

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

ก

บทคัดย่อภาษาไทย

ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

จ

สารบัญตาราง

ฎ

สารบัญภาพ

ฐ

อักษรย่อและสัญลักษณ์

ด

บทที่ 1 บทนำ

1

1.1 ที่มาและความสำคัญ

1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2

บทที่ 2 ทฤษฎี

3

2.1 เส้นใยธรรมชาติ

3

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

4

2.1.2 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ

5

2.1.3 การดัดแปรเส้นใย (Fiber modification)

6

2.1.4 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

7

2.1.5 เส้นใยไฟเบอร์

9

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube : CNTs)

11

2.2.1 การค้นพบ CNTs

11

2.2.2 สมบัติของ CNTs

11

2.2.3 การสังเคราะห์และการผลิต

12

2.2.4 การประยุกต์ใช้ CNTs

13

2.3 วัสดุผสม (Composites)

14

2.4 องค์ประกอบของวัสดุผสม

15

2.4.1 เมทริกซ์ (Matrix)

15

2.4.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3 สารเติมและสารปรับแต่ง (Filler and Additives)	17
2.5 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย (Fiber-matrix interface)	17
2.6 การเสริมแรง (Reinforcement)	20
2.7 กลไกของการเสริมแรงด้วยเส้นใย	20
2.7.1 เส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันตลอด ความยาวของเมทริกซ์ (Unidirectional continuous fiber)	20
2.7.2 เส้นใยเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber)	22
2.8 ตัวประสานคู่ควบ (Coupling agent)	22
2.9 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	23
2.9.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	23
2.9.2 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)	27
2.9.3 ความต้านทานแรงอัด (Compressive strength)	29
2.10 การหาความหนาแน่นด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า (Density Determination with Electrical Balance)	30
2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)	30
2.11.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
2.11.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบ	32

บทที่ 3 การทดลอง	33
-------------------------	-----------

3.1 เครื่องมือ	33
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3.3 วิธีการทดลอง	35
3.3.1 การเตรียมเส้นใยไฟ	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน	35
3.3.3 การศึกษาผลจากการดัดแปรเส้นใยด้วยวิธีอัลคาไลน์ทรีทเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของ วัสดุผสม	36
3.3.4 การศึกษานาควมความยาวเส้นใยที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุผสม	36
3.3.5 การศึกษาสัดส่วนท่อนาโนคาร์บอนที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุผสม	37
3.3.6 การทดสอบชิ้นงาน	38
3.3.6.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)	38
3.3.6.2 การทดสอบความต้านทานแรงอัด (Compressive testing)	39
3.3.6.3 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact testing)	40
3.3.6.4 การหาความหนาแน่นของวัสดุผสม	41
3.3.6.5 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไฟ และลักษณะ พื้นผิวที่เสียดสภาพของวัสดุผสม	42
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
4.1 ผลของการศึกษาเส้นใยไฟทั้งไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรที่มีผลต่อสมบัติเชิง กลบางอย่างของวัสดุผสม	44
4.2 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไฟในขนาดความ ยาวต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลบางอย่าง	45
4.2.1 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไฟในขนาด ความยาวต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด	45
4.2.2 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไฟในขนาด ความยาวต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงอัด	47
4.2.3 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไฟในขนาด ความยาวต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไผ่และท่อนาโนคาร์บอนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลบางอย่าง	50
4.3.1 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไผ่และท่อนาโนคาร์บอน(CNTs) ในสัดส่วนต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด	50
4.3.2 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไผ่และท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ในสัดส่วนต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงอัด	52
4.3.3 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไผ่และท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ในสัดส่วนต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก	52
4.4 ผลของการศึกษาความหนาแน่นของวัสดุผสม ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า	54
4.4.1 ผลการศึกษาความหนาแน่นของวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไผ่ในขนาดความยาวต่างๆ	54
4.4.2 ผลการศึกษาความหนาแน่นของวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไผ่และท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ในสัดส่วนต่างๆ	55
4.5 ผลของการศึกษาลักษณะพื้นผิวเส้นใยและพื้นผิวที่เสียหาย ของวัสดุผสมโดยวิธี Scanning electron microscopy (SEM)	56
4.5.1 ผลของการศึกษาพื้นผิวเส้นใยและพื้นผิวที่เสียหายของวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร (Untreated fiber) และเส้นใยที่ผ่านการดัดแปร (Alkaline treated fiber)	56
4.5.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวที่เสียหายของวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไผ่ ในขนาดความยาวต่างๆ	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.3 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวที่เสถียรภาพของวัสดุผสมระหว่าง เส้นใยไฟเบอร์และอีพ็อกซีเรซินผสม ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ในสัดส่วนต่างๆ	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.1.1 ผลการศึกษาเส้นใยไฟเบอร์ทั้งไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรที่มีผลต่อ เชิงกลบางอย่างของวัสดุผสม	61
5.1.2 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไฟเบอร์ ในขนาดความยาวต่างๆที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลบางอย่าง	61
5.1.3 ผลของการศึกษาวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไฟเบอร์ และท่อนาโนคาร์บอนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลบางอย่าง	62
5.1.4 ผลของการศึกษาความหนาแน่นของวัสดุผสม	62
5.1.5 การศึกษาลักษณะพื้นผิวที่เสถียรภาพ	62
5.1.5.1 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ทั้งที่ไม่ได้ผ่านการ การดัดแปร และเส้นใยที่ผ่านการดัดแปร	62
5.1.5.2 วัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยไฟเบอร์ขนาด ความยาวต่างๆ	62
5.1.5.3 วัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไฟเบอร์และท่อ นาโนคาร์บอนในสัดส่วนต่างๆ	63
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป	63

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก

หน้า

68

ภาคผนวก ก ตัวอย่างลักษณะชิ้นงานที่เสียหายจากการทดสอบสมบัติ
เชิงกล

69

ภาคผนวก ข เปรียบเทียบพลังงานความต้านทานแรงกระแทกของเหล็ก
และวัสดุผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเส้นใยไฟเบอร์กลาส
โนคาร์บอนที่ได้จากการทดลอง

70

ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยการดัดแปรเส้นใยไฟเบอร์กลาส

71

ประวัติผู้เขียน

78

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น และมุมไมโครไฟบริลลา (Microfibrillar angle)	4
2.2 แสดงค่าลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเส้นใย วิธีการผลิต และมอดุลัส	8
2.4 แสดงสมบัติของอีพ็อกซี	16
2.5 ลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียดที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของพอลิเมอร์	26
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	33
4.1 ค่าเฉลี่ยผลจากการวัดค่า ความทนแรงดึงสูงสุด ความทนต่อแรงกระแทก ความทนต่อแรงกดอัด และความหนาแน่นของวัสดุผสม	44

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 การจำแนกเส้นใยตามแหล่งกำเนิด	3
2.2 โครงสร้างภายในของเส้นใยเซลลูโลส (θ = Microfibrillar angle)	5
2.3 ลักษณะของด้ายไหม ชนิดไหมรวก	9
2.4 แสดงการดูดซับและการชุบ	18
2.5 การแพร่กระจาย และการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์	18
2.6 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ผิวสัมผัส	19
2.7 พันธะทางเคมีระหว่างผิวสัมผัส 2 ชนิด	19
2.8 การยึดติดทางกล	20
2.9 แสดงการเรียงของเส้นใยพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย	20
2.10 แรงกระทำต่อวัสดุผสมกรณีเส้นใยเรียงตัวแบบต่อเนื่องตลอดความยาวของเมทริกซ์	21
2.11 กลไกของตัวประสานอุ้มควบ	23
2.12 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุ	24
2.13 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท	26
2.14 กราฟ Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b)	28
2.15 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod	29
2.16 การเลือกรูปแบบโค้งงอออกด้านข้างของวัสดุภายใต้แรงอัด	30
2.17 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด	32
3.1 ด้ายไหมรวกจากจังหวัดร้อยเอ็ด	34
3.2 พงท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	34
3.3 เส้นใยไหม	35
3.4 เส้นใยไหมขนาด 10 mm (ก) เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ข) เส้นใยที่ผ่านการดัดแปร	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.5 เส้นใยไฟเบอร์ขนาดต่างๆ (ก) 2 mm, (ข) 4 mm, (ค) 6 mm, (ง) 8 mm และ (จ) 10 mm	37
3.6 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง (ก) เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ (ข) เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน	38
3.7 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงอัด (ก) เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ (ข) เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน	39
3.8 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและความทนแรงอัด	40
3.9 ชิ้นทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (ก) เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ (ข) เสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน	41
3.10 (ก) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (แบบ Charpy) และ (ข) ลักษณะการวางชิ้นทดสอบ	41
3.11 ชุดอุปกรณ์ในการหาความหนาแน่นของวัสดุผสม	42
3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับเส้นใยไฟเบอร์ขนาดความยาวต่างๆ ของวัสดุผสม	46
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยังกับเส้นใยไฟเบอร์ขนาดความยาวต่างๆ ของวัสดุผสม	46
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึดตัวกับเส้นใยไฟเบอร์ขนาดความยาวต่างๆ ของวัสดุผสม	47
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสแรงอัดกับเส้นใยไฟเบอร์ขนาดความยาวต่างๆ ของวัสดุผสม	48
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกระแทกกับเส้นใยไฟเบอร์ขนาดความยาวต่างๆ ของวัสดุผสม	49
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานต้านทานแรงกระแทกกับเส้นใยไฟเบอร์ขนาดความยาวต่างๆ ของวัสดุผสม	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับสัดส่วนของ ท่อนาโนคาร์บอนของวัสดุผสม	50
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยังกับสัดส่วนของ ท่อนาโนคาร์บอนของวัสดุผสม	51
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวกับสัดส่วนของ ท่อนาโนคาร์บอนของวัสดุผสม	51
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวกับสัดส่วนของ ท่อนาโนคาร์บอนของวัสดุผสม	52
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกระทำกับสัดส่วนของ ท่อนาโนคาร์บอนของวัสดุผสม	53
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานความต้านทานแรงกระทำกับ สัดส่วนของท่อนาโนคาร์บอนของวัสดุผสม	54
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับวัสดุผสมระหว่าง อีพ็อกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอทิลีนความยาวต่างๆ	55
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับวัสดุผสมระหว่าง เส้นใยโพลีเอทิลีนและอีพ็อกซีเรซินผสมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ในปริมาณต่างๆ	55
4.15 เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Untreated fiber; ก) และเส้นใยโพลี เอทิลีนที่ทำการดัดแปร (Alkaline treated fiber; ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า	56
4.16 ลักษณะพื้นผิวจากการทดสอบความทนแรงดึงของวัสดุผสม ระหว่างอีพ็อกซีเรซินและเส้นใยโพลีเอทิลีนที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Untreated fiber; ก) และ เส้นใยโพลีเอทิลีนที่ทำการดัดแปร (Alkaline treated fiber; ข) ที่กำลังขยาย 300 เท่า	57
4.17 ลักษณะพื้นผิวจากการทดสอบการทนแรงดึงระหว่างอีพ็อกซีเรซิน และเส้นใยที่มีความยาวแตกต่างกัน (ก) 2, (ข) 4, (ค) 6, (ง) 8 และ (จ) 10 มิลลิเมตรที่กำลังขยาย 300 เท่า	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป

หน้า

4.18 ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ที่ผ่านทริทเมนต์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

59

กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.19 ลักษณะพื้นผิวจากการทดสอบการทนแรงดึงระหว่างอีพ็อกซีเรซิน

60

และเส้นใยที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณแตกต่างกัน (ก) 2 % wt,

(ข) 4 % wt, (ค) 6 % wt, (ง) 8 % wt และ (จ) 10 % wt ที่กำลังขยาย

10,000 เท่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

CNTs	ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube)
nm	นาโนเมตร
TPa	เทระปาสกาล
MPa	เมกะปาสกาล
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
m^2/g	ตารางเมตรต่อกรัม
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
μm	ไมโครเมตร
A/cm^2	แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
V	โวลต์
mm	มิลลิเมตร
σ	ความเค้น
A	พื้นที่หน้าตัด
σ_c	ค่าความเค้นของวัสดุผสม
σ_f	ค่าความเค้นของเส้นใย
σ_m	ค่าความเค้นของเมทริกซ์
A_c	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุผสม
A_f	พื้นที่หน้าตัดของเส้นใย
A_m	พื้นที่หน้าตัดของเมทริกซ์
ε_c	ค่าความเครียดของวัสดุผสม
ε_f	ค่าความเครียดของเส้นใย
ε_m	ค่าความเครียดของเมทริกซ์
E_c	ค่ามอดุลัสของยังของวัสดุผสม
E_f	ค่ามอดุลัสของยังของเส้นใย
E_m	ค่ามอดุลัสของยังของเมทริกซ์
σ_c^{TS}	ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ
σ_f^{TS}	ค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใย

σ'_m

ค่าความเค้นแรงดึงที่เกิดจากเมทริกซ์ ณ ความเครียดที่ทำให้วัสดุ
ผสมเสียสภาพ

ΔL

อัตราส่วนระหว่างส่วนต่างของความยาว

L_0

ความยาวเดิม

F

แรงจากภายนอก

A

พื้นที่หน้าตัด

E_{ab}

ค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้โดยชั้นทดสอบ

E_{lm}

ค่าพลังงานของการทนการกระแทกของชั้นทดสอบ

B

ความกว้างของชั้นทดสอบ

h

ความหนาของชั้นทดสอบ

ρ

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ρ_{fl}

ค่าความหนาแน่นของของเหลว

W_a

น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน

W_{fl}

น้ำหนักของชิ้นงานในของเหลว