

ผลกระทบของการดูดซึมความชื้นต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิเอไมด์

ชาญชัย ทองเชื้อ

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2556

EFFECT OF MOISTURE ABSORPTION ON THE MECHANICAL PROPERTIES
OF POLYAMIDE COMPOSITES

Chanchai Thongchuea

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2013

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของการดูซึมความชื้นต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิเอไมด์

โดย

ชาญชัย ทองเชื้อ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์)

.....กรรมการ

(ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์)

.....กรรมการ

(ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

ชาญชัย ทองเชื้อ : ผลกระทบของการดูดซึมความชื้นต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิเอไมด์. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนวงค์, 76 หน้า

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการดูดซึมความชื้นต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิเอไมด์เสริมแรงใยแก้ว โดยทำการเตรียมวัสดุผสมพอลิเอไมด์เสริมแรงด้วยใยแก้วชนิดสั้นที่ส่วนผสมที่แตกต่างกัน (0, 10, 20 and 30% wt.) เพื่อศึกษาผลกระทบของการดูดซึมความชื้นต่อสมบัติทางกลของวัสดุจึงทำการเตรียมชิ้นงานมาตรฐานได้และแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 60 วัน ทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากแช่น้ำกลั่นในแต่ละวันเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ดูดซึมในชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบการดึงและการต้านทานการโค้งงอตามมาตรฐาน ASTM D638-02a และ ASTM D790-02 ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของการดูดซึมความชื้นต่อโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมด้วย

จากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งการดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพอลิเอไมด์เสริมแรงใยแก้วได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่ (I) ช่วงเริ่มต้น (1-7 วัน) (II) ช่วงที่ 2 (8-24 วัน) (III) ช่วงที่ 3 (25-35 วัน) และ (IV) ช่วงอิ่มตัว (36-60 วัน) โดยความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (Flexural Strength) ของทุกชิ้นงานลดลงอย่างชัดเจนในช่วงเริ่มต้นของการดูดซึมความชื้น และพบว่าสมบัติทางกลดังกล่าวมีค่าเกือบคงที่หลังจากนั้น ส่วน Modulus of Elasticity ของชิ้นงานมีค่าลดลงในช่วงเริ่มต้นและช่วงอิ่มตัว นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงอย่างชัดเจนในช่วงที่ 3 แต่หลังจากนั้นมีค่าเกือบคงที่ จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติจากสภาพเปราะเป็นสภาพเหนียวหลังจากการดูดซึมความชื้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิเอไมด์เสริมแรงใยแก้ว

CHANCHAI THONGCHUEA : EFFECT OF MOISTURE ABSORPTION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYAMIDE COMPOSITES. ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR JINTAWAT CHAICHANAWONG (D.ENG.), 76 PP.

In this study, the effect of moisture absorption on the mechanical properties of glass fiber reinforced polyamide composites was investigated. The composites of short glass fiber/polyamide with different weight percent (0, 10, 20 and 30% wt.) were prepared. To investigate the effect moisture absorption on mechanical properties of these composites, the standard specimens were prepared and then immersed in distilled water for a period of 60 days. The weight changes of the specimens were daily measured to determine the amount of moisture absorption of the specimens. Tensile test and flexural test were conducted based on ASTM D638-02a and ASTM D790-02, respectively. In addition, the effect of moisture on the microstructure of the composites was also investigated.

It was found that the moisture absorption of the glass fiber reinforced polyamide composites could be divided into four stages: (I) the beginning stage (1-7 days), (II) the second stage (8-24 days), (III) the third stage (25-35 days) and (IV) the saturated stage (36-60 days). Yield Strength, Ultimate Tensile Strength and Flexural Strength of all specimens significantly decreased at the beginning stage of moisture absorption and then these mechanical properties were almost constant. The Modulus of Elasticity of all specimens decreased at the beginning stage and saturated stage. In addition, %Elongation of all specimens did not change at the beginning stage. However, %Elongation of all specimens significantly decreased in the third stage, and then %Elongation were almost constant. Based on the microstructure analysis, the results indicated that the transition of brittle to ductile properties of the glass fiber reinforced polyamide composites after moisture absorption would be attributed to the changes in their mechanical properties.

Graduate School

Student's Signature.....

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature

Academic Year 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรุณาเสียเวลาอันมีค่าของท่าน มาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อีกทั้งยังแนะนำแนวทางการสั่งซื้ออุปกรณ์ทำวิจัยและความรู้เรื่องคุณสมบัติของพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ เจษฎา วงษ์อ่อน (สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน) ที่กรุณาสอนและให้ใช้เครื่อง Parallel Twin Screw Extruder และเครื่องฉีด Specimen สำหรับจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ ที่สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน และความรู้เรื่องการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ชาญชัย ทองเชื้อ

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
2 หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	15
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	15
3.2 เตรียมวัตถุดิบการทดลอง.....	16
3.3 การเตรียมชิ้นงาน.....	17
3.4 ชั่งน้ำหนักและทดสอบสมบัติทางกล.....	18
3.5 เริ่มต้นแช่ชิ้นงานและจับเวลา.....	20
3.6 ชั่งน้ำหนักและทดสอบสมบัติทางกลตามช่วงเวลาที่กำหนด.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	21
4.1 พฤติกรรมการดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว.....	21
4.2 ผลกระทบจากการดูดซึมความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกล.....	23
4.3 ผลกระทบจากการดูดซึมความชื้นที่มีโครงสร้างทางจุลภาพ.....	30
5 สรุปผลการวิจัย.....	45
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก. ค่าคุณสมบัติของวัสดุดิบ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุผสม.....	53
ภาคผนวก ข. บันทึกผลการทดลอง การทดสอบชั่งน้ำหนัก.....	56
ภาคผนวก ค. บันทึกผลการทดลอง การทดสอบสมบัติทางกล.....	60
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	76

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติก (PA) กับใยแก้ว (GF).....	3
1.2 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน.....	4
3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติก (PA) กับใยแก้ว (GF).....	17
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับใยแก้ว.....	23
5.1 การแช่น้ำที่มีผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม.....	45
ข-1 น้ำหนักของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว.....	57
ค-1 Yield Strength ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว.....	61
ค-2 Ultimate Tensile Strength ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว.....	64
ค-3 %Elongation ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว.....	67
ค-4 Modulus of Elasticity ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว.....	70
ค-5 Flexural Strength ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว.....	73

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve).....	8
2.2 ลักษณะชิ้นงาน ก่อนและหลังการยืดตัว.....	9
2.3 แรงเค้นในชิ้นงานทดสอบที่หาความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด.....	10
2.4 การแพร่แบบไม่คงที่ในแนวแกน x	11
3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	15
3.2 เม็ดพลาสติกพอลิเอไมด์ (PA) 66.....	16
3.3 ไยแก้ว (E-Glass Fiber).....	16
3.4 น้ำกลั่น.....	17
3.5 ชิ้นงานตัวอย่างที่จะฉีดขึ้นรูป.....	18
3.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	19
3.7 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....	19
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมความชื้นกับเวลา.....	21
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมความชื้นกับเวลา.....	22
4.3 การทดสอบ Tensile	24
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Yield Strength กับเวลา.....	24
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Ultimate Tensile Strength กับเวลา.....	25
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ %Elongation กับเวลา.....	26
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Modulus of Elasticity กับเวลา.....	27
4.8 การทดสอบ Flexural	29
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Flexural Strength กับเวลา.....	29
4.10 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 100:0.....	30
4.11 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Start.....	31
4.12 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Day 10.....	31
4.13 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Day 30.....	32
4.14 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Day 60.....	32
4.15 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 90:10.....	34
4.16 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Start	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.17 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Day 10.....	35
4.18 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Day 30.....	35
4.19 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Day 60.....	36
4.20 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 80:20.....	37
4.21 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Start.....	38
4.22 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Day 10.....	38
4.23 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Day 30.....	39
4.24 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Day 60.....	39
4.25 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 70:30.....	41
4.26 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Start.....	41
4.27 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Day 10.....	42
4.28 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Day 30.....	42
4.29 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Day 60.....	43
ก-1 ค่าคุณสมบัติของพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ (PA) 66.....	54
ก-2 ค่าคุณสมบัติของใยแก้ว (Glass Fiber).....	55

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การคมนาคมขนส่งสะดวกบอกถึงความเจริญของสังคม ซึ่งการคมนาคมทางบกต้องใช้ยานพาหนะประเภทยานยนต์เป็นหลัก ชิ้นส่วนยานยนต์ภายในห้องโดยสาร ส่วนมากผลิตจากพลาสติก คุณสมบัติของพลาสติกสามารถขึ้นรูปทรงได้ง่ายเพื่อลดต้นทุนการผลิต มีน้ำหนักเบาเพื่อช่วยประหยัดน้ำมัน มีคุณสมบัติความแข็งแรง ไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับเหล็กหรือไม้ แต่มีความปลอดภัยมากกว่าเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

พลาสติกมีหลายชนิด ในการเลือกใช้นิตของพลาสติกให้เหมาะสมกับชิ้นส่วนรถยนต์ ต้องคำนึงถึงความจำเป็นที่ชิ้นส่วนรถยนต์ต้องมี ยกตัวอย่างเช่น มาตรวัดความเร็ว หรือมาตรแสดงผลต้องมีฝาครอบ และฝาครอบต้องใส เพื่อให้ผู้ขับขี่รถยนต์สามารถมองเห็นได้ตลอดเวลา จึงควรที่จะเลือกพลาสติกชนิด พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) เพราะพลาสติกชนิดนี้ มีคุณสมบัติที่ใส และไม่มีการกัดด้วย หรือถ้าต้องการผลิตโครงสร้างภายในและคอนโซล พื้นผิวหน้าต้องมีลักษณะไม่อ่อนเกินไป ทนสารเคมีได้ ไม่ดูดซึมความชื้น จึงควรที่จะเลือกพลาสติกชนิด พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP) เพราะพลาสติกชนิดนี้ มีคุณสมบัติทนต่อสารเคมี ไม่ดูดความชื้น ทนความร้อนได้ดี ผิวหน้าแข็งและมีรูปร่างเสถียร แต่มีความอ่อนตัวที่จะโค้งงอได้ และที่สำคัญ มีความหนาแน่นต่ำ เพราะโครงสร้างภายในและคอนโซล เมื่อรวมน้ำหนักแล้ว จะมีน้ำหนักมาก น้ำหนักตัวรถยนต์ก็จะมากตาม แต่ถ้าเลือกพลาสติก พอลิโพรพิลีน ก็จะสามารถตอบโจทย์ได้ และถ้าต้องการผลิตชิ้นส่วนประเภท บานปรับทิศทางในช่องลม ต้องเลือกพลาสติกที่ลื่น ทนแรงโยกเพื่อปรับทิศทางลมได้ และสามารถทนกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รวดเร็วได้โดยไม่เสียรูปทรง เพราะถ้าเสียรูปทรงก็จะทำให้แรงโยกไม่เสถียร จึงควรที่จะเลือกพลาสติกชนิด พอลิเอไมด์ (Polyamide : PA) เพราะพลาสติกชนิดนี้มีคุณสมบัติรับน้ำหนักที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ดีเยี่ยม เหนียวดีมาก สมบัติลื่นดี และทนต่อสารเคมีได้ดี ไม่เสียรูปง่ายเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะอุณหภูมิ จึงสามารถตอบโจทย์ข้อนี้ได้ตรง

เพื่อเสริมความแข็งแรง ให้กับพลาสติกโดยที่พลาสติกไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปมาก อีกทางเลือกคือ เส้นใย (Fiber) เข้าไปในเนื้อพลาสติก จะช่วยทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงขึ้น โดยเฉพาะชิ้นส่วนรถยนต์ ที่ต้องมีการเคลื่อนที่อยู่ประจำ ยกตัวอย่างเช่น บานปรับทิศทางในช่องลมที่ได้เลือกใช้พลาสติกชนิด พอลิเอไมด์ ในการผลิต และผลที่อาจตามมาก็คือ การดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมกับเส้นใย อาจเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงตามสัดส่วนของเส้นใยที่อยู่ในวัสดุผสม

จากงานวิจัยของ Wang; Sain; และ Cooper [1] ได้มีการศึกษาเรื่องการดูดความชื้นของ วัสดุผสม HDPE กับรำข้าว อัตราส่วนรำข้าว 40%, 50%, 55%, 60% และ 65% แขน้ำกลั่น เป็น เวลา 400 hr. ผลปรากฏว่าวัสดุผสม เมื่อทำการแช่น้ำกลั่น วัสดุผสมจะค่อยๆดูดซึมความชื้นจน อิ่มตัว และอัตราส่วนรำข้าวที่ดูดซึมความชื้นมากที่สุดคือ 65% และเรียงลำดับไปน้อยสุดที่ 40% เมื่อ ดูดซึม ความชื้นจนอิ่มตัวแล้ว วัสดุผสมจะสามารถนำไฟฟ้าได้ อีกทั้งได้มีงานวิจัยของ Akil; Cheng; Ishak; Bakar; และ Rahman [2] ได้ทำการศึกษาเรื่อง การดูดความชื้นต่อวัสดุผสมพลาสติกชนิดพอลิเอสเตอร์ และใยจากปอกระเจา โดยได้ทำการแช่วัสดุผสมใน 3 สภาพคือ แช่น้ำทะเล แช่น้ำกรด และแช่น้ำกลั่น นาน 3 สัปดาห์ ผลปรากฏว่า วัสดุผสมพลาสติกและใยปอกระเจาจะดูดซึมความชื้น จากทั้ง 3 สภาพ การดูดซึมความชื้นเรียงจากมากไปหาน้อย คือ แช่น้ำกลั่น แช่น้ำกรด และแช่น้ำ ทะเล ตามลำดับ และส่งผลให้สมบัติทางกล ค่า Flexural Strength ลดลง หมายถึงยิ่งดูดซึม ความชื้นมาก ก็ยิ่งลดค่า Flexural Strength มาก และได้มีงานวิจัยของ Alamri; และ Low [3] ได้ ทำการศึกษาศึกษาสมบัติทางกล ของวัสดุผสมอีพอกซีและเซลลูโลสไฟเบอร์ ที่มีอัตราส่วนของ เซลลูโลสไฟเบอร์ 19%, 28%, 40% และ 46% เมื่อทำการแช่น้ำ ผลที่ได้คือ สามารถทนแรงดึง และ ทนแรงกระแทก โดยเรียงลำดับจากอัตราส่วนของเซลลูโลสไฟเบอร์ที่มากไปหาน้อย แต่เมื่อแช่อยู่ใน น้ำ เป็นเวลา 2100 hr. ก็จะทำให้เกิดการดูดซึมความชื้น และเรียงจากอัตราส่วนของเซลลูโลสไฟเบอร์มาก ไปหาอัตราส่วนของเซลลูโลสน้อยเช่นกัน ส่งผลให้สมบัติทางกล Flexural Strength ลดลงในทุก อัตราส่วน และได้มีงานวิจัยของ Ferreno; Carrascal; Ruiz; และ Casado [4] ได้ทำการศึกษาเรื่อง อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลและการแตกหักของวัสดุผสม โดยใช้วัสดุผสมพอลิเอไมด์ และเส้นใยแก้ว โดยได้ผสมเส้นใยแก้วเป็น 35% ต่อน้ำหนัก แล้วหลังจากนั้นได้นำวัสดุผสมไปแช่น้ำที่ มีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพื่อให้วัสดุผสมที่มีความชื้นที่แตกต่างกัน 5 ตัวอย่างคือ วัสดุผสมที่ ได้รับความชื้น 0%, 1%, 2%, 3% และ 6% ไปทำการทดสอบ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า เมื่อวัสดุ ผสมได้รับความชื้นมากขึ้น เมื่อทดสอบด้าน Tensile ค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Stress มีค่า ลดลง และเมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาพที่อัตราขยาย 500 เท่า ผลที่ได้คือ วัสดุ ผสมที่ได้รับความชื้น 0%, 1% และ 2% จะมีลักษณะเป็นการแตกเปราะ แต่วัสดุผสมที่ได้รับความ ชื้น 3% และ 6% จะมีลักษณะเป็นการแตกเหนียว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาถึงการดูดซึมความชื้นของชิ้นส่วนพลาสติก ชนิดพอลิเอไมด์ที่ผสมเข้ากับใยแก้ว (Glass Fiber : GF) ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ใยแก้วสำหรับ อุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งทางผู้วิจัยจะศึกษาถึงพฤติกรรมของการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ สมบัติทางกลวัสดุผสม เมื่อมีการผสมอัตราส่วนของใยแก้วกับพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ในอัตราส่วนที่ แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลกระทบ จากการดูดซึมความชื้นของวัสดุผสม ที่มีผลต่อสมบัติทางกล เมื่อมีการผสมอัตราส่วนของใยแก้ว (GF) กับพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ (PA) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลกระทบของการดูดซึมความชื้น ของชิ้นงานวัสดุผสมกันระหว่าง พลาสติกชนิดพอลิเอไมด์กับใยแก้ว

1.3.2 อัตราส่วนในการผสมของพลาสติกต่อใยแก้ว (อัตราส่วนต่อน้ำหนัก) แบ่งเป็น 4 แบบดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติก (PA) กับใยแก้ว (GF)

แบบที่	อัตราส่วนพลาสติกต่อน้ำหนัก	อัตราส่วนใยแก้วต่อน้ำหนัก
1	100%	0%
2	90%	10%
3	80%	20%
4	70%	30%

1.3.3 มาตรฐานของชิ้นงานในการทดสอบ ฉีดขึ้นรูปพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D 638-02a และ ASTM D 790-02

1.3.4 ทำการทดสอบสมบัติทางกลชิ้นงาน โดยเครื่องทดสอบสมบัติทางกลยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AGS-X เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุผสม ได้แก่

- (1) Yield Strength
- (2) Ultimate Tensile Strength
- (3) %Elongation
- (4) Modulus of Elasticity
- (5) Flexural Strength

[illegible]

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วัสดุผสม (Composites) [5]

วัสดุผสม คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุผสมจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase)

วัสดุผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- A. วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composite)
- B. วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composite)
- C. วัสดุผสมโครงสร้าง (Structural Composite)

ในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับชิ้นส่วนพลาสติกชนิด PA ที่ผสมเข้ากับ ใยแก้ว (Glass Fiber) จึงจะเน้นไปที่ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composite) เท่านั้น หรือเรียกชื่อได้อีกว่า วัสดุผสมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic Composite Material)

ส่วนประกอบสำคัญของวัสดุผสมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic Composite Material) มี 2 อย่างคือ

(1) เมทริกซ์ (Matrix)

เมทริกซ์ ในที่นี้ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี หน้าที่หลักของเมทริกซ์คือยึดไฟเบอร์ไว้ด้วยกัน และเป็นตัวกลางส่งผ่านแรงที่มากระทำ ไปยังไฟเบอร์ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของไฟเบอร์เนื่องจากการขัดถูหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติด (Adhesive Bonding Force) ระหว่างไฟเบอร์กับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอ เพื่อป้องกันการที่ไฟเบอร์จะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์

(2) เส้นใย (Fiber)

เส้นใยที่ใช้เสริมแรงพลาสติก มีด้วยกัน 3 ประเภทหลักคือ

ก. เส้นใยแก้ว (Glass Fiber)

ใยแก้วที่นำมาใช้เสริมแรงพลาสติก เพื่อให้มีโครงสร้างแบบวัสดุผสม และใช้สำหรับทำแบบหรือแม่พิมพ์ (Molding Compounds) วัสดุพวกนี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ดีคือ มีความ

แข็งแรงสูง มีรูปทรงที่เสถียร เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ไม่ดูดซึมความชื้น ทนทานต่อการผุกร่อน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ขึ้นรูปง่าย และมีราคาค่อนข้างถูก

แก้วที่ใช้สำหรับทำใยแก้วที่นับว่าสำคัญที่สุดมีอยู่ 2 ประเภทคือ E (Electrical) Glasses และ S (High-Strength) Glasses

E glass เป็นใยแก้วที่ใช้กันมากที่สุด และใช้กับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง E glass เป็นแก้วที่ได้จากสารประกอบของ Lime-Aluminum-Borosilicate ซึ่งไม่มีโซเดียมหรือโพแทสเซียมหรือมีปริมาณน้อย องค์ประกอบหลักของ E glass คือ มีซิลิกา (SiO_2) 52-56% อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 12-16% แคลเซียมออกไซด์ 16-25% และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) 8-13% E glass ที่บริสุทธิ์มี Tensile Strength ประมาณ 500 ksi (3.44 GPa) และมี Modulus of Elasticity 10.5 Msi (72.3 GPa)

S glass มีค่าอัตราส่วนของ Strength ต่อน้ำหนักสูงกว่าและราคาแพงกว่า E Glass และในระยะเริ่มแรก S Glass จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางการทหารและอวกาศ Tensile Strength ของ S Glass มีค่ามากกว่า 650 ksi (4.48 GPa) และมีค่า Modulus of Elasticity ประมาณ 12.4 Msi (85.4 GPa) องค์ประกอบที่สำคัญของ S Glass มีซิลิกา (SiO_2) ประมาณ 65% อะลูมินา (Al_2O_3) 25% และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 10%

ข. เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)

วัสดุผสมผลิตจากการใช้ใยคาร์บอนไปเสริมแรงให้กับพลาสติกเรซิน (Plastic Resin) เช่น อีพอกซี (Epoxy) เพื่อให้วัสดุผสมนั้นมีคุณลักษณะเฉพาะในหลายๆส่วนร่วมกัน คือทำให้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงมีความแข็งตัว ไม่โค้งงอง่าย สมบัติเหล่านี้ก่อให้เกิดความสนใจที่จะนำไปประยุกต์ทางด้านยานอวกาศ (Aero-Space) เช่น สร้างเครื่องบิน แต่เนื่องจากราคาของเส้นใยคาร์บอนค่อนข้างสูง จึงทำให้การนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ลดลง

ค. เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber)

เส้นใยอะรามิดเป็นชื่อทั่วไปของอะโรมาติกพอลิเอไมด์ไฟเบอร์ เส้นใยอะรามิดเริ่มมีการแนะนำทางการค้าโดยบริษัทดูปองท์ (Du Pont) เมื่อปี 1972 ในชื่อว่า เคฟลาร์ (Kevlar) ในปัจจุบันเคฟลาร์ที่ขายกันอยู่มี 2 แบบคือ เคฟลาร์ 29 และเคฟลาร์ 49 เคฟลาร์ 29 เป็นชนิดความหนาแน่นต่ำ แต่เป็นเส้นใยอะรามิดที่มีความแข็งแรงสูงซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้ป้องกันกระสุนหรือชิปนาวาร์ ใช้ทำเชือกและสายเคเบิล ส่วนเคฟลาร์ 49 มีสมบัติเฉพาะคือ มีความหนาแน่นต่ำ แต่มี

ความแข็งแรงและโมดูลัสสูง ทำให้เคฟลาร์ 49 นี้มีประโยชน์ในการเสริมแรงพลาสติก สำหรับงานสร้างเครื่องบิน สร้างเรือ รถยนต์ และนำไปประยุกต์ทางด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ

2.1.2 สมบัติทางกลของวัสดุผสมและการทดสอบสมบัติทางกล [6]

ในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสมบัติทางกล 4 ประเภท ดังนี้

(1) Modulus of Elasticity

ในการดึงวัสดุผสม ในช่วงแรกวัสดุผสมจะเปลี่ยนรูปแบบ Elastic แต่ถ้าปลดแรงที่กระทำต่อตัวอย่างออกไป ตัวอย่างนั้นจะกลับคืนสู่ความยาวเริ่มต้น โดยทั่วไปวัสดุผสมจะแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นแบบเส้นตรงของความเค้นและความเครียดในช่วงของ Elastic ของ Engineering Stress-Strain Diagram สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Hooke ดังสมการที่ 2.1

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

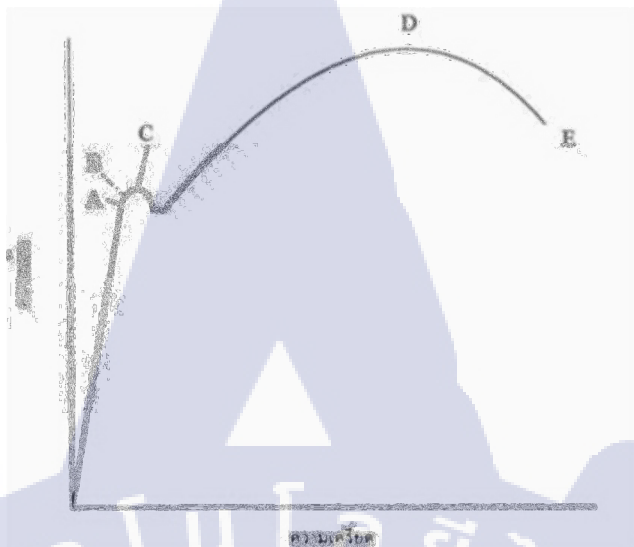
เมื่อ

σ คือ Stress ความเค้น

ε คือ Strain ความเครียด

(2) Yield Strength และ Ultimate Tensile Strength [7]

ความทนแรงดึงของวัสดุ คือ ความต้านทานของวัสดุต่อการยืด (Elongation) หรือการแตกหัก (Breaking) เมื่อมีแรงดึงกระทำต่อวัสดุ พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุจะขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วในการดึงที่ทำให้เกิดความเค้นด้วย เช่น ถ้าดึงวัสดุอย่างรวดเร็วทันที อาจทำให้วัสดุขาดออกได้เร็ว แต่ถ้าใช้แรงเท่ากันแต่ดึงช้าๆ อาจทำให้วัสดุเพียงแต่ยืดออกเท่านั้น ดังนั้นจึงมีมาตรฐานการดึงเกิดขึ้น เช่น มาตรฐาน ASTM หรือ มาตรฐาน ISO ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับโดยทั่วไป ความต้านทานต่อการขาดของวัสดุมีค่าสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียด สามารถนำมาเขียนกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด พบว่าเมื่อเริ่มดึงชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะค่อยๆยืดออกจนถึงจุด A จากกราฟจะเห็นว่าช่วงนี้เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรง นั่นคือความเครียดแปรผันโดยตรงกับความเค้น ซึ่งถ้าปล่อยแรงดึงออกวัสดุจะกลับคืนสภาพเดิม ที่จุด A นี้เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ความเครียดแปรผันโดยตรงกับความเค้น ซึ่งจุดนี้เรียกว่าขีดจำกัดของสัดส่วน (Proportional Limit) เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินขีด สัดส่วนเส้นกราฟจะค่อยๆโค้งออกจากเส้นตรงเป็นช่วงสั้นๆ จนถึงจุด B เรียกว่า ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่วัสดุจะกลับคืนสภาพเดิมได้ และเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร และเมื่อเลยจุด C วัสดุจะยืดตัวออกได้เองโดยไม่ต้องออกแรงเพิ่ม จุดนี้เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) และเมื่อออกแรงดึงวัสดุจะยืดต่อไปอีกจนถึงจุด D ซึ่งเป็นจุดสูงสุดที่วัสดุจะรับความเค้นได้ (Ultimate Strength) จากนั้นวัสดุจะยืดตัวเองออกจนถึงจุด E วัสดุจะขาดออกจากกัน จุด E เรียกว่าจุดแตกหัก (Breaking Point) สามารถอธิบาย ดังสมการที่ 2.2 และ สมการที่ 2.3

$$\text{Yield Strength} = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ

F คือ แรงกระทำภายนอก (ณ จุด Yield)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัด

$$S_u = \frac{F_{\max}}{A_o} \quad (2.3)$$

เมื่อ

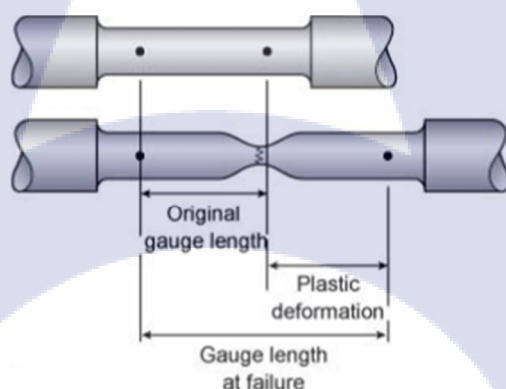
S_u คือ Ultimate Tensile Strength

$F_{\max}$ คือ แรงกระทำภายนอก (สูงสุด)

A_o คือ พื้นที่หน้าตัด

(3) %Elongation

ความเหนียว (Ductility) คือสมบัติของวัสดุที่สามารถแปรรูปหรือยืดตัวได้มากขึ้นก่อนเกิดการแตกหักหรือขาด ในกรณีการทดสอบแรงดึง สามารถวัดได้จากความยาวเกจบนชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ ซึ่งจะได้ค่าเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้ คือ สิ่งที่ใช้บอการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวรของวัสดุ ก่อนเกิดความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะชิ้นงาน ก่อนและหลังการยืดตัว

สามารถอธิบาย ดังสมการที่ 2.4

$$\%Elongation = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (2.4)$$

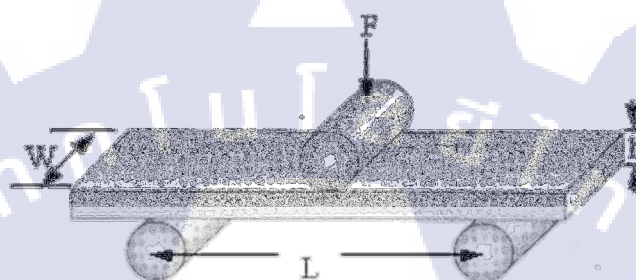
เมื่อ

l_f คือ ระยะความยาวเกจ หลังจากทดสอบ

l_o คือ ระยะความยาวเกจ ก่อนการทดสอบ

(4) Flexural Strength

ความทนแรงโค้งงอ เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบ ให้เกิดการงอตัวโดยใช้ หัวกด (Indenter) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (Supporting Jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (Span) การทดสอบแบบนี้ชิ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile Stress) และแรงเค้นกด (Compressive Stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดใต้ชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แรงเค้นในชิ้นงานทดสอบที่หาความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด

การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้ 2 ลักษณะ คือการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 3 จุด (Three Point Bending) และการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 4 จุด (Four Point Bending) และค่า Flexural Strength คือความเค้นมากที่สุด หรือความเค้นโค้งงอ (Maximum Stress or Flexural Stress) ที่เกิดตรงกลางชิ้นทดสอบตรงส่วนผิวนอกสามารถอธิบาย ดังสมการที่ 2.5

$$\text{Flexural Strength} = \frac{3FL}{2Wh^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ

F คือ แรงกระทำภายนอก

L คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่รองรับชิ้นงาน

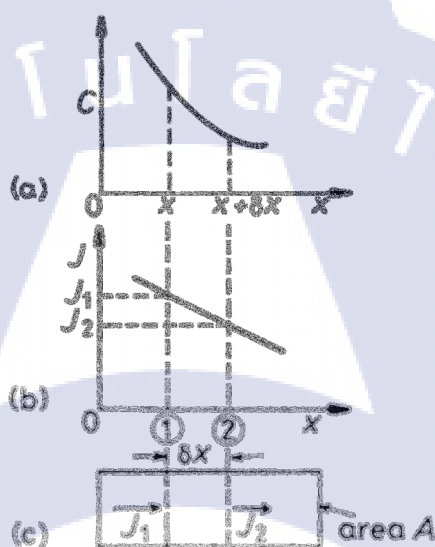
W คือ ความกว้างของชิ้นงาน

h คือ ความสูงของชิ้นงาน

2.1.3 การแพร่ [8]

หลักการพื้นฐานของการแพร่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การแพร่แบบคงที่ และการแพร่แบบไม่คงที่ ซึ่งการแพร่แบบคงที่ คือการแพร่ของความเข้มข้นของตัวถูกละลายทุกจุดคงที่กับเวลา ส่วนในทางปฏิบัติ การแพร่ที่เกิดขึ้นจริงเป็นแบบไม่คงที่ ซึ่งความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางและเวลาที่เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 2.4 แทนความเข้มข้นของสาร B เป็น C_B ที่ตำแหน่ง x เมื่อเวลาผ่านไป จะแทนด้วย $C_B(x,t)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแพร่แบบไม่คงที่ในแนวแกน x

จากรูปที่ 2.4(a) แสดงค่าความเข้มข้น (C) ที่เปลี่ยนไปในแนวแกน x ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเรียกว่า δx แล้วเปรียบเทียบเป็นรูปที่ 2.4(b) เป็นจำนวนอะตอมต่อพื้นที่ต่อเวลา (J) ที่เปลี่ยนไปเป็นรูปที่ 2.4(c) คือเกิดตำแหน่งที่ ① และ ② ซึ่งตามกฎของ Fick สมการที่ 2.6

$$J_B = -D_B \frac{\partial C_B}{\partial x} \quad (2.6)$$

เมื่อ

J_B คือ ปริมาณอะตอมต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น $\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$

D_B คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ หรือการแพร่กระจาย มีหน่วยเป็น $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

C_B คือ ความเข้มข้นของสาร มีหน่วยเป็น $\frac{mol}{m^3}$

x คือ ความยาว มีหน่วยเป็น m

จากรูปที่ 2.4(b) จำนวนอะตอมต่อพื้นที่ต่อเวลา ที่ตำแหน่ง ② จะน้อยกว่าตำแหน่ง ① สามารถทำเป็นสมการของค่าความเข้มข้นของสาร (C_B) คือ

$$\partial C_B = \frac{(J_1 - J_2)A \delta t}{A \delta x} \quad (2.7)$$

เมื่อ δx มีขนาดเล็กจนเข้าใกล้ศูนย์ สามารถประมาณค่า J_2 ได้เป็น

$$J_2 \approx J_1 + \frac{\partial J_B}{\partial x} \delta x \quad (2.8)$$

สามารถแทนค่า J_2 จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.7) ได้สมการ (2.9) และ (2.10)

$$\partial C_B = -\frac{\partial J_B}{\partial x} \delta t \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = -\frac{\partial J_B}{\partial x} \quad (2.10)$$

สามารถแทนค่า J_B จากสมการที่ (2.6) ลงในสมการที่ (2.10) ได้เป็น กฎของ Fick ข้อที่ 2

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_B \frac{\partial C_B}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ

t คือ เวลา มีหน่วยเป็น s

กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นการกระจายแบบไม่คงที่ ซึ่งมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง คือกฎของ Fick ข้อที่ 2

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang; Sain; และ Cooper [1] ได้ทำการศึกษาเรื่องการดูดความชื้นต่อวัสดุผสมพลาสติกและใยธรรมชาติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซึมความชื้น เนื่องจากวัสดุประเภทก่อสร้างบางชนิด เช่น พื้นกระเบื้อง และรั้ว เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพลาสติก จึงจำเป็นต้องเสริมความแข็งแรงของพลาสติก ด้วยใยที่ทำมาจากธรรมชาติ เช่น ไร่ข้าว ในงานวิจัยนี้นำเสนอพฤติกรรมการดูดซึม เพื่อให้เข้าใจกลไกของการดูดซึมความชื้นในใยธรรมชาติ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของใยธรรมชาติที่ผสมลงในพลาสติก มีผลต่อการดูดซึมความชื้น คือ เมื่ออัตราส่วนของใยมากขึ้น การดูดซึมความชื้นของพลาสติก ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อการดูดซึมความชื้น ถึงจุดอิ่มตัว ชิ้นงานพลาสติกที่ผสมใยธรรมชาติ ก็จะสมารถนำไฟฟ้าได้

Akil; Cheng; Ishak; Bakar; และ Rahman [2] ได้ทำการศึกษาเรื่องการดูดความชื้นต่อวัสดุผสมพลาสติกชนิดพอลิเอสเตอร์และใยจากปอกระเจา เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซึมความชื้น เนื่องจากวัสดุพลาสติกบางชนิดจำเป็นต้องเสริมใย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน แต่ต้องนำชิ้นงานนั้นไปใช้งานในกลางแจ้ง ซึ่งผลที่ตามมาคือ วัสดุผสมพลาสติกและใยปอกระเจาจะดูดซึมความชื้น ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาสมบัติทางกลในระหว่างที่วัสดุผสมเกิดการดูดซึมความชื้น โดยได้ทำการแช่วัสดุผสมพลาสติกและใยปอกระเจา ใน 3 สถานะคือ แช่น้ำกลั่น แช่น้ำทะเล และแช่น้ำกรด ที่อุณหภูมิห้องปกติ เป็นเวลา 3 สัปดาห์ต่อเนื่อง ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การดูดซึมความชื้นใน 3 สถานะที่มากที่สุดเรียงจากมากไปหาน้อย คือ แช่น้ำกลั่น แช่น้ำกรด และแช่น้ำทะเล ตามลำดับ และเมื่อผ่านการแช่ใน 3 สัปดาห์ต่อเนื่องค่า Flexural Strength ที่ดีที่สุดเรียงจากมากไปหาน้อย คือ แช่น้ำทะเล แช่น้ำกรด และแช่น้ำกลั่น ตามลำดับ และจากผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่า ยิ่งการดูดซึมความชื้นได้ดีเพียงใด ก็ยิ่งส่งผลให้ค่า Flexural Strength ลดลงตามไปเพียงนั้น

Alamri; และ Low [3] ได้ศึกษาสมบัติทางกล ของวัสดุผสมอีพอกซีและเซลลูโลสไฟเบอร์ ที่มีอัตราส่วนของเซลลูโลสไฟเบอร์ที่แตกต่างกันคือ 19%, 28%, 40% และ 46% ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า วัสดุผสมอีพอกซีและเซลลูโลสไฟเบอร์ที่มีสมบัติทางกล คือ สามารถทนแรงดึง และทนแรงกระแทก ได้ดีที่สุดคือ วัสดุผสมอีพอกซีและเซลลูโลสไฟเบอร์ ที่มีเซลลูโลสไฟเบอร์ผสมอยู่ในอัตราส่วน 46% ส่วนวัสดุผสมอีพอกซีและเซลลูโลสไฟเบอร์ที่มีสมบัติทางกลต่ำที่สุด คือ มีเซลลูโลสไฟเบอร์ผสมอยู่ในอัตราส่วน 19% แต่เมื่อถูกแช่อยู่ในน้ำ จะทำให้สมบัติทางกล Flexural Strength ลดลงตามระยะเวลาการแช่น้ำซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซึมความชื้น

Ferreno; Carrascal; Ruiz; และ Casado [4] ได้ทำการศึกษาเรื่องอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลและการแตกหักของวัสดุผสม โดยใช้วัสดุผสมพอลิเอไมด์และเส้นใยแก้ว โดยได้ผสมเส้นใยแก้วเป็น 35% ต่อน้ำหนัก และได้ขึ้นรูปชิ้นงานการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-10 และ ISO 527-2:1994 โดยได้อบวัสดุผสม ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วหลังจากนั้นได้นำ

วัสดุผสมไปแช่น้ำที่มีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ของห้อง 30% แล้วได้นำวัสดุผสมที่มีความชื้นที่แตกต่างกัน 5 ตัวอย่างคือ วัสดุผสมที่ได้รับความชื้น 0%, 1%, 2%, 3% และ 6% ไปทำการทดสอบ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า เมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นมากขึ้น เมื่อทดสอบด้าน Tensile ค่า Strain มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Stress มีค่าลดลง และเมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาพที่อัตราขยาย 500 เท่า ผลที่ได้คือ วัสดุผสมที่ได้รับความชื้น 0%, 1% และ 2% จะมีลักษณะเป็นการแตกเปราะ แต่วัสดุผสมที่ได้รับความชื้น 3% และ 6% จะมีลักษณะเป็นการแตกเหนียว

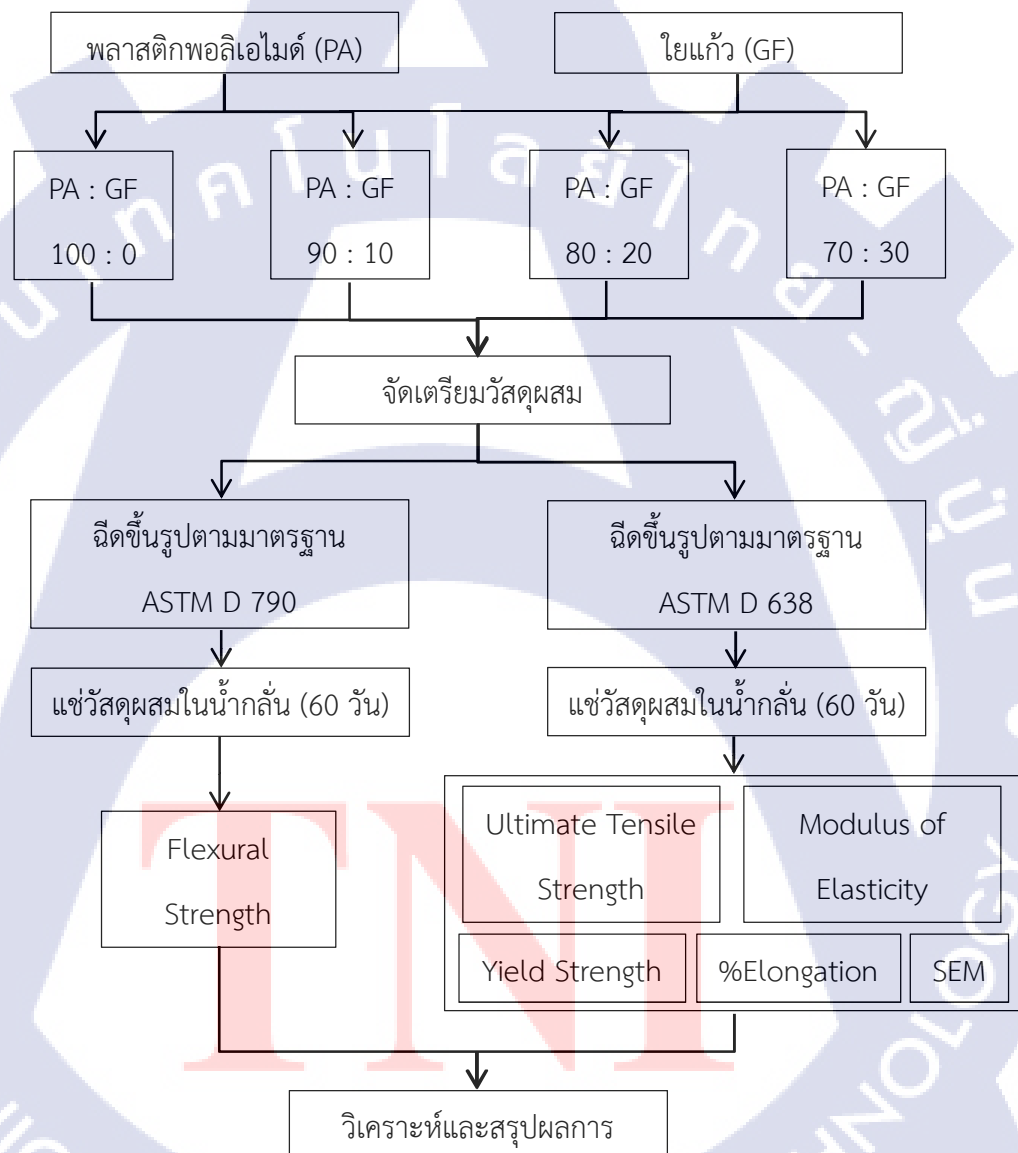
Zafar; Bertocco; Schjodt-Thomsen; และ Rauhe [9] ได้ทำการศึกษาผลกระทบในระยะยาวของความชื้นต่อวัสดุผสมอีพอกซีและคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อชิ้นงานถูกแช่อยู่ในน้ำทะเลและน้ำเกลือแร่ เนื่องจากการขุดเจาะน้ำมันจากทะเลที่ระดับความลึกกว่า 2000 เมตร ต้องใช้วัสดุที่นำมาเป็นเครื่องจักรในการทำงาน ที่มีความแข็งแรงและใช้งานได้ดี เมื่อแช่ในน้ำ สัมผัสกับลมฝนและแสงแดดเป็นเวลานาน เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า วัสดุผสมอีพอกซีและคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อถูกแช่อยู่ในน้ำทะเลและน้ำเกลือแร่เป็นเวลานาน สมบัติทางกล เช่น Tensile Strength และ Elongation จะลดลงและจะมีการอาการบวมของวัสดุผสม เนื่องจากการดูดซึมน้ำเป็นเวลานาน

Leman; Sapuan; Saifol; Maleque; และ Ahmad [10] ได้ทำการศึกษาเรื่องการดูดซึมความชื้นและโดยใช้กฎของ Fick โดยใช้วัสดุผสมอีพอกซีและเส้นใยจากต้นตาล โดยได้ทำเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ผสมเส้นใยจากต้นตาล 10% ต่อน้ำหนัก และ กลุ่มที่ผสมเส้นใยจากต้นตาล 20% ต่อน้ำหนัก โดยได้อบวัสดุผสม ที่อุณหภูมิ 108 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ชั่วโมง แล้วหลังจากนั้นได้นำวัสดุผสมไปแช่น้ำ เป็นเวลา 33 วัน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า วัสดุผสมอีพอกซีและเส้นใยจากต้นตาล มีการดูดซึมความชื้น โดยเฉพาะกลุ่มที่ผสมเส้นใยจากต้นตาล 20% จะมีการดูดซึมความชื้นสูงที่สุด คือ มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 0.93%

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2 เตรียมวัตถุดิบการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่

3.2.1 เม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ (PA) 66 ของบริษัท Invista Engineering Polymer Lot การผลิตหมายเลข NK4CC8J1 (ภาคผนวก ก-1) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เม็ดพลาสติกพอลิเอไมด์ (PA) 66

3.2.2 ไยแก้ว (Glass Fiber) ชนิด E-Glass Fiber ของบริษัท Nippon Electric Glass (Malaysia) Lot การผลิตหมายเลข M20120751 (ภาคผนวก ก-2) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไยแก้ว (E-Glass Fiber)

ทำการผสมตามอัตราส่วนเป็นทั้งหมด 4 แบบ โดยใช้เครื่อง Parallel Twin Screw Extruder ที่อุณหภูมิกระบอกฉีด 280 °C และความเร็วรอบที่ 70 RPM. ตามอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติก (PA) กับใยแก้ว (GF)

แบบที่	อัตราส่วนพลาสติก (PA) ต่อน้ำหนัก	อัตราส่วนใยแก้ว (GF) ต่อน้ำหนัก
1	100%	0%
2	90%	10%
3	80%	20%
4	70%	30%

3.2.3 น้ำกลั่นของบริษัท STAR ดังรูปที่ 3.4

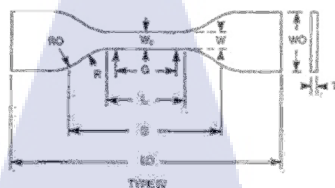


รูปที่ 3.4 น้ำกลั่น

3.3 การเตรียมชิ้นงาน

ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 638-02a [11] และ ASTM D 790-02 [12] โดยใช้เครื่องฉีด Specimen ที่อุณหภูมิกระบอกฉีด 280 °C ซึ่งเกี่ยวข้องกับมาตรฐานการทดสอบที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากล

โดยทำการฉีดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D 638-02a ดังรูปที่ 3.5



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^a

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or smaller		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or smaller	Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^b	Type V ^{c,d}	
W—Width of narrow section ^{e,f}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	$\pm 0.5 (\pm 0.02)^{g,h}$
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	$\pm 0.5 (\pm 0.02)^c$
WO—Width overall, min ^g	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min ^g	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min ^h	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length ⁱ	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	$\pm 0.25 (\pm 0.010)^c$
G—Gage length ⁱ	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 0.13 (\pm 0.005)^c$
D—Distance between gage	115 (4.5)	127 (5.0)	115 (4.5)	25 (1.00)	35.4 (1.4)	$\pm 5 (\pm 0.2)$
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.55)	12.7 (0.5)	$\pm 1 (\pm 0.04)^g$
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 1 (\pm 0.04)^g$

รูปที่ 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างที่จะฉีดยื่นรูป

3.4 ชั่งน้ำหนักและทดสอบสมบัติทางกล

เมื่อเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตัดแต่งครีปให้เรียบร้อย ด้วยใบมีดทุกชิ้นงานในแนวรอยประกบของแม่พิมพ์ (Parting Line) และแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ชุดคือ

- (1) ชิ้นงานที่จะใช้สำหรับชั่งน้ำหนัก จำนวน 1 ชิ้นต่อแบบ
- (2) ชิ้นงานที่จะใช้สำหรับทดสอบสมบัติทางกล จำนวน 60 ชิ้นต่อแบบ

ซึ่งชิ้นงานในชุดที่ 2 นี้ เป็นชิ้นงานที่ทดสอบแบบทำลาย ไม่สามารถนำกลับมาทดสอบใหม่ได้ เพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบกับชิ้นงานในชุดที่ 1 ในการทดสอบสมบัติทางกล จะสามารถแบ่งมาตรฐานในการทดสอบที่อ้างอิงคือ

3.4.1 มาตรฐาน ASTM D 638-02a สำหรับทดสอบ

- ก. Yield Strength
- ข. Ultimate Tensile Strength
- ค. %Elongation
- ง. Modulus of Elasticity
- จ. SEM (Scanning Electron Microscope)

3.4.2 มาตรฐาน ASTM D 790-02 สำหรับทดสอบ Flexural Strength

เริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนักในชิ้นงานในชุดที่ 1 จำนวน 1 ชิ้นต่อแบบ ตามรูปที่ 3.6 แล้วบันทึกข้อมูล (เครื่องชั่งน้ำหนักต้องมีค่าความละเอียด ทศนิยมเป็น 0.001)



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก

นำชิ้นงานในชุดที่ 2 จำนวน 1 ชิ้นต่อแบบ มาทดสอบสมบัติทางกล โดยใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AGS-X ตามรูปที่ 3.7 แล้วบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน

3.5 เริ่มต้นแช่ชิ้นงานและจับเวลา

นำชิ้นงานทุกแบบทุกชิ้น แช่ลงในภาชนะที่บรรจุน้ำกลั่นพร้อมกัน แต่แยกภาชนะของกลุ่มชิ้นงานแต่ละแบบ เพื่อป้องกันการปนของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C

3.6 ชั่งน้ำหนักและทดสอบสมบัติทางกลตามช่วงเวลาที่กำหนด

นำชิ้นงานที่จะใช้สำหรับชั่งน้ำหนัก และทดสอบสมบัติทางกล ตามช่วงเวลาที่กำหนดออกจากภาชนะพร้อมกัน และเช็ดด้วยกระดาษชำระให้แห้งก่อนทุกครั้ง สำหรับงานที่ใช้ชั่งน้ำหนัก เป็นชิ้นงานเดียวกันตลอดเวลาการทดลอง ส่วนชิ้นงานที่ทดสอบสมบัติทางกลเป็นชิ้นงานคนละตัว เพราะเป็นการทดสอบแบบทำลาย ไม่สามารถนำกลับมาทดสอบใหม่ได้ แต่ก็ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบ แทนแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด



TNI

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 พฤติกรรมการดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว

จากผลการทดลองการดูดซึมความชื้น โดยชั่งน้ำหนักวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และชั่งน้ำหนักทุกวันเป็นเวลา 60 วัน (ภาคผนวก ข-1) เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุกวัน โดยใช้สมการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นดังสมการที่ 4.1

$$M_c = \frac{W_t - W_o}{W_o} \times 100 \quad (4.1)$$

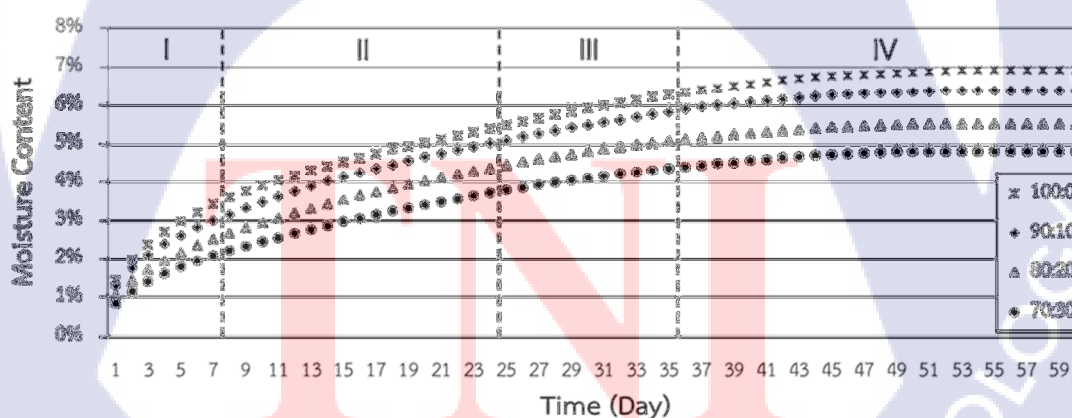
เมื่อ

M_c คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

W_t คือ น้ำหนักชิ้นงาน ระหว่างแช่น้ำตามเวลา

W_o คือ น้ำหนักชิ้นงาน ก่อนแช่น้ำ

จากสมการที่ 4.1 สามารถเขียนเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.1



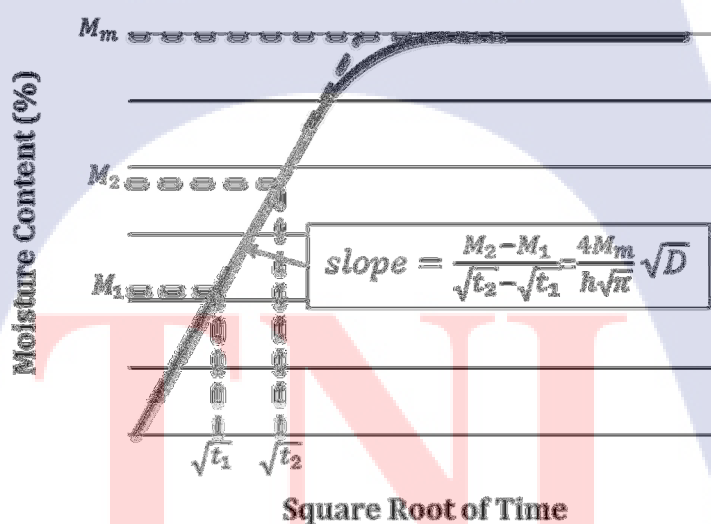
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมความชื้นกับเวลา

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว พลาสติกพอลิเอไมด์(เมทริกซ์) จะมีการดูดซึมความชื้น เพราะใยแก้วไม่ดูดซึมความชื้น และเมื่อผสมใยแก้วในวัสดุผสมก็จะลดการดูดซึม

ความชื้นได้ สามารถดูได้จากอัตราส่วนของไยแก้ว เมื่ออัตราส่วนของไยแก้วมีค่ามากขึ้นในวัสดุผสม การดูดซึมน้ำจะน้อยลง โดยสามารถเรียงอัตราส่วนของไยแก้วที่ดูดซึมน้ำ จากนั้นน้อยไปหามากคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ และสามารถแบ่งช่วงเวลากการดูดซึมออกเป็น 4 ช่วง

- I. ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 7 ของการแช่น้ำ ความชื้นของกราฟมาก แสดงถึงวัสดุผสมมีการดูดซึมความชื้นที่รวดเร็ว
- II. ช่วงวันที่ 8 ถึงวันที่ 24 ของการแช่น้ำ ความชื้นของกราฟลดลง แสดงถึงวัสดุผสมลดการดูดซึมความชื้น
- III. ช่วงวันที่ 25 ถึงวันที่ 35 ของการแช่น้ำ ความชื้นของกราฟลดลงอีก แสดงถึงวัสดุผสมลดการดูดซึมความชื้นใกล้ถึงจุดอิ่มตัว
- IV. ช่วงวันที่ 36 ถึงวันที่ 60 ของการแช่น้ำ ความชื้นของกราฟลดลงและคงที่ แสดงถึงวัสดุผสมลดการดูดซึมความชื้นถึงจุดอิ่มตัว และอิ่มตัวเต็มที่ในช่วงวันที่ 50 ของการแช่น้ำ

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมความชื้นกับเวลา ตามทฤษฎีการดูดซึมความชื้นตามกฎของ Fick แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมความชื้นกับเวลา

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมความชื้นกับเวลา สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ หรือการแพร่กระจาย (D) ดังสมการที่ 4.2

$$D = \pi \left(\frac{h}{4M_m} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (4.2)$$

เมื่อ

D (Diffusion Coefficient) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ มีหน่วยเป็น mm^2/s

h (High) คือ ค่าความหนาของวัสดุผสม มีหน่วยเป็น mm

M_m (Moisture Maximum) คือ ค่าความชื้นสูงสุด

M_2 (Moisture Point 2) คือ ค่าความชื้น ณ จุดเปรียบเทียบที่ 2

M_1 (Moisture Point 1) คือ ค่าความชื้น ณ จุดเปรียบเทียบที่ 1

t_2 (Time Point 2) คือ เวลา ณ จุดเปรียบเทียบที่ 2 มีหน่วยเป็น s

t_1 (Time Point 1) คือ เวลา ณ จุดเปรียบเทียบที่ 1 มีหน่วยเป็น s

จากสมการสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับใยแก้ว ในแต่ละอัตราส่วน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับใยแก้ว

แบบที่	อัตราส่วนพลาสติกต่อใยแก้ว	ค่าความชื้นสูงสุด (M_m)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D)
1	100 : 0	6.90%	$9.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$
2	90 : 10	6.38%	$9.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$
3	80 : 20	5.51%	$8.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$
4	70 : 30	4.79%	$7.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$

4.2 ผลกระทบจากการดูดซึมความชื้นที่มีต่อสมบัติทางกล ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

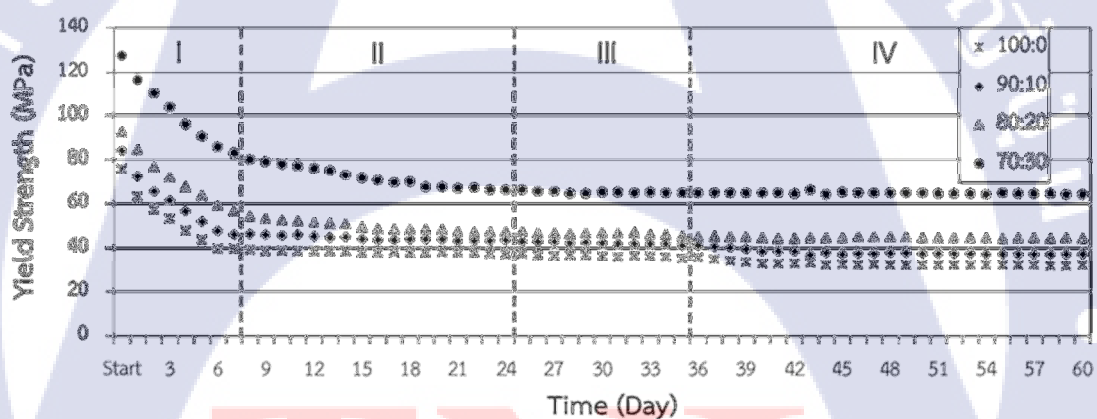
4.2.1 มีผลต่อ Yield Strength

จากผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Yield Strength โดยการใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน (ภาคผนวก ค-1) แสดงการใช้เครื่องทดสอบดัง รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดสอบ Tensile

สามารถเขียนเป็นกราฟในแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 4.4



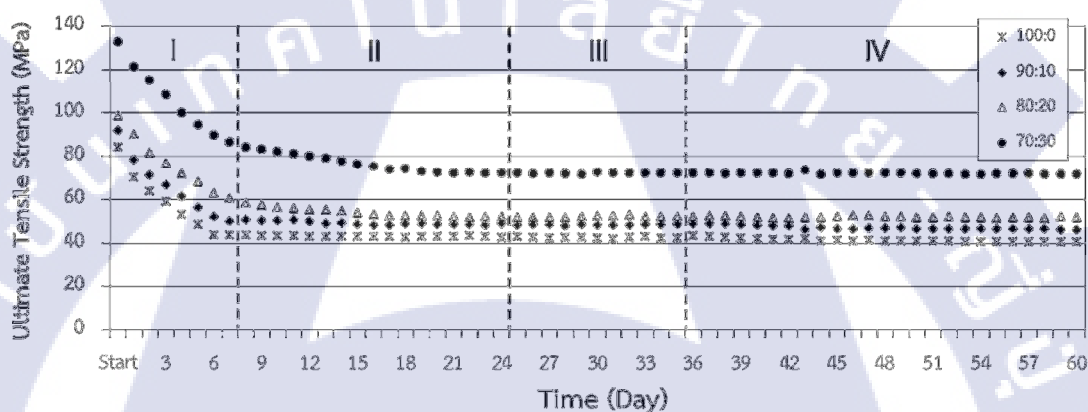
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Yield Strength กับเวลา

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Tensile จะให้ค่า Yield Strength มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย นั่นก็สามารถบอกได้ถึงความสามารถของใยแก้วเมื่อถูกผสมลงในเมทริกซ์ประเภทโพลีเมอร์ จะมีคุณสมบัติทำให้ค่า Yield Strength มากขึ้นหรืออีกความหมายหนึ่งคือแข็งแรงขึ้นนั่นเอง โดยสามารถเรียงค่า Yield Strength จากมากไปหาน้อยคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

ตามรูปที่ 4.1 เมื่อวัสดุผสมแช่น้ำจะมีผลต่อค่า Yield Strength เฉพาะช่วงเวลาเริ่มต้นของการแช่น้ำ (I) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4 คือค่า Yield Strength ลดลง แต่ช่วงเวลาอื่นๆ ของการแช่น้ำ ไม่มีผลต่อค่า Yield Strength

4.2.2 มีผลต่อ Ultimate Tensile Strength

จากผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Ultimate Tensile Strength โดยการใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน (ภาคผนวก ค-2) แสดงการใช้เครื่องทดสอบดัง รูปที่ 4.3 สามารถเขียนเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.5

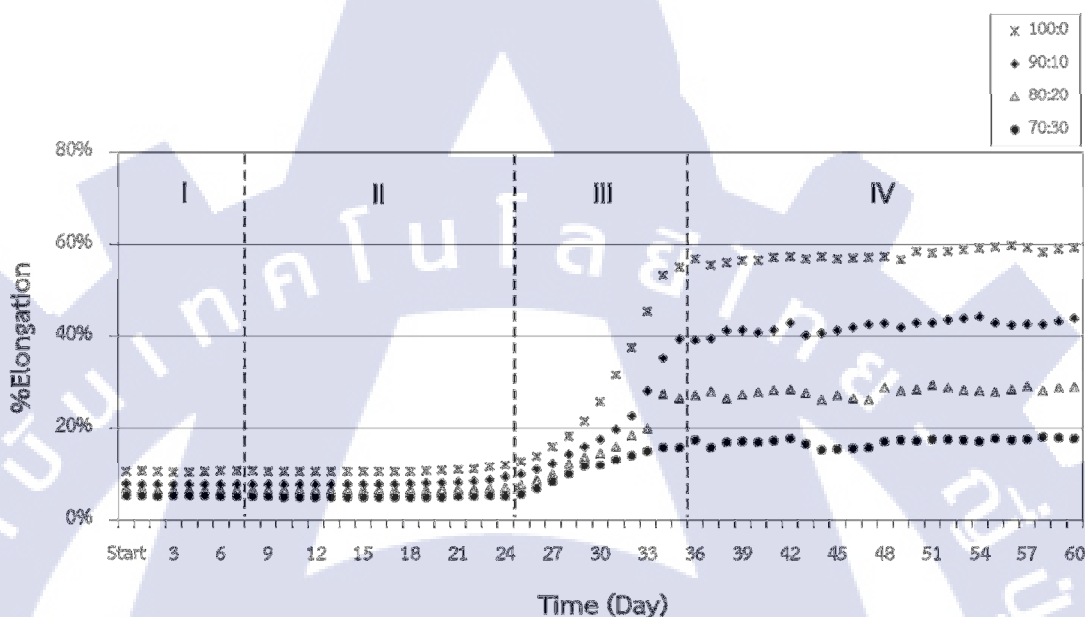


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Ultimate Tensile Strength กับเวลา

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าลักษณะกราฟของการทดสอบ Ultimate Tensile Strength ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว ไม่ได้แตกต่างจากรูปที่ 4.4 กราฟการทดสอบ Yield Strength เลย แต่ที่แตกต่างก็คือ ค่าของ Ultimate Tensile Strength จะมีค่ามากกว่า ในส่วนอื่นที่เหมือนกันก็คือเมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก จะให้ค่า Ultimate Tensile Strength มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย โดยสามารถเรียงค่า Ultimate Tensile Strength จากมากไปหาน้อย คือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 กับรูปที่ 4.5 เมื่อวัสดุผสมแช่น้ำจะมีผลต่อค่า Ultimate Tensile Strength เฉพาะช่วงเวลาเริ่มต้นของการแช่น้ำ (I) คือค่า Ultimate Tensile Strength ลดลง แต่ช่วงเวลาอื่นๆ ของการแช่น้ำ ไม่มีผลต่อค่า Ultimate Tensile Strength เช่นเดียวกับค่า Yield Strength

4.2.3 มีผลต่อ %Elongation

จากผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ %Elongation โดยการใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน (ภาคผนวก ค-3) แสดงการใช้เครื่องทดสอบดัง รูปที่ 4.3 สามารถเขียนเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ %Elongation กับเวลา

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Tensile แล้วจะให้ค่า %Elongation น้อยกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย ในความหมายคือใยแก้วเมื่อถูกผสมลงในเมทริกซ์ประเภทโพลีเมอร์ จะทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง โดยสามารถเรียงค่า %Elongation จากน้อยไปหามากคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

ตามรูปที่ 4.1 เมื่อวัสดุผสมแช่น้ำจะมีผลต่อค่า %Elongation เฉพาะช่วงเวลาที่ 3 ของการแช่น้ำ (III) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6 คือค่า %Elongation เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากที่วัสดุผสมอิ่มตัวแล้ว จะมีผลให้ %Elongation คงที่ ซึ่งการดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมมีผลทำให้ค่า %Elongation หรือความเหนียว มีค่ามากขึ้น เมื่อวัสดุผสมสามารถดูดซึมความชื้นได้มาก แสดงดังต่อไปนี้

- (1) ค่า %Elongation วัสดุผสม 100:0 ก่อนแช่น้ำคือ 10.20% หลังจากแช่น้ำ 60 วัน คือ 59.07% คิดเป็นความเหนียวเพิ่มขึ้น 5.8 เท่า
- (2) ค่า %Elongation วัสดุผสม 90:10 ก่อนแช่น้ำคือ 7.52% หลังจากแช่น้ำ 60 วัน คือ 43.68% คิดเป็นความเหนียวเพิ่มขึ้น 5.8 เท่า
- (3) ค่า %Elongation วัสดุผสม 80:20 ก่อนแช่น้ำคือ 6.39% หลังจากแช่น้ำ 60 วัน คือ 28.50% คิดเป็นความเหนียวเพิ่มขึ้น 4.5 เท่า
- (4) ค่า %Elongation วัสดุผสม 70:30 ก่อนแช่น้ำคือ 5.18% หลังจากแช่น้ำ 60 วัน คือ 17.64% คิดเป็นความเหนียวเพิ่มขึ้น 3.4 เท่า

4.2.4 มีผลต่อ Modulus of Elasticity

จากผลการทดลอง (ภาคผนวก ค-4) สามารถหาค่า Modulus of Elasticity โดยใช้สมการได้ดังสมการที่ 4.3

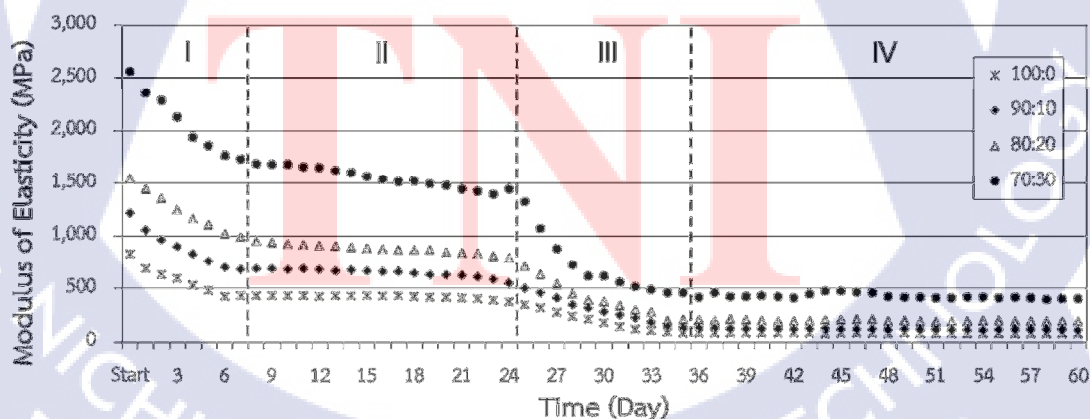
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

เมื่อ

σ คือ Stress ความเค้น

ε คือ Strain ความเครียด

สามารถเขียนเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Modulus of Elasticity กับเวลา

จากรูปที่ 4.7 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ากราฟ Modulus of Elasticity มีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาการดูดซึมความชื้นทั้ง 4 ช่วงเวลาดังนี้

- I. ช่วงเริ่มต้นของการแช่น้ำ ค่า Modulus of Elasticity จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลตามค่าการทดสอบแบบ Yield Strength ตามรูปที่ 4.4 ในอีกความหมายคือ ในช่วงระยะเวลานี้ลักษณะกราฟของ Modulus of Elasticity ของวัสดุผสมจะมีลักษณะเหมือนกราฟของ Yield Strength เนื่องจากการดูดซึมน้ำในช่วงเริ่มต้นมีการดูดซึมความชื้นที่เร็ว ตามรูปที่ 4.1 ส่งผลให้ค่า Yield Strength ลดลงอย่างรวดเร็ว
- II. ช่วงที่ 2 ของการแช่น้ำ ค่า Modulus of Elasticity ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือลดลงเล็กน้อย เป็นผลตามค่าการทดสอบแบบ Yield Strength ตามรูปที่ 4.4 มีลักษณะคงที่และค่าการทดสอบแบบ %Elongation ตามรูปที่ 4.6 มีลักษณะคงที่ด้วยเช่นกัน
- III. ช่วงที่ 3 ของการแช่น้ำ ค่า Modulus of Elasticity จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลตามค่าการทดสอบแบบ Yield Strength ตามรูปที่ 4.4 มีลักษณะคงที่ แต่ค่าการทดสอบแบบ %Elongation ตามรูปที่ 4.6 มีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว วัสดุผสมใกล้จะอึดตัว ก็จะส่งผลให้ %Elongation เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้ Modulus of Elasticity ลดลงอย่างรวดเร็ว
- IV. ช่วงสุดท้ายของการแช่น้ำ ค่า Modulus of Elasticity ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลตามค่าการทดสอบแบบ Yield Strength ตามรูปที่ 4.4 มีลักษณะคงที่และค่าการทดสอบแบบ %Elongation ตามรูปที่ 4.6 มีลักษณะคงที่ด้วยเช่นกัน

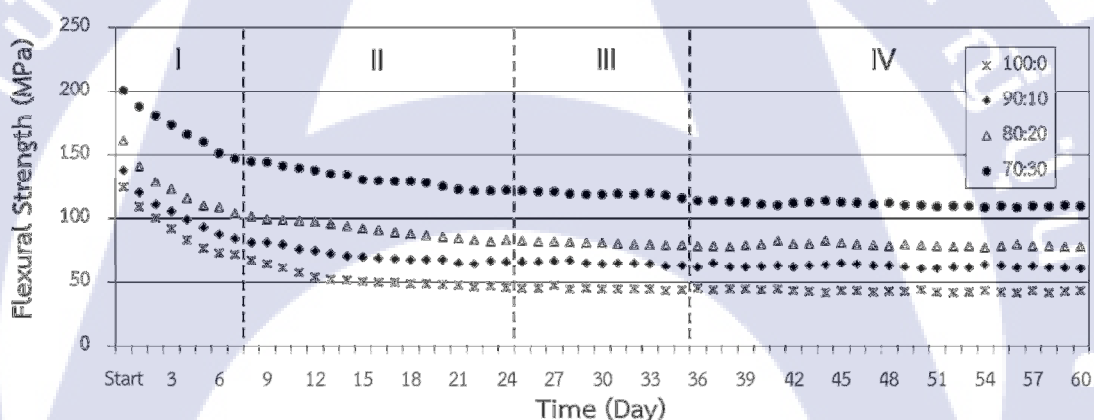
4.2.5 มีผลต่อ Flexural Strength

จากผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Flexural Strength โดยการใช้เครื่องทดสอบ Flexural ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน (ภาคผนวก ค-5) ได้มีการใช้เครื่องทดสอบดัง รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การทดสอบ Flexural

สามารถเขียนเป็นกราฟในแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ Flexural Strength กับเวลา

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อได้ทำการทดสอบคุณสมบัติแบบ Three Point Bending จะให้ค่า Flexural Strength มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย นั่นก็สามารถบอกได้ถึงความสามารถของใยแก้ว เมื่อถูกผสมลงในเมทริกซ์ประเภทโพลีเมอร์ จะมีคุณสมบัติทำให้ค่า Flexural Strength มากขึ้นหรืออีกความหมายหนึ่งคือแข็งแรงขึ้นนั่นเอง โดยสามารถเรียงค่า Flexural Strength จากมากไปหาน้อย คือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

ตามรูปที่ 4.1 เมื่อวัสดุผสมแช่น้ำจะมีผลต่อค่า Flexural Strength เฉพาะช่วงเวลาเริ่มต้นของการแช่น้ำ (I) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9 คือค่า Flexural Strength ลดลง แต่ช่วงเวลาอื่นๆของการแช่น้ำ ไม่มีผลต่อค่า Flexural Strength ผลกราฟที่ได้เหมือนกับ Yield Strength

4.3 ผลกระทบจากการดูดซึมความชื้นที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาพ (Scanning Electron Microscope : SEM)

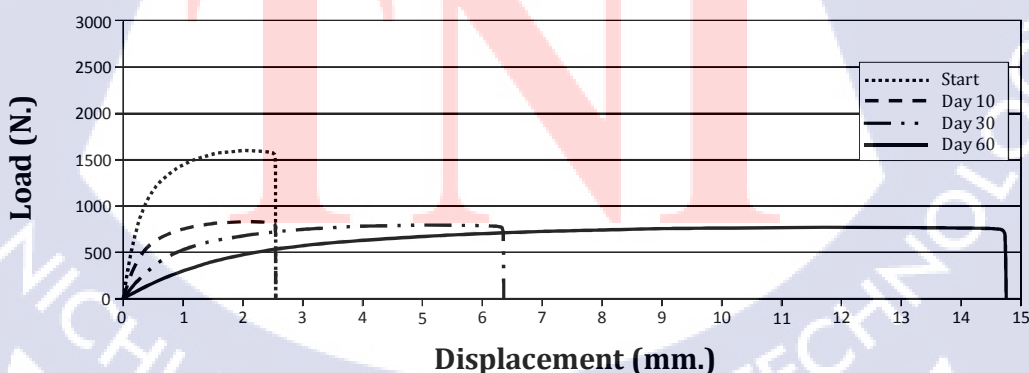
จากผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อสมบัติทางกล โดยใช้เครื่องทดสอบ Tensile จะเห็นว่าพบการเปลี่ยนแปลง เมื่อดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement ของแต่ละวัสดุผสม แบ่งเป็น 4 ช่วงเวลาคือ

- 1) ช่วงก่อนการแช่น้ำ (Start)
- 2) ช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ (Day 10)
- 3) ช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ (Day 30)
- 4) ช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ (Day 60)

โดยทำการเก็บวัสดุผสมที่ผ่านการทดสอบ Tensile ตามช่วงเวลาดังกล่าวนี เพื่อตรวจดูโครงสร้างของวัสดุผสม โดยใช้วิธีการ SEM ที่อัตราขยาย 1000 เท่า สามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละวัสดุผสม ดังต่อไปนี้

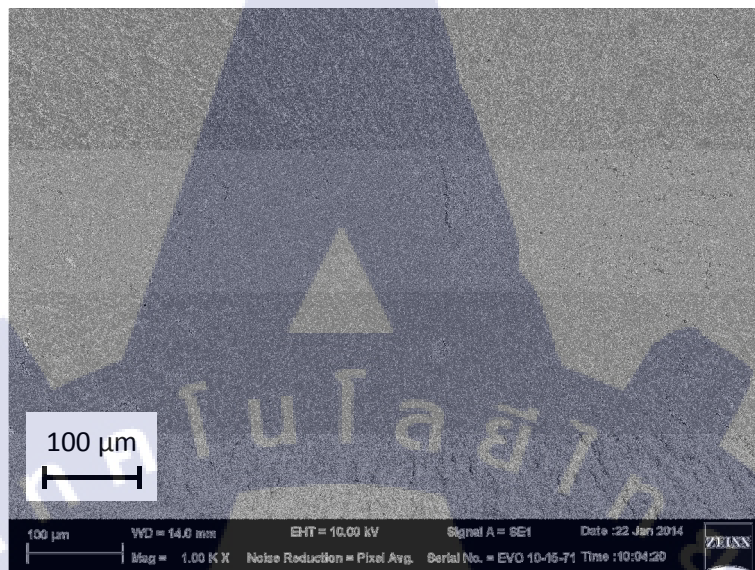
4.3.1 ผล SEM ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0

จากผลการทดลองการโดยการใช้อุปกรณ์ทดสอบ Tensile ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement แสดงดังรูปที่ 4.10



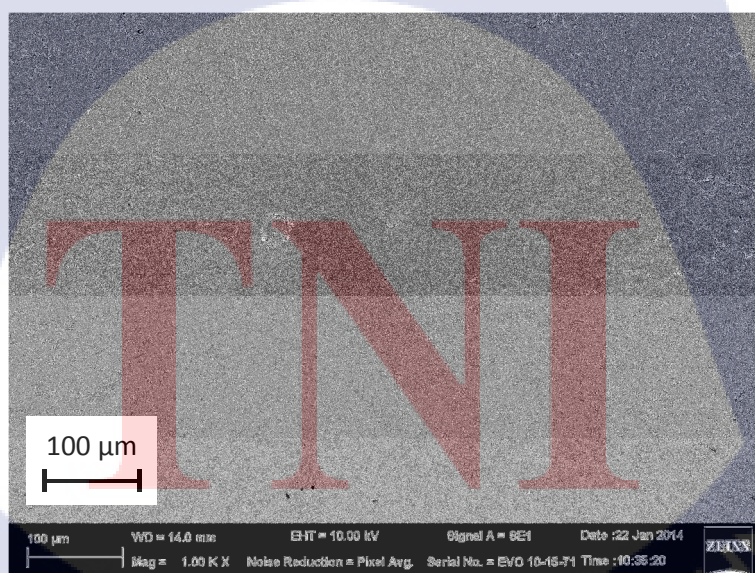
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 100:0

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงก่อนการแช่น้ำ (Start) แสดงดังรูปที่ 4.11



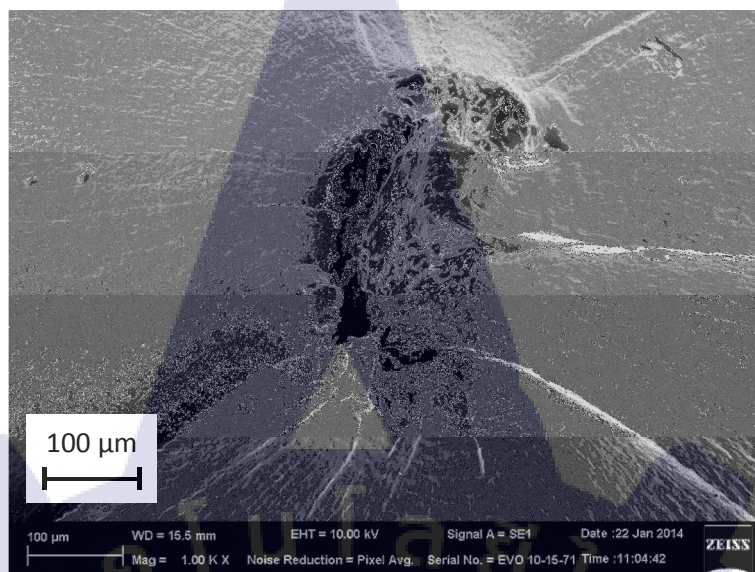
รูปที่ 4.11 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Start

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ (Day 10) แสดงดังรูปที่ 4.12



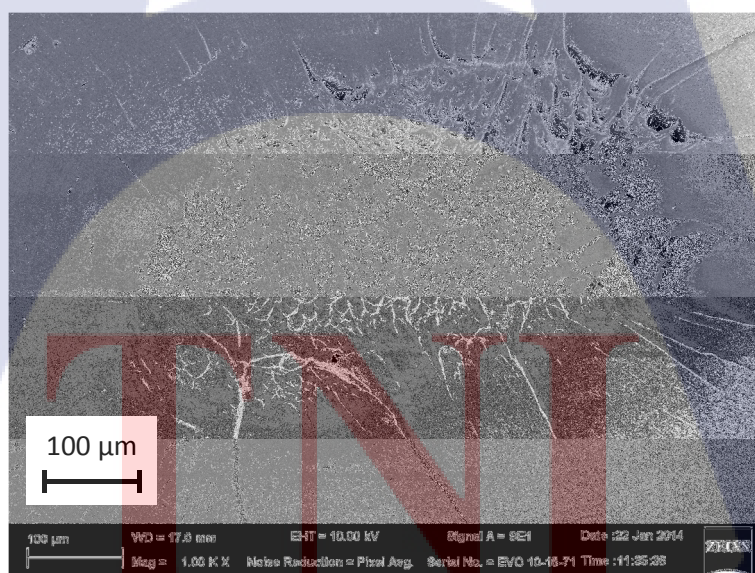
รูปที่ 4.12 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Day 10

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ (Day 30) แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Day 30

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ (Day 60) แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 ช่วง Day 60

จากกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement ดังรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายได้ว่า วัสดุผสมพลาสติกพอลิเอไมด์ต่อใยแก้ว ที่อัตราส่วน 100:0 ก่อนการแช่น้ำค่า Load มีค่า 1608.29 N. และ Displacement มีค่า 2.549 mm. ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ เมื่อผ่านการแช่น้ำ

เป็นเวลา 10 วัน ค่า Load จะลดลง มีค่าเป็น 828.08 N. คิดเป็น 51% ของค่าเริ่มต้น และ Displacement ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Displacement แต่มีผลต่อ Load ซึ่งสามารถดูได้จาก **รูปที่ 4.11** และ **รูปที่ 4.12** โครงสร้างของวัสดุผสมไม่มีการยืดเกาะ และลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ

แต่เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 30 วัน มีผลให้ Displacement เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีค่าถึง 6.371 mm. เพิ่มขึ้นถึง 250% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement ซึ่งสามารถดูได้จาก **รูปที่ 4.13** โครงสร้างของวัสดุผสมมีการยืดเกาะเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

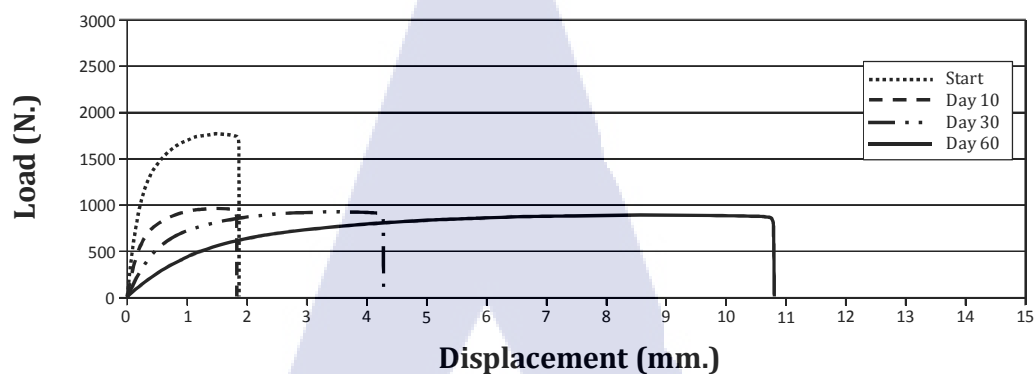
เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 60 วัน ค่า Displacement มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ ซึ่งมีค่าเป็น 14.768 mm. เพิ่มขึ้น 580% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ในความหมายว่า การดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 จะมีผลต่อ Load ในช่วงเวลาเริ่มต้น แต่ไม่มีผลต่อ Displacement แต่เมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่อง จะไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement แปลความหมายได้ว่า วัสดุผสมจะเปราะขึ้นเมื่อได้รับความชื้นในช่วงเริ่มต้น และเมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่องจนใกล้อิ่มตัว วัสดุผสมจะเหนียวขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

การแตกเปราะ (Brittle) คือ การขาดของวัสดุที่ไม่มีการยืดก่อนการแตกขาด เช่น แก้ว เป็นต้น

การแตกเหนียว (Ductile) คือ การขาดของวัสดุที่มีการยืดก่อนการแตกขาด เช่น ยาง พลาสติก เป็นต้น

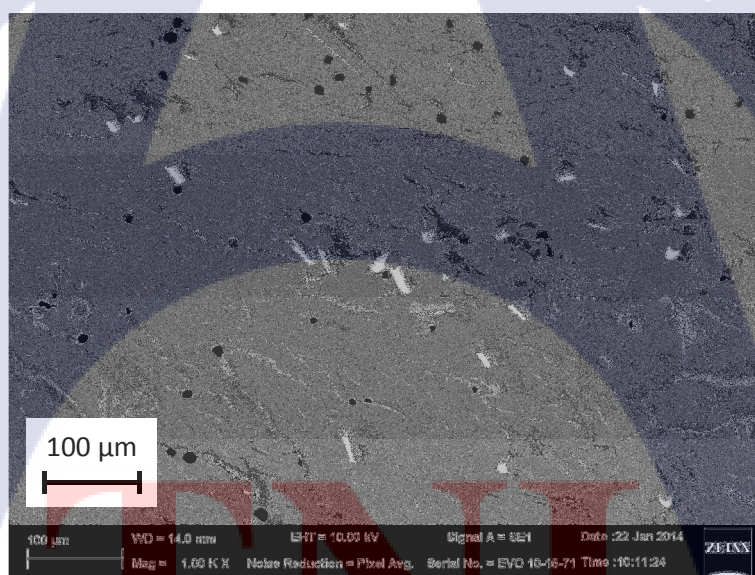
4.3.2 ผล SEM ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10

จากผลการทดลองการโดยใช้เครื่องทดสอบ Tensile ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement แสดงดัง **รูปที่ 4.15**



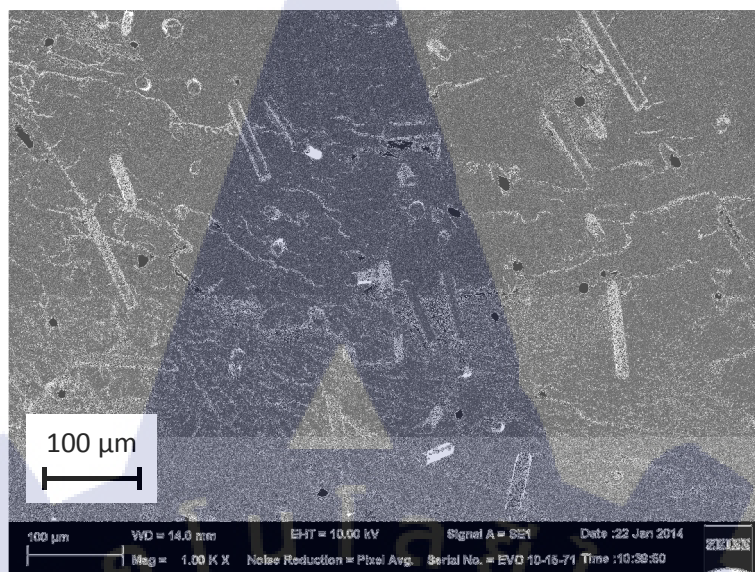
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 90:10

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงก่อนการแช่น้ำ (Start) แสดงดังรูปที่ 4.16



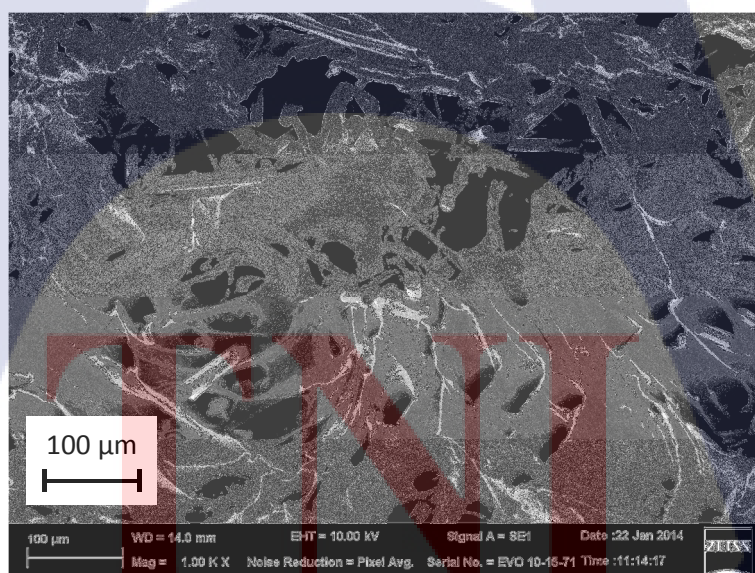
รูปที่ 4.16 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Start

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ (Day 10) แสดงดังรูปที่ 4.17



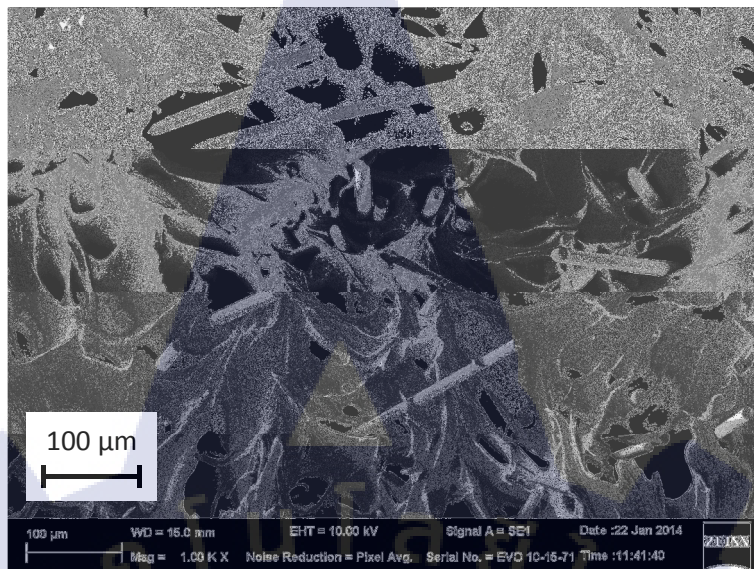
รูปที่ 4.17 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Day 10

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ (Day 30) แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Day 30

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ (Day 60) แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 ช่วง Day 60

จะเห็นว่าการกระจายตัวของใยแก้วในทิศทางตามความยาวของวัสดุผสม และกระจายตัวในรูปแบบที่ไม่แน่นอน จากกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement ดังรูปที่ 4.15 สามารถอธิบายได้ว่า วัสดุผสมพลาสติกพอลิเอไมด์ต่อใยแก้ว ที่อัตราส่วน 90:10 ก่อนการแช่น้ำค่า Load มีค่า 1751.19 N. และ Displacement มีค่า 1.881 mm. ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 10 วัน ค่า Load ลดลง มีค่าเป็น 956.32 N. คิดเป็น 55% ของค่าเริ่มต้น และ Displacement ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Displacement แต่มีผลต่อ Load ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 โครงสร้างของวัสดุผสมไม่มีการยืดยาว ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ

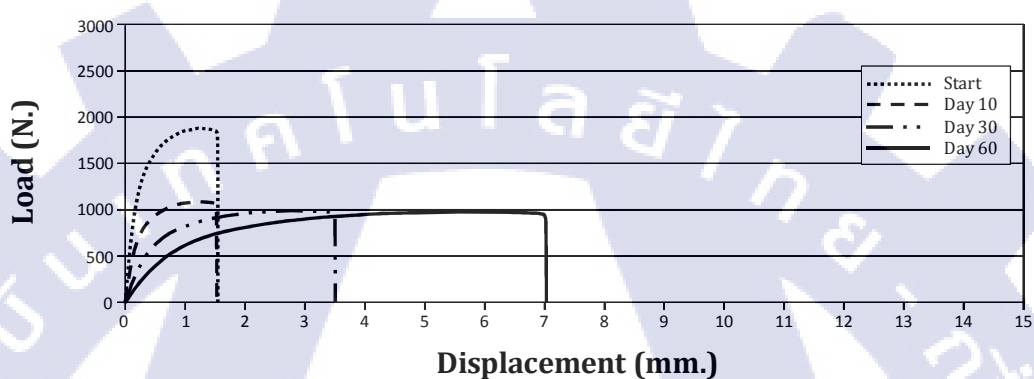
แต่เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 30 วัน มีผลให้ Displacement เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีค่าถึง 4.331 mm. เพิ่มขึ้นถึง 230% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.18 โครงสร้างของวัสดุผสมมีการยืดยาวเพิ่มขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 60 วัน ค่า Displacement มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่มีค่า 10.921 mm. เพิ่มขึ้น 580% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ในความหมายว่า การดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 90:10 จะมีผลต่อ Load ในช่วงเวลาเริ่มต้น แต่ไม่มีผลต่อ Displacement แต่เมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่อง จะไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement แปลความหมายได้

ว่า วัสดุผสมจะเปราะขึ้นเมื่อได้รับความชื้นในช่วงเริ่มต้น และเมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่องจนใกล้อิ่มตัว วัสดุผสมจะเหนียวขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

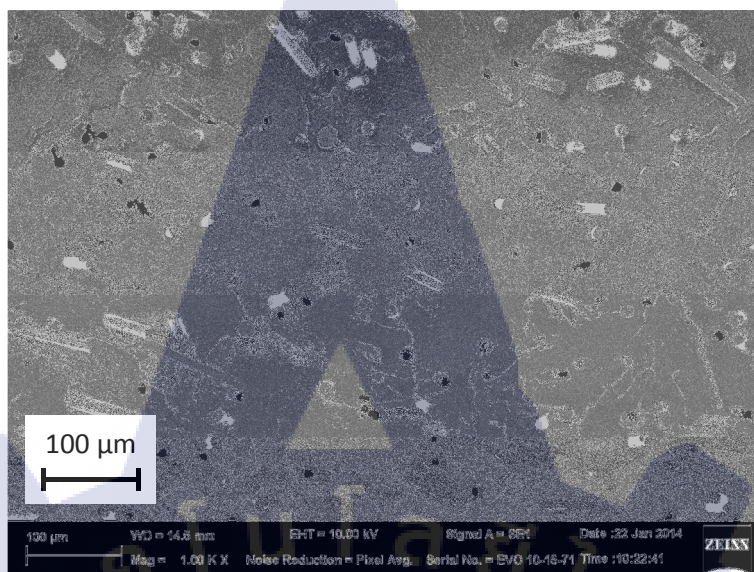
4.3.3 ผล SEM ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20

จากผลการทดลองการโดยการใช้อุปกรณ์ทดสอบ Tensile ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement แสดงดังรูปที่ 4.20



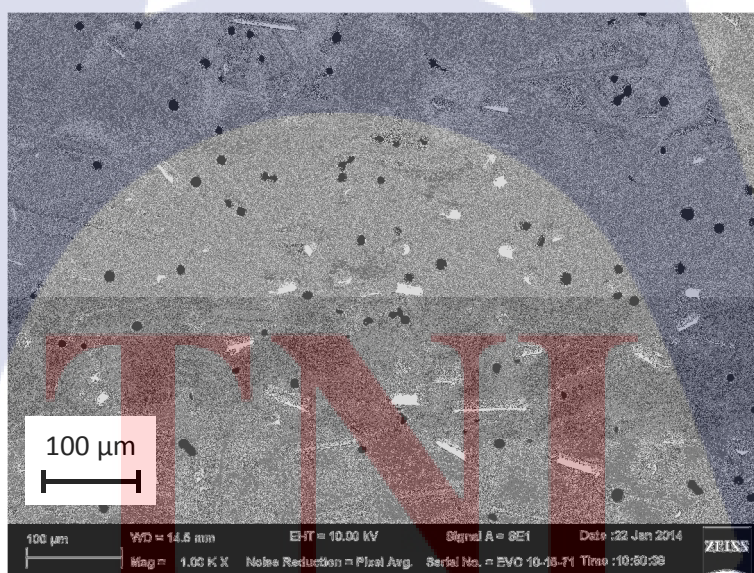
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 80:20

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงก่อนการแช่น้ำ (Start) แสดงดังรูปที่ 4.21



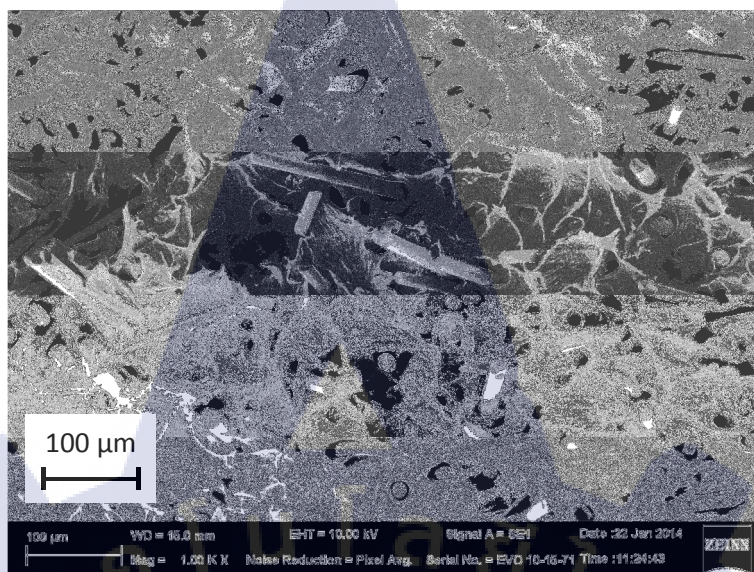
รูปที่ 4.21 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Start

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ (Day 10) แสดงดังรูปที่ 4.22



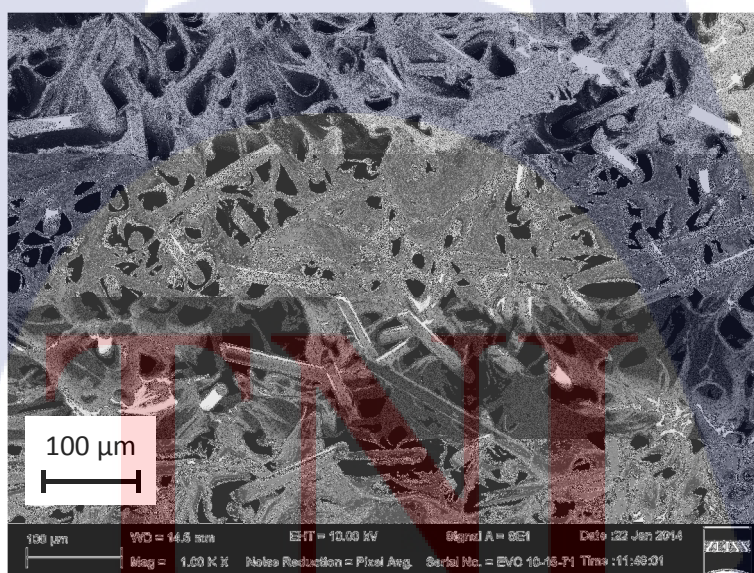
รูปที่ 4.22 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Day 10

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ (Day 30) แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Day 30

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ (Day 60) แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 80:20 ช่วง Day 60

จะเห็นว่ามีการกระจายตัวของใยแก้วในทิศทางตามความยาวของวัสดุผสม และกระจายตัวในรูปแบบที่ไม่แน่นอน จากกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement ดังรูปที่ 4.20 สามารถอธิบายได้ว่า วัสดุผสมพลาสติกพอลิเอไมด์ต่อใยแก้ว ที่อัตราส่วน 80:20 ก่อนการแช่น้ำค่า

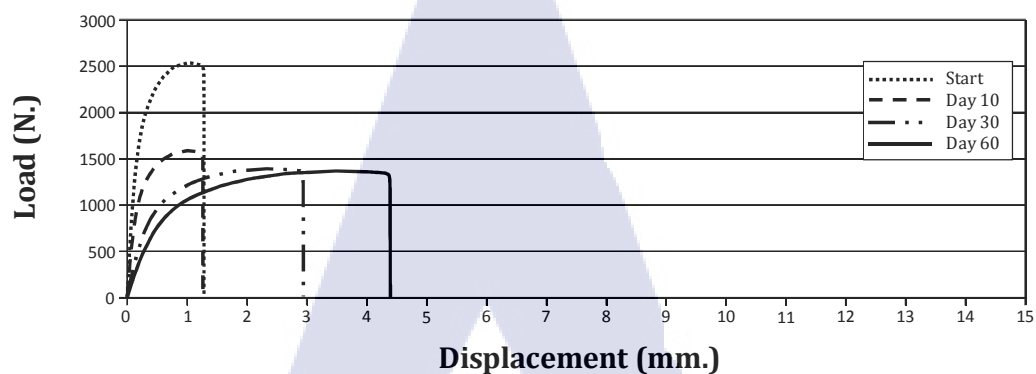
Load มีค่า 1883.12 N. และ Displacement มีค่า 1.596 mm. ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 10 วัน ค่า Load มีค่าลดลง มีค่าเป็น 1073.79 N. คิดเป็น 57% ของค่าเริ่มต้น และ Displacement ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Displacement แต่มีผลต่อ Load ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 โครงสร้างของวัสดุผสมไม่มีการยืดเกาะ ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ

แต่เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 30 วัน มีผลให้ Displacement เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีค่าถึง 3.547 mm. เพิ่มขึ้นถึง 222% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.23 โครงสร้างของวัสดุผสมมีการยืดเกาะเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 60 วัน ค่า Displacement มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ มีค่า 7.124 mm. เพิ่มขึ้น 446% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ในความหมายว่า การดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 100:0 จะมีผลต่อ Load ในช่วงเวลาเริ่มต้น แต่ไม่มีผลต่อ Displacement แต่เมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่อง จะไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement แปลความหมายได้ว่า วัสดุผสมจะเปราะขึ้นเมื่อได้รับความชื้นในช่วงเริ่มต้น และเมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่องจนใกล้อิ่มตัว วัสดุผสมจะเหนียวขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

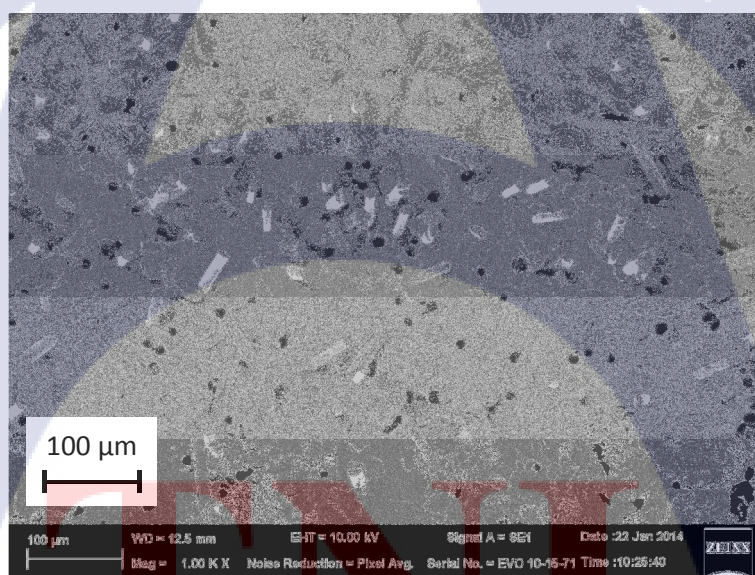
4.3.4 ผล SEM ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30

จากผลการทดลองการโดยใช้เครื่องทดสอบ Tensile ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement แสดงดังรูปที่ 4.25



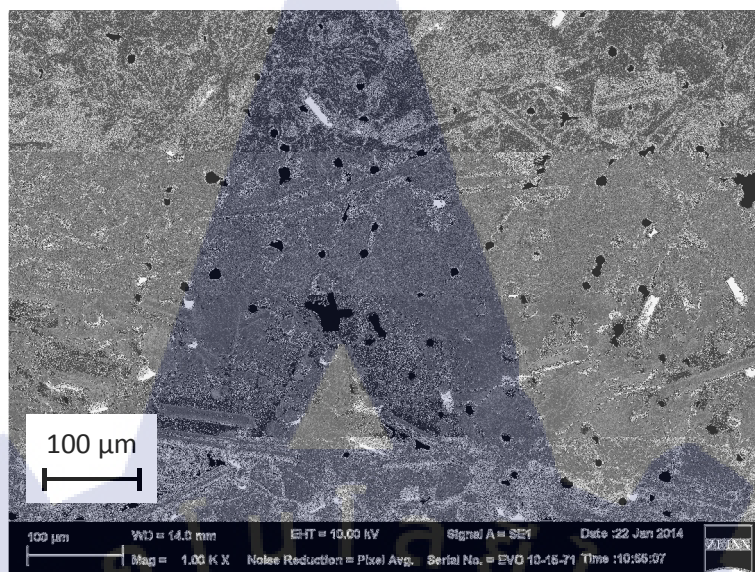
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ Load-Displacement ของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว 70:30

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงก่อนการแช่น้ำ (Start) แสดงดังรูปที่ 4.26



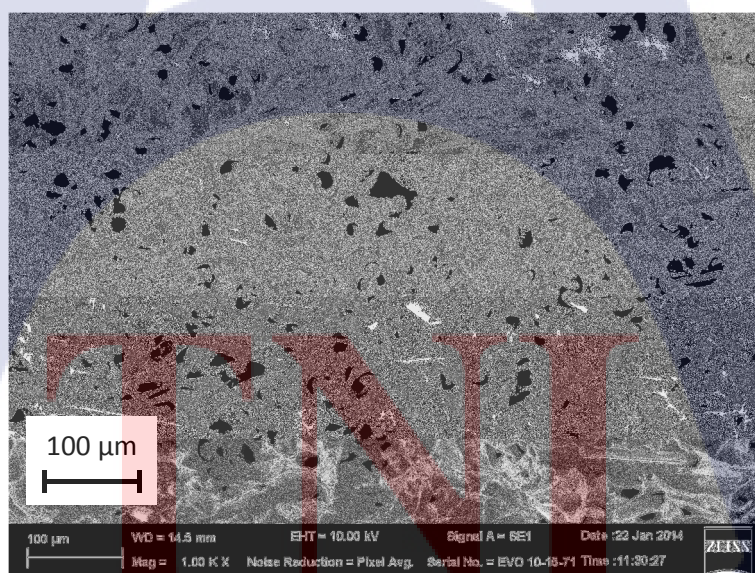
รูปที่ 4.26 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Start

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ (Day 10) แสดงดังรูปที่ 4.27



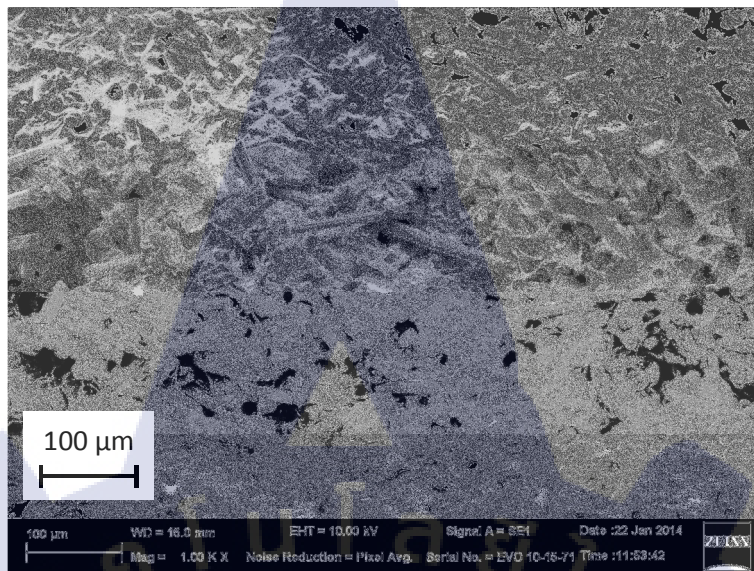
รูปที่ 4.27 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Day 10

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ (Day 30) แสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Day 30

โครงสร้างของวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ (Day 60) แสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 โครงสร้างวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 ช่วง Day 60

จะเห็นว่าการกระจายตัวของใยแก้วในทิศทางตามความยาวของวัสดุผสม และกระจายตัวในรูปแบบที่ไม่แน่นอน เหมือนกับทุกอัตราส่วนผสมที่ผ่านมา จากกราฟความสัมพันธ์ Load-Displacement ดังรูปที่ 4.25 สามารถอธิบายได้ว่า วัสดุผสมพลาสติกพอลิเอไมด์ต่อใยแก้ว ที่อัตราส่วน 70:30 ก่อนการแช่น้ำค่า Load มีค่า 2544.97 N. และ Displacement มีค่า 1.296 mm. ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 10 วัน ค่า Load ลดลง มีค่าเป็น 1576.81 N. คิดเป็น 62% ของค่าเริ่มต้น และ Displacement ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Displacement แต่มีผลต่อ Load ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 โครงสร้างของวัสดุผสมไม่มีการยืดเกาะ ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ

แต่เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 30 วัน มีผลให้ Displacement เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีค่าถึง 2.951 mm. เพิ่มขึ้นถึง 228% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความชื้นไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.28 โครงสร้างของวัสดุผสมมีการยืดเกาะเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว

เมื่อผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 60 วัน ค่า Displacement มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ มีค่า 4.409 mm. เพิ่มขึ้น 340% ของค่าเริ่มต้น แต่ค่า Load เกือบจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย ในความหมายว่า การดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว อัตราส่วน 70:30 จะมีผลต่อ Load ในช่วงเวลาเริ่มต้น แต่ไม่มีผลต่อ Displacement แต่เมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่อง จะไม่มีผลต่อ Load แต่มีผลต่อ Displacement แปลความหมายได้

ว่า วัสดุผสมจะเปราะขึ้นเมื่อได้รับความชื้นในช่วงเริ่มต้น และเมื่อวัสดุผสมได้รับความชื้นอย่างต่อเนื่องจนใกล้อิ่มตัว วัสดุผสมจะเหนียวขึ้น ลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลกระทบบจากการดูดซึมความชื้นของวัสดุผสมพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ต่อใยแก้ว ที่มีผลต่อสมบัติทางกล เมื่อมีการผสมอัตราส่วนพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ต่อใยแก้ว ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การแช่น้ำที่มีผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสม

ลำดับ ที่	ผลต่อสมบัติทางกล	ช่วงเวลาการแช่น้ำ			
		I	II	III	IV
1	Yield Strength	ลดลง	คงที่	คงที่	คงที่
2	Ultimate Tensile Strength	ลดลง	คงที่	คงที่	คงที่
3	% Elongation	คงที่	คงที่	เพิ่มขึ้น	คงที่
4	Modulus of Elasticity	ลดลง	คงที่	ลดลง	คงที่
5	Flexural Strength	ลดลง	คงที่	คงที่	คงที่

พิจารณาตารางที่ 5.1 สามารถสรุปผลการทดลองจำแนกเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

5.1.1 Yield Strength

จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อได้รับความชื้นโดยวิธีการแช่น้ำ จะมีผลต่อสมบัติทางกลด้าน Yield Strength เฉพาะช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงเริ่มต้น (I) คือ ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 7 โดยมีผลทำให้ Yield Strength มีค่าลดลง หลังจากนั้นความชื้นจะไม่ส่งผลต่อ Yield Strength และ Yield Strength จะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.4 เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Tensile จะให้ค่า Yield Strength มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย โดยสามารถเรียงค่า Yield Strength จากมากไปหาน้อยคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

5.1.2 Ultimate Tensile Strength

จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อได้รับความชื้นโดยวิธีการแช่น้ำ จะมีผลต่อสมบัติทางกลด้าน Ultimate Tensile Strength เฉพาะช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงเริ่มต้น (I) คือ ช่วง

วันที่ 1 ถึงวันที่ 7 โดยมีผลทำให้ Ultimate Tensile Strength มีค่าลดลง หลังจากนั้นความชื้นจะไม่ส่งผลต่อ Ultimate Tensile Strength และ Ultimate Tensile Strength จะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.5 เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Tensile จะให้ค่า Ultimate Tensile Strength มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย โดยสามารถเรียงค่า Ultimate Tensile Strength จากมากไปหาน้อยคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

5.1.3 %Elongation

จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อได้รับความชื้นโดยวิธีการแช่น้ำ จะมีผลต่อสมบัติทางกลด้าน %Elongation เฉพาะช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงที่ 3 (III) คือ ช่วงวันที่ 25 ถึงวันที่ 35 โดยมีผลทำให้ %Elongation มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นความชื้นจะไม่ส่งผลต่อ %Elongation และ %Elongation จะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.6 เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Tensile จะให้ค่า %Elongation น้อยกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย โดยสามารถเรียงค่า %Elongation จากน้อยไปหามากคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

5.1.4 Modulus of Elasticity

จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อได้รับความชื้นโดยวิธีการแช่น้ำ จะมีผลต่อสมบัติทางกลด้าน Modulus of Elasticity ในช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงเริ่มต้น (I) คือ ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 7 โดยมีผลทำให้ Modulus of Elasticity มีค่าลดลง ส่วนช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงที่ 2 (II) Modulus of Elasticity จะคงที่ และความชื้นจะมีผลต่อสมบัติทางกลด้าน Modulus of Elasticity อีกครั้งในช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงที่ 3 (III) คือ ช่วงวันที่ 25 ถึงวันที่ 35 โดยมีผลทำให้ Modulus of Elasticity มีค่าลดลง หลังจากนั้นความชื้นจะไม่ส่งผลต่อ Modulus of Elasticity และ Modulus of Elasticity จะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.7 เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Tensile จะให้ค่า Modulus of Elasticity มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย โดยสามารถเรียงค่า Modulus of Elasticity จากมากไปหาน้อยคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

5.1.5 Flexural Strength

จะเห็นว่าวัสดุผสมพลาสติกต่อใยแก้ว เมื่อได้รับความชื้นโดยวิธีการแช่น้ำ และทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Flexural แบบ Three point bending จะมีผลต่อสมบัติทางกลด้าน Flexural Strength เฉพาะช่วงเวลาการแช่น้ำในช่วงเริ่มต้น (I) คือ ช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 7 โดยมีผลทำให้ Flexural Strength มีค่าลดลง หลังจากนั้นความชื้นจะไม่ส่งผลต่อ Flexural Strength และ Flexural Strength จะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.9 เมื่อใยแก้วผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่มาก เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้าน Flexural แบบ Three Point Bending จะให้ค่า Flexural Strength มากกว่าใยแก้วที่ผสมในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย โดยสามารถเรียงค่า Flexural Strength จากมากไปหาน้อยคือ 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาพของวัสดุผสมที่ผ่านการทดสอบแบบ Tensile โดยได้เลือกวัสดุผสม 4 ช่วงเวลาคือ

- (1) ช่วงก่อนการแช่น้ำ
- (2) ช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ
- (3) ช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ
- (4) ช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ

มาทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาพ โดยวิธีการ SEM (Scanning Electron Microscope) ผลที่ได้คือ วัสดุผสมช่วงก่อนการแช่น้ำ และวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 10 ของการแช่น้ำ จะมีลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเปราะ คือ การขาดของวัสดุผสมไม่มีการยืดก่อนการแตกขาด แต่ วัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 30 ของการแช่น้ำ และวัสดุผสมช่วงเวลาวันที่ 60 ของการแช่น้ำ จะมีลักษณะการแตกจะเป็นแบบแตกเหนียว คือ การขาดของวัสดุผสมจะลักษณะการยืดก่อนการแตกขาด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อให้สามารถเห็นผลกระทบที่ชัดเจนกว่าที่ปรากฏในการทดลองนี้ ควรจะเพิ่มอัตราส่วนผสมของใยแก้วในวัสดุผสมให้มากขึ้น เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมและผลกระทบจากการดูดซึมความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกล แต่ต้องตรวจสอบถึงความเป็นไปได้ของเครื่องจักร

5.2.2 ควรระบุเวลาในการทดสอบที่แน่นอนในเวลาเดียวกันทุกวัน รวมทั้งพฤติกรรมของผู้ทดสอบต้องมีความเที่ยงตรง ปฏิบัติแบบเดียวกันทุกวัน เพื่อให้ได้ผลของการทดสอบที่เป็นจริง ไม่คลาดเคลื่อน

5.2.3 ควรตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของวัสดุผสม ด้วยวิธีการ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อให้ได้ทราบถึงผลของ Hydrolysis ของวัสดุผสมว่าแต่ละช่วงเวลา มีสถานะแตกต่างกันอย่างไร



บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] W. Wang; M. Sain; and P.A. Cooper. (2006). Study of Moisture Absorption in Natural Fiber Plastic Composites. **Composites Science and Technology**. 66 (2006) : 379-386.
- [2] H.M. Akil; L.W. Cheng; Z.A. M. Ishak; A.A. Bakar; and M.A. A. Rahman. (2009). Water Absorption Study on Pultruded Jute Fibre Reinforced Unsaturated Polyester Composites. **Composites Science and Technology**. 69 (2009) : 1,942–1,948.
- [3] H. Alamri; and I.M. Low. (2012). Mechanical Properties and Water Absorption Behaviour of Recycled Cellulose Fibre Reinforced Epoxy Composites. **Polymer Testing**. 31 (2012) : 620–628.
- [4] D. Ferreno; I. Carrascal; E. Ruiz; and J.A. Casado. (2011). Characterisation by Means of a Finite Element Model of the Influence of Moisture Content on the Mechanical and Fracture Properties of the Polyamide 6 Reinforced with Short Glass Fibre. **Polymer Testing**. 30 (2011) : 420–428.
- [5] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2556). **คอมโพสิต (Composite)**. สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556, จาก http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem1052ndb_ch2.pdf
- [6] W.F. Smith; and J. Hashemi. (2003). **Foundations of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 4/e**. แปลและเรียบเรียงโดย แม้น อมรสิทธิ์; สมชัย อัครทิวา; และ ธรรมบุญ อุดมมัน. กรุงเทพฯ : ศูนย์หนังสือจุฬาฯ.
- [7] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2555). **กลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials)**. สืบค้นเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556, จาก http://pioneer.netserve.chula.ac.th/~spairod/mech_of_mat.html
- [8] Monash University. (2012). **Non Steady-State Diffusion (Fick's Second Law)**. Retrieved April 2, 2013, from <http://www.monash.edu.au>
- [9] A. Zafar; F. Bertocco; J. Schjodt-Thomsen; and J.C. Rauhe. (2012). Investigation of the Long Term Effects of Moisture on Carbon Fibre and Epoxy Matrix Composites. **Composites Science and Technology**. 72 (2012) : 656-66.

- [10] Z. Leman; S.M. Sapuan; A.M. Saifol; M.A. Maleque; and M.M.H.M. Ahmad. (2008). Moisture Absorption Behavior of Sugar Palm Fiber Reinforced Epoxy Composites. **Materials and Design**. 29 (2008) : 1,666–1,670.
- [11] ASTM International. (2002). **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D 638-02a)**. West Conshohocken : n.p.
- [12] ASTM International. (2002). **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D 790-02a)**. West Conshohocken : n.p.
- [13] S.J. Christian; and S.L. Billington. (2012). Moisture Diffusion and its Impact on Uniaxial Tensile Response of Biobased Composites. **Composites: Part B**. 43 (2012) : 2,303-2,312.



TNI

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ ใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุผสม

TNI

ก-1 ค่าคุณสมบัติของพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์

ค่าคุณสมบัติของพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ (PA) 66 ของบริษัท Invista Engineering Polymer Lot การผลิตหมายเลข NK4CC8J1 แสดงดังรูปที่ ก-1

MTECH® N2600-N

NYLON ENGINEERING PLASTICS

Main Properties

Properties	Standards	Unit	Dry as Molded
Physical			
Specific Gravity, 23°C (73°F)	ASTM D 1505		1.14
Moisture Absorption, 23°C (73°F), 50% RH, 24 hr	ASTM D 3045	%	0.12 (max)
Moisture Absorption, 23°C (73°F), 50% RH, 7 days	ASTM D 3045	%	0.15 (max)
Tensile Elongation @ Break, 23°C (73°F)	ASTM D 638	%	50
Flexural Modulus, Secant, 23°C (73°F)	ASTM D 790	MPa (psi)	2,700 (391,500)
Flexural Strength, 23°C (73°F)	ASTM D 790	MPa (psi)	116 (16,875)
Notched Izod Impact @ 23°C (73°F)	ASTM D 256	J/m (ft-lb/in)	48 (0.75)
Notched Izod Impact @ -40°C (-104°F)	ASTM D 256	J/m (ft-lb/in)	
Thermal			
Deflection Temperature Under Load Unannealed @ 1.82 MPa (264 psi)	ASTM D 648	°C (°F)	82 (180)
Melting Point	ASTM D 789	°C (°F)	250 (482)
Ignition Characteristics Flame, Ending-UL	UL 94		

Typical properties can be subject to change without further notice.

Identification Code

The information contained in this document is supplied in good faith. However it is given purely as an indication. It shall not be construed in any way as a formal comment or warranty on our part, notably in respect of the eventual infringement of any rights or third parties who may use our products. The listed values of properties are for natural grade, if not other wise specified.

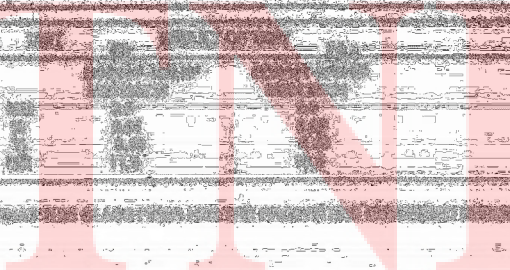
รูปที่ ก-1 ค่าคุณสมบัติของพลาสติกชนิดพอลิเอไมด์ (PA) 66

ก-2 ค่าคุณสมบัติของใยแก้ว

ค่าคุณสมบัติของใยแก้ว (Glass Fiber) ชนิด E-Glass Fiber ของบริษัท Nippon Electric Glass (Malaysia) Lot การผลิตหมายเลข M20120751 แสดงดังรูปที่ ก-2

Nippon Electric Glass (Malaysia) Sdn. Bhd. (211705-M)

CERTIFICATE OF ANALYSIS ORIGINAL

PRODUCT NAME E-Glass Fiber		LOT NO. M20120751	
QUANTITY 1000 kg		DATE OF ANALYSIS 30/08/2012	
ANALYST TANGKONG INTERNATIONAL CO., LTD. 231 PATTANAKARNI SUKHUMVIT ROAD SUKHUMVIT, BANGKOK 10250 THAILAND		TEST METHOD JIS S 5005	
TEST RESULT Tensile Strength: 2000 MPa Elongation at Break: 3.5% Modulus: 70 GPa Density: 2.5 g/cm³ pH: 3.5		TEST RESULT Tensile Strength: 2000 MPa Elongation at Break: 3.5% Modulus: 70 GPa Density: 2.5 g/cm³ pH: 3.5	
			
NIPPON ELECTRIC GLASS (MALAYSIA) SDN. BHD.			
DATE ISSUED: 30/08/2012			

รูปที่ ก-2 ค่าคุณสมบัติของใยแก้ว (Glass Fiber)

ภาคผนวก ข.

บันทึกผลการทดลอง การทดสอบชั่งน้ำหนัก

TNI

ข-1 บันทึกผลการทดลอง การทดสอบขังน้ำหนักร

ทำการบันทึกน้ำหนักของวัสดุผสม โดยชั่งน้ำหนักวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และชั่งน้ำหนักทุกวันเป็นเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุกวัน แสดงดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 น้ำหนักของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว

วันที่ชั่งน้ำหนัก	น้ำหนักของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (กรัม)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
ก่อนแช่น้ำ	5.569	5.708	6.264	6.511
1	5.648	5.780	6.328	6.565
2	5.678	5.807	6.352	6.586
3	5.700	5.827	6.370	6.602
4	5.718	5.843	6.385	6.616
5	5.733	5.856	6.398	6.627
6	5.746	5.868	6.410	6.637
7	5.758	5.878	6.420	6.647
8	5.768	5.887	6.429	6.655
9	5.777	5.897	6.438	6.663
10	5.785	5.905	6.446	6.670
11	5.793	5.913	6.454	6.677
12	5.800	5.921	6.462	6.684
13	5.807	5.929	6.470	6.691
14	5.814	5.936	6.477	6.698
15	5.820	5.943	6.484	6.704
16	5.826	5.949	6.491	6.710
17	5.832	5.955	6.497	6.716
18	5.838	5.961	6.503	6.722
19	5.843	5.967	6.509	6.728
20	5.848	5.973	6.515	6.733
21	5.853	5.978	6.521	6.738

วันที่ชั่งน้ำหนัก	น้ำหนักของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (กรัม)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
22	5.858	5.983	6.526	6.743
23	5.863	5.988	6.531	6.748
24	5.868	5.993	6.536	6.753
25	5.873	5.998	6.541	6.758
26	5.878	6.003	6.546	6.762
27	5.883	6.008	6.551	6.766
28	5.888	6.012	6.555	6.770
29	5.893	6.016	6.559	6.774
30	5.898	6.020	6.563	6.778
31	5.902	6.024	6.567	6.782
32	5.906	6.028	6.571	6.785
33	5.910	6.032	6.574	6.788
34	5.914	6.036	6.577	6.791
35	5.918	6.040	6.580	6.794
36	5.922	6.044	6.583	6.797
37	5.925	6.047	6.585	6.800
38	5.927	6.050	6.588	6.803
39	5.930	6.052	6.591	6.805
40	5.933	6.054	6.593	6.808
41	5.936	6.056	6.595	6.810
42	5.939	6.059	6.597	6.813
43	5.941	6.061	6.599	6.815
44	5.943	6.063	6.601	6.817
45	5.945	6.065	6.603	6.819
46	5.946	6.066	6.604	6.820
47	5.947	6.067	6.605	6.821
48	5.948	6.068	6.606	6.822
49	5.949	6.069	6.607	6.823

วันที่ชั่งน้ำหนัก	น้ำหนักของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (กรัม)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
50	5.950	6.070	6.608	6.823
51	5.951	6.071	6.609	6.823
52	5.952	6.072	6.609	6.823
53	5.953	6.072	6.609	6.823
54	5.953	6.072	6.609	6.823
55	5.953	6.072	6.609	6.823
56	5.953	6.072	6.609	6.823
57	5.953	6.072	6.609	6.823
58	5.953	6.072	6.609	6.823
59	5.953	6.072	6.609	6.823
60	5.953	6.072	6.609	6.823

ภาคผนวก ค.

บันทึกผลการทดลอง การทดสอบสมบัติทางกล

TNI

ค-1 บันทึกผลการทดลอง Yield Strength

ทำการบันทึกผลการทดลองการดูซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Yield Strength โดยการใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน โดยทดสอบวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และทดสอบทุกวันเป็นเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 Yield Strength ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว

วันที่ทดสอบ	ค่า Yield Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
ก่อนแช่น้ำ	75.4	83.9	92.2	127.2
1	62.5	71.7	84.2	116.4
2	57.0	64.9	76.2	110.4
3	52.7	60.8	71.5	103.9
4	47.3	56.1	66.9	96.0
5	43.3	51.4	63.4	90.6
6	39.0	47.4	58.7	85.9
7	39.1	45.7	56.2	83.1
8	38.7	45.8	53.7	80.0
9	38.2	45.5	52.8	78.9
10	38.4	45.3	52.0	78.0
11	38.1	45.7	51.7	76.9
12	38.0	45.0	51.0	76.0
13	38.0	44.2	50.9	74.8
14	38.0	44.4	50.3	72.8
15	37.5	43.5	49.1	71.6
16	37.6	43.1	48.4	70.5
17	37.7	43.1	48.0	69.4
18	37.4	43.7	48.0	69.7
19	37.4	43.6	47.9	67.5
20	37.6	43.4	47.9	67.4

วันที่ทดสอบ	ค่า Yield Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
21	37.2	42.9	46.9	66.9
22	37.3	42.8	46.7	67.1
23	37.1	42.7	47.0	66.2
24	36.9	43.1	46.8	66.1
25	37.0	42.6	46.8	66.1
26	36.3	42.5	46.3	65.3
27	36.1	42.4	46.2	65.4
28	36.3	41.9	46.1	64.4
29	36.4	42.3	46.4	64.2
30	35.6	41.7	46.3	64.9
31	35.4	41.7	46.3	64.9
32	36.0	41.6	46.6	64.8
33	35.8	41.5	45.6	64.9
34	35.3	41.4	45.5	64.8
35	34.8	40.9	44.8	64.8
36	35.2	40.7	44.4	64.7
37	34.5	40.2	44.8	64.6
38	33.8	39.7	44.7	64.5
39	33.1	39.2	44.5	64.6
40	32.4	38.2	44.2	64.8
41	32.2	38.0	43.9	64.7
42	32.1	37.9	43.8	64.5
43	32.5	36.5	44.2	66.1
44	31.7	37.4	44.1	64.1
45	31.9	36.9	44.4	64.9
46	31.6	37.0	44.7	64.8
47	31.8	37.1	44.6	64.8
48	31.6	37.2	44.5	64.8

วันที่ทดสอบ	ค่า Yield Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
49	31.6	37.4	44.5	64.7
50	31.6	37.0	44.1	64.5
51	31.5	37.0	44.2	64.5
52	31.5	36.9	44.4	64.4
53	31.5	36.9	44.2	64.3
54	31.5	36.9	44.1	64.2
55	31.5	36.9	43.9	64.5
56	31.5	36.8	44.2	64.4
57	31.4	36.8	44.1	64.3
58	31.4	36.8	43.9	64.2
59	31.4	36.7	44.2	64.1
60	31.5	36.7	44.0	64.0

ค-2 บันทึกผลการทดลอง Ultimate Tensile Strength

ทำการบันทึกผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Ultimate Tensile Strength โดยการใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน โดยทดสอบวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และทดสอบทุกวันเป็นเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ ค-2

ตารางที่ ค-2 Ultimate Tensile Strength ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว

วันที่ทดสอบ	ค่า Ultimate Tensile Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
ก่อนแช่น้ำ	83.8	91.2	98.1	132.6
1	69.4	77.9	89.6	121.3
2	63.3	70.5	81.1	115.0
3	58.5	66.1	76.1	108.2
4	52.5	61.0	71.2	100.0
5	48.1	55.9	67.4	94.4
6	43.3	51.5	62.4	89.5
7	43.4	49.7	59.8	86.5
8	43.5	50.4	57.7	84.2
9	43.0	50.0	56.8	83.0
10	43.1	49.8	55.9	82.1
11	42.8	50.2	55.6	81.0
12	42.7	49.5	54.9	80.0
13	42.7	48.6	54.7	78.7
14	42.7	48.8	54.1	77.5
15	42.6	48.3	53.4	76.2
16	42.7	47.9	52.7	74.9
17	42.8	47.9	52.1	73.8
18	42.5	48.5	52.1	74.2
19	42.5	48.4	52.1	72.5

วันที่ทดสอบ	ค่า Ultimate Tensile Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
20	42.8	48.2	52.1	72.5
21	42.8	48.2	51.6	71.9
22	42.9	48.0	51.4	72.2
23	42.7	48.0	51.7	71.9
24	42.4	48.4	51.5	71.9
25	42.5	47.8	51.4	71.8
26	42.2	48.3	51.4	71.7
27	42.0	48.2	51.3	71.9
28	42.2	47.6	51.2	71.6
29	42.3	48.1	51.6	71.4
30	41.8	47.9	52.0	72.1
31	41.7	47.9	52.0	72.1
32	42.3	47.8	52.4	72.0
33	42.7	48.2	51.8	72.1
34	42.0	48.2	51.7	72.0
35	42.0	48.1	51.5	72.0
36	42.9	48.5	51.6	71.9
37	42.5	48.5	52.1	71.8
38	42.2	48.4	52.0	71.7
39	41.8	48.3	51.8	71.8
40	41.5	47.8	51.3	72.0
41	41.3	47.5	51.1	71.9
42	41.2	47.4	51.0	71.6
43	41.6	45.7	51.4	73.4
44	40.7	46.8	51.3	71.3
45	40.9	46.1	51.6	72.1
46	40.6	46.2	52.0	71.9

วันที่ทดสอบ	ค่า Ultimate Tensile Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
47	40.8	46.4	51.9	72.0
48	40.5	46.6	51.7	72.0
49	40.5	46.7	51.7	71.9
50	40.5	46.3	51.2	71.7
51	40.4	46.2	51.3	71.6
52	40.4	46.2	51.6	71.5
53	40.4	46.1	51.4	71.4
54	40.4	46.1	51.3	71.3
55	40.4	46.1	51.1	71.7
56	40.3	46.0	51.4	71.6
57	40.3	46.0	51.3	71.5
58	40.3	46.0	51.1	71.4
59	40.3	45.9	51.4	71.2
60	40.4	45.9	51.1	71.1

ค-3 บันทึกผลการทดลอง %Elongation

ทำการบันทึกผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ %Elongation โดยการใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน โดยทดสอบวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และทดสอบทุกวันเป็นเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ ค-3

ตารางที่ ค-3 %Elongation ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว

วันที่ทดสอบ	ค่า %Elongation ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว			
	100:0	90:10	80:20	70:30
ก่อนแช่น้ำ	10.20%	7.52%	6.39%	5.18%
1	10.29%	7.47%	6.25%	5.16%
2	10.14%	7.37%	6.02%	5.05%
3	10.04%	7.44%	6.14%	5.10%
4	10.00%	7.44%	6.16%	5.17%
5	10.13%	7.44%	6.16%	5.10%
6	10.34%	7.43%	6.16%	5.07%
7	10.32%	7.43%	6.14%	5.01%
8	10.27%	7.41%	6.14%	4.99%
9	10.23%	7.41%	6.14%	4.94%
10	10.23%	7.41%	6.14%	4.90%
11	10.21%	7.40%	6.13%	4.88%
12	10.20%	7.39%	6.13%	4.86%
13	10.19%	7.39%	6.13%	4.84%
14	10.16%	7.38%	6.13%	4.84%
15	10.15%	7.38%	6.12%	4.88%
16	10.11%	7.40%	6.12%	4.87%
17	10.11%	7.39%	6.12%	4.87%
18	10.22%	7.62%	6.11%	4.86%
19	10.41%	7.78%	6.11%	4.86%
20	10.48%	7.79%	6.23%	4.90%

วันที่ทดสอบ	ค่า %Elongation ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว			
	100:0	90:10	80:20	70:30
21	10.63%	7.84%	6.25%	4.97%
22	10.89%	8.01%	6.29%	5.06%
23	11.28%	8.34%	6.45%	5.16%
24	11.68%	8.97%	6.62%	4.98%
25	12.48%	9.68%	7.34%	5.43%
26	13.65%	10.64%	8.25%	6.70%
27	15.64%	11.96%	9.57%	8.24%
28	18.04%	14.04%	11.74%	9.94%
29	21.22%	15.62%	13.49%	11.65%
30	25.48%	17.32%	14.19%	11.81%
31	31.35%	19.43%	15.75%	13.00%
32	37.21%	22.33%	18.11%	13.93%
33	45.08%	27.63%	19.67%	14.87%
34	52.95%	35.05%	27.04%	15.75%
35	54.81%	39.01%	26.16%	15.69%
36	56.68%	38.96%	26.78%	17.37%
37	55.30%	39.30%	27.54%	15.70%
38	55.82%	41.04%	26.08%	16.87%
39	56.28%	41.04%	26.90%	16.95%
40	56.25%	40.48%	27.35%	16.79%
41	56.93%	41.08%	27.88%	17.12%
42	57.13%	42.58%	28.11%	17.58%
43	56.54%	39.82%	27.15%	16.45%
44	57.14%	40.32%	25.82%	15.15%
45	56.55%	41.00%	26.66%	15.31%
46	56.76%	41.68%	26.05%	15.47%
47	56.96%	42.37%	25.81%	15.63%
48	57.12%	42.46%	28.31%	16.94%

วันที่ทดสอบ	ค่า %Elongation ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว			
	100:0	90:10	80:20	70:30
49	56.49%	41.69%	27.78%	17.26%
50	58.18%	42.66%	28.10%	17.22%
51	57.94%	42.60%	29.03%	17.42%
52	58.25%	43.30%	28.44%	17.56%
53	58.55%	43.59%	27.85%	17.30%
54	58.85%	43.89%	27.65%	17.04%
55	59.16%	42.59%	27.46%	17.58%
56	59.46%	42.09%	28.07%	17.32%
57	58.96%	42.39%	28.68%	17.46%
58	58.06%	42.29%	27.68%	18.00%
59	58.77%	42.99%	28.29%	17.74%
60	59.07%	43.68%	28.50%	17.64%

ค-4 บันทึกผลการทดลอง Modulus of Elasticity

ทำการบันทึกผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Modulus of Elasticity โดยการ
ใช้เครื่องทดสอบ Tensile ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน โดยทดสอบวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น
แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และทดสอบทุกวันเป็นเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ
แสดงดังตารางที่ ค-4

ตารางที่ ค-4 Modulus of Elasticity ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว

วันที่ทดสอบ	ค่า Modulus of Elasticity ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
ก่อนแช่น้ำ	821.5	1212.5	1535.9	2557.6
1	674.4	1043.4	1434.6	2348.9
2	624.1	957.1	1347.4	2278.6
3	582.9	888.2	1240.3	2122.8
4	525.0	819.8	1156.1	1935.0
5	474.8	751.8	1094.5	1852.4
6	418.7	692.9	1013.7	1763.9
7	421.0	668.7	973.4	1728.1
8	423.4	679.4	940.2	1688.6
9	420.1	675.1	925.3	1680.2
10	421.6	672.6	911.4	1675.6
11	419.5	678.8	906.1	1660.3
12	418.7	669.1	895.0	1646.6
13	419.2	657.6	892.2	1625.0
14	419.9	661.2	882.4	1599.2
15	419.3	654.3	871.6	1563.1
16	422.3	648.0	859.9	1538.4
17	423.5	648.8	852.3	1515.9
18	415.5	636.9	852.8	1524.9
19	408.8	622.6	851.9	1492.7

วันที่ทดสอบ	ค่า Modulus of Elasticity ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
20	408.2	618.9	835.3	1480.3
21	402.8	615.6	824.7	1447.0
22	394.2	599.7	816.9	1426.3
23	378.1	575.3	800.9	1393.0
24	362.5	539.7	777.6	1442.7
25	340.4	493.9	700.9	1322.1
26	309.2	453.8	623.0	1070.9
27	268.7	403.0	536.6	873.0
28	234.1	339.2	436.1	720.2
29	199.5	307.7	382.3	612.8
30	164.2	276.8	366.3	611.0
31	133.0	246.4	330.0	554.9
32	113.7	214.1	289.1	516.7
33	94.6	174.5	263.2	485.1
34	79.4	137.4	191.3	457.2
35	76.6	123.3	196.9	458.7
36	75.7	124.5	192.8	413.9
37	76.9	123.4	189.1	457.2
38	75.6	117.9	199.2	425.1
39	74.3	117.8	192.4	423.8
40	73.8	118.0	187.7	428.5
41	72.5	115.6	183.2	419.8
42	72.1	111.4	181.3	407.6
43	73.6	114.7	189.4	446.2
44	71.2	116.1	198.6	470.4
45	72.4	112.4	193.6	471.1
46	71.5	110.8	199.5	465.1

วันที่ทดสอบ	ค่า Modulus of Elasticity ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
47	71.7	109.5	201.0	460.9
48	70.9	109.7	182.6	425.1
49	71.7	112.1	186.1	416.3
50	69.5	108.4	182.4	416.4
51	69.8	108.5	176.9	411.1
52	69.4	106.7	181.5	407.2
53	69.0	105.8	184.7	412.7
54	68.6	105.0	185.4	418.4
55	68.2	108.2	186.1	407.9
56	67.8	109.4	183.3	413.3
57	68.4	108.5	178.8	409.4
58	69.4	108.7	184.6	396.5
59	68.5	106.8	181.9	401.7
60	68.3	105.0	179.4	403.3

ค-5 บันทึกผลการทดลอง Flexural Strength

ทำการบันทึกผลการทดลองการดูดซึมความชื้นว่ามีผลต่อ Flexural Strength โดยการใช้เครื่องทดสอบแบบ Three Point Bending ทุกวันเป็นเวลา 60 วัน โดยทดสอบวัสดุผสมก่อนแช่วัสดุผสมลงในน้ำกลั่น แล้วทำการแช่วัสดุผสมในน้ำกลั่น และทดสอบทุกวันเป็นเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ ค-5

ตารางที่ ค-5 Flexural Strength ของวัสดุผสมระหว่างพลาสติก:ใยแก้ว

วันที่ทดสอบ	ค่า Flexural Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
ก่อนแช่น้ำ	123.8	137.2	160.6	200.5
1	108.4	119.6	140.1	187.6
2	99.3	110.1	127.8	180.5
3	91.4	105.0	121.9	173.5
4	82.3	98.2	114.8	165.8
5	76.2	92.2	109.0	160.2
6	72.7	87.1	107.5	151.0
7	71.3	83.8	102.9	147.2
8	66.4	80.9	100.6	144.7
9	63.8	80.6	98.1	144.0
10	60.7	78.7	97.9	141.4
11	56.6	75.6	97.1	139.3
12	53.0	74.3	96.6	137.6
13	51.5	72.0	95.0	134.8
14	50.6	70.3	93.3	134.0
15	49.3	69.5	91.5	130.1
16	49.0	68.1	90.2	129.3
17	48.7	67.8	88.1	129.0
18	48.0	67.3	87.0	128.7
19	47.7	67.3	85.9	127.9
20	47.3	67.1	84.8	124.8

วันที่ทดสอบ	ค่า Flexural Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
21	46.8	64.0	83.8	122.1
22	45.5	63.7	82.5	121.0
23	45.9	65.7	81.2	121.3
24	44.5	65.4	82.2	121.7
25	44.5	65.3	81.8	121.4
26	44.4	65.3	81.3	120.5
27	46.4	66.2	81.0	120.3
28	43.8	66.4	80.9	118.7
29	44.3	64.0	80.2	118.0
30	43.9	63.6	79.9	118.3
31	43.7	64.2	79.7	119.0
32	43.6	64.1	79.2	118.4
33	43.6	63.8	79.0	119.3
34	42.7	61.8	78.5	117.5
35	43.2	62.5	78.5	115.3
36	44.2	61.4	77.8	113.4
37	43.0	63.9	77.6	113.5
38	43.6	61.3	77.3	113.2
39	43.6	61.5	78.2	112.3
40	43.2	62.0	79.2	110.7
41	43.6	62.4	81.6	110.1
42	42.7	61.5	79.6	112.0
43	42.1	62.5	79.6	112.2
44	40.8	63.1	81.6	113.3
45	42.5	64.1	80.1	112.5
46	42.5	63.6	79.1	111.7
47	41.2	62.6	78.1	110.9
48	42.0	62.7	77.5	111.9

วันที่ทดสอบ	ค่า Flexural Strength ของวัสดุผสม พลาสติกพอลิเอไมด์:ใยแก้ว (MPa)			
	100:0	90:10	80:20	70:30
49	42.1	61.4	78.6	110.1
50	43.0	60.1	78.4	109.8
51	41.2	60.3	77.4	108.9
52	40.8	61.2	77.0	109.6
53	41.0	60.4	77.8	109.2
54	42.4	63.1	76.8	108.1
55	41.4	62.3	77.6	109.5
56	40.4	60.9	79.0	108.4
57	42.4	61.9	78.0	109.2
58	40.8	60.5	77.6	108.7
59	41.6	60.9	77.2	110.1
60	42.4	60.0	77.4	109.6