



รายงานการวิจัย

การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอสเตอร์เสริมแรง

ไฟเบอร์กลาสและเศษแก้วรีไซเคิล

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYESTER RESIN
REINFORCED WITH GLASS FIBRE AND RECYCLED GLASS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอสเตอร์เสริมแรง

ไฟเบอร์กลาสและเศษแก้วรีไซเคิล

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYESTER RESIN

REINFORCED WITH GLASS FIBRE AND RECYCLED GLASS

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวนัช บุ่งสุด

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวกรรณกนกพรรณ สนสกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

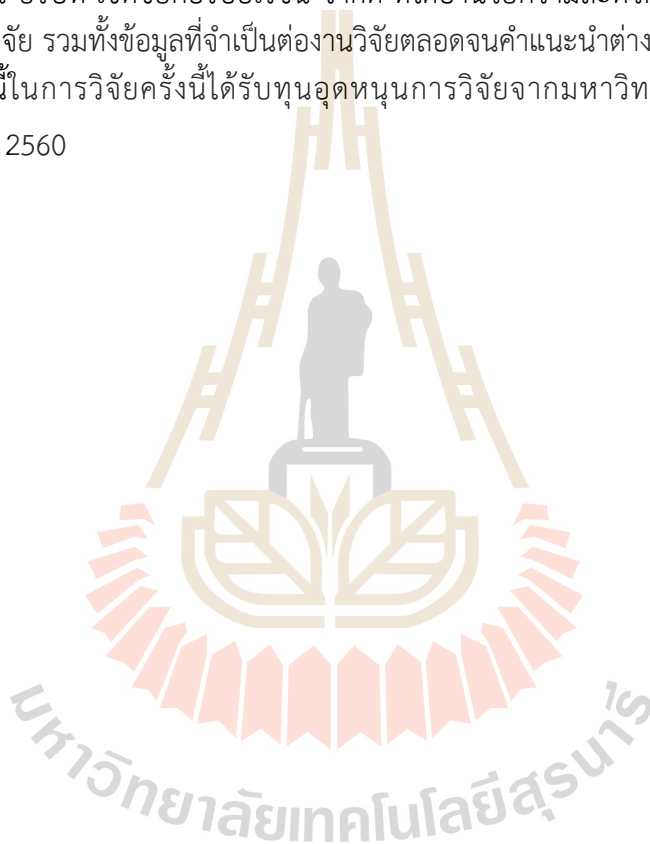
รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของคณะผู้วิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก และสาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือที่ให้ความรู้ทางด้านการใช้เครื่องมือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท เซิตชัยคอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ ในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลที่เป็นต่องานวิจัยตลอดจนคำแนะนำต่างๆ

นอกจากนี้ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2562

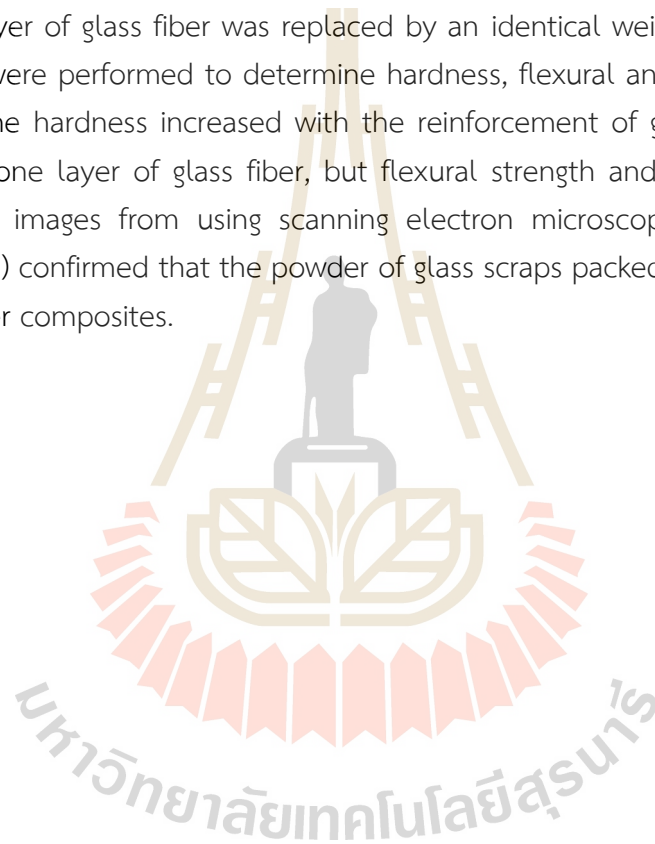


บทคัดย่อ

ในการผลิตธัญพืชขนาดใหญ่ มีความกังวลเรื่องค่าใช้จ่ายสูงในการผลิตชั้นส่วนที่มีการเสริมแรงโพลีเอสเตอร์ด้วยไฟเบอร์กลาส การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากเศษกระจก เพื่อลดปริมาณไฟเบอร์กลาสที่จำเป็นสำหรับการผลิต เศษกระจกถูกบดเครื่องบด Ball mill และร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดผง 108, 125, 149, 186 และ 240 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถนำมาเติมในช่องว่างของไฟเบอร์กลาส วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงโพลีเอสเตอร์ด้วยไฟเบอร์กลาส และผงเศษกระจก โดยใช้ระบบการขึ้นรูปสุญญากาศ (Infusion Vacuum Process, VIP) ในขณะที่ชั้นหนึ่งของใยแก้วจะถูกแทนที่ด้วยน้ำหนักรวมของผงเศษแก้วปริมาณเท่ากัน ทดสอบเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก และความแข็งของวัสดุ ผลการศึกษาพบว่าค่าความแข็งของวัสดุที่เสริมแรงด้วยเศษผงกระจกมากกว่าวัสดุที่ใช้ใยแก้วเพียงอย่างเดียวในการเสริมแรง แต่การต้านทานแรงดึง และแรงกระแทกลดลง และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) เพื่อยืนยันว่าผงเศษกระจกแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของไฟเบอร์กลาสในวัสดุคอมโพสิต

Abstract

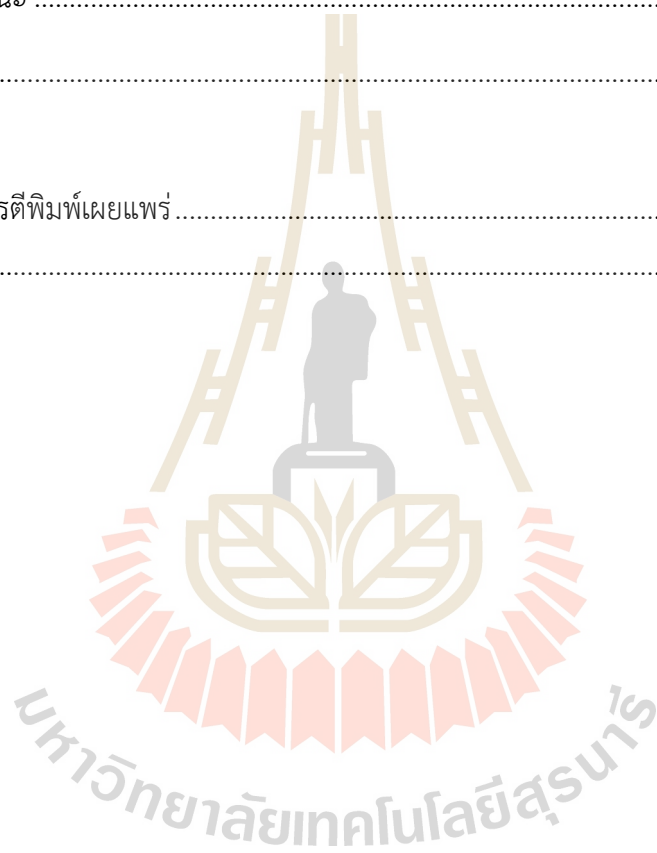
One concern in bus manufacturing is the high cost of glass fiber reinforced in polyester composites parts. This research was aimed to exploit the use of glass scraps to reduce the amount of glass fiber required for production. Glass scraps were crushed by a ball mill into powder sizes of 108, 125, 149, 186 and 240 μm which could be filled in the space between the fine glass. The polyester composites reinforced with glass fiber and the powder of glass scraps were fabricated using Vacuum Infusion Process (VIP) whereas one layer of glass fiber was replaced by an identical weight of the glass scrap powder. Tests were performed to determine hardness, flexural and impact strengths of the material. The hardness increased with the reinforcement of glass scrap in powder form replacing one layer of glass fiber, but flexural strength and impact strength was decreased. The images from using scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM) confirmed that the powder of glass scraps packed in the layers of glass fiber in polyester composites.



สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย	3
1.6 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials).....	5
2.2 โพลีเอสเตอร์	7
2.3 ไฟเบอร์กลาส	8
2.4 เศษกระจก	9
2.5 ระบบการขึ้นรูปแบบ Infusion Vacuum	10
2.6 ปรีทัศน์วรรณกรรม	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	14
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	16
3.2.1 การเตรียมเศษกระจก	16
3.2.2 การออกแบบการทดลอง และเตรียมการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	19
3.2.3 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยระบบ Infusion Vacuum	26
3.2.4 การเตรียมขึ้นทดสอบ	27

3.2.6 การทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	32
4.1 ผลการทดสอบความแข็ง	32
4.2 ผลการทดสอบแรงดัดงอ	40
4.3 ผลการทดสอบแรงกระแทก.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการวิจัย	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก	
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	๑
ประวัติผู้วิจัย	๙



สารบัญรูปภาพ

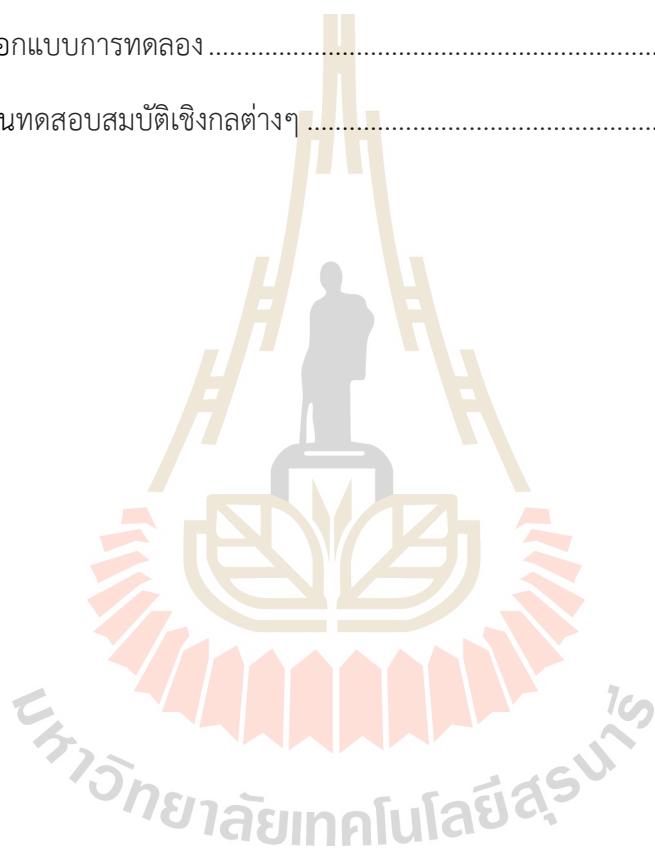
รูปที่	หน้า
2.1	การจำแนกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง.....5
2.2	สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ6
2.3	ภาพขยายช่องว่างระหว่างใยไฟเบอร์กลาสที่จะนำมาใช้ศึกษา9
2.4	กระจกหน้ารถทัวร์ที่แตกจากโรงงาน 10
2.5	วิธีการ Infusion Vacuum 10
2.6	ลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ 11
3.1	แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย 15
3.2	ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของเศษกระจกที่ผ่านตะแกรงร่อนต่างๆ..... 16
3.3	รายละเอียดการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 29..... 20
3.4	การติดตั้งโครงสร้างรถสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ECE Regulation No. 29 21
3.5	ผลการทดสอบความแข็ง 22
3.6	ผลการทดสอบแรงดัดงอ..... 22
3.7	ผลการทดสอบแรงกระแทก..... 23
3.8	การติดตั้งระบบ Infusion Vacuum 26
3.9	ลักษณะของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยระบบ Infusion Vacuum 27
3.10	ตำแหน่งของชิ้นทดสอบ..... 27
3.11	การทดสอบความแข็ง 28
3.12	การทดสอบแรงดัดงอ 29
3.13	เครื่องทดสอบแรงกระแทก และลักษณะการจับชิ้นทดสอบ 30
3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 30
3.15	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบใช้แสง (OM)..... 31
4.1	ค่าความแข็ง (Hardness) ของการทดสอบชิ้นงานที่เติมกระจก ที่น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน 33
4.2	การวิเคราะห์โดยรวมด้วยวิธี DOE ของ Hardness 34
4.3	การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Hardness โดยใช้ DOE 36

4.4	ลักษณะของหั่วกด Hardness ที่ลงในชิ้นทดสอบ.....	38
4.5	ภาพ OM ที่พื้นผิวอนุภาคของชิ้นทดสอบ Hardness	39
4.6	ค่าความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอ (Flexural Strength) ของการทดสอบชิ้นงานที่เติมกระจก ที่ น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน.....	40
4.7	การวิเคราะห์โดยรวมด้วยวิธี DOE ของ Flexural Strength	42
4.8	การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยใช้ DOE ของ Flexural Strength.....	43
4.9	ลักษณะการแตกหักของชิ้นทดสอบ Flexural.....	46
4.10	ค่าความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ของการทดสอบชิ้นงานที่เติมกระจก ที่ น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางที่ขนาดอนุภาคต่างกัน.....	47
4.11	การวิเคราะห์โดยรวมด้วยวิธี DOE ของ Impact Strength	49
4.12	การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยใช้ DOE ของ Impact Strength	50
4.13	ลักษณะการแตกหักของชิ้นทดสอบ Impact	52



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์.....	7
3.1 ขนาดอนุภาคของเศษกระจก.....	18
3.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของโพลีเอสเตอร์และคอมโพสิตของโพลีเอสเตอร์กับสารเสริมต่างๆ	19
3.3 แสดงการออกแบบการทดลอง.....	25
3.4 ขนาดของชั้นทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ.....	28



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุคอมโพสิต (Composite materials) หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป แล้วทำให้คุณสมบัติของวัสดุโดยรวมดีขึ้น และยังมีความหมายในทางวิศวกรรมซึ่งหมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยการประกอบขึ้นนั้นต้องไม่ทำให้วัสดุรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ให้คุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติร่วมกัน ไฟเบอร์กลาสเองก็ถือว่าเป็นวัสดุคอมโพสิตอีกชนิดหนึ่ง โดยเติมเส้นใยแก้วเข้าไป เพื่อเป็นการเสริมแรงให้กับวัสดุเนื้อหลักประเภทพอลิเมอร์ ซึ่งใยแก้วมีลักษณะอ่อนนุ่มแต่เหนียว ทนความร้อนได้สูง แต่มีราคาค่อนข้างสูง และโพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin) ก็เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาเป็นวัสดุเนื้อหลัก ในขณะเดียวกัน แก้ว กระจก และกระจกนิรภัยก็ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ และก่อสร้าง

อุตสาหกรรมการผลิตและประกอบรถโดยสารขนาดใหญ่มีการใช้ไฟเบอร์กลาสในปริมาณที่มาก และในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมานอกจากจะมีการผลิตและประกอบรถโดยสารขนาดใหญ่ยังมีการเดินรถและบริษัทที่ซ่อมบำรุงรถโดยสารขนาดใหญ่อีกด้วย ซึ่งอุตสาหกรรมมักจะมีเศษกระจกที่เกิดจากการบำรุงรักษารถที่ต้องกำจัดทิ้ง ในการผลิตมีปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูง จากปัญหาที่พบ คือ ของเสียที่รอการกำจัดด้วยการส่งไปขึ้นรูปใหม่ อย่างเช่นกระจกหน้ารถ ที่เกิดการแตกเพียงเล็กน้อยหรือทั้งบาน ก็มีการเปลี่ยนทั้งบาน ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการจัดเก็บของทางโรงงาน จึงมีแนวคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อทดแทนวัสดุในส่วนงานอีกส่วน คืองานไฟเบอร์กลาส ซึ่งเป็นงานที่มีต้นทุนการผลิตสูงมาก

การวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อนำเอาเศษกระจกที่ไม่อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้แล้ว กลับมารีไซเคิลเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับโพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin) เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการปรับปรุงความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตที่มีใช้อยู่เป็นจำนวนมาก และลดการใช้ไฟเบอร์กลาสซึ่งมีราคาแพง เพื่อให้ได้มาซึ่งชิ้นส่วนใหม่ที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมได้ ลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์โดยการใช้โพลีเอสเตอร์เรซินในปริมาณที่น้อยลง และถึงแม้เศษกระจกจะสามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ได้ใหม่ แต่ก็ยังเป็นขั้นตอนที่มีกระบวนการซับซ้อน ดังนั้นการนำเศษกระจกมาบดใช้ จึงเป็นการสนับสนุนให้เกิดการนำชิ้นงานที่ใช้แล้วกลับมารีไซเคิลโดยตรง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษวัสดุที่เหลือใช้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์ เสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส และเศษกระจก
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอิทธิพลของโพลีเอสเตอร์ เสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส และเศษกระจก ได้แก่ ขนาดอนุภาคของเศษกระจก น้ำหนักที่เหมาะสมของเศษกระจก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ได้จากบริษัท เซิตชัยคอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 2) ขึ้นรูปด้วยการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (Infusion Vacuum Process)
- 3) ศึกษา และเปรียบเทียบการทดสอบสมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของเศษกระจกที่มีขนาดอนุภาค 108, 125, 148, 186 และ 240 ไมโครเมตร และน้ำหนักที่เติม 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร ไฟเบอร์กลาส เสริมแรงโพลีเอสเตอร์

หมายเหตุ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมีรายละเอียด ดังนี้

1. สมบัติเชิงกล ประกอบไปด้วย
 - ความแข็ง (Hardness)
 - ความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength)
 - ความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength)
2. สัณฐานวิทยาจะใช้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูล
- 2) ออกแบบการทดลอง
- 3) เตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย
 - บดเศษกระจกด้วยเครื่อง ball mill
 - ร่อนตะแกรงเบอร์ 60, 80, 100, 120 และ 140 mesh ให้ได้ขนาดตามต้องการ
 - ชั่งเตรียมผงกระจกที่ใช้ในการขึ้นรูป 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร
- 4) ขึ้นรูปขึ้นทดสอบ โดยการวางไฟเบอร์กลาสลงในโม่ สเปรย์ผงกระจกลงในไฟเบอร์กลาสคลุมโม่ด้วย Vacuum bag แล้วปล่อยโพลีเอสเตอร์เรซินเข้าสู่ขึ้นงานด้วยระบบสุญญากาศ
- 5) ตัดขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240, D790 และ D4812
- 6) นำขึ้นทดสอบตัวอย่างมาทดสอบสมบัติเชิงกล แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เพื่อหาความเป็นไปได้ที่จะลดปริมาณการใช้ไฟเบอร์กลาส และสัณฐานวิทยาที่ตั้งระบุไว้ในขอบเขตงานวิจัย
- 7) รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ และสรุปผลงานวิจัย
- 8) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1) บริษัท เชิดชัยคอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 2) อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 1, 4, 5, 6/1, 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องบดละเอียด Ball mill
- 2) เครื่องร่อนตะแกรง Vibratory sieve shaker ยี่ห้อ Retsch รุ่น ANALYSTTE 3 PRO
- 3) ตะแกรงร่อน ยี่ห้อ Retsch test sieve เบอร์ 60, 80, 100, 120, 140 และ 160 mesh
- 4) เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Mettler Toledo Type Classic MF รุ่น ML3002 ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 5) เครื่องวัดขนาดอนุภาค ด้วยเลเซอร์ ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA – 950V2
- 6) ปั้นลม ปั่นกาฟนสี่ และป่น/กาฟนทราย/
- 7) ปั๊มอัดสุญญากาศ Vacuum pump
- 8) เครื่องเลื่อยสายพาน Vertical band saw machine
- 9) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Universal Testing Machine, UTM ยี่ห้อ INSTRON Model 5565 โหลดเซลล์ขนาด 5 kN
- 10) เครื่องทดสอบแรงกระแทก INSTRON รุ่น (CEAST)/CEAST 9050
- 11) เครื่องทดสอบความแข็ง DUROTECH, BENCH STAND, รุ่น BS550 หัวกด shore D
- 12) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope, SEM
- 13) เวอร์เนียคาลิเปอร์ แบบดิจิตอล 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mitutoyo
- 14) อุปกรณ์ระบบ vacuum composite process เช่น โมลด์กระจก (แบบเปิด) ตาข่ายนำเรซิน ฝา peel ply ฟิล์มคลุมโมลด์ ท่อนำเรซิน ข้อต่อสามทาง หม้อตัดเรซิน และสายยาง
- 15) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optimal Microscope, OM

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้ไฟเบอร์กลาส ที่เป็นวัสดุที่มีต้นสูง
- 2) เพื่อเป็นความรู้สำหรับการวิจัยขั้นต่อไปในการพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีคุณสมบัติเฉพาะทาง โดยมีการนำของเหลือใช้ในอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนหลัก ๆ ทงส่วน คือ ในส่วนแรกเป็นการอธิบายถึงข้อมูล และคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุคอมโพสิต ที่มีโพลีเอสเตอร์ ไฟเบอร์กลาส และเศษกระจก เป็นวัสดุสำคัญในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงการอธิบายระบบการขึ้นรูปแบบ Infusion Vacuum และที่ส่วนสุดท้ายเป็นการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของวัสดุคอมโพสิต ที่มีโพลีเอสเตอร์ และไฟเบอร์กลาส เป็นวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งหัวข้อหลักที่ได้ศึกษารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มีดังนี้

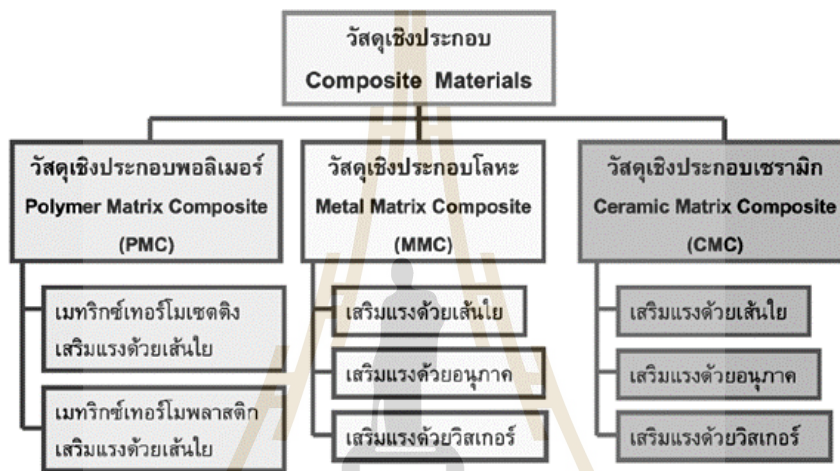
- 2.1 วัสดุคอมโพสิต
- 2.2 โพลีเอสเตอร์
- 2.3 ไฟเบอร์กลาส
- 2.4 เศษกระจก
- 2.5 ระบบการขึ้นรูปแบบ Infusion Vacuum
- 2.6 ปริทัศน์วรรณกรรม



2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials)

วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) หรือวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป แล้วทำให้สมบัติของวัสดุนั้นดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุคอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ (เหตุทัก กิรติเสรี และคณะ, 2552 - 2553)

วัสดุคอมโพสิต ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เมทริกซ์ และสารเสริมแรง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามชนิดของเมทริกซ์ และลักษณะของสารเสริมแรง

องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่

1. เมทริกซ์ (Matrix) คือ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก และเป็นเฟสต่อเนื่อง โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรง และทำให้วัสดุคอมโพสิตเป็นรูปร่าง สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite, PMC) วัสดุคอมโพสิตโลหะ (Metal Matrix Composite, MMC) และวัสดุคอมโพสิตเซรามิก (Ceramic Matrix Composite, CMC)

2. สารเสริมแรง (Reinforcement) คือ วัสดุที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น โดยสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมคุณสมบัติให้เมทริกซ์ และทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติตามต้องการ สามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และวิสเกอร์ (Whisker)

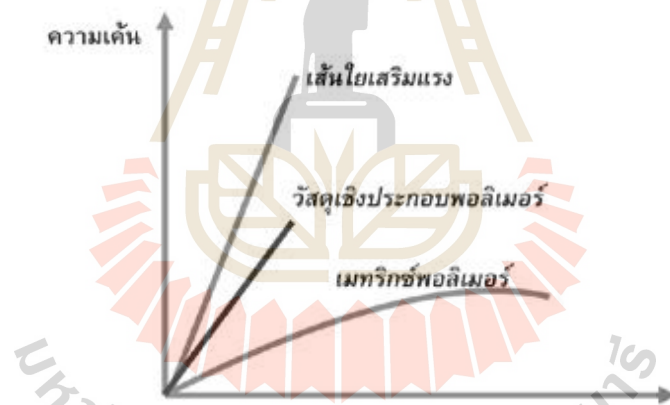
- อนุภาคเสริมแรง จะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น
- เส้นใยจะมีลักษณะยาว โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect Ratio) ถ้าอัตราส่วน ดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไป จะเรียกสารเสริมแรงนั้นว่า เส้นใย (มักจะทับศัพท์ด้วยภาษาอังกฤษว่า ไฟเบอร์) ซึ่งอาจจำแนกตามความยาวเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Shot Fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนส่วนน้อยกว่า เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้น

ใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น และเส้นใยอนินทรีย์ อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น

- วิสเกอร์ เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตร และมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated Single Crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์

วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์

โดยธรรมชาติ พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำๆ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์ที่ความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับ และกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้น โดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ดังแสดงรูปที่ 2.2 ที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลอย่างง่าย ของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เมื่อให้แรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย



รูปที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ

สมบัติเชิงกลนี้ จะเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกันทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้น วัสดุคอมโพสิตจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับรูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (Filler)

วัสดุคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อ

ความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถนำวัสดุคอมโพสิตมาใช้สำหรับงานโครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้ผงกระจกที่ได้จากของเหลือใช้ในกระบวนการผลิต มาเป็นส่วนเติมให้กับวัสดุคอมโพสิตที่มีไฟเบอร์กลาสซึ่งเป็นเส้นใยเสริมแรง โดยคาดหวังว่าผงกระจกอาจเข้าไปในช่องว่างของไฟเบอร์กลาส

2.2 โพลีเอสเตอร์

โพลีเอสเตอร์ เป็นพลาสติกเหลวชนิดหนึ่ง มีลักษณะข้นคล้ายน้ำมันเครื่อง เกิดจากการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์แบบ Condensation Polymerization ของสารประกอบจำพวกไกลคอล (Glycol) และไดเบสิกอะซิด (Dibasic Acid) โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดอิ่มตัว (Saturated Polyester Resin)
2. ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin)

โพลีเอสเตอร์อยู่ในสภาพของเหลว มีกลิ่นฉุน เป็นวัตถุไวไฟชนิดหนึ่ง มีอัตราการหดตัว 2 - 8% หลังเกิดปฏิกิริยาความร้อน จะทำให้แข็งตัวเป็นพลาสติกแข็งที่ไม่สามารถแปรสภาพเป็นพลาสติกเหลวคืนรูปได้อีก เรียกพลาสติกชนิดนี้ว่า Thermosetting plastic หลังเซตตัวเต็มที่ จะปล่อยสารเคมีออกมา ซึ่งมีกลิ่นเหม็นฉุน ดังนั้นสถานที่ทำงานควรเป็นที่โปร่งอากาศถ่ายเทสะดวก ไม่ควรทำงานในสถานที่ที่เป็นห้องทึบตัน และไม่มีการไหลเวียนของอากาศ หรือการระบายอากาศที่ดีพอ

คุณสมบัติของโพลีเอสเตอร์ โดยมี

- คุณสมบัติทางกายภาพ มีคุณสมบัติ แข็ง ใส เงาม สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงกว่าพลาสติกแบบ Thermoplastic แต่เมื่อเทียบกับโลหะ มีความแข็งแรงน้อยกว่ามาก แต่เมื่อเสริมความแข็งแรงด้วยไฟเบอร์กลาส จะได้ผลิตภัณฑ์ ที่มีน้ำหนักเบา เหนียว ไม่เปราะ และแข็งแรงกว่าโลหะ เมื่อเปรียบเทียบกับโดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก

- คุณสมบัติทางไฟฟ้า มีความต้านทานสูง สามารถใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ได้
- คุณสมบัติทางเคมี มีความสามารถในการทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี และไม่เป็นสนิม
- สมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์ (Salar Bagherpour, 2012)

สมบัติเชิงกลของโพลีเอสเตอร์	
ความทนแรงดึง Tensile Strength (MPa)	40 – 85
มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น Modulus of Elasticity (GPa)	1.3 – 4.5
ความยืดหยุ่นของพลาสติก % Elongation	5
ความทนแรงดัดงอ Flexural Strength (MPa)	250 – 690
ความทนแรงอัด Compressive Strength (MPa)	140 – 410
ความทนแรงกระแทก Izod Impact (J/m)	32
ความเหนียวที่ต้านความแตกหัก Fracture Toughness K_{IC} (MPa/m ²)	0.5

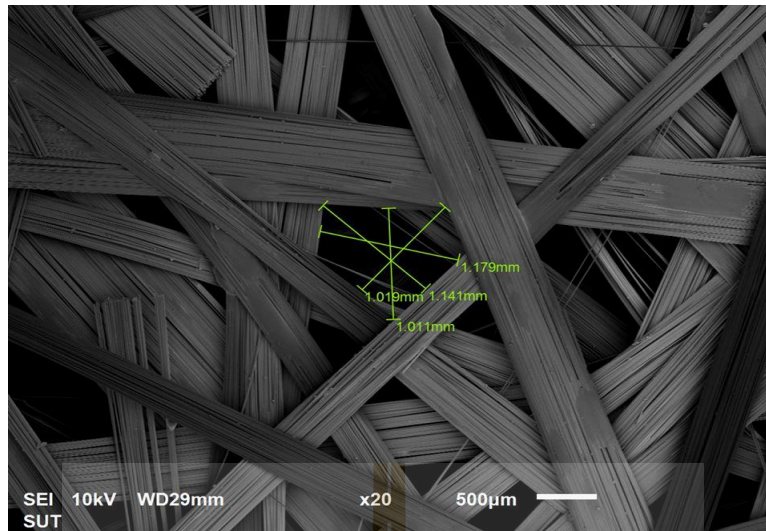
2.3 ไฟเบอร์กลาส

ไฟเบอร์กลาส หรือไฟเบอร์ เป็นตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่มีเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่มีส่วนแบ่งทางการตลาดสูง โดยทั่วไปหมายถึง เมทริกซ์โพลีเอสเตอร์ หรือไวนิล เอสเตอร์ ไฟเบอร์กลาสส์ จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง น้ำหนักเบา เช่น หลังคารถกระบะ เฟอร์นิเจอร์ขนาดเล็ก เป็นต้น ส่วนเมทริกซ์อีพ็อกซี จะถูกใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยเสริมแรงอื่น ๆ ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด และมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยแก้วมาใช้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงสูงมาก ส่วนวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติกมีส่วนแบ่งทางการตลาดน้อยกว่า มักใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียวทนทาน หรือนำไปอัดซ้อนกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

ส่วนผสมหลักที่ใช้ผลิตไฟเบอร์กลาส คือ ทรายแก้ว (Silica Sand) ใช้เป็นสารสร้างแก้ว โซดา แอช (Soda Ash) และหินปูน (Limestone) สารสองอย่างหลังจะช่วยลดจุดหลอมเหลว นอกจากนี้ส่วนผสมทั้งสามแล้วอาจมีส่วนผสมอื่นๆ ที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของไฟเบอร์กลาส เช่น บอแรกซ์ (Borax) ฟินหินม้า (Feldspar) แคลไซน์อะลูมินา (Calcined Alumina) แมกนีไซต์ (Magnesite) เนฟฟีลีนไซยาไนต์ (Nepheline Syenite) และ ดินขาวควาลิน (Kaolin Clay) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไฟเบอร์กลาส จะประกอบไปด้วยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการขึ้นรูปงานไฟเบอร์กลาส ดังนี้ $\text{SiO}_2 = 52.72\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.6 - 16\%$, $\text{CaO} = 10.25\%$, $\text{MgO} = 0 - 2.5\%$, $\text{B}_2\text{O}_2 = 2 - 13\%$, $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} = 0 - 14.2\%$ และ $\text{SO}_3 = 0.7\%$ โดยประมาณ (รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2542)

ไฟเบอร์กลาสนั้นนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในหลายรูปแบบ เช่น เส้นใยซึ่งเป็นเส้นยาว (Continuous Fibre Glass) เส้นใยซึ่งถูกหั่นเป็นเส้นสั้น (Chopped Fibre Glass) หรือเส้นใยซึ่งถูกบดเป็นผง (Milled Fibre Glass) ซึ่งแบบผงนี้เองมีจุดเด่นที่สามารถนำมาช่วยในการ Anticrazing คือการต้านทานการแตกร้าวของวัสดุได้ รูปตัวอย่างการแตกร้าวของวัสดุคอมโพสิตแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดพื้นฐานที่จะพัฒนาวัสดุคอมโพสิตซึ่งเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาสแบบเส้นใยยาวเป็นวัสดุเสริมแรงหลัก และมีการใช้สารตัวเติมคือผงแก้วจากการบดเศษกระจกเหลือใช้ โดยคาดหวังว่าจะสามารถลดค่าใช้จ่ายจากใยไฟเบอร์กลาสซึ่งมีราคาแพง แต่ยังคงสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความแข็งแรงคงรูปเหมาะสมกับชิ้นส่วนรถยนต์โดยสารได้

จากการศึกษาเบื้องต้น ใยไฟเบอร์กลาสจากสถานที่ที่จะทำการวิจัยเป็นไฟเบอร์กลาสแบบฝืน (Chopped strand mat) เป็นไฟเบอร์กลาสเส้นสั้นยาวประมาณ 1 - 2 นิ้ว โปรงแลงเป็นฝืนแบบกระจายเกาะตัวโดยการประสานกาว (binder) ได้ถูกนำมาส่องขยายดังรูปที่ 2.4 พบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยมีความกว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะบดเศษกระจกให้มีขนาดในช่วง 108 ถึง 240 ไมครอน เพื่อนำมาเป็นสารเติมควบคู่กับการใช้ใยไฟเบอร์กลาสในการผลิตชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2.3 ภาพขยายช่องว่างระหว่างใยไฟเบอร์กลาสที่จะนำมาใช้ศึกษา

2.4 เศษกระจก

กระจกนิรภัยที่ใช้ยานพนะในปัจจุบันนั้น มีอยู่ 2 ชนิด คือ กระจกลามิเนต (Laminated Glass) และ กระจกเทมเปอร์ (Tempered Glass) ซึ่งกระจกทั้ง 2 แบบนี้ต้องผ่านการทดสอบตามคุณสมบัติของกระจกนิรภัย ดังนี้

1. ต้องมีความแข็งแรงที่มากกว่ากระจกธรรมดาทั่วไป 3 - 5 เท่า
2. เมื่อกระจกเกิดการแตก จะต้องแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ไม่แหลมคม และไม่กระจัดกระจาย
3. หากเกิดการแตกแล้ว จะต้องไม่ยอมให้วัตถุต่างๆ ทะลุผ่านกระจกมาได้ง่ายๆ

เศษกระจกที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ เป็นเศษกระจกกรรทัวร์แตกจากการประกอบ หรือแตกจากอุบัติเหตุที่เข้ามาเปลี่ยนที่โรงงาน โดยปกติจะเป็นกระจกนิรภัยแบบลามิเนต (Laminated Glass) คือการนำกระจกแผ่นเรียบธรรมดา หรือกระจกเทมเปอร์ สองแผ่นขึ้นไปมาประกบกัน โดยมีแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการยึดเกาะสูงอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกระจก นำไปผ่านความร้อนให้ติดเป็นแผ่นเดียวกัน เมื่อกระจกเกิดแตกจะไม่กระจัดกระจาย ซึ่งก่อนนำมาบดผสมในงานวิจัยนั้น จะต้องทุบกระจกให้หลุดจากแผ่นพอลิเมอร์เสียก่อน



รูปที่ 2.4 กระจกหน้ารถทัวร์ที่แตกจากโรงงาน

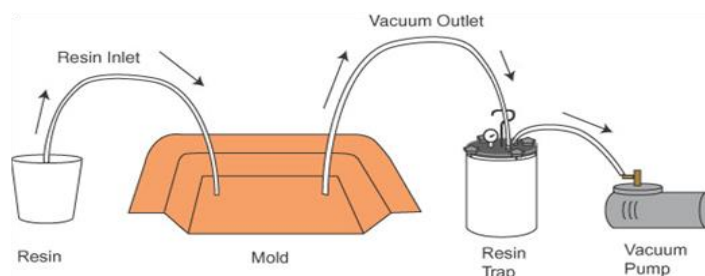
2.5 ระบบการขึ้นรูปแบบ Infusion Vacuum

วิธีการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ คือ

- วิธีการใช้มือทา (Hand layup)
- วิธีพ่น (Spray - up)
- การใช้แม่พิมพ์ประกบ (Resin Transfer Molding)
- การใช้ระบบสุญญากาศ (Infusion Vacuum)

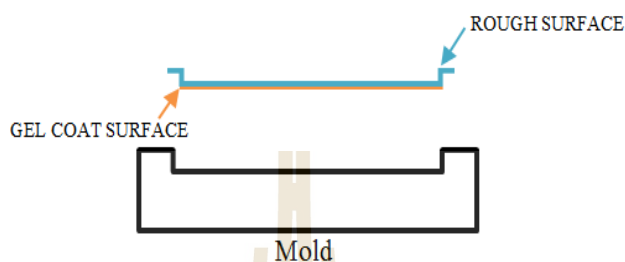
การขึ้นรูปแบบสุญญากาศ

กระบวนการผลิตชิ้นงานนี้ เรียกว่า Infusion หรือเรียกว่าระบบแวกคัม (Vacuum) เพราะใช้ปั๊มสุญญากาศ (จุดี เพียรล้าเลิศ) มีรายละเอียดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธีการ Infusion Vacuum (performancecomposites, Inc.)

หลักการโดยคร่าว คือ ไฟเบอร์กลาส หรืออาจเป็นวัสดุเสริมแรงอื่น จะถูกวางลงบนตำแหน่งที่ต้องการในแม่พิมพ์ แล้วปิดหุ้มแม่พิมพ์ให้สนิทด้วยฟิล์ม และซีลกันรั่ว ต่อจากนั้นใช้ปั๊มดูดอากาศออกให้หมด แล้วปล่อยให้เรซินซึมผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์อย่างช้าๆ ด้วยแรงดูดของปั๊ม เมื่อมีเรซินส่วนเกิน เรซินส่วนเกินนั้นจะถูกดูดออก หยุดการทำงานของปั๊มสุญญากาศเมื่อเรซินเต็มชิ้นงาน รอให้ชิ้นงานแห้งแล้วแกะส่วนหุ้มนำชิ้นงานออก โดยชิ้นงานจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ

2.6 ปรีทัศน์วรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า มีงานวิจัยหลายงานที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไฟเบอร์กลาส เสริมแรงชนิดอื่นๆ เสริมแรงในพอลิเมอร์ต่างๆ ด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อนำประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้ เช่น

Edcleide Araújo และคณะ (2006) สมบัติทางกลของวัสดุผสมโพลีเอสเตอร์ ไฟเบอร์กลาส งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำเอาของเสียที่ได้จากการแปรสภาพของอุตสาหกรรม Paraíba มาใช้เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุผสมโพลีเอสเตอร์เมทริกซ์ คอมโพสิตที่มี 20, 30, 40, 50 และ 60 น้ำหนัก (%) ของไฟเบอร์กลาสรีไซเคิล โดยการขึ้นรูปแบบการบีบอัด (compression molding) และเปรียบเทียบกับวัสดุผสมโพลีเอสเตอร์กับเส้นใยแก้วเพียงอย่างเดียว ทดสอบสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการดูดซับน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล เช่น ค่าโมดูลัสแรงดึงและความต้านทานแรงกระแทก ผลการวิจัยเหล่านี้เป็นหลักฐานว่าขยะจากไฟเบอร์กลาสเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการรีไซเคิล และสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมสำหรับวัสดุผสมโพลีเอสเตอร์เมทริกซ์ได้

Hasim Pihitli (2008) ศึกษาผลกระทบของการสึกหรอเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตไฟเบอร์กลาสแบบตาसानผสมกับอีพ็อกซีเรซิน และไฟเบอร์กลาสแบบตาसानผสมกับโพลีเอสเตอร์เรซิน วิธีการทดสอบภายใต้แรงและความเร็วในการทดสอบที่แตกต่างกัน โดยการสึกหรอนี้หาได้จากการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ การสึกหรอนี้ดูได้จากน้ำหนักที่หายไป โดยวัสดุคอมโพสิตไฟเบอร์กลาสแบบตาसानผสมกับอีพ็อกซีเรซิน มีค่า Strength สูง และการสึกหรอต่ำ เมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตไฟเบอร์กลาสแบบตาसानผสมกับโพลีเอสเตอร์เรซิน และมีการทดสอบ SEM เพิ่ม โดยส่องบริเวณผิวของชิ้นทดสอบที่เกิดการสึกหรอ เพื่อยืนยันผลการทดลอง

Aramide Fatai และคณะ (2012) ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์ เสริมด้วยไฟเบอร์กลาส ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยวิธี Hand lay-up โดยใช้เส้นใยแก้ว (แบบทอ) ความ

หนาแน่น 3.6 นิวตันต่อตารางเมตร และเรซินโพลีเอสเตอร์ทั่วไป ตัวอย่างเส้นใยโพลีเอสเตอร์จากใยแก้ว ที่มีปริมาณใยแก้ว (A-0.05, B-0.10, C-0.15, C-0.20, D-0.25 และ E-0.30) ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความยืดหยุ่น และความทนแรงกระแทกของวัสดุ โดยการทดสอบ มาตรฐาน พบว่าคุณสมบัติทางกลต่างๆ (ไม่รวมความสามารถในการรับแรงกระแทก) ดีขึ้นเมื่อมีปริมาณ ใยแก้วเพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรงสูง สรุปได้ว่าปริมาณเศษใยแก้วที่เหมาะสมสำหรับคอมโพสิตคือ 0.25

Fazle Elahi และคณะ (2014) เส้นใยแก้วเสริมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (GFRP) ขึ้นรูปด้วย วิธี Hand lay-up โดยใช้ไฟเบอร์กลาส 4 ชั้นเสริมแรงโพลีเอสเตอร์เรซิน และกดภายใต้ น้ำหนัก 5 กิโลกรัมต่อวัน ที่ความร้อนจาก 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปผ่านการอบ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล วัดค่ากำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสแรงดึง รับแรงกระแทก แรง ฉีก และความแข็งแรงของวัสดุ การทดลองแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตมีการปรับปรุง อย่างยอดเยี่ยมจากการอบร้อน ผลของอุณหภูมิที่ต่างกัน ใน GFRP ได้ทำการทดลอง พบว่า GFRP มีความ ไวต่ออุณหภูมิ การให้คอมโพสิตต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันมากที่สุด ใน ขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเดือดจะมีคุณสมบัติทางกลลดลงอย่างมาก ผลกระทบที่มีนัยสำคัญของ อุณหภูมิสามารถนำมาประกอบกับการเปลี่ยนแปลงภายในของการยึดติดของเส้นใยเมทริกซ์ของคอมโพ สิิต และวิวัฒนาการของการเชื่อมต่อของเรซินเนื่องจากความร้อน

Yu Cao และ Jack Cameron (2006) ศึกษาสมบัติการต้านทานแรงดัด และแรงเฉือน ของวัสดุ คอมโพสิต อีพ็อกซีเสริมแรง ด้วยไฟเบอร์กลาสดัดแปลง และอนุภาคซิลิกา โดยการขึ้นรูปขึ้นงานสอง แบบคือแบบใช้ปกติ กับใช้แรงช่วยในการขึ้นรูป แบ่งเป็น 4 แบบการทดลอง คือ

- A อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส ใช้วิธีการขึ้นรูปปกติ
- B อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส และอนุภาคซิลิกา ใช้วิธีการขึ้นรูปปกติ
- C อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงช่วย
- D อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส และอนุภาคซิลิกา ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงเข้ามา ช่วย

การทดสอบแรงดัดงอ โดยใช้เครื่อง -3point bending test และแรงเฉือนโดย short – beam shear test ตามมาตรฐาน ASTM D790 และ D2344 จากผลการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบ ที่เตรียมจากวิธีการขึ้นรูปแบบใช้แรง โดยในแบบ D ที่มีการผสมไฟเบอร์กับอนุภาคซิลิกา ได้คุณสมบัติที่ดี สุดเมื่อเทียบกับขึ้นทดสอบแบบอื่น

Yu Cao และ Jack Cameron (2006) ศึกษาสมบัติการต้านทานแรงกระแทก ของวัสดุคอมโพ สิิต อีพ็อกซีเสริมแรง ด้วยไฟเบอร์กลาสดัดแปลง และอนุภาคซิลิกา โดยการขึ้นรูปขึ้นงานสองแบบคือ แบบใช้ปกติ กับใช้แรงช่วยในการขึ้นรูป แบ่งเป็น 4 แบบการทดลอง คือ

- A อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส ใช้วิธีการขึ้นรูปปกติ
- B อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส และอนุภาคซิลิกา ใช้วิธีการขึ้นรูปปกติ
- C อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงช่วย
- D อีพ็อกซี เสริมแรงไฟเบอร์กลาส และอนุภาคซิลิกา ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงเข้ามา ช่วย

การทดสอบแรงอัด โดยวิธี Izod Test ตามมาตรฐาน ASTM D256 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติแรงอัดของแบบ D นั้น ได้ผลดีมากถึง 100% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ A

จะเห็นได้ว่าการศึกษาวัสดุผสมพอลิเมอร์เสริมแรงจำนวนมาก และการใช้ไฟเบอร์กลาส รวมกับเศษกระจก ขึ้นรูปโดยใช้แรงช่วย นั้นทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมดีขึ้น การใช้วัสดุสารเติม และสารเสริมแรงควบคู่กันกับกรรมวิธีดังกล่าว จึงน่าจะทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิเมอร์ชนิดโพลีเอสเตอร์ เหมาะสำหรับชิ้นส่วนบางส่วน เช่น โครงหน้า และท้ายของรถ ฝาครอบล้อ กันโคลน และส่วนตกแต่งภายในของรถโดยสารขนาดใหญ่ได้



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุโพลีเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาสและเศษกระจก ซึ่งเศษกระจกเป็นวัสดุรอกการนำส่งไปขึ้นรูปใหม่ จึงทำให้ต้องเสียพื้นที่การทำงานบางส่วนเพื่อจัดเก็บ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเศษกระจกมาเสริมแรงในส่วนองงานไฟเบอร์กลาสที่มีต้นทุนการผลิตสูง และศึกษาสมบัติเชิงกล ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร เมื่อเทียบกับการใช้ไฟเบอร์กลาสเสริมแรงเพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษาแนวทางที่จะนำวัสดุรีไซเคิลจากเศษกระจกไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

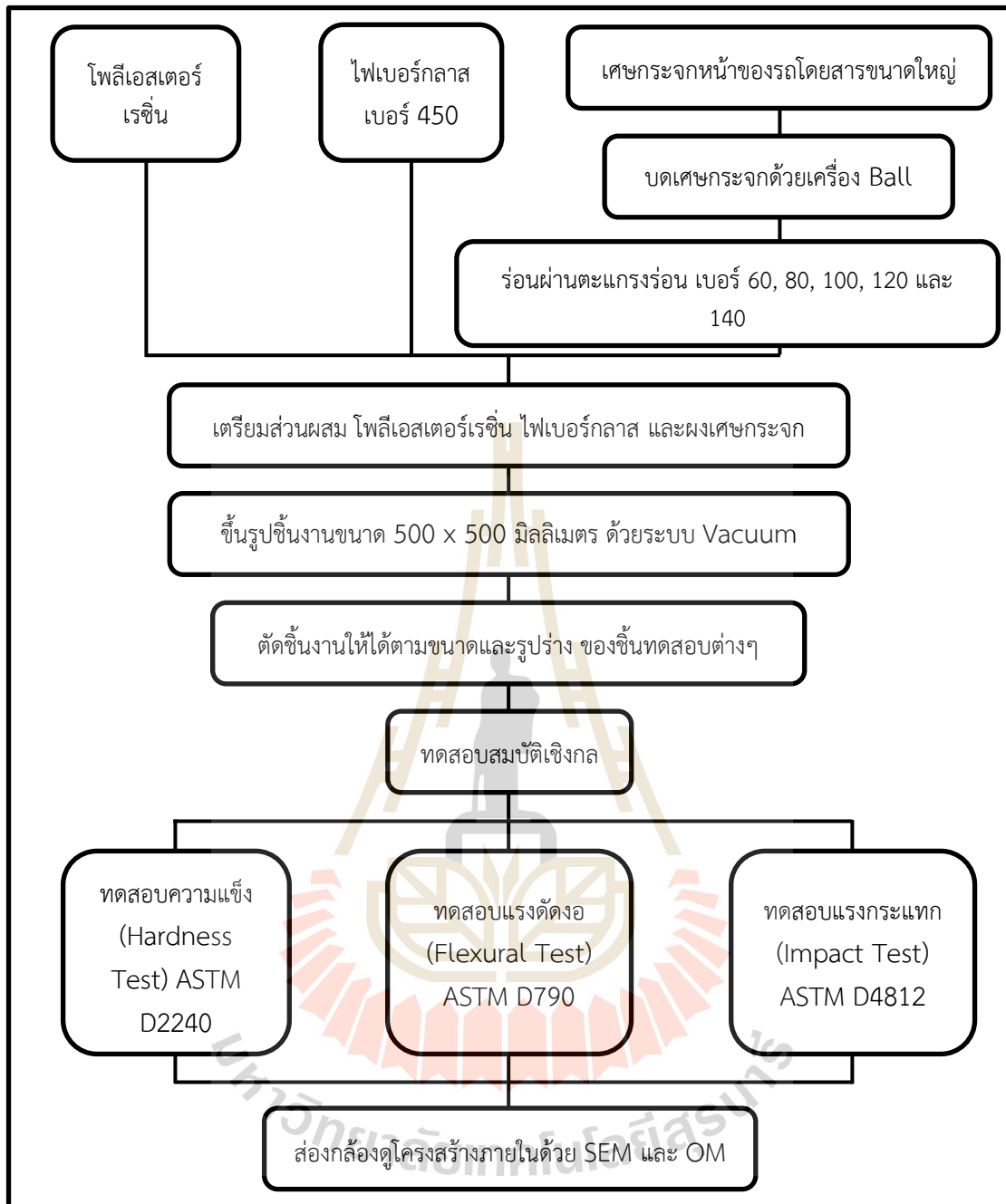
โพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นสารหลัก ซึ่งเป็นเมทริกซ์ ของการทดสอบนี้ ทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรง คือไฟเบอร์กลาสและเศษกระจก

ไฟเบอร์กลาสแบบ chopped stand mat เบอร์ 450 ซึ่งโดยปกติโรงงานจะมีการใช้ไฟเบอร์กลาสขึ้นรูปจำนวน 3 ชั้น เพื่อให้ชิ้นงานมีความหนาตามที่ต้องการ และความแข็งแรง ที่ทนต่อแรงกระแทกได้ตามมาตรฐานความปลอดภัยการชนกระแทกด้านหน้า (ECE Regulation No.29) แต่การใช้ไฟเบอร์กลาสเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการต้นทุนการทำงานที่สูง ในงานวิจัยนี้จะมีการใช้ไฟเบอร์กลาสเพียง 2 ชั้น และทดแทน 1 ชั้นด้วยเศษกระจก

เศษกระจกนี้ได้มาจากเศษกระจกหน้าของรถโดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นกระจกนิรภัย นำมาทำการบด และเติมทดแทนไฟเบอร์กลาส เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาทดแทนการใช้ไฟเบอร์กลาส โดยจะมีการศึกษาที่หลายขนาดอนุภาค และการทดแทนที่น้ำหนักไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น น้อยกว่า และมากกว่า

3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย เริ่มต้นจากการเตรียมวัสดุหลักของงานวิจัยนี้ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Infusion แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปเตรียมทำชิ้นทดสอบ และทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต่างๆ รวมถึงการดูสัดส่วนวิทยาของชิ้นงานนั้น แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

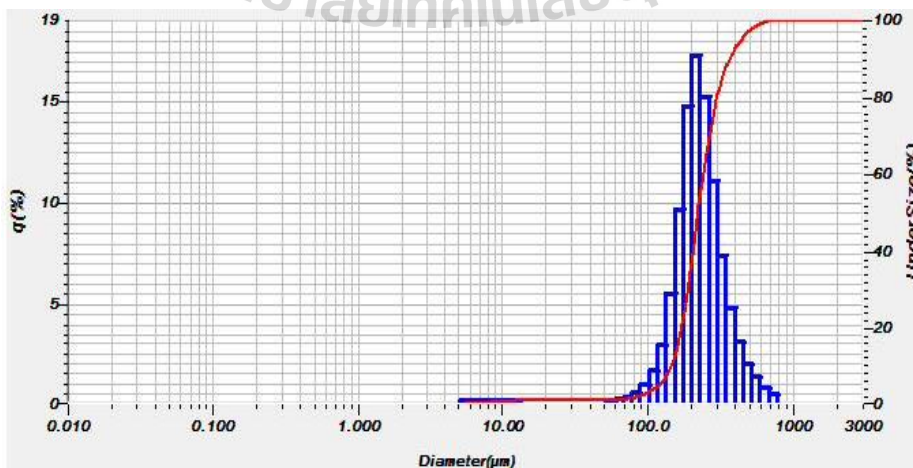
3.2.1 การเตรียมเศษกระจก

เศษกระจกในงานวิจัยนี้ ได้มาจากเศษกระจกหน้ารถโดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นกระจกนิรภัย ที่มีชั้นฟิล์มพอลิเมอร์อยู่ตรงกลาง โดยเริ่มจากนำมาแยกพอลิเมอร์ออก แล้วส่วนที่เป็นกระจกนำมาบด บดด้วยเครื่องบดละเอียด ball mill โดยใช้ระยะเวลาการบดครั้งละ 30 นาที

หลังจากการบด นำไปร่อนด้วยตะแกรงเพื่อคัดขนาด โดยใช้ตะแกรงร่อน ตามมาตรฐาน ASTM E11 โดยตะแกรงร่อนที่ใช้มีขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกันตามเบอร์ของตะแกรง ในการทดลองนี้จะใช้ ตะแกรงร่อนเบอร์ 60, 80, 100, 120 และ 140 เรียงตามขนาดช่องใหญ่สุดไว้ด้านบนบนโล่งมาช่องเล็กสุดอยู่ด้านล่าง และทำการเขย่าตะแกรงด้วยเครื่องร่อน ตะแกรง Vibratory sieve shaker ANALYSTTE 3 PRO เป็นเวลา 10 นาที แอมพลิจูด 1.5 มิลลิเมตร

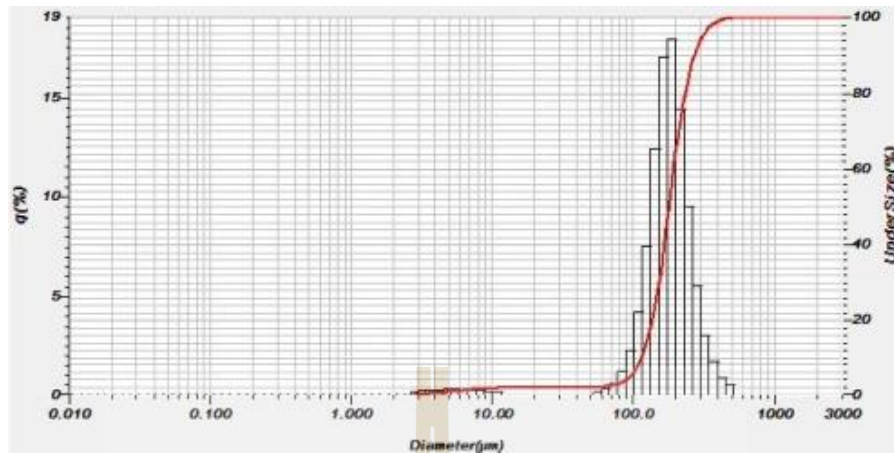
เมื่อบดได้ปริมาณที่เพียงพอต่อการทดสอบ นำไปวัดขนาดอนุภาค โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์(Laser particle size analyzer) Horiba LA – 950V2 ซึ่งเครื่องนี้สามารถวัดขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของสารที่เป็นผงแห้ง หรือสารแขวนลอย โดยในวัดขนาดอนุภาคนั้นจะใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ใส่เศษแบบผุ่นลงไปใ้ในภาชนะที่มีเอทานอล มีแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กควรวนให้เศษแบบผุ่นฟุ้งกระจายอยู่เสมอ และจะมีการยิงเลเซอร์ใส่อนุภาคในเอทานอล เพื่อวัดขนาด และการกระจายตัว ผลจากการวัดขนาดอนุภาค และการกระจายตัว

เพื่อให้ครอบคลุมขนาดอนุภาคในช่วงที่ต้องการนำมาใช้งาน จากเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ของ ดร. อารี ธนบุญสมบัติ และคณะ (2545) ได้ระบุว่าในวัสดุเซรามิก การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของผง เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของผง การไหล การอัดตัว การเกิดปฏิกิริยา และผลกระทบต่อโครงสร้างของชิ้นงานที่สำเร็จแล้ว จึงต้องควบคุมขนาดอนุภาคด้วย 2 วิธีการขึ้นไป ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการ ร่อนผ่านตะแกรง และวัดขนาดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค ซึ่งผลของช่วงอนุภาคที่ได้ แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยที่ความสูงของกราฟจะแสดงขนาดอนุภาคในช่วงขนาดต่างๆ ค่าเฉลี่ย และค่ามัธยฐาน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 อยู่ในช่วงของขนาดที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ปัจจัยการส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ

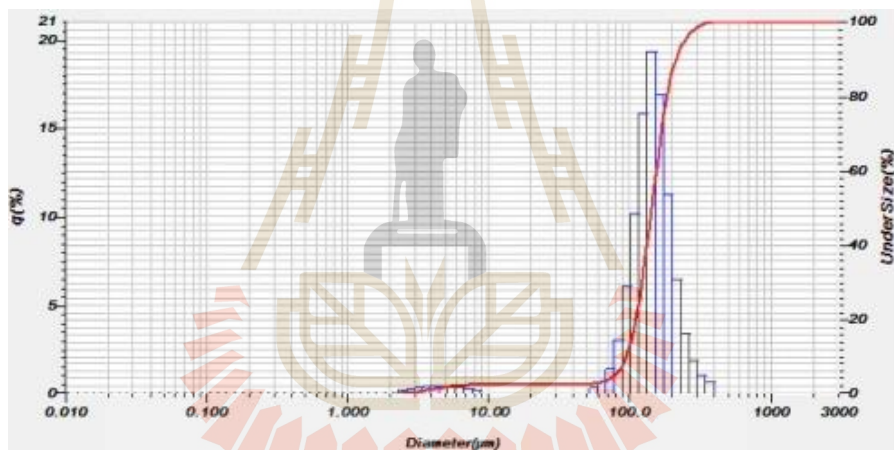


ก) ผ่านตะแกรงเบอร์ 60

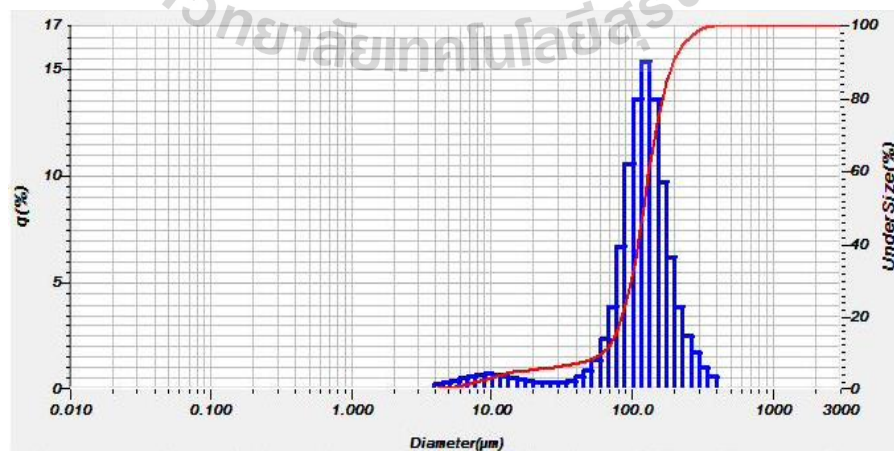
รูปที่ 3.2 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของเศษกระจกที่ผ่านตะแกรงร่อนต่างๆ



ข) ผ่านตะแกรงเบอร์ 80

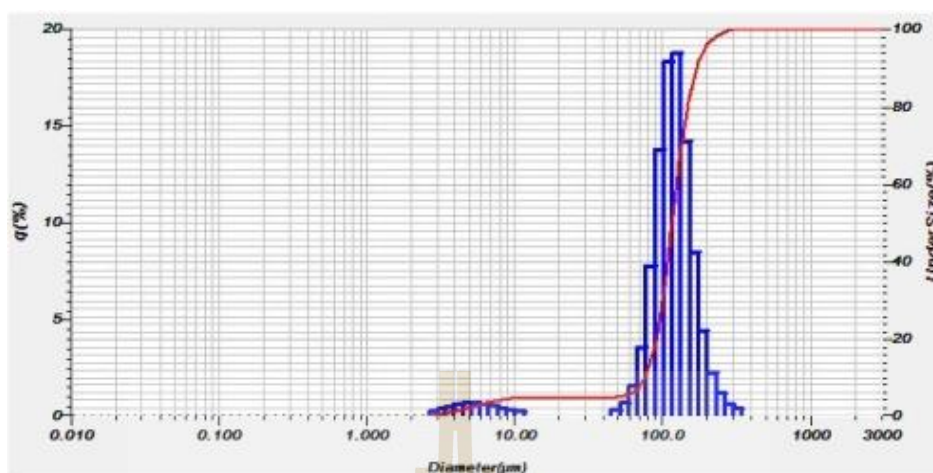


ค) ผ่านตะแกรงเบอร์ 100



ง) ผ่านตะแกรงเบอร์ 120

รูปที่ 3.2 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของเศษกระจกที่ผ่านตะแกรงร่อนต่างๆ (ต่อ)



จ) ผ่านตะแกรงเบอร์ 140

รูปที่ 3.2 ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของเศษกระจกที่ผ่านตะแกรงร่อนต่างๆ (ต่อ)

ตารางที่ 3.1 ขนาดอนุภาคของเศษผงกระจก

ผ่านตะแกรงเบอร์	60	80	100	120	140
	ขนาดอนุภาคของผงกระจก (µm)				
ค่าเฉลี่ย (Mean)	240.66	186.62	148.64	125.74	108.91
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	100.60	68.93	53.53	59.45	45.18
ค่ามัธยฐาน (Median)	221.35	178.65	143.34	120.74	106.15

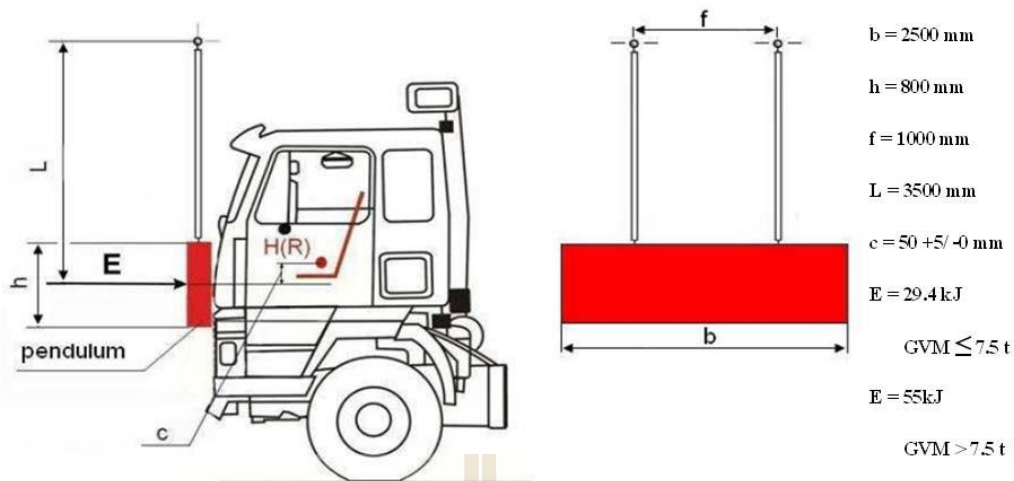
3.2.2 การออกแบบการทดลอง และเตรียมการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

โดยทั่วไปโพลีเอสเตอร์เรซินมักใช้กับเส้นใยแก้วสับอีกลาส (Chopped E-glass fiber) และเส้นใยเสริมแรง (reinforcing fibers) ชนิดอื่นๆ ได้แก่ เส้นใยแก้วเอสกลาส (S-glass fiber) เส้นใยอะรามิด (aramid fiber) และคาร์บอนไฟเบอร์ (carbon fiber) ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติโดยทั่วไป ที่สำคัญของโพลีเอสเตอร์และคอมโพสิตจากโพลีเอสเตอร์กับสารเสริมแรงต่างๆ จากงานวิจัยของปทุมณีวิช สถาปิยะคุณ (2557)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของโพลีเอสเตอร์และคอมโพสิตของโพลีเอสเตอร์กับสารเสริมต่างๆ

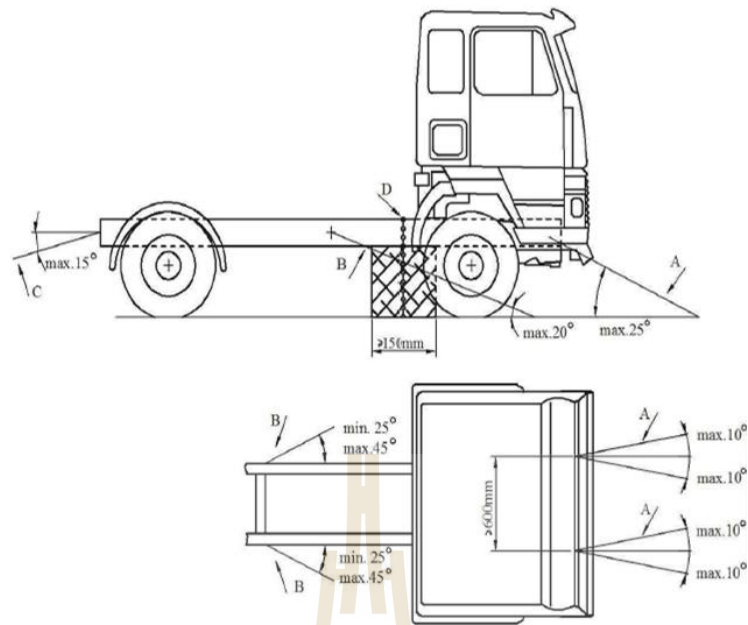
สมบัติเชิงกล	ไม่มีสาร แต่งเติม	Chopped roving-filled	เสริมแรง ด้วยใยแก้ว
ความทนแรงดึง Tensile Strength (MPa)	40	60	70
ความยืดหยุ่นของพลาสติก % Elongation	5	2	1
ความทนแรงดัดงอ Flexural Strength (MPa)	80	100	85
ความทนแรงอัด Compressive Strength (MPa)	60	150	170
ความทนแรงกระแทก Notched Izod Impact (J/m)	20	200	200
ความยืดหยุ่นของพลาสติก % Elongation	5	2	1
สัมประสิทธิ์การขยายตัว $\text{cm/cm}^\circ\text{C} \times 10^{-5}$	5	2.5	2.5
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	1.6	2

ปกติโรงงานจะใช้ไฟเบอร์กลาสในการขึ้นรูป 3 แผ่น ทั้งงานภายในจะเน้นวัสดุที่แข็งแรงทนต่อรอยขีดข่วน เพื่อให้เกิดความสวยงามของภายในรถอยู่ตลอด และที่งานภายนอกที่ต้องทำชิ้นส่วน เพื่อให้ได้มาตรฐานตามที่อุตสาหกรรมกำหนด โดยยึดหลักข้อกำหนดของ UNECE Regulation No. 29 เป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างส่วนหน้ายานพาหนะที่ใช้ขนส่งสินค้า เช่น รถบรรทุก และรถบรรทุกพ่วง แต่ไม่ครอบคลุมถึงรถจักรยานการเกษตร และรถแทรกเตอร์ โดยจะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพิจารณาความปลอดภัยในการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งตามมาตรฐานจะมาตรฐานจะทดสอบทั้งหมด 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (Test A) ความแข็งแรงของหลังคา (Test B) และความแข็งแรงของผนังด้านหลัง (Test C) ในส่วนของงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบการชนด้านหน้า (Test A) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตรถโดยสารขนาดใหญ่ต้องปฏิบัติตาม (ศราวุธ บัวงาม, 2557) โดยรายละเอียดดังนี้



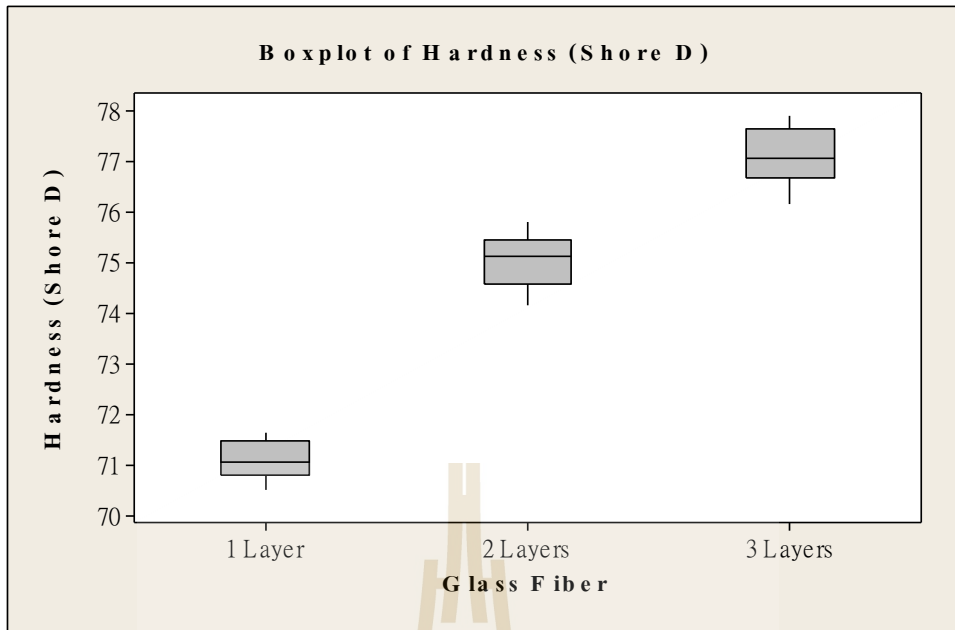
รูปที่ 3.3 รายละเอียดการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐาน ECE Regulation No.29

การทดสอบแบบกระแทกด้านหน้าที่มีผลต่อความแข็งแรงโครงสร้างที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ECE Regulation No.29 ซึ่งมาตรฐานได้กำหนดการตรวจสอบโดยให้ใช้การแกว่งของมวลเข้ากระแทกกับโครงสร้าง และพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างตัวถัง ซึ่งกำหนดให้วัสดุมวลกระแทกมีน้ำหนัก $1,500 \pm 250$ กิโลกรัม และมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และหน้าสัมผัสแบนราบ รวมทั้งมีการกำหนดขนาด ความกว้าง 2,500 มิลลิเมตร และสูง 800 มิลลิเมตร บริเวณขอบมีรัศมีอย่างน้อย 1.5 มิลลิเมตร โดยตุ้มน้ำหนักถูกแขวนห่างจากคานเป็นระยะ 3,500 มิลลิเมตร โดยวัดจากเส้นแนวแกนของคานถึงจุดศูนย์กลางมวลของตุ้มน้ำหนัก และจุดศูนย์กลางมวลอยู่ต่ำกว่าสะโพกผู้ขับขี่ $50+5/-0$ มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยที่ในมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดพลังงานทดสอบได้จากการแกว่งมวลเข้ากระแทกโครงสร้างมีค่าเป็น 29.4 กิโลจูล สำหรับรถมีน้ำหนักรวมไม่เกิน 7,500 กิโลกรัม และ 55 กิโลจูล สำหรับรถที่มีน้ำหนักเกินกว่าที่กำหนดไว้สำหรับการติดตั้งโครงสร้างรถเพื่อทดสอบการชนกระแทกด้านหน้ากำหนดให้ใช้โช้ที่สามารถรับแรงได้ 10 ตัน และที่ฐานของโครงสร้างรองด้วยกล่อ่งไม้ที่มีขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ ความกว้างของโครงสร้างรถ โดยที่ด้านหน้าของโครงสร้างรถยึดด้วยโช้ทำมุมไม่เกิน 25 องศา กับแนวระดับ และทำมุมกับแกนตามยาวของโครงสร้างรถไม่เกิน 10 องศา เมื่อมองจากด้านบน ส่วนด้านข้างยึดด้วยโช้ทำมุมไม่เกิน 20 องศา กับแนวระดับ และทำมุมกับแกนตามยาวของโครงสร้างรถในช่วง 25 องศา ถึง 45 องศา เมื่อมองจากด้านบน และด้านท้ายยึดด้วยโช้ทำมุมไม่เกิน 15 องศา กับแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

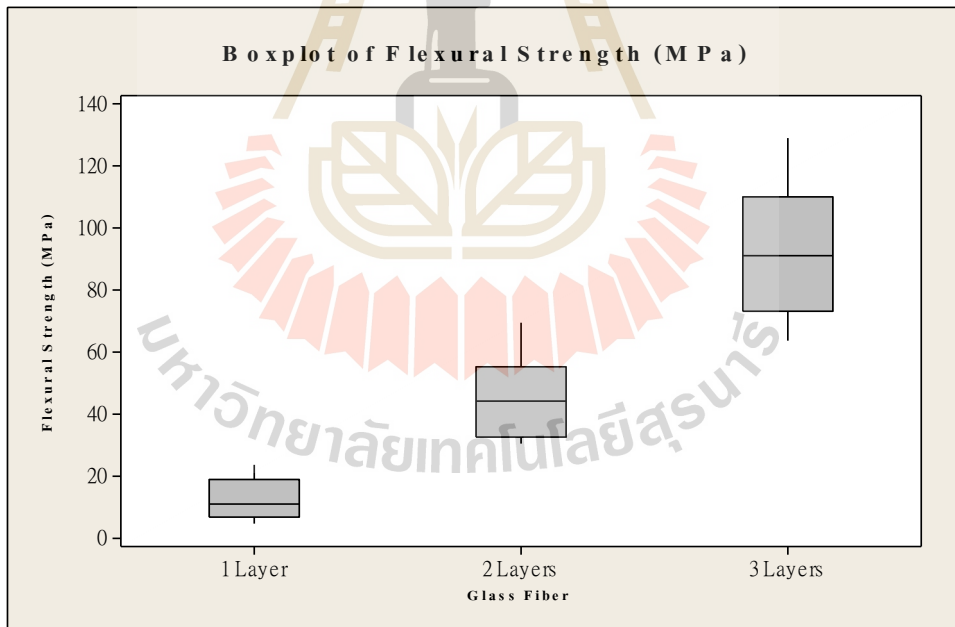


รูปที่ 3.4 การติดตั้งโครงสร้างรถสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ECE Regulation No.29

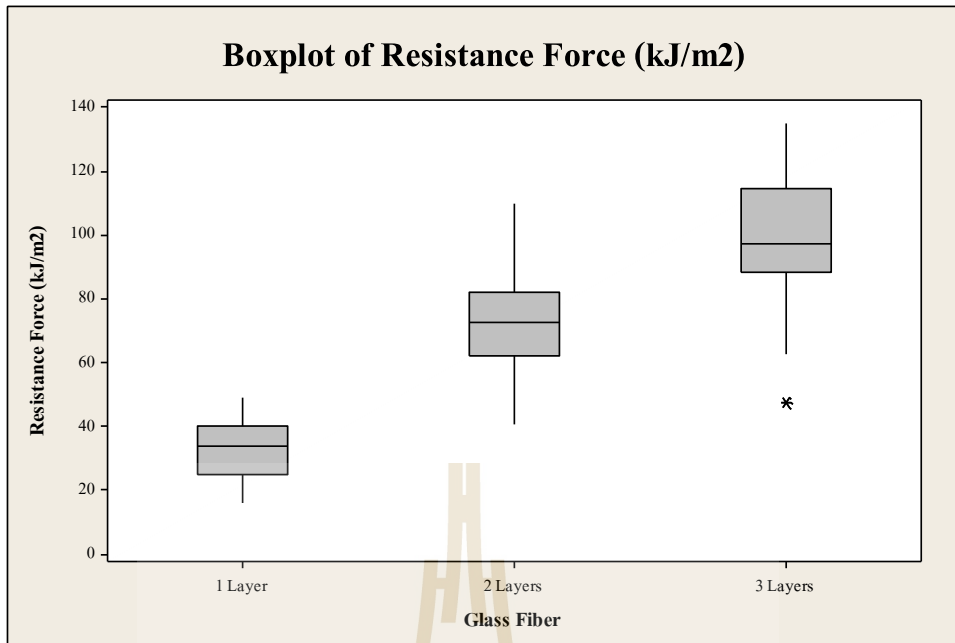
ในการวิจัยนี้จึงเริ่มจากการทดสอบผลของความแข็งแรง ความแข็งแรงของวัสดุที่ทนต่อแรงดัดงอ และความแข็งแรงของวัสดุที่ทนต่อแรงกระแทกของวัสดุโพลีคาร์บอเนตที่โรงงานใช้ เพื่อศึกษาถึงการใช้งานไฟเบอร์ 1, 2 และ 3 ชั้น ส่งผลต่อการใช้งานของวัสดุที่เกี่ยวกับชิ้นส่วนของรถโดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มไฟเบอร์กลาส จะเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรงของวัสดุที่ทนต่อแรงดัด และแรงกระแทกได้เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5 - 3.7 ซึ่งแรงกระแทกของไฟเบอร์กลาส 3 แผ่นนั้นมีความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกได้มากกว่ามาตรฐาน ECE Regulation No. 29 กำหนด และความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอก็มีค่าที่อยู่ในช่วงของสมบัติเชิงกลคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยแก้ว ดังตารางที่ 3.2 แต่เมื่อมีการใช้งานไฟเบอร์กลาสในปริมาณที่มาก จะทำให้เกิดชิ้นส่วนที่มีต้นทุนการผลิตสูง จึงจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุทดแทนที่ทำให้ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ปัจจุบัน



รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบแรงดัดงอ



รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

การเตรียมส่วนผสมในการทดลอง จากหนังสือไฟเบอร์กลาส ด้วยวิธี Hand Lay Up และคอมโพสิต ของสมาคมไทยคอมโพสิต (2551) ดังนี้

1. ไฟเบอร์กลาสที่ใช้เบอร์ 450 (1 ตารางเมตรมีน้ำหนักไฟเบอร์ 450 กรัม) กว้าง และยาว 50 เซนติเมตร

2. โพลีเอสเตอร์เรซินที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 ตารางเมตร จะคำนวณมาจาก พื้นที่การทำงาน 1 ตารางเมตร ใช้ไฟเบอร์กลาสเบอร์ 450 จำนวน 3 ชั้น และความถ่วงจำเพาะของโพลีเอสเตอร์เรซิน 1.8 จะใช้ โพลีเอสเตอร์ 2,430 กรัมต่อตารางเมตร

3. เจลโค้ท (Gel Coat) คือส่วนที่ปิดผิวของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส มีลักษณะคล้ายแป้งเปียก ทำให้ผิวเรียบมัน มีสีสวย และปกปิดไม่ให้เห็นใยแก้ว อัตราส่วนผสมที่ใช้ คือ เจลโค้ท + โคบอลต์ 0.2% + สี 15 - 20 % + ตัวทำให้แข็ง 0.5 - 2.0% + สไตรีนโมโนเมอร์ 15 - 20%

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา ต่างๆ

- สไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene Monomer) เป็นตัวทำละลายที่เสริมการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้เหลวขึ้น และสะดวกในการพ่นหรือทา ใช้ผสมในโพลีเอสเตอร์ และเจลโค้ท ประมาณ 10 - 20% ของ น้ำหนักเรซิน

- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือโคบอลต์ (Cobalt) เป็นสารเคมีสีม่วง ที่ใช้ร่วมกันกับตัวทำให้แข็ง โดยจะเติมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับเรซินก่อน แล้วจึงเติมตัวทำให้แข็งลงไป โดยปกติอัตราส่วนผสมที่ใช้ผสมในเรซินประมาณ 0.5 - 2% ต่อน้ำหนักเรซิน แต่สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการการไหลตัวของเรซินมาก ที่สุดก่อนที่ส่วนผสมจะเป็นวุ้น จึงมีการใช้ในปริมาณที่น้อย เพียง 0.5% ต่อน้ำหนักเรซิน

- ตัวทำให้แข็ง (Hardener) โดยตัวทำแข็งที่นิยมใช้คือ MEKP (METHYL ETHYL KETONE PEROXIDE) เรียกกันทั่วไปว่า บูทาน็อก เอ็ม 50 (BUTANOX M50) เพื่อให้เรซินแข็งตัว ใช้เพียง 1% ต่อน้ำหนักเรซิน

- สี เติมเฉพาะในเจลโค้ท เพื่อให้เป็นสีเมื่อขึ้นรูปเสร็จ สามารถนำไปใช้ได้เลย ไม่ต้องทำสีใหม่

5. เศษกระจก เป็นเศษกระจกที่ผ่านการบด และร่อนแยกขนาด ให้ได้ขนาดอนุภาค 108, 125, 148, 186 และ 240 ไมโครเมตร และจะมีการใช้เศษกระจกแทนไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น โดยจะมีการให้เติมเศษกระจกที่น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร

โดยมีการออกแบบการทดลองทั้งหมด ดังตารางที่ 3.3



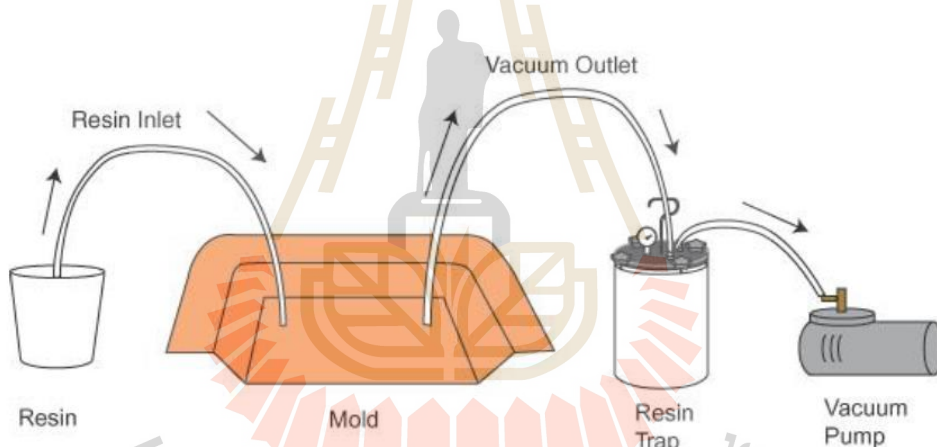
ตารางที่ 3.3 แสดงการออกแบบการทดลอง

โพลีเอสเตอร์เรซิน (g/m ²)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (g/m ²)	เจลโค้ท (ความหนา 0.5 มม.) (g/m ²)	ไฟเบอร์กลาส (No. of layer)	เศษกระจก	
				น้ำหนัก (g/m ²)	ขนาด (μm)
2,430	24.3	815.1	2	350	108
					125
					148
					186
					240
2,430	24.3	815.1	2	400	108
					125
					148
					186
					240
2,430	24.3	815.1	2	450	108
					125
					148
					186
					240
2,430	24.3	815.1	2	500	108
					125
					148
					186
					240
2,430	24.3	815.1	2	550	108
					125
					148
					186
					240

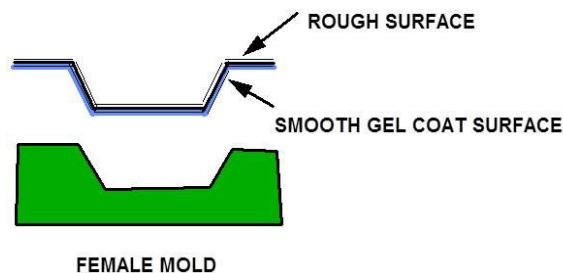
3.2.3 การขึ้นรูปขึ้นทสดอบด้วยระบบ Infusion Vacuum

โดยการขึ้นรูปขึ้นทสดอบนั้น ใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยระบบ Infusion Vacuum เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิตคุณภาพสูง ข้อดี คือ คุณภาพที่สูงขึ้น มีความสม่ำเสมอของชิ้นงาน สามารถนำไปใช้ได้ทันที ประหยัดเวลาในการตกแต่ง และต้นทุนผลิตต่ำลง

กระบวนการ Vacuum Infusion ใช้สุญญากาศ เพื่อให้เรซินไหลลงในงาน ขึ้นตอนแรกคือการวางเส้นใยแก้ว และแผ่นเศษกระจกลงในแม่พิมพ์ โดยเศษกระจกที่เราเตรียมไว้จะถูกนำมาแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน โดยจะพันลงบนแผ่นไฟเบอร์ ที่หัวพรีรัคมี 20 เซนติเมตร พันจากทางด้านซ้ายของโมลด์ไปทางด้านขวา ในอัตราเร็ว 5 วินาทีต่อ 1 รอบ (ความกว้างและยาวของโมลด์ 60 เซนติเมตร) หลังจากนั้นปิดด้านบนด้วยไฟเบอร์กลาสอีก 1 แผ่น และตามด้วยผ้าลอกลาย ตาข่ายนำเรซิน ปิดผนึกโดยถุงสุญญากาศ โดยต่อทางเข้าเรซินบริเวณด้านซ้ายของโมลด์ และทางออกสู่อุปกรณ์สุญญากาศทางด้านขวาของโมลด์ โดยจะทำให้ภายในโมลด์เป็นสุญญากาศก่อนปล่อยเรซินเข้าสู่โมลด์ ซึ่งลักษณะการติดตั้ง เป็นดังรูปที่ 3.8 เมื่อเรซินไหลเข้าจนหมด จะปิดทางเข้าเพื่อให้มีการปั๊มนำเรซินส่วนเกินออก จะเปิดปั๊มให้ทำงานร่วมในการทดลองต่ออีก 30 นาที จึงจะปิดแล้วชิ้นงานเป็นสุญญากาศด้วยตัวเอง และแห้งตัว อีกประมาณ 18 - 20 ชม. แล้วจึงนำออกจากโมลด์ จะได้ลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 3.9



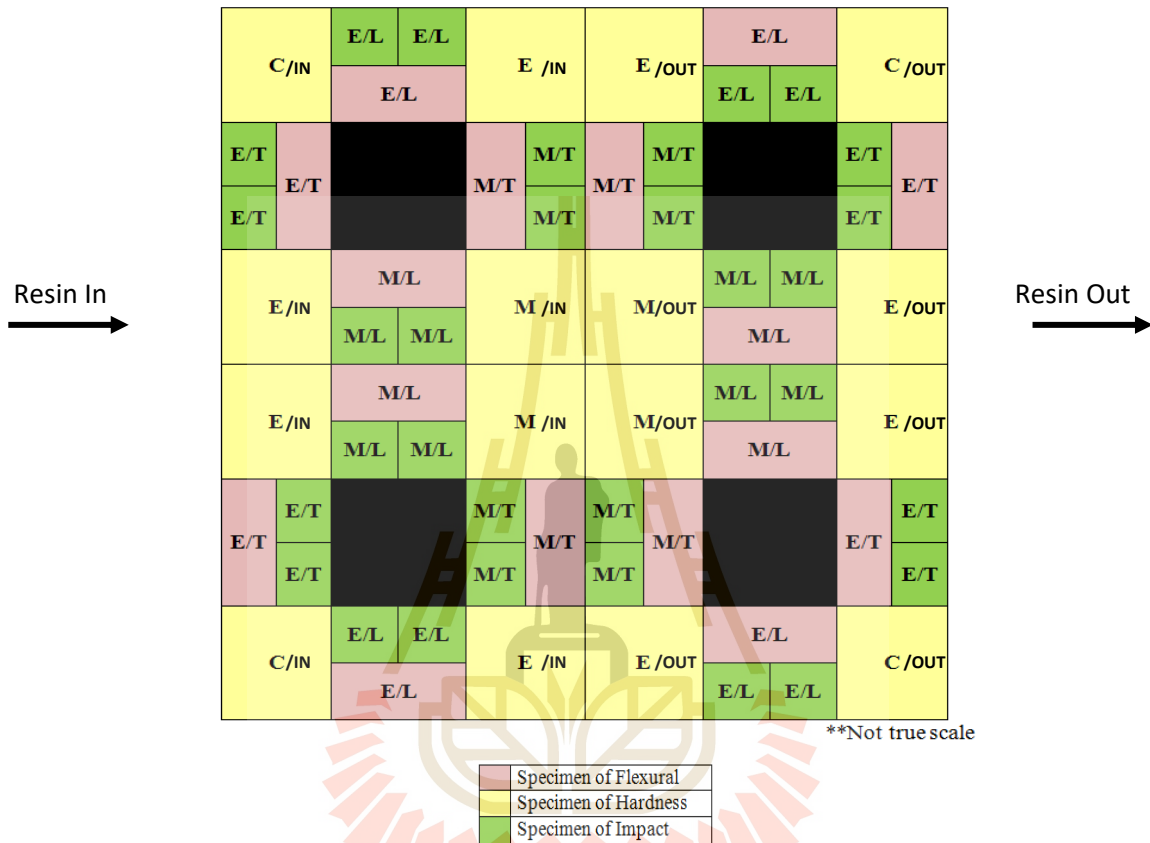
รูปที่ 3.8 การติดตั้งระบบ Infusion Vacuum (performancecomposites, Inc.)



รูปที่ 3.9 ลักษณะของขึ้นทสดอบที่ขึ้นรูปด้วยระบบ Infusion Vacuum

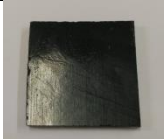

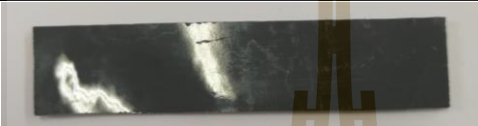
3.2.4 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ชิ้นรูปชิ้นงานขนาดกว้าง 500 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาตัดชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องเลื่อยสายพานตามมาตรฐานต่างๆ ซึ่งในการตัดชิ้นทดสอบในตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน เพื่อดูการกระจายตัววัสดุคอมโพสิตที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ดังรูปที่ 3.10 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของชิ้นทดสอบ

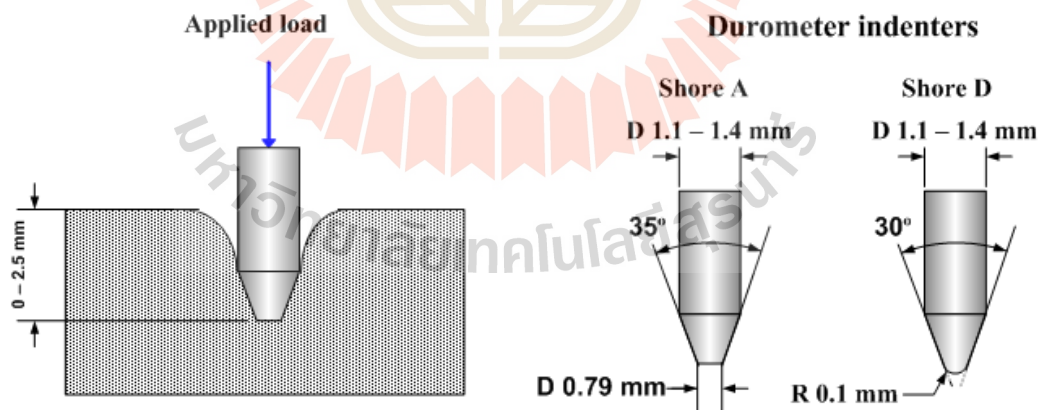
ตารางที่ 3.4 ขนาดของชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ

การทดสอบ	ชิ้นทดสอบ	ขนาด (มิลลิเมตร)		
		กว้าง	ยาว	หนา
ความแข็ง		25.4±0.4	25.4±0.4	3.0±0.3
แรงดัดงอ		12.7±0.2	127±4.0	3.0±0.3
แรงกระแทก		12.7±0.2	63.5±2.0	3.0±0.3

3.2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1) การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งชิ้นทดสอบมีขนาดกว้าง และ ยาว 25.4 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ในการทดสอบนี้จะใช้หัวกดแบบ Shore D ดังรูปที่ 3.11 ด้วย เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Testing Machine, DUROTECH, BENCH STAND, Model BS550) จะสุ่มกดทั่วชิ้นงาน 5 จุดต่อชิ้นทดสอบ โดยชิ้นทดสอบเงื่อนไขละ 16 ชิ้น



รูปที่ 3.11 การทดสอบความแข็ง

2) การทดสอบแรงดัดงอ (Flexural Test)

โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งชิ้นทดสอบเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 127 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่องเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, INSTRON model 5565) ขนาดโหลดเซลล์ 5 kN ที่อุณหภูมิต้อง ดังรูปที่ 3.12 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดงอ (Flexural Strength) โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้

ระยะห่างจุดรองรับ (Support span length)	48	มิลลิเมตร
ความเร็วในการทดสอบ (Crosshead speed)	5	มิลลิเมตรต่อนาที
จำนวนชิ้นทดสอบต่อหนึ่งเงื่อนไข	16	ชิ้น



รูปที่ 3.12 การทดสอบแรงดัดงอ

3) การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

การทดสอบแรงกระแทก แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D4812 โดยชิ้นทดสอบเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 63.5 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร ไม่ต้องทำรอยบาก (Unnotched) ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact testing machine, INSTRON (CEAST)/CEAST 9050) ที่อุณหภูมิต้อง ภาระกรรมที่ใช้ (Energy Load) 11.0 จูลล์ ดังรูปที่ 3.13 โดยชิ้นทดสอบแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 32 ชิ้น



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงกระแทก และลักษณะการจับชิ้นงานทดสอบ

3.2.6 การทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่มีกำลังขยายสูง โดยใช้คลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงทำให้มีความสามารถในการแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง $0.2 \mu\text{m}$ ส่องกราดไปบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบในการสร้างภาพในแนวลึกและแนวระนาบ โดยมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 10 - 500,000 เท่า ซึ่งในงานวิจัยนี้ นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก จนเกิดการแตกหัก เพื่อที่จะนำภาพถ่ายของอนุภาคเศษกระจุก มาดูการกระจายตัวในแผ่นทดสอบ ซึ่งชิ้นตัวอย่างมีขนาดกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร สูงไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบด้วยทอง ถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM (JSM, model 6010 LA) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optimal microscope; OM) กล้องที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ ส่องไปที่วัตถุก่อนที่แสงจะส่องผ่านเข้าสู่ตา จะทำให้เราเห็นภาพได้โดยการมองผ่านเลนส์ Eyepiece ดังแสดงในรูปที่ 3.15

มีหลายชนิด โดยจะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน เช่น

- Biological Microscope สำหรับงานทางด้านชีววิทยา
- Metalogical Microscope สำหรับงานด้านชีววิทยา
- Stereo Microscope สำหรับงานอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น งานอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)



บทที่ 4

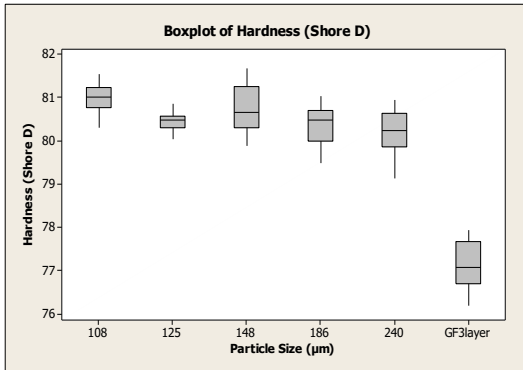
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการดำเนินการนำเศษกระจกมาประยุกต์กับงานไฟเบอร์กลาส โดยนำเศษกระจกมาบดให้ละเอียดร่อนผ่านตะแกรงนำมาให้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ตามอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน โดยขึ้นรูปด้วยระบบ Vacuum Infusion ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ประกอบด้วย การทดสอบความแข็ง การทดสอบแรงดัดงอ และการทดสอบแรงกระแทก ซึ่งการทดสอบจะแบ่งตามขนาดอนุภาคของเศษกระจก ที่มีการเติมส่วนผสมน้ำหนักรของเศษกระจกที่ต่างกัน ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

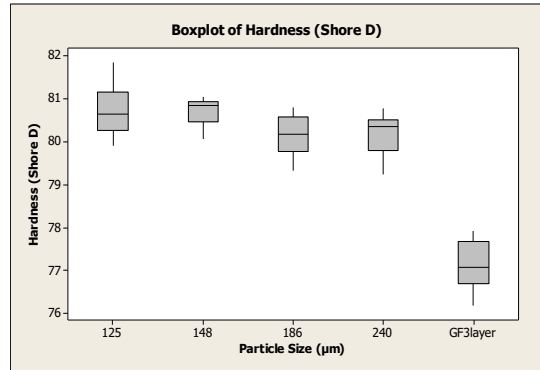
4.1 ผลการทดสอบความแข็ง

จากผลการทดลองความแข็งทั้งหมดเทียบกับชิ้นงานที่โรงงานใช้อยู่ ที่ใช้ไฟเบอร์กลาส 3 ชั้นนั้น ชิ้นทดสอบที่ขึ้นในงานวิจัยนี้มีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่โรงงานใช้อยู่ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากงานวิจัยของ Omyma El-Kady และ Adel Fathy (2014) ที่ทำการวิจัยผลกระทบวัสดุนาโนคอมโพสิต ทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของขนาดอนุภาค SiC อัดลงในอลูมิเนียมเมทริกซ์ กล่าวไว้ในงานวิจัยว่า เมื่อเพิ่มอนุภาค SiC ความแข็งดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับการใช้อลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bakir Unlu (2008), Kuen-Ming Shu กับ Georgechia Tu (2003), Efe Celebi และคณะ (2010), Jianhua Zhu และคณะ (2004) ที่ศึกษาว่าถ้าอนุภาคเซรามิกเพิ่มมาในเมทริกซ์จะส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น

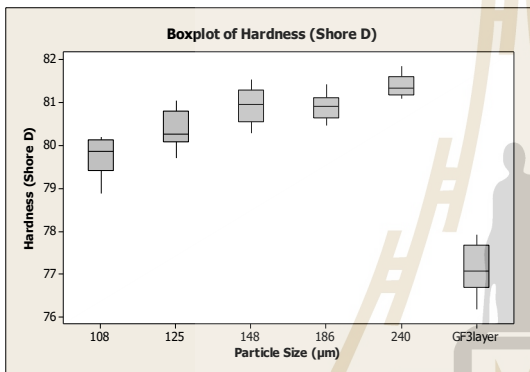




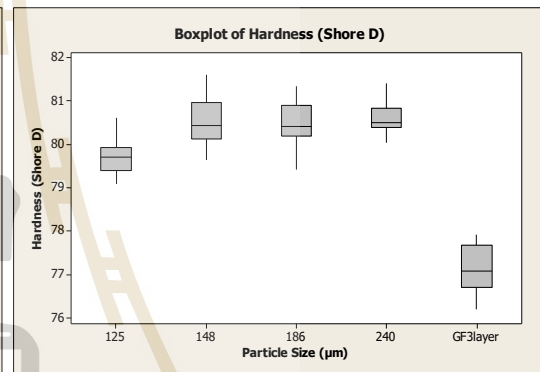
ก) เดิมอนุภาคที่น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร



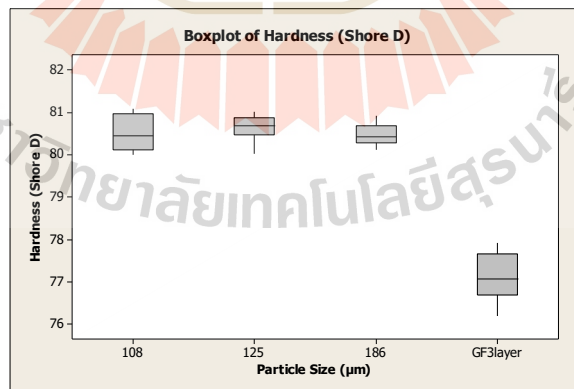
ข) เดิมอนุภาคที่น้ำหนัก 400 กรัมต่อตารางเมตร



ค) เดิมอนุภาคที่น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร

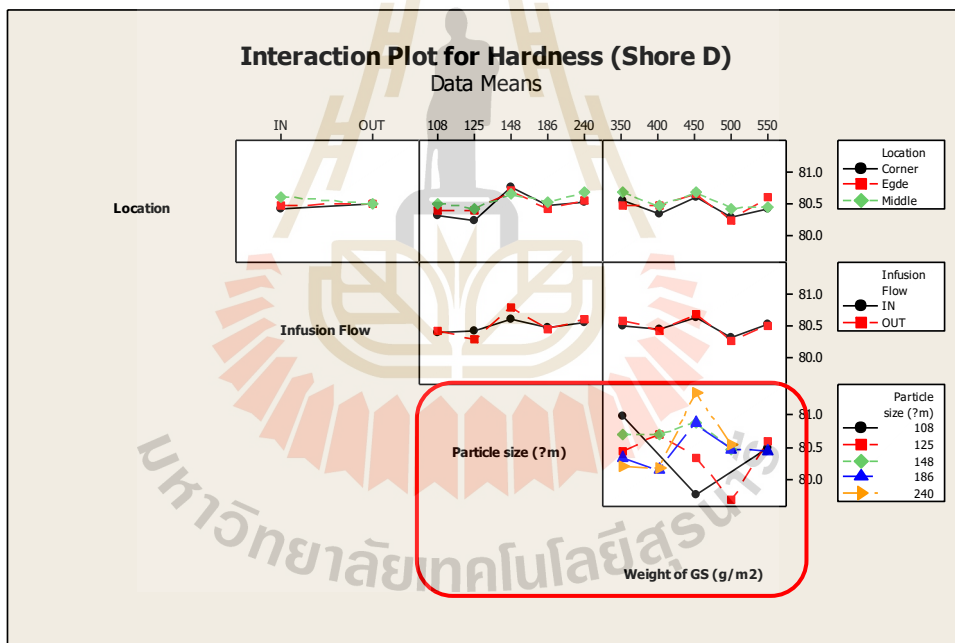
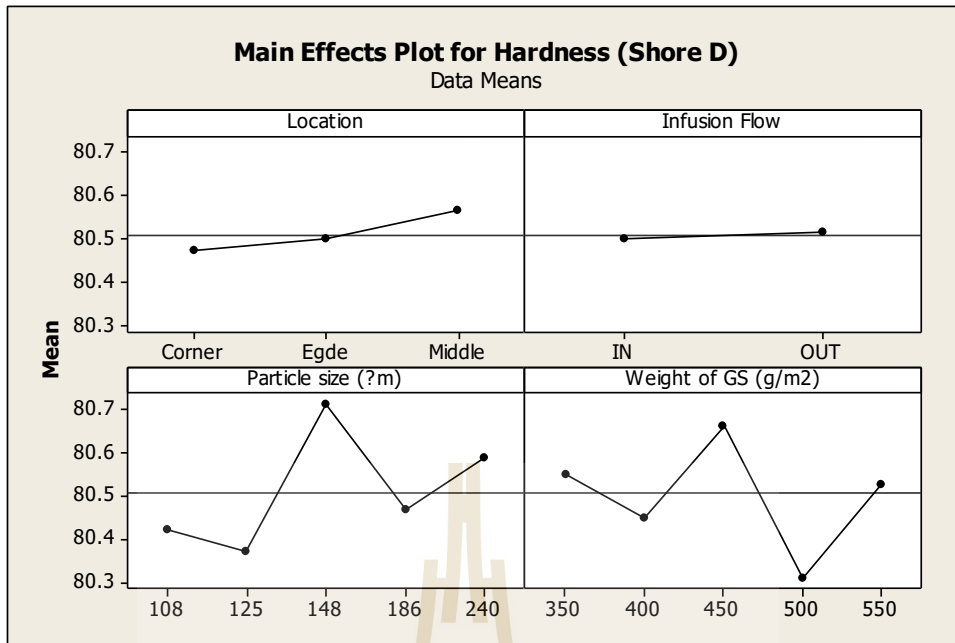


ง) เดิมอนุภาคที่น้ำหนัก 500 กรัมต่อตารางเมตร



จ) เดิมอนุภาคที่น้ำหนัก 550 กรัมต่อตารางเมตร

รูปที่ 4.1 ค่าความแข็ง (Hardness) ของการทดสอบชิ้นงานที่เติมเศษกระจก ที่น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร ที่ขนาดอนุภาคของเศษกระจกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์โดยรวมด้วยวิธี DOE ของ Hardness

จากรูปที่ 4.2 การทดสอบความแข็งที่ปัจจัยต่างๆ จะเห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อการทดสอบ คือ ปัจจัยหลัก ได้แก่ ขนาดอนุภาคของเศษกระจก และน้ำหนักของเศษกระจก ส่วนปัจจัยรองคือตำแหน่งของชั้นทดสอบ จะไม่ส่งผลมาก แสดงว่าทั่วทุกบริเวณของชิ้นงานมีความแข็งใกล้เคียงกัน และทิศทางการไหลเข้า - ออกของเรซิน ก็เช่นกัน ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็ง เพราะเรซินมีการไหลเท่ากันทุกทิศทางทั่วทั้งชิ้นงาน

แต่เพื่อดูปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด และสิ่งที่เราต้องการทดแทนจะสามารถช่วยให้ความแข็งดีขึ้นจริงนั้น จึงใช้การวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธี DOE จะเลือกพิจารณาปัจจัยที่ส่งผล คือ

- น้ำหนักของเศษกระจกที่ทดแทนไฟเบอร์กลาส ที่ 350 และ 450 กรัมต่อตารางเมตร เพราะที่ 350 กรัมต่อตารางเมตรคือน้ำหนักที่น้อยสุด เตรียมได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วน 450 กรัมต่อตารางเมตร เพราะน้ำหนักเท่ากับไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น เป็นเป้าหมายหลักที่เราต้องการ
- ขนาดอนุภาคของเศษกระจก ที่ 108 และ 240 ไมครอน เพราะ เป็นขนาดอนุภาคที่เล็กสุด และใหญ่สุด ที่เราเลือกมาทำการวิจัยนี้
- บริเวณของชั้นทดสอบ ที่ขอบ และตรงกลาง เพราะชิ้นงานที่ดีควรมีค่าความแข็งใกล้เคียงกันทุกบริเวณของชิ้นงาน
- ทิศทางการไหลของเรซิน ฝั่งเรซินเข้า และฝั่งเรซินออก



General Linear Model: Hardness (Shore D) versus Location, InfusionFlow, Praticle size (μm), Weight of GS (g/m^2)

Factor	Type	Levels	Values
Location	fixed	2	Egde, Middle
InfusionFlow	fixed	2	IN, OUT
Particle size (μm)	fixed	2	108, 240
Weight of GS (g/m^2)	fixed	2	350, 450

Analysis of Variance for Hardness (Shore D), using Adjusted SS for Tests							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Location	1	0.9801	0.9801	0.9801	6.27	0.018	
InfusionFlow	1	0.0547	0.0247	0.0247	0.16	0.694	
Particle size (μm)	1	2.1084	1.7550	1.7550	11.22	0.002	
Weight of GS (g/m^2)	1	0.1387	0.1162	0.1162	0.74	0.395	
Location*InfusionFlow	1	0.0360	0.0360	0.0360	0.23	0.635	
Location*Particle size (μm)	1	0.0176	0.0176	0.0176	0.11	0.739	
Location*Weight of GS (g/m^2)	1	0.0009	0.0009	0.0009	0.01	0.939	
InfusionFlow*Particle size (μm)	1	0.1387	0.2072	0.2072	1.32	0.258	
InfusionFlow*Weight of GS (g/m^2)	1	0.0000	0.0030	0.0030	0.02	0.890	
Particle size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	17.7390	14.3995	14.3995	92.05	0.000	
Location*InfusionFlow* Particle size (μm)	1	0.0975	0.0975	0.0975	0.62	0.436	
Location*InfusionFlow* Weight of GS (g/m^2)	1	0.0247	0.0247	0.0247	0.16	0.694	
Location*Particle size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	0.2795	0.2795	0.2795	1.79	0.191	
InfusionFlow*Particle size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	0.0271	0.0045	0.0045	0.03	0.866	
Location*InfusionFlow* Particle size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	0.0693	0.0693	0.0693	0.44	0.510	
Error	32	5.0059	5.0059	0.1564			
Total	47	26.7182					

S = 0.395518 R-Sq = 81.26% R-Sq(adj) = 72.48%

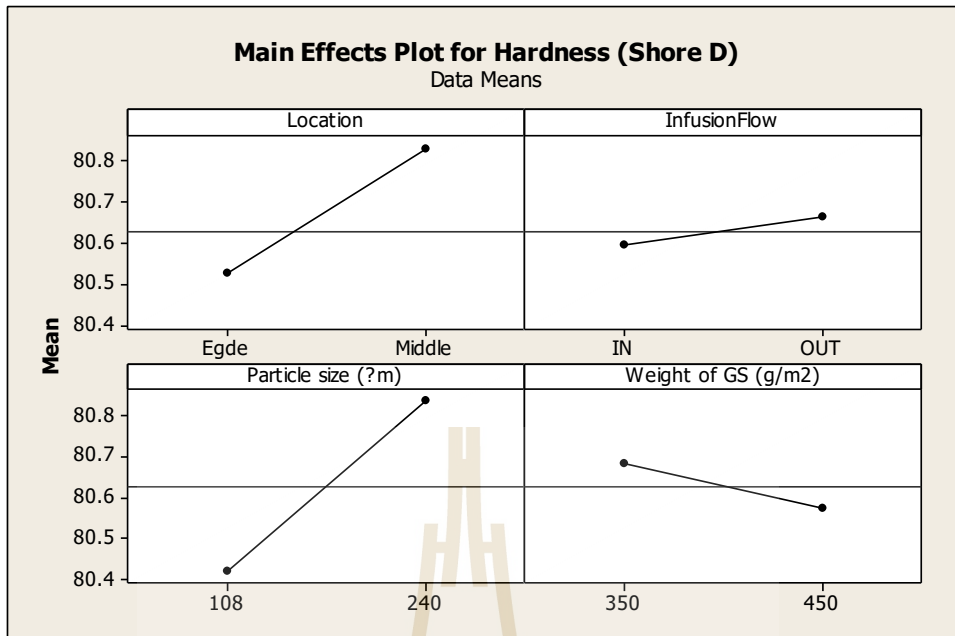
Unusual Observations for Hardness (Shore D)

Obs	Hardness (Shore D)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	79.1200	80.1050	0.1978	-0.9850	-2.88 R

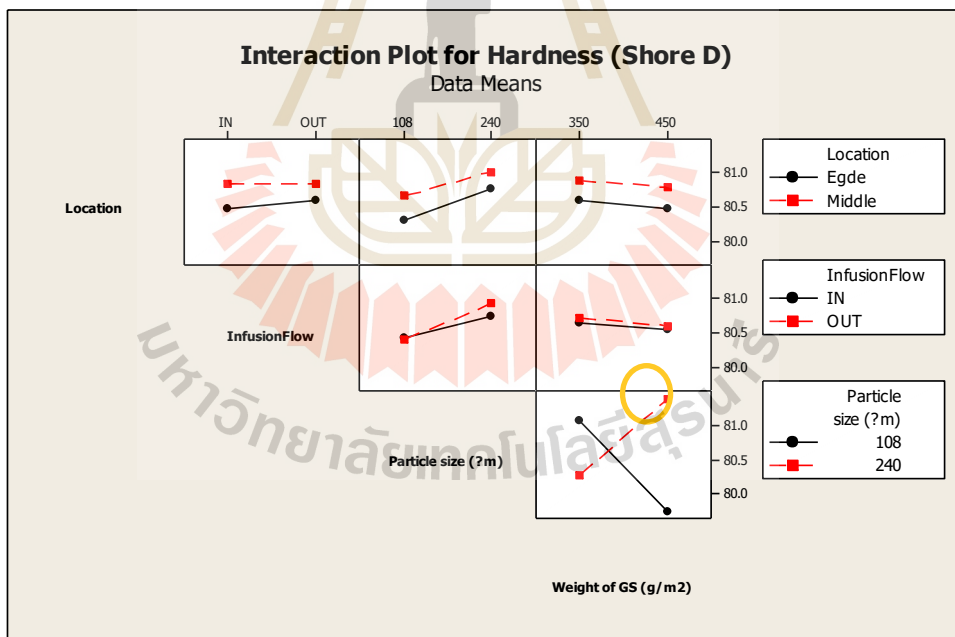
R denotes an observation with a large standardized residual.

ก) การวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วย DOE

รูปที่ 4.3 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยใช้ DOE ของ Hardness



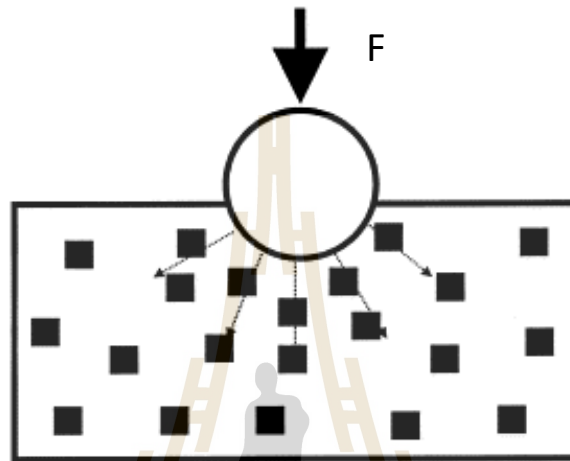
ข) ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ



ค) ปัจจัยที่เลือกดูผลกระทบ

รูปที่ 4.3 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยใช้ DOE ของ Hardness (ต่อ)

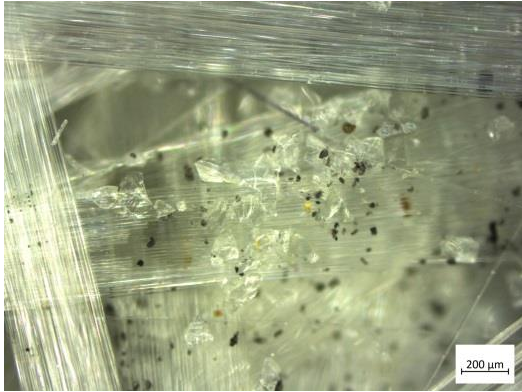
จากการวิเคราะห์ทางสถิติ รูปที่ 4.3 พบว่า รูป ก) ปัจจัยในบรรทัดที่ 6, 8, และ 15 ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ และสอดคล้องกับรูป ข) ในส่วนของรูป ค) จะเห็นว่าปัจจัยในรูป ก) บรรทัดที่ 12 ที่ส่งผลกระทบร่วมกัน และที่ส่งผลกระทบมากที่สุดคือ ขนาดอนุภาคของเศษกระจก จะเห็นได้ว่าที่ขนาดอนุภาค 240 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มน้ำหนักของเศษกระจกที่เติมขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคขนาดใหญ่กระจายตัว และหนาแน่นขึ้นตามปริมาณน้ำหนักที่เติม เมื่อนำมาทดสอบความแข็งแรง จึงกดเจออนุภาคทุกบริเวณ และตัวอนุภาคนี้เองที่ช่วยให้ความแข็งแรงสูงขึ้น



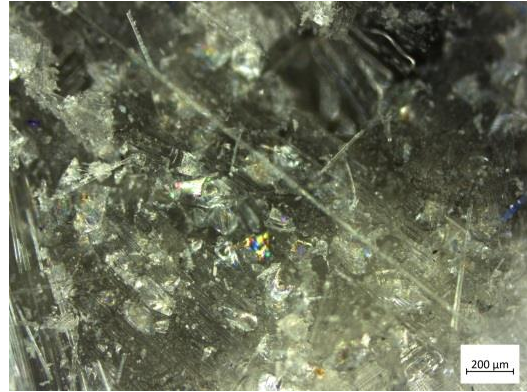
รูปที่ 4.4 ลักษณะของห้วกด Hardness ที่ลงในชิ้นทดสอบ จากงานวิจัยของ Hyoung Seop Kim (2000)

ลักษณะการกด Hardness ลงบนชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 4.4 ห้วกดจะกดโดนเศษกระจกที่บดเติมลงไป ยิ่งถ้าขนาดอนุภาคใหญ่ และมีปริมาณมาก (น้ำหนักที่เติมลงไป) จะทำให้กดเจอเศษกระจกทั่วทุกบริเวณ และส่งผลต่อค่าความแข็งแรงให้สูงขึ้น

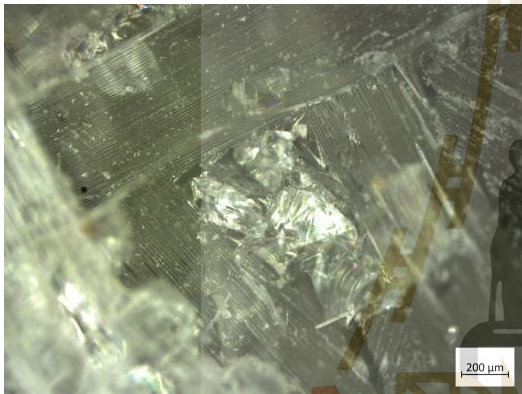
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) ขนาดอนุภาค 108 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร



ข) ขนาดอนุภาค 108 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร



ค) ขนาดอนุภาค 240 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร



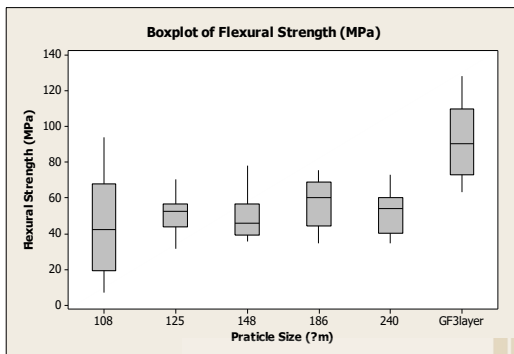
ง) ขนาดอนุภาค 240 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร

รูปที่ 4.5 ภาพ OM ที่พื้นผิวอนุภาคของชั้นทดสอบ Hardness

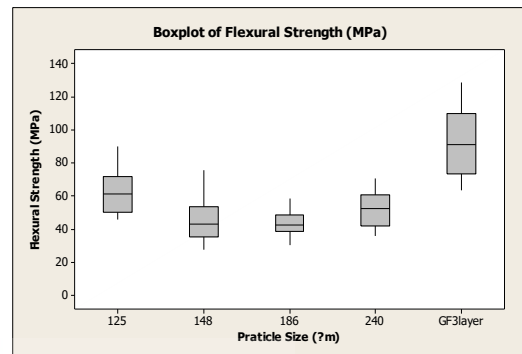
จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าอนุภาคของเศษกระจกกระจายตัวอยู่ในช่องว่างของไฟเบอร์กลาส และที่การเติมเศษกระจกขนาด 240 ไมโครเมตร น้ำหนัก 450 กรัมต่อเมตร มีเศษกระจกกระจายตัวอยู่จำนวนมาก

โดยสรุปการเสริมเศษกระจกเข้าไปในชิ้นงานไฟเบอร์กลาสส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Omyma El-Kady และ Adel Fathy (2014) Bakir Unlu (2008), Kuen-Ming Shu และ Georgechia Tu (2003), Efe Celebi และคณะ (2010), Jianhua Zhu และคณะ (2004)

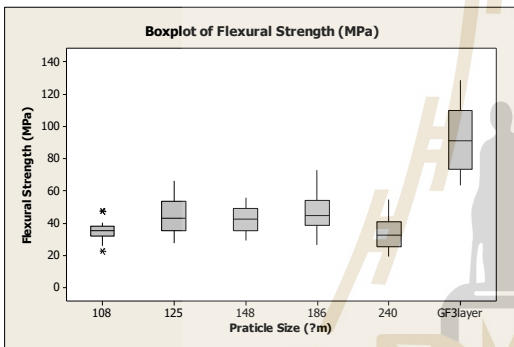
4.2 ผลการทดสอบแรงดัดงอ



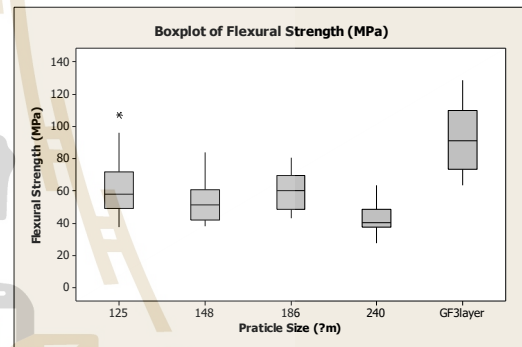
ก) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร



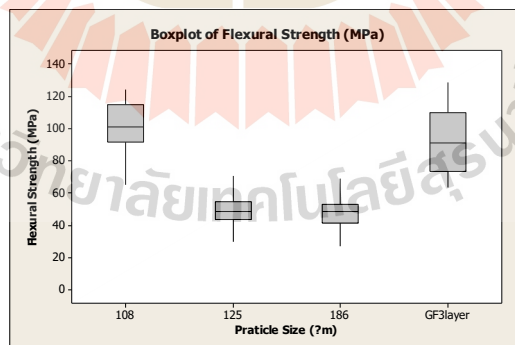
ข) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 400 กรัมต่อตารางเมตร



ค) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร



ง) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 500 กรัมต่อตารางเมตร



จ) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 550 กรัมต่อตารางเมตร

รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอ (Flexural Strength) ของการทดสอบชิ้นงานที่เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 ที่ขนาดอนุภาคของเศษกระจกที่แตกต่างกัน

จากข้อมูลเบื้องต้นในส่วนที่ 3.2.2 กล่าวถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตโพลีเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วทั่วไป มีค่าความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงออยู่ 80 - 100 MPa โรงงานจึงเลือกใช้

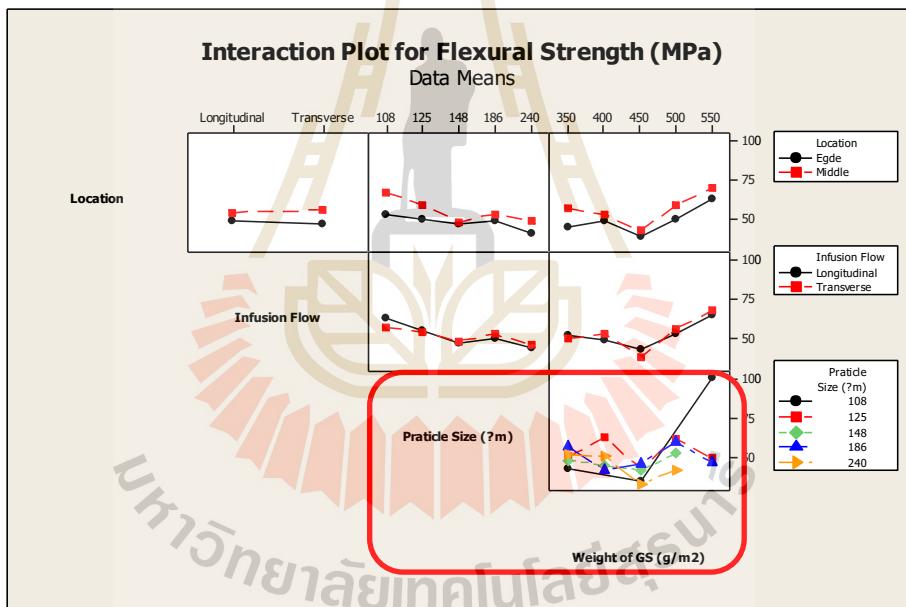
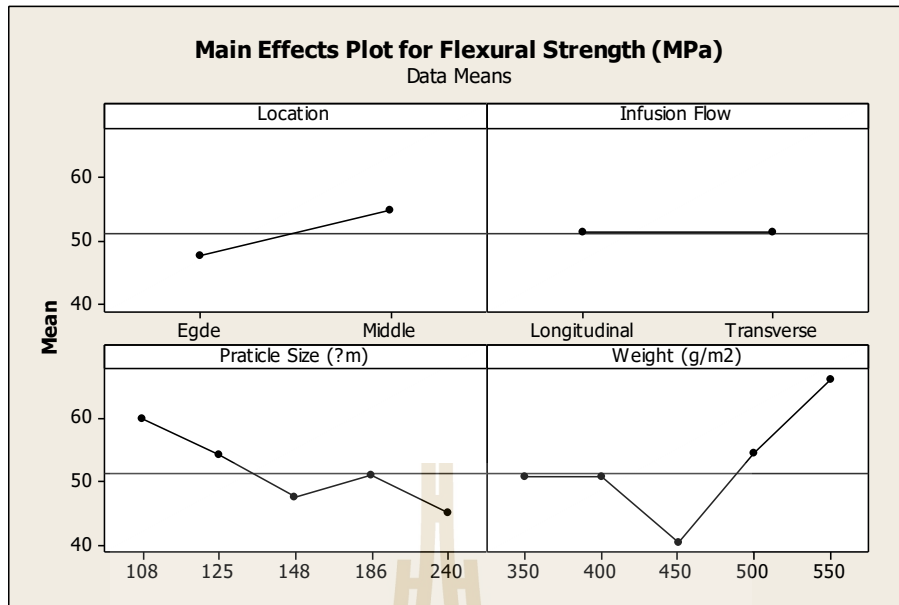
การขึ้นรูปด้วยไฟเบอร์กลาส 3 ชั้น จากการทดสอบเมื่อเสริมเศษกระจกเข้าไปแทนการใช้ไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอลดลง ดังรูปที่ 4.6

การใช้ไฟเบอร์กลาส 2 ชั้น (ในบทที่ 3 รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบแรงดัดงอ) ค่าความแข็งแรงทนต่อกระแทกเฉลี่ยอยู่ที่ 44.271 MPa โดยประมาณ ซึ่งเมื่อเทียบกับกับการใช้เศษกระจกไปเสริมแรงนั้น ผลของความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วยเศษกระจก ไม่ช่วยให้ความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.7 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เศษกระจกมาทดแทนไฟเบอร์กลาส โดยวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ น้ำหนักของเศษกระจก และขนาดอนุภาคของเศษกระจก ซึ่งส่งผลอย่างมาก เมื่อเทียบกับปัจจัยภายใน คือตำแหน่งของชั้นทดสอบของแต่ละปัจจัย และทิศทางการไหลของเรซินของชั้นทดสอบ ซึ่งปัจจัยภายในนี้ไม่ส่งผลแตกต่างกันมาก หมายความว่า ชั้นงานมีการขึ้นรูปอย่างสม่ำเสมอ จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน

ในการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธี DOE จะเลือกพิจารณาปัจจัยที่ส่งผล คือ

- น้ำหนักของเศษกระจกที่ทดแทนไฟเบอร์กลาส ที่ 350 และ 450 กรัมต่อตารางเมตร เพราะที่ 350 กรัมต่อตารางเมตรคือน้ำหนักที่น้อยสุด เตรียมได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วน 450 กรัมต่อตารางเมตร เพราะน้ำหนักเท่ากับไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น เป็นเป้าหมายหลักที่เราต้องการ
- ขนาดอนุภาคของเศษกระจก ที่ 108 และ 240 ไมครอน เพราะ เป็นขนาดอนุภาคที่เล็กสุด และใหญ่สุด ที่เราเลือกมาทำการวิจัยนี้
- บริเวณของชั้นทดสอบ ที่ขอบ และตรงกลาง เพราะชั้นงานที่ดีควรมีค่าใกล้เคียงกันทุกบริเวณของชั้นงาน
- ทิศทางการไหลของเรซิน ตามการไหลของเรซิน หรือขวางการไหลของเรซิน



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์โดยรวมด้วยวิธี DOE ของ Flexural Strength

General Linear Model: Flexural Strength versus Location, Infusion Flow, Particle size (μm), Weight (g/m^2)

Factor	Type	Levels	Values
Location	fixed	2	Edge, Middle
Infusion Flow	fixed	2	Longitudinal, Transverse
Particle Size (μm)	fixed	2	108, 240
Weight of GS (g/m^2)	fixed	2	350, 450

Analysis of Variance for Flexural Strength (MPa), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Location	1	2920.5	2920.5	2920.5	19.86	0.000
Infusion Flow	1	647.5	647.5	647.5	4.40	0.041
Particle Size (μm)	1	193.9	193.9	193.9	1.32	0.257
Weight of GS (g/m^2)	1	2833.7	2833.7	2833.7	19.27	0.000
Location*Infusion Flow	1	11.6	11.6	11.6	0.08	0.780
Location*Particle Size (μm)	1	221.0	221.0	221.0	1.50	0.226
Location*Weight of GS (g/m^2)	1	936.0	936.0	936.0	6.36	0.015
Infusion Flow*Particle Size (μm)	1	216.0	216.0	216.0	1.47	0.231
Infusion Flow*Weight of GS (g/m^2)	1	229.4	229.4	229.4	1.56	0.218
Particle Size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	446.8	446.8	446.8	3.04	0.088
Location*Infusion Flow* Particle Size (μm)	1	199.6	199.6	199.6	1.36	0.250
Location*Infusion Flow* Weight of GS (g/m^2)	1	0.5	0.5	0.5	0.00	0.954
Location*Particle Size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	620.3	620.3	620.3	4.22	0.045
Infusion Flow*Particle Size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	153.9	153.9	153.9	1.05	0.311
Location*Infusion Flow* Particle Size (μm)* Weight of GS (g/m^2)	1	461.4	461.4	461.4	3.14	0.083
Error	48	7058.6	7058.6	147.1		
Total	63	17150.6				

S = 12.1266 R-Sq = 58.84% R-Sq(adj) = 45.98%

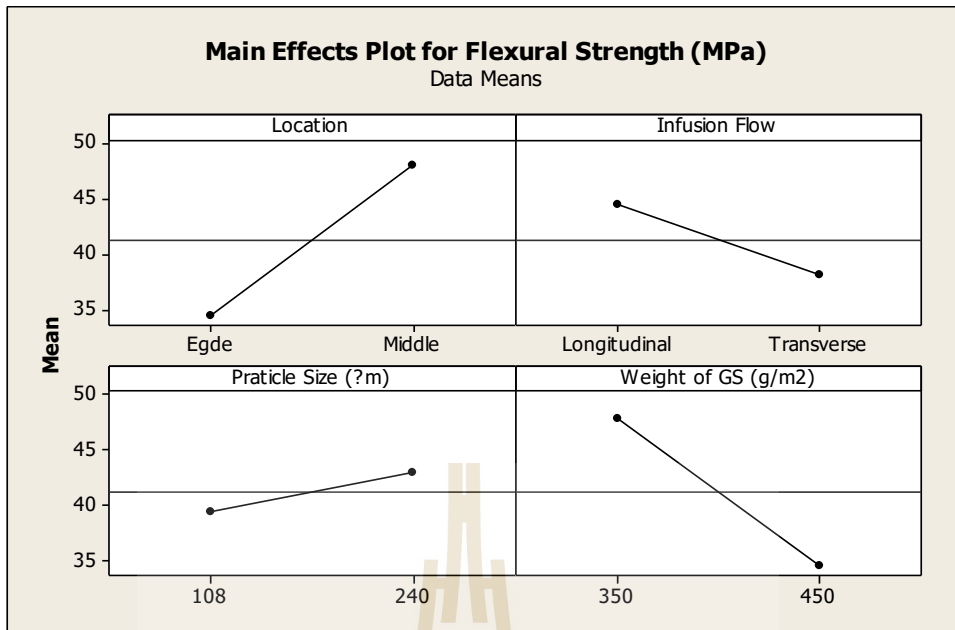
Unusual Observations for Flexural Strength (MPa)

Obs	Flexural Strength (MPa)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
113	73.2610	49.9518	6.0633	23.3092	2.22 R
219	19.3200	40.3623	6.0633	-21.0423	-2.00 R
321	94.1960	63.5907	6.0633	30.6053	2.91 R
424	72.0160	40.3623	6.0633	31.6537	3.01 R
527	32.7880	54.5410	6.0633	-21.7530	-2.07 R

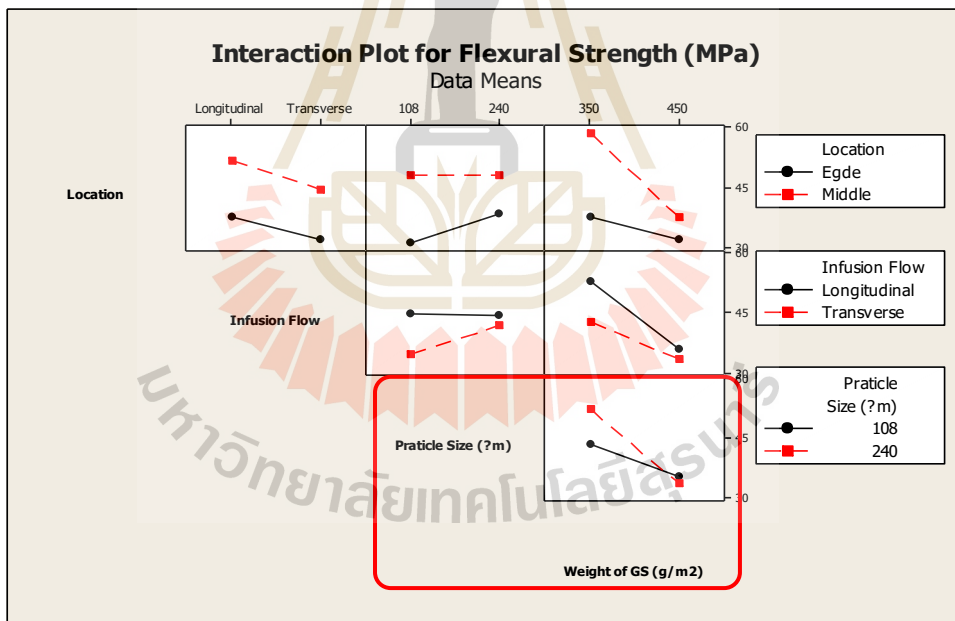
R denotes an observation with a large standardized residual.

ก) การวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วย DOE

รูปที่ 4.8 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Flexural Strength โดยใช้ DOE



ข) ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ



ค) ปัจจัยที่เลือกดูผลกระทบ

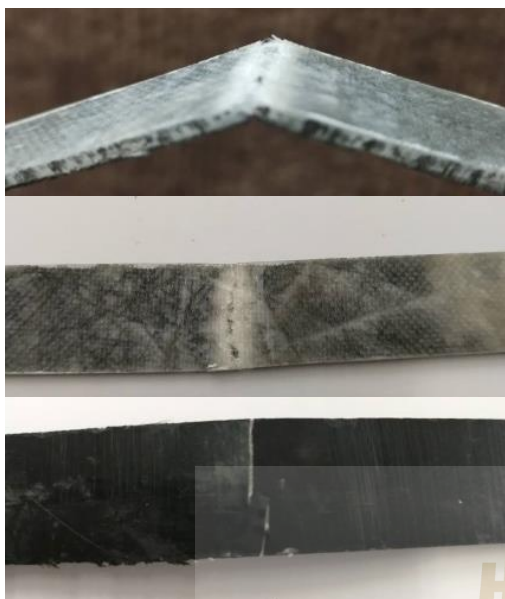
รูปที่ 4.8 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยใช้ DOE ของ Flexural Strength (ต่อ)

จากรูปที่ 4.8 จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ก) พบว่า ปัจจัยในบรรทัดที่ 9, 10, 12, 15 และ 21 เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงทนต่อแรงดึงอย่างมีนัยยะสำคัญ ข) และ ค) เมื่อเติมน้ำหนัก จาก 350 เป็น 450 การทนต่อแรงดึงดิ่งลดลง เนื่องจากการเติมอนุภาคในปริมาณที่มากส่งผลต่อการเกาะตัวกันของอนุภาคที่เป็นสารเสริมกับโพลีเอสเตอร์ที่เป็นเมทริกซ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alewo Opuada และคณะ (2015) ว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงดิ่งลดลง เมื่อมีการเติมอนุภาคเพิ่มเข้าไป และด้วยลักษณะของอนุภาคเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่ไม่เอื้อต่อการทนแรงดึงดิ่ง

การงานวิจัยของ Yu Cao และ Jack Cameron ได้มีการนำอนุภาคซิลิกาเข้าไปช่วยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และการขึ้นรูปโดยใช้แรงเข้ามาช่วย ส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุทนต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น ซึ่งการใช้ตัวสารเสริมแรง และวิธีการขึ้นคล้ายๆกับงานวิจัยนี้ แต่แตกต่างกันที่ในงานวิจัยนี้เป็นการทดแทนการใช้ไฟเบอร์กลาสบางส่วนด้วยเศษกระจก ไม่ใช่การเติมเพิ่ม เหมือนกับงานวิจัยของ Yu Cao และ Jack Cameron จึงทำให้ค่าความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกลดลง

จากรูปที่ 4.9 ข) และ ง) มีรอยแตกหักเสียหายมากกว่า ก) และ ค) ซึ่งลักษณะการแตกหักสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติที่บอกว่า การเติมเศษกระจก 450 กรัมต่อตารางเมตร ทำให้ความแข็งแรงลดลง เมื่อเทียบกับการเติมเศษกระจก 350 กรัมต่อตารางเมตร แสดงให้เห็นว่าการใส่อนุภาคปริมาณมาก ทำให้ลดความแข็งแรงของชิ้นงานลง เนื่องจากมีอนุภาคมากเกินไป และไม่เกาะกับตัวเมทริกซ์ได้ดี





ก) ขนาดอนุภาค 108 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร
ค่าต้านทานแรงดึงอ เท่ากับ 43.515 MPa



ข) ขนาดอนุภาค 108 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร
ค่าต้านทานแรงดึงอ เท่ากับ 35.491 MPa



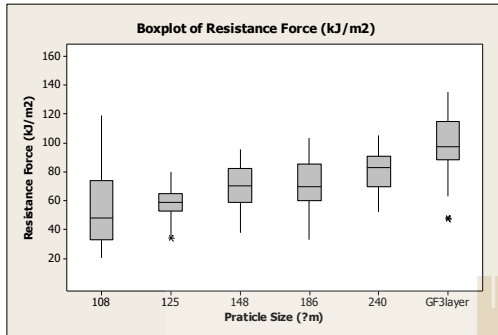
ค) ขนาดอนุภาค 240 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร
ค่าต้านทานแรงดึงอ เท่ากับ 52.281 MPa



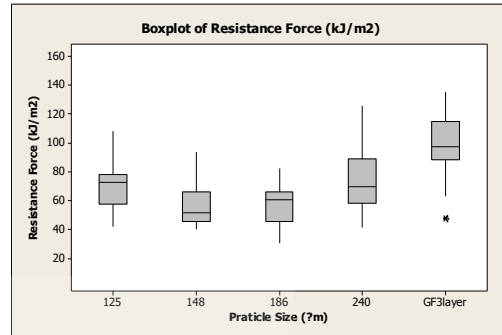
ง) ขนาดอนุภาค 240 ไมโครเมตร
น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร
ค่าต้านทานแรงดึงอ เท่ากับ 33.386 MPa

รูปที่ 4.9 ลักษณะการแตกหักของชิ้นทดสอบ Flexural

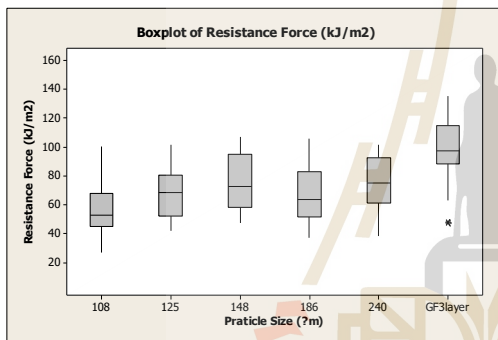
4.3 ผลการทดสอบแรงกระแทก



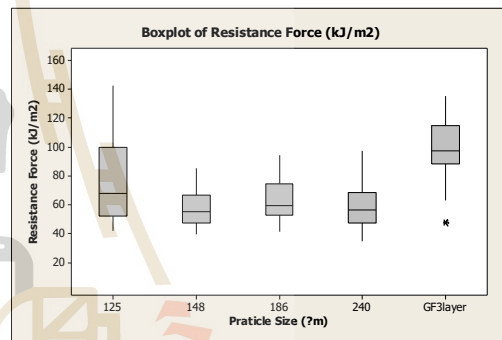
ก) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 350 กรัมต่อตารางเมตร



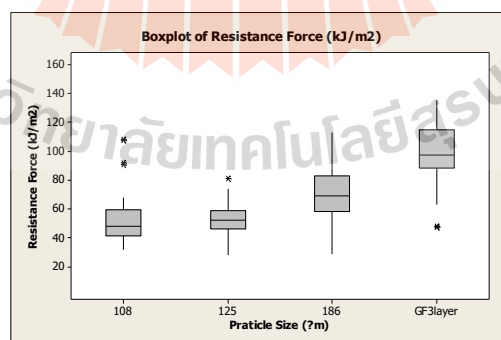
ข) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 400 กรัมต่อตารางเมตร



ค) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 450 กรัมต่อตารางเมตร



ง) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 500 กรัมต่อตารางเมตร



จ) เติมอนุภาคที่น้ำหนัก 550 กรัมต่อตารางเมตร

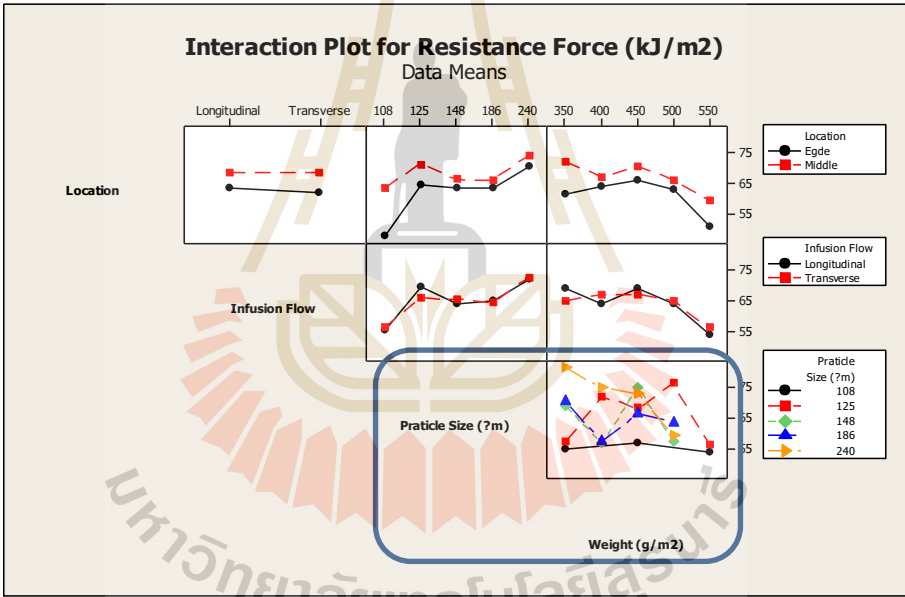
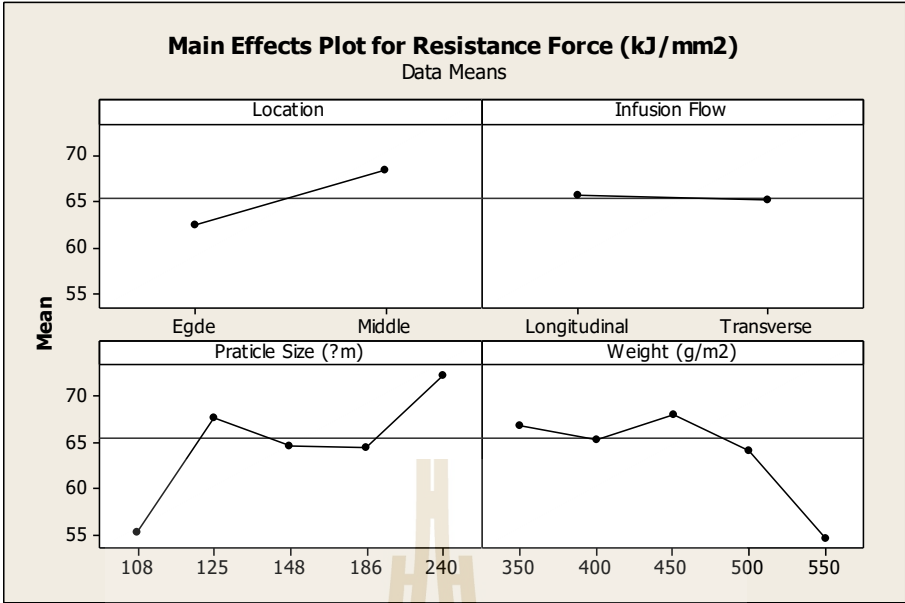
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ของการทดสอบชิ้นงานที่เติมกระจกที่น้ำหนัก 350, 400, 450, 500 และ 550 กรัมต่อตารางเมตร ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน

โดยที่มาตรฐานของยุโรปการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสารขนาดใหญ่ อยู่ที่ 29.4 - 55.0 กิโลจูลล์ ทางโรงงานจึงเลือกความปลอดภัยในการผลิตชิ้นส่วนให้สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งการทดสอบความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกของทุกปัจจัย ในทุกการทดสอบผลที่ได้มีค่าน้อยกว่าวัสดุคอมโพสิตที่โรงงานใช้อยู่ปัจจุบัน และการเสริมแรงด้วยเศษกระจก ไม่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพราะค่าที่ได้ไม่ต่างจากการใช้ไฟเบอร์กลาส 2 ชั้น เพราะฉะนั้นการใช้เศษกระจกเสริมแรงไม่ช่วยให้ทนแรงกระแทกได้ดี ดังรูปที่ 4.10

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เศษกระจกมาทดแทนไฟเบอร์กลาส โดยวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ คือ น้ำหนักของเศษกระจก และขนาดอนุภาคของเศษกระจก ซึ่งส่งผลอย่างมาก เมื่อเทียบกับปัจจัยภายในปัจจัยหลัก คือตำแหน่งของชั้นทดสอบของแต่ละปัจจัย และทิศทางการไหลของเรซินของชั้นทดสอบ ซึ่งปัจจัยภายในนี้ไม่ส่งผลแตกต่างกันมาก ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานมีการขึ้นรูปได้สม่ำเสมอ จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.11

ในการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธี DOE จะเลือกพิจารณาปัจจัยที่ส่งผล คือ

- น้ำหนักของเศษกระจกที่ทดแทนไฟเบอร์กลาส ที่ 350 และ 450 กรัมต่อตารางเมตร เพราะที่ 350 กรัมต่อตารางเมตรคือน้ำหนักที่น้อยสุด เตรียมได้ง่ายและรวดเร็ว ส่วน 450 กรัมต่อตารางเมตร เพราะน้ำหนักเท่ากับไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น เป็นเป้าหมายหลักที่เราต้องการ
- ขนาดอนุภาคของเศษกระจก ที่ 108 และ 240 ไมครอน เพราะ เป็นขนาดอนุภาคที่เล็กสุด และใหญ่สุด ที่เราเลือกมาทำการวิจัยนี้
- บริเวณของชั้นทดสอบ ที่ขอบ และตรงกลาง เพราะชิ้นงานที่ดีควรมีค่าใกล้เคียงกันทุกบริเวณของชิ้นงาน
- ทิศทางการไหลของเรซิน ตามการไหลของเรซิน หรือขวางการไหลของเรซิน



รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์โดยรวมด้วยวิธี DOE ของ Impact Strength

1 **General Linear Model: Resistance F versus Location, Infusion Flow, Particle size (μm), Weight**
2 **(g/m²)**

Factor	Type	Levels	Values
Location	fixed	2	Egde, Middle
Infusion Flow	fixed	2	Longitudinal, Transverse
Praticle Size (μm)	fixed	2	108, 240
Weight (g/m ²)	fixed	2	350, 450

6

7 Analysis of Variance for Resistance Force (kJ/m²), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Location	1	2296.0	2296.0	2296.0	6.96	0.010
Infusion Flow	1	174.4	174.4	174.4	0.53	0.469
Praticle Size (μm)	1	14663.5	14663.5	14663.5	44.42	0.000
Weight (g/m ²)	1	361.3	361.3	361.3	1.09	0.298
Location*Infusion Flow	1	121.9	121.9	121.9	0.37	0.545
Location*Praticle Size (μm)	1	4409.4	4409.4	4409.4	13.36	0.000
Location*Weight (g/m ²)	1	2555.1	2555.1	2555.1	7.74	0.006
Infusion Flow*Praticle Size (μm)	1	336.0	336.0	336.0	1.02	0.315
Infusion Flow*Weight (g/m ²)	1	106.9	106.9	106.9	0.32	0.570
Praticle Size (μm)*Weight (g/m ²)	1	872.3	872.3	872.3	2.64	0.107
Location*Infusion Flow*Praticle Size (μm)	1	362.7	362.7	362.7	1.10	0.297
Location*Infusion Flow*Weight (g/m ²)	1	1490.1	1490.1	1490.1	4.51	0.036
Location*Praticle Size (μm)*Weight (g/m ²)	1	760.0	760.0	760.0	2.30	0.132
Infusion Flow*Praticle Size (μm)*Weight (g/m ²)	1	391.5	391.5	391.5	1.19	0.278
Location*Infusion Flow*Praticle Size (μm)*Weight (g/m ²)	1	263.5	263.5	263.5	0.80	0.374
Error	112	36969.4	36969.4	330.1		
Total	127	66134.0				

26 S = 18.1682 R-Sq = 44.10% R-Sq(adj) = 36.61%

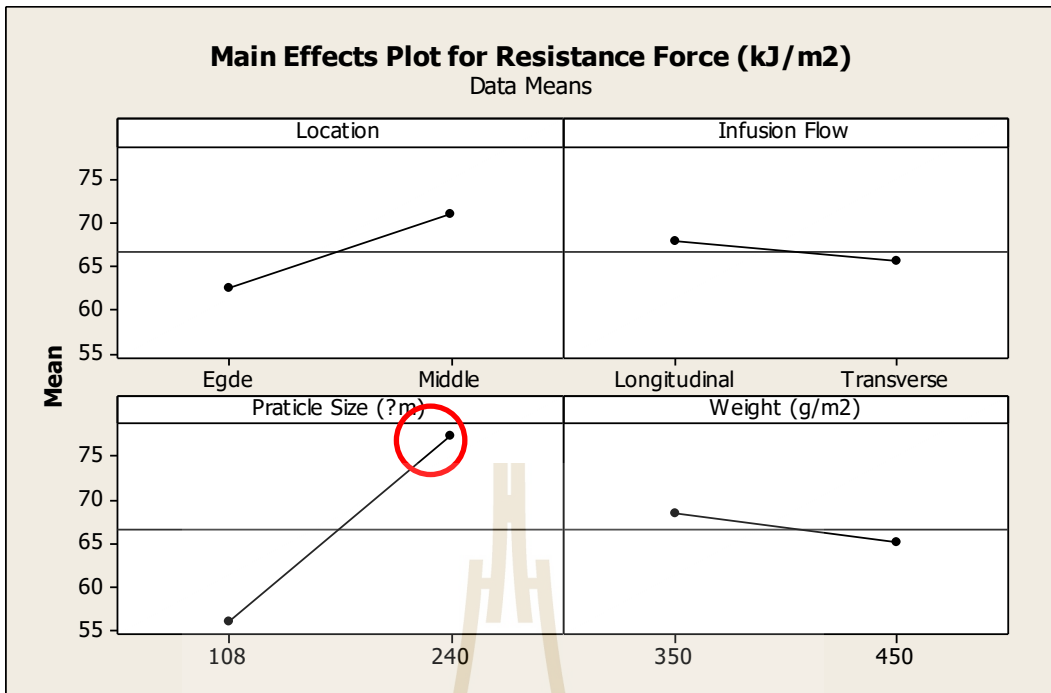
27 Unusual Observations for Resistance Force (kJ/m²)

Obs	Resistance Force (kJ/m ²)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
52	108.540	63.292	6.423	45.248	2.66 R
59	82.030	44.286	6.423	37.744	2.22 R
60	119.000	80.880	6.423	38.120	2.24 R
63	20.260	63.292	6.423	-43.032	-2.53 R
96	41.100	79.349	6.423	-38.249	-2.25 R
108	100.160	62.707	6.423	37.453	2.20 R

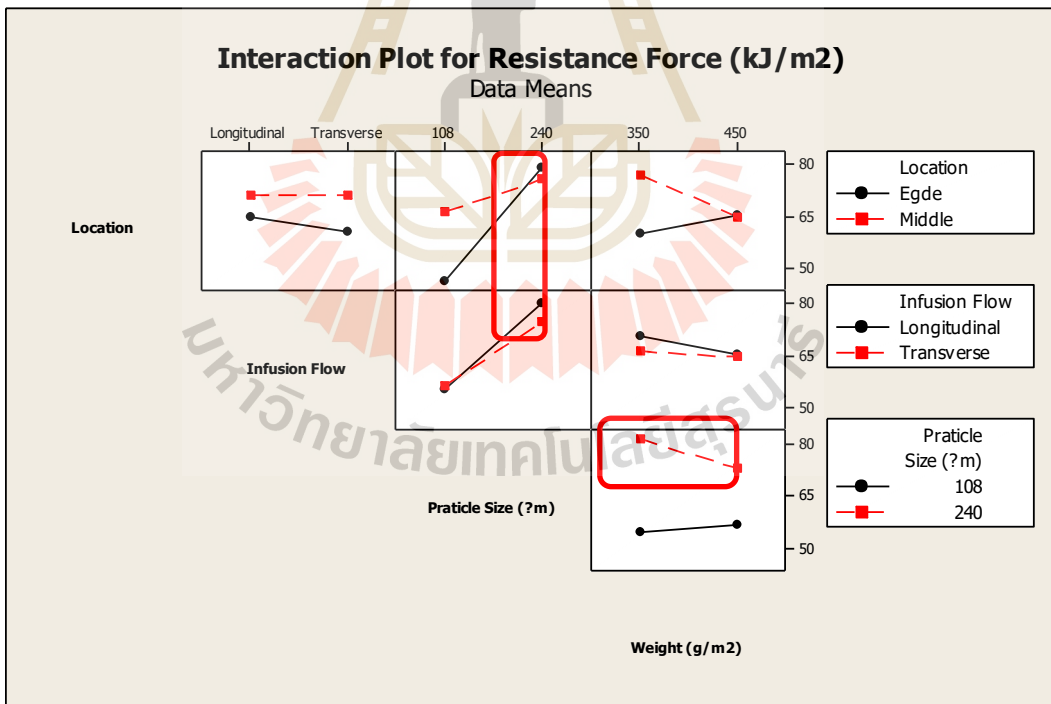
37 R denotes an observation with a large standardized residual.

ก) การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย DOE

รูปที่ 4.12 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Impact Strength โดยใช้ DOE ของ Impact Strength



ข) ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ



ค) ปัจจัยที่เลือกดูผลกระทบ

รูปที่ 4.12 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ โดยใช้ DOE ของ Impact Strength (ต่อ)

จากรูปที่ 4.12 จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ก) ปัจจัยในบรรทัดที่ 9, 11, 14, 15 และ 20 เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงทนต่อแรงดัดอย่างมีนัยยะสำคัญ ข) และ ค) เมื่อเติมเศษกระจกที่น้ำหนัก 350 และ 450 กรัมต่อตารางเมตรในชั้นงาน พบว่าอนุภาคขนาด 240 ไมโครเมตร (ขนาดใหญ่) มีความแข็งแรงสูงกว่าขนาดอนุภาค 108 ไมโครเมตร(ขนาดเล็ก) ซึ่งเป็นไปตามบทความของ Shao-Yun Fu และ คณะ (2008) ที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดของอนุภาคการยึดติดของอนุภาคกับเมทริกซ์ และการเติมอนุภาคต่อสมบัติเชิงกลของอนุภาคของพอลิเมอร์ กล่าวว่อนุภาคขนาดใหญ่ และการยึดเกาะของอนุภาคในพอลิเมอร์ชั้นมีผลต่อความแข็งแรงรวมถึงการทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.13 ลักษณะการแตกหักของชั้นงาน Impact

จากรูปที่ 4.13 ก) และ ข) ที่ใส่อนุภาค 108 ไมโครเมตร (อนุภาคขนาดเล็ก) มีการแตกหักเสียหายของชั้นงานมากกว่า ค) และ ง) ที่ใส่อนุภาค 240 ไมโครเมตร (อนุภาคขนาดใหญ่) โดยสังเกตได้

จากบริเวณที่ได้แสดงวงกลมล้อมรอบในรูป ก) และ ข) นั้นจะมีพื้นที่การแตกหักส่วนสีขาวที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่มากกว่ารูป ค) และ ง) ซึ่งภาพถ่ายแสดงการพฤติกรรมความเสียหายสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ที่บอกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยให้ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าการเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุโพลีเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส และเศษกระจก โดยก่อนหน้าที่จะดำเนินงานวิจัยนี้ สถานประกอบการได้ใช้โพลีเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยแผ่นไฟเบอร์กลาส 3 ชั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุโพลีเอสเตอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยแผ่นไฟเบอร์กลาสเพียง 2 ชั้น และเสริมด้วยเศษกระจกในปริมาณที่เทียบเท่ากับแผ่นไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น (450 กรัมต่อตารางเมตร) และปริมาณอื่นที่ใกล้เคียง (350 - 550 กรัมต่อตารางเมตร) เศษกระจกได้มาจากการบดกระจกที่เสียจากการผลิต หรือจากกระจกกรดโดยสารที่ลูกค้านำมาซ่อมหรือเปลี่ยน ให้ได้ขนาดระหว่าง 108 - 240 ไมโครเมตร

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยทั้งหมด สรุปได้ว่า

- ความแข็ง (Hardness) ของการเติมเศษกระจกเข้าไปทดแทนการใช้ไฟเบอร์ส่งผลให้มีความแข็งสูงกว่าการใช้ไฟเบอร์กลาส 3 ชั้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งในการเติมเศษกระจกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และเติมในปริมาณมาก จะช่วยให้ความแข็งสูง เนื่องจากเศษกระจกที่เติมเข้าไปกระจายตัวในชิ้นงาน และรับแรงกดได้ดีกว่าเส้นใยแก้ว
- ความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอ เมื่อเติมเศษกระจกเข้าไปทดแทนการใช้ไฟเบอร์กลาส 1 ชั้น ทำให้ความแข็งแรงลดลง และเมื่อเติมเศษกระจกในปริมาณที่มากขึ้น ก็จะส่งผลต่อความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอลดลง
- ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทก เมื่อเติมเศษกระจกที่ขนาดอนุภาคใหญ่จะส่งผลให้ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าการเติมเศษกระจกขนาดเล็ก แต่การเติมเศษกระจกไม่ทำให้ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ตัวเสริมแรงเป็นไฟเบอร์กลาส 3 ชั้น
- วัสดุโพลีเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส และเศษกระจกที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะมีความแข็งแรงทนต่อแรงดัดงอและความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลของการทนต่อแรงดัดงอ และแรงกระแทก ชิ้นส่วนที่ทดแทนไฟเบอร์กลาสด้วยเศษกระจก อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำชิ้นส่วนจากการขึ้นรูปนี้มาใช้ในส่วนของงานภายนอกโดยสาธารณะขนาดใหญ่ แต่สามารถใช้กับงานภายใน เพราะต้องการชิ้นส่วนที่แข็ง ทนต่อการขีดขูดสูง ซึ่งเหมาะสมมากกับชิ้นส่วน เช่น ช่องทางเดินระบบปรับอากาศ ผนังภายใน เพดานด้านในตัวรถ เพราะการเติมเศษกระจกช่วยทางด้านนี้เป็นอย่างมาก

บรรณานุกรม

- จตุติ เพียรล้ำเลิศ. ขั้นตอนในการทำชิ้นงานไฟเบอร์กลาสด้วยระบบสุญญากาศ หรือ Infusion. เจ. เอ็น.ทรานสอส (ประเทศไทย).
- ปุ่นณวิช สถาปิยะคุณ. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางการยภาพ และทางกลของวัสดุหล่อสร้างที่ผลิตจากไม้ปืช และไม้ปืชคอมโพสิต โดยวิธีแฮนด์เล็ฟ. วิทยานิพนธ์, 2557
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. หนังสือวิทยาศาสตร์เส้นใย. [โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย](#). 2542
- ศราวุธ บัวงาม. การศึกษาพฤติกรรมการชนกระแทกด้านหน้าโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ภายใต้มาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29. วิทยานิพนธ์, 2557
- สมาคมไทยคอมโพสิต. หนังสือไฟเบอร์กลาสด้วยวิธี Hand Lay Up และคอมโพสิต. 1/2551
- หฤทภักดิ์ กิรติเสรี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร มก., ฉบับที่ 70, ปีที่ 22, พฤศจิกายน 2552 – มกราคม 2553. 18 – 32
- อารี ธนบุญสมบัติ, ภัทราวรรณ คหะวงค์ และศุภมาส ด้านวิทยากุล. เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค. ดีพิมพ์ลงใน LAB TODAY ฉบับที่ 3, 2545
- Alewo Opuada, Mohammed Tijani, Ibrahim Sanusi. Effect of particle size and concentration on the mechanical properties of polyester/date palm seed particulate composites. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, Issue26, January - June 2015. 65 - 78
- Aramide Fatai, Atanda Pethuel, Olorunniwo Olusegun . Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. International Journal of Composite Materials 2012, 147 - 151
- Bakir Unlu. Investigation of tribological and mechanical properties Al₂O₃-SiC reinforced Al composites manufactured by casting or P/M method. Mater Des 2008, 2. 2002 – 8.
- Edcleide Araújo, Kasselyne Araújo, Osanildo Pereira, Pollyana Ribeiro, Tomás de Melo. Fiberglass Wastes/Polyester Resin Composites: Mechanical Properties and Water Sorption. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2006, vol. 16, 332 - 335
- Efe Celebi, Altinsoy Ibrahim, Yener Tuba, Ipek Mediha, Zeytin Sakin, Bindal Cuma. Characterization of cemented Cu-SiC composites. Vacuum 2010, 85. 643 – 7.

- Fazle Elahi, Milon Hossain, Shahida Afrin, Mubarak Khan. **Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites.** International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2014, 26 - 27 December, 2014, Khulna, BANGLADESH
- Hasim Pihili. **An experimental investigation of wear of glass fibre – epoxy resin and glass fibre – polyester resin composite materials.** European Polymer Journal 45, 2009. 149 – 154
- Hyoungh Seop Kim. **On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites.** Materials Science and Engineering, Volume 289, Issues 1 - 2, 30 September 2000, 30 - 33
- Jianhua Zhu, Lei Liu, Guohua Hu, Bin Shen, Wenbin Hu, Wenjiang Ding. **Study on composite electroforming of Cu/SiC composites.** Mater Lett 2004.58. 1634 – 7
- Kuen-Ming Shu, Georgechia Tu. **The microstructure and the thermal expansion characteristics of Cu/SiCp composites.** Mater Sci Eng 2003. 349. 236 – 47.
- Omyma El-Kady, Adel Fathy. **Effect of SiC Particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites.** Materials & Design, Vol. 54, 2014. 348 – 353
- Performance Composites Inc., **VIP Set - up and Equipment.**
www.performancecomposites.com.
- Salar Bagherpour. **Fibre Reinforced Polyester Composites.** INTECH, chapter 6, 2012, 135 - 166
- Shao-Yun Fu, Xi-Qiao Feng, Bernd Lauke, Yiu-Wing Mai. **Effects of particle size, particle / matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate –polymer composites.** Composites: Part B Engineer 39, 2008, 933 – 961
- Yu Cao, Jack Cameron. **Flexural and Shear Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite.** Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 25, No. 4, 2006. 347 – 359

Yu Cao, Jack Cameron. **Impact Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite.** Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 25, No. 7, 2006. 761 – 769





ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Krankanokpan Sonsakul, Wanwanut Boongsood and Somsak Siwadamrongpong (2017)
Mechanical Properties of Glass Scraps Reinforced Polyester Composites, 11th
South East Asian Technical University Consortium Symposium (SEATUC 2017), 13
- 14 March, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh,
Viet Nam.



MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER AND GLASS SCRAPS REINFORCED POLYESTER COMPOSITES

Krankanokpan Sonsakul, Wanwanut Boongsood, Somsak Siwadamrongpong
School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
Email: wanwanut@sut.ac.th

ABSTRACT

One concern in bus manufacturing is the high cost of glass fiber reinforced in polyester composites parts. This research was aimed to study mechanical properties of glass fiber and glass scraps reinforced polyester composites. The type of the glass fiber was randomly oriented fiber. Glass scraps were crushed to powder sizes of 118 and 304 μm by a ball mill. The polyester composites reinforced with glass fiber and the powder of glass scraps were fabricated using Vacuum Infusion Process (VIP) whereas one layer of glass fiber was replaced by an identical weight of the glass scrap powder. Tests were performed to determine hardness, flexural, and impact properties of the polyester composites. The results shown that the proposed reinforcement was equivalent to the use of pure glass fiber, but impact strength was slightly lower. Pictures of specimens obtained by using scanning electron microscope (SEM) confirmed that the powder of glass scraps packed in the layers of glass fiber in polyester composites.

KEYWORDS: *fiberglass, composites, vacuum, glass scraps, mechanical properties, polyester*

1. INTRODUCTION

Composite materials are one of the most significant inventions of the materials sciences (matrix and reinforcement) and which remain separate and distinct within the finish structure (Araujo, et al. 2006). Composite materials are used in assembly boards, furniture, fencing, paneling to civil constructions, automobile and even space or aircraft manufacturing. Composite materials can also be used in many fields with high quality and low cost applications (Fazle Elahi, et al. 2014). Fiber prestressing techniques were developed to improve the properties of continuous fiber reinforce composites (Cao & Cameron 2006). Fiber reinforced composites were successfully

used for many decades for all engineering applications. In this study, the matrix was polyester resin, the reinforcements were glass fiber and glass scraps. The glass fiber was chopped mat No. 450. The glass scraps were laminated glass recycling which obtained from terminated buses or crack during operation in bus fleet and manufacturing. Then, the scraps were grinded pass through the mesh sieve sizes No. 60 and 140. The glass fiber had the density of 450 g/m^2 .

Vacuum Infusion Process (VIP) is an efficient manufacturing process for complex laminate with many plies of fibers and core material. The method is used for producing composites the has many advantages over hand lay-up method such as higher quality, higher glass content lead to higher specific strength and stiffness, better consistency, good interior finish, faster cycle time and lower cost (www.performancecomposites.com).

Mechanical properties of a combination of glass fiber and polyester is characterized by high toughness lead to resistance to crack propagation (Aramide, et al. 2012).

The main objective of this research was to study the mechanical properties of the polyester composites reinforced with glass fiber and the powder of glass scraps which the composites were fabricated using VIP. Initial composite material composition was polyester resin matrix reinforced with 3 layers of glass fiber. Next, one layer of glass fiber was replaced by glass scrap powder. The weights of one layer of glass fiber and glass scrap powder were identical. Tests were performed to determine hardness, flexural, and impact properties of the polyester composites.

2. EXPERIMENT

2.1 Materials and Experiment Procedures

Materials used for this project were;

- Matrix: Polyester resin

Table 1. Sizes of glass scraps

	Particle sizes of glass scraps (µm)	
Mean size	240.66	120.45
Std. Dev.	100.60	47.02
Median size	221.35	117.03

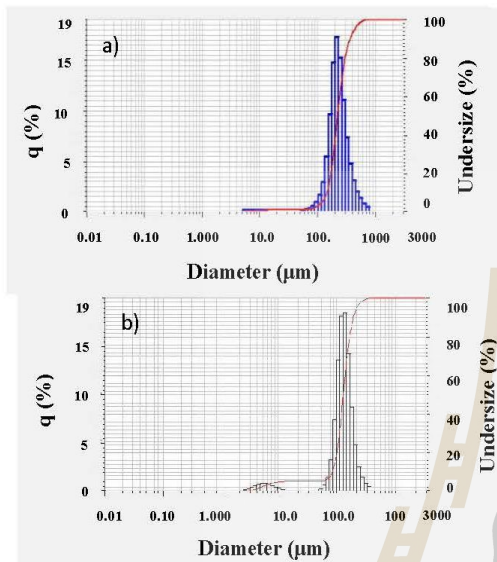


Fig 1. Particle size distribution of glass scraps particle through sieve (a) sieve No. 140 and (b) sieve No. 60

- Catalyst: Methyl Ethyl Ketone Peroxide Norox KP-100
- Reinforcements: Glass fiber chopped stand mat No. 450, and glass powder sizes of 60 and 140 Mesh.
- Others: Gel coat, Styrene monomer, Cobalt in solution as accelerator.

Glass scraps were milled into powder sizes by using a ball mill and screened with sieve No.60 and 140 Mesh where it was decided that the particles could be filled in between the fibers. The sizes were checked by a laser particle counter before used. The results are shown in Table 1 and Fig 1. Table 2 shows sample preparation that were PGF – polyester resin reinforced with 3 layers of pure glass fiber – and A, B, C, D – the resin reinforced with 2 layers of glass fiber and some glass powders. Initially, one layer of glass fiber had weight of 450 g/m². Therefore, the weight of the glass scraps in the experiment were 450 and 550 g/m² which the former was identical with the weight of one layer of glass fiber and the latter was expected to be compacted in the composite.

The VIP was the manufacturing technique, which was used in this study. This technique applies vacuum to pull resin into a laminate (Fig 2). The fabric fibers and core materials are loaded into the mold. Then, a vacuum bag is covered on top to close the mold and create a vacuum seal.

After that, a vacuum pump is used to remove all of the air in the cavity and consolidate the fiber and core materials. Finally, resin is infused under vacuum into the mold cavity to wet out the fiber.

In the present study, the process was followed the practical steps. The glass powder was sprayed after laying the fiber layer by layer. The graphic of rectangular mold used in the experiment is presented in Fig 3. The locations of the vacuum ports and the resin insertion points need to be carefully planned to ensure full resin infusion. Thus, the resin infusion inlet and vacuum outlet were placed at the mid edge of the mold.

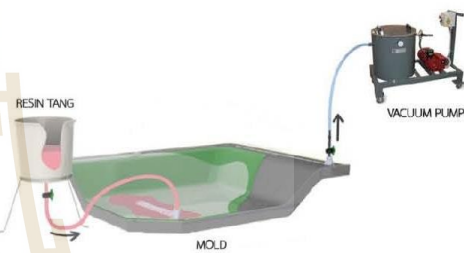


Fig 2. Vacuum infusion process (VIP)

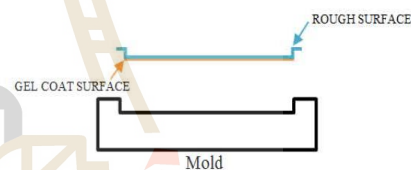
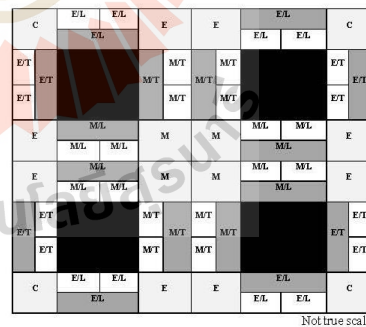


Fig 3. Composite plate forming of VIP



- For hardness test
- For flexural test
- For impact test

Fig 4. Specimens

Table 2. Samples preparation

Sample	Polyester resin (g/m ²)	Catalyst (g/m ²)	Gel coat (0.5 mm thick) (g/m ²)	Glass fiber (No. of layer)	Glass scrap	
					Size (μm)	Weight (g/m ²)
PGF	2,430	24.3	815.1	3	-	-
A				2	240	450
B					550	
C					450	
D					120	550

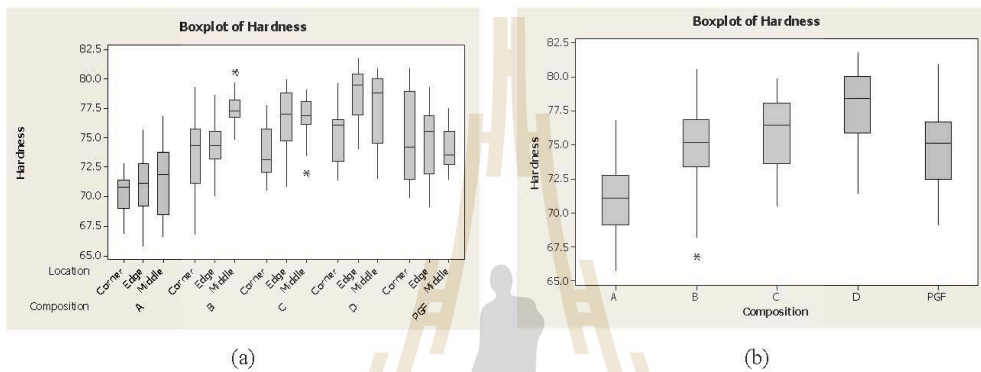


Fig 5. Hardness test results

2.2 Mechanical Properties Tests

Each composition in Table 2 was fabricated with a size of 50x50 cm² then cut into small specimens as shown in Fig 4 for determining mechanical properties.

Hardness test was carried out using the shore D hardness according to ASTM D2240 during 10s referred to Araujo, et al. 2006.

Flexural test was performed using a universal testing machine, INSTRON model 5565 (load 5 kN), with a speed of 5 mm/min at room temperature. The test was according to ASTM D790 as referred to Cao & Cameron 2006.

Izod impact test (unnotched) was conducted using INSTRON (CEAST)/CEAST 9050 impact according to ASTM 4812 apparatus with a hammer of 11 J, at room temperature. Then, the fracture surfaces of the specimens subjected to Izod impact test were taken to scanning electron microscope (SEM) to analyze their microstructure which the specimens were coated with gold (Araujo, et al. 2006).

3. ANALYSIS

The test results were graphically and statistically analyzed and discussed as following.

3.1 Hardness Test

From statistical analysis, it was found that the hardness of the specimens at the corners was significantly lower than at the edge or in the mid plate (Fig 5a) but not so affecting with PGF. This may result from the flow at the corner not so compromise as other positions. Though, the composition D (the mix between smaller particle size and higher weight) gained a higher hardness than, and composition C (the mix between smaller particle size and an identical weight of glass fiber) showed compatible hardness to, PGF (Fig 5b) resulted by the rigid and a numbers of particles spreading thoroughly over the work to absorbing the compression.

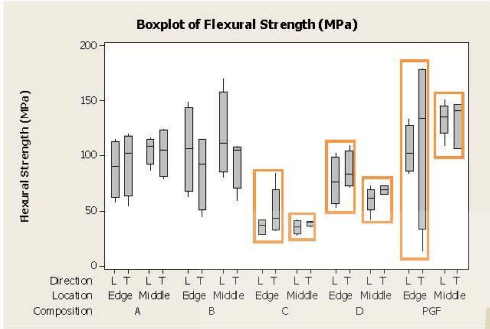
3.2 Flexural Test

Fig 6a shows that either the directions of infusion flow or locations of the specimens had no effect with the flexural strength. The diverse compositions affected the strength. Fortunately, the strengths obtained from compositions A and B were compatible with PGF, see Fig 6b, that might be resulted from the larger particle size was able to better capture with the matrix.

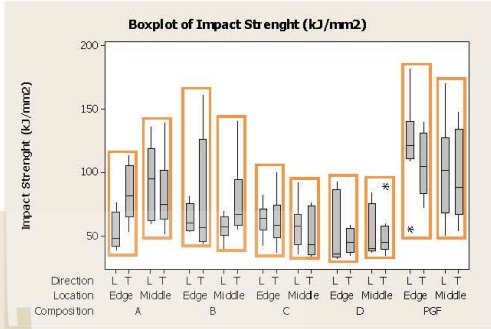
3.3 Impact Test

As well as in the flexural test, the directions of infusion had no effect with the impact resistance (Fig 7a). All proposed composite compositions showed significantly lower impacting energy absorption (Fig 7b). Averagely, impacting energy was absorbed by PGF 39%,

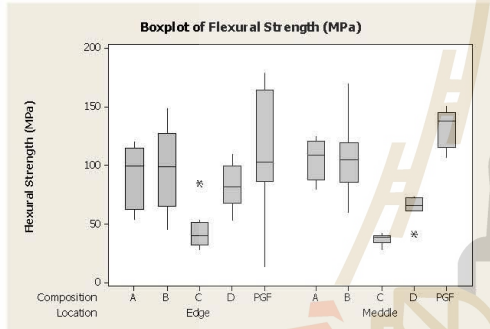
composition A 28%, B 26%, C 22% and D 19%. That might be the consequence of a reinforcement with short and tiny particles instead of long and strong fibers.



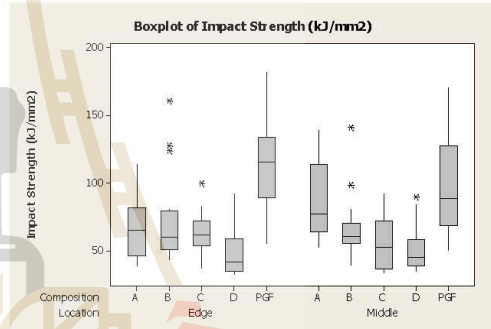
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig 6. Flexural test results

Fig 7. Impact test results

Table 3 Summary of mechanical properties

Sample	Particles size of glass scraps (µm)	Weight of glass scraps (g/m ²)	Hardness (Shore D)	Flexural strength (MPa)	Impact strength (kJ/mm ²)
PGF	-	-	74.9	121.5151	107.42
A	240	450	71.1	98.1245	77.06
B	240	550	75.0	101.3849	70.90
C	120	450	75.9	40.7064	59.19
D	120	550	77.7	72.9033	51.32

3.4 SEM Analysis

The fracture surface of the specimen subjected to impact test were analyzed using SEM. Fig 8. Presents the proof that particles of glass scraps trapped as expected in the space between the glass fabrics to be reinforce the composite material.

Table 3 shows the summary of test results obtained by hardness, flexural, and impact tests on polyester composites reinforced with pure glass fiber and glass scraps. The values shown in the table was averaged from the total numbers of all specimens in each types of tests.

The point estimation in the table agreed well with the graphical and statistical analysis.

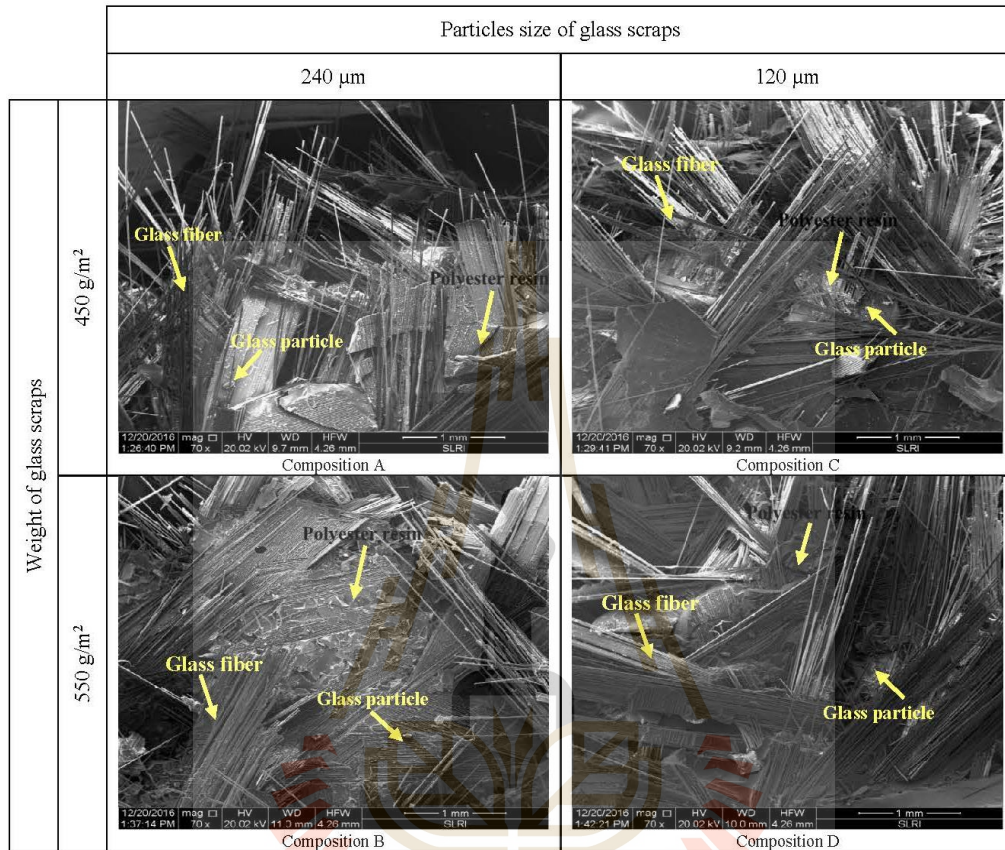


Fig 8. SEM photomicrographs of impact test fractured surfaces (70X).

4. CONCLUSIONS

From the results and discussion, it can be concluded that:

- Hardness was increased through spreading of glass particles over the composite by increasing proportion of glass powder together with a refinement of particle size.
- The resistance to bending, flexural strength, was maintained comparing to composite reinforced with pure glass fiber by composing the glass scraps size of 240 μm .
- Absorbed energy, impact strength, of the composite samples was reduced according with powder reinforcement as oppose to fiber strengthening.
- Pictures from SEM shows that the powders of glass scraps were inserted in the gap of glass fibers.

REFERENCES

- Aramide F.O., Atanda P.O. and Olorunniwo O.O. (2012). Mechanical Properties of a Polyester Fiber Glass Composite, *International Journal of Composite Materials* 2012, January 2012, 2(6), pp. 147 – 151.
- A.H.M. Fazle Elahi, Md. Milon Hossain, Shahida Afrin and Mubarak A. Khan (2014). Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites, *Conference paper in International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2014*, 26 – 27 December 2014.
- Edcleide M. Araújo, Kasselyne D. Araújo, Osanildo D. Pereira, Pollyana C. Ribeiro and Tomás J.A. De Melo (2006). Fiberglass Wastes/Polyester Resin Composite:

Mechanical Properties and Water Sorption, *Polimeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 16, No. 4, pp. 332 – 335.

Y. Cao and J. Cameron (2006). Flexural and shear Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforce Epoxy Composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol. 25. No. 4/2006, pp. 347 – 359.

Y. Cao and J. Cameron (2006). Impact Properties of Silica Particle Modified Glass Fiber Reinforce Epoxy Composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol. 25. No. 7/2006, pp. 761 – 769.

Performance Composites Inc., Vacuum Infusion Process Guide, *Technical Information*, California USA., URL: <http://www.performancecomposites.com>

PHOTOS AND INFORMATION



Krankanokpan Sonsakul received the B.E. (2011) degree in Ceramic Engineering from Suranaree University of Technology. Her Current interests include polymer composites material, manufacturing process.



Wanwanut Boongsod received the B.E. (1999) degree in Industrial Engineering from Khon Kaen University, M.E. (2006) degree in Industrial Engineering from Thammasat University, Thailand, and Ph.D. (2012) degree in Manufacturing Engineering from University of Liverpool, UK. Her Current interests include composites materials, design production and manufacturing processes.



Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, Thailand. M.E. (2001) degree in Environmental System Engineering from Nagaoka University of Technology, and Ph.D. (2004) degree in Energy and Environment Science from Nagaoka University of Technology, Japan. His Current interests include composites materials, design production and manufacturing processes.

ประวัติผู้วิจัย

แบบประวัติส่วนตัว

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4422 4676 โทรสาร 0 4422 4413



wanwanut@sut.ac.th

ผศ.ดร. วรณวนัช ปุ่งสุด

Asst.Prof.Dr. Wanwanut Boongsod

3 4099 00803 06 1

การศึกษา/คุณวุฒิ

2555 Doctor in Philosophy (PhD, Manufacturing Engineering), University of Liverpool, UK

2549 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม. อุตสาหกรรม)มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ. อุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2555 – ปัจจุบันได้รับการรับรอง Technologist Geometric Dimensioning & Tolerancing Professional (GDTP-2009, Certification ID: GDTP T09-8568) โดย the American Society of Mechanical Engineers (ASME)

ตำแหน่งปัจจุบัน

หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2549 – ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2548	วิศวกร บริษัท วีเอส เอลเลเวเตอร์ จำกัด
พ.ศ. 2542 - 2547	วิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์ Mitsubishi Electric Automation Thailand Co., Ltd.

งานวิจัยที่สนใจ

Ultrasonics for Material Processing
Advanced Manufacturing Processes
Product Design and Development
Sustainable Development

ผลงานวิจัย

Akkaranat Rattanaphongphak and Wanwanut Boongsood, "Design of Machine Vision System for Sugarcane Buds or Rings Detection," in 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), Trinity Hall, University of Cambridge, Cambridge, UK, 2-4 March 2019.

Phimmada Sophon, Wanwanut Boongsood, and Kanchala Sudtachat, "A Study of Magnetoresistance Degradation in the Head Assembly Process," in 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), Trinity Hall, University of Cambridge, Cambridge, UK, 2-4 March 2019.

พิมพ์มาดา โสภณ, วรณวนัช บุ่งสุด, และกัญชลา สุดตาชาติ. "การปรับปรุงกระบวนการทดสอบค่าความจุกระแสไฟฟ้าของชุดหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ" การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14, โนวาเทล, ระยอง, 13 – 15 มิถุนายน 2561.

C. Jadram and W. Boongsood, "Application of fuzzy materials-handling inputs with the genetic algorithm for machine layout," in 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), St Anne's College, Oxford University, Oxford, UK, 7-9 March 2018.

Krankanokpan Sonsakul and Wanwanut Boongsood "Effects of Glass Scraps Powder and Glass Fibre on Mechanical Properties of Polyester Composites" International Conference on Informatics, Technology and Engineering 2017 (InCITE 2017), Discovery Kartika Plaza Hotel, Bali, Indonesia, 24-25 August 2017.

ชिरานวัฒน์ เจ็ดรัมย์ และ วรณวนษ์ บุ่งสุด "การประยุกต์ใช้ข้อมูลของอินพุตในการขนย้ายวัสดุที่ไม่ชัดเจนร่วมกับ ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมในการจัดเรียงสถานีงานเครื่องจักร" การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2560 (IE-Net), โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่, เชียงใหม่, 12-15 กรกฎาคม 2560. (Best Paper Award)

Krankanokpan Sonsakul, Wanwanut Boongsod, Somsak Siwadamrongpong "Mechanical Properties of Glass Fiber and Glass Scraps Reinforced Polyester Composites", The 11th SEATUC Symposium, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Vietnam, 13–14 March 2017.

Suphatra Kritwattanakorn, Kontorn Chamniprasart, Wanwanut Boongsod, "A Permutation-based Genetic Algorithm for Solving the Machine Layout of Manufacturing System", The 10th SEATUC Symposium, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan, 22–24 February 2016.

Suphatra Kritwattanakorn, Kontorn Chamniprasart, Wanwanut Boongsod "Application of Genetic Algorithm in Manufacturing Process for Solving Machine Layout", The 41st Congress on Science and Technology of Thailand (STT41), Thailand, 5-8 November 2015.

Somsak Siwadamrongpong, Wanwanut Boongsod, Janjira Aphirakmethawong "A Study of Joining Process for Recycled Material from Waste Melamine Formed by Cold Molding", 8th SEATUC Symposium, Universiti Teknologi Malaysia, 4-5 March 2014.

Siwadamrongpong, S., Boongsod, W., Mahai, M. & Wonglane, K., "Influence of pre-heating in cold forming of melamine", 7th SEATUC Symposium, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 4-6 March 2013.

วรณวนษ์ บุ่งสุด, มณฑลีสานนันทน์ และ บุชบา พฤษชาพันธุ์รัตน์, "การสร้างเครื่องมือสำหรับจัดลำดับข้อกำหนดทางเทคนิคในการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพโดยใช้ตัวเลขฟัชซี", วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 หน้า 27-40, กันยายน-ธันวาคม 2550.

วรณวนษ์ บุ่งสุด, มณฑลีสานนันทน์ และ บุชบา พฤษชาพันธุ์รัตน์, "การสร้างเครื่องมือสำหรับจัดลำดับข้อกำหนดทางเทคนิคในการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพโดยใช้ตัวเลขฟัชซี", การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ, หน้า 92-105, 31 สิงหาคม - 1 กันยายน 2549.

ประสบการณ์ด้านการสอน

Materials and Processes in Manufacturing
Product Quality
Jig and Fixture Design
Product Design
Commercial Materials and Selection
Advanced Statistics for Manufacturing Engineering
Industrial Work Improvement
Geometric Dimensioning and Tolerancing
Precision Measurement

การฝึกอบรม

Six Sigma Blackbelt
Induction motor design by Mitsubishi Electric, Shinshiro, Japan
Corrosion resistance by [National Metal and Materials Technology Center, Bangkok, Thailand](#)
Corrosion resistance in stainless steels by [National Metal and Materials Technology Center, Bangkok, Thailand](#)
Organization Communicating and coordinating techniques by Electrical and Electronics Institute, Bangkok, Thailand
Operation planning techniques and strategies by Electrical and Electronics Institute, Bangkok, Thailand

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี