



การศึกษาสมบัติทางการไหล เชิงกล และทางความร้อนของอะคิโคโนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีน เกรด
ต่าง ๆ ที่มีผงไม้เป็นสารเสริมแรง

โดย

นายวัฒนา เทพปันทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติทางการไหล เชิงกล และทางความร้อนของอะคิโคโนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีน เกรด
ต่าง ๆ ที่มีผงไม้เป็นสารเสริมแรง

โดย
นายวัฒนา เทพปิ่นตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**STUDY OF RHEOLOGICAL , MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF
VARIOUS GRADES OF ABS REINFORCED WITH WOOD SAWDUST**

By

Wattana Teppinta

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาสมบัติทางกล ไลต์ เซิงกล และทางความร้อนของอะคิโคโนไคร-บิวตะไดอิน-สไตรีน เกรด ต่าง ๆ ที่มีผงไม้เป็นสารเสริมแรง” เสนอโดย นายวัฒนา เทพปิ่นตา เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล
2. ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.นิติ ยวงนิชัย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

...../...../.....

50402236 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : อะคริไลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีน/คอมโพสิท/จีลีย

วัฒนา เทพปินตา : การศึกษาสมบัติทางการไหล เชิงกล และทางความร้อนของอะคริไลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีน เกรด ต่าง ๆ ที่มีผงไม้เป็นสารเสริมแรง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล และ ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 111 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิทของผงไม้กับเอปียเอส ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และ สมบัติต่อสัณฐาน โดยใช้สารคู่ควบไซเลน ชนิด N-2-(aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane ปริมาตรร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักผงไม้ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของผงไม้กับเอปียเอส โดยจะศึกษาที่การเติมผงไม้ในปริมาณร้อยละ 9.1 และ 33.3 และทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีด

จากการศึกษาพบว่าอะคริไลไนไตรจะมีอิทธิพลต่อสมบัติการไหลของวัสดุนั้นคือจะทำให้ความหนืดของพลาสติกเอปียเอสและคอมโพสิทของผงไม้กับเอปียเอสไหลอมเหลวมีค่าสูง และการที่มีปริมาณบิวตะไดอินน้อยจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ไหลอมเหลวลดลงอย่างรวดเร็วตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นจากค่าดัชนีกำลัง และในส่วนของการศึกษาการบวมตัวที่หัวขึ้นรูป แม้ว่าบิวตะไดอินจะเป็นเฟสที่ทำให้เกิดการบวมตัวที่มาก แต่กลับพบว่าอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลจะมีผลมากกว่าแม้ว่าจะเป็นเอปียเอสที่มีปริมาณยางน้อยที่สุดก็ตาม

การศึกษการสลายตัวเนื่องจากความร้อน พบว่ากลไกการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิทของผงไม้กับเอปียเอสทุกเกรดประกอบด้วยสองขั้นและยังพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของเอปียเอสและวัสดุคอมโพสิททุกเกรดมีค่าไม่แตกต่างกันเช่นเดียวกับกรณีของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA

ในกรณีของสมบัติเชิงกล อะคริไลไนไตรยังมีส่วนสำคัญที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบทำให้เกิดการเข้ากันได้ระหว่างเฟสพลาสติกกับผงไม้ ทำให้วัสดุคอมโพสิทที่ผลิตจากเอปียเอสที่มีอะคริไลไนไตรมาก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง สำหรับยางบิวตะไดอินจะเป็นส่วนที่สำคัญในการรับแรงกระแทกของเอปียเอสแต่ในกรณีของคอมโพสิทพบว่าอิทธิพลของปริมาณยางมีผลน้อยลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

50402236 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : COMPOSITES/SAWDUST/ABS

WATTANA TEPPINTA : STUDY OF RHEOLOGICAL , MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF VARIOUS GRADES OF ABS REINFORCED WITH WOOD SAWDUST. THESIS ADVISORS : POONSUB THREEPOP NATKUL, Ph.D., AND PROF. NARONGRIT SOMBATSOMPOP, Ph.D. 111 pp.

The rheological, thermal, mechanical, and morphological properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer (ABS)/ wood sawdust composites with different co-monomer contents in ABS were investigated. Three grades of commercial ABS resin (High flow; HF-ABS, super high impact; SI-ABS, and medium impact; MI-ABS grades) were characterized using Nuclear Magnetic Resonance (H-NMR) and CHN elemental analyzer for determination of co-monomer content. Sawdust from Para rubber tree were treated with N-2-(aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane as coupling agent to improve the interfacial adhesion in the composites formed by wood sawdust and ABS. The composites of wood sawdust and ABS were prepared by varying wood sawdust contents of 10 and 50 phr. Blends of wood sawdust filled ABS were compounded using twin-screw extruder and specimens formed by injection molding machine.

The NMR and CHN elemental analyzer results indicated that SI-ABS contains highest amount of butadiene but least amount of styrene than MI-ABS and HF-ABS, respectively.

For rheological properties, shear thinning behavior was found for all of composites in the same shear rate ranges for testing that were investigated. At the low shear rate, the composites which contain higher acrylonitrile content, showed higher viscosity. At high shear rate, the viscosity of each co-monomer dependent composites tends to come close to each other on the curves. Similar behavior on the plot was also found in the high sawdust content composites. In this study, Carreau model was used for curve fitting and those parameters were also determined. Die swell ratio of the composites tended to increase at the initial ranges of shear rate of 10-500 s⁻¹, and then the swelling ratio value decreased dramatically once the shear rate were further applied. The molecular weight has more effects than comonomer content on the die swell behavior i.e., at the same molecular weight, composites with higher butadiene content show higher swelling ratio.

For thermal properties, the results from thermogravimetric analysis (TGA) showed that thermal stability of the composites is lower than that of neat ABS resin and thermal stability decreased with increasing wood sawdust content. TGA was performed on the wood sawdust/ ABS composites degraded in two-stages. Firstly, it occurred at the temperature of 250-350 °C which represented to the thermal degradation of sawdust. The second stage took place between 350 and 470 °C assigned to the degradation of ABS main chain. All composites show the same decomposition temperature ranges with their neat. Moreover, glass transition temperature characterized by dynamic mechanical analysis (DMA) technique of neat ABS and wood sawdust/ ABS composites has no affected by co-monomer content.

The mechanical properties namely tensile strength, tensile modulus, flexural strength, flexural modulus, and impact strength were investigated. Tensile strength, tensile modulus, flexural strength and flexural modulus of HF-ABS/wood sawdust composites were lower than MI-ABS and SI-ABS composites, respectively. They can be explained by bonding between acrylonitrile monomer and silane coupling agent cause of improving in strength and modulus. Therefore, the acrylonitrile content in ABS/wood composites plays an important role in both tensile and flexural properties. However, the impact strength of SI-ABS/wood sawdust composites was higher than MI-ABS and HF-ABS/wood sawdust composites, respectively. This could be explained with the influence of butadiene content.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความรู้และคำแนะนำเพื่อเป็นแนวทางในงานวิจัยจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล และ ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรและศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงสำหรับเงินทุนและเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนรวมถึงกลุ่มสมาชิกวิจัย P-PROF ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังใจและกำลังใจในการทำงาน สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวสำหรับกำลังใจ คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยดีเสมอมา

ด้วยความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	๓
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัยโดยสังเขป	2
ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	3
อะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์	3
ความเป็นมาของอะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์	3
คำจำกัดความและโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกเอบีเอส.....	4
การเตรียมและสังเคราะห์พลาสติกเอบีเอส	5
สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส.....	7
เส้นใยธรรมชาติ.....	12
องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ.....	12
สมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ	14
การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ	16
การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการแทนที่ด้วยวงแหวนเบนซีน.....	16
การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน	17
การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารกลุ่มควาไซเลน	18
วัสดุคอมโพสิต.....	21
ส่วนเสริมแรง	21
ส่วนเมทริกซ์.....	22

บทที่	หน้า
ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ	23
ทฤษฎีการยึดเกาะระหว่างเฟสของวัสดุเชิงประกอบ	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
3 วิธีการทดลอง	28
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	28
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพลาสติกเอบีเอส	29
การวิเคราะห์หาปริมาณ โมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอส	29
การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วย Ubbelohde Viscometer	30
การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน	31
การผสมผงไม้ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับเม็ดพลาสติกเอบีเอส	32
การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	32
การฉีดขึ้นรูป	32
การอัดขึ้นรูป	33
การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของวัสดุผงไม้กับเอบีเอส	33
การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส	33
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส	36
อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส	36
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส	36
การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส	37
สมบัติความต้านแรงดึง	37
สมบัติความต้านการโค้งงอ	37
สมบัติความต้านทานแรงกระแทก	38
การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส	38
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	39
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพลาสติกเอบีเอส	39
การวิเคราะห์หาปริมาณ โมโนเมอร์ในเอบีเอส	39

บทที่	หน้า
การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส.....	42
อิทธิพลของโคโมโนเมอร์ อุณหภูมิ และอัตราการเย็นต่อความหนืดของ วัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส.....	42
สมการของการไหล	45
Master curve.....	48
การศึกษาการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส.....	49
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส.....	51
อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส.....	51
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส..	53
การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอส	56
อิทธิพลของปริมาณโซเลนที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพวงไม้ กับพลาสติกเอบีเอส	56
อิทธิพลของปริมาณ โค โม โนเมอร์ในเอบีเอสต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอม- โพสิตพวงไม้กับเอบีเอส	59
5 สรุปผลการทดลอง	69
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก องค์ประกอบและสมบัติของพลาสติกเอบีเอส	77
ภาคผนวก ข สมบัติการไหล	80
ภาคผนวก ค สมบัติทางความร้อน	104
ภาคผนวก ง สมบัติเชิงกล.....	107
ประวัติผู้วิจัย	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส.....	8
2	สมบัติของเรซินเมทริกซ์ในพลาสติกเอบีเอส	9
3	สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติเมื่อเทียบกับเส้นใยเสริมแรงทั่วไป	15
4	สถานะในการฉีดขึ้นรูป.....	33
5	สัดส่วน (molar) ระหว่างสไตรีนต่อบิวตะไดอินของเอบีเอสที่ใช้	41
6	แสดงผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบในเม็ดพลาสติกเอบีเอสด้วย Elemental analyzer	41
7	แสดงปริมาณโมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอสแต่ละเกรด	42
8	แสดงค่า R^2 ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงกับข้อมูลที่ได้จากการไหล.....	46
9	แสดงค่าคงที่ของ Carreau	47
10	แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิต.....	53
11	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเอบีเอสและคอมโพสิต	55
12	แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างเอบีเอสและไม้ยางพารา.....	60
13	แสดงค่ามอดุลัสแรงดึง มอดุลัสโค้งงอ ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและความทนต่อการโค้งงอสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอสที่ปริมาณการเติมพวงไม้ 10 phr	61
14	แสดงค่ามอดุลัสแรงดึง มอดุลัสโค้งงอ ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและความทนต่อการโค้งงอสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอสที่ปริมาณการเติมพวงไม้ 50 phr	61
15	แสดงค่าความแตกต่างของสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากกฎการผสม ของวัสดุคอมโพสิตของพวงไม้กับ HF-ABS และวัสดุคอมโพสิตของพวงไม้กับ SI-ABS.....	62
16	แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากกฎการผสม ของวัสดุคอมโพสิตของพวงไม้กับ MI-ABS และวัสดุคอมโพสิตของพวงไม้กับ SI-ABS.....	64

ตารางที่		หน้า
17	แสดงสมบัติของพลาสติกเอบีเอสที่ใช้ในงานวิจัย จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน	78
18	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของ HF-ABS ที่อุณหภูมิต่างๆ	81
19	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของ MI-ABS ที่อุณหภูมิต่างๆ	82
20	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของ SI-ABS ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	83
21	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	84
22	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	85
23	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	86
24	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	87
25	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	88
26	แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	89
27	ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ HF-ABS ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	90
28	ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ MI-ABS ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	90
29	ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ SI-ABS ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	90
30	ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ HF-ABS ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส.....	91
31	ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ MI-ABS ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส.....	91

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงกระบวนการผลิตของ BASF	3
2	แสดงขั้นตอนการผลิตเมทิลสไตรีน (α -methylstyrene)	4
3	โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกเอบีเอส	5
4	กระจายตัวของยางบิวตะไดอินใน สไตรีน-อะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ เมทริกซ์	5
5	แสดงกระบวนการผลิตพลาสติกเอบีเอส	6
6	แสดงสัณฐานวิทยาของเอบีเอสที่ผลิตจากกระบวนการที่ต่างกัน	6
7	แสดงการกราฟท์ SAN ลงบนบิวตะไดอิน	7
8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของยางในพลาสติกเอบีเอสที่มีผลต่อสมบัติ ความต้านแรงกระแทก	10
9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของยางในพลาสติกเอบีเอสที่มีผลต่อสมบัติ ความต้านแรงดึง	10
10	ปริมาณอะครีโลไนไตรล์ที่เหมาะสมระหว่างในเฟสยางกับ SAN เมทริกซ์.....	11
11	แสดงภาพจาก TEM ของพลาสติกเอบีเอส	11
12	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูลอส	13
13	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	14
14	แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ด้วยกระบวนการ Benzylation	16
15	แสดงภาพถ่ายจาก SEM ของวัสดุคอมโพสิต ระหว่างพอลิฟอสฟีนกับผงไม้ ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการ Benzylation	17
16	แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ด้วยกระบวนการ Esterification	17
17	แสดงโครงสร้างของกรดไขมัน	18
18	ปฏิกิริยาไฮโดรซิสของไซเลน	19
19	ปฏิกิริยาควบแน่นของไซลานอล	19
20	ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยพอลิไซลานอล	20
21	โมเดลการแพร่ของพอลิเมอร์บนพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยไซเลน .	21
22	การจัดเรียงตัวที่ต่างกันของส่วนเสริมแรง	22
23	กลไกการยึดเกาะของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส	24

ภาพที่		หน้า
24	แสดงกลไกการยึดเกาะของสารคู่ควบ KBM 603 และ 503	25
25	เครื่อง CHNs/O Analyzer	30
26	เครื่องวัดความหนืด Ubbelohde viscometer	30
27	แสดงลักษณะการพลอตกราฟเพื่อหาค่า Intrinsic viscosity จากสมการของ Huggins.....	31
28	แสดงชิ้นงานจากการฉีด	33
29	แสดงเครื่องทดสอบการไหลแบบ Capillary die rheometer.....	34
30	แสดงเครื่องทดสอบ Thermal gravimetric analyzer	36
31	เครื่อง Dynamic mechanical analyzer.....	37
32	เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก	38
33	H-NMR spectra ของพลาสติกเอบีเอสเกรด High Flow (HF-ABS).....	40
34	H-NMR spectra ของพลาสติกเอบีเอสเกรด Medium impact (MI-ABS).....	40
35	H-NMR spectra ของพลาสติกเอบีเอสเกรด Super High Impact (SI-ABS)	40
36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดของพลาสติกเอบีเอส บริสุทธิ์เกรดต่างๆและวัสดุคอมโพสิตที่อัตราความเร็ว 10 s ⁻¹	43
37	แสดงผลของอัตราการขึ้นต่อความหนืดของพลาสติกเอบีเอสและคอมโพสิต ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส	44
38	แสดงการใช้สมการการไหลในการ Fit กับข้อมูลจากการทดลองของวัสดุ คอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด HF ที่การเติมพองไม้ 50 phr.....	45
39	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด HF ที่การเติมพอง- ไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	48
40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเร็วขึ้นกับการบวมตัวที่หัวขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส	49
41	แสดงการเกิดรอยฟั่นเฟือนที่ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสในการ ทดสอบสมบัติการไหลที่อัตราความเร็วสูง	50
42	ผลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปของเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิต ที่อัตราการขึ้น 200 s ⁻¹	50
43	แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด HF	52

ภาพที่		หน้า
44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan\delta$ กับอุณหภูมิของเอบีเอสบริสุทธิ์	54
45	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan\delta$ กับอุณหภูมิของวัสดุคอมโพสิต ของผงไม้กับเอบีเอส.....	54
46	แสดงผลการการวิเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS ด้วยเทคนิค FTIR.....	55
47	แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อค่าความต้านการโค้งงอสูงสุดของ วัสดุคอมโพสิต.....	56
48	แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อค่ามอดูลัสโค้งงอของวัสดุคอมโพสิต.....	57
49	แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อ ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด และ ค่ามอดูลัสแรงดึง	57
50	แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อเปอร์เซ็นต์ยึดตัว ณ จุดขาด และ ความต้านแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต.....	58
51	แสดงความต้านแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสแรงดึงของพลาสติกเอบีเอสและ วัสดุคอมโพสิต.....	59
52	แสดงความทนการโค้งงอสูงสุดและมอดูลัสโค้งงอของพลาสติกเอบีเอสและ วัสดุคอมโพสิต.....	60
53	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุคอม- โพสิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	63
54	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุคอม- โพสิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด SI-ABS ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	63
55	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุคอมโพ- สิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด MI-ABS และ SI-ABS	64
56	แสดงเปอร์เซ็นต์ยึดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอม- โพสิตผงไม้กับเอบีเอส	65
57	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของ เอบีเอสบริสุทธิ์.....	66
58	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของวัสดุ คอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส	67

ภาพที่		หน้า
59	แสดงความทนต่อแรงกระแทกของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์	67
60	แสดงความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต	68
61	แสดง Master curve ของเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส.....	99
62	แสดง Master curve ของเอบีเอสเกรด MI-ABS ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส.....	99
63	แสดง Master curve ของเอบีเอสเกรด SI-ABS ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส.....	100
64	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่การเติมพองไม้ 10 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	100
65	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด MI-ABS ที่การเติมพองไม้ 10 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	101
66	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด SI-ABS ที่การเติมพองไม้ 10 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	101
67	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่การเติมพองไม้ 50 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	102
68	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด MI-ABS ที่การเติมพองไม้ 50 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	102
69	แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพองไม้กับเอบีเอสเกรด SI-ABS ที่การเติมพองไม้ 50 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส	103
70	แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด HF	105
71	แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด MI.....	105
72	แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด HF	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จีลีโอที่ได้มาจากไม้ยางพาราเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่มีปริมาณมากในประเทศ และยังเป็นวัตถุดิบที่ไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างสูงสุดเท่าที่ควร ซึ่งในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมประเภทไม้มีความต้องการที่นำจีลีโอที่มีเป็นจำนวนมากมาใช้ประโยชน์ อย่างน้อยก็เพื่อเป็นการสร้างรายได้จากเศษวัสดุเหลือใช้อีกทางหนึ่ง โดยวิธีการหนึ่งที่นำจีลีโอมาใช้เพื่อประโยชน์ในทางการค้า นั่นก็คือการนำมาเสริมแรงในพลาสติก ซึ่งนอกจากเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับจีลีโอแล้ว ยังเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกให้ดีขึ้นเพื่อให้สามารถนำพลาสติกมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมมากขึ้น โดยทั่วไปพบว่าอุตสาหกรรมของวัสดุพลาสติกคอมโพสิตผสมผงไม้นั้น พลาสติกที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ โพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีน และ โพลีไวนิลคลอไรด์ พลาสติกแต่ละชนิดจะมีข้อดี และ ข้อเสียแตกต่างกันไปเช่น วัสดุคอมโพสิตโพลีเอทิลีนผสมผงไม้ทนต่อความร้อนได้ดีกว่า และถูกกว่าวัสดุคอมโพสิตโพลีไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้ แต่วัสดุคอมโพสิตโพลีไวนิลคลอไรด์ผสมผงไม้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุคอมโพสิตโพลีเอทิลีนผสมผงไม้ [1-10] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่ศึกษาการนำเอาพลาสติกที่มีสมบัติครอบคลุมทั้งด้านความทนต่อความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดีอย่างเช่นพลาสติกเอบีเอสมาผสมกับผงไม้ และทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุคอมโพสิตโพลีเอบีเอสผสมผงไม้ พลาสติกเอบีเอสเป็นส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้าหลากหลายชนิดที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โทรศัพท์มือถือ โทรศัพท์ เป็นต้น เอบีเอสเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็งแรง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ทำให้พลาสติกมีสมบัติทนแรงกระแทก (Impact resistance) ดี นอกจากนี้เอบีเอสยังมีสมบัติเด่นอีกหลายเรื่อง เช่น ทนต่อแรงเสียดสี (Abrasion) คงสภาพรูปร่างได้ดี (Dimension stability) ทนความร้อน ทนสารเคมี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี

เอบีเอสเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ของโมโนเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (Styrene) อะคริโลไนไตร (Acrylonitrile) และบิวตะไดเอน (Butadiene) ซึ่งโพลิเมอร์ที่ได้จากโมโนเมอร์ 3 ชนิดเรียกว่า เทอร์โพลิเมอร์ (Terpolymer) โมโนเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์ ABS ขึ้นมานั้น ล้วนมีผลต่อสมบัติของพลาสติกทั้งสิ้น

อะครีโลไนไตรมีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวตะไดอินมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่าย สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และช่วยลดต้นทุน เนื่องจากเอบีเอสเป็นพลาสติกที่ได้จากการนำโมโนเมอร์ 3 ชนิดมาผลิต ดังนั้นผู้ผลิตเอบีเอส จึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดเพื่อให้ได้สมบัติอย่างที่ต้องการ ซึ่งเอบีเอสที่จำหน่ายในท้องตลาดประกอบด้วยอะครีโลไนไตรประมาณ 15-30 % บิวตะไดอิน ประมาณ 5-30% และสไตรีนประมาณ 45-75% ดังนั้นในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดในพลาสติกเอบีเอสต่อกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติต่อสัณฐานของวัสดุคอมโพสิตอะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนผสมผงไม้

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของโคโมโนเมอร์ในอะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนที่มีต่อกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติต่อสัณฐาน และสมบัติความทนทานต่อสารเคมี ของอะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนผสมผงไม้

1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัยโดยสังเขป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของโคโมโนเมอร์ในอะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีน (เอบีเอส) ที่มีต่อกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติต่อสัณฐาน และสมบัติความทนทานต่อสารเคมีของวัสดุคอมโพสิตเอบีเอสผสมผงไม้ยางพารา ด้วยการใช้ปริมาณผงไม้ 9.1 และ 33.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หรือ 10 และ 50 phr) และใช้สารคู่ควบชนิด N-2(aminoethyl)3-aminopropyl trimethoxysilane ในการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเอบีเอสกับผงไม้

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลซึ่งทำให้ทราบถึงผลของปริมาณโคโมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอส ที่ส่งผลต่อสมบัติในด้านต่างๆของวัสดุคอมโพสิตเอบีเอสกับผงไม้ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้วัสดุและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงไม้กับพลาสติกเอบีเอส

1.4.2 ข้อมูลที่ได้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาวัตถุดิบที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม และยังเป็นการช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่า

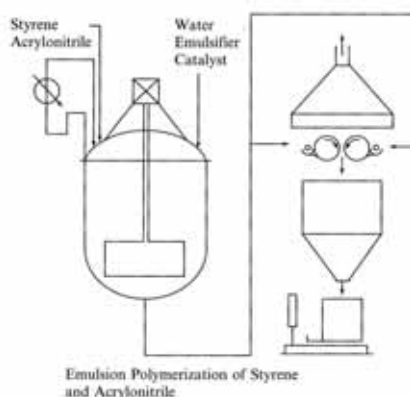
บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 อะครีโลไนไทร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์

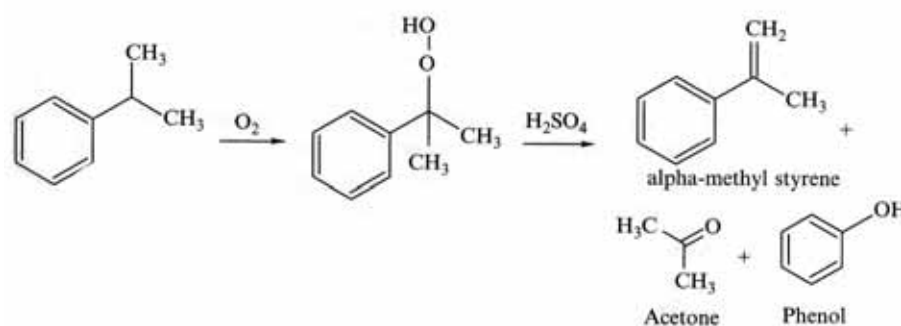
2.1.1 ความเป็นมาของอะครีโลไนไทร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ [11-13]

ปี ค.ศ. 1940 อะครีโลไนไทร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ หรือ พลาสติกเอบีเอส (acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer ,ABS) เริ่มรู้จักกันในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ประมาณ กลางปี โดยเริ่มแรกของการผลิตพลาสติกเอบีเอสนั้น ทำได้โดยการผสมระหว่างสไตรีน-อะครีโลไนไทรโคพอลิเมอร์ (SAN) กับบิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ (SBR) หรือบิวตะไดอิน-อะครีโลไนไทรโคพอลิเมอร์ (NBR) แต่วัสดุดังกล่าวก็ยังมีปัญหาอยู่ เช่น ไม่มีความคงทนของสี ราคาสูง ขึ้นรูปยาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มี ความสวยงาม พื้นผิวที่ไม่มีความเงา หรือพื้นผิวด้าน และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทนต่อแรงกระแทกได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำแต่ปัญหาดังกล่าวก็สามารถแก้ไขได้ โดยในปี 1948 ทีมนักวิจัยจากบริษัท Marbon (บริษัทในเครือ Marsene Corp. ซึ่งภายหลังเปลี่ยนชื่อเป็น Borg Warner) พบว่าพอลิบิวตะไดอินมีอุณหภูมิทรานซิชันต่ำกว่าในกรณีที่เป็นโคพอลิเมอร์ จึงคิดที่จะนำพอลิบิวตะไดอินมาผสมกับ SAN โดยตรงเพื่อผลิตวัสดุเอบีเอสแต่ก็ยังมีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้ของเฟสทั้งสอง ซึ่งปัญหาดังกล่าวก็สามารถแก้ไขได้โดยการใช้กระบวนการ Emulsion polymerization เพื่อสังเคราะห์อนุภาคพอลิบิวตะไดอินขึ้นมาก่อนจากนั้นกราฟท์ SAN ลงไปโดยใช้กระบวนการผลิตของ BASF ดังแสดงในภาพที่ 1 จนกระทั่งในปี 1959 Borg Warner ได้ทำการจดสิทธิบัตรสำหรับกระบวนการผลิตเอบีเอสด้วยวิธีดังกล่าวและใช้ผลิตเอบีเอสออกสู่ตลาดโดยใช้ชื่อทางการค้าว่า Cyclolac™



ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตของ BASF [13]

การวิจัยและพัฒนาวัสดุเอบีเอสเป็นไปอย่างต่อเนื่อง Borg Warner ใช้เงินลงทุนมหาศาลสำหรับงานวิจัยกว่า 10,000 ชั่ง เพื่อหาสัดส่วนมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการผลิตเอบีเอสในด้านการพาณิชย์ ต่อมา มีการผลิตพลาสติกเอบีเอสชนิดทนความร้อนสูงขึ้น โดยใช้แอลฟาเมทิลสไตรีน (α -methylstyrene) แทนสไตรีนทั้งในส่วนแมทริกส์และส่วนกราฟท์ ซึ่งทำให้วัสดุเอบีเอสมีอุณหภูมิในการเสียรูป (Heat deflection temperature) สูงขึ้น โดยในปี 1958 เอบีเอสเกรดทนความร้อนเป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ แต่ข้อเสียของเอบีเอสเกรดนี้คือความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากหมู่เมทิลที่เพิ่มเข้าไปจะขัดขวางการไหลของพลาสติกหลอมเหลว ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปสำหรับเอบีเอสเกรดดังกล่าว

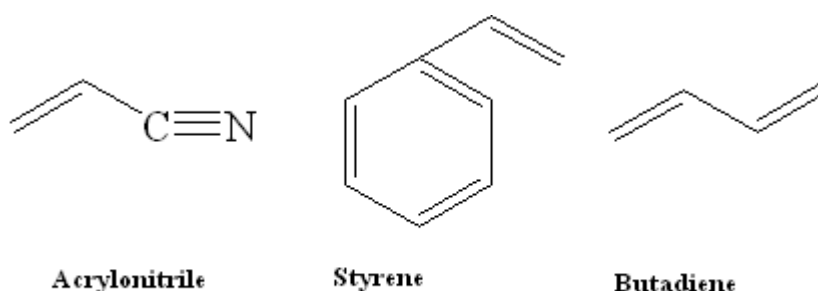


ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการผลิตแอลฟาเมทิลสไตรีน (α -methylstyrene) [13]

ต่อมา Borg Warner ได้เกิดแนวคิดที่ผลิตวัสดุเอบีเอสที่มีความใสขึ้น ซึ่งเอบีเอสชนิดที่มีอยู่นั้นมีลักษณะขุ่นเนื่องจากการกระเจิงแสงของเฟสยาง จึงมีการทดลองลดขนาดของอนุภาคบิวตะไดอิน พบว่าสามารถผลิตเอบีเอสที่มีความใสได้แต่กลับทำให้ความทนต่อแรงกระแทกลดลง ต่อมา มีการทดลองเติมมอนอเมอร์อีกชนิดลงไปซึ่งก็คือ เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate; MMA) เพื่อลดความแตกต่างดัชนีหักเหแสงขององค์ประกอบต่างๆ จนประสบความสำเร็จในการผลิตเอบีเอสชนิดใสและออกสู่ตลาดด้วยชื่อทางการค้า CyclolacTM CIT

2.1.2 คำจำกัดความและโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกเอบีเอส

พลาสติกเอบีเอส เกิดจากมอนอเมอร์ 3 ชนิดด้วยกัน คือ อะคริโลไนไตร บิวตะไดอิน และสไตรีน โดยมาตรฐาน ASTM D1788 พบว่า พลาสติกเอบีเอส โดยทั่วไปประกอบด้วยอะคริโลไนไตรอย่างน้อย 13 เปอร์เซ็นต์ บิวตะไดอินอย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ และสไตรีนอย่างน้อย 15 เปอร์เซ็นต์ นับว่าเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรม และจัดเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม คือ มีความแข็งแรงสูง เหนียว ทนต่อแรงกระแทก สารเคมี และความร้อน โดยมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกเอบีเอส

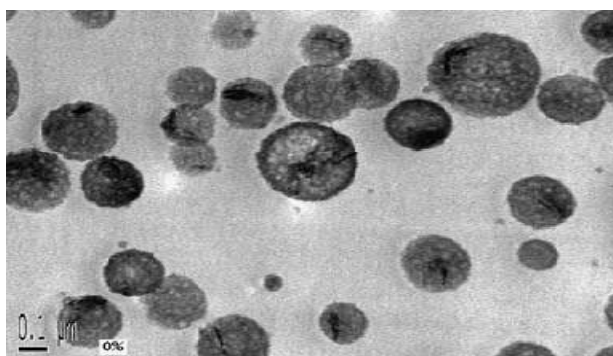
2.1.3 การเตรียมและสังเคราะห์พลาสติกเอบีเอส

2.1.3.1 การเตรียมพลาสติกเอบีเอส

พลาสติกเอบีเอส สามารถเตรียมได้ 2 แบบ คือ

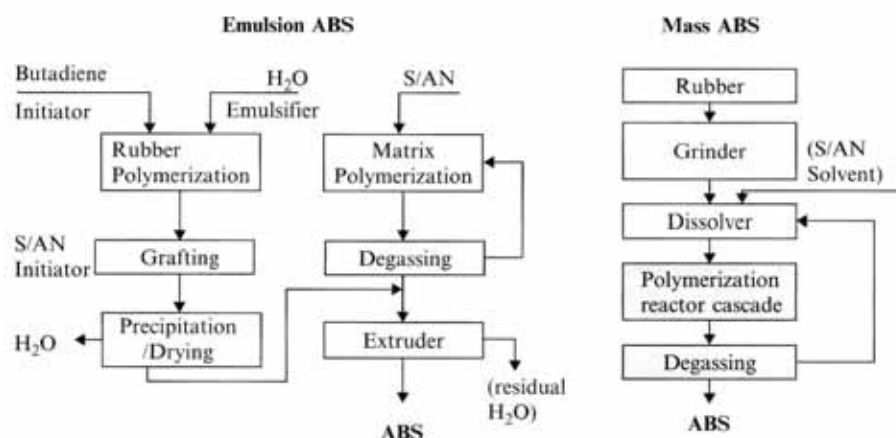
1. แบบที่เกิดจากการผสมระหว่างยางอะคริโลไนไตร-บิวตะไดอิน หรือ สไตรีน-บิวตะไดอิน โคลิเมอร์กับโคลิเมอร์ของสไตรีน-อะคริโลไนไตร ซึ่งการผสมแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

2. แบบที่เกิดจากการกราฟต์ โดยการทำให้บิวตะไดอินเกิดกราฟต์กับสไตรีน-อะคริโลไนไตร โคลิเมอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน และสำหรับการเตรียมพลาสติกเอบีเอสดังกล่าว ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นสไตรีน-อะคริโลไนไตร โคลิเมอร์เป็นเฟสหลัก (Matrix phase) ที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) และส่วนที่เป็นยางบิวตะไดอินเป็นเฟสที่กระจายอยู่ในเฟสที่ต่อเนื่องดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 4



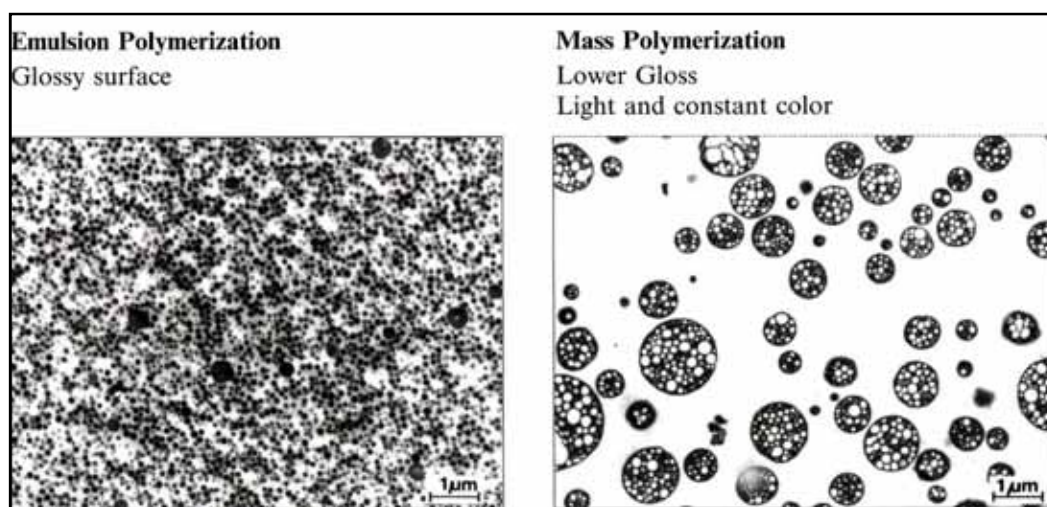
ภาพที่ 4 การกระจายตัวของยางบิวตะไดอินใน สไตรีน-อะคริโลไนไตร โคลิเมอร์เมทริกซ์ [14]

ในกระบวนการผลิตพลาสติกแบบกราฟท์บิวตะไดอินโดยทั่วไปแล้วจะใช้เทคโนโลยีการผลิตเช่นเดียวกันกับการผลิต GPPS (General purpose polystyrene) และ HIPS (High impact polystyrene) โดยมีอยู่สองกระบวนการที่นิยมใช้คือ Emulsion polymerization และ Mass polymerization ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงกระบวนการผลิตพลาสติกเอบีเอส [13]

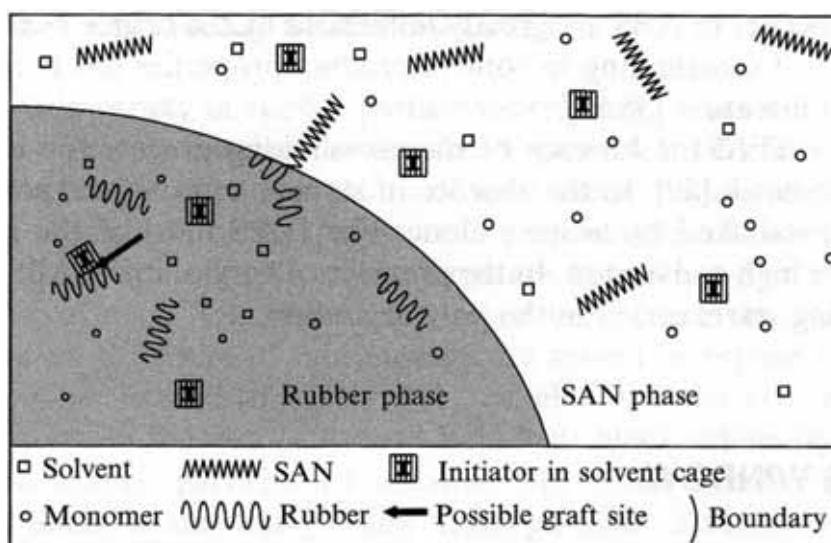
แต่สำหรับพลาสติกเอบีเอสนั้นการที่ทำให้วัสดุมีความทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีนั้นจะต้องควบคุมให้ขนาดของอนุภาคเฟสยางมีขนาดเล็ก ดังนั้นกระบวนการผลิตแบบ Emulsion polymerization จึงเป็นที่นิยมมากกว่าสำหรับการผลิตเอบีเอส ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมขนาดอนุภาคยางให้มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ดังในภาพที่ 6 แสดงลักษณะของพอลิบิวตะไดอินในเอบีเอสที่ผลิตได้จากกระบวนการที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 6 แสดงสัณฐานวิทยาของเอบีเอสที่ผลิตจากกระบวนการที่ต่างกัน[11]

2.1.3.2 การเตรียมยางที่เป็นตัวเกิดกราฟต์

ยางบิวตะไดอินที่เป็นตัวเกิดกราฟต์ (Polybutadiene substrate) มีกระบวนการเตรียม 2 แบบ คือ แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) หรือแบบสารละลาย (Solution polymerization) โดยใช้วิธีทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) เป็นวิธีที่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่องไม่จำเป็นต้องใช้สารตัวเติมภายนอก (External additives) และได้องค์ประกอบที่เป็นลาเท็กซ์ (Latex) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ทันที



ภาพที่ 7 แสดงการกราฟต์ SAN ลงบนบิวตะไดอิน[11]

2.1.4 สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส

เนื่องจากพลาสติกเอบีเอสเป็นพลาสติกที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ 3 ชนิด จึงทำให้สมบัติในด้านต่างๆ ของพลาสติกเอบีเอสเป็นไปตามสมบัติของมอนอเมอร์นั้นๆ ดังนี้

1. พอลิอะคริโลไนไตร เป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน (Amorphous) ช่วยเสริมความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Rigid) ทนต่อความร้อน สารเคมี และเป็นตัวทำละลายได้ดี
2. พอลิบิวตะไดอิน เป็นวัสดุที่เป็นยาง มีอุณหภูมิอ่อนตัว (T_g) ต่ำ (ต่ำกว่า -76°F หรือ -60°C) และมีพันธะคู่ที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Cross-linking) เป็นเทอร์โมเซตพลาสติกซึ่งเป็นที่นิยมทั้งในบริษัทที่ผลิตโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) และโคพอลิเมอร์ (Copolymer) เช่น ยาง เอสบีอาร์ (SBR) และ เอ็นบีอาร์ (NBR) เป็นต้น เนื่องจากยางบิวตะไดอินช่วยให้อุณหภูมิอ่อนตัวของวัสดุลดลงจึงทำให้วัสดุดังกล่าว ทนต่อแรงกระแทกได้ดี เพื่อความเหนียว และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ

3. พอลิสไตรีน เป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน มีความแข็งสูง (Rigid materials) ความหนืดต่ำ (low viscosity) จึงสามารถไหลได้ง่าย (Flowability) ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปในกระบวนการผลิต และมีความมันวาวแต่มีข้อด้อย คือ มีความเปราะ (Brittleness)

จากสมบัติดังกล่าวของมอนอเมอร์ทั้งสามชนิด ทำให้พลาสติกเอบีเอสมีสมบัติที่ดีหลายอย่างด้วยกัน แสดงดังตารางที่ 1 โดยสมบัติต่างๆ ของพลาสติกเอบีเอส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบน้ำหนักโมเลกุล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของพอลิเมอร์ต่างๆ ดังกล่าว และจากสมบัติที่ดีหลายอย่างนี้จึงทำให้พลาสติกเอบีเอสได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างมาก แต่เนื่องจากการะบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเอบีเอสที่ค่อนข้างซับซ้อนจึงมีข้อจำกัดในเรื่องของราคา และสำหรับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกเอบีเอสนั้นใช้อุณหภูมิในการผลิตช่วง 220-260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังต้องระวังในเรื่องของความชื้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเป็นพิเศษด้วย

ตารางที่ 1 สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส [12]

Properties	Units	Injection-molding grades		Extrusion grades
		High impact	Medium impact	
Izod impact (3.2 mm.thick specimen)	J/m	320-500	160-320	80-640
Hardness	R	85-106	102-115	75-115
Tensile yield strength	MPa	18-41	35-50	30-44
Elongation at break	%	5-75	5-60	20-100
Tensile modulus	GPa	1.02-4	2.1-2.8	0.9-2.9
Specific gravity	-	1.01-1.05	1.03-1.06	1.02-1.08

สมบัติของพลาสติกเอบีเอสโดยทั่วไปขึ้นกับเฟสหลัก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความสามารถในการผลิต (Processibility) และการทนความร้อนของพลาสติกเอบีเอสคอมปาวด์ (Compound) โดยความสามารถในการผลิตจะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนทางเคมีของพลาสติกเอบีเอสคอมปาวด์ เช่น หน่วยของมอนอเมอร์ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ และอุณหภูมิคล้ายแก้วของเฟสหลักในพลาสติกเอบีเอส แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของเรซินเมทริกซ์ในพลาสติกเอบีเอส[12]

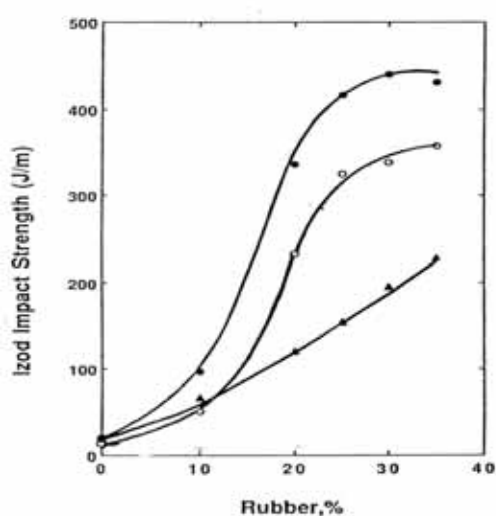
Matrix component	Chemical constructure	T _g (°C)	Concentration in the ABS blend (wt%)	Heat resistance Vicat B 120 (°C)	Other properties
SAN	Random copolymer S:AN 80:20-65:35	115	95-50	104	Increase in thermal-stability at high acrylonitrile contents
AMS-AN copolymer	Random copolymer AMS:AN 70:30	128	95-50	117	Depolymerization begins at 280°C
AMS-AN Sequence polymer	AMS:AN 70:30 high proportion of AMS pairs	140	95-50	~130	Toughness lower than with random copolymers
Styrene-AN-NPMI terpolymer	Random terpolymer S:AN:NPMI 67:28:5	140	95-80	~130	High reactivity of the anhydride ring, Heat resistance limited

AN = acrylonitrile; AMS = α -methylstyrene; MA = maleicanhydride; S = styrene;

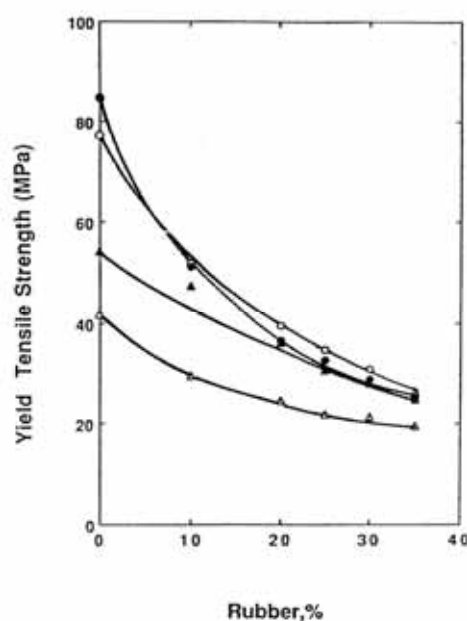
NPMI = *N*-phenylmaleimide

พลาสติกเอบีเอสที่ผลิตจากโคพอลิเมอร์ของเอลฟาเมทิลสไตรีน-อะคริโลไนไตร (α -methylstyrene-acrylonitrile) มีสมบัติที่คล้ายคลึงกับสไตรีน-อะคริโลไนไตรโคพอลิเมอร์ คือ เป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิคล้ายแก้วสูง และมีพฤติกรรมทางเคมีคล้ายกับสไตรีน-อะคริโลไนไตรโคพอลิเมอร์ คือ สามารถทำให้เกิดพลาสติกเอบีเอสที่ทนต่อความร้อนสูงได้ ซึ่งความสามารถในการทนต่อความร้อนของพลาสติกเอบีเอสยังขึ้นกับปริมาณของเอลฟาเมทิลสไตรีนอีกด้วย และโคพอลิเมอร์แบบพิเศษนี้มีสัดส่วนของเอลฟาเมทิลสไตรีนสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการผลิตด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกเอบีเอสที่มีความต้านทานต่อความร้อนสูงถึง 130 องศาเซลเซียส (Vicat B temperature)

สมบัติของพลาสติกเอปียีสนอกจากขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นเมทริกซ์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นยางอีกด้วย นั่นคือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเฟสที่เป็นยาง อุนหภูมิห้อง ความเหนียวของพลาสติกเอปียีสสูงขึ้น และทำให้ความต้านแรงกระแทก (Izod impact strength) สูงขึ้นด้วย แสดงดังภาพที่ 8 แต่ความแข็งแรง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสความต้านแรงดึง (Tensile modulus) ลดลงตามสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 9

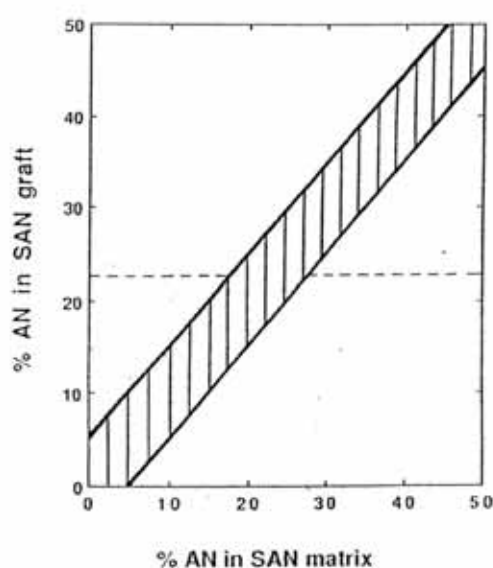


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของยางในพลาสติกเอปียีสที่มีต่อสมบัติความต้านแรงกระแทก [15]

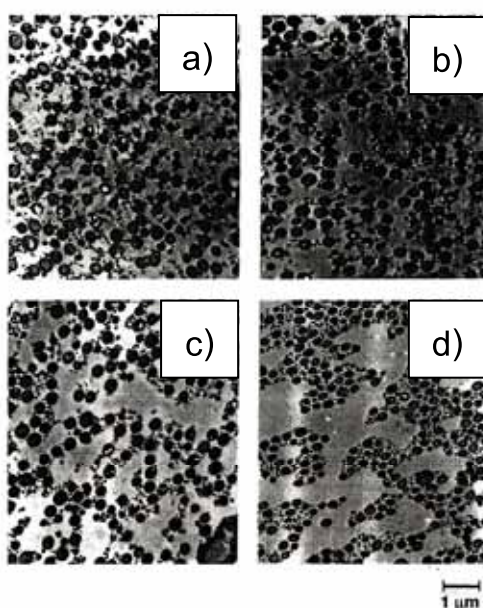


ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของยางในเอปียีสที่มีต่อสมบัติความต้านแรงดึง [15]

นอกจากนี้สมบัติของพลาสติกเอบีเอสยังขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของปริมาณของอะครีโลไนไตรระหว่างในส่วนที่เป็นเมทริกซ์กับส่วนที่กราฟท์กับบิวตะไดอินซึ่ง Kim และคณะ[15, 16]ได้แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนปริมาณอะครีโลไนไตรที่เหมาะสมระหว่างเฟสของยางและเมทริกซ์ดังแสดงในภาพที่ 10 ด้วยปริมาณอะครีโลไนไตรที่เหมาะสมจะทำให้เฟสของยางบิวตะไดอินกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 11 ส่งผลต่อความทนทานต่อแรงกระแทกที่ดี



ภาพที่ 10 ปริมาณอะครีโลไนไตรที่เหมาะสมระหว่างในเฟสยางกับ SAN เมทริกซ์ [16]



ภาพที่ 11 แสดงภาพจาก TEM ของพลาสติกเอบีเอส ภาพ a และ b เฟสยางกระจายสม่ำเสมอในเมทริกซ์ ส่วนภาพ c และ d แสดงให้เห็นการรวมตัวกันของเฟสยางในเอบีเอส [16]

2.2 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เป็นเส้นใยที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น เส้นใยจากไม้ หรือจี้เลื้อย เส้นใยปอ และป่าน เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (cellulose) ประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน (lignin) ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าว พบว่า มีส่วนของเซลลูโลสมากที่สุด ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเส้นใย โดยองค์ประกอบทั้งหมดจะอยู่ในผนังเซลล์ของเนื้อไม้ และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงทั้งสิ้น นอกจากนี้ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบยังขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อไม้อีกด้วย และโดยทั่วไปไม้เนื้อแข็งมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสมากกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่มีลิกนินน้อยกว่าไม้เนื้ออ่อน

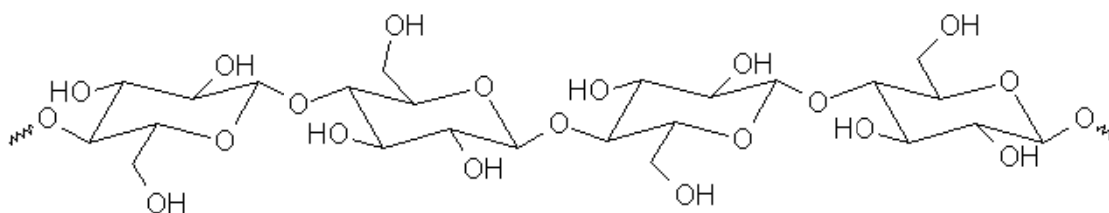
อนุภาคจี้เลื้อย หรือ ผงไม้ เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 40-80 เมช (Mesh) สามารถนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender) หรือ สารเสริมแรง (Reinforcement) ในพลาสติกได้ โดยมีข้อดี คือ ช่วยลดการหดตัว (Shrinkage) ของพอลิเมอร์ เพิ่มค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มความแข็งแรง (Strength) และช่วยลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้กระบวนการผลิตขึ้นรูปทำได้ยากขึ้น ลดเสถียรภาพทางความร้อน ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมไม่ดี ลดความสามารถในการรับแรงกระแทก และไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิสูงๆ เนื่องจากจี้เลื้อยมีอุณหภูมิเริ่มเสถียรภาพ (Degradation temperature) ประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส

2.2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยฝ้าย (Cotton) ปอกระเจา (Jute) ลินิน (Flax) ป่านลามี่ (Ramie) และป่านศรนารายณ์ (Sisal) เป็นต้น มีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

2.2.1.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วย แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (Anhydroglucopyranose) ซึ่งเป็นหน่วยของโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคสิติก (Glycosidic bond) โดยเซลลูโลสของไม้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10,000 กรัมต่อโมล โดยคิดจากปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ และโดยทั่วไปของเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเส้นตรง (Linear) ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสมีความเป็นระเบียบสูง นอกจากนี้ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสสามารถเกิดแรงกระทำระหว่างกัน (Interaction) ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) จึงทำให้เซลลูโลสเป็นส่วนที่ทนต่อตัวทำละลายสูง มีความเป็นผลึก และมีความแข็งแรงสูง ซึ่งเซลลูโลสมีโครงสร้างทางเคมี แสดงดังภาพที่ 12



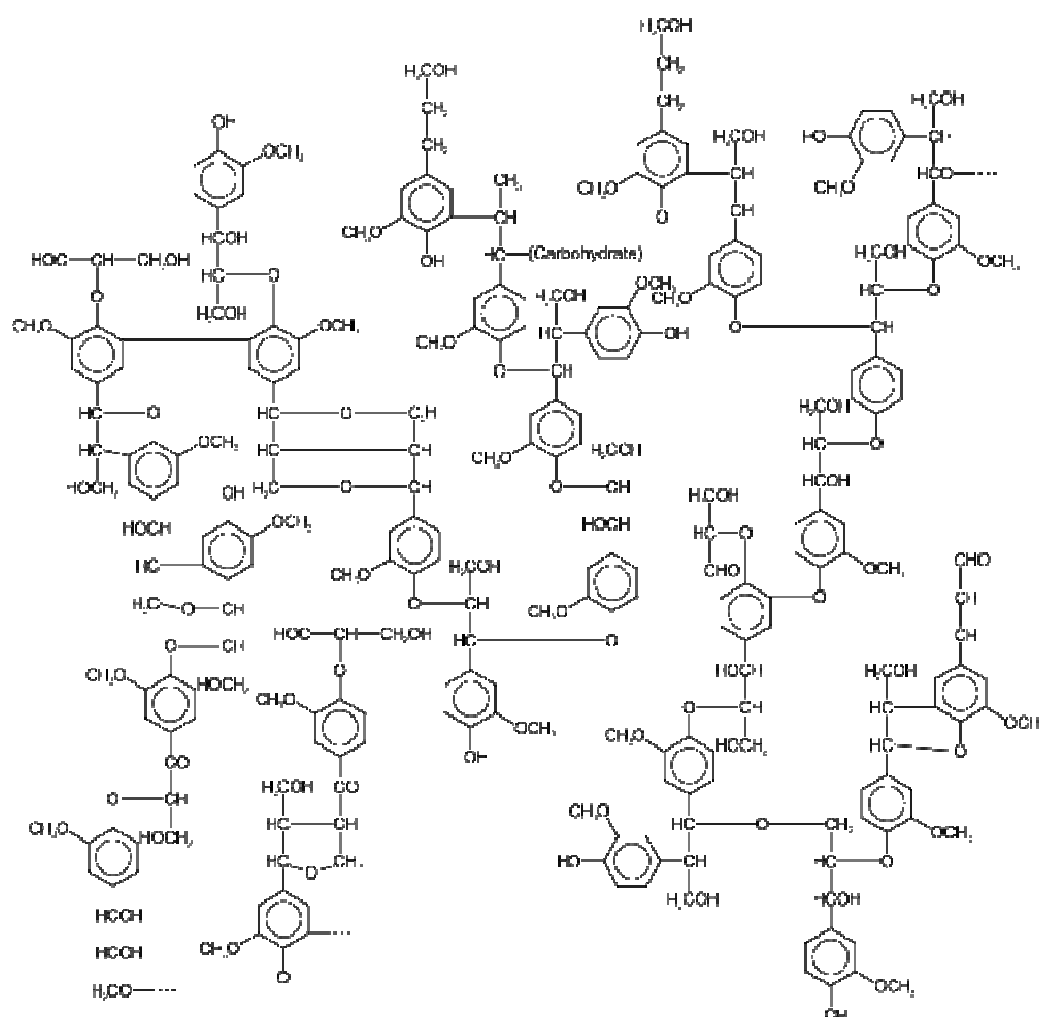
ภาพที่ 12 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [17]

2.2.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทเฮเทอโรโพลิแซ็กคาไรด์ (Heterogeneous Polysaccharides) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์หลายชนิดประกอบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน โดยเฮมิเซลลูโลสแตกต่างกับเซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทโฮโมโพลิแซ็กคาไรด์ (Homogeneous Polysaccharides) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสประเภทเดียวประกอบอยู่ในโมเลกุล เฮมิเซลลูโลสเป็นโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลส และมีค่า Degree of Polymerization ไม่เกิน 200 โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายโดยสารละลายกรด แล้วให้โมเลกุลของน้ำตาลที่มีขนาดเล็กลงคือ โมเลกุลเดียวของน้ำตาลกลูโคส แมนโนส ไซโลส และอะราบิโนส โดยปกติทั่วไปบริเวณของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบอยู่ในพืชมีปริมาณประมาณ 20-30% โดยที่เฮมิเซลลูโลสนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ ดังนี้คือ กาแลคโตกลูโคแมนแนน (Galactoglucomannan) ประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนส กลูโคส และกาแลคโตส อะราบิโนกลูคูโรโนไซแลน (Arabinoglucuronoxylan) ประกอบด้วยน้ำตาล ไซโลส กาแลคโตสและอะราบิโนส อะราบิโนกาแลคแทน ประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตสและอะราบิโนส กลูคูโรโนไซแลน (Glucuronoxylan) ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและไซโลส และกลูโคแมนแนน (Glucomannan) ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและแมนโนส

2.2.1.3 ลิกนิน

ลิกนิน (Lignin หรือ Lignen; มาจากภาษาละติน Linum ซึ่งแปลว่า ไม้) ถูกค้นพบในปี 1819 โดย De Candolle เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีการจัดเรียงตัวแบบสามมิติ ซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนทั้งส่วนที่เป็นวงแหวนเบนซีน (aromatic hydrocarbon) คือ ส่วนของฟีนิลโพรเพน (phenyl propane) และส่วนที่เป็นเส้นตรง (aliphatic hydrocarbon) แสดงดังภาพที่ 13 พบมากในผนังเซลล์ของพืช



ภาพที่ 13 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [18]

2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงที่สามารถใช้ได้ทั้งในเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี เช่น มีความแข็งแรง และมีความแข็งสูง เป็นต้น แต่มีความหนาแน่นต่ำ แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งจากค่าที่ได้พบว่าเส้นใยลินิน (Flax) และเส้นใยที่ได้จากเยื่อกระดาษ (Kraft) มีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยแก้วชนิด E ซึ่งเป็นชนิดที่นำไปใช้งานพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นที่ยอมรับมากในปัจจุบัน

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติเมื่อเทียบกับเส้นใยเสริมแรงทั่วไป [19]

Fibers	Density (g/cm ³)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	287-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Flax	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Hemp	-	1.6	690	-
Ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128.0
Sisal	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
Coir	1.2	30.0	175	4.0-6.0
Viscose (cord)	-	11.4	593	11.0
Soft wood kraft	1.5	-	1000	40.0
E-glass	2.5	2.5	2000-3500	70.0
S-glass	2.5	2.8	4570	86.0
Aramide (normal)	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63.0-67.0
Carbon (normal)	1.4	1.4-1.8	4000	230.0-240.0

จากตารางข้างต้น พบว่าช่วงค่าของสมบัติดังกล่าวมีอุปสรรคอย่างหนึ่งที่ทำให้ค่าของผลิตภัณฑ์จากเส้นใยธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีโครงสร้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของเส้นใยธรรมชาติในระหว่างการเติบโต และปัจจัยอื่นๆ อีก

เส้นใยธรรมชาติสามารถผลิตเป็นเส้นใยเสริมแรงได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลที่ได้แตกต่างกันออกไป เห็นได้ว่าเส้นใยธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้ค่ามอดูลัสประมาณ 10 GPa แต่เมื่อผ่านกระบวนการทางเคมี โดยแยกเส้นใยเซลลูโลสออกจากเนื้อไม้แล้วนำมาเป็นวัสดุเสริมแรงให้ค่ามอดูลัสสูงถึง 40 GPa และเมื่อทำการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสจะได้เส้นใยขนาดเล็ก (Microfibril) ซึ่งให้ค่ามอดูลัสประมาณ 70 GPa แต่ตามทฤษฎีแล้วเซลลูโลสสามารถให้ค่ามอดูลัสได้สูงถึง 250 GPa อย่างไรก็ตามยังไม่มีวิธีที่สามารถแยกเซลลูโลสออกมาจากเส้นใยขนาดเล็กได้ ในปัจจุบันจึงนิยมทำการเตรียมเส้นใยธรรมชาติถึงเพียงกระบวนการที่สอง (Microfibril) เท่านั้น

จากโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติที่มีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งชอบน้ำ จึงทำให้เส้นใยธรรมชาติสามารถดูดความชื้นได้ ปริมาณความชื้นของเส้นใยธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนที่ไม่เป็นผลึกและช่องว่างภายในเส้นใย โดยในสภาวะปกติเส้นใยธรรมชาติมีปริมาณความชื้นสูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลและลักษณะทางกายภาพ คือ เมื่อนำมาผสมกับพลาสติกเกิดช่องว่างระหว่างเฟสของเส้นใยธรรมชาติกับพลาสติก ทำให้สมบัติกลของพลาสติกที่ได้ไม่ดีนัก

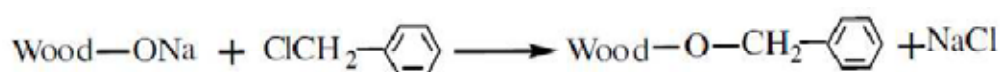
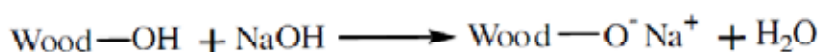
ในกรณีของเส้นใยแก้วค่าความแข็งแรง (Tensile strength) ของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับความยาวและชนิดของเส้นใยนั้นๆ พบว่าความแข็งแรงของเส้นใยลินินขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยมากกว่าเส้นใยแก้ว แต่สำหรับเส้นใยสับปะรดความยาวของเส้นใยส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงน้อยมาก นอกจากนี้ความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาดียังขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมเส้นใย เช่น การเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมได้

2.3 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ

การปรับปรุงสมบัติทางกลโดยการผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติ โดยทั่วไปจะเกิดความไม่เข้ากันของวัสดุผสมเนื่องจากสมบัติที่แตกต่างกันของวัสดุทั้งสองที่นำมาผสมกัน เช่น มีสมบัติทางกล (Mechanical properties) ความหนาแน่น (Density) ความยืดหยุ่น (Elastic modulus) การขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion) และพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ที่ต่างกันมาก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างในเรื่องของความเป็นขั้ว (Polarity) ของพลาสติกกับเส้นใยธรรมชาติ ทำให้เส้นใยธรรมชาติไม่สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการยึดเกาะกันระหว่างเฟส จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสอง

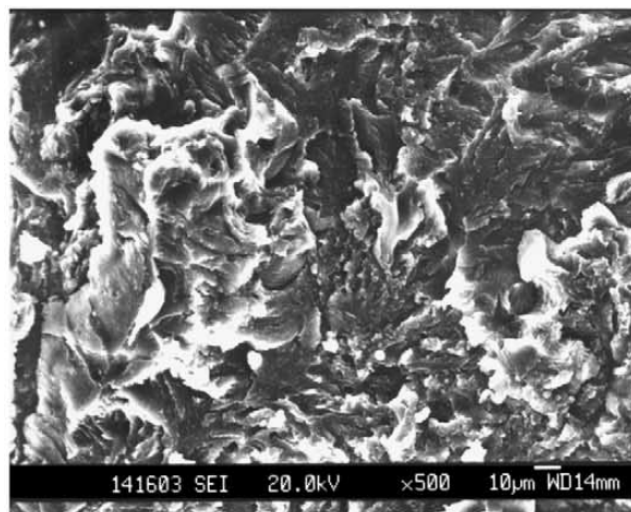
2.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการแทนที่ด้วยวงแหวนเบนซีน (Benzylation) [20-22]

กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยกระบวนการ Benzylation เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวเส้นใย ด้วย Alkoxide หรือ Phenoxide ion ด้วยกระบวนการห้ของ Williamson ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้ด้วยกระบวนการ Benzylation [20]

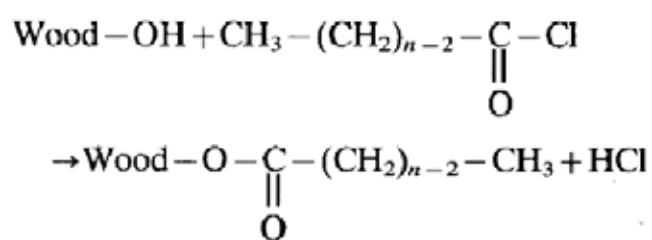
การที่หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของผงไม้ถูกแทนที่ด้วยวงแหวนเบนซีน จะทำให้ความเป็นขั้วที่ผิวลดลง และเมื่อนำผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วไปผสมกับพลาสติกซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำ ทำให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของผงไม้ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงภาพถ่ายจาก SEM ของวัสดุคอมโพสิต ระหว่างพอลิฟิฟิลีนกับผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการ Benzylation [21]

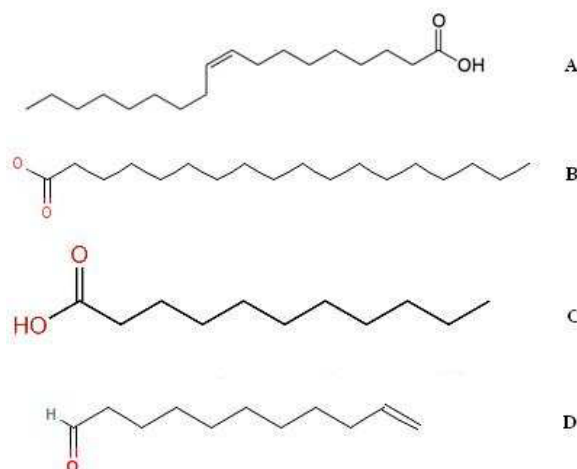
2.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) [23-31]

การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยเทคนิคนี้ จะเป็นการใช้กระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของผงไม้ให้กลายเป็นหมู่เอสเตอร์ซึ่งมีความเป็นขั้วน้อยกว่า กระบวนการดังกล่าวแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้โดยกระบวนการ Esterification [24]

สารที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวในกระบวนการนี้นิยมใช้กรดไขมันเพราะมีส่วนของสายโซ่คาร์บอนที่ยาว (มีคาร์บอน 8-18 อะตอม) เพราะมีความเป็นขั้วต่ำ ซึ่งประเภทของกรดไขมันที่นิยมใช้มีทั้งแบบอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ยกตัวอย่างเช่น อันเดิลเลอิก อัลเดคาโนอิก โอเลอิก หรือ สเตียริก เป็นต้น



ภาพที่ 17 แสดงโครงสร้างของกรดไขมัน Oleic Acid (A), Stearic acid (B), Undecanoic acid (C) และ Undecylenic acid (D)

2.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน

สารคู่ควบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ ไซเลน (Silane coupling agents) เนื่องจากไซเลนนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในพลาสติกเสริมแรง งานเคลือบผิว งานทาสี น้ำหมึก กาว สารยึดติด และยาง และมีความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี

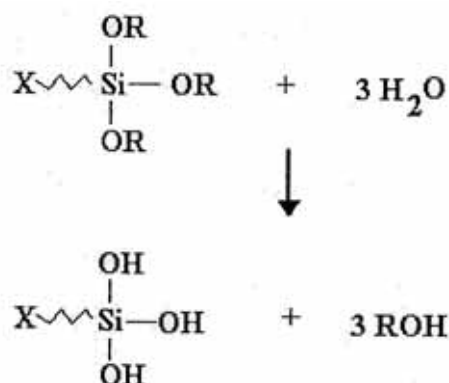
2.3.3.1 ความหมายและสูตรโครงสร้างทางเคมีของไซเลน

ไซเลน เป็นสารคู่ควบที่มีธาตุซิลิกอน (silicon) อยู่ในโครงสร้าง มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $((OR)_3-Si-R'-X)$ ซึ่งประกอบด้วยหมู่แทนที่ 2 ชนิด คือ หมู่แทนที่ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ (Organic substituents) และหมู่ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic substituents) ยึดเกาะอยู่บนสายโซ่โมเลกุลเดียวกัน โดยหมู่ฟังก์ชันที่เป็นพวกสารอินทรีย์ ในที่นี้แทนด้วย X เช่น อะมิโน (Amino) อีพอกซี (Epoxy) และเมทาไครเลต (Methacrylate) จะเข้าทำปฏิกิริยากับวัสดุอินทรีย์ (Organic materials) เช่น พอลิเมอร์สังเคราะห์ ส่วนตัวเชื่อมหรือพันธะอัลคิลีน (Alkylene linkage) แทนด้วย R' ซึ่งเป็นตัวเชื่อมระหว่างซิลิกอนและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นพวกสารอินทรีย์และอีกชนิดหนึ่งคือ หมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ (Hydrolysable functional group) ในที่นี้แทนด้วย OR เช่น เมทอกซี (Methoxy) และเอทอกซี (Ethoxy) โดยจะเปลี่ยนเป็นหมู่ซิลานอล (Silanol group) คือ $Si-OH$ เมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งหมู่^{นี้}สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับวัสดุอนินทรีย์ (inorganic materials) เช่น พวกเส้นใยแก้ว และยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับวัสดุอินทรีย์ เช่น เส้นใยธรรมชาติ ทำให้เส้นใยธรรมชาติสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี โดยไซเลนที่จำหน่ายกันอยู่ในปัจจุบันนี้มี

หมู่ฟังก์ชัน คือ หมู่ X แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะสมกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด

กลไกการสร้างพันธะของไซเลนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

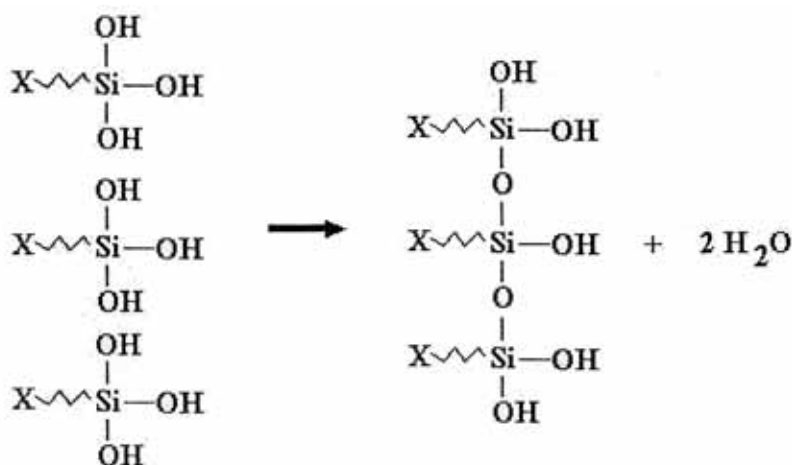


ภาพที่ 18 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซเลน[12]

จากภาพที่ 18 X คือ หมู่ฟังก์ชันที่เป็นพวกสารอินทรีย์ และ OR คือ หมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ พบว่า ไซเลนถูกทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ ทำให้หมู่อัลคอกไซด์ (Alkoxide) หรือหมู่ OR บนไซเลนถูกเปลี่ยนเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เรียกว่า ไซลานอล (Silanol) เพื่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไซเลนกับเส้นใยธรรมชาติ

2. ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction)

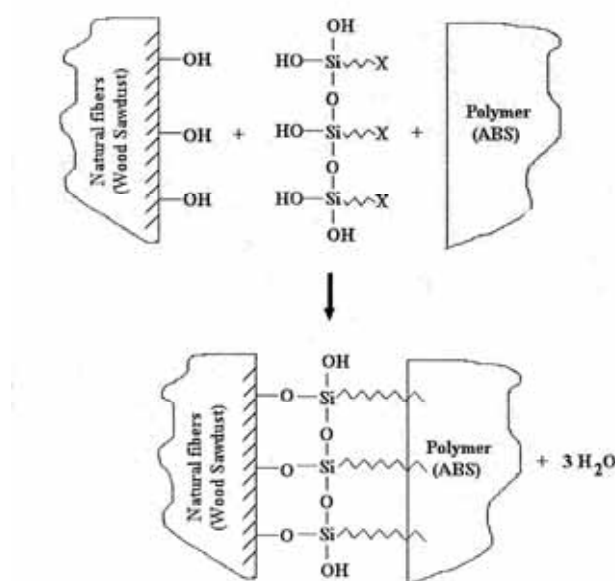
ปฏิกิริยาควบแน่น แสดงดังภาพที่ 19 โดยเริ่มเกิดจากขั้นตอนแรกไซลานอลหลายๆ โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) กันเอง ทำให้ได้สายโซ่โมเลกุลที่ยาวขึ้นเป็นพอลิไซลานอล (polysilanol) และจะเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยธรรมชาติในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 19 ปฏิกิริยาควบแน่นของไซลานอล [12]

3. ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ (Surface modification)

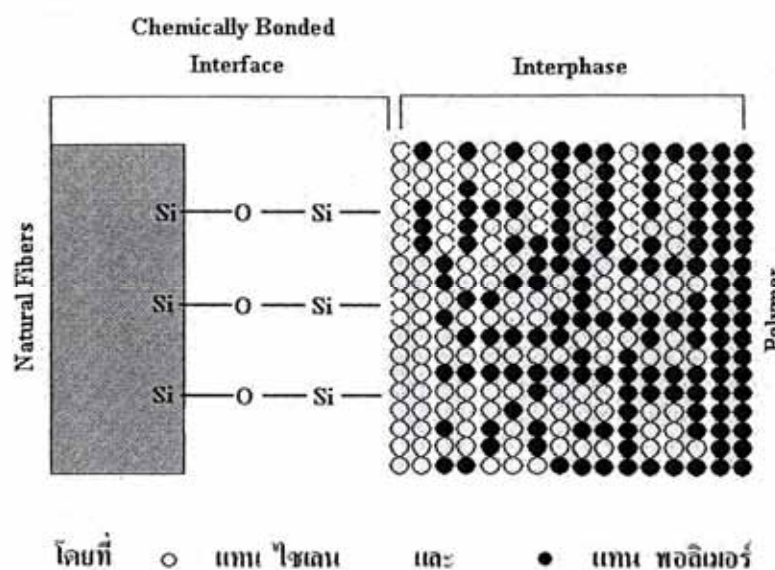
ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติ เป็นการนำพอลิไซลานอลที่ได้มาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเส้นใยธรรมชาติ โดยด้านที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลเซลลูโลสในเส้นใยธรรมชาติ และเมื่อได้รับความร้อนโมเลกุลดังกล่าวปลดปล่อยน้ำออกมา และเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิไซลานอลด้วยหมู่อีเทอร์ (Ether linkage) และปลายสายโซ่โมเลกุลอีกข้างหนึ่งของไซเลน (X) จับกับพอลิเมอร์ แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยพอลิไซลานอล [12]

2.3.3.2 การแพร่เข้าไปของพอลิเมอร์ในส่วนเสริมแรงที่ผ่านการปรับปรุงผิว

พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างไซเลนและพอลิเมอร์เป็นพันธะที่ซับซ้อน โดยการเกิดพันธะระหว่างไซเลนและพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกนั้นเกิดโดยการแพร่ (Diffusion) เข้าไปภายในส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ แสดงดังภาพที่ 21 การที่พอลิเมอร์แทรกซึมเข้าไปภายในหลายๆ ชั้นของโครงสร้างเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนแล้วนั้น ความเข้ากันได้ (Solubility) อย่างเหมาะสมระหว่างไซเลนกับพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มสมบัติทางกล เช่น ความต้านแรงดึง แรงกระแทก และการโค้งงอ และสามารถลดการดูดซับความชื้นของวัสดุเชิงประกอบ (Composites) ด้วย



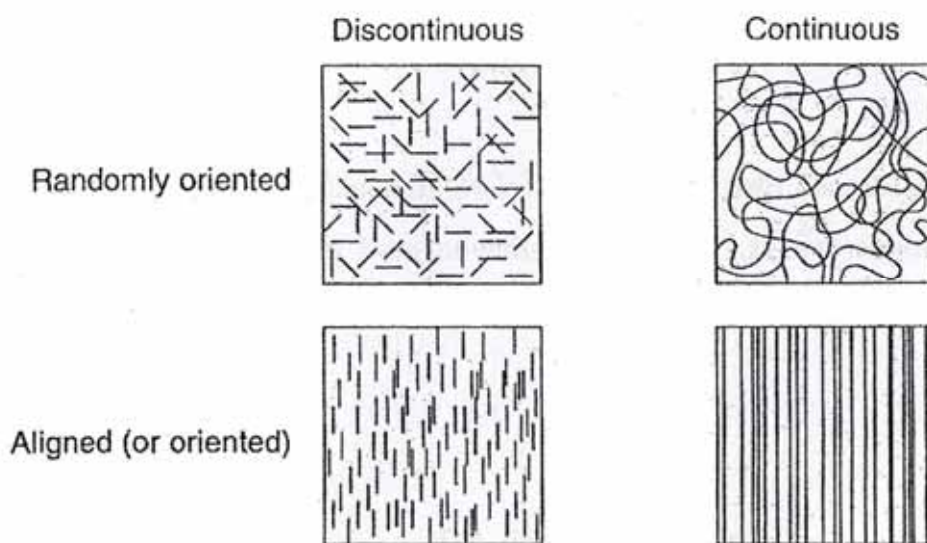
ภาพที่ 21 โมเดลการแพร่ของพอลิเมอร์บนพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติที่ปรับปรุงด้วยซิลิคอน [12]

2.4 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต (Composite materials) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักอย่างน้อย 2 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนเป็นองค์ประกอบที่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนดังกล่าวนี้คือ ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) และส่วนของเมทริกซ์ (Matrix)

2.4.1 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรง และมีค่ามอดูลัสสูง จึงเป็นส่วนที่คอยรับแรงหลักของวัสดุเชิงประกอบ และส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้กันมีหลายชนิด และที่เป็นประเภทเส้นใย เช่น เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด (Aramid) ซึ่งเส้นใยพวกนี้อาจเป็นเส้นใยยาวหรือเส้นใยสั้น และอาจเกิดเป็นเส้นใยพันกันหรือทอให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ โดยการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน แสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การจัดเรียงตัวที่ต่างกันของส่วนเสริมแรง [32]

2.4.2 ส่วนเมทริกซ์

ส่วนเมทริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่วนเสริมแรงอยู่ในตำแหน่งและมีการจัดเรียงตัวตามที่กำหนด โดยส่วนนี้อยู่ล้อมรอบและคอยปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น แสงแดด และอากาศ เป็นต้น ซึ่งส่วนนี้มักมีความแข็งแรง และมีความอดุลต่ำกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่องทำให้สามารถถ่ายเทแรงที่ได้รับไปสู่ส่วนเสริมแรงได้ง่าย และเมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์ เป็นต้น

2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

1. สัดส่วนของส่วนผสม
2. ความแข็งแรงและพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส
3. ภาพร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง
4. สภาพแวดล้อม

2.4.4 ทฤษฎีการยึดเกาะระหว่างเฟสของวัสดุเชิงประกอบ

ในวัสดุเชิงประกอบ เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยในบริเวณระหว่างเฟส (interphases) ได้หลายวิธีด้วยกัน โดยมีกลไกการยึดเกาะหลักๆ 5 กลไกด้วยกัน แสดงดังภาพที่ 23 ซึ่งอาจเกิดแบบใดแบบหนึ่งหรือเกิดร่วมกันก็ได้ ดังต่อไปนี้

2.4.4.1 การดูดซับและการเปียก (Absorption and wetting)

การดูดซับและการเปียก เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเข้าใกล้กันมากพอจนสามารถเกิดแรงดึงดูดทางกลได้ (Physical attraction) เช่น เกิดการเปียก (Wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของของแข็ง ส่วนในกรณีของของแข็งสองชนิดที่อยู่ใกล้กันมากพอในระดับจุลภาค หรือระดับอะตอม ความขรุขระของพื้นผิวจะขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะกันได้ ในกรณีนี้จึงเกิดการยึดเกาะแบบการดูดซับ (Absorption) และการเปียก (Wetting) ได้ยาก ซึ่งการยึดเกาะแบบการดูดซับและการเปียกนี้ เกิดจากการกระจายตัวของแรงระหว่างโมเลกุลที่สัมผัสกัน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการยึดเกาะแบบนี้จะมีความแข็งแรงสูง แต่ในความเป็นจริงแล้วกลับมีความแข็งแรงน้อยมาก อาจเนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยที่มีความสกปรก การเกิดฟองอากาศระหว่างกระบวนการขึ้นรูป หรือการหดตัวของเมทริกซ์เอง จึงทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) และช่องว่างระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย

2.4.4.2 การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

การแพร่เข้าหากัน เกิดจากการยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิด โดยโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองมีการแพร่เข้าหากัน ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) และความสามารถในการแพร่ โดยการพันกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นการยึดเกาะแบบการแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion) สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการใช้ตัวทำละลายทาที่บริเวณพื้นผิว หรือการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งกลไกการยึดเกาะแบบนี้เกิดขึ้นได้กับเส้นใยที่มีการเคลือบพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมทริกซ์ แต่ไม่เกิดในคอมโพสิตที่มีพื้นผิวของเส้นใยแข็ง และไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล

2.4.4.3 แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction)

แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิต เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดมีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน คือพื้นผิวหนึ่งมีประจุเป็นบวกและอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุเป็นลบ ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุ แรงดึงดูดระหว่างประจุ หรือไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) กลไกการยึดเกาะชนิดอื่นคือ ช่วยให้เกิดการยึดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่น การยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทสารไฮเลกซ์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวกมีการยึดติดได้ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวเส้นใย

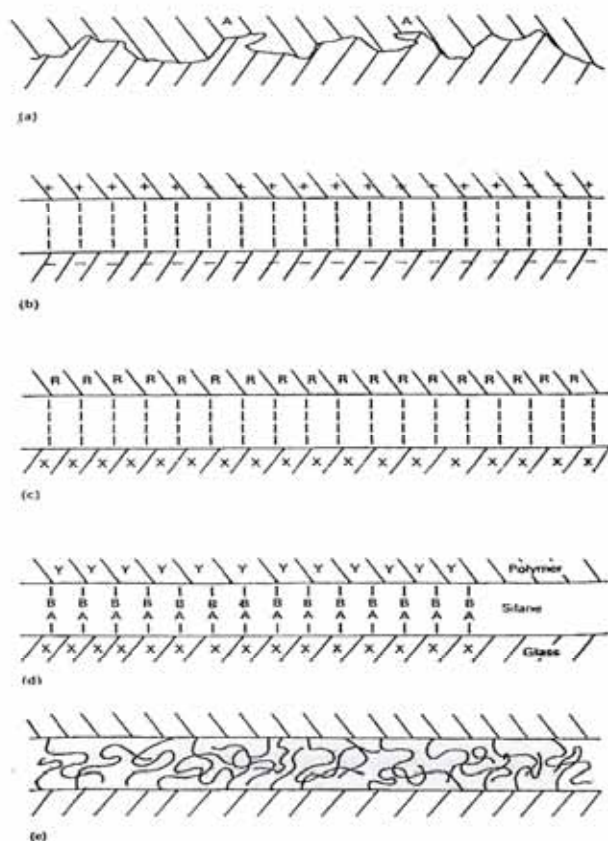
2.4.4.4 พันธะเคมี (Chemical bonding)

พันธะเคมี เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญชนิดหนึ่ง เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวและเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดเป็นพันธะเคมีได้ เช่น การ

เกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง และความแข็งแรงของกลการยึดเกาะขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น ซึ่งพันธะเคมีที่เกิดขึ้นมี 5 ชนิด คือ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) พันธะที่เกิดจากแรงไอออนิก (Ionic force) พันธะโลหะ (Metallic bonds) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) และพันธะที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der waals forces)

2.4.4.5 การยึดเกาะทางกล

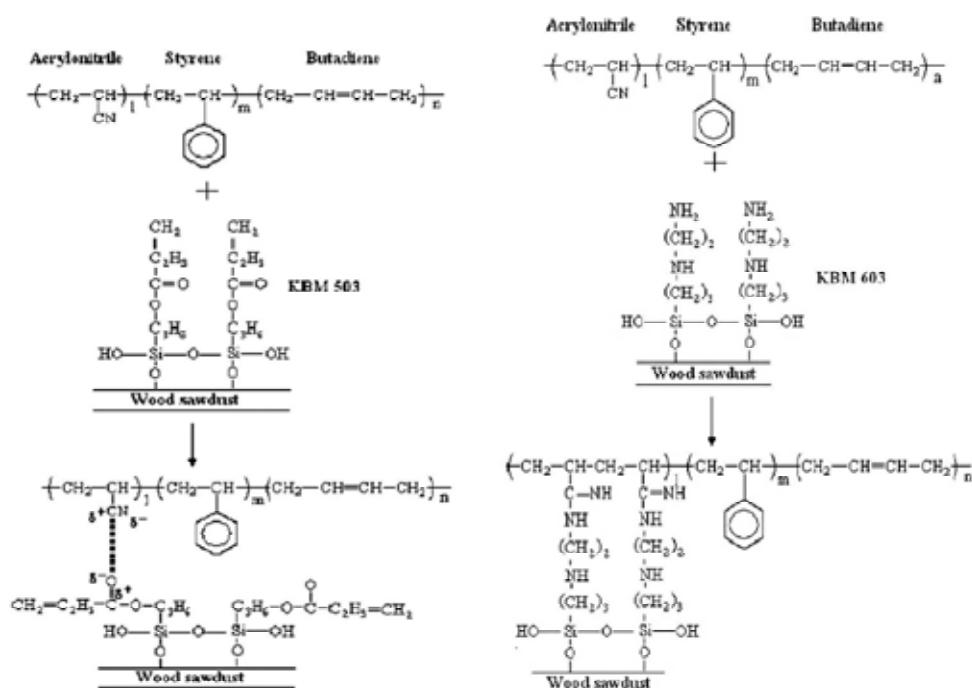
การยึดเกาะทางกล (Mechanical attraction หรือ mechanical interlocking) เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือในกระบวนการขึ้นรูป คือ เมื่อเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวของเส้นใยในขณะที่เป็นของไหล ซึ่งทำให้เมทริกซ์สามารถแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย หรือในร่องบนพื้นผิวเส้นใยแล้วทำให้เกิดการเชื่อมโยง เมทริกซ์แข็งตัวติดกับพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับ ความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เมทริกซ์แทรกตัวเข้าไปได้ และความหนืดของเมทริกซ์เอง



ภาพที่ 23 กลไกการยึดเกาะของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส a) การยึดเกาะทางกลการ b) แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิต c) การแพร่เข้าหากัน d) พันธะเคมี e) ดูดซับและการเปียก [32]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chotirat และคณะ [33] ทำการศึกษากลไกการยึดเกาะระหว่างวัสดุคอมโพสิตอะคริโลไนไตร์ - บิวตะไดอิน - สไตรีน (ABS) กับซีลี้อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วด้วยสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด คือ N-2(aminoethyl)3-aminopropyl trimethoxysilane (KBM603) และ 3-Methacryloxypropyl trimethoxysilane (KBM503) ที่ปริมาณความเข้มข้น 0-2 % โดยน้ำหนักของซีลี้อยไม้ นอกจากนี้ยังศึกษาปริมาณซีลี้อยไม้ที่เหมาะสมในการผสมกับเอปียีส รวมถึงการหาชนิดและปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมที่ใช้ปรับปรุงผิวของซีลี้อยไม้ในวัสดุคอมโพสิตที่มีเอปียีสเป็นเมตริกซ์ จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณซีลี้อยไม้ที่ผสมกับ ABS เพิ่มขึ้น ทำให้มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตลดลง และ ยังพบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของสารคู่ควบไซเลน ชนิด KBM503 และ ชนิด KBM603 ที่ใช้ปรับปรุงผิวซีลี้อยไม้คือ 1 % และ 0.5 % โดยน้ำหนักของซีลี้อยไม้ตามลำดับ โดยซีลี้อยไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด KBM603 มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างวัสดุคอมโพสิตเอปียีสกับซีลี้อยไม้ที่ดีกว่า ชนิด KBM503 เป็นผลเนื่องมาจากกลไกการยึดเกาะเกิดจากการเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ของ N-C จากหมู่ NH_2 ของสารคู่ควบไซเลนชนิด KBM603 กับ หมู่ $\text{C}\equiv\text{N}$ ของ ABS ซึ่งแข็งแรงกว่า การเชื่อมโยงด้วยแรงไดโพล-ไดโพล ระหว่าง หมู่ $\text{C}=\text{O}$ ของสารคู่ควบไซเลนชนิด KBM503 และหมู่ $\text{C}\equiv\text{N}$ ของเอปียีสดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แสดงกลไกการยึดเกาะของสารคู่ควบ KBM 603 และ 503

Tiganis และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเอบีเอส โดยการทำ Aging ที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียสในสถานะที่มี Oxygen จากการศึกษาพบว่า การเกิดการสลายตัวของ ABS จะเกิดที่ผิวของชิ้นงาน ABS เนื่องจาก Oxygen แพร่เข้าไปในเนื้อชิ้นงานได้อย่างจำกัด และการ Aging ภายใต้อุณหภูมิสูงจะพบว่าการแตกหักของชิ้นงานจะเริ่มจากร่องรอยที่เกิดจากการสลายตัวที่พื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ชั้นของ ABS ที่เกิดการสลายตัวจะต้องมีความหนาจนถึง 0.08 นิ้ว จึงจะทำให้รอยแตกที่ขนาดใหญ่พอที่จะเกิดการแตกหักเข้าไปในเนื้อของชิ้นงาน ผลจาก FTIR แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของ ABS จะเกิดในเฟสของ Polybutadiene (PB) โดยจะเริ่มจากการ Abstract ของ Hydrogen จาก α carbon ที่พันธะคู่ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดอนุมูลคาร์บอนิลและไฮดรอกซิลขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการ Crosslink ระหว่างสายโซ่ของ ABS ขึ้นอีกด้วยซึ่งถูกยืนยันด้วยผลจาก Positron annihilation lifetime spectroscopy โดยแสดงให้เห็นถึงการลดลงของ Free volume ที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน และจะทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่น ความแข็งและมอดูลัสมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค DMA ในการยืนยันการเกิด Crosslink โดยแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของ Tg ของเฟส PB เฟส ภายหลังจาก Aging

Kim และ คณะ [15, 16] ทำการศึกษาการผลิตวัสดุเอบีเอส ด้วยการผสมของ SAN กับ Butadiene ที่กราฟท์ด้วย SAN โดยใช้กระบวนการ Emulsion ซึ่ง SAN matrix ที่ใช้จะมีปริมาณ Acrylonitrile (AN) ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0-40% ในขณะที่ SAN ที่กราฟท์กับ Butadiene จะมีปริมาณ Acrylonitrile คงที่ที่ 22.5% พบว่าค่าความแข็งแรงและค่าความเหนียวของวัสดุมีค่าสูงสุดที่ใช้ SAN matrix ที่มีปริมาณ Acrylonitrile 34% ส่วนการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปด้วยเทคนิค Dilatometry พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกการเปลี่ยนรูปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Acrylonitrile ใน SAN matrix นอกจากนี้การศึกษาด้วย TEM แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่แตกต่างกันของ Rubber phase ใน Matrix รวมทั้งการศึกษา Morphology ของพื้นผิวที่แตกหักด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับ miscible region ของ SAN graft และ SAN matrix นอกจากนี้ Kim และคณะได้ทำการศึกษาวัด ABS ซึ่งเตรียมด้วยวิธีการเดิมแต่ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ AN ทั้งใน SAN matrix (14.7- 40%) และ SAN graft (14.2 - 37.5%) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล แรงยึดติดระหว่าง SAN graft และ SAN matrix รวมถึง Dynamic mechanical properties ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ ABS ที่เตรียมขึ้นพบว่าจะมีค่าดีที่สุดเมื่อปริมาณ AN ใน SAN matrix มีค่าหนึ่งและมากกว่าปริมาณ AN ใน SAN graft และค่าสูงสุดดังกล่าวจะสูงขึ้นตามปริมาณ AN ใน SAN graft สำหรับการศึกษาการยึดติดระหว่างเฟสด้วย Lap shear measurement พบว่าการยึดติดจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ AN ของทั้ง SAN

graft และ SAN matrix มีค่าที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง แต่จะอยู่นอก miscible region ตามทฤษฎี และในการศึกษา Dynamic mechanical properties โดยจะพิจารณาค่า Glass transition temperature พบว่าค่า Tg ของ Rubber phase จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ AN ใน matrix

Chastagner [35] ทำการศึกษาปริมาณขี้เลื่อยไม้ ปริมาณ SAN และ อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง ABS กับขี้เลื่อยไม้เมเปิ้ล (maple wood flour) ที่ทดสอบโดยใช้ slit die rheometer ที่มีขนาดความสูง 5 มิลลิเมตร และ ความกว้าง 50 มิลลิเมตร โดยขี้เลื่อยไม้เมเปิ้ลมีขนาด 40 mesh โดยปรับเปลี่ยนปริมาณขี้เลื่อยตั้งแต่ 20 – 40 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ ยังทำการศึกษากลับมาปริมาณขี้เลื่อยไม้ ต่อคุณสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง พอลิโพรพิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) กับขี้เลื่อยไม้เมเปิ้ลที่ทดสอบโดยใช้ slit die จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณขี้เลื่อยไม้ที่ผสมกับ ABS เพิ่มขึ้น และ ปริมาณ SAN เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง เช่นเดียวกันกับเมื่อปริมาณขี้เลื่อยไม้ที่ผสมใน HDPE เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบคุณสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบ โดยใช้ capillary die rheometer

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือสำหรับการผสมวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงไม้และเอบีเอส

- เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder)
- เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)

3.1.2 เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

- เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine)
- เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)

3.1.3 เครื่องทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพสิต

3.1.3.1 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ โมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอส

- เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR)
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHN Analyzer)

เครื่องมือวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเอบีเอส

3.1.3.2 เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติการไหล

- คาปิลารีรีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer)

3.1.3.3 เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติทางความร้อน

- เครื่องศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA)
- เครื่องทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล (DMA)

3.1.3.4 เครื่องทดสอบสมบัติทางกล

- เครื่องทดสอบแรงดึงแรงกดเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
- เครื่องทดสอบความต้านแรงกระแทก (Impact Tester)

3.1.3.5 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เม็ดพลาสติกเอบีเอส จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ทั้งหมด 3 เกรด ได้แก่

- GA300 (High flow; HF-ABS)
- MH-1 (Medium Impact; MI-ABS)
- SP200 (Super high impact; SI-ABS)

3.2.2 ผงไม้ยางพารา (Para-sawdust) จากบริษัท วี.พี. วัสดุ จำกัด ซึ่งผงไม้ดังกล่าวนำมาคัดแยกขนาด โดยขนาดผงไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วง 100 – 300 ไมครอน

3.2.3 สารคู่ควบไซเลนชนิด N-2(aminoethyl)3-aminopropyl trimethoxysilane จากบริษัท Sigma-Aldrich, Inc. ประเทศเยอรมัน

3.2.4 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2.5 กรดอะซิติกแอซิด (Acetic acid)

3.2.6 สารละลายไดคลอโรฟอร์ม (Dichloroform)

3.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพลาสติกเอบีเอส

3.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอส

ในการวิเคราะห์หาปริมาณโมโนเมอร์แต่ละชนิดในพลาสติก ABS แต่ละเกรดนั้น ใช้สองเทคนิคในการวิเคราะห์คือ Proton-nuclear magnetic resonance (H-NMR) และเทคนิค Elemental Analysis (CHN/O) ในการวิเคราะห์

3.3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค H-NMR

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค H-MNR ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NMR spectrometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น 300 ด้วยความถี่สนามแม่เหล็ก 300 MHz โดยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในรูปสารละลายเจือจาง โดยนำเม็ดพลาสติกเอบีเอส ประมาณ 5-10 มิลลิกรัม ละลายใน D-Chloroform แล้วเขย่าจนกระทั่งตัวอย่างละลายเป็นเนื้อเดียว แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วย NMR spectrometer ซึ่งผลที่ได้บ่งบอกถึงสัดส่วนของโมโนเมอร์แต่ละชนิด

3.3.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Elemental Analysis (CHN)

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในเม็ดพลาสติกเอบีเอส ด้วยเครื่อง CHNs/O Analyzer ของบริษัท Perkin Elmer Instrument รุ่น Series II 2400 ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งใช้ตัวอย่างเม็ดพลาสติกเอบีเอสน้ำหนักประมาณ 1.0 – 1.5 มิลลิกรัม ผลที่ได้อยู่ในรูปของปริมาณธาตุแต่ละชนิด ได้แก่ C, H และ N ในพลาสติกเอบีเอส



ภาพที่ 25 เครื่อง CHNs/O Analyzer [36]

3.3.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วย Ubbelohde Viscometer

การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วย Ubbelohde viscometer โดยอาศัยหลักการของความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับน้ำหนักโมเลกุลตามสมการของ Mark-Houwink-Sakurada [37] ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$[\eta] = K\bar{M}_v^a \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

เมื่อ $\bar{M}_v$ คือน้ำหนักโมเลกุล

$[\eta]$ คือค่า intrinsic viscosity

K และ a คือค่าคงที่ของสมการ



ภาพที่ 26 เครื่องวัดความหนืด Ubbelohde viscometer [38]

โดยในการทดลอง เริ่มจากการเตรียมสารละลายเอบีเอสที่ความเข้มข้น 1, 0.5, 0.25, 0.125 และ 0.063 กรัมต่อลิตร ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม จากนั้นใส่สารละลายเอบีเอสลงในกระเปาะของ Ubbelohde Viscometer ดังภาพที่ 26 แล้วจับเวลาที่สารละลายเอบีเอสและตัวทำละลายบริสุทธิ์ไหลผ่านกระเปาะของ Viscometer ซึ่งเวลาที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณหาความหนืดจำเพาะ (Specific viscosity, η_{sp}) จากสมการที่ 3.2

$$\eta_{sp} = (t_c - t_0) / t_0 \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

เมื่อ η_{sp} คือ ค่าความหนืดจำเพาะ

t_c คือ เวลาที่สารละลายเอบีเอสไหลผ่านกระเปาะ (วินาที)

t_0 คือ เวลาที่ตัวทำละลายบริสุทธิ์ไหลผ่านกระเปาะ (วินาที)

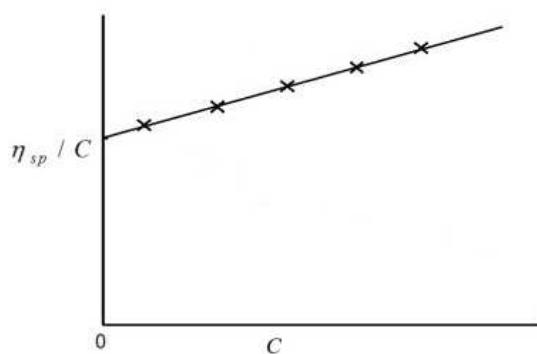
จากนั้นข้อมูลที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหา Intrinsic viscosity จากสมการของ Huggins ดังสมการที่ 3.3

$$(\eta_{sp}/c) = [\eta] + k[\eta]^2 c \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่สมการ

c คือ ความเข้มข้น (g/L)

จากสมการที่ 3.3 เมื่อพลอตกราฟระหว่าง (η_{sp}/c) กับ c ทำให้สามารถหา Intrinsic viscosity จากจุดตัดแกน Y ของเส้นกราฟดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงลักษณะการพลอตกราฟเพื่อหา Intrinsic viscosity จากสมการของ Huggins [39]

เมื่อแทนค่า Intrinsic viscosity ที่คำนวณได้ลงในสมการที่ 3.1 และแทนค่าคงที่ต่างๆลงในสมการที่ 3.1 ($k = 1.5 \times 10^{-4}$ และ $a = 0.7$ [40]) แล้วคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเอบีเอสได้

3.4 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)

3.4.1 นำผงไม้ที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้วปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.2 เตรียมสารละลายคู่ควบชนิด N-2(aminoethyl) 3-aminopropyl trimethoxysilane ซึ่งปริมาณไซเลนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 % ของน้ำหนักของผงไม้ โดยไซเลนดังกล่าวถูกหยดลงในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่มีกรดอะซิติกละลายอยู่ 1% โดยน้ำหนัก และในระหว่างที่ทำการหยดไซเลน ก็ทำการกวนสารละลายอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งไซเลนถูกหยดจนหมดและสารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.3 พ่นสารละลายไซเลนที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2 ผสมกับผงไม้ทันที ในเครื่องผสมความเร็วสูงด้วยความถี่ใบกวน 25 เฮิร์ต เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.5. การผสมผงไม้ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวแล้วกับเม็ดพลาสติกเอบีเอส

ผงไม้ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวแล้วถูกนำมาผสมแบบแห้ง (Dry-blending) กับพลาสติกเอบีเอส (สัดส่วน 10 และ 50 ในเอบีเอส 100 ส่วน) ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงด้วยความถี่การหมุนของใบกวน 25 เฮิร์ต จากนั้นนำไปผสม (Melt-blending) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกัน (co-rotating twin crew extruder) ด้วยสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร และหัวขึ้นรูป ลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวน 8 รู ทำการผสมด้วยความถี่การหมุนของสกรูที่ 9.0 เฮิร์ต และอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมตั้งแต่กรวยป้อนจนถึงหัวขึ้นรูป คือ 100, 170, 175, 175, 180, 180, 185, 185 และ 190 องศาเซลเซียส คอมปาวด์ที่ออกมาจะถูกหล่อเย็นด้วยน้ำและถูกตัดเป็นเม็ด หลังจากนั้นนำอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

3.6.1 การฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

นำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากข้อ 3.5 มาฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) รุ่น E-80B ของบริษัท Elite Precision Machinery Ltd. โดยชิ้นงานที่ทำการฉีดจะเป็นชิ้นงานที่นำไปทดสอบสมบัติแรงดึง การโค้งงอ และ ความทนทานต่อแรงกระแทก ดังแสดงในภาพที่ 28 และสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สภาวะในการฉีดขึ้นรูป

พารามิเตอร์ควบคุม	สภาวะ
อุณหภูมิใกล้กรวยป้อน	180 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิกระบอกหลอม	185 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิใกล้หัวฉีด	190 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบสกรู	85 รอบต่อนาที
ความเร็วในการฉีด	50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
ความดันในการฉีด	65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 28 แสดงชิ้นงานจากการฉีด (ก) ชิ้นงานทดสอบการดึงยืด (ข) ชิ้นงานทดสอบการโค้งงอ และ (ค) ชิ้นงานทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

3.6.2 การอัดขึ้นรูป (Compression molding)

นำเม็ดคอมพาวด์ที่ได้จากข้อ 3.5 มาขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 20 x 20 เซนติเมตร ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) เพื่อนำไปทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล ด้วยเทคนิค DMA โดยมีสภาวะการขึ้นรูปได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้คือ 190 องศาเซลเซียส แรงดันและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปคือ 10,000 kPa และ 2 นาที ตามลำดับ

3.7 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพองไม่กับเอบีเอส

3.7.1 การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตพองไม่กับเอบีเอส

การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิต โดยเครื่องทดสอบการไหลแบบ Capillary rheometer ยี่ห้อ CEAST รุ่น Rheologic 5000 ดังแสดงในภาพที่ 29 ด้วยหัวขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร ($L/D = 20:1$)



ภาพที่ 29 แสดงเครื่องทดสอบการไหลแบบ Capillary die rheometer ยี่ห้อ CEAST รุ่น Rheologic 5000 [41]

โดยอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือที่ 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส ในช่วงอัตราเฉือน (Shear rate) 5 ถึง 1500 s^{-1} พร้อมทั้งมีการวัดการบวมตัวที่หัวขึ้นรูป ด้วยเซนเซอร์แสงในขณะที่พลาสติกหลอมเหลวไหลออกมาจากขึ้นรูป ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะแสดงผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน ซึ่งในงานวิจัยนี้ นำสมการการไหลมาอธิบายพฤติกรรมการไหลซึ่งประกอบไปด้วยสมการดังแสดงในสมการความสัมพันธ์ต่างๆต่อไปนี้ [42]

Power law $\eta = m\dot{\gamma}^{1-n}$ (สมการที่ 3.4)

Carreau $\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{[1+(\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{1-n}{2}}}$ (สมการที่ 3.5)

Herschel-Bulkley $\eta = \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} + m\dot{\gamma}^{n-1}$ (สมการที่ 3.6)

Cross-Williamson $\eta = \frac{\eta_0}{1+(\lambda\dot{\gamma})^{(1-n)}}$ (สมการที่ 3.7)

เมื่อ η คือ ความหนืด (Viscosity) (Pa.s)

η_0 คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero-shear viscosity) (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน (Shear rate) (s^{-1})

n คือ ดรรชนีการไหล (Power law index)

m คือ ค่าคงที่การไหล (Consistency coefficient) (Pa.s^2)

λ คือ เวลาคลายความเค้น (Relaxation time) (s)

σ_0 คือ ความเค้นยิลด์ (Yield stress) (Pa)

ซึ่งค่าคงที่ต่างๆเหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าความหนืดและอัตราครีดยืดเค้นที่ได้จากการทดลองลงไป โดยค่า n คือ ค่าดัชนีกำลัง (Power law index) บ่งบอกถึงสมบัติของของไหล โดยทั่วไปพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่า n อยู่ในช่วง $0 \leq n \leq 1$ ค่า η_0 ความหนืดของของไหลที่อัตราครีดยืดเค้นเท่ากับศูนย์ และค่า λ คือค่า Relaxation time ซึ่งบ่งบอกถึงระยะเวลาที่ของไหลใช้ในการคลายความเครียดเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ [43]

นอกจากนี้ในการทดลองในส่วนนี้มีการนำหลักการของ Time-Temperature super position มาใช้ในการสร้าง Master curve ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียสโดยใช้ Shift factor ในการเลื่อนแกนของเส้นกราฟ โดย Shift factor ดังกล่าวหาได้จากสมการ

$$a_T = \frac{\eta_0(T)T_{ref}\rho_{ref}}{\eta_0(T_{ref})T\rho} \quad (\text{สมการที่ 3.8})$$

เมื่อ a_T คือ ค่า Shift factor

T , ρ และ η_0 คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ความหนาแน่น (g/cm^3) และ ความหนืดที่อัตราครีดยืดเค้นเป็นศูนย์ (Pa.s) ตามลำดับ

T_{ref} , ρ_{ref} และ η_{ref} คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ความหนาแน่น (g/cm^3) และ ความหนืดที่อัตราครีดยืดเค้นเป็นศูนย์ (Pa.s) ที่สถานะอ้างอิงตามลำดับ

ภายใต้สมมติฐาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ทำการศึกษา (180-200 องศาเซลเซียส) ความหนาแน่นของวัสดุจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากดังนั้นสมการที่ 3.5 จะลดรูปเป็น

$$a_T = \frac{\eta_0(T)T_{ref}}{\eta_0(T_{ref})T} \quad (\text{สมการที่ 3.9})$$

จากนั้นค่า Shift factor ที่คำนวณได้จะถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนค่าความหนืดและอัตราครีดยืดเค้นด้วยสมการที่ 3.7 และ 3.8 ดังต่อไปนี้

$$\dot{\gamma}_r = a_T \dot{\gamma} \quad (\text{สมการที่ 3.10})$$

เมื่อ $\dot{\gamma}_r$ คือ ค่า Reduced shear rate

$$\eta_r = \frac{\eta(T, \dot{\gamma})}{a_T} \quad (\text{สมการที่ 3.11})$$

เมื่อ η_r คือ ค่า Reduced viscosity

3.7.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียีส

3.7.2.1 อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียีส

การศึกษาในส่วนนี้ทำการทดสอบด้วยเทคนิค TGA เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature; T_d) ของวัสดุ โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเตรียมจากเม็ดคอมปาวด์จากข้อ 3.5 โดยตัดให้มีน้ำหนักประมาณ 3-8 มิลลิกรัม และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Perkin-Elmer Thermal analyzer รุ่น TGA7 แสดงดังภาพที่ 30 โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 50-600 องศาเซลเซียส ในก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิ ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่องค์ประกอบต่างๆในวัสดุคอมโพสิตเกิดการสลายตัว



ภาพที่ 30 แสดงเครื่องทดสอบ Thermal gravimetric analyzer (TGA)

3.7.2.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียีส

การศึกษาในส่วนนี้ทำการทดสอบด้วยเทคนิค DMA เป็นการทดสอบด้วยการให้แรงกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ข้อมูลที่ได้แสดงผลในรูปของ Loss modulus (E'') storage modulus (E') และ $\tan\delta$ ซึ่งจะบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสมบัติของตัวอย่างจากของแข็งไปเป็นของไหลหนืดหรือที่เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง (Transition temperature; T_g) โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer ยี่ห้อ GABO รุ่น EPLEXOR QC 25 ทำการทดสอบด้วยโหมดการดึงที่ 0.1 % strain ด้วยความถี่ 10 เฮิรตซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 50-150 องศา

เซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเตรียมโดยการตัดจากแผ่นชิ้นงานที่เตรียมในหัวข้อ 3.6.2 ให้มีขนาด 10 x 60 x 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 31 เครื่อง Dynamic mechanical analyzer

3.7.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียีส

3.7.3.1 สมบัติความต้านแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของชิ้นงาน (Tensile properties) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS 2782: Part 3 (1996) Methods 320A โดยชิ้นงานที่ใช้คือชิ้นงานรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ที่ได้จากหัวข้อ 3.6.1 ด้วยความยาวเกจ (Gauge length) 50 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ LLOYD Instrument รุ่น LR 50K ด้วยโหมดการทดสอบการดึงยืด ใช้ load cell ขนาด 50 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าที่ได้จากการทดสอบถูกแปรผลเป็น 3 ค่าคือ ค่ายังมอดุลัส ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด และ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

3.7.3.2 สมบัติความต้านการโค้งงอ

การทดสอบสมบัติการโค้งงอ (Flexural properties) เป็นการทดสอบการต้านการโค้งงอของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกด 3 จุด (Three point bending) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเป็นแท่งสี่เหลี่ยมตามมาตรฐาน ASTM D790 (1999) แสดงดังภาพ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบเดียวกับการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง แต่เปลี่ยนโหมดการทดสอบเป็นการให้แรงกดด้วย load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการกด 2.8 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ (support span) 100 มิลลิเมตร ข้อมูลที่ได้รายงานในรูปของค่ามอดุลัสความต้านการโค้งงอ (Flexural modulus) และค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (Flexural strength)

3.7.3.3 สมบัติความต้านทานแรงกระแทก

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้การทดสอบแบบ Notched izod impact test ตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งวิธีดังกล่าวมีการทำรอยบากที่ชิ้นงาน โดยการใช้เครื่องทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum impact tester) ยี่ห้อ Zwick รุ่น II ดังแสดงในภาพที่ 32 โดยการใช้ค้อนเหวี่ยงขนาด 4 จูล โดยข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปแบบของค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก (Impact strength)



ภาพที่ 32 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก

3.7.4 การศึกษาสมบัติสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียเอส

สัณฐานวิทยา (Morphology) ของวัสดุคอมโพสิตทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ยี่ห้อ CamScan ด้วยการให้พลังงาน 15 keV ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า โดยชิ้นงานที่นำไปทดสอบเป็นชิ้นงานที่มีการแตกหักจากการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (หัวข้อ 3.7.3.3)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงไม้อย่างพาราและพลาสติกเอบีเอสที่มีองค์ประกอบโมโนเมอร์ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา พลาสติกเอบีเอสที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเอบีเอสจากบริษัท ไออาร์พีซีจำกัดมหาชน ซึ่งได้แก่เกรด High Flow, Medium high impact และ super high impact โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอักษรย่อแทนชื่อของเม็ดพลาสติกทั้งสามเกรดดังนี้ HF-ABS, MI-ABS และ SI-ABS ตามลำดับ ผงไม้อย่างพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 100-300 ไมโครเมตร และปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลนชนิด N-2-(aminoethyl)-3-(aminopropyl) trimethoxysilane และเติมผงไม้ในวัสดุคอมโพสิตในปริมาณร้อยละ 9.1(10phr) และ 33.3(50phr) ของน้ำหนักวัสดุคอมโพสิต โดยผลการทดลองในส่วนต่างๆจะแสดงดังต่อไปนี้

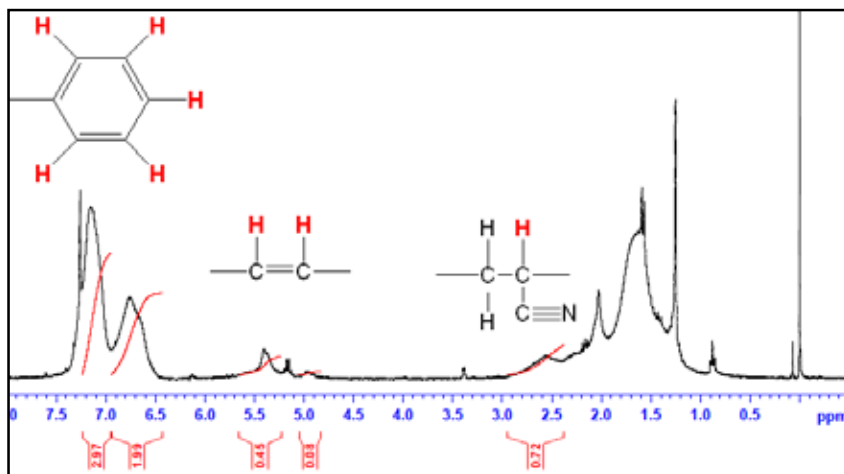
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพลาสติกเอบีเอส

4.1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอส

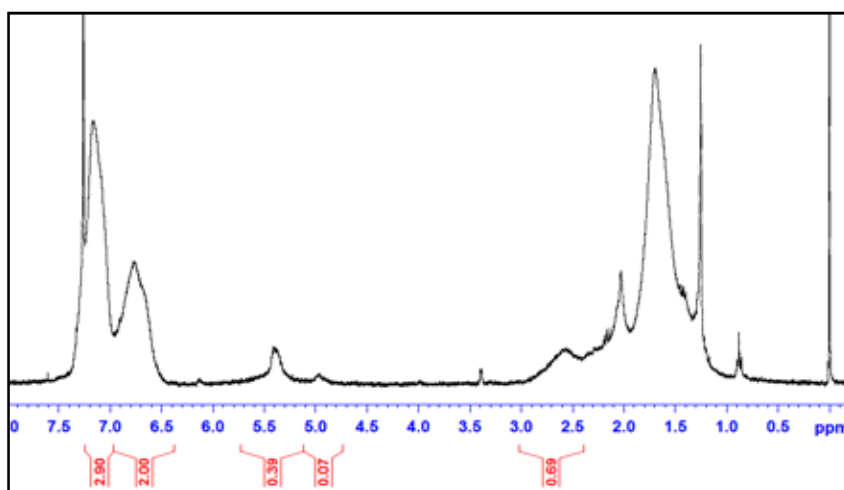
การวิเคราะห์หาสัดส่วนโคโมโนเมอร์ในเม็ดพลาสติกเอบีเอสทั้งสามเกรดจะใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ 2 เทคนิคด้วยกัน นั่นคือ H-NMR และ CHN Elemental analysis

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค H-NMR

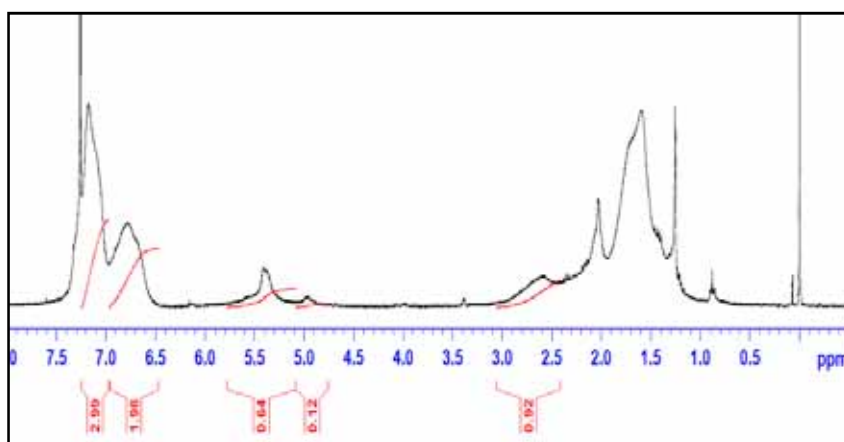
ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนโมโนเมอร์จากเทคนิค H-NMR ของเม็ดพลาสติกเอบีเอสทั้งสามเกรดแสดงดังในภาพที่ 33-35 ซึ่งจากภาพเห็นว่าพลาสติกเอบีเอสทั้งสามเกรดปรากฏสัญญาณที่สำคัญ ที่ตำแหน่งเดียวกันได้แก่ ที่ 7.3-6.5 ppm แสดงการเกิดเรโซแนนซ์ของโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับวงแหวนเบนซีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของสไตรีน ช่วง 5.5-4.9 ppm แสดงสัญญาณที่เกิดจากโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับ $-C=C-$ ของบิวตะไดอิน และที่ตำแหน่ง 2.6 ppm จะปรากฏสัญญาณที่เกิดจากโปรตอนบนคาร์บอนที่ติดกับหมู่ $-CN$ ของอะคริโลไนไตร



ภาพที่ 33 แสดง H-NMR spectra ของพลาสติกเอบีเอส เกรด High Flow (HF-ABS)



ภาพที่ 34 แสดง H-NMR spectra ของพลาสติกเอบีเอส เกรด Medium Impact (MI-ABS)



ภาพที่ 35 แสดง H-NMR spectra ของพลาสติกเอบีเอส เกรด Super High Impact (SI-ABS)

สัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละส่วน แต่อย่างไรก็ตามบริเวณสัญญาณที่เกิดจากโปรตอนในอะคริโลไนไตร (2.6 ppm) มีการซ้อนทับกับสัญญาณจากโปรตอนของหมู่ $-CH_2$ ในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ทำให้ไม่สามารถเทียบสัดส่วนของอะคริโลไนไตรได้ จึงบอกได้เพียงสัดส่วนระหว่างสไตรีนต่อบิวตะไดอินเท่านั้นซึ่งแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงสัดส่วน (molar) ระหว่าง Styrene monomer ต่อ Butadiene monomer

พลาสติกเอบีเอส	สัดส่วนระหว่าง สไตรีนต่อบิวตะไดอิน
HF	1 : 0.25
MI	1 : 0.22
SI	1 : 0.36

เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค H-NMR ไม่สามารถบอกถึงสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดได้โดยเฉพาะอะคริโลไนไตรดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิค Elemental analysis เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของอะคริโลไนไตร

4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CHN Elemental analysis

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าวใช้การเผาตัวอย่างเม็ดพลาสติกขนาดประมาณ 1.0-1.5 มิลลิกรัม โดยใช้แก๊สผสมระหว่างออกซิเจนกับฮีเลียม แก๊สทั้งหมดที่ได้จากการเผาถูกนำมาวิเคราะห์ และแสดงผลออกมาในรูปของสัดส่วนของธาตุทั้งหมดในพลาสติก ดังในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบในเม็ดพลาสติกเอบีเอสด้วย Elemental analyzer

Sample	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)	Sample weight (mg)
HF-ABS	86.30	7.57	5.00	1.394
MI-ABS	86.85	7.68	5.47	1.380
SI-ABS	85.50	7.45	5.64	1.197

จากธาตุที่วิเคราะห์ได้ทั้งหมด เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกเอบีเอส จะพบว่าที่ตำแหน่งอะคริโลไนไตรโมโนเมอร์ 1 หน่วย มีธาตุไนโตรเจนหนึ่งตัว ดังนั้นสัดส่วนของ

ธาตุไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคนี้สามารถใช้คำนวณหาปริมาณอะคริโลไนไตรได้ และผลการวิเคราะห์หาปริมาณโมโนเมอร์ต่างๆในพลาสติกเอบีเอสแต่ละเกรดแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณโมโนเมอร์ในพลาสติกเอบีเอสแต่ละเกรด

พลาสติกเอบีเอส	ร้อยละโดยน้ำหนักโมโนเมอร์ในเอบีเอส			น้ำหนักโมเลกุล (M_v)
	อะคริโลไนไตร	บิวตะไดอิน	สไตรีน	
HF-ABS	18.9	9.5	71.5	312,440
MI-ABS	20.7	8.6	70.7	536,295
SI-ABS	21.4	12.5	66.2	342,529

สัดส่วนของโมโนเมอร์ที่วิเคราะห์ได้พบว่า SI-ABS มีปริมาณบิวตะไดอินมากที่สุด ถัดมาเป็น HF-ABS ส่วน MI-ABS มีปริมาณบิวตะไดอินน้อยที่สุด สำหรับสัดส่วนของอะคริโลไนไตร SI-ABS และ MI-ABS พบว่ามีปริมาณอะคริโลไนไตรที่มากและใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เอบีเอสเกรด HF-ABS และ MI-ABS จะมีสไตรีนที่ใกล้เคียงกันและมากกว่า SI-ABS นอกจากนี้ในตารางที่ 6 แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย M_v ของเอบีเอสเกรดทั้งสามเกรดซึ่งพบว่า เอบีเอสเกรด MI-ABS เป็นเอบีเอสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่วน HF-ABS และ SI-ABS จะมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่า MI-ABS

4.2 การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส

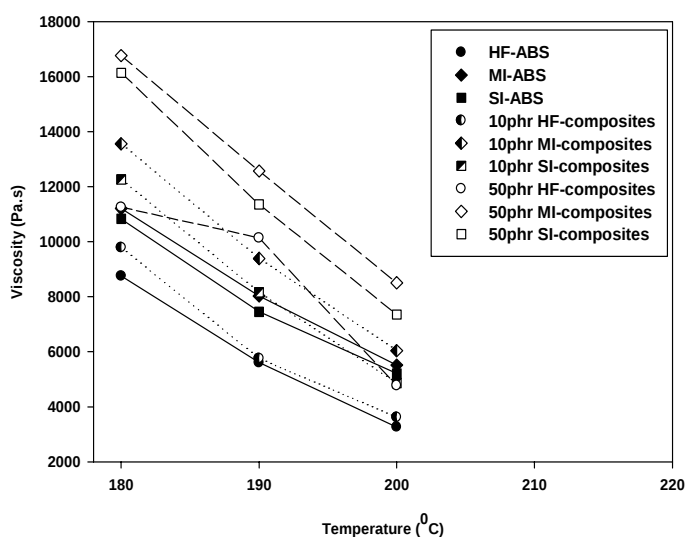
การศึกษาศสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตทำให้ได้ข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วยความหนืดของวัสดุที่อัตราความเร็วเฉือน $5-1500 \text{ s}^{-1}$ และอุณหภูมิต่างๆกันคือ 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส รวมทั้งศึกษาการบวมตัวที่หัวขึ้นรูป (Die) โดยในการวิจารณ์ผลการทดลองแบ่งเป็นหัวข้อย่อยต่างๆดังต่อไปนี้

4.2.1 อิทธิพลของโคโมโนเมอร์ อุณหภูมิและอัตราความเร็วเฉือน ต่อความหนืดของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส

จากภาพที่ 36 และ 37 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและอัตราความเร็วเฉือนที่มีต่อความหนืดของเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิต ซึ่งพบว่าทั้งพลาสติกเอบีเอสและคอมโพสิตแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ shear-thinning กล่าวคือความหนืดลดลงตามอัตราความเร็วเฉือนและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์โดยทั่วไป

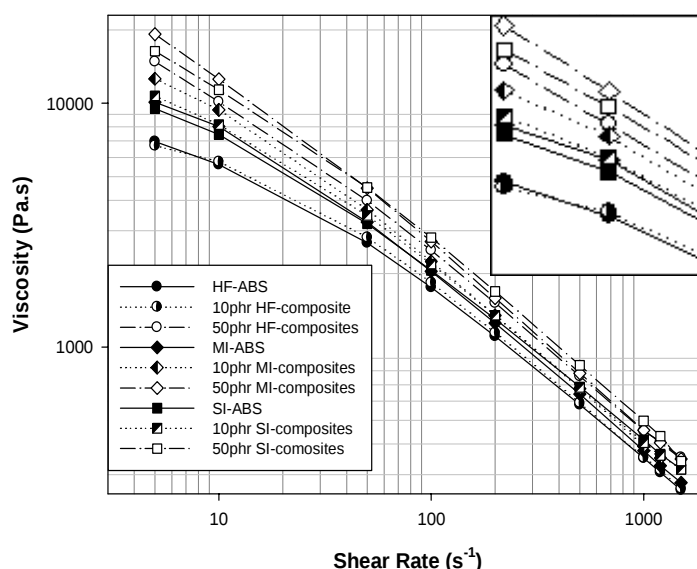
ในกรณีของเอบีเอสบริสุทธิ์ จากภาพที่ 36 พบว่าที่ทุกๆอุณหภูมิ ค่าความหนืดของ HF-ABS < SI-ABS < MI-ABS ทั้งนี้เนื่องจาก หมู่ไซยาโน(-CN) ที่ตำแหน่งอะคริโลไนไตรโมโนเมอร์

สามารถเกิดแรงดึงดูดทุติยภูมิระหว่างสายโซ่ซึ่งส่งผลทำให้ความหนืดสูงขึ้น ดังนั้นจากภาพเห็นว่า เอบีเอสเกรด HF-ABS มีความหนืดน้อยที่สุดเนื่องจากมีปริมาณอะคริโลไนไตรน้อยที่สุดประกอบกับการที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำแสดงในตารางที่ 6 จึงทำให้เอบีเอสเกรด HF-ABS มีความหนืดต่ำ สำหรับพลาสติกเอบีเอสเกรด MI-ABS และ SI-ABS มีความหนืดสูงเนื่องจากเอบีเอสทั้งสองเกรดมีปริมาณอะคริโลไนไตรที่มากและถึงแม้ว่าเอบีเอสทั้งสองเกรดจะมีปริมาณอะคริโลไนไตรที่ใกล้เคียงกัน (MI-ABS 20.7 เปอร์เซ็นต์ และ SI 21.4 เปอร์เซ็นต์) แต่จากภาพจะเห็นว่าความหนืดของ MI-ABS มีค่าสูงกว่าความหนืดของ SI-ABS เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าของ MI-ABS ทำให้ระดับการการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้ความหนืดสูงกว่า



ภาพที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์เกรดต่างๆและวัสดุคอมโพสิตที่อัตราครีดยอด 10 s⁻¹

ในกรณีของวัสดุคอมโพสิต การเติมผงไม้เข้าไปในพลาสติกทำให้ความหนืดของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้ทั้งนี้ก็เป็นเพราะอนุภาคของผงไม้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของเอบีเอส ดังแสดงในภาพที่ 37 วัสดุคอมโพสิตของผงไม้และพลาสติกเอบีเอสทั้งสามเกรดมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืดของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์เกรดต่างๆและวัสดุคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

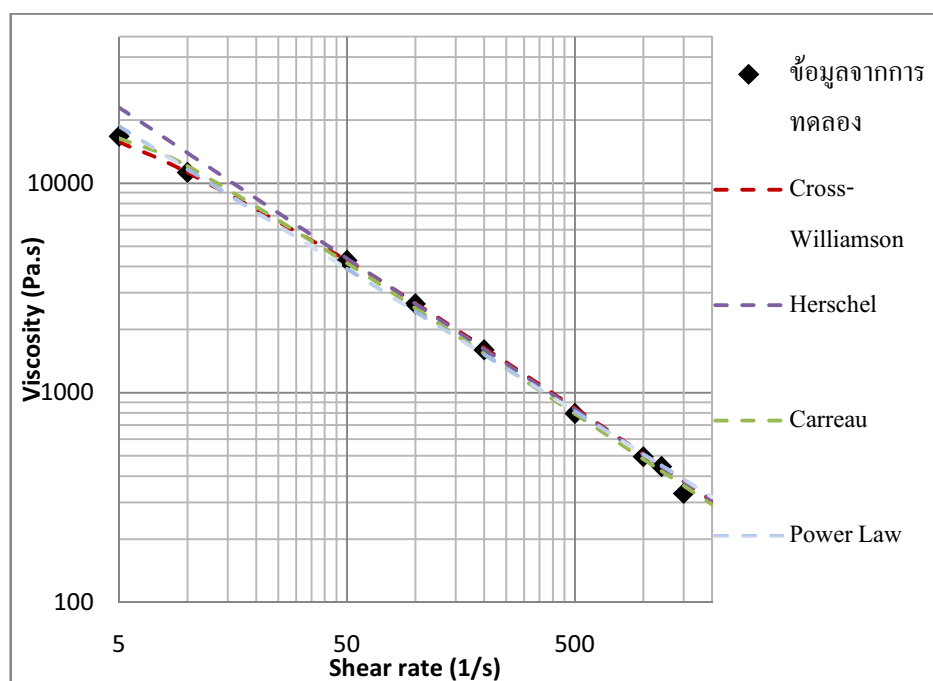
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนืดของเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส ในกรณีที่มีการเติมผงไม้ในปริมาณต่ำ (10 phr) ที่อัตราเฉือน 10 s^{-1} อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS มีความหนืดเพิ่มขึ้น 2.7 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS และ SI-ABS มีความหนืดเพิ่มขึ้น 16.9 และ 9.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจอธิบายด้วยการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารคู่ควบกับเอบีเอสที่ตำแหน่งอะคริโลไนไตรดังแสดงในภาพที่ 24 โดย HF-ABS เป็นเอบีเอสที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรน้อยจึงมีโอกาที่จะเกิดการเชื่อมโยงกับสารคู่ควบน้อย ประกอบกับการที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำจึงทำให้ HF-ABS มีความหนืดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ปริมาณการเติมผงไม้ในปริมาณน้อย แต่ในกรณี SI-ABS และ MI-ABS พบว่าความหนืดเพิ่มขึ้นสูงนั้นเป็นเพราะการที่เอบีเอสทั้งสองมีการเชื่อมโยงกับโมเลกุลของผงไม้ได้มากกว่าและอาจเป็นไปได้ว่าเอบีเอสทั้งสองเกรดมีการเกิดปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนในระดับที่เท่ากัน แต่เอบีเอสเกรด MI-ABS มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าคือมีสายโซ่ที่ยาวกว่า จึงทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันทางกายภาพของสายโซ่พอลิเมอร์และโมเลกุลของผงไม้ที่มากกว่า SI ทำให้ความหนืดของวัสดุคอมโพสิตจากเอบีเอสเกรด MI-ABS มีความหนืดที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด

ในกรณีการเติมผงไม้ในปริมาณที่สูงขึ้น (50 phr) พบว่าค่าความหนืดของวัสดุคอมโพสิตจะมีลำดับเช่นเดียวกันกับในกรณีของเอบีเอสบริสุทธิ์และคอมโพสิตที่การเติมผงไม้ 10 phr แต่วัสดุ

คอมโพสิตจากเอบีเอสทั้งสามเกรดมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เติมผงไม้ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้เฟสของพลาสติกมีปริมาณน้อยลง ทำให้ทั้งผลของโมโนเมอร์และน้ำหนักโมเลกุลลดน้อยลง

4.2.2 สมการของการไหล

จากค่าความหนืดที่สัมพันธ์กับอัตราครีดยืดเค้น สามารถใช้สมการของการไหล มาอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวซึ่งสมการการไหลที่จะนำมาใช้ประกอบไปด้วยสมการของ Power Law (สมการที่ 3.4) Carreau (สมการที่ 3.5) Herschel-Bulkley (สมการที่ 3.6) Cross-Williamson (สมการที่ 3.7) โดยความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการต่างๆจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 แสดงการใช้สมการการไหลในการ Fit กับข้อมูลจากการทดลองของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr

ในการเปรียบเทียบความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง สามารถพิจารณาได้จากค่า Secound virial coefficient (R^2) ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าข้อมูลจากการทดลองสามารถแสดงพฤติกรรมการไหลจากสมการการไหลได้ถูกต้อง โดยค่า R^2 จากสมการการไหลต่างๆแสดงในตารางที่ 8 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8 แสดงค่า R^2 ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงกับข้อมูลที่ได้จากสมการการไหล

สมการ	R^2
Power Law	0.9960
Carreau	0.9993
Cross-Williamson	0.9987
Herschel-Bulkley	0.9944

สมการ Power law เป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนได้ดีในช่วงที่ความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (อัตราเฉือนในช่วง 50-1000 s^{-1}) ส่วนสมการของ Herschel-Bulkley จะใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนได้ดีที่อัตราเฉือนสูงมากๆ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่า R^2 จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าสมการทั้งสองใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับพลาสติกเอปียีสในช่วงอัตราเฉือนที่ทำการศึกษาได้ไม่ดีนัก

สำหรับสมการ Carreau และสมการของ Cross-Williamson สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุคอมโพสิตเอปียีสกับผงไม้ในช่วงอัตราเฉือนที่ทำการศึกษาได้ดีเห็นได้จากค่า R^2 ในตารางที่ 7 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 มาก ซึ่งจากทฤษฎีแล้วสมการของ Carreau ออกแบบไว้สำหรับอธิบายพฤติกรรมการไหลในช่วงของความหนืดที่มีการเปลี่ยนแปลงจากช่วง Newtonian ไปเป็นช่วงที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ Power-law ได้ดีกว่าสมการของ Cross-Williamson จึงปรากฏค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากกว่า นอกจากนี้ถึงแม้ว่าภาพที่ 37 จะแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบการใช้สมการการไหลสำหรับเพียงแค่ตัวอย่างเดียว อันที่จริงแล้วเราพบว่าสมการของ Carreau สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของของทุกๆตัวอย่างได้ดีที่สุดโดยแสดงไว้ในภาคผนวก ข

จากการเปรียบเทียบที่ผ่านมาพบว่าสมการของ Carreau สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุคอมโพสิตเอปียีสกับผงไม้ในช่วงอัตราเฉือนที่ทำการศึกษาได้ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้สมการดังกล่าวในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุ โดยสมการดังกล่าวประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปรได้แก่ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero-shear viscosity; η_0) ค่า Characteristic time (λ) และ ค่า Power law index (n) ซึ่งตัวแปรต่างๆเหล่านี้แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงค่าคงที่จากสมการของ Carreau ของวัสดุคอมโพสิตระหว่างผงไม้และเอบีเอสเกรดต่างๆ

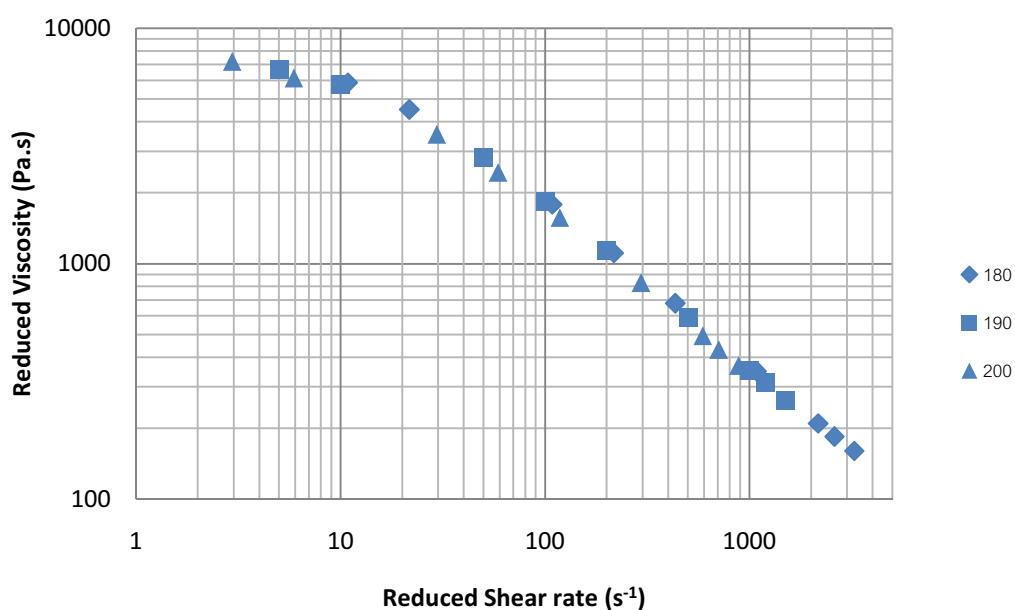
ค่าคงที่ของ Carreau		η_0			λ			n		
อุณหภูมิ (°C)	ABS	Sawdust content			Sawdust content			Sawdust content		
		0	10	50	0	10	50	0	10	50
180	HF	12491	14185	20267	0.14	0.14	0.18	0.31	0.29	0.28
	MI	21127	27042	40157	0.20	0.24	0.30	0.29	0.27	0.24
	SI	20881	22026	34672	0.20	0.19	0.24	0.30	0.29	0.26
190	HF	7346	6899	17232	0.08	0.08	0.15	0.33	0.33	0.29
	MI	11504	15393	25095	0.13	0.17	0.20	0.30	0.29	0.25
	SI	10532	11971	22592	0.12	0.14	0.19	0.34	0.32	0.28
200	HF	4134	4305	6547	0.06	0.05	0.09	0.34	0.30	0.33
	MI	7208	8328	15520	0.08	0.09	0.17	0.30	0.28	0.28
	SI	6794	6927	12217	0.08	0.09	0.16	0.32	0.32	0.32

จากตารางที่ 9 เมื่อพิจารณาค่า ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero-shear viscosity; η_0) ที่ทุกๆอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามความหนืดของวัสดุคอมโพสิตดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา คือ วัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS มีความหนืดมากที่สุด แต่วัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS จะมีความหนืดน้อยที่สุด และความหนืดยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้ที่ใส่ลงไป สำหรับค่า Power law index (n) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงคำตอบสนองต่ออัตราเฉือนของวัสดุ พบว่าตัวอย่างจาก MI-ABS (ทั้งเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพสิต) มีค่าต่ำที่สุดสำหรับทุกๆอุณหภูมิที่ทำการศึกษา นั่นก็หมายความว่าเมื่อเปรียบเทียบสำหรับตัวอย่างจากเอบีเอสทั้งสามเกรด ค่าความหนืดของตัวอย่าง MI-ABS ลดลงอย่างรวดเร็วตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่โมเลกุลของบิวตะไดอิน พบว่าโมเลกุลของยางเป็นโมเลกุลที่มีความไม่เป็นระเบียบสูงจะส่งผลให้ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวไปตามทิศทางการไหลได้ยาก ดังนั้นการที่ MI-ABS มีบิวตะไดอินโมโนเมอร์น้อยทำให้สายโซ่สามารถการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางการไหลได้ง่ายกว่าทำให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็วตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่า Characteristic time (λ) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความรวดเร็วในการคลายความเค้นหรือที่เรียกว่า Relaxation time ยิ่งวัสดุมีค่า

Characteristic time ที่มากนั้นหมายความว่าต้องใช้เวลาที่มากกว่าในการคลายความเค้นในระบบเพื่อกลับสู่สมดุล จากตารางที่ 9 เห็นว่าตัวอย่างจาก MI-ABS จะมีค่า Characteristic time มากที่สุด และตัวอย่างจาก HF-ABS มีค่าน้อยที่สุดที่ทุกๆอุณหภูมิในการทดลอง

4.2.3 Master Curve

การสร้าง Master Curve จะใช้หลักการของ Time-temperature superposition โดยที่ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างที่ถูกนำมาวัดความหนืดที่อัตราการการเฉือนในช่วง $5-1500 \text{ s}^{-1}$ และที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆกันเหล่านี้ถูกนำมาเลื่อนแกนโดยเทียบอุณหภูมิที่ 190 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปวัสดุ โดยในการเลื่อนแกนจะทำโดยใช้ค่า Shift factor จากการคำนวณดังสมการที่ (3.8) Master curve ที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

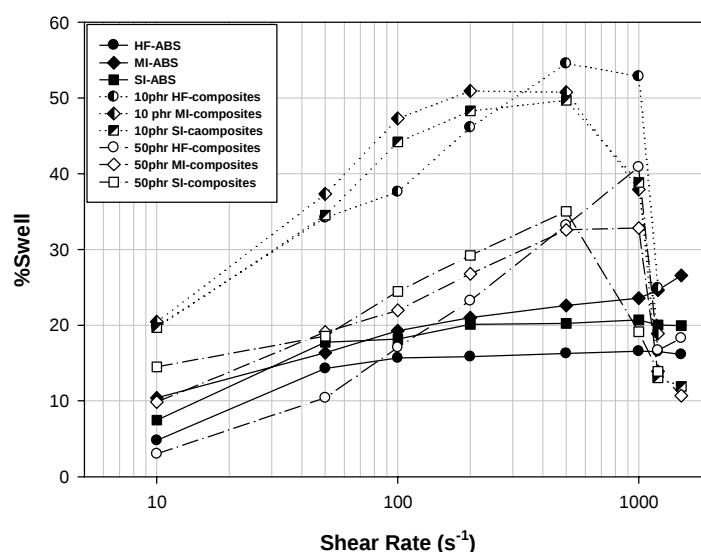


ภาพที่ 39 แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิอ้างอิง (refferent temperature) 190 องศาเซลเซียส

สำหรับ Master Curve ที่ได้จะทำให้เราสามารถทำนายถึงค่าความหนืดของตัวอย่างในช่วงอัตราเฉือนที่กว้างขึ้น สำหรับในภาพที่ 38 แสดง Master curve ของตัวอย่างเพียงบางส่วนเท่านั้น ส่วน Master Curve ของตัวอย่างอื่นๆได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

4.2.4 การศึกษาการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตพองไม่กับเอบีเอส

การศึกษาการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตพองไม่กับเอบีเอส โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิและอัตราความเร็วเฉือนในช่วงเดียวกันกับการทดสอบสมบัติการไหลในหัวข้อที่ผ่านมาคือ ที่อุณหภูมิ 180 190 และ 200 องศาเซลเซียส และอัตราความเร็วเฉือนในช่วง $5 - 1500 \text{ s}^{-1}$ โดยผลการทดลองแสดงดังภาพต่อไปนี้

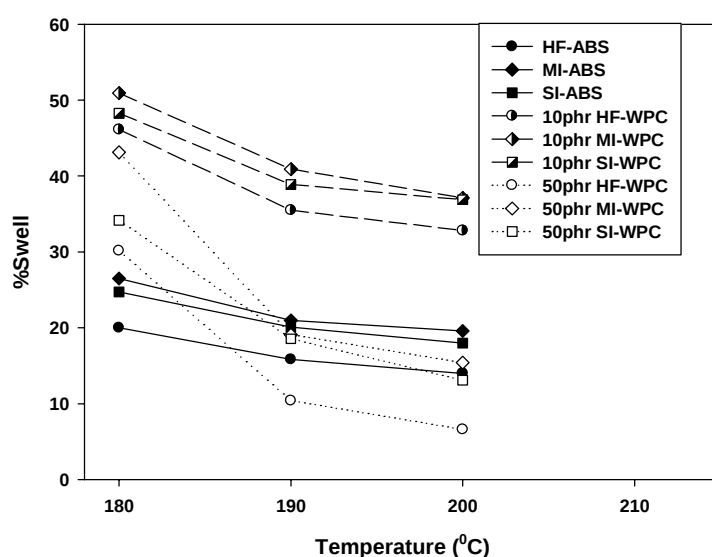


ภาพที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเร็วเฉือนกับการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

โดยปกติแล้วการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปของพอลิเมอร์ หลอมเหลว จะเพิ่มขึ้นตามอัตราความเร็วเฉือนแต่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งสำหรับพฤติกรรมของการบวมตัวของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์จะเป็นไปตามทฤษฎีดังกล่าวดังแสดงในภาพที่ 40 และ 42 สำหรับการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตพบว่า จะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นตามอัตราความเร็วเฉือนเฉพาะในช่วงอัตราความเร็วเฉือนในช่วงต่ำๆ เท่านั้น ($10-500 \text{ s}^{-1}$) ที่อัตราความเร็วเฉือนสูงๆ การบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตกลับลดลง ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากสองปัจจัยด้วยกันได้แก่ ปัจจัยแรกคือที่อัตราความเร็วเฉือนสูงๆ คอมโพสิตหลอมเหลวที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปมีการเกิดลักษณะของรอยฟิโนฉลาม (Sharkskin) ที่ผิว ดังแสดงในภาพที่ 42 นั้นหมายความว่า พลังงานที่ใช้ในการบวมตัวสูญเสียไปกับการเกิดลักษณะดังกล่าว ทำให้การบวมตัวที่หัวขึ้นรูปลดลง ปัจจัยที่สองอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear heating effect) [44, 45]



ภาพที่ 41 แสดงการเกิดรอยฟืนฉลามที่ของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสในการทดสอบสมบัติการไหลที่อัตราความเร็วเฉือนสูง



ภาพที่ 42 ผลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวที่ห้วขึ้นรูป ของเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิตที่อัตราความเร็วเฉือน 200 s⁻¹

ผลของโมโนเมอร์ที่มีต่อการบวมตัวที่ห้วขึ้นรูป สามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 42 พบว่าในกรณีของเอบีเอสบริสุทธิ์ MI-ABS จะมีการบวมตัวที่มากที่สุด จากการศึกษาของกลุ่มวิจัยของ Kumar [46] และกลุ่มวิจัยของ Varghese [47] พบว่าถ้าในระบบมีส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูงจะทำให้เกิดการบวมตัวที่ห้วขึ้นรูปมาก ซึ่งในกรณีนี้ก็คือส่วนของยางบิวตะไดอิน แต่ MI-ABS ที่มีปริมาณยางน้อยที่สุดกลับมีการบวมตัวที่มากที่สุดในทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษา เมื่อพลาสติกหลอมเหลวถูกอัดผ่านห้วขึ้นรูป นั่นคือกรณีที่พลาสติกหลอมเหลวได้รับความเค้นและพลาสติกจะพยายามคลายความเค้นนั้น แต่เมื่อพลาสติกออกมาจากห้วขึ้นรูป ความเค้นที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวจะเป็นสาเหตุให้เกิดการบวมตัว ดังนั้นการที่ MI-ABS มีน้ำหนักโมเลกุลมากที่สุด ทำให้การเกี่ยวพันกันของสายโซ่มีมากและทำให้พลาสติกหลอมเหลวผ่อนคลายความเค้นได้ยากและใช้

เวลานาน ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Characteristic time ที่คำนวณได้จากสมการของ Carreau ดังแสดงในตารางที่ 9 (ตัวอย่าง MI-ABS มีค่ามากที่สุด) ดังนั้นเมื่อผ่านออกมาจากหัวขึ้นรูป จึงมีความเครียดหลงเหลืออยู่มากและเป็นสาเหตุให้เกิดการบวมตัวที่มากของเอบีเอสเกรด MI-ABS

เมื่อเปรียบเทียบกับ HF-ABS และ SI-ABS ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ SI มีปริมาณยางที่มากกว่า จึงทำให้มีการบวมตัวที่มากกว่า และในกรณีของวัสดุคอมโพสิตที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เหมือนกัน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกเอบีเอสมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการบวมตัวที่หัวขึ้นรูปมากกว่าผลของโมโนเมอร์

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าพันธะทุติยภูมิและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบและอะคริไลไนไตรโมโนเมอร์ในเอบีเอสกับผงไม้ รวมทั้งอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของเอบีเอสจะส่งผลอย่างมากต่อความหนืดของเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส ส่วนบิวตะไดอินจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราเครียดเฉือน กล่าวคือเมื่อเพิ่มอัตราเครียดเฉือนให้กับระบบ เอบีเอสที่มีปริมาณบิวตะไดอินสูง จะทำให้ความหนืดของเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสลดลงช้ากว่าเอบีเอสที่มีปริมาณยางบิวตะไดอินน้อย ส่วนการบวมตัวที่หัวขึ้นรูป พบว่าทั้งในเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพสิต จะได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าปริมาณยางบิวตะไดอิน โดยเอบีเอสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จะมีการบวมตัวที่มากกว่าแม้ว่าจะมีปริมาณบิวตะไดอินน้อยกว่าก็ตาม

การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตจะทำให้ได้ข้อมูลซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ขึ้นรูปวัสดุเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล หรือนำไปใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่อไปในอนาคต แต่ในความเป็นจริง นอกจากสมบัติสมบัติการไหลแล้ว ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะต้องคำนึงในเรื่องของสมบัติทางความร้อนของวัสดุอีกด้วย

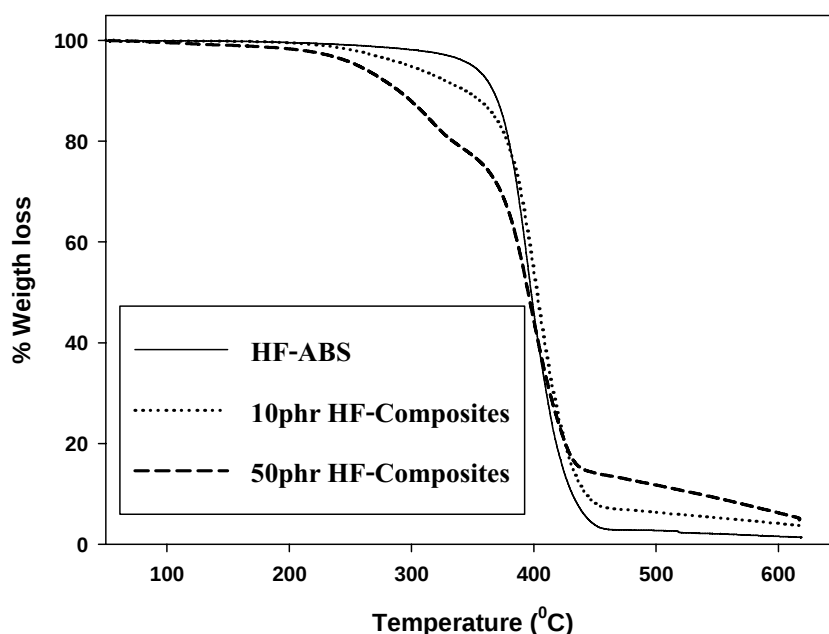
4.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส

การศึกษาในส่วนนี้ประกอบไปกับการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุด้วยเทคนิค TGA และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยเทคนิค DMA ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.3.1 อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส

ผลจากการทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทคนิค TGA แสดงดังภาพที่ 43 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเอบีเอสเกรด HF-ABS และวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับ HF-ABS ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 – 600 องศาเซลเซียส ในกรณีของเอบีเอสบริสุทธิ์ปรากฏให้เห็นการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิประมาณ 380-410 องศาเซลเซียส แต่ในกรณีของวัสดุคอมโพสิตจะปรากฏให้เห็นการสูญเสีย

น้ำหนักสองช่วงอุณหภูมิด้วยกันคือในช่วงอุณหภูมิ 200 – 350 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของผงไม้ยางพารา และการสลายตัวช่วงที่สองคือในช่วงอุณหภูมิ 380 – 410 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการสลายตัวทางความร้อนของเอบีเอส นอกจากนี้การสลายตัวทางความร้อนของเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS และ SI-ABS แสดงลักษณะที่เหมือนกันกับ HF-ABS ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก



ภาพที่ 43 แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด HF

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์เกรดต่างๆและวัสดุคอมโพสิตแสดงดังในตารางที่ 10 พบว่าการเติมผงไม้ในปริมาณน้อย (10phr) ใน MI-ABS และ SI-ABS ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัวของเอบีเอส แต่สำหรับในกรณีของ HF-ABS ที่มีการเติมผงไม้ในปริมาณต่ำ พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการสลายตัวของเอบีเอสอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการที่ HF-ABS มีปริมาณอะคริโลไนไตรน้อย จึงมีโอกาที่จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกับสารคู่ควบมีน้อย ทำให้สารคู่ควบเกิดการรวมตัวกันเองกลายเป็นพอลิไซลอคเซน ประกอบกับในกระบวนการการสลายตัวของผงไม้และพลาสติกจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้นซึ่งจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิไซลอคเซน ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับวัสดุ [48, 49]

ตารางที่ 10 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิต

พลาสติกเอบีเอส เกรดต่างๆ	อุณหภูมิการสลายตัว (t_d , องศาเซลเซียส)		
	เอบีเอสบริสุทธิ์	วัสดุคอมโพสิต (ผงไม้ 9.1%)	วัสดุคอมโพสิต (ผงไม้ 33.3%)
HF-ABS	395.0	399.6	393.7
MI-ABS	393.3	392.0	393.8
SI-ABS	397.3	396.9	393.5

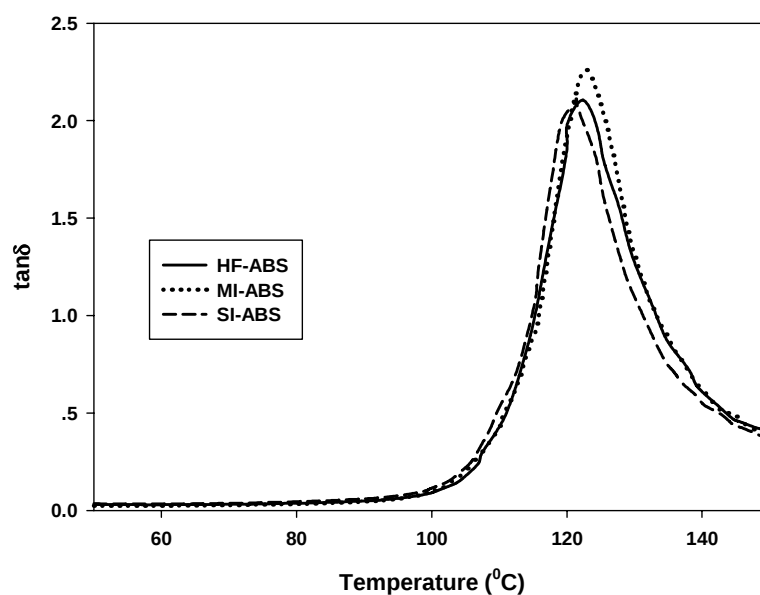
สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมผงไม้ในปริมาณสูง (50 phr) จากตารางพบว่า วัสดุคอมโพสิตจากพลาสติกเอบีเอสทุกเกรดมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเติมผงไม้มากขึ้นทำให้สัดส่วนของพลาสติกเอบีเอสลดลง ทำให้ผลของปริมาณองค์ประกอบโมโนเมอร์ต่อการสลายตัวของพลาสติกลดลง

4.3.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส

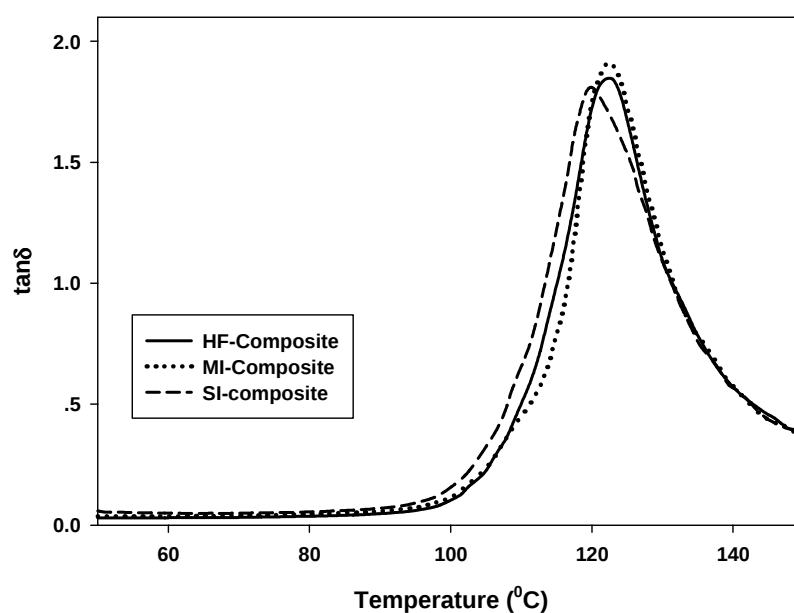
ในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุจะใช้เทคนิค DMA โดยผลการทดสอบจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่า $\tan\delta$ ดังแสดงในภาพที่ 44 และ 45 ซึ่งค่า $\tan\delta$ จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Storage modulus (E') และ Loss modulus (E'') ดังสมการต่อไปนี้

$$\tan\delta = E'' / E' \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

ค่า E'' บ่งบอกถึงการตอบสนองต่อแรงภายนอกแบบของไหล ส่วน E' แทนการตอบสนองต่อแรงภายนอกแบบของแข็ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 – 100 องศาเซลเซียส ค่า $\tan\delta$ มีค่าน้อยแสดงว่า $E'' > E'$ นั่นคือการตอบสนองของวัสดุมีการตอบสนองแบบของแข็งมากกว่า แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่า $\tan\delta$ มีค่าเพิ่มขึ้นและปรากฏเป็นพีคขึ้น หมายความว่า ณ ที่อุณหภูมินั้นการตอบสนองต่อแรงภายนอกของชิ้นงานตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการตอบสนองแบบของแข็งไปเป็นการตอบสนองต่อแรงแบบของไหล ซึ่งที่อุณหภูมินั้นก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุนั่นเอง



ภาพที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan\delta$ กับอุณหภูมิของเอบีเอสบริสุทธิ์



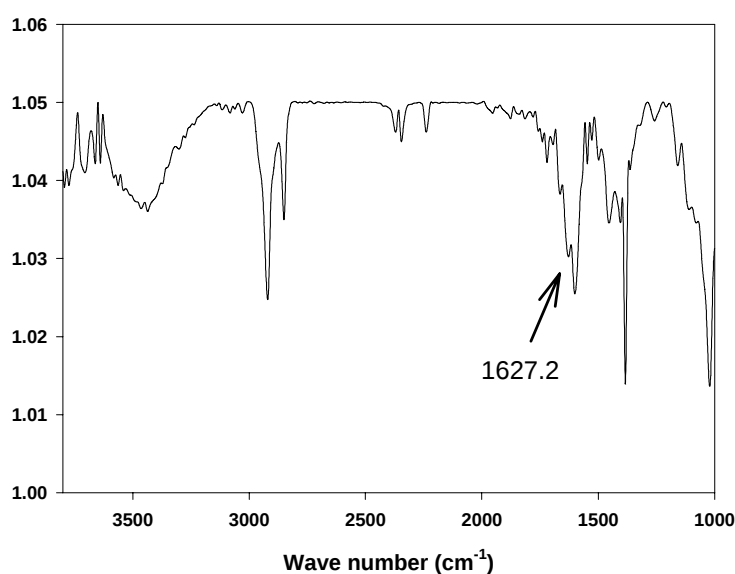
ภาพที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan\delta$ กับอุณหภูมิของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส

ภาพที่ 44 และ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan\delta$ กับอุณหภูมิจากการทดสอบ DMA ของเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสตามลำดับ และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุสรุปไว้ในตารางที่ 11 ในกรณีของเอบีเอสบริสุทธิ์ พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเอบีเอสทั้งสามเกรดไม่แตกต่างกันเลย

ตารางที่ 11 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเอบีเอสและคอมโพลีท

ชนิดเอบีเอส	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส)	
	พลาสติกเอบีเอส	คอมโพลีท
HF-ABS	122.4	123.0
MI-ABS	122.9	122.5
SI-ABS	121.4	120.5

สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุคอมโพลีทพบว่าไม่แตกต่างไปจากพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวคล้ายกับวัสดุคอมโพลีทในหลายๆระบบ [50, 51] อันที่จริงการเติมผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคลือบชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเกิดการเชื่อมโยงกับพลาสติกเอบีเอสด้วยพันธะโคเวเลนต์ดังกลไกในภาพที่ 24 ซึ่งการเกิดการเชื่อมโยดังกล่าวจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ซึ่งวัสดุคอมโพลีทน่าจะปรากฏอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่สูงกว่าเอบีเอสบริสุทธิ์ แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพลีทพบว่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเติมสารเคลือบในปริมาณน้อย ทำให้ระดับการเชื่อมโยงของเอบีเอสกับผงไม้มีน้อย การเชื่อมโยดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งอะคริโลไนไตร โดยจะเกิดเป็นพันธะ $-C=N$ ขึ้น และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จะปรากฏสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ 1620 cm^{-1} และจากการวิเคราะห์ด้วย FTIR ดังแสดงในภาพที่ 46 พบว่าเกิดฟิวดังกล่าวขึ้นแต่ปรากฏสัญญาณที่อ่อนมาก



ภาพที่ 46 แสดงผลการวิเคราะห์วัสดุคอมโพลีทของผงไม้กับ MI-ABS ด้วยเทคนิค FTIR

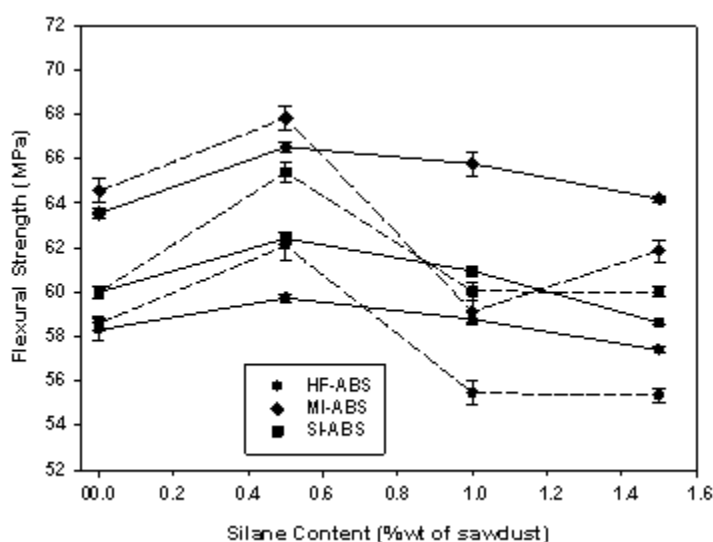
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเติมสารคู่ควบในปริมาณน้อย (0.5 % โดยน้ำหนักของผงไม้) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่เอปียีเอสกับผงไม้ แต่ระดับการเชื่อมโยงนั้นน้อยมากจึงไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียีเอส

4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอปียีเอส

การศึกษสมบัติเชิงกลของเอปียีเอสและวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียีเอสซึ่งประกอบไปด้วย สมบัติแรงดึง (Tensile properties) สมบัติความโค้งงอ (Flexural properties) และ สมบัติความทนต่อแรงกระแทก (Impact property) โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไซเลนชนิดที่ใช้คือ N-2-(aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane พบว่ามีปริมาณการใช้ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.5% ของน้ำหนักผงไม้ แต่นั่นก็เป็นเพียงการทดลองโดยใช้พลาสติกเอปียีเอสเพียงเกรดเดียวเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาปริมาณไซเลนที่เหมาะสมสำหรับเอปียีเอสทุกเกรด

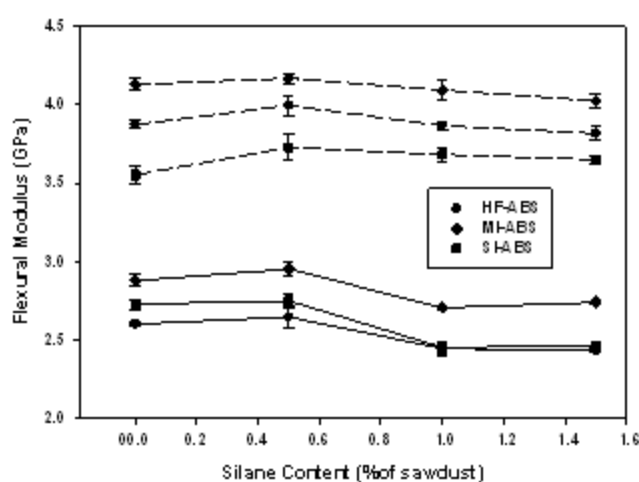
4.4.1 อิทธิพลของปริมาณไซเลนที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบผงไม้กับพลาสติกเอปียีเอส

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณไซเลนต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งปริมาณไซเลนที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0 – 1.5 % ของน้ำหนักผงไม้ ซึ่งผลการทดลองแสดงในภาพที่ 47-49 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบที่มีต่อความต้านการโค้งงอสูงสุด (flexural strength) โมดูลัสโค้งงอ (flexural modulus) ความต้านแรงดึง (tensile strength) และโมดูลัสแรงดึง (tensile modulus) ของวัสดุคอมโพสิตตามลำดับ

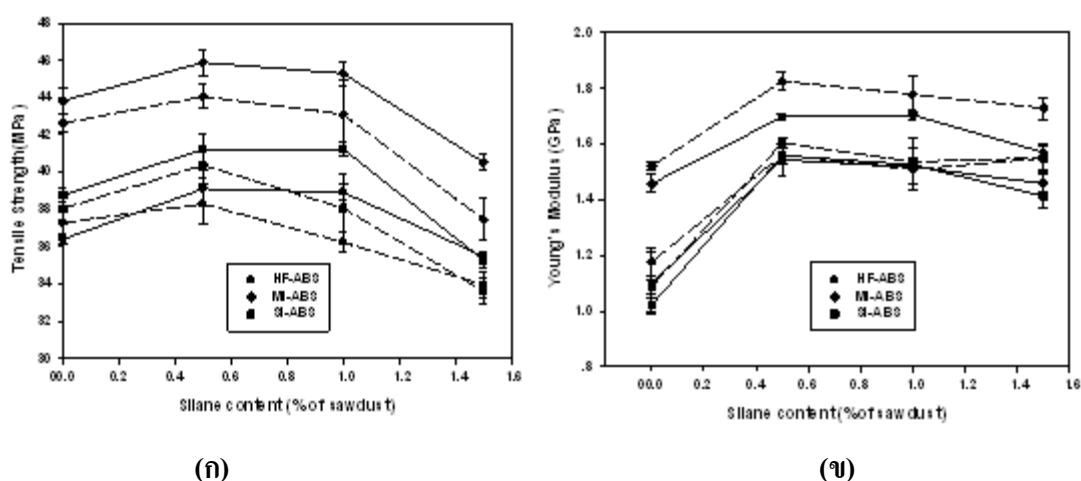


ภาพที่ 47 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อค่าความต้านการโค้งงอสูงสุดของวัสดุคอมโพสิต โดยที่เส้นทึบและเส้นประแสดงวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณซีลี้อย 9.1% (10 phr) และ 33.3% (50 phr) ตามลำดับ

จากภาพพบว่าสมบัติดังกล่าวของวัสดุคอมโพสิตทุกสูตรมีค่าสูงสุดที่การใช้สารคู่ควบในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงไม้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[33] การใช้สารคู่ควบชนิดนี้ (N-2-(aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane) สำหรับวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับพลาสติกเอบีเอส มีปริมาณการใช้สูงสุดอยู่ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผงไม้ เนื่องจากที่การใช้สารคู่ควบในปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลทำให้เกิดการรวมตัวกันเองของสารคู่ควบแล้วเกิดเป็นเฟสของพอลิไซลอกเซน (polysiloxane) ขึ้นไปแทรกระหว่างเฟสของเอบีเอสกับผงไม้ ทำให้การยึดเหนี่ยวของผงไม้กับเอบีเอสลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเหล่านี้ลดลง

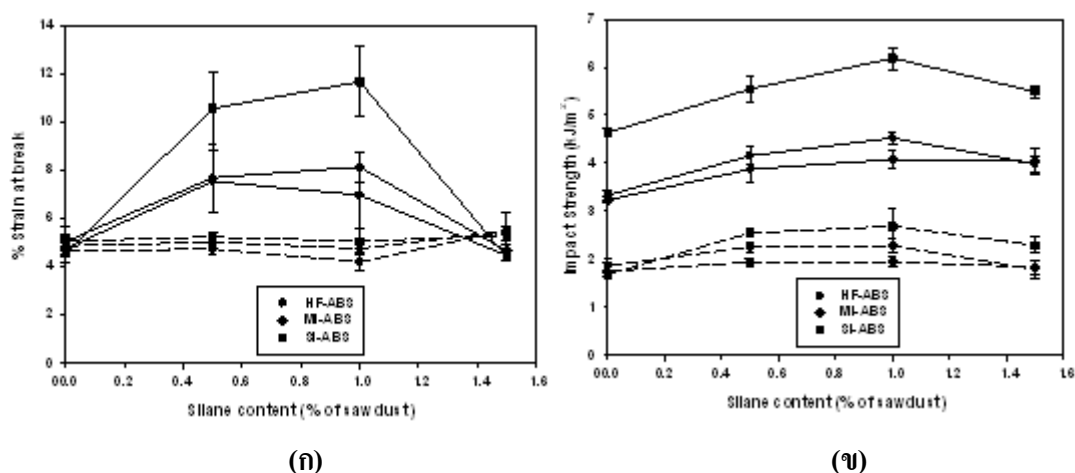


ภาพที่ 48 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อค่ามอดูลัสโค้งงอของวัสดุคอมโพสิต โดยที่เส้นทึบและเส้นประแสดงวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อย 9.1% (10 phr) และ 33.3% (50 phr) ตามลำดับ



ภาพที่ 49 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด และ (ข) ค่ามอดูลัสแรงดึง โดยที่เส้นทึบและเส้นประแสดงคอมโพสิตที่มีปริมาณขี้เลื่อย 9.1% (10 phr) และ 33.3% (50 phr) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในกรณีของค่าเปอร์เซ็นต์ยึดตัว ณ จุดขาด (% strain at break) และค่าความต้านแรงกระแทก (Impact Strength) ของวัสดุของโพลีทกกลับมีค่าสูงสุดที่การใช้ปริมาณสารคู่ควบ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงไม้ ดังแสดงในภาพที่ 50 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขณะวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงกระแทก การที่มีพอลิไซลอคเซนนั้นจะทำให้การเลื่อนผ่านของสายโซ่พอลิเมอร์ง่ายขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความเหนียวมากขึ้น จึงยึดตัวเมื่อได้รับแรงดึงและทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่ที่การใช้สารคู่ควบที่ปริมาณมากที่สุด (1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงไม้) พบว่าสมบัติดังกล่าวมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากการเกิดเป็นเฟสของพอลิไซลอคเซนที่มากขึ้น ทำให้การยึดเหนี่ยวของผงไม้กับเอปียเอสลดลงอย่างมากและเกิดจุดบกพร่องที่มากขึ้นภายในชิ้นงาน



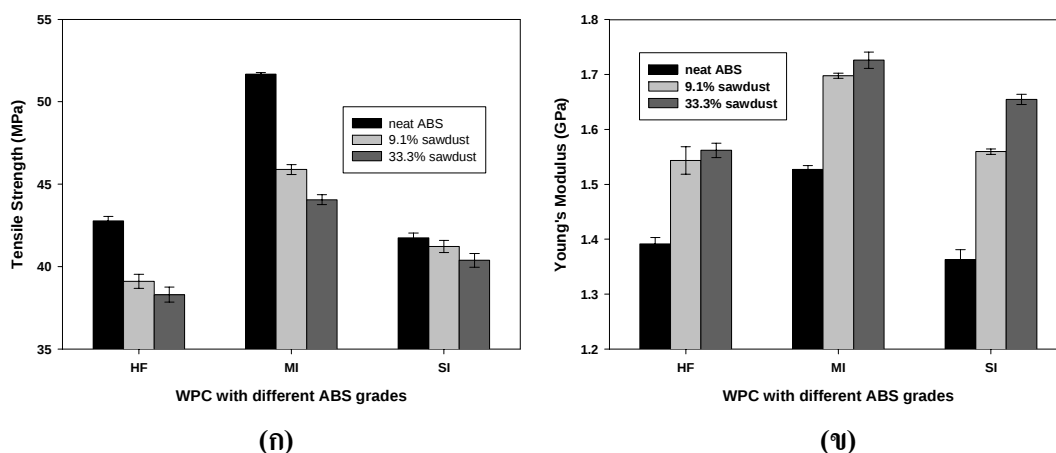
ภาพที่ 50 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) เปอร์เซ็นต์ยึดตัว ณ จุดขาด (ข) ความต้านแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต โดยที่เส้นทึบและเส้นประแสดงวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณซีลีเยอ 9.1% (10 phr) และ 33.3% (50 phr) ตามลำดับ

ดังนั้นในการศึกษาอิทธิพลของโคโมโนเมอร์ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในหัวข้อต่อไปจะใช้วัสดุคอมโพสิตที่ใช้ปริมาณไซเลน 0.5% ของน้ำหนักผงไม้

4.4.2 อิทธิพลของปริมาณโคโมโนเมอร์ในเอปียเอสต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอปียเอส

จากภาพที่ 51 แสดงค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และมอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของเอปียเอสและวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอปียเอส ในกรณีของเอปียเอสบริสุทธิ์พบว่า เอปียเอสเกรด MIABS มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสแรงดึงมากที่สุด เนื่องจากการที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบกับการที่มีปริมาณยางบิวตะไดอินต่ำโดยความแข็งแรงของเอปียเอสจะแปรผกผันกับปริมาณยางบิวตะไดอิน [15, 16] และด้วยเหตุนี้จึงทำให้เอปียเอสเกรด MI-ABS มีค่า

ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมากที่สุดและในทางกลับกัน SI-ABS มีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสแรงดึงต่ำที่สุด



ภาพที่ 51 แสดง (ก) ความต้านแรงดึงสูงสุด และ (ข) มอดุลัสแรงดึงของพลาสติกเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิต

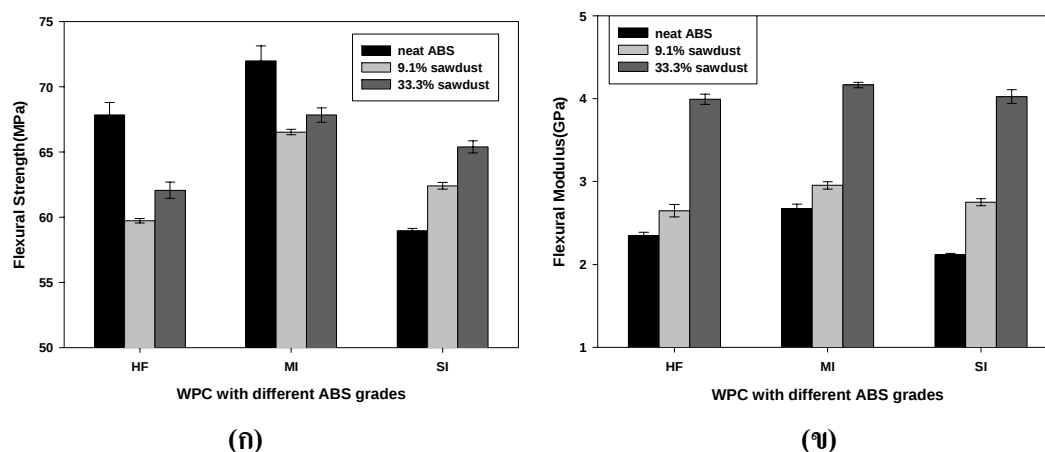
ในกรณีของวัสดุคอมโพสิตค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเอบีเอสบริสุทธิ์ ทั้งนี้เป็นเพราะในการขึ้นรูปชิ้นงานจากการฉีด พบว่าจะเกิดจุดบกพร่อง (Defect) ในชิ้นงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นั่นคือฟองอากาศ (Void) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุของความเข้ากันได้ยากของผงไม้กับเอบีเอส และถึงแม้จะมีการเติมสารตัวควบเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของเฟสทั้งสอง แต่ก็มีข้อจำกัดในการเติมสารดังกล่าวทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างผงไม้กับเอบีเอสในระดับต่ำ ดังแสดงให้เห็นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ดังภาพที่ 46 การเกิดฟองอากาศดังกล่าวและเป็นผลทำให้เกิดการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอส

สำหรับค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสพบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสทุกตัวอย่างจะมีค่ามอดุลัสที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเอบีเอสบริสุทธิ์และเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผงไม้ เนื่องจากการเติมผงไม้ซึ่งเป็นเฟสที่มีมอดุลัสสูงกว่าในพลาสติกดังแสดงในตารางที่ 12 ทำให้มอดุลัสโดยรวมของวัสดุคอมโพสิตนั้นสูงกว่าพลาสติกบริสุทธิ์

ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างเอบีเอสและไม้ยางพารา

สมบัติ	พลาสติกเอบีเอส			ไม้ยางพารา [52]
	HF-ABS	MI-ABS	SI-ABS	
Tensile modulus (GPa)	1.39	1.53	1.36	2.07
Flexural modulus (GPa)	2.35	2.67	2.12	7.92
Tensile strength (MPa)	42.8	51.7	41.7	49.6
Flexural strength (MPa)	67.8	72.0	59.0	84.6

นอกจากนี้ในการทดสอบสมบัติการโค้งงอ พบว่าค่ามอดุลัสโค้งงอและค่าความทนต่อการโค้งงอสูงสุดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีของมอดุลัสแรงดึงและความทนต่อแรงดึงสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 52 แสดง (ก) ความทนต่อการโค้งงอสูงสุด และ (ข) มอดุลัสโค้งงอ ของพลาสติกเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิตซึ่งอาจจะอธิบายได้ด้วยกฎการผสม [53] ดังสมการที่ 4.1

สำหรับผลของโมโนเมอร์ต่อค่ามอดุลัสแรงดึง มอดุลัสโค้งงอ ความทนต่อแรงดึงสูงสุด และความทนต่อการโค้งงอสูงสุดสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการผสม [53] ดังสมการต่อไปนี้

$$E_c = E_m V_s + E_p V_p \quad (\text{สมการที่ 4.2})$$

เมื่อ E_c คือค่ามอดุลัสหรือค่าความแข็งแรงของคอมโพสิต

E_m คือค่ามอดุลัสหรือความแข็งแรงของสารเสริมแรง (ผงไม้)

E_p คือ ค่ามอดุลัสหรือความแข็งแรงของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (เอบีเอส)

V_s คือสัดส่วนโดยมวลของสารเสริมแรง

V_p คือสัดส่วนโดยมวลของพอลิเมอร์เมทริกซ์

และเมื่อแทนค่ามอดูลัสและความแข็งแรงจากตารางที่ 11 ค่ามอดูลัสแรงดึง มอดูลัสโค้งงอ ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและความทนต่อการโค้งงอสูงสุด ที่คำนวณได้จากกฎการผสม แสดงดังใน ตารางที่ 13 และ 14

ตารางที่ 13 แสดงค่ามอดูลัสแรงดึง มอดูลัสโค้งงอ ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและความทนต่อการโค้งงอสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสที่ปริมาณการเติมผงไม้ 10 phr

สมบัติ	วัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสเกรดต่างๆ					
	HF-ABS		MI-ABS		SI-ABS	
	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี
Tensile modulus (GPa)	1.54	1.45	1.70	1.58	1.56	1.43
Flexural modulus (GPa)	2.65	2.86	2.95	3.15	2.75	2.65
Tensile strength (MPa)	39.1	43.5	45.9	51.6	41.2	42.5
Flexural strength (MPa)	59.7	69.4	66.5	73.2	62.4	61.4

ตารางที่ 14 แสดงค่ามอดูลัสแรงดึง มอดูลัสโค้งงอ ความทนต่อแรงดึงสูงสุดและความทนต่อการโค้งงอสูงสุดของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสที่ปริมาณการเติมผงไม้ 50 phr

สมบัติ	วัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสเกรดต่างๆ					
	HF-ABS		MI-ABS		SI-ABS	
	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี
Tensile modulus (GPa)	1.56	1.61	1.73	1.71	1.65	1.59
Flexural modulus (GPa)	4.00	4.18	4.17	4.40	4.03	4.03
Tensile strength (MPa)	38.3	45.0	44.1	51.0	40.4	44.3
Flexural strength (MPa)	62.1	69.4	67.8	73.2	65.4	61.4

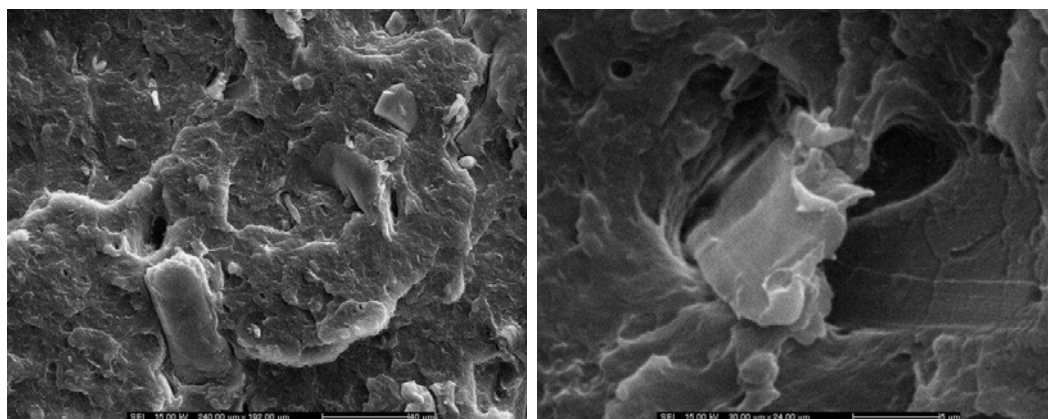
โดยการเปรียบเทียบค่าของสมบัติเชิงกลเหล่านี้สามารถแบ่งเป็นการเปรียบเทียบได้สองกรณีซึ่งก็คือ เปรียบเทียบกรณีการใช้เอปียเอสที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกันแต่มีปริมาณอะคริโลไนไตรต่างกัน (เปรียบเทียบระหว่างวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสเกรด HF-ABS และ SI-ABS) ส่วนกรณีที่สองคือการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุกรณีที่ใช้เอปียเอสที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรเท่ากันแต่น้ำหนักโมเลกุลต่างกัน (เปรียบเทียบระหว่างวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสเกรด MI-ABS และ SI-ABS)

การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS และ SI-ABS โดยเปรียบเทียบในรูปของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้จากกฎการผสมดังแสดงในตารางต่อไปนี้

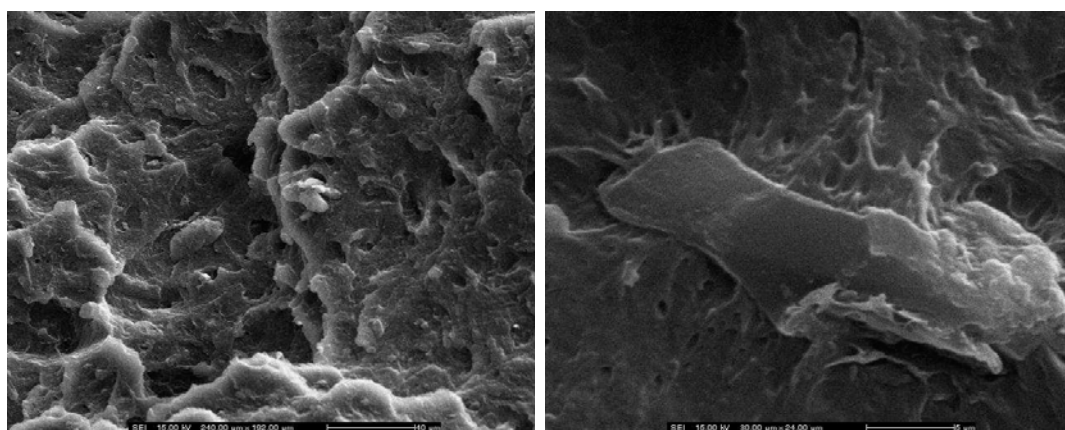
ตารางที่ 15 แสดงค่าความแตกต่างของสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากกฎการผสม ของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS

สมบัติ	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี สำหรับวัสดุคอมโพสิต ของผงไม้กับเอบีเอส			
	ผงไม้ 10 phr		ผงไม้ 50 phr	
	HF-ABS	SI-ABS	HF-ABS	SI-ABS
Tensile modulus (GPa)	+6.21	+9.09	-3.11	+3.77
Flexural modulus (GPa)	-7.34	+3.77	-4.31	0.00
Tensile strength (MPa)	-10.11	-3.06	-14.89	-8.80
Flexural strength (MPa)	-13.98	+1.63	-10.52	+6.51

จากตารางที่ 15 พบว่าสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด ความทนต่อการโค้งงอสูงสุด มอดูลัสแรงดึงและมอดูลัสโค้งงอของ วัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด SI-ABS มีค่าความแตกต่างจากทฤษฎีในเชิงบวกมากกว่าคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ทั้งในกรณีการเติมผงไม้ในปริมาณน้อย (10 phr) และ ในปริมาณมาก (50 phr) ทั้งนี้เป็นเพราะผลของปริมาณอะคริโลไนไตร ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับสารคู่ควบไซเลน เนื่องจาก SI-ABS มีปริมาณอะคริโลไนไตรที่มากกว่าจึงทำให้ระดับการเกิดการเชื่อมโยงกับสารคู่ควบไซเลนที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคผงไม้สูงกว่า ทำให้เอบีเอสเกรด SI-ABS มีการเข้ากันได้และการเกาะยึดบนผิวของผงไม้ได้ดีกว่าเอบีเอสเกรด HF-ABS ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในภาพที่ 53 และ 54



ภาพที่ 53 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุคอมโพสิตของไม้กับเอปียูเรท HF-ABS ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และ 1500 เท่า (ขวา)



ภาพที่ 54 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุคอมโพสิตของไม้กับเอปียูเรท SI-ABS ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และ 1500 เท่า (ขวา)

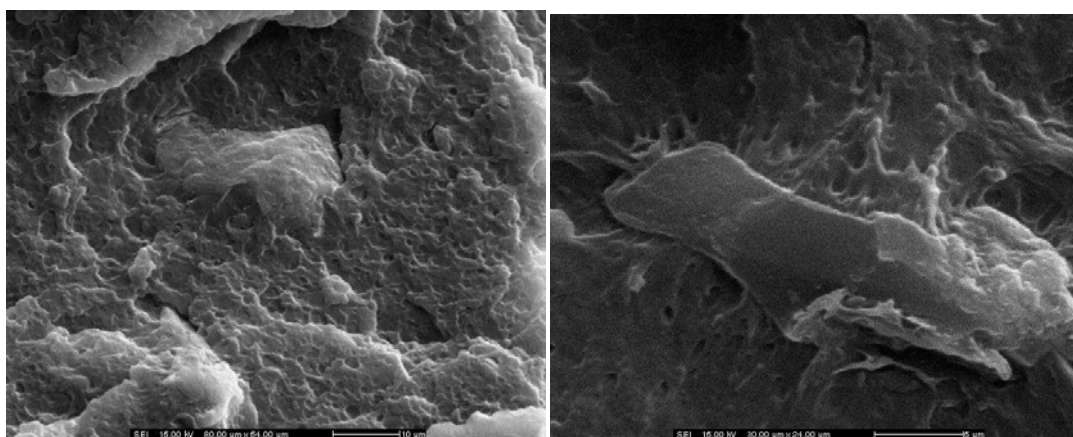
จากภาพที่ 53 และ 54 เห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียูเรท HF-ABS ปรากฏให้เห็นช่องว่าง (Void) ระหว่างเฟสของผงไม้กับเอปียูเรทซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่แย่ ซึ่งตรงกันข้ามกับในกรณีของคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียูเรท SI-ABS โดยมีการยึดเกาะที่ดีกว่าของผงไม้กับเอปียูเรท

สำหรับการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียูเรทที่ใช้เอปียูเรทที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันแสดงดังในตารางที่ 15 โดยที่ MI-ABS เป็นเอปียูเรทที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่วน SI-ABS เป็นเอปียูเรทที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า

ตารางที่ 16 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากกฎการผสม ของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS

สมบัติ	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี สำหรับวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส			
	ผงไม้ 10 phr		ผงไม้ 50 phr	
	MI-ABS	SI-ABS	MI-ABS	SI-ABS
Tensile modulus (GPa)	+7.59	+9.09	+1.17	+3.77
Flexural modulus (GPa)	-6.35	+3.77	-5.23	0.00
Tensile strength (MPa)	-11.05	-3.06	-13.53	-8.80
Flexural strength (MPa)	-9.15	+1.63	-7.38	+6.51

เนื่องจากความเข้ากันได้ และการยึดเกาะที่ดีของผงไม้กับพลาสติกเอบีเอสขึ้นอยู่กับปริมาณอะครีโลไนไตรเป็นหลัก ดังนั้นสำหรับพลาสติกเอบีเอสทั้งสองเกรดนี้ซึ่งมีปริมาณอะครีโลไนไตรที่เท่าๆกัน จึงแสดงการยึดเกาะที่ดีระหว่างเฟสของผงไม้กับเอบีเอสซึ่งแสดงให้เห็นด้วยภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังในภาพที่ 55

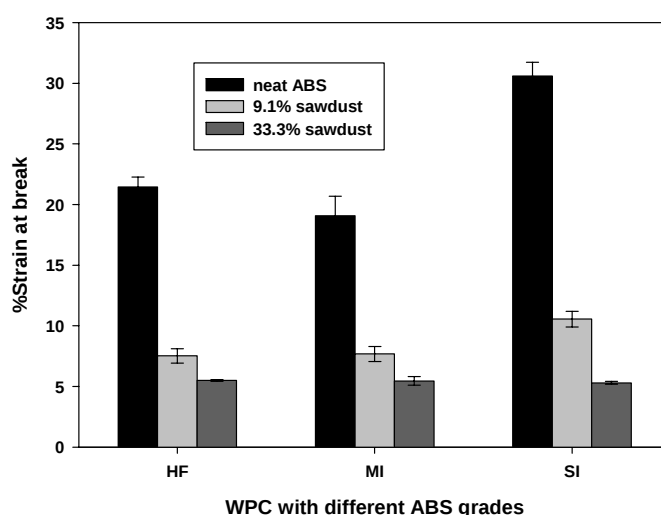


ภาพที่ 55 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด MI-ABS (ซ้าย) และ SI-ABS (ขวา) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จากรูปที่ 55 แม้ว่าวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสทั้งสองเกรดนี้จะแสดงการยึดเกาะที่ดีระหว่างเฟสของผงไม้กับเอบีเอสในลักษณะที่เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสมบัติเชิงกลจากทฤษฎีพบว่า ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด ความทนต่อการโค้งงอสูงสุด โมดูลัสแรงดึงและโมดูลัสโค้งงอของ วัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอบีเอสเกรด MI-ABS มี

ความแตกต่างจากทฤษฎีไปในเชิงลบมากกว่าวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสเกรด SI-ABS ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการที่ MI-ABS มีน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่าและมีปริมาณสไตรีนมากกว่า ทำให้ทั้งพลาสติกเอบีเอส MI-ABS และคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS มีความแข็งแรง (Stiffness) ที่สูงกว่าตัวอย่าง SI-ABS ทำให้ในขั้นตอนการยืดตัว บริเวณผิวของแม่พิมพ์จะเกิดการยืดตัวก่อนแล้วทำให้เกิดการดึงเอาเนื้อพลาสติกจากแกนกลาง สำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นน้อยจะทำให้เนื้อพลาสติกบริเวณแกนกลางมีโอกาสแยกออกจากกันได้มากกว่าเกิดเป็นฟองสุญญากาศขึ้นในปริมาณที่มากกว่า ซึ่งฟองสุญญากาศเหล่านี้เองที่ทำให้สมบัติเชิงกลทั้งในส่วนของการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด ความทนต่อการโค้งงอสูงสุด โมดูลัสแรงดึงและโมดูลัสโค้งงอ ของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS มีค่าต่ำกว่าวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีการผสม

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Percent strain at break) ของพลาสติกเอบีเอส และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส แสดงดังภาพที่ 56 โดยในกรณีของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์ ค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณยาง นั่นคือเอบีเอสเกรดที่มีปริมาณยางมากจะทำให้พลาสติกมีความเหนียวและยืดตัวออกได้มากเมื่อได้รับแรงดึง ดังนั้นเอบีเอสเกรด SI-ABS จึงมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมากที่สุด

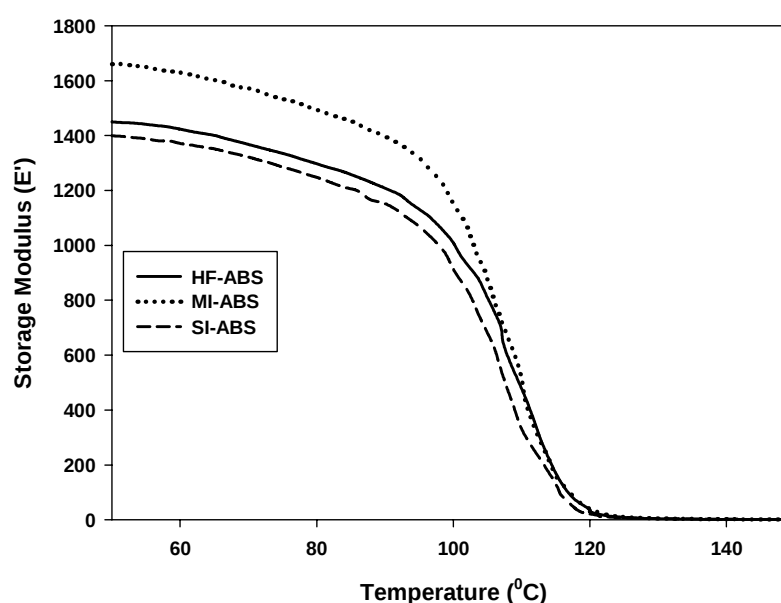


ภาพที่ 56 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอส

ในกรณีของวัสดุคอมโพสิตจะพบว่าค่าการยืดตัวของวัสดุนั้นมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากการเติมผงไม้ลงไปซึ่งเป็นการลดปริมาณเฟสที่มีความเหนียว (เอบีเอส) ประกอบกับฟองสุญญากาศ

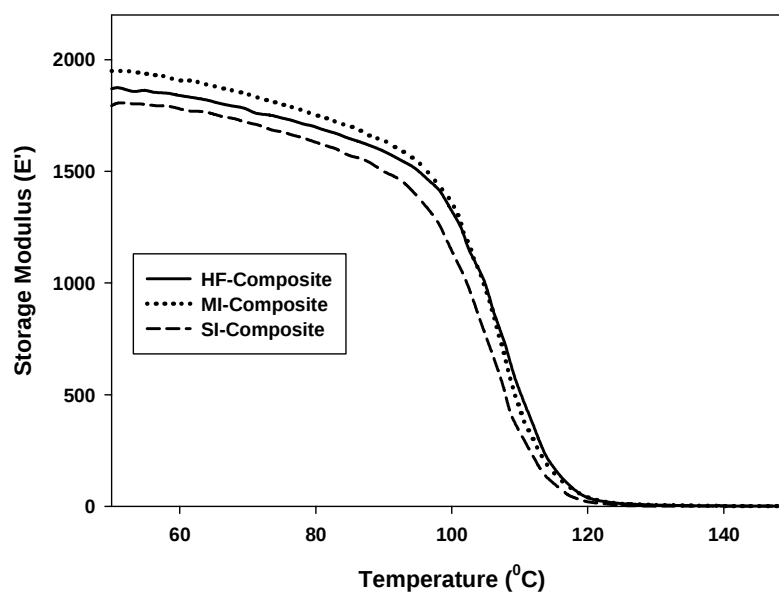
ที่เกิดจากความไม่เข้ากันระหว่างผงไม้กับเอบีเอส ส่งผลให้ความเหนียวของวัสดุลดลง เมื่อพิจารณาการเติมผงไม้ในปริมาณน้อย (ร้อยละ 9.1) อิทธิพลของบิวตะไดอินยังคงส่งผลต่อวัสดุคอมโพสิต นั่นคือ วัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณอย่างมาก ก็จะมีค่าความเหนียวมากกว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณเล็กน้อย แต่ที่ระดับการเติมผงไม้ในปริมาณมาก (ร้อยละ 33.3) อิทธิพลของสัคส่วนโคโมโนเมอร์ส่งผลน้อยมากต่อความเหนียวของวัสดุ

ภาพที่ 57 แสดงค่า Storage modulus จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA ของเอบีเอสบริสุทธิ์และวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอบีเอสตามลำดับ สำหรับค่า Storage modulus ของเอบีเอสบริสุทธิ์ พบว่าเอบีเอสเกรด MI-ABS มีค่ามอดุลัส (Storage modulus) สูงที่สุด ส่วน SI-ABS จะมีมอดุลัสต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกล (มอดุลัสแรงดึงและมอดุลัสโค้งงอ) ทั้งนี้เป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงและประกอบกับการที่มีปริมาณบิวตะไดอินต่ำ



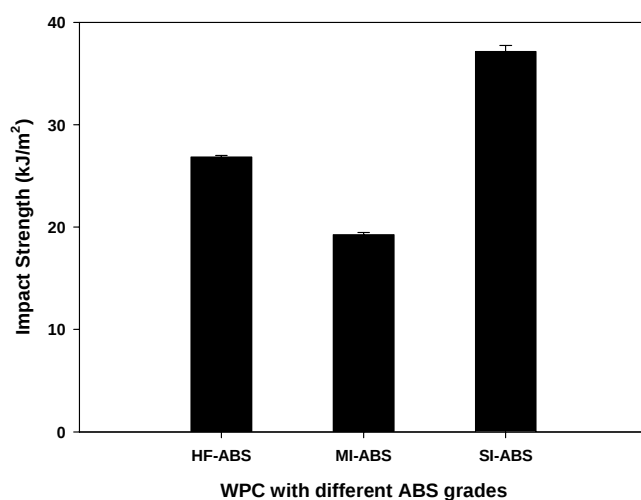
ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของเอบีเอสบริสุทธิ์

ส่วนในกรณีของวัสดุคอมโพสิตจะเห็นว่าการเติมผงไม้ลงไปในเอบีเอสจะทำให้ค่ามอดุลัสของวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเติมผงไม้ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งลงไปในพลาสติกทำให้ความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้นผลดังกล่าวสอดคล้องกับ มอดุลัสแรงดึง และมอดุลัสโค้งงอ

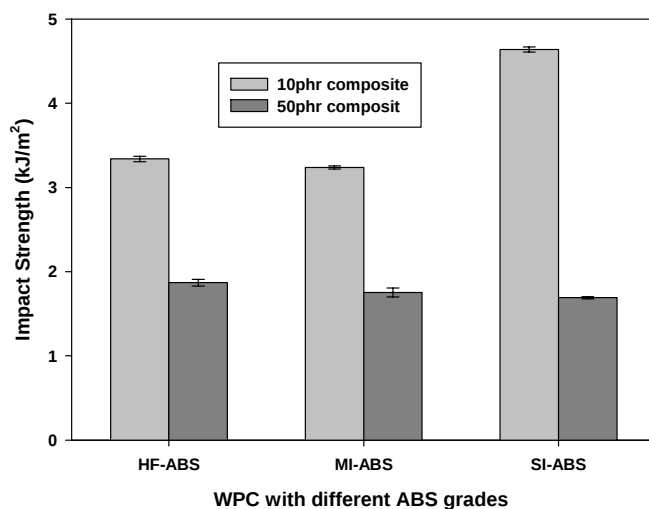


ภาพที่ 58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้อัดกับเอบีเอส

ในส่วนของสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของเอบีเอสมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเหนียวของวัสดุ ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้จึงมีแนวโน้มเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด ซึ่งแสดงดังภาพที่ 59 โดยความทนต่อแรงกระแทกของเอบีเอสบริสุทธิ์ได้รับอิทธิพลจากปริมาณยางโดยตรง เอบีเอสเกรด SI-ABS มีความทนต่อแรงกระแทกมากที่สุดแต่ MI-ABS จะมีความทนทานต่อแรงกระแทกน้อยที่สุดตามปริมาณยาง



ภาพที่ 59 แสดงความทนต่อแรงกระแทกของพลาสติกเอบีเอสบริสุทธิ์



ภาพที่ 60 แสดงความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต

ความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอสแสดงในภาพที่ 60 พบว่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเอบีเอสบริสุทธิ์ เนื่องมาจากการลดปริมาณของเฟสพลาสติกทำให้ความเหนียวของวัสดุลดลง ทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น โดยที่การเติมพวงไม้ 10 phr พบว่าบิวตะไดอินยังคงส่งผลต่อความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตเช่นเดียวกับเอบีเอสบริสุทธิ์ แต่สำหรับการเติมพวงไม้ 50 phr พบว่าอิทธิพลของปริมาณโคโมโนเมอร์ไม่ส่งผลต่อความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับพลาสติกเอบีเอสเลย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สมบัติการไหลของวัสดุคอมโพสิตเอปียูเรเทนกับผงไม้

จากการศึกษาพบว่าปริมาณอะครีโลไนไตรมีอิทธิพลต่อสมบัติการไหลของวัสดุนั้นคือทำให้ความหนืดของพลาสติกเอปียูเรเทนและวัสดุคอมโพสิตหลอมเหลวมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณอะครีโลไนไตรมากขึ้น ในกรณีของบิวตะไดอินส่งผลต่อสมบัติ Shear thinning ของเอปียูเรเทนและวัสดุคอมโพสิต กล่าวคือการทำบิวตะไดอินมากทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงอย่างรวดเร็วตามอัตราความเร็วที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นจากค่ากราฟกำลัง และในส่วนของการศึกษาการบวมตัวที่หวั่นรูป แม้ว่าบิวตะไดอินจะเป็นเฟสที่ทำให้เกิดการบวมตัวที่มาก แต่กลับพบว่าอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของเอปียูเรเทนมีผลมากกว่าแม้ว่าจะเป็นเอปียูเรเทนที่มีปริมาณอย่างน้อยที่สุดก็ตาม

5.2 สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตเอปียูเรเทนกับผงไม้

ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตพบว่าเฟสของพอลิไซลอกเซนที่เกิดขึ้นจากสารคู่ควบในวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับเอปียูเรเทนที่มีปริมาณอะครีโลไนไตรน้อยทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณอะครีโลไนไตรไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของคอมโพสิตที่การเติมผงไม้ในปริมาณมาก นอกจากนี้การศึกษาดูอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วพบว่าทั้งในเอปียูเรเทนและคอมโพสิตไม่ปรากฏให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากการทดสอบด้วยเทคนิค DMA

5.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอปียูเรเทน

วัสดุคอมโพสิตผงไม้กับเอปียูเรเทนที่มีปริมาณอะครีโลไนไตรมากจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าทั้งความแข็งแรงและมอดุลัสเนื่องจากอะครีโลไนไตรมีส่วนสำคัญในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบทำให้เกิดการเข้ากันได้ดีระหว่างเฟสพลาสติกกับผงไม้ โดยปริมาณสารคู่ควบ N-2-(aminoethyl)-3-(aminopropyl)trimethoxysilane ที่เหมาะสมได้แก่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงไม้

ส่วนยางบิวตะไดอินจะเป็นส่วนที่สำคัญในการรับแรงกระแทกของเอปียูเรเทนแต่ในกรณีของคอมโพสิตพบว่าความแตกต่างของปริมาณยางบิวตะไดอินในวัสดุคอมโพสิตไม่ส่งอิทธิพลต่อ

ความทนทานต่อแรงกระทำของวัสดุคอมโพสิต อีกทั้งยังมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเอปียเอส
บริสุทธิ์

บรรณานุกรม

1. A.K.Bledzki, J.Gassan, and S.Theis, "Wood-Filled Thermoplastic Composite," **Mechanics of Composite Materials** 34 (1998):
2. A.K.Bledzki, M.Letman, A.Viksne, and L.Renceb, "A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites," **Composites: Part A** 36 (2005): 789-797.
3. B.Kamal, P.Shusheng, and P.M. “, "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)," **Composites: Part B** (2007):
4. D.Geum-Hyun, L.Sun-Young, K.In-Aeh, and K.Young-To, "Thermal behavior of liquefied wood polymer composites (LWPC)," **Composite Structures** 68 (2005): 103-108.
5. D.Livia, J.Tünde, S.Zoltán, N.Gábor, M.János, and P.Béla, "Wood flour filled PP composites: compatibilization and adhesion," **Composites Science and Technology** 67 (2007): 2838-2846.
6. G.K.Ryan, Creep Behavior of a wood-polypropylene composite, 2005, Washington State University, 96.
7. K.Richard, Z.S.Audrey, H.Scott, and G.Wolfgang, "Mechanical properties of wetlaid lyocell and hybrid fiber-reinforced composites with polypropylene," **Composites: Part A** 39 (2008): 470-477.
8. M.Fatih and K.Ayse, "Determination of thermal properties and morphology of eucalyptus wood residue filled high density polyethylene composites," **International Journal of Molecular Sciences** 9 (2008): 107-119.
9. Y.T.Zheng, D.R.Cao, D.S.Wang, and J.J.Chen, " Study on the interface modification of bagasse fibre and the mechanical properties of its composite with PVC," **Composites:Part A** 38 (2007): 20-25.
10. Z.Yongsheng, W.Kejian, Z.Fuhua, X.Ping, and J.Mingyin, "Properties of poly(vinyl chloride)/wood flour/montmorillonite composites: Effects of coupling agents and layered silicate," **Polymer Degradation and Stability** 91 (2006): 2874-2883.

11. I.I.Rubin, Handbook of plastic materials and technology Vol. John Wiley & Sons, (New York, 1990).
12. J.C.Salamone, Polymer Materials Encyclopedia, (New York: CRC Press, 1996).
13. J.Scheirs and D.Priddy, Modern styrenic polymers, (West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003), 757.
14. I.-J. Kim, O.-S. Kwon, J.B. Park, and H. Joo, "Synthesis and characterization of ABS/silica hybrid nanocomposites," **Current Applied Physics** 6S1 (2006): e43-e47.
15. H.Kim, H.Keskkula, and D.R.Paul, "Toughening of SAN copolymer by an SAN emulsion grafted rubber," **Polymer** 31 (1990): 869-876.
16. H.Kim, H.Keskkula, and D.R.Paul, "Effect of acrylonitrile content on the toughness of ABS materials," **Polymer** 32 (1991): 1447-1455.
17. K.H.Gardner and J.Blackwel, "Structure of Native Cellulose," **Biopolymers** 13 (1974): 1975-2001.
18. D.N.S. Hon and N. Shiraishi, Wood and cellulosic chemistry, (New York: Marcel Dekker INC., 2001).
19. A.K.Bledzki and J.Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibers," **Progress in Polymer Science** 24 (1999): 221-274.
20. D.N.S. Hon and N.H. Ou, "Thermoplasticization of wood. I. Benzylation of wood," **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry** 27 (1989): 2457-2482.
21. X.Lu, M.Q.Zhang, M.Z.Rong, G.Shi, and G.C.Yang, "All-plant fiber composites. II: water absorption behavior and biodegradability of unidirectional sisal fiber reinforced benzylated wood," **Polymer Composites** 3 (2004):
22. M.Q.Zhang, M.Z.Rong, and X.Lu, "Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: All-plant fiber composites," **Composites Science and Technology** 65 (2005):
23. C.S.R. Freire, A.J.D. Silvestre, C. Pascoal Neto, M.N. Belgacem, and A. Gandini, "Controlled heterogeneous modification of cellulose fibers with fatty acids: effect of reaction conditions on the extent of esterification and fiber properties," **Journal of Applied Polymer Science** 100 (2006): 1093-1102.

24. G.Chauvelon, L.Saulnie, A.Buleon, J.F.Thibault, C.Gourson, and R.Benhaddou, "Acidic activation of cellulose and its esterification by long-chain fatty acid," **Journal of Applied Polymer Science** 74 (1999): 1933–1940.
25. M. Baiardo, G. Frisoni, M. Scandola, and A. Licciardello, "Surface chemical modification of natural cellulose fibers," **Journal of Applied Polymer Science** 83 (2002): 38–45.
26. P. Jandura, B.V. Kokta, and B. Riedl, "Fibrous long-chain organic acid cellulose esters and their characterization by diffuse reflectance FTIR spectroscopy, solid state CP/MAS ¹³C-NMR, and X-Ray diffraction," **Journal of Applied Polymer Science** 78 (2000): 1354–1365.
27. P.Jandura, B.Ried, and B.V. Kokta, "Thermal degradation behavior of cellulose fibers partially esterified with some long chain organic acids," **Polymer Degradation and Stability** 70 (2000): 387-394.
28. S. Thiebaud and M.E. Borredon, "Solvent-free wood esterification with fatty acid chlorides " **Bioresource Technology** 52 (1995): 169-173.
29. S.Thiebaud, M.E. Borredon, G.Baziard, and F.Senocq, "Properties of wood esterified of wood esterified by fatty-acid chlorides " **Bioresource Technology** 59 (1997): 103-107.
30. V. Tserki, N.E. Zafeiropoulos, F. Simon, and C. Panayiotou, "A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres," **Composites: Part A** 36 (2005): 1110–1118.
31. Z.Dominkovics, L.Danyadi, and B.Pukanszky, "Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites," **Composites: Part A** 38 (2007): 1893–1901.
32. B.T.Astrom, Manufacturing of polymer composites, (London: Chapman & Hall, 1997), 120-125.
33. L.Chotirat, K.Chaochanchaikul, and N.Sombatsompop, "On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile–butadiene–styrene/wood sawdust composites," **International Journal of Adhesion & Adhesives** 27 (2007): 669–678.

34. B.E Tiganis, L.S Burn, P Davis, and A.J. Hill, "Thermal degradation of acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) blends," **Polymer Degradation and Stability** 76 (2002): 425–434.
35. M.W. Chastagner, Slit die rheology of HDPE and ABS based wood plastic composites, 2005, WASHINGTON STATE UNIVERSITY, 96.
36. PerkinElmer Inc. Carpilary Rheometer [online], 1998-2009. Available from [Http://las.perkinelmer.com](http://las.perkinelmer.com).
37. D.Cambell and J.R.White, Polymer characterization (London: Chapman&Hall, 1989), 362.
38. Fungilab. Viscometer [online], 2009. Available from <http://www.fungilab.com/en/prop:Cos/0/1:2:22:23>.
39. Malvern Instruments. Understanding dilute solution viscosity (DSV) [online], 2010. Available from <http://www.malvern.com/LabEng/company/company.htm>.
40. P.Davis, R.A.Grazia, N.Roberto, and V.Nicola, *Process for the preparation of ABS resins*. 1998: United State of America.
41. Direct Industry. Virtual industrial exhibition [online], 2009. Available from <Http://directindustry.com>.
42. P.J. Carreau, D. De Kee, and R.P. Chhabra, Rheology of polymeric systems, (Munich: Hanser publication Inc., 1997), 520.
43. M.Rubinstein and R.H.Colby, Polymer physics, (New York: Oxford University Press Inc., 2003), 440.
44. N. Sombatsompop and W. Chaiwattanapipat, "Temperature distributions of molten polypropylene during injection-molding " **Advances in Polymer Technology** 19 (2000): 79-86.
45. N. Sombatsompop and N.-T. Intawong, "A comparative study on extrudate swell ratio of polystyrene in a capillary rheometer and a single screw extruder," **Polymer Testing** 24 (2005): 948–952.
46. C.R.Kumar, S.V. Nair, K.E. George, Z. Oommen, and S.Thomas, *Blends of nylon/acrylonitrile butadiene rubber: effects of blend ratio, dynamic vulcanization and*

reactive compatibilization on rheology and extrudate morphology, in *Polymer Engineering and Science*. 2003, CBS Interactive Inc.

47. H.Varghese, J.S.Anand, K. Ramamurth, R.Janardhan, S.S.Bhagawan, and S.Thomas, "Melt rheology and morphology of nitrile rubber and ethylene-vinyl acetate copolymer blends," **Polymer plastics technology and engineering** 38 (1999): 319-339.
48. S. Zulfiqar and S. Ahmad, "Thermal degradation of blends of PVAC with polysiloxane-II," **Polymer Degradation and Stability** 71 (2001): 299-304.
49. S.Tiptipakorn, S.Damrongsakkul, S.Ando, K.Hemvichian, and S.Rimdusit, "Thermal degradation behaviors of polybenzoxazine and silicon-containing polyimide blends," **Polymer Degradation and Stability** 92 (2007): 1265-1278.
50. H.Hsich, "Composite rheology- I. Elastomer-filler interaction and its effect on viscosity," **Journal of materials science** 17 (1982): 438-446.
51. R.A.C.Altafim, C.R.Murakami, S.C.Neto, L.C.R.Araújo, and G.O.Chierice, "The effects of fillers on polyurethane resin-based electrical insulators," **Materials Research** 6 (2003): 187-191.
52. S.Chirasatitsin, S.Prasertsan, W.Wisutmethangoon, and B.Kyokong, "Mechanical properties of rubberwood oriented strand lumber (OSL): The effect of strand length," **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 25 (2005): 1047-1055.
53. C. J. R.Verbeek and W. W.Focke, "Modelling the Young's modulus of platelet reinforced thermoplastic sheet composites," **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 33 (2002): 1697-1704.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

องค์ประกอบและสมบัติของพลาสติกเอบีเอส

ก-1 ข้อมูลสมบัติของพลาสติกเอบีเอสจากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน

ตารางที่ 17 แสดงสมบัติของพลาสติกเอบีเอสที่ใช้ในงานวิจัย จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน

เกรด	MFI g/10min	Impact strength (kg-cm/cm)	Tensile strength (kg/cm ²)	Flexural strength (kg/cm ²)	Flexural Modulus (x10 ⁴ kg/cm ²)	Rockwell Hardness	HDT
GA300	30	22	480	670	2.3	112	86
MH1	18	26	530	700	2.3	116	86
SP200	17	36	420	570	2.05	109	84

ก-2 ตัวอย่างการคำนวณหาองค์ประกอบโคโมโนเมอร์

เอบีเอสเกรด HF-ABS จากการทดสอบด้วย Elemental analysis พบว่ามีปริมาณธาตุ

ไนโตรเจนทั้งหมด 5.00% ในตัวอย่าง 1.394 มิลลิกรัม

คิดเป็นน้ำหนักธาตุไนโตรเจน $0.05 \times 1.395 = 0.0697$ มิลลิกรัม

คิดเป็นจำนวนโมลจะได้ โมลไนโตรเจน = มวล ÷ มวลโมเลกุล

มวลโมเลกุลไนโตรเจนเท่ากับ 14 โมลไนโตรเจน = $0.0697 \div 14$

= 0.00498 มิลลิโมล

ใน 1 โมเลกุลของอะซิโตนไไตรมีไนโตรเจน 1 อะตอม ดังนั้น

โมลอะซิโตนไไตร = โมลไนโตรเจน

= 0.00498 มิลลิโมล

มวลโมเลกุลอะซิโตนไไตรเท่ากับ 53

คิดเป็นน้ำหนักอะซิโตนไไตร = $0.00498 \times 53 = 0.26$ มิลลิกรัม

คิดเป็น $(0.26/1.394) \times 100 = 18.9 \%$ โดยน้ำหนักเอบีเอส

น้ำหนักที่เหลือของตัวอย่างเท่ากับ $1.394 - 0.26 = 1.134$ มิลลิกรัม ซึ่งเป็นองค์ประกอบในส่วน of สไตรีนกับบิวตะไดอิน และจากการทดสอบด้วย H-NMR พบว่าสัดส่วนโดยโมลของสไตรีนต่อบิวตะไดอินของ HF-ABS เท่ากับ 1 : 0.25 คิดเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักโมเลกุล (สไตรีน = 104, บิวตะไดอิน = 54) จะได้

$$(1 \times 104) : (0.25 \times 54) = 104 : 13.5$$

ดังนั้น ปริมาณสไตรีนเท่ากับ $\frac{104}{104+13.5} \times 1.134 = 1.00$ มิลลิกรัม

คิดเป็น 71.5 % โดยน้ำหนักของตัวอย่าง

ดังนั้นปริมาณบิวตะไดอินจึงเท่ากับ 0.134 มิลลิกรัม

คิดเป็น 9.5 % โดยน้ำหนักของตัวอย่าง

ภาคผนวก ข

สมบัติการไหล

ข-1 ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary die rheometer

ตารางที่ 18 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของ HF-ABS ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	10982	-	6962	-	4025	-
10	8752	6.35	5605	4.76	3260	1.34
50	3619	14.67	2675	14.26	1964	7.32
100	2304	19.06	1758	15.65	1369	12.9
200	1431	20.01	1107	15.85	896	14
500	749	20.85	581	16.26	476	13.93
1000	441	19.85	351	16.55	285	14.32
1200	384	20.38	306	16.5	250	14.12
1500	328	20.75	259	16.13	213	13.7

ตารางที่ 19 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของ MI-ABS ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	16508	10.79	10107	0.03	6827	-
10	11210	8.82	8030	10.4	5515	2.04
50	4076	24.54	3251	16.33	2578	15.04
100	2557	23.58	2043	19.24	1650	17.89
200	1568	26.47	1254	20.97	1021	19.59
500	791	27.71	642	22.59	527	19.44
1000	475	29.41	376	23.59	313	20.18
1200	422	30.83	326	24.61	270	20.69
1500	-	-	278	26.56	228	21.36

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของ SI-ABS ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	16285	10.49	9510	5.38	6435	-
10	10833	12.19	7451	7.46	5210	1.16
50	4128	20.62	3208	17.74	2526	16
100	2637	23.99	2064	18.18	1661	16.23
200	1665	24.73	1303	20.1	1054	17.97
500	868	24.83	687	20.25	556	18.48
1000	517	23.94	416	20.69	337	20.48
1200	453	23.11	364	20.02	296	17.33
1500	392	23.87	315	19.92	255	17.94

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	12742	25.5	6700	12.44	4250	14.01
10	9786	31.93	5757	19.86	3615	17.27
50	3871	47.75	2815	34.2	2085	24.13
100	2410	49.45	1837	37.61	1439	32.29
200	1472	38.88	1144	46.13	926	36.88
500	757	17.59	590	54.55	489	41.82
1000	455	15.9	352	52.85	291	43.57
1200	400	13.19	312	24.91	255	29.34
1500	348	13.55	263	-	218	21.03

ตารางที่ 22 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	19622	26.02	12607	16.31	7835	6.91
10	13557	35.45	9390	20.44	6041	15.51
50	4621	25.2	3651	37.31	2771	28.11
100	2814	16.98	2247	47.29	1775	31.87
200	1701	16.91	1348	50.91	1085	37.12
500	855	18.36	675	50.74	550	50.11
1000	501	18.38	392	37.93	328	42.22
1200	437	18.49	351	18.89	288	24.17
1500	381	19.74	-	-	246	17.78

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	16990	24.39	10717	16.92	6522	10.83
10	12261	30.14	8158	19.67	4858	11.42
50	4418	49.68	3465	34.53	2482	22.17
100	2717	45.12	2191	44.17	1663	28.88
200	1656	35.49	1349	48.28	1052	32.81
500	861	24.45	682	49.68	540	40.02
1000	523	14.34	405	38.83	328	35.13
1200	461	14.06	359	13.02	288	21.79
1500	414	14.51	315	11.89	246	16.34

ตารางที่ 24 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	16732	5.9	14820	8.41	6125	1.3
10	11257	5.54	10142	14.48	4770	1.25
50	4279	17.21	3987	18.55	2288	3.21
100	2656	24.62	2494	24.45	1474	5.36
200	1599	30.16	1516	29.2	946	6.59
500	795	35.7	759	35.03	503	13.08
1000	496	24.44	453	19.15	311	14.42
1200	444	17.15	409	13.91	285	22.86
1500	331	16.76	353	-	249	26.89

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	26771	10.63	19185	6.36	12722	1.04
10	16771	13.91	12571	9.83	8503	2.91
50	5373	24.53	4485	19.09	3344	7.73
100	3142	28.73	2711	21.95	2054	10.07
200	1823	34.15	1589	26.77	1208	15.41
500	885	43.16	782	32.58	595	36.46
1000	537	18.08	456	32.82	360	38.5
1200	475	12.34	406	13.91	321	29.15
1500	383	11.4	348	10.68	257	28.69

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลการไหลและการบวมตัวของวัสดุคอมโพสิตของผงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr ที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราความเร็วเฉือน (sec^{-1})	180		190		200	
	องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส		องศาเซลเซียส	
	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell	ความหนืด (Pa.s)	%Swell
5	25055	9.94	16357	2.63	10330	1.49
10	16141	12.49	11358	3.01	7353	2.04
50	5523	25	4508	10.4	3243	5.07
100	3230	33.51	2813	17.07	2077	8.95
200	1879	43.1	1692	23.23	1266	13.08
500	943	42.65	842	33.19	635	30.63
1000	582	24.44	498	40.87	388	32.77
1200	523	13.01	431	16.67	348	21.37
1500	435	10.94	341	18.28	299	28.66

ข-2 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆ

ตารางที่ 27 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ HF-ABS ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	m	λ	n	R^2
Cross-williamson	37554.87	-	-	0.311	0.25	0.9987
Power law	-	-	55860	-	0.32	0.9960
Carreau	20267	-	-	0.18	0.28	0.9993
Herschel-Bulkley	-	3.60E-13	73100	-	0.28	0.9944

ตารางที่ 28 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ MI-ABS ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	46920	-	-	0.45	0.25	0.9986
Power law	-	-	53402	-	0.33	0.9980
Carreau	21126.64	-	-	0.2	0.29	0.9998
Herschel-Bulkley	-	162330	8326	-	0.52	0.9754

ตารางที่ 29 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ SI-ABS ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	30331	-	-	0.25	0.26	0.9959
Power law	-	-	50755	-	0.35	0.9973
Carreau	20880.54	-	-	0.2	0.3	0.9980
Herschel-Bulkley	-	102353	33872	-	0.36	0.9851

ตารางที่ 30 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ HF-ABS ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	11941	-	-	0.12	0.30	0.9886
Power law	-	-	22540	-	0.41	0.9860
Carreau	7346	-	-	0.08	0.33	0.9960
Herschel-Bulkley	-	137981	2546	-	0.66	0.9064

ตารางที่ 31 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ MI-ABS ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	27546	-	-	0.36	0.30	0.9969
Power law	-	-	35308	-	0.36	0.9920
Carreau	11504.35	-	-	0.13	0.3	0.9996
Herschel-Bulkley	-	168361	2339	-	0.67	0.9265

ตารางที่ 32 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ SI-ABS ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	16646	-	-	0.13	0.25	0.9989
Power law	-	-	30669	-	0.39	0.9920
Carreau	10532.19	-	-	0.12	0.34	0.9999
Herschel-Bulkley	-	168149	2282	-	0.70	0.9263

ตารางที่ 33 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ HF-ABS ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	6921	-	-	0.08	0.32	0.9956
Power law	-	-	12132	-	0.48	0.9700
Carreau	4134	-	-	0.06	0.34	0.9986
Herschel-Bulkley	-	104598	2589	-	0.63	0.8600

ตารางที่ 34 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ MI-ABS ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	11489	-	-	0.11	0.28	0.9966
Power law	-	-	23182	-	0.39	0.9860
Carreau	7208	-	-	0.08	0.3	0.9998
Herschel-Bulkley	-	130891	2380	-	0.65	0.9074

ตารางที่ 35 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของ SI-ABS ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	12402	-	-	0.12	0.26	0.9963
Power law	-	-	20511	-	0.42	0.9860
Carreau	6794	-	-	0.08	0.32	0.9985
Herschel-Bulkley	-	135733	1862	-	0.70	0.9012

ตารางที่ 36 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ HF-ABS ที่การเติม
พวงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	26187	-	-	0.21	0.25	0.9995
Power law	-	-	43107	-	0.35	0.9940
Carreau	14184	-	-	0.14	0.29	0.9995
Herschel-Bulkley	-	166315	9061	-	0.50	0.9443

ตารางที่ 37 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	68290	-	-	0.67	0.25	0.9997
Power law	-	-	67621	-	0.30	0.9980
Carreau	27042	-	-	0.24	0.27	0.9999
Herschel-Bulkley	-	74758	55861	-	0.29	0.9854

ตารางที่ 38 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	44783	-	-	0.39	0.25	0.9997
Power law	-	-	55783	-	0.33	0.9980
Carreau	22026	-	-	0.19	0.29	0.9999
Herschel-Bulkley	-	107802	29036	-	0.39	0.9745

ตารางที่ 39 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	11150	--	-	0.09	0.28	0.9983
Power law	-	-	22672	-	0.41	0.9820
Carreau	6898	-	-	0.08	0.30	0.9989
Herschel-Bulkley	-	156096	1721	-	0.70	0.8753

ตารางที่ 40 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมพวงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	24923	-	-	0.19	0.22	0.9992
Power law	-	-	43402	-	0.33	0.9940
Carreau	15393	-	-	0.17	0.29	0.9993
Herschel-Bulkley	-	41757	50421	-	0.28	0.9715

ตารางที่ 41 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมพวงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	19901	-	-	0.15	0.23	0.9999
Power law	-	-	35932	-	0.37	0.9920
Carreau	11971	-	-	0.14	0.32	0.9999
Herschel-Bulkley	-	207373	765	-	0.83	0.9315

ตารางที่ 42 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมพวงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	7852	-	-	0.08	0.31	0.9946
Power law	-	-	13384	-	0.46	0.9710
Carreau	4305	-	-	0.04	0.33	0.9991
Herschel-Bulkley	-	111239	2457	-	0.64	0.8491

ตารางที่ 43 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมพวงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	20261	-	-	0.22	0.24	0.9964
Power law	-	-	26316	-	0.38	0.9890
Carreau	8328	-	-	0.09	0.28	0.9974
Herschel-Bulkley	-	10843	49163	-	0.27	0.9607

ตารางที่ 44 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมพวงไม้ 10 phr อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	9613	-	-	0.07	0.23	0.9968
Power law	-	-	20248	-	0.42	0.9850
Carreau	6927	-	-	0.09	0.32	0.9983
Herschel-Bulkley	-	151208	1054	-	0.76	0.9169

ตารางที่ 45 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมพวงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	37554.87	-	-	0.311	0.25	0.9987
Power law	-	-	55860	-	0.32	0.9960
Carreau	20267	-	-	0.18	0.28	0.9993
Herschel-Bulkley	-	3.60E-13	73100	-	0.28	0.9944

ตารางที่ 46 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	94205	-	-	0.68	0.20	0.9996
Power law	-	-	93975	-	0.26	0.9970
Carreau	40157	-	-	0.30	0.24	0.9995
Herschel-Bulkley	-	267120	3411	-	0.63	0.9859

ตารางที่ 47 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	99419	-	-	0.84	0.24	0.9998
Power law	-	-	84469	-	0.29	0.9990
Carreau	34673	-	-	0.24	0.26	0.9997
Herschel-Bulkley	-	301721	927	-	0.83	0.9792

ตารางที่ 48 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	26493	-	-	0.18	0.22	0.9976
Power law	-	-	48517	-	0.33	0.9960
Carreau	17232	-	-	0.15	0.29	0.9995
Herschel-Bulkley	-	1.03E-13	42753	-	0.34	0.9964

ตารางที่ 49 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	54269	-	-	0.43	0.22	0.9994
Power law	-	-	66451	-	0.29	0.9980
Carreau	25095	-	-	0.20	0.25	0.9998
Herschel-Bulkley	-	128193	28708	-	0.36	0.9853

ตารางที่ 50 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	37558	-	-	0.28	0.25	0.9995
Power law	-	-	56644	-	0.32	0.9940
Carreau	22591	-	-	0.19	0.30	0.9989
Herschel-Bulkley	-	231441	3909	-	0.62	0.9619

ตารางที่ 51 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	11725	-	-	0.17	0.35	0.9954
Power law	-	-	18589	-	0.42	0.9910
Carreau	6547	-	-	0.09	0.33	0.9997
Herschel-Bulkley	-	3.10E-15	15145	-	0.44	0.9865

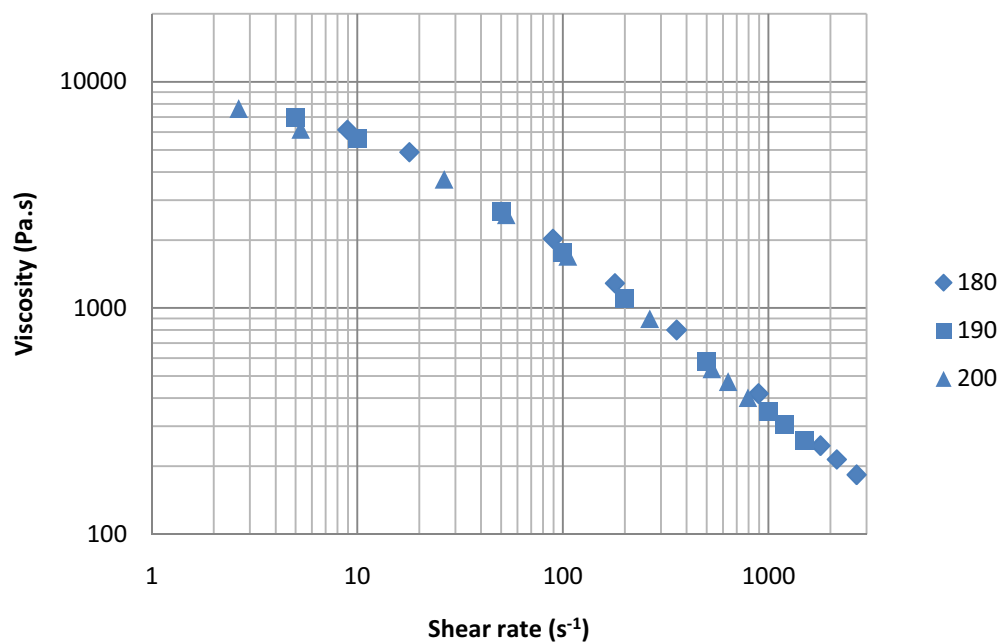
ตารางที่ 52 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ MI-ABS ที่การเติมพวงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	37662	-	-	0.51	0.28	0.9993
Power law	-	-	43316	-	0.32	0.9960
Carreau	15520	-	-	0.17	0.28	0.9995
Herschel-Bulkley	-	189189	787	-	0.79	0.9670

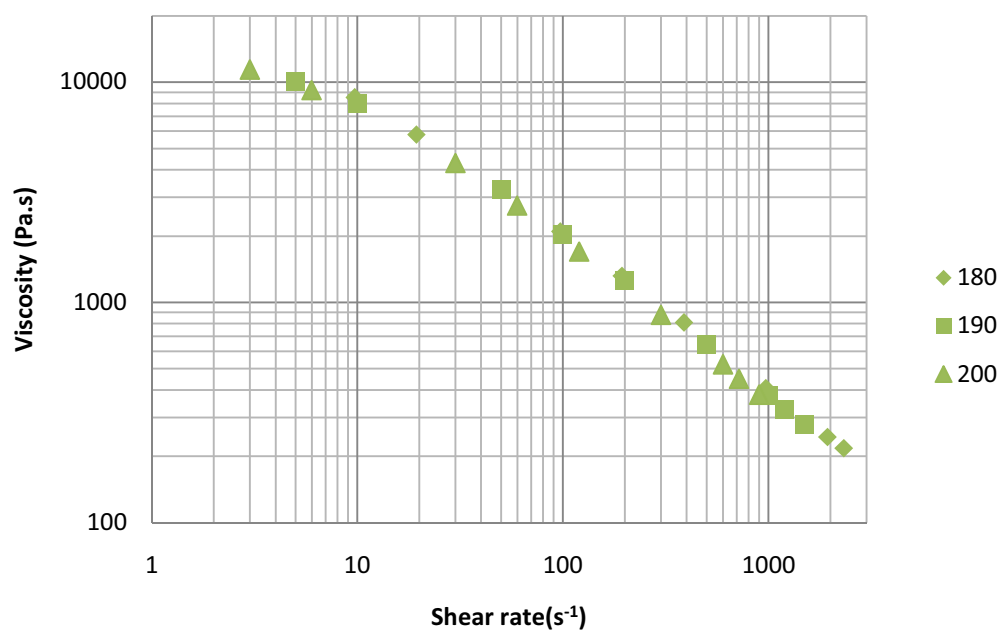
ตารางที่ 53 ค่าคงที่จากสมการการไหลแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับ SI-ABS ที่การเติมพวงไม้ 50 phr อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

สมการ	η_0	σ_0	M	λ	n	R^2
Cross-williamson	20072	-	-	0.18	0.25	0.9988
Power law	-	-	33237	-	0.37	0.9930
Carreau	12216	-	-	0.16	0.32	0.9996
Herschel-Bulkley	-	202127	459	-	0.89	0.9448

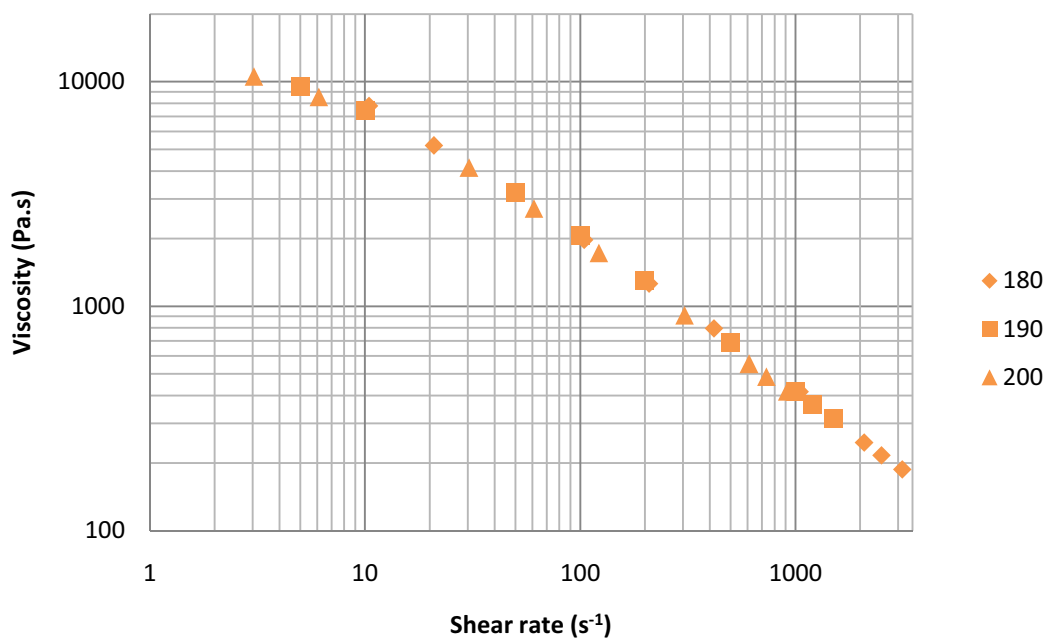
ข-3 Master curve ของพลาสติกเอบีเอสและวัสดุคอมโพสิต



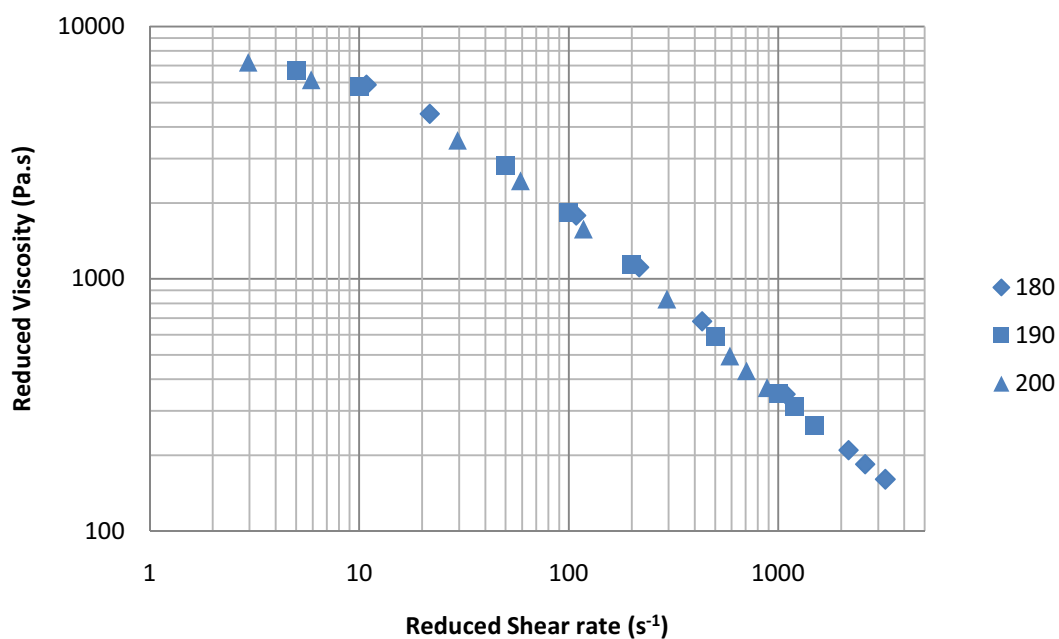
ภาพที่ 61 แสดง Master curve ของเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



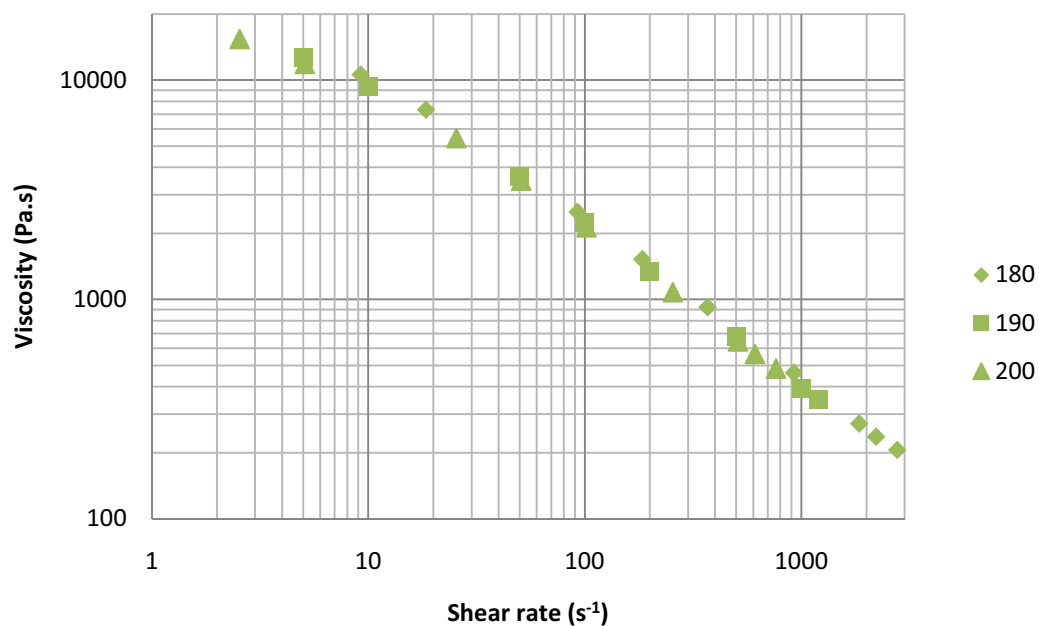
ภาพที่ 62 แสดง Master curve ของเอบีเอสเกรด MI-ABS ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



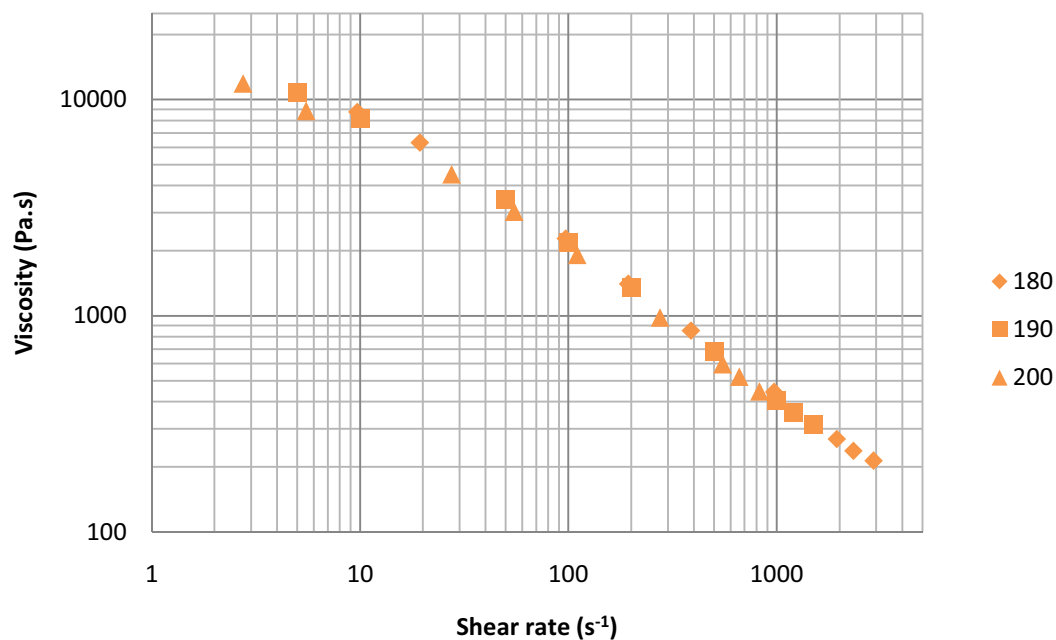
ภาพที่ 63 แสดง Master curve ของเอบีเอสเกรด SI-ABS ที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



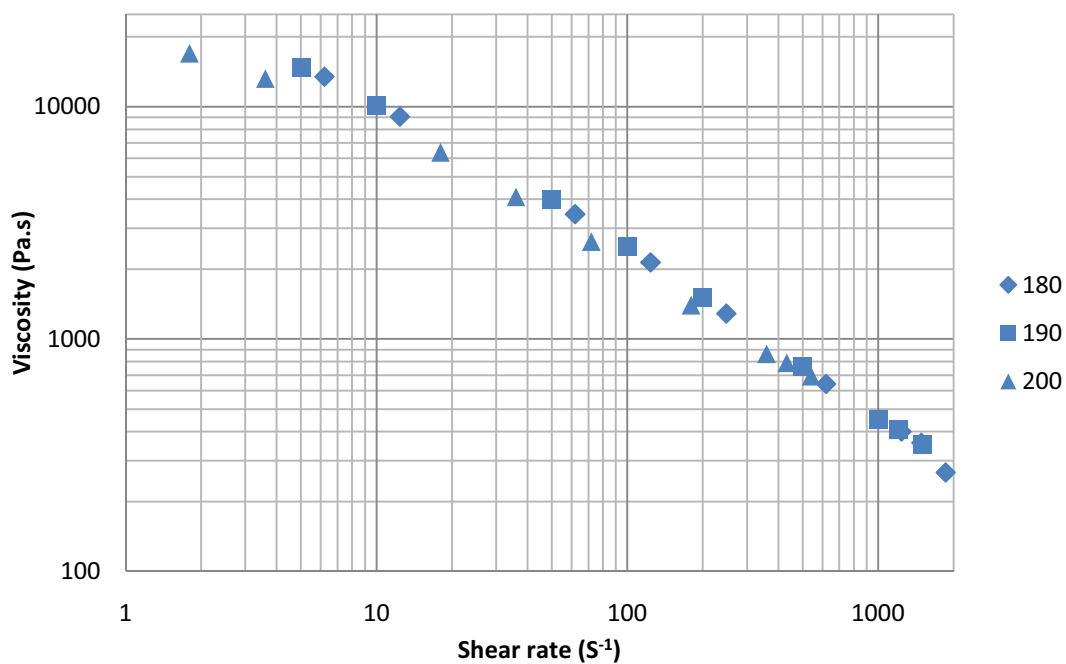
ภาพที่ 64 แสดง Master curve ของวัสดุคอม โพลีทพงไม้กับเอบีเอสเกรด HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



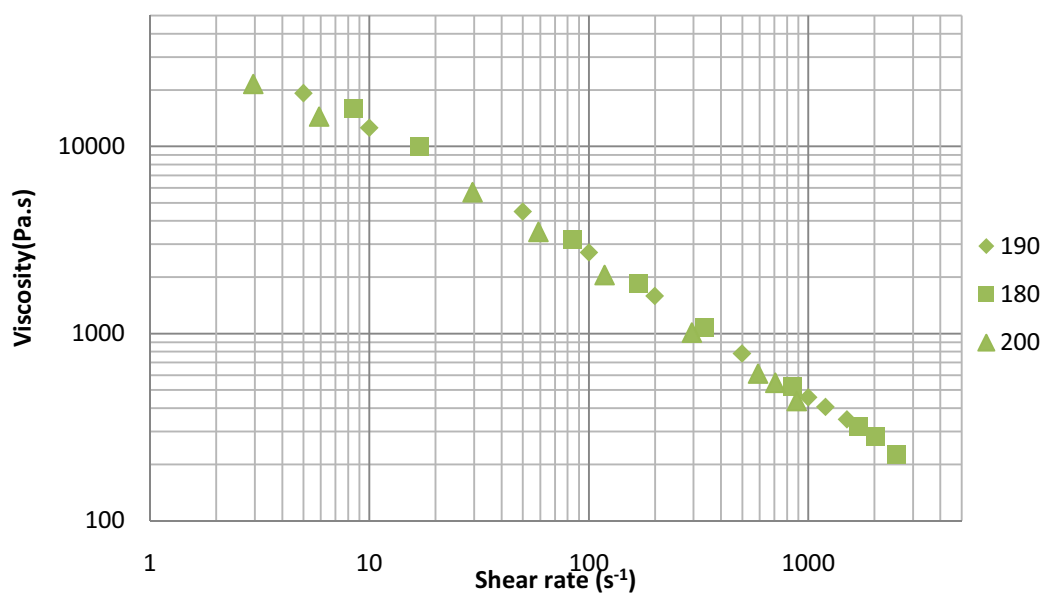
ภาพที่ 65 แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสเกรด MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



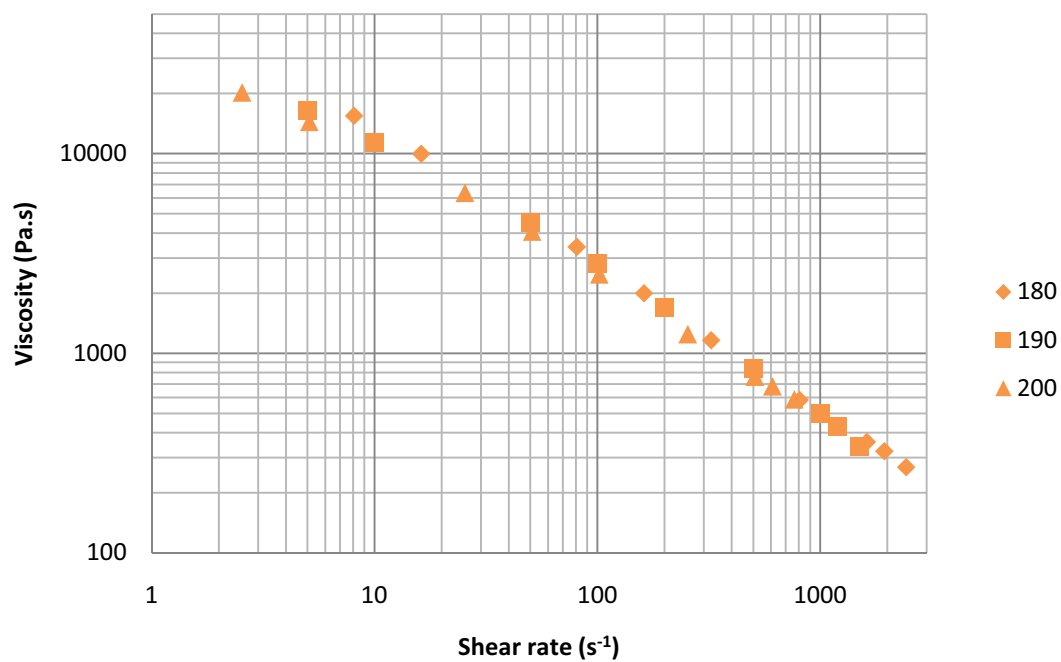
ภาพที่ 66 แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอปียเอสเกรด SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 10 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 67 แสดง Master curve ของวัสดุคอมพอสิตพวงไม้กับเอปียูเรท HF-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 68 แสดง Master curve ของวัสดุคอมพอสิตพวงไม้กับเอปียูเรท MI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส

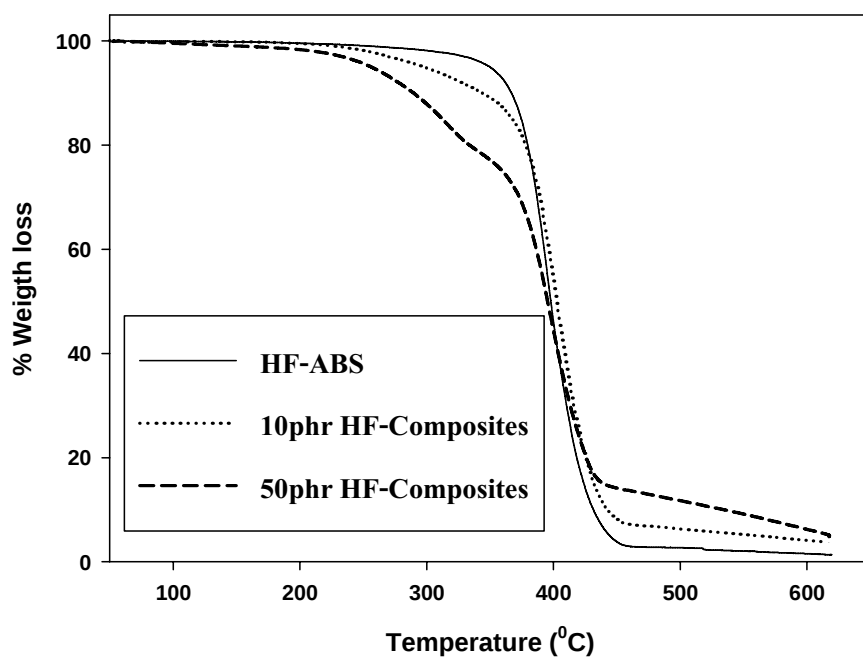


ภาพที่ 69 แสดง Master curve ของวัสดุคอมโพสิตพวงไม้กับเอบีเอสเกรด SI-ABS ที่การเติมผงไม้ 50 phr และที่อุณหภูมิอ้างอิง 190 องศาเซลเซียส

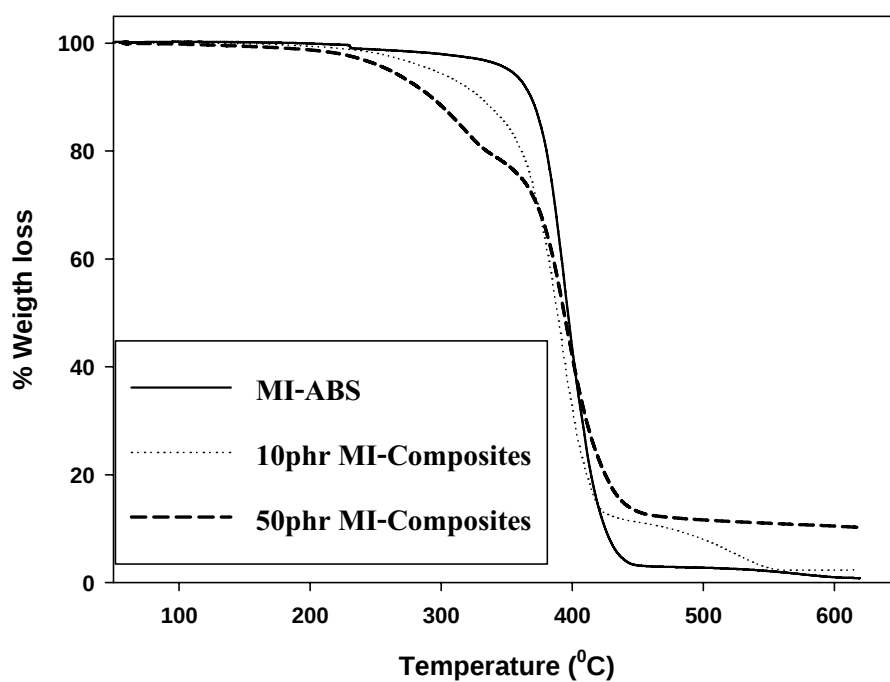
ภาคผนวก ค

สมบัติทางความร้อน

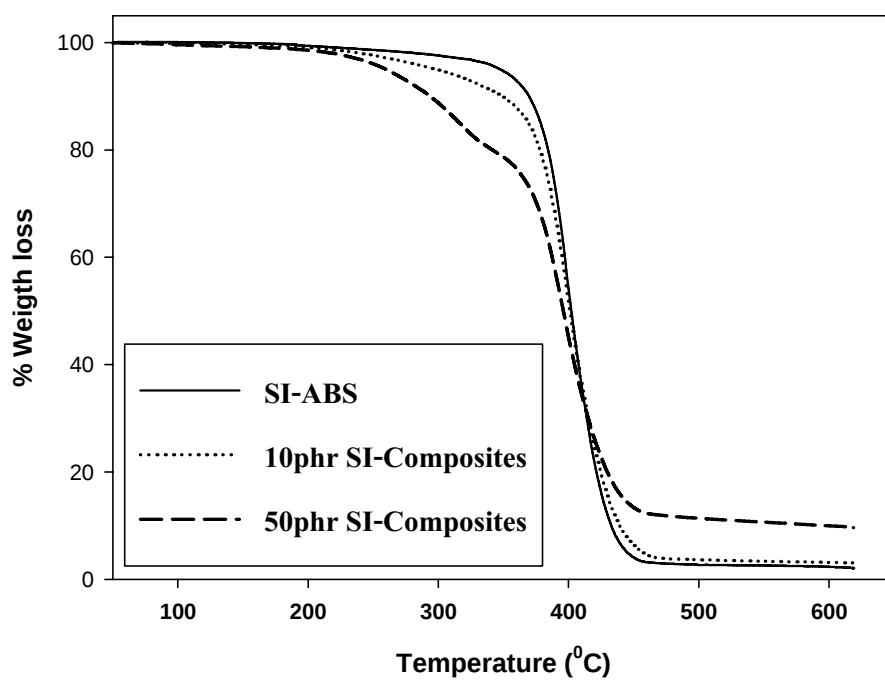
ค-1 ข้อมูลจากการทดสอบด้วย TGA



ภาพที่ 70 แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด HF



ภาพที่ 71 แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด MI



ภาพที่ 72 แสดงการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวอย่างเกรด SI

ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกล

ง-1 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตารางที่ 54 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของพลาสติกเอปียีสบริสุทธิ

เอปียีส	Tensile strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	% strain at break	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Impact Strength (kJ/m ²)
HF	42.1	1.39	22.5	68.9	2.27	27.2
	42.2	1.35	18.2	69.8	2.25	27.1
	43.1	1.37	22.1	67.8	2.48	26.8
	43.1	1.41	22.7	64.2	2.35	27.5
	43.4	1.30	21.4	68.3	2.38	27.0
MI	51.5	1.53	23.9	74.5	2.80	19.8
	51.9	1.52	15.7	73.6	2.77	18.4
	51.8	1.55	21.7	73.3	2.53	18.4
	51.5	1.53	17.5	69.1	2.66	20.3
	51.9	1.51	16.3	69.3	2.58	19.0
SI	41.9	1.38	28.5	58.9	2.09	39.2
	40.7	1.37	33.9	59.3	2.14	36.9
	41.5	1.41	31.4	58.7	2.15	36.4
	42.5	1.36	31.4	59.3	2.10	38.9
	42.1	1.42	27.5	58.4	2.08	38.3

ตารางที่ 55 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้สารคู่ควบ 0.5% และผงไม้ 9.1%

เอปียีส	Tensile strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	% strain at break	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Impact Strength (kJ/m ²)
HF	37.4	1.51	9.0	59.6	2.79	3.9
	38.9	1.51	6.7	59.4	2.64	3.8
	39.7	1.49	8.0	59.7	2.42	4.2
	39.5	1.55	5.6	59.4	2.54	4.0
	39.8	1.63	8.0	60.3	2.82	4.2
MI	44.7	1.69	8.5	66.3	2.77	3.6
	46.0	1.70	9.7	67.2	2.99	3.7
	46.5	1.68	6.9	66.3	2.98	3.4
	45.8	1.71	6.2	66.7	2.97	4.1
	46.1	1.69	6.9	65.9	3.02	3.6
SI	40.0	1.57	8.7	62.6	2.73	5.3
	41.3	1.55	12.1	62.4	2.65	5.5
	41.0	1.56	11.0	62.7	2.67	5.3
	42.3	1.54	11.5	62.7	2.80	5.5
	41.3	1.55	9.3	61.3	2.88	5.4

ตารางที่ 56 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้สารคู่ควบ 0.5% และผงไม้ 33.3%

เอปียีส	Tensile strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	% strain at break	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Impact Strength (kJ/m ²)
HF	37.5	1.56	4.6	63.8	4.16	2.3
	37.3	1.59	4.9	61.6	3.95	2.1
	38.5	1.55	4.3	62.5	4.10	2.4
	39.9	1.52	4.8	60.1	3.87	2.2
	38.3	1.59	4.7	62.4	3.86	2.2
MI	44.0	1.85	4.9	66.9	4.230	1.9
	43.5	1.80	4.8	67.1	4.20	1.9
	45.2	1.87	4.8	67.0	4.11	2.0
	43.7	1.79	5.5	69.7	4.06	1.8
	43.9	1.82	4.8	68.3	4.20	1.9
SI	41.2	1.63	5.2	64.3	3.53	2.6
	39.5	1.60	5.3	64.3	3.89	2.6
	40.5	1.59	5.2	66.1	3.89	2.6
	40.8	1.58	4.9	66.6	3.77	2.5
	39.9	1.61	5.5	65.4	3.53	2.4

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายวัฒนา เทพปิ่นตา
ที่อยู่ 171 หมู่ 7 ต.บ้านเป้า อ.เมือง จ.ลำปาง รหัสไปรษณีย์ 52100

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

พ.ศ. 2550 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลงานวิจัย

- (1) P.Threepopnatkul, W.Teppinta and N.Sombatsompop, “Effect of Co-monomer Content on Mechanical Properties of Sawdust/Wood Composite”, Paper Presented at The 4th China-Europe Symposium on Processing and Properties of reinforced Polymers, Guishan Hotel, China 8-12 June 2009.
- (2) P.Threepopnatkul, W.Teppinta and N.Sombatsompop, “Effect of Co-monomer Content on Rheological and Thermal Properties of Sawdust/ABS Composites”, Paper Presented at International Conference on Functionalized and Sensing Materials 2009, Chulabhorn Research Institute, Bangkok, Thailand, 7-9 December 2009.