



ศึกษาสมบัติวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก
เพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

Investigation on Properties of Glass Fiber-Reinforced Polymer
Wrapped with Ceramic-Reinforced Polymer to Make Wind
Turbine Blades for Electricity Generation

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รำพึง เจริญยศ

นายสุทธิสาร อนันตรัตนชัย

นายพิพัฒน์ สัจจิตธรรมกุล

ศึกษาสมบัติวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก

เพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ร่ำฟ้า เจริญยศ
นายสุทธิสาร อนันต์รัตนชัย
นายพิพัฒน์ สุกิจธรรมกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประจำปีงบประมาณ 2558

Investigation on Properties of Glass Fiber-Reinforced Polymer Wrapped with
Ceramic-Reinforced Polymer to Make Wind Turbine Blades for Electricity Generation

Asst. Prof. Rampueng Jaroenyos
Mr. Suttisan Anuntaranachai
Mr. Pipat Sujittamakul

Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering and Architecture
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Academic Year 2015

ชื่อโครงการวิจัย	ศึกษาสมบัติวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิกเพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า
ชื่อผู้วิจัย	1. ศศ.ร่าพิ่ง เจริญยศ 2. นายสุทธิสาร อนันต์รัตนชัย 3. นายพิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีงบประมาณ	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาข้อมูลการสึกกร่อนของใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการปะทะเสียดสีกับกระแสลมที่มีฝุ่นละอองปะปนอยู่ อย่างรุนแรงตามความเร็วของกระแสลมที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความเสียหายแก่ใบกังหันจนถึงตัวกังหันลม และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงค่อนข้างสูง

จากปัญหาดังกล่าว ผู้ดำเนินโครงการจึงได้ทำการคิดค้นวัสดุที่จะมาทดแทนวัสดุที่ใช้งานเดิมซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว โดยใช้อิพ็อกซีผสมเส้นใยแก้วและหุ้มด้วยอิพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของใบกังหันลม โดยทำการสร้างชิ้นงานทดสอบในอัตราส่วน 70:30, 60:40 และ 50:50 แล้วนำไปทดสอบสมบัติการทนแรงดึง แรงดัด ความแข็งและการทนต่อสึกกร่อน ทำการเปรียบเทียบสมบัติวัสดุ จากนั้นเลือกวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดเพื่อขึ้นรูปเป็นใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

ผลการทดลอง ได้วัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิกที่อัตราส่วน 70:30 มีสมบัติทางกลดีที่สุดคือ สามารถทนแรงดึง 97.76 MPa การทนแรงดัด 194.8 MPa มีความแข็ง 103.5 HR เนื่องจากเป็นอัตราส่วนผสมที่มีการจับตัวกันพอดีระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยจึงทำให้มีความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก สามารถใช้เป็นวัสดุผลิตเป็นใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ภายในสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำที่เป็นประโยชน์เป็นแนวทางในระหว่างการค้าเนินงานและที่สำคัญได้ให้กำลังใจแก่คณะผู้วิจัยมาโดยตลอดโดยให้ข้อเสนอแนะความคิดเห็นตลอดจนช่วยแก้ไขปรับปรุงในการดำเนินโครงการวิจัยฉบับนี้มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบ

ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลที่ให้ความอนุเคราะห์งบประมาณในการดำเนินโครงการวิจัย

คณะผู้จัดทำโครงการวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ตลอดจนนักศึกษาที่ช่วยดำเนินการค้นคว้าและทดลองในโครงการวิจัยด้วยจนทำให้โครงการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านสถานที่และด้านเครื่องมือ เครื่องจักรตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นในการจัดทำโครงการ และขอขอบพระคุณบุคคลท่านอื่นที่เกี่ยวข้องๆที่มีได้เอ่ยนามมาในที่นี้ด้วย

หากโครงการวิจัยนี้ไม่ได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาจากท่านทั้งหลายที่ได้กล่าวถึงไป แล้วข้างต้น โครงการวิจัยก็คงไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

รำพึง เจริญยศ

สุทธิสาร อนันตรัตนชัย

พิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญแผนภูมิ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ	5
2.1 นิยามคำศัพท์	5
2.2 แนวคิด	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.4 คอมโพสิต	11
2.5 สมบัติของวัสดุ	36
2.6 การออกแบบวัสดุ	41
2.7 การทดสอบแรงดึง	48
2.8 การทดสอบแรงค้ำงอ	50
2.9 การทดสอบความแข็ง	55
2.10 การสึกหรอ	57
2.11 กังหันลมในประเทศไทย	61
2.12 การผลิตใบกังหันลม	65
2.13 การประเมินผล	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงาน	70
3.1 การวางแผนงาน	70
3.2 การเตรียมการ	73
3.3 การออกแบบการทดลอง	76
3.4 การดำเนินการ	78
3.6 การขึ้นรูปใบกึ่งหัน	93
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	96
4.1 ผลการทดลอง	96
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลอง	102
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	106
5.1 สรุปผล	106
5.2 ปัญหาในการดำเนินโครงการ	106
5.3 ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารอ้างอิง	108
ภาคผนวก ก.	110
ข้อมูลอีพอกซี	111
ข้อมูลเซรามิก	113
ภาคผนวก ข.	115
ผลการทดสอบแรงค้ำงอ	115
ผลการทดสอบแรงดึง	116
ผลการทดสอบความแข็ง	127
ภาคผนวก ค.	132
มาตรฐานการทดสอบ	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของคอม โพลีตเสริมแรงด้วยเส้นใย	17
2.2 ประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมื่อมีการจัดเรียงตัวของเส้นใย	18
2.3 สมบัติของพอลิคาร์บอเนตทั้งแบบที่ไม่เสริมแรงและเสริมแรงด้วยเส้นใย	19
2.4 ค่า Fracture Strength และความทนทานต่อการแตกหักที่อุณหภูมิห้อง	22
2.5 คุณลักษณะทางกลที่อุณหภูมิห้องของพอลิเมอร์บางชนิด	25
2.6 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว	37
2.7 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานของเส้นใยเซรามิก	38
2.8 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด	52
2.9 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 4 จุด	53
2.10 แสดงค่าการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ	56
3.1 แผนการดำเนิน โครงการวิจัย	71
3.2 อุปกรณ์	75
3.3 วัสดุในการทดลอง	76
3.4 สรุปรายการออกแบบการทดลอง	77
3.5 การออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้วและอีพ็อกซี่กับเส้นใยเซรามิก	81
3.6 การออกแบบส่วนผสมของพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้วเส้นใยเซรามิก	83
4.1 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้ว	96
4.2 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุอีพ็อกซี่กับเส้นใยเซรามิก	97
4.3 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้ว และเส้นใยเซรามิก	97
4.4 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดัดงอของวัสดุพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้ว	97
4.5 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดัดงอวัสดุอีพ็อกซี่กับเส้นใยเซรามิก	98
4.6 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดัดงอของวัสดุพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้ว และเส้นใยเซรามิก	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลการทดสอบความแข็ง ของวัสดุพอลิเอสเตอร์กับเส้นใยแก้ว	99
4.8 ผลการทดสอบความแข็ง วัสดุวัสดุอีพ็อกซี่กับเส้นใยเซรามิก	99
4.9 ผลการทดสอบความแข็ง ของวัสดุพอลิเอสเตอร์กับเส้นใยแก้ว และเส้นใยเซรามิก	99
4.10 ผลการทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุผสม	100
4.11 ผลการทดสอบการสึกกร่อนของวัสดุผสม	101

สาวพ.
ม.ทร.สุวรรณภูมิ

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การลี้กกร่อนของไบกัณฑ์ลผลิตกระแสไฟฟ้า	1
1.2 การเสียหายของกัณฑ์ลเนื่องจากการลี้กกร่อน	2
2.1 ไบกัณฑ์ลผลิตกระแสไฟฟ้า	6
2.2 ลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ส่งผลต่อสมบัติ	11
2.3 แผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพลิต	12
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า และความยาวของเส้นใย	14
2.5 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แบบต่างๆ	15
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เมทริกซ์ และ คอมโพลิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน	16
2.7 พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของพอลิเมอร์	23
2.8 กราฟแรงเค้นความเครียดแสดงค่าความแข็งแรงดึงและจุดจะนนของโพลิเมอร์	23
2.9 อธิพลของอุณหภูมิต่อกราฟแรงเค้นความเครียดของ (Polymethyl Methacrylate)	24
2.10 โครงสร้าง Spherulite ของ Polyethylene	26
2.11 เส้นใยแก้ว (Glass Fibers)	37
2.12 เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibers)	39
2.13 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)	39
2.14 ตัวทำแข็ง	40
2.15 ตัวถอดแบบ (Mold Release)	41
2.16 วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ	42
2.17 การจำแนกประเภทของวัสดุผสม	43
2.18 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น	45
2.19 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic)	45
2.20 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุวิสโคอิลาสติก	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.21 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic)	46
2.22 การเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเมื่อได้รับแรง	47
2.23 เครื่องทดสอบแรงดึง	47
2.24 หลักการทดสอบแรงดึง	47
2.25 เครื่องทดสอบแรงดัดงอ	50
2.26 หลักการทดสอบแรงดัดงอ	51
2.27 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด	51
2.28 การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด	53
2.29 ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบแรงดัดงอ	54
2.30 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึดสำหรับการดัดงอแบบ 4 จุด	54
2.31 เครื่องทดสอบความแข็ง	55
2.32 หลักการความแข็งร็อคเวลล์	56
2.33 ชิ้นงานใบพัดเกิดการสึกหรอร่วมกับการกัดกร่อน (Wear Corrosion)	57
2.34 เฟืองที่เสียหายด้วยกลไกการสึกหรอร่วมกับการล้าบนผิวหน้าจนเกิดการกะเทาะของ พื้นเฟือง	60
2.35 กังหันลมวิดน้ำเข้าสู่เรือ	61
2.36 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาน 1 กิโลวัตต์ 3 ชุด ณ. อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติ	63
2.37 ทูบกังหันลมขนาน 200 กิโลวัตต์ แห่งแรกในประเทศไทย ณ. เกาะล้าน	63
2.38 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาน 150 kW ของการการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	64
2.39 การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนานเล็ก	65
2.40 ใบกังหันลม	65
2.41 ลักษณะของแบบใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า	67
2.42 ตัวอย่างการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	68

3.1	เครื่องกัด (Milling)	73
-----	----------------------	----

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.2	เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester)	73
3.3	เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)	74
3.4	เครื่องทดสอบแรงดัด (Universal Testing Machine)	74
3.5	เครื่องยิงทราย	75
3.6	แม่แบบหล่อขึ้นรูป	80
3.7	การลงเว้าซี่ถอดแบบ	81
3.8	การตัดเส้นใยและซังน้ำหนัก	81
3.9	การซังดวงตัวทำแข็ง (Hardener Mekpo) และพอลิเมอร์	82
3.10	การลงน้ำยาพอลิเมอร์กับเส้นใย	82
3.11	ชิ้นงานพอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้ว	82
3.12	ชิ้นงานอีพ็อกซี่ผสมเส้นใยเซรามิก	83
3.13	วัสดุทำแม่แบบ	83
3.14	การลงเว้าซี่ถอดแบบ	84
3.15	การซังน้ำหนักเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิก	84
3.16	การซังพอลิเมอร์และดวงตัวทำแข็ง	84
3.17	การลงน้ำยาพอลิเมอร์กับเส้นใย	85
3.18	ชิ้นงานที่แข็งตัวและออกจากแบบ	85
3.19	ตัดแผ่นขึ้นทดสอบ	86
3.20	การกัดชิ้นงานทดสอบ	86
3.21	ชิ้นงานทดสอบแรงดึง	86
3.22	ชิ้นงานทดสอบแรงดัด	87
3.23	ชิ้นงานทดสอบความแข็ง	87
3.24	การติดตั้งขึ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ	88

3.25	การขาดของชิ้นงานทดสอบ	88
------	-----------------------	----

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.26	ชิ้นงานพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับหน้าด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก	89
3.27	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับ	90
3.28	การเพิ่มแรงให้กับตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ	90
3.29	ชิ้นงานทดสอบแรงดัดชนิดเสริมแรงด้วยเส้นใยหลังทำการทดสอบ	90
3.30	การวางชิ้นทดสอบความแข็ง	91
3.31	การทดสอบความแข็ง	92
3.32	เครื่องยิงทรายทดสอบการกัดกร่อน	92
3.33	ชิ้นงานทดสอบการสึกกร่อน	93
3.34	ทำการลงเว็ทซ์แม่แบบใบกั้งหิน	93
3.35	วางเส้นใยเพื่อเสริมแรง	94
3.36	ถอดแบบใบกั้งหินลม	94
3.37	ใบกั้งหินหลังการตกแต่งและทำสี	94
3.38	การประกอบและติดตั้งกั้งหินลม	95

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่	หน้า
3.1 ขั้นตอนการดำเนิน โครงการวิจัย	72
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	79
4.1 ความสามารถในการรับแรงของ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว	101
4.2 ความสามารถในการรับแรงของอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก	102
4.3 ความสามารถในการรับแรงของ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิก	102
4.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของวัสดุผสม	103
4.5 ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุผสม	103
4.6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกกร่อน	104

ส.อ.
ม.ท.ร.สุวรรณี

บทที่ 1

บทนำ

งานโครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในด้านความต้านทานแรงดึง แรงดัดงอและการทดสอบความแข็งของวัสดุ ซึ่งคอมโพสิตที่ทำจากพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยชนิด เส้นใย ได้แก่ พอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก และใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก ดังนั้น คณะผู้จัดทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้าข้อมูลและศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนำมาสร้างเป็น กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

1.1 ความสำคัญของปัญหา

งานโครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในด้านความต้านทานแรงดึง แรงดัดงอการทดสอบความแข็งของวัสดุและการกัดกร่อน เพื่อทำการศึกษาสมบัติวัสดุพอลิเมอร์ ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิกเพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกังหันลมผลิต กระแสไฟฟ้า ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้าข้อมูลและศึกษาคุณสมบัติของ วัสดุเพื่อนำมาสร้างเป็นกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าจะมี ส่วนประกอบหลักคล้ายๆกัน ซึ่งจะแตกต่างกันบ้างในเรื่องของรายละเอียด ดังนั้นประเภทของกัน หันลมจะแบ่งตามลักษณะการวางเพลลา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กังหันลมที่มีเพลลาในแกนนอน และกังหันลมที่มีเพลลาในแกนตั้ง ซึ่งใบของกังหันลมจะทำหน้าที่รับลมและปะทะเสียดสีกับกระแส ลมอย่างรุนแรงตามความเร็วของกระแสลมที่เกิดขึ้น ในขณะที่เดียวกันภายในกระแสลมย่อมปะปน กับฝุ่นละอองที่มีขนาดต่างๆปลิวมาปะทะกับใบของกังหัน โดยเฉพาะส่วนของสันใบ ก็จะทำให้เกิดการ เสียดสีและสึกกร่อนได้เร็ว ถ้าใบทำจากวัสดุที่มีความแข็งและความแข็งแรงต่ำทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม



ภาพที่ 1.1 การสึกกร่อนของใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 1.2 การเสียหายของกังหันลมเนื่องจากการสึกกร่อนของใบกังหัน

ผู้ดำเนินโครงการวิจัยมีแนวคิดว่าถ้าเรานำวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิกที่เป็นวัสดุผสมที่มีสมบัติที่ตีรวมหลายๆด้าน เช่น พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้ว จะทำให้วัสดุมีสมบัติดีขึ้น เพราะเป็นการรวมเอาจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์ กับจุดเด่นของเส้นใยแก้วเข้าไว้ด้วยกัน โดยเนื้อหลักของพอลิเมอร์ทำหน้าที่กระจายแรง ที่กระทำต่อวัสดุลงไประหว่าง เส้นใยแต่ละเส้น และพอลิเมอร์ยังทำหน้าที่ปกป้องเส้นใยไม่ให้เสียหาย เนื่องจากการเสียดสีและ การกระแทก ผลของการรวมพอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรง ทำให้วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตมีจุดเด่นหลายอย่าง ได้แก่ มีค่าความแข็งแรงและความแข็งตึง (Stiffness) สูง สามารถขึ้นรูปง่าย น้ำหนักเบา และทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ส่วน เส้นใยเซรามิกจะมีความแข็งแรงสูง มีโมดูลัสสูง มีการนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และทนทานต่อความร้อน และการสลายตัวเมื่อถูกความร้อนสูง ในบางกรณีเส้นใยเซรามิกสามารถทนความร้อนได้ถึง $1,800^{\circ}\text{C}$ และสามารถอยู่ในสถานะที่ถูกออกซิไดส์ และไม่ถูกออกซิไดส์ บางครั้งอาจใช้อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ถูกหลอมละลายโดยไม่ถูกทำลาย

ดังนั้นวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิก ย่อมมีสมบัติ ด้านความแข็งแรง ความแข็ง และการทนต่อสภาพอากาศที่ดี สามารถนำมาทำเป็นใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีความทนทาน และมีน้ำหนักเบากว่าวัสดุหลายๆ ชนิด ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมใบกังหันลม และอายุการใช้งานของกังหันนานขึ้น

1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความเหมาะสมของวัสดุในการใช้ทำใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงคด ทดสอบความแข็งและการทนต่อการสึกกร่อน

1.2.3 เพื่อคิดค้นวัสดุใหม่ๆในงานวิศวกรรมที่มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา

1.3 ขอบเขตการดำเนินการ

1.3.1 สร้างชิ้นงานทดสอบจากพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว โดยกระบวนการผลิตแบบทามือ ในอัตราส่วนผสม 70:30, 60:40 และ 50:50 จำนวน 50 ชิ้น

1.3.2 สร้างชิ้นงานทดสอบจากอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิกโดยกระบวนการผลิตแบบทามือ ในอัตราส่วนผสม 70:30, 60:40 และ 50:50 จำนวน 50 ชิ้น

1.3.3 สร้างชิ้นงานทดสอบจากพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วเคลือบทับผิวหน้าด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก โดยกระบวนการผลิตแบบทามือ ในอัตราส่วนผสม 70:30, 60:40 และ 50:50 จำนวน 50 ชิ้น

1.3.4 ทำการทดสอบทางกล ได้แก่

1. ทดสอบการต้านทานต่อแรงดึง
2. ทดสอบการต้านทานต่อแรงดัด
3. ทดสอบความแข็ง
4. ทดสอบการสึกกร่อน

1.3.5 สร้างใบกั้นหุ้มผลิตกระแสไฟฟ้าจากวัสดุผสมที่ทดลอง จำนวน 3 ใบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาข้อมูลวัสดุ และวิธีการทำชิ้นงานทดสอบรวมทั้งหลักการทำงานของใบกั้นหุ้มผลิตกระแสไฟฟ้า และวิธีการทำใบกั้นหุ้มผลิตกระแสไฟฟ้า

1.4.2 วางแผนและออกแบบการทดลอง

1.4.3 เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุที่เกี่ยวข้อง

1.4.4 สร้างชิ้นงานทดสอบ

1.4.5 ทำการทดสอบ ความทนต่อแรงดึง ความทนแรงดัดงอ ความแข็งและการทนต่อการสึกกร่อน

1.4.6 ประเมินผลและสรุปผล

1.4.7 สร้างใบกั้นหุ้มผลิตกระแสไฟฟ้าจากวัสดุที่ทำการทดลองที่มีสมบัติเหมาะสม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาทดลองเพื่อใช้ทำใบกั้นหุ้มผลิตกระแสไฟฟ้า

1.5.2 ได้วัสดุในงานวิศวกรรม สำหรับใช้ทำเป็นใบกั้นหุ้มที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา ทนต่อการสึกกร่อน และทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ทดแทนการใช้ไม้และโลหะ

1.5.3 สามารถนำความรู้ที่ได้ ไปประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไป

1.5.4 บูรณาการงานวิจัยกับการเรียนการสอน

1.5.5 สามารถ จัดสิทธิบัตร และเผยแพร่ความรู้งานวิจัย เพื่อชื่อเสียงของมหาวิทยาลัย

1.5.6 สามารถพัฒนาทำเป็นอุตสาหกรรมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม(SMEs)

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

ในการวิจัยโครงการ ศึกษาสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกั้นหุ้มผลผลิต กระแสไฟฟ้าครั้งนี้ ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์ วัสดุเสริมแรง วัสดุคอมโพสิต สมบัติทางกล ตลอดจนการออกแบบวัสดุผสม และการทดสอบวัสดุสำหรับนำไปใช้ทำใบกั้นหุ้ม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.1.1 คอมโพสิต(Composite) เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตที่จะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) ในเมทริกซ์นั้นหรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced Phase) คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็นสาม ประเภทใหญ่ ๆ คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composite) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-Reinforced Composite) และ คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composite) นอกจากนี้คอมโพสิตแต่ละประเภทยังสามารถแบ่งประเภทย่อย ๆ ได้อีก

2.1.2 พอลิเมอร์(Polymer) เป็นสสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาว หรือประกอบด้วยอะตอมนับหลายพันอะตอมมาเชื่อมต่อกัน คำว่า Poly หมายถึงมากหรือหลาย ๆ ส่วน Mer คือหนึ่งหน่วยเมื่อรวมกันแล้วความหมายจึงเป็นหลาย ๆ หน่วยที่มาต่อเชื่อมกัน โดยทั่วไป Mer หรือหน่วยซ้ำจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่หน่วยซ้ำจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีประเภทโควาเลนต์ ซึ่งพอลิเมอร์เป็นผลลัพธ์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน และแต่ละชนิดของพอลิเมอร์อาจมีสมบัติแตกต่างกัน เนื่องจาก ขนาดโซ่ของโมเลกุลหรือโครงสร้างเคมีของหน่วยซ้ำที่ต่างกัน พอลิเมอร์ปัจจุบันได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุดั้งเดิมได้แก่ ไม้ โลหะ แก้วหรือเซรามิก หากพิจารณาเปรียบเทียบกันคร่าว ๆ อาจพบว่าพอลิเมอร์มักจะแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุดั้งเดิมไม่ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก และสมบัติของพอลิเมอร์อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ตามเวลา

2.1.3 เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibers เป็นเส้นใยประเภทพอลิคริสตัลไลน์

(Polycrystalline) ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะคาร์ไบด์ของโลหะไนไตรด์ของโลหะหรือ ส่วนผสมอื่นๆ ในกรณีนี้ถือว่าซิลิกอนหรือโบรอนเริ่มมีการนำไปใช้งานกับด้านอากาศยาน นิวเคลียร์ และโรงงานเคมี เพราะงานเหล่านี้ต้องการเส้นใยที่มีความทนทานสูงและมีความคงทนความร้อนสูง และมีความคงทนต่อความร้อนมากกว่าเส้นใยแก้ว อีกประการมีความต้องการสร้างวัสดุที่มี สมรรถนะด้านเชิงกลที่ดีเยี่ยม เบา แต่แข็งแรง และทนความร้อนสูง

2.2 แนวความคิด

แนวคิดนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ ในด้านความต้านทานแรงดึง แรงดัด งอ และการทดสอบความแข็งของวัสดุ ที่ทำจากพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้น ใยเซรามิก เนื่องจากสังเกตเห็นปัญหาของใบกังหันลมของเก่าเกิดการชำรุดเนื่องจากวัสดุทำมาจากไม้ จึงไม่มีความสามารถในการต่อต้าน หรือต้านทานต่อตัวการทำลายไม้ต่างๆ ที่สำคัญ คือ รา ทำให้ไม้ ฝุ หรือเสียดสี มอดและปลวก เป็นแมลง ซึ่งอาศัยกินสารในไม้ หรือเนื้อไม้เป็นอาหาร ดังนั้นคณะ ผู้จัดทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะค้นคว้าข้อมูลและศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใย แก้วหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิกเพื่อนำมาสร้างเป็นกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้น ผู้วิจัยมีความคิดว่าถ้าเรานำวัสดุผสมที่มีสมบัติรวมหลายด้าน ทั้งด้านความแข็ง และการทนต่อ สภาพอากาศมาทำเป็นใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามี ความทนทาน และมีน้ำหนักเบากว่าวัสดุหลายๆ ชนิด ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมใบกังหันลม ผลิตกระแสไฟฟ้า และอายุการใช้งานของกังหันนานขึ้น ผู้วิจัยมีความคิดว่าถ้าเรานำวัสดุผสมที่มี สมบัติรวมหลายด้าน ทั้งด้านความแข็งแรง ความแข็ง และการทนต่อสภาพอากาศมาทำเป็นใบ กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีความทนทาน และมีน้ำหนัก เบากว่าวัสดุหลายๆ ชนิด ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า และอายุการ ใช้งานของกังหันนานขึ้น เพื่อเป็นแนวความคิดที่จัดทำโครงการที่แก้ปัญหา ดังรูป



ภาพที่ 2.1 ใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 เตชพัทธ์ พักเปี่ยม และ สันติสุข นันทิกุล [1] ได้ศึกษาผลของกระบวนการผลิตต่อสมบัติทางกลของวัสดุประกอบใยแก้ว อีพ็อกซีในที่สภาวะอุณหภูมิปกติเมื่อปี 2553 ได้ศึกษาผลของกระบวนการผลิตต่อสมบัติทางกลของวัสดุประกอบด้วยวิธีการอัดเย็นด้วยความดัน 4 ค่า ได้แก่ ความดันบรรยากาศ 3, 5 และ 7 บาร์ วัสดุที่เลือกนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ เส้นใย (E-glass) และอีพ็อกซีเรซิน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039/D 3039M – 00 (2006) สำหรับชิ้นงานที่มีการจัดเรียง [0/90]_{2s} และ ASTM D 3518/D 3518 จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณด้วยทฤษฎีลามิเนชันคลาสสิก ชิ้นแรกทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้างห้วงคอลลูมิเนียมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการอัดเย็น ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานได้ตั้งแต่ความดัน 1-40 บาร์ จากนั้นผลิตชิ้นงานทดสอบและทำการทดสอบ พบว่าชิ้นงานที่ทำการผลิตตั้งแต่ความดันตั้งแต่ 3 บาร์ขึ้นไปจะทำให้ค่าสัดส่วนของเส้นใยต่อปริมาตรและความหนาแน่นค่าคงที่ โดยค่าความแข็งแรงของวัสดุประกอบที่ผ่านกระบวนการผลิตที่ความดัน 3 บาร์ มีค่ามากที่สุด และค่าความคลาดเคลื่อนของสมบัติทางกลมีค่าไม่เกิน 10.25% แต่สำหรับนั้นมีค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -36.53% และ 8.40%

2.3.2 วิชัย โยชนรินทร์[2] ได้วิจัยพัฒนา สาธิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ มีจุดมุ่งหมายหลักคือสามารถสร้างต้นแบบและการใช้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมอย่างเหมาะสม โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้านั้นมีต้นทุนกำเนิดมาจากประเทศในแถบยุโรปหรือประเทศที่มีความเร็วลมสูง ทำให้การออกแบบย่อมต้องให้เหมาะสมกับความลมเฉลี่ยค่อนข้างสูงตามไปด้วย ประเทศในแถบยุโรปซึ่งจะมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7-8 เมตรต่อวินาที นั้นมีความแตกต่างสูงมากกับลมในประเทศไทยหรือประเทศในแถบร้อนที่มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่แค่เพียง 3-4 เมตรต่อวินาทีเท่านั้นดังนั้นการใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอาจไม่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับประเทศที่มีลมต่ำ หากต้องการนำกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาใช้งานจึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมขึ้นเองในประเทศ ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษา และวิจัยรวมทั้งการผลิตกังหันลมต้นแบบขึ้นมา 2 ชนิดคือกังหันลมแนวแกนนอนจำนวน 1 ตัว กังหันลมแนวแกนตั้งจำนวน 1 ตัว และนำมาเปรียบเทียบกับกังหันลมแนวแกนนอนที่นำเข้ามาจากต่างประเทศอีก 1 ตัว ซึ่งกังหันลมทั้ง 3 ตัวมีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดเท่ากัน คือ 5 กิโลวัตต์ผลจากการวิเคราะห์เห็นได้ว่ากังหันลมแนวแกนตั้งที่ผลิตในประเทศไทยต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเนื่องด้วยการเริ่มหมุนตัวได้ ที่ความเร็วลมสูงเกินไป สำหรับความสำเร็จเกิดขึ้นกับกังหันลมแนวแกนนอนที่ผลิตในประเทศไทยสามารถทำงานได้ดีกว่ากังหันลมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศโดยคิดประสิทธิภาพรวมอยู่ที่ประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ขณะที่กังหันลม

นำเข้ามาจากต่างประเทศหากนำมาใช้งานที่ความเร็วลมต่ำอาจมีประสิทธิภาพในการทำงานเพียง 15-20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ทำให้การผลิตไฟฟ้าต่อวันมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นจากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ทำให้ได้ต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนนอนขนาด 5 กิโลวัตต์ที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้าเหมาะสมกับลมในประเทศที่มีความเร็วลมเฉลี่ยที่ 3-4 เมตรต่อวินาทีเพื่อนำไปใช้งานในพื้นที่ต่างๆได้ต่อไปโดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมที่ได้ทำการศึกษาและวิจัยและผลิตในประเทศแบบแนวแกนนอนขนาด 5 กิโลวัตต์ผลิตไฟฟ้าได้ 120 หน่วยทางไฟฟ้าในขณะที่กังหันลมนำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีกำลังการผลิตเท่ากันผลิตไฟฟ้าได้ 20 หน่วยจากผลการทดสอบ 1 เดือน

2.3.3 สรุต ศรีสันติสุข ,สัมพันธ์ ไชยเทพ ,ดามร บัณฑิตรัตน์และ ชาย รังสิยากุล [3] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์ ใน อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ไผ่ในจังหวัดเชียงใหม่มีเศษใยไผ่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งเศษใยไผ่อาจจะสามารถใช้เสริมแรงวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เป็นแผ่นขึ้นรูปต่างๆได้ การนำเศษใยไผ่มาเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตจะช่วยลดต้นทุนการผลิตวัสดุแผ่นได้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาความต้านทานแรงดึง และ โมดูลัสแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตแผ่นทำจากโพลีเอสเตอร์เรซินเสริมแรงด้วยเศษใยไผ่ ซึ่งเป็นเส้นใยชนิดสั้น เปรียบเทียบกับการเสริมแรงของเส้นใยชนิดยาว ได้แก่ ไผ่ ไผ่แก้ว และคาร์บอนไฟเบอร์และผลการทดสอบแรงดึงพบว่าคาร์บอนไฟเบอร์มีสมบัติที่ดีที่สุด ส่วนเส้นใยไผ่ชนิดยาวมีสมบัติใกล้เคียงกับไผ่แก้ว โดยวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ชนิดยาวจะมีความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าเล็กน้อย แต่มีโมดูลัสสูงกว่าไผ่แก้ว ซึ่งอาจใช้ทดแทนไผ่แก้วในการเสริมแรงได้ ส่วนเศษใยไผ่มีสมบัติด้อยที่สุด เพราะไม่ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง แต่ช่วยเสริมโมดูลัสแรงดึงเล็กน้อย ดังนั้นหากจะนำเศษใยไผ่ไปใช้เสริมแรงแผ่นคอมโพสิต ต้องใช้กับงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา และต้นทุนต่ำ

2.3.4 กษมา จารุกاجرและวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์[4] ได้ศึกษาพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตจากเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อน ผลการทดสอบพบว่าค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยังก์ของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่เส้นใยป่านศรนารายณ์ทั้งกรณีดัดแปรด้วยความร้อน และทางเคมี ในทางตรงข้ามค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักและค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีค่าน้อยกว่าพอลิโพรพิลีน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการดัดแปรทั้งสองวิธีจะเห็นว่า ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และมอดูลัสของยังก์จะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับกรณีพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีการเติมยางพบว่า ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และมอดูลัสของยังก์มีค่าลดลง ส่วนค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักและค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มี

แนวโน้มนำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเติมยางทั้งกรณีที่ใช้เส้นใยผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนและทางเคมี พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยังก็ใกล้เคียงกัน โดยพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีการเติมยาง EPDM จะมีค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และมอดูลัสของยังที่สูงกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย ส่วนค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหัก และค่าความทนต่อแรงกระแทกนั้น พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเติมยางธรรมชาติจะมีค่าสูงกว่ายาง EPDM มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เรื่องพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตจากเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อน

2.3.5 พฤติพวงค์ พันธมนัส โสภา [5] ได้ศึกษาความคงทนและสมบัติของเส้นใยปอกระเจาที่ปรับปรุงผิวผสมในวัสดุยางคอมโพสิต งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการปรับปรุงผิวของเส้นใยต่อความคงทนและสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติและสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต การปรับปรุงผิวเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสามแบบคือการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นการทา ความสะอาดสิ่งสกปรกต่างๆบนผิวของเส้นใย การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้น้ำ ยางเพื่อให้ น้ำ ยางเคลือบผิวของเส้นใยและทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างยางที่เป็นแมทริกซ์และเส้นใยที่เป็นสารเสริมแรงและการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับน้ำ ยาง จากการศึกษาเรื่องเวลาที่ใช้ควบคุมความหนาของยางบนผิวของเส้นใยพบว่าเวลาที่มีผลน้อย-มากเมื่อใช้ปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำ ยางธรรมชาติ (DRC) 1050% แต่เมื่อปริมาณ DRC เป็น 60% ต้องอาศัยเวลาเพื่อให้ น้ำ ยางแทรกเข้าไปในเส้นใยเนื่องจากน้ำ ยางมีความหนืดสูง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของยางบนผิวของเส้นใยอย่างมากคือปริมาณยางแห้งในน้ำ ยาง โดยเมื่อปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำ ยางเพิ่มสูงขึ้น น้ำ หนักของยางแห้งที่เกาะบนผิวของเส้นใยก็เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาความคงทนทางความชื้นของเส้นใยพบว่าหลังจากที่เส้นใยได้รับการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียวกัน ให้เส้นใยมีค่าการดูดความชื้นที่เพิ่มขึ้นจากเส้นใยเดิม 9.164% เป็น 11.072% แต่เมื่อนำ เส้นใยไปปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางพบว่าค่าการดูดความชื้นของเส้นใยลดลงตามปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำ ยางที่เพิ่มขึ้น เส้นใยที่มีค่าการดูดความชื้นต่ำ ที่สุดคือเส้นใยปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางที่มี DRC 60% ซึ่งมีค่าความชื้นเพียง 1.554% จากการศึกษาสมบัติของเส้นใยพบว่าค่าความเหนียวของเส้นใยมีค่าลดลง 2 เท่า หลังจากมีการปรับปรุงผิว จากเดิมค่าความเหนียวของเส้นใยปอกระเจาอยู่ที่ 2.10 gf/den เมื่อปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่าความเหนียวของเส้นใยลดลงเหลือเพียง 1.09 gf/den และเมื่อปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางก็ยิ่งทำให้ค่าความเหนียวของเส้นใยลดลงตามลำดับ ค่าการทนแรงดึงของเส้นใยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นหลังจากปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางธรรมชาติโดยเส้นใยที่แสดงค่าการทนแรงดึงได้สูงที่สุดคือเส้นใยที่ปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางที่มี DRC 30% โดยมีค่าถึง 1.058 MPa ซึ่งเส้นใยเดิมมีค่าการทนแรงดึงเพียง 0.922

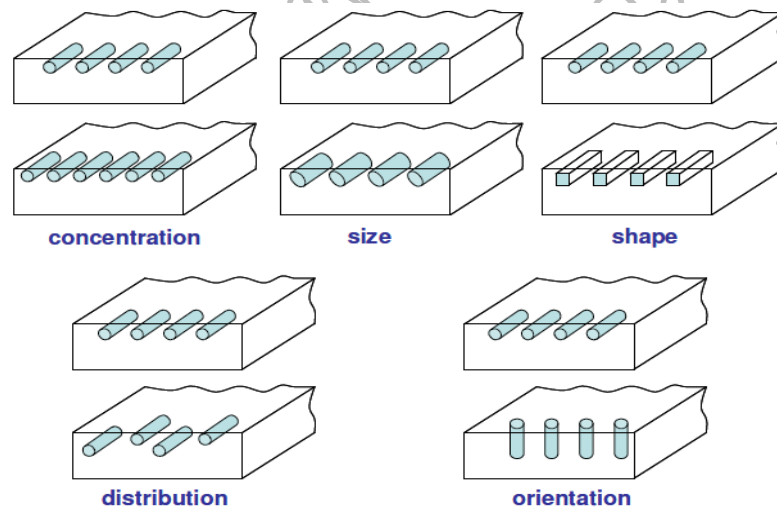
MPa ค่ามอดูลัสของเส้นใยมีค่าลดลงหลังจากปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยาง ส่วนค่าระยะยืดของเส้นใยมีค่าลดลงเล็กน้อยหลังจากปรับปรุงผิวด้วยน้ำที่มีปริมาณ DRC 1040% และเพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 50-60%DRC ยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับน้ำ ยางมีค่าการทนแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้นคือ 13.50, 11.80, 9.90 และ 7.30 MPa ตามลำดับ แต่ยังคงสูงกว่ายางคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งมีค่าการทนแรงดึงคือ 8.70, 5.30, 4.70 และ 5.50 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแข็งที่ผิวและค่ามอดูลัสที่ 100% และ 300% มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้นและพบว่าคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ปรับปรุงผิวกับคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% และ 300% และค่าความแข็งที่ผิวที่ดีที่สุดเป็นผลมาจากค่าการที่คอมโพสิตมีแรงดึงดูระหว่างเส้นใยกับยางดี ซึ่งดูได้จากค่า Qf/Qg และค่า $1/Q$ จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตพบว่า การที่คอมโพสิตแสดงค่าการทนแรงดึงที่ดีขึ้นเป็นผลมาจากช่องว่างระหว่างเส้นใยกับยางลดลง ซึ่งคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปรับปรุงผิวด้วยน้ำ ยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 10% กับคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับน้ำ ยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 10% แสดงถึงช่องว่างที่เล็กที่สุด ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เรื่องศึกษาความคงทนและสมบัติของเส้นใยปอกระเจาที่ปรับปรุงผิวผสมในวัสดุยางคอมโพสิต

2.3.6 เอกกวี เสรี,เดชา นาคจันทร์และเรืองชัย รักชาติ [6] ได้ศึกษาสมบัติวัสดุผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยและพอลิเมอร์กับอนุภาคเพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกั้นล้มผลิตรกระแสไฟฟ้า จากการศึกษาปัญหา ผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการออกแบบการทดลองโดยการสร้างตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ 2 ประเภทคือประเภทเส้นใยและประเภทอนุภาค ได้แก่ อีพ็อกซี เรซินผสมเส้นใยคาร์บอน อีพ็อกซี เรซินผสมเส้นใยแก้ว อีพ็อกซีเรซินผสมเส้นใยอะลูมิเนียม อีพ็อกซีเรซินผสมอนุภาคคาร์บอน อีพ็อกซี เรซินผสมอนุภาคแก้วและ อีพ็อกซี เรซินผสมอนุภาคอะลูมิเนียม ในอัตราส่วน 2.5:1 นำวัสดุที่ได้ไปทดสอบสมบัติการทนแรงดึง แรงดัดและความแข็งและทำการเปรียบเทียบสมบัติวัสดุแต่ละชนิด จากนั้นเลือกวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ทำกั้นล้มผลิตรกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองที่ได้จากวัสดุ 2 ประเภท วัสดุประเภทเส้นใยที่มีสมบัติทางกลดีที่สุดคือ วัสดุอีพ็อกซีผสมเส้นใยคาร์บอนมีสมบัติทนแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 1,550 N/mm² แรงดัดสูงสุดเฉลี่ย 352 N/mm² และความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 107 HRL รองลงมาเป็นวัสดุอีพ็อกซีผสมเส้นใยแก้วที่มีสมบัติทนแรงดึงเฉลี่ย 965 N/mm² สมบัติทนแรงดัดเฉลี่ย 171 N/mm² ความแข็งเฉลี่ย 80 HRL วัสดุประเภทอนุภาคที่มีสมบัติทางกลดีที่สุดคือวัสดุ อีพ็อกซีผสมอนุภาคแก้วมีสมบัติทนแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 41 N/mm² แรงดัดสูงสุดเฉลี่ย 70 N/mm² และความแข็งสูงสุดเฉลี่ย 105 HRL วัสดุที่ใช้ทำใบกั้นล้มผลิตรกระแสไฟฟ้า ส่วนของวัสดุเนื่องจากใช้อีพ็อกซีผสมเส้นใยแก้ว เพราะมีราคาถูกกว่าวัสดุอีพ็อกซีผสม

เส้นใยคาร์บอน ในส่วนของวัสดุหุ้มผิวใช้ฟ็อกซ์ผสมเส้นใยคาร์บอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี นายเอกวิ เสรี นายเดชา นาคจันทร์และนายเรืองชัย รักษาติ เรื่องศึกษาสมบัติวัสดุผสมพอลิเมอร์กับเส้นใยและพอลิเมอร์กับอนุภาคเพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกั้นหุ้มผลิตกระแสไฟฟ้า

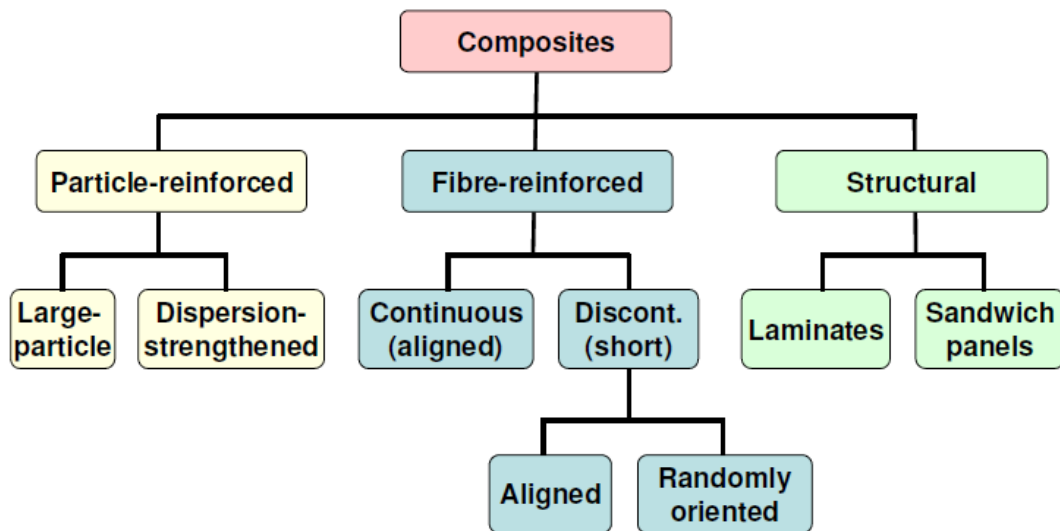
2.4 คอมโพสิต (Composite)

สุภาสินี ลิ้มปานภาพ[7] ได้กล่าวไว้ดังนี้ คอมโพสิต (Composite) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกันโดยทั่วไปแล้วคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) ในเมทริกซ์นั้นหรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (Reinforced Phase) ยกตัวอย่างคอมโพสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (Lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber) หรือกระดูกซึ่งเป็นคอมโพสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (Apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิตได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจาย และการจัดเรียงตัว

คอมโพสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced Composite) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composite) และคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composite) นอกจากนี้แล้ว คอมโพสิตแต่ละประเภทยังสามารถเป็นประเภทย่อยๆได้อีก ดังแสดงในแผนผัง



ภาพที่ 2.3 แผนผังการแบ่งประเภทของคอมโพสิต

2.4.1 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค คือคอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) นี้มีรูปร่างได้หลายแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้นคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-Particle Composite) และคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-Strengthened Composite)

1) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ คำว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในที่นี้ คือ เรามองภาพรวมของอนุภาคไม่ใช่มองในระดับอะตอมหรือ โมเลกุล อย่างไรก็ตามเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพ ขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่จนเกินไปและอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นด้วยค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอมโพสิตที่เกิดจากสององค์ประกอบ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบทั้งสองซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ กฎของการผสม โดยที่ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของคอมโพสิตนั้น ๆ จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าขอบเขตสูงสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ($E_c (u)$) กับค่าขอบเขตต่ำสุดของค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ($E_c (l)$) ของคอมโพสิตค่า $E_c (u)$ และค่า $E_c (l)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$E_c (U) = E_m V_m + E_p V_p \dots \dots \dots 2.1$$

$$E_c (l) = \frac{E_m E_p}{V_m + V_p E_m} \dots \dots \dots 2.2$$

เมื่อ E คือค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และ V คือสัดส่วนโดยปริมาตร และสัญลักษณ์ตัวห้อย c , m และ p แทนคอมโพสิตเมทริกซ์ และอนุภาค ตามลำดับ ตัวอย่างของคอมโพสิตประเภทนี้ที่รู้จักกันดีคือคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยเมทริกซ์ของซีเมนต์โดยมีทรายและกรวดทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่เพื่อช่วยในการเสริมแรงและนอกจากจะช่วยเสริมแรงแล้ว การที่ใส่ทรายกับกรวดลงไปผสมทำให้สามารถลดปริมาณของซีเมนต์ซึ่งมีราคาแพงกว่า จึงเป็นการลงทุนอีกทางหนึ่งด้วย

2) คอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาคในคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคประเภทนี้ อนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะมีขนาดเล็กกว่าคอมโพสิตที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อยู่มากโดยทั่วไปแล้วอนุภาคจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 นาโนเมตร อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์ (Particle-Matrix Interaction) จะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระดับอะตอมหรือโมเลกุล กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงนี้จะคล้ายกับกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ตัวอย่างของคอมโพสิตประเภทนี้ เช่น นิกเกิล ทีดี (TD Nickel) คือ นิกเกิลอัลลอยที่เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงโดยการเติมอนุภาคของทอเรีย (Thoria, ThO_2) ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้จากการเติมผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-50 นาโนเมตร ปริมาณ 15-30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรลงไปในช่วงวัลคาไนซ์ (Vulcanised Rubber) เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความแกร่ง และความต้านทานการสึกหรอให้กับยาง

2.4.2 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ[8] ได้สรุปไว้ดังนี้ เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะและในรูปของมอดูลัสจำเพาะซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

1) ส่วนประกอบของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

ก) เส้นใย วัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยมีหลายรูปแบบดังนี้

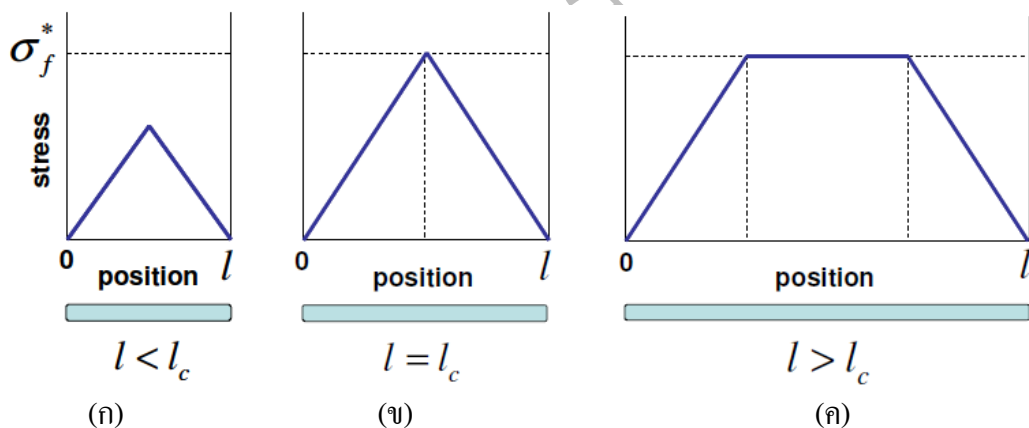
วิสเกอร์ (Whisker) คือ ผลึกเดี่ยวที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมากๆ มีสภาพความสมบูรณ์ของการเป็นผลึกสูงและมีความแข็งแรงสูงโดยทั่วไปแล้ววิสเกอร์จะมีราคาแพงมาก เนื่องจากเตรียมได้ยาก ยกตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา เป็นต้น

ไฟเบอร์ (Fiber) คือ เส้นใยของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพหุผลึก หรือเป็นสัณฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นพอลิเมอร์หรือ เซรามิก ยกตัวอย่างเช่นอะรามิด (Aramid) แก้ว คาร์บอน โบรอนออกไซด์ และอะลูมินา เป็นต้น

ลวดเล็ก (Fine Wire) โดยทั่วไปแล้วลวดเล็กจะมีขนาดใหญ่กว่าวิสเกอร์และไฟเบอร์และมักจะหมายถึงโลหะ อย่างเช่น เหล็กกล้า โมลิบดีนัม และทังสแตน

ข) เมทริกซ์ เมทริกซ์อาจเป็นได้ทั้ง โลหะ เซรามิก หรือ พอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วมักมีความเหนียวที่ดี หน้าที่หลักของเมทริกซ์ก็คือยึดไฟเบอร์ไว้ด้วยกัน และเป็นตัวกลางที่ส่งผ่านแรงที่มากระทำไปยังไฟเบอร์ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของไฟเบอร์เนื่องจากการขัดถูหรือปฏิกิริยาเคมี แรงของพันธะยึดติด (Adhesive Bonding Force) ระหว่างไฟเบอร์กับเมทริกซ์ควรมีค่าสูงพอ เพื่อป้องกันการที่ไฟเบอร์จะถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์

2) อิทธิพลของความยาวเส้นใยที่มีต่อสมบัติของคอมโพสิตความยาวของเส้นใย มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงและความแข็งดึงของคอมโพสิต และเพื่อให้คอมโพสิตมีสมบัติดังกล่าวที่ดี เส้นใยที่นำมาเสริมแรงควรมีค่าความยาววิกฤติค่าหนึ่ง ค่าความยาววิกฤตินี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย หรือค่าความแข็งแรงเฉือน ณ จุดคราก (Shear yield Strength) ของเมทริกซ์ แล้วแต่ค่าใดน้อยกว่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างความยาววิกฤติของเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ความต้านทานแรงดึงของเส้นใย และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย

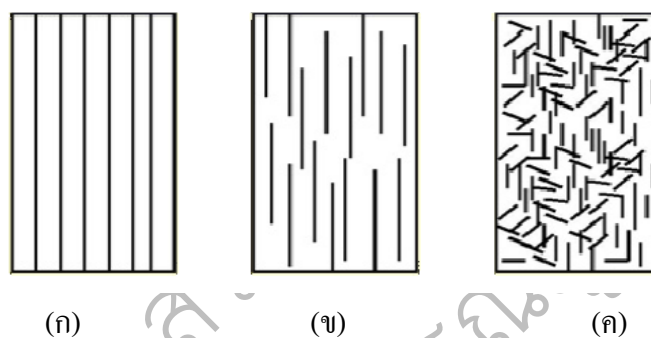


ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_f^* และความยาวของเส้นใย (1) เมื่อ (ก) $l < l_c$

(ข) $l = l_c$ และ (ค) $l > l_c$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ_f^* และความยาวของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อเส้นใยมีความยาวน้อยกว่า l_c (รูปที่ 2.14(ก)) เส้นใยจะไม่สามารถรับแรงได้มากถึงค่า σ_f^*

แต่เมื่อเส้นใยมีความยาวเท่ากับ l_c (รูปที่ 2.4(ข)) บริเวณกึ่งกลางของความยาวเส้นใยจะสามารถรับแรงได้ถึงค่า σ_f^* และถ้าเส้นใยมีความยาวมากกว่า l_c (รูปที่ 2.4(ค)) ช่วงของความยาวเส้นใย ที่สามารถรับแรงได้ถึงค่า σ_f^* จะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงด้วยเส้นใยดีขึ้น ด้วยเราสามารถแบ่งประเภทของเส้นใยตามความยาวของมันได้เป็นสองประเภทคือ เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber) ในกรณีเส้นใยต่อเนื่องหมายถึงเส้นใยมีความยาวมากกว่า l_c มากๆ (โดยทั่วไปคือมากกว่า $15 l_c$) ส่วนเส้นใยไม่ต่อเนื่องหมายถึงเส้นใยมีค่าความยาวน้อยกว่า l_c นอกจากนี้เมื่อนำเส้นใยไปผสมกับเมทริกซ์ทำให้เกิดเป็นคอมโพสิต จะสามารถจัดเรียงตัวได้สามแบบด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยในเมทริกซ์แบบต่างๆ

(ก) เส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน

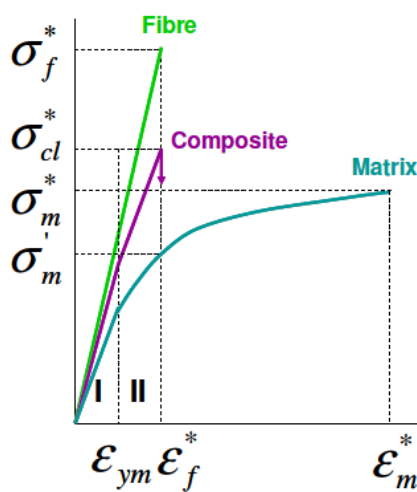
(ข) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน

(ค) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

รูปที่ 2.5 (ก) คือคอมโพสิตประเภทเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน นั่นคือเส้นใยมีความยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิตและเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยที่ดี ส่วนรูปที่ 2.5 (ข) คือกรณีที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน นั่นคือเส้นใยไม่ยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิต แต่ยังคงเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยไม่ดีเท่าในกรณีแรกสุดท้ายรูปที่ 2.5 (ค) คือเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ กรณีนี้ประสิทธิภาพการเสริมแรงจะต่ำที่สุดจากทั้ง สามประเภทที่กล่าวมา ซึ่งวิธีการคำนวณค่าความแข็งแรงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยประเภทต่างๆ

3) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าคอมโพสิตประเภทเสริมแรงเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก)) คือ

คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความยาวตลอดช่วงความยาวของคอมโพสิตและเรียงตัวขนานกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงในทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยที่ดี ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่ามอดูลัสยืดหยุ่น เมื่อคอมโพสิตประเภทนี้ได้รับแรงในทิศทางขนานกับการเรียงตัวของเส้นใยอย่างไรก็ตามถ้าคอมโพสิตตัวเดียวกันนี้ได้รับแรงในทิศตั้งฉากกับการเรียงตัวของเส้นใยแล้ว ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น(หรือประสิทธิภาพในการเสริมแรง) จะลดลงเป็นอย่างมาก ลักษณะที่สมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมากเช่นนี้ทำให้เราสามารถเรียกคอมโพสิตประเภทนี้ได้ว่าเป็นวัสดุที่มีสภาพแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ที่สูง



- σ_m^I ความเค้นของเมทริกซ์เมื่อเส้นใยแตกหัก
- σ_m^* ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
- σ_{cl}^* ความเค้นสูงสุดของคอมโพสิต
- σ_f^* ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
- ϵ_{ym} ความเครียด ณ จุดครากของเมทริกซ์
- ϵ_f^* ความเครียดสูงสุดเมื่อเส้นใยแตกหัก
- ϵ_m^* ความเครียดสูงสุดเมื่อเมทริกซ์แตกหัก

ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใย เมทริกซ์ และคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน

ก) พฤติกรรมความเค้นความเครียดแบบดิ่ง เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใยประเภทเสริมแรงเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เมื่อได้รับแรงในแนวขนานกับเส้นใย จะมีพฤติกรรมความเค้นความเครียดแบบดิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.6 เริ่มต้นในช่วงของการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นของเมทริกซ์ (อยู่ในช่วงที่ I) เมื่อให้แรงดึงทั้ง เส้นใยและเมทริกซ์จะมีการยืดออก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเป็นเส้นตรง เมื่อความเครียดมีค่ามากกว่า (เข้าสู่ช่วงที่ II) เมทริกซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร และเมื่อให้แรงเพิ่มขึ้นจนความเครียดมีค่าเท่ากับ ϵ_f^* จะเกิดการแตกหักของเส้นใย ดังนั้นความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูงสุดของคอมโพสิตจะมีค่าเท่ากับ σ_{cl}^* และ

ข) พฤติกรรมยืดหยุ่น เมื่อทิศทางการให้แรงขนานกับเส้นใย ในกรณีที่พันธะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์มีความแข็งแรงมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจากเส้นใยและเมทริกซ์จะมีการเปลี่ยนรูปไปพร้อมๆกัน หรือที่เรียกว่าสถานะความเครียดเท่ากัน แรงที่คอมโพสิตรองรับ (F_c) จะมีค่าเท่ากับแรงที่เมทริกซ์รองรับ (F_m) รวมกับแรงที่เส้นใยรองรับ

ค) พฤติกรรมยืดหยุ่นเมื่อได้รับแรงกระทำในทิศตั้งฉากกับเส้นใย พิจารณาคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและขนานที่ได้รับแรงกระทำในทิศตั้งฉากกับเส้นใยถ้าอยู่ในสถานะความเค้นเท่ากัน

ง) ความต้านทานแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใยของ คอมโพสิตแบบเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน ในกรณีที่ให้ออกแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใยของคอมโพสิตแบบเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เราสามารถหาค่าความต้านทานแรงดึงในแนวขนานของคอมโพสิตนี้ (σ_{cl}^*)

จ) ความต้านทานแรงดึงในแนวตั้งฉากกับเส้นใย ค่าความต้านทานแรงดึงในแนวตั้งฉากกับเส้นใยมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยยกตัวอย่างเช่น สมบัติของเส้นใยและเมทริกซ์ ช่องว่างหรือรูพรุนในชิ้นงานและความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยกับ เมทริกซ์ เราสามารถแก้ไขได้โดยปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์ ค่าความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งในแนวขนานและตั้งฉากกับเส้นใยแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (ปริมาณของไฟเบอร์กลาสอยู่ที่ประมาณ 50 โดยปริมาตร)

วัสดุ	ความต้านทานแรงดึงใน แนวขนานกับเส้นใย (MPa)	ความต้านทานแรงดึงใน แนวตั้งฉากกับเส้นใย (MPa)
Glass-Polyester	700	20
Carbon-Epoxy	1,000	35
Kevlar-Epoxy	1,200	20

ที่มา : สุภาสินี ลิ้มปานภาพ [7]

4) คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกัน เส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องที่ใช้ในคอมโพสิตประเภทนี้เป็นได้ทั้งเส้นใยแก้ว คาร์บอน และอะรามิด โดยที่คอมโพสิตประเภทนี้สามารถมีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นและความต้านทานแรงดึงได้สูงถึง 90% และ 50% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องความแข็งแรงในทิศทาง

กับเส้นใยสามารถพิจารณาได้สองกรณีคือ กรณีที่เส้นใยมีความยาว (l) มากกว่าค่า l_c และเส้นใยมีความยาวน้อยกว่าค่า l_c ในกรณีที่เส้นใยมีความยาวมากกว่าค่า l_c

5) คอมโพลิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นระเบียบในกรณีที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในเมทริกซ์ คอมโพลิตนั้นจะมีค่ามอดูลัส (E_{cd}) เท่ากับ

$$E_{cd} = KE_f V_f + E_m V_m \dots \dots \dots 2.3$$

เมื่อ K คือ Fiber Efficiency Parameter (ขึ้นอยู่กับค่า V_f and E_f/E_m ratio) โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 ตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าในกรณีที่เส้นใยทุกเส้นขนานกันประสิทธิภาพของการเสริมแรงจะสูงสุด เมื่อให้ความเค้นในทิศทางกับเส้นใย และจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด (เท่ากับ 0) เมื่อให้ความเค้นในทิศตั้งฉากกับเส้นใย นั่นคือเปรียบเทียบเสมือนเป็นการเสริมแรงด้วยอนุภาค

ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมื่อมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยและทิศทางของความเค้นต่างกัน

การจัดเรียงตัวของเส้นใย	ทิศทางของความเค้น	ประสิทธิภาพของการเสริมแรง
เส้นใยทุกเส้นขนานกัน	ขนานกับเส้นใยตั้งฉากกับเส้นใย	10
เส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอในระนาบเฉพาะหนึ่งๆ	ทุกทิศทางในระนาบนั้น ๆ	3/8
เส้นใยกระจายตัวไม่เป็นระเบียบแต่สม่ำเสมอในสามมิติ	ทุกทิศทาง	1/5

ที่มา : สุภาสินี ลิ้มปานภาพ [7]

จากตารางเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นจำเพาะ ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสของความยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาตรของเส้นใยเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดตัวของคอมโพลิต จะลดลงจากพอลิเมอร์บอนด์ที่ไม่เสริมแรงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 2.3 สมบัติของพอลิคาร์บอนเนตทั้งแบบที่ไม่เสริมแรง และเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว แบบไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นระเบียบ

สมบัติ	ไม่เสริมแรง	ปริมาณของเส้นใย (%)		
		20	30	40
Specific gravity	1.19-1.22	1.35	1.43	1.52
Tensile strength [MPa (ksi)]	59-62 (8.5-9.0)	110 (16)	131 (19)	159 (23)
Modulus of elasticity [GPa (106 psi)]	2.24-2.345 (0.325-0.340)	5.93 (0.86)	8.62 (1.25)	11.6 (1.68)
Elongation (%)	90-15	4-6	3-5	3-5

ที่มา : สุภาสินี ลิ้มปานภาพ [7]

6) กระบวนการผลิตคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถผลิตได้หลายวิธีในที่นี้จะกล่าวถึงสองกระบวนการด้วยกัน คือ พัลทรูชัน (Pultrusion) และการพันใยแก้ว (Filament Winding)

ก) พัลทรูชัน (Pultrusion) กระบวนการพัลทรูชันเริ่มต้นจากนำม้วนเส้นใยมาเรียงไว้จากนั้นทำการดึงเส้นใยออกจากม้วนผ่านแผ่นนำทาง (Guide Plate) แล้วนำเข้าสู่อ่างที่มีพอลิเมอร์เหลวอยู่ พอลิเมอร์เหลวจะเคลือบเส้นใยจากนั้นจะถูกอบให้แข็งตัว (Curing) ก่อนที่จะผ่านขั้นตอนก่อนตัดให้ได้ขนาดที่ต้องการเป็นขั้นตอนสุดท้ายขั้นตอนของกระบวนการพัลทรูชัน

โดยทั่วไปแล้ว พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์คือ พอลิเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ หรืออีพ็อกซี เรซินส่วนเส้นใยที่ใช้จะเป็นเส้นใยแก้ว คาร์บอน หรืออะรามิด โดยจะทำการเติมเส้นใยที่ประมาณ 40-70 เปอร์เซ็นต์ของเมทริกซ์

ข) การพันใยแก้ว (Filament Winding) กระบวนการพันใยแก้วมีขั้นตอนเริ่มต้นคล้ายกับวิธีพัลทรูชัน คือดึงเส้นใยผ่านไปยังพอลิเมอร์เหลว แต่หลังจากนั้นจะนำเส้นใยไปพันรอบแกนด้วยรูปแบบการพันใยแก้วแบบต่างๆ วิธีการพันใยแก้วนี้มักใช้ในการผลิตรูปทรงแบบกลวง ชิ้นงานที่ได้จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงมาก ซึ่งมีทั้งแบบ Hoop ,Hoop and Helical, Multiple Helical และ Longitudinal และแสดงตัวอย่างของผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่ได้จากกระบวนการพันใยแก้วซึ่งมีทั้งท่อกลวงตรง ท่อข้องอ และท่อสามแฉก เป็นต้น

7) คอมโพสิตแบบไฮบริด (Hybrid Composite) คอมโพสิตแบบไฮบริดเป็นคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมากกว่าหนึ่งชนิด ยกตัวอย่างเช่น คอมโพสิตแบบไฮบริดของพอลิเมอร์

เรซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรง ความแข็งดึงสูง น้ำหนักเบา แต่ราคาแพง ในขณะที่เส้นใยแก้วอาจแข็งแรงไม่เท่าแต่มีราคาถูกกว่าจึงนำมาใช้ผสมกัน และทำให้คอมโพสิตแบบไฮบริดที่ได้มีความแข็งแรง ความแข็งดึง และความต้านทานการกระแทกสูงขึ้นตัวอย่างการใช้งานวัสดุนี้เช่น ชิ้นส่วนโครงสร้างของยานพาหนะ (ทั้ง ทางบก น้ำ และอากาศ) อุปกรณ์กีฬา และชิ้น ส่วนงานทางการแพทย์ที่มีน้ำหนักเบา (Light weight Orthopaedic Component)

2.4.3 คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composite) สุภาสิณี ลิ้มปานานภาพ [7] ได้สรุปไว้ว่า คอมโพสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและคอมโพสิตสมบัติของคอมโพสิต โครงสร้างนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้วยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย เราสามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้เป็นสองประเภทคือ คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar Composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel)

1) คอมโพสิตแบบชั้น คอมโพสิตแบบชั้นประกอบด้วยแผ่นชีท (Sheet) ที่มีความแข็งแรงสูงในทิศทางเดียวมาเรียงซ้อนกัน ยกตัวอย่างเช่นแผ่นคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจัดเรียงตัวขนานกัน แล้วนำแต่ละแผ่นมาซ้อนกันจนได้เป็นคอมโพสิตแบบชั้นเพื่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงควรเรียงแผ่นชีทแบบสลับทิศทางขอเส้นใย

2) ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel) ผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชเป็นคอมโพสิตโครงสร้างประเภทหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแกนกลางหรือที่เรียกว่า (Core) และประกบที่ด้านบนและล่างด้วยแผ่นชีทที่เป็นผิวนอกหรือที่เรียกว่า Face โดยมีแผ่นกาว (Adhesive) ทำหน้าที่เชื่อมให้แผ่น (Core) และ (Face) ติดกันหน้าทีของแผ่น (Face) ถือเป็นตัวรองรับน้ำหนักเกือบทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้าง ยกตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำ (Face) เช่น อะลูมิเนียมอัลลอย เหล็กกล้า ไทเทเนียม ไม้อัด หรือแผ่นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย ส่วน (Core) จะช่วยเพิ่มค่า (Shear Rigidity) ในระนาบตั้งฉากกับแผ่น (Face) และมักจะเป็น โครงสร้างที่โปร่งหรือมีรูพรุน รูปแบบโครงสร้างของ (Core) ที่นิยมใช้คือแบบรังผึ้ง (Honeycomb) วัสดุที่ใช้ทำเป็น (Core) ได้แก่ พอลิเมอร์โฟม ยางสังเคราะห์ หรือโลหะและอัลลอย เป็นต้นเนื่องจาก (Core) เป็นโครงสร้างแบบโปร่ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา ดังนั้นผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิชจึงถูกนำไปใช้งานได้หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ทำเป็นหลังคา พื้นหรือกำแพงของอาคาร ทำเป็นชิ้นส่วนของปีกหรือช่องเก็บสัมภาระในเครื่องบิน เป็นต้น

ประเภทของคอมโพสิตแบ่งตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ นอกจากการแบ่งประเภทของคอมโพสิตดังกล่าวข้างต้นแล้ว เรายังสามารถแบ่งประเภทของคอมโพสิตตามวัสดุที่ทำหน้าที่

เป็นเมทริกซ์ได้เป็นสามประเภท ได้แก่ Polymer-Matrix Composites (PMCs), Metal-Matrix Composites (MMCs) และ Ceramic-Matrix Composites (CMCs)

1) Polymer-Matrix Composites (PMCs) คือคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ และส่วนวัสดุเสริมแรงเป็นได้หลากหลาย ทั้ง แก้ว คาร์บอน และอะรามิด คอมโพสิตประเภทนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก และขึ้นรูปง่ายที่อุณหภูมิห้อง พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเมทริกซ์มากที่สุดคือพอลิเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ แต่นอกจากสองประเภทนี้แล้ว ยังมีพอลิเมอร์ประเภทอื่น ๆ อีก ยกตัวอย่างเช่น อีพอกซี ซึ่งมีราคาสูงกว่าพอลิเอสเตอร์หรือไวนิลเอสเตอร์ แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและสามารถทนต่อความชื้น ได้ดีกว่า หรือ พอลิอิมิดเรซิน (Polyimide Resin) ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไปจึงถูกนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง (ถึง 230 °C) หรือพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether Etherketone, PEEK) พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphenylene Sulphide, PPS) พอลิอีเทอร์อิมิด (Polyetherimide, PEI) ซึ่งมีศักยภาพที่จะประยุกต์ใช้เป็นยานอวกาศในอนาคต

2) Metal-Matrix Composites (MMCs) เป็นคอมโพสิตที่มีโลหะหรือโลหะผสมเป็นเมทริกซ์ ส่วนวัสดุที่ทำหน้าที่เสริมแรงนั้นสามารถเป็นได้ทั้ง อนุภาค หรือเส้นใย ทั้ง แบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ข้อดีของ MMCs ที่เหนือกว่า PMCs คือสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ แต่มีราคาแพง ดังนั้น มักถูกนำไปใช้ในงานเฉพาะที่ต้องการสมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรง จำเพาะ ความแข็งตึงจำเพาะ ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทาน การนำความร้อน หรือความเสถียรของขนาด (Dimensional Stability) เป็นต้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน MMCS เช่น ใช้ อลูมิเนียมอัลลอยเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเพื่อทำยานยนต์ หรือใช้อลูมิเนียมอัลลอยชั้น สูงเสริมแรงด้วยอนุภาคโบรอนเพื่อทำเป็นกระสวยอวกาศหรือยานอวกาศ เป็นต้น (Cermets) หรือ (Ceramic-Metal Composite) คือ MMCs ที่มีเมทริกซ์โลหะน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และเสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิกจำพวกออกไซด์ โบโรคาร์ไบด์ หรืออลูมินา ส่วนโลหะที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์อาจเป็นนิกเกิล โมลิบดีนัม หรือโคบอลต์ ยกตัวอย่าง (Cermets) เช่น เมทริกซ์ของโคบอลต์ หรือนิกเกิลที่ถูกเสริมแรงด้วยอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ หรือ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (อาจเติมมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ซึ่งวัสดุที่ได้มีความแข็งแรงมาก (รองจากเพชร) และสามารถทนความร้อนได้ดี ตัวอย่างการใช้งานของ (Cermets) ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตตัวต้านทานตัวเก็บประจุ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่ต้องเจอสภาวะอุณหภูมิสูง

3) Ceramic-Matrix Composites (CMCs) โดยทั่วไปแล้ว วัสดุ เซรามิกสามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่ข้อด้อยของเซรามิกคือมีค่าความทนทานต่อการ

แตกหักต่ำเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นจึงนำมาทำเป็น (CMCs) ซึ่งการเสริมแรงสามารถทำได้ทั้ง ในรูปแบบอนุภาค วิสเกอร์ หรือไฟเบอร์

นอกจากการเสริมแรงด้วยอนุภาคแล้ว การเสริมแรงด้วยวิสเกอร์สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวของ (CMCs) ได้ กระบวนการจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงหรือความเหนียวเป็นได้ทั้งการช่วยเปลี่ยนทิศทางของรอยแตก ทำหน้าที่เป็นสะพานข้ามรอยแตก หรือช่วยกระจายความเค้นให้สม่ำเสมอบริเวณรอยแตก ค่า (Fracture Strength) และความทนทานต่อการแตกหักที่อุณหภูมิห้องของ (CMCs) ระหว่างอะลูมินาเมทริกซ์และซิลิกอนคาร์ไบด์วิสเกอร์แสดงดังตารางที่ 2.4 ตารางที่ 2.4 แสดงค่า (Fracture Strength) และความทนทานต่อการแตกหักที่อุณหภูมิห้องของ (CMCs) ระหว่างอะลูมินาเมทริกซ์และซิลิกอนคาร์ไบด์วิสเกอร์ที่ปริมาณต่างๆ

Whisker Content (vol %)	Fracture Strength (MPa)	Fracture Toughness
0	-	4.5
10	455/55	7.1
20	655/135	7.5-9.0
40	850/130	6.0

ที่มา : สุภาสินี ลิ้มปานภาพ [7]

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณวิสเกอร์เพิ่มขึ้น ค่า (Fracture Strength) จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่าความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture Toughness) ของ CMCS ที่ปริมาณวิสเกอร์ต่างๆ ไม่ต่างกันมาก แต่ก็ยังมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมวิสเกอร์

2.4.4 การคำนวณคอมโพสิต คำนวณน้ำหนักคอมโพสิตให้ได้อัตราส่วน 2.5 : 1

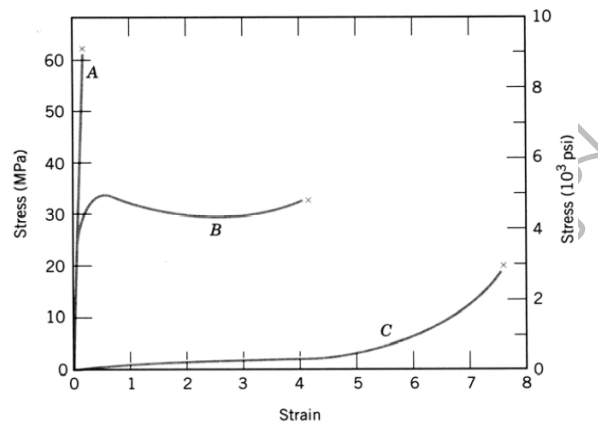
การคำนวณน้ำหนักแก้วเสริมแรง = พื้นที่ (ตรม.) × น้ำหนักแก้วเสริมแรง (กรัม / ตรม.) × จำนวนชั้น
การคำนวณน้ำหนักน้ำหนักรีพ็อกซ์ = น้ำหนักแก้วเสริมแรง × 2.5

2.4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties of Polymers)

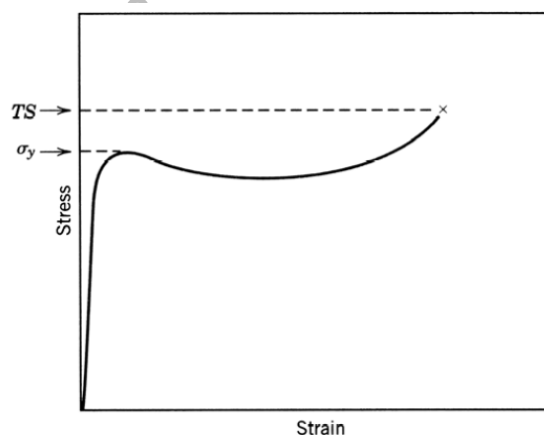
สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties of Polymers) จะมีพารามิเตอร์หลายอย่างเหมือนกับโลหะ ได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความแข็งแรงดึงความแข็งแรงอัดและความแข็งแรง การลาโดยค่าพารามิเตอร์ทางกลต่างๆ เหล่านี้จะหาค่าด้วยการทดสอบแรงดึง ความเครียด คุณลักษณะทางกลของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะไว้มากต่ออัตราการเสียรูป (อัตราความเครียด) อุณหภูมิและธรรมชาติทางเคมีของสิ่งแวดล้อม เช่น ในสภาวะที่มีน้ำ ออกซิเจนตัวทำ

ละลายอินทรีย์เป็นต้น บางครั้งในการทดสอบวัสดุพอลิเมอร์จำเป็นต้องดัดแปลงเทคนิคการทดสอบรวมทั้งรูปทรงของชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบวัสดุโลหะ โดยเฉพาะวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเช่น

2.4.6 พฤติกรรมแรงเค้นความเครียด (Stress-Strain Behavior) สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ พบพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดสามแบบที่แตกต่างกัน กราฟ A เป็นลักษณะแรงเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ชนิดที่แข็งเปราะ กราฟ B เป็นพฤติกรรมของวัสดุพลาสติกซึ่งเป็นแบบเดียวกันกับที่พบในวัสดุกลุ่มโลหะ สุดท้ายการเลือกรูปแบบกราฟ C เป็นการเลือกรูปแบบยืดหยุ่นทั้งหมดจนกระทั่งเกิดการแตกหัก คือวัสดุสามารถที่จะยืดออกแบบคืนรูปได้อย่างมากภายใต้แรงเค้นต่ำ ซึ่งจะพบในพอลิเมอร์กลุ่มอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) โมดูลัสความยืดหยุ่นในเทอมของโมดูลัสการดึงซึ่งบางครั้งเรียกว่า โมดูลัส พอลิเมอร์และความเหนียว (Ductility)

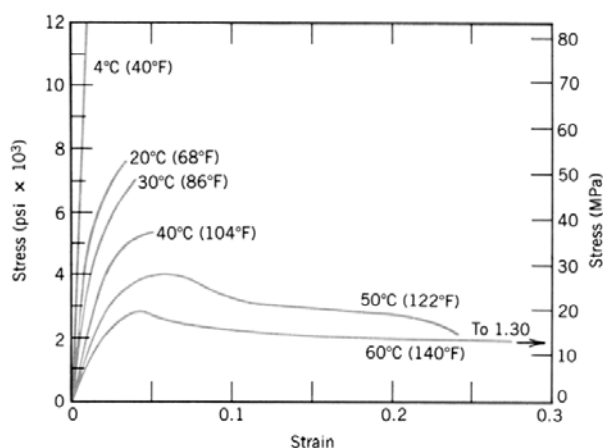


ภาพที่ 2.7 พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ กราฟ A พฤติกรรมแบบเปราะ B พฤติกรรมแบบพลาสติก และ C พฤติกรรมแบบอีลาสติกทั้งหมด (อีลาสโตเมอร์)



ภาพที่ 2.8 กราฟแรงเค้นความเครียดแสดงค่าความแข็งแรงดึงและจุดจำนนของพอลิเมอร์

สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์นั้นมักจะเป็นช่วงกว้างไม่เหมือนกับวัสดุโลหะ เช่น โมดูลัสของวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงอาจมีค่าต่ำเพียง 7 MPa (103 psi) แต่บางชนิดที่มีสติฟเนส (Stiffness) สูงอาจมีค่าสูงถึง 4 GPa (0.6×10^6 psi) ส่วนค่าโมดูลัสของโลหะนั้นมีค่าสูงกว่ามากคือ ประมาณ 48 ถึง 410 GPa ($7-60 \times 10^6$ psi) ความแข็งแรงดึงสูงสุดของพอลิเมอร์มีค่าประมาณ 100 MPa (15,000 psi) ในขณะที่โลหะผสมบางชนิดมีค่าสูงถึง 4,100MPa (600,000 psi) แต่ขณะเดียวกัน ขณะที่โลหะสามารถยืดออกในช่วงพลาสติกได้มากกว่าร้อยละ 100 พอลิเมอร์บางชนิดที่ยืดหยุ่นสูง สามารถยืดออกได้มากถึงกว่าร้อยละ 1,000 นอกจากนี้คุณลักษณะทางกลของพอลิเมอร์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิห้องมากกว่าโลหะอย่างมาก เมื่อพิจารณา พฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของ (Polymethyl Methacrylate) (Plexiglas) ที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 4°C ถึง 60°C (40°F - 140°C)



ภาพที่ 2.9 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกราฟแรงเค้นความเครียดของ (Polymethyl Methacrylate)

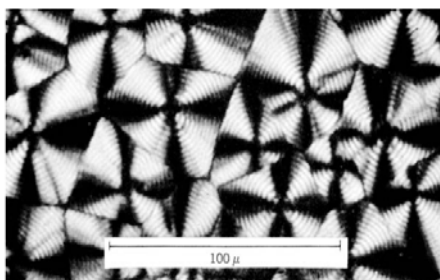
อิทธิพลของอัตราความเครียดมีความสำคัญต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์ ซึ่งปกติการลดอัตราการเสียรูปมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมกราฟแรงเค้นความเครียดแบบเดียวกันกับการเพิ่มอุณหภูมิ คือวัสดุจะอ่อนตัวลงและเหนียวขึ้นความสามารถในการจัดการสมบัติทางกลของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับความเข้าใจถึงกลไกการเกิดการเสียรูปของวัสดุ โดยกล่าวถึงรูปแบบการเสียรูปสองแบบที่แตกต่างกัน คือการเสียรูปแบบพลาสติกของพอลิเมอร์แบบกิ่งผลึก ซึ่งมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของวัสดุ กับการเสียรูปแบบยืดหยุ่นอย่างมากของพอลิเมอร์กลุ่มออลาสโตเมอร์

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของพอลิเมอร์บางชนิด

Material	Specific Gravity	Tensile Modulus [GPa(ksi)]	Tensile Strength [GPa(ksi)]	Yield Strength [GPa(ksi)]	Elongation at Break (%)
Polyethylene (low density)	0.917-0.932	0.17-0.28 (25-41)	8.3-31.4 (1.2-4.55)	9.0-14.5 (1.3-2.1)	100-650
Polyethylene (high density)	0.952-0.965	1.06-1.09 (155-158)	22.1-31.0 (3.2-4.5)	26.2-33.1 (3.8-4.8)	10-1200
Polevinylchloride	1.30-1.53	2.4-4.1 (350-600)	40.7-51.7 (5.9-7.5)	40.7-44.8 (5.9-6.5)	40-80
Polytetrafluoroethylene	2.14-2.20	0.40-0.55 (58-80)	20.7-34.5 (3.0-5.0)	-	200-400
Polypropylene	0.90-0.91	1.14-1.55 (165-225)	31-41.4 (4.5-6.0)	31.0-37.2 (4.5-5.4)	100-600
Polytetrafluoroethylene	2.14-2.20	0.40-0.55 (58-80)	20.7-34.5 (3.0-5.0)	-	200-400
Polystyrene	1.04-1.05	2.28-3.28 (330-475)	35.9-51.7 (5.2-7.5)	-	1.2-2.5
Polymethyl methacrylate	1.17-1.20	2.24-3.24 (325-470)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	53.8-73.1 (7.8-10.6)	2.0-5.5
Polyester (PET)	1.29-1.40	2.8-4.1 (400-600)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	59.3 (8.6)	30-300
Polycarbonate	1.20	2.38 (345)	62.8-72.4 (9.1-10.5)	62.1 (9.0)	110-150

2.4.7 การเสียรูปของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Deformation of Semicrystalline Polymers)

1) กลไกการเสียรูป (Mechanism) พอลิเมอร์กึ่งผลึกหลายชนิด เนื้อส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็น Spherulite ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งแต่ละ Spherulite ประกอบด้วย Chain-Folded Ribbon จำนวนมาก หรือ Lamellar ที่แผ่ออกจากจุดกึ่งกลาง พื้นที่นอกจากที่เป็น Lamellar เหล่านี้จะเป็นแบบอสัณฐาน (รูปที่ 2.10) การจัดเรียง Lamellar จะเชื่อมด้วย Tie Chain ซึ่งเชื่อมผ่านตลอดบริเวณของอสัณฐานเหล่านั้น



ภาพที่ 2.10 โครงสร้าง Spherulite ของ Polyethylene

กลไกการเสียรูปพลาสติกอธิบายได้ดีที่สุดด้วยปฏิริยาระหว่างชั้นของ Lamellar กับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบริเวณที่เป็นอสัณฐาน ในการตอบโต้แรงดึงที่กระทำ กระบวนการนี้เกิดขึ้นหลายขั้นตอนซึ่งได้แสดงในรูปที่ 2.10 ลักษณะ Chain-Folded Lamellar สองชุดกับบริเวณอสัณฐานที่อยู่ระหว่าง Lamellar ก่อนเสียรูป ในขั้นแรกของการเสียรูป Lamellar Ribbon จะเลื่อนผ่าน Ribbon อื่นๆ เช่นเดียวกับ Tie Chain บริเวณอสัณฐานทำให้เกิดการยืดออก จากนั้นจะเกิดการเสียรูปในขั้นที่สอง โดยการเอียงของ Lamellar ซึ่ง Fold Chain จะเกิดการเรียงตัวในแนวของแรงดึงดังรูปที่ 2.10

จากนั้นบริเวณของชุดผลึกจะแยกออกจาก Lamellar เป็นส่วนๆ โดยยังเชื่อมกันด้วย Tie Chain ดังแสดงในรูป 2.10 ในขั้นสุดท้ายชุดผลึกและ Tie Chain จะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแนวแรงดึง ดังนั้นการเสียรูปจากแรงดึงของพอลิเมอร์กึ่งผลึกทำให้เกิดโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวสูง ซึ่งแน่นอนในระหว่างกระบวนการ Spherulite จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงคุณลักษณะทางกลของพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อกระบวนการถูกขัดขวาง เช่นการเพิ่มระดับการครอสลิงค์ (Crosslink) ซึ่งจะไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลทำให้พอลิเมอร์แข็งแรงขึ้นและเปราะมากขึ้น โดยการครอสลิงค์อาจเพิ่มขึ้นจากรังสี คือเมื่อขึ้นทดสอบสัมผัสกับรังสีบางชนิดพันธะสายโซ่ด้านข้างจะแตกออกและเกิดการครอสลิงค์ขึ้น และพันธะโมเลกุลลำดับสองที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล เช่นพันธะ (Van Der Waals) แม้ว่าจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ภายในสายโซ่อย่างมาก และไม่ก่อผลในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่มากนัก แต่สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์กลับขึ้นอยู่กัขนาดของแรงระหว่างโมเลกุลที่ไม่แข็งแรงเหล่านี้

เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลที่ยึดด้วยพันธะโมเลกุลลำดับสองเหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นลำดับแรกในการตอบสนองต่อแรงที่กระทำ ดังนั้น โครงสร้างพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกจึงมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลมากกว่าแบบอสัณฐาน กล่าวคือ โครงสร้างแบบผลึกสายโซ่โมเลกุลจะอยู่กันอย่างอัดแน่นและเป็นระเบียบจึงมีแรงพันธะโมเลกุลลำดับสองที่สูงกว่าแบบ อสัณฐาน ดังนั้น การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิเมอร์จึงทำให้สมบัติทางกลดีขึ้นคุณลักษณะสายโซ่โมเลกุลอื่นๆ รวมทั้งน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลก่อนข้างค่าความแข็งแรงทางกลจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล เช่น คุณลักษณะทางกายภาพของ Polyethylene จะเปลี่ยนแปลงไปตามร้อยละของความเป็นผลึกกับน้ำหนักโมเลกุล

2) การเสีรูประดับมหภาค (Macroscopic Deformation) การเสีรูประดับมหภาคของพอลิเมอร์กึ่งผลึกอธิบายได้ด้วยกราฟแรงเค้นความเครียดในการทดสอบแรงดึง การเสีรูช่วงแรกเป็นการจัดเรียงทิศทางของ โครงสร้างอสัณฐานและเป็นการเสีรูแบบอีลาสติกจนถึงจุดจำนนบน โดยการเสีรูประดับมหภาคจะเกิดขึ้นน้อย ชิ้นงานจะยืดออกเล็กน้อย และเมื่อแรงเค้นเพิ่มถึงจุดจำนนบนและล่าง การเสีรูช่วงนี้เป็นการจัดเรียงทิศทางของสายโซ่ในส่วนของผลึก ซึ่งเป็นการเสีรูแบบพลาสติกและสังเกตเห็นได้ชัดในระดับมหภาค โดยเหนือจุดจำนนบนจะมีคอคอดเกิดขึ้นในช่วงระยะทดสอบ (Gauge Length) ภายในบริเวณคอคอดสายโซ่จะเริ่มจัดเรียงตัว ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและต้านทานการเสีรูในบริเวณนี้ จากนั้นชิ้นทดสอบจะยืดออกจากที่เกิดคอคอดตลอดช่วงระยะทดสอบเป็นเส้นกราฟแนวอนจนถึงจุดแตกหัก พฤติกรรมนี้อาจแตกต่างกับโลหะเหนียว คือโลหะจะเกิดการเสีรูต่อเนื่อง ณ จุดที่เป็นคอคอดนั้น โดยไม่ลุกลามจนแตกหัก

2.4.8 ปปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างมากโดยบางส่วในบพนี้ได้พิจารณาถึงคุณลักษณะทางความร้อนและทางกลของวัสดุอันเนื่องจากความร้อน เริ่มด้วยปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อนการเกิดผลึกเป็นกระบวนการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวิภูภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการเย็นตัวจากของหลอมเหลวที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ และการหลอมตัวจะเกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อน ส่วนการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นจะเกิดกับพอลิเมอร์อสัณฐานหรือพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นผลึก และเมื่อเย็นตัวจากของหลอมเหลวจะเกิดเป็นของแข็งริจิด (Rigid Solid) ซึ่งจะคงโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกันกับของหลอมเหลว และในบางครั้งถือเป็นของเหลวแข็งอสัณฐาน ซึ่งแน่นอนสมบัติทางเคมีและกายภาพจะเปลี่ยนไปตามการเกิดผลึก การหลอมและ

การอ่อนตัวจากความร้อน ยิ่งกว่านั้นพอลิเมอร์กิ่งผลึกบริเวณที่เป็นผลึกจะเกิดการหลอมตัวและการเกิดผลึกในขณะที่บริเวณที่ไม่เป็นผลึกจะผ่านช่วงอุณหภูมิของการอ่อนตัวจากความร้อน

1) การเกิดผลึก (Crystallization) การเข้าใจถึงกลไกและอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เป็นสิ่งสำคัญมากเช่นเดียวกับกับอิทธิพลของระดับการเกิดผลึกต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนของวัสดุ การเกิดผลึกของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดขึ้นโดยจุดเริ่มเกิดผลึก (Nucleation) และขยายตัวด้วยกระบวนการเติบโต (Growth Process) กล่าวคือเมื่อพอลิเมอร์เย็นตัวผ่านอุณหภูมิการหลอมเหลวจะมีจุดเริ่มเกิดผลึกเป็นบริเวณเล็กๆ จากนั้นโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบจะเริ่มจัดเรียงทิศทางในรูปของชั้น (Chain-Folded) ที่อุณหภูมิเกินอุณหภูมิหลอมเหลวจุดเริ่มเกิดผลึกจะไม่เสถียร เนื่องจากการสั่นของอะตอมจากความร้อนจะทำลายการจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดจุดเริ่มเกิดผลึกและในระหว่างการเติบโตของผลึก จุดเริ่มเกิดผลึกจะการเกิดผลึกต้องอาศัยเวลาในแบบเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง (Solid-State Transformation) ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยการนำเศษส่วนการเกิดผลึกมาล็อกเทียบกับค่าล็อกของเวลาที่อุณหภูมิคงที่ซึ่งเป็นการเกิดผลึกโดยที่ y เป็นฟังก์ชันของเวลา t ตามสมการของ

$$\text{Avrami } y = 1 - \exp(-ktn)$$

เมื่อ k และ n เป็นค่าคงที่ที่เป็นอิสระจากเวลา (Time-Independence Constant) แต่จะขึ้นอยู่กับระบบของการเกิดผลึก โดยปกติปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้นจะวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นทดสอบ เนื่องจากวิถุภาคของเหลวกับวิถุภาคของผลึกมีปริมาตรแตกต่างกันส่วนอัตราการเกิดผลึกจะวัด ณ จุดที่มีการเกิดผลึกร้อยละ 50 และอัตราการเกิดผลึกนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดผลึก โดยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะแปรผกผันกับอัตราการเกิดผลึก กล่าวคือถ้าอัตราการเกิดผลึกต่ำจะได้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สูง การเกิดผลึกของพอลิเมอร์เกิดได้สมบูรณ์ทั้งสามอุณหภูมิ ซึ่งแท้จริงแล้วการเกิดผลึกร้อยละ 100 ของพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นไปไม่ได้แต่ค่าเศษส่วนผลึกเท่ากับ 1 ในกราฟนั้นเป็นค่าระดับการเกิดผลึกสูงสุดได้ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งที่แท้จริงจะมีค่าต่ำกว่านี้

2) การหลอมเหลว (Melting) การหลอมเหลวของผลึกพอลิเมอร์จะเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงสถานะจากวัสดุของแข็งที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบไปเป็นของไหลหนืด (Viscousliquid) ที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) การหลอมเหลวของพอลิเมอร์มีหลายแบบแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับลักษณะของโครงสร้างผลึก (Lamellae) ซึ่งจะไม่เหมือนกับกรณีของโลหะและเซรามิกที่มีรูปแบบการหลอมเหลวที่แน่นอนกว่า และนอกจากนั้นพฤติกรรมการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ

กล่าวคือถ้าเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์จะสูงขึ้นวัสดุพอลิเมอร์จะตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสมบัติของวัสดุ กล่าวคือการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว อาจเพิ่มความหนาของชั้น (Lamellae) ได้ ดังนั้นการอบอ่อนพอลิเมอร์อาจทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นได้

3) การเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition) การเปลี่ยนสภาพนี้จะเกิดในพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานที่เกิดจากการเย็นตัวจากสถานะของเหลวเป็นของแข็งโดยไม่เกิดเป็นผลึก นั่นคือในช่วงการเย็นตัวสายโซ่โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบในลักษณะสามมิติ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพในช่วงแรกของการเย็นตัวความหนืดจะเพิ่มขึ้น จากนั้นจะค่อยๆ เปลี่ยนจากของเหลวเป็นวัสดุคล้ายยางและกลายเป็นของแข็งในที่สุด อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากยืดหยุ่นคล้ายยางเป็นของแข็ง เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition Temperature, T_g) ในทางกลับกันเมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิ T_g จะเกิดการเปลี่ยนสภาพจากของแข็งกลับไปเป็นยืดหยุ่น ยิ่งกว่านั้นกรณีพอลิเมอร์ที่สามารถเป็นผลึกก็อาจเกิดเป็นของแข็งอสัณฐานได้ ถ้าได้รับการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากสถานะของเหลว ซึ่งสมบัติทางกายภาพต่างๆ

4) อุณหภูมิการหลอมและการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น อุณหภูมิหลอมเหลวกับการเปลี่ยนสภาพนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ โดยนิยามอุณหภูมิทั้งสองข้างต้นเป็นขีดจำกัดอุณหภูมิมบนและล่างตามลำดับในการนำวัสดุไปใช้งาน โดยเฉพาะพอลิเมอร์กึ่งผลึก และยังมีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์และวัสดุประกอบพอลิเมอร์ (Polymer-Matrix Composite) อีกด้วยอุณหภูมิหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของพอลิเมอร์จะวัดโดยกรรมวิธีแบบเดียวกันกับวัสดุเซรามิก ด้วยการพล็อตปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) เป็นส่วนกลับของความหนาแน่นเทียบกับอุณหภูมิ โดยพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานและผลึกตามลำดับ สำหรับวัสดุผลึกมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิหลอมเหลว T_m ส่วนกราฟวัสดุอสัณฐานจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องแต่มีการลดลงของความชันเล็กน้อยที่อุณหภูมิ T_g สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึกจะพบทั้งพฤติกรรมหลอมเหลว T_m และการเปลี่ยนสภาพ T_g ซึ่งเป็นสมบัติของวัฏภาคผลึกและอสัณฐานตามลำดับทั้งนี้พฤติกรรมขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวหรืออัตราการให้ความร้อน แสดงค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของพอลิเมอร์บางชนิด

5) ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการหลอมและการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น

ก) อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ในระหว่างการหลอมเหลวของพอลิเมอร์สายโซ่โมเลกุลจำเป็นต้องมีการจัดเรียงตัวใหม่ ด้วยการเปลี่ยนสภาพจากที่เป็นระเบียบไปอยู่ในสภาพโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ โดยความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่โมเลกุลรวมทั้งอุณหภูมิการหลอมเหลวนี้อาจขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ สติฟเฟนของสายโซ่จะถูกควบคุมโดยความคล่องตัวในการหมุนของพันธะทางเคมีตลอดสายโซ่ กล่าวคือพันธะคู่และหมู่อะโรมาติกจะทำให้ความสามารถในการพับงอ ของสายโซ่ลดลง ซึ่งทำให้ T_m สูงขึ้น ยิ่งกว่านั้นขนาดและชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่สายโซ่มีอิทธิพลต่อความอิสระในการหมุนของโมเลกุลและทำให้ T_m สูงขึ้นเช่นกัน เช่น Polypropylene มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า Polyethylene ($175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อ $115\text{ }^{\circ}\text{C}$) เนื่องจากหมู่ Methyl CH_3 ด้านข้างของ (Polypropylene) มีขนาดใหญ่กว่าอะตอม H ที่พบใน (Polyethylene) เป็นต้น การมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น Cl , OH และ CN แม้ว่าจะมีขนาดเล็กแต่จะมีผลต่อพอลิเมอร์บางชนิดอุณหภูมิหลอมเหลวจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล กล่าวคือที่น้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ การเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยหรือความยาวสายโซ่จะทำให้ T_m สูงขึ้น ยิ่งกว่านั้นการหลอมเหลวของพอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นช่วงของอุณหภูมิ ทำให้ T_m มีค่าเป็นช่วงมากกว่าที่จะเป็นอุณหภูมิค่าเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการก่อตัวเป็นโมเลกุลของพอลิเมอร์จะได้น้ำหนักโมเลกุลที่หลากหลาย และค่า T_m จะขึ้นไปตามน้ำหนักโมเลกุลเหล่านั้น โดยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีช่วงของค่าอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วงหลายองศาเซลเซียสระดับความเป็นกิ่งของสายโซ่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ เนื่องจากความเป็นกิ่งจะส่งผลกระทบต่อในลักษณะของสิ่งบกพร่องในผลึกวัสดุ และทำให้อุณหภูมิการหลอมลดลง เช่นพอลิเอธิลีนหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรง (Linear Polymer) จะมีอุณหภูมิการหลอมสูงกว่าพอลิเอธิลีนหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีความเป็นกิ่งพอสมควร ที่ $137\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

ข) อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ (T_g) เมื่อให้ความร้อนเลขอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ พอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งอสัณฐานจะเปลี่ยนจากสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น กล่าวคือโมเลกุลซึ่งถูกแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g จะเกิดการหมุนและเคลื่อนตัวที่อุณหภูมิเหนือ T_g นั่นคือค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของโมเลกุลที่ส่งผลกระทบต่อสติฟเฟนของสายโซ่ ส่วนใหญ่ตัวแปรและอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลแบบเดียวกันกับที่มีต่ออุณหภูมิการหลอมเหลว คือทำให้ความสามารถในการพับงอของสายโซ่ลดลง และสิ่งต่างๆที่จะทำให้ค่า T_g สูงขึ้นได้แก่

- หมู่ฟังก์ชันที่ค่อนข้างใหญ่ เช่น ค่า T_g ของ Polypropylene ที่ $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับ Polystyrene ที่ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

- อะตอมหรือหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่นค่า Tg ของ Polyvinyl Chloride ที่ 87 °C เปรียบเทียบกับ Polypropylene ที่ -18 °F เป็นต้น
 - พันธะคู่และหมู่อะโรมาติกในสายโซ่จะทำให้โมเลกุลสายโซ่หลักสติฟมากขึ้นน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้นจะทำให้ Tg สูงขึ้น 1 และการมีกิ่งเล็กน้อยในสายโซ่จะทำให้ Tg ลดลง แต่ถ้ามีกิ่งมากจะกีดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่ทำให้ Tg กลับสูงขึ้น
- เช่นเดียวกับพอลิเมอร์อสัณฐานบางชนิดที่มีการครอสลิงค์ และถ้ามีการครอสลิงค์ในปริมาณมาก โมเลกุลจะไม่สามารถเคลื่อนตัวได้เลย พอลิเมอร์จะไม่ปรากฏการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว เป็นการยืดหยุ่นหรือไม่มีการอ่อนตัวเกิดขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มโมเลกุลพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันจะทำให้ทั้ง Tg และ Tm ลดลง จึงเป็นไปได้ที่จะควบคุม Tg และ Tm ซึ่งปกติ Tg อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 Tm ในพอลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวได้อย่างอิสระ ส่วนการควบคุมตัวแปรทั้งสองให้อิสระมากขึ้นทำได้โดยการสังเคราะห์หรือการใช้ประโยชน์จากวัสดุโคพอลิเมอร์ (Copolymer)

2.4.9 พอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติกและแบบเทอร์โมเซต รูปแบบการแบ่งประเภทวัสดุพอลิเมอร์อย่างหนึ่งคือการพิจารณาการตอบสนองทางกลของพอลิเมอร์ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งจะแบ่งพอลิเมอร์ออกเป็นสองประเภทได้แก่เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Polymers) และเทอร์โมเซต (Thermosetting Polymers) เทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อลดอุณหภูมิ สองกระบวนการนี้เป็นกระบวนการสวนทางกันและอาจทำซ้ำไปมาได้ วัสดุนี้ปกติจะขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนร่วมกับความดัน ในระดับโมเลกุลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงพันธะลำดับสองพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซตจะมีความแข็งแรงที่เมื่อได้รับความร้อนและไม่มีการอ่อนตัวจากความร้อน โดยในระหว่างการปรับสภาพทางความร้อน ชั้นแรกจะมีการครอสลิงค์แบบโควาเลนต์เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ติดกัน พันธะเหล่านี้จะยึดสายโซ่ไว้ด้วยกันและต้านการฉีกและการหมุนของสายโซ่ที่อุณหภูมิสูง ปกติการครอสลิงค์จะประมาณร้อยละ 10 ถึง 50 ของหน่วยเมอร์ในสายโซ่ การให้ความร้อนสูงเกินเพียงเล็กน้อยอาจเป็นเหตุทำให้พันธะครอสลิงค์เหล่านี้เกิดการแตกออกและเกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์เทอร์โมเซต ปกติจะมีความแข็ง ความแข็งแรง และความเปราะมากกว่าเทอร์โมพลาสติก โดยเทอร์โมเซตจะรวมไปถึงยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ อีพอกซี เรซินฟีนอลิกและพอลิเอสเตอ์

2.4.10 ความยืดหยุ่นหนืด (Viscoelasticity) พอลิเมอร์อสัณฐานอาจแสดงพฤติกรรมคล้ายแก้วที่อุณหภูมิต่ำ เป็นของแข็งยืดหยุ่นที่อุณหภูมิปานกลางเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ Tg และเป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อมีการเสียรูปเล็กน้อย พฤติกรรมทางกลที่อุณหภูมิต่ำอาจเป็นแบบยืดหยุ่น ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของฮุก (Hooke's Law) $\sigma = E\epsilon$ พอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงจะมีความหนืดหรือมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว และที่อุณหภูมิลดลงพบว่าพอลิเมอร์จะเป็นของแข็ง

ยืดหยุ่นที่มีคุณลักษณะทางกลร่วมกันของความยืดหยุ่นกับความหนืด ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะเรียกว่า ความยืดหยุ่นหนืด (Viscoelasticity) การเสียรูปพลาสติกเป็นการเสียรูปแบบทันทีทันใด คือการเสียรูปหรือความเครียดจะเกิดขึ้นและหายไปทันทีที่ใส่แรงเค้นและนำแรงเค้นนั้นออกไปจากวัสดุ นั้นคือการเสียรูป

1) โมดูลัสการคลายตัวแบบยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic Relaxation Modulus) พฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดของวัสดุพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ โดยมีหลายเทคนิคการทดสอบที่สามารถใช้วัดและบอกปริมาณของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้ การวัดการคลายแรงเค้น (Stress Relaxation) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้วัดสมบัตินี้ของวัสดุ โดยขึ้นทดสอบจะถูกยึดออกอย่างรวดเร็วด้วยแรงเค้นดึงเริ่มแรกที่ทำให้วัสดุเกิดความเครียดขึ้นเล็กน้อย จากนั้นทำการวัดแรงเค้นที่ต้องใช้คงความเครียดนั้นไว้เทียบกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปแรงเค้นที่ต้องใช้คงความเครียดจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการคลายตัวของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจนิยาม โมดูลัสการคลายตัว (Relaxation Modulus, $E_r(t)$) ของพอลิเมอร์ชนิดยืดหยุ่นหนืดเป็น โมดูลัสอีลาสติกที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังสมการ $E_r(t) = \sigma(t) / \epsilon_0$ เมื่อ $\sigma(t)$ คือแรงเค้นที่วัดได้ ณ เวลา t และ ϵ_0 คือระดับความเครียดคงที่ที่ใช้ทดสอบเนื่องจากพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดของพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการกำหนดพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดที่สมบูรณ์จำเป็นต้องทำการวัดโมดูลัสการคลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย ซึ่งเป็นกราฟค่า $\log E_r(t)$ กับค่า \log ของเวลาของพอลิเมอร์ที่แสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ สิ่งสำคัญที่ได้จากกราฟคือการลดลงของ $E_r(t)$

ที่สอดคล้องกับค่าแรงเค้นที่ลดลงในสมการข้างต้น และการลดลงของค่า $E_r(t)$ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิให้กำหนดจุดบนกราฟ $\log E_r(t)$ กับ \log ของเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ณ เวลาเดียวกัน เช่นที่เวลา จากนั้นนำค่า $\log E_r(t)$ ที่ได้มาพล็อตเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งพอลิสไตรีน (PS) อสังฐาน โดยค่า t_1 ในกรณีนี้กำหนดไว้ที่ 10 วินาทีหลังจากที่ใส่แรงกระทำ จากรูปสามารถแบ่งกราฟออกได้หลายส่วน ส่วนแรกเป็นบริเวณที่อุณหภูมิต่ำสุดซึ่งวัสดุจะประพฤติตัวคล้ายแก้วที่แข็งและเปราะ ค่า $E_r(10)$ ที่อุณหภูมิต่ำนี้จะอิสระจากอุณหภูมิ คือช่วงอุณหภูมินี้คุณลักษณะความเครียดกับเวลาจะเป็นแบบเดียวกัน เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลจะถูกแช่แข็งและค่า $E_r(10)$ จะลดลงทันทีประมาณ 10^3 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 20°C (-68°F) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าบริเวณลีเทอรี (Leathery Region) หรือบริเวณของการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition) โดย T_g ของพอลิสไตรีนจะมีค่า 100°C (212°F) ในช่วงอุณหภูมินี้ขึ้นทดสอบพอลิเมอร์จะเป็นลีเทอรี นั่นคือการเสียรูปจะขึ้นกับเวลาและวัสดุไม่สามารถคืนรูปได้อย่างสมบูรณ์หลังจากนำแรงที่กระทำออกไปแบบเดียวกัน และกราฟช่วงอุณหภูมิของวัสดุจะมีการเสียรูปคล้ายซึ่งจะทั้งยืดหยุ่นและหนืด โดยการเสียรูปในช่วงนี้สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นเนื่องจากโมดูลัสการคลายตัวค่อนข้างต่ำ และ

สองบริเวณสุดท้ายช่วงอุณหภูมิสูงเป็นช่วงของการไหลแบบยืดหยุ่นและแบบหนืดตามลำดับ โดยวัสดุที่ผ่านสองช่วงอุณหภูมินี้จะค่อยๆ เปลี่ยนสภาพจากวัสดุนุ่มคล้ายยางเป็นของเหลวหนืด ในช่วงของการไหลหนืดโมดูลัสจะลดลงอย่างมากตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และพฤติกรรมความเครียดกับเวลาจะกลับไปเหมือนเดิมอีกครั้ง จากสภาพของโมเลกุลในสภาวะไหลหนืดทำให้การเคลื่อนตัวของสายโซ่สูงชันอย่างมาก ในส่วนของสายโซ่จะเกิดการสั้นและการหมุนอย่างอิสระจากสายโซ่อื่นๆ และเกิดการเสีรูปเป็นแบบหนืดทั้งหมดพฤติกรรมการเสีรูปของพอลิเมอร์หนืดจะอยู่ในรูปของความหนืด ดังนั้นการวัดค่าจึงเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการไหลเนื่องจากแรงเฉือน ส่วนอัตราของแรงเค้นที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะยืดหยุ่นหนืดนั้นจะเป็นแบบเดียวกันกับอิทธิพลของการลดอุณหภูมิพฤติกรรมของกราฟ $\log E_r(10)$ กับอุณหภูมิของพอลิไทรีนจะมีหลายแบบขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุพื้นฐาน จะมีลักษณะเหมือนกับกราฟ และสำหรับพอลิไทรีนที่มีระดับการครอสลิงก์สูง จะปรากฏบริเวณที่มีสมบัติคล้ายยางเกิดขึ้นและคงสภาพจนถึงอุณหภูมิต่ำตัว

2) การครากแบบยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic Creep) วัสดุพอลิเมอร์

หลายชนิดของวัสดุเกิดการเสีรูปในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับเวลาเมื่อรับแรงเค้นคงที่ เช่นการเสีรูปในเทอมของการครากแบบยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic Creep) การเสีรูปประเภทนี้มักจะเกิดที่อุณหภูมิห้องและเกิดภายใต้แรงเค้นที่ต่ำกว่าความแข็งแรงจำนนของ $E_c(t) = \sigma_0 / \epsilon(t)$ เมื่อ σ_0 คือค่าแรงเค้นคงที่ที่กระทำ และ $\epsilon(t)$ คือค่าความเครียดที่ขึ้นอยู่กับเวลาโมดูลัสการครากจะมีความไวต่ออุณหภูมิและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนอิทธิพลของโครงสร้างโมเลกุลต่อลักษณะการครากจะเป็นแบบทั่วไป คือความเสี่ยงต่อการเกิดครากลดลงและโมดูลัสการครากจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

2.4.11 การเสีรูปของอีลาสโตเมอร์ (Deformation of Elastomer) หนึ่งในสมบัติที่น่าสนใจของวัสดุอีลาสโตเมอร์คือความยืดหยุ่นคล้ายยาง นั่นคือ ความสามารถในการเกิดการเสีรูปได้ค่อนข้างมากและการสปริงตัวกลับสู่รูปทรงเดิมพฤติกรรมลักษณะนี้เริ่มแรกพบในวัสดุยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามไม่กี่ปีมานี้ได้มีการสังเคราะห์อีลาสโตเมอร์ขึ้นพร้อมกับสมบัติที่หลากหลาย คุณลักษณะแรงเค้นความเครียดของวัสดุอีลาสโตเมอร์จะมีโมดูลัสความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำในขณะที่มีความเครียดเกิดขึ้นอย่างมาก อีลาสโตเมอร์ในช่วงที่ไม่มีแรงเค้นกระทำจะมีสภาพเป็นอสัณฐาน ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ในลักษณะม้วนเป็นขดและบิดงอเป็นอย่างมาก เมื่อใส่แรงดึงกับวัสดุชนิดนี้ จะเกิดการเสีรูปแบบยืดหยุ่น โดยโครงสร้างบางส่วนจะคลายตัวจากที่ม้วนขดและบิดงอยืดตัวออกเป็นเส้นตรง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการยืดตัวออกของสายโซ่โมเลกุลในแนวของแรงเค้นดึงที่กระทำ เมื่อนำแรงเค้นออกสายโซ่จะสปริงตัวกลับสู่สภาพเดิมแบบเดียวกับ

สภาพก่อนใส่แรงกระทำซึ่งทำให้วัสดุกลับคืนสู่รูปทรงเดิมอย่างสมบูรณ์แรงเคลื่อนสำหรับการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเป็นพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกเรียกว่า เอนโทรปี (Entropy) ซึ่งเป็นการวัดระดับของความไม่เป็นระเบียบภายในระบบ เอนโทรปีจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของความไม่เป็นระเบียบ อีลาสโตเมอร์ที่ถูกดึงยืดสายโซ่จะยึดเป็นเส้นตรงและมีการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้ระบบมีความเป็นระเบียบมากขึ้นและมีเอนโทรปีลดลง และเมื่อนำแรงดึงออกเอนโทรปีจะกลับเพิ่มขึ้นเนื่องจากสายโซ่กลับไปสู่โครงสร้างเดิมที่ม้วนขดและบิดงอ สองปรากฏการณ์ที่เป็นผลกระทบจากเอนโทรปี คือเมื่อทำการดึงยืดอีลาสโตเมอร์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และโมดูลัสความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับพฤติกรรมที่พบในวัสดุอื่นๆ สภาวะที่ทำให้วัสดุพอลิเมอร์อยู่ในรูปของอีลาสโตเมอร์ได้แก่ วัสดุเกิดผลึกได้ยาก โดยวัสดุอีลาสโตเมอร์จะอยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งมีสายโซ่โมเลกุลแบบบิดงอและม้วนเป็นขดภายใต้สภาวะไร้แรงกระทำ การหมุนของพันธะสายโซ่โมเลกุลต้องค่อนข้างอิสระโดยอยู่ในลักษณะที่ม้วนเป็นขดพร้อมที่จะตอบสนองต่อแรงที่กระทำสามารถเกิดการเสียรูปแบบอีลาสติกได้ค่อนข้างสูง และมีการเสียรูปแบบพลาสติกแบบค่อยเป็นค่อยไป (Delay) โดยการเคลื่อนตัวของสายโซ่จะถูกจำกัดด้วยการครอสลิงค์ และครอสลิงค์นี้จะเป็นจุดยึดระหว่างสายโซ่ทำให้สายโซ่ไม่สามารถเคลื่อนออกจากกัน จึงมีบทบาทต่อกระบวนการเสียรูปของอีลาสโตเมอร์ การครอสลิงค์ในวัสดุอีลาสโตเมอร์หลายชนิดเกิดขึ้นจากกระบวนการที่เรียกว่าวาลคาไนเซชัน (Vulcanization) สุดท้ายอีลาสโตเมอร์จะต้องอยู่เหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (T_g) ดังนั้นอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมคล้ายยางจะขึ้นอยู่กับค่า T_g ปกติอีลาสโตเมอร์โดยทั่วไปจะมีค่า T_g อยู่ในช่วง -50 ถึง -90 °F (-60 ถึง -130 °F) แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g อีลาสโตเมอร์จะมีสมบัติคล้ายแก้วคือแข็งเปราะแบบเดียวกับพฤติกรรมแรงเค้นความเครียด

2.4.12 การแตกหักของพอลิเมอร์ (Fracture of Polymers) ความแข็งแรงแตกหัก (Fracture Strength) ของพอลิเมอร์จะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับโลหะและเซรามิก โดยปกติรูปแบบการแตกหักของพอลิเมอร์กลุ่มเทอร์โมเซตจะเป็นแบบเปราะ ปกติส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแตกหักจะเป็นบริเวณที่มีการสะสมของแรงเค้นสำหรับพอลิเมอร์กลุ่มเทอร์โมพลาสติกสามารถเกิดการแตกหักได้ทั้งแบบเปราะและแบบเหนียว และวัสดุเทอร์โมพลาสติกหลายชนิดสามารถเปลี่ยนการแตกเหนียวเป็นแตกเปราะได้ ตัวแปรที่ทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะคือการลดอุณหภูมิ การเพิ่มอัตราความเครียด และการมีอยู่ของร่องบากที่มีลักษณะปลายแหลม การเพิ่มความหนาของชิ้นทดสอบ และการปรับโครงสร้างพอลิเมอร์ทางเคมี เซิงสายโซ่โมเลกุลและโครงสร้างจุลภาคเป็นต้น เทอร์โมพลาสติกคล้ายแก้ว (Glassy Thermoplastic) จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเข้าใกล้บริเวณอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น

Tg วัสดุจะเริ่มมีความเหนียวและมีช่วงของการจำนนแบบพลาสติก (Plastic Yielding) ก่อนเกิดการแตกหัก พฤติกรรมนี้ได้แสดงไว้โดยคุณลักษณะแรงเค้นความเครียดของ Polymethyl Methacrylate กล่าวคือ PMMA จะมีความเปราะที่อุณหภูมิ 4 °C และมีความเหนียวที่อุณหภูมิ 60 °C ปรากฏการณ์หนึ่งที่มีักทำให้เกิดการแตกหักในพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกคล้ายแก้วคือการแตกเป็นร่างแหเล็กๆ (Crazing) เกรซิงนี้เป็นบริเวณที่เกิดการจำนนเฉพาะที่ ซึ่งทำให้เกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็ก (Microvoids) กับสายเชื่อม (Fibrillar Bridge) เล็กๆ สายเชื่อมที่อยู่ระหว่างช่องว่างเล็กๆ เหล่านี้เป็นกลุ่มสายโซ่โมเลกุลที่มีการจัดเรียงทิศทางตามแนวแรงที่กระทำ และถ้าแรงดึงที่กระทำมากเพียงพอจะทำให้สายเชื่อมยืดออกและขาดในที่สุด เป็นเหตุทำให้ช่องว่างขนาดเล็กเหล่านี้เชื่อมเข้าด้วยกันและโตขึ้นกลายเป็นรอยแตกหัก เกรซิงแตกต่างจากรอยแตกปกติตรงที่สามารถรองรับแรงในแนวพื้นผิวตัดขวาง ยิ่งกว่านั้นกระบวนการเกรซิงจะดูดซับพลังงานการแตกหักและส่งผลทำให้ทัฟเนสการแตกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เกรซิงจะก่อให้เกิดบริเวณที่มีแรงเค้นสูงบริเวณรอยข่วน จุดบกพร่องและบริเวณโมเลกุลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้การดูกลามจะตั้งฉากกับแรงเค้นดึงที่กระทำซึ่งปกติหนาไม่เกิน 5 ไมครอน ทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการแตกหักที่ได้อธิบายในบทก่อนหน้านี้นี้สามารถประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งเปราะหรือกึ่งเปราะได้ โดยความเสี่ยงของวัสดุต่อการแตกหักเมื่อรอยร้าวปรากฏอาจแสดงในเทอมของความแกร่งการแตกหักจากความเครียดแนวระนาบ (Plane Strain Fracture Toughness) ขนาดของ K_{Ic} จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพอลิเมอร์ เช่น น้ำหนัก

2.4.13 คุณลักษณะอื่นๆ ของพอลิเมอร์ (Miscellaneous Characteristics)

1) ความแข็งแรงการกระแทก (Impact Strength) ในการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์บางอย่างจะเกี่ยวข้องกับระดับความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุในมีลักษณะที่ชิ้นงานมีร่องบาก ซึ่งในการทดสอบหาความแข็งแรงการกระแทก (Impact Strength) นี้จะเป็นแบบเดียวกันกับโลหะ คือจะใช้การทดสอบแบบ (Izod) และ (Charpy) โดยในการทดสอบพอลิเมอร์อาจแสดงรอยแตกแบบเหนียวหรือแบบเปราะภายใต้สภาวะการรับแรงกระแทก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ขนาดของชิ้นทดสอบ อัตราความเครียดและรูปแบบของแรงที่กระทำ ทั้งพอลิเมอร์ที่เป็นแบบผลึกและสัณฐานจะเปราะและมีความแข็งแรงการกระแทกค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนสมบัติจากเหนียวเป็นเปราะจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิแคบๆ เช่นเดียวกับกรณีของเหล็กกล้า กล่าวคือความแข็งแรงการกระแทกของวัสดุพอลิเมอร์ในช่วงอุณหภูมิสูงจะลดลงทีละน้อยเมื่ออุณหภูมิลดลงโดยพอลิเมอร์ยังคงมีสภาพที่อ่อนนุ่ม และเมื่ออุณหภูมิลดลงช่วงหนึ่งความแข็งแรงการกระแทกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และวัสดุจะมีสมบัติเปลี่ยนจากเหนียวเป็นเปราะโดยมีการดูดซับพลังงานน้อยลงอย่างมาก อุณหภูมิที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติจากเหนียวเป็นเปราะนี้เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยน

สภาพจากเหนียวเป็นเปราะ อุณหภูมินี้มีความสำคัญมากเมื่อนำวัสดุพอลิเมอร์ไปใช้งานในสภาวะหรือบรรยากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงกว้างและครอบคลุมอุณหภูมิของกาเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของพอลิเมอร์นี้ ปกติในการทดสอบการกระแทกทั้งสองแบบจะใช้ในการวัดสมบัติหรือคุณลักษณะสองอย่างที่สำคัญของวัสดุพอลิเมอร์ คือความแข็งแรงการกระแทกที่อุณหภูมิห้องกับความแข็งแรงการกระแทกที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพจากเหนียวเป็นเปราะซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิห้อง

2) การล้า (Fatigue) พอลิเมอร์อาจเกิดความเสียหายจากการล้าภายใต้การรับแรงแบบเวียนรอบสลับกันระหว่างแรงของสองชนิดแบบซ้ำๆเช่นเดียวกับโลหะ การล้าของวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้ที่ระดับแรงเค้นที่ต่ำกว่าความแข็งแรงจํานนของวัสดุ การทดสอบการล้ากับวัสดุพอลิเมอร์อาจพฤติกรรมการล้าของพอลิเมอร์จะว่องไวต่อความถี่ของการใส่แรงมากกว่าโลหะอย่างมาก การหมุนพอลิเมอร์ด้วยรอบความถี่สูงและหรือด้วยแรงเค้นค่อนข้างสูงสามารถทำให้เกิดความร้อนเฉพาะบริเวณซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นจากการอ่อนตัวลงของวัสดุมากกว่าที่จะมาจากผลของกระบวนการการล้า

3) ความแข็งแรงการฉีกขาดและความแข็ง (Tear Strength and Hardness) สมบัติทางกลอื่นๆ ที่บางครั้งมีอิทธิพลต่อความเหมาะสมในการนำพอลิเมอร์ไปใช้งานบางอย่าง หนึ่งในนั้นคือการต้านทานการฉีกขาดและความแข็ง ความสามารถในการต้านในชิ้นงาน โลหะความแข็งจะแสดงถึงความต้านทานของวัสดุต่อการขีดข่วน การเกิดเป็นรอยขีด การเสีรูปร่าง และอื่นๆ ในทำนองเดียวกัน พอลิเมอร์จะอ่อนนุ่มมากกว่าโลหะและเซรามิก และการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่จะทำโดยเทคนิคของการทำให้เกิดรอยขีดเช่นเดียวกับที่ใช้กับโลหะ การทดสอบแบบ Rockwell บ่อยครั้งใช้กับพอลิเมอร์ เทคนิคการกดอื่นๆเพื่อทำให้เกิดรอยลงไปบนเนื้อวัสดุได้แก่

2.5 สมบัติของวัสดุ

2.5.1 เส้นใยแก้ว (Glass Fibers) อภิชาติ สนธิสมบัติ[9] ได้สรุปไว้ว่าเป็นวัสดุที่ใช้กันมานานมาก แต่การทำให้ใยแก้วมีความแข็งแรง (เสริมแรง) เป็นแนวความคิดใหม่ ในปี พ.ศ. 2463 เป็นครั้งแรกที่มีความพยายามในการทำให้เกิดเส้นใยแก้ว (เสริมแรง) โดยปกติเส้นใยแก้วประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ โบรอนออกไซด์ และโลหะออกไซด์จํานวนเล็กน้อย ปกติแก้วจะเป็นรูปร่างเหสามมิติชนิด isotropic ซึ่งมีเหลี่ยมของอะตอมออกซิเจน 4 อะตอมรอบๆ อะตอมซิลิกอน แต่ทำให้ไม่ปกติ และเป็นส่วนไม่เป็นผลึก (ไม่เป็นระเบียบ) ด้วยอิออนของโลหะ เดียวนี้บริษัท Owens Corning, Ventrotex, Ahlstrom และ Pilkinston เป็นบริษัทชั้นนำในการผลิตเส้นใยแก้ว (เสริมแรง)

การนำไปใช้งาน การใช้งานของเส้นใยแก้วมักจะเป็นพลาสติกเสริมแรง เช่น อากาศยาน และอวกาศ เครื่องมือเครื่องใช้ การก่อสร้าง สินค้าต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ป้องกันการกัดกร่อน เป็นต้น อีกประเภทใช้ในงานเส้นใยแก้วเสริมแรงในพลาสติก เพื่อใช้ด้านอุตสาหกรรม และรถยนต์ บางส่วนใช้ในกิจกรรมด้านกีฬา และการพักผ่อนหย่อนใจ เช่น เครื่องบินเล็ก เป็นต้น ในปัจจุบัน เส้นใยแก้วถูกนำมาใช้แทนเส้นใยหิน เนื่องจากเส้นใยแก้วไม่ไหม้ไฟ ทนต่อจุลินทรีย์ มีความเสถียรภาพ และไม่มีพิษต่อร่างกาย

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว (เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก)

Components	AR-glass	C-glass	E-glass	S-glass
SiO ₂	62.2	65	55.2	65
ZrO ₂	16.7	-	-	-
TiO ₂	0.1	-	-	-
Fe ₂ O ₃	0.09	0.3	0.3	-
B ₂ O ₃	-	5	7.3	-
CaO	5.2	14	18.7	-
MgO	0.16	3	3.3	10
Na ₂ O	14.3	8.5	0.3	-
K ₂ O	0.4	-	0.2	-
LiO ₂	-	-	-	-
F ₂	-	-	0.3	-

Composition of Glass Fibres[Wt%]



ภาพที่ 2.11 เส้นใยแก้ว (Glass Fibers)

2.5.2 เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibers) อภิชาติ สนธิสมบัติ [9] ได้สรุปไว้ว่า เส้นใยเซรามิกเป็นเส้นใยประเภทพอลิคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะ คาร์ไบด์ของโลหะ ไนไตรด์ของโลหะ หรือส่วนผสมอื่นๆ ในกรณีนี้ถือว่าซิลิกอน และโบรอน ใน พ.ศ. 2493-2503 เริ่มมีการนำไปใช้กับงานด้านอวกาศ นิวเคลียร์ โรงงานเคมี เพราะงานเหล่านี้ต้องการเส้นใยที่ทนความร้อนสูง และมีความคงทนต่อความร้อนมากกว่าเส้นใยแก้ว อีกประการมีความต้องการสร้างวัสดุที่มีสมรรถนะด้านเชิงกลที่ดีเยี่ยม เบา แต่แข็งแรง และทนความร้อนสูง ดังนั้นจึงนำมาซึ่งการใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ อะลูมินา/อะลูมิโน-ซิลิเกต ใน พ.ศ. 2523-2533 ได้มีการเปลี่ยนมาทำการวิจัยเกี่ยวกับอะลูมินา หรืออะลูมิโน-ซิลิเกต หรือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ บริษัทที่เป็นผู้ผลิตเส้นใยเซรามิกที่มีส่วนผสมของอะลูมินา มีบริษัท ICI 3M Dupont และ Sumitomo ส่วนผู้ผลิตเส้นใยเซรามิกที่มีองค์ประกอบซิลิกอน เช่น บริษัท Nippon Carbon Dow Corning/Celanese เป็นต้น ซึ่งจะเน้นเฉพาะเส้นใยที่มีองค์ประกอบอะลูมินา และซิลิกอนคาร์ไบด์ เท่านั้น

การนำไปใช้งาน เส้นใยเซรามิก สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. เทคโนโลยีการผสมวัสดุ ทำให้เกิดความแข็งแรงสูง ความเหนียว และทนอุณหภูมิได้สูงตามต้องการ
2. จนวนกันความร้อนแบบใช้งานหนัก และตัวกรองกาซที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น เส้นใยเซรามิกได้ถูกนำไปผสมกับเส้นใยโลหะทำให้เป็นเส้นใยผสมที่เหมาะสมกับงานอวกาศ และ โรงงานเคมี เพราะทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อนสูงมาก

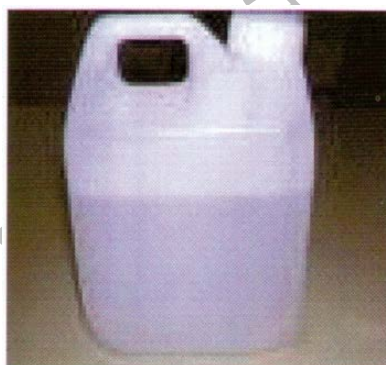
ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานของเส้นใยเซรามิก

Fiber Type	Maximum Use of Temperatures (°C)		
	Oxidizing Temperature (°C)	Non-oxidizing Atmosphere	Melting
Al ₂ O ₃	1,540	1,600	2,040
Al ₂ O ₃ -SiO ₂	1,300	1,300	1,760
Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -B ₂ O ₃	1,427	1,427	1,740
Sic	1,800	1,800	2,690
Si ₃ N ₄	1,300	1,800	1,900



ภาพที่ 2.12 เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibers)

2.5.3 อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy Resin) พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์[10]ได้กล่าวไว้ว่า ลักษณะ เป็นของเหลวข้น มีสีเหลืองอ่อนๆ การใช้งานต้องผสมตัวทำแข็งของ Epoxy สมบัติ ใช้ทำผิวและโครงสร้างที่แข็งแรงสามารถรับแรงและมีกำลังยึดเกาะที่สูงและยังมีการหดตัวน้อย การนำไปใช้สำหรับใช้หล่อขึ้นรูปร่วมกับใยแก้วได้ทุกชนิด โดยส่วนใหญ่ใช้กับเส้นใยคาร์บอนและเคฟลาร์ เช่น อุปกรณ์กีฬา เครื่องร่อน เป็นต้น



ภาพที่ 2.13 อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy Resin)

2.5.4 ตัวทำแข็ง (Hardener/MEKPO) พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์[10]ได้กล่าวไว้ว่า ลักษณะ เป็นของเหลวใสเหมือนน้ำ มีกลิ่นฉุนเหมือนกรด สมบัติ ใช้ผสมกับเจลโค้ทและน้ำยาเรซิน เพื่อให้เกิดการแข็งตัว

การนำไปใช้ สำหรับใช้ผสมในอัตราส่วน เรซิน = 100 ส่วน : MEKPO = 1-2 ส่วนของน้ำหนัก

ข้อควรระวัง ห้ามผสมตัวทำแข็ง (MEKPO) โดยตรงกับตัวโคบอลต์จะทำให้เกิดลูกเป็นไฟ การเก็บรักษา ต้องเก็บแยกจากโคบอลต์ และในที่ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก กรณีเกิดการหกใส่พื้นต้อง เช็ดให้แห้ง ใช้ทินเนอร์ล้างออกให้สะอาด หรือนำผ้าหรือกระดาษตัวทำแข็งไปใส่ถังขยะรวมกัน เพราะถ้าเกิดมีเศษโคบอลต์อยู่จะสามารถติดไฟได้



ภาพที่ 2.14 ตัวทำแข็ง (Hardener/MEKPO)

2.5.5 ตัวถอดแบบ (Mold Release) ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 4 ประเภทคือ

- 1) แบบขี้ผึ้ง (Wax) ใช้ทาบางๆ ที่แม่แบบแล้วขัดเงาด้วยผ้าที่สะอาด แม่แบบจะเงาขึ้น
- 2) แบบน้ำ (Water Base) เป็นตัวถอดแบบชนิดน้ำ ซึ่งสามารถถอดชิ้นงานได้ดี สำหรับผิวชิ้นงานที่ขรุขระไม่เรียบ ข้อดีคือ ไม่มีอันตรายต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงาน
- 3) แบบสารเคมี (Solvent) เป็นน้ำยาถอดแบบที่มีสารเคมีผสมอยู่ด้วย สามารถถอดชิ้นงานได้หลายครั้ง ต่อการลงน้ำยา 1 รอบ
- 4) แบบแผ่นฟิล์ม มีด้วยกัน 2 แบบคือ
 - ก) PVA น้ำ เป็นน้ำยาถอดแบบซึ่งมีลักษณะเป็นน้ำ ใช้ทาลงแม่แบบบางๆ ปล่อยให้แห้งประมาณ 10 นาทีจะกลายเป็นแผ่นฟิล์ม เหมาะสำหรับการทำต้นแบบและแม่แบบ
 - ข) Mylar Film เป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งทำมาจากโพลีเอสเตอร์รีดออกมาเป็นแผ่น ใช้สำหรับทำชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบทำหลังคาโปร่งแสง

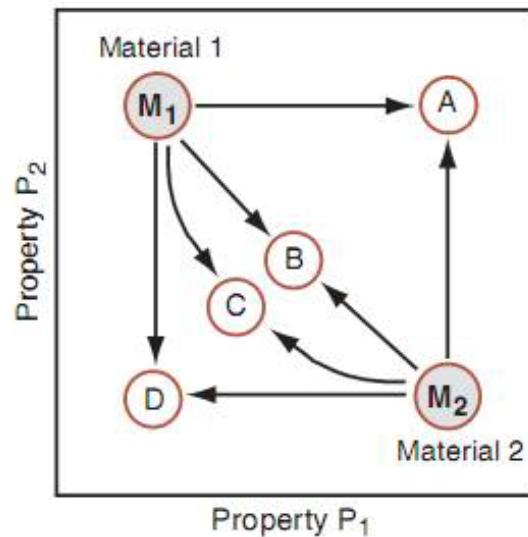


ภาพที่ 2.15 ตัวถอดแบบ (Mold Release)

2.6 การออกแบบวัสดุผสม (Designing Hybrid Materials)

www.qlickbranding.com/learn/chap8/01.html [11] ได้สรุปไว้ว่า ในการผลิตชิ้นส่วนทางวิศวกรรมและผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยีใหม่ๆ ปัจจุบันอาจจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษหลายอย่างรวมอยู่ด้วยกันซึ่งไม่สามารถหาได้ในวัสดุทั่วไปที่เป็นเนื้อเดียวไม่ว่าจะเป็น เซรามิก โลหะ หรือพอลิเมอร์ สมบัติพิเศษเหล่านี้เช่นวัสดุที่มีความแข็งสูง แต่มีความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นความต้องการของการออกแบบของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมอากาศยาน โดยที่วัสดุทั่วไปอาจไม่สามารถตอบสนองความต้องการของการออกแบบได้เพราะฉะนั้นวัสดุผสม (Hybrids) จึงเป็นหนึ่งในทางเลือกที่ดีสำหรับความต้องการของการออกแบบที่ต้องการสมบัติหลายอย่างรวมกัน วัสดุผสมเป็นการนำวัสดุต่างประเภทที่มีสมบัติต่างกันมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของการออกแบบได้วัสดุผสมจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของการออกแบบที่ต้องการวัสดุที่ทำหน้าที่หลายอย่างในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยเฟสสองชนิด

การเลือกใช้วัสดุผสมต้องเริ่มจากการวิเคราะห์ความต้องการของการออกแบบรวมถึงข้อจำกัด (Constraints) ต่างๆไม่ว่าจะเป็นข้อจำกัดด้านสมบัติ (Properties) หรือว่าข้อจำกัดในด้านหน้าที่ (Functions) และหากผลจากการวิเคราะห์และการคัดเลือกวัสดุเบื้องต้นปรากฏว่ามีวัสดุชนิดใดก็ตามที่สามารถตอบสนองข้อจำกัดทั้งหมดได้วัสดุชนิดนั้นจะถูกเลือกใช้ จากนั้นทำการเลือกสัดส่วนปริมาตร (Volume Fraction) ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการซึ่งต้องอยู่ภายในขอบเขตบนและขอบเขตล่างของสมบัติของวัสดุผสม (Upper and Lower Bounds) และต้องพิจารณาและวิเคราะห์ถึง (Criterion of Excellence) ซึ่งเป็นไปตามดัชนีวัสดุ (Material Index) แล้วพลอตเส้นต่างๆเหล่านี้ในชาร์ตการเลือกวัสดุ (Material Selection Chart)



ภาพที่ 2.16 วัสดุผสมหรือวัสดุเชิงประกอบ

สมบัติของวัสดุที่ได้นั้นสามารถเป็นได้ 4 กรณีดังนี้

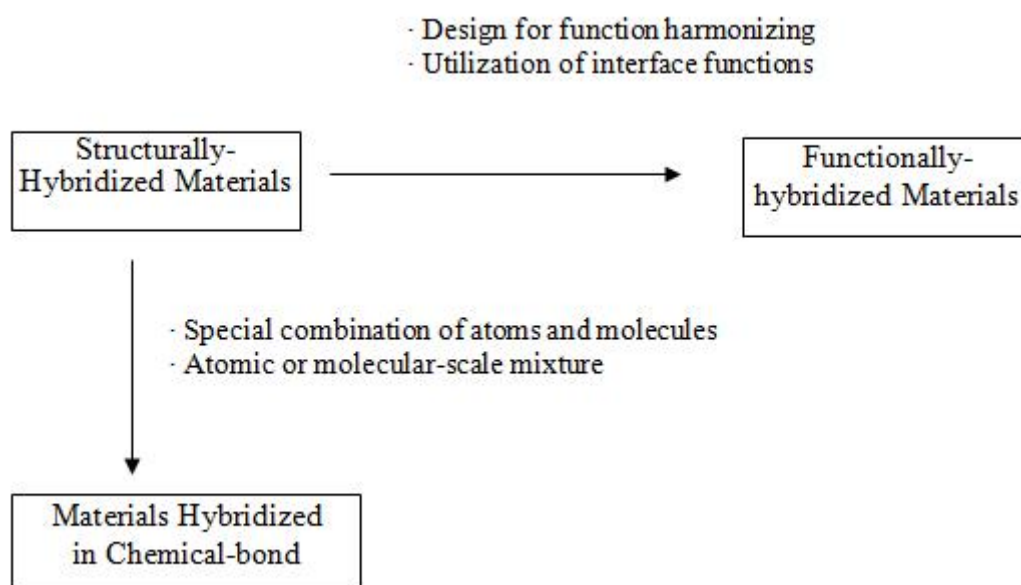
กรณี A ถือได้ว่าเป็นกรณีที่รวมข้อดีของสมบัติของวัสดุตั้งต้นทั้งสองชนิดซึ่งกรณีนี้เป็นกรณีอุดมคติ โดยทั่วไปวัสดุผสมจะมีสมบัติที่เป็นไปตามกรณีนี้เมื่อมีการนำสมบัติทั่วไปของวัสดุชนิดหนึ่งมารวมกับสมบัติของพื้นผิวที่ดีของวัสดุอีกชนิดหนึ่งเช่นการการชุบเหล็กกล้าด้วยสังกะสี (Galvanized Steel) เป็นการรวมสมบัติทางกลที่ดีของเหล็กกล้าผสมกับสมบัติของผิวที่ดีของสังกะสี โดยเฉพาะความต้านทานการกัดกร่อน

กรณี B เป็นกรณีที่สมบัติของวัสดุผสมเป็นไปตามกฎการผสม (Rule of Mixture) โดยที่สมบัติของวัสดุผสมเป็นผลลัพธ์ของสมบัติของวัสดุเริ่มต้นทั้งสองชนิดที่รวมกันและเฉลี่ยกันทางพีชคณิตโดยมีการถ่วงน้ำหนักในอัตราส่วนของปริมาตร (Volume Fraction)

กรณี C เป็นกรณีที่สมบัติของวัสดุที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิก (Harmonic Mean) ของวัสดุตั้งต้นแต่ว่ายังมีสมบัติที่รวมกันแล้วดีกว่าวัสดุตั้งต้นชนิดใดชนิดหนึ่งเดี่ยวๆซึ่งในบางกรณีวัสดุผสมนี้สามารถนำมาใช้งานได้เหมือนกัน

กรณี D เรียกว่า "The Worst of Both" เป็นกรณีที่วัสดุรวมเอาสมบัติที่ไม่ดีของวัสดุที่เริ่มต้นทั้งสองชนิดไว้ด้วยกันซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เช่นระบบน้ำดับเพลิงตามอาคารที่เป็นวัสดุผสมของโลหะและซีเมนต์โดยที่ชิ้นส่วนโลหะถูกออกแบบให้เกิดการวิบัติเมื่อซีเมนต์ละลายไปเมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงกว่าจุดหลอมเหลวของซีเมนต์และเมื่อชิ้นส่วนโลหะหักออกน้ำจะถูกปล่อยออกมาเพื่อดับเพลิง

2.6.1 การจำแนกประเภทของวัสดุผสม (Classification of Hybrid Materials)



ภาพที่ 2.17 การจำแนกประเภทของวัสดุผสม

วัสดุผสมสามารถที่ถูกจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆได้โดยใช้อ็องค์ประกอบเป็นเกณฑ์ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- 1) วัสดุเชิงประกอบ (Composite) เป็นวัสดุผสมที่มีใช้แพร่หลายที่สุด ประกอบด้วยสองเฟสหลักคือเฟสเนื้อพื้นและเฟสที่กระจายซึ่งเป็นเฟสเสริมแรง
- 2) แซนด์วิช (Sandwich) เป็นวัสดุผสมที่วัสดุชนิดหนึ่งเป็นผิวด้านนอกและมีแกนด้านในซึ่งปกติเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและทำให้วัสดุแซนด์วิชมีสมบัติทางกลที่ดี โดยเฉพาะมีความสามารถในการต้านทานการบิดงอที่ดีและดีกว่าวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาประกอบเป็นผิวและแกนกลาง
- 3) โครงร่างแลตทิซ (Lattice) เป็นโครงสร้างที่ผสมกันระหว่างวัสดุและช่องว่าง โครงร่างแลตทิซแบ่งได้เป็นสองชนิดหลักๆคือโครงสร้างที่รับแรงแบบบิดงอ (Bending Dominated Structure) และโครงสร้างที่รับแรงดึง (Stretch Dominated Structure)
- 4) โครงสร้างแบบชิ้น (Segment) แบ่งได้เป็นแบบ 1D 2D และ 3D เพราะว่ามีโครงสร้างเป็นชิ้นๆแยกกันอยู่และนำมาต่อกันทำให้วัสดุผสมแบบนี้มีความต้านทานความเสียหายที่ดี

2.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จินตมัย สุวรรณประทีป [12] ได้สรุปไว้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในวัสดุใดๆนั้นถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดยโรเบิร์ต ฮุก (Robert Hooke) โดยกล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างย่อมเป็นสัดส่วนกับแรง ซึ่งหมายถึงวัสดุจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างยาวขึ้นหรือสั้นลงเป็นสัดส่วนกับแรงที่เพิ่มหรือลดในวัสดุ ตัวอย่างเช่น เส้นใยไนลอนเมื่อถูกดึงด้วยแรง 10 กรัม จะยืดตัวออก 1 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มแรงเป็น 20 กรัม เส้นใยจะยืดตัวออกเป็น 2 มิลลิเมตร เป็นต้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนสมการเชิงเส้นที่เรียกว่ากฎของฮุก ดังนี้

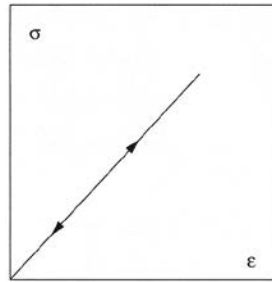
$$\text{แรง} = \text{ค่าคงที่} \times \text{การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง} \dots\dots\dots 2.4$$

อย่างไรก็ตาม ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการใช้ค่าของภาระแรงในการอธิบายสมบัติของวัสดุนั้นไม่เป็นสิ่งที่ชัดเจน ซึ่งต่อมาโทมัส ยัง (Thomas Young) จึงได้แสดงว่าค่าความเค้นและค่าความเครียดก็มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนเช่นเดียวกัน จึงทำให้กฎของฮุกถูกดัดแปลงขึ้น

$$\text{ความเค้น} = \text{ค่าคงที่} \times \text{ความเครียด} \dots\dots\dots 2.5$$

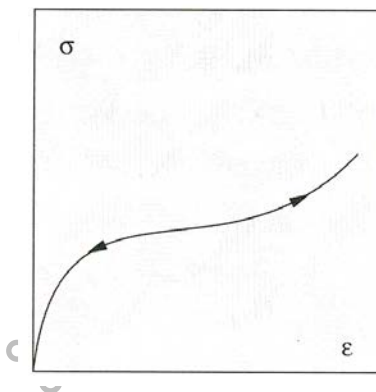
ซึ่งค่าคงที่นี้แสดงถึงความแกร่งของวัสดุหรือความสามารถในการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งได้แก่ ค่านมอดูลัสของยัง (Young's Modulus) นั่นเอง ซึ่งวัสดุที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเช่นนี้จะถือว่ามีสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Behavior) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อเราหยุดให้แรงกระทำแก่วัสดุ วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างคืนกลับมาโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุในกรณีของการให้แรงการกระทำและหลังหยุดให้แรงกระทำจะมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้อนกัน

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่แสดงสมบัติเช่นนี้มักจะเป็นวัสดุในอุดมคติเท่านั้น อย่างไรก็ตามวัสดุทั่วไปถึงแม้จะไม่แสดงสมบัติยืดหยุ่นเช่นนี้โดยตลอดแต่จะแสดงสมบัติยืดหยุ่นเช่นนี้ที่ค่าความเครียดต่ำเท่านั้น (โดยมากต่ำกว่าความเครียด 0.1%) และสามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) เท่านั้น



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Behavior)

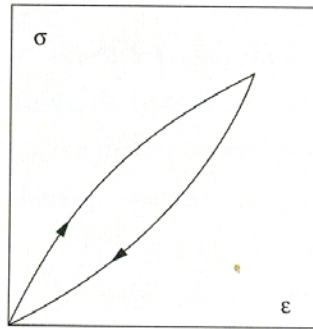
นอกจากสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นแล้ววัสดุบางประเภท เช่น วัสดุจำพวกยาง สามารถที่จะแสดงสมบัติยืดหยุ่นอีกประเภทเรียกว่า ยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic Behavior) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 วัสดุประเภทนี้เมื่อได้รับแรงกระทำ สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูง แต่ยังคงสมบัติยืดหยุ่นและสามารถที่จะคืนตัวกลับสู่สภาพเริ่มต้นเมื่อยุติการให้แรงกระทำโดยไม่สูญเสียพลังงานเช่นเดียวกับวัสดุแสดงสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic)

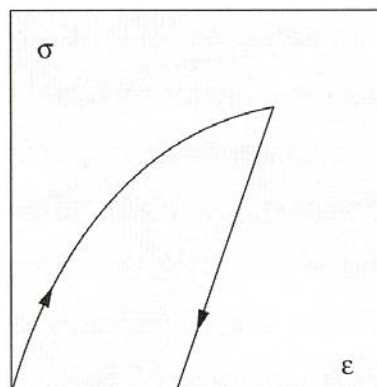
นอกจากสมบัติยืดหยุ่นแล้ว วัสดุบางประเภทยังแสดงสมบัติอีกประเภทซึ่งเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลาหรือที่เรียกกันว่าสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Behavior) คือ เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ วัสดุจะสามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมเมื่อยุติการให้แรงกระทำขึ้นงานทดสอบ หากแต่ในการคืนตัวกลับมานี้จะมีการสูญเสียพลังงานและในบางกรณีอาจจะใช้เวลานานในการคืนตัว

ดังรูปที่ 2.19 ได้แก่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในกรณีของการให้แรงกระทำและการยุติการให้แรงกระทำจะมีรูปร่างที่ต่างกัน ไม่ทับซ้อนกันดังเช่นในกรณีของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติกเชิงเส้น ซึ่งสมบัติประเภทนี้มักพบได้ในพอลิเมอร์ต่างๆ



ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุวิสโคอีลาสติก(Viscoelastic)

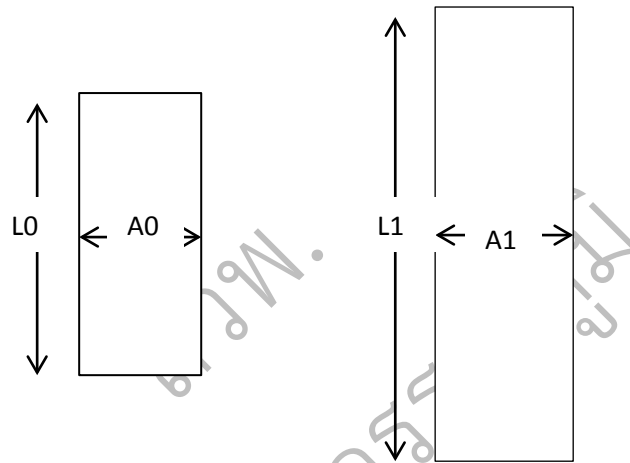
จะเห็นได้ว่าลักษณะที่สำคัญของสมบัติยืดหยุ่น ได้แก่ การที่สามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมได้เมื่อยุติการให้แรงกระทำ ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงกรณีของวัสดุประเภทยางแล้ว สมบัติความยืดหยุ่นนี้จะจำกัดอยู่เพียงในระดับของค่าความเครียดต่ำเท่านั้น จุดที่วัสดุเปลี่ยนแปลงสมบัติจากยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเรียกว่า จุดคราก (Yield Point) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกินระดับของค่าความเครียด ณ จุดดังกล่าวนี้ วัสดุดังกล่าวจะไม่สามารถคืนตัวกลับมาสู่สภาพเดิมได้เมื่อยุติการให้แรงกระทำหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic or Permanent Deformation) ซึ่งสมบัติของวัสดุหรือความสัมพันธ์ประเภทนี้จะพบได้ในวัสดุทุกประเภทที่ระดับค่าความเครียดสูงๆ ยกเว้นในกรณีของวัสดุเปราะที่จะเกิดการแตกหักขึ้นก่อนที่จะแสดงสมบัติประเภทนี้



ภาพที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic)

เมื่อวัสดุอยู่ในสภาพของการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก รูปร่างของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการลดหรือเพิ่มขนาดความกว้าง ขึ้นกับว่าวัสดุถูกแรงกระทำให้อัดตัวหรือยวบตัว ซึ่งในระหว่างการให้แรงกระทำและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนี้ ให้ถือว่าปริมาตรของวัสดุมีค่าคงที่ ดังนั้น $A_0L_0 = A_1L_1$

- โดยที่
- A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
 - L_0 คือ ระยะเริ่มต้น
 - A_1 คือ พื้นที่หน้าตัด ณ เวลาใดๆ
 - L_1 คือ ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ณ เวลาใดๆ



ภาพที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุเมื่อได้รับแรง

จากสมการ จะเห็นได้ว่าพื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะลดลงเรื่อยๆ ตามแรงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น คำนิยามของความเค้นและความเครียดในสมการ ซึ่งจะควรเรียกว่าความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering or Conventional Stress) และความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering or Conventional Strain) เนื่องจากเป็นการประมาณจากรูปทรงของวัสดุเริ่มต้นโดยไม่ได้คำนึงถึงรูปทรงของวัสดุที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทดสอบซึ่งจะมีผลต่อภาระการรับแรงที่ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงตามกัน ดังนั้น จึงมีการตัดแปลงเพื่อคำนวณค่าความเค้นและความเครียดจริงที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้น โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\text{ความเครียดจริง (True Strain, } \epsilon_t) = \sum_i \frac{(\Delta L)}{L_i} \dots\dots\dots 2.6$$

เราสามารถเปลี่ยนค่าความเค้นจริงให้อยู่ในรูปของค่าสัดส่วนของความเค้นเชิงวิศวกรรม โดยการใช้หลักการเดียวกับการคำนวณค่าความเครียดจริง คือ ถือว่าปริมาตรของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราสามารถที่จะคำนวณหาความเค้นจริงและความเครียดจริงได้จากความเค้น

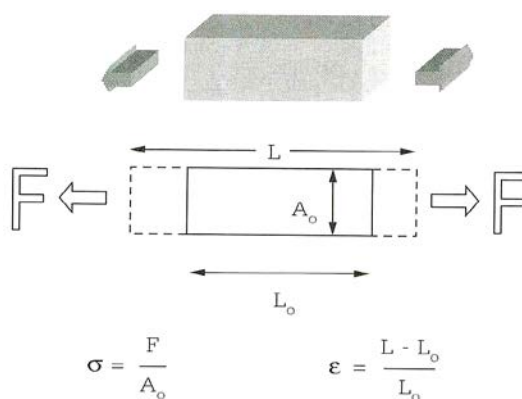
เชิงวิศวกรรม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยทั่วไปจึงสามารถเปลี่ยนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงได้เพื่อใช้ในการศึกษาถึงสมบัติของวัสดุที่ระดับความเครียดสูงหรือเมื่อวัสดุเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเชิงวิศวกรรมและค่าจริงของความเค้น จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของกราฟความสัมพันธ์นั้น ค่าความเค้นทั้งสองประเภทไม่มีความแตกต่างกันแต่อย่างใด หากจะเริ่มมีความแตกต่างเมื่อผ่านจุดครากโดยค่าความเค้นจริงจะมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเชิงวิศวกรรม

2.7 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)



ภาพที่ 2.23 เครื่องทดสอบแรงดึง

จินตมัย สุวรรณประทีป[13] ได้สรุปไว้ดังนี้ การทดสอบแรงดึง ถือได้ว่าเป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยมและเป็นที่รู้จักมากที่สุดกว่าได้สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ โดยในการทดสอบจะเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานในทิศทางตรงข้ามกันเพื่อสร้างแรงดึงขึ้นในชิ้นงาน ถึงแม้ในทางทฤษฎีการทดสอบประเภทนี้จะใช้งานในการทดสอบวัสดุประเภทโลหะและพอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่ ไม่นิยมใช้งานในการทดสอบเซรามิกทั้งนี้เนื่องจากความยากของการเตรียมชิ้นงาน การจับยึด และการติดตั้งในการทดสอบอันเนื่องมาจากความเปราะซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของเซรามิกที่เป็นข้อจำกัดในการทดสอบ



ภาพที่ 2.24 หลักการทดสอบแรงดึง

โดยทั่วไปแล้วชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะอยู่ในรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะเรียวยาว (อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างมีค่ามาก) และปลายทั้งสองสามารถถูกจับยึดโดยเครื่องทดสอบได้ การใช้ชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น มักจะไม่เหมาะต่อการทดสอบโดยทั่วไปทั้งนี้เนื่องจากการที่ชิ้นงานดังกล่าวสามารถที่จะแตกหักหรือขาดในบริเวณใดก็ได้ตลอดความยาวของชิ้นงานเนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากัน ทำให้ในทุกบริเวณตกอยู่ในภายใต้ความเค้นใกล้เคียงกัน ทำให้การแตกหักอาจจะเกิดขึ้นนอกบริเวณที่ทำการวัดความเครียดบนชิ้นงานก็ได้ และยังมีโอกาสสูงที่จะเกิดการแตกหักในบริเวณจับยึดทั้งสองข้างเนื่องมาจากความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากแรงบีบที่ใช้จับยึดชิ้นงานจึงทำให้ผลการทดสอบจากการใช้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้อาจจะมีค่าที่ต่ำกว่าสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้ยกเว้นแต่ในการทดสอบฟิล์มหรือแผ่นพลาสติกบางหรือชิ้นงานบางประเภทที่การเตรียมชิ้นงานทำได้ลำบากที่อาจจะยังคงต้องใช้ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการทดสอบ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว ชิ้นงานทดสอบแรงดึงนั้นจึงถูกกำหนดให้มีลักษณะรูปร่างที่มีพื้นที่หน้าตัดในบริเวณที่ต้องการวัดความเครียดอยู่ในบริเวณตรงกึ่งกลางชิ้นงานและมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่สำหรับการยึดในบริเวณปลาย หรือมีลักษณะคล้ายที่ยกน้ำหนัก (Dumbbell) โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ การออกแบบเช่นนี้ก็เพื่อที่จะกำหนดได้ว่าชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด (เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดต่ำสุด) ไม่แตกหักในบริเวณจับยึด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว การที่จะทดสอบแล้วชิ้นงานเกิดการแตกหักในบริเวณกึ่งกลางนั้นยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมชิ้นงานทดสอบ การติดตั้งชิ้นงานทดสอบ และความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ เป็นต้น ประเภทของชิ้นงานทดสอบแรงดึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทได้แก่

1) ดัมเบลแบบเอวแคบ (Narrow-Waisted Dumbbell) ชิ้นงานประเภทนี้เป็นชิ้นงานทดสอบทั่วไปสำหรับพลาสติก เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบพลาสติกทั้งอ่อนและแข็ง นอกจากนี้ใช้ทดสอบแรงดึงแล้ว ชิ้นงานประเภทนี้ยังสามารถนำไปใช้ทดสอบแรงดัดและทดสอบแรงกระแทกได้โดยการตัดปลายทั้งสองข้างสำหรับยึดจับที่

2) ดัมเบลแบบเอวกว้าง (Broad-Waisted Dumbbell) ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการทดสอบพลาสติกอ่อนนุ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่สามารถยืดตัวได้สูง ได้แก่ วัสดุจำพวกยางต่างๆ หรือพลาสติกนิ่ม

3) ดัมเบลแบบกระดูกสุนัข (Dog Bone Dumbbell) ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตในกรณีที่ชิ้นงานแบบดัมเบลโค้งเข้าไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับการทดสอบในปัจจุบัน

4) แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Parallel-Side Strip) ชิ้นงานประเภทนี้เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุเชิงประกอบ ในกรณีที่การเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงมีผลทำให้การตัดชิ้นงานเป็นรูปคัมเบลทำได้ลำบากและผลการทดสอบไม่แน่นอน แต่การใช้งานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้อาจจะประสบปัญหาของการแตกหักบริเวณที่จัดยึดได้ง่าย ดังนั้น เพื่อป้องกันปัญหานี้ แผ่นประกอบจึงมักถูกติดตั้งเพื่อใช้ในการเสริมแรงบริเวณจัดยึดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในบริเวณนั้น นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบแล้ว ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ยังถูกใช้ในการทดสอบฟิล์มพลาสติกอีกด้วย

2.8 การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural Test)

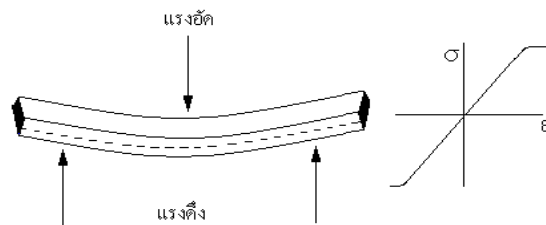


ภาพที่ 2.25 เครื่องทดสอบแรงดัดงอ

จินตมัย สุวรรณประทีป[14] ได้สรุปไว้ดังนี้ การทดสอบแรงดัดงอเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบพลาสติก และมักใช้เป็นวิธีประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ เนื่องจากวิธีนี้จะไม่ค่อยมีปัญหาซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ระหว่างชิ้นงาน และเครื่องทดสอบเหมือนการทดสอบแรงดึง นอกจากนี้การกระจายตัวของแนวแรงยังถูกจำกัดอยู่แต่ในบริเวณที่จะเสียหายอีกด้วย อย่างไรก็ตามสภาพของแรงที่เกิดขึ้นทั้งสองประเภทนี้แตกต่างกัน ในการทดสอบแรงดึงนั้น ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด (Uniform Tension) แต่ในการทดสอบแรงดัดงอ ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากในสถานะที่ชิ้นงานถูกดัดงอนั้น ชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงสูงสุดบนผิว หนึ่งและได้รับแรงอัดบนผิวตรงกันข้าม

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะ แต่ไม่เหมาะสำหรับพลาสติกอ่อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงดัดได้มาก เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอนี้จะถูกต้องในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุใน

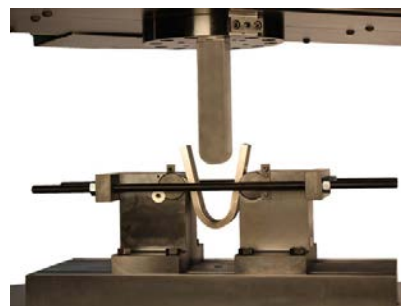
ระดับต่ำ วัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้น และอยู่ภายใต้แรงดัดงอเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น โดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่ระดับความเครียดเกิน 5%



ภาพที่ 2.26 หลักการทดสอบแรงดัดงอ

โดยทั่วไปการทดสอบการดัดงอแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.8.1 การดัดงอแบบ 3 จุด (Three-Pointed Bending) การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุด รับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง เท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round Knike Edges) หรือเพลลาโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกด และชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และ มีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อ เป็นการลดความเข้มของความเค้น (Stress Concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัส และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



ภาพที่ 2.27 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

ตารางที่ 2.8 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงค้ำงอแบบ 3 จุด

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก
ความเค้น	$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2}$	$\sigma = \frac{8FL}{\pi D^2}$
ความเครียด	$\epsilon = \frac{6Yh}{L^2}$	$\epsilon = \frac{6YD}{L^2}$
มอดูลัส	$E = \frac{L^3}{4Bh^3} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$E = \frac{4L^3}{3\pi^4} \left(\frac{F}{Y}\right)$

ที่มา : จินตมัย สุวรรณประทีป[14]

โดยที่

F คือ แรงกระทำ

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (Span Length)

h คือ ความหนา

B คือ ความกว้าง

Y คือ ระยะการค้ำงอของชิ้นงาน

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกต้น

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง F และ Y ในวงเล็บจะเท่ากับความชันในช่วงแรกของกราฟ ที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการค้ำงอของชิ้นงานในช่วงแรกที่ยังเป็นเส้นตรง

2.8.2 การทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Pointed Bending) การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่ 2 จุด ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าในกรณีของการทดสอบการค้ำงอแบบ 3 จุด หัวกดที่ให้ภาระและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมนหรือเพลาลอยแข็งเช่นเดียวกับ การทดสอบแบบ 3 จุด แต่รัศมีของหัวกดและชุดให้ภาระจะมีค่าเท่ากัน โดยจะต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 1.5 เท่าของความหนาของชิ้นงานทดสอบ ระยะห่างระหว่างชุดกดและชุดรองรับในการทดสอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบ 1/3 และแบบ 1/4 การจัดระยะ 1/3 หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ-จุดกดและระหว่างจุดกดทั้งสองมีค่าเท่ากันคือ 1/3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ในขณะที่การจัดระยะแบบ 1/4 หมายถึงระยะห่างระหว่างจุดรองรับและจุดกดมีค่าเท่ากับ 1/4 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ในขณะที่ระยะห่างระหว่างจุดกดทั้งสองเท่ากับ 2/4 เท่าของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองหรือระยะ

สเปกสามารถกำหนดได้โดยจาก อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นงานทดสอบโดย มีค่าได้ระหว่าง 16 : 1 ถึง 60 : 1, จินตมัย สุวรรณประทีป[13]



ภาพที่ 2.28 การทดสอบการค้ำงอแบบ 4 จุด

ตารางที่ 2.9 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงค้ำงอแบบ 4 จุด

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก	ทรงกระบอก
	1/3	1/4	1/3	1/4
	ของระยะสเปก	ของระยะสเปก	ของระยะสเปก	ของระยะสเปก
ความเค้น	$\sigma = \frac{FL}{Bh^2}$	$\sigma = \frac{3FL}{4Bh^2}$	$\sigma = \frac{16FL}{3\pi^3}$	$\sigma = \frac{4FL}{\pi D^3}$
ความเครียด	$\epsilon = \frac{4.70Yh}{L^2}$	$\epsilon = \frac{4.36Yh}{L^2}$	$\epsilon = \frac{4.70YD}{L^2}$	$\epsilon = \frac{4.36YD}{L^2}$
มอดูลัส	$\epsilon = \frac{0.2IL^3}{Bh^2} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$\epsilon = \frac{0.17L^3}{Bh^3} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$\epsilon = \frac{1.12L^3}{\pi D^4} \left(\frac{F}{Y}\right)$	$\epsilon = \frac{0.91L^3}{\pi D^4} \left(\frac{F}{Y}\right)$

ที่มา : จินตมัย สุวรรณประทีป[14]

โดยที่

F คือ แรงกระทำ

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (Span Length)

h คือ ความหนา

B คือ ความกว้าง

Y คือ ระยะการค้ำงอของชิ้นงาน

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกต้น

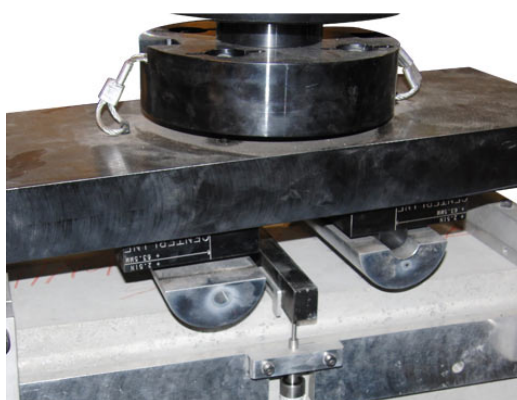
ลักษณะชิ้นงานสำหรับการทดสอบการค้ำงอทั้งแบบ 3 จุดและ 4 จุดนั้นจะอยู่ในลักษณะของคาน โดยอาจจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ในการเตรียมชิ้นงานนั้น ชิ้นงานที่ได้จะต้องมีขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ พื้นผิว

จะต้องมีความขนานและไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียม ชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้สำหรับวัสดุบางประเภท เช่นเซรามิก บริเวณขอบของชิ้นงานอาจจะมีการทำให้มน โคน หรือปาดทำมุม (Chamfer) เพื่อลดความเข้มของความเค้นในบริเวณดังกล่าว

ชิ้นงานในการทดสอบแรงค้ำงจะไม่ถูกจับยึดแต่อย่างใด แต่จะถูกวางอยู่ตรงกลางบน แท่นรองรับระหว่างจะรับแรงสองจุด จากนั้นชิ้นงานจะถูกกดด้วยแท่นกดจากด้านบนซึ่งจะมีจำนวนจุดรองรับแรงค้ำงขึ้น อยู่กับลักษณะของการทดสอบ โดยจุดรองรับในการส่งผ่านแรงค้ำง ชิ้นงานทุกจุดจะต้องมีความโค้งมนเพื่อลดความ เข้มความเค้นในบริเวณนั้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้ ชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักในบริเวณจุดค้ำงนั้นได้ นอกจากนี้จุดรับแรงค้ำงทั้งหมดสามารถที่จะ เป็นแบบยึดติดโดยไม่สามารถหมุนได้ หรืออาจจะมีลักษณะที่หมุนตัวได้บ้างเพื่อที่จะลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงาน ทดสอบและจุดรองรับ ซึ่งจะมีผลต่อผลการทดสอบได้



ภาพที่ 2.29 ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบแรงค้ำง



ภาพที่ 2.30 ลักษณะของอุปกรณ์จับยึดสำหรับการค้ำงแบบ 4 จุด

2.9 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)



ภาพที่ 2.31 เครื่องทดสอบความแข็ง

จินตมัย สุวรรณประทีป[15] ได้สรุปไว้ดังนี้ การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) ถือเป็น การทดสอบทางกลที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งในส่วนของการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบที่ซื้อเข้ามา การควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต ไปจนถึงการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จ นอกจากนี้ยังเป็นการทดสอบที่ใช้งานวิจัยและพัฒนาวัสดุต่างๆ อีกด้วย การทดสอบประเภทนี้ดูเหมือนจะเป็นการทดสอบที่ไม่มีความซับซ้อนอะไร และใช้เวลาไม่นานในการทดสอบก็ได้ผลออกมาแต่ผลการทดสอบที่ได้นั้นถูกต้องหรือไม่ แม้จะดูง่าย แต่หากศึกษาให้ดีแล้ว หลายๆ องค์ประกอบจะสามารถส่งผลถึงความถูกต้องของผลการทดสอบได้ และแน่นอนว่าย่อมส่งผลถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

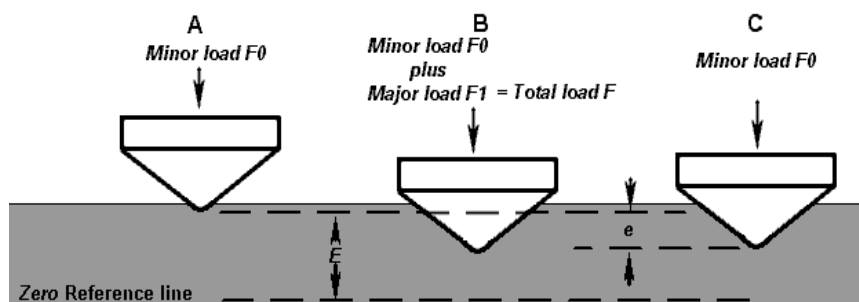
คำจำกัดความของความแข็ง (Hardness) นั้นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายความหมาย ในแง่หนึ่งความแข็งหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการขีดข่วน (Resistance to scratch) หรืออาจหมายถึง ความสามารถต่อการต้านทานการกดหรือเจาะทะลุโดยวัสดุอื่น (Resistance to Indentation) หรืออาจหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการขัดสี (Resistance to Abrasion) หรืออาจหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการกัดแต่งหรือการตัด (Resistance to Machining) ดังนั้นในการวัดความแข็งเพื่อให้ตรงตามคำจำกัดความต่างๆ เหล่านี้ เทคนิคหรือวิธีการที่ใช้ในการทดสอบจึงต้องมีความแตกต่างกันไปด้วย

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hard Test) วิธีทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ประกอบด้วย การกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปกรวยหรือหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ

สเกล	หัวกด	ภาระเริ่มต้น Minor Load F_0 , kgf	ภาระหลัก Major Load F_1 , kgf	ภาระรวม F , kgf	ค่าของE
A	เพชรรูปกรวย	10	50	60	100
B	ลูกบอลเหล็ก 1/16"	10	90	100	130
C	เพชรรูปกรวย	10	140	150	100
D	เพชรรูปกรวย	10	90	100	100
E	ลูกบอลเหล็ก 1/8"	10	90	100	130
F	ลูกบอลเหล็ก 1/16"	10	50	60	130
G	ลูกบอลเหล็ก 1/16"	10	140	150	130
H	ลูกบอลเหล็ก 1/8"	10	50	60	130
K	ลูกบอลเหล็ก 1/8"	10	140	150	130
L	ลูกบอลเหล็ก 1/4"	10	50	60	130
M	ลูกบอลเหล็ก 1/4"	10	90	100	130
P	ลูกบอลเหล็ก 1/4"	10	140	150	130
R	ลูกบอลเหล็ก 1/2"	10	50	60	130
S	ลูกบอลเหล็ก 1/2"	10	90	100	130
V	ลูกบอลเหล็ก 1/2"	10	140	150	130

ที่มา : <http://www.dss.go.th>,จินตมัย สุวรรณประทีป [15]



ภาพที่ 2.32 หลักการความแข็งรีคเวลล์

ข้อจำกัดและข้อควรระวังของการทดสอบ

- ไม่ควรใช้หัวกดลูกบอลในการวัดความแข็งสูงกว่า 100 เนื่องจากค่าที่ได้จะมีความแม่นยำต่ำเพราะบริเวณปลายของลูกบอลเท่านั้นที่สัมผัสชิ้นงานซึ่งอาจจะเกิดการยุบตัวของลูกบอลได้ นอกจากนี้หากค่าความแข็งสูงเกินกว่า 115 จะไม่สามารถใช้เป็นค่าความแข็งของวัสดุ แต่อาจใช้เพื่อการเปรียบเทียบเท่านั้น นอกจากนี้ค่าความแข็งที่วัดได้เป็นค่าลบไม่ควรใช้เช่นกัน
- ความแข็งรีอคเวลล์จะเป็นสเกลที่ค่อนข้างหายาก พลาสติกที่มีความแข็งใกล้เคียงกันอาจจะไม่สามารถถูกแยกแยะด้วยค่าความแข็งรีอคเวลล์ได้
- ความสะอาดของอุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งที่ได้ เนื่องจากจะทำให้พื้นผิวสัมผัสกันในแต่ละจุดไม่แนบสนิททำให้ความแข็งเปลี่ยนแปลงได้ ควรทำความสะอาดแท่นวางชิ้นงาน หัวกด และชิ้นงานทดสอบเสมอก่อนทำการทดสอบ
- หากมีการเปลี่ยนหรือใส่อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบที่เป็นส่วนประกอบในการให้แรงกด ตัวอย่างเช่น หัวกด แท่นวางชิ้นงาน ค่าความแข็งที่ได้จากการวัด 2-3 ครั้งแรกไม่ควรนำมาใช้เป็นผลการทดสอบเนื่องจากจะมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ควรรอให้จุดเชื่อมต่อต่างๆ มีความสนิทแน่นหนาจากแรงกดในการทดสอบ 2-3 ครั้งแรกก่อนนำค่าไปใช้งาน

2.10 การสึกหรอ (Wear) <http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2011/01/wear.html>[16] ได้อธิบายไว้ว่าการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิวหน้า เมื่อมีการเสียดสีหรือมีการเคลื่อนที่สัมผัสกันของวัสดุ 2 ชิ้น แม้ว่าวัสดุที่สูญเสียไปจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่อาจทำให้ชิ้นส่วนนั้นเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง เช่น แม่พิมพ์ มีดกลึง หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลบางชนิด เช่น เฟือง ลูกสูบ กระจับอกสูบ และโซ่ เป็นต้น บางครั้งการสึกหรอเกิดร่วมกับการกัดกร่อน (ภาพที่ 2.33) ซึ่งถือว่าเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง



ภาพที่ 2.33 ชิ้นงานใบพัดเกิดการสึกหรอร่วมกับการกัดกร่อน (Wear Corrosion)

การสึกหรอเป็นศัพท์ทั่วไปที่ใช้อธิบายการเสื่อมสภาพของผิวหน้าวัสดุจากการเสียดสีที่เริ่มต้นจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าสองผิวหน้าที่อันใดอันหนึ่งมีการเคลื่อนที่ และอุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราการสึกหรอเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเสียดสีทำให้เกิดความร้อนได้ อันส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุและทำให้เพิ่มความไวต่อการเสื่อมสภาพด้วย ชิ้นส่วนจำพวกแบร็ริง ลูกเบี้ยว และเฟือง เป็นวัสดุที่มักจะเกิดการสึกหรอได้ง่ายมาก การสึกหรอมีหลายรูปแบบเช่น Adhesive Wear, Abrasive Wear, Corrosive Wear, Surface Fatigue Wear, Impact Wear และ Fretting Wear ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดคร่าวๆ ในลำดับต่อไป การป้องกันหรือลดปัญหาการเสื่อมสภาพของผิวหน้าวัสดุจากการสึกหรอสามารถปรับปรุงได้หลายวิธีการ เช่น การใช้สารหล่อลื่นและการปรับปรุงผิวหน้าชิ้นงาน เป็นต้น การเลือกใช้วัสดุที่ต้านทานต่อการสึกหรอ เช่น วัสดุที่มีความแข็งสูง เช่น เซรามิกส์ ก็เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับป้องกันการสึกหรอที่รุนแรง นอกจากนี้ยังมีการเคลือบผิวแข็งด้วย ทังสเทน-คาร์ไบด์-โคบอลต์ ซึ่งสามารถที่จะเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุได้ โดยเฉพาะวัสดุที่มีผิวนานุ่ม การปรับปรุงผิวหน้าหรือการอบชุบสามารถใช้ในการเพิ่มความแข็งหรือเพิ่มความเรียบให้กับวัสดุ ยกตัวอย่างการทำคาร์บูไรซิ่งและการเตรียมผิวที่ดี

2.10.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากการสัมผัสกันของผิวหน้าชิ้นงาน 2 ชิ้น ที่มีการเคลื่อนที่อันส่งผลให้เกิดความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ที่สูงและเกิดขึ้นเนื่องจากธรรมชาติของความหยาบของผิวหน้าวัสดุ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าวัสดุ 2 ชนิดเสียดสีกันทำให้เกิดความเครียดเกินจุดครากของวัสดุ เนื้อวัสดุบริเวณที่ถูกเสียดสีจะเกิด plastic zone เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ไป ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะพาเอาเนื้อวัสดุของชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยกว่าไปด้วย ทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น ถ้าผิวหน้าที่เคลื่อนที่ที่มีการเสียดสีกันอย่างต่อเนื่อง ค่าความเค้นแรงเฉือนที่บริเวณที่เกิดพันธะอะตอมมิกจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเกินขีดจำกัดของอีกวัสดุหนึ่งและทำให้จุดที่สัมผัสกันเกิดการแตก พร้อมทั้งนำชิ้นส่วนติดมาด้วย ชิ้นส่วนที่เกิดการแตกสามารถหลุดออกมาเป็นเศษชิ้น โลหะหรือยังคงเหลือพันธะอะตอมมิกไว้บนผิวหน้าชิ้นงานที่อยู่ฝั่งตรงกันข้าม การสึกหรอแบบยึดติดยังมีชื่อเรียกอื่นๆ อีก คือ Scoring, Scuffing, Alling หรือ Seizure ความแข็งสูงแต่มีความแข็งแรงต่ำเป็นสมบัติที่ต้องพิจารณาเมื่อจะนำชิ้นส่วนมาประยุกต์ใช้งานที่ต้านทานการสึกหรอแบบยึดติด อย่างไรก็ตาม สมบัติเหล่านี้อาจจะอยู่ในวัสดุชิ้นเดียวกันก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น วัสดุ Resistant Monolithic ซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง และมีความแข็งสูง และวัสดุเซรามิกส์ที่มีความหนาแน่นต่ำ เป็นต้น

2.10.2 การเกาะเกาะ (Galling) เป็นรูปแบบการเสียหายของการสึกหรอแบบยึดติดที่ค่อนข้างรุนแรง เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีกันอย่างรุนแรง ส่งผลให้เกิดการเชื่อมติดกันของเฟส

ของแข็งแบบเฉพาะที่และส่งผลให้เกิดการหลุดร่อนของชิ้นส่วนโลหะ กระบวนการนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเสียหายบนผิวหน้าของวัสดุใดวัสดุหนึ่งหรือทั้งสองวัสดุ

2.10.3 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear)

การเซาะร่อง การขัดหยาบ และการขูดผิว เป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับการเสียหายด้วยรูปแบบดังกล่าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผิวหน้าชิ้นงานที่เป็นวัตถุแข็งมีการเปลี่ยนที่หรือมีการเคลื่อนที่ของวัสดุที่มีผลมาจากแรงปฏิสัมพันธ์กับผิวหน้าของวัตถุอื่นหรืออนุภาคอื่น โดยอนุภาคสามารถฝังลึกลงไปผิวหน้าของวัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันและมีการเคลื่อนที่เสียดสีระหว่างกันทำให้เกิดการเสียดสี (การเปลี่ยนที่และการเคลื่อนที่ของผิวหน้าวัสดุ) ของผิวหน้าวัสดุที่มีความแข็งน้อยกว่า แหล่งที่มาของอนุภาคอาจเกิดจากสารแปลกล้อม (ที่มาจากสิ่งแวดล้อมด้านนอก) เศษชิ้นส่วนที่เกิดจากการสึกหรอ หรืออนุภาคของแข็งที่เจือปนอยู่ในของไหล ในอีกนัยหนึ่ง การสึกหรอจากการเสียดสีสามารถเกิดได้จากกรณีที่ไม่มีเศษวัสดุหลุดออกมา แต่เกิดขึ้นเนื่องจากความหยาบของผิวหน้าวัสดุอีกอันหนึ่งทำให้เกิดการเสียดสี กลไกการสึกหรอนี้ต่างจากการสึกหรอแบบขีดขีดคือไม่มีพันธะอะตอมมิกที่สร้างขึ้นบนผิวหน้าทั้งสอง การสึกกร่อนแบบขัดสี (Abrasive Erosion) อาจเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีอนุภาคของแข็งเจือปนและมีทิศทางเคลื่อนที่ขนานกับผิวหน้าของวัสดุ และอนุภาคเหล่านั้นก็ทำให้ผิวหน้าวัสดุค่อยๆ เกิดการเสื่อมสภาพทีละเล็กทีละน้อย ความแข็งของวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญต่ออัตราการสึกหรอแบบขัดสีของผิวหน้าชิ้นงาน คือ ถ้าผิวหน้าวัสดุมีความแข็งสูงจะทำให้อัตราการสึกหรอต่ำ และถ้าความแข็งของผิวหน้าวัสดุมีค่าสูงกว่าความแข็งของอนุภาคที่มาขัดสี เราอาจจะสังเกตเห็นการสึกหรอแม้เพียงเล็กน้อย และอนุภาคเหล่านั้นอาจจะแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยได้ วัสดุที่มีสมบัติด้านความแข็งและความแกร่งสูงจะเหมาะสำหรับใช้งานที่ด้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดสี ยกตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผิวหน้ามีความแข็งสูง โลหะผสมโคบอลต์ และเซรามิกส์ เป็นต้น

2.10.4 การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosion Wear)

เมื่ออิทธิพลของการกัดกร่อนและการสึกหรอเกิดขึ้นร่วมกัน การเสื่อมสภาพของผิวหน้าวัสดุอาจจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นที่ทราบกันดีโดยเราจะเรียกว่า การสึกหรอจากการกัดกร่อน ดังนั้นการสร้างฟิล์มหรือชั้นเคลือบจะนิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปกป้องโลหะพื้น (Base Metal) หรือโลหะผสมจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงจนนำไปสู่ปัญหาการกัดกร่อน ถ้าผิวหน้าของชั้นเคลือบอยู่ภายใต้สภาวะการรับแรงจากการสึกหรอแบบขัดสีและแบบขีดขีด จะทำให้เกิดการสูญเสียชั้นเคลือบจากผิวหน้าของวัสดุได้ ในขณะที่ผิวหน้าของโลหะพื้นที่สูญเสียชั้นเคลือบก็สามารถเกิดการกัดกร่อนต่อเนื่องไปได้อีก ในอีกนัยหนึ่ง ผิวหน้าที่เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดออกซิไดซ์อาจจะทำให้สมบัติทางกลลดลงและมีอัตราการสึกหรอสูงขึ้น นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์การ

กักร่อนที่มีอนุภาคของออกไซด์ที่หลุดออกมาจากผิวหน้าของวัสดุสามารถทำตัวเป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดการเสียดสีต่อไปได้เช่นกัน

2.10.5 การสึกหรอร่วมกับการล้าบนผิวหน้า (Surface Fatigue Wear)

การล้าที่ผิวหน้าหรือการล้าจากการสัมผัสเกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของวัสดุ 2 ชิ้น ที่สัมผัสกับวัสดุอีกอันหนึ่งที่กำลังกลิ้งหรือร่วมกับการกลิ้งและการเคลื่อนที่แบบเลื่อน (Sliding Motion) ทำให้เกิดแรงแบบสลับหรือการวางตัวของแรงเค้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุ ความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเริ่มต้นจากการฟอร์มตัวของรอยร้าวภายใต้ผิวหน้าของวัสดุ และขยายกลับมาที่ผิวหน้าอีกครั้งทำให้เกิดมีลักษณะเป็นหลุม (Pit) การล้าด้วยรูปแบบนี้มักจะพบในวัตถุที่มีการรีดซ้ำแล้วซ้ำเล่าผ่านผิวหน้าของวัสดุ ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างที่สูงในแต่ละจุดเป็นแนวยาวบนผิวหน้าของวัสดุ ยกตัวอย่าง เช่น เฟือง รางรถไฟที่มักจะเกิดการล้าที่ผิวหน้าขึ้นงาน ตัวอย่างการสึกหรอร่วมกับการล้าบนผิวหน้าแสดงในรูปที่ 34



ก) เฟืองที่เกิดการเสียหาย



ข) พื้นเฟืองที่เกิดการกะเทาะ

ภาพที่ 2.34 เฟืองที่เสียหายด้วยกลไกการสึกหรอร่วมกับการล้าบนผิวหน้าจนเกิดการกะเทาะของพื้นเฟือง

2.10.6 การสึกหรอแบบถูครูด (Fretting Wear) ผิวหน้าของวัสดุที่มีการสัมผัสอย่างแนบ

แน่นกับวัสดุอื่นและมีธรรมชาติการเคลื่อนที่เป็นคาบและมีแอม-พลิจูดสูงมาก เช่น การสั่นสะเทือนมีแนวโน้มที่จะเกิดการสึกหรอได้ การสึกหรอจากการถูครูดมักจะเกิดร่วมกับการกัดกร่อนหรือการเกิดออกซิเดชันของเศษชิ้นส่วนที่หลุดออกมาและบริเวณที่สึกหรอ กลไกการสึกหรอจะมีเศษชิ้นส่วนโลหะที่หลุดออกมาในปริมาณเล็กน้อยจากระบบแทนที่จะมีเศษชิ้นส่วนตกค้างภายในผิวหน้าที่สัมผัสกับ ผิวหน้าอีกด้านหนึ่งโดยเฉพาะในกรณีที่แสดงให้เห็นการเกิดพันธะทางกลและการเคลื่อนที่แบบส่ายไปมาของผิวหน้าที่แยกตัวออกมา ดังนั้นจึงทำให้เกิดการออกซิเดชันของอนุภาคที่หลุดออกมาได้ ถ้าเศษโลหะที่หลุดออกมาถูกฝังอยู่ในผิวหน้าของโลหะที่มีความนิ่มกว่า

อัตราการสึกหรออาจจะลดลง ถ้าไม่มีเศษโลหะเหลือค้างอยู่เลยบนผิวหน้ารอยต่อของวัสดุทั้งสอง อัตราการสึกหรออาจจะเพิ่มขึ้นได้ รอยร้าวจากการล้ายังมีแนวโน้มที่จะฟอร์มตัวในบริเวณที่สึกหรอ เป็นผลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพบนผิวหน้าของวัสดุต่อไป สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวและของแข็ง (เช่นการปรับปรุงผิวหน้า การเคลือบผิวเป็นต้น) ความเค้นตกค้าง (ที่เกิดจากการยิงเม็ดเหล็กหรือเลเซอร์) การทำผิวให้เป็นร่อง (เพื่อเก็บเศษโลหะที่หลุดออกมา) และ/หรือการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมสามารถที่จะช่วยลดปรากฏการณ์ดังกล่าวหรือต้านทานการสึกหรอแบบถูครูดได้

2.11 กังหันลมในประเทศไทย วิชัย โธมรินทร์ [2] ได้สรุปไว้ว่า ประเทศไทยนั้นมีการใช้พลังงานลมในหลายรูปแบบด้วยกันตั้งแต่เทคโนโลยีอย่างง่าย ๆ เช่น กังหันไม้ไฟ้อัดลมไปจนถึงเทคโนโลยีที่ซับซ้อน ซึ่งในประเทศไทยสามารถแยกลักษณะการใช้ประโยชน์ได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ กังหันลมเพื่อการสูบน้ำ และกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า สำหรับกังหันลมเพื่อการสูบน้ำ ในไทยมีการใช้เพื่อการเกษตรในนาข้าวและนาเกลือมาเป็นเวลานาน วัสดุที่ใช้เป็นใบกังหันที่ทำจากผ้า ลังกะสีหรือเหล็กบ้าง โดยกังหันลมเพื่อการสูบน้ำนี้ ไม่ต้องมีความเร็วลมมากก็สามารถทำงานได้ดี จึงมีหลายพื้นที่ในประเทศไทยที่ใช้กังหันลมเพราะพื้นที่ส่วนใหญ่จะเป็นทุ่งกว้างมีสิ่งกีดขวางน้อย เหมาะกับการติดตั้งกังหันลม และมีโครงการสำรวจการใช้กังหันลมในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2524 ได้มีการประเมินการใช้งานกังหันลม แบบใบพัดที่ใช้ในนาข้าวทำด้วยเสื่อลำแพนหรือผ้าใบคุณภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 กังหันลมวิดน้ำเข้าสู่นาเกลือ

ต่อมาการใช้กังหันลมในประเทศไทยนั้น ได้ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เกษตรกรรมมาเป็นอุตสาหกรรมมากขึ้น และในปี พ.ศ. 2530 กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน ได้ดำเนินการติดตั้งกังหันลมสูบน้ำใน โครงการศูนย์พัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี และในปีพ.ศ. 2534-2535 ได้มีการสำรวจกังหันลมของจังหวัดสมุทรสาครและสมุทรสงครามเนื่องจากเป็นพื้นที่ทำนาเกลือ พบว่ามีกังหันประมาณ 167 ชุด ซึ่งเป็นกังหันลมชนิดดั้งเดิมภูมิปัญญาชาวบ้านแต่สามารถใช้เพื่อการสูบน้ำได้เป็นอย่างดี ในปี พ.ศ. 2542 มีโครงการสาธิตการติดตั้งกังหันลมเพื่อการสูบน้ำได้มีการใช้กังหันลมขนาด 18 ใบพัด ในโครงการแปลงสาธิตการเกษตรแบบผสมผสานตามแนวพระราชดำริ “ทฤษฎีใหม่” อ.ปากท่อจ.ราชบุรี ซึ่งได้มีการพัฒนาและปรับปรุงรูปแบบและสร้างประกอบทดลองใช้งานที่ศูนย์พัฒนาและเผยแพร่พลังงานภูมิภาค จ.ราชบุรี ได้ผลการสาธิตเป็นที่น่าพอใจ ในปี พ.ศ.2544 กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน ได้ให้งบประมาณแก่ศูนย์พัฒนาและเผยแพร่พลังงานสู่ภูมิภาค จ.ราชบุรี ในการศึกษาและพัฒนากังหันลมเพื่อการสูบน้ำต่อไป จะเห็นได้ว่าสถานภาพพลังงานลมเพื่อการสูบน้ำในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเน้นไปในด้านงานวิจัยเพื่อทดสอบสมรรถนะของกังหันลม เนื่องจากกังหันลมมีหลายรูปแบบซึ่งเหมาะสมกับการทำงานแต่ละแบบไม่เหมือนกัน ดังนั้นควรมีงานวิจัยเชิงนโยบายด้านมาตรการส่งเสริมการนำกังหันลมมาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้นและควรจะอนุรักษ์การใช้กังหันลมเพื่อการสูบน้ำในนาข้าวเดิมให้มีการใช้งานต่อไปและเพิ่มปริมาณจำนวนกังหันลมให้มากขึ้น พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความสนใจจึงได้เริ่มมีการพัฒนาโดยได้รับการบรรจุเป็นแผนพัฒนาพลังงานทดแทนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมากกว่า 10 ปีมาแล้ว มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการสาธิตและประเมินผลในทางเทคนิค ตลอดจนการเตรียมพร้อมสำหรับความต้องการในอนาคต โดยเริ่มศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับศักยภาพพลังงานลมทั่วประเทศ เพื่อหาระดับความเร็วลมของแต่ละพื้นที่ทั่วประเทศ และด้วยความร่วมมือจากกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าประเทศไทยมีความเร็วลมอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำกว่า 4 เมตรต่อวินาที ต่อมาจึงได้ทำการทดลองสร้างและติดตั้งกังหันลมด้วยความร่วมมือจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปี พ.ศ.2526-2529 อย่างไรก็ตามกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ทดลองติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์จำนวน 3 ชุดเพื่อเป็นไฟฟ้าแสงสว่างบริเวณจุดใช้งานจริง ณ.พื้นที่บริเวณริมหาด อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติสิรินธร จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งได้ติดตั้งแล้วเสร็จใน เดือนมกราคม พ.ศ. 2551 ดังแสดงใน ภาพที่ 2.36



ภาพที่ 2.36 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์ 3 ชุด ณ.อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติสิรินธร จ.เพชรบุรี

ภาพที่ 2.36 เป็นกังหันลมขนาดเล็กที่มีระบบการทำงานเป็นแบบประจุไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่และใช้ชุดแปลงแรงดันจากไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเป็นไฟฟ้าส่องสว่างบริเวณชายหาดใกล้พื้นที่ทำการติดตั้งกังหันลมดังกล่าว ในส่วนการผลิตไฟฟ้าที่เป็นฟาร์มกังหันลมขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในประเทศไทยที่แรกเป็นของเมืองพัทยาที่บริเวณเกาะล้านซึ่งเป็นกังหันลมขนาดเล็กขนาด 4.5 กิโลวัตต์จำนวน 45 ชุดรวมกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 13 เมตรต่อวินาที ได้กำลังการผลิตสูงสุด 200 กิโลวัตต์เพื่อเชื่อมเข้าสู่ระบบสายส่งหลักป้อนไฟฟ้าให้ประชาชนบนเกาะล้านเมืองพัทยาได้ใช้ซึ่งจะลดปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลได้เฉลี่ยวันละประมาณ 200 ลิตร ออกแบบและดำเนิน โครงการ โดยทีมงานกังหันลมผลิตไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้เดินเครื่องอย่างเป็นทางการเมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2550



ภาพที่ 2.37 ฟาร์มกังหันลมขนาด 200 กิโลวัตต์ แห่งแรกในประเทศไทย ณ. เกาะล้าน เมืองพัทยา โดยทีมงานกังหันลมผลิตไฟฟ้า มทร.ธัญบุรี

ในขณะที่การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โดยกองพลังงานพิเศษ ฝ่ายวิทยาการพลังงาน (ในขณะนั้น) ได้จัดทำโครงการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมโดยร่วมมือกับสถาบันการศึกษาต่างๆ เช่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 เป็นต้นมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดเล็ก (ไม่เกิน 1.0 kW) ได้จัดสร้าง ติดตั้ง และทดลองผลิตไฟฟ้าในปีพ.ศ. 2526 แต่บางโครงการมีปัญหาทางด้านเทคนิค และได้ยกเลิกโครงการความร่วมมือไปในที่สุด เนื่องจากขาดบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการออกแบบและสร้างตัวกังหันลมพร้อมอุปกรณ์ประกอบ ด้วยเหตุนี้ กฟผ. จึงได้เปลี่ยนแนวคิดที่จะสร้างและพัฒนาตัวกังหันลมเองในประเทศ มาใช้วิธีการจัดหาจากต่างประเทศที่มีประสบการณ์แทน โดยได้จัดตั้งสถานีทดลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่แหลมพรหมเทพ บริเวณใต้สุดของจังหวัดภูเก็ต ติดกับทะเลอันดามัน ในขนาดเล็ก 0.85, 1, 2, 10, 18.5, 150 กิโลวัตต์ ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมาซึ่งในปัจจุบันกังหันลมบางรุ่นก็ชำรุดและทำการหยุดการทำงานเพื่อรอการ ซ่อมแซมหรือติดตั้งใหม่ แต่กังหันลมขนาด 150 กิโลวัตต์ก็ยังคงทำงานได้อยู่ดังภาพที่ 2.37

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ แต่พบว่าบางพื้นที่มีความเร็วลมเฉลี่ยในรอบปีสูงกว่า 5 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความสูง 40 เมตรจากพื้นดิน ซึ่งเป็นความเร็วลมที่มีศักยภาพที่ดี สามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้



ภาพที่ 2.38 กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 150 kW ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ติดตั้ง ณ.แหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่า การพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมในสมัยก่อน ยังขาดเทคโนโลยีและบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ ทำให้การพัฒนากังหันลมไม่ประสบความสำเร็จในการออกแบบและสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 2.39 การพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี(ก) และ (ข) แสดงการพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ ที่บริเวณอ่าวไผ่ จ.ชลบุรี

จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานลมมาเป็นเวลานานและได้นำมาใช้ในหลายรูปแบบด้วยกันไม่ว่าจะเป็น พัดลม เครื่องสูบน้ำ เครื่องอัดลม พัดลมระบายอากาศ กังหันลมผลิตไฟฟ้า และยังได้มีการดัดแปลงประยุกต์พลังงานลมนำมาใช้ในรูปแบบต่างๆ อีกมากมายเพื่อให้ใช้ได้กับชีวิตประจำวันมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยฯ จึงสนใจศึกษาพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานลม ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดชนิดหนึ่งที่เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยนำมาวิเคราะห์เป็นแนวคิดด้านสังคม ปัญหาและผลกระทบ เพราะปัจจุบันการรณรงค์ให้ใช้พลังงานทดแทนถือเป็นสิ่งสำคัญที่สังคมต้องหันมาให้ความสนใจไม่ว่าจะเป็นภาครัฐ เอกชนและประชาชน ต้องร่วมมือและเรียนรู้เพื่อให้พลังงานที่ได้สามารถนำไปใช้ได้จริงและเป็นประโยชน์ต่อสังคมไทย เพื่อพลังงานลมจะได้เป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญอีกทางหนึ่งให้มีความยั่งยืนต่อไป ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่ทั่วไปไม่ต้องซื้อหา เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่หมดสิ้น

2.12 การผลิตใบกังหันลม



ภาพที่ 2.40 ใบกังหันลม

วิชัย โรยรินทร์, [2] ได้สรุปไว้ว่า ไบกังหันลมทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูงในตัวเพราะไบกังหันลมต้องมีน้ำหนักเบาซึ่งจะทำให้ช่วยในการเริ่มหมุนได้ง่าย ดังนั้นไบกังหันลมจึงเป็นหัวใจหลักของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ทำไบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเป็นหัวใจหลักและสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของไบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าแต่ละรุ่น วัสดุที่เบาแต่มีความแข็งแรงไม่แพ้เหล็ก

โดยทั่วไปในปัจจุบันที่เป็นที่ยอมรับในการทำไบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า คือ ไฟเบอร์กลาส ซึ่งจัดเป็นวัสดุคอมโพสิต(Composite) ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างเส้นใย (Woven) ชนิดต่างๆ ผสมกับสารผสมที่ช่วยในการประสานเส้นใยทำให้เกิดการยึดตัวและแข็งแรงโดยอาจแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด โดยเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบาจะมีราคาสูงตามไปด้วย เช่น เส้นใยคาร์บอน(Carbon Fiber) อาจมีความแข็งแรงถึง 3 เท่าของเส้นใยไฟเบอร์กลาสโดยทั่วไป โดยเส้นใยชนิดต่างๆก็มีความเหมาะสมและต้นทุนต่างกันออกไปซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับกังหันลมขนาดเล็กโดยทั่วไป ไปอาจใช้เส้นใยไฟเบอร์กลาสธรรมดา แต่จะต้องมีการเสริมความแข็งแรงที่โคนไบกังหันลมโดยการฉีดโฟมหรือสร้างวัสดุประสานกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอย่างไรก็ตามในการประสานกันของวัสดุที่ทำไบกังหันลมจะไม่ใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวประสานเส้นใยเนื่องจากเรซินมีความเปราะสูง และไม่ทนต่อแสงอุลตราไวโอเลต(Ultraviolet) ดังนั้นควรที่จะใช้สารอีพอกซีเป็นตัวประสานยึดเส้นใยไฟเบอร์กลาสและจำเป็นต้องคลุมด้วยผิวที่เรียบโดยการพันสารป้องกันแสงแดดที่เรียกกันว่า สารโพลียูรีเทนถึงสองครั้งที่ผิวของไบกังหันลมไบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าอาจทำจากวัสดุอื่นเช่น อะลูมิเนียม ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเหล็กโดยทั่วไป ลวดการเป็นสนิมแต่ก็มีน้ำหนักมากกว่าเส้นใยตาข่ายชนิดต่างๆ ซึ่งอาจเป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงและมีความมันวาวเช่น Al 606 ซึ่งเหมาะสมต่องานทางด้านอากาศยานไบกังหันไม่ควรทำด้วยไม้โดยเฉพาะในเขตร้อนชื้นอาจทำให้ไม้มีความแข็งแรงต่ำรับความเปลี่ยนแปลงของความชื้น อุณหภูมิสูงและแตกต่างกันบ่อยไม่ได้ ทำให้เกิดความเค้น (Stress) เกิดขึ้นในเนื้อไม้และแตกในที่สุด แต่หากจำเป็นหรือเป็นเพียงไบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าทดลองก็อาจขึ้นรูปไป จากไม้ได้แต่ควรเลือกใช้ไม้เนื้อแข็งที่มีน้ำหนักเบาและต้องผ่านการเคลือบด้วยสารป้องกันความชื้นและแสงแดดอย่างเช่น โพลียูรีเทนสำหรับทาเนื้อไม้หรือทำสีเคลือบอีกครั้งหนึ่ง

2.12.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปไบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์

- 1) ทำการทาน้ำยา Epoxy ลงในแบบที่เตรียมเอาไว้
- 2) ทำการวางเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) ชั้นแรกก่อนและทาน้ำยา Epoxy และวางเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) ทับอีกชั้นหนึ่ง

- 3) หลังจากที่ได้วางเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) เป็นที่เรียบร้อยแล้วทาน้ำยา Epoxy และวางเส้นใยไฟเบอร์กลาสซ้าทำอย่างนี้จนได้ความหนาเท่ากับ 3 มม.
- 4) ทำซ้ำกับแบบอีกชิ้น
- 5) เมื่อได้ตามแบบที่ต้องการทั้ง 2 ชิ้น จะทำการประกบแบบเข้าด้วยกันและทาน้ำยาประสานเพื่อให้แบบทั้ง 2 ด้านติดเป็นชิ้นเดียวกัน และรอให้แห้ง
- 6) เมื่อแบบแห้งแล้วให้ทำการถอดแบบและแต่งพื้นผิวให้เรียบ
- 7) มาถึงขั้นตอนนี้ก่อนที่จะมีการทำสีเพื่อให้ดูสวยงามและความคงทนแล้วจะทำการทดสอบความแข็งแรงของใบที่ แรงกระทำเท่ากับ 60 kg-m
- 8) เมื่อทดสอบเสร็จแล้วก็ให้ทำการ ไปสีเพื่อทำสี
- 9) เมื่อทำสีเสร็จแล้วก็จะพ่นเคลือบสีด้วยโพลียูรีเทนอีก 2 ชั้นเพื่อป้องกันอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet)
- 10) เมื่อทำสีเสร็จแล้วก็ให้ทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่งอีกครั้งหนึ่งเพื่อความมั่นใจ



ภาพที่ 2.41 ลักษณะของแบบใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

2.13 การประเมินผล

2.12.1 ร้อยละ (Percent), <https://th.wikipedia.org/wiki/>[17]สรุปไว้ ดังนี้ ร้อยละ (Percent) หมายถึง อัตราส่วนที่แสดงการเปรียบเทียบ จำนวนใดจำนวนหนึ่ง กับ 100 โดยมีตัวส่วนเป็น 100 ใช้สัญลักษณ์ % เช่น

$$\frac{35}{100} \text{ เขียนแทนด้วย ร้อยละ 35 หรือ 35 \%}$$

$$\frac{0.26}{100} \text{ เขียนแทนด้วย ร้อยละ 0.26 หรือ 0.26 \%}$$

$$\frac{56.2}{100} \text{ เขียนแทนด้วย ร้อยละ } 56.2 \text{ หรือ } 56.2\%$$

2.12.2 การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (\bar{X}) พิศมัย หาญมงคลพิพัฒน์[18] ได้สรุปไว้ว่า ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (\bar{X}) จัดว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญมากในวิชาสถิติ เพราะค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ดีที่สุด เพราะ 1) เป็นค่าที่ไม่เอนเอียง 2) เป็นค่าที่มีความคงเส้นคงวา 3) เป็นค่าที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุด และ 4) เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ค่าเฉลี่ยเลขคณิตก็มีข้อจำกัดในการใช้ เช่น ถ้าข้อมูลมีการกระจายมาก หรือข้อมูลบางตัวมีค่ามากหรือน้อยจนผิดปกติ หรือข้อมูลมีการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว ค่าเฉลี่ยเลขคณิตจะไม่สามารถเป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลได้ การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตเมื่อข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่ (\bar{X}) ในกรณีที่ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงความถี่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตสามารถหาได้โดย

$$\text{สูตร } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n o^x i}{n}$$

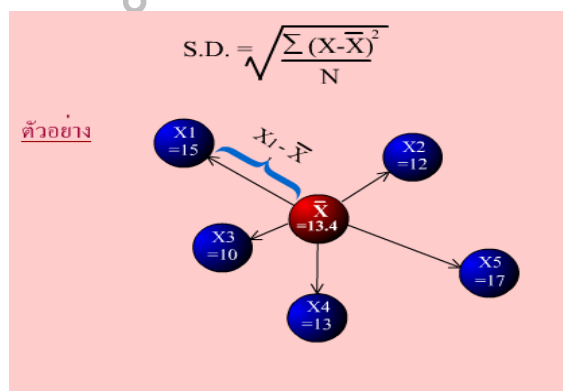
เมื่อ \bar{X} แทนค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

เมื่อ $\sum_{i=1}^n X_i$ แทนผลรวมทั้งหมดของข้อมูล

เมื่อ n แทนจำนวนตัวอย่าง

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$S.D. = \frac{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2}}{N}$$



ภาพที่ 2.42 ตัวอย่างการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในขณะนี้คณะผู้จัดทำโครงการ ได้จัดการทดสอบหาค่าแรงดึง แรงดัด และค่าความแข็ง เพื่อนำผลการทดสอบไปทำใบกึ่งहनผลิตรกระแสไฟฟ้าและสูตรการคำนวณต่างๆ เข้ามาช่วย และยังมิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีที่สำคัญดั่งที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว และจะทำการทดสอบวัสดุรวมถึงการสร้างใบกึ่งहनผลิตรกระแสไฟฟ้า

สาวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

จากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีความรู้เกี่ยวกับการดำเนินโครงการวิจัยในเรื่องต่างๆ เช่น การศึกษาสมบัติและกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต การสร้างชิ้นทดสอบ มาตรฐานการทดสอบ การทดสอบ และวิธีการผลิตใบกั้นหลุม เพื่อนำความรู้จากการศึกษาค้นคว้ามาใช้ในการดำเนินโครงการในบทนี้เกี่ยวกับการสร้างชิ้นทดสอบตามมาตรฐานทดสอบต่างๆ การทดสอบชิ้นทดสอบ โดยควบคุมทั้งการผลิตการทดสอบเพื่อนำค่าสมบัติทางกลมาวิเคราะห์หาค่าของวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิดนำมาเปรียบเทียบว่าวัสดุคอมโพสิตชนิดไหนที่สมบัติทางกลดีที่สุด และทำการเลือกวัสดุไปผลิตใบกั้นหลุมต่อไป โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

3.1 การวางแผน

ในของการวางแผนโครงการนี้ ผู้ทำการวิจัยได้แสดงแผนการทำงานของโครงการนี้ทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการจนกระทั่งจบโครงการโดยมีการกำหนดก่อนหลังและระยะเวลาในการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินงานโครงการ อย่างชัดเจนดังต่อไปนี้

การดำเนินโครงการจะเป็นการกำหนดลำดับขั้นตอนการทำโครงการและพิจารณาขั้นตอนการทำงาน ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ มีระยะเวลาการดำเนินงานที่เหมาะสมกับการทำโครงการนี้ โดยได้วางแผนการดำเนินงานออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินการ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับ วัสดุผสม

3.1.2 ศึกษาทฤษฎีของการออกแบบ, การสร้างแม่แบบและกระบวนการขึ้นรูปชิ้น

ทดสอบและผลิตภัณ์ซ์ตามมาตรฐานที่กำหนด

3.1.3 ออกแบบและทดลองหล่อชิ้นทดสอบ

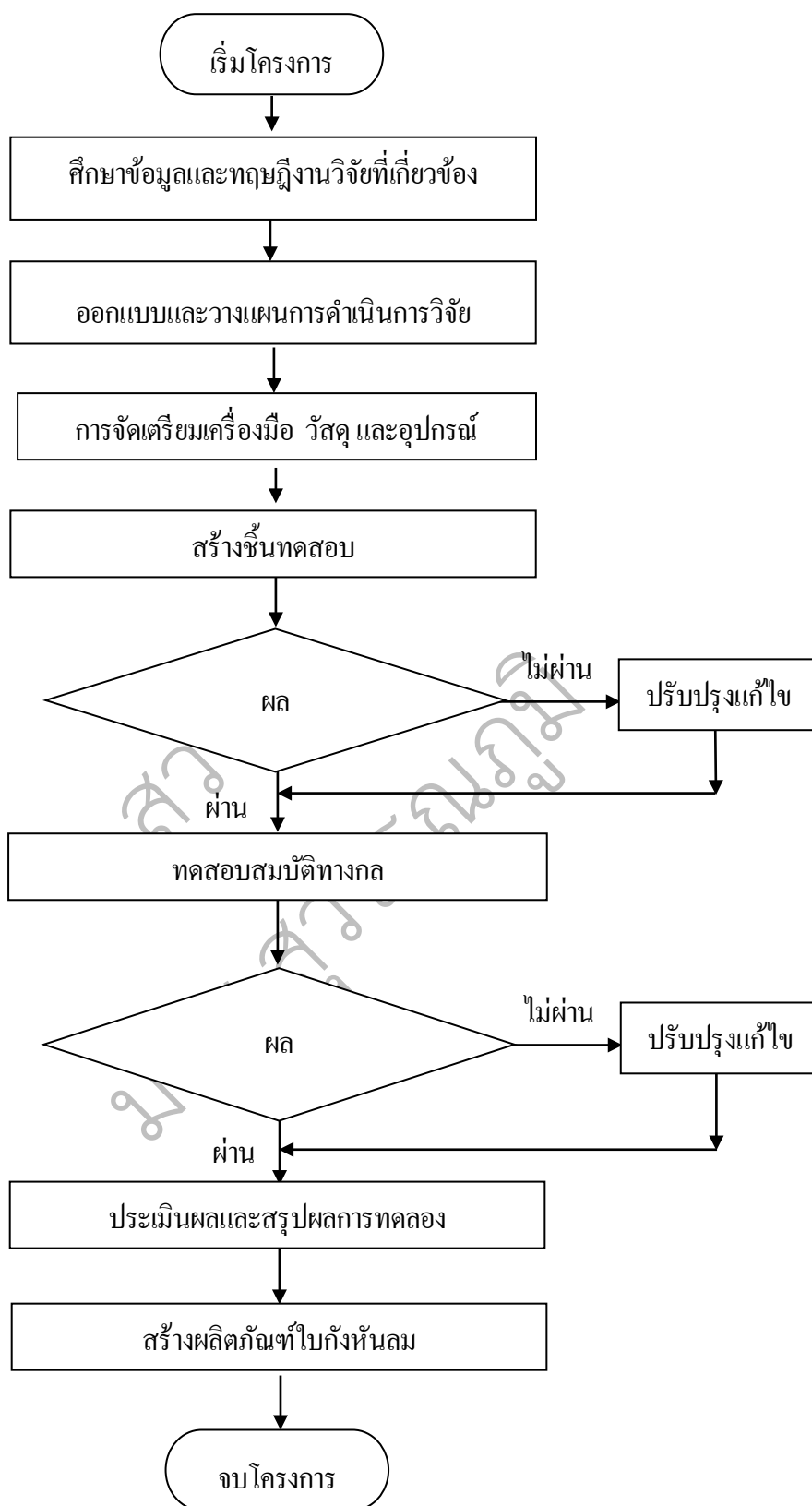
3.1.4 ขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

3.1.5 ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงคัด ทดสอบความแข็งและ

การสึกกร่อน

3.1.6 บันทึกผล วิเคราะห์ และแปลผลข้อมูล

3.1.7 ขึ้นรูปใบกั้นหลุม



แผนภูมิที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย

3.2 การเตรียมการ

การเตรียมเครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ที่จะนำมาทำชิ้นงานทดสอบหาสมบัติของวัสดุเพื่อผลิตใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อได้ศึกษาข้อมูลจากทฤษฎี จึงได้ข้อสรุปว่าต้องเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุในการสร้างชิ้นงานนำไปทำการทดสอบหาค่าของ แรงดึง ความแข็งและแรงดัดงอ เพื่อเลือกเอาวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมนำไปทำเป็นใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 เครื่องกัด (Milling) สำหรับกัดชิ้นงานทดสอบให้ได้ขนาดตามมาตรฐานชิ้นงานทดสอบ



ภาพที่ 3.1 เครื่องกัด (Milling)

3.2.1.2 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Test) วิธีการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) ของโครงการนี้ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM L 18



ภาพที่ 3.2 เครื่องทดสอบความแข็ง Hardness Tester (Instron-Wolppert 930/250)

3.2.1.3 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5566 ใช้สำหรับทดสอบหาสมบัติการทดสอบแรงดึง 0-25,000 KN



ภาพที่ 3.3 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine

3.2.1.4 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5566 สำหรับทดสอบหาสมบัติการทนแรงดึง 0-25,000 KN



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine

3.2.1.5 เครื่องเครื่องยิงทราย F.T-50 ทดสอบการกัดกร่อน



ภาพที่ 3.5 เครื่องยิงทราย F.T. -50

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รายการ	จำนวน
1. ลูกกลิ้งทาน้ำยาสำหรับไล่ฟองอากาศ	1อัน
2. แปรงทาน้ำยาสำหรับทาเรซินลงบนเส้นใย	1อัน
3. ถุงมือยางใช้สำหรับป้องกันสารเคมีเปื้อนมือ	1กล่อง
4. แก้วพลาสติกใช้สำหรับผสมอีพ็อกซี เรซินทั้ง 2 ส่วน	1ชิ้น
5. ทรายใช้สำหรับชั่งน้ำหนัก	1เครื่อง
6. กรรไกรใช้สำหรับตัดเส้นใย	1ด้าม
7. คัตเตอร์ใช้สำหรับตัดเส้นใย	1อัน

3.2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 วัสดุในการทดลอง

รายการ	จำนวน
1. อีพ็อกซี เรซิน (Epoxy Resin) H105	5 ลิตร
2. ตัวทำแข็ง (Hardener Mekpo)	2.5 ลิตร
3. ตัวถอดแบบ (Mold Release)	1 กระป๋อง
4. อะซิโตนใช้สำหรับเช็ดล้างอุปกรณ์	1 ลิตร
5. เส้นใยแก้ว (Glass Fiber)	1 กก.
6. เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibers)	1 กก.

3.3 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองต้องคำนึงถึงการรับแรงทางกลของใบกังหันเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุ การจะทำให้การทดลองออกมามีคุณภาพและตรงจุดมุ่งหมาย ในส่วนของการออกแบบนี้ จะใช้ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยเซรามิก และ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วเป็นวัสดุด้านในเคลือบด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิกเป็นผิวด้านนอก เหตุผลที่เลือกใช้วัสดุนี้ เพราะหาง่ายในท้องตลาด ราคาไม่สูง และเป็นวัสดุที่ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำใบกังหัน ทำการผสมกันในอัตราส่วน 70 : 30 , 60 : 40 และ 50 : 50 แล้วทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยวิธีใช้มือทา (โดยอ้างอิงจากอัตราส่วนของการหล่อพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วในกระบวนการผลิตแบบทำมือเป็นอัตราส่วนมาตรฐานในการหล่อขึ้นงาน) นำชิ้นงานหล่อเป็นแผ่นไปสร้างชิ้นงานทดสอบ แรงดึง แรงดัดและความแข็ง ให้ได้ตามมาตรฐานการทดสอบ นำชิ้นงานไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบต่างๆ ตามที่กำหนด เพื่อหาค่าสมบัติและทำการวิเคราะห์หาค่าที่กักผล ในการออกแบบการทดลองให้ดำเนินการทดลองตามลำดับ คือ

3.3.1 วัสดุพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้ว และพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทดสอบการต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 638 อัตราส่วนผสมละ 5 ชิ้น แล้วพิจารณาเลือกผลการทดลองที่เหมาะสม 3 ผลการทดลอง

2. ทดสอบการต้านทานแรงดัด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดัด มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 790 อัตราส่วนละ 5 ชิ้น แล้วพิจารณาเลือกผลการทดลองที่เหมาะสม 3 ผลการทดลอง

3. ทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 785-98 อัตราส่วนผสมละ 5 ชิ้น แล้วพิจารณาเลือกผลการทดลองที่เหมาะสม 3 ผลการทดลอง

3.3.2 พอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้วเคลือบด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิกเป็นผิวด้านนอก มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทดสอบการต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 638 อัตราส่วนผสมละ 5 ชั้น แล้วพิจารณาเลือกผลการทดลองที่เหมาะสม 3 ผลทดลอง
2. ทดสอบการต้านทานแรงดัด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดัด มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 790 อัตราส่วนละ 5 ชั้น แล้วพิจารณาเลือกผลการทดลองที่เหมาะสม 3 ผลทดลอง
3. ทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 785-98 อัตราส่วนผสมละ 5 ชั้น แล้วพิจารณาเลือกผลการทดลองที่เหมาะสม 3 ผลทดลอง
4. การทดสอบการสึกกร่อน ทำการสร้างตัวอย่างขึ้นทดสอบชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิกจากผลการทดสอบของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาสร้างเป็นใบกึ่งหั่นลม จำนวน 5 ชั้น ทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำไปยิงด้วยผงทรายภายในตู้ขัดผิววัสดุด้วยทรายตามเวลาที่กำหนด แล้วเอาออกจากตู้ยิงทรายนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาอัตราการสึกกร่อนของวัสดุทดลองจากการเสียดสีของผงทรายกับวัสดุทดลอง

ตารางที่ 3.4 สรุปการออกแบบการทดลอง

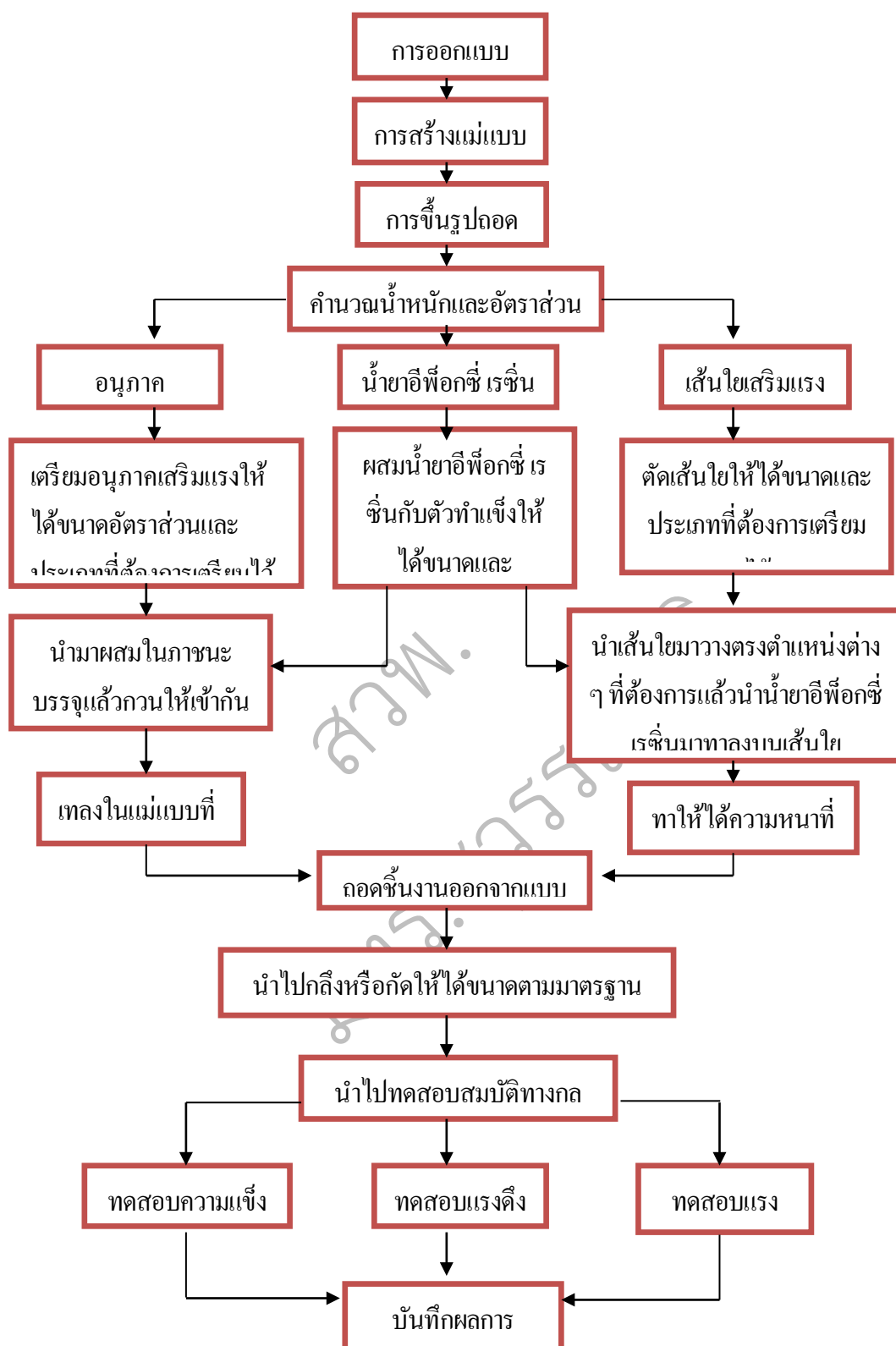
วัสดุทดลอง	ทดสอบความต้านทานแรงดึง	ทดสอบความต้านทานแรงดัด	ทดสอบความแข็ง
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้ว	ASTM D 638	ASTM D 790	ASTM D 785-98
อัตราส่วน 70:30	3 ชั้น	3 ชั้น	5 ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้ว	ASTM D 638	ASTM D 790	ASTM D 785-98
อัตราส่วน 60:40	3 ชั้น	3 ชั้น	5 ชั้น ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้ว	ASTM D 638	ASTM D 790	ASTM D 785-98
อัตราส่วน 50:50	3 ชั้น	3 ชั้น	5 ชั้น ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก	ASTM D 638	ASTM D 790	ASTM D 785-98
อัตราส่วน 70:30	3 ชั้น	3 ชั้น	5 ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก	ASTM D 638	ASTM D 790	ASTM D 785-98
อัตราส่วน 60:40	3 ชั้น	3 ชั้น	5 ชั้นๆละ 3 จุด

ตารางที่ 3.4 สรุปการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

รายการ	ทดสอบความ ต้านทานแรงดึง	ทดสอบความ ต้านทานแรงคด	ทดสอบความแข็ง
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 50:50	ASTM D 638 3 ชั้น	ASTM D 790 3 ชั้น	ASTM D 785-98 5 ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและ เส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 70:30	ASTM D 638 3 ชั้น	ASTM D 790 3 ชั้น	ASTM D 785-98 5 ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและ เส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 60:40	ASTM D 638 3 ชั้น	ASTM D 790 3 ชั้น	ASTM D 785-98 5 ชั้นๆละ 3 จุด
พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วและ เส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 50:50	ASTM D 638 3 ชั้น	ASTM D 790 3 ชั้น	ASTM D 785-98 5 ชั้นๆละ 3 จุด

3.4 การดำเนินการ

ผู้ดำเนินโครงการจำเป็นต้องมีความรู้ในการผลิตชิ้นงานอย่างละเอียดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและลดอันตรายที่อาจเกิดจากการผลิต ได้แก่ การเตรียมเส้นใย การจัดวางเส้นใย การรีดไล่อากาศ ระยะเวลาที่ทำให้วัสดุมีโครงสร้างแข็งแรงเต็มที่ การผสมสารเคมี สมบัติของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อผู้ผลิตและการเก็บรักษาสารเคมีรวมถึงวัสดุต่างๆ ที่ต้องใช้ในการผลิต โดยการผลิตชิ้นงานวัสดุประกอบด้วยวิธีมือทำตามโรงงานทั่วไปมีขั้นตอนในการดำเนินโครงการดังนี้



แผนภูมิที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการโครงการ

3.4.1 สร้างขึ้นทดสอบวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก และพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วเคลือบทับผิวหน้าด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก โดยดำเนินการสร้างตามขั้นตอนอย่างละเอียดเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงาน การสร้างแม่แบบ กระบวนการหล่อชิ้นงานและทำการสร้างชิ้นงานจากวัสดุผสมให้ได้ตามมาตรฐานชิ้นงานทดสอบซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน คือ

3.4.1.1 การออกแบบชิ้นงาน เป็นการออกแบบทางโครงสร้างของชิ้นงานที่ต้องการจะผลิตโดยการร่างแบบ แบบที่จะนำมาใช้ในการผลิตทั่วไปมักจะเป็นแบบที่เป็นมุมมองสามมิติ เพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นงานที่ตรงตามความต้องการอย่างเที่ยงตรงโดยจะระบุขนาดของวัสดุต้นแบบอย่างละเอียดทั้งมุมและขนาดความยาว ความกว้าง และความหนาของทุกสัดส่วนที่จำเป็น โดยจะต้องกำหนดขนาดให้โตกว่าขนาดมาตรฐานที่กำหนดโดยจะต้องเผื่อขนาดที่จะตกแต่งด้วยเครื่องจักรในการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ

3.4.1.2 การสร้างแม่แบบชิ้นงานทดสอบ นำวัสดุแผ่นเรียบมาขึ้นรูปเป็นถาดสี่เหลี่ยมขนาด $300 \times 300 \times 20$ มม. โดยเมื่อระยะเวลาตกแต่งชิ้นทดสอบไว้แล้ว



ภาพที่ 3.6 แม่แบบหล่อขึ้นรูป

3.4.1.3 การหล่อชิ้นงานทดสอบ วัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว และอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

1) กำหนดหาสัดส่วนผสมระหว่างพอลิเอสเตอร์กับเส้นใยแก้วและอีพ็อกซีกับเส้นใยเซรามิก ในอัตราส่วนที่ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาน้ำของพอลิเมอร์ที่ใช้และน้ำหนักของเส้นใยเซรามิก ทำการคำนวณหาอัตราส่วนในการเตรียมพอลิเมอร์และเส้นใยเซรามิกแม่พิมพ์ขนาด $30 \times 30 \times 2$ เซนติเมตร น้ำหนักทั้งหมดของแม่พิมพ์เท่ากับ 1800 กรัม จากนั้นทำการคำนวณตามสูตรร้อยละเพื่อหาอัตราส่วนผสมของทั้งสองระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยเซรามิกดังกล่าวคำนวณหาน้ำหนักของพอลิเมอร์และวัสดุผสมเสริมแรง ทั้ง 2 ชนิด จากอัตราส่วนผสมใช้งาน $70 : 30$, $60 : 40$ และ $50 : 50$ โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.5 การออกแบบส่วนผสมพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยแก้วและอีพ็อกซี่กับเส้นใยเซรามิก ที่ทำการทดลอง

อัตราส่วน	พอลิเอสเทอร์ (กรัม)	เส้นใยแก้ว (กรัม)	อีพ็อกซี่ (กรัม)	เส้นใยเซรามิก (กรัม)
70 : 30	1260	540	1260	540
60 : 40	1080	720	1080	720
50 : 50	900	900	900	900

2) ทำความสะอาดแม่แบบและลงแว็กซ์ถอดแบบเพื่อง่ายต่อการถอดชิ้นงาน



ภาพที่ 3.7 การลงแว็กซ์ถอดแบบ

3) ตัดเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิกให้ได้ขนาดตามแม่แบบ
4) นำเส้นใยที่ได้จากการตัดไปชั่งให้น้ำหนักตามที่คำนวณไว้ตามแม่แบบในการหล่อขึ้นรูป



ภาพที่ 3.8 ตัดเส้นแก้วและชั่งน้ำหนัก

5) นำอีพ็อกซี่เรซิน (Epoxy Resin) H105 กับตัวทำแข็ง (Hardener Mekpo) และพอลิเอสเทอร์ กับตัวทำแข็ง มาชั่งให้ได้ตามอัตราส่วนการใช้งาน และทำการผสมให้ได้ น้ำหนักตรงตาม อัตราส่วน ที่ ใช้งานทั้ง 3 อัตราส่วน



ภาพที่ 3.9 การชั่งตวงตัวทำแข็ง (Hardener) และพอลิเมอร์

6) นำเส้นใยมาวางบนแม่แบบ นำพอลิเมอร์ เรซิน มาทาลงบนเส้นใย โดยใช้แปรงทาแล้วใช้ลูกกลิ้งเหล็กกริดให้ทั่วเพื่อไล่ฟองอากาศ



(ก) เส้นใยแก้ว

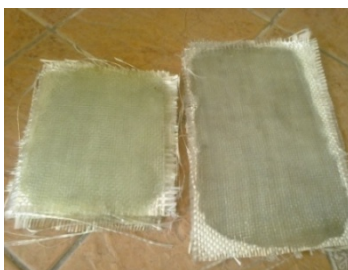
(ข) เส้นใยเซรามิก

ภาพที่ 3.10 การลงน้ำยาอีพ็อกซีกับเส้นใย

7) นำเส้นใยชั้นที่ 2 มาวางทับบนเส้นใยชั้นแรกแล้วทານ้ำยาพอลิเมอร์ เรซิน ให้ทั่ว แล้วไล่ฟองอากาศออกให้หมด ทำตามขั้นตอนนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ความหนาตามต้องการหรือตามความหนาของแม่แบบ

8) หลังจากลงน้ำยาพอลิเมอร์ เรซิน เสร็จเรียบร้อยแล้ว รอประมาณ 1 ชั่วโมง ให้ใช้มีดตัดขอบที่เกินให้เรียบทุกด้าน แล้วปล่อยรอให้แห้งสนิท 3-4 ชั่วโมง

9) ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ เมื่อชิ้นงานแห้งสนิทดีแล้ว จึงใช้ค้อนยางเคาะตามจุดต่าง ๆ เพื่อช่วยในการถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ จากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานแล้วตรวจเช็คความเรียบร้อยของชิ้นงาน ก่อนการนำไปตัดเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ



ภาพที่ 3.11 ชิ้นงานพอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้ว



ภาพที่ 3.12 ชิ้นงานอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

3.4.1.4 การหล่อชิ้นงานทดสอบ วัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

- 1) การสร้างแม่แบบชิ้นงานทดสอบ ใช้ขนาดขนาด 300×300×20 มม.

ใช้ในการทำแม่แบบ



ภาพที่ 3.13 วัสดุทำแม่แบบ

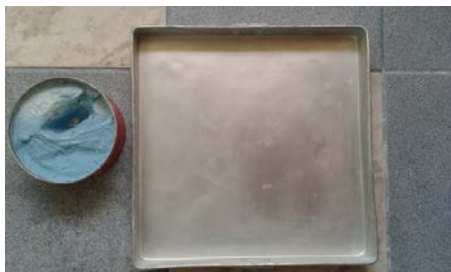
- 2) คำนวณหาสัดส่วนที่ทำการทดลองเพื่อหาน้ำหนักของพอลิเมอร์ และน้ำหนักของเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิก ตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ขนาด 30×30×2 เซนติเมตร น้ำหนักทั้งหมดของแม่พิมพ์เท่ากับ 1800 กรัม จากนั้นทำการคำนวณตามสูตรร้อยละเพื่อหาอัตราส่วนผสมของทั้งสองระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิกดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การออกแบบส่วนผสมของพอลิเมอร์กับเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิก ที่ทำการทดลอง

อัตราส่วนผสม	พอลิเมอร์ (กรัม)	เส้นใยแก้ว (กรัม)	เส้นใยเซรามิก (กรัม)
70 : 30	1260	360	180
60 : 40	1080	540	180
50 : 50	900	720	180

ชิ้นงาน

- 3) ทำความสะอาดแม่แบบและลงเว็ทซ์ถอดแบบเพื่อง่ายต่อการถอด



ภาพที่ 3.14 การลงเว็ทซ์ถอดแบบ

- 4) ตัดเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิกให้ได้ขนาดความกว้าง 30×30 ซม. แล้วไปซังให้น้ำหนักตามที่คำนวณไว้



(ก) เส้นใยแก้ว



(ข) เส้นใยเซรามิก

ภาพที่ 3.15 การซังน้ำหนักเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิก

- 5) นำพอลิเอสเตอร์และอีพ็อกซี่ พร้อม ตัวทำแข็ง (Hardener) มาทำการซังให้ได้อัตราส่วน ตามที่กำหนด และกวนผสมให้เข้ากันจนทั่วถึง



(ก) ตัวทำแข็ง



(ข) พอลิเมอร์ เรซิน

ภาพที่ 3.16 การซังพอลิเมอร์และตัวทำแข็ง (Hardener)

6) นำเส้นใยเซรามิกมาวางบนแม่แบบ นำน้ำยาพอลิเมอร์ มาทาลงบนเส้นใย โดยใช้ลูกกลิ้ง



ภาพที่ 3.17 การลงน้ำยาพอลิเมอร์กับเส้นใย

7) นำเส้นใยแก้วมาวางเป็นชั้นที่ 2 วางทับบนเส้นชั้นแรกแล้วทาน้ำยาอีพ็อกซีให้ทั่ว แล้วไล่ฟองอากาศออกให้หมดทำตามขั้นตอนนี้ไปเรื่อยๆ จนได้ความหนาประมาณ 20 mm.

8) หลังจากลงน้ำยาอีพ็อกซีเสร็จเรียบร้อยแล้ว รอประมาณ 1 ชั่วโมง ให้ใช้คัตเตอร์ตัดขอบที่เกินให้เรียบทุกด้านแล้วปล่อยรอให้แห้งสนิท 3-4 ชั่วโมง

9) การถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบ เมื่อชิ้นงานแห้งสนิทแล้ว จึงใช้ค้อนยางเคาะตามจุดต่าง ๆ เพื่อช่วยในการถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงาน และตรวจเช็คความเรียบร้อยของชิ้นงาน ก่อนนำไปตัดและขึ้นรูปชิ้นทดสอบ



(ก) อัตราส่วน 70:30

(ข) อัตราส่วน 60:40

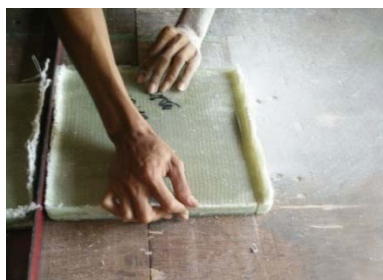
(ค) อัตราส่วน 50:50

ภาพที่ 3.18 ชิ้นงานที่แข็งตัวและถอดออกจากแบบ

3.4.1.5 การสร้างชิ้นงานทดสอบจากวัสดุผสม ที่ได้จากการขึ้นรูปและถอดแบบชิ้นงานในตอนแรกทั้งหมด และยังไม่สามารถนำไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลได้เนื่องจากในการทดสอบวัสดุจะต้องมีขนาดและมาตรฐานการทดสอบของวัสดุในแต่ละชนิด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะ

เป็นการเตรียมชิ้นงานทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานคือ ASTM D 638, ASTM D 790 ดังภาคผนวก ก. จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการหล่อ มาทำการตัดและกัดให้ได้ขนาดตามมาตรฐานของการทดสอบแต่ละชนิดและตามจำนวนที่กำหนด ดังนี้

- 1) ทำการตัดแผ่นชิ้นทดสอบที่หล่อให้ใกล้เคียงตามแบบ



ภาพที่ 3.19 ตัดแผ่นชิ้นทดสอบ

- 2) นำชิ้นทดสอบที่ตัดได้ไปทำการขึ้นรูปชิ้นทดสอบชนิดต่างๆ ตามมาตรฐานการทดสอบด้วยเครื่องกัด(Milling Machine)



ภาพที่ 3.20 การกัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกัด(Milling Machine)

- ก) ชิ้นงานทดสอบแรงดึงอัตราส่วนการทดสอบละ 5 ชิ้น ขนาด 246x29x12.70 มม.มาตรฐานASTM D 638 ดังภาคผนวก ก.



(ก) อัตราส่วน 70:30

(ข) อัตราส่วน 60:40

(ค) อัตราส่วน 50:50

ภาพที่ 3.21 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ข) ชิ้นงานทดสอบแรงคัตอัตราส่วนการทดสอบละ 5 ชิ้น ขนาด 13x150x9.60 มม. มาตรฐานASTM D790 ดังภาพผนวก ก.



(ก) อัตราส่วน 70:30 (ข) อัตราส่วน 60:40 (ค) อัตราส่วน 50:50

ภาพที่ 3.22 ชิ้นงานทดสอบแรงคัตอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก มาตรฐานASTM D 790

ค) ชิ้นงานการทดสอบความแข็งอัตราส่วนการทดสอบละ 5 ชิ้น มาตรฐาน ASTM L 785-98



(ก) อัตราส่วน 70:30 (ข) อัตราส่วน 60:40 (ค) อัตราส่วน 50:50

ภาพที่ 3.23 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง

3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties Testing) การทดสอบสมบัติเชิงกล ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญ ในการศึกษาสมบัติของคอมโพสิตของงานวิจัยเล่มนี้ เพราะเป็นขั้นตอนที่มีความละเอียดมากค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีความผิดพลาดไม่ได้หรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญเป็นพิเศษ โดยการศึกษาทฤษฎีการทดสอบและวิธีการทดสอบอุปกรณ์ในการทดสอบ รวมไปถึงขั้นตอนการทดสอบและวิธีการวัดผลอย่างละเอียดโดยมีกระบวนการทดสอบดังนี้

3.4.2.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Testing) จะเป็นการทดสอบด้วยการดึงเป็นการทดสอบแบบสถิต (Static Test) ชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดออกมาเสมอ (ปราศจากการกระแทก) จนชิ้นงานทดสอบขาด ความเร็วในการยึดตัวจะต้องต่ำ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาดมาก แรงดึงและความยาวที่ยึดออกของชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดค่าหรือถูกพิมพ์ค่าและกราฟออกมาให้ทราบได้ โดยนำชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 3039 ,ASTM D 638 ที่เตรียมไว้ นำมาทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง โดยทำการตั้งพารามิเตอร์ดังนี้

อุณหภูมิ	=	25 องศา
โหลด	=	25 KN
ความเร็ว	=	2 มม./นาที
ระยะห่างที่จับชิ้นงาน	=	50 มม.

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบให้แน่นหนา ตามคู่มือเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine และบันทึกความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ (Gauge-Length) (L_0)



ภาพที่ 3.24 การติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ

- 2) การเพิ่มแรงดึงให้กับชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดจากกัน



ภาพที่ 3.25 การขาดของชิ้นงานทดสอบ



(ก) พอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้ว



(จ) อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก



(ค) พอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้วทับหน้าอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

ภาพที่ 3.26 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงภายหลังทำการทดสอบ

3) บันทึกผลการทดสอบ การบันทึกผลการทดสอบของชิ้นงานทดสอบแต่ละชนิดลงในแบบฟอร์มบันทึกค่าทดสอบ ดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

3.4.2.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอ (Flexural Testing) โดยนำชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790 จำนวน 18 ชิ้น ที่เตรียมไว้ นำมาทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัด ซึ่งเครื่องจะทำการกดที่ตำแหน่งกลางชิ้นงานทำให้เกิดการโค้งงอเนื่องจากจุดกด 3 จุด (Three Point Bending)

อุณหภูมิ	=	25 °C
น้ำหนักโหลด	=	25 KN
ความเร็วในการกด	=	2.8 มม./นาที
ระยะสเปน	=	100 มม.

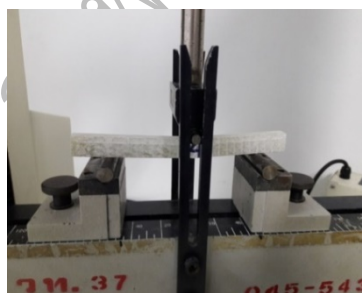
มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับให้มีระยะห่างระหว่างจตุรรองรับเท่ากับ 100 มม. จากนั้น ทำ การเคลื่อนหัวกดมายังตำแหน่งที่พร้อมทดสอบ พร้อมทั้งติดตั้ง Dial Gauge ที่จุดกึ่งกลางระหว่างจตุรรองรับ โดยพยายามให้ Dial Gauge มีระยะวัดสูงสุดเท่าที่จะทำได้



ภาพที่ 3.27 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับ

2) ทำการเพิ่มแรงให้กับตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ ทำการอ่านค่าแรงกระทำและค่าการโก่งตัวในเวลาเดียวกัน โดยจะต้องให้มีจุดที่อ่านอย่างน้อยที่สุด 20 จุดก่อนตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติ และบันทึกค่าแรงกระทำและระยะ โก่งตัวที่จุดวิบัติ



ภาพที่ 3.28 การเพิ่มแรงให้กับตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ



(ก) พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว (ข) อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก



(ค) พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับหน้า อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

ภาพที่ 3.29 ชิ้นงานทดสอบแรงดัดชนิดเสริมแรงด้วยเส้นใยหลังทำการทดสอบ

3) บันทึกผลการทดลอง การบันทึกผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแต่ละชนิดลงในแบบฟอร์มบันทึกค่าทดสอบ ดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.6

3.4.2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) โดยนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมไว้จำนวนวัสดุ 2 ชนิด ชนิดละ 5 ชิ้นไปวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงหัวกด(Indentor)ในการทดสอบโลหะไม่ใช่เหล็กหรือพลาสติก ฉนวนและปะเก็น จะใช้บอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 1/4 หรือ 1/2 โดยขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุแต่ละชนิดแรงที่ใช้ในการทดสอบมี 588 N 980 N หรือ 1471 N เช่น การทดสอบความแข็งของพลาสติกโดยวิธีทดสอบ HRL ใช้บอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 แรงกดทดสอบ 588 N โดยอ้างอิงมาจากบทที่ 2

ระยะเวลาให้แรงกดเริ่มต้น = 5 วินาที

ระยะเวลาเพิ่มแรงกดเต็ม = 5 วินาที

ระยะเวลาให้แรงกดเต็ม = 15 วินาที

อุณหภูมิ = 23 °C

ความชื้นสัมพัทธ์ = 50% R.H.

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) นำชิ้นงานทดสอบมาวางบนแท่นที่มีความแข็งเพียงพอ และในขณะที่ทดสอบจะต้องให้หัวกดอยู่ในแนวศูนย์กลางของชิ้นงานเสมอ



ภาพที่ 3.30 การวางชิ้นทดสอบความแข็ง

2) นำหัวกดกดบนผิวงานด้วยแรงกดนำ $F_0 = 98.07 \text{ N}$ โดยมีให้กระแทกหรือมีการสั่นสะเทือนใด ๆ

3) ตั้งหน้าปัดไปที่เลข 100 (ขณะนี้ระยะกดลึก 0 mm กำหนดไว้ที่ความแข็งรีอคเวลล์ 100) จากนั้นเพิ่มแรงกดเพิ่มจาก F_0 ไป F ในเวลา 2 วินาทีแต่ไม่เกิน 8 วินาที แรงกดเพิ่มเติม 588 N

4) เพื่อให้หัวกดแช่ในเนื้อวัสดุจนเกิดสภาพครากตัว (Plasticity) ด้วยแรงกดเพิ่มเติม F จะต้องให้หัวกดแช่ระหว่าง 10-15 วินาที



ภาพที่ 3.31 การทดสอบความแข็ง

- 5) ความแข็งรีออคเวลล์จะหาได้จากระยะกดลึกถาวร e ซึ่งโดยปกติจะสามารถอ่านค่าที่เครื่องทดสอบได้โดยตรง
- 6) ระยะห่างระหว่างรอยกด (วัดจากศูนย์กลางรอยกด) จะต้องมากกว่าสี่เท่าของรอยกด (แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 2 มม.) สำหรับรอยกดที่อยู่ห่างจากขอบชิ้นงานจะต้องมีระยะห่างอย่างต่ำ 2-5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (ไม่ต่ำกว่า 1 มม.)
- 7) บันทึกผลการทดลอง บันทึกผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบแต่ละชนิดลงในแบบฟอร์มบันทึกค่าทดสอบ ดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.9

3.4.2.4 การทดสอบการสึกกร่อน ภายหลังการสรุปผลการทดลองวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับหน้าด้วยอีพ็อกซี่ผสมเส้นใยเซรามิก จำนวน 3 อัตราส่วนผสม ทำการเลือกวัสดุผสมอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดด้านความแข็งแรง และความแข็งเพื่อนำไปผลิตเป็นใบกั้นหุ้ม โดยนำวัสดุผสมไปสร้างชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบหาความต้านทานต่อการสึกกร่อนของวัสดุที่จะทำเป็นใบกั้นหุ้ม ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องยิงทราย ฟันทรายด้วยความเร็ว 40 ก.ก./นาที ใช้เวลาในการทดสอบ 10 นาที มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.32 เครื่องยิงทรายทดสอบการสึกกร่อน

ทดสอบ

1) ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบตามขนาดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้น

2) ตัดและขึ้นรูปชิ้นทดสอบให้ได้น้ำหนัก 190 กรัม



ภาพที่ 3.33 ชิ้นทดสอบการสึกกร่อน

2 ครั้ง

3) ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนนำเข้าเครื่องทดสอบยิงทราย

4) ใส่ชิ้นงานที่เตรียมไว้เข้าไปในถังขัด ทำการยิงทรายเป็นเวลา 10 นาที จำนวน

5) นำงานออกจากเครื่องยิงทราย ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบ

6) บันทึกผลการทดลอง บันทึกผลการทดลองของชิ้นงานทดสอบ

ในตารางที่ 4.10

3.5 การขึ้นรูปใบกั้น

หลังทดสอบหาค่าความต้านทานการสึกกร่อนแล้วนำวัสดุที่เลือกนี้ไปขึ้นรูปเป็นใบกั้นลมผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ทำความสะอาดแม่แบบ แล้วเช็ดให้แห้ง จากนั้นทำการขัดผิวแม่แบบ

2) ทำการลงเว็ทซ์ถอดแบบให้ทั่วแม่แบบเพื่อให้ง่ายต่อการถอดแบบ



ภาพที่ 3.34 ทำการลงเว็ทซ์แม่แบบใบกั้น

- 3) ตัดเส้นใยแก้วและเส้นใยเซรามิกให้ได้ขนาดและปริมาณตามแม่แบบใบกึ่งหั่นลม
- 4) ชั่งน้ำยาอีพ็อกซีและพอลิเอสเทอร์กับตัวทำแข็งให้ได้อัตราส่วนตามการทดลอง



ภาพที่ 3.35 วางเส้นใยเพื่อเสริมแรง

4) ทาเจลโค้ท หรืออีพ็อกซี เรซินผสมตัวทำแข็งแล้ววางเส้นใยเซรามิกตามตำแหน่งของแม่แบบ แล้วใช้แปรงจุ่มเรซินทาจนทั่วแม่แบบแล้วใช้ลูกกลิ้งไล่ฟองอากาศบนเส้นใยเซรามิก จากนั้นนำเส้นใยแก้ววางทับบนเส้นใยเซรามิกเป็นชั้นที่ 2 แล้วทาด้วยพอลิเอสเทอร์เรซินผสมตัวทำแข็ง เป็นชั้นๆตามความหนาของใบกึ่งหั่นที่ต้องการ ประมาณ 6 มม. จากนั้นนำแม่แบบประกบเข้าด้วยกันรอให้แห้งสนิท ประมาณ 3-4 ชั่วโมง

- 4) เมื่อแข็งตัวดีแล้วทำการถอดแม่แบบจะได้ใบกึ่งหั่นลมดังแสดงในรูป



ภาพที่ 3.36 ถอดแบบใบกึ่งหั่นลม

5) ทำการตัดครีบกแต่ง และทำสี พร้อมตรวจสอบน้ำหนักและความสมดุล ของใบกึ่งหั่นลม ผลิตรถกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3.37 ใบกึ่งหั่นหลังการตกแต่งและทำสี

6) ประกอบและติดตั้งเพื่อทดลองการทำงานในขณะที่หมุนของใบกังหันลม



ภาพที่ 3.38 การประกอบและติดตั้งกังหันลม

สาวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองต้องคำนึงถึงการรับแรงทางกลของใบกั้นเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุ การจะทำให้การทดลองออกมามีคุณภาพและตรงจุดมุ่งหมาย ในส่วนของ การทดลองนี้ จะทำการทดลองวัสดุ 3 ชนิด คือ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อีพ็อกซี่ผสมเส้นใย เซรามิก และพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับหน้าด้วย อีพ็อกซี่ผสมเส้นใยเซรามิก ซึ่งเป็นวัสดุที่ นิยมนำมาทำใบกั้น ทำการทดลองในอัตราส่วนผสม 70 : 30 , 60 : 40 และ 50 : 50 ขึ้นรูปโดย กระบวนการผลิตแบบทามือ หล่อขึ้นรูปขึ้นงาน เพื่อสร้างชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบ การต้านทานแรงดึง การต้านทานแรงค้ำ และความแข็ง ตามมาตรฐานการทดสอบ

4.1 ผลการทดลอง

4.1.2 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) การทดสอบด้วยการดึงเป็นการ ทดสอบแบบสถิต (Static Test) ชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดออกสม่ำเสมอ (ปราศจากการกระแทก) จน ชิ้นงานทดสอบขาด ความเร็วในการยึดตัวจะต้องต่ำ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด มาก แรงดึงและความยาวที่ยึดออกของชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดค่าหรือถูกพิมพ์ค่าและกราฟออกมา ให้ทราบได้ โดยนำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้มาทดสอบการทนต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 3039 ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง ของวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสม เส้นใยแก้ว

อัตราส่วน	ความต้านทานแรงดึง MPa			\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
70:30	783	780	785	783
60:40	625	618	622	622
50:50	550	540	547	546

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุอีพ็อกซี่ผสม เส้นใยเซรามิก

ความต้านทานแรงดึง MPa

อัตราส่วน	ชั้นที่			\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
70:30	38.47	39.25	37.47	38
60:40	33.14	38.89	41.55	38
50:50	32.77	32.77	22.23	29

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว ทับผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความต้านทานแรงดึง MPa			\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
70:30	93.50	95.00	104.80	98
60:40	84.50	100.00	67.10	84
50:50	65.20	83.30	77.60	75

4.1.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง (Flexural Strength) โดยนำชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790 ที่เตรียมไว้ นำมาทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งเครื่องจะทำการกดที่ตำแหน่งกลางชิ้นงานทำให้เกิดการโค้งงอเป็นการทดสอบจากจุดกด 3 จุด (Three Point Bending) การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง (Flexural Strength) ASTM D 790 ในอัตราส่วน 70 : 30 , 60 : 40 และ 50 : 50 ตัวอย่างละ 3 ชิ้น

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง ของวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสม เส้นใยแก้ว

อัตราส่วน	ความต้านทานแรงดึง MPa			\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
70:30	125	122	128	125
60:40	100	96	98	98
50:50	84	89	88	87

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงค้ำของวัสดุ โพลีเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความต้านทานแรงค้ำ MPa			\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
70:30	46.46	51.03	59.73	52
60:40	36.21	34.53	34.35	35
50:50	27.31	29.31	31.29	29

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงค้ำ โพลีเมอร์ผสม เส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความต้านทานแรงค้ำ MPa			\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
70:30	218.6	183.4	182.4	195
60:40	204.2	171.3	195.0	190
50:50	154.5	131.0	141.0	142

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n o^x \cdot i}{n}$$

เมื่อ \bar{X} แทนค่าเฉลี่ยของผลทดสอบแรงค้ำ

เมื่อ $\sum_{i=1}^n X_i$ แทนผลรวมทั้งหมดของผลทดสอบแรงค้ำ

เมื่อ n แทนจำนวนตัวอย่าง ทดสอบแรงค้ำ

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n o^x \cdot i}{n} = \frac{218.6 + 183.4 + 182.4}{3} = 195 \text{ MPa}$$

4.1.4 การทดสอบสมบัติความแข็ง โดยการทดสอบแบบร็อกเวลล์ (Rockwell) HRL โดยนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมไว้ไปวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงหัวกด (Indenter) ในการทดสอบโลหะไม่ใช่เหล็กหรือพลาสติก จนวนและปะเกิน จะใช้บอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8, 1/4 หรือ 1/2 โดยขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุแต่ละชนิดแรงที่ใช้ในการทดสอบมี 588 N 980 N หรือ 1,471 N เช่น การทดสอบความแข็งของพลาสติกโดยวิธีทดสอบ HRL ใช้บอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 แรงกดทดสอบ 588 N การทดสอบสมบัติความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell) ASTM D 785-98 ทำการทดสอบในอัตราส่วน 70 : 30, 60 : 40 และ 50 : 50 อัตราส่วนละ 5 ชั้น ดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแข็งวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว

อัตราส่วน	ความแข็ง(HRL)					\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
70:30	79	79	79	77	81	79
60:40	73	72	76	73	70	73
50:50	62	59	62	63	62	62

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งวัสดุอีพ็อกซีผสม เส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความแข็ง(HRL)					\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
70:30	106	104	105	105	105	105
60:40	87	85	87	87	88	87
50:50	68	68	68	67	68	68

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็งวัสดุ พอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยพอลิเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความแข็ง (HRL)					\bar{X}
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
70:30	106	104	106	104	106	105
60:40	94	95	93	93	93	94
50:50	90	91	92	91	90	91

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n o^x i}{n}$$

เมื่อ \bar{X} แทนค่าเฉลี่ยของผลทดสอบความแข็ง

เมื่อ $\sum_{i=1}^n X_i$ แทนผลรวมทั้งหมดของผลทดสอบความแข็ง

เมื่อ n แทนจำนวนตัวอย่าง ทดสอบ

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n o^x i}{n} = \frac{106 + 104 + 106 + 104 + 106}{5} = 105 \text{ HRL}$$

4.1.5 การทดสอบการสึกกร่อน ทดสอบโดยเลือกวัสดุทดสอบอัตราส่วนผสม 70: 30 ที่มีความแข็งแรงและความแข็งสูงสุดเพื่อจะนำไปผลิตเป็นใบกังหัน นำมาทำเป็นชิ้นทดสอบการทนต่อการสึกกร่อน โดยใช้เครื่องพ่นทรายขัดผิวชิ้นงานเป็นเครื่องทดสอบ นำชิ้นทดสอบซึ่งน้ำหนักก่อน แล้วใส่ในห้องขัดของเครื่องทดสอบ จากนั้นปล่อยแรงดันจากปั๊มลมขับเคลื่อนผงทรายให้ไปกระทบผิวของชิ้นทดสอบ ตามความเร็วที่กำหนด เป็นเวลานาน 10 นาที จำนวน 2-3 ครั้ง แล้วนำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักภายหลังทดสอบอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบสำหรับหาค่าการสึกกร่อนของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการสึกกร่อนของ พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก โดยพิจารณาจากอัตราส่วนที่มีความแข็งแรงและความแข็งมากที่สุด

ชิ้นทดสอบ	น้ำหนัก (g)		%
	ก่อน	หลัง	
ชิ้นที่1	186.97	186.45	0.28
ชิ้นที่2	189.50	189.12	0.20
ชิ้นที่3	187.85	187.11	0.39
\bar{X}	188.10	187.56	0.29

$$\frac{\text{ก่อนทดสอบ} - \text{หลังทดสอบ}}{\text{ก่อนทดสอบ}} \times 100$$

$$\frac{188.10 - 187.56}{188.10} \times 100 = 0.29\%$$

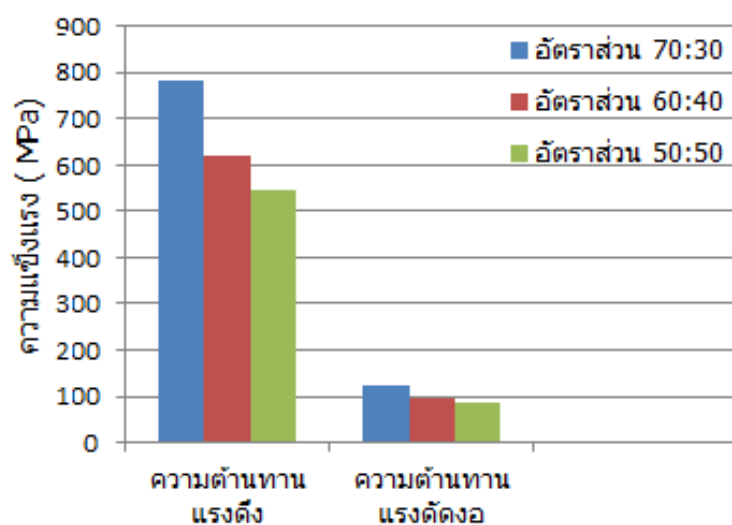
ตารางที่ 4.11 สรุปผลการทดสอบวัสดุผสมที่มีสมบัติทางกลดีที่สุด ที่อัตราส่วนผสม 70:30

วัสดุทดลอง	ค่าความต้านทาน แรงดึง (MPa)	ค่าความต้านทาน แรงดัด (MPa)	ค่าความแข็ง (HRL)	ค่าการสึกกร่อน (%)
พอลิเอสเทอร์ กับ เส้นใยแก้ว	783	125	79	-
อีพ็อกซี่ กับ เส้นใยเซรามิก	38	52	105	-
พอลิเมอร์ กับ เส้นใยแก้ว และ เส้นใยเซรามิก	98	195	105	0.29

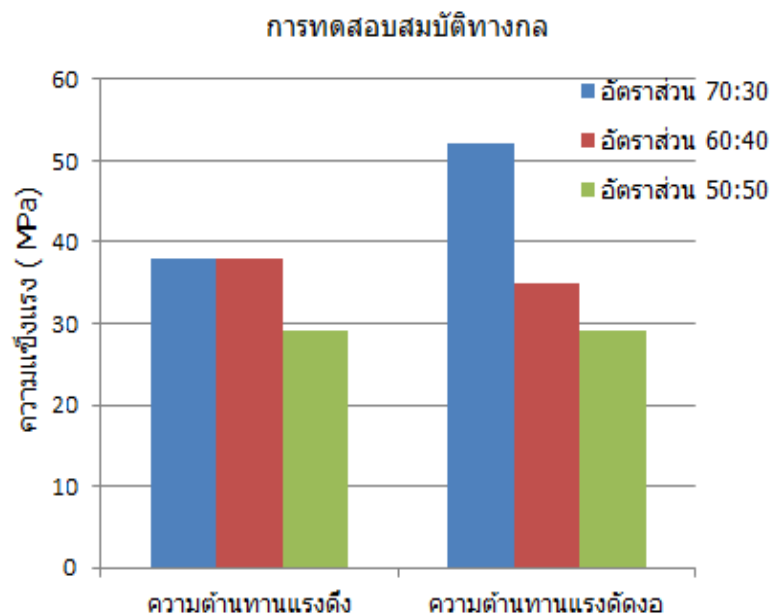
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

4.2.1 การเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) ของวัสดุพอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้ว อีพ็อกซี่ผสมเส้นใย เซรามิก และพอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วย อีพ็อกซี่ผสมเส้นใย เซรามิก

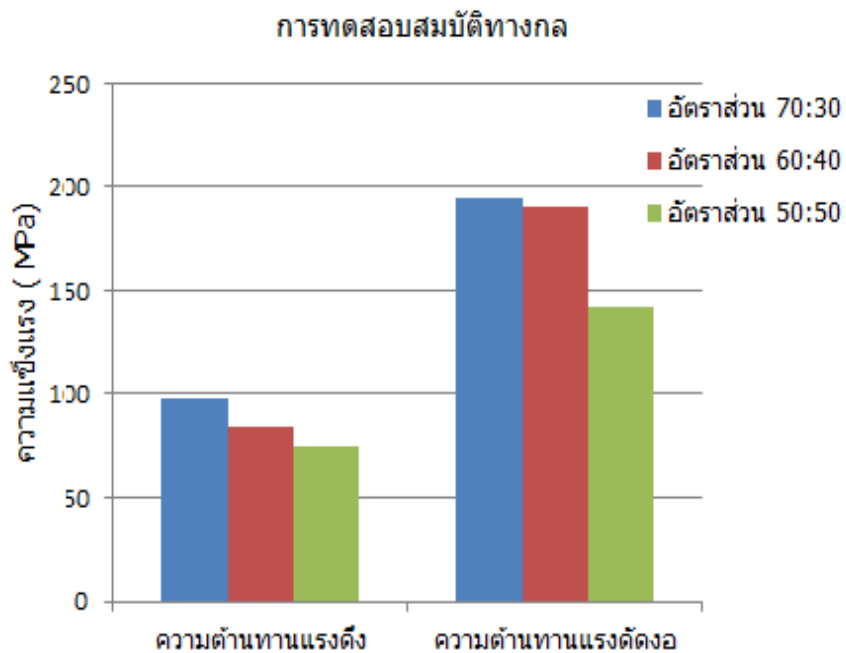
การทดสอบสมบัติทางกล



แผนภูมิที่ 4.1 ความสามารถในการรับแรงของวัสดุพอลิเอสเทอร์ผสมเส้นใยแก้ว

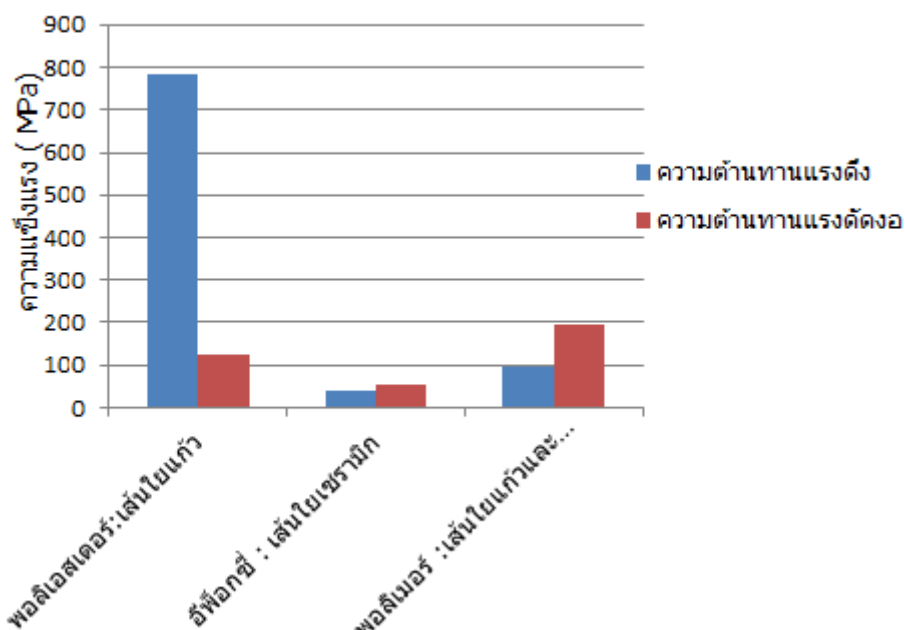


แผนภูมิที่ 4.2 ความสามารถในการรับแรงของวัสดุอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก



แผนภูมิที่ 4.3 ความสามารถในการรับแรงของวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทึบผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

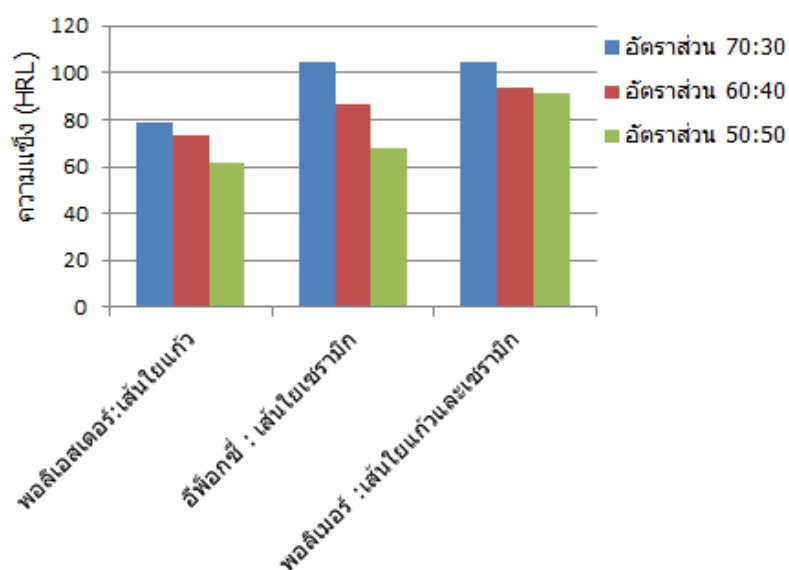
การทดสอบทางกล



แผนภูมิที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของวัสดุผสม

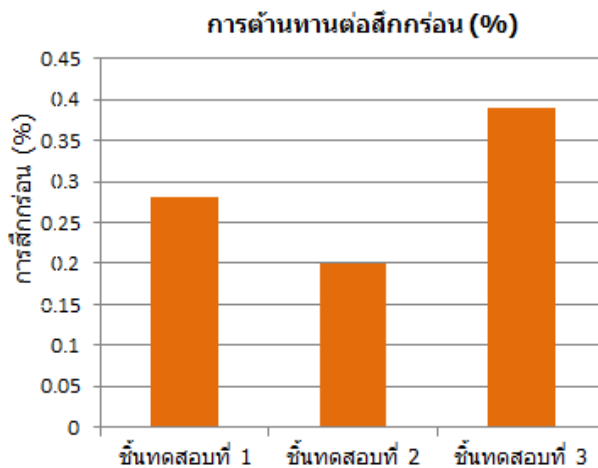
4.2.2 การเปรียบเทียบความแข็ง (Hardness) ของวัสดุโพลีเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อีพ็อกซีผสมเส้นใย เซรามิก และโพลีเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วย อีพ็อกซีผสมเส้นใย เซรามิก

การทดสอบความแข็ง



แผนภูมิที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness) ของวัสดุผสม

4.2.3 การเปรียบเทียบความต้านทานการสึกกร่อน ของวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว ทับผิวบนด้วย อีพ็อกซีผสมเส้นใย เซรามิก



แผนภูมิที่ 4.6 ผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน(Wear Resistance)

จากแผนภูมิที่ 4.1 ถึง 4.6 จะเห็นว่าจากการเปรียบเทียบของผลการทดลองวัสดุผสมพบว่า วัสดุผสมพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิกในอัตราส่วน 70:30 นั้นจะมีค่าสมบัติทางกลสูงที่สุดในกลุ่มวัสดุชนิดเดียวกัน และมีความแข็งผิวสูงกว่า พอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วและอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก ในการทดลอง ปรากฏว่าวัสดุผสม ชนิดนี้มีสมบัติในการทนต่อแรงดึงและแรงอัดสูงกว่า อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก เนื่องจากเป็น เส้นใยผสมเส้นใยแก้วซึ่งมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงสูงกว่าเส้นใย ชนิดอื่นๆที่ทำการทดลอง แต่จะมีค่าต่ำกว่าพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เส้นใยเซรามิกมีสมบัติแข็งแต่มีความเปราะ ดังนั้นเมื่อผสมกับเส้นใยแก้วจะทำให้สมบัติการรับแรง ดึงลดลงแต่จะเพิ่มสมบัติการรับแรงดัดงอและความแข็งมากขึ้น ประกอบกับปัจจัยในการผสมเส้น ใยได้กระจายอยู่ในเนื้อของวัสดุผสมได้อย่างสม่ำเสมอ มีการประสานยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเป็น เนื้อเดียวกันอย่างทั่วถึงจึงทำให้มีความแข็งแรงกว่าวัสดุอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การจัดทำโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกล ด้านความแข็งแรงและความแข็งแรงและการทนต่อการสึกกร่อน ของใบกังหันลมที่ต้องทนต่อการเสียดสีจากฝุ่นละออง ศึกษา ด้านความต้านทานแรงเค้นที่กระทำต่อใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขณะหมุนและเพื่อศึกษาค้นคว้าวัสดุ ใหม่ๆในงานวิศวกรรมที่มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของใบกังหันลม ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อลดปัญหาในการผลิตกระแสไฟฟ้าของพื้นที่ที่อยู่ห่างไกล ซึ่งสามารถสรุปผล การดำเนินโครงการ ได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากการทดลอง ซึ่งทำการออกแบบการทดสอบ ทำการสร้างชิ้นงานทดสอบวัสดุทั้งหมด 3 ชนิดและนำไปทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง แรงดัดงอ ความแข็ง และการต้านทานต่อ การสึกกร่อน พบว่าโพลีเมอร์ผสมเส้นใยแก้วหุ้มด้วยโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเซรามิก มีค่าสมบัติทาง กลสูงสุดที่ อัตราส่วน 70:30 สามารถต้านทานแรงดึงได้ 98 MPa ค่าความต้านทานแรงดัดงอ 195 MPa มีความแข็ง 105 HRL และมีความต้านทานการสึกกร่อน 29 % โดยน้ำหนัก แต่จะมีความ แข็งแรงน้อยกว่าวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วเพียงชนิดเดียว แต่จะมีความแข็งแรงกว่าวัสดุ อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิกชนิดเดียวเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยเซรามิกมีสมบัติแข็ง แต่เปราะ ะเมื่อทำการผสมกับวัสดุที่มีความเหนียว จะทำให้วัสดุที่ได้มีความสามารถในการรับแรงดึงและแรง ดัดงอลดลงแต่จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงทำให้ใบกังหันลมทนต่อการสึกกร่อนได้ดียิ่งขึ้น และมีอายุ การใช้งานได้นานยิ่งขึ้น

5.2 ปัญหาในการดำเนินโครงการ

5.2.1 ปัญหาด้านงบประมาณ เพราะ วัสดุที่ใช้ในการทดลองบางชนิดมีราคาสูง เช่น เส้นเซรามิกราคาสูงถึง เมตรละ 1,500 บาท

5.2.2 การจัดซื้ออุปกรณ์บางอย่างเกิดความล่าช้าเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองบาง ชนิดไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 วัสดุที่ใช้ผลิตใบกั้นหมผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟ

5.3.2 ควรพัฒนาวัสดุผสมชนิดนี้ไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ

สาวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

เอกสารอ้างอิง

- [1] เตชพัทธ์ พักเปี่ยม และ สันติสุข นันทิกุล, 2555, โครงการศึกษาผลของกระบวนการผลิตโดยวิธีอัดเย็นต่อสมบัติทางกลของวัสดุประกอบใยแก้วอีพ็อกซี่ในสภาวะอุณหภูมิปกติ, วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [2] วิชัย โรยรินทร์, โครงการศึกษาวิจัยพัฒนาสาธิตต้นแบบ เทคโนโลยีกักหน้ลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ อนุรักษ์พลังงาน กระทรวง
- [3] ศรุต ศรีสันติสุข ,สัมพันธ์ ไชยเทพ ,ดามร บัณฑุรัตน์และ ชาย รังสิยากุล, 2555, โครงการศึกษาวิจัยการเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเใยแก้วและคาร์บอนไฟเบอร์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [4] กษมา จารุกاجر และ วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, 2554, โครงการวิจัยพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตจากเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อน”, สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [5] พฤติพงษ์ พันธมนัสโสภา, 2557, โครงการศึกษาความคงทนและสมบัติของเส้นใยปอกระเจาที่ปรับปรุงผิวผสม ในวัสดุยางคอมโพสิต, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [6] เอกกวี เสรี, เศชา นาคจันทร์ และ เรืองชัย อักชาติ, 2555, โครงการศึกษาสมบัติวัสดุผสมพอลิเมอร์กับ เส้นใยและพอลิเมอร์ถับนุภาคเพื่อใช้เป็นวัสดุทำใบกักหน้ลมผลิตกระแสไฟฟ้า, สาขาวิชาวิศวกรรมอุสาหการ ,คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
- [7] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, 2555, เอกสารประกอบการเรียนคอมโพสิต, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
[ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.physics.kku.ac.th> (21 ตุลาคม 2558)
- [8] แม้น อมรสิทธิ์, สมชาย อัครทิวา และ ธรรมบุญ อุดมมัน , 2551 , วัสดุวิศวกรรม , แมคกรอ- ฮิล , กรุงเทพฯ หน้า 509 – 547
- [9] อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2556, “เส้นใยสมรรถนะสูง” [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา http://www.en.rmutt.ac.th/prd/2013/High_Performance_Fibers.pdf (27 ตุลาคม 2558)
- [10] พิษิต เหลี่ยนพิพัฒน์, 2534, ไฟเบอร์กล๊าส, มิตรการพิมพ์, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7

- [11] “การออกแบบวัสดุผสม (Designing Hybrid Materials)”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา www.clickbranding.com/learn/chap8/01.html (20 มกราคม 2558)
- [12] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547, “ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด”, ทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 23-27
- [13] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547, “การทดสอบแรงดึง”, การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 28-30
- [14] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547, “การทดสอบแรงดัดงอ”, การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 32-36
- [15] จินตมัย สุวรรณประทีป, 2547, “การทดสอบความแข็ง”, การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 83
- [16] “รูปแบบการเสียหายของวัสดุ”, การสึกหรอ (Wear) [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2011/01/wear.html> (28 กรกฎาคม 2559)
- [17] “อัตราร้อยละ”, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki> (17 กรกฎาคม 2559)
- [18] พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์, 2553, “ทฤษฎีค่าเฉลี่ยเลขคณิต”, หลักสถิติ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 20

ภาคผนวก ก.

- ข้อมูลอีพอกซี
- ข้อมูลเซรามิก
- สถานที่เกี่ยวกับการดำเนินโครงการวิจัย

ข้อมูลรายละเอียดอีพ็อกซี

Major Holdings Ltd.**TECHNICAL DATA SHEET** **EPOXY RESIN BE-333**

BE-333 is a liquid, unmodified bisphenol A-epichlorohydrin epoxide resin which is light straw-color has medium viscosity. BE-333 is one of the most standard liquid resin which can be cured with amine, anhydride, polyamide, or other hardeners depending upon desired and properties. The products have excellent chemical resistance, superior physical and electrical properties, maximum heat resistance and excellent adhesion. BE-333 can be cured at room or elevated temperatures depending upon choice of hardener.

SPECIFICATION

Weight per Epoxy Equivalent (W P E)	182 - 192
Viscosity, Brookfield, cps, 25 °C	11,000 – 15,000
Color, (APHA)	< 30
Specific Gravity	1.15 – 1.18
Nonvolatile %wt	99.7 min
Chlorine,Hydrolyzable,ppm	< 1,000

APPLICATION

Protective Coating
 Casting, potting & Encapsulation for Electrical Components
 Laminating
 Tooling
 Civil Engineering
 Adhesive

PACKAGE

220 kgs net weight in new iron drum.

STORAGE

BE-333 should be stored in dry conditions away from the resin may have a storage life of at least one year.

The information given herein and otherwise supplied to users is based on our general experience and, where applicable, on the results of test on samples of typical manufacture. However, because of the many factors which are outside knowledge and control, which can effect the use of these products, users may rely on their own judgment and we cannot accept liability for any injury, loss or damage resulting from reliance upon such information.

(DIN 3219, at 500 l/s; 23°C)

Amine Value: 300 - 350 mg KOH/g
(DIN 16945 / 5.6)

Iodine Colour Number: ≤ 2 .
(DIN 6162)

Not continually determined:

Dynamic Viscosity: 80 - 100 mPa.s
(DIN 3219, at 500 l/s; 25°C)

Density, 20°C: 1.00 approx. g/cm³
(DIN 2811 - 2)

Flash point (°C) > 96 °C
(DIN 2719, Fensky – Martens)

STORAGE STABILITY

At temperatures up to 25 °C storage stability packed in original containers amounts to at least 365 days.

SAFETY AT WORK AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

When handling and processing epoxy resins and hardeners, the rules and regulations established by local authorities should be observed. A Material Safety Data Sheet is available on request.

The information given herein and otherwise supplied to users is based on our general experience and, where applicable, on the results of test on samples of typical manufacture. However, because of the many factors which are outside knowledge and control, which can effect the use of these products, users may rely on their own judgment and we cannot accept liability for any injury, loss or damage resulting from reliance upon such information.

ข้อมูลเส้นใยเซรามิก

Item	Standard	High Pure	High Aluminum	Zirconium	
Classification Temp (°C)	1260	1260	1360	1430	
Working Temp (°C)	≤1050	≤1100	≤1200	≤1350	
Color	Pure White	Pure White	Pure White	Pure White	
Bulk Density (Kg/m ³)	190-220	190-220	190-220	190-220	
Permanent Linear Shrinkage(%)	950°CX24hs3.5	1100°CX24hs3.5	1200°CX24hs3.5	1350°CX24hs3.5	
Thermal Conductivity (w/m.k) (128Kg/m ³)	0.07(400°C)	0.07(400°C)	0.069(400°C)	0.068(400°C)	
	0.09(400°C)	0.09(400°C)	0.088(400°C)	0.087(400°C)	
	0.12(800°C)	0.12(800°C)	0.110(800°C)	0.100(800°C)	
Organic Content(%)	10	8	8	8	
Tensile Strength (128Kg/m ³) (≥Mpa)	0.50	0.65	0.70	0.75	
Chemical Composition (%)	AL ₂ O ₃	45-46	47-49	52-55	39-40
	AL ₂ O ₃ +SiO ₂	97	99	99	—
	ZrO ₂	—	—	—	15-17
Moisture(%)	≤ 1				
Size(mm)	Length: 10000 – 600000 Width: 610 & 1220 Thickness: 0.50 - 8; As customer's requirements				
Package	Cartons				
Certificate	ISO9001-2000; ISO14001-2000				

สถานที่เกี่ยวกับการดำเนินโครงการวิจัย

รายการ	ที่อยู่	ติดต่อได้ที่
All Art Center จำหน่ายวัสดุ อุปกรณ์การประดิษฐ์ เรซิน ไฟเบอร์กลาส	เลขที่ 56/30 ม.2 ถ.งามวงศ์วาน ต.บางเขน อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000	Tel. 02-965-9269, Mobile/Whatsapp: 081-646- 9618 Line:@allartcenter Fax.02-965-9269 E- mail: loengsak@gmail.com
สถานที่ขึ้นรูปใบกึ่งหั่นลม	ถ.ติวานนท์ 38ตำหน้าไม้ อ.ลาด หลุมแก้ว จ.ปทุมธานี 12140	Tel. 086-1228420
สถานที่ขึ้นรูปสเปคซีเมนต์	หจก. สหสาธิตยูเนี่ยนทูลส์ 54/26-27 5. นนทบุรี 1 ต. บางกระสอบ อ.เมือง จ.นนทบุรี	Tel 02-5275077-8 Fax. 02-5266117
สถานที่ทดสอบแรงดึง แรง ดัดงอ ความแข็ง	ภาควิชาวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีชัยบุรี ต.คลองหก อ.ชัยบุรี จ.ปทุมธานี 12110	Tel 02-5493480
สถานที่ทดสอบการสึกกร่อน พลูทรีพท์พ่นทราย	31/100 ซอยศรีพรสวรรค์ ต. ตลาดขวัญ อ.เมือง จ.นนทบุรี	Tel 081-624-0881 ID line: panu 31100
สถานที่ขายเส้นใยเซรามิก บริษัท เวสต์บาวด์เอ็นจิ เนียริง จำกัด	313/2 พระราม 9 ซอย 15 ถนน พระราม 9 บางกะปิ ห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310	Tel: 02-7197300-8 Fax: 02-7197309

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดัดงอ

ผลการทดสอบค่าความแข็ง

การแปลงหน่วยปริมาตรเป็นหน่วยกรัม

ภาพ.
ม.ทร.สุวรรณภูมิ

การทดสอบแรงดึง

ตารางที่ ข1 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อัตราส่วนผสม 70:30

No	Speed mm./min.	Gauge Length mm.	Temperature °C	Humidity %	Tensile Strength N/mm ²
1	2	50	23	46	783
2	2	50	23	46	780
3	2	50	23	46	785

ตาราง ข2 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อัตราส่วนผสม 60:40

No	Speed mm./min.	Gauge Length mm.	Temperature °C	Humidity %	Tensile Strength N/mm ²
1	2	50	23	46	625
2	2	50	23	46	618
3	2	50	23	46	622

ตาราง ข3 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อัตราส่วนผสม 50:50

No	Speed mm./min.	Gauge Length mm.	Temperature °C	Humidity %	Tensile Strength N/mm ²
1	2	50	23	46	550
2	2	50	23	46	540
3	2	50	23	46	547

ตาราง ข4 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงค้ำงอพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อัตราส่วน ผสม 70:30

No	Speed mm./min.	Span mm.	Temperature °C	Humidity %	Flexural Strength N/mm ²
1	4.56	150	23	51	125
2	4.56	150	23	51	122
3	4.56	150	23	51	128

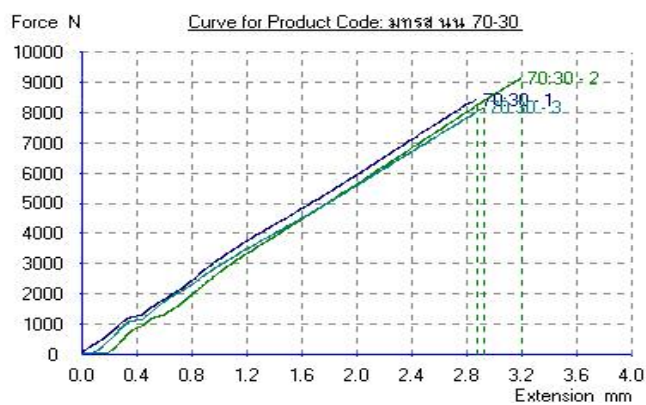
ตาราง ข5 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงค้ำงอพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อัตราส่วน ผสม 60:40

No	Speed mm./min.	Span mm.	Temperature °C	Humidity %	Flexural Strength N/mm ²
1	4.56	150	23	51	100
2	4.56	150	23	51	96
3	4.56	150	23	51	98

ตาราง ข6 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงค้ำงอพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว อัตราส่วน ผสม 50:50

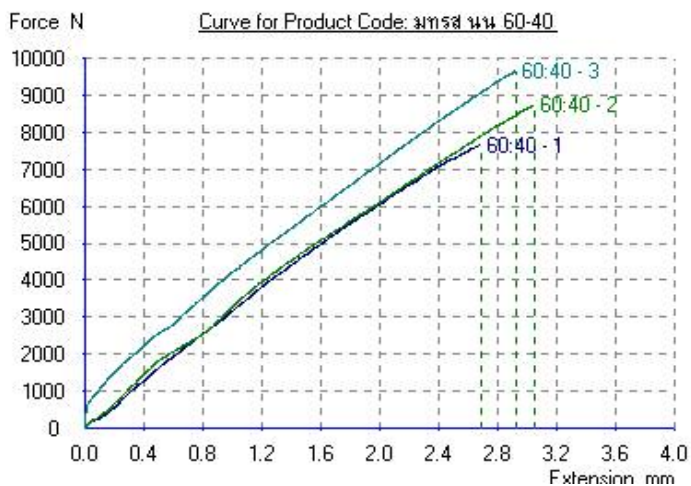
No	Speed mm./min.	Span mm.	Temperature °C	Humidity %	Flexural Strength N/mm ²
1	4.56	150	23	51	84
2	4.56	150	23	51	89
3	4.56	150	23	51	88

ตารางที่ ข7 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 70:30



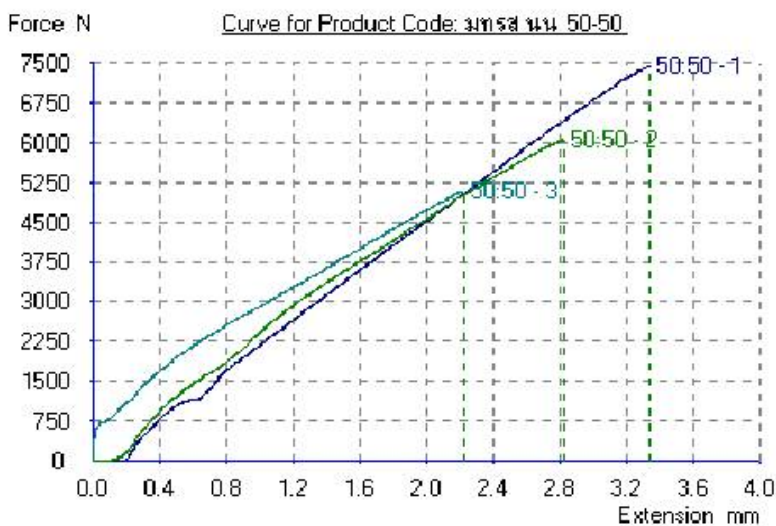
Batch Reference	Max Force	Max Stress		Ext at Max		Ext at Brk	Thickness
	N	MPa	%	%	mm		
70:30 - 1	8430	38.47	2.497	2.497	12.50	18.00	
70:30 - 2	9150	39.25	2.783	2.783	12.60	18.50	
70:30 - 3	8160	37.47	2.546	2.546	12.50	17.90	
n	3	3	3	3	3	3	
Mean	8580	37.73	2.609	2.609	12.533	18.133	
Median	8430	37.47	2.546	2.546	12.50	18.00	
Std. Dev.	511.76	1.4106	0.1526	0.1526	0.0576	0.3215	
Range	990	2.78	0.285	0.285	0.10	0.60	
Maximum	9150	39.25	2.783	2.783	12.60	18.50	
Minimum	8160	36.47	2.497	2.497	12.50	17.90	

ตารางที่ ข8 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 60:40



Batch Reference	Max Force		Max Stress		Ext at Max	Ext	at	Brk
	N	MPa	%	%	mm	mm		
60:40 - 1	7664	33.14	2.337	2.337	12.50	18.50		
60:40 - 2	8750	38.89	2.650	2.650	12.50	18.00		
60:40 - 3	9680	41.55	2.546	2.546	12.50	18.20		
N	3	3	3	3	3	3		
Mean	8698	38.19	2.511	2.511	12.500	18.233		
Median	8750	38.89	2.546	2.546	12.50	18.20		
Std. Dev.	1009.0	4.7423	0.1594	0.1594	0	0.2517		
Range	2016	9.41	0.313	0.313	0	0.50		
Maximum	9680	42.55	2.650	2.650	12.50	18.50		
Minimum	7664	33.14	2.337	2.337	12.50	18.00		

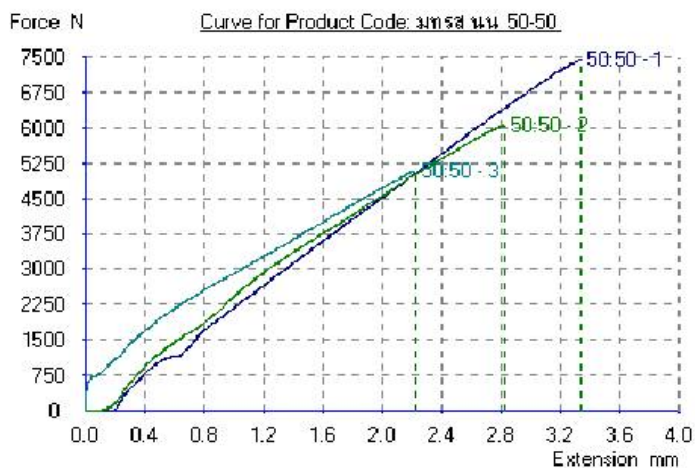
ตารางที่ ๗๑ แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 50:50



Batch Reference	Max Force	Max Stress	Ext at Max	Ext at Brk	Thickness
Width	N	MPa	%	%	mm
50:50 - 1	7455	32.77	2.904	2.904	18.20
50:50 - 2	6060	32.77	2.452	2.452	18.20
50:50 - 3	5085	22.23	1.930	1.930	18.30
N	3	3	3	3	3
Mean	6200	27.58	2.429	2.429	18.233
Median	6060	27.75	2.452	2.452	18.20
Std. Dev.	1191.2	5.2718	0.4874	0.4874	0.2887
Range	2370	10.54	0.974	0.974	0.10
Maximum	7455	32.77	2.904	2.904	18.30
Minimum	5085	22.23	1.930	1.930	18.20

การทดสอบค่าความแข็ง

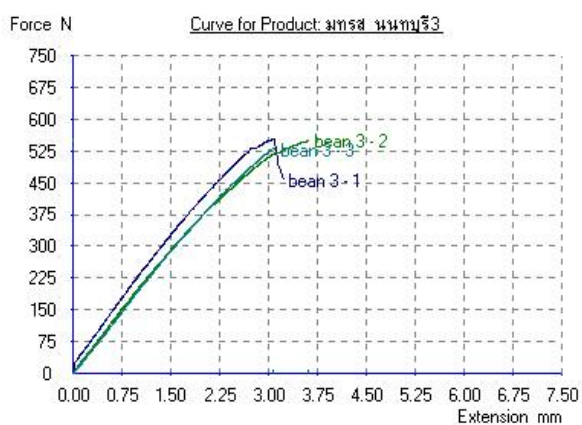
ตารางที่ ข10 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดัดคือฟ็อกซ์ผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 70:30



Batch	Flex Strength		Flex Mod	Thick	Width
	MPa	MPa	mm	mm	mm
bean - 1	46.46	5399	9.60	12.80	
bean - 2	51.03	6369	9.60	13.00	
bean - 3	59.73	6882	9.40	12.90	
n		3	3	3	3
Mean		56.75	6217	9.533	12.900
Median		59.4	6369	9.60	12.90
Std. Dev.		22.269	753.16	0.1154	0.1001
Range		44.3	1483	0.20	0.20
Maximum		77.6	6882	9.60	13.00
Minimum		33.3	5399	9.40	12.80

ตารางที่ ข11 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดัดคือพ็อกซี่ผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 60:40

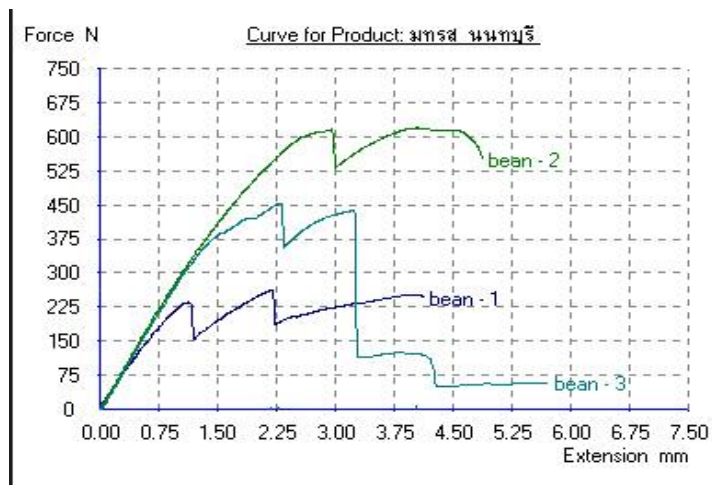
ผลการทดสอบแรงดัดงอ



Batch	Flex Strength	Flex Mod	Thick	Width
	MPa	MPa	mm	mm
bean 3 - 1	36.21	4520	9.60	13.00
bean 3 - 2	34.53	4310	9.60	13.00
bean 3 - 3	34.35	4287	9.60	13.00
n	3	3	3	3
Mean	68.08	4372	9.600	13.000
Median	68.6	4310	9.60	13.00
Std. Dev.	1.4022	128.20	0	0
Range	2.6	233	0	0
Maximum	69.1	4520	9.60	13.00

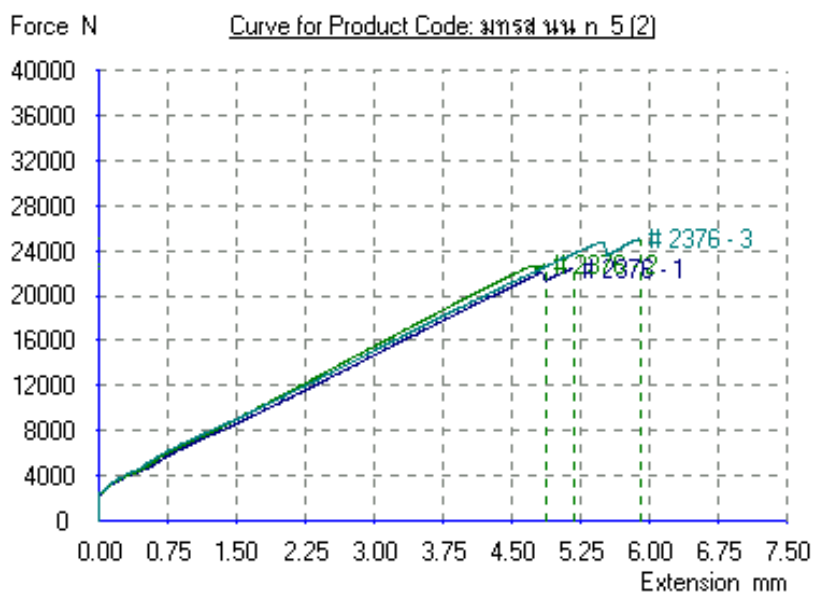
Minimum 66.5 4287 9.60 13.00

ตารางที่ ข12 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดัดที่พ็อกซ์ผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 50:50



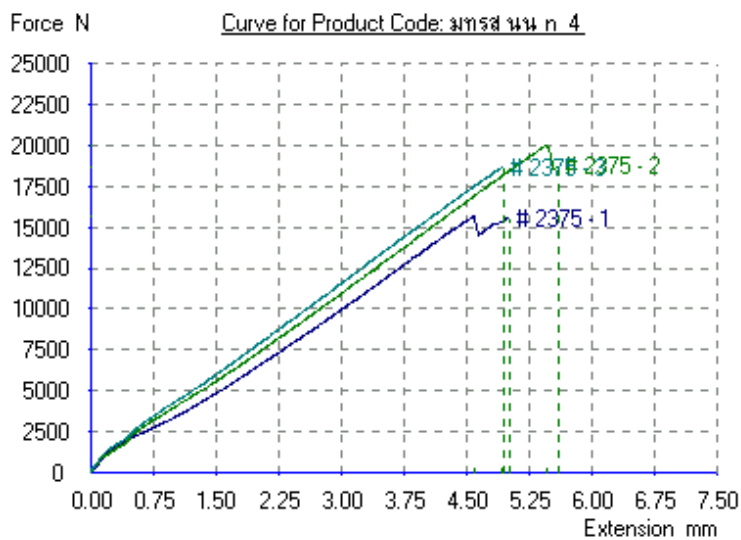
Batch	Flex Strength	Flex Mod	Thick	Width
	MPa	MPa	mm	mm
bean 2 - 1	27.31	3409	9.60	13.00
bean 2 - 2	29.31	3677	9.60	12.70
bean 2 - 3	31.29	3846	9.60	12.80
n	3	3	3	3
Mean	58.13	3644	9.600	12.833
Median	58.8	3677	9.60	12.80
Std. Dev.	3.1868	220.14	0	0.1528
Range	6.3	437	0	0.30
Maximum	60.9	3846	9.60	13.00
Minimum	54.6	3409	9.60	12.70

ตารางที่ ข13 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วย
อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 70:30



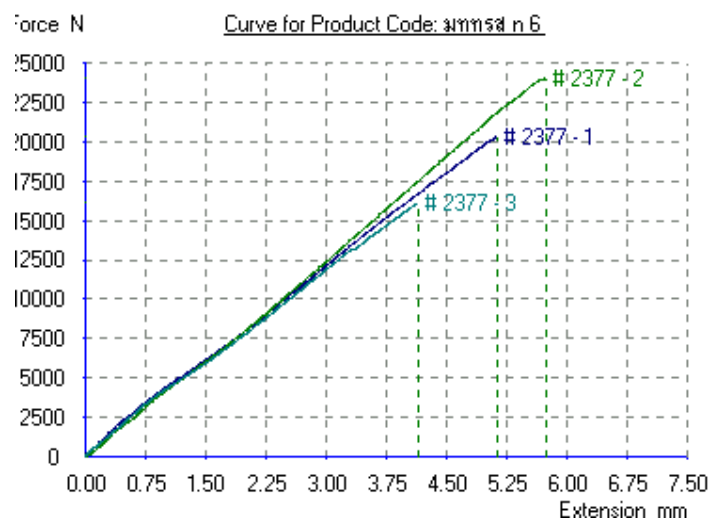
Batch	Reference	Max Force	Max Stress	Ext at Max	Ext at Brk	Thickness	
Width		N	MPa	%	mm	mm	
# 2376 - 1		22425	93.5	4.507	4.507	19.00	12.62
# 2376 - 2		22775	95.0	4.246	4.246	19.00	12.62
# 2376 - 3		25120	104.8	5.146	5.146	19.00	12.62
n	3	3	3	3	3	3	3
Mean		23440	97.76	4.633	4.633	19.000	12.620
Median		22775	95.0	4.507	4.507	19.00	12.62
Std. Dev.		1465.4	6.1115	0.4631	0.4631	0	0
Range		2695	11.2	0.900	0.900	0	0
Maximum		25120	104.8	5.146	5.146	19.00	12.62
Minimum		22425	93.5	4.246	4.246	19.00	12.62

ตารางที่ ข14 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วย
อีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 60:40



Batch	Reference	Max Force	Max Stress	Ext at Max	Ext	at	Brk
Thickness							
Width							
	N	MPa	%	%	mm	mm	
# 2375 - 1	15680	65.2	3.991	4.357	19.00	12.65	
# 2375 - 2	20025	83.3	4.748	4.878	19.00	12.65	
# 2375 - 3	18660	77.6	4.278	4.304	19.00	12.65	
n	3	3	3	3	3	3	3
Mean	18122	75.40	4.339	4.513	19.000	12.650	
Median	18660	77.6	4.278	4.357	19.00	12.65	
Std. Dev.	2222.0	9.245	0.3819	0.3174	0	0	
Range	4345	18.1	0.757	0.574	0	0	
Maximum	20025	83.3	4.748	4.878	19.00	12.65	
Minimum	15680	65.2	3.991	4.304	19.00	12.65	

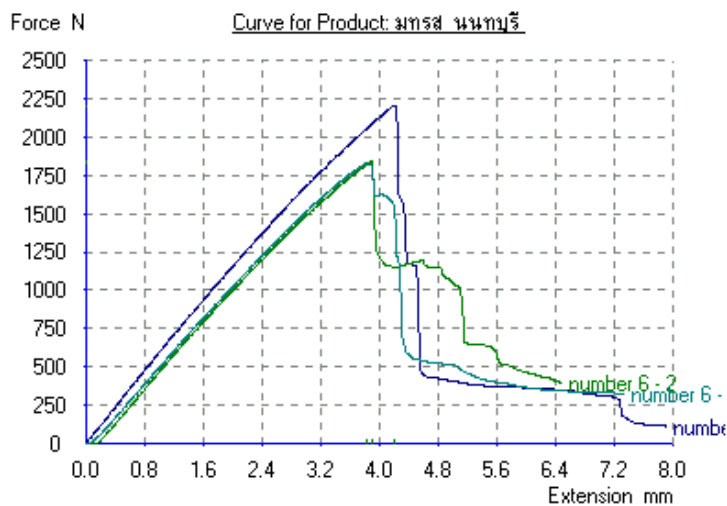
ตารางที่ ข15 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 50:50



Batch Reference	Max Force		Max Stress		Ext at Max		Ext at Brk	Thickness
	N	MPa	%	%	mm	mm		
# 2377 - 1	20350	84.5	4.461	4.461	19.00	12.68		
# 2377 - 2	24100	100.0	4.989	4.989	19.00	12.68		
# 2377 - 3	16160	67.1	3.617	3.617	19.00	12.68		
Mean	20203	83.86	4.356	4.356	19.000	12.680		
Median	20350	84.5	4.461	4.461	19.00	12.68		
Std. Dev.	3972.0	16.487	0.6919	0.6919	0	0		
Range	7940	33.0	1.372	1.372	0	0		
Maximum	24100	100.0	4.989	4.989	19.00	12.68		
Minimum	16160	67.1	3.617	3.617	19.00	12.68		

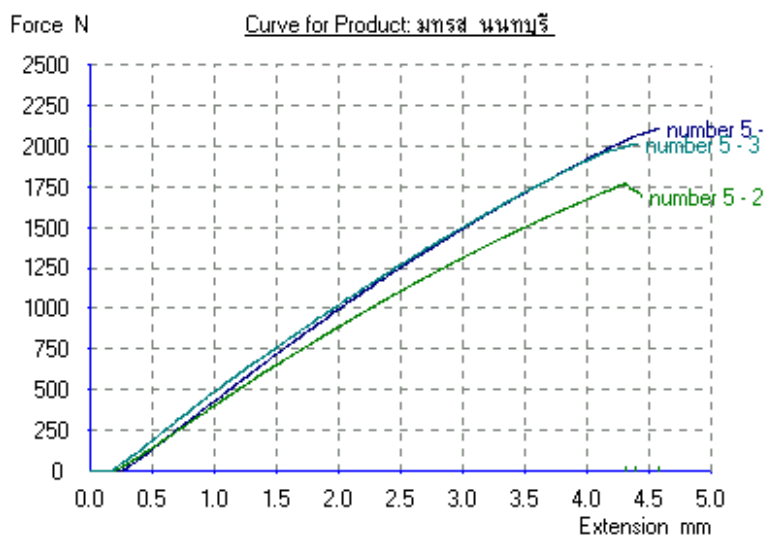
ผลการทดสอบค่าความแข็ง

ตารางที่ ข16 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดัดงอ ของพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทึบผิว บนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 70:30



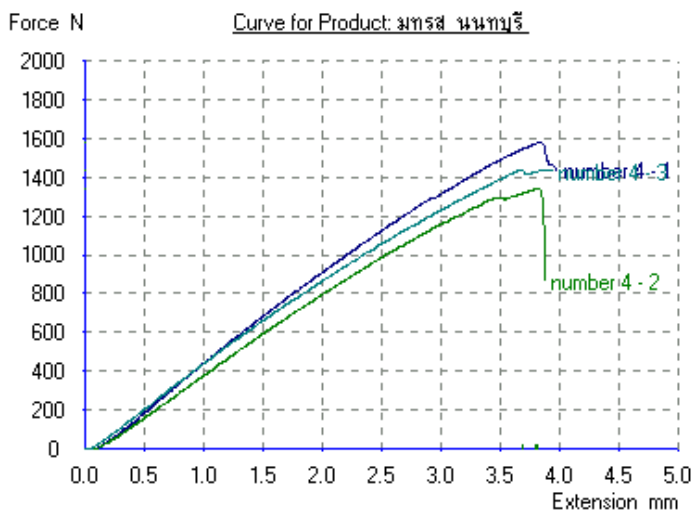
Batch	Flex Strength MPa	Flex Mod MPa	Thick mm	Width mm
number 6 - 1	218.6	7714	12.60	9.50
number 6 - 2	183.4	7422	12.60	9.50
number 6 - 3	182.4	7213	12.60	9.50
n	3	3	3	3
Mean	194.78	7450	12.600	9.500
Median	183.4	7422	12.60	9.50
Std. Dev.	20.591	251.80	0	0
Range	36.2	501	0	0
Maximum	218.6	7714	12.60	9.50
Minimum	182.4	7213	12.60	9.50

ตารางที่ ข17 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงของพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทึบผิว
บนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 60:40



Batch	Flex Strength	Flex Mod	Thick	Width
	MPa	MPa	mm	mm
number 5 - 1	204.2	7450	12.70	9.60
number 5 - 2	171.3	6564	12.70	9.60
number 5 - 3	195.0	7326	12.70	9.60
n	3	3	3	3
Mean	190.13	7113	12.700	9.600
Median	195.0	7326	12.70	9.60
Std. Dev.	16.968	479.55	0	0
Range	32.9	885	0	0
Maximum	204.2	7450	12.70	9.60
Minimum	171.3	6564	12.70	9.60

ตารางที่ ข18 แสดงผลการทดสอบการทนต่อแรงดัดงอ ของพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทึบผิว
 บนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก อัตราส่วน 50:50



Batch	Flex Strength MPa	Flex Mod MPa	Thick mm	Width mm
number 4 - 1	154.5	6511	12.70	9.50
number 4 - 2	131.0	5604	12.70	9.50
number 4 - 3	141.0	6031	12.70	9.50
n	3	3	3	3
Mean	142.14	6049	12.700	9.500
Median	141.0	6031	12.70	9.50
Std. Dev.	11.791	453.78	0	0
Range	23.5	907	0	0
Maximum	154.5	6511	12.70	9.50
Minimum	131.0	5604	12.70	9.50

ตารางที่ ข19 แสดงผลการทดสอบความแข็ง ของพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้ว

อัตราส่วน	ความแข็ง(HRL)															\bar{X}
	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			ชั้นที่ 4			ชั้นที่ 5			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
70:30	82	76	79	85	83	78	79	80	77	72	78	80	81	82	79	79
60:40	75	73	72	73	70	73	76	77	74	73	76	69	70	69	71	73
50:50	65	60	62	60	59	58	64	61	61	64	64	60	65	59	62	62

ตารางที่ ข20 แสดงผลการทดสอบความแข็ง ของอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความแข็ง(HRL)															\bar{X}
	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			ชั้นที่ 4			ชั้นที่ 5			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
70:30	106	106	105	104	102	106	104	105	105	104	106	106	104	105	105	105
60:40	88	89	85	86	85	85	86	88	86	87	87	88	87	88	89	87
50:50	68	68	69	68	67	69	68	68	68	67	66	67	67	68	69	68

ตารางที่ ข21 แสดงผลการทดสอบความแข็ง ของพอลิเอสเตอร์ผสมเส้นใยแก้วทับผิวบนด้วยอีพ็อกซีผสมเส้นใยเซรามิก

อัตราส่วน	ความแข็ง(HRL)															\bar{X}
	ชั้นที่ 1			ชั้นที่ 2			ชั้นที่ 3			ชั้นที่ 4			ชั้นที่ 5			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
70:30	106	107	105	102	105	105	104	106	108	104	102	106	102	109	108	105
60:40	96	92	93	95	96	95	94	93	93	96	93	90	94	92	92	94
50:50	91	89	89	92	91	91	92	92	93	92	93	89	89	90	90	91

วิธีการเปลี่ยนหน่วยปริมาตรเป็นหน่วยกรัม

- 1) แม่พิมพ์ขนาด $30 \times 30 \times 2$ เซนติเมตร คำนวณหาปริมาตรของแม่พิมพ์ได้เท่ากับ 1800 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการแปลงปริมาตรเป็นน้ำหนัก ดังต่อไปนี้ค่าความหนาแน่นของอิพ็อกซีเรซินเท่ากับ 1 g/cm^3 ข้อมูลค่าความหนาแน่นของอิพ็อกซีเรซินดูจากภาคผนวก ก. เพราะฉะนั้นถ้าทำการเทอิพ็อกซีเรซินลงแม่พิมพ์ขนาด $30 \times 30 \times 2$ เซนติเมตรที่มี ปริมาตร 1800 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะได้น้ำหนักเท่ากับ 1800 กรัม

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

ภาคผนวก ก.

มาตรฐาน ASTM D 638

มาตรฐาน ASTM D 790

แบบชิ้นทดสอบ

สวพ.
ม.ทร.สุวรรณภูมิ



Designation: D 638 -- 02a

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is based under the final designation D 638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method can be used for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including films less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, Test Methods D 882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) must be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

¹ Note 1—This test method and ISO 527-1 are technically equivalent.

² Note 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rates of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified describe important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used when more precise physical data are needed.

³ Note 3—This test method may be used for testing plasticized solid resins or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D 229 and Test Method D 651.

⁴ Note 4—For tensile properties of state-cured composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus (>20 GPa (>3.0 × 10⁶ psi)) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D 3039D 3039M.

1.4 Test data obtained by this test method are relevant and appropriate for use in engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E08 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee E08.10 on Mechanical Properties. Current edition approved November 10, 2001. Published January 2002. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2001 as D 638-01.

1.6 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials

Used for Electrical Insulation²

D 412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermo-

plastic Elastomers—Tension³

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing⁴

D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical

Insulating Materials⁵

D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic

Sheeting⁶

D 883 Terminology Relating to Plastics⁴

D 1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break

Plastics and Electrical Insulating Materials⁴

D 3039D 3039M Test Method for Tensile Properties of

Polymer Matrix Composite Materials⁷

D 4000 Classification System for Specifying Plastic Mate-

rials⁸

D 4066 Classification System for Nylon Injection and Ex-

trusion Materials⁹

D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid

Plastic Specimens¹⁰

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines¹¹

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers¹²

E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Tempera-

ture¹³

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 09.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01.

⁵ Discontinued; see 1994 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 16.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.01.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.02.

⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01.

⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

2.1 Determine the Precision of a Test Method¹⁰

2.2 ISO Standard:

ISO 527-1 Determination of Tensile Properties¹¹

3. Terminology

3.1 **Definitions**—Definitions of terms applying to this test method appear in Terminology D 883 and Annex A2.

4. Significance and Use

4.1 This test method is designed to produce tensile property data for the control and specification of plastic materials. These data are also useful for qualitative characterization and for research and development. For many materials, there may be a specification that requires the use of this test method, but with some procedural modifications that take precedence when adhering to the specification. Therefore, it is advisable to refer to that material specification before using this test method. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

4.2 Tensile properties may vary with specimen preparation and with speed and environment of testing. Consequently, when precise comparative results are desired, these factors must be carefully controlled.

4.2.1 It is realized that a material cannot be tested without also testing the method of preparation of that material. Hence, when comparative tests of materials per se are desired, the greatest care must be exercised to ensure that all samples are prepared in exactly the same way, unless the test is to include the effects of sample preparation. Similarly, for referee purposes or comparisons within any given series of specimens, care must be taken to receive the maximum degree of uniformity in details of preparation, treatment, and handling.

4.3 Tensile properties may provide useful data for plastics engineering design purposes. However, because of the high degree of sensitivity exhibited by many plastics to rate of straining and environmental conditions, data obtained by this test method cannot be considered valid for applications involving load-time scales or environments widely different from those of this test method. In cases of such dissimilarity, no reliable estimation of the limit of usefulness can be made for most plastics. This sensitivity to rate of straining and environment necessitates testing over a broad load-time scale (including impact and creep) and range of environmental conditions if tensile properties are to suffice for engineering design purposes.

Note 5—Since the existence of a true elastic limit in plastics (as in many other organic materials and in many metals) is debatable, the propriety of applying the term "elastic modulus" is in question, generally accepted definitions to describe the "stiffness" or "rigidity" of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are highly dependent on such factors as rate of application of stress, temperature, previous history of specimen, etc. However, stress-strain curves for plastics, determined as described in this test method, almost always show a linear region at low stresses, and a straight line drawn tangent to this portion of the curve permits calculation of an elastic

modulus of the usually defined type. Such a constant is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and similar factors are realized.

4.4 **Poisson's Ratio**—When uniaxial tensile force is applied to a solid, the solid stretches in the direction of the applied force (axially), but it also contracts in both dimensions lateral to the applied force. If the solid is homogeneous and isotropic, and the material remains elastic under the action of the applied force, the lateral strain bears a constant relationship to the axial strain. This constant, called Poisson's ratio, is defined as the negative ratio of the transverse (negative) to axial strain under uniaxial stress.

4.4.1 Poisson's ratio is used for the design of structures in which all dimensional changes resulting from the application of force need to be taken into account and in the application of the generalized theory of elasticity to structural analysis.

Note 6—The accuracy of the determination of Poisson's ratio is usually limited by the accuracy of the transverse strain measurements because the percentage errors in these measurements are usually greater than in the axial strain measurements. Since a ratio rather than an absolute quantity is measured, it is only necessary to know accurately the relative value of the coefficient factors of the measurements. Also, in general, the value of the applied loads need not be known accurately.

5. Apparatus

5.1 **Testing Machine**—A testing machine of the constant-rate-of-crosshead-movement type and comprising essentially the following:

5.1.1 **Fixed Member**—A fixed or essentially stationary member carrying one grip.

5.1.2 **Movable Member**—A movable member carrying a second grip.

5.1.3 **Grips**—Grips for holding the test specimen between the fixed member and the movable member of the testing machine can be either the fixed or self-aligning type.

5.1.3.1 **Fixed grips** are rigidly attached to the fixed and movable members of the testing machine. When this type of grip is used extreme care should be taken to ensure that the test specimen is inserted and clamped so that the long axis of the test specimen coincides with the direction of pull through the center line of the grip assembly.

5.1.3.2 **Self-aligning grips** are attached to the fixed and movable members of the testing machine in such a manner that they will move freely into alignment as soon as any load is applied so that the long axis of the test specimen will coincide with the direction of the applied pull through the center line of the grip assembly. The specimens should be aligned as perfectly as possible with the direction of pull so that no rotary motion that may induce slippage will occur in the grips; there is a limit to the amount of misalignment self-aligning grips will accommodate.

5.1.3.3 The test specimen shall be held in such a way that slippage relative to the grips is prevented insofar as possible. Grip surfaces that are deeply scored or serrated with a pattern similar to those of a coarse single-cut file, serrations about 2.4 mm (0.09 in.) apart and about 1.6 mm (0.06 in.) deep, have been found satisfactory for most thermoplastics. Finer serrations have been found to be more satisfactory for harder plastics, such as the thermosetting materials. The serrations

¹⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

¹¹ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10018.

D 638 - 02a

should be kept clean and sharp. Breaking in the grips may occur at times, even when deep serrations or abraded specimen surfaces are used; other techniques must be used in these cases. Other techniques that have been found useful, particularly with smooth-faced grips, are abrading that portion of the surface of the specimen that will be in the grips, and interposing thin pieces of abrasive cloth, abrasive paper, or plastic, or rubber-coated fabric, commonly called hospital sheeting, between the specimen and the grip surface. No. 80 double-sided abrasive paper has been found effective in many cases. An open-mesh fabric, in which the threads are coated with abrasive, has also been effective. Reducing the cross-sectional area of the specimen may also be effective. The use of special types of grips is sometimes necessary to eliminate slippage and breakage in the grips.

5.1.4 Drive Mechanism—A drive mechanism for imparting to the movable member a uniform, controlled velocity with respect to the stationary member, with this velocity to be regulated as specified in Section 8.

5.1.5 Load Indicator—A suitable load-indicating mechanism capable of showing the total tensile load carried by the test specimen when held by the grips. This mechanism shall be essentially free of inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the indicated value, or better. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

Note 7—Experience has shown that many testing machines now in use are incapable of sustaining accuracy for as long as the periods between inspection recommended in Practices E 4. Hence, it is recommended that each machine be studied individually and verified as often as may be found necessary. It frequently will be necessary to perform this function daily.

5.1.6 The fixed member, movable member, drive mechanism, and grips shall be constructed of such materials and in such proportions that the total elastic longitudinal strain of the system constituted by these parts does not exceed 1% of the total longitudinal strain between the two gage marks on the test specimen at any time during the test and at any load up to the rated capacity of the machine.

5.1.7 Crosshead Extension Indicator—A suitable extension indicating mechanism capable of showing the amount of change in the separation of the grips, that is, crosshead movement. This mechanism shall be essentially free of inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the crosshead movement with an accuracy of $\pm 10\%$ of the indicated value.

5.2 Extension Indicator (extensometer)—A suitable instrument shall be used for determining the distance between two designated points within the gage length of the test specimen as the specimen is stretched. For release purposes, the extensometer must be set at the full gage length of the specimen, as shown in Fig. 1. It is desirable, but not essential, that this instrument automatically record this distance, or any change in it, as a function of the load on the test specimen or of the elapsed time from the start of the test, or both. If only the latter is obtained, load-time data must also be taken. This instrument shall be essentially free of inertia at the specified speed of

testing. Extensometers shall be classified and their calibration periodically verified in accordance with Practice E 83.

5.2.1 Modulus-of-Elasticity Measurements—For modulus-of-elasticity measurements, an extensometer with a maximum strain error of 0.0002 mm/mm (in./in.) that automatically and continuously records shall be used. An extensometer classified by Practice E 83 as fulfilling the requirements of a B-2 classification within the range of use for modulus measurements meets this requirement.

5.2.2 Low-Extension Measurements—For elongation-at-yield and low-extension measurements (nominally 20% or less), the same above extensometer, attenuated to 20% extension, may be used. In any case, the extensometer system must meet at least Class C (Practice E 83) requirements, which include a fixed strain error of 0.001 strain or $\pm 1.0\%$ of the indicated strain, whichever is greater.

5.2.3 High-Extension Measurements—For making measurements at elongations greater than 20%, measuring techniques with error no greater than $\pm 10\%$ of the measured value are acceptable.

5.2.4 Poisson's Ratio—Bi-axial extensometer or axial and transverse extensometers capable of recording axial strain and transverse strain simultaneously. The extensometers shall be capable of measuring the change in strains with an accuracy of 1% of the relevant value or better.

Note 8—Strain gages can be used as an alternative method to measure axial and transverse strains; however, proper techniques for mounting strain gages are crucial to obtaining accurate data. Consult strain gage suppliers for instruction and training in these special techniques.

5.3 Micrometers—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: (1) a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), (2) a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) in diameter, and (3) a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.0002 in.) over the entire foot area. Flatness of the foot and anvil shall conform to Test Method D 5947.

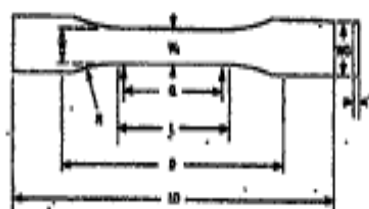
5.3.1 An optional instrument equipped with a circular contact foot 15.88 ± 0.08 mm (0.625 ± 0.003 in.) in diameter is recommended for thickness measuring of porous samples or larger specimens at least 15.88 mm in minimum width.

6. Test Specimens

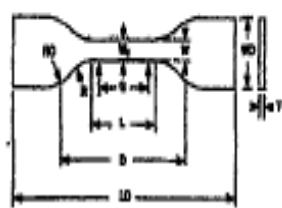
6.1 Sheet, Plate, and Molded Plastics

6.1.1 Rigid and Semirigid Plastics—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type I specimen is the preferred specimen and shall be used where sufficient material having a thickness of 7 mm (0.28 in.) or less is available. The Type II specimen may be used when a material does not break in the narrow section with the preferred Type I specimen. The Type V specimen shall be used where only limited material having a thickness of 4 mm (0.16 in.) or less is available for evaluation, or where a large number of

D 638 -- 02a



TYPE I



TYPE V

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

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.56), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^b	Type V ^{c,d}		
W—Width of narrow section ^{e,f}	19 (0.75)	9 (0.35)	19 (0.75)	9 (0.35)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{g,h}	
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	6.35 (0.250)	±0.5 (±0.02) ⁱ	
WO—Width overall, min ^h	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	—	+6.4 (+0.25)	
WO—Width overall, min ^h	—	—	—	—	6.35 (0.250)	+3.18 (+0.125)	
LO—Length overall, min ^h	105 (4.1)	105 (4.1)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G—Gage length ^j	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	—	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^k	
G—Gage length ^j	—	—	—	25 (1.00)	—	±0.13 (±0.006)	
D—Distance between grips	115 (4.5)	105 (4.1)	115 (4.5)	65 (2.5)	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)	
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.55)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^l	
RO—Outer radius (Type IV)	—	—	—	25 (1.00)	—	±1 (±0.04)	

^aThickness, T, shall be 0.2±0.4 mm (0.15±0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Type I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T, may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14±0.4 mm (0.55±0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those stated for the grade of material tested.

^bFor the Type IV specimen, the lateral width of the narrow section of the die shall be 6.00±0.05 mm (0.236±0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die Q in Test Methods D-415.

^cThe Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

- W=3.18±0.08 mm (0.125±0.001 in.),
- L=6.35±0.08 mm (0.250±0.003 in.),
- G=7.62±0.02 mm (0.300±0.001 in.), and
- R=12.7±0.08 mm (0.500±0.003 in.).

The other tolerances are those in the table.

^dSupporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D 1602 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request PP10-1036.

^eThe width at the center W_c shall be +0.00 mm, -0.10 mm (+0.000 in., -0.004 in.) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

^fFor molded specimens, a slant of not over 0.16 mm (0.005 in.) may be allowed for other Type I or II specimens 3.2 mm (0.125 in.) in thickness, and this should be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the minimum allowable draft, could be as follows:

- ^gOverall width greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips.
- ^hOverall lengths greater than the minimum indicated may be desirable either to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.
- ⁱTest stands or initial extensometer span.
- ^jWhen self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if machined uniform cross section.

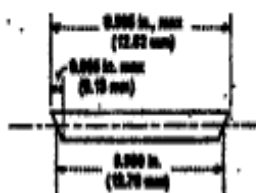


FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

specimens are to be exposed in a limited space (thermal and environmental stability tests, etc.). The Type IV specimen should be used when direct comparisons are required between materials in different rigidity cases (that is, nonrigid and

 D 638-02a

semirigid). The Type III specimen must be used for all materials with a thickness of greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

6.1.2 *Nonrigid Plastics*—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type IV specimen shall be used for testing nonrigid plastics with a thickness of 4 mm (0.16 in.) or less. The Type III specimen must be used for all materials with a thickness greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

6.1.3 *Reinforced Composites*—The test specimen for reinforced composites, including highly orthotropic laminates, shall conform to the dimensions of the Type I specimen shown in Fig. 1.

6.1.4 *Preparation*—Test specimens shall be prepared by machining operations, or die cutting, from materials in sheet, plate, slab, or similar form. Materials thicker than 14 mm (0.55 in.) must be machined to 14 mm (0.55 in.) for use as Type III specimens. Specimens can also be prepared by molding the material to be tested.

Note 9—Test results have shown that for some materials such as glass cloth, SMC, and BMC laminates, other specimen types should be considered to ensure breakage within the gage length of the specimen, as mandated by 7.3.

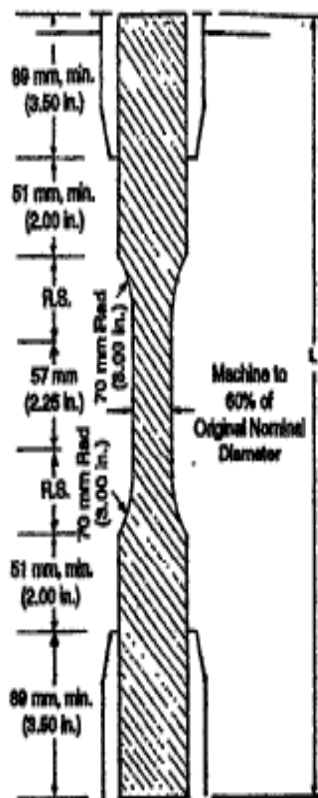
Note 10—When preparing specimens from certain composite laminates such as woven roving, or glass cloth, care must be exercised in cutting the specimens parallel to the reinforcement. The reinforcement will be significantly weakened by cutting on a bias, resulting in lower laminate properties, unless testing of specimens in a direction other than parallel with the reinforcement constitutes a variable being studied.

Note 11—Specimens prepared by injection molding may have different tensile properties than specimens prepared by machining or die-cutting because of the orientation induced. This effect may be more pronounced in specimens with narrow sections.

6.2 *Rigid Tubes*—The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60% of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 25 mm (1 in.) shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 *Rigid Rods*—The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60% of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter.

6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes



DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

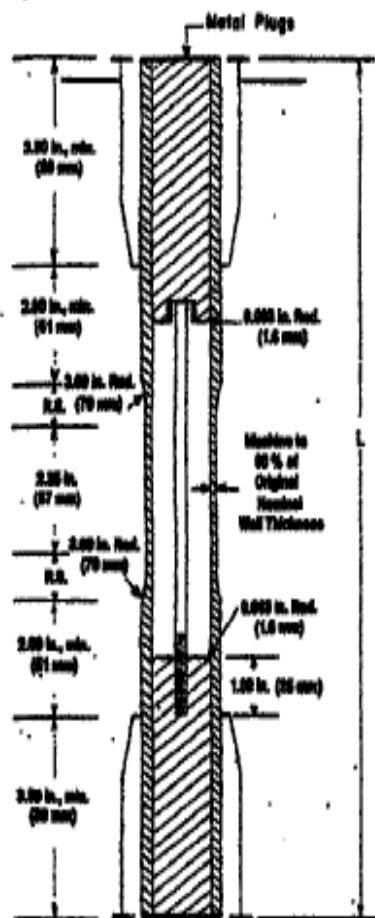
Nominal Diameter	Length of Parallel Section, ZFLS	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L , of Specimen to Be Used for 89 mm (3 1/2 in.) Jaws ^a
mm (in.)			
3.2 (1/8)	19.8 (0.778)	309 (14.02)	301 (10)
4.7 (1/4)	24.0 (0.944)	301 (14.50)	301 (10)
6.4 (1/4)	27.7 (1.091)	304 (14.50)	301 (10)
9.5 (3/8)	33.9 (1.330)	310 (14.50)	301 (10)
12.7 (1/2)	39.0 (1.530)	316 (14.70)	400 (15.75)
15.9 (5/8)	43.5 (1.714)	300 (14.90)	400 (15.75)
19.0 (3/4)	47.8 (1.875)	304 (15.10)	400 (15.75)
22.2 (7/8)	51.6 (2.019)	308 (15.27)	400 (15.75)
25.4 (1)	54.7 (2.154)	301 (15.40)	419 (16.5)
31.8 (1 1/4)	60.0 (2.360)	308 (15.00)	419 (16.5)
38.1 (1 1/2)	66.4 (2.615)	403 (15.87)	419 (16.5)
42.5 (1 3/4)	71.4 (2.812)	406 (16.00)	419 (16.5)
50.8 (2)	76.0 (2.980)	412 (16.24)	432 (17)

^a For other jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the minimum length of the jaw grip.

FIG. 3 Diagram Showing Location of Rod Tension Test Specimen in Testing Machine

shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.

D 638 - 02a



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Section, S.R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 80-mm (3.15-in.) Jaws ^a
			mm (in.)
0.70 (1/4)	15.0 (0.547)	300 (11.81)	381 (15)
1.2 (1/4)	17.0 (0.670)	354 (13.92)	381 (15)
1.6 (1/4)	19.0 (0.778)	388 (14.92)	381 (15)
2.4 (1/4)	24.0 (0.940)	381 (14.37)	381 (15)
3.2 (1/4)	27.7 (1.091)	394 (14.94)	381 (15)
4.8 (1/4)	33.0 (1.280)	370 (14.56)	381 (15)
6.4 (1/4)	39.0 (1.530)	378 (14.78)	400 (15.75)
7.8 (1/4)	43.5 (1.714)	360 (14.18)	400 (15.75)
9.5 (1/4)	47.8 (1.878)	364 (14.33)	400 (15.75)
11.1 (1/4)	51.5 (2.018)	368 (14.49)	400 (15.75)
12.7 (1/4)	54.7 (2.154)	361 (14.20)	419 (16.5)

^aFor other jaws greater than 80 mm (3.15 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 0.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

6.5 If it is necessary to place gage marks on the specimen, this shall be done with a wax crayon or India ink that will not affect the material being tested. Gage marks shall not be scratched, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Number of Test Specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 Test ten specimens, five normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy, for each sample in the case of anisotropic materials.

7.3 Discard specimens that break at some flaw, or that break outside of the narrow cross-sectional test section (Fig. 1, dimension "L"), and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

Note 12—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

8. Speed of Testing

8.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. The rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running idle may be used, if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

8.2 Choose the speed of testing from Table 1. Determine this chosen speed of testing by the specification for the material being tested, or by agreement between those concerned. When the speed is not specified, use the lowest speed shown in Table 1 for the specimen geometry being used, which gives rupture within 1/4 to 5-min testing time.

8.3 Modulus determinations may be made at the speed selected for the other tensile properties when the recorder response and resolution are adequate.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^a

Classification ^b	Specimen Type	Speed of Testing, min/min (in./min)	Nominal Strain ^c Rate at Start of Test, min/min (in./in./min)
Right and Straight	I, E, W rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		60 (2) ± 10 %	1
	500 (20) ± 10 %	10	
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
Nonright	V	500 (20) ± 10 %	15
		1 (0.05) ± 25 %	0.1
	W	10 (0.5) ± 25 %	1
		180 (8) ± 25 %	10
IV	500 (20) ± 10 %	10	
	50 (2) ± 10 %	1.5	
		500 (20) ± 10 %	15

^aSelect the lowest speed that produces rupture in 1/4 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^bSee Terminology D 883 for definitions.

^cThe initial rate of straining cannot be calculated exactly for double-headed specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillet. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

D 638 - 02a

8.4 Poisson's ratio determinations shall be made at the same speed selected for modulus determinations.

9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

9.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of rigid flat specimens (Fig. 1) with a suitable micrometer to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at several points along their narrow sections. Measure the thickness of nonrigid specimens (produced by a Type IV die) in the same manner with the required dial micrometer. Take the width of this specimen as the distance between the cutting edges of the die in the narrow section. Measure the diameter of rod specimens, and the inside and outside diameters of tube specimens, to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at a minimum of two points 90° apart; make these measurements along the groove for specimens so constructed. Use plugs in testing tube specimens, as shown in Fig. 2.

TABLE 2 Modulus, 10^6 psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S_y	S_n	l_y	l_n
Polypropylene	0.210	0.0088	0.071	0.008	0.801
Cellulose acetate butyrate	0.248	0.0179	0.038	0.081	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.008	0.081	0.144
Glass-reinforced nylon	1.17	0.0887	0.017	0.102	0.814
Glass-reinforced polyester	1.38	0.0884	0.008	0.089	0.708

10.2 Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the specimen and the grips with an imaginary line joining the points of attachment of the grips to the machine. The distance between the ends of the gripping surfaces, when using flat specimens, shall be as indicated in Fig. 1. On tube and rod specimens, the location for the grips shall be as shown in Fig. 2 and Fig. 3. Tighten the grips evenly and firmly to the degree necessary to prevent slippage of the specimen during the test, but not to the point where the specimen would be crushed.

10.3 Attach the extension indicator. When modulus is being determined, a Class B-2 or better extensometer is required (see 5.2.1).

Note 13—Modulus of materials is determined from the slope of the linear portion of the stress-strain curve. For most plastics, this linear portion is very small, occurs very rapidly, and must be recorded automatically. The change in jaw separation is never to be used for calculating modulus or elongation.

10.3.1 Poisson's Ratio Determination:

10.3.1.1 When Poisson's ratio is determined, the speed of testing and the load range at which it is determined shall be the same as those used for modulus of elasticity.

10.3.1.2 Attach the transverse strain measuring device. The transverse strain measuring device must continuously measure the strain simultaneously with the axial strain measuring device.

TABLE 3 Tensile Stress at Yield, 10^6 psi, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_y	S_n	l_y	l_n
Polypropylene	3.03	0.022	0.181	0.082	0.468
Cellulose acetate butyrate	5.01	0.068	0.227	0.164	0.842
Acrylic	10.4	0.067	0.917	0.180	0.887

TABLE 4 Elongation at Yield, %, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_y	S_n	l_y	l_n
Cellulose acetate butyrate	3.68	0.27	0.62	0.78	1.78
Acrylic	4.86	0.21	0.68	0.98	1.98
Polypropylene	8.79	0.46	5.88	1.27	18.5

10.3.1.3 Make simultaneous measurements of load and strain and record the data. The precision of the value of Poisson's ratio will depend on the number of data points of axial and transverse strain taken.

10.4 Set the speed of testing at the proper rate as required in Section 8, and start the machine.

10.5 Record the load-extension curve of the specimen.

10.6 Record the load and extension at the yield point (if one exists) and the load and extension at the moment of rupture.

Note 14—If it is desired to measure both modulus and failure properties (yield or break, or both), it may be necessary, in the case of highly extensible materials, to run two independent tests. The high magnification extensometer normally used to determine properties up to the yield point may not be suitable for tests involving high extensibility. If allowed to remain attached to the specimen, the extensometer could be permanently damaged. A broad-range incremental extensometer or hand-ratio technique may be needed when such materials are taken to rupture.

11. Calculation

11.1 The compression shall be made in accordance with Annex A1, unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

11.2 *Tensile Strength*—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load in newtons (or pounds-force) by the original minimum cross-sectional area of the specimen in square metres (or square inches). Express the result in pascals (or pounds-force per square inch) and report it to three significant figures as tensile strength at yield or tensile strength at break, whichever term is applicable. When a nominal yield or break load less than the maximum is present and applicable, it may be desirable also to calculate, in a similar manner, the corresponding tensile stress at yield or tensile stress at break and report it to three significant figures (see Note A2.8).

D 638 - 02a

11.3 Elongation values are valid and are reported in cases where uniformity of deformation within the specimen gage length is present. Elongation values are quantitatively relevant and appropriate for engineering design. When non-uniform deformation (such as necking) occurs within the specimen gage length, nominal strain values are reported. Nominal strain values are of qualitative utility only.

shall be calculated whenever possible. However, for materials where no proportionality is evident, the secant value shall be calculated. Draw the tangent as directed in A1.3 and Fig. A1.2, and mark off the designated strain from the yield point where the tangent line goes through zero stress. The stress to be used in the calculation is then determined by dividing the load-extension curve by the original average cross-sectional area of

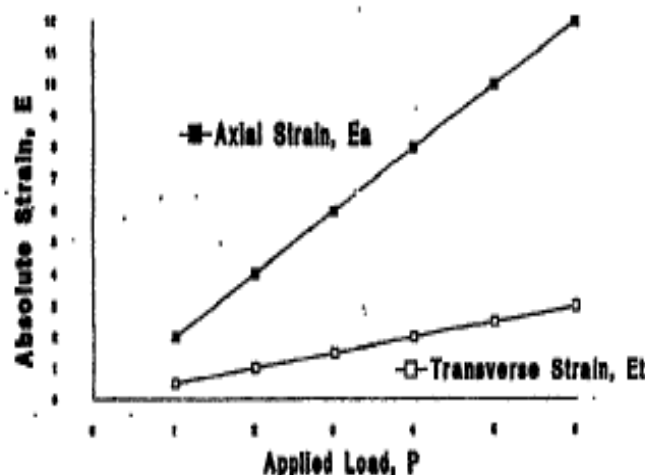


FIG. 4 Plot of Strain Versus Load for Determination of Poisson's Ratio

11.3.1 *Percent Elongation*—Percent elongation is the change in gage length relative to the original specimen gage length, expressed as a percent. Percent elongation is calculated using the apparatus described in 5.2.

11.3.1.1 *Percent Elongation at Yield*—Calculate the percent elongation at yield by reading the extension (change in gage length) at the yield point. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

11.3.1.2 *Percent Elongation at Break*—Calculate the percent elongation at break by reading the extension (change in gage length) at the point of specimen rupture. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

11.3.2 *Nominal Strain*—Nominal strain is the change in grip separation relative to the original grip separation expressed as a percent. Nominal strain is calculated using the apparatus described in 5.1.7.

11.3.2.1 *Nominal strain at break*—Calculate the nominal strain at break by reading the extension (change in grip separation) at the point of rupture. Divide that extension by the original grip separation and multiply by 100.

11.4 *Modulus of Elasticity*—Calculate the modulus of elasticity by extending the initial linear portion of the load-extension curve and dividing the difference in stress corresponding to any segment of section on this straight line by the corresponding difference in strain. All elastic modulus values shall be computed using the average initial cross-sectional area of the test specimens in the calculations. The result shall be expressed in pascals (pounds-force per square inch) and reported to three significant figures.

11.5 *Secant Modulus*—At a designated strain, this shall be calculated by dividing the corresponding stress (nominal) by the designated strain. Elastic modulus values are preferable and

the specimen.

11.6 *Poisson's Ratio*—The axial strain, ϵ_a , indicated by the axial extensometer, and the transverse strain, ϵ_t , indicated by the transverse extensometers, are plotted against the applied load, P , as shown in Fig. 4. A straight line is drawn through each set of points, and the slopes, $d\epsilon_a/dP$ and $d\epsilon_t/dP$, of these lines are determined. Poisson's ratio, μ , is then calculated as follows:

$$\mu = -(d\epsilon_t/dP)/(d\epsilon_a/dP) \quad (1)$$

where:

$d\epsilon_t$ = change in transverse strain,

$d\epsilon_a$ = change in axial strain, and

dP = change in applied load;

or

$$\mu = -(d\epsilon_t)/(d\epsilon_a) \quad (2)$$

11.6.1 The errors that may be introduced by drawing a straight line through the points can be reduced by applying the method of least squares.

11.7 For each series of tests, calculate the arithmetic mean of all values obtained and report it as the "average value" for the particular property in question.

11.8 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report it to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n-1)} \quad (3)$$

where:

s = estimated standard deviation,

X = value of single observation,

D 638 - 02a

n = number of observations, and
 \bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

11.9 See Annex A1 for information on toe compensation.

TABLE 5 Tensile Strength at Break, 10³ psi, for Eight Laboratories, Five Materials^a

	Mean	S_x	S_y	t_y	t_x
Polypropylene	2.87	1.54	1.85	4.37	4.88
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.059	0.160	0.164	0.500
Acrylo	8.59	0.492	0.751	1.27	2.19
Glass-reinforced polyester	20.8	0.235	0.437	0.859	1.34
Glass-reinforced nylon	23.5	0.277	0.596	0.794	1.88

^a Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a necked part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 6 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials^a

	Mean	S_x	S_y	t_y	t_x
Glass-reinforced polyester	8.68	0.20	2.33	0.570	0.89
Glass-reinforced nylon	8.67	0.10	2.13	0.283	0.63
Acrylo	13.2	0.05	3.08	5.80	10.3
Cellulose acetate butyrate	14.1	1.87	0.52	5.29	15.7
Polypropylene	295.0	50.9	119.0	144.0	337.0

^a Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a necked part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 7 Tensile Yield Strength, for Ten Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_x	S_y	t	R
LDPE	20	1644	82.4	84.0	148.8	179.3
LDPE	20	1894	26.1	81.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	98.9	207.8	279.7
LLDPE	20	1791	49.2	78.8	137.9	212.9
LLDPE	20	2000	55.5	87.9	185.4	246.1
LLDPE	20	1730	83.9	98.0	178.9	208.7
HDPE	2	4101	198.1	371.8	646.1	1041.9
HDPE	2	3989	178.9	479.0	492.4	1396.5

12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code numbers, form, principal dimensions, previous history, etc.;

12.1.2 Method of preparing test specimens,

12.1.3 Type of test specimen and dimensions,

12.1.4 Conditioning procedure used,

12.1.5 Atmospheric conditions in test room,

12.1.6 Number of specimens tested,

12.1.7 Speed of testing,

12.1.8 Classification of extensometers used. A description of measuring technique and calculations employed instead of a minimum Class-C extensometer system,

12.1.9 Tensile strength at yield or break, average value, and standard deviation,

12.1.10 Tensile stress at yield or break, if applicable, average value, and standard deviation,

12.1.11 Percent elongation at yield, or break, or nominal strain at break, or all three, as applicable, average value, and standard deviation,

12.1.12 Modulus of elasticity, average value, and standard deviation,

12.1.13 Date of test, and

12.1.14 Revision date of Test Method D 638.

13. Precision and Bias¹³

13.1 Precision—Tables 2-6 are based on a round-robin test conducted in 1984, involving five materials tested by eight laboratories using the Type I specimen, all of nominal 0.125-in. thickness. Each test result was based on five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

TABLE 8 Tensile Yield Elongation, for Eight Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_x	S_y	t	R
LDPE	20	17.0	1.26	3.16	3.52	6.84
LDPE	20	14.6	1.02	2.36	2.86	5.87
LLDPE	20	15.7	1.37	2.85	3.85	7.37
LLDPE	20	15.6	1.29	3.20	4.46	9.24
LLDPE	20	11.7	1.27	2.36	3.58	8.08
LLDPE	20	15.2	1.27	2.59	3.66	7.35
HDPE	2	8.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	8.88	1.59	2.75	6.48	7.71

TABLE 9 Tensile Break Strength, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_x	S_y	t	R
LDPE	20	1582	52.3	74.9	146.4	206.7
LDPE	20	1780	66.8	102.9	196.4	269.1
LLDPE	20	4379	127.1	219.0	398.8	513.3
LLDPE	20	2840	78.6	148.5	232.2	401.8
LLDPE	20	1679	34.3	47.0	95.96	131.6
LLDPE	20	2650	119.1	199.3	393.6	495.6

13.1.1 Tables 7-10 are based on a round-robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, involving eight polyethylene materials tested in ten laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material. Data from some laboratories could not be used for various reasons, and this is noted in each table.

13.1.2 In Tables 2-10, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

¹³ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR-D20-1125 for the 1984 round robin and RR-D20-1170 for the 1988 round robin.

 D 638 - 02a

TABLE 10 Tensile Break Elongation, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, In./Min.	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_w	S_B	I_r	I_R
LDPE	20	667	31.5	68.5	69.2	100.6
LDPE	20	590	61.5	69.2	172.8	246.7
LDPE	20	800	26.7	113.8	71.9	312.7
LDPE	20	64.4	8.99	11.7	18.7	32.8
LDPE	20	803	26.7	104.4	71.9	298.5
LDPE	20	782	41.6	96.7	118.6	276.6

13.1.2.1 S_w is the within-laboratory standard deviation of the average; $I_r = 2.83 S_w$. (See 13.1.2.3 for application of I_r .)

13.1.2.2 S_B is the between-laboratory standard deviation of the average; $I_R = 2.83 S_B$. (See 13.1.2.4 for application of I_R .)

13.1.2.3 *Repeatability*—In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material and condition.

13.1.2.4 *Reproducibility*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using differ-

ent equipment on different days, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material and condition. (This applies between different laboratories or between different equipment within the same laboratory.)

13.1.2.5 Any judgment in accordance with 13.1.2.3 and 13.1.2.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.1.2.6 Other formulations may give somewhat different results.

13.1.2.7 For further information on the methodology used in this section, see Practice E 691.

13.1.2.8 The precision of this test method is very dependent upon the uniformity of specimen preparation, standard practices for which are covered in other documents.

13.2 *Bias*—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

14. Keywords

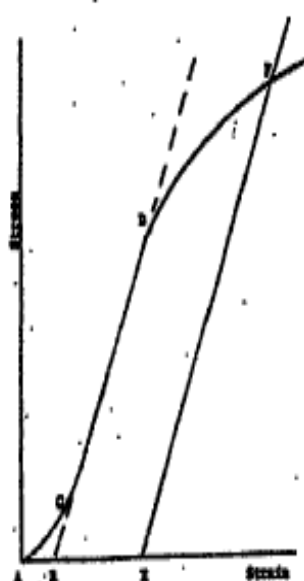
14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; tensile properties; tensile strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region, AC, that does not represent a property of the



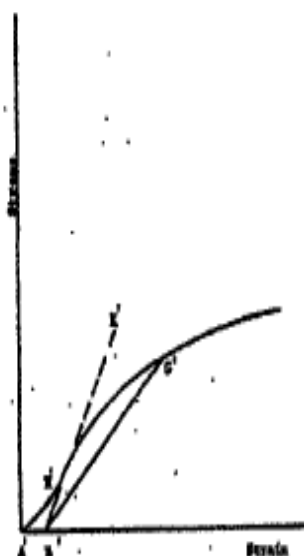
NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.1 Material with Hookean Region

material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point (H'). This is extended to intersect the strain axis at Point B', the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line B' G'). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.

D 638 - 02a



Note 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. DEFINITIONS OF TERMS AND SYMBOLS RELATING TO TENSION TESTING OF PLASTICS

A2.1 elastic limit—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any permanent strain remaining upon complete release of the stress. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

Note A2.1—Measured values of proportional limit and elastic limit vary greatly with the sensitivity and accuracy of the testing equipment, eccentricity of loading, the scale to which the stress-strain diagram is plotted, and other factors. Consequently, these values are usually replaced by yield strength.

A2.2 elongation—the increase in length produced in the gage length of the test specimen by a tensile load. It is expressed in units of length, usually inches (millimetres). (Also known as *extension*.)

Note A2.2—Elongation and strain values are valid only in cases where uniformity of specimen behavior within the gage length is proved. In the case of materials exhibiting necking phenomena, such values are only of qualitative utility after attainment of yield point. This is due to inability to ensure that necking will encompass the entire length between the gage marks prior to specimen failure.

A2.3 gage length—the original length of that portion of the specimen over which strain or change in length is determined.

A2.4 modulus of elasticity—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a material. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch). (Also known as *elastic modulus* or *Young's modulus*.)

Note A2.3—The stress-strain relations of many plastics do not conform to Hooke's law throughout the elastic range but deviate therefrom even at stresses well below the elastic limit. For such materials the slope of the tangent to the stress-strain curve at a low stress is usually taken as the modulus of elasticity. Since the existence of a true proportional limit

in plastics is debatable, the propriety of applying the term "modulus of elasticity" to describe the stiffness or rigidity of a plastic has been actively questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are very dependent on such factors as rate of straining, temperature, previous specimen history, etc. However, such a value is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and other factors are realized.

A2.5 necking—the localized reduction in cross section which may occur in a material under tensile stress.

A2.6 offset yield strength—the stress at which the strain exceeds by a specified amount (the offset) an extension of the initial proportional portion of the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

Note A2.4—This measurement is useful for materials whose stress-strain curve in the yield range is of gradual curvature. The offset yield strength can be derived from a stress-strain curve as follows (Fig. A2.1):

On the strain axis lay off OM equal to the specified offset.

Draw OA tangent to the initial straight-line portion of the stress-strain curve.

Through M draw a line MN parallel to OA and locate the intersection of MN with the stress-strain curve.

The stress at the point of intersection r is the "offset yield strength." The specified value of the offset must be stated as a percent of the original gage length in conjunction with the strength value. Example: 0.1 % offset yield strength = ... MPa (psi), or yield strength at 0.1 % offset = ... MPa (psi).

A2.7 percent elongation—the elongation of a test specimen expressed as a percent of the gage length.

A2.8 percent elongation at break and yield:

A2.8.1 percent elongation at break—the percent elongation at the moment of rupture of the test specimen.

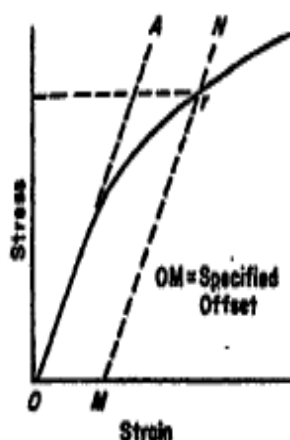


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

A2.8.2 percent elongation at yield—the percent elongation at the moment the yield point (A2.21) is attained in the test specimen.

A2.9 percent reduction of area (nominal)—the difference between the original cross-sectional area measured at the point of rupture after breaking and after all retraction has ceased, expressed as a percent of the original area.

A2.10 percent reduction of area (true)—the difference between the original cross-sectional area of the test specimen and the minimum cross-sectional area within the gage boundaries prevailing at the moment of rupture, expressed as a percentage of the original area.

A2.11 proportional limit—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

A2.12 rate of loading—the change in tensile load carried by the specimen per unit time. It is expressed in force per unit time, usually newtons (pounds-force) per minute. The initial rate of loading can be calculated from the initial slope of the load versus time diagram.

A2.13 rate of straining—the change in tensile strain per unit time. It is expressed either as strain per unit time, usually metres per metre (inches per inch) per minute, or percent elongation per unit time, usually percent elongation per minute. The initial rate of straining can be calculated from the initial slope of the tensile strain versus time diagram.

NOTE A2.5—The initial rate of straining is synonymous with the rate of crosshead movement divided by the initial distance between crossheads only in a machine with constant rate of crosshead movement and when the specimen has a uniform original cross section, does not "neck down," and does not slip in the jaws.

A2.14 rate of stressing (nominal)—the change in tensile stress (nominal) per unit time. It is expressed in force per unit area per unit time, usually megapascals (pounds-force per

square inch) per minute. The initial rate of stressing can be calculated from the initial slope of the tensile stress (nominal) versus time diagram.

NOTE A2.6—The initial rate of stressing as determined in this manner has only limited physical significance. It does, however, roughly describe the average rate at which the initial stress (nominal) carried by the test specimen is applied. It is affected by the elasticity and flow characteristics of the materials being tested. At the yield point, the rate of stressing (true) may continue to have a positive value if the cross-sectional area is decreasing.

A2.15 secant modulus—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain at any specified point on the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch), and reported together with the specified stress or strain.

NOTE A2.7—This measurement is usually employed in place of modulus of elasticity in the case of materials whose stress-strain diagram does not demonstrate proportionality of stress to strain.

A2.16 strain—the ratio of the elongation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length. It is expressed as a dimensionless ratio.

A2.16.1 nominal strain at break—the strain at the moment of rupture relative to the original grip separation.

A2.17 tensile strength (nominal)—the maximum tensile stress (nominal) sustained by the specimen during a tension test. When the maximum stress occurs at the yield point (A2.21), it shall be designated tensile strength at yield. When the maximum stress occurs at break, it shall be designated tensile strength at break.

A2.18 tensile stress (nominal)—the tensile load per unit area of minimum original cross section, within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.8—The expression of tensile properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used in practice. In the case of materials exhibiting high extensibility or necking, or both (A2.15), nominal stress calculations may not be meaningful beyond the yield point (A2.21) due to the extensive reduction in cross-sectional area that occurs. Under some circumstances it may be desirable to express the tensile properties per unit of minimum prevailing cross section. These properties are called true tensile properties (that is, true tensile stress, etc.).

A2.19 tensile stress-strain curve—a diagram in which values of tensile stress are plotted as ordinates against corresponding values of tensile strain as abscissas.

A2.20 true strain (see Fig. A2.2) is defined by the following equation for ϵ_t :

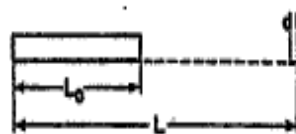


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation



$$\epsilon_T = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln L/L_0 \quad (A2.1)$$

where:

dL = increment of elongation when the distance between the gage marks is L ,

L_0 = original distance between gage marks, and

L = distance between gage marks at any time.

A2.21 yield point—the first point on the stress-strain curve at which an increase in strain occurs without an increase in stress (Fig. A2.2).

Note A2.9—Only materials whose stress-strain curves exhibit a point of zero slope may be considered as having a yield point.

Note A2.10—Some materials exhibit a distinct "break" or discontinuity in the stress-strain curve in the elastic region. This break is not a yield point by definition. However, this point may prove useful for material characterization in some cases.

A2.22 yield strength—the stress at which a material exhibits a specified limiting deviation from the proportionality of stress to strain. Unless otherwise specified, this stress will be the stress at the yield point and when expressed in relation to the tensile strength shall be designated either tensile strength at yield or tensile stress at yield as required in A2.17 (Fig. A2.3). (See *offset yield strength*.)

A2.23 Symbols—The following symbols may be used for the above terms:

Symbol	Term
W	Load
ΔW	Increment of load
L	Distance between gage marks at any time
L_0	Original distance between gage marks
L_r	Distance between gage marks at instant of rupture
ΔL	Increment of distance between gage marks = elongation
A	Minimum cross-sectional area at any time
A_0	Original cross-sectional area
ΔA	Increment of cross-sectional area
A_r	Cross-sectional area at point of rupture measured after breaking specimen
A_T	Cross-sectional area at point of rupture, measured at the instant of rupture
t	Time
Δt	Increment of time
σ	Tensile stress
$\Delta \sigma$	Increment of stress
σ_T	True tensile stress
σ_B	Tensile strength at break (nominal)
σ_{UT}	Tensile strength at break (true)
ϵ	Strain
$\Delta \epsilon$	Increment of strain
ϵ_T	Total strain, at break
ϵ_T	True strain
$\%EI$	Percentage elongation
Y.P.	Yield point
E	Modulus of elasticity

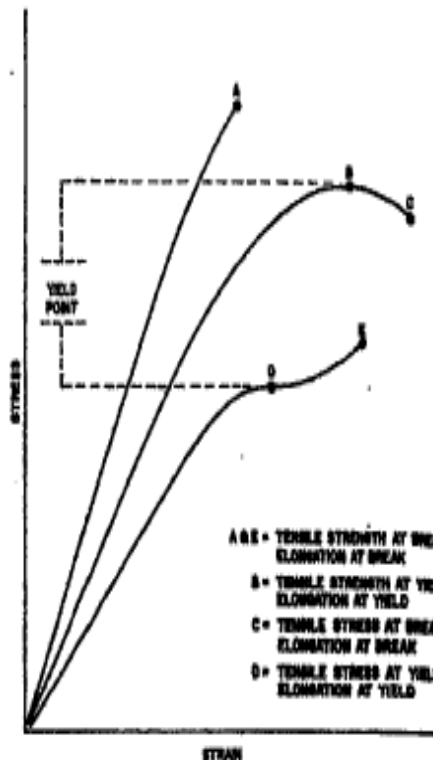


FIG. A2.3 Tensile Designations

- A B S = TENSILE STRENGTH AT BREAK ELONGATION AT BREAK
- B = TENSILE STRENGTH AT YIELD ELONGATION AT YIELD
- C = TENSILE STRESS AT BREAK ELONGATION AT BREAK
- D = TENSILE STRESS AT YIELD ELONGATION AT YIELD

A2.24 Relations between these various terms may be defined as follows:

$$\begin{aligned} \sigma &= W/A \\ \sigma_T &= W/A_T \\ \sigma_B &= W/A_0 \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \sigma_{UT} &= W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \epsilon &= \Delta L/L_0 = (L - L_0)/L_0 \\ \epsilon_T &= \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln L/L_0 \\ \%EI &= \left[\frac{(L - L_0)}{L_0} \right] \times 100 = \epsilon \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{Percent reduction of area (nominal)} = \left[\frac{(A_0 - A_r)}{A_0} \right] \times 100$$

$$\text{Percent reduction of area (true)} = \left[\frac{(A_0 - A_T)}{A_0} \right] \times 100$$

$$\text{Rate of loading} = \Delta W/\Delta t$$

$$\text{Rate of stressing (nominal)} = \Delta \sigma/\Delta t = (\Delta W/A_0)/\Delta t$$

$$\text{Rate of straining} = \Delta \epsilon/\Delta t = (\Delta L/L_0)/\Delta t$$

For the case where the volume of the test specimen does not change during the test, the following three relations hold:

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon) = \sigma L/L_0 \quad (A2.2)$$

$$\sigma_{UT} = \sigma_B(1 + \epsilon_B) = \sigma_B L_0/L_r$$

$$A = A_0/(1 + \epsilon)$$

Table 11. Influence of influencing parameters on impact strength

Parameter "T"	Settings	Slope trend
Layer thickness	O=HX	Decreasing
	O=VX	Decreasing
	Pc=30 min	Decreasing
	Pc=60 min	Decreasing
Orientation	Lt=0.100 mm	Increasing
	Lt=0.15 mm	Increasing
	Pc=30 min	Increasing
	Pc=60 min	Increasing
Post-curing time	Lt=0.100 mm	Increasing
	Lt=0.15 mm	Increasing
	O=HX	Increasing
	O=VX	Increasing

Table 12. Impact strength of the OA's trials

"T"	E_f (J)	E_f (J/m)
1	0.215	21.50
2	0.210	21.00
3	0.215	21.50
4	0.183	18.30
5	0.198	19.80
6	0.198	19.80
7	0.198	19.80
8	0.195	19.50
9	0.180	18.00

Table 13. Influence of influencing parameters on flexural strength

Parameter "T"	Level	"T"	IS	\bar{y}	Obs
Lt	1	1	21.5	26.65	25.58
		2	21.0	26.44	
		3	21.5	26.65	
		4	18.3	25.25	
	2	5	19.3	25.71	
		6	19.3	25.71	
		7	19.8	25.93	
		8	19.5	25.80	
		9	18.0	25.11	
O	1	1	21.5	26.65	25.94
		2	21.0	26.44	
		3	21.5	26.65	
		4	18.3	25.25	
	2	5	19.3	25.71	
		6	19.3	25.71	
		7	19.8	25.93	
		8	19.5	25.80	
		9	18.0	25.11	
Pc	1	1	21.5	26.65	26.05
		2	21.0	26.44	
		3	21.5	26.65	
		4	18.3	25.25	
	2	5	19.3	25.71	
		6	19.3	25.71	
		7	19.8	25.93	
		8	19.5	25.80	
		9	18.0	25.11	

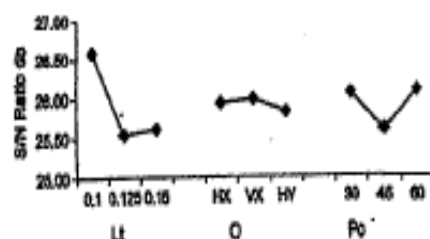


Fig. 17 - S/N ratio graph for impact strength analysis.

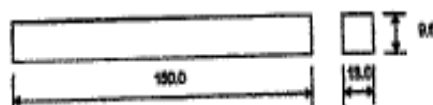


Fig. 18 - Flexural test specimen as per ASTM D790.

5. Experimental analysis for flexural strength (FS)

The analysis carried out for flexural strength (FS) is presented in this section. The procedure is identical to the one in Section 3. The influencing parameters to FS are: Lt, Pc and O. Two extreme values possible for experimentation are chosen as levels for screening experiment and are as stated in Table 2.

Eight flexural resistance test specimens using SL 8530 resin in SLA 5000 machine are constructed as per ASTM standard-ASTM D790. The dimensional details of the test specimen are given in Fig. 18. Universal testing machine is used to test the specimen and the load at which the fatigue occurs is noted. The specimen is subjected to point load at the midway between the supports, which are placed at 150 mm apart. The flexural strength (FS) at fracture (δ) is calculated using the following Eq. (9a):

$$\delta = \frac{3WL}{2bd^2} \quad (9a)$$

where W is load in Newton, L is length of the flexural test specimen in mm, b is breadth of the flexural test specimen in mm, d is depth of the flexural test specimen in mm.

Table 15 shows the eight experimental trials of the screening experiment and their observed flexural strength.

The influence of Lt, O and Pc on FS is illustrated in Figs. 19-21, respectively. From these figures it is observed that all the parameters impose a non-linearity effect. In order to accommodate this non-linearity, three levels are set for each parameter as shown in Table 4.

The interaction effect between the parameters are analysed with the plots given in Figs. 22(a-d), 23(a-d) and 24(a-d) and that there found exist no interaction effect. The slope trends are given in Table 16.

Hence, L9 orthogonal array (which has nine experimental runs) is chosen based on the discussions as stated in Section 3.3. The selected L9 orthogonal array is shown in Table 6.

After finalising the parameters, levels and OA the main experiment has been conducted as per the setting available in the OA depicted in Table 6. Table 17 shows the flexural strength

Table 11. ANOVA results for impact strength.

Parameter 'Y'	Sum of Squares 'SS _y '	Degrees of freedom 'Dof'	Mean sum of squares 'MS _y '	F _{critical}	F _(0.025,22) tabulated	Percentage of contribution (P _y)
Lt	10.95	2	5.47	41.42*		80.84
O	0.18	2	0.09	0.68	39.00	1.30
Pc	2.18	2	1.09	8.26		16.09
Error	0.26	2	0.13			1.95
Total	13.56	8				

* Significant at 97.5% confidence level (F_{critical} > F_{tabulated}).

'Y'	Parameter 'X'			b _y (mm)	d _y (mm)	W _y ln (N)	FS _y (N/mm ²)
	Lt (mm)	O	Pc (min)				
1	0.100	HX	30	13.21	9.73	582	104.70
2	0.100	HX	60	13.23	9.71	570	102.82
3	0.100	VX	30	13.17	9.74	577	103.90
4	0.100	VX	60	13.17	9.75	550	98.84
5	0.150	HX	30	13.25	9.75	583	104.50
6	0.150	HX	60	13.11	9.80	559	99.89
7	0.150	VX	30	13.15	9.75	558	100.43
8	0.150	VX	60	13.13	9.81	525	93.13

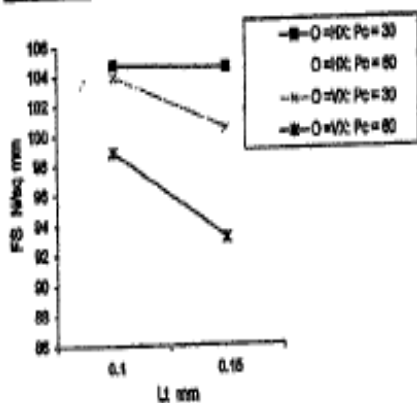


Fig. 19 - Layer thickness vs. flexural strength (O and Pc are kept as constant).

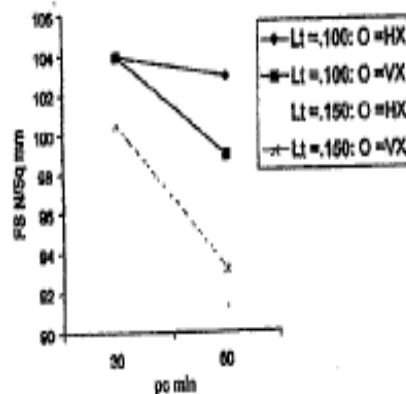


Fig. 21 - Post-curing time vs. flexural strength (Lt and O are kept as constant).

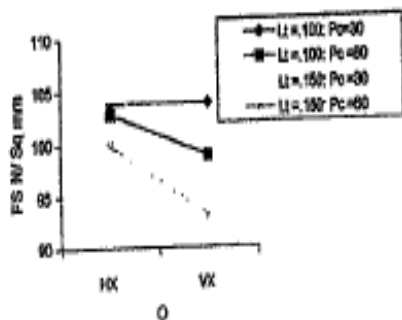


Fig. 20 - Orientation vs. flexural strength (Lt and Pc are kept as constant).

Table 12. Slope trend for each parameter 'X' with respect to 'Y'.

Parameter 'Y'	Settings	Slope trend
Layer thickness	O=HX	Decreasing
	O=VX	Decreasing
	Pc=30 min	Decreasing
	Pc=60 min	Decreasing
Orientation	Lt=0.100 mm	Decreasing
	Lt=0.15 mm	Decreasing
	Pc=30 min	Decreasing
	Pc=60 min	Decreasing
Post-curing time	Lt=0.100 mm	Decreasing
	Lt=0.15 mm	Decreasing
	O=HX	Decreasing
	O=VX	Decreasing

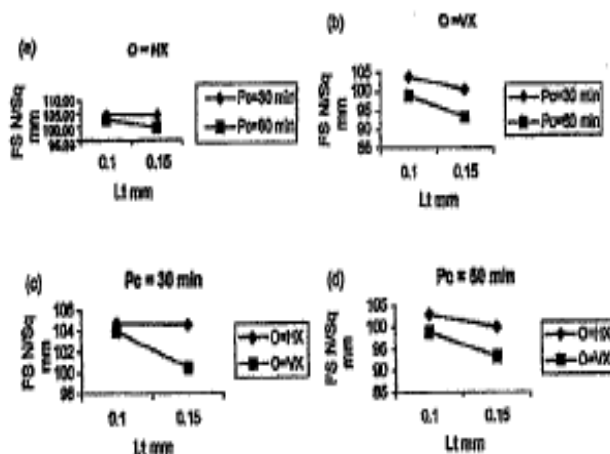


Fig. 22 - Lt vs. FS under different settings of O and Pc.

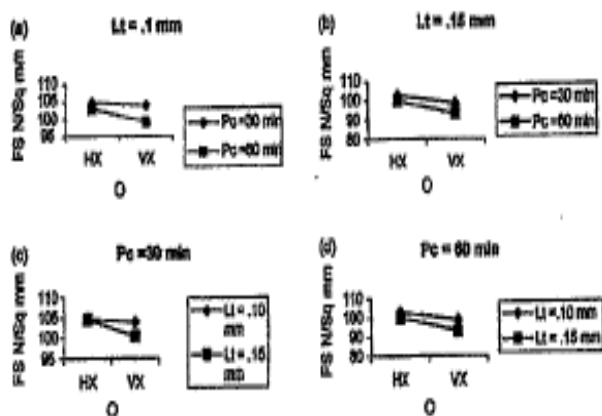


Fig. 23 - O vs. FS under different settings of Lt and Pc.

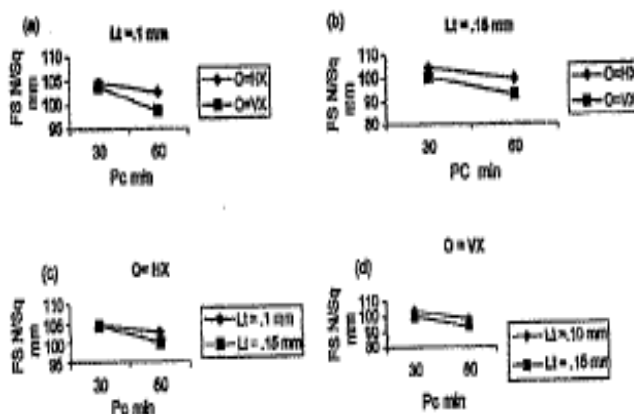


Fig. 24 - Pc vs. FS under different settings of Lt and O.

Table 17. Estimated flexural strength of test parts.

η^*	b_j (mm)	D_j (mm)	W_j (N)	FS_j (N/mm ²)
1	13.24	9.74	580	103.90
2	13.20	9.72	570	102.84
3	13.16	9.76	590	105.90
4	13.14	9.78	550	98.87
5	13.16	9.74	580	104.53
6	13.26	9.84	570	99.89
7	13.12	9.76	480	86.42
8	13.16	9.74	500	90.11
9	13.14	9.84	490	86.65

Table 18. S/N ratio for each level in each factor and the graph shown in Fig. 25 shows the variation of S/N ratio for all the controllable factors.

Parameter η^*	Level	η^*	FS	η	η_{wc}	
Lt	1	1	103.90	40.33	40.36	
		2	102.84	40.24		
		3	105.90	40.50		
	2	4	98.87	39.90		
		5	104.53	40.38		
		6	99.89	39.99		
	3	7	86.42	38.73		38.95
		8	90.11	39.10		
		9	86.65	38.76		
O	1	1	103.90	40.33	39.66	
		4	98.87	39.90		
		7	86.42	38.73		
	2	2	102.84	40.24		
		5	104.53	40.38		
		8	90.11	39.10		
	3	3	105.90	40.50		
		6	99.89	39.99		
		9	86.65	38.76		
Pc	1	1	103.90	40.33	39.81	
		6	99.89	39.99		
		8	90.11	39.10		
	2	2	102.84	40.24		
		4	98.87	39.90		
		9	86.65	38.76		
	3	3	105.90	40.50		
		5	104.53	40.38		
		7	86.42	38.73		

(FS) of all CA settings. Table 18 shows S/N ratio for each level in each factor and the graph shown in Fig. 25 shows the variation of S/N ratio for all the controllable factors.

The level having the higher S/N ratio is selected as the optimum level contributing higher flexural strength to the part. They are:

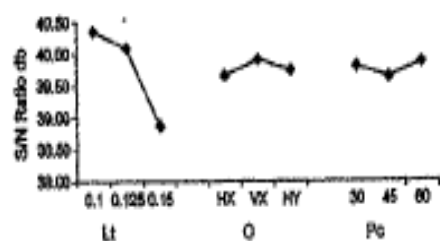


Fig. 25 - S/N ratio graph for flexural strength analysis.

Layer thickness : 0.1 mm (Level 1, S/N: 40.36),
Orientation : VX (Level 2, S/N: 39.91) and
Post-curing time : 60 min (Level 3, S/N: 39.87).

Table 19 shows the percentage of contribution of each factor for flexural strength along with the estimated ANOVA parameters. From the ANOVA table the significance of each parameter is identified.

6. Establishment of process model (regression equation)

ANOVA reveals that layer thickness, orientation and post-curing time are contributing significantly to mechanical properties such as tensile, impact and flexural strength. Establishment of a process model (empirical relationship/regression model) for any mechanical property (tensile/impact/flexural strength) as a function of process parameters (layer thickness, orientation and post-curing time) would be useful to predict how much strength can be achieved for a given set of the process parameters, thus providing prior knowledge of strength before actually making a SL part. This regression model is able to show the dependency of strength on process parameters, which is a very useful information for rapid tool designers as well as RP machine users.

Montgomery (2001) suggests that orthogonal polynomial is a useful method for developing process model (regression equation) with orthogonal array data. A quadratic polynomial model (Eq. (10)) is proposed to establish process model between response variable of strength and process parameters:

$$RV = A_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_{1i} P_1(i) + \beta_{2i} P_2(i)) + \epsilon \quad (10)$$

RV: response variable (tensile, impact, flexural strength of test specimens); i : process parameter identifier; A_0 : constant coefficient = $\sum_{j=1}^N y_j / (N)$; β_{1i} : linear coefficient for the i th parameter = $\sum_{j=1}^N (y_j^i) / \sum_{j=1}^N (x_j^i)^2$; β_{2i} : non-linear coefficient for the i th parameter = $\sum_{j=1}^N (y_j^i) / \sum_{j=1}^N (x_j^i)^3$; C_1^i : orthogonal contrast coefficient of linear term for i th parameter in j th experiment; C_2^i : orthogonal contrast coefficient of non-linear term for i th parameter in j th experiment; ϵ : error component; $P_1(i)$: 1st order orthogonal polynomials of parameter $i = \lambda_1 [(j - \bar{m}_i) / \Delta_i]$; $P_2(i)$: 2nd order orthogonal polynomials of parameter $i = \lambda_2 [(j - \bar{m}_i)^2 / \Delta_i^2] - [(L_i^2 - 1) / 12 \Delta_i^2]$; λ_1 : constant polynomial for 1st order orthogonal polynomial for parameter i ($\lambda_1 = 1$ when number of parameters are three); λ_2 : constant polynomial for 2nd order orthogonal polynomial for parameter i ($\lambda_2 = 3$ when number of parameters are three); \bar{m}_i : mean value of the levels of parameter i ; Δ_i : spacing between the value of levels for parameter i ; L_i : total number of levels for parameter i .

6.1. Empirical relation for tensile strength vs. process parameters

Layer thickness (Lt), orientation (O) and post-curing time (Pc) influencing the tensile strength (TS), which is the response

Parameter γ	Sum of squares 'SS γ '	Degrees of freedom 'DOF γ '	Mean sum of squares 'MSS γ '	F _{statistic}	F _{critical(0.05)} tabulated	Percentage of contribution (P _{stat})
Lt	460.28	2	230.14	60.80*		81.58
O	15.68	2	7.84	2.04		2.96
Pc	12.39	2	6.19	1.64	20.00	2.02
Error	7.56	2	3.78			1.54
Total	495.91	8				

* Significant at 97.5% confidence level ($F_{statistic} > F_{tabulated}$).

variable. The regression equation for tensile strength is written as

$$\begin{aligned}
 TS = & \beta_{21} \times \lambda_2 \left[\left(\frac{(Lt - \bar{m}_{Lt})^2}{d_{Lt}^2} \right) - \left(\frac{L_{t0}^2 - 1}{12} \right) \right] \\
 & + \beta_{11} \times \lambda_1 \left[\frac{Lt - \bar{m}_{Lt}}{d_{Lt}} \right] \\
 & + \beta_{20} \times \lambda_2 \left[\left(\frac{(O - \bar{m}_O)^2}{d_O^2} \right) - \left(\frac{O_0^2 - 1}{12} \right) \right] \\
 & + \beta_{10} \times \lambda_1 \left[\frac{O - \bar{m}_O}{d_O} \right] \\
 & + \beta_{2c} \times \lambda_2 \left[\left(\frac{(Pc - \bar{m}_{Pc})^2}{d_{Pc}^2} \right) - \left(\frac{P_{c0}^2 - 1}{12} \right) \right] \\
 & + \beta_{1c} \times \lambda_1 \left[\frac{Pc - \bar{m}_{Pc}}{d_{Pc}} \right] + \beta_0 \quad (11)
 \end{aligned}$$

Among the process parameters, layer thickness, and post-curing are quantitative measures with equal spacing and orientation is a qualitative measure. Hence, coded value of orthogonal array is used. The lower, middle and higher value of the process parameters are coded as -1, 0 and 1 respectively. Hence, the mean value of the levels of process parameters (\bar{m}) becomes zero and the spacing between the levels of the process parameters (d) become one. For three parameters study

Levels	C_1^j	C_2^j
Lower	-1	1
Medium	0	-2
Higher	1	1

λ_1 equal to 1 and λ_2 equal to 3. Eq. (11) thus becomes:

$$\begin{aligned}
 TS = & \beta_{21} \times 3 \times \left[Lt^2 - \left(\frac{L_{t0}^2 - 1}{12} \right) \right] \\
 & + \beta_{11} \times 1 \times [Lt] + \beta_{20} \times 3 \times \left[O^2 - \left(\frac{O_0^2 - 1}{12} \right) \right] \\
 & + \beta_{10} \times 1 \times [O] + \beta_{2c} \times 3 \times \left[Pc^2 - \left(\frac{P_{c0}^2 - 1}{12} \right) \right] \\
 & + \beta_{1c} \times 1 \times [Pc] + \beta_0 \quad (12)
 \end{aligned}$$

Table 20 provides the values of orthogonal contrast coefficient for linear (C_1^j) and non-linear (C_2^j) term.

Table 21 provides the calculation details for obtaining the constant, linear and non-linear coefficients for all the three parameters.

The values are $\beta_{21} = -1.01/6 = -0.1683$; $\beta_{10} = 3.8/6 = 0.6333$;
 $\beta_{1c} = 0.45/5 = 0.0790$; $\beta_{2c} = 18.21/18 = 1.0116$;

j	TS _j	Coded value of the levels			Orthogonal contrast for linear term C_1^j			Orthogonal contrast for non-linear term C_2^j			$(A_1)_{Lt}$	$(A_2)_{Lt}$	$(A_3)_{O}$	$(A_4)_{O}$	$(A_5)_{Pc}$	$(A_6)_{Pc}$
		Lt	O	Pc	Lt	O	Pc	Lt	O	Pc						
1	59.28	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-59.28	59.28	-59.28	59.28	-59.28	59.28
2	59.74	-1	0	0	-1	0	0	1	-2	-2	-59.74	59.74	0	-119.48	0	-119.48
3	59.42	-1	1	1	-1	1	1	1	1	1	-59.42	59.42	59.42	59.42	59.42	59.42
4	53.68	0	-1	0	0	-1	0	-2	1	-2	0	-106.16	-53.68	53.68	0	-106.16
5	59.05	0	0	1	0	0	1	-2	-2	1	0	-119.06	0	-119.06	59.05	59.05
6	54.82	0	1	-1	0	1	-1	-2	1	1	0	-113.64	56.82	56.82	-56.82	56.82
7	60.57	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	59.57	59.57	-59.57	59.57	59.57	59.57
8	60.37	1	0	-1	1	0	-1	1	-2	1	60.37	60.37	0	-120.74	-60.37	60.37
9	58.59	1	1	0	1	1	0	1	1	-2	58.59	58.59	58.59	58.59	0	-117.18

Table 21 Comparison of experimental and regression values of tensile strength at various levels of settings

Settings	Lt (mm)	O	Pc (min)	Experiment value (EV)	Regression value (RV)	Percentage of deviation ((EV - RV)/EV) × 100
GA settings	0.1	HX	30	59.58	58.71	1.12
	0.1	VX	45	59.74	59.70	0.07
	0.1	HY	60	59.42	60.19	1.18
	0.125	HX	45	59.08	59.79	1.34
	0.125	VX	60	59.03	58.96	1.13
	0.125	HY	30	56.82	56.78	0.08
	0.15	HX	60	58.57	58.53	0.07
	0.15	VX	30	60.37	61.08	1.18
	0.15	HY	45	58.59	57.92	1.14
Average percentage of deviation						0.8134
Non-GA settings	0.1	VX	60	61.57	61.23	0.54
	0.125	VX	45	56.49	55.97	0.94
	0.15	HY	60	59.79	59.21	0.99
Average percentage of deviation						0.8294

$$\beta_{20} = -12.42/18 = -0.6900; \quad \beta_{21c} = 10.77/18 = 0.5983;$$

$$\beta_0 = 525/9 = 58.3333.$$

Substituting the above parameters in Eq. (12), the process model for tensile strength (TS) is derived and given in Eq. (13).

$$TS = 3.0548Lt^2 - 0.1083Lt - 2.0700O^2 + 0.6333O + 1.7950Pc^2 + 0.0750Pc + 56.4935 \quad (13)$$

6.2. Empirical relation for impact strength vs. process parameters

Similarly the process model established between IS and influencing parameters (Lt, O and Pc) is given in Eq. (14).

$$IS = 1.2917Lt^2 - 1.1250Lt - 0.2063O^2 - 0.1250O + 1.0417Pc^2 + 0.0417Pc + 18.3611 \quad (14)$$

6.3. Empirical relation for flexural strength vs. process parameters

In the similar manner the process model between FS and influencing parameters (Lt, O and Pc) is established and is given in Eq. (15).

$$FS = -5.1267Lt^2 - 8.2433Lt - 2.2217O^2 + 0.5417O + 2.3383Pc^2 + 0.4917Pc + 101.0189 \quad (15)$$

7. Performance evaluation

The final step in the process parameter design is to validate the regression equation with the set of process parameters. Table 22 shows the comparison between the experiment value and regression value of the tensile strength at various levels of

Settings	Lt (mm)	O	Pc (min)	Experiment value (EV)	Regression value (RV)	Percentage of deviation ((EV - RV)/EV) × 100
GA settings	0.100	HX	30	21.50	21.69	0.90
	0.100	VX	45	21.00	20.78	1.06
	0.100	HY	60	21.50	21.53	0.13
	0.125	HX	45	18.25	18.28	0.15
	0.125	VX	60	19.25	19.44	1.01
	0.125	HY	30	19.25	19.08	1.15
	0.150	HX	60	19.75	19.58	1.13
	0.150	VX	30	19.50	19.33	0.14
	0.150	HY	45	18.00	18.19	1.08
Average percentage of deviation						0.7587
Non-GA settings	0.100	VX	60	21.06	21.05	0.06
	0.125	VX	45	18.36	18.50	0.75
	0.150	HY	60	19.28	19.27	0.04
Average percentage of deviation						0.5687

Settings	Lt (mm)	O	Pc (min)	Experiment value (EV)	Regression value (RV)	Percentage of deviation $\{(EV - RV)/EV\} \times 100$
OA settings	0.1	HX	30	103.90	103.22	0.66
	0.1	VX	45	102.94	104.14	1.56
	0.1	HY	60	105.90	105.29	0.58
	0.125	HX	45	98.27	98.26	0.02
	0.125	VX	60	104.53	100.85	3.65
	0.125	HY	30	99.89	101.19	1.30
	0.15	HX	60	85.42	87.72	1.50
	0.15	VX	30	90.11	86.50	3.68
	0.15	HY	45	86.65	85.97	0.79
Average percentage of deviation						0.8925
Non-OA settings	0.1	VX	60	106.97	105.06	0.83
	0.125	VX	45	101.02	100.34	0.68
	0.15	HY	60	88.80	83.23	6.48
Average percentage of deviation						0.6965

process parameters (nine OA settings and three non-OA settings). The average percentage deviation of tensile strength (obtained from regression equation and from the experimental value) is 0.8157% (in OA settings) and 0.2234% (in non-OA settings).

Table 23 shows the comparison between the experiment value and regression value of the impact strength at various levels of process parameters (nine OA settings and three non-OA settings). The average percentage deviation of impact strength (obtained from regression equation and from the experimental value) is 0.7507% (in OA settings) and 0.5887% (in non-OA settings).

Table 24 shows the comparison between the experiment value and regression value of the flexural strength at various levels of process parameters (nine OA settings and three non-OA settings). The average percentage deviation of flexural strength (obtained from regression equation and from the experimental value) is 0.8925% (in OA settings) and 0.6965% (in non-OA settings).

8. Conclusions and scope for future research

In this paper, an attempt has been made to analyse the process parameters that influence the strength aspect of SL parts in order to be useful for rapid tooling applications. Conclusions of the analysis are as follows:

- The parameters Lt, Pc and O influence much on part strength of SL products.
- Of the three process parameters Lt has the major contributing factor on 'part strength'.
- The optimal combinations of process parameters are 0.1 mm layer thickness, 60 min post-curing time and vertical orientation (VX) for tensile, impact and flexural strengths of SL part.

Besides, the process model (regression equations) between part strength characteristics (tensile/impact/

flexural) and most influencing parameters (layer thickness/orientation/post-curing time) has been established for stereolithography process. The process model obtained by the empirical relation can predict how much strength can be achieved for a given set of the process parameters, thus providing prior knowledge of part strength before actually making a SL part. The average percentage of deviation of the regression values is less than 1% in all part strength characteristics. Although factorial design is a well-known technique for analysing the effect of variables over an objective, the uncertainty in measurements of the variables influence the results and subsequently the analysis (Luis Perez, 2002). In order to guarantee precision in any result, it is necessary to consider the uncertainty in measurements. Hence the future work should include uncertainty of the observed response so as to get accurate prediction on the results. In addition to this, work can be extended for other materials and checked for generalization. The regression equation may further be refined using non-classical optimization approaches such as genetic algorithm, simulated annealing and neural network.

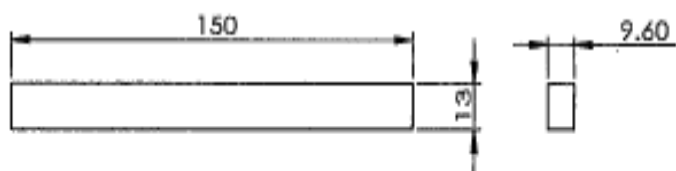
Acknowledgements

The authors thank the Management of Thiagarajar college of Engineering and the Director, Gas Turbine Research Establishment (GTRE), Bangalore for providing the necessary facilities to carry out this work. The authors thank the reviewers for their valuable suggestions and guidelines for improving the content of the paper.

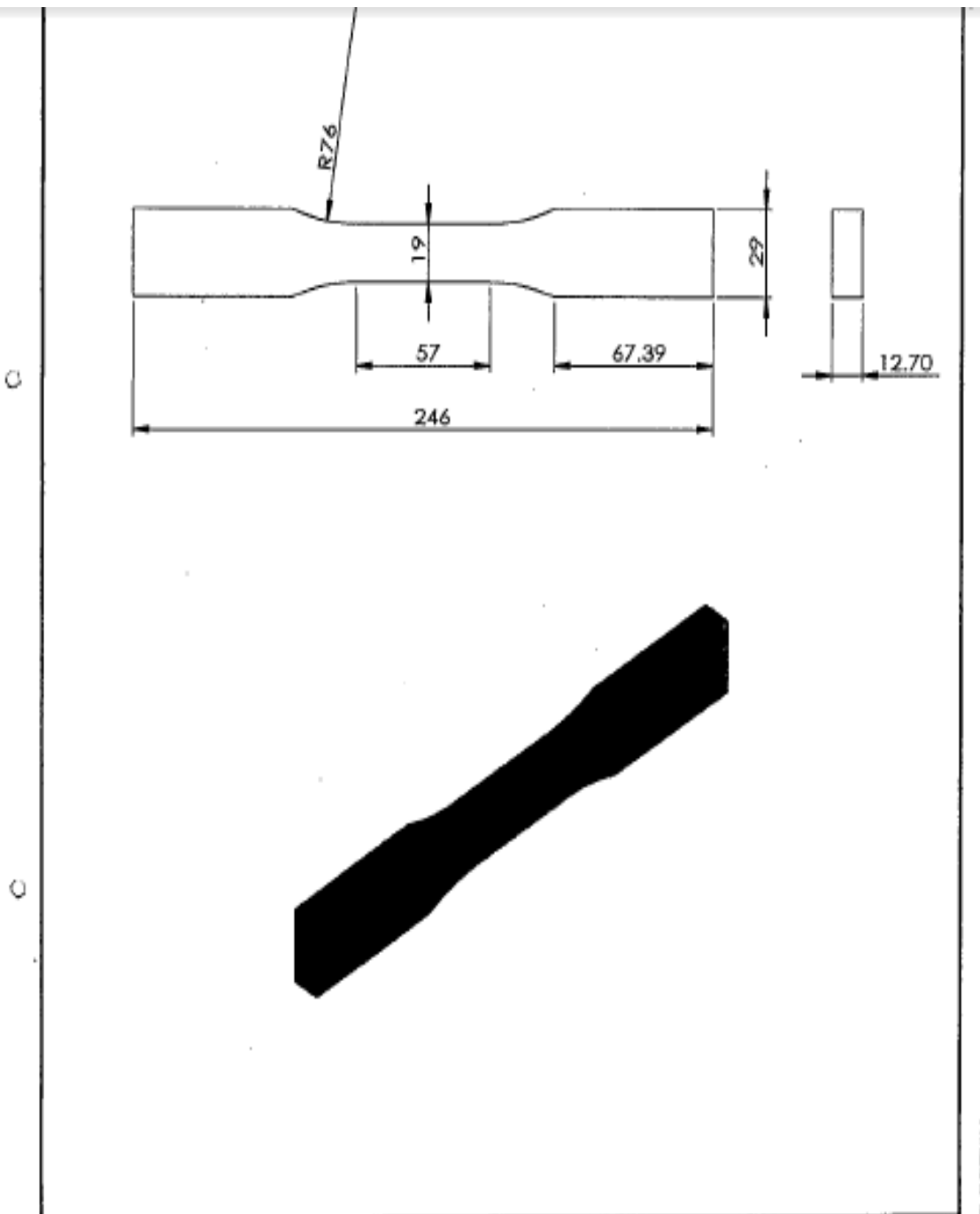
REFERENCES

- Annual book of ASTM standards, 2001. Section 8, Vol. 08.02 (II): *Elastics D3222-D5083* (ASTM 08 02 II).
- Chockalingam, K., Jawahar, N., Ramanathan, K.N., Banerjee, R.S., 2006. Optimization of stereolithography process parameters for part strength using design of experiments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29, 79-88.

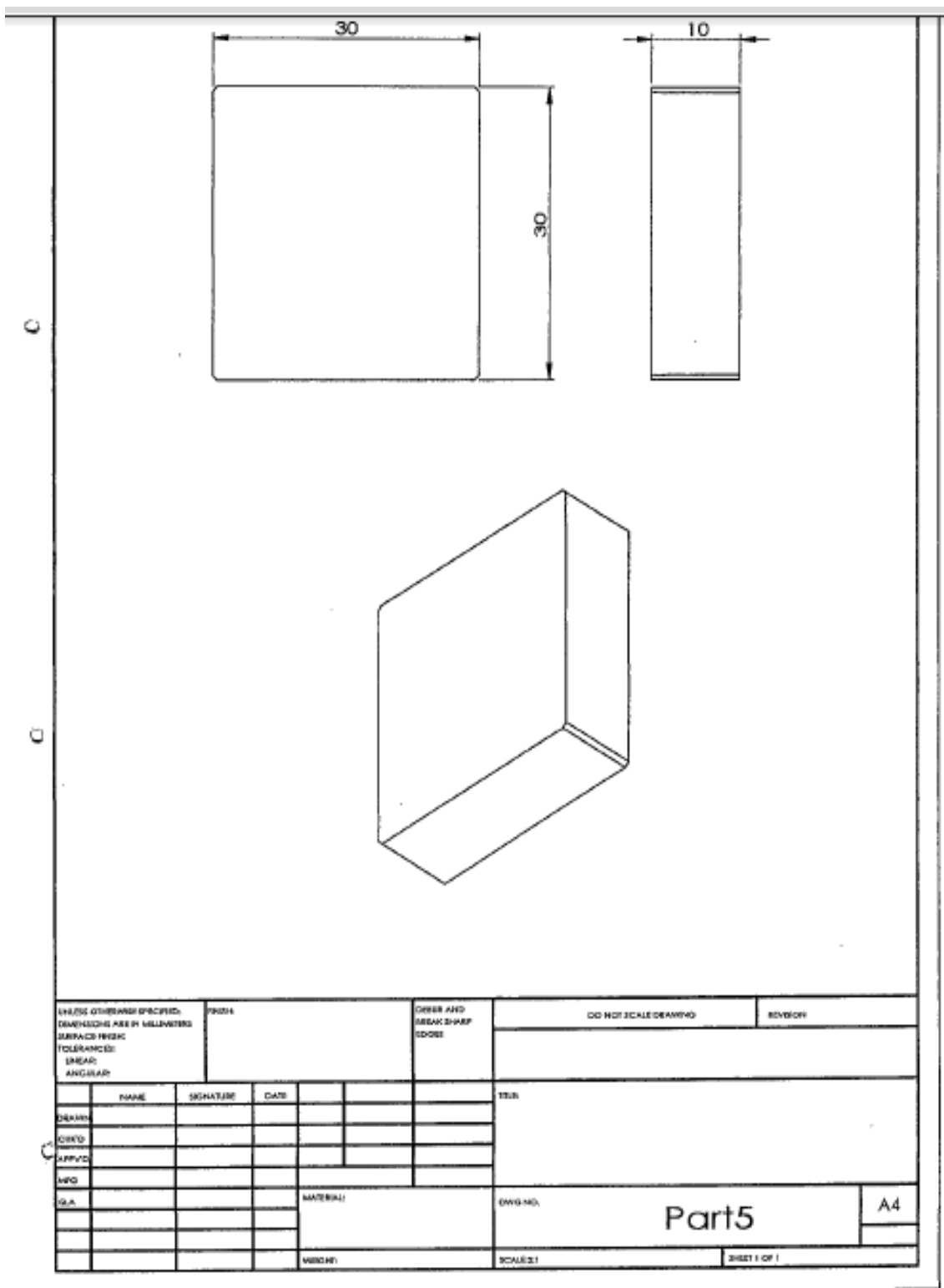
- Geiger, M., Ozel, T., 2001. Development of rapid tooling for injection molding with metal filled stereolithography (SLA) cavity inserts. In: *Proceedings of the 2nd international conference on design and production of dies and molds*, pp. 109-123.
- Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Haseen, H.H., 2004. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 145, 84-92.
- Harris, R., Hopkins, N., Newlyn, H., Hague, R., Dickens, P., 2002. Layer thickness and draft angle selection for stereolithography injection mould tooling. *International Journal of Production Research* 40 (2), 719-729.
- Hefin, Z., Eiju, A., Graeme, K., 2000. An application of experimental design for process optimization. *Rapid Prototyping Journal* 2 (2), 78-83.
- Jacobs, F.P., 1992. *Rapid prototyping and manufacturing: Fundamentals of stereolithography*, 1st ed. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.
- Kim, S.J., Kim, K.S., Ho, J., 2003. Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology* 136, 202-208.
- Luis Perez, C.J., 2002. Surface roughness modelling considering uncertainty in measurement. *International Journal of Production Research* 40 (10), 2245-2258.
- Montgomery, D.C., 2001. *Design and analysis of experiments*, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Omachi, S.O., Hon, K.K., 1998. Application of Taguchi method and new style for quality improvement on stereolithography. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers* 212 (Part B), 461-472.
- Pang, T.H., Thomas, H., 1994. Stereolithography epoxy resins SL 5170 and SL 5180: Accuracy, dimensional stability and mechanical properties. In: *Solid free form fabrication proceedings*, pp. 204-224.
- Pham, D.T., Driess, S.S., 2001. *Rapid manufacturing*, 1st ed. Springer Verlag, London.
- Rahmata, S., Dickens, P., 1997. Stereolithography for injection mould tooling. *Rapid Prototyping Journal* 1 (2), 53-60.
- Ross, R.J., 1996. *Taguchi techniques for quality engineering*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Schub, D.A., Chu, K., Montgomery, D.C., 1997. Optimizing stereolithography throughput. *Journal of Manufacturing System* 16, 290-303.
- Syros, G.P., 2003. Die casting process optimization using Taguchi methods. *Journal of Materials Processing Technology* 135, 68-74.
- Turun, N., Cogan, C., Gul, T. (2004). A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology* 152, 316-322.
- Yang, W.H., Teng, Y.S., 1998. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology* 84, 122-129.



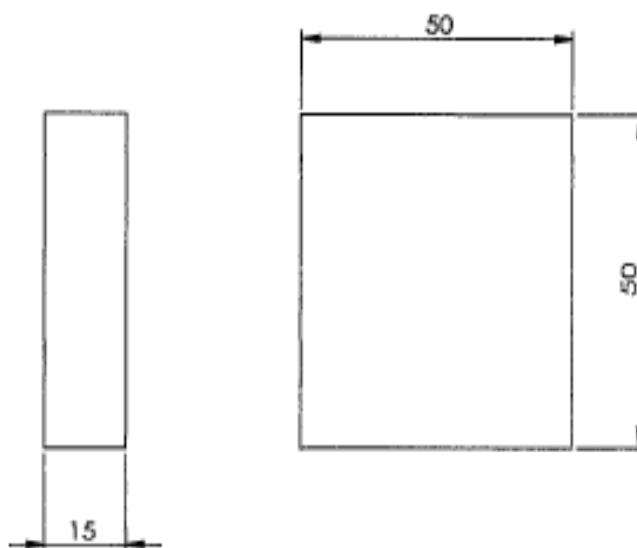
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR ANGULAR		FINISH:		CORNER AND BCHAN RAKPP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE	
DRAWN							
CHECKED							
APPROVED							
DATE							
		MATERIAL:		QMS NO.		Part1 ASTM D790 A4	
		REVISION:		SCALE:		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR ANGULAR		FINISH		COLOR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE			
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
QA				MATERIAL		DWG NO.		A4	
						Part4			
				WEIGHT		SCALE(S)		PAGE 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: HORIZONTAL ANGULAR		UNIT		DIMS AND BREAKS/REP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TUB			
CHKD									
APP'D									
MFD									
G.A.				MATERIAL:		DWG NO.		Part5	
								A4	
				VISION:		SCALE:1		SHEET 1 OF 1	



FINISH: OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: UNLESS INDICATED				FINISH:		EDGE AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
										TITLE	
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
DATE				MATERIAL		DRAWING NO.		8900		A4	
				WEIGHT		SCALE				SHEET 1 OF 1	