



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวัสดุสมรรถนะดีนาโนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.วิม เหนือเพ็ง
ศาสตราจารย์ ดร. ทวี ตันขศิริ
รองศาสตราจารย์.ดร.จีระพงษ์ ตันตระกูล

พฤศจิกายน 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวัดคุณสมบัติบนโนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.วิม เหนือเพ็ง
ศาสตราจารย์ ดร. ทวี ตันหมศิริ
รองศาสตราจารย์.ดร.จีระพงษ์ ตันตระกูล

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยได้ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมระดับนาโนระหว่างท่อคาร์บอน ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา สำหรับนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น เป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์ โดยพัฒนาการเตรียมคาร์บอนนาโนทิวส์ และซิลิคอนคาร์ไบด์ ให้เตรียมได้ปริมาณมากขึ้นใช้เวลาเฉลี่ยน้อยลง แล้วนำมาผสมกับอีพ็อกซีเรซินในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ กัน โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกในความดันต่ำ จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมที่เตรียมขึ้น โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อหาองค์ประกอบในการเตรียมที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้วัสดุผสมระหว่างคาร์บอนนาโนทิวส์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน พบว่ามีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 969% มีอัตราการสึกหรอลดลง 91% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน มีค่า Tensile strength สูงสุดที่ 243.14 MPa และ ค่า Maximum force สูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 828% และ 948% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน และเมื่อเทียบกับเหล็กตัวถังที่มีความแข็งแรงสูง (HSS) คิดเป็น 70.88 %ของเหล็กตัวถัง

Keywords: วัสดุผสมนาโน วัสดุเชิงประกอบ ท่อคาร์บอน ซิลิคอนคาร์ไบด์ อีพ็อกซีเรซิน สมบัติเชิงกล

Abstract

In this research, fabrication of nanocomposites between carbon nanotubes/ silicon carbide and epoxy resin was studied to obtain the high strength materials which exhibit light weight for vehicle industries application for example, part of body. The fabrication of carbon nanotubes and silicon carbide nanofibers were developed whereas the researchers attempt to increase the quantity of nanotubes and nanofibers obtained from processing. Thereafter, to produce composites materials, the nanotubes and nanofibers were mixed with epoxy resin in difference ratios via low pressure ultrasonic technique. Furthermore, physical properties, mechanical properties, thermal property were examined. Besides, microstructure of composites samples was determined by using scanning electron microscopy (SEM) to find the optimum condition for fabricating of composites material and to obtain the excellent properties of composites between carbon nanotubes/ silicon carbide nanofibers and epoxy resin. It was found that the hardness increased 969 %, wear test decreased 91% and tensile strength increased 828% when compared with resin and when compared with mild steel (HSS), the maximum tensile strength reached to 70.88%.

Keyword: composites material, nanocomposites, CNT, SiC, epoxy resin, mechanical properties.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยในการให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆในการทำวิจัย ขอขอบคุณผู้ร่วมงานและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

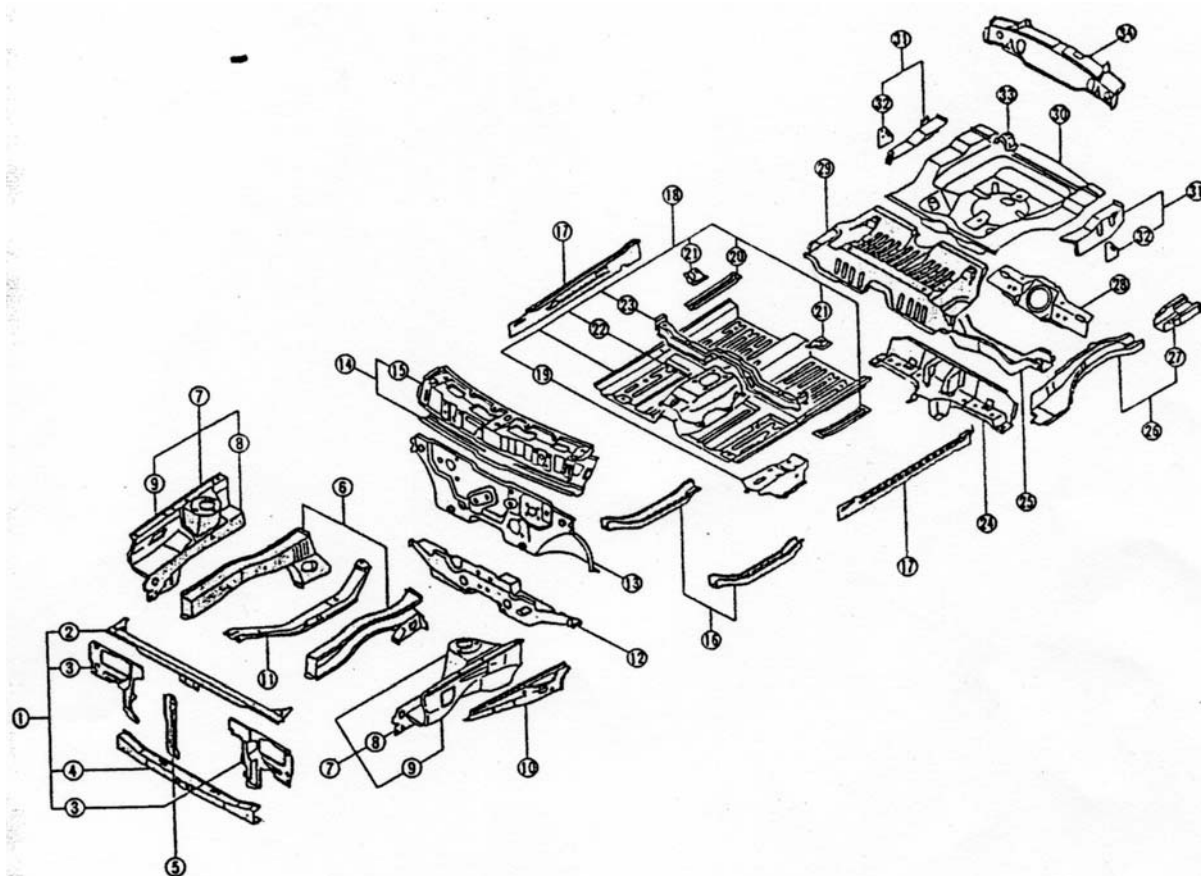
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

1. **ชื่อโครงการ :** (ภาษาไทย) **วัสดุผสมระดับนาโนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน**
(ภาษาอังกฤษ) **Carbon Nanotube/Silicon Carbide /Epoxy Resin Nanocomposites**
2. **ชื่อหัวหน้าโครงการ**
ชื่อ : นายวิม เหนือเพ็ง (Wim Nhuapeng)
หน่วยงานที่สังกัด : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ที่อยู่: 239 ถนนห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์ 0-5394-3369 ต่อ 1131
โทรสาร 0-5335-7512
E-mail : nhuapeng@yahoo.com
3. **สาขาวิชาที่ทำการวิจัย :** อิเล็กทรอนิกส์ (วัสดุศาสตร์)
5. **ระยะเวลาดำเนินการ** 2 ปี
6. **ได้เสนอโครงการนี้ หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วน เพื่อขอทุนต่อแหล่งทุนอื่นที่ใดบ้าง**
[/] **ไม่ได้เสนอต่อแหล่งทุนอื่น**

7. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันวัสดุประเภทพลาสติกมีบทบาทมากขึ้นในการนำมาใช้งานด้านต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ หรือแม้แต่ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ในอากาศยานและรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและไม่เป็นสนิม แต่พลาสติกมีข้อเสีย คือ มีความแข็งแรงน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทโลหะ เช่น เหล็ก จึงยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูงมากๆ ได้ ในการแก้ปัญหานี้ ได้มีการพัฒนาวัสดุผสมขึ้นมาชนิดหนึ่ง เรียกว่า วัสดุผสมประเภทไฟเบอร์กลาส (Fiber Glass)¹ วัสดุชนิดนี้เตรียมโดยการนำเส้นใยไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงสูงผสมเข้าไปในพลาสติกเป็นการเสริมแรงให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและไม่เป็นสนิม ดูเหมือนว่าไฟเบอร์กลาสจะเป็นทางออกที่ดีในการพัฒนาไปใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ปัญหาที่ยังมีอยู่คือ วัสดุชนิดนี้ยังมีความแข็งแรงและความคงทนไม่พอที่จะนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูงมากๆ เช่นในตัวถังส่วนล่างของรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าวัสดุชนิดนี้ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงและการขีดข่วนได้มากนัก แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นพบวัสดุเส้นใยชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงสูงมากคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) ซึ่งน่าจะเป็นคำตอบที่ดีได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุผสมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และทนต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น โดยใช้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมกับเมตริกซ์อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) และนอกจากนี้ยังผสมเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ลงไปอีก เป็นเซรามิกเฟสที่มีความแข็งแรงสูงมาก เพื่อให้สามารถทนต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น และยังมีแนวโน้มที่จะทำให้วัสดุชนิดนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น



- | | | |
|-----------------------------------|---|------------------------------|
| 1 Radiator core support assembly | 16 Front floor side extension | 31 Trunk floor side |
| 2 Upper radiator core support | 17 Inner sill | 32 Rear floor side extension |
| 3 Side radiator core support | 18 Front floor | 33 Spare tire clamp bracket |
| 4 Lower radiator core support | 19 Hand brake & seat belt reinforcement | 34 Rear crossmember (WAGON) |
| 5 Hood lock stay | 20 Center side member | |
| 6 Front side member | 21 Front seat mounting bracket | |
| 7 Hoodledge assembly | 22 Transmission control reinforcement | |
| 8 Front side member closing plate | 23 2nd crossmember | |
| 9 Hoodledge panel | 24 Rear seat crossmember | |
| 10 Hoodledge reinforcement | 25 Fuel tank mounting member | |
| 11 Center front member | 26 Rear side member | |
| 12 Lower dash crossmember | 27 Rear side member extension | |
| 13 Lower dash | 28 Rear floor belt anchor reinforcement | |
| 14 Air box assembly | 29 Rear floor front | |
| 15 Cowl top | 30 Rear floor rear | |

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของตัวถัง (Body) ด้านล่างรถยนต์นั่งขับเคลื่อน 2 ล้อ²

8. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเตรียมวัสดุผสมระดับนาโนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน ให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรง และทนต่อการขีดข่วนได้สูง เพื่อเป็นชิ้นส่วนยานยนต์
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเตรียมคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ได้ปริมาณมากขึ้น และใช้เวลาน้อยลง

9. ระเบียบวิธีวิจัย

ปีที่ 1

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารทางวิชาการ
2. จัดซื้อจัดหาวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี
3. เตรียมผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์ และซิลิคอนคาร์ไบด์ให้ได้ปริมาณมากขึ้น และใช้เวลาน้อยลง ซึ่งต้องมีการปรับตัวแปรที่สำคัญต่างๆ ให้เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต
4. เตรียมวัสดุระดับนาโนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน ในอัตราส่วนปริมาตรต่างๆ

ปีที่ 2

1. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ อาทิ ความหนาแน่น การหดตัว สี และอื่นๆ ของวัสดุผสมที่เตรียมได้
2. ตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เตรียมได้ อาทิ การทดสอบแรงดึง การทดสอบค่าความแข็ง ค่าความทนต่อการกระแทก และการทนต่อการขีดข่วน
3. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
4. ทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมที่เตรียมได้
5. เลือกอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดในการที่จะเตรียมวัสดุผสมให้มีคุณภาพเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ได้จริง
6. สรุปและอภิปรายผลการทดลองที่ได้
7. เขียนรายงาน

10. จำนวนโครงการที่ผู้สมัครกำลังดำเนินการอยู่

-

เอกสารอ้างอิง

1. P.K. Mallick, *"Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design"*, Marcel Dekker, Inc., New York 10016, 1993.
2. เสนีย์ พันโยธา. การผลิตรถยนต์. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพฯ: กรุงเทพฯ. 2545.

เนื้อหางานวิจัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันวัสดุประเภทพลาสติกมีบทบาทมากขึ้นในการนำมาใช้งานด้านต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ หรือแม้แต่ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ในอากาศยานและรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบาและไม่เป็นสนิม แต่พลาสติกมีข้อเสีย คือ มีความแข็งแรงน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทโลหะ เช่น เหล็ก จึงยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูงมาก ๆ ได้ ในการแก้ปัญหานี้ได้มีการพัฒนาวัสดุผสมขึ้นมาชนิดหนึ่ง เรียกว่า วัสดุผสมประเภทไฟเบอร์กลาส (Fiber Glass)¹ วัสดุชนิดนี้เตรียมโดยการนำเส้นใยไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงสูงผสมเข้าไปในพลาสติกเป็นการเสริมแรงให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและไม่เป็นสนิม ดูเหมือนว่าไฟเบอร์กลาสจะเป็นทางออกที่ดีในการพัฒนาไปใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ปัญหาที่ยังมีอยู่คือ วัสดุชนิดนี้ยังมีความแข็งแรงและความคงทนไม่พอที่จะนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูงมาก ๆ เช่น ในตัวถังส่วนล่างของรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าวัสดุชนิดนี้ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงและการขีดข่วนได้มากนัก แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นพบวัสดุเส้นใยชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงสูงมากคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) ซึ่งน่าจะเป็นคำตอบที่ดีได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุผสมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และทนต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น โดยใช้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมกับเมตริกซ์อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) และนอกจากนี้ยังผสมเซรามิกซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ลงไปอีก เป็นเซรามิกเฟสที่มีความแข็งแรงสูงมาก เพื่อให้สามารถทนต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น และยังมีแนวโน้มที่จะทำให้วัสดุชนิดนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

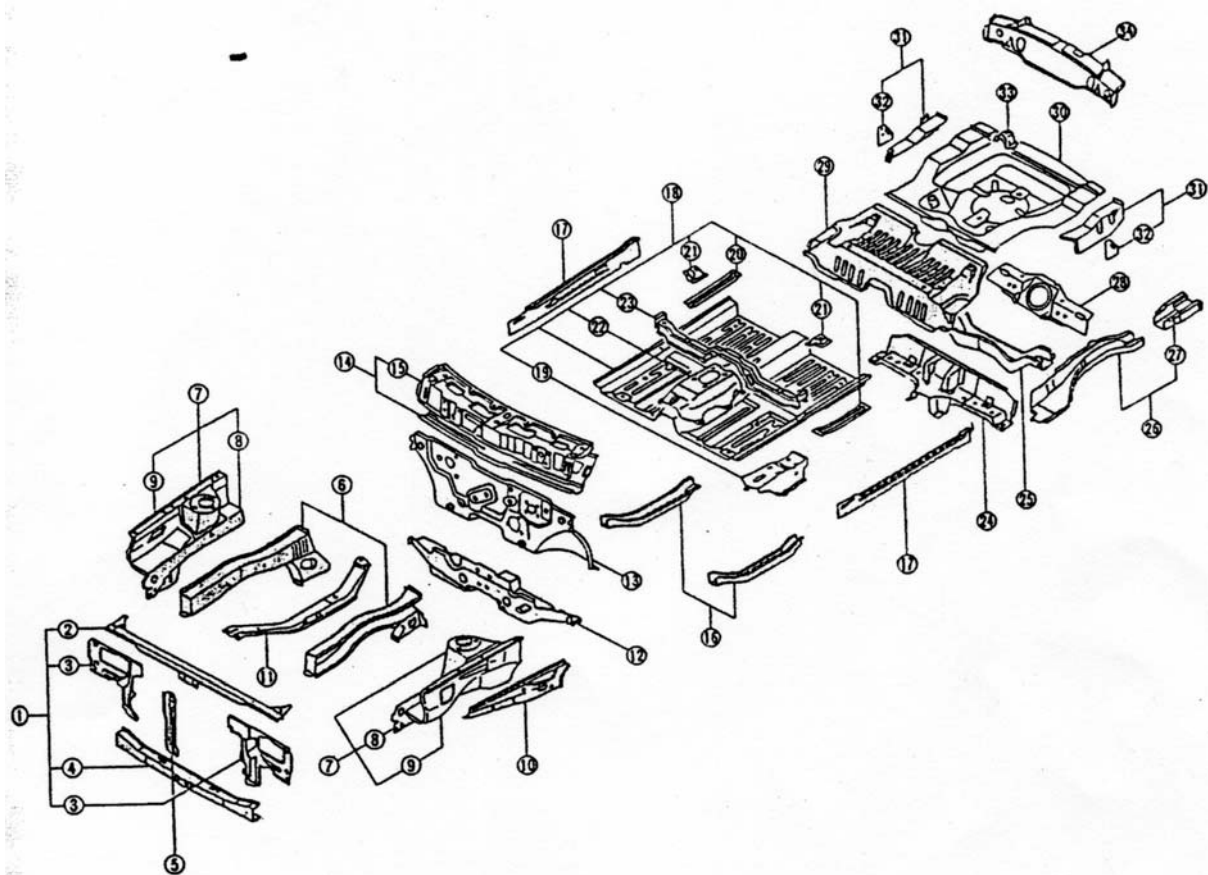
1. เพื่อศึกษาเตรียมวัสดุผสมระดับนาโนระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอีพ็อกซีเรซิน ให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรง และทนต่อการขีดข่วนได้สูง เพื่อเป็นชิ้นส่วนยานยนต์
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเตรียมคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ได้ปริมาณมากขึ้นและใช้เวลาน้อยลง

1.3 ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีผู้ผลิตชิ้นส่วนที่ใช้ประกอบรถยนต์และจักรยานยนต์ประมาณ 600-700 ราย ชิ้นส่วนที่ผลิตได้ในประเทศ ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนระบบกันสะเทือน ชิ้นส่วนระบบเบรก-คลัตช์ ชิ้นส่วนพวงมาลัย ชิ้นส่วนตัวถัง อุปกรณ์ไฟฟ้า และแสงสว่าง ชิ้นส่วนตกแต่งภายในรถ อุปกรณ์อำนวยความสะดวก ชิ้นส่วนยาง พลาสติก และกระจก เป็นต้น ในระยะเวลาที่ผ่านมาอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ได้ขยายตัวตามการเติบโตของอุตสาหกรรมรถยนต์และจักรยานยนต์ โดยการนำเข้าอุปกรณ์และส่วนประกอบมีแนวโน้มลดลง²

จะเห็นว่าชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์ โดยรวมๆ แล้วต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ป้องกันสนิม รับแรงได้ดี และขึ้นรูปได้ง่าย สำหรับในส่วนของตัวถัง ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบมากกว่า 80 ชิ้น โดยชิ้นหลักๆ ประกอบไปด้วย หลังคา กระโปรงหน้า-หลัง ประตูหน้า-หลัง บังโคลนหน้า-หลัง และพื้นรถ เป็นต้น ควรจะคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ คือ ความแข็งแรงของวัสดุ ความเหนียวของวัสดุ ความต้านทานต่อความสึกหรอของวัสดุ ความสามารถในการตกแต่งวัสดุ และความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุ

ในปัจจุบันพบว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ที่นำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยมากจะใช้วัสดุที่เป็นโลหะจำพวกเหล็กเป็นหลัก โดยข้อเสียของเหล็กคือน้ำหนักมาก ทำให้รถมีน้ำหนักมากและสิ้นเปลืองพลังงานสูง ในการลดน้ำหนักลงจะต้องหาวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาใช้แทน แต่วัสดุที่มีน้ำหนักเบามักจะขาดคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น เช่น พลาสติก และอะลูมิเนียม เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมา คือวัสดุผสมไฟเบอร์/อีพ็อกซี หรือไฟเบอร์กลาส วัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็ก แต่มีน้ำหนักที่เบากว่าและไม่เป็นสนิม จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ ที่จะนำมาใช้งานผลิตเป็นชิ้นส่วนของยานยนต์เป็นอย่างยิ่ง³ สิ่งที่มีผลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุผสมมากที่สุด คือความสามารถในการเกาะยึดกันระหว่างไฟเบอร์และเมตริกซ์ ได้มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ และพบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงต่อกันเป็นอย่างยิ่ง⁴⁻¹² จึงได้มีการศึกษาเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฟเบอร์และเมตริกซ์นี้ โดยการปรับปรุงพื้นผิวของไฟเบอร์เพื่อให้เกาะยึดได้ดีขึ้น และลดการแตกได้ดีขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวมีหลายวิธี เช่น plasma treatment¹³⁻¹⁴ ชนิดต่างๆ และ chemical treatment¹⁵ เป็นต้น การใช้งานวัสดุผสมนี้ส่วนมากมักจะต้องสัมผัสกับของเหลวหรือไอน้ำ ได้มีผลการวิจัยยืนยันว่าความชื้นรวมทั้งสารเคมีต่างๆ มีผลต่อความคงทนของวัสดุ¹⁶ ความชื้นสามารถเกิดขึ้นจากขั้นตอนระหว่างการผลิต หรือจากการซึมผ่านรอยต่อของผิวสัมผัสระหว่างไฟเบอร์และอีพ็อกซีระหว่างการใช้งาน จะทำให้การเกาะยึดระหว่างไฟเบอร์และอีพ็อกซีลดลงความแข็งแรงจะลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด



- | | | |
|-----------------------------------|---|------------------------------|
| 1 Radiator core support assembly | 16 Front floor side extension | 31 Trunk floor side |
| 2 Upper radiator core support | 17 Inner sill | 32 Rear floor side extension |
| 3 Side radiator core support | 18 Front floor | 33 Spare tire clamp bracket |
| 4 Lower radiator core support | 19 Hand brake & seat belt reinforcement | 34 Rear crossmember (WAGON) |
| 5 Hood lock stay | 20 Center side member | |
| 6 Front side member | 21 Front seat mounting bracket | |
| 7 Hoodledge assembly | 22 Transmission control reinforcement | |
| 8 Front side member closing plate | 23 2nd crossmember | |
| 9 Hoodledge panel | 24 Rear seat crossmember | |
| 10 Hoodledge reinforcement | 25 Fuel tank mounting member | |
| 11 Center front member | 26 Rear side member | |
| 12 Lower dash crossmember | 27 Rear side member extension | |
| 13 Lower dash | 28 Rear floor belt anchor reinforcement | |
| 14 Air box assembly | 29 Rear floor front | |
| 15 Cowl top | 30 Rear floor rear | |

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของตัวถัง (Body) ด้านล่างรถยนต์นั่งขับเคลื่อน 2 ล้อ²

การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างโลหะผสมชนิดต่างๆ และวัสดุผสมระหว่างไฟเบอร์กับอีพ็อกซี (Gr/Ep) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโลหะผสมชนิดต่างๆ และวัสดุผสมไฟเบอร์กลาส³

Material Designation	Tensile Ultimate, (MPa)	Comp Yield, (MPa)	Modulus (GPa)	Specific Gravity	Specific Tensile Ultimate	Specific Comp Yield	Specific Modulus
2024-T3 Al	462	290	74	2.77	167	105	27
7075-T6 Al	586	531	72	2.80	209	190	26
7175-T73 Al	504	436	70	2.80	180	156	25
Ti6Al-4V	923	909	110	4.43	208	205	25
300N Steel	1931	1703	200	7.84	246	217	25
Gr/Ep	1661	1698	130	1.61	1031	1054	81

วัสดุผสมประเภทไฟเบอร์กลาสโดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นเมตริกซ์ (matrix) และส่วนที่เป็นเส้นใยไฟเบอร์ (fiber) ชนิดและคุณสมบัติของสารที่นิยมใช้ทั้งสองส่วน แสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ชนิดและคุณสมบัติของสารที่ใช้เป็นเมตริกซ์³

Matirx	Properties
Polyesters	low cost, noncritical use
Epoxies	good adhesion, strength, corrosion properties
Polymides	high temperature (600 F)
BMI'S	gap between epoxies and polyimides
Phenolics	ablative applications, thermal insulation
Carbon	highest temperature capability
Thermoplastics	processing considerations
Ceramics	high temperature performance and less strength
Metals	advanced metal, unique applications

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของเส้นใยชนิดต่างๆ

ชนิดของเส้นใย	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Density (g/cm ³)
300 N steel ³	200	1.93	7.84
PAN-Based Carbon ¹⁷	250	2.7	1.75
Kavlar 49 ¹⁷	125	3.5	1.45
E-Glasses ¹⁷	70	2.5	2.55
Sic ¹⁷	430	3.5	3.3
Al ₂ O ₃ ¹⁷	379	1.4	3.95
Boron (W) ¹⁷	385	3.8	2.6
Carbon nanotube ^{18,19}	1,250	30.0	1.33-1.4

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นวัสดุเส้นใยที่มีความแข็งแรงมากที่สุด สามารถทนแรงดึงได้ถึง 30 GPa มากกว่าเคฟลาเกือบ 10 เท่า โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นโครงสร้างอีกแบบหนึ่งของธาตุคาร์บอน โดยอะตอมของคาร์บอนจะเกาะกันเป็นโครงตาข่ายลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย S. Iijima²⁰ ต่อมาได้มีการวิจัยต่อเนื่องกันมา และพบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติคือ มีการนำไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับการบิดตัวของโครงตาข่ายของท่อ²¹⁻²³ มีความเป็นกลางทางเคมี น้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูง จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ที่สูงมากเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

จากคุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้งานหลายประเภทเช่น เป็นตัวกลางในการกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)²⁴ นำไปใช้ในการแยกก๊าซ²⁵ นำไปใช้เป็นส่วนปลาย (Tip) ของเครื่อง AFM^{26,27} หรือ นำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรง และน้ำหนักเบา²⁸

จากคุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุสำหรับชิ้นส่วนรถยนต์ และงานวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของวัสดุผสมเพื่อให้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถประยุกต์ไปใช้เป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ต่อไปได้ โดยใช้ไฟเบอร์ที่มีความแข็งแรงสูงสุดคือเส้นใยคาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมกับแมตทริกที่แข็งแรงมากที่สุดคืออีพ็อกซีเรซิน นอกจากนี้ยังผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งแรงสูง จึงสามารถต้านทานต่อการขีดข่วนได้เป็นอย่างดี และยังมีแนวโน้มที่จะทำให้วัสดุผสมชนิดนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น

2.1 วัสดุผสม (composites)

วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุที่มีวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปเป็นองค์ประกอบ วัสดุผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารเติมที่เหมาะสมหรือวัสดุเสริมแรงกับสารเชื่อมประสานพวกเรซินที่เข้ากันได้ เมื่อผสมผสานกันแล้วจะได้ลักษณะที่เป็นสมบัติที่ต้องการ ตัวแปรที่จะทำให้วัสดุผสมมีสมบัติต่าง ๆ กัน มีมากมายทั้งนี้รวมถึงรูปร่าง ปริมาตร และส่วนประกอบของสารเติมหรือวัสดุเสริมแรงที่ฝังกระจายในเนื้อวัสดุผสม แบบอย่างของวัสดุผสมมีพวกดิสเพอร์ชันฮาร์ดเดนด (dispersion hardened) และไฟเบอร์สเตรงเทนด (fiber-strengthened) ในโลหะ เซรามิก แก้ว คอนกรีต และพลาสติก

ตัวอย่างของวัสดุผสมพวกดิสเพอร์ชันฮาร์ดเดนด ได้แก่ การมีอนุภาคของวัสดุแข็งฝังในเนื้อวัสดุอ่อน เช่น อนุภาคของเหล็กหรือโครเมียมฝังในทองแดง อนุภาคของทอเรีย (thoria) ในนิเกิล หรือวัสดุผสมของทองแดง-ซิลิมาไนต์ (silimanite) ที่ใช้ในการห้ามล้อเครื่องบิน

ตัวอย่างของวัสดุผสมพวกไฟเบอร์สเตรงเทนด ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยที่เสริมแรงในพลาสติก (FRP) โฟมพอลิเอทิลีนในพีวีซีที่ใช้ทำเบาะนั่ง หรือโฟมพอลิสไตรีน (polystyrene form) ใช้ทำทุ่นลอยน้ำ เป็นต้น

วัสดุผสมส่วนใหญ่จะเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วนหรือมากกว่า คือ ส่วนที่เป็นเส้นใย และส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (matrix) โดยเส้นใยอาจมีความยาวต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ หรือกรณีที่เส้นใยมีความยาวไม่ต่อเนื่อง เช่น เส้นใยขนาดสั้นกระจายไม่เป็นระเบียบอยู่ในเมทริกซ์ หรืออาจมีส่วนที่สาม ที่เรียกว่าอินเตอร์เฟส (interphase) อยู่รอบ ๆ เส้นใยทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

โดยทั่วไปเส้นใยและเมทริกซ์จะมีสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ต่างกัน เส้นใยจะมีความแข็งแรงมากกว่าเมทริกซ์ และสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมได้ช่วยไม่ให้เกิดการเสียหายหรือการผิดรูปภายใต้แรงกระทำนั้นๆ เมทริกซ์โดยทั่วไปจะเป็นพอลิเมอร์หรือพลาสติก ทำหน้าที่ให้เส้นใยกระจายตัวและยึดเกาะ และช่วยถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกที่กระทำต่อวัสดุผสมมายังเส้นใย ตลอดจนช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม

ความแข็งแรงของวัสดุผสมจะถูกกำหนดโดยสมบัติเส้นใย สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยในเมทริกซ์ ความแข็งแรงและการกระจายตัว ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ซึ่งจะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้อ่อนแอจากภายนอกสามารถแยกเส้นใยและเมทริกซ์ออกจากกัน

2.2 องค์ประกอบของวัสดุผสม

1) เมทริกซ์

ในพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยหรืออนุภาค เมทริกซ์เป็นเทอร์มอพลาสติก (thermoplastic) หรือเทอร์มอเซต (thermoset)

เทอร์มอเซตพอลิเมอร์ จะหลอมตัวในเฉพาะครั้งแรกที่ได้รับความร้อน และเกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยความร้อนหรือตัวเชื่อมโยง (crosslinking agent) ทำให้มีเครือข่ายเป็นแบบร่างแห (network) โครงสร้างของพอลิเมอร์จะคงตัวไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อีกเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของเทอร์มอเซตพอลิเมอร์ ได้แก่ อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) พอลิเอสเตอ์ (polyester) ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) เป็นต้น

เทอร์มอพลาสติก สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อน แล้วแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นตัวลง การหลอมตัวด้วยความร้อนสามารถทำได้หลายครั้ง เนื่องจากไม่มีการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่โมเลกุล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพอีกด้วย ตัวอย่างของเทอร์มอพลาสติกพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิพรอพิลีน (polypropylene) ไนลอน (nylon) พอลิสไตรีน (polystyrene) เป็นต้น

อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resins)

อีพ็อกซีเรซิน หรืออีพ็อกซีเป็นเมทริกซ์ สำหรับคอมโพสิตที่มีให้เลือกใช้มากมายหลายชนิดในท้องตลาด แม้ว่าพอลิเอสเตอ์ชนิดไม่อิ่มตัวจะมีราคาถูกกว่า หรือพอลิอิมิดจะสามารถทนความร้อนได้ดีกว่า แต่อีพ็อกซีจะมีสมบัติทางกายภาพที่กว้าง มีความแข็งแรงเข้ากันได้ดีกับเส้นใยทุกชนิดและสามารถผ่านกระบวนการได้สะดวก ทำให้อีพ็อกซีเป็นสารที่ได้รับการเลือกใช้มากที่สุด ส่วนใหญ่แล้วอีพ็อกซีจะใช้ในงานโครงสร้างต่างๆ ทั้งนี้โครงสร้างทางเคมีของเรซินของสารทำให้สุก (during agents) ชนิดของสารดัดแปรโครงสร้าง (modifying reactants) ที่มีให้เลือกมากมาย และสภาวะการก่อโครงสร้างตาข่าย (curing conditions) จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติความเหนียวทน ความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลาย คุณสมบัติทางกลตั้งแต่ที่มีความยืดหยุ่นสูงจนถึงมีความแข็งแรงสูง (high strength) และความแข็ง (hardness) คุณสมบัติต้านทานการไหลคลาน (creep) และความล้า นอกจากนี้อีพ็อกซียังเด่นในด้านการยึดเกาะ (adhesion) เส้นใยได้ดียิ่งขึ้น ความทนทานความร้อนและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ปฏิกิริยาก่อโครงสร้างตาข่ายไม่ก่อให้เกิดสารข้างเคียง (by products) และมีการหดตัวต่ำหลังปฏิกิริยาก่อโครงสร้างตาข่าย เรซินที่ยังไม่สุก (uncured resin) ก็มีให้เลือกตั้งแต่ที่เป็นของเหลวความหนืดต่ำจนเป็นของแข็ง ซึ่งเมื่อรวมกับสารก่อโครงสร้างตาข่ายที่มีให้เลือกมากมาย จะทำให้สามารถเลือกสภาวะของกระบวนการเตรียมคอมโพสิตได้หลากหลาย ข้อเสียของอีพ็อกซีที่สำคัญ คือ การดูดความชื้น และความเปราะ

ตาราง 2.1 แสดงคุณสมบัติของอีพ็อกซี

คุณสมบัติ	
อุณหภูมิการอ่อนตัว (heat-deflection temperature) ที่ 1.82 MPa, °C	140
ความคงทนความร้อนสูงสุดเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง °C	120
สัมประสิทธิ์การขยายตัว $\text{cm/cm/}^{\circ}\text{C} \times 10^{-5}$	2.5
ความแข็งแรงดึง (tensile strength) MPa	52
เปอร์เซ็นต์การยืด (% elongation)	5
ความทนแรงโค้งงอ (Flexural strength) MPa	124
ความทนแรงอัด (compressive strength) MPa	70
ความทนแรงกระแทก (Notched Izod impact strength) J/m	11
ความแข็ง (hardness) RockwellM90	M105
ความถ่วงจำเพาะ	1.0

หน้าที่เมทริกซ์

1. ให้เส้นใยหรืออนุภาคกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
2. ป้องกันไม่給เส้นใยหรืออนุภาคเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม
3. ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใยหรืออนุภาค
4. ช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม
5. ต้องเชื่อมด้วยตัวเสริมแรงได้

2) ตัวเสริมแรง (reinforce)

ตัวเสริมแรง ได้แก่ พวกที่เป็นอนุภาคหรือเส้นใย ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งเส้นใยที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือเส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) และเส้นใยอะรามิด (aramid fiber)

หน้าที่ของตัวเสริมแรง

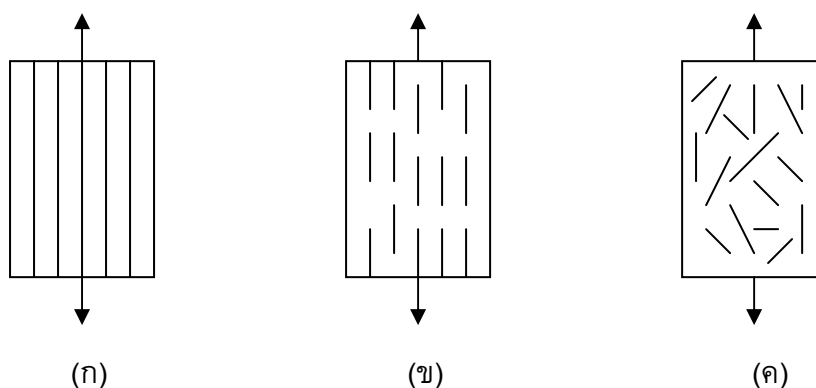
1. เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสม
2. สามารถรับแรงกระทำจากภายนอก โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใยหรืออนุภาค

3) สารเติมและสารปรับแต่ง (filler and additives)

สารเติมและสารปรับแต่ง นำมาใช้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตเพื่อเปลี่ยนลักษณะการทำงานของระบบเรซิน กระบวนการ หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับราคาของสารเติมอาจเป็นเรซินที่มีราคาโดยมุลต่ำ ซึ่งไม่มีผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้เลย สารเติมอื่นๆ ซึ่งจะมีผลต่อการทำสารประกอบ และ/หรือขึ้นงานสำเร็จรูป เช่น แคมเซียมคาร์บอเนตช่วยปรับปรุงความเงางามของผิวพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง และแทลคัม (talc) ช่วยปรับปรุงอุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน (heat deflection temperature) ของพอลิพรอพิลีน โดยสารเติมทั้งสองมีการใช้ทั่วไปเนื่องจากมีราคาต่ำ และใช้ได้ปริมาณสูง การเติม

อะลูมิเนียมไตรไฮดรทจะช่วยให้เกิดเปลวไฟช้าลง (flame retardant) นอกจากนี้ยังมีสารปรับแต่งที่ช่วยยับยั้งการเสียคุณภาพจากแสงอัลตราไวโอเลต สารปรับแต่งที่นำไฟฟ้าได้ (conductive additives) ใช้ในพลาสติกชนิดเสริมแรงเพื่อป้องกันการสอตแทรกจากความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และวิทยู ส่วนสารให้สี (colorants) ช่วยทำให้เกิดสี การเติมเมทัลลิกสเตียเรท (metallic stearates) ในสารประกอบอัดแบบเพื่อให้ชิ้นงานสำเร็จรูปหลุดออกจากพื้นผิวแม่แบบได้ง่าย และสารปรับแต่งประเภทเทอร์มอพลาสติกที่ใช้ในสูตรผสมเทอร์มอเซตเพื่อควบคุมการหดตัวที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มตัว ซึ่งมีผลทำให้แบบที่ได้ใกล้เคียงกับข้อกำหนดที่ต้องการ พื้นผิวจึงเรียบจัดอยู่ในสินค้าสำเร็จรูปประเภทเกรดเอ

การกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์



รูป 2.1 แสดงการเรียงของเส้นใยพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย

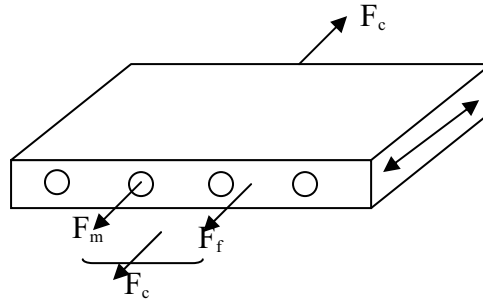
เส้นใยอาจจะมีการจัดเรียงตัวเป็น 3 แบบ ดังรูป 2.1 คือ

- 1) เรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของเมทริกซ์ (unidirectional continuous fibers)
- 2) เรียงตัวเปรี๊ยะแบบไม่ต่อเนื่อง (aligned discontinuous fibers)
- 3) เรียงตัวไม่เป็นระเบียบแบบไม่ต่อเนื่อง (randomly oriented discontinuous fibers)

2.3 กลไกของการเสริมแรงด้วยเส้นใย

2.3.1 เส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอดความยาวของเมทริกซ์

วัสดุผสมชนิดนี้จะมีเส้นใยยาวเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์ โดยทิศทางที่เส้นใยเรียงตัวจะเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงกระทำจากภายนอก ถ้าสมมติว่าเส้นใยทุกเส้นเหมือนกันและพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยของเมทริกซ์สมบูรณ์ ความเครียด (strain, ϵ) ในวัสดุผสมจะเท่ากับความเครียดของเส้นใยและเมทริกซ์ แรงกระทำต่อวัสดุผสม (W_c) จะถูกแบ่งไปยังเส้นใย (W_f) และเมทริกซ์ (W_m) ดังรูป 2.2



รูป 2.2 แรงกระทำต่อวัสดุผสมกรณีเส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์

ดังนั้น $W_c = W_f + W_m$ (2.1)

เนื่องจาก $W = \sigma A$ (2.2)

เมื่อ σ = ความเค้น (stress)
 A = พื้นที่หน้าตัด (cross-sectional area)

ดังนั้น $\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$ (2.3)

เมื่อ $\sigma_c, \sigma_f, \sigma_m$ เป็นค่าความเค้นของวัสดุผสม เส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ
 A_c, A_f, A_m เป็นพื้นที่หน้าตัดของวัสดุผสมเส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

จัดรูปสมการ 2.3 ใหม่ จะได้

$$\sigma_c = \left[\frac{\sigma_f \sigma_f}{A_c} \right] + \left[\frac{\sigma_m \sigma_m}{A_c} \right] \quad (2.4)$$

นำสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์ (V) มาใช้

เช่น กรณีของเส้นใย (ความยาวของเส้นใยเท่ากับความยาวของวัสดุผสม)

สัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย $V_f = \frac{\text{Volume of fiber}}{\text{Volume of composite}} = \frac{A_f}{A_c}$ (2.5)

สัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์ $V_m = \frac{\text{Volume of matrix}}{\text{Volume of composite}} = \frac{A_m}{A_c}$ (2.6)

แทนสมการ 2.5 และ 2.6 ลงในสมการ 2.4 จะได้

$$\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.7)$$

และ $V_f + V_m = 1$ (2.8)

ดังนั้น $\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m (1 - V_f)$ (2.9)

เมื่อวัสดุผสม เส้นใย และเมทริกซ์ มีสมบัติของความยืดหยุ่น ค่าความเค้น จะมีความสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) ดังนี้

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c, \sigma_f = E_f \varepsilon_f, \sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (2.10)$$

เนื่องจากค่าความเครียดของวัสดุผสม (ε_c), เส้นใย (ε_f) และเมทริกซ์ (ε_m) เท่ากัน

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (2.11)$$

ดังนั้น $E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.12)$

เมื่อ E_c, E_f และ E_m คือ ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุผสม, เส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

จากสมการ 2.7 $\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) สูงเกินกว่าค่าสัดส่วนโดยปริมาตรต่ำสุด (V_{min}) วัสดุผสมจะเกิดการเสียหายเมื่อเส้นใยเสียหาย

ดังนั้น $\sigma_c^{TS} = \sigma_f^{TS} V_f + \sigma_m' V \quad (2.13)$

เมื่อ σ_c^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของวัสดุ

σ_f^{TS} = ค่าความทนแรงดึงของเส้นใย

σ_m' = ค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดจากเมทริกซ์ ณ ความเครียดที่ทำให้วัสดุผสมเสียหาย

เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเส้นใย (V_f) มีค่าต่ำกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่ำที่สุด (V_{min}) วัสดุผสมจะเสียหายเมื่อค่าความเค้นของเมทริกซ์มีค่าเท่ากับ ค่าความทนแรงดึงของเมทริกซ์

ดังนั้น $\sigma_c^{TS} = \sigma_m^{TS} V_m \quad (2.14)$

2.3.2 เส้นใยเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง

วัสดุผสมที่นำไปใช้ในงานวิศวกรรม โดยส่วนใหญ่มีการจัดเรียงของเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง โดยเส้นใยที่ใช้จะเป็นเส้นใยสั้น ถึงแม้ว่าความแข็งแรงจะน้อยกว่าวัสดุผสมที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน โดยปริมาตรของเส้นใยที่เท่ากัน ข้อดีของเส้นใยสั้น คือ สะดวกในการเตรียมวัสดุ เช่น เทคนิคการฉีดขึ้นรูป

การจัดเรียงตัวของเส้นใยสั้นมี 2 ลักษณะ คือ

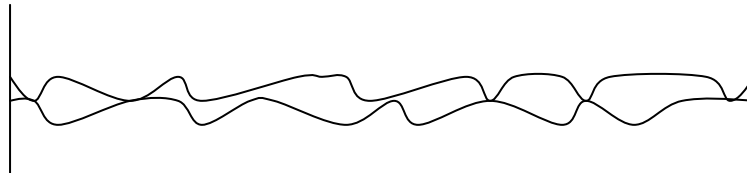
- 1) เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ
- 2) เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

2.4 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย

2.4.1 การดูดซับและการชุบ (adsorption and wetting)

เมื่อผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิดเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันอย่างพอเพียง แรงกระทำทางกายภาพที่ดีที่สุดคือการชุบพื้นผิวของของแข็ง โดยของเหลว เพราะเนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองจะมีความ

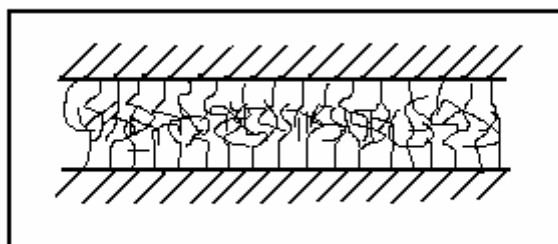
ขรุขระในระดับขนาดเล็ก ทำให้การสัมผัสกันนั้น ไม่แนบสนิทกัน โดยจะยังมีช่องว่างอยู่ ดังรูป 2.3 ซึ่งเป็นจุดอ่อนหายไปถึงผลให้มีการยึดติดที่ดีขึ้น สำหรับการยึดติดกันของพื้นผิวเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์นั้น เมทริกซ์ที่หลอมเหลวจะเข้าไปแทนที่ในส่วนบริเวณที่ขรุขระขนาดเล็กของพื้นผิวเส้นใย จุดอ่อนของรอยต่อที่จะเกิดขึ้นคือฟองอากาศภายใน (void)



รูป 2.3 แสดงการดูดซับและการซบ

2.4.2 การแพร่ (diffusion)

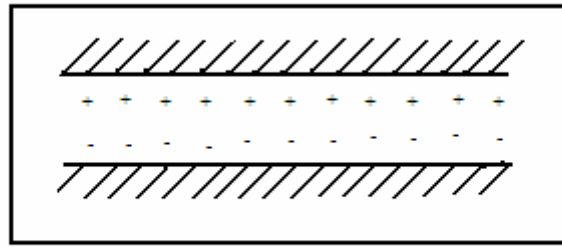
การแพร่กระจายของโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งไปยังโมเลกุลของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งสามารถทำให้เกิดพันธะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด การแพร่กระจายโมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าหากันนั้นจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกี่ยวพันกันเป็นร่างแห ดังรูป 2.4 ความแข็งแรงของพันธะจะขึ้นกับจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่แพร่เข้าไป และพันกันยุ่งเหยิง ถ้ามีมากก็就会有ความแข็งแรงของการยึดติดกันมาก การแพร่กระจายสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ โดยใช้พวกละลายหรือตัวกลางพลาสติก (plasticizing agents) ที่มีองค์ประกอบที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้สะดวก สำหรับเส้นใยเสริมแรงอาจมีการเคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์ก่อนที่จะนำไปผสมกับเมทริกซ์



รูป 2.4 การแพร่กระจาย และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์

2.4.3 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction)

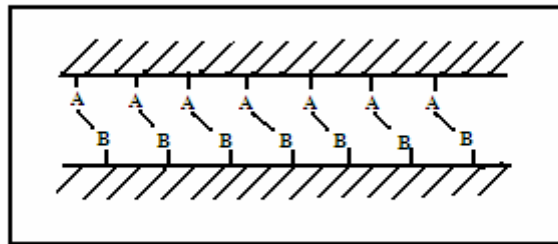
เมื่อพื้นผิวของวัสดุสองชนิดที่มีประจุไฟฟ้าต่างขั้วกันมาสัมผัสกันจะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ดังรูป 2.5 ความแข็งแรงของการยึดติดจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า



รูป 2.5 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ผิวสัมผัส

2.4.4 การเกิดพันธะทางเคมี (chemical bonding)

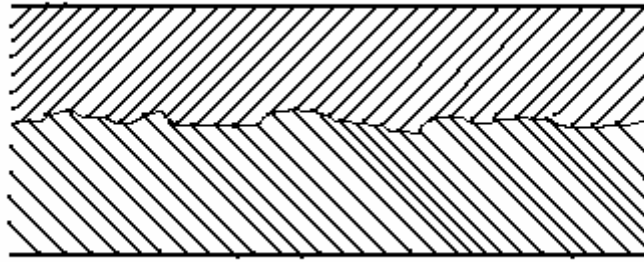
การเกิดพันธะทางเคมีเกิดจากหมู่เคมีของเมทริกซ์เกิดพันธะกับหมู่เคมีของผิวเส้นใย ความแข็งแรงของพันธะขึ้นอยู่กับจำนวน และชนิดของพันธะ สำหรับพื้นที่ที่เกิดความเสียหายจะทำให้พันธะทางเคมีขาดกันได้ ในส่วนของเส้นใยเสริมแรงจะมีการใช้ตัวประสานคู่ควบเพื่อให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างผิวเส้นใยกับเมทริกซ์



รูป 2.6 พันธะทางเคมีระหว่างผิวสัมผัส 2 ชนิด

2.4.5 การยึดติดทางกล (mechanical adhesion)

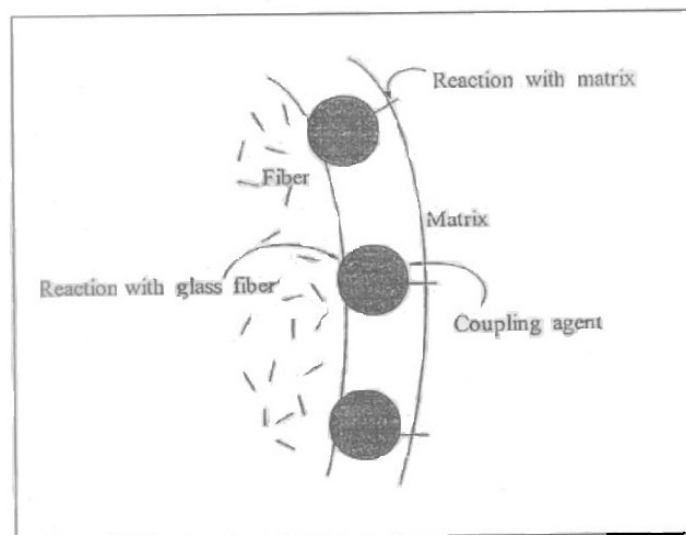
การยึดติดทางกลเป็นการยึดติดที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างผิวเส้นใยที่ขรุขระ และเมทริกซ์ โดยเมทริกซ์จะเข้าไปแทรกในส่วนที่ขรุขระ และเป็นมุมที่ไม่สามารถหลุดออกมาได้ (re-entrantangle) ของผิวเส้นใย ดังรูป 2.7 ซึ่งถ้ามีส่วนนี้มาก ความแข็งแรงของการยึดติดก็มากด้วย นอกจากนี้ผิวที่ขรุขระของเส้นใยยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสอีกด้วย



รูป 2.7 การยึดติดทางกล

2.5 ตัวประสานคู่ควบ

ตัวประสานคู่ควบจะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี อีกทั้งยังช่วยป้องกันผิวของเส้นใยจากความชื้น และป้องกันความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการผสม และการผลิตวัสดุผสม โดยทั่วไปแล้วการใช้ตัวประสานคู่ควบจะอยู่ในขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยในกระบวนการผลิตเส้นใย และในส่วนมากจะใช้สารประกอบของไฮดรอกไซด์และไททาเนต (titanate) เป็นตัวประสานคู่ควบ ซึ่งกลไกการประสานของเส้นใยกับเมทริกซ์ที่มีตัวประสานคู่ควบเป็นตัวประสานแสดง ดังรูป 2.8



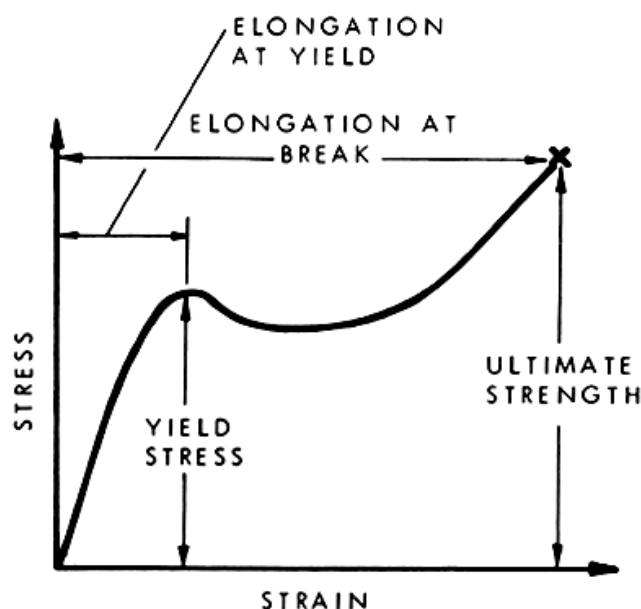
รูป 2.8 กลไกของตัวประสานคู่ควบ

2.6 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุที่จะรับด้วยแรงกระทำโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการแตกหัก สมบัติของวัสดุนั้นจะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด และสามารถทดสอบได้โดยการทำการทดลอง การทดสอบที่สำคัญ คือ การทดสอบโดยการดึงหรือการอัด (tension or compression test) การทดสอบตัวอย่างของวัสดุไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสมชนิดต่าง ๆ จะต้องทำเป็นรูปทรง และขนาดตามมาตรฐานก่อนที่จะทำการทดสอบ เช่น มาตรฐานสมาคมอเมริกันสำหรับการทดสอบวัสดุ (American Society for Testing and Materials Standard ASTM) มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard; JIS) หรือมาตรฐานอื่น ๆ ที่ยอมรับกันทั่วโลก ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้เป็นตัวบ่งชี้ และสามารถเป็นแนวทางในการทดสอบได้

2.6.1 ความทนแรงดึง (tensile strength) [29-30]

ความทนแรงดึงสามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่ดึงวัสดุด้วยแรงภายนอก แรงกระทำจะถ่ายทอดตลอดแนวของชิ้นตัวอย่าง ทิศทางการเคลื่อนที่ภายในแกนตามแนวแรงจะมีการต้านกัน การเกิดแรงต้านนี้เกิดขึ้นทั่วบริเวณของชิ้นตัวอย่าง จะส่งผลให้เกิดความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ขึ้นภายในวัสดุ โดยความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้เรียกว่า กราฟความเค้น – ความเครียด ดังรูป 2.9



รูป 2.9 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุ

กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุจะแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายในขอบเขตของความยืดหยุ่น การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงจะทำให้เพิ่มความเครียดอย่างเป็นสัดส่วน หลักการนี้ค้นพบโดย โรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) โดยใช้สปริง จึงเรียกชื่อว่า กฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งแสดงในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.15)$$

โดย E แทนค่าคงที่ของความเป็นสัดส่วน (Constant of proportionality) ซึ่งเรียกว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยัง (modulus of elasticity or Young's modulus) σ แทนค่าความเค้น และ ε แทนค่าความเครียด สมการนี้เป็นสมการของแนวเส้นที่เหยียดตรงเริ่มต้นของกราฟความเค้น – ความเครียด ดังนั้นโมดูลัสของความยืดหยุ่นจึงเท่ากับความชัน (slope) ของเส้นกราฟ

ความเครียดเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่เคลื่อนที่ไปขณะถูกแรงมากระทำ ค่านี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับค่าความเค้น มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร (mm/mm) หรือนิวตันต่อตารางนิ้ว (in/in) บางครั้งอาจใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้ การคำนวณค่าความเครียดหาได้จากอัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความยาว (ΔL) ต่อ ความยาวเดิม (L_0) ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.16)$$

ความเค้นสามารถคำนวณได้จากแรงภายนอก (F) ที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (A) และเกิดการต่อต้านขึ้น โดยมีหน่วยการวัดเป็นแรงต่อพื้นที่ เช่น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pa) โดยแสดงดังสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.17)$$

แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ และส่งผลให้เกิดความเค้นนั้นมีดังนี้

- ความเค้นแรงดึง (tensile stress)
- ความเค้นแรงอัด (compressive stress)
- ความเค้นแรงเฉือน (shear stress)
- ความเค้นแรงดัดโค้ง (bending or flexural stress)

ความเค้นแรงดึง คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการดึงโดยแรงภายนอกมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเป็นหน่วยแรงต่อพื้นที่

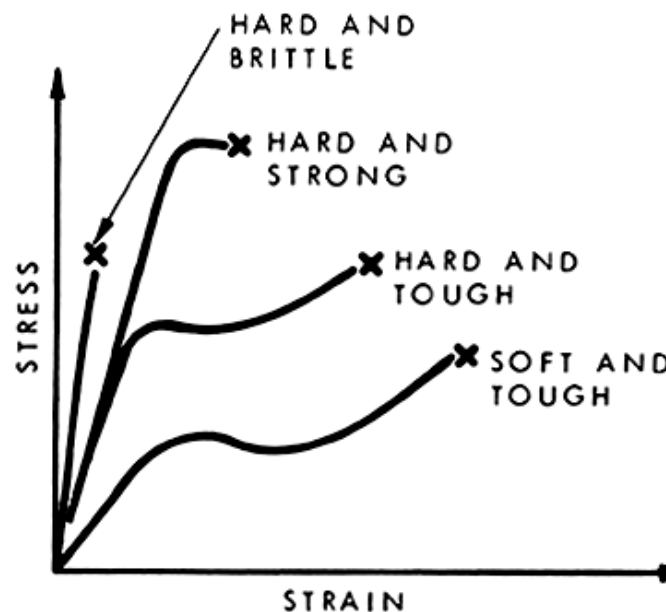
ความเค้นแรงอัด คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงดัดหรือกด ซึ่งพยายามให้วัสดุอัดแน่นติดกัน หรือ ทำให้อะตอมของวัสดุอัดแน่น การทดสอบแบบนี้วัสดุจะเกิดแรงต้านจากแรงอัดเพื่อให้เกิดการคืนตัวของวัสดุในการรักษาสภาพของตัวเองให้สมดุล

ความเค้นแรงเฉือน คือ ค่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบการดึงหรือการอัดเพื่อให้วัสดุเลื่อนผ่านกัน ซึ่งพื้นที่จะขนานกับทิศทางของแรงภายนอกที่กระทำ

ความยืด (elongation) เป็นความสามารถของวัสดุในการยืดตัว เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การทดสอบหาค่าความยืดนี้มักใช้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อเปรียบเทียบกับความยาวเดิมของวัสดุว่ายืดได้กี่เปอร์เซ็นต์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความยืด (\% elongation)} = \left(\frac{\Delta L}{L_o} \right) \times 100 \quad (2.18)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดสามารถบอกสมบัติของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุประเภทใด เช่นเป็นวัสดุที่เหนียว (ductile) หรือ เป็นวัสดุที่เปราะ (brittle) ดังรูป 2.10

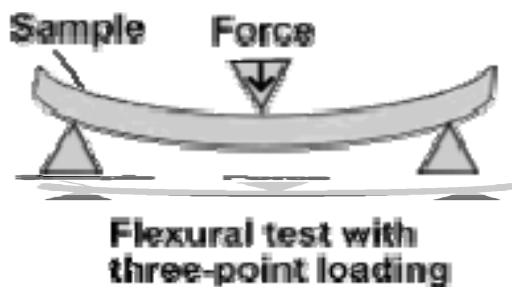


รูป 2.10 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท

2.6.2 ความทนแรงโค้งงอ (flexural strength)

ความทนแรงโค้งงอ คือ เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบกดขึ้นตัวอย่างให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่างที่อยู่ใกล้ลักษณะแนวนอน โดยมีตัวรองรับเป็นตัวกำหนดช่วงห่าง การทดสอบแบบนี้คล้ายกับว่าเป็นการรวมเอาการทดสอบการดึงและการอัดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งแรงอัดจะ

เกิดขึ้นบนชิ้นตัวอย่าง ส่วนแรงดึงจะเกิดขึ้นที่ใต้ชิ้นงานตัวอย่าง การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด (three point bending) ดังรูป 2.11 และการทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 4 จุด (four point bending)



รูป 2.11 การทดสอบแรงดัดโค้งแบบ 3 จุด

สำหรับชิ้นทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมค่าความเค้นในการโค้งงอ;
$$\sigma = \frac{3PL}{2Wh^2} \quad (2.19)$$

ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นในการโค้งงอ;
$$E = \frac{PL^3}{4Wh^3\Delta L} \quad (2.20)$$

เมื่อ	P	คือ แรงกระทำของการโค้งงอ
	L	คือ ระยะห่างของตัวรองรับชิ้นตัวอย่าง
	W	คือ ความกว้างของชิ้นตัวอย่าง
	h	คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง
	ΔL	คือ ระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่อได้รับแรง

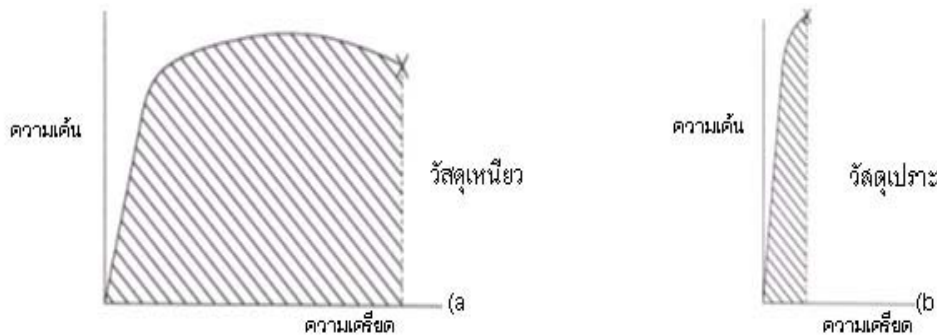
2.6.3 ความแข็ง (Hardness) [29]

ความหมายของค่าความแข็งของวัสดุนั้น หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเจาะผ่าน (indentation) หรือ ความสามารถในการทนต่อการขีดข่วน ดังนั้นค่าความแข็งของตัวอย่างการทดสอบจะเป็นหน่วยที่ขึ้นอยู่กับวิธีการ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ค่าของความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือ พลาสติก และเซรามิกจะแข็งกว่าพอลิเมอร์

2.6.4 ความเหนียว (toughness) ของวัสดุ

ความเหนียว (toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก สามารถวัดคุณสมบัติด้วยการทดสอบแรงกระแทก (impact test) ซึ่งความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรง และความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรา มักจะประเมินค่าความเหนียวจากมอดูลัสของความเหนียว (modulus of toughness) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) – ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (tensile test) ซึ่งค่ามอ

ดูลักษณะของความเหนียว (modulus of toughness) นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายจากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ



รูปที่ 2.12 แสดง Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b)

2.7 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube : CNT)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งเพิ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1991 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับ ฟูลเลอรีน (fullerene) ต่างกันที่ฟูลเลอรีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม (spherical shape) แต่ CNT มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (cylindrical shape) ชื่อของ CNT มาจากขนาดที่อยู่ในระดับนาโน (10^{-9} เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผม

2.7.1 การค้นพบ CNT

การค้นพบ CNT เกิดจากความบังเอิญที่ Sumio Iijima นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ขณะกำลังสังเคราะห์ฟูลเลอรีนโดยวิธีการระเหยด้วยการอาร์ก (arc-evaporation) แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบแกรไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคนาโนและท่อนาโน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของอิิจิมาสามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมาก โดยปรับสภาวะของวิธีการระเหยด้วยการอาร์ก ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร (nm) และมีความยาวในช่วง 1 ไมโครเมตร (μm) และเป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า Multi-Walled Carbon Nanotube (MWNT) ต่อมา มีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์ แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่า Single-Walled Carbon Nanotube (SWNT) ในอีกสองปีต่อมา

ท่อนาโนของแกรไฟต์นี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบท่อปลายเปิดหรือปลายปิด (cap) ถ้าเป็นแบบปลายปิดจะครอบด้วยครึ่งทรงกลมของ ฟูลเลอรีน C 60 ขนาดของท่อสำหรับ SWNT มีตั้งแต่ 0.7 ถึง 2 nm ส่วน MWNT มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 300 nm โดยมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อที่มีขนาดอยู่

ในระหว่าง 0.34 ถึง 0.36 nm สามารถทำให้ยาวได้ถึง 20 เซนติเมตร และมีรายงานว่าสามารถทำให้ยาวได้ถึง 100 เมตร ล่าสุดสามารถทำท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ ขนาดเล็กสุดได้ถึง 3 อังสตรอม (Å)

2.7.2 คุณสมบัติของ CNT

เราทราบกันดีว่าเพชรมีความแข็งแกร่งมาก ด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของแกรไฟต์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟต์ (กราฟีน) มีความแข็งแกร่งมาก (มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้าง CNT ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 nm (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ CNT แข็งแรงกว่าเพชร และแกรไฟต์ ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของ CNT มีค่าสูงถึง 1 TPa หรือ 1000 GPa และ CNT มีพื้นที่ผิวได้ถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสูงถึง 2.7 g/cm^3 CNT มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNT สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 106 A/cm^2 สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ CNT คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNT ในสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ศักย์ต่ำกว่า เช่น จะกระตุ้นฟอสเฟอร์ (phosphors) ที่วางไว้ห่าง 1 มิลลิเมตร (mm) ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1 - 3 โวลต์ (V) ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50 - 100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้วโมลิบดีนัม (molybdenum)

CNT มีความสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อ CNT แต่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อ CNT ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการค้นพบสมบัติอีกหลายประการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกมาก

2.7.3 การสังเคราะห์และการผลิต

เทคนิคในการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีดังนี้

1. เทคนิคแรกเริ่มคือดิซชาร์จแบบอาร์ค (arc discharge) ซึ่งเป็นการใช้กระแสไฟตรงขนาด 100 A และศักย์ประมาณ 20 V โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 2,000 ถึง 3,000 °C ซึ่งทำให้เกิดไอพลาสมาร้อนระหว่างขั้วคาร์บอน 2 ขั้ว จะเกิดการควบแน่นที่ขั้วคาโทด (เป็น water-cooled electrode) ได้ผลิตผลเป็น MWNT ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 - 20 nm ด้วยความยาวน้อยกว่า 50 nm และถ้ามีการใช้โลหะคะตะลิสต์ร่วมด้วยจะได้เป็น MWNTs

2. ใช้แสงเลเซอร์ (pulsed-laser vaporation) ไปทำให้เป่าคาร์บอนผสมโลหะกลายเป็นไอในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,100 - 1,200 °C และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจนไปกวาดท่อนาโนที่ได้ออกจากเตาเผาไปหล่อเย็นที่ตัวเก็บกัก (collector) ทองแดงด้านนอกเตาเผา เทคนิคนี้ใช้โคบอลต์และนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ SWNTs ที่เป็นระเบียบมากกว่าวิธีแรกแต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงทั้ง

สองเทคนิคข้างต้นมีปัญหาในเรื่องของการสังเคราะห์ให้ได้ปริมาณมาก และทำให้ได้ CNT ที่มีระเบียบยาก

3. การตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (chemical vapor deposition : CVD) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ โดยอาศัยการก่อรูปของท่อนาโนบนวัสดุรองรับ (substrate) เมื่อทำปฏิกิริยาของก๊าซผสมพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น acetylene methane หรือ ethylene) และไนโตรเจนภายในห้องปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 600 - 800 °C สำหรับการผลิต MWNT และ 900 - 1200 °C สำหรับการผลิต SWNT ในบรรยากาศปกติ การเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยใช้วัสดุรองรับพวกโลหะหรือโลหะออกไซด์ หรือป้อนก๊าซดังกล่าวร่วมกับโลหะคะตะลิสต์เข้าไปในห้อง ซึ่งทำให้สามารถผลิต CNT ได้ในปริมาณมาก และสามารถควบคุมขนาดและความยาวของ CNT ได้ง่ายโดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

2.7.4 การประยุกต์ใช้ CNT

CNT สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของ CNT ได้ปริมาณมาก เช่น พลาสติกเสริม CNT เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจอภาพอย่างแบน และเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) ซึ่ง CNT จะไปแทนที่คะตะลิสต์เดิม คือ แพลตตินัม

เนื่องจาก CNT มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการจัดเรียงอนุภาคของ CNT ให้ได้ตามต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ได้มีรายงานออกมาว่าสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์สองเส้นทำงานคล้ายตะเกียบคือ จะคีบและเคลื่อนย้ายอนุภาคของ CNT ได้ตามต้องการ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า “Optical Trapping” จึงคาดว่าน่าจะสามารถนำ CNT มาใช้ในการสร้างไมโครชิพที่มีความไวสูงและใช้พลังงานต่ำได้ในอนาคต

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จาก CNT คือการที่ท่อนาโนนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ คือสามารถใช้เป็นโพรบ (probe) ตรวจวัด หรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็กมากสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (ultrasmall pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ อันหลังนี้คือศักยภาพของ CNT ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (targeted drug delivery)

2.8 เส้นใยนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) เป็นวัสดุทนไฟประเภทที่มีซิลิกอน (Si) และคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบ คุณสมบัติต่าง ๆ ของซิลิกอนคาร์ไบด์ แสดงดังตาราง 2.2

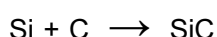
ตาราง 2.2 คุณสมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์

น้ำหนักโมเลกุล	40.10
ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ 25-400°C	$4.4 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of electricity)	410 Gpa
จุดหลอมตัว (melting point)	2700°C
ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)	0.285 แคลอรี/กรัม-องศาเซลวิน
ความแข็ง (hardness)	9.0-9.5 Moh's scale
ความหนาแน่น (bulk density)	0.069 กรัม/เซนติเมตร ³
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	3.2

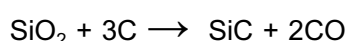
ข้อเสียของสารประกอบซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ ถูกเผาไหม้ได้ในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation atmosphere) ซิลิกอนคาร์ไบด์มีจุดหลอมตัวที่ 2700°C ค่าความร้อนจำเพาะของซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่า 0.285 แคลอรี/กรัม-องศาเซลวิน มีค่าการนำความร้อนสูง การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนค่อนข้างต่ำ ทนต่อความร้อนสูง ทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดี (Thermal shock resistance) มีค่าความแข็งแรงทางกลสูง ทนทานต่อการสึกกร่อน ทนทานทางเคมี (Chemical resistance) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนคาร์ไบด์จึงเป็นที่น่าสนใจของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านเป็นอย่างมาก ในการจะนำซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ในยุคของนาโนเทคโนโลยีนี้

ซิลิกอนคาร์ไบด์ไม่ใช่สารที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ แต่เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาใช้ โดยปกติซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ มีโครงสร้างผลึกอยู่สองแบบ คือ แบบลูกบาศก์ (Cubic form) และแบบทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal form) ซิลิกอนคาร์ไบด์แบบลูกบาศก์นั้น เรียกว่า เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้โดยใช้ส่วนผสมของซิลิกอนกับคาร์บอน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2000°C ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์แบบทรงหกเหลี่ยมนั้นเรียกว่า แอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 2.13 การสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์มีอยู่หลายวิธีด้วยกันคือ

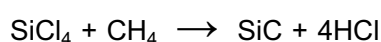
- สังเคราะห์จากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างซิลิกอนกับคาร์บอน



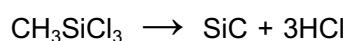
- สังเคราะห์จากปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ระหว่างซิลิกากับคาร์บอน

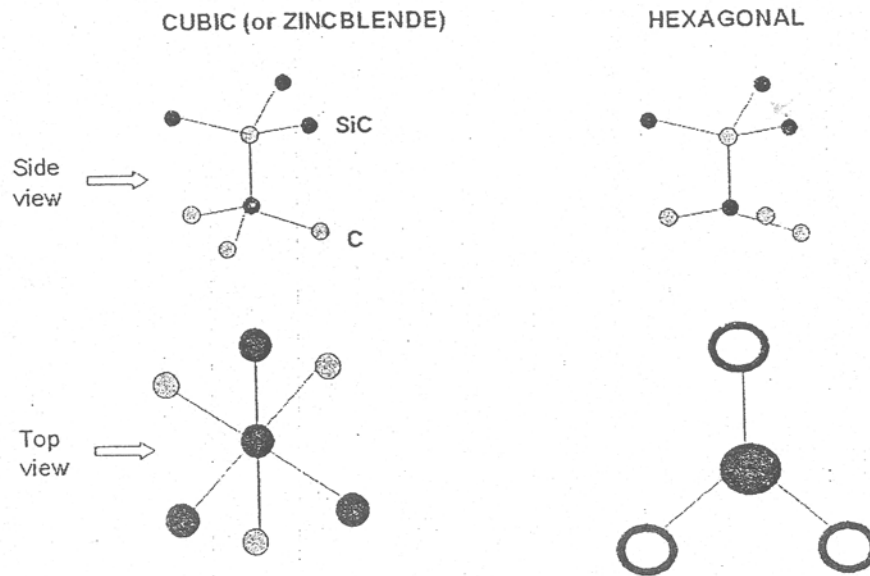


- สังเคราะห์จากปฏิกิริยาในสภาวะไอ (Vapor phase reaction or chemical vapor deposition, CVD) การเตรียมโดยวิธีนี้จะใช้ซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (SiCl_4) ที่อยู่ในสภาวะไอ ทำปฏิกิริยากับก๊าซมีเทน (DH_4)



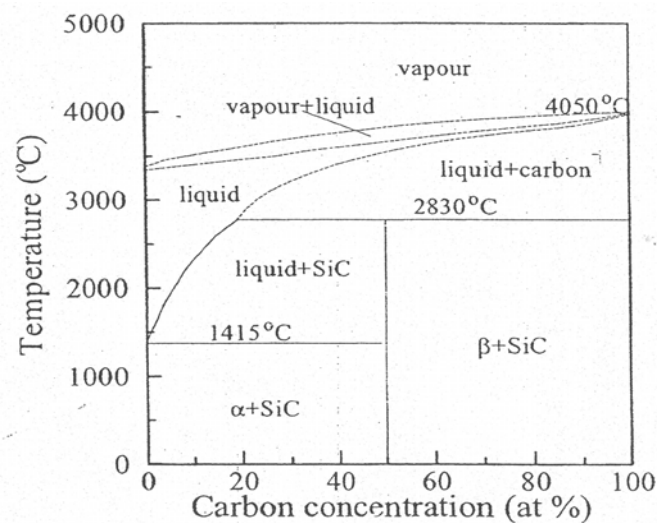
- สังเคราะห์จากปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลซิลิกอนไตร่คลอไรด์ (Methyl silicon trichloride)





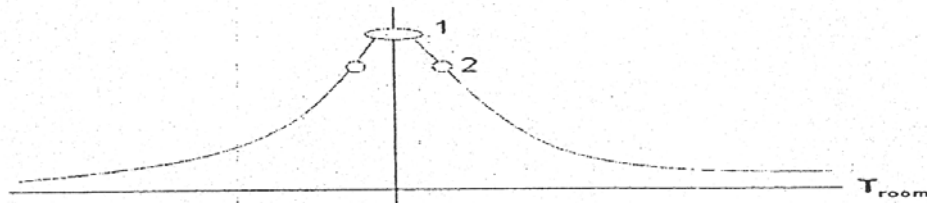
รูปที่ 2.13 โครงสร้างซิลิกอนคาร์ไบด์แบบทรงลูกบาศก์ และแบบทรงหกเหลี่ยม

ในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนและคาร์บอน จะเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1050°C และจะเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1500°C - 1900°C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะสมบูรณ์ ทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 2.14 ส่วนการสังเคราะห์เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถสังเคราะห์ต่อได้จากปฏิกิริยาการเตรียมเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อได้เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1500°C - 1900°C จนอุณหภูมิสูงถึง 2100°C เบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ จนอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2400°C การเปลี่ยนจากเบตาซิลิกอนคาร์ไบด์ไปเป็นแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.14 เฟสไดอะแกรมในระบบ Si-C ; คือ α สารละลายของแข็งของ C ใน Si
 β สารละลายของแข็งของ Si ใน C

กลไกพื้นฐานอันหนึ่งที่ใช้อธิบายการสร้างตัวของเส้นใยนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) Mechanism ซึ่งอธิบายว่าเมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้คาร์บอนและธาตุอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ ซึ่งอะตอมของไอจะแพร่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการรวมตัว (Deposit) เป็นของเหลว และสุดท้ายของเหลวจะตกตะกอน (Precipitation) เป็นของแข็ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสร้างตัวของเส้นใยนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือเส้นใยนาโนในแนวใดแนวหนึ่ง (Anisotropic growth)



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงเงื่อนไขการเกิดเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์โดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้ากระแสสูง

จากรูปที่ 2.15 อธิบายได้ว่า ณ ตำแหน่งที่ 1 คือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้วัตถุเปลี่ยนจากของแข็งกลายเป็นไอ (Vapor) ส่วนในตำแหน่งที่ 2 คือบริเวณรอยต่อที่ไอของอะตอมแพร่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นของเหลว (Liquid) และสุดท้ายกลายเป็นของแข็ง (Solid) ส่งผลให้เกิดการสร้างตัวเป็นเส้นใยนาโนขึ้น สำหรับเงื่อนไขในการเกิดเส้นใยนาโนโดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้ากระแสสูงคือ จะต้องมีความร้อนที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนสถานะของแข็งให้กลายเป็นไอ และจะต้องมีความดันสูง

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 อีพ็อกซีเรซิน # 7275 (ผลิตโดย บริษัท ไทยอีพ็อกซี จำกัด)
- 3.1.2 Hardener # 7275 (ผลิตโดย บริษัท ไทยอีพ็อกซี จำกัด)
- 3.1.3 อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3 < 10 micron: purity 99.7% ผลิตโดย บริษัท Aldrich)
- 3.1.4 อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3 150 micron: purity 99.7% ผลิตโดย บริษัท Aldrich)
- 3.1.5 ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC nanoparticles)
- 3.1.6 นิเกิลออกไซด์ (NiO powder)
- 3.1.7 Ethanol (Merch)
- 3.1.8 แอลกอฮอล์ (Alcohol)

3.2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 แผ่นทองแดงขนาด 6 x 17 ตารางเซนติเมตร
- 3.2.2 ภาดพลาสติกชนิดพอลิเอทเทอรัลีน (PP)
- 3.2.3 แก้วน้ำพลาสติกชนิดพอลิเอทเทอรัลีน (PP)
- 3.2.4 แผ่นฟิล์มไมลา
- 3.2.5 ชุดอุปกรณ์ให้น้ำเกลือพร้อมสาย
- 3.2.6 ไม้ไอศกรีมสำหรับกวานสาร
- 3.2.7 ข้อนตักสารทำด้วยสแตนเลส
- 3.2.8 นาฬิกาจับเวลา
- 3.2.9 หลอดดูดสาร
- 3.2.10 เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 3.2.11 ปีมลขนาด 1 แรงม้า
- 3.2.12 ตู้ดูดความชื้น (Descicator)
- 3.2.13 ครกเซรามิกส์สำหรับบดสาร
- 3.2.14 เต้าไฟฟ้า E.G.O. รุ่น 14.12871.300 1500 W
- 3.2.15 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าความละเอียดสูง รุ่น GR-200 ของบริษัท A&D
- 3.2.16 ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนโดยกระบวนการตกตะกอนไอสารเคมี
- 3.2.17 เครื่องวัดความหนาแน่น Analytical Balance, Model GR – 200 ผลิตโดยบริษัท A&D Company, Limited
- 3.2.18 เครื่องทดสอบ Pin – on – Disk Tribometer (ISC – 200 – Tribometer)

- 3.2.19 เครื่องทดสอบ Microhardness, Model MXT-07, Matsuzawa, Hollywood International, Ltd
- 3.2.20 เครื่อง CRBV Hardness Tester, Series No. 800.023 ผลิตโดยบริษัท Brooks Inspection Equipment ประเทศอังกฤษ
- 3.2.21 เครื่อง Universal Testing Machine, Model 8802 ผลิตโดยบริษัท Instron ประเทศอังกฤษ
- 3.2.22 เครื่องฉาบผิวด้วยทอง (Sputter) รุ่น SPI-MODULETM Sputter Coater ของบริษัท SPI supplies Division of Structure Probe ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมติดตั้งเครื่องกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDX) รุ่น JSM-6335F ของบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JEOL JSM 5910 LV ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.25 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) (Diffraktometer) รุ่น D500/501 ผลิตโดยบริษัท SIEMENS ประเทศเยอรมนี
- 3.2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) รุ่น JEOL JEM - 2010 ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.27 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Energy Dispersive Analysis of X-ray, EDX) รุ่น JEOL JSM – 6335 F ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.28 ฐานข้อมูล JCPDS file

3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกสะสมไอสารเคมี

- 3.3.1. ชั่งผงนิเกิลออกไซด์ให้ได้น้ำหนัก 2.5 กรัม
- 3.3.2. ทาด้วยผงนิเกิลออกไซด์ปริมาณ 2.5 กรัม ซึ่งเปียกเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) บนแผ่นทองแดงขนาด 6 x 17 เซนติเมตร
- 3.3.3. ม้วนแผ่นทองแดงให้เป็นทรงกระบอกโดยไม่ให้ซ้อนกัน ใส่เข้าไปในห้องเผาของชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการตกสะสมไอสารเคมี
- 3.3.4. เปิดชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผา ตั้งอุณหภูมิให้ห้องเผามีอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
- 3.3.5. เมื่อถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ปล่องหยดเอทิลแอลกอฮอล์จากชุดอุปกรณ์ให้น้ำเกลือ เข้าสู่ห้องเผา โดยอัตราการไหลของเอทิลแอลกอฮอล์เป็น 0.33 มิลลิลิตรต่อ นาที 30 นาที
- 3.3.6. เมื่อครบกำหนดเวลา ให้ปิดการปล่อยหยดเอทิลแอลกอฮอล์
- 3.3.7. ตั้งอุณหภูมิที่ชุดควบคุมอุณหภูมิให้ห้องเผามีอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

- 3.3.8. เมื่อถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปล่องหยุดเอธิลแอลกอฮอล์จากชุดอุปกรณ์ให้น้ำเกลือ เข้าสู่ห้องเผา อัตราการไหลของเอธิลแอลกอฮอล์เป็น 0.33 ลิตรต่อนาที โดยทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเป็นเวลานาน 9 ชั่วโมง
- 3.3.9. เมื่อครบกำหนดเวลา ให้ปิดชุดอุปกรณ์ให้น้ำเกลือเพื่อหยุดการหยุดเอธิลแอลกอฮอล์ และชุดควบคุมเตา รอจนกระทั่งอุณหภูมิในห้องเผาตกลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำแผ่นทองแดงออกจากห้องเผา
- 3.3.10. นำสารตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD, SEM และ EDX

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

- 34.1. นำสารตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ น้ำหนัก 0.02 กรัม มาบดด้วยครกบดสารเซรามิกส์สำหรับบดสาร เพื่อให้สารตัวอย่างมีลักษณะเป็นผง
- 34.2. นำสารตัวอย่างที่ได้ไปติดบนแผ่นแก้วที่มีช่องสำหรับใส่สารขนาด 1 x 1.5 เซนติเมตร
- 34.3. ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง XRD

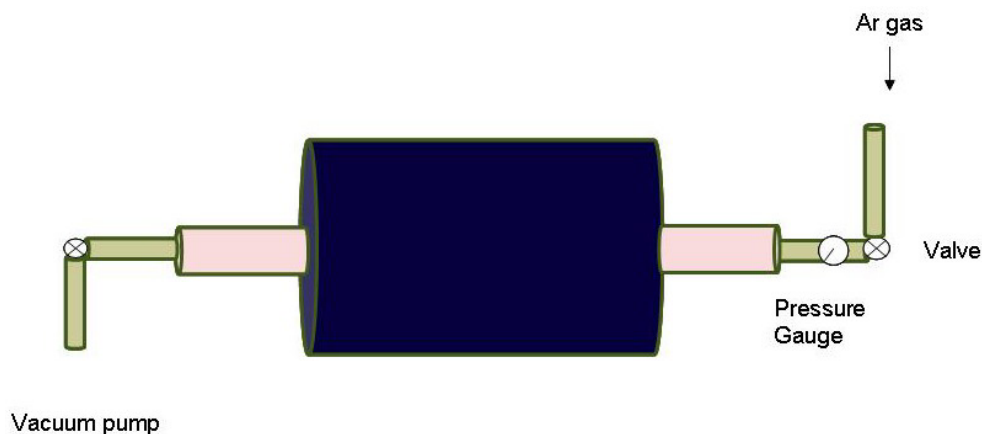
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

- 3.5.1. ดัดสารตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ บนแท่งทองเหลืองด้วยเทปกาวคาร์บอน
- 3.5.2. นำชิ้นงานมาทำการฉาบผิวหน้าด้วยทอง เพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า
- 3.5.3. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง EDX

3.6 วิธีการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ

- 3.6.1. นำผงซิลิคอน (99%, Aldrich) ผงคาร์บอน ปริมาณอย่างละ 0.45 กรัม และผงนิกเกิลออกไซด์ ปริมาณ 0.10 กรัม บดรวมกันเป็นเวลา 20 นาที
- 3.6.2. ใส่ลงในถาดอลูมินา จากนั้นนำเข้าเตาเผาแบบที่ใช้ท่ออลูมินา โดยวางตำแหน่งกลางของท่อ จากนั้นนำถาดที่ใส่ผงคาร์บอนวางห่างออกมาประมาณ 5 ซม. ปิดฝาท่อทั้งสองด้าน
- 3.6.3. เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อไล่อากาศออกแล้วเติมกาซอาร์กอน ทำซ้ำ 3 ครั้ง (ทำซ้ำอีก 2 ครั้งเมื่อเปิดเตาผ่านไป 1 ชม. และ 10 นาทีก่อนอุณหภูมิสังเคราะห์)
- 3.6.4. เเผาที่ 1300 -1400°C ด้วยอัตรา 10°C/min ค้างที่อุณหภูมิดังกล่าว 1 ชม. จากนั้นลด

อุณหภูมิลงด้วยอัตรา 10°C/min จนถึง 400°C แล้วปล่อยให้ลดลงตามธรรมชาติ



รูปที่ 3.1 แสดงเตาเผาสังเคราะห์เส้นลวดนาโนซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ

3.7 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

- 3.7.1 ตัดสารตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ บนแท่งทองเหลืองด้วยเทปกาวคาร์บอน
- 3.7.2 นำแท่งทองเหลืองมาฉาบทองเพื่อให้สารตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ ด้วยเครื่องฉาบผิวด้วยทอง
- 3.7.3 นำแท่งทองเหลืองที่ติดสารตัวอย่างมาถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.8 กระบวนการเตรียมวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับอีพ็อกซี

- 3.8.1 นำสารตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มาบดด้วยครกบดสารเซรามิกส์สำหรับบดสาร เพื่อให้สารมีลักษณะเป็นผง
- 3.8.2 ผสมอีพ็อกซีและท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่างๆ นำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 3.8.3 เติมตัวทำให้แข็งในอัตราส่วนที่เหมาะสม คนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยไม้ไอศกรีม
- 3.8.4 เทอีพ็อกซีเรซินที่ผสมตัวทำให้แข็งแล้วลงไปในแม่แบบให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นไมลารวางด้านล่างสุดและด้านบนสุดเพื่อให้ผิวของวัสดุผสมเรียบ
- 3.8.5 รอจนกระทั่งอีพ็อกซีแข็งตัว โดยปล่อยให้วัสดุผสมแข็งตัวในอุณหภูมิห้อง นาน 2 วัน
- 3.8.6 นำตัวอย่างวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอนกับอีพ็อกซีที่เตรียมได้ไปทดสอบหาค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) โดยเครื่องทดสอบ Universal (Instron : model 8802)
- 3.8.7 ทดสอบหาค่าความหนาแน่นโดยวิธีอาคิมิตีส

- 3.8.9 นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบหาค่าความแข็ง โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (CRBV Hardness Tester)
- 3.8.10 นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบหาค่าความสึกหรอ โดยใช้เครื่องทดสอบ Pin – on – Disk Tribometer (ISC – 200 – Tribometer)
- 3.8.11 ศึกษาหาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.9 กระบวนการเตรียมวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน

- 3.9.1 นำสารตัวอย่างท่อนาโนคาร์บอนและผงนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์ มาบดด้วยครกบดสารเซรามิกส์สำหรับบดสาร เพื่อให้สารมีลักษณะเป็นผง
- 3.9.2 ผสมอีพ็อกซี, ท่อนาโนคาร์บอนและผงนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ นำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 3.9.3 เติมตัวทำให้แข็งในอัตราส่วนที่เหมาะสม คนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยไม้ไอศกรีม
- 3.9.4 เทอีพ็อกซีเรซินที่ผสมตัวทำให้แข็งแล้วลงไปในแม่แบบให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นไมลาวางด้านล่างสุดและด้านบนสุดเพื่อให้ผิวของวัสดุผสมเรียบ
- 3.9.5 รอจนกระทั่งอีพ็อกซีแข็งตัว โดยปล่อยให้วัสดุผสมแข็งตัวในอุณหภูมิห้อง นาน 2 วัน
- 3.9.6 นำตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้ไปทดสอบหาค่าการทนต่อแรงดึง(Tensile strength) และค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) โดยเครื่องทดสอบ Universal (Instron : model 8802)
- 3.9.7 ทดสอบหาค่าความหนาแน่นโดยวิธีอาคิมิตัส
- 3.9.8 นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบหาค่าความแข็ง โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (CRBV Hardness Tester)
- 3.9.9 นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบหาค่าความสึกหรอ โดยใช้เครื่องทดสอบ Pin – on – Disk Tribometer (ISC – 200 – Tribometer)
- 3.9.10 ศึกษาหาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผสมตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.10 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

- 3.10.1 ตัดชิ้นทดสอบแต่ตัวอย่างออกเป็นชิ้นเล็กๆหนาประมาณ 1 cm.
- 3.10.2 นำชิ้นทดสอบวางบน stub ที่ติดด้วยเทปกาวคาร์บอน โดยวางชิ้นทดสอบให้ด้านข้างหงายขึ้นเพื่อศึกษา cross section
- 3.10.3 นำ stub ที่เตรียมแล้วทั้งหมด เข้าเครื่องปั๊มสุญญากาศ 15 นาที โดยใช้ความดันอยู่ในช่วงประมาณ 600-400 mTorr เพื่อทำการฉาบทองประมาณ 100-300 A แล้วนำไปส่องกล้อง SEM เพื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของ cross section

3.11 การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

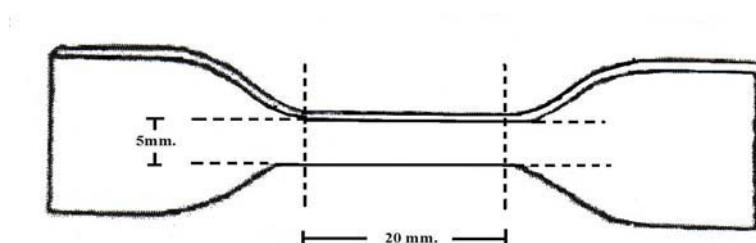
3.11.1 การหาความหนาแน่น (Density)

- 3.11.1.1. ตัดชิ้นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 1cm. x 1cm. จำนวน 5 ชิ้น ในแต่ละ % by volume
- 3.11.1.2. นำชิ้นทดสอบไปชั่งน้ำหนักในอากาศที่ละชั้น บันทึกผล
- 3.11.1.3. นำชิ้นทดสอบไปแช่ในน้ำปริมาตร 10 ml. / 5 ชิ้น นาน 1 ชั่วโมง
- 3.11.1.4. เมื่อแช่ชิ้นทดสอบครบ 1 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักในน้ำ โดยบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิของน้ำ ที่อ่านได้เพื่อนำมาหาค่าความหนาแน่นของน้ำจากตารางมาตรฐาน
- 3.11.1.5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

3.11.2 การทดสอบการทนแรงดึง (Tensile Test)

- 3.11.2.1 ตัดชิ้นทดสอบตามขนาดดังรูป 3.1 ซึ่งมีขนาดของ Gauge range 20 mm.
- 3.11.2.2 ตัดชิ้นทดสอบตัวอย่างละ 3 ชิ้น ในตำแหน่งต่างๆอาจมีความหนาแตกต่างกัน
- 3.11.2.3 วัดพื้นที่หน้าตัด Gauge range โดยใช้เวอร์เนียร์ บันทึกค่า
- 3.11.2.4 ตั้งค่ากำหนดเงื่อนไขการทดสอบลงในเครื่อง ดังนี้

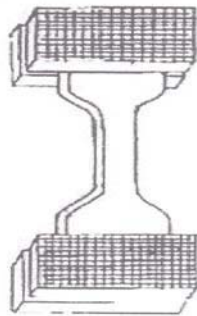
Stress	10,000 N.
Strain	2000 mm.
Gauge range	20 mm.
Speed	250 mm./min
- 3.11.2.5 นำชิ้นทดสอบเข้าเครื่องทดสอบ โดยจัดตำแหน่งให้บริเวณของ Gauge range ไม่หย่อนหรือตึงจนเกินไป
- 3.11.2.6 ทดสอบแรงดึงโดยเพิ่มแรงดึงขึ้นเรื่อยๆจนกว่าชิ้นงานจะเกิดความเสียหายหรือขาดบริเวณ Gauge range
- 3.11.2.7 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่า Tensile และคำนวณหาค่า Toughness บันทึกผล



รูป 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ tensile



รูป 3.2 เครื่องทดสอบ tensile



รูป 3.3 การติดตั้งชิ้นทดสอบกับหัวจับของ load cell

3.11.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

- 3.11.3.1 ตัดชิ้นทดสอบขนาดพอเหมาะกับ stub ที่ใช้
- 3.11.3.2 ติดชิ้นงานลงบน stub โดยพยายามติดให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบที่สุด
- 3.11.3.4 นำชิ้นงานไปวางบนเครื่องทดสอบ Microhardness และตั้งค่าเงื่อนไขของน้ำหนักที่ใช้กดลงบนชิ้นทดสอบ และทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบจะกดชิ้นงานลงไบนาน 10 วินาที
- 3.11.3.5 เครื่องทดสอบจะประมวลผลความกว้างของรอยกดที่เกิดขึ้น และแสดงค่าความแข็งของวัสดุที่ได้แล้วบันทึกผล

3.11.4 การทดสอบการสึกหรอจากการขีดข่วน (Wear Test)

- 3.11.4.1 ตัดชิ้นทดสอบขนาดพอเหมาะกับ stub ที่ใช้

- 3.11.4.2 ติดชิ้นงานลงบน stub โดยพยายามติดให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบที่สุด
- 3.11.4.3 ตรวจสอบจานหมุนและหัวกด(ball)ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน
- 3.11.4.4 นำชิ้นงานไปวางบนจานของเครื่องทดสอบ Pin – on – Disk Tribometer และตั้งค่าเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้

Turning: 1500 turns

Wear track radius (r) : 4 mm.

Load : 200 g.

- 3.11.4.5 ตั้งค่าเงื่อนไขการทดสอบในเครื่องคอมพิวเตอร์ และเริ่มการทดสอบซึ่งตามจำนวนรอบที่กำหนด แล้ววัดค่า wear volume loss และคำนวณค่าอัตราการสึกหรอของตัวอย่าง บันทึกผล

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสม CNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

จากการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ นาโนไฟเบอร์ และอีพ็อกซีเรซินโดยใช้หลักการแทนที่น้ำของอาคีมิดีส ซึ่งสามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานในอากาศ (W_2) จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่น้ำให้อิ่มตัวประมาณ 3 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักในน้ำ (W_1) จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างได้จากสมการต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	ρ (g/cm ³)
E (#7275)	1.176
CNTs+ E 0.1%	1.180
CNTs+ E 0.2%	1.183
CNTs+ E 0.3%	1.183
CNTs+ E 0.4%	1.185
CNTs+ E 0.5%	1.186
CNTs+ E 0.6%	1.185
CNTs+ E 0.7%	1.186
CNTs+ E 0.8%	1.188
CNTs+ E 0.9%	1.189
CNTs+ E 1.0%	1.193

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อคาร์บอนและอีพ็อกซีเรซิน พบว่าค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมตัวอย่างมีค่าระหว่าง 1.180 – 1.193 g/cm³ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของอีพ็อกซีเรซิน (1.176 g/cm³)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่าง
ท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	ρ (g/cm ³)
E (#7275)	1.176
CNTs + SiC + E 2%	1.165
CNTs + SiC + E 5%	1.201
CNTs + SiC + E 10%	1.214
CNTs + SiC + E 12%	1.227
CNTs + SiC + E 15%	1.235
CNTs + SiC + E 20%	1.258

ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน แสดงดังตารางที่ 4. 2 พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้มีค่าระหว่าง 1.165 – 1.258 g/cm³ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของอีพ็อกซีเรซิน (1.176 g/cm³)

4.2 การทดสอบความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสมCNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นใช้วิธีกดวัสดุที่มีลักษณะแข็งกว่า เช่น เหล็กแข็งเพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น รูปกลม พีระมิต โค่น หรือกรวย เมื่อกดตัวกดลงไปใวัสดุที่ทดสอบเป็นมุม 90 องศา ลงไปอย่างช้า ๆ แล้ววัดรอยเว้าที่เกิดขึ้นก็จะสามารถหาค่าความแข็งได้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่าง
ท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	Hardness (Vicker)
E (#7275)	37.3
CNTs+ E 0.1%	48.2
CNTs+ E 0.2%	50.7
CNTs+ E 0.3%	54.8
CNTs+ E 0.4%	58.1
CNTs+ E 0.5%	60.8
CNTs+ E 0.6%	64.8
CNTs+ E 0.7%	65.8
CNTs+ E 0.8%	71.4
CNTs+ E 0.9%	67.6
CNTs+ E 1.0%	63.4

จากตารางที่ 4.3 แสดงการทดสอบหาค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน พบว่า ค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 48.2 – 71.4 ซึ่งสูงกว่าความแข็งของอีพ็อกซีเรซิน โดยพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 0.8% มีค่าความแข็งสูงสุด และเพิ่มขึ้น 91% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

ตารางที่ 4.4 แสดงการทดสอบหาค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน โดยใช้หัวกดแบบ Knoop พบว่า ค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 8.6-13.9 ซึ่งสูงกว่าความแข็งของอีพ็อกซีเรซิน (1.3) โดยพบว่าที่ 20% ของท่อนาโนคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็งสูงสุด และเพิ่มขึ้น 969% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่าง
ท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	Hardness (Knoop)
E (#7275)	1.3
CNTs + SiC + E 2%	8.6
CNTs + SiC + E 5%	10.3
CNTs + SiC + E 10%	10.5
CNTs + SiC + E 12%	12.3
CNTs + SiC + E 15%	12.5
CNTs + SiC + E 20%	13.9

4.3 การทดสอบการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสมCNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

การสึกหรอ (Wear) เป็นปัญหาสำคัญที่พบในทุกอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดการสูญเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและจากประสิทธิภาพการทำงานที่ลดน้อยลง การสึกหรอเป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือสูญเสียเนื้อบริเวณที่สัมผัสกัน

การสึกหรอสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การขัดถูจากอนุภาคหรือเศษวัสดุเล็กๆ กระทำต่อผิวชิ้นงาน (Abrasive wear) หรือการสึกหรอจากการไถระหว่างผิวทั้งแบบที่มีตัวหล่อลื่นและไม่มีตัวหล่อลื่น (Sliding wear) เป็นต้น

การสึกหรอจะช้าหรือเร็วขึ้นกับอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น โครงสร้างและชนิดของวัสดุ ขนาดของเกรน (วัสดุที่มีเกรนโตจะสึกหรอเร็วกว่าวัสดุที่มีเกรนละเอียด) ความหยาบผิว (ลักษณะผิวหยาบจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอของคู่สัมผัสสูง) นอกจากนี้อัตราการสึกหรอยังขึ้นอยู่กับการกระทำ ความเร็วรอบ อุณหภูมิ และผลกระทบจากปัจจัยภายนอก อาทิเช่น สิ่งสกปรก ไอรกด่าง เป็นต้น

การคำนวณอัตราการสึกหรอ สามารถทำได้โดยใช้สมการ

$$\text{Wear rate} = \frac{\text{Volume loss (mm}^3\text{)}}{\text{Sliding distance (mm)}}$$

$$\text{เมื่อ Volume loss (mm}^3\text{)} = \frac{\pi(\text{wear track radius, mm}) (\text{track width, mm})}{6(\text{sphere radius, mm})}$$

$$\text{Sliding distance (mm)} = 2\pi r N$$

โดย N คือจำนวนรอบที่ทำการทดสอบ และ
r คือรัศมีของชิ้นทดสอบที่หมุน (Rotating specimen)

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	Wear rate (μm^3)
E (#7275)	2.9100
CNTs+ E 0.1%	2.1200
CNTs+ E 0.2%	1.6400
CNTs+ E 0.3%	1.6000
CNTs+ E 0.4%	1.1300
CNTs+ E 0.5%	0.8880
CNTs+ E 0.6%	0.5980
CNTs+ E 0.7%	0.5110
CNTs+ E 0.8%	0.4500
CNTs+ E 0.9%	0.3680
CNTs+ E 1.0%	0.2760

จากตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินที่ทดสอบด้วยเครื่อง Pin-on-Disk Tribometer เพื่อหา พบว่า อัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้อยู่ในช่วง $0.2760 - 2.1200 \mu\text{m}^3$ ซึ่งต่ำกว่าอัตราการสึกหรอของอีพ็อกซีเรซิน โดยพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 1.0 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุดและลดลง 91% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน ($2.9100 \mu\text{m}^3$)

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่าง
ท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	Wear rate (μm^3)
E (#7275)	2.9100
CNTs + SiC + E 2%	0.2464
CNTs + SiC + E 5%	0.2399
CNTs + SiC + E 10%	0.2124
CNTs + SiC + E 12%	0.1907
CNTs + SiC + E 15%	0.1715
CNTs + SiC + E 20%	0.1489

จากตารางที่ 4.6 แสดงการทดสอบหาอัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน โดยใช้เครื่องทดสอบ Pin-on-Disk Tribometer พบว่า อัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 0.2464 – 0.1489 μm^3 ซึ่งต่ำกว่าอัตราการสึกหรอของอีพ็อกซีเรซิน (2.9100 μm^3) โดยพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ 20% มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด และลดลง 95% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

4.4 การทดสอบการทนต่อแรงดึงของตัวอย่างวัสดุผสมCNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของวัสดุด้วยการใช้วิธีการดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราการดึงที่คงที่ ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบอาจทำเป็นแผ่นหรือเป็นแท่ง โดยค่า Tensile strength และค่า Modulus of elasticity สามารถหาได้จากกราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมกับความเครียดทางวิศวกรรม

ค่า Tensile strength คำนวณได้จากค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ โดยค่านี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าวัสดุนั้นมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุนจะทำให้ค่า strength มีค่าลดลง โดยค่า Tensile strength ที่ทดลองได้แสดงดังตารางที่ 4.7

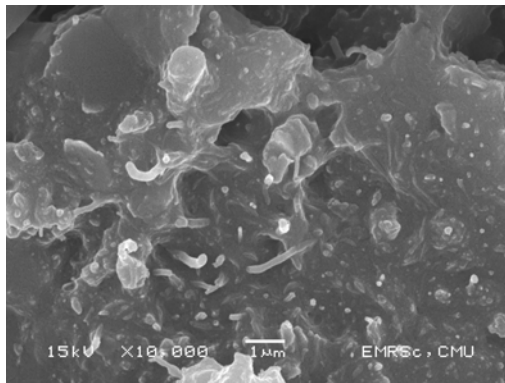
ตารางที่ 4.7 แสดงค่า Tensile strength และ ค่า Maximum force ของตัวอย่าง
วัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

Sample	Tensile Strength (MPa)	Max. Force (N)
E (#7275)	29.36	293.6
CNTs+ E 0.1%	49.35	570.0
CNTs+ E 0.2%	60.50	605.0
CNTs+ E 0.3%	61.50	737.0
CNTs+ E 0.4%	63.00	693.0
CNTs+ E 0.5%	73.18	939.0
CNTs+ E 0.6%	82.00	984.0
CNTs+ E 0.7%	67.68	609.0
CNTs+ E 0.8%	65.75	618.0
CNTs+ E 0.9%	51.10	606.0
CNTs+ E 1.0%	63.80	702.0

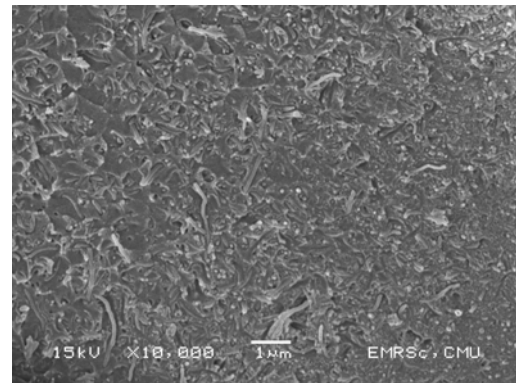
จากตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงค่า Tensile strength และ ค่า Maximum force ของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน พบว่า ค่า Tensile strength และ ค่า Maximum force อยู่ในช่วง 49.35 – 82.00 MPa และ 570.0 – 984.0 N ซึ่งมีค่าสูงกว่าอีพ็อกซีเรซิน (29.36 MPa และ 293.6 N) และพบว่าที่ปริมาณท่อคาร์บอน 0.6 % มีค่า Tensile strength และ ค่า Maximum force สูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 183% และ 235% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสมCNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

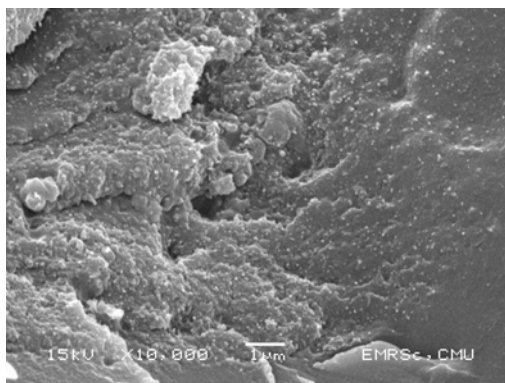
4.5.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน



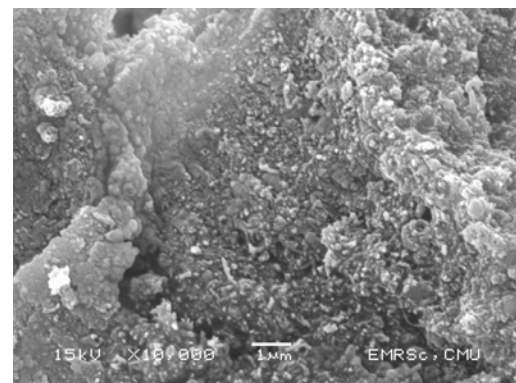
ก. 0.2%



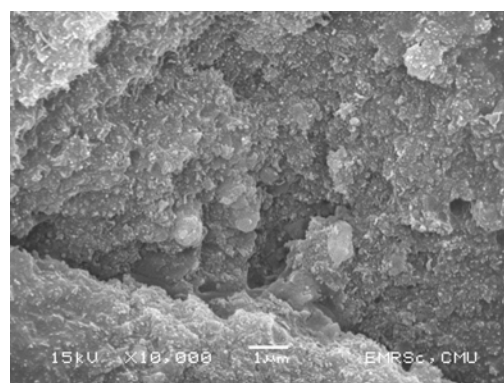
ข. 0.4%



ค. 0.6%



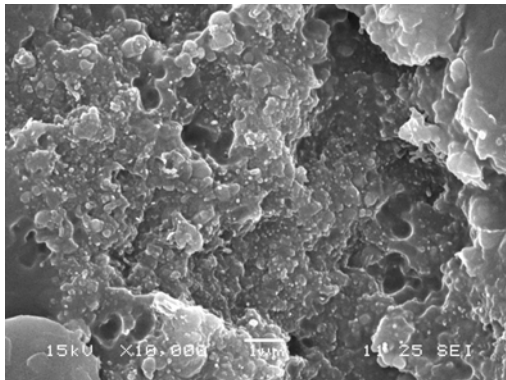
ง. 0.8%



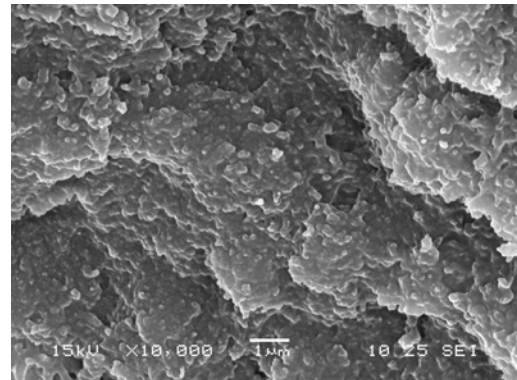
จ. 1.0%

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส
ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

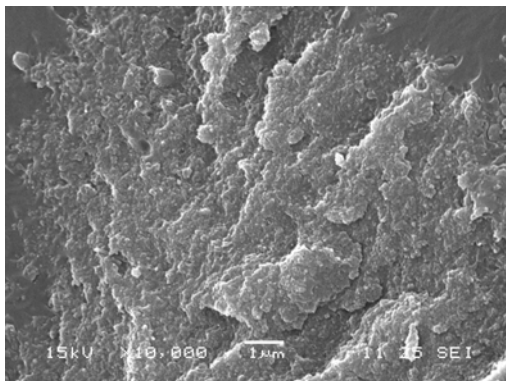
4.5.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน



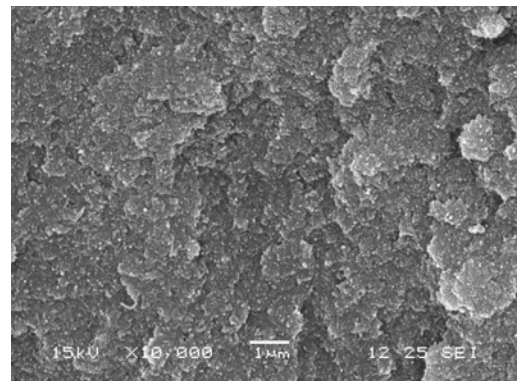
ก. 2%



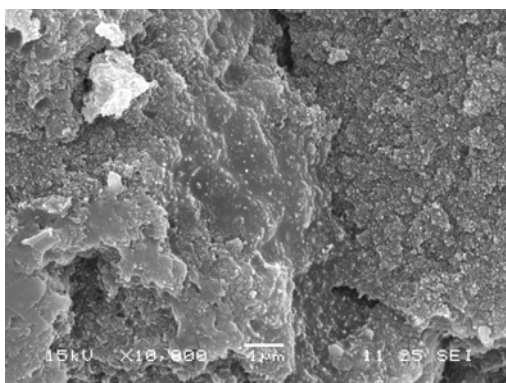
ข. 5%



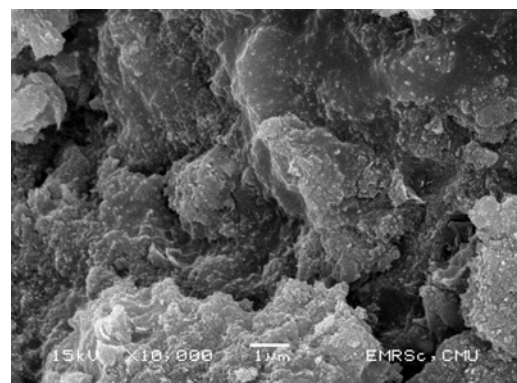
ค. 10%



ง. 12%



จ. 15%



ฉ. 20%

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน

หลังจากที่ได้ทำการเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน ทั้งแบบ 2 และ 3 เฟส แล้ว นำตัวอย่างวัสดุผสมที่ได้มาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน จากรูปแสดงให้เห็นว่า ท่อนาโนคาร์บอนสามารถกระจายได้ดีในอีพ็อกซีเรซิน เช่นเดียวกันรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ก็แสดงให้เห็นว่า ท่อนาโนคาร์บอน และซิลิกอนคาร์ไบด์ สามารถกระจายตัวในอีพ็อกซีเรซินได้เป็นอย่างดี การกระจายตัวอย่างดีนี้ทำให้เส้นใยนาโนมีการยึดเกาะกับอีพ็อกซีเรซินได้อย่างสม่ำเสมอจึงส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้นดังผลที่ได้ตั้งที่กล่าวถึงข้างต้น นอกจากนี้ยังทำให้การสึกหรอน้อยลงเนื่องจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของท่อนาโนคาร์บอน และซิลิกอนคาร์ไบด์นอกจากช่วยให้การยึดเกาะแข็งแรงขึ้นยังมีการกระจายแรงเสียดทานจากการขูดขีดได้ดีขึ้นทำให้ทนต่อการสึกหรอมากขึ้นดังผลที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอ(wear)ในตารางที่ 4.5 และ 4.6

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสมระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน ที่เตรียมได้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์ ความหนาแน่นของวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซินมีค่าระหว่าง

2. ความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 48.2 – 71.4 ซึ่งสูงกว่าความแข็งของอีพ็อกซีเรซิน และพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 0.8% มีค่าความแข็งสูงสุด โดยเพิ่มขึ้น 91% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

3. การทดสอบหาค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน โดยใช้หัวกดแบบ Knoop พบว่า ค่าความแข็งของตัวอย่างวัสดุผสมที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 8.6-13.9 ซึ่งสูงกว่าความแข็งของอีพ็อกซีเรซิน (1.3) โดยพบว่าที่ 20% ของท่อนาโนคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่าความแข็งสูงสุด และเพิ่มขึ้น 969% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

4. อัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินที่เตรียมได้อยู่ในช่วง $0.2760 - 2.1200 \mu\text{m}^3$ ซึ่งต่ำกว่าอัตราการสึกหรอของอีพ็อกซีเรซิน โดยพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 1.0 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด และลดลง 91% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน ($2.9100 \mu\text{m}^3$)

5. การทดสอบหาอัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน โดยพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ 20% มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด และลดลง 95% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน

6. ที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 0.6 % ของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน มีค่า Tensile strength และ ค่า Maximum force สูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 183% และ 235% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน สำหรับวัสดุผสม 3 เฟส ที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ 20% มีค่า Tensile strength สูงสุดที่ 243.14 MPa และ ค่า Maximum force

สูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 828% และ 948% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซิน และเมื่อเทียบกับเหล็กตัวถังที่มีความแข็งแรงสูง (HSS) (ซึ่งมีค่า Tensile strength อย่างน้อย 343 MPa)^[71] คิดเป็น 70.88 %

7. จากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน แสดงให้เห็นว่า ท่อนาโนคาร์บอนสามารถกระจายได้ดีในอีพ็อกซีเรซิน เช่นเดียวกัน โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน ที่ปริมาณต่างกัน ก็แสดงให้เห็นว่า ท่อนาโนคาร์บอน และซิลิกอนคาร์ไบด์ สามารถกระจายตัวในอีพ็อกซีเรซินได้เป็นอย่างดี ทำให้สมบัติเชิงฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. P.K. Mallick, *"Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design"*, Marcel Dekker, Inc., New York 10016, 1993.
2. เสนีย์ พันโยธา. การผลิตรถยนต์. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ: กรุงเทพฯ. 2545.
3. Jones RM. *"Mechanics of Composite Materials"*, Hemisphere Publishing Company, New York, 1987.
4. Friedrich K, Walters R, Carlsson LA, Smiley AJ, Gillespie JW, Mechanisms of rate effects on interlamina fracture toughness of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites. *J.Mater.Sci.* 1989; **24**:3387-98.
5. Truss RW, Hine PJ, Duckett RA. Interlamina and intralaminar fracture toughness of uniaxial continuous and discontinuous carbon fibre/epoxy composites. *Composites Part A* 1977; **28**: 627-36.
6. Albertsen H, Ivens J. Interlaminar fracture toughness of CFRP influenced by fibre surface treatment:: Part 1. Experimental results. *Compos Sci. Technol.* 1995; **54**: 133-45.
7. Kotaki M, Hamada H. Effect of interfacial properties and weave structure on mode I interlaminar fracture behaviour of glass satin woven fabric. *Composite Part A* 1997; **28**: 257-66.
8. Wagner HD, Wiesel E, Green AK, Evidence of dynamic effect in the fragmentation of optical fiber in epoxy. *Composites Part A* 1998; **29**: 989-91.
9. Day RJ, Rodrigues JVC. Investigation of the micromechanics of the microbond test. *Compos Sci Technol* 1998; **58**: 907-14.
10. Varelidis PC, Papakostopoulos DG, Pandazis CI, Papaspyrides CD. Polyamide coated Kevlar fabric in epoxy resin: mechanical properties and moisture absorption studies. *Composites Part A.* 2000; **31**: 549-58.
11. Kllantar J, Drzal LT. The bonding mechanism of aramid fiber to epoxy matrices. *J.Mater.Sci.* 1990; **25**: 4186-93.
12. Mai YW, Castino F. Fracture toughness of Kevlar-epoxy composites with controlled interfacial bonding. *J.Mater.Sci.* 1984; **19**: 1638-55.
13. Li R, Ye L, Mai YW. Application of plasma technologies in fibre-reinforced polymer composites: a review of recent developments. *Composites Part A*, 1997; **28**: 73-86.
14. Brown JR, Chappell PJC, Mathys Z. Plasma surface modification of advanced organic fibers. *J.Mater.Sci.* 1990; **26**: 4172-8.

15. Andrews MC, Bannister DJ, Young RJ. Review: The interfacial properties of aramid/epoxy model composites. *J.Mater.Sci.* 1996; **31**: 3893-913.
16. Aronhime MT, Neumann S, Marom G. The anisotropic diffusion of water in Kevlar-epoxy composites. *J.Mater.Sci.* 1984; **22**: 2435-46.
17. Krishan K. Chawla, "*Composite Materials: Science and Engineering*", Springer-Verlag, New York, Inc., 1998.
18. E. Dujardin, T.W. Ebbessen, A. Krishnan, P.N. Yialilos, M.M. Treacy, *Phys. Rev. B*, **58**, 14013-14019 (1998).
19. M.F. Yu, B.S. Files, S. Arepalli, R.S. Ruoff, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5552 (2000).
20. S. Iijima, *Nature*, **345**, 56 (1991).
21. J.W. Mintmire, B.I. Dunlap, and C.T. White, *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 631 (1992).
22. N. Hamada, S. Sawada and A. Oshiyama, *Phys. Rev. B*, **68**, 1579 (1992).
23. R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus and M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B*, **46**, 1804 (1992).
24. Y. Ye, C.C. Ahn, C. Witham, B. Fultz, J. Liu, A.G. Rinzier, D. Colbert, K.A. Smith, R.E. Smalley, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2307-2309 (1999).
25. C. Liu, Y.Y. Fan, M. Liu, H.T. Cong, H.M. Cheng, M.S. Dresselhaus, *Science*, **286**, 1127-1129 (1999).
26. H.J. Dai, J.H. Hafner, A.G. Rinzier, D.T. Collbert, R.E. Smalley, *Nature*, **384**, 147-150 (1996).
27. S.S. Wong, E. Joselevich, A.T. Woolley, C.L. Cheung, C.M. Lieber, *Nature*, **394**, 52-55 (1998).
28. R.S. Ruoff, D.C. Lorents, *Carbon*, **33**, 925-930 (1995).
29. William, F.S. *Principle of Material Science and Engineering*, 3rd ed., New York: McGrawHill, 1996.
30. *Institute for Research in Construction. (no date). "Properties and Behavior of Plastics" [Online]. Available <http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca> (20 February 2008).*

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. **Nhuapeng W.**, Thamjaree W., Kumfu S., Singjai P. and Tunkasiri T., Fabrication and Mechanical Properties of Silicon Carbide Nanowire / Epoxy Resin Composites, *Current Applied Physics*, 2008, 8: 295-299.
2. **Nhuapeng W.**, Kumfu S., Thamjaree W. and Tunkasiri T., Fabrication of Double Layers of Aramid Fiber/Alumina/Epoxy Resin Laminate Composite Using Low-Pressure Technique, *Advanced Materials Research Vols. 55-57 (2008) pp 457*
3. W. Thamjaree, **W. Nhuapeng** and T. Tunkasiri, Fabrication of Barium Zirconium Titanate Ceramics Using Ultrasonic Ball Milling Technique, *Advanced Materials Research Vols. 55-57 (2008) pp 213*
4. H. Longkullabutra, **W. Nhuapeng**, W. Thamjaree and T. Tunkasiri, Mechanical Properties of Hemp Fiber Composites with Carbon Nanotubes Reinforcement, *Advanced Materials Research Vols. 55-57 (2008) pp 553*

ภาคผนวก

Fabrication and mechanical properties of silicon carbide nanowires/epoxy resin composites

W. Nhuapeng, W. Thamjaree *, S. Kumfu, P. Singjai, T. Tunkasiri

Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

Available online 1 November 2007

Abstract

An experimental investigation was carried out to study the fabrication of silicon carbide nanowires (SiC NWs)/epoxy resin composites. This material could exhibit excellent mechanical properties for example, hardness, wear resistant and especially lightweight which may be used to replace metal parts in vehicles. The SiC NWs/epoxy resin composites were prepared by using the ultrasonic mixing and casting techniques. The physical and mechanical properties such as density, tensile strength, hardness and wear test of composite samples were examined. Furthermore, microstructures of samples were also investigated by scanning electron microscopy (SEM). It was found that the ultrasonic mixing could be used for fabricating high wear strength samples of SiC NWs/epoxy resin composites.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 81.05.Mh; 81.05.Ni; 81.05.Pj; 81.05.Ok

Keywords: Composites; Silicon carbide nanowires; Epoxy resin

1. Introduction

In the recent years, there is a great need for composites because the combination of two or more materials can lead to enhance performance and outstanding properties compared to their constituents [1,2]. Especially, the polymer-based composites reinforced with a small percentages of strong fillers can significantly improve the mechanical, thermal and barrier properties of the pure polymer. Moreover, these improvements are achieved through conventional processing techniques without any detrimental effects on processability, appearance, density and aging performance of the matrix [3]. The realization of their unique properties, it has been considering for a wide range of applications including packaging, coating, sport, electronics, aerospace industries, aircraft and military, automotive, and marine engineering [3–6]. The conventional fibers, for examples, glass-fiber, carbon-fiber and aramid-

fiber are widely used in nowadays. However, these materials are still limited in some applications, especially, the aircraft engine and aerospace industries which need high temperature materials, high mechanical properties that are lightweight [7]. Therefore, there are many works focus on the reinforcing polymer-based materials have incorporated various particle/whisker-type fillers especially, the functionally graded materials (FGMs) to fabricate the high performance materials for space-planes [8,9]. The new type filler, silicon carbide nanowires (SiC NWs) have been attracting considerable attention due to their excellent properties such as high thermal stability, high thermal conductivity, good mechanical properties and chemical inertness [10,11]. Besides, it has been suggested as good reinforcement materials and suitable to be used as the reinforcing material for composites due to their much larger strength over their bulk counterparts and strong interfacial bonding [12]. It is reported that the elastic modulus and ultimate bending strengths of SiC nanorods with several tens of nanometer thick were 610–660 and 53.4 GPa, respectively. The strength of these nanorods is a factor of two or more times higher than earlier observations for

* Corresponding author. Fax: +66 5335 7512.

E-mail address: msrlwt@yahoo.com (W. Thamjaree).

SiC whiskers of micrometer diameter [13]. Therefore, they can be used in nanoelectronics, field emission device, biomedical engineering, nanocomposites and applications in high temperature nanoscale devices [10,14,15]. Although there are many research works on SiC NWs, most of the works focus on the fabrication of SiC NWs and properties of SiC/ceramic composites [12,16–18]. However, improvement properties of materials by using SiC NWs as fillers in polymer matrix composites have not yet been reported.

In this work, composites samples between SiC NWs and epoxy resin were fabricated using ultrasonic mixing and casting techniques. The reinforced fiber, SiC NWs was synthesized by current heating technique (CHT). Physical and mechanical properties such as hardness, wear resistance, tensile strength and density of the composites samples were investigated. Moreover, microstructure of samples was determined using SEM technique.

2. Experimental procedure

The SiC NWs were synthesized via current heat technique (CHT) [19]. The raw materials, carbon powder (ultra high pure graphite, 99.9%), SiO₂ (Silica gel 60, Fluka) and Al₂O₃ (Extra pure, 98%, Reidel-de Haen) were mixed and pressed into rod shape with 12 mm in diameter and 25 mm in length. The rod was heated by DC power supply for 5 min under argon atmosphere. SiC NWs was taken out from surface of the rod were ground by using agate mortar for 10 min to get rid of hard agglomeration. A matrix was created by mixing epoxy resin (Thai Epoxy Resin Ltd., Thailand) with its hardener in the ratio 100:27 by volume. The density of the matrix is 1.176 g/cm³. To fabricate composites, firstly, SiC NWs were added into epoxy resin with the different ratios varying from 5% to 15% of volume. Firstly, the mixtures of epoxy resin and SiC NWs were dispersed for 3 h in an ultrasonic bath. Secondly, hardener was added into the mixture and mixed in ultrasonic bath for 5 min. Thirdly, the mixture was poured into the rubber mould in the dog-bone shape (Fig. 1) with a sample thickness of 1 mm. It is noted that mylar films were put at the

upper and the lower of the samples in order to obtain a smooth surface. Finally, the composite samples were left to settle at the room temperature for one day and then removed from the mould. Density of samples was measured by using Archimedes method. Tensile strength of the samples was measured by the universal testing machine (Lloyd Instruments, LRX) with a cross-head rate at 50 mm/min. The hardness was tested by Knoop's hardness testing machine (HK, Brooks Inspection Equipment Ltd., England). The wear resistance was examined by the Pin-on-Disk Tribometer with ball radius of 4 mm. Moreover, the microstructure of the composites samples was investigated by SEM.

3. Results and discussion

Table 1 shows density, hardness, width of wear track and tensile strength values of SiC NWs/epoxy resin composite samples. The results showed that density of composites samples increased with increasing of SiC NWs content which is in the range of 1.1455–1.1567 g/cm³. However, it is noted that the density of the composites samples is higher than pure SiC NWs (0.996 g/cm³) and slightly less than that of the pure epoxy resin (1.176 g/cm³). Moreover, the hardness (HK) and tensile strength are in the range of 1.3–6.3 HK and 5.40–23.81 MPa, respectively. Furthermore, it is observed that the widths of wear track of samples are in the range of 329–550 µm. It is observed that hardness and tensile strength of 15 vol% SiC NWs composites increased to 384% and 341%, respectively, and the wear track of samples decreased to 40% when compared with that of pure epoxy resin. Fig. 2 shows the relationship between coefficient of friction and distance, it shows that friction values of pure epoxy resin are much higher than that of composites. The coefficient of friction of pure epoxy decreased to 83% when adding the SiC NWs into polymer phase. It could be assumed that adding SiC NWs into polymer-based, epoxy resin would decrease the friction and promote the wear resistance of the pure polymer. Fig. 3 shows the photographs of the width of wear track of pure epoxy resin and composites samples. It exhibits that the width of wear track are dramatically decreased (from 550 to 329 µm) with increasing of SiC NWs (0–15 vol%) contents which confirm that wear resistance of soft and ductile materials could be improved by using the SiC NWs filler.

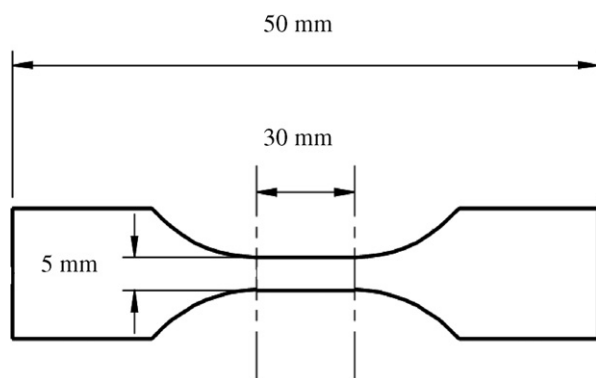


Fig. 1. The tensile test of composites samples.

Table 1

The density, hardness, width of wear track and tensile strength of composites samples

vol% of SiC NWs (%)	Density (g/cm ³)	Hardness (HK)	Width of wear track (µm)	Tensile strength (MPa)
0	1.176	1.3	550.0	5.4
5	1.14549	3.7	371.0	9.40
10	1.14747	4.7	356.0	15.41
15	1.15674	6.3	329.8	23.81

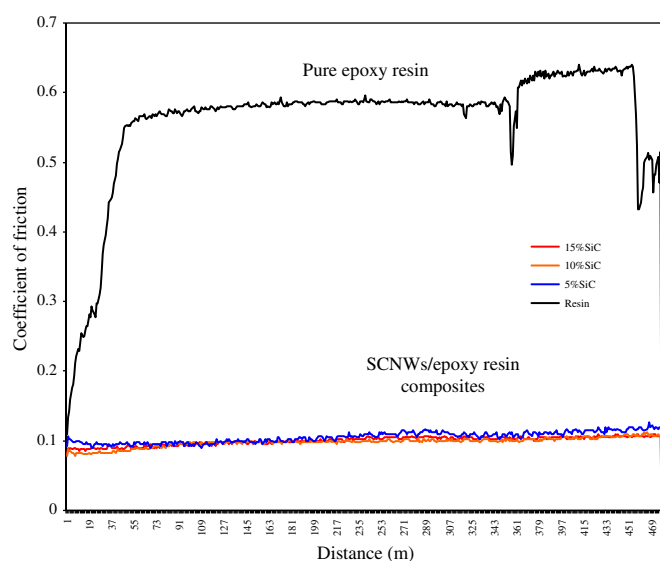


Fig. 2. Wear resistance of pure epoxy resin and SiC NWs/epoxy resin composites.

Fig. 4 shows the typical SEM micrographs at different magnifications and EDS spectrum of the obtained products. It reveals that the products consist of a large quantity of wire-like nanostructures with several micrometers in length and diameters varying from 50 to 70 nm. It is also revealed that SiC NWs were randomly oriented with straight or curved morphologies. These nanowires generally display smooth

surface and very uniform diameter. Besides, the catalyst particles are observed at the end tip of wires as shown in the higher magnification SEM micrograph (Fig. 4). The EDS analysis showed that the elements of nanowires with a wrapping layer contain silicon, carbon and oxygen. The wrapping layer is thought to be SiO_2 . This may be due to the reaction between SiC NWs and the remaining oxygen in the furnace. Fig. 5 shows the SEM micrographs of composites samples with different SiC NWs contents. It can be seen that the brighter phase is the filler phase (SiC NWs) whereas, the grey phase is matrix phase (epoxy resin). The fracture surface of the nanocomposites was coarse, which may imply that the composites have good toughness because of the presence of nanowires. Mostly area covered with polymer phase when small quantity of SiC NWs (1.0 vol%) was added into the sample as shown in Fig. 5a. However, very well distribution of nanowires can be obtained when the content of SiC NWs is increased for 5 vol% and 10 vol%, respectively. Moreover, it shows that epoxy resin evenly impregnated throughout the nanowires, which indicates good resin impregnation (Fig. 5b and c). Fig. 5d shows the micrograph of 15 vol% composites, it is found that the SiC NWs was covered by polymer matrix and some parts of SiC NWs embedded into epoxy resin which may cause to the much higher of mechanical properties. Therefore, it can be reported that adding the nanowires into the polymer-based phase can promote the mechanical of single phase polymer-based especially, hardness and tensile strength.

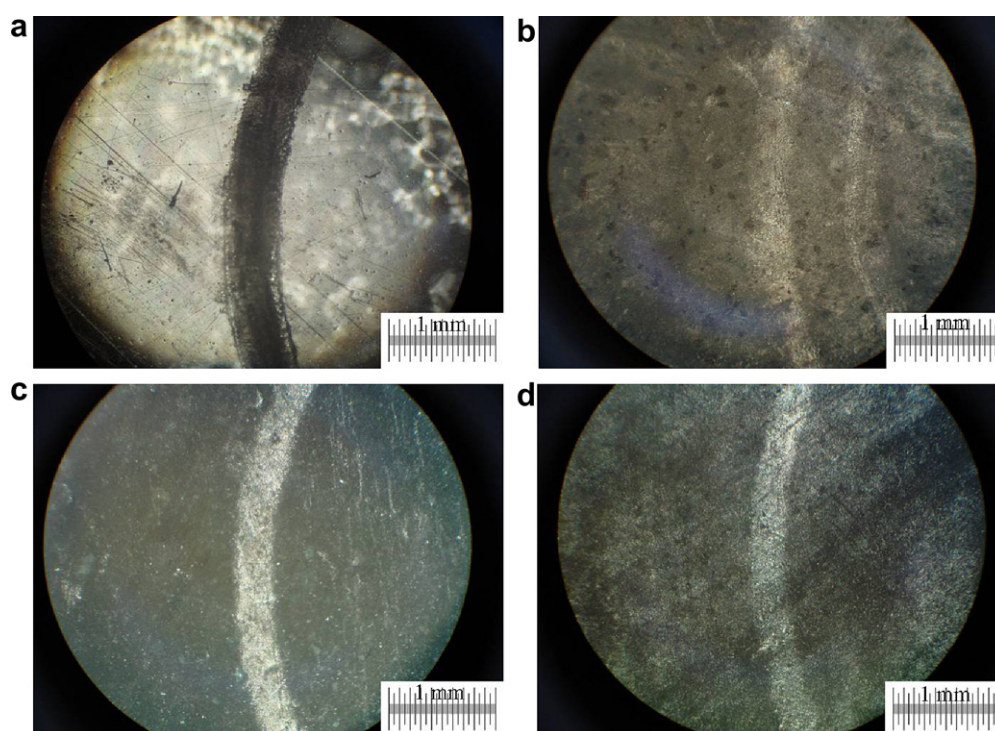


Fig. 3. Wear track of composites samples: (a) pure epoxy resin, (b) 5 vol%, (c) 10 vol% and (d) 15 vol% of SiC NWs.

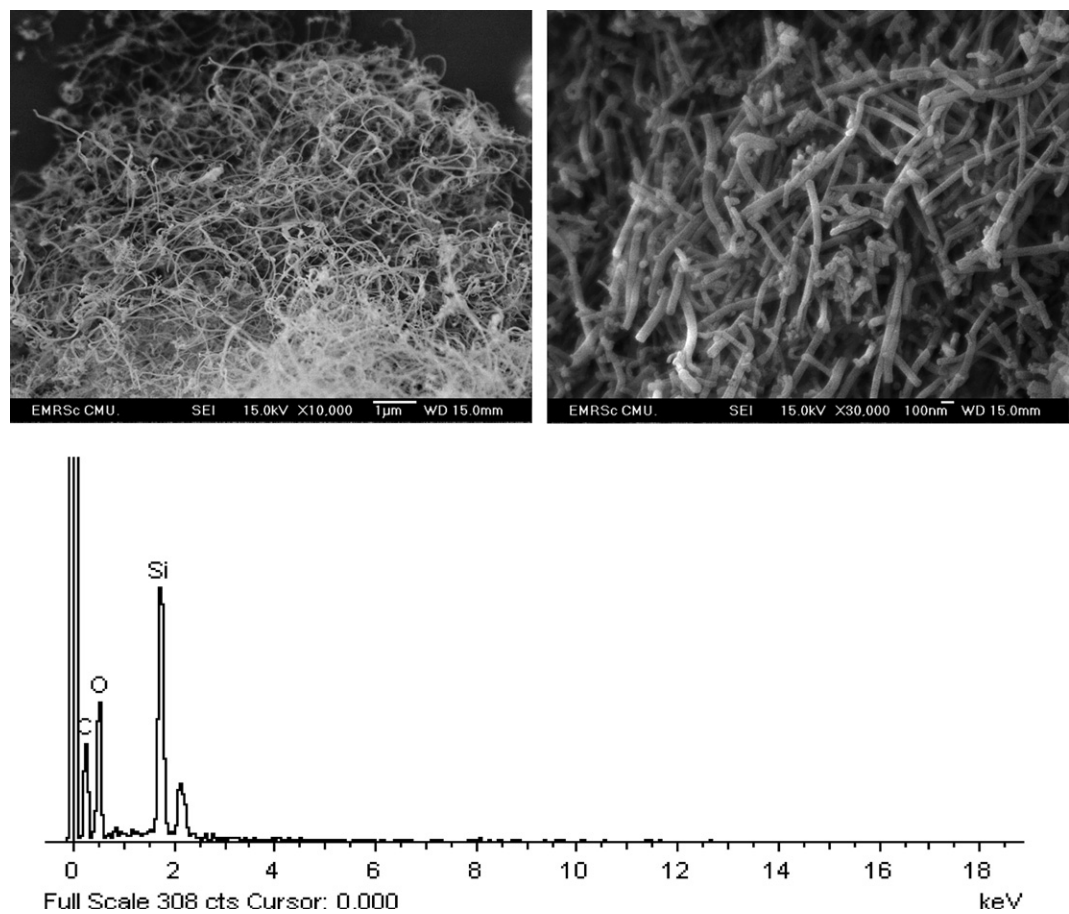


Fig. 4. SEM micrographs and EDS spectrum of SiC NWs.

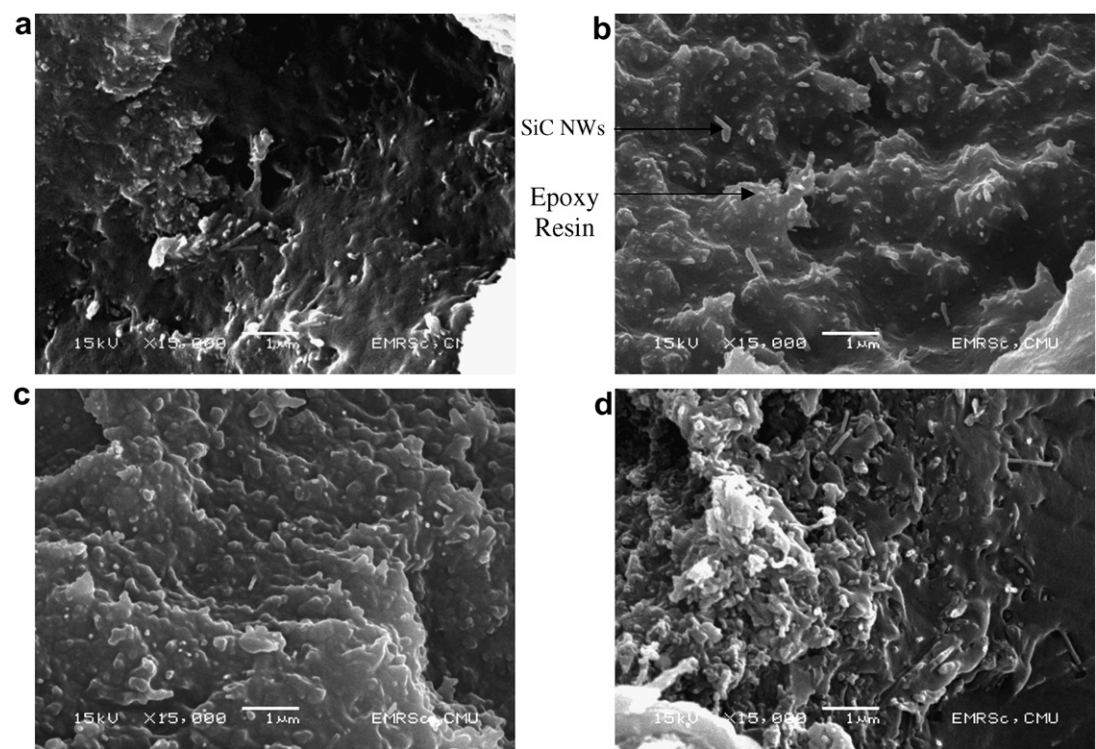


Fig. 5. SEM micrographs of SiC NWs/epoxy resin composites (a) 1 vol%, (b) 5 vol%, (c) 10 vol% and (d) 15 vol%.

4. Conclusion

SiC NWs/epoxy resin composites were fabricated by using the ultrasonic mixing and casting techniques. The SiC NWs were used as the reinforced fiber to promote the mechanical properties of the composites. The results revealed that the SiC NWs were well-dispersed within the epoxy resin matrix. The wear resistance of polymer-based materials could be improved by adding SiC NWs. The composites with 15 vol% of SiC NWs show the best wear resistance with the width of wear track of 329.8 μm which is much less than that of pure epoxy resin (550 μm) while there is no significant change in weight. Moreover, the hardness and tensile strength of composites was improved to 384% and 341%, much higher than that of pure epoxy resin.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) and National Nanotechnology Center (Thailand) for supporting this research. And the authors also would like to express their sincere thanks to the Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University for all the facilities.

References

- [1] X.F. Liu, C.X. Xiong, H.J. Sun, L.J. Dong, R. Li, Y. Liu, *Mater. Sci. Eng. B* 127 (2006) 261–266.
- [2] R.J. Day, J.V. Cauich Rodrigez, *Comp. Sci. Technol.* 58 (1998) 907–914.
- [3] N. Chisholm, H. Mahfuz, V.K. Rangari, A. Ashfaq, S. Jeelani, *Comp. Struct.* 67 (1) (2005) 115–127.
- [4] P.K. Mallick, *Fiber-reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Revised and Expanded, second ed., Marcel Dekker, Inc., NY, 1993.
- [5] M. Walker, R. Smith, *Comp. Struct.* 80 (2002) 1457–1460.
- [6] M.S. Mel, *Composite Materials, Properties, Nondestructive, Testing and Repair*, vol. 1, Prentice-Hall, NJ, 1994.
- [7] K.L. Luthra, H.D. Park, *J. Am. Ceram. Soc.* 75 (7) (1992) 1889–1898.
- [8] S. Chand, *J. Mater. Sci.* 35 (2000) 1303–1313.
- [9] M. Krumova, C. Klingshirm, F. Hauptert, K. Friedrich, *Compos. Sci. Technol.* 61 (2001) 557–5563.
- [10] Q.G. Fu, H.J. Li, X.H. Shi, K.Z. Li, J. Wei, Z.B. Hua, *Mater. Chem. Phys.* 100 (2006) 108–111.
- [11] Y. Ying, Y. Gu, Z. Li, H. Gu, L. Cheng, Y. Qian, *J. Solid State Chem.* 177 (2004) 4163–4166.
- [12] W. Yang, H. Araki, A. Kohyama, S. Thaveethavorn, H. Suzuki, T. Noda, *Mater. Lett.* 58 (2004) 3145–3148.
- [13] E.W. Wong, P.E. Sheehan, C.M. Lieber, *Science* 277 (1997) 1971.
- [14] X.W. Du, X. Zhao, S.L. Jia, Y.W. Lu, J.J. Li, N.Q. Zhao, *Mater. Sci. Eng. B* 136 (2007) 72–77.
- [15] J.Y. Fan, X.L. Wu, P.K. Chu, *Prog. Mater. Sci.* 51 (2006) 983–1031.
- [16] Y. Baek, Y. Ryu, K. Yong, *Mater. Sci. Eng. C* 26 (2006) 805–808.
- [17] S. Tang, J. Deng, H. Du, W. Liu, K. Yang, *J. Am. Ceram. Soc.* 88 (1) (2005) 3253–3255.
- [18] T. Ito, K. Sano, T. Akiyama, K. Nakamura, *Thin Solid Films* 508 (2006) 243–246.
- [19] T. Jintakosol, P. Singjai, *Key Eng. Mater* 353–358 (2007) 2171–2174.

Fabrication of Double Layers of Aramid Fiber/Alumina/Epoxy Resin Laminate Composite Using Low-Pressure Technique

W. Nhuapeng^a, S. Kumfu^b, W. Thamjaree^{*c} and T. Tunkasiri^d

Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

^anhuapeng@yahoo.com, ^bsupreyak@yahoo.com, ^cmsrlwt@yahoo.com, ^dtawee@chiangmai.ac.th

Keywords: Composites, Aramid, Al₂O₃, Epoxy resin

Abstract. An experimental investigation was carried out to study the fabrication of double layers of aramid fiber/alumina/epoxy resin laminate composites using low-pressure technique. To obtain the sample with high wear resistance property, the micron size of alumina particles were added into epoxy resin using the ultrasonic processor. The physical and mechanical properties such as density, hardness, impact test, wear resistance and tensile strength of the composites samples were investigated. Furthermore, microstructures of specimens were also examined by scanning electron microscope (SEM). From the results, it was found that the mechanical properties of double layers laminate composites of aramid fiber/alumina/epoxy resin could improve by using the low-pressure technique.

Introduction

Epoxy resin systems are increasingly used as matrices in composite materials for a wide range of automotive and aerospace applications, and for shipbuilding or electronic devices because of its excellent bonding, thermal and mechanical characteristics [1-2]. Aramid fiber is one of the most interesting fibers, because of their good mechanical properties for example, light-weight, high specific modulus and strength, high thermal resistance and chemical inertness. Furthermore, it exhibits low electrical conductivity when compared to metal alloy and carbon fiber [3]. However, it has erosion resistance poorer than metallic materials [4]. The scientist added ceramic phase into the composites to improve the property of the fiber-reinforced composite materials [5]. Al₂O₃ is known to be an important ceramic material because of its outstanding combination of chemical and physical properties such as excellent resistance to heat and wear, high specific strength, and good oxidation resistance. However, the major problem with the use of Al₂O₃ as a structural material is its inherent brittleness, which is the common characteristic of ceramic materials [6]. In order to enhance the bending force and interaction between Al₂O₃ and epoxy resin phase, the ultrasonic mixing was used for fabricating these laminate composites due to its high energy sonic wave utilization that can force an intrinsic mixing of particles with the matrix via sonic cavitations [7].

In the present work, the double layers laminated composites of aramid /Al₂O₃/epoxy resin were fabricated by using ultrasonic mixing and low-pressure technique. The physical and mechanical properties such as density, hardness, impact test, wear resistance and tensile strength were investigated. Moreover, microstructure of the samples was examined by using the scanning electron microscopy (SEM).

Experimental

In this work, the epoxy resin (Thai Epoxy Resin Ltd., Thailand) was used as matrix phase. The density of the matrix is 1.176 g/cm³. The plain weave aramid fiber and Al₂O₃ powder (Aldrich, purity 99%, 10 microns) were used as the reinforcement phase. The Al₂O₃ powder was added into epoxy resin with the different ratios varying from 2, 5, 10, 12, 15 and 20 percents by volume. To fabricate the double layers laminated composites, firstly, aramid fiber was cleaned by dipping in the ethanol (Merck, purity 99%) and dried. Secondly, the mixtures of epoxy resin and Al₂O₃ powder were dispersed for 3 h in an ultrasonic bath. Thirdly, hardener was added into the mixture and

mixed in ultrasonic bath for 5 min. Fourthly, aramid fiber was laid down and the mixture of epoxy resin and hardener filled with Al_2O_3 powder was then poured into the plastic mould with thickness of 1 mm. Thereafter, the other aramid fiber was laid down upon the 1st layer. In this step, the mylar films were put at the upper and the lower of the samples in order to obtain smooth surface. Finally, the composite samples were left to settle for 1 day at the room temperature and then removed from the mould. Density of the samples was measured by Archimedes method. To investigate the mechanical properties, hardness by Vicker's hardness testing machine (HV30, Brook Inspection Equipment Ltd., England). The impact was tested using the impact testing machine (6705CE, Dension Mayes Group, DMG). The wear resistance was measured by the Pin-on-Disk Tribometer with the ball radius of 4 mm. The tensile strength was examined by using the universal testing machine with a cross-head rate at 50 mm/min, the composites samples were cut into the dog-bone shapes. Moreover, the microstructure of the samples, which cut by ceramic cutting tool, was also determined by scanning electron microscopy (SEM).

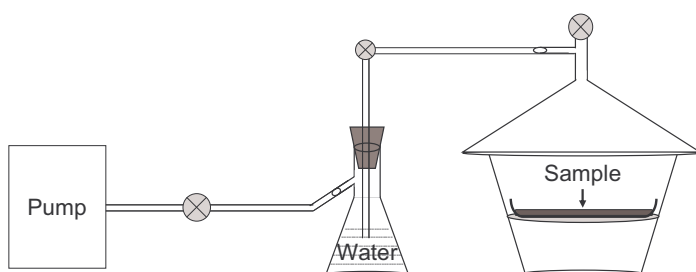


Fig. 1. The schematic diagram of low - pressure technique.

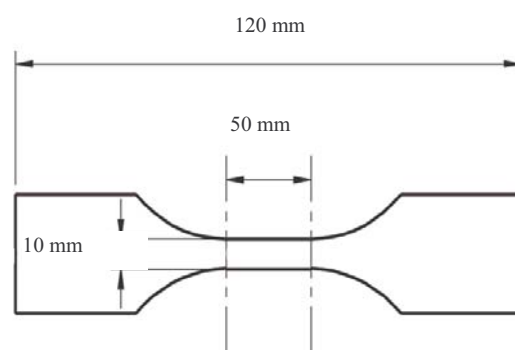


Fig. 2. The tensile test of composites samples.

Results and Discussion

Table 1 shows density, hardness, impact, wear rate and tensile strength values of aramid/ Al_2O_3 /epoxy resin laminated composite samples. The results showed that the density of composite samples which is in the range of 1.265-1.476 g/cm^3 was increased with increasing Al_2O_3 powder content. However, it is noted that the density of the composites samples is less than the density of Al_2O_3 powders (3.61 g/cm^3) and slightly higher than the pure epoxy resin (1.176 g/cm^3). The hardness and tensile strength of composites sample are in the range of 84.7 - 102.3 HV and 129.8 - 290.3 MPa, respectively. Furthermore, it is observed that the impact and wear rate values are in the range of 3.7 - 4.3 J. and 0.2074 - 0.3924 μm^2 , respectively. It is observed that at 10 vol% Al_2O_3 powder content is minimum hardness (85.0 HV) whereas tensile strength is maximum and much higher than the pure resin (887% increased). Besides, at 20 vol% Al_2O_3 powder content are highest hardness, which increased to 174% and lowest tensile strength (102.3 HV and 129.8 MPa, respectively). Fig. 3 shows the photographs of the width of wear track of composites samples. It exhibits that the wear rate are dramatically decreased with increasing of Al_2O_3 powder content when compared to the pure epoxy resin (from 2.9100 to 0.2074 μm^2). It might be said that the wear resistance of the composites samples could be improved by using the Al_2O_3 powder filler. The SEM micrographs of composites samples with the different Al_2O_3 powder contents are shown in Fig. 4. It was found that the small amount of porous appears at the contact area. It may assume that composites show good adhesion between reinforced and epoxy resin.

Table 1. The properties of reinforced composites.

Vol% of Al_2O_3	Density (g/cm^3)	Hardness (HV30)	Impact (J)	Wear rate (μm^2)	Tensile strength (MPa)
0	1.176	37.3	3.2	2.9100	29.4
2	1.265	84.7	3.7	0.3924	255.8
5	1.312	87.7	3.9	0.2970	282.4
0	1.339	85.0	4.1	0.2573	290.3
12	1.363	90.6	4.0	0.2271	282.0
15	1.436	92.6	4.1	0.2074	212.1
20	1.476	102.3	4.3	0.1575	129.8

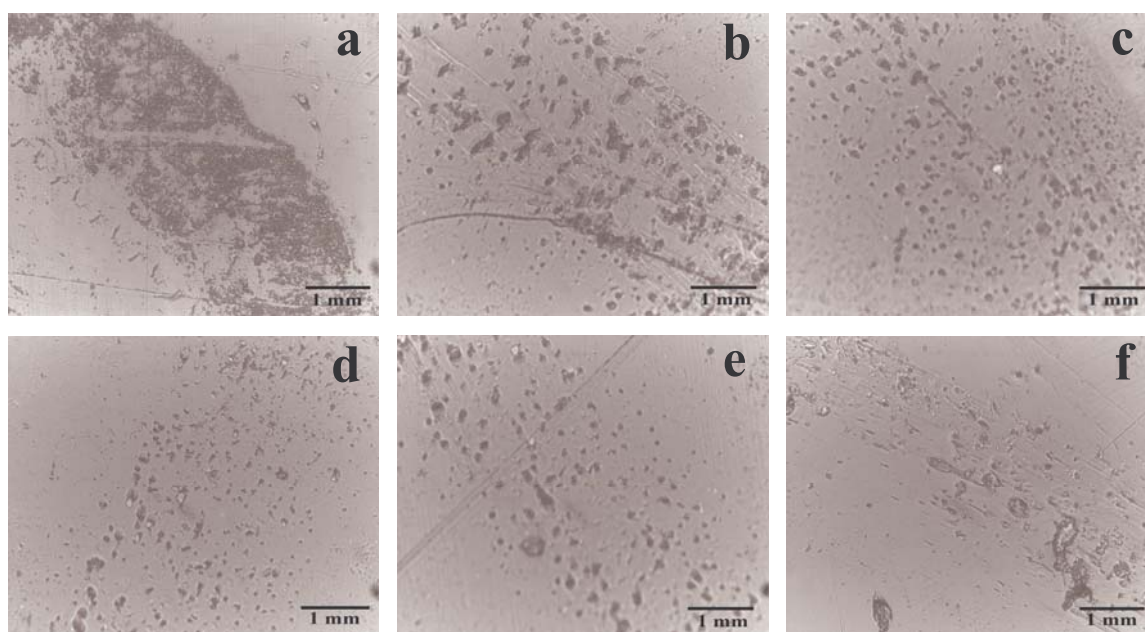


Fig. 3. Wear track of composites samples (a) 2 vol%, (b) 5 vol%, (c) 10 vol%, (d) 12 vol%, (e) 15 vol%, (f) 20 vol%

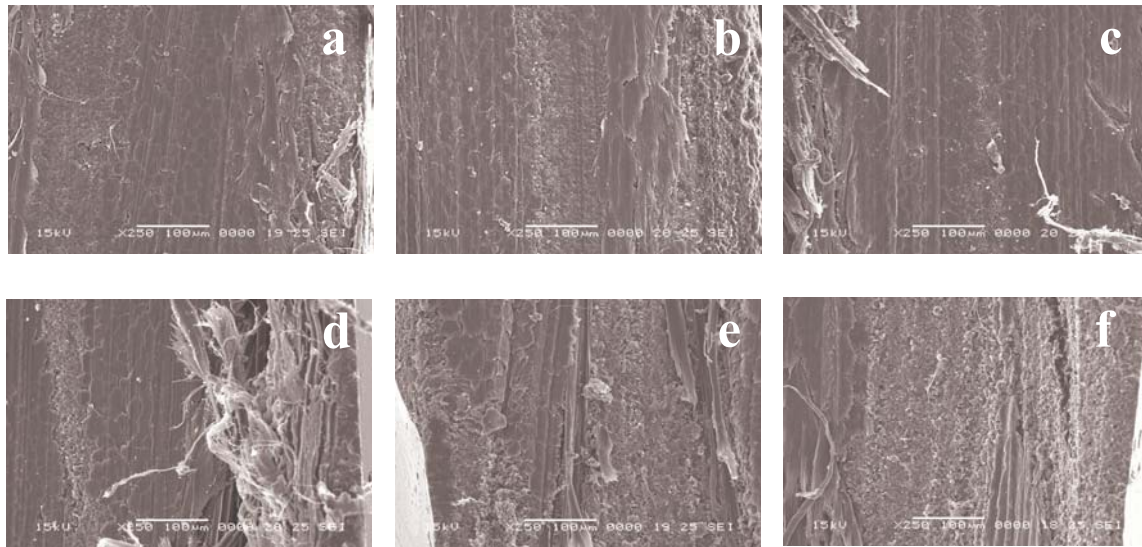


Fig. 4. SEM micrographs of aramid/ Al_2O_3 /epoxy resin composites (a) 2 vol%, (b) 5 vol%, (c) 10 vol%, (d) 12 vol%, (e) 15 vol%, (f) 20 vol%.

Summary

Aramid/ Al_2O_3 /epoxy resin composites were fabricated by using the ultrasonic mixing and casting technique. The plain weave aramid fiber and Al_2O_3 powder were used as the reinforcement to promote the mechanical properties of the composites. The results revealed that the aramid and Al_2O_3 powder were well-dispersed within the epoxy resin matrix. The tensile strength of the 10 vol% Al_2O_3 /epoxy resin composites compared with the pure epoxy resin increased 887%. The hardness and impact were maximum at 20 vol% Al_2O_3 . The composites samples with 20 vol% of Al_2O_3 show the best wear resistance with the wear rate $0.1575 \mu\text{m}^2$, much less than the pure epoxy resin ($2.9100 \mu\text{m}^2$).

Acknowledgement

The authors would like to sincere thanks the Thailand Research Fund and The Graduate School, Chiang Mai University for their financial supporting. And the authors also would like to express their sincere thanks to the Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University for all the facilities.

References

- [1] B. Wetzel, P. Rosso, F. Hauptert and K. Friedrich: Eng. Fract. Mech. Vol. 73 (2006), p. 2375.
- [2] M. Alagar, A.A. Kumar, K.P.O. Mahesh and K. Dinakaran: Eur. Polym. J. Vol. 36 (2000), p. 2449.
- [3] P.J. De Lange, E. Mäder, K. Mai, R.J. Young and I. Ahmad: Composites Part A. Vol. 32 (2001), p. 331.
- [4] U.S. Tewari, A.P. Harsha, A.M. Häger and K. Friedrich: Compos Sci. and Technol. Vol. 63 (2003), p. 549.
- [5] M. Hussian, A. Nakahira and K. Niihara: Mater. Lett. Vol. 26 (1996), p. 185.
- [6] Z. Su, Z. Jizhong, Z. Shiqi, L. Wenzhi and L. Hengde: Compos. Sci. and Technol. Vol. 63 (2003), p. 1009.
- [7] C. Nathaniel, M. Hassan, K.R. Vijaya, A. Adnan and J. Shaik: Compos. Struct. Vol. 67 (2005), p. 115.

Fabrication of Barium Zirconium Titanate Ceramics Using Ultrasonic Ball Milling Technique

W. Thamjaree, W. Nhuapeng* and T. Tunkasiri

Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

*nhuapeng@yahoo.com

Keywords: BZT, milling time, ultrasonic ball milling

Abstract. In this work, barium zirconium titanate (BZT) ceramics were fabricated by using a ultrasonic ball milling technique. BZT with the ratio of $\text{BaCO}_3\text{:ZrO}_2\text{:TiO}_2$ was 1:0.05:0.95 was mixed in ultrasonic ball milling for 1, 3 and 4.5 hr and calcined at temperature of 1000 °C. Phase formation of BZT powder was investigated using XRD technique. Moreover, physical and electrical properties were examined. It was found that the tetragonal structure of BZT can be observed. Particle size of sample powder obtained from new milling technique is smaller than that of powder obtained from conventional mixed oxide method. Moreover, this new technique also requires the less time fabrication. Furthermore, the dielectric properties are increased with milling time and sintering temperature.

Introduction

In the past, innovations in many applications for example, actuators, sensors, hydrophones and ultrasonic transducers have been the driving force for new developments in piezoelectric ceramics [1]. Lead-containing materials including mainly lead zirconate titanate (PZT) and lead-based perovskite compositions have been the mainstay for high performance applications due to their excellent dielectric, piezoelectric and electromechanical coupling coefficients [1,2]. However, from the sustainable development point of view, the toxicity of lead oxide and its high vapor pressure during materials processing may bring serious problems and the growing of concern on health and safety worldwide have drawn the attention owing to the need for environmental protection [2,3]. In recent years, lead-free ferroelectric and piezoelectric materials have received much attention to produce the electronic products to protect the environment and human health. Therefore, it is necessary and urgent to develop lead-free materials with excellent properties for replacing the lead-based materials. One of the most important and promising lead-free materials is barium titanate (BT) and its solid solutions for example, barium zirconium titanate (BZT) [4]. Normally, the fine, high purity and uniform BT and its solid solution powder which is advantages in many engineering applications can be synthesized by such chemical methods for example, sol-gel, co-precipitation, hydrothermal, the poly vinyl alcohol evaporation route, spray dry technique and spray pyrolysis technique, etc [5]. However, the chemical synthesis is not suitable for mass production due to low yield and high cost of powder. Therefore, the solid-state reaction process using oxides as the starting materials are more favorite to prepare BT and its solid solution powder because this technique is very simple, low cost and can be prepared for mass product [6]. Unfortunately, the conventional method requires a high calcinations temperature to synthesize the designed BT compound, making the fabrication of BT ceramics very complicated and time-consuming [7]. Therefore, in this work the authors attempt to prepare the BZT powder by using ultra-ball milling technique. The effect of time on formation and morphology of powder was studied. Furthermore, the physical and electrical properties of samples were also examined.

Experimental

BZT with the mole ratio of $\text{BaCO}_3\text{:ZrO}_2\text{:TiO}_2$ was 1:0.05:0.95 was prepared via the ultrasonic ball-milling technique (Figure 1). BaCO_3 (99%, Fluka), ZrO_2 (99%, Fluka) and TiO_2 , (99%, Reidel) were employed as precursors. The starting powders were weighed according to appropriate molar fractions, mixed and wet milled (in ethanol) for different time (1, 3 and 4.5 hr) in the zirconia grinding media. The mixtures were dried, calcined in closed alumina crucible at temperature of 1000 -1250 °C for 2 hr with heating and cooling rate of 3 °C/min. Moreover, the calcined powder was sieved and sintered in closed alumina crucible at temperature of 1300 °C and 1350 °C for 2 hr with heating and cooling rate of 3 °C/min., respectively. An X-ray diffractometer (XRD, Philips) and a scanning electron microscope (SEM, Philips XL 30 ESEM) were employed to study phase evolution and microstructure of the samples, respectively.



Figure 1. Fabrication of BZT powder using the ultrasonic ball-milling technique.

Results and Discussion

The phase identification of calcined and sintered BZT ceramics were conducted by X-ray diffraction (XRD) technique. Figure 2 show the XRD pattern of BZT powder which milled for 4.5 hr and calcined as different temperature. From Fig. 2, the series of peak can be matched with the JCPDS file no. 83-1880. It can be seen that the uncompleted perovskite-like BZT phase was found in powder with a milling time of 1 hr and the single BZT phase was obtained from a milling time of 3 hr and 4.5 hr (Figure 3). It can be seen that the ultrasonic ball-milling technique take the less time consuming when compare with the conventional method which normally take 24 hr for milling time. This may be due to that the ultrasonic processing may promote the ability of grinding, breaking down the agglomeration of powder. Next, effect of milling on particle size of BZT powder was examined by particle size analyzer (Mastersizer S ver 2.19, Malven Instrument, Ltd.) as show in Table 1. It can be seen that average particle size of uncalcine powder and calcined powder are in the range of 0.83-0.16 μm and 0.72-0.22 μm , respectively. Besides, it is also found that there is a significantly change in size of particle with the further milling time of ultrasonic ball mill. Table 2 exhibits the density, dielectric properties and Curie temperature of BZT ceramics. It can be found that density and dielectric constant of BZT ceramics is increasing with the milling time which effect from the decreasing of particle size when the milling time is increased. The optimum values of density and dielectric constant (77.67% and 1555) obtain from ceramics sintered at 1350 °C with the milling time of 4.5 hr. It has been observed that density of samples is not extremely high which may be due to its sintering behavior of the oxide mixture which shows the volumetric expansion [7]. Moreover, there is a significantly change in Curie temperature of BZT ceramics sintered at 1350 °C which may be due to the density of sample and the Zr concentration from the media. The relationship between dielectric constant of BZT ceramics and temperature is shown in Figure 4.

The normal curve of dielectric shows that higher dielectric constant values obtain from ceramics which sintered higher temperature.

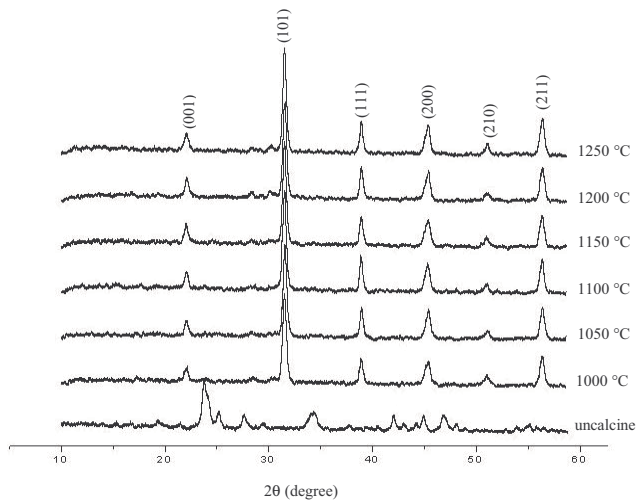


Figure 2. XRD pattern of BZT powder Milled for of 4.5 hr and calcined different temperatures.

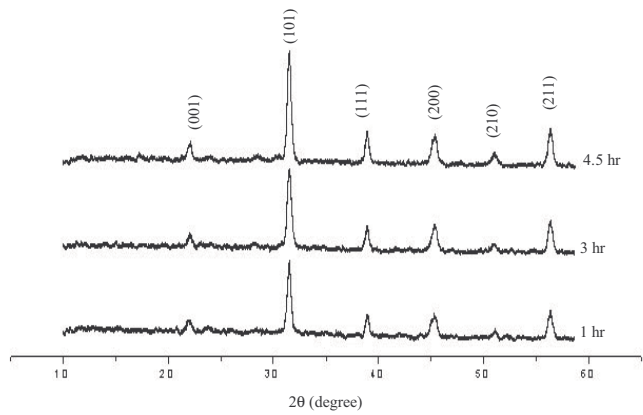


Figure 3. XRD pattern of BZT powder calcined at 1000 °C which mixed for different of milling times.

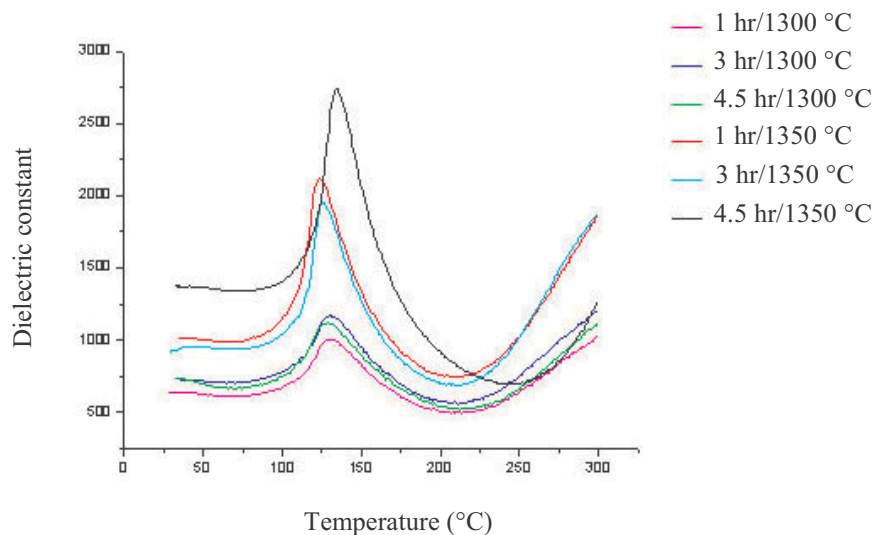
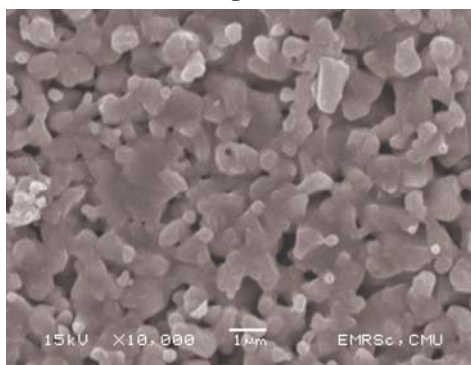
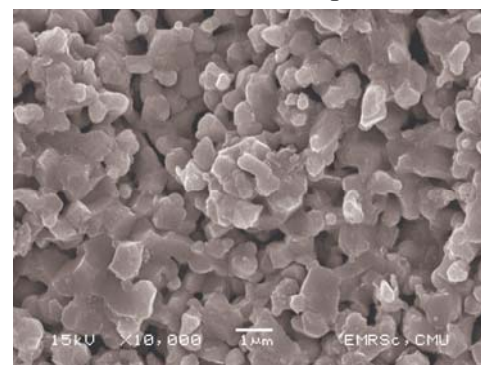


Figure 4. Relationship between dielectric constant of BZT ceramics and temperature.



(a)



(b)

Figure 5. SEM micrographs of BZT samples sintered at 1350 °C (a) as received surface and (b) fracture surface.

Table 1. Average particle size of uncalcine and calcined BZT powders

Milling Time (hr)	Mean diameter (μm)	
	Uncalcine powder	Calcined at 1000 °C
1	0.83	0.72
3	0.18	0.23
4.5	0.16	0.22

Table 2. Density, dielectric properties and Curie temperature of BZT ceramics

Sintering Temperature (°C)	Milling Time (hr)	Density (%)	Frequency (1 kHz)		Curie Temperature (°C)
			ϵ_r	$\tan\delta$	
1300	1	67.62	866	0.38	130
	3	71.69	970	0.35	130
	4.5	73.08	1308	0.60	129
1350	1	74.72	1128	0.19	123
	3	75.16	1193	0.13	126
	4.5	77.67	1555	0.25	134

The SEM micrographs of as receive surface and fracture surface of BZT ceramics sintered at 1350 °C are shown in Figure 5. There is many pores appear in the bulk which may be due to the effect of low density of the samples. However, this problem can be improved by using higher sintering temperature. The time employed in the ball milled method has the effect on the porosity in the bulk (not show here). The grains agglomerate in irregular shape. Furthermore, the average grain size of sintered ceramics is about 1.2 μm . Therefore, it could be concluded that the ultrasonic ball milling technique could produce fine powder but consuming less milling time when compared to the conventional technique.

Summary

It can be concluded that homogeneous and fine powder can be obtained by using the ultrasonic ball-milling technique which could be fabricated in mass product and low cost. The most significant change occurs in the size of the particles. Moreover, the ultrasonic ball-milling technique results in smaller particle size and less milling time than the powder processed via the conventional ball milling method.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund (TRF) and Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University for supporting this research.

References

- [1] T.R. Shrout and S.J. Zhang: J. Electroceram Vol. 19 (2007), p. 111.
- [2] J. Wu, D. Xiao, Y. Wang, J. Zu and P. Yu: J. Appl. Phys. Vol. 103 (2008), p. 1.
- [3] H. Yan, D. Xiao, P. Yu, J. Zhu, D. Lin and G. Li: Mats Design Vol. 26 (2005), p. 474.
- [4] Z. Yu, R. Guo and A.S. Bhalla: Mats. Lett. Vol. 57 (2002), p. 349.
- [5] J. Lappalainen and V. Lantto: App. Surf. Sci. Vol. 154-155 (2000), p. 118.
- [6] Shirane, K. Suzuki and A. Takeda: J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 7 (1952), p. 12.
- [7] L.B. Kong, J. Ma, H.T. Huang, W. Zhu and O.K. Tan: Mater. Lett. Vol. 50 (2001), p. 129.

Mechanical Properties of Hemp Fiber Composites with Carbon Nanotubes Reinforcement

H. Longkullabutra, W. Nhuapeng^a, W. Thamjaree and T. Tunkasiri

Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

^anhuapeng@yahoo.com

Keywords: composites, carbon nanotubes, reinforcement

Abstract. An experimental was investigated the condition of reinforcement of hemp fiber and hemp fiber/epoxy resin composites with carbon nanotubes (CNTs). The CNTs were mixed with several liquid such as ethanol, latex, water glue and epoxy resin. These mixtures were added to hemp fiber and prepared the hemp fiber/epoxy resin composites. The mechanical properties of both fiber and composite samples were measured. It was found that the mixture of epoxy resin and CNTs with CNTs ratio of 20 vol% in hemp fiber showed the highest tensile strength of 25.43 N. and the same mixture in hemp fiber/epoxy resin composites showed the highest tensile strength of 31.82 MPa and elongation of 7.40 %.

Introduction

Bio-composites are the smart materials of the future. It is only through these materials that the balance of ecology and economy can be maintained. In the past decade the interest and research in this area has grown exponentially. Natural/bio-fibers offer many advantages such as energy efficiency, low cost, low density, high toughness, acceptable specific strength, and bio-degradability [1]. CNTs have a number of properties (mechanical and physical) that make them attractive for use in a broad spectrum of applications, especially as reinforcement in nanocomposites [2-6]. There are two kinds of carbon nanotubes: single-walled carbon nanotubes (SWNTs) (one graphene layer) and multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) (many graphene layers) wrapped onto themselves. They can be produced in various ways such as arc discharge, laser ablation, solar energy, molten salt electrolysis and chemical vapour deposition (CVD). The nanotubes are often with more or less impurity (metal catalytic particles, amorphous carbon, etc.) depending on the synthesis method used [7].

There have been many attempts to incorporate nanoparticles, such as metal-oxide nanoparticles, nanoclays, carbon nanofibers, graphite nanoplatelets and carbon nanotubes into the polymeric matrix of conventional fiber-reinforced composites by impregnating dry fiber preforms with the modified nanocomposite matrix or introducing nanoparticle/epoxy films between composite prepreg plies [8]. The aim of the experimental was investigated the condition of reinforcement of hemp fiber and hemp fiber/epoxy resin composites with CNTs and mechanical properties of them were measured.

Experimental

The CNTs were produced by CVD and burned at 430 °C for 4 h for treatment. After that CNTs were mixed with several liquid such as ethanol, latex, water glue and epoxy resin by CNTs ratio of 20 vol %. Hemp fibers were impregnated with these mixtures and tensile strength was measured with Hounsfield H10KS mechanical testing machine in order to choose the best of liquid for prepared the hemp fiber/epoxy resin composites. Then, the epoxy was chosen for prepared hemp fiber/epoxy resin composites by two conditions, untreated and treated CNTs. The CNTs were dispersed in the epoxy by ultrasonication before being mixed with the hardener by ratio 10:2.7 by volume, impregnating the hemp fabric performs with the nanocomposite solution and the matrix (epoxy resin) was mixed to hemp fabric and CNTs by hand lay-up technique, the flat sheet samples were produced.

All the sheets were allowed to cure at room temperature for 6 days. The dog – bone shape composite samples for mechanical testing had the gauge length of 30 mm, width 14 mm and thickness about 1 mm. The tensile tests were conducted on a Hounsfield mechanical testing machine using a crosshead speed of 2.5 mm/min and a 250 mm extensometer.

Results and Discussion

The Table 1 shows tensile properties of the hemp fibers, hemp fibers with several liquid were un-reinforced/reinforced CNTs.

Table 1. The tensile properties of hemp fibers

Reinforcing hemp fiber	Force (N)	Elongation (%)
Hemp	15.01	6.67
Hemp + ethanol + CNTs	17.47	7.07
Hemp + ethanol	17.16	7.77
Hemp + latex +CNTs	21.56	14.40
Hemp + latex	25.57	14.08
Hemp + water glue + CNTs	23.61	12.37
Hemp + water glue	24.67	15.93
Hemp + resin + CNTs	25.43	10.80
Hemp + resin	26.53	14.03

It was found that they are slightly different because of the strength of hemp fiber have more influence than CNTs. However, they have better strength than hemp fiber, hemp fiber with ethanol + CNTs and hemp fiber with ethanol. It is possible that the reinforcement was effect from several liquid and CNTs.

The resin liquid was chosen for hemp fiber/epoxy resin composites because of its high strength

Table 2. The mechanical properties of hemp fiber, CNTs untreated/treated reinforced hemp fiber/epoxy resin composites

Reinforcing hemp fiber/epoxy resin composites	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Strain to break (%)
Hemp	25.34	0.18	13.74
Hemp + resin + CNTs (untreated)	23.58	0.18	18.61
Hemp + resin + CNTs (treated)	28.63	0.20	21.29

The average values of the strength, the Young's modulus, and the fracture strain of these composites were shown in Table 2. These results show that the addition of the CNTs (treated) increased the strength and the modulus of the composites. The tensile strength of CNTs treated/untreated reinforced hemp fiber/epoxy resin composites are values of 28.63 and 23.58 MPa respectively. The decrement of the tensile strength of the composite may be due to the impurity (metal catalytic particles, amorphous carbon, etc.) of CNTs (untreated) that disperses into the matrix [7]. The CNTs were burned to improve the purity of nanofiber.

Scanning electron microscope (SEM) images were obtained to study the dispersion and mechanical role of CNTs in the epoxy matrix of the composites. There were some zones have very high local CNTs concentrations, as shown in Fig.1. The distribution of CNTs on CNTs (treated) reinforced hemp fiber/epoxy resin composite was more homogeneous than CNTs (untreated) reinforced hemp fiber/epoxy resin composite. It is possible that the particles of impurity of CNTs (untreated) disperse into composite instead of CNTs. Another parameter is the CNTs added into resin with CNTs ratio of 20 vol% in hemp fiber was very viscous and the homogenization process was difficult.

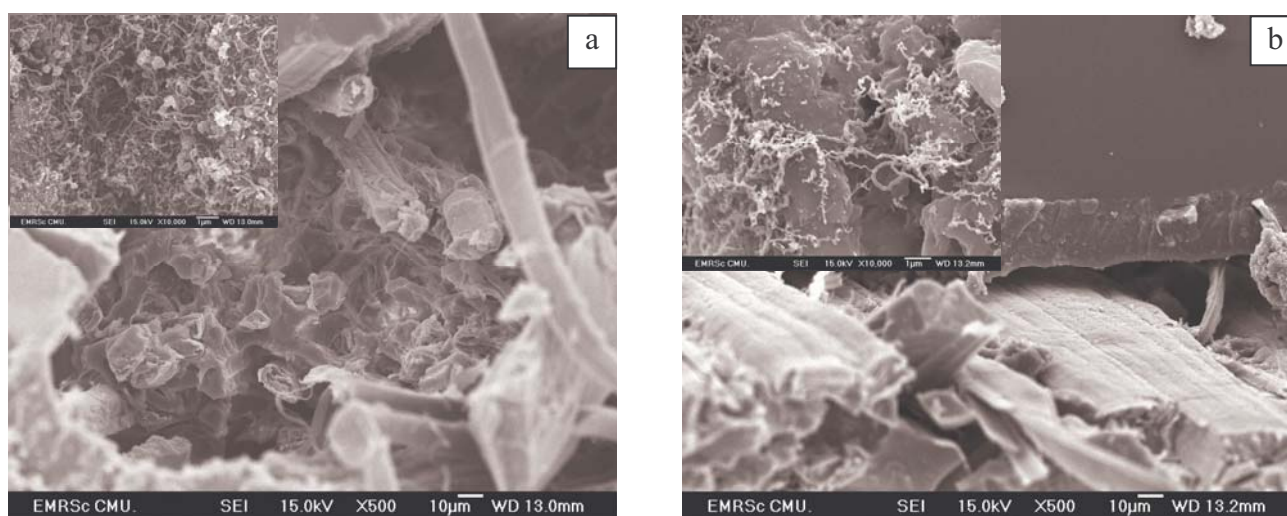


Fig. 1 SEM images of the fracture surface of (a) CNTs (untreated) reinforced hemp fiber/resin epoxy composite (b) CNTs (treated) reinforced hemp fiber/resin composite.

Summary

CNTs were dispersed into epoxy resin better than another liquid. The mechanical properties of hemp fiber composites with CNTs reinforcement made by hand lay-up technique and CNTs (treated) reinforced hemp fiber/resin epoxy composite was higher tensile strength than CNTs (untreated) reinforced hemp fiber/resin epoxy composite. In order to make significant improvements to the mechanical properties of the composites it was found necessary to CNTs treatment.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) and National Nanotechnology Center (Thailand) for supporting this research. And the authors also would like to the Nanomaterials Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science and the graduate school, Chiang Mai University.

References

- [1] M G. Mehta, A. K. Mohant, M. Misra, L. T. Drzal: J. Mater. Sci. Vol. 39 (2004), p. 2961.
- [2] D.H. Robertson, D.W. Brenner, J.W. Mintmire: Phys Rev B Vol. 45 (1992), p. 2592.
- [3] B.I. Yakobson, C.J. Brabec, J. Bernholc: Phys Rev Lett Vol. 76 (1996), p. 2511.
- [4] J.P. Lu: Phys Rev Lett Vol. 79 (1997) p. 1297.
- [5] E.W. Wong, P.E. Sheehan, C.M. Lieber: Science Vol. 277 (1997), p. 1971.
- [6] C.F. Cornwell, L.T. Wille: Solid State Commun Vol.101 (1997), p.555.
- [7] J.B. Bai, A. Allaoui : Composites: Part A Vol. 34 (2003), p. 689.
- [8] J. Cho, I.M. Daniel: Scripta Mater. (2007), in press.