

การรีไซเคิลเส้นใยไฟเบอร์กลาสในแผ่นหลังคาโปร่งแสง

ดวงกมล เจตนาไทกุล, ดุจดเดือน คงวรานนท์ และ ตรีนุช อมรตระกูล
รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมเรื่อง “การรีไซเคิลเส้นใยไฟเบอร์กลาสในแผ่นหลังคาโปร่งแสง” นี้มีจุดเริ่มต้นจากการติดต่อจากทางบริษัทผู้ผลิตแผ่นหลังคาโปร่งแสงรายหนึ่งในประเทศซึ่งแจ้งความต้องการหาความเป็นไปได้ในการหาวิธีจัดการกับเศษหลังคาโปร่งแสงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหลังคาโปร่งแสงของโรงงาน ซึ่งในปัจจุบัน เศษหลังคาเหล่านี้เป็นภาระทางด้านค่าใช้จ่าย เพราะต้องเสียค่าจ้างให้กับบริษัทที่รับกำจัดของเสียที่เป็นพิษ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการนี้จึงเป็นการนำเศษหลังคาโปร่งแสงกลับมาใช้หมุนเวียนใหม่ โดยมีการศึกษาถึงผลของการผสมเศษหลังคาโปร่งแสงที่ผ่านการบดลงในพอลิเอสเตอร์เรซินบริสุทธิ์ ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจาก 0-40% โดยน้ำหนัก แล้วทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และทางกลในเบื้องต้น พบว่าการผสมผงของเศษหลังคาโปร่งแสงในพอลิเอสเตอร์เรซินบริสุทธิ์ ไม่ทำให้คุณสมบัติในการดูดซับน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม สำหรับอิทธิพลของส่วนผสม เมื่อเพิ่มปริมาณผงของเศษหลังคาโปร่งแสงให้มากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นและความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากผลโครงการ สรุปได้ว่า การนำเศษหลังคาโปร่งแสงกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่นั้นมีความเป็นไปได้สูง

คำหลัก : เส้นใยไฟเบอร์กลาส, การรีไซเคิล, แผ่นหลังคาโปร่งแสง

1. บทนำ

ปัจจุบันพลาสติกซึ่งเคยเป็นรองวัสดุอื่นๆ ในด้านความแข็งแรงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจาก การที่ได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตวัตถุดิบและการนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ให้ถูกทางมากขึ้น การปรับปรุงทางด้านการเสริมความแข็งแรงของพลาสติกให้ใช้งานได้ดีทัดเทียมกับวัสดุอื่นๆนั้น ทำได้โดยการใช้วัสดุซึ่งมีคุณสมบัติที่ทั้งแข็ง และ เหนียว มาเสริมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาเสริมแรงให้พลาสติกก็คือ โยแก้ว (Fiberglass) ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นหลายประการ เช่น ทนการผุกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้สูง เป็นฉนวนไฟฟ้า และทนสารเคมี ส่วนพลาสติกที่จะ

นำมาใช้เป็นเนื้อ ต้องเป็นชนิดที่มีความแข็งแรงมาก ซึ่งถ้าไม่มีการเสริมแรงแล้วจะเปราะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกเอาพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติ้งมาใช้งาน โดยพลาสติกที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดคือ พอลิเอสเตอร์เรซิน

ทั้งนี้เมื่อปริมาณการใช้พลาสติกเพิ่มขึ้น ปริมาณของเสียจากพลาสติกก็เพิ่มขึ้นตามมาด้วย การนำของเสียจากพลาสติกเหล่านี้กลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจทางการศึกษา เนื่องจากทำให้เกิดผลดีหลายประการ เช่น ลดปริมาณการใช้วัสดุหรือสารตั้งต้นบริสุทธิ์ ลดต้นทุนและพลังงานที่จะใช้ในการกำจัดของเสีย ลดปริมาณมลพิษอันเนื่องมาจากการย่อยสลายของเสีย และในทางวิชาการ อาจทำให้

เกิดการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้คุณสมบัติที่ต่างไปจากวัสดุที่มีอยู่เดิมได้

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุประกอบแต่ง (Composite Resin)

2.1.1 คำนิยามและประเภทของวัสดุประกอบแต่ง

วัสดุประกอบแต่งหมายถึงสารผสมที่ได้จากการรวมกันของสาร 2 ชนิดหรือ 2 เฟสขึ้นไป โดยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบในระดับจุลภาคแตกต่างกัน โดยต้องมีชนิดหนึ่งเป็นตัวเสริมแรงที่มีหน้าที่ให้คุณสมบัติให้กับเนื้อพื้น สารเริ่มต้น (ทั้งตัวเสริมแรงและเนื้อพื้น) จะต้องคงสภาพ ไม่ละลายเข้าด้วยกัน และปรากฏอยู่ในวัสดุผสมโดยที่สามารถถูกบ่งชี้ถึงคุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพของแต่ละสารได้

2.1.2 วัสดุประกอบแต่งโดยใช้ผงอนุภาค (Particulate or Particle reinforced composite)

วัสดุผสมเสริมแรงโดยใช้อนุภาคใหญ่ (Large Particle Composite) ที่มีขนาดมากกว่า $0.1\ \mu\text{m}$ เป็นวัสดุประกอบแต่งที่ใช้อนุภาคซึ่งมีความแข็งและแข็งแรงมากกว่าเนื้อเมทริกซ์ อนุภาคดังกล่าวจะหน่วงการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนรูปร่างของเนื้อเมทริกซ์เมื่อได้รับแรงมากระทำ ส่งผลให้แรงกระทำหรือความเค้นถูกส่งผ่านเนื้อเมทริกซ์ไปได้ในระดับหนึ่ง พฤติกรรมหรือคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเนื้อเมทริกซ์กับวัสดุอนุภาค นอกจากนี้วัสดุประกอบแต่งประเภทผงอนุภาคกระจายตัว (Dispersion-strengthened composite) จะใช้วัสดุอนุภาคที่มีขนาด $0.01 - 0.1\ \mu\text{m}$ ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและเนื้อเมทริกซ์จะนำไปสู่การเพิ่มความแข็งแรงในระดับจุลภาค โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะกระจายตัวไปทั่วเนื้อเมทริกซ์ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถยับยั้งหรือหยุดการเคลื่อนที่ของวัสดุอนุภาคเอง หรือดิสโลเคชัน (Dislocation) ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ของชิ้นวัสดุประกอบแต่งเกิดขึ้นได้ยาก และนำไปสู่การเพิ่มขึ้น

ของความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield stress) ความแข็งแรงสูงสุด (UTS) และความแข็ง (Hardness)

2.1.3 วัสดุประกอบแต่งโดยใช้เส้นใย (Fiber reinforced composites)

วัสดุประกอบแต่งประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยมีเส้นใยกระจายตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์การนำเส้นใยมาใช้งานจะช่วยทำให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรงหรือความแข็งแรงต่อน้ำหนัก หรือที่เรียกว่าความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และโมดูลัสจำเพาะ (specific modulus) มีค่าสูงมาก

2.1.4 วัสดุประกอบแต่งโดยใช้พอลิเมอร์ (Polymer matrix composite)

วัสดุประกอบแต่งนี้จะใช้พอลิเมอร์ต่างชนิดกันมาเนื่องจากคุณสมบัติทางกลโดยทั่วไปของพอลิเมอร์หลักไม่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความแข็งแรง และความแกร่งในช่วงอีลาสติกมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับโลหะและเซรามิกส์ กรรมวิธีการผลิตวัสดุประกอบแต่งประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูงเหมือนวัสดุผสมประเภทอื่น ทำให้ปัญหาในด้านการเสื่อมสภาพของตัวเสริมแรงในระหว่างการผลิตวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับชนิดอื่น ดังนั้นวัสดุประกอบแต่งประเภทนี้จึงได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วและเป็นที่ยอมรับให้นำมาใช้งานด้านโครงสร้างได้

2.2 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งที่ใช้กับเนื้อเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์นั้นควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีเสถียรภายใต้สภาวะการขึ้นรูป และสภาวะการใช้งาน ไม่เป็นพิษและไม่ทำให้เกิดรสรหรือกลิ่น ไม่เกิดการคายสี (bleeding) หรือการเป็นฝ้า (blooming) ไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป และมีราคาถูก

3. วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้

เศษหลังคาโปร่งแสงที่เกิดจากกระบวนการผลิตของบริษัท แอมเฟิลไลท์ ไฟเบอร์กลาส (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยในช่วง 3 - 4 ซม. ความหนาของเศษหลังคามีค่าประมาณ 0.03 ซม. และมีเศษเส้นใยไฟเบอร์กลาสกระจายออกอย่างสม่ำเสมอ เครื่อง Pulverizer ที่ใช้ในงานนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1

3.2 การบดย่อย

3.2.1 การบดย่อยด้วยเครื่อง Pulverizer



รูปที่ 1 Pulverizer

การบดด้วยเครื่อง Pulverizer เป็นการอาศัยกลไกการเฉือนซึ่งเกิดจากการหมุนของเข็ม (Pin) โดยในการเดินเครื่องจะทำการป้อนวัตถุดิบซึ่งเป็นเศษหลังคาจากทางด้านบน จากนั้นผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นผงจะลอดผ่านตะแกรงและไหลออกทางด้านล่าง

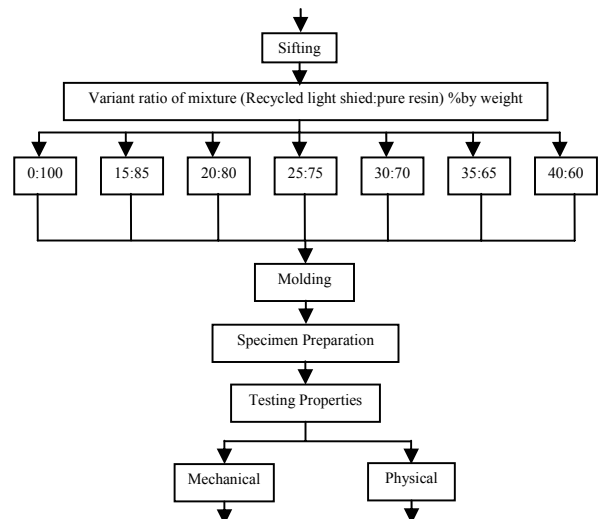
3.2.2 การบดย่อยด้วยเครื่อง Vibration Ball Mill



รูปที่ 2 Vibration Ball Mill

ทำการบดย่อยเศษหลังคาโปร่งแสงด้วยเครื่องบดแบบใช้ลูกบดสั่นสะเทือนนั้น จะต้องนำเศษหลังคาไปตัดเป็นชิ้นเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต้องนำไปคัดแยกขนาดก่อนใช้งาน การบดจะใช้หม้อบดจำนวน 2 ลูก สำหรับสัดส่วนโดยน้ำหนักของเศษหลังคาต่อลูกบดมีค่าประมาณ 1:10 รูปที่ 2 เป็น

ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องบดแบบใช้ลูกบดสั่นสะเทือนที่ใช้ในงานนี้ หนึ่งวิธีการเตรียมชิ้นงานและทดสอบคุณสมบัตินั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดย่อยจะถูกนำมาผสมกับเรซินบริสุทธิ์ โดยใช้การผสมในสัดส่วน 0 : 100 ถึง 40 : 60



รูปที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและทดสอบคุณสมบัติ

3.3 การขึ้นรูป

ในการเตรียมแบบพิมพ์สำหรับการขึ้นรูป จะใช้แผ่นฟิล์มใสสำหรับปิดหน้าของชิ้นงานทั้งสองด้าน ซึ่งจะฉีดสเปรย์ที่แบบพิมพ์เพื่อช่วยให้การคลายเรซินออกจากแบบพิมพ์ทำได้ง่ายขึ้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเรซินเหลวและผงที่ผ่านการคัดแยกขนาด ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ เทผสมลงในเรซิน เติมหาช่วยแข็ง (Curing Agent) ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของเรซิน คนให้เข้ากัน นำเข้าเครื่องปรับความดันสุญญากาศเพื่อกำจัดฟองที่เกิดขึ้นจากการกวนผสม เทเรซินที่เตรียมไว้ลงในแบบพิมพ์จนเต็มช่อง ปิดหน้าเรซินด้วยแผ่นฟิล์มใส รอให้เรซินแข็งตัว นำชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์ เข้าเครื่องขัดผิวเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นงานที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปที่สัดส่วนอนุภาคต่าง ๆ

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมขึ้น ทำโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ที่แสดงในรูป ที่ 5 ทดสอบการทนแรงกระแทกของวัสดุ โดยหลักการ Three Point Bending สำหรับชิ้นงานใช้รูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D256 (1990)



รูปที่ 5 Universal Testing Machine

3.5 การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ

การทดสอบที่ดำเนินการโดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน นำชิ้นงานแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำโดยใช้สมการ

$$X = (B-A)/A \quad (1)$$

ซึ่ง X คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)

B คือ น้ำหนักหลังการแช่น้ำ (กรัม)

A คือ น้ำหนักก่อนการแช่น้ำ (กรัม)

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การบดเศษหุ้มคาเพื่อเตรียมวัตถุดิบสำหรับรีไซเคิล

ในการบดเศษหุ้มคาไปร่งแสงด้วยเครื่อง Pulverizer พบว่าไม่สามารถทำให้เรซินกลายเป็นผงละเอียดแล้วแยกเอาเฉพาะเส้นใยแก้วกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ตามที่คาดหวัง อีกทั้งยังทำให้เส้นใยแก้วเปื่อยยุ่ย เสี่ยงสภาพเดิมไปอีกด้วย จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้เห็นว่าการใช้กลไกการฉีกของเครื่อง Pulverizer ไม่เหมาะกับการแยกเส้นใยแก้วออกจากเศษหุ้มคาไปร่งแสง

ดังนั้น จึงทำการทดลองโดยใช้ Vibration Ball Mill แทน ซึ่งสามารถบดเรซินและเส้นใยแก้วเป็นผงละเอียด โดยในการทดลองนี้ได้ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างลูกบดต่อเศษหุ้มคาไปร่งแสงเป็น 10 : 1 แต่ต้องใช้เวลามากกว่า 18 ชั่วโมง จึงจะสามารถทำให้เศษหุ้มคาไปร่งแสงกลายเป็นผงทั้งหมด ถ้าหากใช้เวลาน้อยกว่านี้ก็จะมีส่วนหนึ่งกลายเป็นผงและอีกส่วนหนึ่งยังคงเหลือเป็นแผ่นปลายโค้งมน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลูกบดที่ใช้มีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างลูกบดมาก โอกาสที่ลูกบดจะกระทบกับเศษหุ้มคาไปร่งแสงจึงน้อยลง

อนึ่งในการใช้ Vibration Ball Mill พลังงานที่ป้อนที่ถูกนำไปใช้ในการบดจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานเสียงและความร้อน อย่างไรก็ตาม โดยอาศัยการบดทั้งสองวิธี การแยกเส้นใยแก้วออกจากเรซินยังทำได้อย่างจำกัด จึงดัดแปลงการทดลองจากการแยกเส้นใยแก้วเพื่อเติมในเรซินใหม่ มาเป็นการนำผงละเอียดที่ได้จากการบดย่อย ซึ่งประกอบด้วยเรซินและเส้นใยแก้วปนกันอยู่มารีไซเคิลใช้ใหม่โดยนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเอสเตอร์เรซิน สาเหตุที่คิดจะนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งก็เนื่องจากว่า ตามทฤษฎีแล้วสารเติมแต่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเนื้อพื้นได้ และยังเป็นการประหยัดค่าวัสดุเนื้อพื้นที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปอีกด้วย เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมและไม่เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน จึงกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการบดอยู่ที่ 8 ถึง 10

ข้าวโม่ จากนั้น นำผงที่ได้ไปคัดแยกขนาดโดยวิธีการ Sieve เพื่อนำเอาผงที่มีขนาดต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร ไปใช้ในการขึ้นรูปสารประกอบแต่ง ส่วนผงหรือเศษ หลังกาโปรงแสงที่ยังมีขนาดใหญ่มากกว่า จะแยกไว้เพื่อทำการบดต่อไป

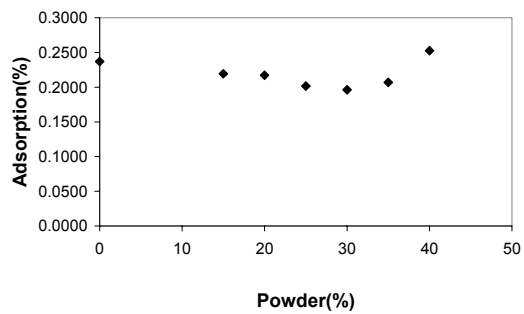
4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้วัตถุดิบที่ได้จากการบดย่อย

ในขั้นตอนการขึ้นรูป มีปัญหาหลายอย่างที่เกิดขึ้น ข้อแรกคือเรื่องการเกิดฟองอากาศแทรกลงไป ในขั้นตอนที่ทำการกวนส่วนผสม อันได้แก่ เรซิน ผง เศษหลังกา และตัวทำแข็ง ซึ่งฟองอากาศนี้จะส่งผลให้ ค่าสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของชิ้นงานที่วัดได้ คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยนำส่วนผสมที่กวนให้เข้ากันแล้วไปเข้าเครื่องดูดสุญญากาศก่อนที่จะเทลงในแบบพิมพ์ ซึ่งวิธีนี้ช่วยให้ ปริมาณฟองอากาศลดลงได้แต่ไม่ทำให้หายไปทั้งหมด

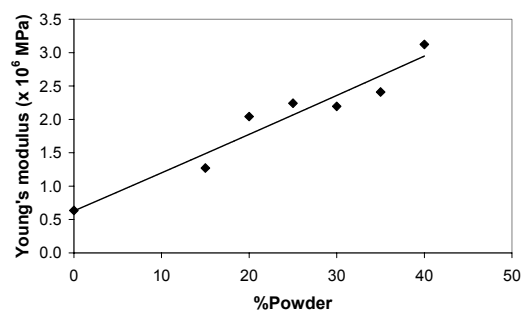
ปัญหาข้อต่อมาก็คือ เมื่อปริมาณของผงเศษ หลังกาที่เติมลงในเรซินด้วยสัดส่วนที่มากขึ้นก็จะทำให้เรซินมีความสามารถในการขึ้นรูปลดลง การกำจัด ฟองอากาศภายในชิ้นงานทำได้น้อยลง และการขึ้นรูปทำได้ยากขึ้น ซึ่งในการนี้จะแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนขณะเตรียมขึ้นรูปชิ้นงาน

4.3 การวิเคราะห์สมบัติการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน

คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นงานที่ทำการวัดคือ สมบัติการดูดซึมน้ำ จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเรซินบริสุทธิ์กับที่ขึ้นรูปด้วยเรซินผสมอนุภาค มีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน แสดงว่า การผสมผงอนุภาคไม่ทำให้คุณสมบัติการดูดซึมน้ำ เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลดีหากต้องการนำวัสดุประกอบแต่งนี้ไปใช้เป็นแผ่นหลังคาเพราะสภาพการใช้งานอาจจะโดนน้ำ หรือฝน หากแผ่นหลังคาดูดซึมน้ำได้มาก จะเกิดการบวมตัว และเสียรูปไป ชิ้นงานที่ผสมผงอนุภาค 40 % มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำสูง เป็น เพราะว่าการขึ้นรูปจะมีฟองอากาศเกิดขึ้น ในระหว่างการกวนผสม ซึ่งถ้ามีฟองอากาศมาก ก็จะทำให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำได้มากขึ้นด้วย



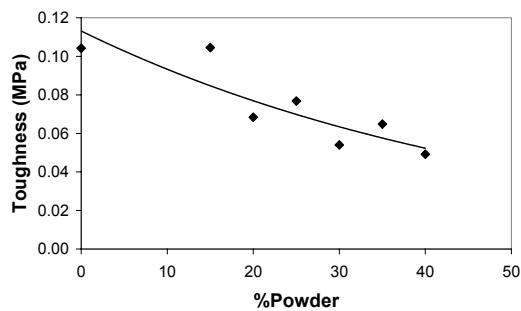
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนอนุภาคและค่าการดูดซึมน้ำ



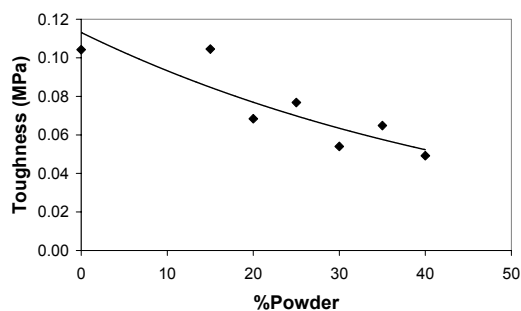
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนอนุภาคและ Young's Modulus

4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

อิทธิพลของผงเศษหลังกาที่เติมลงไปต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 7,8 และ 9 โดยจากรูปที่ 7 จะสังเกตเห็นว่า Young's Modulus (หรือ flexural modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น โดยค่า Young's Modulus เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของวัสดุ เนื่องจากอนุภาคที่ใส่ในชิ้นงานมีส่วนผสมของเส้นใยแก้ว จึงช่วยเสริมแรงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากเส้นใยแก้วจะมีความแข็งแล้วยังมีความเปราะสูงอีกด้วย ดังนั้นเมื่อมีอนุภาคของเส้นใยแก้วอยู่ในชิ้นงานมากขึ้น ความเปราะของชิ้นงานจึงมีค่าสูงขึ้น วัสดุมีความสามารถในการโค้งงอลดลง ซึ่งค่าความแกร่งและความเหนียวมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนอนุภาคและความแกร่ง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนอนุภาคและความเหนียว

5.สรุปผลการทดลอง

- ปัจจัยที่มีผลต่อการบดย่อยวัสดุ คือ ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ ขนาดของลูกบด และสัดส่วนระหว่างลูกบด กับเศษหลังคาโปร่งแสง มีผลต่อการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างลูกบดและเศษหลังคาโปร่งแสง
- ลักษณะและขนาดของอนุภาคมีผลต่อการกระจายตัวในเรซิน
- สัดส่วนอนุภาคผงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Flexural Modulus สูงขึ้น
- สัดส่วนอนุภาคผง และฟองอากาศในชิ้นงานมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม สำหรับปริญญาตรี ประจำปี 2546

ขอขอบคุณ 1) รองศาสตราจารย์ ดร.รัชชัย ชรินพาณิชย์กุล ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล ผศ.ดร.ศราวุธ ริมดุสิต และอาจารย์ อนุรักษ์ โทณานนท์ สำหรับความรู้ คำแนะนำและวิธีการในการดำเนินโครงการอย่างถูกต้องและมีระบบ 2) คุณชัย มนูญพงศ์ สำหรับความร่วมมือจากทางบริษัท 3) นางสาวจันจิรา จัปศิลป์ นิสิตปริญญาเอก ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำและการช่วยเหลือในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ และ ศุภกาญจน์ คำมณี, จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ประจักษ์โลก ระดับจุลภาค, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 2544.
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, เอฟอาร์พี, พิมพ์ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ: ห.จ.ก. ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2546.
- สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร และ ปรีทธรณ์ พันธบุรุษย์, โลหะวิทยาเชิงวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: บริษัท เอช.เอ็น.กรุ๊ป จำกัด, 2538.
- รศ. อรุษา สรวารี, สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- American Society for Testing and Materials, 1972 annual book of ASTM standards / American Society for Testing and Materials, 1st ed., Philadelphia: ASTM 1972.
- F.L.Matthews and R.D.Rawlings, Composite Materials Engineering, 1st ed., London: Chapman & Hall, 1994.
- Keishi Gotoh, Hiroaki Masuda, and Ko Higashitani,

Powder Technology Handbook, 2nd ed., New York:

Marcel Dekker, Inc., 1997.