T_g มีค่าลดลงเล็กน้อย (T_g ของพอลิคาร์บอเนต ประมาณ 145°C) ทั้งนี้เพราะทั้งเอบีเอสและยางธรรมชาติ มีค่า T_g ที่ต่ำกว่าพอลิคาร์บอเนต คือ 105°C และ -72°C ตามลำดับ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น T_g จึงมีค่าลดลงเล็กน้อย การผสมที่ลดมากลงในพอลิเมอร์ผสมที่มียางธรรมชาติ 5% ไม่ส่งผลให้ T_g เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลอย่างมากสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มียางธรรมชาติ 15% ในขณะที่อะคริลิครีบบเบอร์ไม่ส่งผลต่อ T_g ของพอลิเมอร์ผสมเลย เนื่องจาก T_g ของยางธรรมชาติ มีค่าต่ำกว่า T_g ของเอบีเอสอย่างมาก จึงส่งผลให้เอบีเอสคอมโพสิตมี T_g ที่สูงกว่ายางธรรมชาติคอมโพสิต แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า T_g ของคอมโพสิตทั้ง 2 ต่างกันเพียง 2°C เท่านั้น



ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass transition temperature)

อุณหภูมิการอ่อนตัว (VICAT SOFTENING POINT)

ภาพที่ 4-7 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (Vicat softening point) ซึ่งมีลักษณะที่สอดคล้องกับผลของ Tg กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ จะส่งผลให้ Vicat มีค่าต่ำลง โดยเฉพาะที่ยางธรรมชาติปริมาณสูง (15%) เนื่องจากมีการเติม Ingress ซึ่งเป็นสารต้านการเสื่อมสภาพจากความร้อนลงไปในคอมโพสิตที่ 0.1% จึงเห็นได้ว่า Vicat ของคอมโพสิต มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม แต่ทั้งนี้ สารต้านการเสื่อมสภาพจากความร้อนที่ปริมาณที่ต่ำเพียง 0.1% จึงไม่สามารถช่วยเพิ่ม Vicat ของพอลิเมอร์ผสม ที่มียางธรรมชาติสูงถึง 15% ในทางตรงกันข้าม คอมโพสิตของพอลิคาร์บอเนต/ ยางธรรมชาติที่มียางธรรมชาติ 15% มี Vicat ที่ต่ำลงอันเนื่องมาจากปริมาณพอลิคาร์บอเนตที่ลดลงเล็กน้อย ทดคัมและอะคริลิครีบบอร์ไม่ส่งผลต่อ Vicat ในขณะที่ยางธรรมชาติและเอบีเอสในปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลต่อ Vicat ของคอมโพสิตเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Tg ของคอมโพสิตทั้ง 2 ที่มีความต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นทั้ง ๆ ที่ Tg ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ต่างกันอย่างมาก

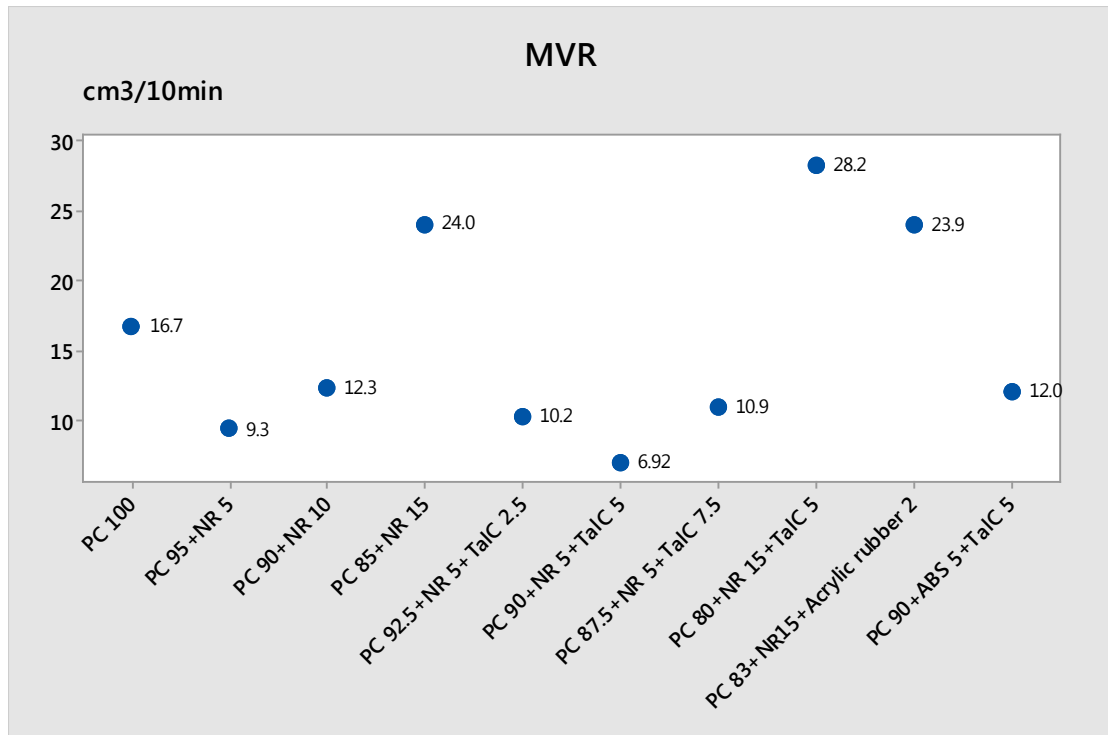


ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (Vicat softening point)

อัตราการไหลเชิงปริมาตร (MELT VOLUME-FLOW RATE, MVR)

เมื่อผสมยางธรรมชาติลงในพอลิคาร์บอเนต ส่งผลให้ทั้ง Tg และ Vicat ลดลง จึงส่งผลให้ MVR เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4-8 โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติสูง MVR จะยังมีค่าสูงมาก โดยที่พอลิเมอร์ผสม/ คอมโพลีเมอร์พอลิคาร์บอเนตที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 5% มีค่า MVR เท่ากับ 9.3 cm³/10min แต่เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มเป็น 10% และ 15% ค่า MVR เพิ่มขึ้นเป็น 12.3 และ 24.0 cm³/10min ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะยางธรรมชาติมีความหนืดน้อยกว่าพอลิคาร์บอเนต

นอกจากนี้พบว่าทัลคัมและอะคริลิครีบบเบอร์ไม่ส่งผลต่อ MVR เช่นเดียวกับที่ไม่ส่งผลต่อ Tg และ Vicat ถึงแม้ว่าการใช้ยางธรรมชาติทดแทนเอบีเอสในคอมโพลีเมอร์ที่มี 5% จะไม่ส่งผลต่อ Tg และ Vicat อย่างมีนัยสำคัญ แต่จะเห็นได้ว่าเอบีเอสคอมโพลีเมอร์ มี MVR ที่สูงกว่ายางธรรมชาติคอมโพลีเมอร์เล็กน้อย ซึ่งบ่งบอกถึงความหนืดของเอบีเอสคอมโพลีเมอร์ต่ำกว่ายางธรรมชาติคอมโพลีเมอร์ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะขึ้นรูปได้ง่ายกว่า



ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบอัตราการไหลเชิงปริมาตร (MVR)

การศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SCANNING ELECTRON MICROSCOPE, SEM)

จากการทดลองศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนตด้วยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 500 1,000 และ 2,000 เท่า พบว่าปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติ จะส่งผลต่อความเป็นวัฏภาค (Phase) ของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ เมื่อปริมาณยางธรรมชาติสูงขึ้น ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) จะลดลง ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบของผสมพอลิคาร์บอเนต/ยางธรรมชาติ ระหว่าง 95/5 และ 85/15 ในภาพที่ 4-8 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ จันทิมา ดิประเสริฐกุล (2554) ซึ่งศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับยางธรรมชาติ ที่พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น โอกาสที่เฟสของยางจะรวมตัวกัน (Coalesce) ขณะผสมในสถานะหลอม จะสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางน้อย ซึ่งความเป็นเนื้อเดียวกันนี้ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติจะมีการแยกเฟสระหว่าง

พอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้ความทนแรงกระแทก มอดูลัสยืดหยุ่น และความแข็งแรงต่อการดึงลดต่ำลงดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว เมื่อมีการผสมทัลคัมลงไปทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตจะพบว่าทัลคัมส่งผลให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติดีขึ้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าอนุภาคของทัลคัมบางส่วนจับตัวเป็นก้อนซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกันเล็กน้อยกระจายตัวอยู่ในคอมโพสิต ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีการเติมอะคริลิครีบบเบอร์ลงในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้พอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นโดยที่อนุภาคอะคริลิครีบบเบอร์ไม่มีจับตัวกันแบบทัลคัม นอกจากนี้พบว่าลักษณะเฟสของคอมโพสิตที่เป็นยางธรรมชาติและเป็นเอบีเอส ไม่มีความแตกต่าง กล่าวคือพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติ/เอบีเอสผสมกันได้เป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีการจับกันเป็นก้อนของอนุภาคทัลคัมกระจายตัวอยู่ในคอมโพสิต

ตัวอย่าง	กำลังขยาย 500 เท่า	กำลังขยาย 1000 เท่า	กำลังขยาย 2000 เท่า
PC 95 NR 5			
PC 85 NR 15			
PC 90 NR 5 Talcum 5			
PC 80 NR 15 Talcum 5			
PC 83 NR 15 AR 2			
PC 90 ABS 5 Talcum 5			

ภาพที่ 4-9 พอลิเมอร์ผสม/คอมพอลิิตพอลิคาร์บอเนต ด้วยกำลังขยาย 500 1,000 และ 2,000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลงานนิพนธ์และข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานนิพนธ์

งานนิพนธ์นี้แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการใช้ยางธรรมชาติแทนเอปีเอสในพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต การผสมยางธรรมชาติลงในพอลิคาร์บอเนตในปริมาณเล็กน้อย (5% โดยน้ำหนัก) ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงกระแทกอย่างมาก อีกทั้งพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อมีการเติมทลคัมลงในพอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติ จะส่งผลในด้านมอดูลัสยืดหยุ่นและทำให้พอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้อนุภาคทลคัมมีการจับตัวกัน ส่งผลให้คุณสมบัติบางประการไม่ดีเท่าที่ควร การเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิตด้อยลง ทั้งนี้เป็นเพราะเหตุผลสองประการ เหตุผลแรกคือ คุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติไม่ดีเท่าคุณสมบัติทางกลของพอลิคาร์บอเนต ยกเว้นในด้านการต้านแรงกระแทก และเหตุผลอีกประการ คือ เมื่อมีการผสมยางธรรมชาติในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม เช่นเดียวกับทลคัม เมื่อผสมอะคริลิครีบบเบอร์ลงในพอลิเมอร์ผสม จะส่งผลให้พอลิคาร์บอเนตและยางธรรมชาติผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น โดยที่อนุภาคอะคริลิครีบบเบอร์ไม่จับตัวกันเป็นก้อน เช่นเดียวกับทลคัม นอกจากคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าหรือเทียบเท่าได้ของพอลิคาร์บอเนต/ยางธรรมชาติ/ทลคัมคอมโพสิต เมื่อเทียบกับ พอลิคาร์บอเนต/เอปีเอส/ทลคัมคอมโพสิตแล้ว ยังพบว่าเมื่อมีการใช้ยางธรรมชาติแทนเอปีเอสในคอมโพสิต ไม่ได้ส่งผลให้คุณสมบัติทางความร้อนและการไหลเปลี่ยนแปลงไปมาก

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบว่า การเตรียมพอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนตด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง หรือ Two mill roll ซึ่งทำได้ง่าย ขั้นตอนไม่ซับซ้อน อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้มีราคาถูก และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

ในงานนิพนธ์นี้ ใช้วิธีผสมพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิ 250°C ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต หรือไม่ โดย

อาจจะมีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต ด้วยเครื่องผสมแบบเปิดสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมพอลิคาร์บอเนตและพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตที่ได้ มาทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลต่อไป

บรรณานุกรม

- จันทิมา ดีประเสริฐกุล. (2554). การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ, สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฐิติพร เพชรอุดม.(2550). การเตรียมพอลิคาร์บอนเนตคอมโพสิตที่นำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นไบโพลาร์เพลต ในเซลล์เชื้อเพลิง แบบฟิวเอ็่ม.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเคมี อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นวดล เพ็ชรวัฒนา. (2554). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ไบเออร์ไทย. (2553). การเปลี่ยนแปลงรายละเอียดโครงการในรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการผลิตโพลีคาร์บอนเนต ครั้งที่ 6. เข้าถึงได้จาก http://eiadoc.onep.go.th/eialibrary/7petro/55/55_1392.pdf
- ปิยฉัตร วัฒนชัย. (2559). หลักเคมีพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: ฟาสต์บุ๊กส์.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). สารเคมียาง. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- พจนพร ฮวบเจริญ, เอกชัย วิมลมาลา, และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ.(2557) การบ่มสุกและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีซิลิกาจากเถ้าชานอ้อย. กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. (2560). *Differential scanning calorimeter* / ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2606/differential-scanning-calorimeter>
- ระพีพันธ์ แดงตันกี, พัชรา โชติช่วง, และ ระพีภรณ์ ศรีสุข. (2560) สมบัติการไหลและพฤติกรรม การบวมตัวของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมออร์กาโนเคลย์ และซิลิกา: ผลของสารกู่ควบไซเลน.เข้าถึงได้จาก http://www.conference.phuket.psu.ac.th/proceedings/PSU_OPEN_WEEK_2009/data/Sciences/Paper22.pdf

- สิรินภา ดอกเกียง. (2553). *การลดต้นทุนการผลิต โดยการหาปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เหมาะสม ในการผลิตพลาสติกผสม PC/ABS โดยวิธีออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการบัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เอื้องดาว จันทร์ดร. (2548). *การเตรียมแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วจากพอลิพรอพิลีนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาเคมีเทค, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โอบเอื้อ อิมวิทยา. (2543). *ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Balakrishnan, S., Neelakantan, N.R., Nabi Saheb., D., & Jog, Jyoti P. (1997) *Rheological and morphological behavior of blends of polycarbonate with unmodified and maleic anhydride grafted ABS*. *Polymer*, 39(23), pp. 5765-5771.
- Ishikawa, Maerua. (1994). *Stability of plastic deformation and toughness of polycarbonate blended with poly (acrylonitrile-butadiene-styrene) copolymer*. *Polymer*, 36(11), pp. 2203-2210.
- Lui, Y., Li, H., Ding, X., Zhu, J., & Zhang, Long. (2014). *Effect of the compatibilizers on polycarbonate (PC) / acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blend*. *American Journal of Materials Research*, 1(3), pp. 48-52.
- Raj, M.M. (2014). *Studies on mechanical properties of PC-ABS blends*. *American Journal of Materials Research*, 3(2), pp. 512-518.
- Santana, O.O., MasPOCH, M.L., & Martinez, A.B. (1998). *Polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends: miscibility and interfacial adhesion*. *Polymer Bullentin*. 41, pp. 721-728.
- Smith, W. F. (1996). *Principle of Material Science and Engineering* (3rd ed.). Newyork: McGraw-Hill.
- Sung, Y.T., Fasulo, P.D., Rodgers, W.R., Yoo, Y.T., Yoo, Y., & Paul, D.R. (2011). *Properties of Polycarbonate/ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene/ Talc Composites*. *Journal of Applied Polymer Science*, 124, pp. 1020-1030.

- Tangudom, P., Thongsang, S., & Sombatsompop, N. (2014). *Cure and Mechanical properties and abrasive wear behavior of natural rubber, styrene-butadiene Rubber and their blends reinforce with silica hybrid fillers. Material and Design, 53*, pp. 856-864.
- Wildes, G.S., Harada, T., Keskkula, H., Paul, D.R., Janarthanan, V., & Padwa, A.R. (1998). *Synthesis and characterization of an amine-function SAN for the compatibilization of PC/ABS blends. Polymer, 40(11)*, pp. 3069-3082.
- Wildes, G., Keskkula, H., & Paul, D.R. (1999). *Fracture characterization of PC/ABS blends: effect of reactive compatibilization, ABS and rubber concentration. Polymer, 40*, pp. 7089-7107.
- Wang, S., Hu Y., Zong, R., Tang Y., Chen, Z., & Fan, W. (2003). *Preparation and characterization of flame retardant ABS/montmorillonite nanocomposite. Applied Clay Science, 25(2)*. pp. 49-55.
- William, D., Callister, Jr., & David G. R. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction (9th ed.)*, New York: John Wiley & Sons Inc.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบ

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ผลการทดสอบความทนแรงกระแทก (Izod Impact Strength) (kJ/m²)

No. of Test	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	14.8	40.5	39.3	31.4	30.4	34.1	27.8	48.9	50.3	13.6
2	25.2	42.0	35.1	33.0	36.4	28.5	19.6	44.0	41.5	16.0
3	22.0	44.9	35.4	31.6	32.7	35.4	29.9	44.6	36.1	15.4
4	22.2	46.2	38.7	31.7	30.9	35.6	31.2	45.4	41.7	14.5
5	15.6	44.2	35.9	31.4	33.8	29.9	32.7	44.4	48.8	14.7
6	18.8	41.0	36.5	33.7	32.6	36.7	34.0	50.7	47.0	15.8
7	20.4	45.0	37.2	30.8	33.1	35.1	40.8	47.8	46.5	14.0
8	15.0	41.7	35.3	31.1	36.4	31.2	29.1	45.4	36.2	14.3
9	15.2	46.1	36.9	30.0	32.5	29.3	31.4	50.0	36.4	14.4
10	15.1	42.0	35.3	31.1	33.1	28.8	28.7	47.0	47.3	14.5
Average	18.4	43.4	36.6	31.6	33.2	32.5	30.5	46.8	43.2	14.7
SD	3.8	2.2	1.5	1.0	2.0	3.2	5.3	2.4	5.5	0.8

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 การทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) (MPa)

No. of Test	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2084.0	2186.6	1956.6	1761.2	2441.2	2682.9	2700.0	1865.8	1702.5	2714.5
2	2141.5	2181.4	1967.1	1790.1	2454.1	2710.4	2802.1	1835.6	1714.1	2723.7
3	2082.2	2203.3	1948.5	1783.3	2445.4	2689.6	2812.5	1882.2	1697.6	2837.4
4	2093.0	2178.7	1971.6	1777.2	2456.5	2664.3	2871.0	1870.0	1700.7	2760.7
5	2094.6	2188.3	1967.0	1762.2	2460.6	2648.9	2800.6	1863.9	1721.8	2717.7
6	2115.1	2178.3	1970.6	1764.4				1874.8		
7	2123.4	2183.9	1982.4	1773.7				1873.8		
8	2113.0	2173.2	1960.8	1778.8				1866.4		
9	2122.4	2175.4	1957.2	1774.0				1876.4		
10	2122.4	2177.4	1948.6	1786.3						
Average	2109.2	2182.6	1963.0	1775.1	2451.6	2679.2	2797.2	1867.6	1707.3	2750.8
SD	19.7	8.7	10.7	10.1	8.0	23.6	61.6	13.4	10.2	51.8

ตารางภาคผนวกที่ ก-3 ผลการทดสอบความแข็งแรงจุดคราก (Strength @ Yield) (MPa)

No. of Test	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	61.4	58.5	50.1	44.4	56.7	56.0	56.1	34.9	38.0	59.5
2	61.6	58.4	50.5	44.6	56.7	55.4	56.4	34.7	38.8	59.6
3	61.2	58.1	50.3	46.1	56.8	55.7	56.0	36.1	38.9	59.9
4	61.3	58.2	50.5	44.7	56.4	55.5	56.5	35.6	38.7	59.8
5	61.2	58.1	50.6	44.8	56.3	55.6	57.2	35.7	39.0	59.6
6	61.0	58.1	50.8	44.7				35.2		
7	60.9	57.8	50.4	44.9				32.8		
8	61.1	58.4	50.7	44.7				35.6		
9	61.5	58.3	50.6	44.8				34.4		
10	61.5	58.3	50.0	44.2						
Average	61.3	58.2	50.4	44.8	56.6	55.6	56.4	35.0	38.7	59.6
SD	0.2	0.2	0.3	0.5	0.2	0.2	0.5	1.0	0.4	0.2

ตารางภาคผนวกที่ ก-4 ผลการทดสอบความแข็งแรงสูงสุด (Strength @ Break) (MPa)

No. of Test	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	55.9	43.9	33.9	23.7	39.8	40.5	36.3	20.7	15.5	47.8
2	53.6	43.8	34.9	22.5	38.7	30.6	30.6	20.3	38.8	44.8
3	55.9	42.3	32.5	25.2	37.5	28.2	33.6	29.5	13.1	49.2
4	53.3	41.1	33.9	23.1	40.3	36.0	35.5	29.2	38.7	48.4
5	54.9	44.8	35.9	23.8	39.8	38.5	38.9	25.4	13.1	50.0
6	56.9	43.1	34.2	25.4				19.7		
7	54.3	43.1	33.3	24.4				20.1		
8	55.4	45.5	34.1	23.8				21.0		
9	56.2	44.7	34.3	22.6				23.9		
10	56.5	43.2	32.9	22.0						
Average	55.3	43.5	34.0	23.7	39.2	34.8	35.0	23.3	23.9	48.0
SD	1.2	1.3	1.0	1.1	1.1	5.2	3.1	3.9	13.6	2.0

ตารางภาคผนวกที่ ก-5 ผลการทดสอบค่ายืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation @ Break) (%)

No. of Test	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	82.2	26.0	9.3	9.1	8.6	7.9	10.3	3.8	6.9	25.5
2	76.1	14.2	10.4	8.6	8.3	9.6	9.4	3.9	4.3	17.2
3	80.1	20.2	12.2	7.7	8.8	13.5	7.9	4.0	7.0	58.9
4	78.9	22.2	13.2	8.2	9.5	13.4	6.9	3.9	4.1	38.7
5	77.4	17.2	9.8	3.4	10.6	8.3	9.8	4.0	6.9	66.5
6	86.9	16.8	8.4	7.7				3.9		
7	80.1	23.2	12.2	8.2				3.8		
8	81.0	15.3	14.2	7.6				3.9		
9	78.8	17.2	9.2	9.1				3.6		
10	82.9	23.5	10.8	9.4						
Average	80.4	19.6	11.0	7.9	9.2	10.5	8.8	3.9	5.8	41.4
SD	3.1	4.0	1.9	1.7	0.9	2.7	1.4	0.1	1.5	21.1

ตารางภาคผนวกที่ ก-6 ผลการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (Vicat softening) (°C)

No. of Test	สูตรที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	145.8	141.5	137.9	129.8	146.9	147.7	146.9	126.9	123.2	148.0
2	145.7	141.4	137.8	129.8	146.8	147.7	147.0	127.9	126.5	148.2
3	145.8	141.5	137.9	129.7	146.7	147.4	146.7	118.8	122.8	147.6
4						147.5	146.7	127.0		147.8
5						145.9	145.2	124.4		146.6
6						146.4	145.8	126.5		147.0
Average	145.8	141.5	137.9	129.8	146.8	147.1	146.4	125.3	124.2	147.5
SD	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.7	3.4	2.0	0.6

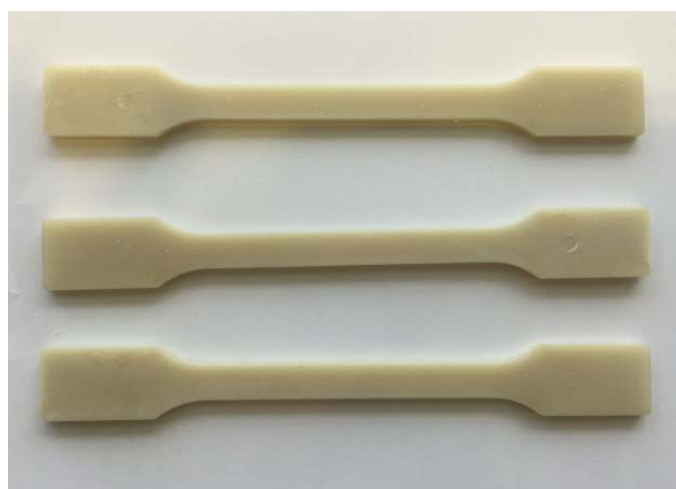
ตารางภาคผนวกที่ ก-7 ผลการทดสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, Tg) และอัตราการไหลเชิงปริมาตร (MVR)

สูตรที่	Tg (°C)	MVR (cm ³ /10min)
1	145.50	16.7
2	138.50	9.3
3	136.10	12.3
4	133.37	24.0
5	137.50	10.2
6	139.80	7.0
7	137.18	10.1
8	138.10	28.2
9	131.57	23.9
10	142.48	12.0

ภาคผนวก ข
ภาพชิ้นงานสำหรับการทดสอบ



ภาพภาคผนวกที่ ข-1 พอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิตพอลิคาร์บอเนตที่ได้จากเครื่องบดพลาสติก



ภาพภาคผนวกที่ ข-2 ชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 527-1 รูปคัมเบลแบบ 1A หน้า 4 มม.



ภาพภาคผนวกที่ ข-3 ชิ้นงานตามมาตรฐาน ISO 180 รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 10 มม.
ยาว 80 มม.และหนา 4 มม.