

การผลิตเส้นใยซิลิกาโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์
เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6



ปริญญานิพนธ์
ของ
ปิยะดา วัจวร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กันยายน 2557

การผลิตเส้นใยซิลิกาโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์
เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6



ปริญญานิพนธ์
ของ
ปิยะดา วัจวร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กันยายน 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การผลิตเส้นใยซิลิกาโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์
เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

กันยายน 2557

ปิยะดา วัจวร (2557). การผลิตเส้นใยซิลิกาโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์
เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ปริญญานิพนธ์ วท.ม. (วัสดุศาสตร์). กรุงเทพฯ:

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คณะกรรมการควบคุม:

อาจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล

งานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตเส้นใยซิลิกาจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและนำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 โดยได้ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ในการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นได้เตรียมสารละลายตั้งต้นจากกระบวนการโซลเจล โดยใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเคต น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก และเอทิลแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น ในการปั่นเส้นใยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 15 เซนติเมตร และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ จากนั้นนำเส้นใยซิลิกามาเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้างในเส้นใยที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยซิลิกาก่อนการเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.471 ± 0.029 0.425 ± 0.011 และ 0.354 ± 0.012 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อนำเส้นใยซิลิกาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ใกล้เคียงกับเส้นใยซิลิกาก่อนเผาโดยประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) สารอินทรีย์ (CH CH_2 CH_3) น้ำ (H_2O) ซิลอกเซน (Si-O-Si) และพันธะของซิลิกอนและออกซิเจน (Si-O) ส่วนเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏฟังก์ชันไฮดรอกซิล สารอินทรีย์และน้ำ ส่วนหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซนและพันธะของซิลิกอนและออกซิเจนยังคงอยู่แต่มีปริมาณลดลงจากเดิมเล็กน้อย

เส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 โดยผลิตชิ้นงานเป็นคอมพอสิตแบบชั้นซึ่งระหว่างชั้นมีแผ่นเส้นใยซิลิกาวางสลับอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันไป และถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน การทดสอบสมบัติเชิงกลได้ทำโดยการทดสอบแรงดึง แรงกระแทก และแรงดัดงอ ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6 ความเค้น ณ จุดขาดลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น แต่ความเค้นสูงสุดนั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ในการทดสอบแรงกระแทกมีค่าความทนทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ในการทดสอบแรงดัดงอพบว่าค่ามอดูลัสดัดงอและค่าความแข็งแรง

ตัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเส้นใยชิลิกาลงไปปริมาณน้อย แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยชิลิกาในไนลอน 6

คำสำคัญ: การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต, เส้นใยชิลิกา, วัสดุเสริมแรง,ไนลอน 6,สมบัติเชิงกล



FABRICATION OF SILICA FIBERS BY ELECTROSPINNING PROCESS AND
APPLICATION AS REINFORCEMENT IN NYLON 6

AN ABSTRACT
BY
PIYADA WANGWORN



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Material
at Srinakharinwirot University
September 2014

Piyada Wangworn (2014). *Fabrication of silica fibers by electrospinning process and application as reinforcement in Nylon 6*. Master Thesis, M.Sc. (Material Science).
Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:
Dr.PanitarnWanakamol

This work involves fabrication of silica fibers by electrospinning process and application of the obtained fibers as reinforcement in Nylon 6. The effects of silica fibers content on mechanical properties of Nylon 6 were examined. In producing silica nanofibers via electrospinning process, the precursor was prepared through sol-gel reaction using tetraethyl orthosilicate (TEOS), ethanol, hydrochloric acid (HCl) and deionized water. The distance between the tip and the collector was set at 15 cm and the voltage applied was 15 kV. The silica fibers were then calcined at 200°C and 800°C to eliminate solvent and residual organic materials.

The morphology analysis via scanning electron microscopy showed that the average diameters of silica fibers before and after calcination at 200°C and 800°C were 0.471 ± 0.029 , 0.425 ± 0.011 and 0.354 ± 0.012 micrometers respectively. According to Fourier transforms infrared spectroscopy (FT-IR) analysis, silica fibers after calcination at 200°C contained functional groups similar to silica fibers before calcinations. The FT-IR peaks corresponded to hydroxyl group (O-H) organic group (CH CH₂ CH₃) water (H₂O) siloxane group (Si-O-Si) and silicon-oxygen bond (Si-O). For silica fibers after calcination at 800°C, the peaks corresponding to hydroxyl group organic group and water disappeared, while the peaks corresponding to siloxane group and silicon-oxygen bond still remained.

Silica fibers obtained from electrospinning were applied as reinforcement in Nylon 6 in the form of laminar composite. Silica fibers were inserted between Nylon sheets at different silica fibers content (0, 0.5, 1 and 2 wt %) and the layers were then compressed via compression molding process to obtain composite samples. Mechanical tests on the composites samples included tensile test, impact test, and flexural test. The tensile test result showed that Young's modulus increased with weight fraction of silica fibers. Strain at break decreased when the quantity of fibers was increased. Tensile strength was not significantly influenced by the increasing fibers quantity. In the impact test, the impact

strength showed significant improvement with silica fibers content similar to Young's modulus. In the flexural test, the results showed that flexural modulus and flexural strength decreased at small addition of silica fibers and then increased slightly as the weight fraction of silica fibers was increased.

Keyword: electrospinning, silica fibers, reinforced composite, Nylon 6, mechanical properties



ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตเส้นใยซิลิกาโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์
เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6

ของ

ปิยะดา วังวร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2557

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษา

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล)

(ศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ ศุภผล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อารียา เขี่ยมบุญ)

ประกาศคุณูปการ

ในการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ได้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก อ.ดร.ปณิธาน วนากมล ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ และช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างสูง ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. อาริยา เอี่ยมบุญ และ ศ.ดร.พิชญ์ ศุภผล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่า (ปริญญาบัตร) รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคุณอาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญาบัตรจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณธัญพ นิลกำจร ที่ได้คอยช่วยเหลือแนะนำอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโท คุณธนวรรค์ คันทักษ์ คุณสุมิตตา เมฆนิตติ และคุณรชตวรรณ กมลเพชร ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ส่งเสริมและสนับสนุนในทุกๆเรื่อง อีกทั้งยังให้ความรักและปรารถนาดีและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ปิยะดา วังวร

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
แผนดำเนินการ.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning).....	4
ปฏิกิริยาโซลเจล (Sol-gel reaction)	6
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂) หรือซิลิกา (Silica).....	9
ไนลอน (Nylon) หรือ พอลิเอไมด์ (Polyamide).....	11
วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials)	13
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นใย.....	15
กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	19
กระบวนการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	21
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	40
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
อุปกรณ์ในการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกา.....	40
อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต.....	40
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต.....	40
สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	41
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย	52
การวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	52
การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกาด้วยเครื่องเอกซเรย์	
สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน	56
การวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด	
สเปกโตรสโกปี (FT-IR).....	57
การขึ้นรูปและลักษณะของคอมพอสิต.....	63
การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	68
5 สรุป อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	99
สรุปผลการวิจัยและอภิปราย	99
ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก.....	105
ประวัติย่อผู้วิจัย	121

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 งานวิจัยการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	31
2 งานวิจัยการประยุกต์ใช้เส้นใยซิลิกานำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก.....	34
3 รายละเอียดมวลของไนลอน 6 และเส้นใยซิลิกาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....	46
4 รายละเอียดมวลของไนลอน 6 และเส้นใยซิลิกาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก.....	46
5 รายละเอียดมวลของไนลอน 6 และเส้นใยซิลิกาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดัดงอ.....	47
6 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของเส้นใยซิลิกา.....	58
7 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....	69
8 สมบัติความทนต่อแรงดึงไนลอน 6 ประกับ 2 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง....	79
9 สมบัติความทนต่อแรงดึงไนลอน 6 ประกับ 3 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง....	80
10 สรุปสมบัติความทนต่อแรงดึงไนลอน 6 ประกับ 2 และ 3 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	81
11 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก.....	84
12 สมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	86
13 สรุปสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง..	87
14 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ที่ใช้ทดสอบแรงดัดงอ.....	89
15 สมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	95
16 สรุปสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง..	96
17 ผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซิลิกาก่อนการเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์....	107
18 ผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่ 200 องศาเซลเซียส.....	110
19 ผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่ 800 องศาเซลเซียส.....	113

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 อุปกรณ์เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตเส้นใย.....	5
2 ส่วนประกอบและหลักการเกิดเส้นใยของวิธีอิเล็กทรอนิกส์ (ก) ในช่วงก่อนการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงและ (ข) ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่มีค่ามากพอแก่ระบบจนกระทั่งเกิดเส้นใยนาโนขึ้น.....	6
3 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล.....	7
4 กระบวนการโซลเจล.....	9
5 โครงสร้างผลึกของ SiO_2 และโครงสร้างออสซิลอนของ SiO_2	10
6 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมพอสิตได้แก่ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาดรูปร่างการกระจายและการจัดเรียงตัว.....	14
7 การทำงานของSEM.....	16
8 ตัวอย่างเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี.....	17
9 ตัวอย่างเครื่องกดอัด (Compression molding machine).....	19
10 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine).....	22
11 เครื่องมือทดสอบการกระแทก (Impact testing).....	24
12 การผสมสารละลายบนสเตอริออร์(Stirrer).....	41
13 การให้ความร้อนแก่สารละลายโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ.....	42
14 อุปกรณ์การปั่นเส้นใยซิลิกาด้วยไฟฟ้าสถิต.....	43
15 เส้นใยซิลิกาเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุเซรามิก.....	43
16 ผืนเส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	44
17 (a) แผ่นไนลอน 6 ประกบกับผืนเส้นใยซิลิกา (b) แผ่นไนลอน 6 ประกบกับผืนเส้นใยซิลิกาหลังเข้าเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน.....	45
18 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638.....	47
19 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256.....	48
20 ชิ้นงานทดสอบแรงดัดงอตามมาตรฐาน ASTM D790.....	48
21 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง.....	49
22 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการรับแรงกระแทกที่ทำรอยบากแล้ว.....	50

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 เครื่องทดสอบแรงกระแทกที่ใช้ในการทดสอบ.....	50
24 ขั้นตอนการทดสอบแรงดัดงอ.....	51
25 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาก่อนการเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลาย และสารอินทรีย์ที่ตกค้าง (a) และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า (c) และ (d) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	53
26 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (a) และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า (c) และ (d) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	54
27 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (a) และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า (c) และ (d) กำลังขยาย 5000 เท่า.....	55
28 ลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกา ก่อนการเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้าง.....	57
29 ลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกา หลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	57
30 ลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกา หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	58
31 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกา ก่อนเผา.....	60
32 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดสารละลาย ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	61
33 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ ตกค้างที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	61
34 กราฟเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกา ก่อนเผาและหลังเผา ที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส.....	62
35 พื้นผิวของของขึ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	64
36 พื้นผิวของของขึ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0.5 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	65

37	พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-1 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	65
----	--	----

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
38 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-2 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	66
39 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-0 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	66
40 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-1 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	67
41 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-2 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	67
42 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-4 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2.....	68
43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 2 ชั้น TSA-0 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	70
44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 2 ชั้น TSA-0.5 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	70
45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 2 ชั้น TSA-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	71
46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 2 ชั้น TSA-2 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	71
47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 3 ชั้น TSB-0 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	72
48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 3 ชั้น TSB-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	72
49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 3 ชั้น TSB-2 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	73
50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานแบบ ประกบ 3 ชั้น TSB-4 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	73
51 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0 หลังการทดสอบแรงดึงทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	74
52 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0.5 หลังการทดสอบแรงดึงทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	74
53 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-1 หลังการทดสอบแรงดึงทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	75
54 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-2 หลังการทดสอบแรงดึงทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	75
55 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSB-0 หลังการทดสอบแรงดึงทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	76

56 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-1 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	76
--	----

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
57 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-2 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	77
58 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-4 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	77
59 กราฟแสดงความทนต่อแรงดึงของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	81
60 กราฟแสดงความเค้นสูงสุดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	82
61 กราฟแสดงความเครียด ณ จุดขาดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกา เป็นวัสดุเสริมแรง.....	82
62 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก.....	85
63 กราฟแสดงความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกา เป็นวัสดุเสริมแรง.....	87
64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ ของชิ้นงาน FR-0 5 ชิ้นงาน.....	89
65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ ของชิ้นงาน FR-0.5 5 ชิ้นงาน.....	90
66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ ของชิ้นงาน FR-1 5 ชิ้นงาน.....	90
67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ ของชิ้นงาน FR-2 5 ชิ้นงาน.....	91
68 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดัดงอ.....	92
69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแรงดัดงอ ของชิ้นงาน FR-0 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	93
70 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแรงดัดงอ ของชิ้นงาน FR-0.5 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	94
71 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแรงดัดงอ ของชิ้นงาน FR-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	94
72 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแรงดัดงอ ของชิ้นงาน FR-2 จำนวน 5 ชิ้นงาน.....	95

73 ค่ามอดูลัสแรงดัดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	97
---	----

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
74 ค่าความแข็งแรงดัดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง.....	97



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันการขึ้นรูปพอลิเมอร์เพื่อใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์มักต้องมีการใส่สารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เช่นสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนให้ดีขึ้น เพื่อให้เหมาะกับลักษณะงาน ในลอน 6 (Nylon 6) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermo-plastics) ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายมีการใช้สารตัวเติมอนินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่นกัน สารตัวเติมอนินทรีย์ที่ใช้กันมากในลอน ได้แก่ เคาลิน (Kaolin) แร่วอลาสโทไนต์ (Wollastonite) แร่กลีปหิน (Mica) ซิลิกา (Silica) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และเส้นใยแก้ว (Glass fiber) (Segatelli; et al. 2010: 98) สารตัวเติมประเภทเส้นใยแก้วและเส้นใยซิลิกาเป็นตัวเลือกที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งวิธีการดั้งเดิมในการผลิตเส้นใยดังกล่าวอาศัยวิธีการดึงซึ่งทำให้ได้เส้นใยขนาดหลายไมโครเมตรจนถึงหลายมิลลิเมตร (อดิศักดิ์. 2543: 1-5) ในลอน 6 ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและซิลิกาแสดงสมบัติเชิงกลหลายประการที่ดีขึ้น เช่น โมดูลัสและความต้านทานแรงดึง (Mouhmid; et al. 2006: 544-552) (Segatelli; et al. 2010: 98-105) (Li; et al. 2010: 262-268) (Yoo; et al. 2011: 180-190)

ในปัจจุบันมีเทคนิคใหม่ในการผลิตเส้นใยคือเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรือเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง เทคนิคนี้เป็นทางเลือกใหม่ที่ได้ถูกนำมาใช้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์และเส้นใยสารอนินทรีย์ออกไซด์หลากหลายชนิด สำหรับประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เกษษกรรม วิศวกรรม การทหาร และอื่นๆ เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถประดิษฐ์เส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตรถึงหลายไมโครเมตร โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง สำหรับระบบพื้นฐานมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเพียง 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) ส่วนควบคุมการไหลของสารละลาย และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) จัดเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อยและใช้งานได้สะดวก (Huang; et al. 2003: 2225)

หลายกลุ่มวิจัยประสบความสำเร็จในการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยมีการผลิตทำร่วมกับเทคนิคโซลเจล (Sol gel) โดยเตรียมสารตั้งต้นจากเตตระเอทิลออร์โท-ซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate: TEOS) น้ำกลั่น (H_2O) เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_6O) และกรดไฮโดร-คลอริก (HCl) เส้นใยซิลิกาที่ได้มีขนาด 0.2-4.5 ไมโครเมตร (Choi; et al. 2003: 891-893) (Iimura; et al. 2010: 64-68) (Pramuansub; et al. 2012: 602-606) เส้นใยซิลิกาที่ได้จากเทคนิค

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ น่าจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเส้นใยแก้วแบบดั้งเดิม เพราะเส้นใยจะเบาและเปราะน้อยลง ทั้งนี้ยังไม่มีรายงานการนำเส้นใยดังกล่าวไปใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์ต่างๆ

ในงานวิจัยนี้จึงได้มีจุดมุ่งหมายที่จะผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แล้วนำเส้นใยที่ผลิตได้ไปเป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 พร้อมทั้งศึกษาผลของปริมาณเส้นใยซิลิกาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีความมุ่งหมาย ดังนี้

1. เพื่อทำการผลิตและวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
2. เพื่อผลิตคอมพอสิตโดยใช้เส้นใยซิลิกาจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวัสดุ เสริมแรงในไนลอน 6
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า สถิตเป็นวัสดุเสริมแรง

ความสำคัญของงานวิจัย

1. ทำให้ได้เส้นใยซิลิกาจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 300-1000 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าเส้นใยซิลิกาแบบดั้งเดิม
2. ทำให้ทราบถึงสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวัสดุเสริมแรง

ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

1. ผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้สารละลายตั้งต้นที่เตรียมจากเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate: TEOS)
2. วิเคราะห์เส้นใยซิลิกา ดังนี้
 - ศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)
 - วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

3. ขึ้นรูปไนลอน 6 โดยใช้เส้นใยซิลิกาจากกระบวนการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวัสดุเสริมแรง

4. ทดสอบสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรงโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ จากนั้นเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ได้จากการใช้ปริมาณซิลิกาที่แตกต่างกัน

แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

- การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)
- ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกา (Silica)
- วิธีการโซลเจล (Sol-gel methods)
- การผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
- ไนลอน 6
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกา
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

2. ผลิตเส้นใยซิลิกา

3. วิเคราะห์เส้นใยซิลิกา

4. ขึ้นรูปไนลอน 6

5. ทดสอบสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

6. วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรงในปริมาณที่

แตกต่างกัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยนี้จะทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการเสริมแรงไนลอน 6 ด้วยเส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

บทที่ 2

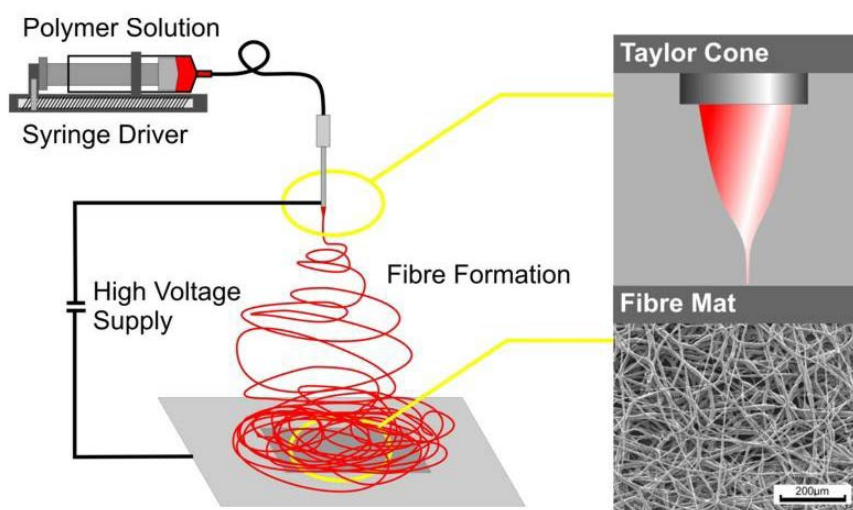
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)
2. ปฏิกิริยาโซลเจล (Sol-gel reaction)
3. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกา (Silica)
4. ไนลอน (Nylon) หรือ พอลิเอไมด์ (Polyamide)
5. วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials)
6. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นใย
7. กระบวนการที่ใช้ขึ้นรูปพอลิเมอร์
8. กระบวนการที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ
9. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spinning) หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้แรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า เส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีขนาดเล็กมาก (ระดับนาโนเมตร) (ปรัชญา นิยมไทย; และ จรรยา ตริมงคล หิรัญวิวัฒน์กุล. 2555: 1) อิเล็กโตรสปินนิงได้กลายเป็นเครื่องมืออเนกประสงค์สำหรับการผลิตเส้นใยนาโนที่มีวัสดุตั้งต้นหลายชนิดรวมกัน (Chuangchote; & Supaphol. 2006: 125) ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมี 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลาย (Syringe) ที่ติดกับเข็มโลหะ (Tip) และฉากรับที่เป็นโลหะ (Metal collector) (Huang; et al. 2003: 2225) ภาพประกอบ 1 แสดงอุปกรณ์เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงในการผลิตเส้นใย



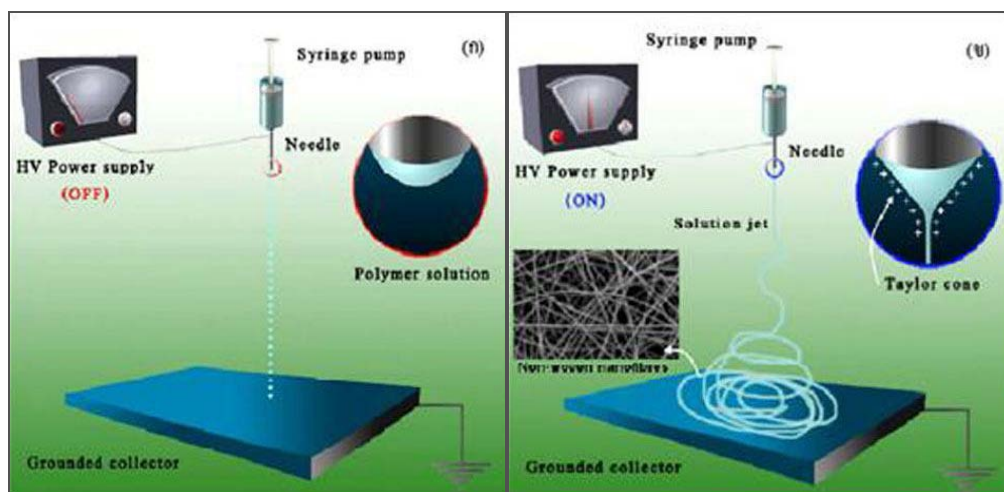
ภาพประกอบ 1 อุปกรณ์เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงในการผลิตเส้นใย

ที่มา: <http://www.centropede.com/UKSB2006/ePoster/images/background/ElectrospinningFigure.jpg> สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2556 (ออนไลน์).

1.1 หลักการของการเกิดเส้นใย

การทำงานของระบบอิเล็กโตรสปินนิงแสดงในภาพประกอบ 2 เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ สารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะ อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์สูงพอจะทำให้เกิดประจุสะสมที่ผิวของสารละลายจึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้นถ้าแรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าพอที่จะทำให้แรงผลักมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวย และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง จะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Jet) ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงอย่างมากแล้วตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ (Non-woven nanofiber) ความไม่เสถียรของการบิดโค้งของเส้นใยอธิบายได้จากรูปขยายในภาพประกอบ 2 (ข) บริเวณที่ลำของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่งพบว่าประจุคงค้างที่ผิวของสารละลายผลักดันทำให้เส้นใยสับตัวและด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำจึงเกิดแรงที่

ไม่สมดุล ทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อนอันนำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และยิ่งรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็กประกอบกับการระเหยออกของตัวทำละลายในที่สุดเกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรได้ (Rutledge; & Fridrikh. 2007: 2)



ภาพประกอบ 2 ส่วนประกอบและหลักการเกิดเส้นใยของวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

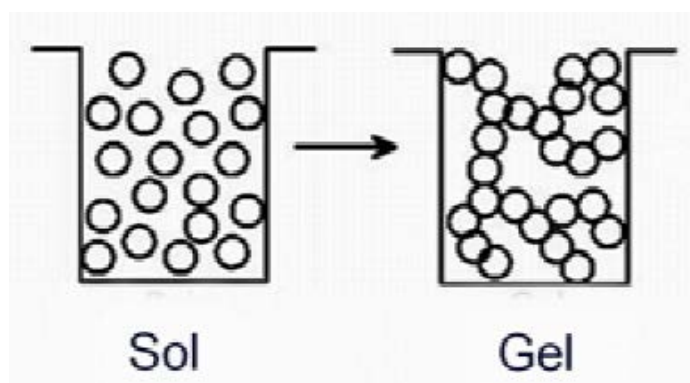
(ก) ในช่วงก่อนการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงและ

(ข) ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่มีค่ามากพอแก่ระบบจนกระทั่งเกิดเส้นใยนาโนขึ้น

ที่มา:<http://202.28.94.55/web/322103/2551/work1/g19/menu3.htm> สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2556 (ออนไลน์).

2. ปฏิกริยาโซลเจล (Sol-gel reaction)

กระบวนการผลิตโดยวิธีโซลเจลเป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกและแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” (Sol) ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปแบบของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1 - 1 ไมโครเมตร เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” (Gel) ดังภาพประกอบ 3 แสดงการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล



ภาพประกอบ 3 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

ที่มา: <http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.htm> สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2556 (ออนไลน์).

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซลเจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นด้วยน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการ มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน

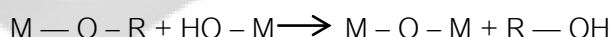
Hydrolysis :



Water condensation :



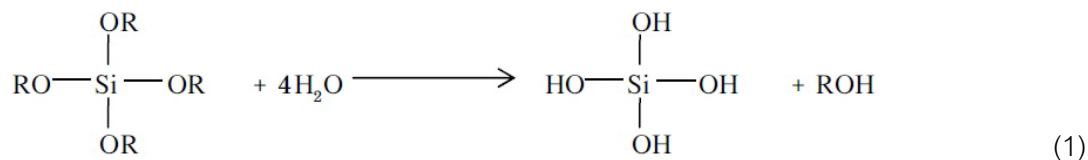
Alcohol Condensation :



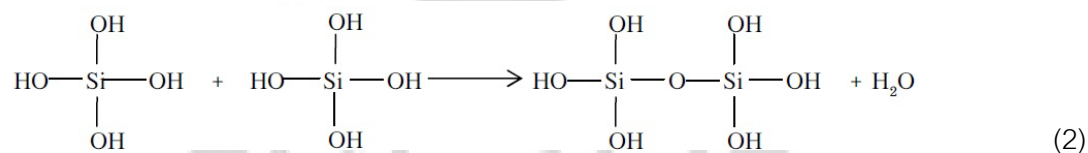
เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ ซิลิคอน (Silicon; Si) เซอร์โคเนียม (Zirconium; Zr) ไทเทเนียม (Titanium; Ti) อะลูมิเนียม (Aluminum; Al) และ OR แทนหมู่แอลคอกซิล (Alkoxyl group)

ขั้นตอนแรกของการทำโซลเจล คือ การผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น โลหะอัลคอกไซด์ (Metal Alkoxide) เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น เตตระเมทอกซีไฮโดรเจน (Tetramethoxysilane; TMOS) และ เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; TEOS) ส่วนแอลคอกซีชนิดอื่น เช่น อะลูมินาต (Aluminate) ไททา-

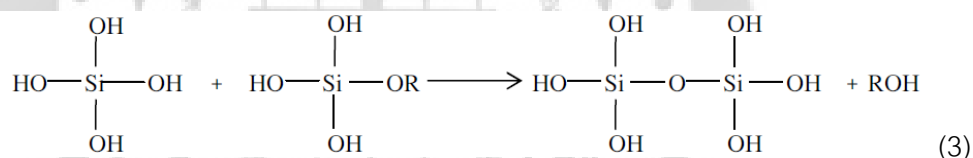
เนต(Titanate) และโบเรต (Borate) มีใช้กันแพร่หลายโดยมักจะใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS), C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังสมการ 1



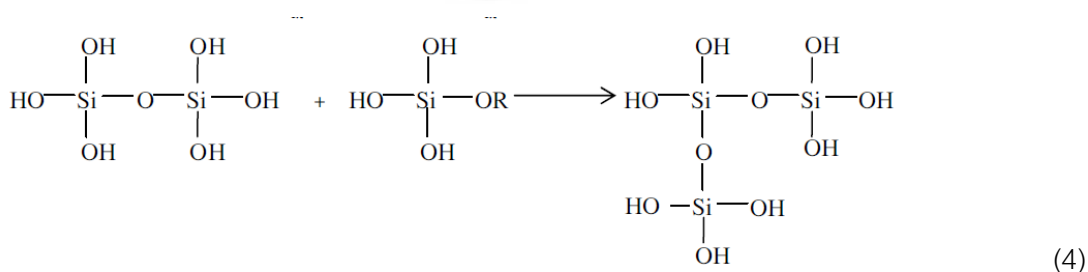
และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยน้ำดังสมการ 2



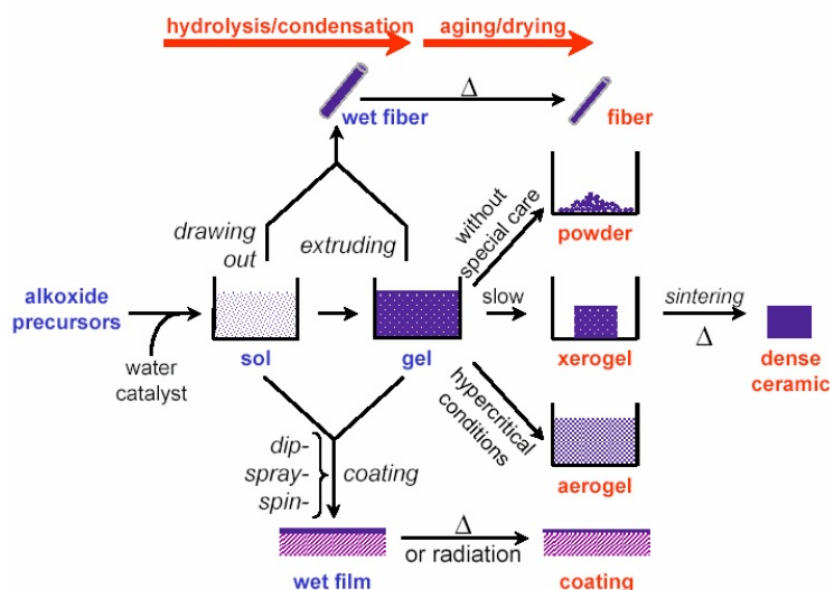
หรือ ปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ดังสมการ 3



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อไปจนกลายเป็นโครงข่ายซิลิกา (Silica Network) อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า เจลจึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าว่า ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันดังสมการ 4



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็นโซลและเจลเมื่อเข้าสู่กระบวนการที่ทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (Fiber) อนุภาคผง (Powder) และการเคลือบฟิล์ม (Coating film) เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป (จุฑารัตน์ อาชวรัตน์ถาวร. ม.ป.ป)



ภาพประกอบ 4 กระบวนการโซลเจล

ที่มา: <http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.htm> สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2556 (ออนไลน์)

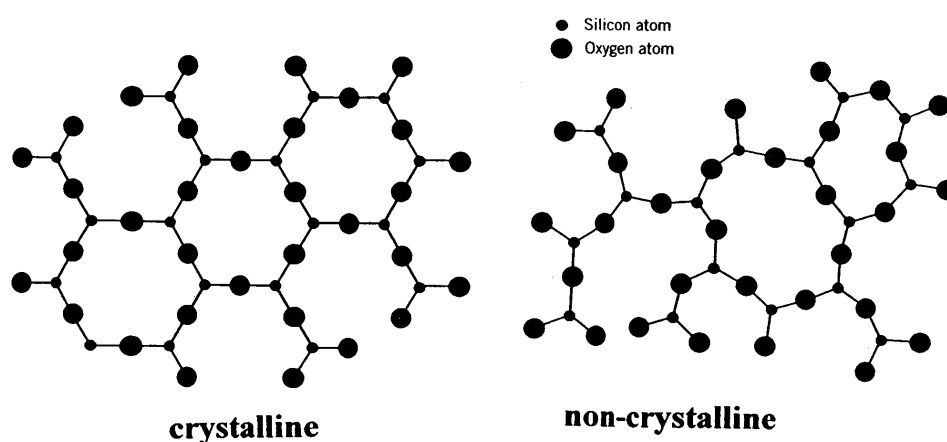
3. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกา (Silica) (สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์; และคณะ. 2548: 352-354)

วัสดุซิลิกเกตแบบง่ายที่สุดคือ ซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2) โครงสร้างซิลิกาเป็นแบบเครือข่ายสามมิติที่เกิดจากการร่วมกันใช้อะตอมของออกซิเจนของเตตระฮีดรอนที่อยู่ติดกัน ดังนั้น วัสดุประเภทนี้จึงมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง และทุกอะตอมมีโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เสถียร จากโครงสร้างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของ Si ต่อ O เท่ากับ 1:2

หากเตตระฮีดรอนทั้งหมดมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบจะสามารถเกิดโครงสร้างผลึกที่มีอัญรูปได้ 3 แบบ คือ ควอตซ์ คริสโตบัลไลต์ และไตรโดไมต์ โครงสร้างเหล่านี้มีความซับซ้อนและจัดเรียงอะตอมอย่างไม่แน่นอน ทำให้โครงสร้างของซิลิกามีความหนาแน่นต่ำ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้องควอตซ์มีความหนาแน่น 2.65 g/cm^3 จุดหลอมเหลวของผลึกซิลิกาเท่ากับ 1710°C ซึ่งมีค่าสูงเนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมของซิลิคอนและออกซิเจนมีความแข็งแรงสูง

3.1 แก้วซิลิกา

ซิลิกานั้นสามารถถูกทำให้เป็นของแข็งที่ไม่เป็นโครงสร้างผลึก (Non-crystalline) หรือแก้ว (Glass) ได้ การเรียงตัวของอะตอมจะไม่เป็นระเบียบ เป็นลักษณะเช่นเดียวกับโมเลกุลของเหลว ซิลิกาประเภทนี้เรียกว่า ฟิวส์ซิลิกา (Fused silica) หรือวิเทรียสซิลิกา (Vitreous silica) โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาประเภทนี้ ยังคงเป็นเช่นเดียวกับแบบมีโครงสร้างผลึก คือ ซิลิเกต (SiO_4^{4-}) แต่ นอกเหนือไปจากโครงสร้างพื้นฐานนี้แล้ว การเรียงตัวของอะตอมต่างๆ จะไม่มีความเป็นระเบียบ โครงสร้างของซิลิกาแบบเป็นผลึกและไม่เป็นผลึกได้ถูกเปรียบเทียบแสดงไว้ในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 โครงสร้างผลึกของ SiO_2 และโครงสร้างอสัณฐานของ SiO_2

ที่มา: <http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2556 (ออนไลน์)

สารประกอบออกไซด์ตัวอื่น ๆ เช่น B_2O_3 และ เจอร์มาเนียมไดออกไซด์ (GeO_2) อาจเกิดโครงสร้างโครงข่ายแบบแก้วได้เช่นกัน วัสดุเหล่านี้รวมทั้งซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เราเรียกว่าเป็นตัวกำเนิดโครงข่าย (Network former) โดยทั่วไปแก้วอนินทรีย์ที่ใช้ทำภาชนะกระจกหน้าต่างและอื่นๆคือ แก้วซิลิกาที่ผสมด้วยออกไซด์ อย่างเช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมออกไซด์ (NaO) ออกไซด์เหล่านี้ไม่ช่วยให้เกิดโครงข่าย แต่แคตไอออนในออกไซด์เหล่านี้ถูกรวมใช้เป็นส่วนเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง SiO_4^{4-} ด้วยเหตุผลนี้ ออกไซด์เพิ่มเติมเหล่านี้จึงถูกเรียกว่าตัวเปลี่ยนแปลงโครงข่าย (Network modifier) นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแมกนีเซียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ถึงแม้ไม่ได้เป็นตัวกำเนิดโครงข่าย แต่สามารถเข้าไปแทนที่ซิลิคอน เพิ่มความเสถียรให้แก่โครงข่าย เราเรียกออกไซด์เหล่านี้ว่าอินเตอร์มีเดียต (Intermediate) จะพบว่าการเพิ่ม

จำนวนตัวเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอินทรีย์มีเดียต จะลดจุดหลอมเหลวและความหนืด (Viscosity) ของ แก้ว ทำให้สามารถขึ้นรูปแก้วได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

3.2 การประยุกต์ใช้ซิลิกา

ปัจจุบันซิลิกามีบทบาทสำคัญทั้งในอุตสาหกรรม และการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมาก โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายแขนงตัวอย่างเช่น

อุตสาหกรรมยาง ซิลิกาสามารถใช้เป็นสารเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เพราะการเติมสารตัวเติมลงไปยาง จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางให้ดีขึ้นโดยเฉพาะค่าความแข็ง (Hardness) โมดูลัส (Modulus) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) เป็นต้น โดยซิลิกาที่นิยมใช้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร (nm) ซิลิกาจะไม่อยู่โดดเดี่ยว ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า แอ็กกรีเกต (Aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างการกวนผสม

ปัจจุบันซิลิกาที่นิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางคือ ซิลิกาในรูปแบบคอลลอยด์ (Colloidal silica) หรือพรีซิพิเตตซิลิกา (Precipitate silica) สามารถแบ่งได้หลายเกรด ซิลิกาแต่ละเกรดจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ (Primary particle size) หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) โดยทั่วไป ซิลิกาอนุภาคปฐมภูมิเล็กหรือพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะช่วยเสริมแรงได้ดีกว่าอนุภาคใหญ่

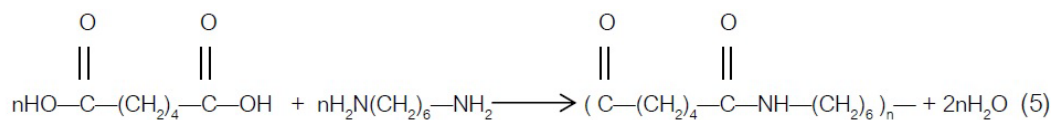
อุตสาหกรรมซีเมนต์ การใช้ประโยชน์จากซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มเติม (Additive) เพื่อทำให้คอนกรีตคุณภาพสูง หรือคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ด้วยตนเอง ซึ่งการใช้ซิลิกานาโนทำให้คอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวมีความสามารถในการไหลเทได้ดีขึ้น และยังเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ผสมอนุภาคระดับนาโนข้างต้นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งทำให้การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตน้อยลง เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนมีการกระจายตัวดีขึ้นในส่วนผสมเพิ่มความหนืดของของเหลวในมอร์ตาร์ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากจึงทำให้เม็ดปูนซีเมนต์และมวลรวมสามารถลอยอยู่ในของเหลวในระหว่างที่เป็นมอร์ตาร์สดได้

อุตสาหกรรมยา ซิลิกาสามารถใช้เป็นสารช่วยเพิ่มแรงตึงผิว และช่วยในการกระจายตัวของยาชนิดที่เป็นของเหลวได้

อุตสาหกรรมอาหาร ซิลิกาสามารถใช้เป็นตัวดูดซับความชื้น ช่วยยืดอายุการถนอมอาหาร และ ใช้กรองน้ำดื่ม (พัชรินทร์ วรรณกุล. 2010: 40-41)

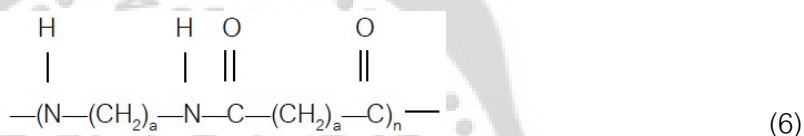
4. ไนลอน (Nylon) หรือพอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) (อินดาร์ รัชเวทย์. 2555: 240-241)

ไนลอนได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกรดกับหมู่ฟังก์ชันกรดกับหมู่ฟังก์ชันเอมีน ดังตัวอย่างการเตรียมไนลอน 6,6 จากกรดอะดิปิก (Adipic acid) และไดเอมีน (Diamine) คือ เฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (Hexamethylenediamine) ในสมการ



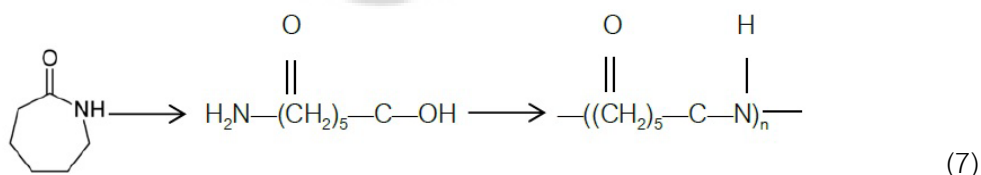
5 adipic acid hexamethylene diamine nylon-6,6 (5)

อาจเขียนสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปของไนลอนอาจเขียนได้ดังสมการ 6



โดยทั่วไป a และ b เป็นจำนวนอะตอมคาร์บอน ซึ่งจะแตกต่างกันไปสำหรับไนลอนแต่ละชนิด เช่น ในกรณีไนลอน-6,6 มี a = 6 และ b = 4 เมื่อรวมกับอะตอมคาร์บอนที่มีหมู่คาร์บอนิล 2 หมู่จะเท่ากับ 6 ดังนั้นตัวเลขหน้า (a) จะหมายถึงจำนวนอะตอมคาร์บอนในไดเอมีน ส่วนตัวเลขหลังจะหมายถึงจำนวนอะตอมคาร์บอนในกรด

ไนลอนยังสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น มอนอเมอร์ชนิดเดียวที่มีหมู่เอมีนและหมู่กรดอยู่ สมการ 7 แสดงปฏิกิริยาในการเกิดไนลอน 6



ไนลอนที่ได้จากสมการ 7 เป็นการเปิดวงแหวนของเอปไซลอน-คาร์โพรแลคตัม (ϵ -caprolactam) มีจำนวนอะตอมคาร์บอนระหว่างหมู่เอไมด์ 6 ตัว จึงเรียกไนลอนชนิดนี้ว่า ไนลอน 6 เนื่องจากมีมอนอ-เมอร์เพียงชนิดเดียว

โมเลกุลของไนลอนมีสภาพขั้วที่เกิดจากหมู่เอไมด์และหมู่คาร์บอนิล จึงเกิดแรงไดโพลระหว่างโมเลกุลของไนลอน ส่งผลให้โมเลกุลอัดตัวแน่นและเป็นระเบียบ ทำให้ไนลอนมีความเป็นผลึกสูง มีค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting point temperature ; T_m) สูง เช่น ไนลอน 6,6 มี T_m ที่ 265 °C และ ไนลอน 6 มี T_m ที่ 223 °C เป็นต้น

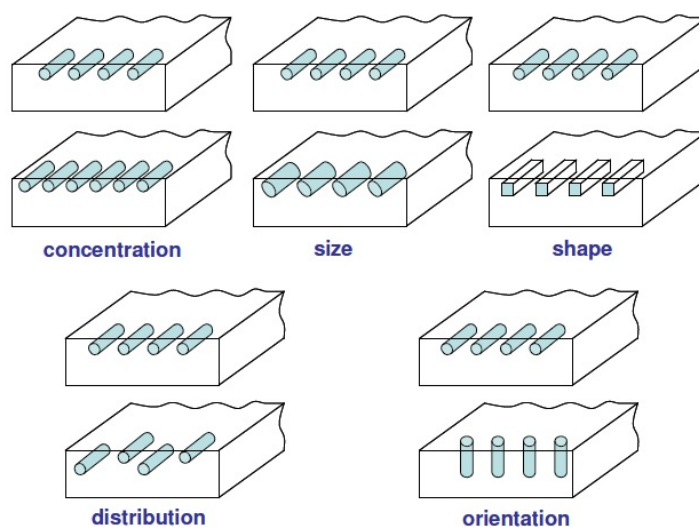
เนื่องจากไนลอนเป็นพอลิเมอร์ที่มีสภาพขั้ว จึงไม่ทนต่อสารละลายที่มีขั้ว แต่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถใช้งานที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันหรือตัวทำละลายอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ ไนลอน 6,6 และ ไนลอน 6 ที่มีการใช้งานมากที่สุดแล้วยังมีไนลอนชนิดอื่นๆ อีกได้แก่ ไนลอน 6,10 ไนลอน 2,2 ไนลอน 4 ไนลอน 7 และไนลอน 12 เป็นต้น

ไนลอนมีความแข็งแรง เหนียว และทนทานต่อการสึกกร่อน จึงใช้ทำพรม เชือกสายเบ็ดตกปลา แห อวน ร่มชูชีพ และยังใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อเสริมการทนทานต่อการสึกกร่อน เป็นต้น

5. วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials) (สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ชีท. 2554: 191-213)

คอมพอสิต (Composite) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมพอสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced phase) ยกตัวอย่างคอมพอสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นคอมพอสิตระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibre) หรือกระดูก ซึ่งเป็นคอมพอสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

ในส่วนของคอมพอสิตสังเคราะห์นั้น จะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมพอสิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ภาพประกอบ 6 แสดงถึงลักษณะต่างๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต ถึงแม้คอมพอสิตจะเกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้ว สุดท้ายคอมพอสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน



ภาพประกอบ 6 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมพอสิต ได้แก่ ๑ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจายและการจัดเรียงตัว

ที่มา: สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ชีท.(2554). วัสดุศาสตร์ขั้นแนะนำ. หน้า191.

คอมพอสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ คอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite) คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-reinforced composite) และคอมพอสิตโครงสร้าง (Structural composite)

5.1 คอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค

คอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคคือคอมพอสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่นเป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น

คอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) และคอมพอสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-strengthened composite)

5.2 คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) สูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรง

จำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะและในรูปของมอดุลัสจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

5.3 คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite)

คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิต สมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้วยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วยเราสามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภทคือคอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

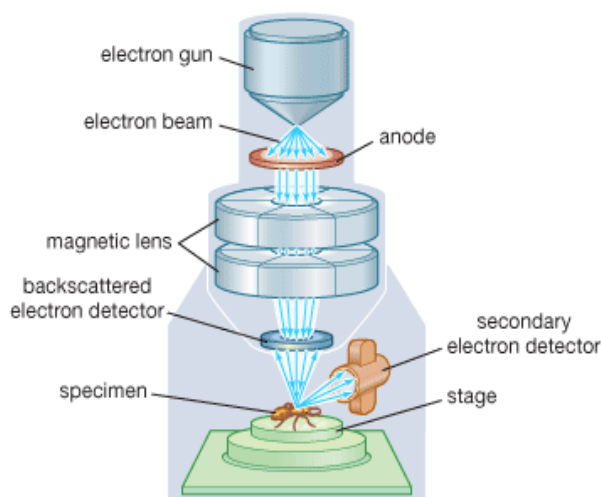
6. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์เส้นใย

6.1 เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) (แมน อมรสิทธิ์; อมร เพชรสม. 2534: 289-304)

SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้งานได้หลายสาขา ไม่ว่าจะเป็นห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ชีววิทยาเคมีวัสดุศาสตร์และอื่นๆอีกจำนวนมากเนื่องจากสามารถใช้ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของชิ้นตัวอย่างในระดับที่เล็กลงไปมากกว่าที่จะมองเห็นด้วยตาเปล่าและจำแนกรายละเอียดได้ และยังสามารถนำไปใช้กับเทคนิคอื่นได้ เช่น Energy Dispersive Spectroscopy, EDS เป็นต้น

การทำงานของ SEM

ส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของ SEM แสดงในภาพประกอบ 7 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0 – 30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน



ภาพประกอบ 7 การทำงานของ SEM

ที่มา: <http://www.digitalsmicroscope.com/scanning-electron-microscope-5/> (ออนไลน์)

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมแสงอิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้นแล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป

6.2 การวิเคราะห์เส้นใยด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์; และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2547: 305-306)



ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ที่มา: <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/analytical/spectro/thai/FT-IR/IR-Prestige21.php> สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2556 (ออนไลน์).

ภาพประกอบ 8 แสดงตัวอย่างเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพอลิเมอร์ในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FT-IR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

หลักการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์

ช่วงคลื่นอินฟราเรด (0.78-1000 ไมโครเมตร) อยู่ระหว่างช่วงคลื่นวิสิเบิลและช่วงคลื่นไมโครเวฟ (เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีนิยมใช้หน่วยความยาวคลื่นเป็นจำนวนคลื่นหรือเลขคลื่น หรือ wave number (cm^{-1}) ช่วงคลื่นอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (μm)	เลขคลื่น (cm^{-1})
อินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR, NIR)	0.78-2.5	12800-4000
อินฟราเรดย่านกลาง (Mid or fundamental IR)	2.5-50	4000-200
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	50-1000	200-10

ช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ถูกนำมาใช้มากจะอยู่ในช่วง $4000-670 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ สำหรับช่วงคลื่นอินฟราเรดย่านกลางจะให้แถบการดูดกลืน (Absorption bands) ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโมเลกุล ช่วงคลื่นอินฟราเรดมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลเกิดการทรานซิชันได้ แต่ทำให้เกิดการทรานซิชันของการสั่นของโมเลกุล สเปกตรัมที่ได้มีลักษณะเป็นแถบแคบและอยู่ใกล้กันมากหรือมีการซ้อนเหลื่อมกันของสเปกตรัม อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานของการสั่นต้องมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานของการหมุนด้วยเสมอ ดังนั้นจึงไม่ค่อยเห็นสเปกตรัมของการสั่นอย่างเดียว (Pure vibrational spectrum) แต่อาจเห็นสเปกตรัมการหมุนอย่างเดียวได้เพราะช่วงกว้างระหว่างระดับพลังงานของการหมุนน้อยกว่าของระดับพลังงานการสั่นมากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็งและของเหลวเกิดจากการสั่นตลอดเวลาจึงให้อินฟราเรดสเปกตรัมได้แต่ไม่ให้โมโคเรพสเปกตรัมของแข็งและของเหลวเพราะโมเลกุลหมุนได้น้อย

การดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุลมีข้อกำหนดที่สำคัญ 2 ประการ

1. โมเลกุลที่กำลังสั่นนั้นต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ภายในโมเลกุล ดังนั้นโมเลกุลที่ประกอบด้วยสองอะตอมที่เหมือนกัน เช่น ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas; N_2) ก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas; O_2) และก๊าซคลอรีน (Chlorine gas; Cl_2) จะไม่ให้อินฟราเรดสเปกตรัมสรุปได้ว่า การที่โมเลกุลใดๆ จะดูดกลืนช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดได้นั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ในระหว่างที่โมเลกุลนั้นสั่น ดังนั้นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ความหนาแน่นของประจุ (Charge density) แตกต่างกันระหว่างอะตอมทั้งสองจะให้แถบดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดได้เรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า IR-active สำหรับโมเลกุลที่ประกอบด้วยสองอะตอมที่เหมือนกันจึงไม่มีความแตกต่างของความหนาแน่นของประจุ การสั่นของโมเลกุลดังกล่าวจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ จะไม่ให้แถบดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรด เรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า IR-inactive

2. พลังงานของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ให้กับโมเลกุลจะต้องมีค่าพอดีกับผลต่างของระดับพลังงานของการสั่นที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชัน

ตำแหน่งของอะตอมต่างๆ ในโมเลกุลที่มาสร้างพันธะกันนั้นไม่ได้อยู่นิ่ง จะเกิดการเปลี่ยนไปแบบต่อเนื่องตลอดเวลาทั้งนี้เพราะโมเลกุลเกิดการสั่นอันเนื่องมาจากการยืดและการงอ

การสั่นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะของโมเลกุล เรียกว่าการสั่นแบบยืด (Stretching or valency vibration) ทำให้พันธะยืดออกหรือหดสั้นลง การสั่นแบบยืดมี 2 แบบ คือ การยืดแบบมีสมมาตร (Symmetric, sym) และการยืดแบบปฏิสมมาตร (Asymmetric, asym) การสั่นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะในโมเลกุลเรียกว่าการสั่นแบบงอ (Bending) หรือการ

ผิดรูป (Deformation) ซึ่งมีด้วยกัน 4 แบบ การงอแบบตะไกรภายในระนาบ (In-plane scissoring) การงอแบบโคลงภายในระนาบ (In-plane rocking) การงอแบบกระดิกออกนอกระนาบ (Out-of-plane wagging) และการงอแบบบิด (Out-of-plane twisting)

7. กระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง (ดร.พรณี พัทธวรกร. ออนไลน์: หน้า 25-31)

7.1 กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding process)

กระบวนการกดอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงานของกระบวนการกดอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัด (Compression molding machine) คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ (Fixed platen) ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ตัวอย่างเครื่องกดอัด (Compression molding machine)

ที่มา: <http://epg.science.cmu.ac.th/induschem/article-download.php?id=1563> สืบค้นเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2556 (ออนไลน์).

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ร่วมด้วย ได้แก่

ระบบการขับเคลื่อน ในปัจจุบันเครื่องอัดส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานอัตโนมัติโดยใช้แรงขับเคลื่อนจากระบบไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลงนอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนยังทำหน้าที่ในการให้ความดันในการอัดอีกด้วยเครื่องกดอัดขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 5-100 ตัน ส่วนเครื่องกดอัดที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 10-4,000 ตัน โดยขนาดของความดันจะขึ้นกับขนาดของแผ่นเหล็กอัดซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต ชนิดของพลาสติก ความหนาของผนังผลิตภัณฑ์พลาสติก และการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนการกดอัด

ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการกดอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของผนังผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีและในการกดอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ (Curing) ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการกดอัดนานมากดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบเพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้นลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลงและยังสามารถลดความดันที่ใช้ในการกดอัดได้อีกด้วย

ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการกดอัด

แม้การแปรรูปด้วยกระบวนการกดอัดจะเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานานแต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้งานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกดอัดมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการแปรรูปด้วยเทคนิคอื่นๆ หลายประการ ดังนี้

- แม่แบบมีราคาถูกและผลิตได้ง่าย
 - มีการสูญเสียวัสดุุน้อยมากคือมีครีบกหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 2-5% เท่านั้น
 - โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมากเนื่องจากในระหว่างการกดอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
 - เครื่องกดอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
 - ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) บนชิ้นงานซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย
 - แม่แบบสำหรับกระบวนการกดอัดไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำพลาสติก (Sprue) และประตูเข้า (Gates) ทำให้ไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงาน
- ถึงแม้ว่ากระบวนการกดอัดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้วแต่เทคนิคนี้ก็ยังมีข้อเสียเปรียบหลายประการ เช่น

- วัสดุบิดเบี้ยวในสภาวะของแข็งหรือกึ่งของแข็งทำให้เกิดความเครียดภายในแม่แบบสูงมาก ในขณะที่ทำการกดอัดจึงไม่สามารถใส่วัสดุอื่นๆเช่นโลหะลงไปแม่แบบได้เนื่องจากจะทำให้โลหะเกิดการบิดเบี้ยวและแม่แบบเกิดการเสียหายได้จึงทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบหุ้มด้วยเทคนิคนี้ได้
- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
- เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาวทำให้กำลังการผลิตต่ำ
- การผลิตชิ้นงานที่หนาต้องใช้เวลานาน
- จำเป็นต้องมีการตัดครีบทิ้งเสมอ

8. กระบวนการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Testing) (อรรถพล ตะระะ. 2551: 165-249)

8.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปได้แก่ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit) ร้อยละการยืด (Percent elongation) มอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ขีดจำกัดแบบสัดส่วน (Proportional limit) ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent reduction in area) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) จุดจำนน (Yield point) และความแข็งแรงจำนน (Yield strength) เป็นต้น

ทฤษฎี

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงขึ้นทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ได้สภาวะการยืดและเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูปโดยการยืดจากแรงที่กระทำการตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้นนั่นคือการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ

กระบวนการทดสอบ

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุจะใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่าเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ดังแสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

ที่มา: <http://www.piromolarn.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=574359&Ntype=2> สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2556 (ออนไลน์).

กระบวนการทดสอบมีดังนี้

- กลึงแต่งชิ้นทดสอบ (Specimen) จากชิ้นงานตัวอย่าง (Sample) ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เช่น มอก., JIS เป็นต้น
- ทำความสะอาดชิ้นทดสอบ (Specimen) ใช้กระดาษทรายลูบชิ้นทดสอบ ถ้าผิวมีสนิม เพื่อป้องกันการเลื่อน ของชิ้นงานจากหัวจับขณะทำการดึง
- ตรวจสอบความเรียบ ตรง ของชิ้นทดสอบ โดยจะต้องไม่โก่งงอ
- ทำการวัดและบันทึกค่าขนาดและมิติของชิ้นทดสอบ
- ทำการดึงด้วยเครื่องดึง (Tensile machine) ซึ่งเมื่อดึงเสร็จสิ้นชิ้นงานขาดจากกันเป็นสองส่วน

- แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อกำหนดสมบัติเชิงกล

การทดสอบแรงดึงบ่อยครั้งให้ข้อมูลที่สำคัญในการระบุสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุการทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบเบื้องต้นที่ใช้ทดสอบวัสดุซึ่งสามารถให้ข้อมูลความแข็งแรงดึงของวัสดุและบ่อยครั้งที่ข้อมูลนี้มีความสำคัญในการออกแบบและการสร้างผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม

ข้อมูลการทดสอบแรงดึงสามารถสร้างเป็นกราฟความเค้นความเครียดของชิ้นทดสอบ ผลลัพธ์ในการทดสอบจะแสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุในการใช้งานโดยมีสองจุดที่สำคัญเกิดขึ้นบน

กราฟคือจุดจํานนและความเค้นดิ่งสูงสุดหรือความแข็งแรงดิ่งของวัสดุซึ่งเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงสมรรถภาพการรับแรงของวัสดุ

8.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing)

อัตราเร็วการใส่แรงและอัตราการเสียรูปที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุแสดงสมบัติแตกต่างกัน คือวัสดุส่วนใหญ่สามารถรับแรงได้สูงขึ้นก่อนแตกหักหากมีระยะเวลาการใส่แรงนานขึ้น คือ การทดสอบแบบสถิต (static testing) แต่ถ้าใส่แรงแบบพลวัต (dynamic testing) แม้จะกระทำด้วยแรงที่น้อยกว่าปกติชิ้นงานก็แตกหักได้ ทั้งนี้เพราะสมบัติต่างๆ ของวัสดุหลายชนิดขึ้นอยู่กับอัตราการยืดตัว (strain rate) การทดสอบที่ใช้วัดค่าพลังงานที่จำเป็นในการทำให้วัสดุแตกหักภายใต้การรับแรงแบบฉับพลันนี้เรียกว่าเป็นการทดสอบการกระแทก

ทฤษฎี

การทดสอบการกระแทกเป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของวัสดุ ค่าความแข็งแรงการกระแทกจะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (Shock load) พลังงานการกระแทกจะสูญเสียไปในหลายลักษณะเช่นถูกใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุและแรงเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ เป็นต้น

การออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรประการแรกต้องให้ชิ้นงานสามารถดูดซับพลังงานให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในช่วงของการยืดหยุ่นและประการที่สองคืออาศัยการห้วงบางรูปแบบเพื่อลดการดูดซับพลังงานของเครื่อง ในการทดสอบการกระแทกจะใช้พลังงานของลูกตุ้มกระแทกให้ชิ้นทดสอบแตกหักโดยพลังงานจะนิยามเป็นงานซึ่งเป็นแรงที่กระทำเป็นระยะทางหนึ่งดังสมการ

$$W = FD$$

เมื่อ	W	คือ	งาน (ปอนด์ฟุตหรือนิวตันเมตร)
	F	คือ	แรงที่กระทำ (ปอนด์หรือนิวตัน)
	D	คือ	ระยะทางในช่วงที่แรงกระทำ (นิ้วหรือเมตร)

กระบวนการทดสอบ

ส่วนประกอบที่จำเป็นต้องได้มาตรฐานในการทดสอบการกระแทกได้แก่กระบวนการทดสอบ แท่นวางชิ้นงาน ชุดรองรับชิ้นงาน ชิ้นทดสอบ น้ำหนักของลูกตุ้ม และความเร็วการกระแทกของลูกตุ้ม ภาพประกอบ 11 แสดงตัวอย่างเครื่องมือทดสอบการกระแทก (Impact testing)



ภาพประกอบ 11 เครื่องมือทดสอบการกระแทก (Impact testing)

ที่มา: <http://www.itokin2000.com/index.php?lay=show&ac=article&id=538807024&Nttype=22> สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2556 (ออนไลน์).

รูปแบบทางทฤษฎีของเครื่องทดสอบการกระแทกแบบแตกหักในคราวเดียว (Single blow) ควรเป็นดังนี้

- ต้มน้ำหนักที่เคลื่อนที่ควรจะให้พลังงานจลน์ที่มากพอที่จะทำให้ขึ้นทดสอบแตกหักในบริเวณที่กำหนด

- แท่นวางและชุดรองรับชิ้นงานที่สามารถทำให้ชิ้นงานรับแรงกระแทกได้เต็มที่

- ทำการวัดการวัดพลังงานหลงเหลือของลูกตุ้มหลังจากที่ชิ้นงานแตกหัก

พลังงานจลน์การกระแทกจะวัดและควบคุมได้จากน้ำหนักกับระดับความสูงที่วัดจากกึ่งกลางน้ำหนักของลูกตุ้มที่ถูกปล่อยลงมาอย่างอิสระและลูกตุ้มควรจะถูกยึดเป็นอย่างดีเพื่อลดอิทธิพลของการแกว่งด้านข้างหรือแรงหมุนและความเสียดทาน คือต้องอยู่ในสภาพที่ยึดแน่นเมื่อเหวี่ยงกระแทกกับชิ้นงานดังนั้นต้องหาหลักการขจัดสิ่งต่างๆ เหล่านี้เพื่อลดผลกระทบจากการยึดเหนี่ยว ความเร่งและการสั่น แท่นวางชิ้นงานควรมีน้ำหนักมากพอเมื่อเทียบกับพลังงานจากการกระแทกของลูกตุ้มและไม่ทำให้พลังงานการกระแทกเกิดการสูญเสียจากการเสีรูปหรือการสั่นของแท่นวาง และชิ้นงานจะต้องถูกยึดอย่างดีและอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องตลอดการทดสอบ

8.3 การทดสอบแรงดัดงอ (Bending or Flexural Testing)

การทดสอบแรงดัดงอเป็นการใส่แรงกระทำกับชิ้นทดสอบแล้วทำให้เกิดแรงเค้นอัดที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดชิ้นงานและเกิดแรงเค้นดึงที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดชิ้นงาน การดัดงออาจกระทำด้วยแรงเค้นตรง แรงเฉือนตัด หรือแรงเฉือนบิด โดยชิ้นงานที่มีการรับแรงแบบสลับทางมักจะทำการทดสอบการดัดงอซึ่งชิ้นงานจะมีการโค้งงอเกิดขึ้น ณ จุดหนึ่งบนพื้นผิวบริเวณที่มีการรับแรงการดัดงอเป็นการทดสอบความแข็งแรงตึง (Stiffness) ของแท่งทดสอบซึ่งสามารถใช้เป็นฟังก์ชันในส่วนของสมบัติความแข็งแรงตึง (Stiffness) ของวัสดุ

ทฤษฎี

การทดสอบการดัดงอเป็นการดัดงอชิ้นงานทดสอบภายใต้แรงกระทำ ความแข็งแรงที่วัสดุแสดงออกมาเป็นฟังก์ชันของวัสดุที่ชิ้นทดสอบถูกเตรียมขึ้น รวมทั้งลักษณะของภาคตัดของชิ้นทดสอบ เช่นแท่งทดสอบชนิดเดียวกันที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 1×4 นิ้วจะมีความแข็งแรงการดัดงอสูงกว่าแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2×2 นิ้ว ดังนั้นหลักวิชาทางคณิตศาสตร์จะมีความเกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงการดัดงอของวัสดุอย่างมาก

สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการดัดงอจะเป็นแบบเดียวกันกับการทดสอบแรงดึงได้แก่ ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) จุดจำนน (Yield point) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และอื่นๆ ด้วยเหตุนี้การทดสอบการดัดงอจึงใช้เป็นการทดสอบพื้นฐานที่ดีที่สุดในการทดสอบชิ้นงานที่มีรูปทรงภาคตัดแบบต่างๆ ในการนำไปใช้งาน

เมื่อชิ้นทดสอบมีการรับแรงในลักษณะที่มีฐานรองรับปลายทั้งสองแล้วมีการใส่แรงกระทำบริเวณตรงกลางชิ้นงานซึ่งจะทำให้ด้านล่างของชิ้นงานอยู่ภายใต้แรงดึงและด้านบนอยู่ภายใต้แรงอัดแรงดึงจะทำให้ส่วนล่างของชิ้นทดสอบถูกดึงยืดออก ส่วนแรงอัดจะทำให้ชิ้นทดสอบถูกอัดเข้าหากันและบริเวณกึ่งกลางระหว่างสองแรงนี้คือเส้นหรือแกนแบ่ง

การบันทึกข้อมูลแรงที่กระทำกับการดัดงอที่เกิดขึ้นสามารถนำไปเขียนเป็นกราฟความเค้นความเครียดการดัดงอเพื่อใช้ในการอธิบายคุณลักษณะของวัสดุจากการทดสอบการดัดงอนอกจากนั้นควรทำการรายงานทั้งในส่วนของแรงที่กระทำกับการดัดงอ ประเภทและคุณลักษณะของการแตกหักเช่นอธิบายชนิดของรอยแตกหักว่าแตกหักจากแรงดึง แรงอัด หรือว่าแรงเฉือน หรือมีการบวมของชิ้นงานก่อนการแตกหักหรือไม่ ลักษณะของรอยแตกหักเป็นอย่างไร หยิบขรุขระหรือเรียบเสมอกันเป็นต้น หรืออาจมีการวาดรูปรอยแตกหักคร่าวๆ ประกอบกับคำอธิบายสั้นๆ ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ดีในการอธิบายประเภทและคุณลักษณะของรอยแตกหัก

กระบวนการทดสอบ

การทดสอบการดัดงอมักทำการทดสอบด้วยเครื่องเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ซึ่งในการเตรียมชิ้นทดสอบมีข้อควรระวังต่างๆ ดังนี้

1. รูปทรงของชิ้นทดสอบควรมีรูปแบบที่สามารถทำการทดสอบตามนิยามที่กำหนดและทราบระยะห่างระหว่างแท่นวางชิ้นงานโดยความยาวของชิ้นทดสอบควรอยู่ระหว่าง 6-12 เท่าของความหนาทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแรงเฉือนหรือการบวม
2. พื้นสัมผัสกับวัสดุภายใต้การทดสอบไม่ควรเกิดจุดที่มีความเค้นสูงเกินไปที่พื้นผิว
3. ขณะที่ใส่แรงกระทำอาจต้องทำการปรับตำแหน่งฐานรับชิ้นงานในแนวยาวทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อจำกัดในการทดสอบในแนวยาว
4. บางครั้งอาจต้องทำการปรับมุมด้านขวางเพื่อป้องกันการบิดเป็นเกลียวของปลายชิ้นทดสอบด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดแรงเค้นบิดเกิดขึ้นในชิ้นงาน
5. ขณะรับแรงกระทำไม่ควรมีการปรับเปลี่ยนทิศทางการจัดเรียงของชิ้นทดสอบ

9. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

9.1 การผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ปี พ.ศ.2546 (ค.ศ. 2003) ชอยและคณะ (Choi; et al. 2003 : 891-893) ได้ทำการผลิตเส้นใยซิลิกา ด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและเทคนิคโซลเจล (Sol-gel) โดยใช้เตตระเอทิลอซิเลต (TEOS) เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_6O) น้ำกลั่น (H_2O) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วน 1:2:2:0.01 โดยมวล และได้ใช้เทคนิคโซลเจลในการเตรียมสารตั้งต้น ในขั้นตอนการปั่นเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ผู้วิจัยได้ศึกษาความต่างศักย์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10-16 กิโลโวลต์ โดยมีระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับตัวรองรับ 10 เซนติเมตร เมื่อนำเส้นใยซิลิกาไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยซิลิกาค่อนข้างจะเล็กลงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เส้นใยซิลิกามีขนาด 200-600 นาโนเมตร เมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ 12-16 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเส้นใยซิลิกาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันพบว่าเส้นใยซิลิกามีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous silica)

ปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ.2010) อิโมระและคณะ (Iimura; et al. 2010: 64-68) ได้ทำการศึกษาการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยไฟฟ้าสถิตและได้เตรียมสารตั้งต้นด้วยกระบวนการโซลเจล (Sol-gel) โดยใช้เตตระเอทิลอซิเลต (TEOS) เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_6O) น้ำกลั่น (H_2O) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นสารตั้งต้น และผู้วิจัยยังได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำกลั่นต่อเตตระเอทิลอซิเลต-

ลิเคต ($r = \text{H}_2\text{O}/\text{TEOS}$) ที่มีผลต่อระยะเวลาในการหนืดของสารละลาย อัตราส่วนโดยโมลที่ใช้ในการผสมสารละลายมีด้วยกัน 5 ตัวอย่าง ในแต่ละตัวอย่างจะมีอัตราส่วนระหว่างน้ำกลั่นต่อเตตระเอทิลออกซิไลเกตต่างกัน ได้แก่ 4.0 2.7 และ 1.7 ตามลำดับ พบว่าสารละลายที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำกลั่นต่อเตตระเอทิลออกซิไลเกตมากกว่า 2 ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง สารละลายจึงจะหนืด และสารละลายที่มีอัตราส่วนน้ำกลั่นต่อเตตระเอทิลออกซิไลเกตน้อยกว่า 2 สารละลายจะไม่หนืดเลย จากนั้นผู้วิจัยได้ใส่โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และ แคลเซียมไนไตรต์ ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) ในกรณีที่ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำกลั่นต่อเตตระเอทิลออกซิไลเกตเท่ากับ 1.7 พบว่าสารละลายจะหนืดเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับสารละลายที่ไม่ได้เติม KCl และ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ จากนั้นเมื่อนำสารละลายที่มีอัตราส่วนน้ำระหว่างเตตระเอทิลออกซิไลเกตน้อยกว่า 2 มาปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับตัวรองรับ 200 มิลลิเมตร เส้นใยที่ปั่นได้จะมีขนาดประมาณ 4.5 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใย 7.7 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับซิลิกาทั่วไป

ปี พ.ศ. 2555 (ค.ศ. 2012) ประมวลทรัพย์ และคณะ (Pramuanub; et al. 2012: 602-606) ได้ทำการผลิตเส้นใยซิลิกา ด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและเทคนิคโซลเจล (Sol-gel) โดยใช้เตตระเอทิลออกซิไลเคต (TEOS) เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) น้ำกลั่น (H_2O) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วน 1:2:2:0.01 โดยมวล และได้ใช้เทคนิคโซลเจลในการเตรียมสารตั้งต้น ในขั้นตอนการปั่นเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ผู้วิจัยได้ศึกษาความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ โดยมีระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับตัวรองรับ 20 เซนติเมตร ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคูณพหุคูณการแคลไซน์เส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกัน 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส และได้้นำเส้นใยซิลิกาก่อนเผาและหลังเผาที่ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ไปศึกษาลักษณะเส้นใยด้วยเครื่อง SEM พบว่าเส้นใยมีขนาด 0.350 0.380 0.326 และ 0.352 ไมโครเมตร ตามลำดับ และยังทำการศึกษาลักษณะพันธะ หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของสาร ด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าการแคลไซน์เส้นใยซิลิกาไม่มีผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และยังพบว่าการแคลไซน์ทำให้กำจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้างในเส้นใยซิลิกาได้ดี

9.2 การประยุกต์ใช้เส้นใยซิลิกานำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน

ปี พ.ศ. 2544 (ค.ศ. 2003) กราสฟา และคณะ (Garcfa; et at. 2003: 33-38) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่มีซิลิกาขนาดนาโนเป็นวัสดุเสริมแรง ให้ดีขึ้น โดยใช้ปริมาณของซิลิกา 1 3 5 % โดยน้ำหนัก ซิลิกามีรูปร่างทรงกลมขนาด 10-30 นาโนเมตร และมีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding) และได้นำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยซิลิกาเข้าไปในไนลอน 6 พบว่ายังมอดูลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นวิกฤต (Yield strength) และความเครียด ณ จุดขาด (Strain at break) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยซิลิกา

ปี พ.ศ.2547 (ค.ศ. 2006) เมามิดและคณะ (Mouhmid; et at. 2006: 544-552) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอไมด์ 6,6 (Polyamide 6,6: PA 66) ที่มีเส้นใยซิลิกาลักษณะเส้นเป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยใช้เส้นใยซิลิกา 15 30 และ 50% โดยน้ำหนัก ส่วนผสมทั้งหมดถูกผสมในเครื่องรีดแบบเกลียวรีดเดี่ยว (Single screw extruder) และส่วนผสมทั้งหมดถูกนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molded) และได้นำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มเส้นใยซิลิกาเข้าไปพอลิเอไมด์ 6,6 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืดหยุ่น (Tensile modulus) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยซิลิกา

ปี พ.ศ.2553 (ค.ศ.2010) ลีและคณะ (Li; et at. 2010 : 262-268) ได้ทำการศึกษาการใช้เส้นใยซิลิกาที่มีลักษณะเส้นเป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร โดยมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันคือ 1 2 3 และ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเส้นใยซิลิกาถูกเตรียมโดย monomer casting (MC) technology เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการเสียดทาน (Tribological properties) ของพอลิเอไมด์ 6 บล็อกโคพอลิเมอร์ (Polyamide 6-polyurethane (PA6-PU) block copolymers) ในการทดสอบแรงเสียดทานและการสึกหรอผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดย friction machine ที่มีลูกเหล็กโครเมียม (Chromium steel ball) เคลื่อนที่บนพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ 500 1000 และ 1500 รอบ/นาที และใช้แรง 78.5 และ 159 นิวตันในการทดสอบ พบว่าเมื่อโคพอลิเมอร์ได้รับการเสริมแรงจากเส้นใยซิลิกาความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเส้นใยซิลิกา แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) จะลดลงในช่วงแรกจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใส่เส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้ศึกษาสมบัติการเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าเมื่อเส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทาน (Coefficient of friction) และอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ของวัสดุคอมพอสิตจะลดลง แรงที่ใช้ในการทดสอบและความเร็วในการเคลื่อนที่จะมีผลต่ออัตราการสึกหรอของวัสดุคอมพอสิต

ปี พ.ศ.2553 (ค.ศ. 2010) เซเกทเทลลีและคณะ (Segatelli; et al. 2010: 98-105) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของไนลอน 6 และไนลอน 6 ผสมกับโคพอลิเมอร์ (EPDM-g-MA) โดยใช้เส้นใยซิลิกาที่มีลักษณะสั้นและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ± 2 ไมโครเมตรยาว 150 ± 83 ไมโครเมตรโดยใช้เส้นใยที่ได้จากธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยซิลิกา 5 10 และ 15% โดยน้ำหนัก จากนั้นผู้วิจัยนำส่วนผสมทั้งหมดไปผสมในเครื่องรีดแบบเกลียวคู่ (Twin-screw extruder) แล้วอัดให้ส่วนผสมทั้งหมดเป็นเม็ด และนำมาขึ้นรูปในเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molded) หลังจากนั้นได้นำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการนำเส้นใยซิลิกามาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 จะมีค่ามอดูลัสของการโค้งงอ (Flexural modulus) เพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่อผสม EPDM-g-MA ลงไปในไนลอน 6 นอกจากนั้นค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และการทดสอบแรงกระแทก (Izod impact strength) ของไนลอน 6 ที่ผสมกับ EPDM-g-MA จะลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้น และไนลอน 6 ที่ผสมกับ EPDM-g-MA จะมีความเหนียวมากกว่าไนลอน 6 เส้นใยซิลิกาที่มีลักษณะสั้นนั้นสามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติกทางวิศวกรรมได้

ปี พ.ศ.2553 (ค.ศ.2010) เว็นกาตะและเกร็ก (Venkatat; &Gregg. 2010: 1253-1256) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงกลด้านการดัดงอของเทอร์โมพลาสติก พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และไนลอน 66 ที่มีเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง โดยใช้ปริมาณเส้นใยแก้ว 0 10 40 % โดยน้ำหนัก ชิ้นงานถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding) ตามมาตรฐาน ASTM D790 เพื่อทดสอบการดัดงอ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าความความทนแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยซิลิกาที่เพิ่มขึ้น

ปี พ.ศ.2554 (ค.ศ. 2011) ยูและคณะ (Yoo; et al. 2011 : 180-190) ได้ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตที่ประกอบไปด้วยไนลอน 6 ผสมกับออกการ์โนเคลย์ (Organoclay) ออกการ์โนเคลย์ที่ใช้คือมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite : MMT) และเส้นใยซิลิกาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 ไมโครเมตรและความยาว 4 มิลลิเมตร โดยใช้ปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันคือ 10 20 30 40% โดยน้ำหนัก ส่วนผสมทั้งหมดถูกผสมในเครื่องรีดแบบเกลียวรีดเดี่ยว (Single screw extruder) เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดถูกอัดออกมาเป็นเม็ดและถูกนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molded) โดยขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ASTM D638 ASTM D256 เพื่อทดสอบแรงดึง (Tensile) และการทดสอบแรงกระแทก (Izod impact strength) ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้นค่าความยืดหยุ่น (Tensile modulus) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของไนลอน 6 ที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ผสมอยู่จะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ไม่มียอนต์มอริลโลไนต์ และเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเส้นใยซิลิกากการทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength)

ของไนลอน 6 ที่ไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์ผสมอยู่จะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ผสมอยู่
นอกจากนั้นไนลอน 6 ที่ไม่มีมอนต์มอริลโลไนต์จะมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)
ลดลง



จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตาราง 1 งานวิจัยการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ปี ค.ศ	ผู้วิจัย	ผลงาน	สารเคมี	สัดส่วนโดย มวล	เงื่อนไข	เครื่องมือ วิเคราะห์	ผลที่ได้
2003	ชอยและคณะ	ศึกษาและผลิต เส้นใยซิลิกา ขนาดนาโน	TEOS C_2H_6O H_2O HCl	1:2:2:0.01	-ค่าความต่าง ศักย์ในช่วง 10- 16 กิโลโวลต์ -ระยะห่าง ระหว่างปลาย เข็มโลหะกับ วัสดุรองรับ 10 เซนติเมตร	-SEM -XRD	-ขนาดของเส้นใย ซิลิกาจะเล็กลงเมื่อ ความต่างศักย์ ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น -เส้นใยซิลิกามี โครงสร้าง แบบอสัณฐาน

ตาราง 1 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้วิจัย	ผลงาน	สารเคมี	สัดส่วนโดย มวล	เงื่อนไข	เครื่องมือ วิเคราะห์	ผลที่ได้
2010	อิมูระและคณะ	ศึกษาการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต	TEOS C_2H_6O H_2O HCl	อัตราส่วน $H_2O/TEOS$ 4.0 2.7 1.7	-ค่าความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ -ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับวัสดุรองรับ 20 เซนติเมตร	-SEM	-สารละลายที่มีค่าอัตราส่วนระหว่าง $H_2O/TEOS$ น้อยกว่า 2 สารละลายจะไม่มีคความหนืดเลย แต่สำหรับสารละลายที่โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และแคลเซียมไนไตรต์ ($Ca(NO_3)_2$) พบว่าสารละลายมีความหนืดและสามารถนำไปปั่นได้

ตาราง 1 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้วิจัย	ผลงาน	สารเคมี	สัดส่วนโดย มวล	เงื่อนไข	เครื่องมือ วิเคราะห์	ผลที่ได้
2012	ประมวลดทรัพย์และ คณะ	ศึกษาการผลิต เส้นใยซิลิกาด้วย กระบวนการปั่น ด้วยไฟฟ้าสถิต	TEOS C_2H_6O H_2O HCl	1:2:2:0.01	-ค่าความต่าง ศักย์ 15 กิโล โวลต์ -ระยะห่าง ระหว่างปลาย เข็มโลหะกับ วัสดุรองรับ 20 เซนติเมตร -อุณหภูมิใน การเคลือบ 400 600 และ 800 องศา เซลเซียส	-SEM -FT-IR	การเคลือบเส้นใย ซิลิกาไม่มี ผลกระทบต่อ ลักษณะทาง สัณฐานวิทยาและ ขนาดของเส้นใย ซิลิกาที่ และยัง พบว่าการเคลือบ ทำให้กำจัด สารอินทรีย์ที่ตกค้าง ในเส้นใยซิลิกาได้ดี

ตาราง 2 งานวิจัยการประยุกต์ใช้เส้นใยซิลิกานำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6

ปี ค.ศ	ผู้แต่ง	ผลงาน	ปริมาณของเส้นใยซิลิกาและขบวนการผลิต	การขึ้นรูป	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา
2003	กราฟฟาและคณะ	ทำการศึกษานีลอน 6 ที่มีซิลิกานาโนเป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ให้ดีขึ้น	0,1,3,5 wt%	Compression molding	Young's modulus Yield strength Strain at break	Young's modulus เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นวิกฤต (Yield strength) และความเครียด ณ จุดขาด (Strain at break)
			ขนาดของเส้นใย			
			D= 10-30 nm			

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ตาราง 2 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้แต่ง	ผลงาน	ปริมาณของเส้นใยซิลิกาและขบวนการผลิต	การขึ้นรูป	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา
2006	เมามิดและคณะ	ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอไมด์ 6,6 (Polyamide 6,6: PA66) ที่มีเส้นใยซิลิกาลักษณะเส้นเป็นวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์	0,15,30,50 wt%	Single screw extruder และ Injection molding	Tensile strength Tensile modulus	Tensile strength และ Tensile modulus จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยซิลิกา

ตาราง 2 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้แต่ง	ผลงาน	ปริมาณของเส้นใยซิลิกาและขบวนการผลิต	การขึ้นรูป	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา
2010	ลีและคณะ	ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการเสียดทานของพอลิเอไมด์ 6 บล็อกโคพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง	0,1,2,3,5 wt% เส้นใยซิลิกาถูกเตรียมโดยวิธี monomer casting (MC) technology	นำส่วนผสมเทลงบนแม่พิมพ์	Tensile strength Impact strength Coefficient of friction Wear rate	-Tensile strength เพิ่มขึ้น -Impact strength จะลดลงในช่วงแรก จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใส่เส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้น -Coefficient of friction และWear rate จะลดลง
			ขนาดของเส้นใย			
			D= 10 μ m			

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ตาราง 2 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้แต่ง	ผลงาน	ปริมาณของเส้นใยซิลิกาและขบวนการผลิต	การขึ้นรูป	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา
2010	เซเก็ทเทल्लीและคณะ	ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของไนลอน 6 และไนลอน 6 ผสมกับโคพอลิเมอร์(EPDM-g-MA) โดยใช้เส้นใยซิลิกาที่มีลักษณะสั้นเป็นวัสดุเสริมแรง	0,5,10,15 wt% เส้นใยได้จากธรรมชาติ	Twin-screw extruder และ Injection molding	Flexural modulus Elongation at break Izod impact strength	-Flexural modulus จะเพิ่มขึ้น -Elongation at break จะลดลง -Izod impact strengthจะเพิ่มขึ้น น้อยมาก
			ขนาดของเส้นใย			
			L=150±83µm D=12±2µm			

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

L = ความยาวของเส้นใย

ตาราง 2 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้แต่ง	ผลงาน	ปริมาณของเส้นใยซิลิกาและขบวนการผลิต	การขึ้นรูป	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา
2010	เว็นกาตะและเกร็ก	ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านการดัดงอของเทอร์โมพลาสติก พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และไนลอน 66 ที่มีเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง	0,10,40 wt%	Compression molding	Flexural strength	เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าความความทนแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยซิลิกาที่เพิ่มขึ้น

ตาราง 2 (ต่อ)

ปี ค.ศ	ผู้แต่ง	ผลงาน	ปริมาณของเส้นใยซิลิกาและขบวนการผลิต	การขึ้นรูป	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา
2011	ยูและคณะ	ทำการศึกษา ลักษณะพื้นฐาน วิทยาและคุณสมบัติ เชิงกลของไนลอน 6 ผสมกับมอนต์มอริล โลไนต์ (Montmorillonite : MMT) ที่มีเส้นใย ซิลิกาเป็นวัสดุ เสริมแรง	0 ,10, 20 ,30, 40%wt	Single screw extruderและ Injection molding	Tensile modulus Tensile strength Izod impact strength Elongation at break	-Tensile modulus และTensile strengthจะเพิ่มขึ้น - Izod impact strength ไม่จะเพิ่ม -Elongation at break จะลดลง
			ขนาดของเส้นใย			
			L=4 mm D=13 μ m			

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใย

L = ความยาวของเส้นใย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการผลิตเส้นใยซิลิกา (Silica fibers) โดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) และเมื่อได้เส้นใยซิลิกา นำเส้นใยซิลิกาไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6

1. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid: HCl)
- 1.2 เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate: TEOS)
- 1.3 น้ำกลั่น (Distilled water)
- 1.4 ไนลอน 6 (Nylon 6)
- 1.5 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol: C_2H_6O)
- 1.6 หลอดฉีดยา (Syringe) ขนาด 5 มิลลิลิตร
- 1.7 เข็มโลหะ (Needle)
- 1.8 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 1.9 สเตอเรียร์ (Stirrer)
- 1.10 แหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High voltage power supply)

2. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกา

- 2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)
- 2.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต

- 3.1 เครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding machine)

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

- 4.1 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal testing machine)
- 4.2 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

5. สถานที่ดำเนินงานวิจัย

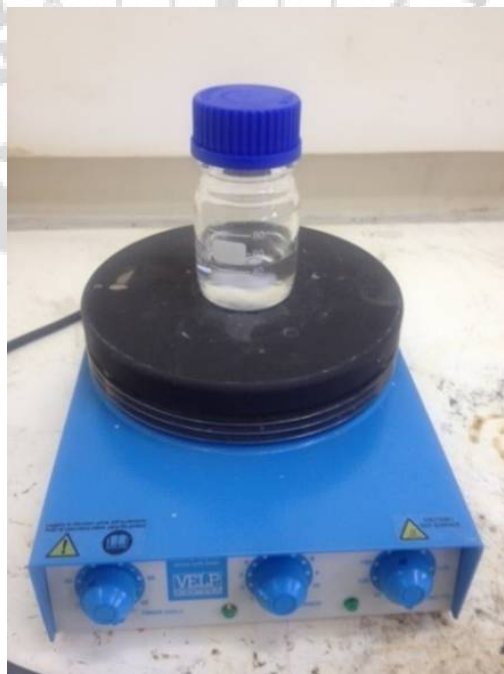
- 5.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 5.2 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 5.3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 5.4 สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

6. ขั้นตอนการวิจัย

6.1 ขั้นตอนการเตรียมตั้งต้นในการผลิตเส้นใย (นัฐยา ประมวลทรัพย์; 2557: 28-32)

1. สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเส้นใยซิลิกาชนิดนี้ เตตระเอทิลอซิเลต น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก เอทิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วนโดยโมล $\text{TEOS} : \text{H}_2\text{O} : \text{HCl} : \text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ เท่ากับ 1 : 2 : 0.01 : 2
2. นำเตตระเอทิลอซิเลตผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ (สารละลายชุดที่ 1) และนำกรดไฮโดรคลอริกผสมกับน้ำกลั่น (สารละลายชุดที่ 2) ดังภาพประกอบ 12
3. นำสารละลายชุดที่ 1 มากรนบนสเตอริออร์ (Stirrer) นาน 2 ชั่วโมง ด้วยความแรงระดับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง ระหว่างที่ปั่นสารละลายชุดที่ 1 นำสารละลายชุดที่ 2 ค่อยๆ หยดลงไปในสารละลายชุดที่

1



ภาพประกอบ 12 การผสมสารละลายบนสเตอริออร์ (Stirrer)

4. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3 มาให้ความร้อนแก่สารละลาย โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ให้ความร้อน 6 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 13 จนได้สารละลายที่มีความหนืดเหมาะสมต่อการขึ้นรูปเส้นใยซิลิกา

หมายเหตุ : ในการเตรียมสารละลายได้ทำการผสมสารละลายข้างต้นทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนให้ความร้อน 6 ชั่วโมง

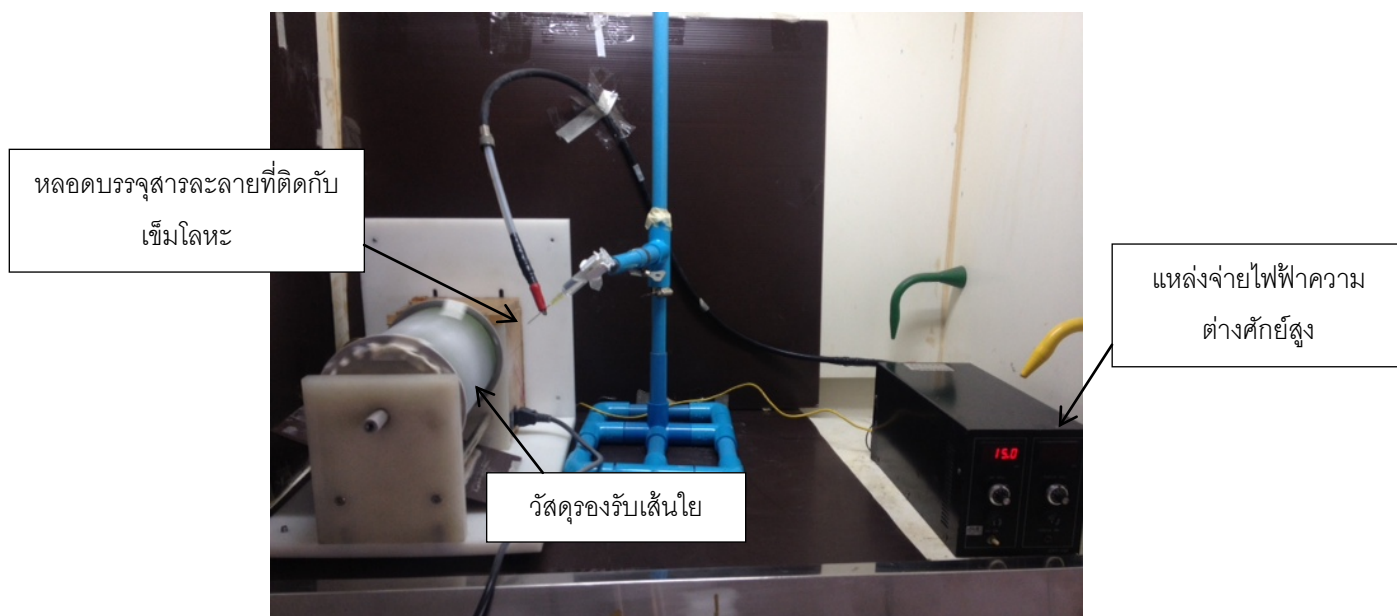


ภาพประกอบ 13 การให้ความร้อนแก่สารละลายโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ

6.2 ขั้นตอนการปั่นเส้นใยซิลิกาด้วยไฟฟ้าสถิต

1. เตรียมอุปกรณ์โดยต่อขั้วบวกเข้ากับปลายเข็มโลหะและต่อขั้วลบกับวัสดุรองรับเส้นใย
2. นำสารละลายที่เตรียมไว้ ใส่ในหลอดฉีดยา ขนาด 5 มิลลิลิตร และต่อเข้ากับปลายเข็มโลหะ ติดตั้งหลอดฉีดยากับขาตั้งเอียงทำมุมประมาณ 45 องศา ให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยห่างกัน 15 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 14
3. เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High- voltage power supply) พร้อมทั้งปรับค่าความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ ทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง

หมายเหตุ : ในการเตรียมสารละลายจากกระบวนการโซลเจล สารละลายจะมีความหนืดพอเหมาะในการปั่นอยู่ในช่วง 3 ชั่วโมง ระหว่างการปั่นเมื่อเกิดการอุดตันที่ปลายเข็มสามารถแก้ไขได้โดยนำสำลีชุบในตัวทำละลายและนำมาเช็ดที่ปลายเข็มโลหะ



ภาพประกอบ 14 อุปกรณ์การปั่นเส้นใยซิลิกาด้วยไฟฟ้าสถิต

4. นำเส้นใยซิลิกาไปเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุเซรามิก ด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตัวทำละลาย โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังภาพประกอบ 15

5. นำเส้นใยซิลิกาไปเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุเซรามิก ด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้าง โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



ภาพประกอบ 15 เส้นใยซิลิกาเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุเซรามิก



ภาพประกอบ 16 แผ่นเส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกา

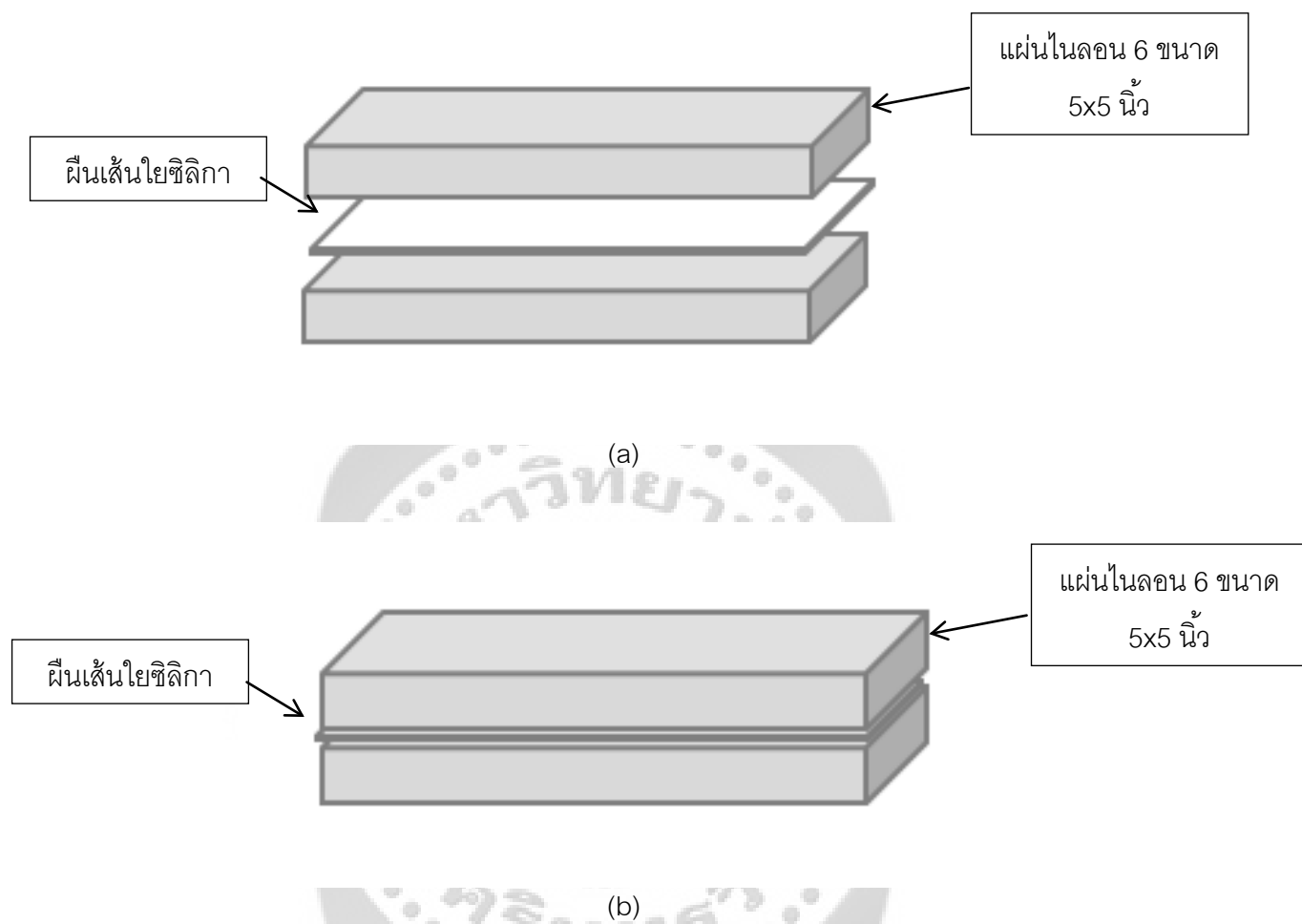
1. ทำการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)
2. ศึกษาลักษณะพันธะ หมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของสาร ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์-ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

6.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิต

เส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ซึ่งขึ้นรูปโดยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน โดยนำแผ่นไนลอน 6 ที่ขึ้นรูปแล้วมาวางประกบกันเป็นชั้นซึ่งระหว่างชั้นมีแผ่นเส้นใยซิลิกาวางสลับอยู่ประมาณ 0.5 1 2 และ 4% โดยน้ำหนัก ในการทดสอบแรงดึงนั้นจะใช้แผ่นไนลอน 6 ประกบกัน 2 ชั้น และ 3 ชั้น การทดสอบแรงกระแทกและแรงดัดงอจะใช้แผ่นไนลอน 6 ซ้อนกัน 2 ชั้น โดยมีขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

1. นำเม็ดไนลอน 6 ใส่แม่พิมพ์ให้มีปริมาณพอเหมาะเพื่อที่จะขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงาน โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปนั้นมีขนาด กว้าง 5 นิ้ว และ ยาว 5 นิ้ว
2. นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
3. นำแผ่นไนลอน 6 ที่ขึ้นรูปไว้แล้ววางสลับกับแผ่นเส้นใยซิลิกา เป็นชั้นและนำไปอัดซ้ำด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อนอีกครั้งด้วยอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ดังภาพที่ 17

ตารางที่ 3-5 แสดงรายละเอียดมวลของเส้นใยซิลิกาและไนลอน 6



ภาพประกอบ 17 (a) แผ่นไนลอน 6 ประกอบกับแผ่นเส้นใยซิลิกา

(b) แผ่นไนลอน 6 ประกอบกับแผ่นเส้นใยซิลิกาหลังเข้าเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน

ตาราง 3 รายละเอียดมวลของไนลอน 6 และเส้นใยซิลิกาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง

ชิ้นงาน	จำนวนชั้น ของไนลอน6	มวลของ ไนลอน 6 (กรัม)	จำนวนชั้นของ เส้นใยซิลิกา	มวลของ เส้นใย (กรัม)	สัดส่วนของ เส้นใยซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)
TSA-0	2	41.3	0	0	0
TSA-	2	41.3	1	0.224	0.542
0.5	2	41.3	1	0.424	1.026
TSA-1	2	41.3	1	0.794	1.922
TSA-2	3	41.3	0	0	0
TSB-0	3	41.3	2	0.234	0.987
TSB-1				0.174	
	3	41.3	2	0.394	1.883
TSB-2				0.384	
	3	41.3	2	0.744	4.014
TSB-4				0.914	

ตาราง 4 รายละเอียดมวลของไนลอน 6 และเส้นใยซิลิกาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงาน	จำนวนชั้น ของไนลอน 6	มวลของ ไนลอน6 (กรัม)	จำนวนชั้นของ เส้นใยซิลิกา	มวลของ เส้นใย (กรัม)	สัดส่วนของ เส้นใยซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)
IP-0	2	44.08	0	0	0
IP-0.5	2	44.08	1	0.241	0.546
IP-1	2	44.08	1	0.454	1.029
IP-2	2	44.08	1	0.854	1.937

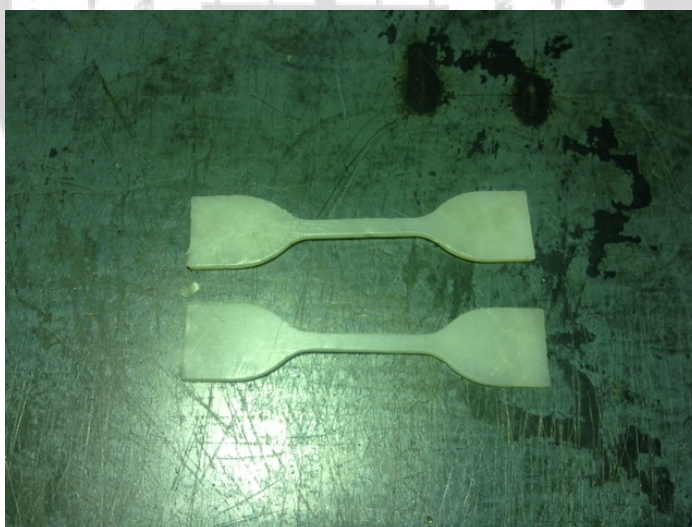
ตาราง 5 รายละเอียดมวลของไนลอน 6 และเส้นใยซิลิกาในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง

ชิ้นงาน	จำนวนชั้น ของไนลอน 6	มวลของ ไนลอน 6 (กรัม)	จำนวนชั้นของ เส้นใยซิลิกา	มวลของ เส้นใย (กรัม)	สัดส่วนของ เส้นใยซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)
FR-0	2	44.08	0	0	0
FR-0.5	2	44.08	1	0.241	0.546
FR-1	2	44.08	1	0.454	1.029
FR-2	2	44.08	1	0.854	1.937

6.5 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

1. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

ในการทดสอบแรงดึงมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้แม่พิมพ์แบบตัดโดยให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 638 ซึ่งมีขนาด กว้าง 6 ยาว 30หนา 3 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638

2. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทก (Impact testing)

ในการทดสอบแรงกระแทกมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้แม่พิมพ์แบบตัดโดยให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งมีขนาด กว้าง 12.7 ยาว 64 หนา 3.2 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256

3. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดัดงอ (Bending or Flexural Testing)

ในการทดสอบแรงดัดงอมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้แม่พิมพ์แบบตัดโดยให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งมีขนาด กว้าง 12.7 ยาว 125 หนา 3.2 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 20



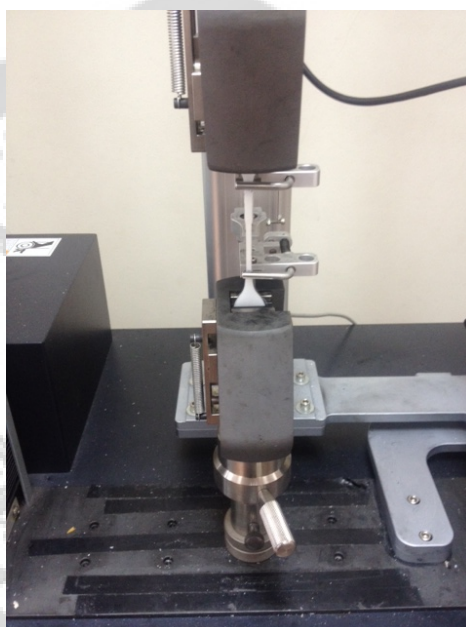
ภาพประกอบ 20 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดัดงอตามมาตรฐาน ASTM D790

4. นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ในข้อ 1-3 มาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำไปทดสอบเชิงกล

6.6 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกล

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงานที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM D638 มาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC506B1 ใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง

2. การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing)

ก่อนที่จะทำการทดสอบแรงกระแทกนั้น นำชิ้นงานที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM D256 มาทำรอยบาก (Notch) ด้วยเครื่องบากตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งเครื่องบากนี้จะบากชิ้นงานเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังภาพประกอบ 22 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Izod Impact tester) ยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7045 ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 22 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการรับแรงกระแทกที่ทำรอยบากแล้ว



ภาพประกอบ 23 เครื่องทดสอบแรงกระแทกที่ใช้ในการทดสอบ

3. การทดสอบแรงดัดงอ (Bending or Flexural Testing)

นำชิ้นงานที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM D790 มาทดสอบแรงดัดงอด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC506B1 โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) 1 กิโลนิวตัน ความเร็วในการกด (Compression speed) 1.28 มิลลิเมตรต่ออนาที และใช้ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน (Support span) 48 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 ขั้นตอนการทดสอบแรงดึง



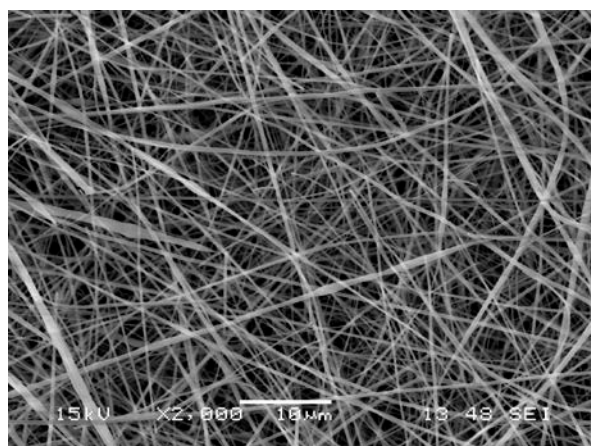
บทที่ 4

ผลการวิจัย

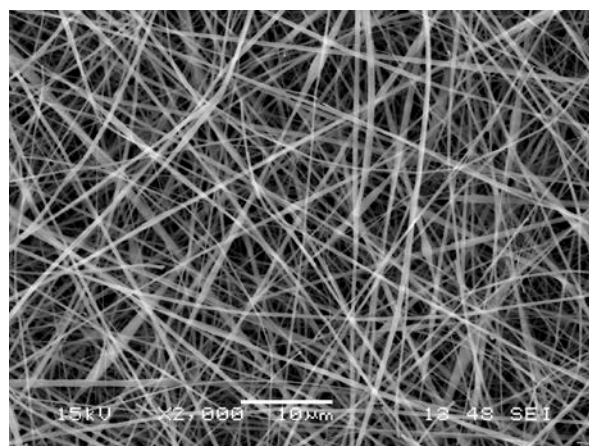
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้สารตั้งต้นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก เอทิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วนโดยโมล TEOS : H_2O : HCl : C_2H_6O เท่ากับ 1 : 2 : 0.01 : 2 แล้วนำเส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ขึ้นรูปโดยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน โดยนำแผ่นไนลอน 6 ที่ขึ้นรูปแล้วมาวางประกบกันเป็นชั้นซึ่งระหว่างชั้นมีแผ่นเส้นใยซิลิกาวางสลับอยู่ พร้อมทั้งศึกษาผลของปริมาณเส้นใยซิลิกาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6

4.1 การวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

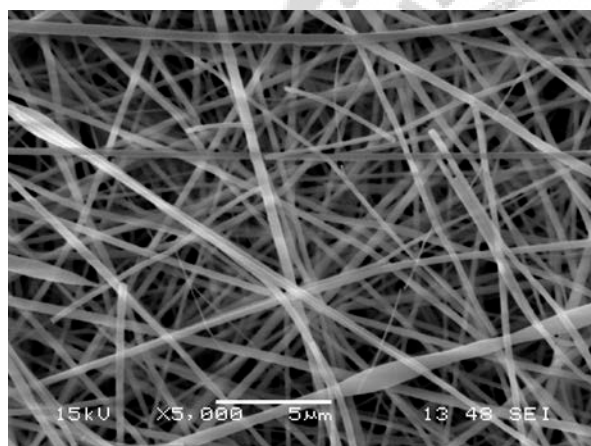
ในขั้นตอนการผลิตเส้นใยซิลิกานั้นได้ทำการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย 15 เซนติเมตร (Pramuansub; et al. 2012: 602-606) จากนั้นได้นำเส้นใยซิลิกาที่ได้มาเผาที่ 200 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในการวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถแบ่งเส้นใยซิลิกาที่นำมาวิเคราะห์เป็น 3 กลุ่มคือ เส้นใยซิลิกาก่อนเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้าง เส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลายที่ตกค้างที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และเส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้างที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 2000 และ 5000 เท่า แสดงลักษณะของเส้นใยซิลิกาดังภาพประกอบที่ 25 26 และ 27 ตามลำดับ



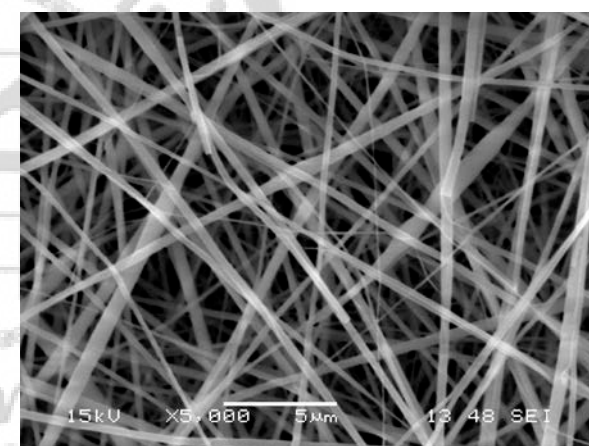
(a)



(b)

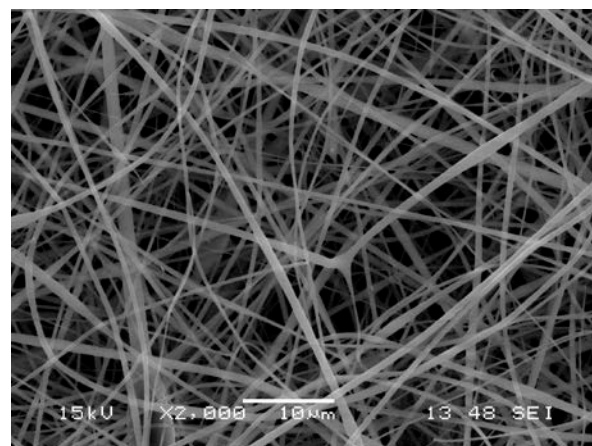
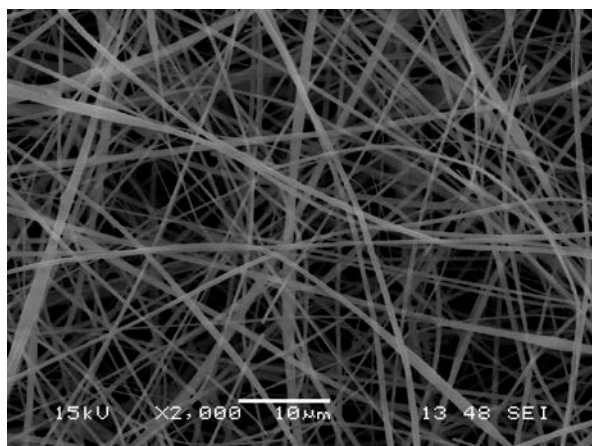


(c)



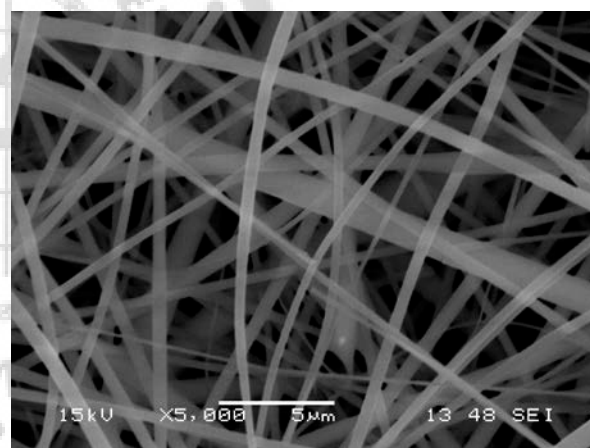
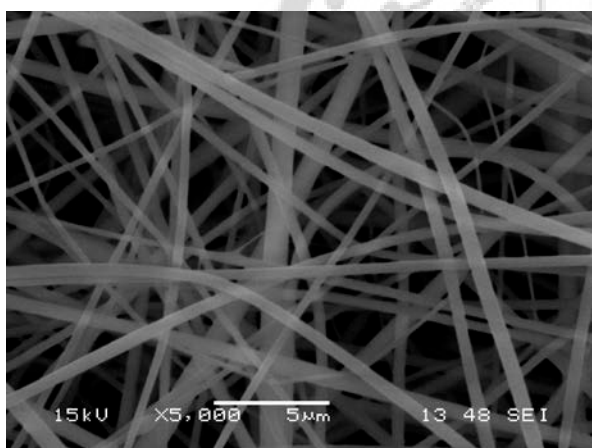
(d)

ภาพประกอบ 25 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาก่อนการเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้าง (a) และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า (c) และ (d) กำลังขยาย 5000 เท่า



(a)

(b)

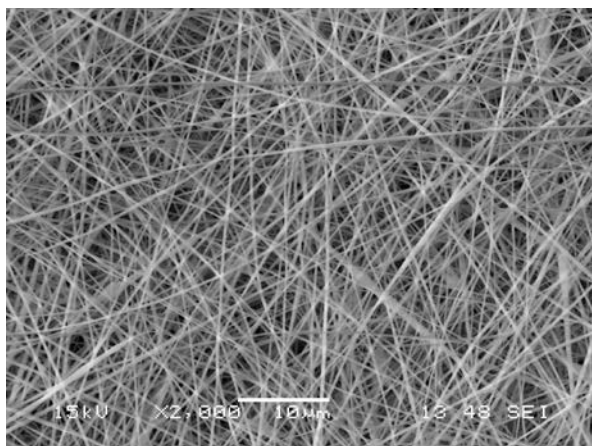


(c)

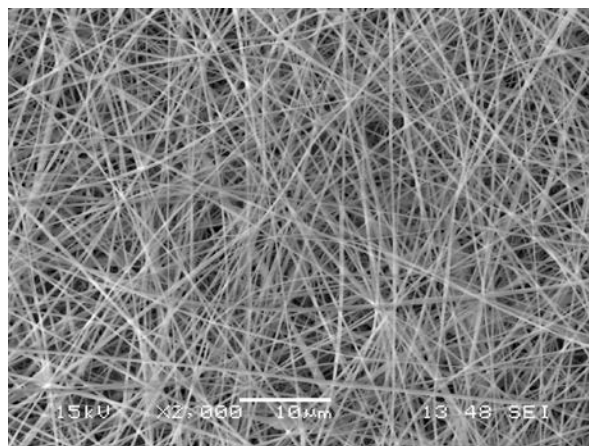
(d)

ภาพประกอบ 26 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

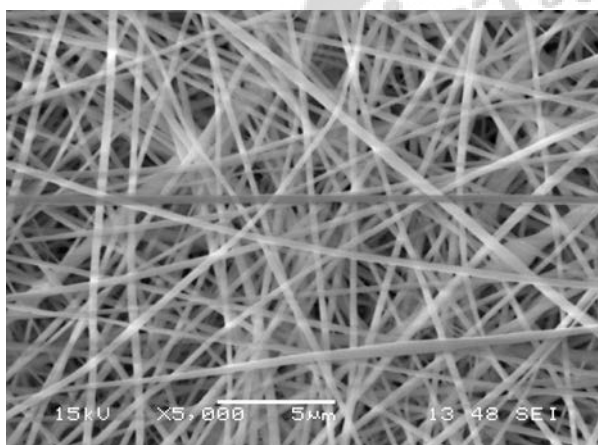
(a) และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า (c) และ (d) กำลังขยาย 5000 เท่า



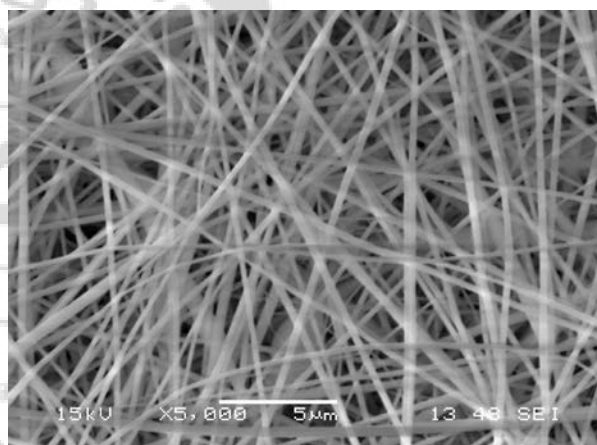
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพประกอบ 27 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

(a) และ (b) กำลังขยาย 2000 เท่า (c) และ (d) กำลังขยาย 5000 เท่า

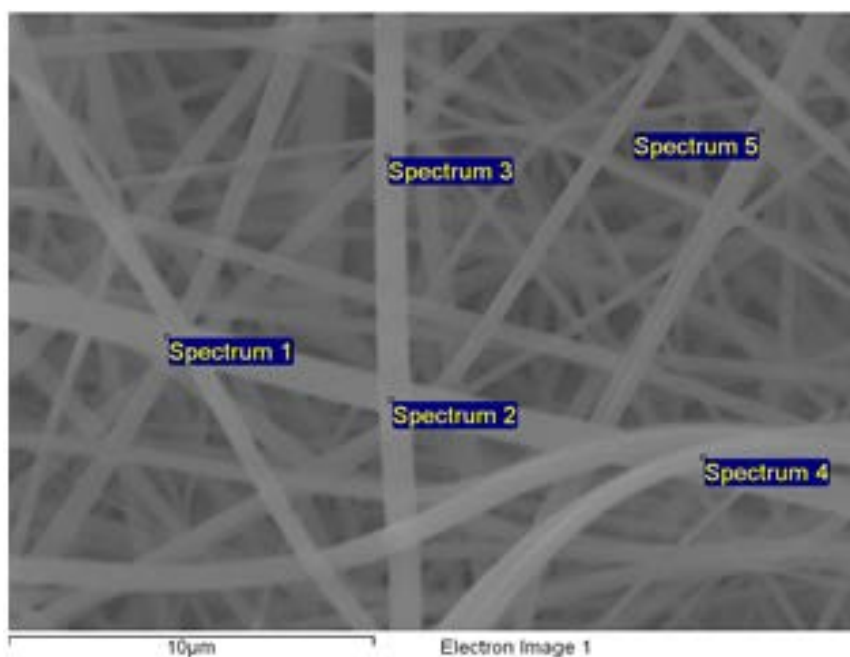
ผลการวิเคราะห์พบว่าเส้นใยซิลิกา ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส มีลักษณะเรียบและเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง เส้นใยมีขนาดไม่เท่ากันเล็กบ้างใหญ่บ้าง ดังภาพประกอบที่ 25 26 และ 27 เมื่อเปรียบเทียบขนาดของเส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก่อนการเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้างบนเส้นใยด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับวัสดุเซรามิก พบว่าเส้นใยซิลิกามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.471 ± 0.029 0.425 ± 0.011 และ 0.354 ± 0.012 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียสมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยซิลิกา ก่อนการเผา

เมื่อนำผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาที่ได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาจากงานวิจัยอื่นที่ผ่านมามีพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดแตกต่างกัน โดยจากงานวิจัยของชอยและคนอื่นๆ (Choi; et al. 2003: 891-893) ผลการวิเคราะห์เส้นใยพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วง 0.2 - 0.4 ไมโครเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากเงื่อนไขในการปั่นเส้นใยที่ต่างกัน คือ ขนาดเข็มโลหะความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเส้นใยและงานของชอยและคณะไม่ได้ทำการเผาเส้นใยซิลิกา

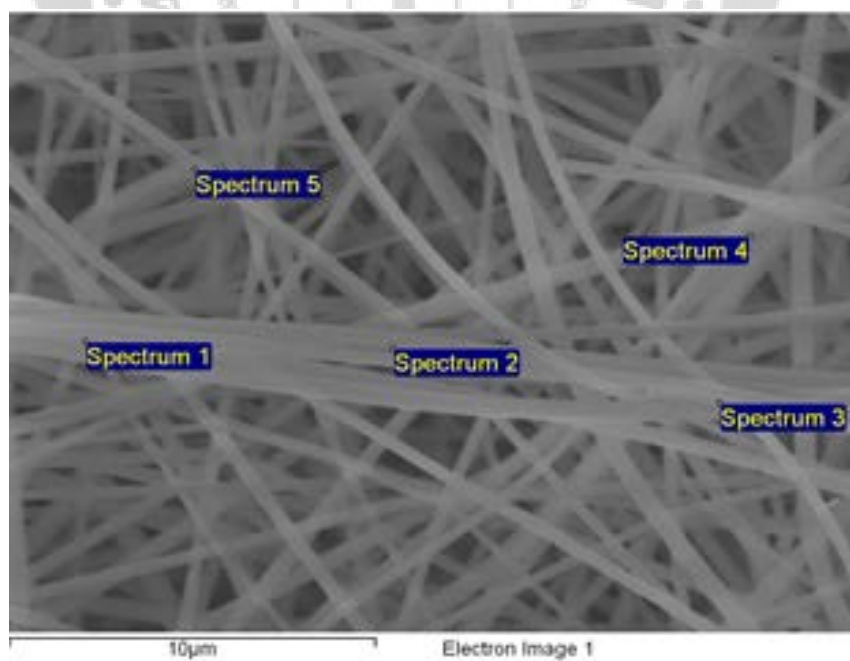
เมื่อนำผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของประมวณทรัพย์และคณะ (Pramuanub; et al. 2012: 602-606) ผลการวิเคราะห์เส้นใยพบว่าขนาดเส้นใยเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาด 0.352 ไมโครเมตร (ภาคผนวก ก) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากเงื่อนไขในการปั่นเส้นใยเดียวกัน คือ ขนาดเข็มโลหะความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเส้นใย

4.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกาด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

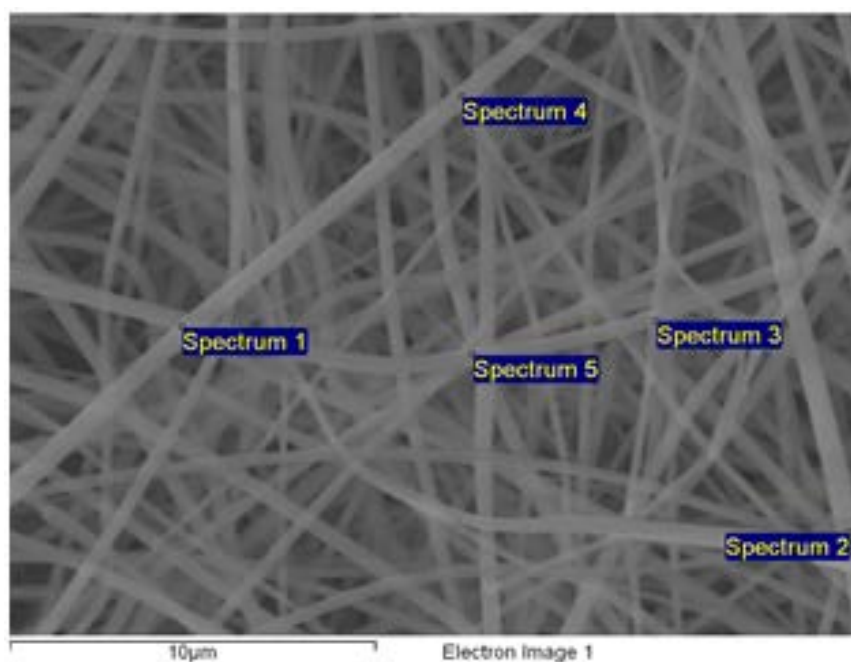
ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุภายในเส้นใยซิลิกาด้วยเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโกปีแบบกระจายพลังงาน โดยใช้ภาพที่กำลังขยาย 5000 เท่า ภาพประกอบ 28 29 และ 30 แสดงลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกา ก่อนเผา เพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้างบนเส้นใยหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 และเส้นใยหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลของการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุในเส้นใยซิลิกาแสดงดังตาราง 6



ภาพประกอบ 28 ลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกา ก่อนการเผาเพื่อกำจัดตัวทำละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้าง



ภาพประกอบ 29 ลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเส้นใยซิลิกา หลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 30 ลักษณะเส้นใยและตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของ
เส้นใยซิลิกาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตาราง 6 ปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของเส้นใยซิลิกา

อุณหภูมิที่ใช้เผา (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ซิลิคอน (Atomic%)	ออกซิเจน (Atomic%)
ก่อนเผา	1	29.45	70.55
	2	27.60	72.40
	3	31.34	68.66
	4	29.46	70.54
	5	31.98	68.02
เฉลี่ย		29.97	70.03
200	1	28.84	71.16
	2	36.23	63.77
	3	27.97	72.03
	4	30.56	69.44
	5	31.88	68.12

ตาราง 6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่ใช้เผา (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ซิลิคอน (Atomic%)	ออกซิเจน (Atomic%)
เฉลี่ย		31.10	68.90
800	1	34.14	65.86
	2	38.26	61.74
	3	34.58	65.42
	4	33.58	66.42
	5	32.30	67.70
เฉลี่ย		34.57	65.43

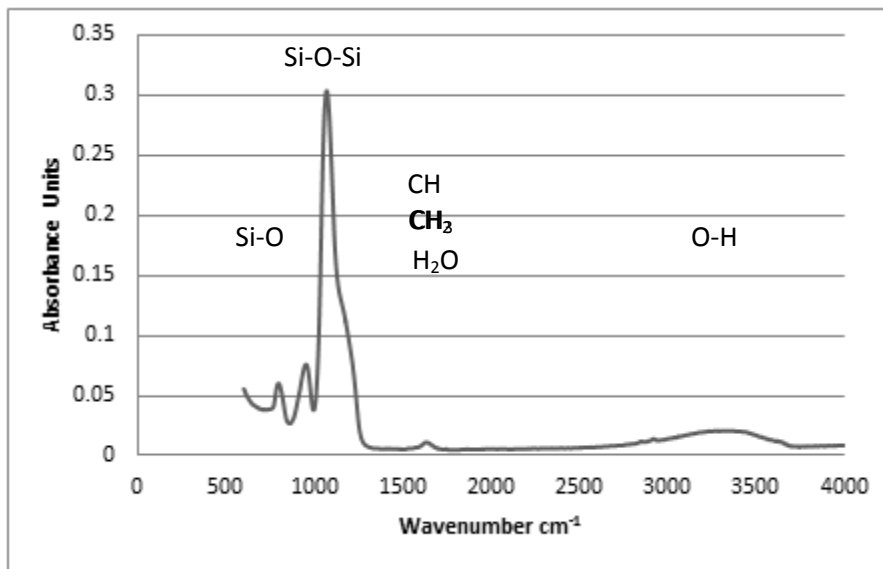
จากตาราง 6 จะได้อัตราส่วนปริมาณธาตุ ซิลิคอน : ออกซิเจน ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดของเส้นใยซิลิกา ก่อนและหลังการเผา เมื่อนำข้อมูลอัตราส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้ของเส้นใยซิลิกา ก่อนเผาและหลังเผาที่แต่ละอุณหภูมิมาเฉลี่ย พบว่าเส้นใยซิลิกา ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิที่ 200 และ 800 องศาเซลเซียส มีปริมาณซิลิคอนเท่ากับ 29.97 31.10 และ 34.57 Atomic% และมีปริมาณออกซิเจนเท่ากับ 70.03 68.90 และ 65.43 Atomic% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเส้นใยซิลิกา หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วนของซิลิคอนต่อออกซิเจน ใกล้เคียง 1:2 ซึ่งเป็นไปตามสูตรโครงสร้างทางเคมีของซิลิกา คือ SiO_2 สำหรับเส้นใยซิลิกา ก่อนการเผา มีอัตราส่วนออกซิเจน มากกว่าหลังการเผา เพราะปริมาณออกซิเจน ในตัวทำละลาย

4.3 การวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR)

เส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจะอยู่ในในช่วงของสเปกตรัม $4000\text{-}600\text{ cm}^{-1}$

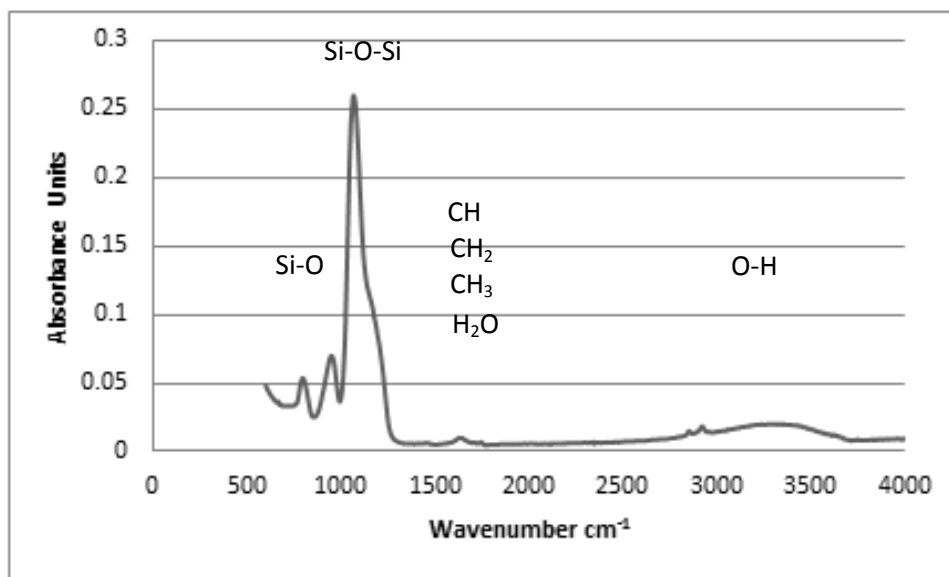
ผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกา ก่อนเผาด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี แสดงดังภาพประกอบ 31 จากกราฟพบว่า มีพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่น $2848\text{-}3304\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) จากภาพประกอบ 31 พบว่าเป็นบริเวณที่มีความกว้างของพีคมากที่สุด นอกจากนั้นยังพบพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 1632 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ $\text{CH CH}_2\text{ CH}_3$

และ น้ำ(H_2O) พิกัดขึ้นที่เลขคลื่น 1068 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Si-O-Si) และพิกัดขึ้นที่เลขคลื่น 796 และ 952 cm^{-1} แสดงถึงพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O)



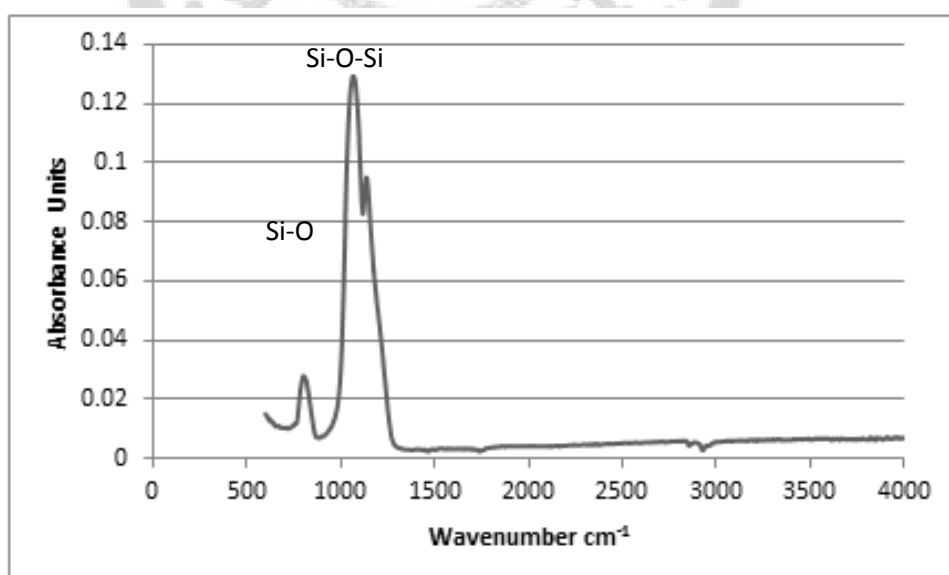
ภาพประกอบ 31 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาอ่อนเผา

ผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี แสดงดังภาพประกอบ 32 จากกราฟพบว่าพิกัดขึ้นที่เลขคลื่น $2848-3304\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) พิกัดขึ้นที่เลขคลื่น 1632 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ CH CH_2 CH_3 และ น้ำ(H_2O) และพิกัดขึ้นที่เลขคลื่น 796 และ 952 cm^{-1} แสดงพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O) พิกัดขึ้นที่เลขคลื่น 1068 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si)



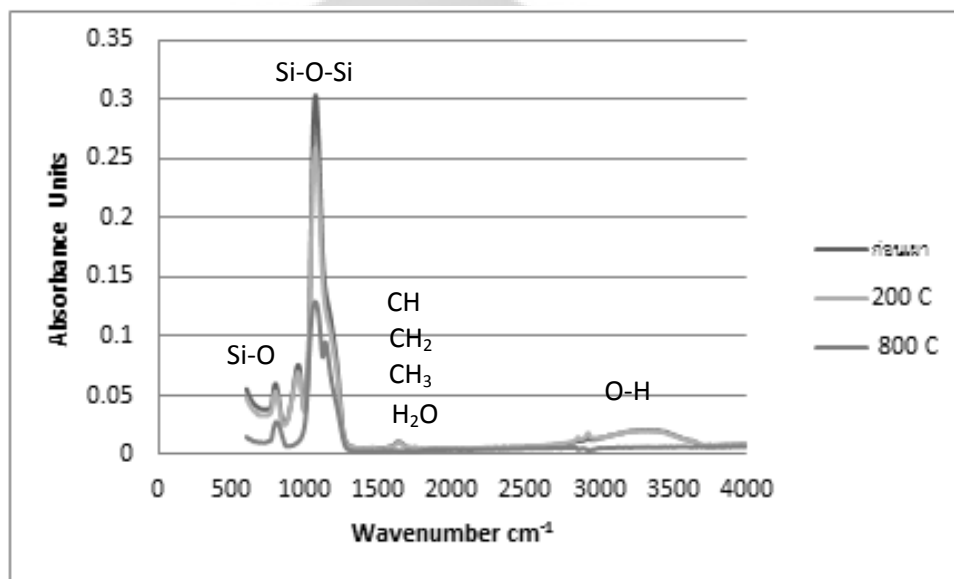
ภาพประกอบ 32 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดสารละลายที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาที่หลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี แสดงดังภาพประกอบ 33 จากกราฟพบว่าพีกเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 2848-3304 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกเซน (Si-O-Si) และพีกเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 796 และ 952 cm^{-1} แสดงถึงพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O)



ภาพประกอบ 33 กราฟ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้างที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแสดงดังภาพประกอบ 34 จากภาพประกอบ 34 พบว่าเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันต่างๆใกล้เคียงกับเส้นใยซิลิกาก่อนเผา ส่วนเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยซิลิกาก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ CH CH₂ CH₃ และ น้ำ (H₂O) มีปริมาณลดลงจนไม่ปรากฏให้เห็น หมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) และพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O) ยังคงอยู่ แต่มีปริมาณลดลงจากเดิมอย่างอันเป็นผลเนื่องมาจากการสลายตัวทางความร้อน



ภาพประกอบ 34 กราฟเปรียบเทียบ FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยซิลิกาก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อนำผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบจากงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา งานวิจัยในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของชอย และคณะ (Choi; et al. 2003: 891-893) และงานวิจัยของประมวลทรัพย์และคณะ (Pramuansu; et al. 2012: 602-606) ผลการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาพบว่าปรากฏพีคที่ตรงตำแหน่งเลขคลื่นที่ตรงกับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ CH CH₂ CH₃ และ น้ำ (H₂O) หมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Si-O-Si) และพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O) ซึ่งมีผลเหมือนกันกับงานวิจัยในครั้งนี้

4.4 การขึ้นรูปและลักษณะของคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิตเกิดจากการขึ้นรูปในลอน 6 ผสมเส้นใยซิลิกาโดยกระบวนการอัดเข้าแบบด้วยความร้อน ในการขึ้นรูปคอมพอสิตมีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปและการประกบชั้นของคอมพอสิต เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา และการหล่อเย็น ที่ใช้ในการขึ้นรูป

1. การขึ้นรูปในลอน 6

1.1 ในการขึ้นรูปในลอน 6 ด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อนในครั้งแรกผู้วิจัยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 220 องศาเซลเซียส เนื่องจากในลอน 6 มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 6 นาที พบว่าเมื่อดึงลอน 6 นั้นหลอมเหลวอย่างไม่สม่ำเสมอในบางจุดนั้นเมื่อดึงลอน 6 ยังมีลักษณะเกาะกันเป็นเม็ด

1.2 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาทีและหล่อเย็นเป็นเวลา 6 นาที พบว่าเมื่อดึงลอน 6 ละลายและไหลออกจากแม่พิมพ์เยอะเกินไปจนทำให้แผ่นในลอนที่ขึ้นรูปมีลักษณะเป็นรูและฟองอากาศในบางจุด อาจจะเป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปนานเกินไป

1.3 ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 300 องศาเซลเซียสเช่นเดิมแต่ใช้ระยะเวลาในการอัดด้วยความร้อน 3 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 3 นาที พบว่าเมื่อดึงลอน 6 ละลายและไหลออกจากแม่พิมพ์มากเกินไปเหมือนเดิม อาจจะเป็นเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงเกินไป

1.4 เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็น 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 6 นาที พบว่าเมื่อดึงลอน 6 หลอมเหลวอย่างสม่ำเสมอไม่พบฟองอากาศและรูช่องว่างในแผ่นในลอน 6 ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้ว

2. การประกบชั้นของแผ่นในลอน 6 ซึ่งระหว่างชั้นที่แทรกด้วยเส้นใยซิลิกา

2.1 ในการประกบชั้นของแผ่นในลอน 6 ด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อนในครั้งแรกผู้วิจัยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 นาที และหล่อเย็น 6 นาทีพบว่าแผ่นในลอน 6 ที่ประกบกันแล้วไหลออกจากแม่พิมพ์มากเกินไป และมีรูช่องว่างและฟองอากาศเกิดขึ้นบนแผ่นในลอน 6 เป็นจำนวนมาก

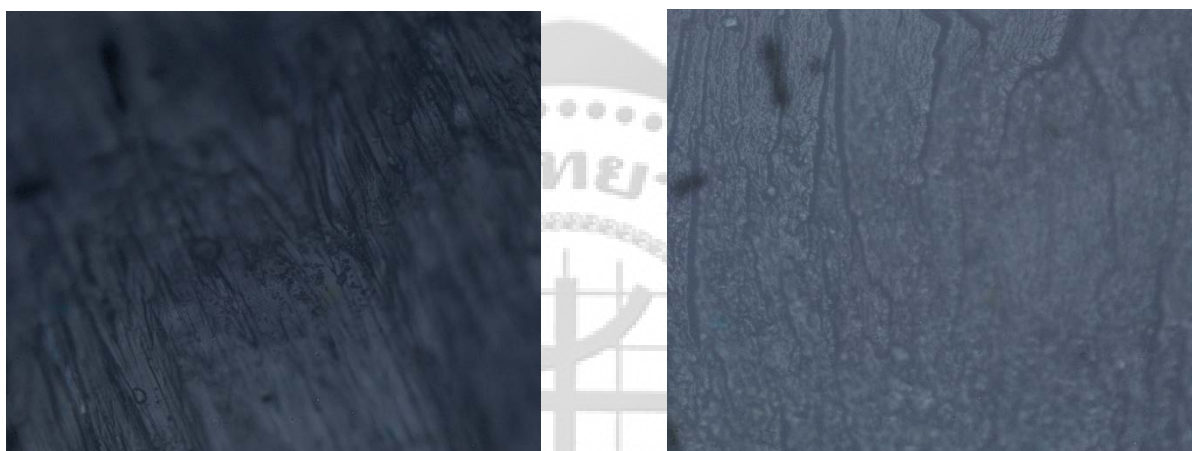
2.2 ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที และหล่อเย็น 3 นาทีพบว่าแผ่นในลอน 6 ที่ประกบกันและเกิดรูช่องว่างและฟองอากาศเกิดขึ้นบนแผ่นในลอน 6 เช่นเดียวกัน

2.3 เมื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเท่ากับ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 6 นาที พบว่าแผ่นในลอน 6 นั้นประกบกันไม่สนิท สามารถใช้มือแกะออกจากกันได้

2.4 เพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบประกบเป็น 240 องศาเป็นเวลา 6 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 6 นาที พบว่าแผ่นไนลอน 6 ประกบกันได้สนิทองด้วยตาเปล่าไม่มีช่องว่างระหว่างแผ่นไนลอน 6 ที่ประกบกัน

3. ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง

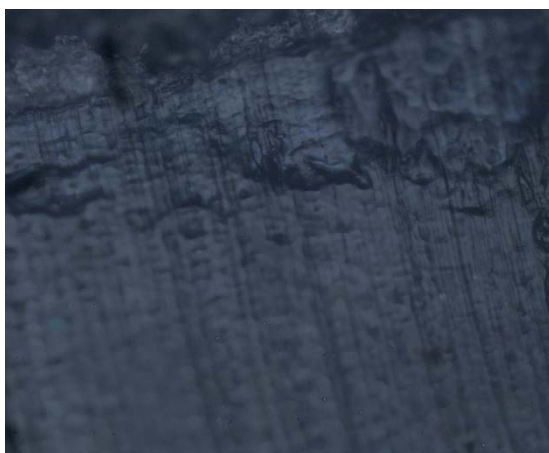
ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้กำลังขยาย 200 เท่า แสดงพื้นผิวของชิ้นงานในการทดสอบแรงดึงของไนลอน 6 ประกบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น แสดงดังภาพ 35-42



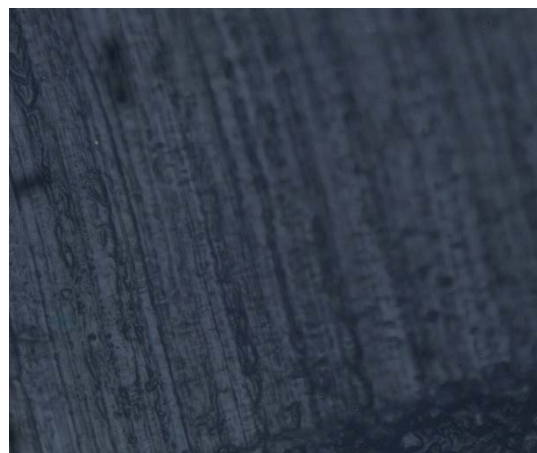
(a)

(b)

ภาพประกอบ 35 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2

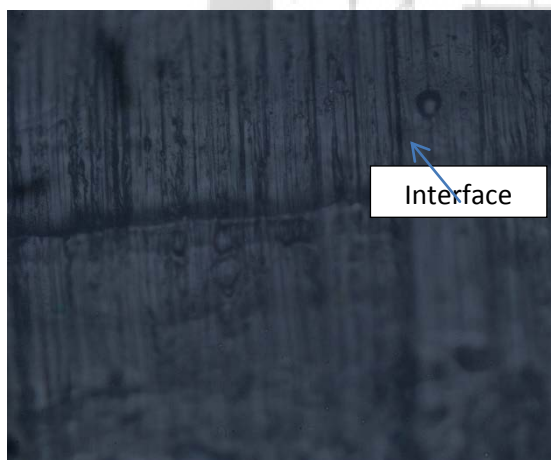


(a)

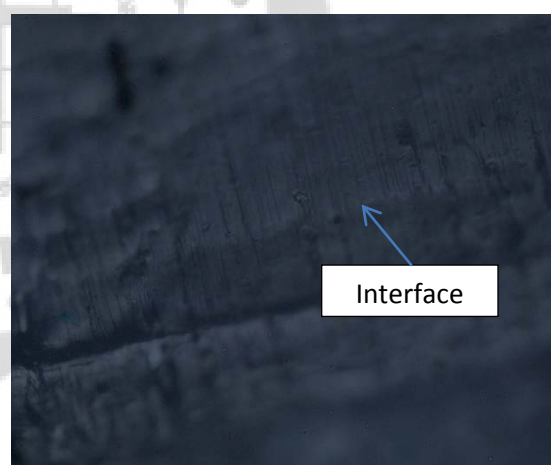


(b)

ภาพประกอบ 36 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0.5 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2



(a)



(b)

ภาพประกอบ 37 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-1 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2



(a)



(b)

ภาพประกอบ 38 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-2 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2

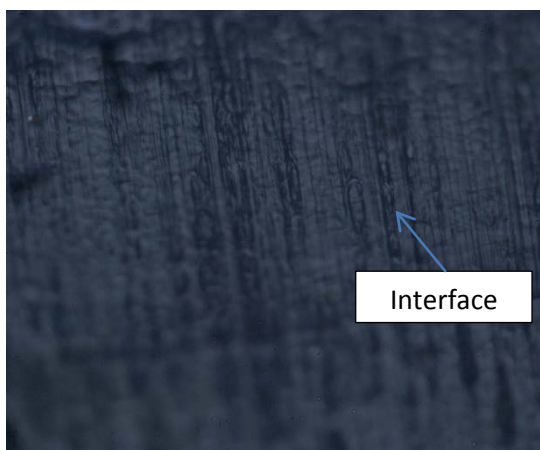


(a)

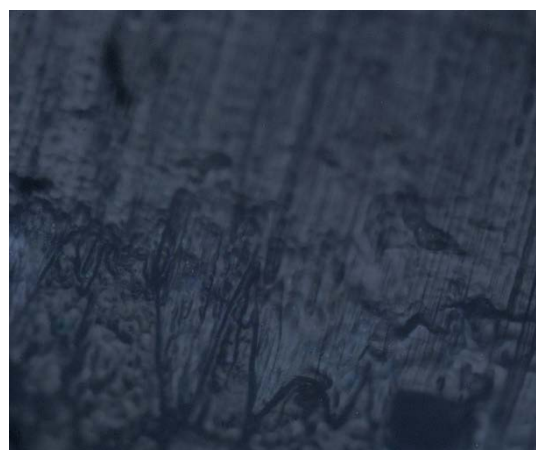


(b)

ภาพประกอบ 39 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-0 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2

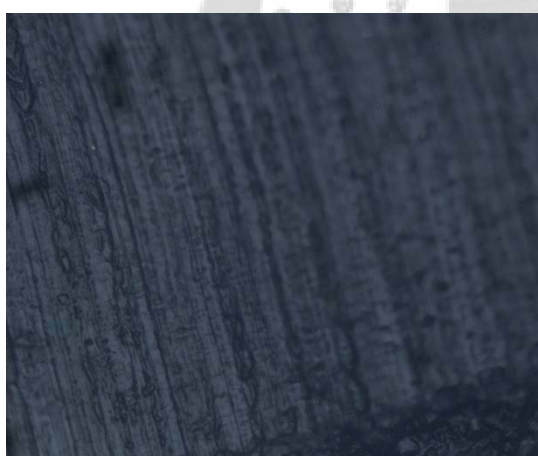


(a)



(b)

ภาพประกอบ 40 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-1 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2

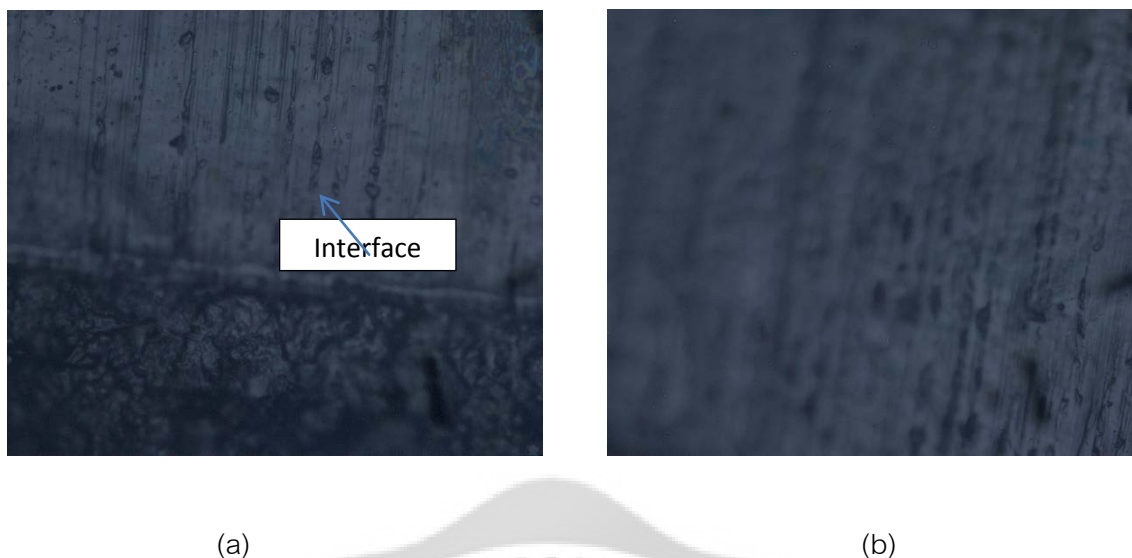


(a)



(b)

ภาพประกอบ 41 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-2 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2



ภาพประกอบ 42 พื้นผิวของของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-4 (a) จุดที่ 1 (b) จุดที่ 2

จากภาพประกอบ 35-42 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึงของไนลอน 6 ประกบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น พบว่าบางชิ้นงานประกบกันสนิทไม่พบรูหรือช่องว่างระหว่างชิ้นงาน ในบางชิ้นงานพบรอยเชื่อมระหว่างชั้น (Interface) ที่ประกบแต่ก็ไม่พบรูหรือช่องว่างระหว่างชิ้นงานเช่นเดียวกัน

4.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

เส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 โดยผลิตชิ้นงานเป็นคอมพอสิตแบบชั้นซึ่งระหว่างชั้นมีแผ่นเส้นใยซิลิกาวางสลับอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันไป และถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน ในขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกลได้ทำการทดสอบแรงดึง แรงกระแทก และแรงดัดงอ

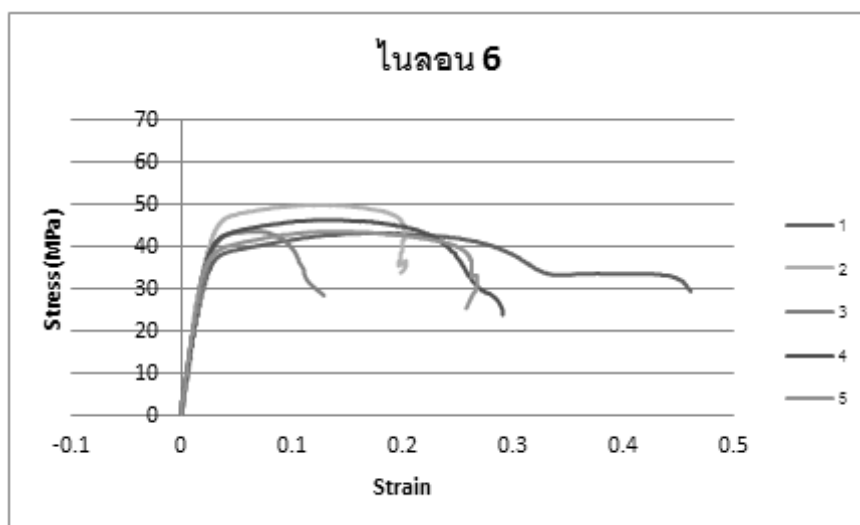
1. การทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบแรงดึงลักษณะชิ้นงานมีการประกบชั้นของแผ่นไนลอน 6 ที่แตกต่างกันคือ 2 ชั้น และ 3 ชั้นซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ดังตาราง 7 ชิ้นงานมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งมีขนาดกว้าง 6 ยาว 30 หนา 3 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่ออนาที ชิ้นงานแต่ละแบบมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบใช้ชิ้นงานในการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นงาน

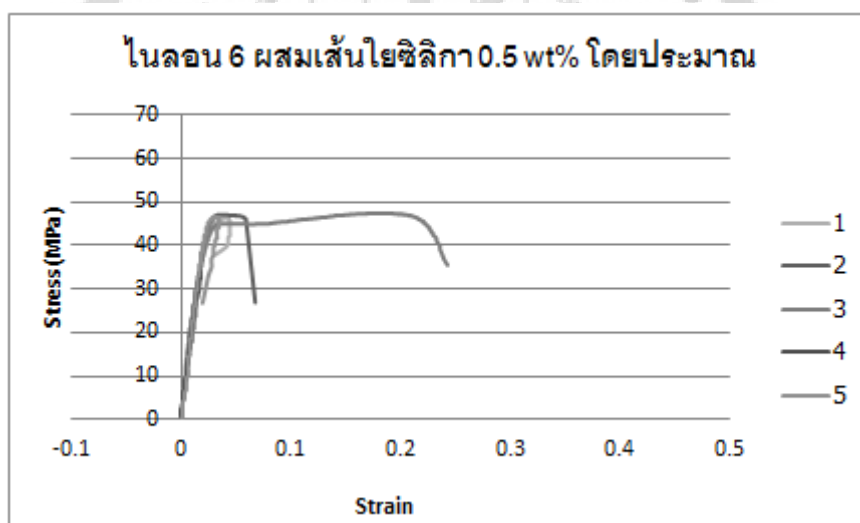
ตาราง 7 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ที่ใช้ทดสอบแรงดึง

ชิ้นงาน	จำนวนชั้น ของไนลอน 6	จำนวนชั้นของ เส้นใยซิลิกา	สัดส่วนของเส้นใยซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)
TSA-0	2	0	0
TSA-0.5	2	1	0.542
TSA-1	2	1	1.026
TSA-2	2	1	1.922
TSB-0	3	0	0
TSB-1	3	2	0.987
TSB-2	3	2	1.883
TSB-4	3	2	4.014

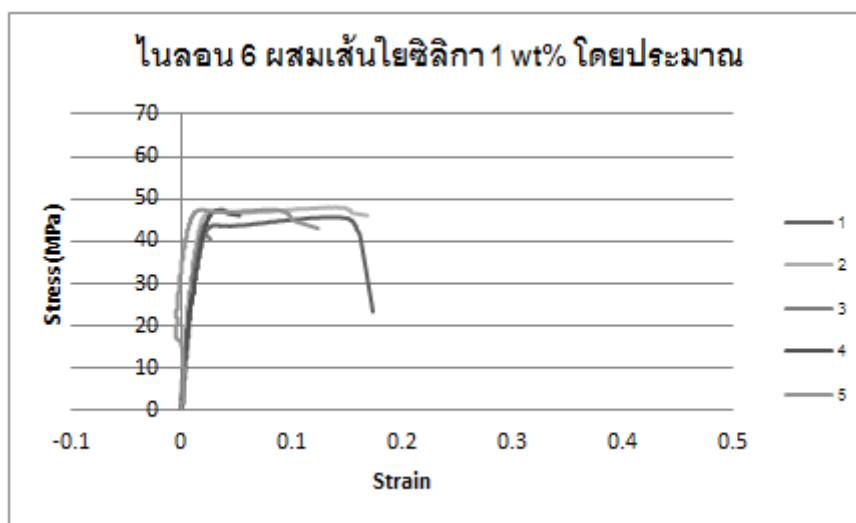
ผลจากการทดสอบแรงดึงสามารถแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังภาพประกอบ 43-50 ซึ่งเป็นกราฟสำหรับชิ้นงานทั้ง 8 ชุดในตารางตามลำดับ โดยในช่วงต้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อเริ่มถึงขั้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากแนวเส้นตรง ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงจะแสดงดังภาพประกอบ 51-58



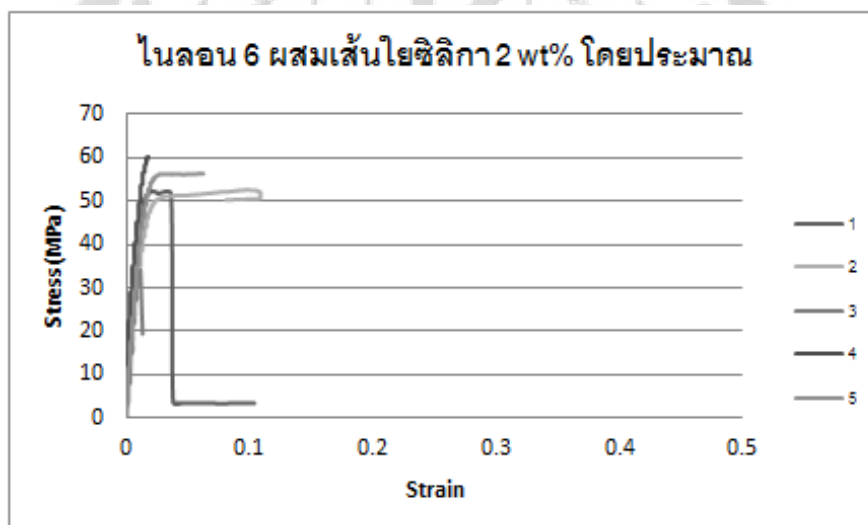
ภาพประกอบ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0 จำนวน 5 ชิ้นงาน



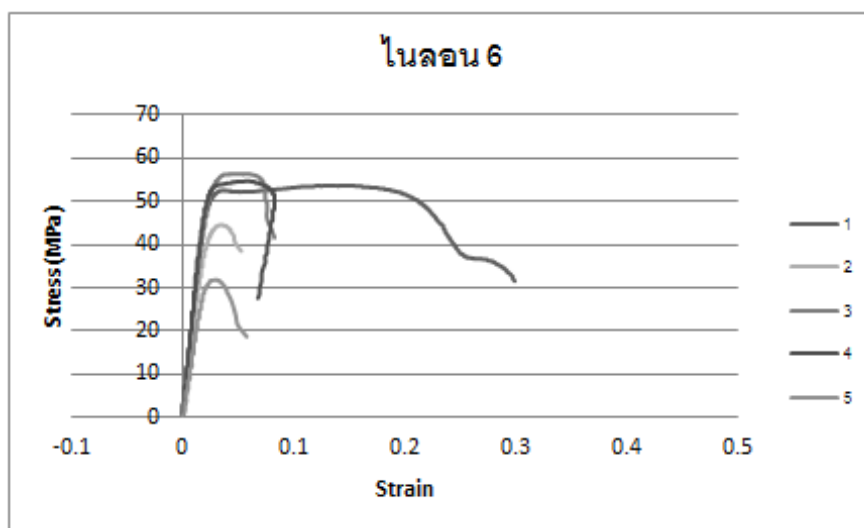
ภาพประกอบ 44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0.5 จำนวน 5 ชิ้นงาน



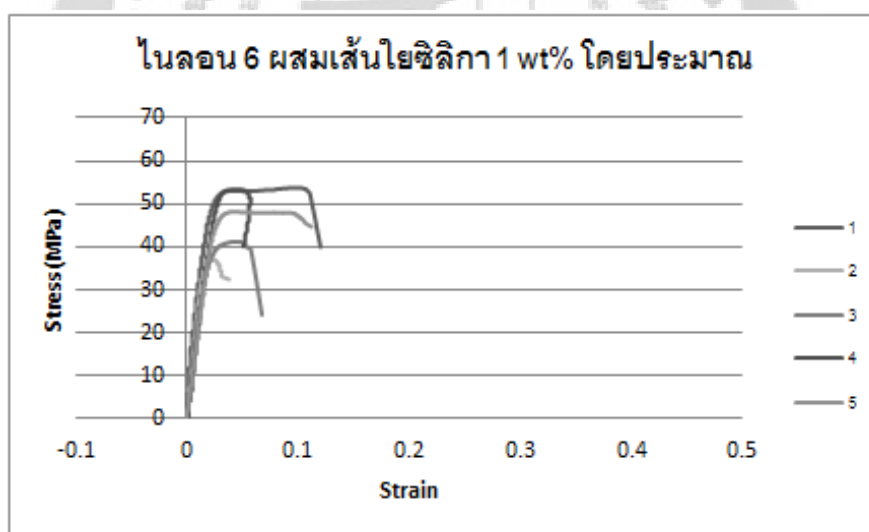
ภาพประกอบ 45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน



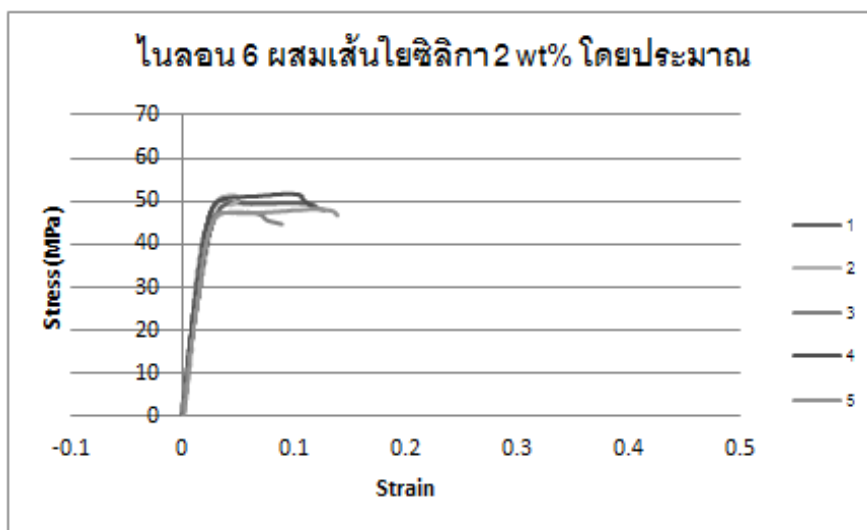
ภาพประกอบ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-2 จำนวน 5 ชิ้นงาน



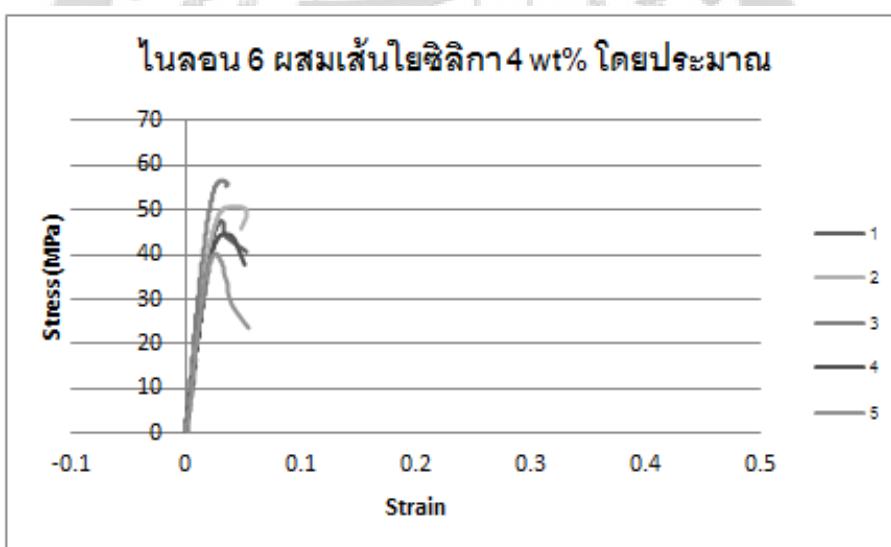
ภาพประกอบ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-0 จำนวน 5 ชิ้นงาน



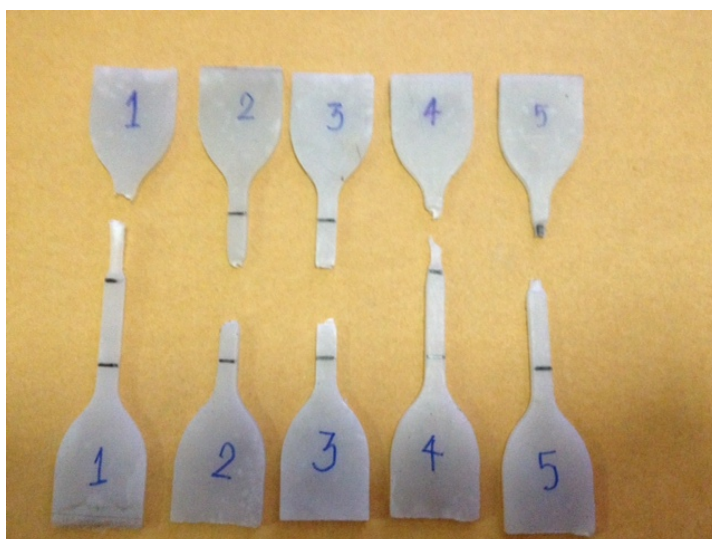
ภาพประกอบ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน



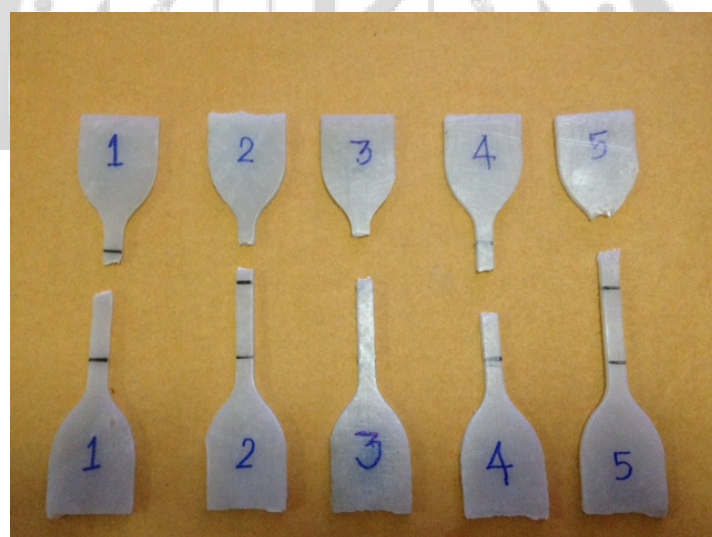
ภาพประกอบ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-2 จำนวน 5 ชิ้นงาน



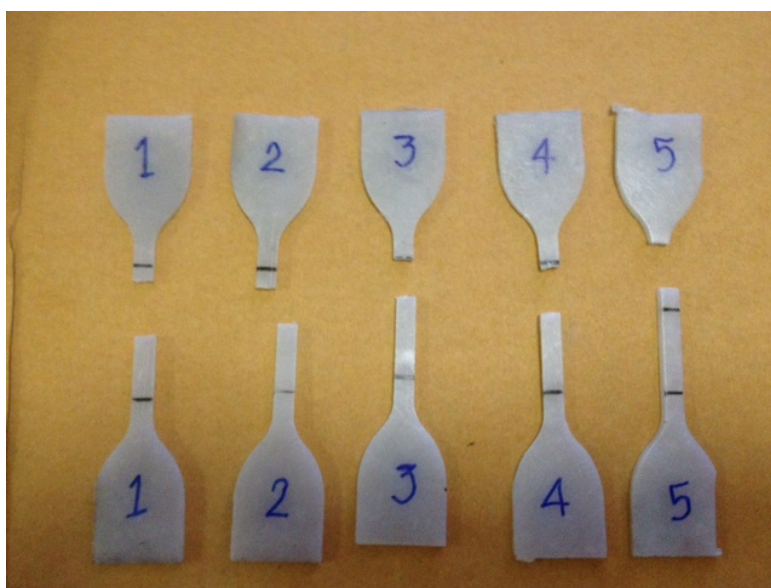
ภาพประกอบ 50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ของชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-4 จำนวน 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 51 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0
 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



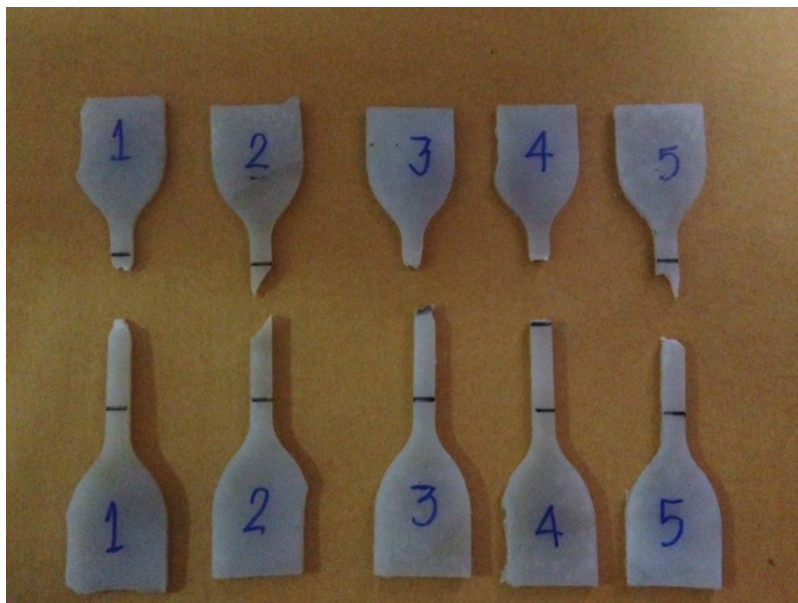
ภาพประกอบ 52 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-0.5
 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 53 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-1
หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



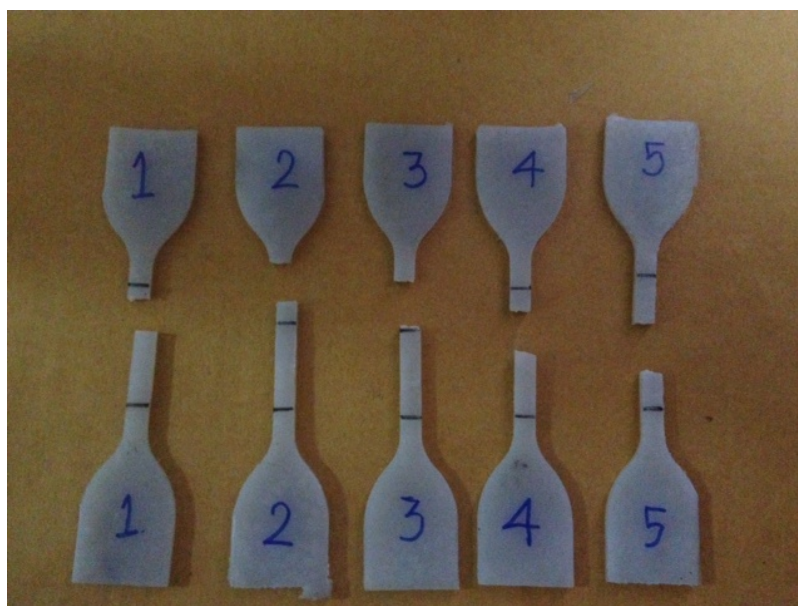
ภาพประกอบ 54 ชิ้นงานแบบประกบ 2 ชั้น TSA-2
หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



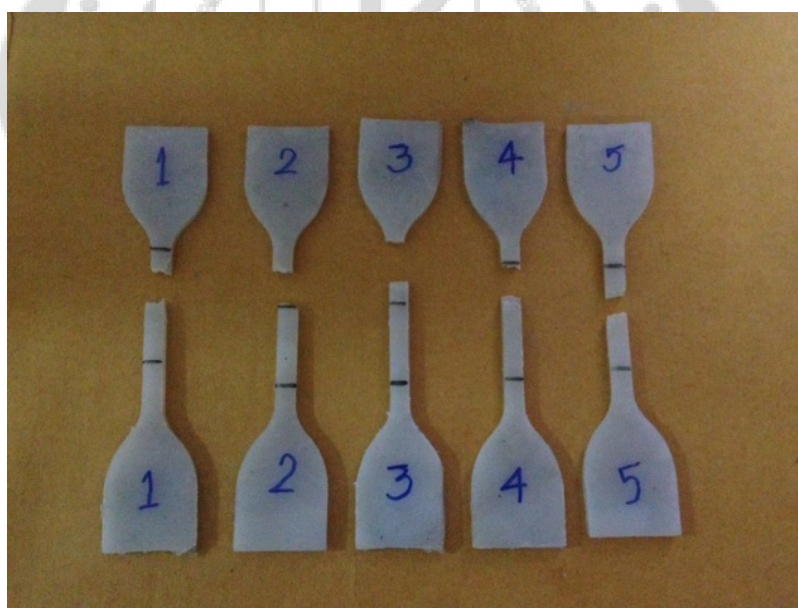
ภาพประกอบ 55 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-0
หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 56 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-1
หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 57 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-2
 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 58 ชิ้นงานแบบประกบ 3 ชั้น TSB-4
 หลังการทดสอบแรงดึง ทั้ง 5 ชิ้นงาน

ภาพประกอบ 43-50 เป็นกราฟสำหรับชิ้นงานทั้ง 8 ชุดที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง จากกราฟพบว่าชิ้นงานจะมีการเสียรูปแบบพลาสติกที่แตกต่างกัน โดยในชิ้นงานที่มีแผ่นเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรงนั้นจะมีการเสียรูปแบบพลาสติกที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแผ่นเส้นใยซิลิกา และทำให้มีความเครียดที่จุดขาดน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Garcfa; et at. 2003: 33-38) (Segatelli; et at. 2010: 98-105) (Yoo; et at. 2011: 180-190)

ภาพประกอบ 43-50 จากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานแต่ละชิ้น มีความเครียดที่จุดขาดที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสอดคล้องกับภาพประกอบ 51-58

ภาพประกอบ 51 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 1 4 และ 5 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ (Extensometer) ชิ้นงานที่ 2 และ 3 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 52 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 2 3 และ 5 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 และ 4 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 53 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 3 และ 5 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 2 และ 4 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 54 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 3 4 และ 5 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 และ 2 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 55 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 3 และ 4 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 2 และ 5 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 56 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 2 3 และ 4 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 และ 5 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 57 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 2 และ 3 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 4 และ 5 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ภาพประกอบ 58 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ 2 และ 3 มีจุดขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ ชิ้นงานที่ 1 4 และ 5 จะมีจุดขาดในช่วงอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับ

ชิ้นงานที่ขาดเหนืออุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงานจะทำให้กราฟที่ได้นั้นมีลักษณะที่แปลกออกไปเนื่องจากไม่สามารถบันทึกข้อมูลนั้นได้ ซึ่งอาจจะเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงานนั้น ลื่นหรือยึดจับชิ้นงานไม่แน่นจึงทำให้กราฟแต่ละชิ้นงานมีความเครียดที่จุดขาดแตกต่างกัน

ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาหาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบได้ดังตาราง 8 – 9

ตาราง 8 สมบัติความทนต่อแรงดึงในลอน 6 ประกบ 2 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

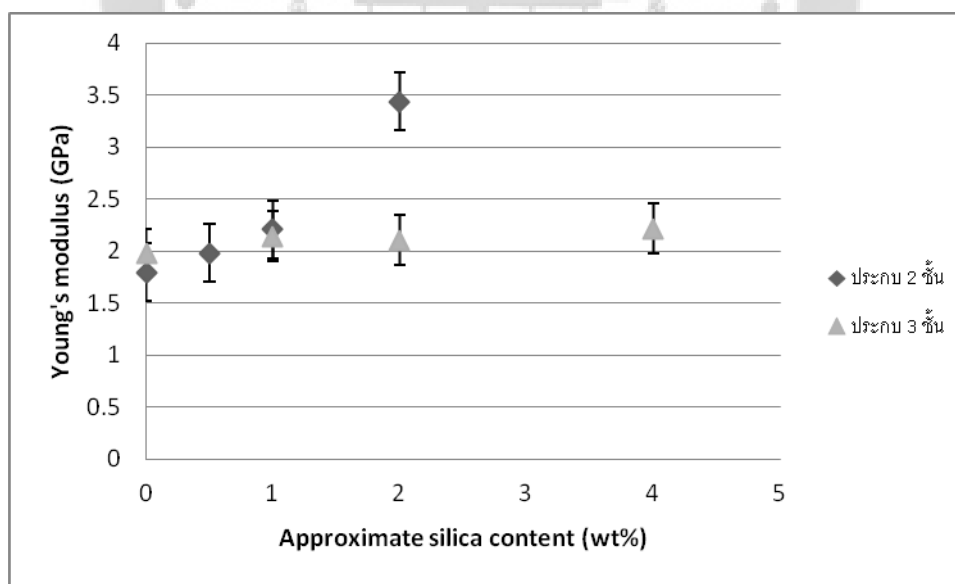
ชั้นงาน	มอดุลัส (กิกะปาสคาล)	ความเค้นสูงสุด (เมกะปาสคาล)	ความเครียด ณ จุดขาด
TSA-0	1.625	43.0	0.480
	1.727	50.1	0.190
	1.800	44.0	0.125
	1.941	47.1	0.280
	1.885	44.2	0.260
เฉลี่ย	1.795±0.13	45.7±2.90	0.267±0.13
TSA-0.5	1.777	47.2	0.031
	2.250	48.1	0.065
	1.611	48.1	0.240
	2.171	34.5	0.018
	2.093	47.5	0.020
เฉลี่ย	1.980±0.27	45.1±5.92	0.074±0.09
TSA-1	2.500	47.0	0.170
	2.000	49.2	0.160
	2.540	44.0	0.026
	2.429	48.5	0.052
	1.571	47.0	0.160
เฉลี่ย	2.208±0.42	47.1±1.99	0.114±0.07
TSA-2	3.000	54.3	0.110
	3.600	52.0	0.080
	3.812	33.0	0.013
	3.454	60.5	0.017
	3.320	58.0	0.062
เฉลี่ย	3.437±0.31	51.6±10.88	0.056±0.04

ตาราง 9 สมบัติความทนต่อแรงดึงในลอน 6 ประกบ 3 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

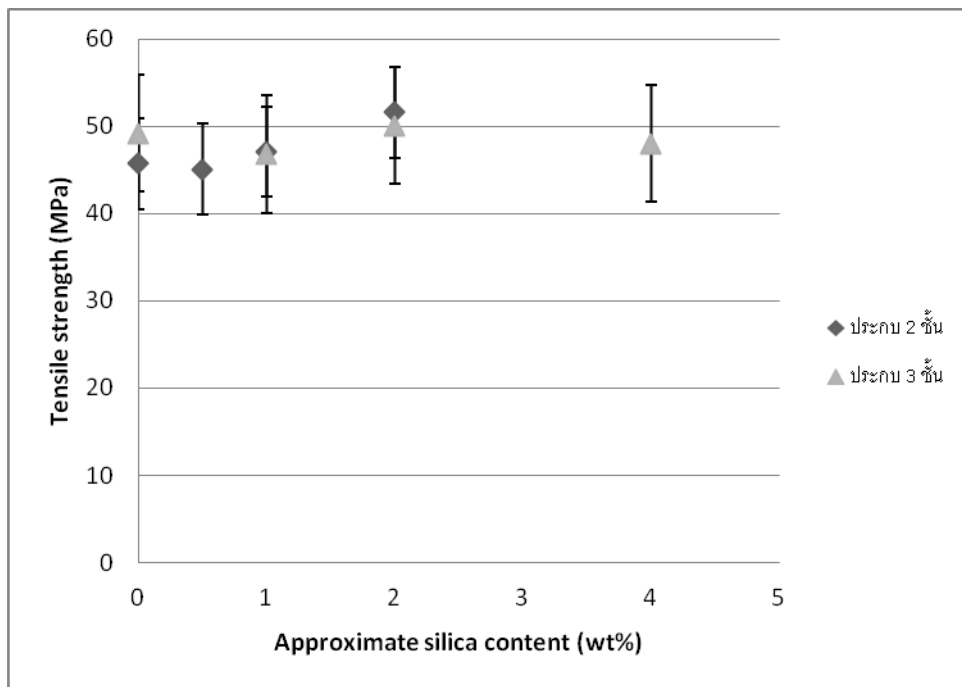
ชิ้นงาน	มอดุลัส (กิกะปาสคาล)	ความเค้นสูงสุด (เมกะปาสคาล)	ความเครียด ณ จุดขาด
TSB-0	2.121	55.0	0.302
	1.864	45.0	0.050
	2.138	57.2	0.080
	2.250	56.5	0.065
	1.514	32.5	0.061
เฉลี่ย	1.977±0.29	49.2±10.57	0.112±0.11
TSB-1	2.286	55.0	0.127
	2.440	37.2	0.044
	2.036	40.0	0.070
	1.954	52.5	0.050
	2.000	49.5	0.120
เฉลี่ย	2.143±0.21	46.8±7.83	0.082±0.04
TSB-2	2.000	50.0	0.130
	2.000	52.5	0.040
	2.344	47.2	0.099
	2.285	52.2	0.128
	1.905	48.5	0.050
เฉลี่ย	2.106±0.19	50.1±2.29	0.089±0.04
TSB-4	2.051	48.0	0.051
	2.235	50.0	0.054
	2.733	57.2	0.030
	2.000	45.0	0.050
	2.061	40.0	0.050
เฉลี่ย	2.216±0.30	48.0±6.36	0.047±0.01

ตาราง 10 สรุปสมบัติความทนต่อแรงดึงไนลอน 6 ประภ 2 และ 3 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

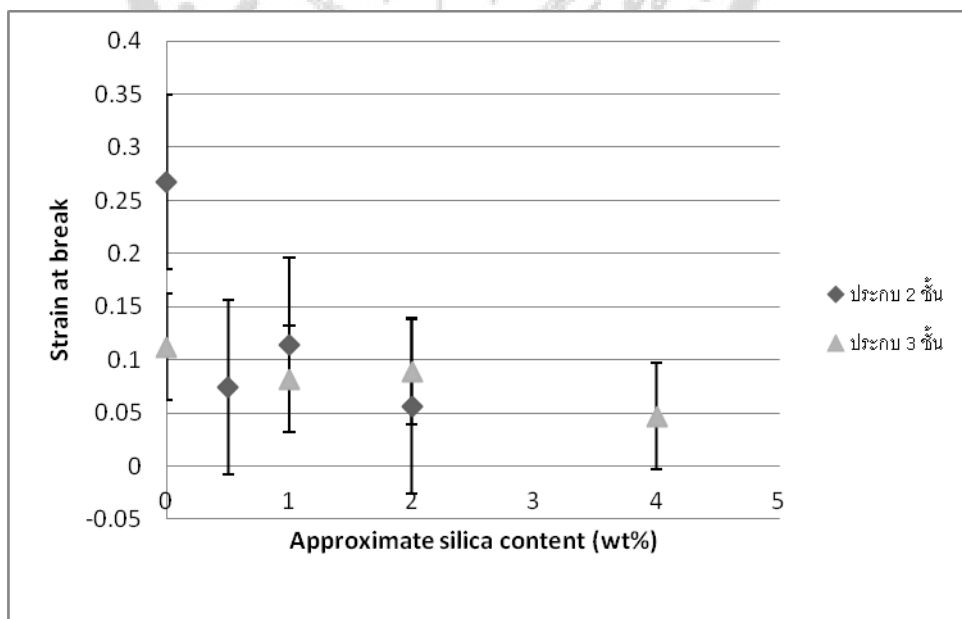
ชิ้นงาน	มอดูลัส (กิกะปาสคาล)	ความเค้นสูงสุด (เมกะปาสคาล)	ความเครียด ณ จุดขาด
TSA-0	1.795±0.13	45.7±2.90	0.267±0.13
TSA-0.5	1.980±0.27	45.1±5.92	0.074±0.09
TSA-1	2.208±0.42	47.1±1.99	0.114±0.07
TSA-2	3.437±0.31	51.6±10.88	0.056±0.04
TSB-0	1.977±0.29	49.2±10.57	0.112±0.11
TSB-1	2.143±0.21	46.8±7.83	0.082±0.04
TSB-2	2.106±0.19	50.1±2.29	0.089±0.04
TSB-4	2.216±0.30	48.0±6.36	0.047±0.01



ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงความทนต่อแรงดึงของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง



ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความเค้นสูงสุดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง



ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงความเครียด ณ จุดขาดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

ผลการวิเคราะห์การทดสอบแรงดึงของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรงพบว่า ไนลอน 6 ประภ 2 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0.5, 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีค่าของมอดูลัส 1.795±0.13, 1.980±0.27, 2.208±0.42 และ 3.437±0.31 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6 ค่าความเค้นสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไนลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก ความเครียด ณ จุดขาดลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

ไนลอน 6 ประภ 3 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0, 1, 2 และ 4% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัส 1.977±0.29, 2.143±0.21, 2.106±0.19 และ 2.216±0.30 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งค่าของมอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณเส้นใยซิลิกาที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6 ความเครียด ณ จุดขาดลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น แต่ความเค้นสูงสุดนั้นเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนเมื่อปริมาณของเส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้นในไนลอน 6

เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของกราสฟาและคณะ (Garcfa; et al. 2003: 33-38) กราสฟาและคณะได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่มีซิลิกานาโนเป็นวัสดุเสริมแรง ให้ดีขึ้นโดยใช้ปริมาณของซิลิกา 0, 1, 3, 5 % โดยน้ำหนัก ซิลิกามีขนาด 10-30 นาโนเมตร และมีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding) และได้นำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยซิลิกาเข้าไปในไนลอน 6 พบว่ายังมอดูลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกา ค่าความเครียด ณ จุดขาด (Strain at break) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยซิลิกาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากปริมาณซิลิกาที่ใช้ใกล้เคียงกัน และมีกระบวนการขึ้นรูปเหมือนกัน

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ความเค้นสูงสุดมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของลีและคณะ (Li; et al. 2010 : 262-268) ลีและคณะได้ทำการศึกษาการใช้เส้นใยซิลิกาที่มีลักษณะเส้นเป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร โดยมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันคือ 0, 1, 2, 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเส้นใยซิลิกาถูกเตรียมโดย monomer casting (MC) technology เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการเสียดทาน (Tribological properties) ของพอลิเอไมด์ 6 บล็อกโคพอลิเมอร์ (Polyamide 6-polyurethane (PA6-PU) block copolymers) พบว่าค่าความเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณเส้นใยซิลิกาที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะว่ามีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้ทั้งสองงานวิจัยมีกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

2. การทดสอบแรงกระแทก

ในการทดสอบแรงกระแทกลักษณะชิ้นงานมีการประกบชั้นของแผ่นไนลอน 6 2 ชั้น ดังรายละเอียดในตาราง 11 ชิ้นงานมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งมีขนาด กว้าง 12.7 ยาว 64 มม. 3.2 มิลลิเมตร ชิ้นงานแต่ละแบบมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบใช้ชิ้นงานในการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นงาน

ตาราง 11 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงาน	จำนวนชั้นของไนลอน 6	จำนวนชั้นของเส้นใยซิลิกา	สัดส่วนของเส้นใยซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)
IP-0	2	0	0
IP-0.5	2	1	0.546
IP-1	2	1	1.029
IP-2	2	1	1.937

ผลจากการทดสอบแรงกระแทกจะได้ค่า β (มุมยกลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก) และสามารถนำมาหาค่าสมบัติความทนต่อแรงกระแทกดังสมการที่ 8 9 10 และ 11

$$E1 = L \times \left(\frac{F}{2}\right) \times [(\cos\alpha' - \cos\alpha) + (\cos\beta' - \cos\beta^0)] \quad (8)$$

$$E2 = L \times F \times (\cos\theta' - \cos\theta) \quad (9)$$

$$E = E' - (E1 + E2) \quad (10)$$

$$T = \frac{E}{A} \quad (11)$$

E	คือ	พลังงานที่ใช้ในการแตกหักของชิ้นทดสอบ
E1	คือ	พลังงานเสียดทานเนื่องจากอากาศและแกนตี
E2	คือ	พลังงานเสียดทานเนื่องจากเข็มชี้
E'	คือ	พลังงานเสียดทานที่ได้จากมุมยกลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก
β	คือ	มุมยกลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก
β'	คือ	มุมที่อ่านได้จากแกนตีโดยไม่มีชิ้นงาน
β^0	คือ	มุมเริ่มต้นใดๆของแกนตีโดยไม่มีชิ้นงาน

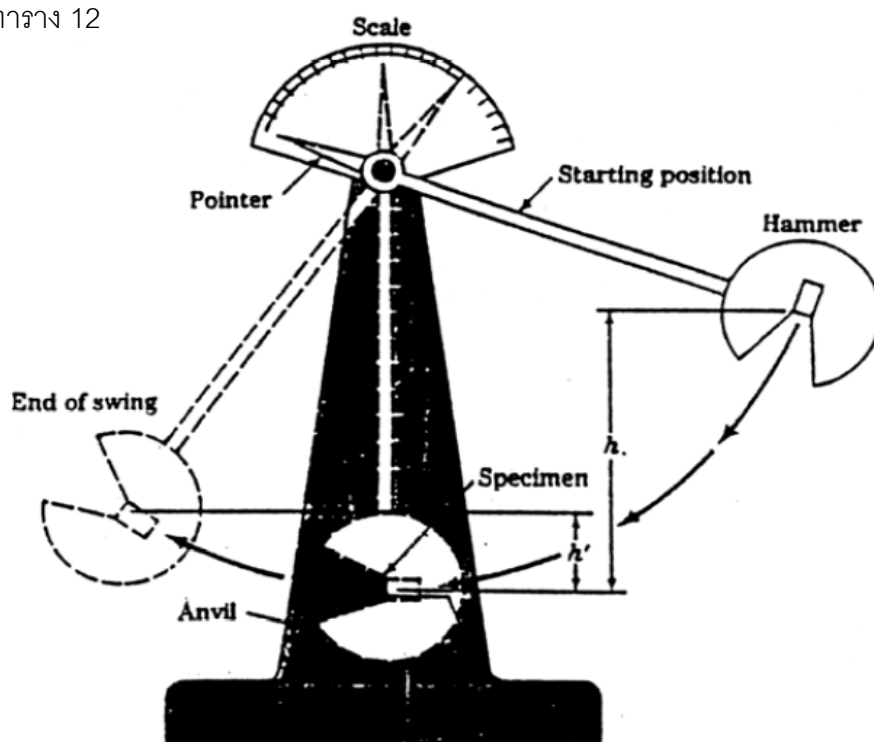
θ	คือ	มุมเริ่มต้นในการปล่อยลูกตุ้มโดยไม่มีชิ้นงาน
θ'	คือ	มุมที่อ่านได้จากเข็มชี้เมื่อปล่อยลูกตุ้มโดยไม่มีชิ้นงาน
α	คือ	มุมเริ่มต้นของแขนตีโดยไม่มีชิ้นงาน
α'	คือ	มุมที่ตีได้จากแขนตี
T	คือ	ความทนทานต่อการกระแทก (Impact strength)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดบริเวณร่องบาก
F	คือ	น้ำหนักของลูกตุ้ม
L	คือ	ความยาวของแขนตี

ในการทดสอบมีค่าต่างๆดังนี้

$\alpha = 150$ องศา $\alpha' = 145$ องศา $\beta^\circ = 90$ องศา $\beta' = 99$ องศา

$\theta = 150$ องศา $\theta' = 150$ องศา $L = 32.7$ เซนติเมตร $F = 0.49$ กิโลกรัม

ภาพประกอบ 62 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงดังตาราง 12



ภาพประกอบ 62 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก

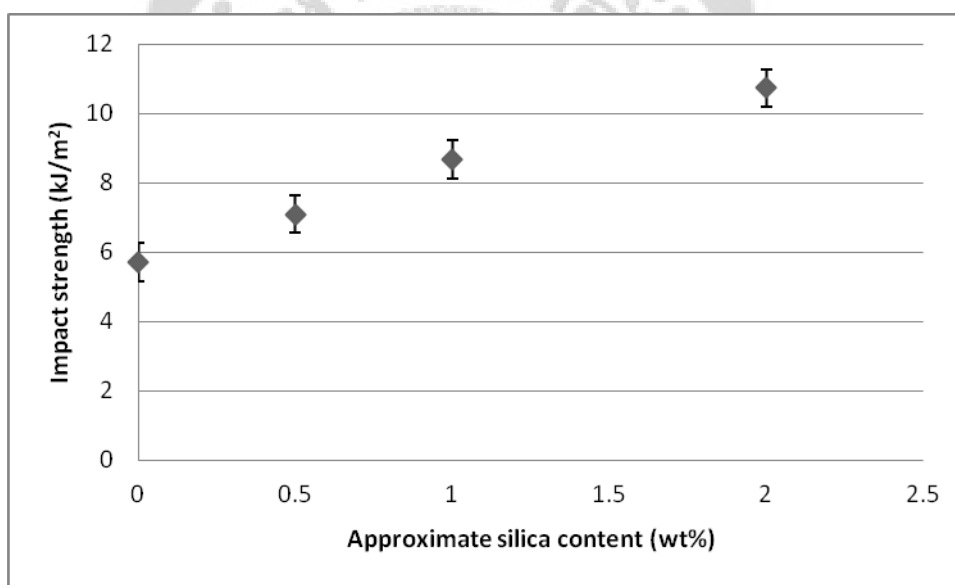
ที่มา: อรรถพล ตะเระ. (2551). คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ. หน้า 220.

ตาราง 12 สมบัติความทนต่อแรงกระทำของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

ชิ้นงาน	มุมยกลูกตุ้ม สุดท้ายหลังกระ แทก (องศา)	แรงเสียดทานจากมุม ยกลูกตุ้มหลังกระแทก (นิวตันเมตร)	พลังงานที่ดูด ซับ (นิวตันเมตร)	ความทนทานต่อการ กระแทก (กิโลจูลต่อตารางเมตร)
IP-0	140	0.139	0.23	5.67
	142	0.122	0.21	5.17
	139	0.174	0.26	6.40
	141	0.139	0.23	5.67
	141	0.139	0.23	5.67
เฉลี่ย	140.6	0.143	0.23	5.71±0.44
IP-0.5	139	0.174	0.26	6.40
	138	0.193	0.28	6.90
	136	0.230	0.32	7.88
	137	0.211	0.30	7.39
	138	0.193	0.28	6.90
เฉลี่ย	137.6	0.201	0.29	7.09±0.56
IP-1	135	0.249	0.37	9.11
	134	0.269	0.36	8.87
	136	0.230	0.32	7.88
	135	0.249	0.34	8.38
	133	0.289	0.37	9.11
เฉลี่ย	134.6	0.257	0.35	8.67±0.53
IP-2	131	0.329	0.42	10.34
	130	0.350	0.44	10.84
	129	0.371	0.46	11.33
	132	0.308	0.40	9.85
	129	0.371	0.46	11.33
เฉลี่ย	130.2	0.343	0.44	10.74±0.64

ตาราง 13 สรุปสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

ชิ้นงาน	มูมยกลูกตุ้มสุดท้าย หลังกระแทก (องศา)	พลังงานเสียตทานจาก มูมยกลูกตุ้มหลัง กระแทก (นิวตันเมตร)	พลังงานที่ดูด ซับ (นิวตันเมตร)	ความทนทานต่อการ กระแทก (กิโลจูลต่อตารางเมตร)
IP-0	140.6	0.143	0.23	5.71±0.44
IP-0.5	137.6	0.201	0.29	7.09±0.56
IP-01	134.6	0.257	0.35	8.67±0.53
IP-2	130.2	0.343	0.44	10.74±0.64



ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

ผลการวิเคราะห์การทดสอบแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง พบว่าไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีความทนทานต่อการกระแทก (Impact strength) 5.71 ± 0.44 7.09 ± 0.56 10.74 ± 0.64 กิโลจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6

เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยครั้งนี้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยกับงานวิจัยของลีและคณะ (Li; et al. 2010 : 262-268) ลีและคณะได้ทำการศึกษาการใช้เส้นใยซิลิกาที่มีลักษณะสั้นเป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร โดยมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันคือ 0 1 2 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเส้นใยซิลิกาถูกเตรียมโดย monomer casting (MC) technology เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติการเสียดทาน (Tribological properties) ของพอลิเอไมด์ 6 บล็อกโคพอลิเมอร์ (Polyamide 6-polyurethane (PA6-PU) block copolymers) ผลการทดสอบของลีและคณะพบว่าค่าความทนทานต่อการกระแทก (Impact strength) ที่มีปริมาณเส้นใยซิลิกา 1% โดยน้ำหนักลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเอไมด์ 6 บล็อกโคพอลิเมอร์ (Polyamide 6-polyurethane (PA6-PU) block copolymers) ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกา แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้น 2 3 5% โดยน้ำหนักค่าความทนทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ค่าความทนทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่ามีกระบวนการผลิต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เมทริกซ์ที่ กระบวนการขึ้นรูปที่ใช้แตกต่างกัน

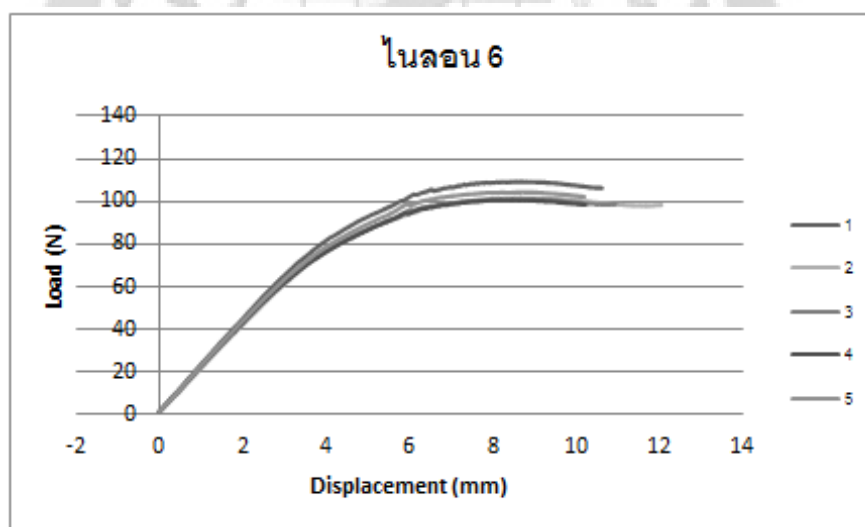
3. การทดสอบแรงดัดงอ

ในการทดสอบแรงดัดงอลักษณะชิ้นงานมีการประกบชั้นของแผ่นไนลอน 6 2 ชั้น ซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ดังตาราง 14 ชิ้นงานมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งมีขนาด กว้าง 12.7 ยาว 125 นหนา 3.2 มิลลิเมตร โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) 1 กิโลนิวตัน ความเร็วในการกด (Compression speed) 1.28 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน (Support span) 48 มิลลิเมตร ชิ้นงานแต่ละแบบมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบใช้ชิ้นงานในการทดสอบจำนวน 5 ชิ้นงาน

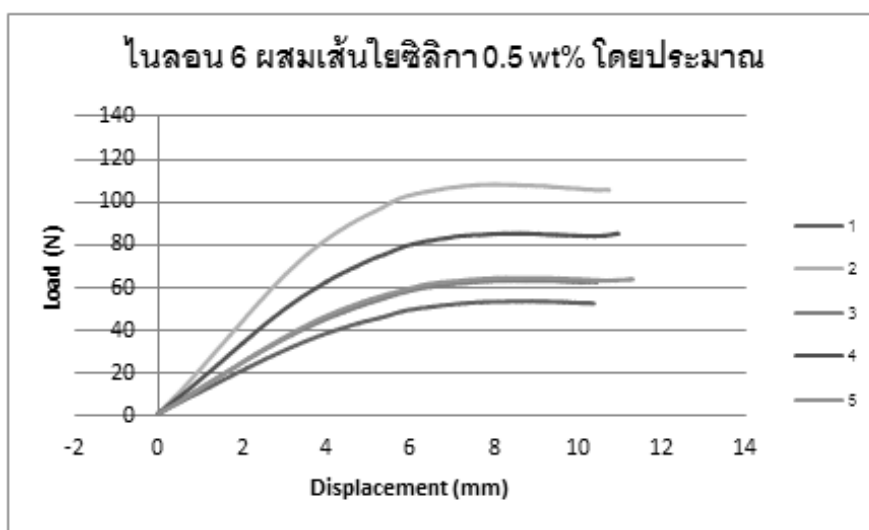
ตาราง 14 ปริมาณเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 ที่ใช้ทดสอบแรงดัดงอ

ชั้นงาน	จำนวนชั้น ของไนลอน 6	จำนวนชั้นของ เส้นใยซิลิกา	สัดส่วนของเส้นใยซิลิกา (% โดยน้ำหนัก)
FR-0	2	0	0
FR-0.5	2	1	0.546
FR-1	2	1	1.029
FR-2	2	1	1.937

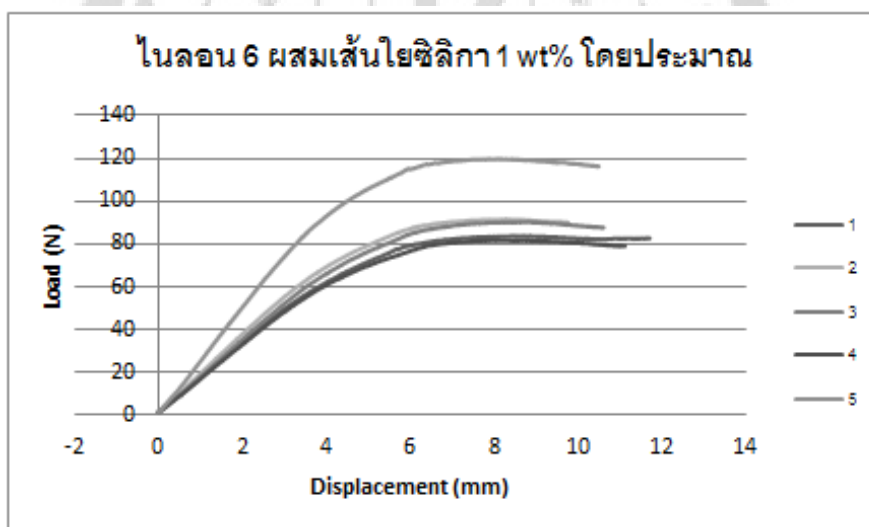
ผลจากการทดสอบแรงดัดงอจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอที่เกิดขึ้นดังภาพประกอบ 64-67 ซึ่งแสดงผลการทดสอบของชั้นงาน FR-0 FR-0.5 FR-1 FR-2 ตามลำดับ ลักษณะของกราฟที่ปรากฏในช่วงแรกจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงหลังจากนั้น เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากแนวเส้นตรง



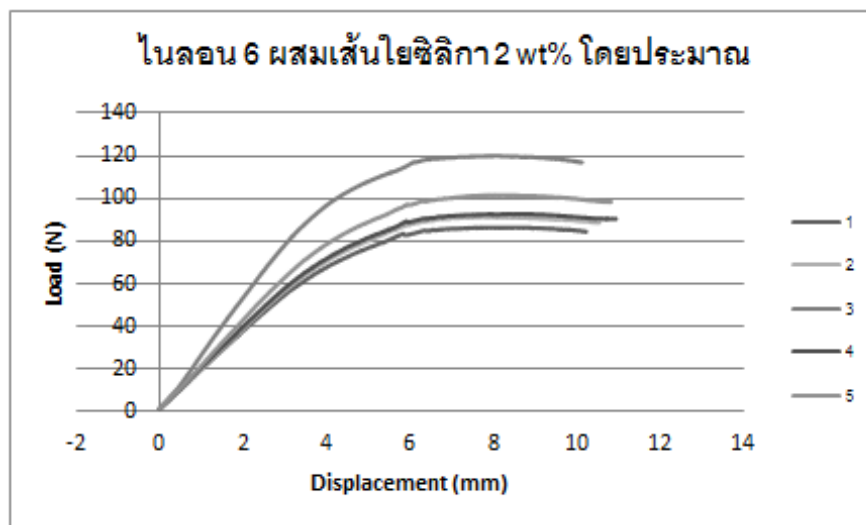
ภาพประกอบ 64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ
ของชั้นงาน FR-0 5 ชั้นงาน



ภาพประกอบ 65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ
ของชิ้นงาน FR-0.5 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ
ของชิ้นงาน FR-1 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการดัดงอ
ของชิ้นงาน FR-2 5 ชิ้นงาน

ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดัดงอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับการดัดงอ
สามารถนำมาหาค่ามอดุลัสดัดงอ ดังสมการ 12

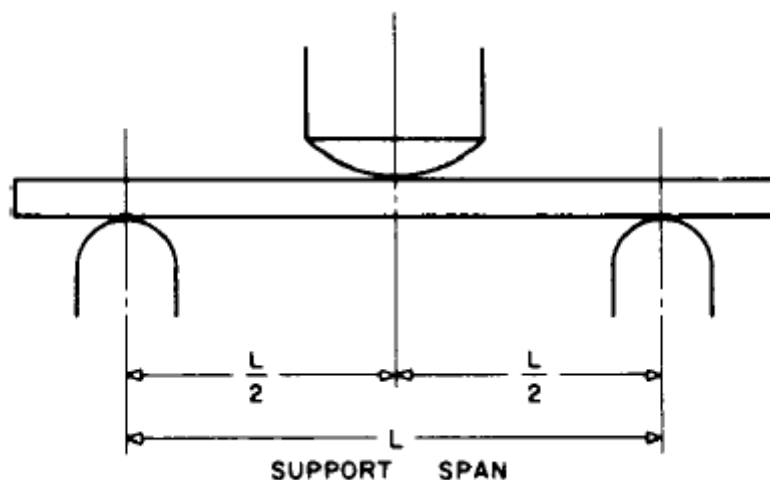
$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (12)$$

E_B	คือ	ค่ามอดุลัสดัดงอ
L	คือ	ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน
m	คือ	ความชันของกราฟความสัมพันธ์แรงที่กระทำกับการดัดงอ
b	คือ	ความกว้างของชิ้นทดสอบ
d	คือ	ความหนาของชิ้นทดสอบ

ในการทดสอบมีค่าต่างๆดังนี้

$$L = 48 \text{ มิลลิเมตร} \quad b = 12.7 \text{ มิลลิเมตร} \quad d = 3 \text{ มิลลิเมตร}$$

ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดัดงอแสดงดังภาพประกอบ 61 เมื่อใช้สมการ 12 คำนวณค่ามอดูลัสแรงดัดจะได้ผลดังตารางที่ 15



ภาพประกอบ 68 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดัดงอ

ที่มา: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical Insulating materials . ASTM International designation: D 790 – 03 .
หน้า 2 .

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและแรงดัดงอสามารถคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดของแรงดัดงอและนำมาพล็อตเป็นกราฟโดยใช้สมการ 13 และ สมการ 14 ซึ่งกราฟความเค้นและความเครียดแรงดัดแสดงดังภาพประกอบ 69-72

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (13)$$

σ_f	คือ	ความเค้นแรงดัด
P	คือ	แรงกระทำ
L	คือ	ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน

b คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ

d คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (14)$$

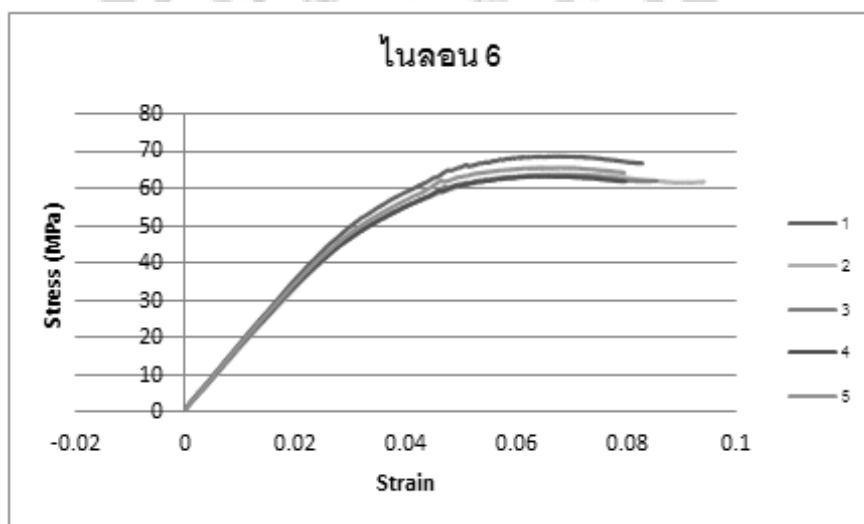
ε_f คือ ความเครียดแรงดัด

D คือ ระยะยึดของชิ้นงานจากการดัดงอ

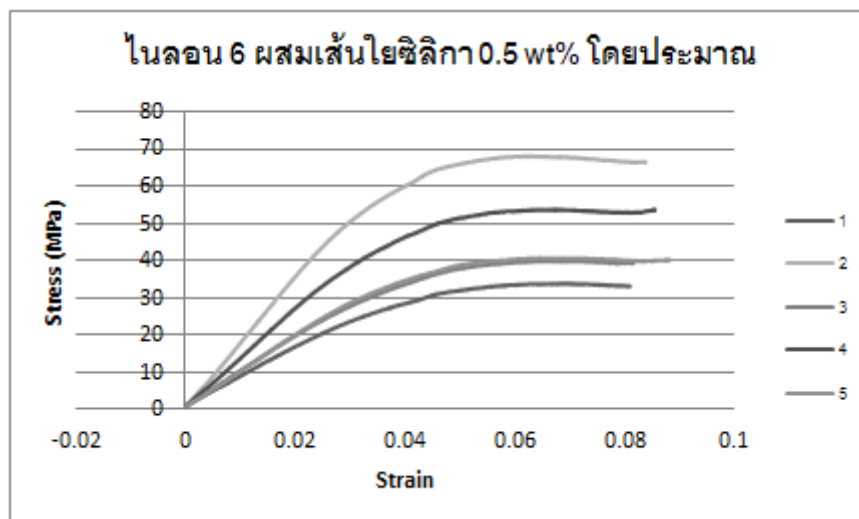
L คือ ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน

b คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ

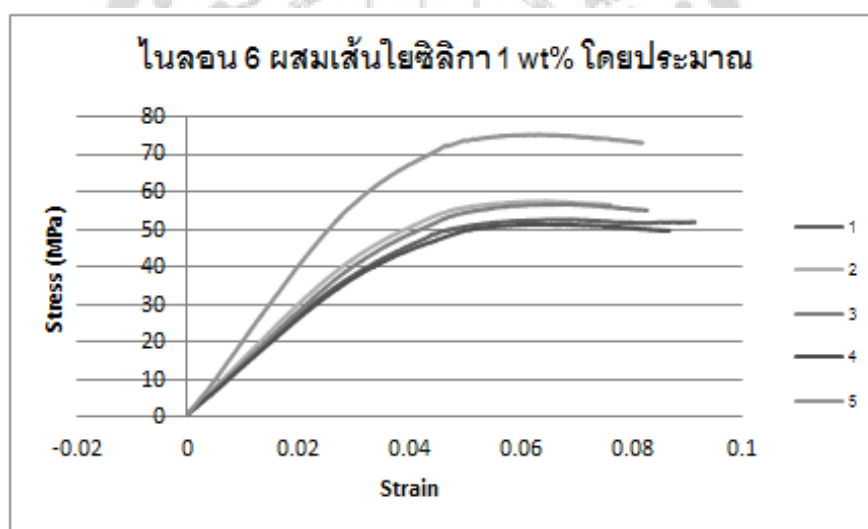
d คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ



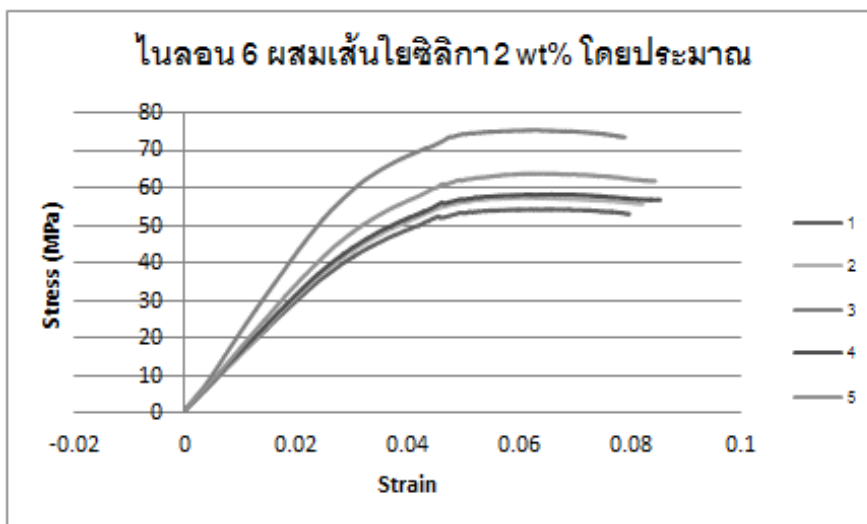
ภาพประกอบ 69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแรงดัดงอ ของชิ้นงาน FR-0 จำนวน 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 70 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดึงของชิ้นงาน FR-0.5 จำนวน 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 71 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดึงของชิ้นงาน FR-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 72 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ
ความเครียดดัดงอ ของชิ้นงาน FR-1 จำนวน 5 ชิ้นงาน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะได้ค่าความแข็งแรงดัดซึ่งเป็นจุดสูงสุดของกราฟ ค่าความแข็งแรงดัดจะแสดงดังตาราง 15

ตาราง 15 สมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

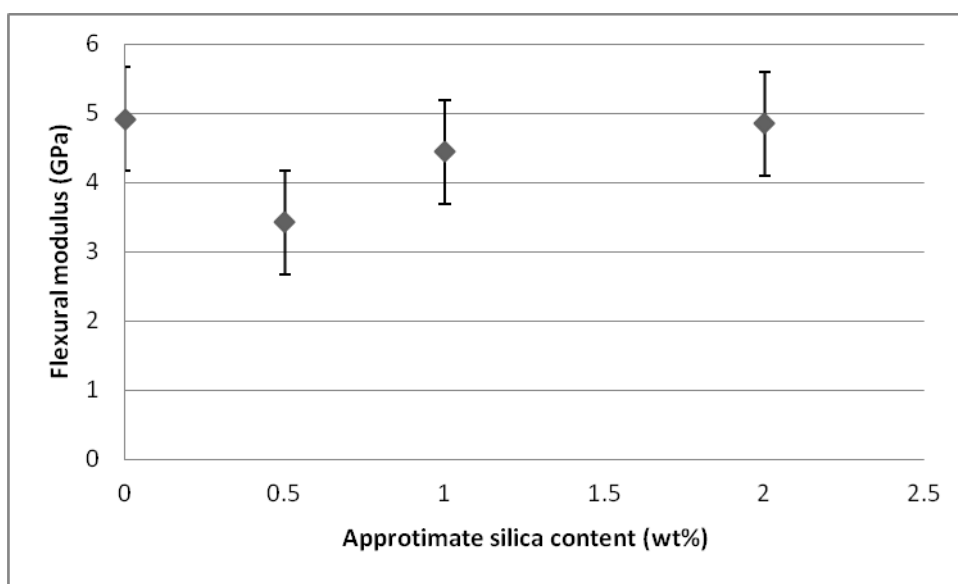
ชิ้นงาน	ความชันของกราฟ	มอดูลัสดัดงอ (กิกะปาสคาล)	ความแข็งแรงดัด (เมกะปาสคาล)
FR-0	21.48	5.19	69
	18.68	4.52	65
	19.71	4.47	64
	20.63	4.99	63
	20.95	5.07	66
เฉลี่ย	20.29	4.91±0.33	65.4±2.06
FR-0.5	9.14	2.21	33
	21.18	5.12	68
	11.47	2.77	40
	16.76	4.05	55
	12.16	2.94	41

ตาราง 15 (ต่อ)

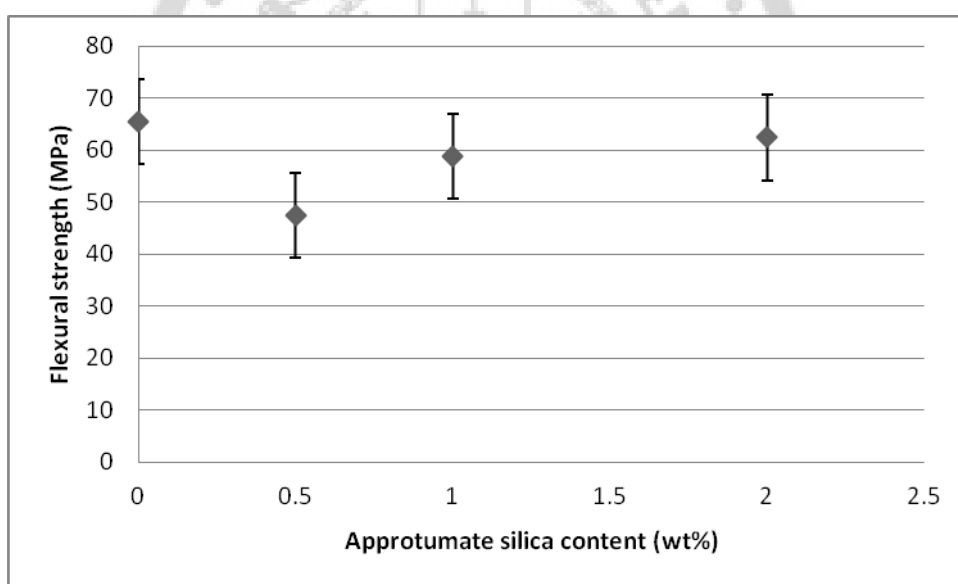
ชิ้นงาน	ความชันของกราฟ	มอดูลัสตัดดงอ (กิกะปาสคาล)	ความแข็งแรงดัด (เมกะปาสคาล)
เฉลี่ย	14.14	3.42 ± 1.16	47.4 ± 12.53
FR-1	16.26	3.93	52
	18.27	4.42	58
	16.94	4.09	56
	16.15	3.91	51
	24.24	5.86	77
เฉลี่ย	18.37	4.44 ± 0.81	58.8 ± 9.45
FR-2	18.48	4.47	52
	18.27	4.42	58
	25.31	6.12	78
	18.58	4.49	59
	19.68	4.76	65
เฉลี่ย	20.06	4.85 ± 0.72	62.4 ± 8.82

ตาราง 16 สรุปสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

ชิ้นงาน	ความชันของกราฟ	มอดูลัสตัดดงอ กิกะปาสคาล	ความแข็งแรงดัด เมกะปาสคาล
FR-0	20.29	4.91 ± 0.33	65.4 ± 2.06
FR-0.5	14.14	3.42 ± 1.16	47.4 ± 12.53
FR-1	18.37	4.44 ± 0.81	58.8 ± 9.45
FR-2	20.06	4.85 ± 0.72	62.4 ± 8.82



ภาพประกอบ 73 ค่ามอดูลัสแรงดัดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง



ภาพประกอบ 74 ค่าความแข็งแรงดัดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง

ผลการวิเคราะห์การทดสอบแรงดัดของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสดัดงอ (Flexural modulus) 4.91 ± 0.33 3.42 ± 1.16 4.44 ± 0.81 และ 4.85 ± 0.72 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ค่ามอดูลัสดัดงอที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไนลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก

ในลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) 65.4 ± 2.06 47.4 ± 12.53 58.8 ± 9.45 และ 62.4 ± 8.82 ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงดัดที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับในลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใย ซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับค่ามอดุลัสดัดงอ

เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติมอดุลัสดัดงอมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีความแตกต่างกับงานวิจัยของเว็นกาตะและเกร็ก (Venkata; & Gregg. 2010: 1253-1256) เว็นกาตะและเกร็กได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านการดัดงอของเทอร์โมพลาสติก พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และในลอน 66 ที่มีเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง โดยใช้ปริมาณเส้นใยแก้ว 0 10 40 % โดยน้ำหนัก ชิ้นงานถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression molding) ตามมาตรฐาน ASTM D790 เพื่อทดสอบการดัดงอ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าความแข็งแรงดัดที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับในลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก ซึ่งผลที่ได้แตกต่างกันเนื่องจากปริมาณเส้นใยแก้วและเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตเส้นใยซิลิกาจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและนำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 โดยได้ศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ซึ่งเส้นใยซิลิกาที่ผลิตจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นได้เตรียมสารละลายตั้งต้นจากกระบวนการโซลเจล โดยใช้ เตตระเอทิลออกโทซิลิเคต น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก และเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นสารตั้งต้น ในอัตราส่วนโดยโมล $\text{TEOS} : \text{H}_2\text{O} : \text{HCl} : \text{C}_2\text{H}_5\text{O} : \text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ เท่ากับ 1:2:0.01:2 และในขั้นตอนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยห่างกัน 15 เซนติเมตร และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ทำการปั่นเส้นใยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ทำการเผาเส้นใยที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 2000 และ 5000 เท่าเส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก่อนการเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส เส้นใยซิลิกามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.471 0.425 และ 0.354 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเส้นใยซิลิกาหลังการเผาเพื่อกำจัดสารละลายและสารอินทรีย์ที่ตกค้างที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียสมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยซิลิกา ก่อนการเผา

ผลจากการวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 800 องศาเซลเซียส ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจะอยู่ในในช่วงของสเปกตรัม 4000-600 cm^{-1} และหมู่ฟังก์ชันที่พบประกอบไปด้วย หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ CH CH_2 CH_3 และ น้ำ (H_2O) หมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Si-O-Si) และพันธะซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O) พบว่าเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ใกล้เคียงกับเส้นใยซิลิกา ก่อนเผา ส่วนเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยซิลิกา ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ CH CH_2 CH_3 และ น้ำ (H_2O) มีปริมาณลดลงจนไม่ปรากฏให้เห็น หมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) และพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O) ยังคงอยู่ แต่มีปริมาณลดลงจากเดิมอย่างอันเป็นผลเนื่องมาจากการสลายตัวทางความร้อน

เส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในไนลอน 6 โดยผลิตขึ้นงานเป็นคอมพอลิตแบบชั้นซึ่งระหว่างชั้นมีแผ่นเส้นใยซิลิกาวางสลับอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันไป และถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบด้วยความร้อน ในขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกลได้ทำการทดสอบแรงดึง แรงกระแทก และแรงดัดงอ

ในการทดสอบแรงดึง ลักษณะขึ้นงานมีการประกบชั้นของแผ่นไนลอน 6 ที่แตกต่างกันคือ 2 ชั้น และ 3 ชั้น ขึ้นงานมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งมีขนาด กว้าง 6 ยาว 30 มม 3 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร ต่อนาที ขึ้นงานแต่ละแบบมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบใช้ขึ้นงานในการทดสอบจำนวน 5 ขึ้นงาน ผลการวิเคราะห์การทดสอบแรงดึงของไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรงพบว่า ไนลอน 6 ประกบ 2 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีค่าของมอดูลัส 1.795 ± 0.13 1.980 ± 0.27 2.208 ± 0.42 และ 3.437 ± 0.31 กิกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6 ค่าความเค้นสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไนลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก ความเครียด ณ จุดขาดลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

ไนลอน 6 ประกบ 3 ชั้นที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 1 2 และ 4% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัส 1.977 ± 0.29 2.143 ± 0.21 2.106 ± 0.19 และ 2.216 ± 0.30 กิกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งค่าของมอดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณเส้นใยซิลิกาที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6 ความเครียด ณ จุดขาดลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น แต่ความเค้นสูงสุดนั้นเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนเมื่อปริมาณของเส้นใยซิลิกาเพิ่มขึ้นในไนลอน 6

ในการทดสอบแรงกระแทก ลักษณะขึ้นงานมีการประกบชั้นของแผ่นไนลอน 6 2 ชั้น ขึ้นงานมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งมีขนาด กว้าง 12.7 ยาว 125 มม 3.2 มิลลิเมตร ขึ้นงานแต่ละแบบมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบใช้ขึ้นงานในการทดสอบจำนวน 5 ขึ้นงาน พบว่าไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีความทนทานต่อการกระแทก (Impact strength) 5.71 ± 0.44 7.09 ± 0.56 10.74 ± 0.64 กิโลจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในไนลอน 6

ในการทดสอบแรงดัดงอ ในการทดสอบแรงดัดงอลักษณะขึ้นงานมีการประกบชั้นของแผ่นไนลอน 6 2 ชั้น ขึ้นงานมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งมีขนาด กว้าง 12.7 ยาว 125 มม 3.2 มิลลิเมตร โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) 1 กิโลนิวตัน ความเร็วในการกด (Compression speed) 1.28 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ระยะห่างของแท่นรองรับขึ้นงาน (Support span) 48 มิลลิเมตร ขึ้นงานแต่ละแบบมีปริมาณเส้นใยซิลิกาที่แตกต่างกันไปโดยแต่ละแบบใช้ขึ้นงานในการทดสอบ

จำนวน 5 ชิ้นงาน พบว่าไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดุลัสดัดงอ (Flexural modulus) 4.91 ± 0.33 3.42 ± 1.16 4.44 ± 0.81 และ 4.85 ± 0.72 กิกะปาสคาล ตามลำดับ ค่ามอดุลัสดัดงอที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไนลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก

ไนลอน 6 ที่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง 0 0.5 1 และ 2% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดัด (Flexural strength) 65.4 ± 2.06 47.4 ± 12.53 58.8 ± 9.45 และ 62.4 ± 8.82 ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงดัดที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 0.5% โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไนลอน 6 ที่ไม่มีเส้นใยซิลิกาเป็นวัสดุเสริมแรง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเส้นใยซิลิกา 1 และ 2 % โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับค่ามอดุลัสดัดงอ

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 ที่ใช้เส้นใยซิลิกาที่ผลิตจากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวัสดุเสริมแรงนั้นอาจจะเพิ่มปริมาณของเส้นใยซิลิกาที่ใช้เสริมแรงให้มีปริมาณมากกว่างานวิจัยนี้ น่าจะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในงานวิจัยต่อไปอาจจะนำเส้นใยซิลิกาที่ผลิตจากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ



บรรณานุกรม

- จุฑารัตน์ อาชวรัตน์ถาวร. (ม.ป.ป.). กระบวนการโซลเจล. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2556, จาก <http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3251>.
- ดรรชนี พัทธวากร. (ม.ป.ป.). เทคโนโลยีกระบวนการการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2557 จาก <http://epg.science.cmu.ac.th/inuschem/articledownload.php?id=1563>.
- นัฐยา ประมวลทรัพย์.(2557). การผลิตและวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาที่ได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการเผาแคลไซน์: ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์). กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์; และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. (2547). สเปคโตรสโคปีด้านการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปริญญานิยมไทย; และจรรยา ตริ่มงคล หิรัญวิวัฒน์กุล. (2555). เทคนิคการปั่นเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประโยชน์ด้านการแพทย์. *PLASTIC BI-WEEKLY NEW*. 52 .
- พัชรินทร์ วรรณกุล.(2553). Sol-gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากขาน้อย. *วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี*. 36: p 39-43.
- แม่น อมรสิทธิ์; และคณะ. (2534). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์.
- สุภาสินี ลิ้มปานภาพ ชีท. (2554). วัสดุศาสตร์ขั้นแนะนำ. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อดิศักดิ์ คงช่วงคิด. (2543). ไฟเบอร์กลาส. *วารสาร Hobby Electronics*, 102: p 1-5.
- อรรถพล พัทธวากร. (2551). คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- อนินดา รัชเวทย์. (2555). พอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: ดวงกลม
- Choi, Sung-Seen; et al. (2003). Silica nanofibers from electrospinning/sol-gel process. *Journal of materials science letters*. 22: p 891-893.
- Chuangchote, Surawut.;& Supaphol, Pitt. (2006). Fabrication of aligned poly (vinyl alcohol) Nano fibers by electrospinning. *Journal of nanoscience and nanotechnology*: p125-129.

- Li, Du-Xin; et al. (2010). Mechanical and tribological properties of polyamide 6-polyurethane block copolymer reinforced with short glass fibers. *Wear* 269: p 262–268.
- Monserat Garcfa.; et al. (2003). Hybrid nylon-6/silica nanocomposites with improved mechanical properties. *Materials Research Society* .704 : p 33-38
- Mouhmid ,B.; et al. (2006). A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation. *Polymer testing*. 25: p 544–552.
- Huang, Zheng - Ming; et al. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites science and techonlogy*. 63 :p 2223-2253.
- limura, Kenji; et al. (2010). Preparation of silica fibers and non-woven cloth by electrospinning. *Advanced powers technology*. 21: p 64-68.
- Pramuansub, Nuttaya.;& Jittangprasert, Piyada.;& Wanakamol, Panitarn. (2012). Effects of Calcination Temperature on Electrospun Silica Fibers. *Advanced Materials Research*. 488-489: p 602-606.
- Rutledge, Gregory C.;& Fridrikh, Sergey V. (2007). Formation of fibers by electrospinning. *Advance drug delivery reviews*. 59: p 1384-1391.
- Segatelli, Mariana Gava; et al. (2010). Natural silica fiber as reinforcing filler of Nylon 6. *Composites: Part B*: p 98-105
- Venkata S. Chevali.;& Gregg M. Janowski. (2010). Flexural creep of long fiber-reinforced thermoplastic composites:Effect of processing-dependent fiber variables on creep response. *Composites: Part A* :p 1253–1262
- William D. Callister, Jr. (2548). *วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน*. แปลโดยสุวัณชัย พงษ์สุกิจวัฒน์.; และคณะ กรุงเทพฯ: ท้อป.
- Yoo,Youngjae.;& Spencer, M.W.;& Paul, D.R. (2011). Morphology and mechanical. properties of glass fiber reinforced Nylon 6 nanocomposites. *Polymer*. 52: p 180-. 190.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการวัดขนาดของเส้นใยจากภาพที่ได้จาก
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวัดขนาดของเส้นใยซิลิกาจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดวัดได้จากโปรแกรมอิมเมจเจ ซึ่งโปรแกรมอิมเมจเจสามารถวิเคราะห์ภาพถ่าย ซึ่งสามารถนำใช้หาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยได้

ตาราง 17 ผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซิลิกาก่อนการเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
1	726.605	24	494.106	48	610.236
2	693.566	25	445.809	49	457.862
3	596.263	26	504.042	50	279.777
4	528.789	27	489.452	51	748.293
5	475.216	28	644.827	52	591.862
6	507.812	29	400.748	53	445.422
7	431.459	30	566.406	54	392.222
8	646.894	31	692.74	55	262.631
9	428.354	33	384.721	56	431.727
10	390.625	34	407.824	57	305.594
11	349.386	35	602.943	58	475.712
12	438.91	36	540.208	59	723.814
13	305.088	37	613.294	60	459.552
14	935.259	38	464.253	61	279.777
15	442.804	39	668.072	62	446.291
16	574.431	40	497.951	63	463.331
17	558.607	41	1401.099	64	413.854
18	488.672	42	350.482	65	378.649
19	459.711	43	668.712	66	237.039
20	445.381	44	787.402	67	311.248
21	729.225	45	283.902	68	574.924
22	288.375	46	523.044	69	459.552
23	336.028	47	413.386	70	504.567

ตาราง 17 (ต่อ)

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
71	354.331	97	415.243	123	500.625
72	386.752	98	346.095	124	804.583
73	405.817	99	303.835	125	390.625
74	212.926	100	377.211	126	337.162
75	431.727	101	410.621	127	509.313
76	708.661	102	325.065	128	457.632
77	493.698	103	360.138	129	360.138
78	392.222	104	497.951	130	314.932
79	552.585	105	480.405	131	494.106
80	442.366	106	391.113	132	574.431
81	939.126	107	402.647	133	180.069
82	985.893	108	370.579	134	276.214
83	413.861	109	417.987	135	847.305
84	352.105	110	358.546	136	552.772
85	407.824	111	407.824	137	593.056
86	430.131	112	422.526	138	492.946
87	433.664	113	323.323	139	499.099
88	488.281	114	417.987	140	428.354
89	317.946	115	351.562	141	465.893
90	402.173	116	393.059	142	375.691
91	359.078	117	370.579	143	336.028
92	265.654	118	445.381	144	331.456
93	724.765	119	508.188	145	356.412
94	386.699	120	391.113	146	360.138
95	438.912	121	860.262	147	305.712
96	587.563	122	527.705	148	415.242

ตาราง 17 (ต่อ)

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
149	341.099	153	315.537	157	512.672
150	375.183	154	814.01	158	370.579
151	595.303	155	391.113	159	341.657
152	551.390	156	323.3	160	445.381
เฉลี่ย					471.040
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					28.68



ตาราง 18 ผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่ 200 องศาเซลเซียส

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
1	717.092	24	327.403	48	336.028
2	597.541	25	290.353	49	292.969
3	612.983	26	468.750	50	341.099
4	398.361	27	341.099	51	407.824
5	366.959	28	507.812	52	531.307
6	558.607	29	254.656	53	412.012
7	384.721	30	449.643	54	317.946
8	292.969	31	414.320	55	577.082
9	410.621	33	349.386	56	395.478
10	379.228	34	360.138	57	373.144
11	454.285	35	402.647	58	652.765
12	368.515	36	741.159	59	352.105
13	383.728	37	400.748	60	262.766
14	483.176	38	398.361	61	521.159
15	455.962	39	402.647	62	509.313
16	559.290	40	406.419	63	375.183
17	482.386	41	639.779	64	520.060
18	445.381	42	683.594	65	430.131
19	341.657	43	507.812	66	391.113
20	518.958	44	469.563	67	482.386
21	303.207	45	725.028	68	449.643
22	430.131	46	308.816	69	414.320
23	457.215	47	262.039	70	295.561

ตาราง 18 (ต่อ)

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
71	288.375	97	195.312	123	683.873
72	317.946	98	371.094	124	587.238
73	478.814	99	288.375	125	515.640
74	429.688	100	327.403	126	387.684
75	402.647	101	366.959	127	244.726
76	611.425	102	358.546	128	414.320
77	438.910	103	303.835	129	373.144
78	412.012	104	331.456	130	531.397
79	412.012	105	203.912	131	332.695
80	390.625	106	413.860	132	364.874
81	414.320	107	617.632	133	371.094
82	1022.323	108	345.543	134	235.187
83	586.263	109	570.433	135	180.069
84	602.943	110	322.118	136	410.621
85	884.962	111	485.146	137	303.835
86	375.691	112	385.216	138	430.131
87	368.515	113	383.728	139	379.228
88	536.310	114	390.625	140	402.173
89	341.657	115	341.657	141	337.162
90	352.105	116	360.138	142	1088.155
91	507.812	117	459.711	143	562.351
92	317.946	118	303.207	144	346.095
93	253.906	119	391.113	145	292.969
94	274.134	120	375.183	146	387.684
95	360.138	121	250.122	147	334.321
96	468.750	122	1259.273	148	317.946

ตาราง 18 (ต่อ)

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
149	333.750	153	536.310	157	265.654
150	520.060	154	377.211	158	384.721
151	265.654	155	256.893	159	352.105
152	277.591	156	238.409	160	551.390
เฉลี่ย					425.321
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					10.630



ตาราง 19 ผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซิลิกาหลังเผาที่ 800 องศาเซลเซียส

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
1	467.331	24	431.977	48	265.654
2	291.829	25	326.129	49	207.620
3	409.023	26	253.665	50	606.728
4	314.309	27	272.374	51	472.398
5	382.235	28	525.652	52	394.995
6	586.569	29	443.648	53	555.182
7	505.837	30	443.648	54	308.816
8	200.304	31	695.236	55	336.028
9	233.463	33	438.931	56	260.579
10	426.687	34	221.824	57	290.353
11	237.482	35	252.918	58	220.971
12	140.294	36	358.737	59	470.375
13	291.829	37	323.800	60	290.353
14	348.026	38	339.771	61	336.028
15	357.680	39	369.137	62	363.302
16	194.553	40	438.931	63	334.321
17	529.240	41	365.531	64	337.162
18	371.692	42	524.078	65	253.906
19	291.829	43	385.216	66	394.995
20	350.735	44	332.605	67	346.095
21	523.849	45	385.216	68	402.647
22	261.020	46	438.910	69	308.816
23	358.737	47	308.816	70	410.156

ตาราง 19 (ต่อ)

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
71	279.645	97	488.672	123	358.546
72	445.381	98	358.546	124	322.118
73	383.728	99	371.094	125	341.099
74	363.302	100	323.300	126	393.059
75	345.543	101	597.860	127	402.173
76	320.336	102	313.110	128	358.546
77	497.184	103	314.932	129	254.656
78	332.031	104	419.354	130	370.579
79	262.039	105	195.312	131	248.592
80	595.303	106	265.654	132	253.906
81	346.095	107	323.300	133	308.816
82	621.634	108	288.375	134	262.039
83	428.354	109	333.750	135	471.994
84	524.806	110	345.543	136	303.835
85	317.946	111	392.573	137	341.099
86	341.099	112	201.087	138	346.095
87	370.579	113	254.656	139	332.605
88	253.906	114	281.684	140	683.594
89	277.591	115	488.281	141	433.664
90	305.712	116	368.515	142	317.946
91	235.187	117	322.118	143	244.726
92	312.501	118	455.962	144	298.771
93	165.728	119	308.816	145	271.337
94	298.132	120	292.969	146	436.732
95	341.099	121	352.105	147	290.353
96	317.946	122	512.672	148	359.078

ตาราง 19 (ต่อ)

เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)	เส้นใย	ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)
149	359.078	153	271.337	157	322.118
150	390.625	154	192.361	158	371.094
151	371.094	155	341.657	159	256.893
152	317.946	156	308.816	160	327.403
เฉลี่ย					354.368
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					11.860



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณสมบัติเชิงกล



ตัวอย่างการคำนวณหาค่า ความหนาแน่นต่อการกระแทก

$$\alpha = 150 \text{ องศา} \quad \alpha' = 145 \text{ องศา} \quad \beta^{\circ} = 90 \text{ องศา} \quad \beta' = 99 \text{ องศา}$$

$$\theta = 150 \text{ องศา} \quad \theta' = 150 \text{ องศา} \quad L = 32.7 \text{ เซนติเมตร} \quad F = 0.49 \text{ กิโลกรัม}$$

$$E1 = L \times \left(\frac{F}{2}\right) \times [(\cos\alpha' - \cos\alpha) + (\cos\beta' - \cos\beta^{\circ})] \quad (8)$$

$$E2 = L \times F \times (\cos\theta' - \cos\theta) \quad (9)$$

$$E = E' - (E1 + E2) \quad (10)$$

$$T = \frac{E}{A} \quad (11)$$

แทนค่าในสมการ

ยกตัวอย่างชิ้นงาน IP0 ชั้นที่1

$$E1 = \left(\frac{32.7}{100} \times \left(\frac{0.49}{2}\right) \times 9.8 \times [(\cos(145) - \cos(150)) + (\cos(99) - \cos(90))]\right)$$

$$E1 = \left(\frac{32.7}{100} \times 0.245 \times 9.8 \times [(-0.819 - (-0.866)) + (-0.156 - (0))]\right)$$

$$E1 = -0.0855 \text{ นิวตันเมตร}$$

$$E2 = \left(\frac{32.7}{100} \times 0.49 \times 9.8 \times [\cos 150 - \cos 150]\right)$$

$$E2 = 0 \text{ นิวตันเมตร}$$

$$E = 0.139 - (-0.0855 + 0) \text{ นิวตันเมตร}$$

$$E = 0.23 \text{ นิวตันเมตร}$$

$$T = 0.23 / 4.06 \times 10^{-5}$$

$$T = 5665.025 \text{ จูลต่อตารางเมตร}$$

$$T = 5.67 \text{ กิโลจูลต่อตารางเมตร}$$

E	คือ	พลังงานที่ใช้ในการแตกหักของขึ้นทดสอบ
E1	คือ	แรงเสียดทานเนื่องจากอากาศและแกนตี
E2	คือ	แรงเสียดทานเนื่องจากเข็มชี้
E'	คือ	แรงเสียดทานที่ได้จากมุกยกลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก
β	คือ	มุกยกลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก
β'	คือ	มุกที่อ่านได้จากแกนตีโดยไม่มีชิ้นงาน
β_0	คือ	มุกเริ่มต้นใดๆของแกนตีโดยไม่มีชิ้นงาน
θ	คือ	มุกเริ่มต้นในการปล่อยลูกตุ้มโดยไม่มีชิ้นงาน
θ'	คือ	มุกที่อ่านได้จากเข็มชี้เมื่อปล่อยลูกตุ้มโดยไม่มีชิ้นงาน
α	คือ	มุกเริ่มต้นของแกนตีโดยไม่มีชิ้นงาน
α'	คือ	มุกที่ดีได้จากแกนตี
T	คือ	ความทนทานต่อการกระแทก (Impact strength)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดบริเวณร่องบาก

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า มอดูลัสดัดงอ

$$L = 48 \text{ มิลลิเมตร} \quad b = 12.7 \text{ มิลลิเมตร} \quad d = 3 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (12)$$

$$E_B = \frac{48^3 \times 21.18}{4 \times 12.7 \times 3^3}$$

$$E_B = 5195.79 \text{ เมกะปาสคาล}$$

$$E_B = 5.12 \text{ กิกะปาสคาล}$$

E_B	คือ	ค่ามอดูลัสดัดงอ
L	คือ	ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน
m	คือ	ความชันของกราฟความสัมพันธ์แรงที่กระทำกับการดัดงอ
b	คือ	ความกว้างของชิ้นทดสอบ
d	คือ	ความหนาของชิ้นทดสอบ

สมการการคำนวณหาค่ามอดูลัสแรงดัดและความทนต่อการดัดงอ

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (13)$$

σ_f	คือ	ความเค้นแรงดัด
P	คือ	แรงกระทำ
L	คือ	ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน
b	คือ	ความกว้างของชิ้นทดสอบ
d	คือ	ความหนาของชิ้นทดสอบ

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (14)$$

ϵ_f	คือ	ความเครียดแรงดัด
D	คือ	ระยะการกระจัด
L	คือ	ระยะห่างของแท่นรองรับชิ้นงาน
b	คือ	ความกว้างของชิ้นทดสอบ
d	คือ	ความหนาของชิ้นทดสอบ



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ สกุล	นางสาวปิยะดา วัจวร
วัน เดือน ปีเกิด	18 กรกฎาคม 2532
สถานที่เกิด	นครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	463 อัมพร2 ซ.สุขาวดี ถ. นครพนม-ท่าอุเทน ต. อาจสามารถ อ. เมือง จ. นครพนม 48000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2548	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย จ.นครพนม
พ.ศ. 2551	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย จ.นครพนม
พ.ศ. 2555	จบการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2557	จบการศึกษาระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาวัสดุศาสตร์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

