

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสม CNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

จากการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ นาโนไฟเบอร์ และอีพ็อกซีเรซินโดยใช้หลักการแทนที่น้ำของอาคิมิดีส 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

การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นใช้วิธีทดสอบวัสดุที่มีลักษณะแข็งกว่า เช่น เหล็กแข็งเพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น รูปกลม พีระมิต โคน 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 การสึกหรอเป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูกระหว่างผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือสูญเสียเนื้อบริเวณที่สัมผัสกัน

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

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

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 ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

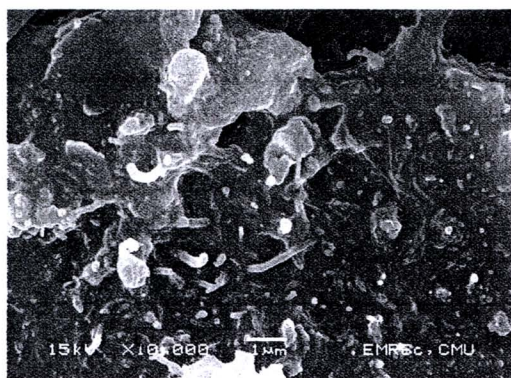
Sample	Tensile Strength (MPa)	Max. Force (N)
E (#7275)	29.36	293.6
CNTs+ E 0.1%	49.35	570.0
CNTs+ E 0.2%	60.50	605.0
CNTs+ E 0.3%	61.50	737.0
CNTs+ E 0.4%	63.00	693.0
CNTs+ E 0.5%	73.18	939.0
CNTs+ E 0.6%	82.00	984.0
CNTs+ E 0.7%	67.68	609.0
CNTs+ E 0.8%	65.75	618.0
CNTs+ E 0.9%	51.10	606.0
CNTs+ E 1.0%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

จากตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงค่า Tensile strength และ ค่า Maximum force ของตัวอย่าง
วัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน พบว่า ค่า Tensile strength และ ค่า
Maximum force อยู่ในช่วง 49.35 – 82.00 MPa และ 570.0 – 984.0 N ซึ่งมีค่าสูงกว่าอีพ็อกซีเร
ซิน (29.36 MPa และ 293.6 N) และพบว่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 0.6 % มีค่า Tensile
strength และ ค่า Maximum force สูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 183% และ 235% เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเร
ซิน

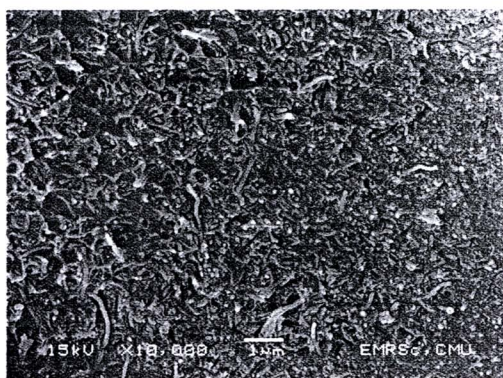


4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสมCNT/SiC/อีพ็อกซีเรซิน

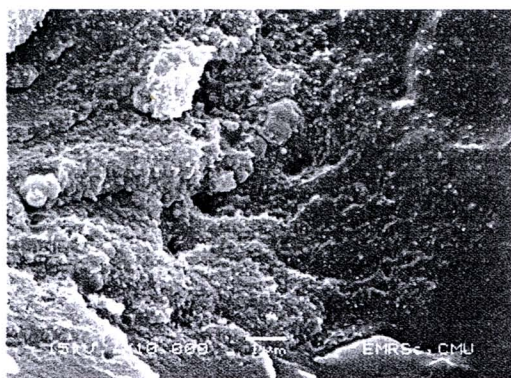
4.5.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน



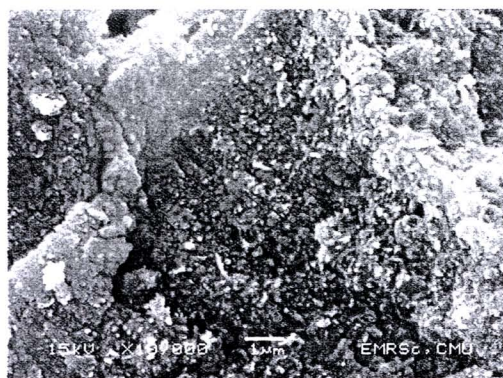
ก. 0.2%



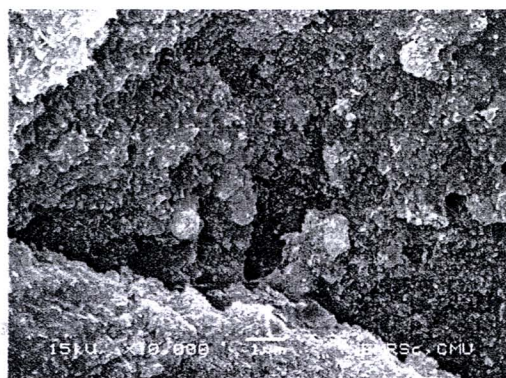
ข. 0.4%



ค. 0.6%



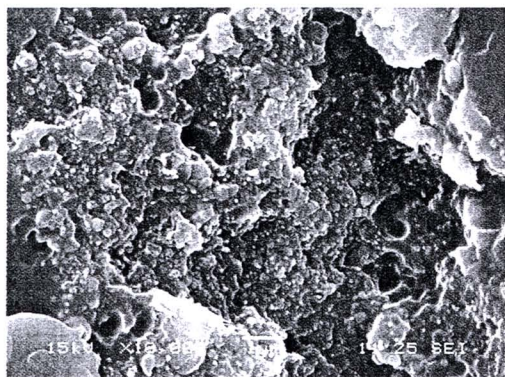
ง. 0.8%



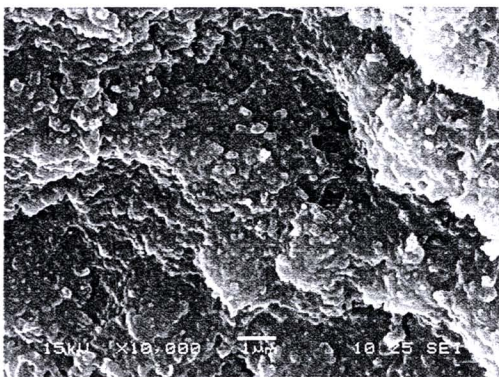
จ. 1.0%

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 2 เฟส
ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน

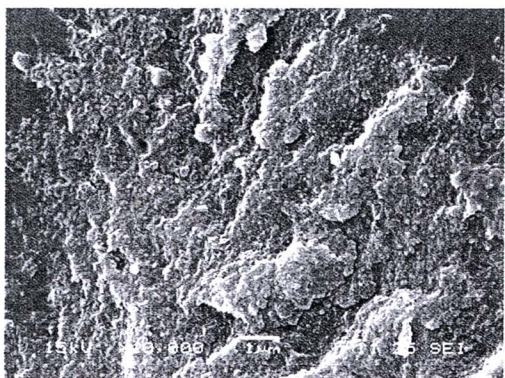
4.5.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนานาโนคาร์บอน/ซิลิกอนคาร์ไบด์/อีพ็อกซีเรซิน



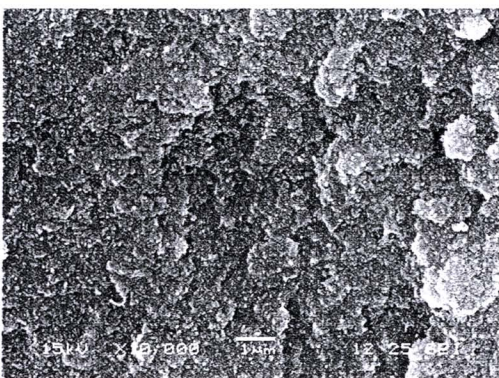
ก. 2%



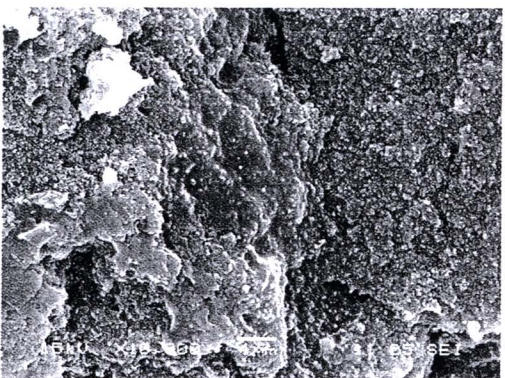
ข. 5%



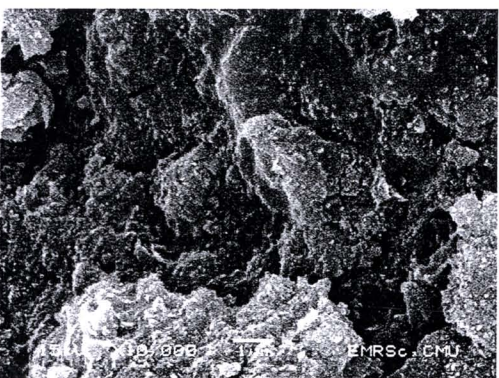
ค. 10%



ง. 12%



จ. 15%



ฉ. 20%

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผสม 3 เฟส ระหว่างท่อนานาโนคาร์บอน/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