

การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน

**A STUDY OF THE REINFORCEMENT OF EPOXY RESIN WITH
CHICKEN EGG SHELL POWDER**

อินทรีย์ ศรีสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน

อินทรีย์ ศรีสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

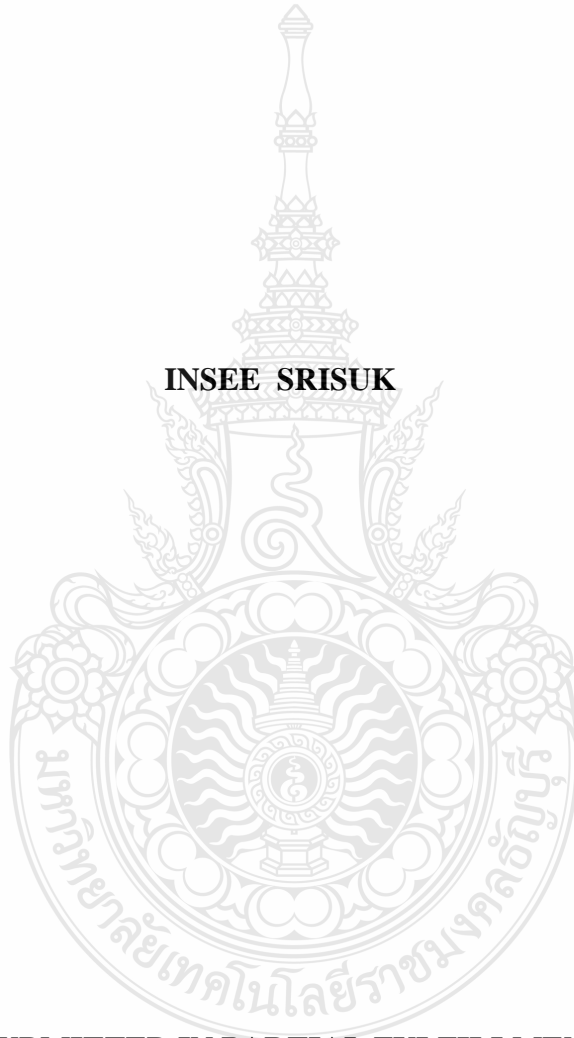
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**A STUDY OF THE REINFORCEMENT OF EPOXY RESIN WITH
CHICKEN EGG SHELL POWDER**

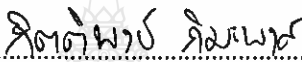
INSEE SRISUK

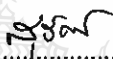



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI
ACADEMIC YEAR 2017
COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน
ชื่อ-นามสกุล นายอินทรี ศรีสุข
สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.
ปีการศึกษา 2560


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ วรรณศรี, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(อาจารย์อนันต์ มีมนต์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 14 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน
ชื่อ-นามสกุล	นายอินทรีย์ ศรีสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน โดยใช้เปลือกไข่ไก่ที่เป็นเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตขนมไทยซึ่งไข่ไก่เป็นส่วนผสมที่สำคัญในการสร้างรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ จากการศึกษาพบว่าในเปลือกไข่ไก่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ และอีก 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่น ในอุตสาหกรรมพลาสติกได้มีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตการเป็นตัวเติม (Filler) เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติก ปรับปรุงผิวของพลาสติกให้มีความเงาเพิ่มขึ้น ควบคุมการหดตัวของพลาสติก

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของการผสมผงเปลือกไข่ไก่ในอีพอกซีเรซิน อิทธิพลของขนาดผงเปลือกไข่ไก่ และอิทธิพลของสารคู่ควบ (Coupling Agent) ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยผงเปลือกไข่ไก่ ขั้นตอนแรกได้ศึกษากระบวนการแยกไข่ไก่ออกจากเปลือกไข่ไก่ จากการทดลองพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้ลอกเปลือกไข่ไก่ได้ จากนั้นเปลือกไข่ไก่ถูกนำไปบด และคัดแยกขนาด 75 100 200 และ 325 เมช จากนั้นทำการทดลองขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตโดยใช้ผงเปลือกไข่ไก่แต่ละขนาดในสัดส่วนร้อยละ 15 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงกลหลายประการ และปรับปรุงสมบัติทางกลโดยใช้สารคู่ควบ

จากผลการทดลองพบว่าผงเปลือกไข่ไก่ขนาด 200 เมช ผสมในสัดส่วน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลดีที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกไข่ไก่ด้วยสารคู่ควบไซเลน KH560 พบว่าสมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้นซึ่งยืนยันด้วยผลการทดสอบสมบัติทางกล และสัญญาณวิทยาของวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยผงเปลือกไข่ไก่ นอกจากนี้ผลการทดลองได้ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบแฟกทอเรียลซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ขนาดและอัตราส่วนของผงเปลือกไข่ไก่มีผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : ผงเปลือกไข่ไก่ อีพอกซีเรซิน วัสดุคอมโพสิต

Thesis Title	A Study of the Reinforcement of Epoxy Resin with Chicken Egg Shell Powder
Name – Surname	Mr.Insee Srisuk
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Torsakul, D.Ing.
Academic Year	2017

ABSTRACT

This study investigated the reinforcement of epoxy resin with chicken egg shell powder. The egg shells in the study were the waste of chicken eggs used in making Thai dessert, in which eggs are an important ingredient for creating a unique flavor. It has been proven that over 97% of an egg shell is composed of calcium carbonate and 3% of other organic substances. Plastic industries have been using calcium carbonate as fillers to reduce the usage of plastic, improve the surface quality and control the shrinkage of plastic products.

This research studied the mixing ratios of egg shell powder in epoxy resin, effects of the powder sizes and the coupling agents in the forming process of composite materials derived from egg shell powder reinforced in epoxy resin. The first step studied the removal of the egg membrane. It was found that a sodium hydroxide solution could remove the membrane thoroughly. After that, the egg shells were ground and sieved to the sizes of 75, 100, 200 and 325 mesh. Then, composites were formed by mixing egg shell powder with epoxy resin in the ratios of 15, 35 and 50% w/w respectively. Mechanical tests were conducted on the composites to evaluate their properties. The final step investigated the improvement of the composites' mechanical properties by using coupling agents.

The results showed that the best mechanical properties were achieved when the composite consisted of 200 mesh egg shell powder at the mixing ratio of 15 % w/w. Meanwhile, among the silane coupling agents, KH560 could improve the mechanical properties significantly, which was confirmed by the results of the mechanical testing and morphology of the composite materials. In addition, the results of this study were analyzed, using the factorial variance analysis technique. It was concluded that the sizes and mixing ratios of egg shell powder affected the mechanical properties at 95% confidence intervals.

Keywords : chicken egg shell powder, epoxy resin, composite materials

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับคำแนะนำจากคณาจารย์ทั้งหลาย ที่คอยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ขณะที่ได้ทำการจัดทำโครงการ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล และดร.อนินท์ มีมนต์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยควบคุมการจัดทำโครงการให้สามารถดำเนินการไปได้จนแล้วเสร็จ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี บริษัท ไควคาเซอิ (ไทยแลนด์) จำกัด และบุคลากรทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางกลทำให้โครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวทั้งหมดที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ และคอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อินทรีย์ ศรีสุข



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุคอมโพสิต.....	4
2.2 เปลือกไข่.....	7
2.3 อีพอกซีเรซิน.....	14
2.4 สารควบคู่ปฏิกิริยา.....	16
2.5 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสม.....	18
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	25
2.7 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	37
3.4 กระบวนการเตรียมผงบดจากเปลือกไข่.....	39
3.5 กระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน.....	45
3.6 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์.....	57
4.1 ผลการเตรียมผงบดจากเปลือกไข่.....	57
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอิพอกซีเรซิน.....	59
4.3 ผลกระทบของกระบวนการทำให้ความร้อน (Post cure).....	63
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ.....	66
4.5 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ.....	69
4.6 ผลสำเร็จของการขึ้นรูปแม่พิมพ์.....	74
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุป.....	76
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	77
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก ก แสดงตารางผลการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	81
ภาคผนวก ข ภาพแสดงชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	93
ภาคผนวก ค แสดงการคำนวณอัตราส่วนผสมในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ.....	101
ภาคผนวก ง ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	107
ประวัติผู้ทำวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัดส่วนไข่ขาว ไข่แดง และเปลือกไข่ของสัตว์ปีกแต่ละชนิด.....	8
ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของส่วนต่างๆของไข่ไก่.....	9
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของไข่.....	12
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่ (ค่าเฉลี่ย, กรัมต่อไข่ 1 ฟอง).....	13
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่.....	13
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของสารควบคุมปฏิกริยาประเภทไซเลนและการนำไปใช้งานกับพอลิเมอร์ ชนิดต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2.7 ลักษณะของกราฟความเค้นและความเครียดที่มีความสัมพันธ์กับสมบัติของ พอลิเมอร์.....	22
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ.....	33
ตารางที่ 3.2 การทดสอบแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่.....	41
ตารางที่ 4.1 การทดสอบแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่.....	57
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่เดิมในอีพอกซีเรซิน.....	70
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นผงเปลือกไข่เดิมในอีพอกซีเรซิน.....	70
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่เดิมในอีพอกซีเรซิน.....	71
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็งผงเปลือกไข่เดิมในอีพอกซีเรซิน.....	71

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของตัวเสริมแรง.....	6
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างไข่ไก่.....	9
ภาพที่ 2.3 เปลือกไข่ผ่าตามหน้าตัดด้านข้างขยายใหญ่จากของจริง.....	11
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างอีพอกซีเรซิน.....	14
ภาพที่ 2.5 ลักษณะการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์.....	17
ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	19
ภาพที่ 2.7 ประเภทของกราฟความเค้นความเครียด.....	22
ภาพที่ 2.8 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก.....	24
ภาพที่ 3.1 แผนภาพการไหลของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
ภาพที่ 3.2 เครื่องบดแบบ Ball Mill.....	34
ภาพที่ 3.3 ชุดตะแกรงร่อนคัดแยกอนุภาค.....	34
ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์กวนสาร.....	35
ภาพที่ 3.5 ชุดสุญญากาศสำหรับไล่ฟองอากาศ.....	35
ภาพที่ 3.6 แม่พิมพ์ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	36
ภาพที่ 3.7 คาซังคิจิตอล.....	36
ภาพที่ 3.8 ตู้อบ.....	37
ภาพที่ 3.9 ออกแบบการทดลองโดยใช้ Program Minitab.....	38
ภาพที่ 3.10 ล้างเปลือกไข่ด้วยน้ำสะอาด.....	39
ภาพที่ 3.11 เปลือกไข่บด.....	40
ภาพที่ 3.12 การแยกเชื้อด้วยสารละลาย.....	41
ภาพที่ 3.13 การแยกเชื้อเปลือกไข่ออก.....	42
ภาพที่ 3.14 การเตรียมเปลือกไข่ให้แห้ง.....	42
ภาพที่ 3.15 การทดสอบด้วยเครื่อง XRF (X-ray fluorescence)	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.16 ลักษณะการทำงานของเครื่องบดแบบ Ball Mill.....	44
ภาพที่ 3.17 ตะแกรง (Sieve Test).....	44
ภาพที่ 3.18 การตรวจสอบแต่ละชนิด.....	45
ภาพที่ 3.19 ผสมผงเปลือกไข่กับอีพอกซีเรซินชนิด A.....	46
ภาพที่ 3.20 คู่มือป้องกันอากาศ.....	46
ภาพที่ 3.21 ผสมสารอีพอกซีเรซินชนิด B.....	47
ภาพที่ 3.22 เทสารที่ผสมลงเบ้าหล่อชิ้นงาน.....	47
ภาพที่ 3.23 ร่อนชิ้นงานแข็งและปลดชิ้นงานออกจากแบบ.....	48
ภาพที่ 3.24 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	49
ภาพที่ 3.25 แสดงขนาดมาตรฐานชิ้นทดสอบที่นำไปทดสอบความแรงดึง.....	49
ภาพที่ 3.26 ชิ้นงานเตรียมทดสอบแรงดึง.....	49
ภาพที่ 3.27 เครื่องทดสอบความแข็ง.....	50
ภาพที่ 3.28 แสดงขนาดมาตรฐานชิ้นทดสอบที่นำไปทดสอบความแข็ง.....	50
ภาพที่ 3.29 ชิ้นงานเตรียมทดสอบความแข็ง.....	51
ภาพที่ 3.30 เครื่องทดสอบแรงกระแทก แบบชาร์ปี.....	51
ภาพที่ 3.31 แสดงขนาดมาตรฐานชิ้นทดสอบที่นำไปทดสอบแรงกระแทก.....	52
ภาพที่ 3.32 ชิ้นงานเตรียมทดสอบแรงกระแทก.....	52
ภาพที่ 3.33 การใช้ Stirrer ในการกวนสาร.....	53
ภาพที่ 3.64 การกรองสาร.....	54
ภาพที่ 3.35 การอบแห้ง.....	54
ภาพที่ 3.36 ผงเปลือกไข่หลังจากผ่านการอบแห้ง.....	54
ภาพที่ 3.37 บล็อกแม่พิมพ์.....	55
ภาพที่ 3.38 ทาวาสลินแม่พิมพ์.....	55
ภาพที่ 3.39 ผสมสารที่ต้องการหล่อแม่พิมพ์.....	56
ภาพที่ 3.40 หล่อแม่พิมพ์.....	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.1 กราฟปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตหน้า.....	58
ภาพที่ 4.2 ผงเปลือกไข่ที่ได้จากการบดและคัดแยกตามขนาดเมช.....	59
ภาพที่ 4.3 ชั้นทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับการหล่อจากผงเปลือกไข่เต็มใน อีพอกซีเรซิน.....	60
ภาพที่ 4.4 ชั้นทดสอบค่าความต้านทานต่อการกระแทกสำหรับการหล่อจากผงเปลือกไข่เต็มใน อีพอกซีเรซิน.....	60
ภาพที่ 4.5 ชั้นทดสอบค่าความแข็งสำหรับการหล่อจากผงเปลือกไข่เต็มในอีพอกซีเรซิน.....	60
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงจากผงเปลือกไข่เต็มในอีพอกซีเรซิน.....	61
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่ายังโมดูลัสจากผงเปลือกไข่เต็มในอีพอกซีเรซิน.....	60
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งจากผงเปลือกไข่เต็มในอีพอกซีเรซิน.....	60
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าแรงกระแทกจากผงเปลือกไข่เต็มในอีพอกซีเรซิน.....	63
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	64
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงค่ายังโมดูลัสระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและชั้น ทดสอบ ที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	64
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ ไม่ได้ ผ่านการ Post Cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ ชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (แรงกด 60Kg. HRR).....	65
ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกระหว่างชั้นงานที่ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นงานที่ ผ่านการ Post cure ที่ อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

- ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent.....66
- ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงค่า Young Modulus ระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent.....66
- ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent (ใช้แรงกด 60Kg. HRR)67
- ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงต่อการกระแทกระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและชั้นทดสอบ ที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent.....67
- ภาพที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่กำลังขยาย 200 และ 1000 เท่า ที่ (a - b) ผสมผงเปลือกไข่ 15% (c - d) ผสมผงเปลือกไข่ 50% และ (e) ชั้นงานที่ผ้าส่อง.....68
- ภาพที่ 4.19 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณพื้นผิวของวัสดุที่กำลังขยาย 50 เท่า Mode back skater ที่ (a) ผสมผงเปลือกไข่ 15 % (b) ผสมผงเปลือกไข่ 50 % และในด้าน Cross Section ของวัสดุ ที่กำลังขยาย 500 เท่า Mode Secondary (c) ผสมผงเปลือกไข่ 50 % ที่ใช้ผงเปลือกไข่ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และ (d) ผสมผงเปลือกไข่ 50% ที่ใช้ผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว.....69

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึง.....	72
ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่ายังโมดูลัส.....	73
ภาพที่ 4.22 เปลือกไข่ผ่าตามหน้าตัดด้านข้างขยายใหญ่จากของจริง.....	73
ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก.....	74
ภาพที่ 4.24 ผลสำเร็จของการขึ้นรูปแม่พิมพ์.....	75
ภาพที่ 4.25 ผลงานอัดกลีบดอกไม้ประดิษฐ์.....	75



บทที่ 1

บทนำ

โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน เป็นโครงการวิจัยที่ผู้จัดทำ มีความต้องการจะลดต้นทุนในการขึ้นรูปวัสดุชนิดหนึ่ง โดยที่จะใช้ขยะเหลือใช้จากชุมชนที่สามารถหาได้โดยง่ายและมีอยู่ทั่วไป โดยรายละเอียดของความสำเร็จและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมอาหารขนาดกลางและขนาดย่อมหลายแห่งใช้ “ไข่” เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไม่ว่าจะเป็นอาหารคาวและขนมหวาน จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้แสดงข้อมูลการบริโภคไข่ไก่ในปี 2560 พบว่ามีปริมาณการบริโภคไข่ไก่ จำนวนถึง 15,868 ล้านฟอง ดังนั้นจึงทำให้มีเปลือกไข่จำนวนมาก ถูกทิ้งเป็นขยะ จากขยะเหลือทิ้งที่มีอยู่ทุกครัวเรือน จึงมีหลากหลายความพยายามที่จะนำเปลือกไข่เหลือทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์ เช่น การนำเปลือกไข่มาซักผ้า การนำเปลือกไข่มาไล่แมลง รวมถึงการนำเปลือกไข่มาไล่แมลง แต่ถึงอย่างไรก็ยังมีเปลือกไข่จำนวนมากที่ยังเหลือทิ้ง

ในเปลือกไข่ไก่ 1 ใบมีองค์ประกอบย่อย 2 ส่วนหลัก คือ เยื่อหุ้มเปลือกไข่ (Membrane) และเปลือกไข่ (Egg Shells) ในเปลือกไข่นั้นมีองค์ประกอบ CaCO_3 อยู่ถึง 99.0%ซึ่งจะพบว่าส่วนประกอบหลักของเปลือกไข่ คือ CaCO_3 หรือที่รู้จักกัน คือ แคลเซียมคาร์บอเนต จากการศึกษาพบว่าการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องผนังหลังคา คอนกรีตผสมเสร็จ เป็นต้น ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติม (Filler) เพื่อปรับปรุงผิวของพลาสติก โดยทำให้พลาสติก มีความเงาหรือความมันเพิ่มขึ้น ด้านทานไฟฟ้าดีขึ้น ทนทานต่อแรงบีบอัด ควบคุมการหดตัวของพลาสติก และยังทำให้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกทนทานต่อสภาพภูมิอากาศมากขึ้นอีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำเปลือกไข่ไก่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ โดยการนำเปลือกไข่ไก่ไปผสมในอีพอกซีเรซินสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสริมแรงและเพื่อลดปริมาณการใช้อีพอกซีเรซิน ช่วยลดต้นทุนในการผลิต จากการศึกษาพบว่าการเติมผงอลูมิเนียมและผงบดจากเศษแก้ว ลงไปในเรซินสำหรับหล่อเป็นก้อนวัสดุสำหรับขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของการผสมผงบดจากเปลือกไข่ไก่ในอีพอกซีเรซินและศึกษาสมบัติทางกลบาง

ประการของวัสดุผสมผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน อีกทั้งยังเป็นการหาวิธีการช่วยลดปริมาณขยะเพิ่มช่องทางการนำเปลือกไข่เหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ จะเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นการลดขยะจากไข่ไก่ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกไข่ไก่ได้อีกทางหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมผงเปลือกไข่ และศึกษากระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมจากอีพอกซีเรซินผสมผงเปลือกไข่

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลบางประการของผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน เช่น การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้เปลือกไข่ไก่ สีครีม ที่ได้จากเศษเหลือทิ้งของการผลิตขนมเปี๊ยะยี่ห้อสองเสาที่อยู่ในชุมชนบึงกาสาม อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี

1.3.2 เตรียมเปลือกไข่โดยนำมาผ่านกระบวนการแยกเชื้อด้วย สารละลายกรดซัลฟูริก อะซิติกแอซิด ไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.3.3 ขึ้นรูปขึ้นทดสอบสมบัติเชิงกลอีพอกซีเรซินผสมกับผงเปลือกไข่ โดยใช้ผงเปลือกไข่ไก่ขนาด 75, 100, 200 และ 325 เมช ที่เสริมแรงในอีพอกซีเรซินเกรดแม่พิมพ์ EP-078 ในอัตราส่วนอีพอกซีเรซินกับผงเปลือกไข่ร้อยละ 100:0, 85:15, 65:35, 50:50 โดยน้ำหนัก

1.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการ

1.3.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 638

1.3.4.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 785

1.3.4.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 256

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำเปลือกไข่ที่เป็นขยะเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดปริมาณขยะจากไข่ไก่และเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเปลือกไข่ไก่

1.4.2 ได้รู้ถึงกระบวนการเตรียมเปลือกไข่ สำหรับนำมาใช้ขึ้นรูปวัสดุผสมจากอีพอกซีเรซิน

1.4.3 ได้รู้ถึงค่าของสมบัติทางกลบางประการของวัสดุผสมจากผงบดเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

1.4.4 ทำให้เกิดความรู้ ประสบการณ์ เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้เกิดขึ้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์เรื่องทดสอบและในการทดสอบจึงจำเป็นต้องมีการทบทวนวรรณกรรมและศึกษาส่วนของทฤษฎีที่มีความสำคัญ และเกี่ยวข้องกับการจัดทำวิทยานิพนธ์ หัวข้อนี้โดยมีรายละเอียดของเนื้อหา ดังนี้

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) [7]

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทขึ้นไป โดยที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากการผสมหรือการสร้างพันธะ

วัสดุคอมโพสิต หรือ “วัสดุประกอบ” เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างมาก ในปัจจุบันมีปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุคอมโพสิตมากถึง 10 ล้านตันต่อปีและมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นทุกปีประมาณ 5-10% วัสดุคอมโพสิตจัดเป็นวัสดุวิศวกรรม (Engineering material) ที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุโครงสร้างและรับแรงสำหรับงาน วิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์เรือเฟอร์นิเจอร์รูปทรงกีฬา เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากคอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการที่สำคัญที่สุดคือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ดังนั้นคอมโพสิตจึงมีความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength, σ/ρ) สูง ดังนั้นเมื่อใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง เช่น ยานพาหนะ จะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น มีประสิทธิภาพในการขนส่งมากขึ้น และประหยัดพลังงานมากขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่อยู่ในช่วงกว้าง เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายชนิดหลายรูปแบบสามารถเลือกใช้ออกแบบและสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน ทำให้มีการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตอย่างกว้างขวางมากมายหลากหลายการใช้งาน ในการใช้งานในปัจจุบันมีการเรียกวัสดุคอมโพสิตหลากหลายชื่อเช่น พลาสติกเสริมแรง (Reinforced plastics, RP) พลาสติกเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Fiberglass reinforced plastics, FRP) แผ่นลามิเนตเสริมแรง (Reinforced plastic laminates) หรือ ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เป็นต้น

2.1.1 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct Components) อยู่ด้วยกันและเสริมแรงกัน องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิตคือคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เส้นใย (Fibers) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass- fibers) เส้นใยคาร์บอน (Carbon - fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar® fibers) เป็นต้น เส้นใยอาจเป็นเส้นใยเดี่ยวยาว (Continuous fibers) หรือเส้นใยสั้น (Discontinuous หรือ Chopped short fibers) นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ และมีการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ โดยส่วน 6 เสริมแรงทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงหลัก (Principle load-carrying members) ของวัสดุคอมโพสิต

2.1.2 เมตริกซ์ (Matrix) [8,9]

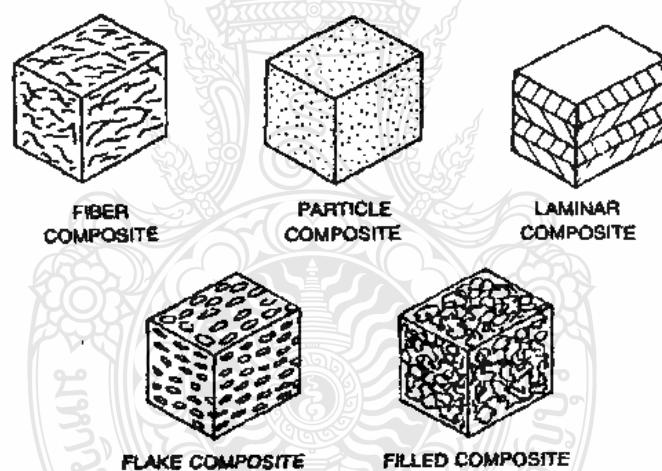
วัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่ง และการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสี เนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่า ส่วนเสริมแรงเมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุ

พอลิเมอร์เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Polymer Composites” สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์ประเภท เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermosets) โลหะเรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Metal Composites” และ เซรามิก เรียกคอมโพสิตชนิดนี้ว่า “Ceramic Composites” เกิดจากการผสมกันระหว่างวัสดุองค์ประกอบอยู่ในระดับที่สามารถมองเห็นได้ ตัวอย่างเช่น คอนกรีต ที่ประกอบด้วยซีเมนต์ ทราย หิน และ น้ำ จากการสร้างพันธะขององค์ประกอบอยู่ในระดับโมเลกุล ถ้าเป็นเหล็กเรียกว่า อัลลอย ถ้าเป็นพลาสติกเรียกว่าพอลิเมอร์

วัสดุเชิงประกอบจะประกอบด้วยตัวเสริมแรง (Reinforce phase) ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย อนุภาค แผ่นหรือชิ้นเล็กๆ และ/หรือเป็นสารตัวเติม ซึ่งเป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ฝังตัวอยู่ในเนื้อพื้น (Matrix) ที่อาจเป็นโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ตัวเสริมแรงจะช่วยทำให้สมบัติทางกลโดยรวมของเนื้อพื้นดีขึ้นเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีทั้งข้อดีข้อเสีย เช่น โลหะจะมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงแต่เป็นสนิมง่ายและหนัก พอลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนไม่ได้ นำไฟฟ้าไม่ได้ เซรามิกมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอและการผุกร่อนได้ดี และทนความ

ร้อนได้ดี แต่เปราะ มีความเหนียวต่ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาวัสดุต่างชนิดมาผสมกันเพื่อจะ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติพิเศษที่ได้จากข้อดีของวัสดุแต่ละชนิด เช่น คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุผสมที่จะให้ทั้งความแข็ง (จากสมบัติที่ดีของคอนกรีตซึ่งเป็นเซรามิก) และความเหนียว (จากสมบัติที่ดีของเหล็กซึ่งเป็นโลหะ) หรือไฟเบอร์กลาสเป็นวัสดุผสมที่มีน้ำหนักเบา (จากสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์) และมีความแข็งแรง (จากสมบัติที่ดีของใยแก้ว) เป็นต้น

ประเภทของวัสดุคอมโพสิตอาจถูกแบ่งได้ตามเนื้อพื้นได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Fiber-reinforced polymers, FRP) กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-matrix composite ,CMC) และกลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-matrix composite, MMC) นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตอาจแบ่งได้ตามลักษณะของตัวเสริมแรง ได้แก่ ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber composite), ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (Particle composite), ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นชั้นเล็ก ๆ (Laminar composite), ตัวเสริมแรงเป็นสารตัวเติม (Flake composite) และ ตัวเสริมแรงมีลักษณะเป็นชั้นหรือชนิดซ้อนแผ่น (Filled composite) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของตัวเสริมแรง

2.1.3 ข้อดีของวัสดุคอมโพสิต

2.2.3.1 มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) ความแข็งเปราะจำเพาะ (Specific stiffness) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา

2.2.3.2 ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ และมีสมบัติหลากหลายสามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น จัดให้เส้นใย (ส่วนเสริมแรง) เรียงตัวตามแนวรับแรง

2.2.3.3 มีอายุการใช้งานยาวนาน มีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี
2.2.3.4 มีสมบัติการรับแรงและมีการหน่วง (Damping) ที่ดี
2.2.3.5 ความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ดี
2.2.3.6 มีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) สูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficients of thermal expansion, CTE) ไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะ

2.1.4 ข้อเสียของคอมโพสิต

- 2.1.4.1 ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบและเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต
- 2.1.4.2 มักมีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน หรือมีสมบัติแอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากการจัดเรียงตัว (Orientation) ของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว (Transverse direction)
- 2.1.4.3 การต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่นทำได้ยาก
- 2.1.4.4 การตรวจวิเคราะห์สมบัติคอมโพสิตทำได้ยาก
- 2.1.4.5 การทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ทำได้

2.2 เปลือกไข่ (Egg Shell) [10]

เปลือกไข่เป็นพวกหินปูนแข็งเรียบติดแน่นอยู่กับเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอกจะแยกเปลือกไข่ออกจากเยื่อนี้ได้ง่าย ความหนาของเปลือกมักขึ้นอยู่กับขนาดของไข่ ไข่ใหญ่มีเปลือกหนากว่าไข่เล็กทั้งนี้ย่อมแล้วแต่ไก่แต่ละตัว พันธุ์ อาหาร และฤดูกาลอีกด้วย ไก่พื้นเมือง ไก่ป่า มีเปลือกไข่หนากว่าไก่พันธุ์แท้ต่างๆ หรือไก่สายพันธุ์ใหม่

โครงสร้างของไข่ทั้งฟองของสัตว์ปีกต่างๆ รวมทั้งเป็ด ไก่ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ไข่แดง ไข่ขาว และเปลือกไข่ มีสัดส่วนใกล้เคียงกันทุกฟอง จะมีปริมาณต่างกันตามขนาด และชนิดของสัตว์ปีกดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนไข่ขาว ไข่แดง และเปลือกไข่ของสัตว์ปีกแต่ละชนิด

ชนิด	น้ำหนัก (กรัม)	ไข่ขาว (%)	ไข่แดง (%)	เปลือกไข่ (%)
ไข่ห่าน	200	52.5	35.1	12.4
ไข่เป็ด	80	52.6	35.4	12.0
ไข่ไก่	58	55.8	31.9	12.3
ไข่นกพิราบ	17	74.0	17.9	8.1

อาจประมาณได้ว่าไข่ไก่ฟองหนึ่งๆ จะมีไข่ขาวอยู่ 6 ส่วน ไข่แดง 3 ส่วน และเปลือก 1 ส่วน แสดงเป็นตัวเลขได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ไข่ไก่เป็นแหล่งเริ่มต้นที่ช่วยให้ชีวิตลูกไก่ได้เจริญเติบโตขึ้นมา ธรรมชาติจึงได้สร้างสรรค์แต่ละองค์ประกอบในไข่นั้นให้มีหน้าที่เฉพาะอย่าง และสำคัญต่อการที่จะเป็นสิ่งที่ช่วยประคับประคองหล่อเลี้ยงชีวิตลูกอ่อนให้เจริญเติบโตขึ้นได้โดยปกติ และปลอดภัย

ภายในฟองไข่ เซลล์ต้นกำเนิดของชีวิตใหม่อยู่ที่ฐานเชื้อลูกไก่ (Blastoderm) ตรงจุดนี้ของไข่ที่มีเชื้อตัวผู้ผสมแล้ว จะเป็นจุดเริ่มต้นของไซโกตที่จะเจริญเป็นลูกอ่อนหรือเอมบริโออยู่ชิดกับไข่แดง ซึ่งเป็นแหล่งคลังของอาหารต่างๆ เอมบริโอนี้บางคนเรียกว่า เชื้อลูกไก่

ไข่ขาวมีลักษณะกึ่งของเหลว มีหน้าที่โดยธรรมชาติในการป้องกันการกระทบกระเทือน ป้องกันความร้อนหนาวแก่เชื้อลูกไก่ ทั้งไข่ขาว และไข่แดงเป็นอาหารหล่อเลี้ยงชีวิตใหม่ไปจนกว่าชีวิตนั้นจะเจริญเติบโตจนสมบูรณ์ออกจากไข่

ชั้นนอกของไข่ได้แก่เปลือก เปลือกเป็นเสมือนเกราะป้องกันการกระทบกระเทือนแก่ลูกไก่ เป็นที่อากาศถ่ายเทระหว่างภายในกับภายนอกไข่ และเป็นที่ยึดรักษาอาหารกับน้ำสำหรับลูกไก่ในไข่ที่กำลังฟักตัวอยู่ ดังแสดงสัดส่วนในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของส่วนต่างๆของไข่ไก่

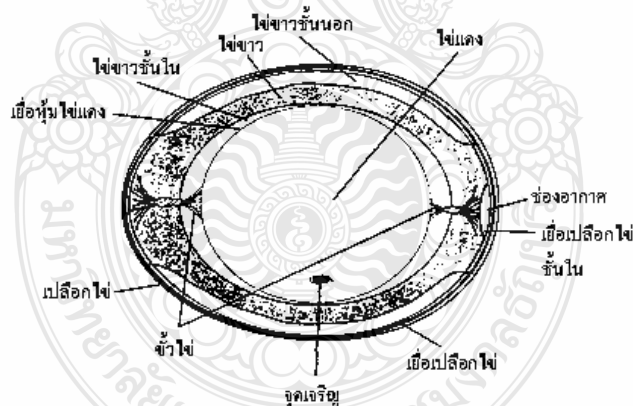
ส่วนต่างๆ	น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนจากไข่ฟอง (%)
1. ไข่ขาว	32.9	55.8
2. ไข่ขาวเหลวชั้นนอก	7.6	23.2
3. ไข่ขาวชั้นตอนกลาง	18.9	57.3
4. ไข่ขาวเหลวตอนกลาง	5.5	16.8
5. ไข่ขาวที่เป็นขี้ และเยื่อหุ้มไข่แดง	0.9	2.7

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของส่วนต่างๆของไข่ไก่

ส่วนต่างๆ	น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนจากไข่ 1 ฟอง (%)
6. ไข่แดง	18.7	31.9
7. เปลือกกับเยื่อเปลือก	6.4	12.3
8. เปลือก	6.2	96.9
9. เยื่อใต้เปลือก	0.2	3.1
10. ทั้งฟอง	58.0	100.0

2.2.1 โครงสร้างของไข่ไก่ [11]

ลักษณะภายในของไข่ไก่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ เปลือกไข่ (Eggshell) ไข่ขาว (Egg -white) และไข่แดง (Egg yolk) แต่ละส่วนจะมีปริมาณร้อยละ 9-11 ร้อยละ 60-63 และร้อยละ 28-29 ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักของไข่แต่ละฟองจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ และอายุของแม่ไก่ส่วนที่อยู่ใต้เปลือกไข่ทั้งหมดนอกจากเยื่อหุ้มไข่จะใช้เป็นอาหาร เมื่อคิดหักจำนวนของเปลือก และเยื่อติดเปลือกแล้วจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 89 ของน้ำหนักไข่มีเปลือก ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของไข่ไก่

2.2.2 หน้าทีเปลือกไข่

2.2.2.1 หน้าทีของเปลือกไข่โดยธรรมชาติต้องทนรับน้ำหนักแม่ไก่เวลากกฟักไข่ และมีความบางพอที่ลูกไก่จะเจาะคืบออกไปจากเปลือกนี้ได้ เปลือกไข่ยังจะต้องโปร่งพอที่จะให้เชื้อลูกไก่ได้อากาศมาหายใจ และต้องหนาพอที่จะป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ไม่ให้เข้าไปในไข่ได้ และยังมี

หน้าที่ป้องกันไม่ให้ความชื้นหนีหายได้ง่าย นอกจากนี้โดยธรรมชาติเปลือกไข่ยังต้องมีสารอินทรีย์ต่างๆมากพอที่จะเป็นแร่ธาตุไปหล่อเลี้ยงเชื้อลูกไก่ให้เติบโตได้อีกด้วย

2.2.2.2 ถ้าเปลือกไข่แบนก็ไม่มีความแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักคคทับหรือแรง

กระทบกระเทือนธรรมชาติได้สร้างให้เปลือกไข่โค้งติดกับเยื่อหุ้มไข่ และโค้งลดหลั่นกันเป็นรัศมีจากศูนย์กลางไข่ด้วยการเรียงตัวของผลึกธาตุปูน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 พวก พวกหนึ่งมีประมาณ 1/5 เป็นโครงสร้างของเปลือกประกอบด้วยอินทรีย์สารที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเซลล์เป็น โปรตีนแบบเดียวกับ ฟังไค และกระดูกที่ประสานโยงยึดกัน พวกที่สองเป็นส่วนประกอบของอินทรีย์สารต่างๆ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต มีอยู่มากที่ด้านนอกเคลือบคลุมเป็นเนื้อพื้น(matrix) ของเปลือก ทั้งสองพวกนี้สร้างมาจากท่อไข่ส่วนล่าง (Uterus)

2.2.2.3 เปลือกไข่ประกอบด้วยชั้นสำคัญๆ 2 ชั้น คือ เปลือกชั้นนอก เรียกว่า Spongy layer กับเปลือกชั้นใน เรียกว่า Mammillary layer ชั้นนอกเป็นแคลเซียมในรูปผลึกของหินปูน (Calcite) ตั้งตรงทางแกนยาวของผลึกกับผิวเปลือก เป็นชั้นที่แข็งแรงที่สุด และแน่นที่สุด ชั้นในนั้นเป็นสารประกอบของแมกนีเซียมกับฟอสเฟต แร่ธาตุต่างๆเหล่านี้ไม่อยู่ในรูปผลึก เวลาไข่ร้าวก็จะร้าวถึงภายในด้วย

2.2.2.4 เปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นนี้เป็นชั้นนอกที่ฉาบติดกับเปลือกชั้นในเป็นชั้นที่ฉีกกันแน่นและมีรูเล็ก ๆ จำนวนมากเชื่อมโยงจากชั้นในมาเปิดที่ชั้นนี้เป็นรูพรุนแบบฟองน้ำแต่แข็งแรงมากเปลือกชั้นนอกนี้ให้ความเป็นรูปทรง และความแข็งแรงแก่เปลือกไข่ จากภาพถ่ายที่ดูด้วยเอ็กซ์เรย์ จะเห็นว่าความแน่น และแกร่งของชั้นนี้มีมากที่ผิวด้านนอก เกือบแฉ่ง ๆ ที่เป็นเนื้อหาของชั้นนี้มีลักษณะเป็นผลึกเล็ก ๆ ส่วนประกอบของชั้นนี้เมื่อย้อมด้วยสีโปรตีนจะเห็นว่ามันมีไม่ทั่วผิวเปลือกแต่จะมีมากขึ้นตอนติดกับเปลือกชั้นใน สีนี้ทำให้เห็นเปลือกชั้นนอกนี้แบ่งออกเป็น 3 ชั้นตามลักษณะของเส้นใยโปรตีน (Matrix fiber) คือ ชั้นที่อยู่ข้างในมีเส้นใยโปรตีนมากกว่าชั้นกลางชั้นนอกนั้นมีเส้นใยโปรตีนน้อยที่สุด

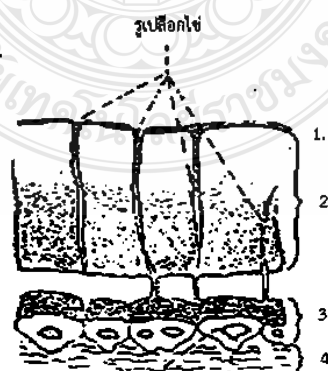
2.2.2.5 เปลือกชั้นใน เป็นชั้นที่บางของเปลือกอยู่ติดกับเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอกประกอบด้วยปุ่มพื้นเปลือกลักษณะหยาบ ๆ (Mammilla) ที่มีรูปร่างต่างๆตั้งแต่ทรงรูปไข่ถึงทรงกลม ปุ่มเหล่านี้ฉีกเป็นชั้นเดี่ยวอยู่ชิดกับเยื่อหุ้มไข่ ปลายปุ่มผายออกไปเปิดที่เยื่อหุ้มไข่ชั้นในเป็นทางผ่านของอากาศให้กระจายไปทั่วเปลือกชั้นนี้ไปสู่บริเวณปลายปุ่มพื้นเปลือก ซึ่งปุ่มพื้นเปลือกประกอบด้วยเนื้อที่ที่ไม่เป็นผลึกกระจายอยู่รอบผิวพื้นโปรตีนของเปลือก (Granular matrix material) ในไข่ต่างๆ ผิวพื้นโปรตีนเหล่านี้มีลักษณะคล้ายสาขารายอยู่ที่ปุ่มหินปูน ขนาด และรูปร่างของปุ่มพื้นเปลือกและการเรียงตัวของพื้นเปลือกจะแตกต่างกันตามชนิดของสัตว์ปีก ความหนาของเปลือกชั้นใน

ประมาณ 0.11 มิลลิเมตร หรือเป็นเนื้อที่ประมาณ 1/3 ของความหนาของผิวหนังชั้นหนังกำพร้า ความสูงของแต่ละปุ่มเหล่านี้แล้วแต่ความหนาของเปลือกชั้นใน เส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละปุ่มประมาณ 0.096 - 0.144 มิลลิเมตร

2.2.2.6 เยื่อเปลือกไข่ (Membranes) เยื่อหุ้มไข่แบ่งออกเป็น 2 ชั้นกระชับติดกับเปลือกไข่จนเป็นรูปทรงเช่นเดียวกัน ชั้นแรกเป็นเยื่อชั้นในล้อมรอบไข่ขาวส่วนนอก ที่ส่วนหัวท้ายไม่มีเส้นใยมีวชิของไข่ขาวชั้นมาเชื่อมติดอยู่ เรียกว่า Ligamenta albuminis อีกชั้นหนึ่งจะเป็นเยื่อชั้นนอกอยู่ระหว่างเยื่อชั้นในกับเปลือก ชั้นนี้ผลึกแน่นกับเปลือกชั้นใน โดยทั่วไปเยื่อชั้นใน และนอกมีสิ่งเชื่อมติดกัน ยกเว้นที่ส่วนป้านอันจะเกิดเป็นช่องอากาศของไข่ (Air cell) เมื่อไข่นั้นอายุมากขึ้น

2.2.2.7 รูเปลือก (Pores) มีลักษณะเป็นรูปร่างต่างๆ ตั้งแต่รูไปจนถึงกลม รูเปลือกเชื่อมโยงจากภายนอกเข้าไปถึงเยื่อเปลือกไข่ ขนาดของรูมีขนาดต่างๆตั้งแต่เห็นได้ด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดเล็กมากต้องดูด้วยกล้องขยาย รูเหล่านี้ไม่ใช่เป็นระยะ และไม่มีควมสม่ำเสมอ รูเหล่านี้เชื่อมโยงระหว่างเปลือกชั้นนอกกับระบบเชื่อมโยงของช่องอากาศที่เปลือกชั้นใน ตอนที่รูนี้เริ่มผ่านเปลือกชั้นนอกออกมานั้นจะมีขนาดเล็กที่สุดแล้วมาเปิดกว้างเป็นแฉกผายออกที่ผิวของเปลือกชั้นนอกในไข่ใหม่บางรูที่ปากรูตัน หรือถูกอุดด้วยมวลไข่ ฉะนั้นการขจัดสีผิวไข่จึงเป็นเหตุให้ปากรูถูกเปิดมากขึ้น ทำให้น้ำในไข่ระเหยออกง่ายขึ้น และจุลินทรีย์จากภายนอกเข้าทำลายไข่ได้สะดวกขึ้น

2.2.2.8 ชั้นเคลือบผิวไข่ (Cuticle) เป็นชั้นเยื่อผิวชั้นที่บางฉาบเคลือบอย่างแน่นกับผิวนอกของเปลือก มีคุณสมบัติให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ ที่ปากรูเปลือกตรงส่วนพื้นเปลือกไข่ด้านใน (Plaque- of matrix) ก็เป็นส่วนของเคลือบผิวไข่ เพราะมันไปติดต่อกันเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับเคลือบผิวไข่ชั้นในนอกจากนี้เปลือกไข่ยังมีเม็ดสีที่เปลือกไข่ ซึ่งเกิดจากวัตถุสีของเม็ด โลหิตแดง และยังมีที่เยื่อเปลือกไข่อีกเล็กน้อยส่วนประกอบของเปลือกไข่ แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 เปลือกไข่ผ่าตามหน้าตัดด้านข้างขยายใหญ่จากของจริง

จากภาพขยายของเปลือกไข่ เริ่มลำดับจากข้างบนลงไปจะมีส่วนต่างๆดังนี้

- 1) เคลือบผิวไข่ (Cuticle)
- 2) เปลือกชั้นนอก (Spongy layer) ประกอบด้วยผิวพื้นเปลือก (Mammillary knob or mammilla) และปากกรูพื้นเปลือก (Mammillary core)
- 3) เปลือกชั้นใน (Mammillary layer)
- 4) เยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane)

2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของไข่

น้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในไข่ เมื่อระเหยน้ำออกให้หมดส่วนวัตถุแห้งที่ปรากฏนั้นจะประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ และอินทรีย์สารอีกเล็กน้อย ดังแสดงตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของไข่

ส่วนต่างๆ	เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด	น้ำ (%)	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เถ้า (%)
ไข่ทั้งฟอง	100	65.5	11.8	11.0	11.7
ไข่แดง	31	48.0	17.5	32.5	2.0
ไข่ขาว	58	88	11.0	0.2	0.8
เปลือก	11	-	-	-	-

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าไข่ทั้งฟองมีปริมาณโปรตีน ไขมัน เกลือแร่ หรือเถ้าประมาณเกือบเท่าๆกัน ไขมันในไข่จะรวมถึง True fats, Phosphorus, Nitrogen และ Sugar-containing lipids และ Sterols ไขมันเกือบทั้งหมดในไข่จะอยู่ในไข่แดงโดยส่วนใหญ่จะเป็น Lipoproteins นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตอาจพบเป็นส่วนประกอบเล็กน้อยในไข่ไก่ มีปริมาณเฉลี่ย 0.5 กรัม ต่อไข่ 1 ฟอง ดังตารางที่ 2.4 โดยอยู่ในไข่แดงร้อยละ 40 คาร์โบไฮเดรตนั้นจะอยู่ในรูปของน้ำตาลอิสระ และรูปที่จับกับโปรตีน และไขมันชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่ (ค่าเฉลี่ย, กรัมต่อไข่ 1 ฟอง)

ส่วนต่างๆ	น้ำ	โปรตีน	คาร์โบไฮเดรต		ไขมัน	แร่ธาตุ
			น้ำตาลอิสระ	Conjugated oligosaccharides		
ไข่แดง	18.7	9.1	0.131	0.056	5.83	0.318
ไข่ขาว	33.0	28.9	0.132	0.165	0.002	0.231
เยื่อเปลือก	5.9	0.1	0.25	-	-	5.9
เปลือก			0.15	-	-	
รวม	57.6	38.1	0.263	0.221	5.832	6.449

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่

ชนิดองค์ประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณ (%)
น้ำ	0.1	1.6
วัตถุแห้ง	6.0	98.4
อินทรีย์วัตถุ	0.2	3.3
โปรตีน	0.2	3.3
ลิปิด	น้อยมาก	0.03
อนินทรีย์	5.8	95.1
รวม	6.1	100.0

เปลือกไข่ประกอบด้วยแร่ธาตุประมาณร้อยละ 95 ในส่วนนี้จะมีแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 98 สารอนินทรีย์อื่น ๆ จะรวมถึง ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และเหล็กกับซัลเฟอร์ ปริมาณน้อยมากดังตารางที่ 6 เกือบอนินทรีย์ที่อยู่ในเปลือกไข่ส่วนมากจะเป็นคาร์บอเนต และฟอสเฟตของแคลเซียม และแมกนีเซียม ผลึก Calcite ที่มีอยู่ในเปลือกไข่จะประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และผลึก Dolomite จะประกอบด้วยแคลเซียม และแมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยโครงสร้างของผลึก Dolomite จะแข็งแรงกว่าผลึก calcite เปลือกไข่จะประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน โพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย Galactosamine, Glucosamine, Galactose, Fructose, Glucose, Sialic acids และไขมันปริมาณเล็กน้อยนอกจากนี้เยื่อหุ้มเปลือกไข่ยังประกอบด้วยส่วนที่เป็นเม็ดสี คือ Protoporphyrin ปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเปลือกไข่ไก่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 94 แมกนีเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 1 แคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 1

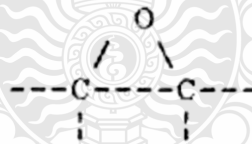
และสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอีกร้อยละ 4 เปลือกไข่ก็จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตเป็นแหล่งของแคลเซียมคาร์บอเนต

2.3 อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resins) [12]

อีพอกซีเรซินจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต มีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงและการทนต่อการขีดข่วน ซึ่งเมื่อผ่านการเชื่อมโยงโมเลกุลหรือการบ่ม (Curing) แล้วไม่สามารถเปลี่ยนกลับรูปเดิมได้ นั่นคือเรซินถูกทำให้แข็งจนไม่สามารถหลอมเหลวใหม่ได้ ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเรซินก็ไม่สามารถอ่อนตัวได้อีก การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างแหแบบถาวร โดยทั่วไปแล้วการบ่มครั้งนี้ทำได้โดยอาศัยความร้อนและความดันแต่ละเรซินบางกลุ่มก็สามารถบ่มที่อุณหภูมิห้องได้โดยไม่ต้องใช้ความดัน การเกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแหของเทอร์โมเซตนี้ทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้น้อยหรือไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ จึงเป็นสมบัติที่ดีในเรื่องความแข็งที่อุณหภูมิสูง การไม่ละลายในตัวทำละลาย ความทนทานต่อความร้อน สารเคมี การขีดข่วน

อีพอกซีเรซิน เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นซึ่งเป็นสารจำพวกอีพอกไซด์ และที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่ในโซ่พอลิเมอร์ก่อนเกิดการเชื่อมโยงหมู่อีพอกไซด์อาจจะอยู่รูปของอีพอกซีเรน (Exirance) หรือหมู่ออกซีลีน (Thoxyline)

อีพอกซีเรซินสามารถถูกอธิบายในลักษณะของการจับกันเป็นวงของอะตอม 3 อะตอม ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนามของหมู่อีพอกซี หมู่อีพอกไซด์ หมู่ออกเรซิน ซึ่งอาจเขียนได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างอีพอกซีเรซิน

อีพอกซีเรซินที่ขายอยู่ทั่วไปจะมีลักษณะ โครงสร้างอย่างใดอย่างหนึ่งใน 3 อย่างต่อไปนี้ คือ อลิฟาติก (Aliphatic) ไซโคลลิฟาติก (Cycloaliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) ความสามารถของหมู่อีพอกซีที่สามารถทำปฏิกิริยา หรือยึดเกาะกับพื้นผิวของวัสดุได้หลากหลาย เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้อีพอกซีเรซิน ถูกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง การเติมสารช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (Curing Agent) ทำให้เกิดเป็นเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดการหลอมละลายได้อีก และไม่เกิดการละลายตัวทำละลายได้อีก เพื่อเป็นการปรับแต่งสมบัติ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

จากอีพอกซีให้มีความแตกต่างกันไปตามความต้องการอาจทำได้โดยการเติมส่วนประกอบอื่นๆ เข้าไปในส่วนผสมเช่น สารเพิ่มเนื้อ ตัวทำลาย สารทำให้เงา สารช่วยทำให้มีสมบัติเป็นพลาสติกมากขึ้น และสารช่วยเริ่มปฏิกิริยาให้เกิดขึ้น

อีพอกซีเรซินได้ถูกนำมาใช้เป็นทางการค้าในปี ค.ศ. 1946 และปัจจุบันได้มีการใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ในปี ค.ศ. 1983 มีการใช้ประมาณ 135 เมตริกตัน ในประเทศสหรัฐอเมริกา 45 % และของจำนวนนี้ 60 ตัน ถูกใช้เป็นสารเคลือบเพื่อปกป้องผิวหน้าของวัสดุชนิดอื่นๆ และจำนวนที่เหลือ 75 ตัน ถูกใช้ในงานด้านโครงสร้าง เช่น การทำ Laminate และ Composite และทำเป็นเครื่องมือ ทำเป็นแม่พิมพ์ ถูกใช้ในการหล่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ถูกใช้ในด้านการก่อสร้าง เป็นตัวประสานหรือยึดติดกับวัสดุอื่นและงานประเภทอื่นๆ

อีพอกซีเรซินมีลักษณะต่าง ๆ คือ มีความทนทานต่อสารเคมี และทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก มีสมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน มีสมบัติในการยึดติดกับวัสดุอื่นได้โดดเด่นมาก มีการหดตัวต่ำเมื่อมีการ Cure มีความสามารถในการโค้งงอได้ระดับหนึ่ง มีสมบัติทางไฟฟ้าดี และมีความสามารถที่จะถูกใช้ในกระบวนการผลิตภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้มากมาย ความเป็นไปได้ในการใช้อีพอกซีในทางการค้าถูกค้นพบโดย De'TreyFre'res ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์และ DeVoe กับ Reynolds ในสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1936 De'TreyFre'res ได้ผลิตอีพอกซีเรซินที่มีโครงสร้างปฏิกิริยาจนมีสถานะเป็นของแข็งแล้วสามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับฟัน (Dental Product) แต่เมื่อนำไปทำเป็นการค้า ปรากฏว่าความพยายามนั้นไม่มีผลสำเร็จในปี ค.ศ. 1946 อีพอกซีที่ถูกใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน หรือกาว ซึ่งได้ถูกนำเสนอที่นิทรรศการในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ที่เรียกว่า "Swiss Industries Fair" ซึ่งได้มีการนำเสนอตัวอย่างอีพอกซีที่ได้จากการหล่อ (Casting) เพื่อสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมด้านไฟฟ้า ประมาณปี ค.ศ. 1939 อีพอกซีเรซินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถูกผลิตขึ้นในสหรัฐอเมริกา จากการทำปฏิกิริยาของบิสฟีนอล เอ กับ เอพิคลอโรไฮดริน (Biphenyl A and Epichlorohydrin)

ในทันทีที่อุตสาหกรรมโลกครั้งที่ 2 DeVol และ Reynolds ได้จดลิขสิทธิ์ของอีพอกซีเรซินต่างๆ ซึ่งรวมไปถึงเรซินที่มีหมู่เอสเทอร์ด้วย เรซินเหล่านี้ถูกนำไปสู่ตลาดผ่านบริษัท Jones Dabney ในขณะที่เดียวกับที่ CIBA AG ได้ลิขสิทธิ์โดย De'TreyFre'res ซึ่งได้พัฒนาอีพอกซีใช้กับงานต่างๆ เช่น งานหล่อ งานเสริมแรงด้วยเส้นใย และทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (Laminating) และงานยึดวัสดุอื่นเข้าด้วยกัน (Adhesives) ในช่วงนี้บริษัท CIBA Products ก็ได้ถูกตั้งขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงปลายปี ค.ศ. 1940 – 1949 มีบริษัทของสหรัฐอเมริกา 2 บริษัท คือ Shell Chemical Co. และ Union Carbide Corp. จากนั้นก็มีบริษัท Bakelite Co. ได้เริ่มทำการค้นคว้าวิจัย

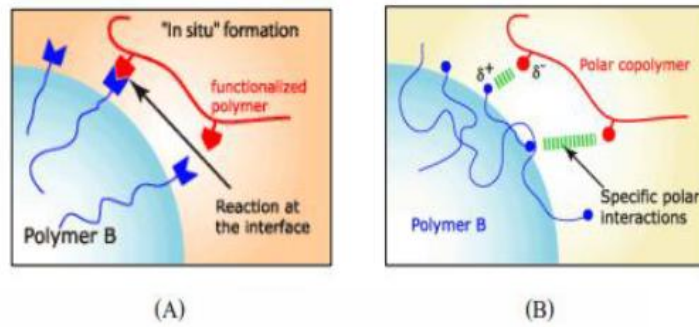
เกี่ยวกับอีพอกซีเรซิน ที่มีบิสฟีนอล เอ เป็นส่วนผสมหลัก ในสมัยนั้น Shell เป็นเพียงบริษัทเดียวที่จำหน่าย Epichlorohydrin โดยบริษัท Bakelite เป็นผู้นำในด้านการจำหน่าย ฟีนอลลิกส์เรซิน และบิสฟีนอล เอ ใน ค.ศ. 1955 ผู้ผลิตอีพอกซี 4 แห่งของสหรัฐอเมริกาได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับลิขสิทธิ์ที่ได้จากนั้น Dow Chemical Co. และ Reinhold Chemical, Inc. ได้เข้ามาร่วมในลิขสิทธิ์ด้วย และเริ่มทำการตลาดเกี่ยวกับอีพอกซีเรซินในช่วงปลายปี ค.ศ. 1970 – 1979 CIBA-GEIGY Corp. และ Shell Chemical Co., ได้พัฒนาเรซินชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นแต่ทั้งสองบริษัทก็ยังมีจำกัดทางด้านการค้า ทำให้ไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร

2.4 สารควบคู่ปฏิกิริยา (Coupling Agents) [6]

สารที่ช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่างทั้งสองโมเลกุลไว้ โดยส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยากับฟิลเลอร์และอีกส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดการรวมตัว หรือทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดีเมื่อพื้นผิวฟิลเลอร์ได้รับการปรับปรุงด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาจะช่วยลดแรงดึงผิวของฟิลเลอร์หรือเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวของฟิลเลอร์ ที่มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ทำให้สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ซึ่งไม่เพียงช่วยให้การผสมเกิดได้ดีขึ้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติโดยรวมของคอมโพสิตอีกด้วย โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.4.1 Reactive Coupling Agents เป็นการปรับปรุงพื้นผิวฟิลเลอร์ โดยใช้สารที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างสองเฟส ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โมเลกุลของสารควบคู่ปฏิกิริยาจะประกอบด้วยหมู่ที่ว่องไว เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก หรือหมู่อีพอกซี

2.4.2 Non-reactive Coupling Agents เป็นการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำหน้าที่ลดแรงดึงผิว เพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวโดยการสร้างแรงดึงดูดแบบแวนเดอร์วาลส์หรือเกิดพันธะไฮโดรเจน แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์ [15]

(A) Reactive Coupling Agents (B) Non-reactive Coupling Agents

2.4.3 สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน (Silane Coupling Agent)

สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน ใช้เป็นสารควบคู่มานานกว่า 50 ปี สำหรับปรับปรุงพื้นผิวของไฟเบอร์กลาสและฟิลเลอร์ นิยมนำมาใช้กับพลาสติกได้หลายชนิด แสดงดังตารางที่ 2.6 ซึ่งช่วยให้ฟิลเลอร์สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น โดยมีโครงสร้างทั่วไปคือ Y-R-Si-X₃

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลนและการนำไปใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [15]

สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไซเลน	ชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้
1. Vinyl-triethoxy silane	Unsaturated Polyesters, Polyolefins, PVC, PS, ABS, SAN and PMMA.
2. Vinyl-tris (2-methoxy) silane	
3. 3-Methaacyloxypropyltrimethoxy silane.	
4. 3-Aminopropyltriethoxy silane	Epoxy, Phenolic and Melamine Resins, PA, PHR, PP, PE, PMMA and PC
5. 3-Glycidoxypropyltrimethoxy silane	Resins, Unsaturated Polyesters, PUR, PC, PS, ABS, SAN, PA, PP, PE and Polysulfides Epoxy, Phenolic and melamine
6. 3-Mercaptopropytrimethoxy silane	Phenolic and Epoxy Resins, PVC, PS, EPPM

สำหรับการศึกษาพอลิเมอร์ผสมนี้เลือกใช้สารควบคู่ปฏิกิริยาประเภท Vinyl-Triethoxy Silane สารควบคู่ปฏิกิริยาหมู่วินิลจะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารประสานกับพอลิเมอร์ จึงทำให้เส้นใยแก้วมีแรงยึดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ไซเลนที่ผลิตออกทางการค้าจะมีหมู่ฟังก์ชัน (หมู่Y) ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น ไซเลนที่ประกอบด้วยหมู่วินิล จะถูกนำไปใช้งานกับพอลิเอสเทอร์ เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ขณะที่ไซเลนประกอบด้วยหมู่อิพอกซีหรือหมู่อะมิโน จะใช้งานกับพอลิเอไมด์ อีพอกซีเรซินหรือพอลิยูรีเทนชนิดเทอร์โมเซต เป็นต้น

2.4.4 กระบวนการเชื่อมขวางสายโซ่ให้เป็นโครงสร้างร่างแหด้วยไซเลนและน้ำ

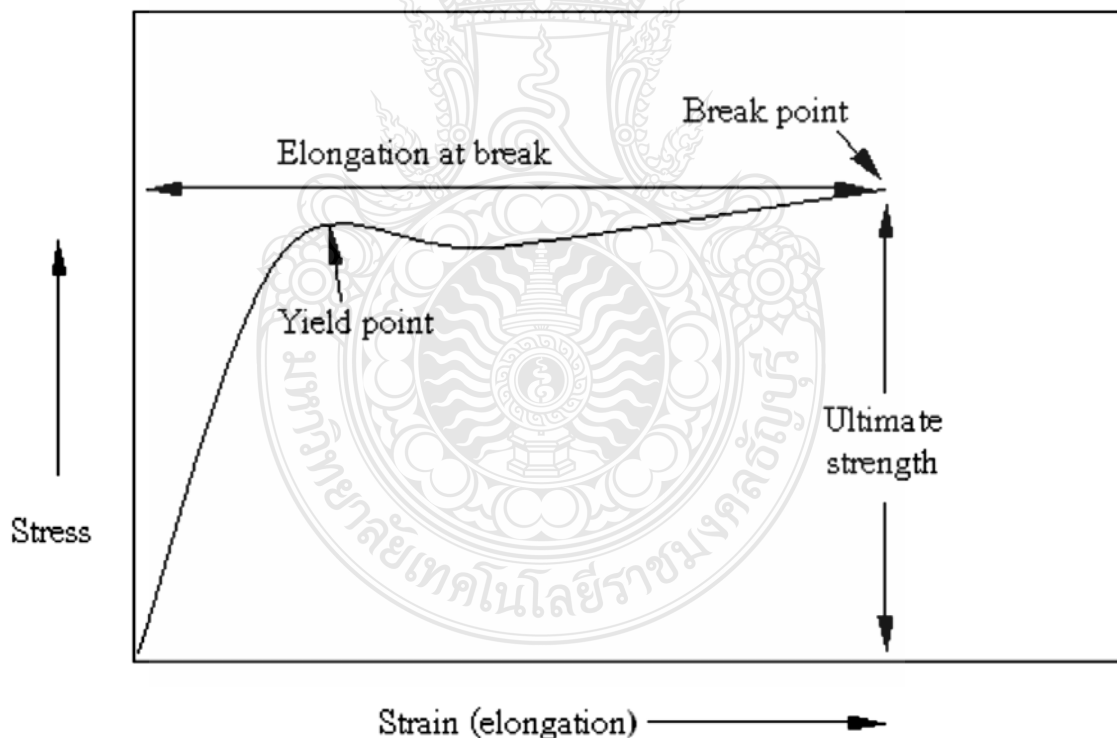
กระบวนการเชื่อมขวางสายโซ่โดยใช้ไซเลนและน้ำของพอลิเมอร์ เป็นหัวข้อที่นักวิจัยให้ความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการได้แก่ เป็นกระบวนการที่ง่าย, ลงทุนต่ำและสามารถเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ให้สูงขึ้นได้มีการประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมหุ้มฉนวนไฟฟ้าแรงสูง, อุตสาหกรรมผลิตท่อจากพอลิเมอร์, ไม้เทียมที่ผลิตจากพลาสติก, โฟมพลาสติก, อุตสาหกรรมเส้นใยและสิ่งทอ เป็นต้น ไซเลนที่นิยมใช้กันทั่วไปในกระบวนการเชื่อมขวางสายโซ่พอลิเมอร์มีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งานกับพอลิเมอร์แต่ละประเภทสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6 กระบวนการเชื่อมขวางสายโซ่เป็นระบบร่างแหในขั้นตอนแรกคือขั้นตอนของการกราฟที่ไซเลน เป็นการเกิดอนุมูลอิสระเพื่อเริ่มปฏิกิริยาโดยการสลายตัวจากความร้อนของสารเปอร์ออกไซด์ โดยหลักการสามารถสันนิษฐานได้ว่า อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้เข้าไปจับกับอะตอมของไฮโดรเจนของสายโซ่พอลิเมอร์สุดท้ายเกิดเป็นการกราฟที่ไซเลนของพอลิเมอร์ ขั้นตอนต่อมาคือการเชื่อมขวางสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่กราฟที่ด้วยไซเลนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยความชื้นของน้ำ โดยกระบวนการควบแน่นก่อตัวขึ้นจากหมู่ไฮดรอกซิล(-OH) เชื่อมต่อกัน โดยพันธะซิล็อกเซน (Si-O-Si) กลไกการเชื่อมขวางสายโซ่ให้เป็นโครงสร้างร่างแหด้วยไซเลนและน้ำของพอลิเมอร์

2.5 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสม (Mechanical properties of materials) [13]

สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบความแข็ง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

ลักษณะชิ้นงานทดสอบส่วนใหญ่ที่เป็นรูปคัมเบลล์ ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานในแบบต่าง ๆ ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่นกรณีที่เป็นยางก็จะได้จากการตีแผ่ยางเป็นรูปคัมเบลล์ด้วย Die (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ใน Compression mold) ส่วนในกรณีของพลาสติก อาจจะได้จากกระบวนการฉีด (Injection moldings) หรือได้จากการตัดแผ่นพลาสติกด้วย Die ในทำนองเดียวกันกับยาง ถ้าหากพลาสติกดังกล่าวมีความแข็งต่ำ เช่น Plasticized PVC ในขณะที่ทดสอบจะใช้เครื่อง Universal testing machine โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ตามมาตรฐานกำหนด แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็วอุณหภูมิ) ที่ทำการดึง



ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

คำจำกัดความของกราฟความเค้นและความเครียดมีดังนี้

2.5.1.1 ความเค้น (Stress)

ความเค้นคือ แรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ว่าการวัดค่าแรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะฉะนั้นโดยทั่วไปแล้วความเค้นมักถูกกล่าวถึงในแง่ของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เนื่องจากแรงภายในเนื้อของวัสดุคือปฏิกิริยาของของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำนั่นเอง ซึ่งทั้งสองแรงนี้ขนาดเท่ากัน จากคำจำกัดความที่เกริ่นไปแล้วนั้นความเค้น (Stress, σ) สามารถที่จะถูกคำนวณออกมาได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

เมื่อ σ คือ ความเค้นหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสกาล(Pa)

P คือ แรงภายนอกที่มากระทำมีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

A คือพื้นที่ภาคตัดของวัสดุที่ถูกแรงภายนอกมากระทำและตั้งฉากกับแรงภายนอกมีหน่วยเป็น ตร.ม. (m^2)

ความเค้นแบ่งออกตามลักษณะที่แรงภายนอกมากระทำได้ 3 อย่าง คือ

1) ความเค้นแรงดึง (tensile stress) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำวัตถุในลักษณะที่พยายามดึง วัตถุในขนาดจากกัน วัตถุนั้นจะมีแรงภายในต่อต้านเอาไว้ แรงภายในที่ต่อต้านเอาไว้ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เราเรียกความเค้นดึง

2) ความเค้นอัด (Compressive Stress) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัตถุในลักษณะที่อัด วัตถุนั้นให้แตกหักออกจากกัน ก็จะมีแรงดึงคู่ระหว่าง โมเลกุลต่อต้านเอาไว้ภายในที่ต่อต้านไว้นี้ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เราเรียกว่า ความเค้นอัด

3) ความเค้นเฉือน (Shearing Stress) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัตถุในลักษณะที่เฉือน วัตถุให้ขาดจากกัน ก็มีแรงภายในต่อต้านเอาไว้ แรงภายในที่ต่อต้านไว้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เราเรียกว่า ความเค้นเฉือน

2.5.1.2 ความเครียด (strain)

ความเครียดคือ เมื่อแท่งวัตถุ ถูกแรงภายนอกมากระทำ และวัตถุนั้นแปรรูปหรือเปลี่ยนรูปร่างก็จะมี แรงภายในต่อต้าน แรงภายนอกที่มาเปลี่ยนรูปร่างนั้น การต่อต้านการเปลี่ยนรูปร่างนี้เรียกว่า ความเครียด หาขนาดความเครียดได้โดยเอาส่วนที่เปลี่ยนไปจากรูปร่างเดิมหารด้วยรูปร่างเดิมของวัตถุ แบ่งได้ 3 อย่าง คือ

- 1) ความเครียดอัด (Compression Strain)
- 2) ความเครียดดึง (Tensile strain)
- 3) ความเครียดเฉือน (ϵ_s)

จุดคราก (yield point) คือจุดแรกบนเส้นกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดที่เกิดการเพิ่มความเครียดขึ้นในขณะที่ความเค้น ไม่ได้เพิ่มขึ้น

ความเค้นที่จุดคราก (yield stress) คือความเค้น ณ จุดที่ความชันของเส้นกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นศูนย์

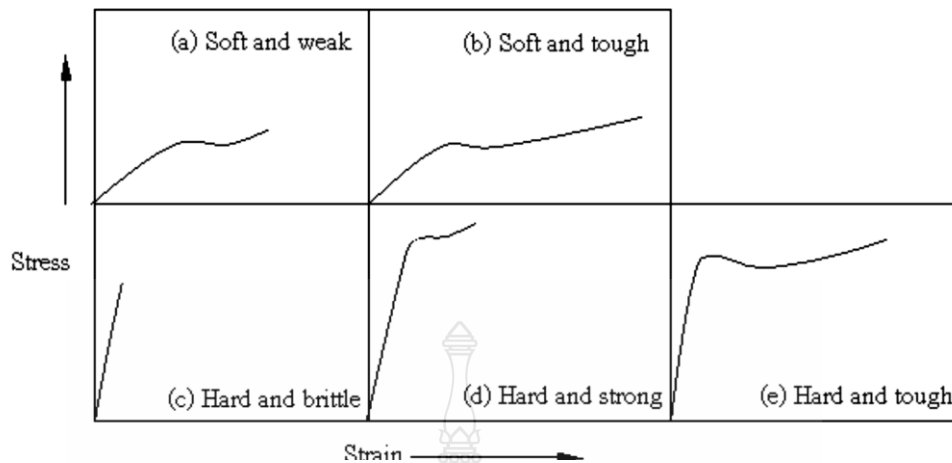
ความเค้นสูงสุด (ultimate strength) คือค่ามากที่สุดของความเค้นซึ่งวัสดุสามารถทนได้ภายใต้แรงดึง ค่านี้จะอยู่ที่จุดขาด (break point) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุที่ใช้ทดสอบขาดหรือแยกออกจากกัน

ความทนแรงดึงสูงสุด (tensile strength) คือค่าความเค้นที่มากที่สุดที่ชิ้นงานสามารถทนได้ระหว่างการทดสอบ เมื่อปรากฏความเค้นที่มากที่สุดที่จุดครากก็จะเป็นค่าความทนแรงดึงที่จุดคราก แต่เมื่อเกิดความเค้นมากที่สุดที่จุดขาดก็กำหนดว่าเป็นความทนแรงดึงที่จุดขาดสำหรับความทนแรงดึง คำนวณได้โดยค่าแรงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation) คือการยืดตัวออกของชิ้นงานที่แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความยาวเริ่มต้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของความยาวของชิ้นงานที่ถูกดึง ถ้าเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break) จะเป็นการคิดเปอร์เซ็นต์การยืดขณะที่ชิ้นงานขาดหรือแตกออก

มอดูลัส หรือมอดูลัสแบบยืดหยุ่น (elastic modulus) ที่เป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความเครียดเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเค้น ค่ามอดูลัสเป็นสิ่งที่วัดความแข็งแกร่งหรือแข็งตึงของวัสดุซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่นขณะรับแรง การหาค่ามอดูลัสนั้นสามารถหาได้จากกราฟความเค้นและความเครียด โดยมอดูลัสแบบยืดหยุ่นได้จากการวัดความชันในของเส้นสัมผัสเริ่มแรกซึ่งเป็นส่วนที่ชันที่สุดของเส้นโค้ง

พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็นสิ่งบ่งชี้ได้ถึงความเหนียวของวัสดุถ้าวัสดุใดมีพื้นที่ใต้กราฟมากจะเป็นวัสดุที่มีความเหนียวมาก ส่วนวัสดุที่มีพื้นที่ใต้กราฟน้อยจะเป็นวัสดุเปราะ โดยสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับลักษณะของเส้นกราฟความเค้นความเครียดตามภาพที่ 2.7 และสามารถวิเคราะห์ได้ดังตาราง 2.7



ภาพที่ 2.7 ประเภทของกราฟความเค้นความเครียด

ตารางที่ 2.7 ลักษณะของกราฟความเค้นและความเครียดที่มีความสัมพันธ์กับสมบัติของพอลิเมอร์

ลักษณะของพลาสติก	ลักษณะของกราฟความเค้นและความเครียด			
	Modulus	Yield stress	Ultimate strength	Elongation at break
Soft, weak	Low	Low	Low	Moderate
Soft, tough	Low	Low	High	High
Hard, brittle	High	High	High	Moderate
Hard, strong	High	High	High	Moderate
Hard, tough	High	High	High	High

การคำนวณเกี่ยวกับสมบัติแรงดึง

$$\text{ความทนแรงดึงสูงสุด} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดของชิ้นทดสอบ ณ จุดเริ่มต้น}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ความยาวที่เพิ่มขึ้น ณ จุดขาด} \times 100}{\text{ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ}}$$

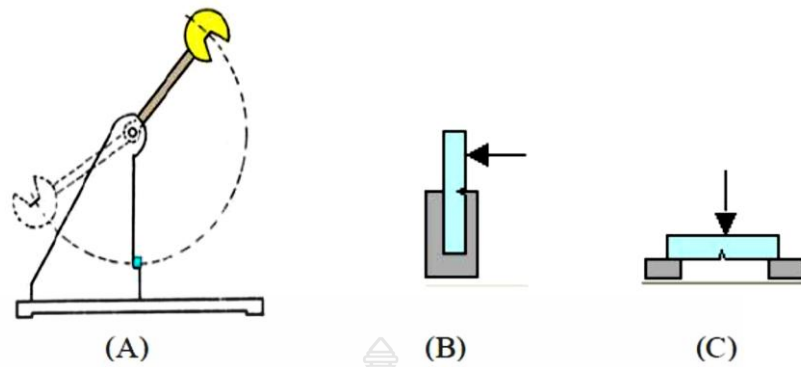
$$\text{มอดุลัส} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}}$$

2.5.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก เป็นการใช้แรงกระทำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและกระแทกขึ้นทดสอบให้แตกหักในเวลาอันสั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกแรงกระแทกซึ่งการทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐานสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 วิธีการ คือ การทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่มีตุ้มน้ำหนักซึ่งทราบพลังงานในการพุ่งเข้าชนชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ ตามมาตรฐาน วิธีการนี้เรียกว่าการทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง (Pendulum Impact Test) อีกวิธีหนึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้น้ำหนักหรือหัวกระแทก (Impact Test) ซึ่งปล่อยให้ตกอย่างอิสระจากความสูงที่ทราบค่าลงสู่ชิ้นงาน แล้วนำมาคำนวณความเค้นกระแทกสูงสุด หรือความแกร่งต่อการกระแทก (Impact Strength) การทดสอบแบบนี้เรียกว่าการทดสอบแรงกระแทกแบบอาศัยการตกของน้ำหนัก (Falling Weight Impact Testing)

การทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง จะเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แสดงความสามารถของวัสดุ ในการต้านทานแรงกระแทกจากการตีด้วยค้อน ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ทั้งหมดที่จำเป็นเพื่อให้วัสดุเริ่มเกิดการแตกหัก (Initiate Fracture) และดำเนินต่อไปจนกระทั่งวัสดุขาดออกจากกัน การทดสอบนี้สามารถทำได้อย่างรวดเร็วเป็นการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุที่ง่ายสำหรับเปรียบเทียบความเหนียวของวัสดุ ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบนั้น จะทำการบากชิ้นงานก่อนการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากรอยบากบนชิ้นงานจะทำหน้าที่น้ำหนักกดน้ำหนักกด 30 เป็นจุดที่แรงกระทำมาสะสมกัน (Stress Concentration) ทำให้การเปลี่ยนรูป (Deformation) ของชิ้นงานเกิดขึ้นได้ยาก เพราะการแตกขาดของชิ้นงานจะเกิดที่บริเวณรอยบากเท่านั้น ตามปกติค่าการทนต่อแรงกระแทก จะรายงานในหน่วยของพลังงานต่อความกว้างของชิ้นงาน เนื่องจากค่าการทนต่อแรงกระแทกขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานเช่นกัน ในการเปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานจากวัสดุที่ต่างกัน นิยมรายงานในหน่วยของจูลต่อตารางเมตร

การทดสอบการทนแรงกระแทก แบบชิ้นงานที่มีรอยบากมี 2 วิธี คือ การทดสอบแรงกระแทก แบบไอซอด (Izod Impact Test) และการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test) ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างในแง่ของการปฏิบัติ กล่าวคือ วิธีของชาร์ปี นั้น รอยบากจะอยู่ตรงข้ามกับทางเดินของค้อนตี และจะวางตัวอย่างในแกนนอน ส่วนวิธีของไอซอด รอยบากจะอยู่ด้านเดียวกับค้อนตี และตัวอย่างจะอยู่ในแกนตั้ง แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก

- (A) ลักษณะการเหวี่ยงของค้อนตี (B) ลักษณะการวางชิ้นงานแบบ Izod
 (C) ลักษณะการวางชิ้นงานแบบ Charpy

2.5.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิวในการทดสอบความแข็ง ไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุหลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกดซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่าง ๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมน หรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักกดที่โดยการวัดน้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

ความแข็งที่กล่าวถึงนี้จะแตกต่างไปจากค่าความต้านทานการขัดสี (Abrasion resistance) หรือค่าความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น พอลิไธรีน จัดเป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Hardness) สูง แต่ขณะเดียวกันก็มีความต้านทานการขัดสีต่ำ

การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถกระทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิไธรีน พอลิเมธิล เมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น

ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่าง ๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) [11]

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองไปตามที่เราต้องการซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง วิธีการทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time, OFAT) จะให้ตอบสนองเข้าสู่จุดหมายที่ต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มี อัตราการระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง

2.6.1 การวิจัยเชิงทดลอง

การวิจัยเชิงทดลอง คือ การวิจัยที่ใช้ตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ซึ่งจะถูกรเรียกว่า ตัวแปรทดลองและตัวแปรทดลองนี้จะถูกจัดกระทำอย่างรอบคอบโดยผู้วิจัย เพื่อศึกษาผลที่ได้จากตัวแปร

การวิจัยเชิงทดลอง จะเป็นกระบวนการค้นหาความรู้และความจริงโดยใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์แบบหนึ่งซึ่งศึกษาความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรในการทดลองที่เกิดขึ้น ภายใต้เงื่อนไขหรือสถานการณ์ที่ได้รับการควบคุมอย่างรัดกุม เพื่อศึกษาว่าเงื่อนไขหรือสถานการณ์ที่จัดขึ้นนั้นเป็นสาเหตุที่แท้จริงของผลหรือปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนแปลงนั้นหรือไม่ โดยผู้วิจัยจะใช้วิธีการสังเกตเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสภาพปกติกับที่เกิดขึ้นในสภาพที่ได้รับการควบคุมตามเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่เป็นความจริงต่าง ๆ สามารถนำไปใช้ในการอธิบาย ทำนาย และควบคุมได้

ในบรรดาประเภทของการวิจัยทั้งหมด การวิจัยเชิงทดลองเป็นการวิจัยที่มีความสำคัญมาก คือเป็นการวิจัยประเภทเดียวที่พยายามศึกษาผลกระทบของตัวแปรและเป็นประเภทเดียวที่มีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์เชิงสาเหตุและผลในการศึกษาทดลอง ผู้วิจัยจะมองเห็นผลของตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียวที่ส่งผลต่อตัวแปรตามเพียง 1 ตัวหรือมากกว่า ตัวแปรอิสระในการวิจัยเชิงทดลองจะต้องพาดพิงถึงบ่อยๆ ในฐานะที่เป็นตัวแปรทดลอง (Experimental variable) หรือ ตัวแปรจัดกระทำ (Treatment variable) สำหรับตัวแปรตามนั้นเรียกว่า ตัวแปรเกณฑ์ (Criterion variable) หรือตัวแปร ผลลัพธ์ (Outcome variable) จะนำเสนอผล (results) หรือผลลัพธ์ (Outcome) ที่ได้จากการศึกษา การวิจัยเชิงทดลองเป็นการศึกษาจากสาเหตุไปหาผล คือต้องการจะทราบว่าตัวแปรที่ศึกษานั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลเช่นนั้นจริงหรือไม่ เช่น ถ้าเกิด X แล้วจะต้องเกิด Y หรือไม่ (If X the Y) ดังนั้นถ้าจะกล่าวให้เห็นชัดขึ้นก็อาจกล่าวได้ว่า การวิจัยเชิงทดลองเป็นการวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์

เชิงเหตุผลของปรากฏการณ์ต่าง ๆ และถือกันว่าเป็นการวิจัยที่ให้ความเชื่อถือในผลการวิจัยที่ดีที่สุดต่อไปนี้จะขอกล่าวถึงประเด็นสำคัญ ๆ ของการวิจัยเชิงทดลอง

2.6.1.1 ความมุ่งหมายทั่วไปของการวิจัยเชิงทดลอง การวิจัยเชิงทดลองมีความมุ่งหมายที่สำคัญดังนี้

- 1) เพื่อค้นหาข้อเท็จจริงของสาเหตุที่ทำให้เกิดผล
- 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของปรากฏการณ์ต่าง ๆ
- 3) เพื่อนำผลการวิจัยไปสร้างเป็นกฎเกณฑ์ สูตร ทฤษฎี
- 4) เพื่อวิเคราะห์หรือค้นหาข้อบกพร่องของงานต่าง ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขหรือพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
- 5) เพื่อนำผลการทดลองไปใช้

2.6.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยเชิงทดลอง

ในการวิจัยเชิงทดลองมักจะมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย 2 ประเภทคือ

2.6.2.1 กลุ่มทดลอง (Experimental group) หมายถึง กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการจัดกระทำในการทดลอง นิยมใช้สัญลักษณ์ E

2.6.2.2 กลุ่มควบคุม (Control group) หมายถึง กลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยจัดให้มีลักษณะเหมือนกลุ่มทดลอง แต่ไม่ได้รับการจัดกระทำ คงปล่อยให้เป็นไปตามสภาพธรรมชาติ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบกับกลุ่มทดลอง นิยมใช้สัญลักษณ์ C

2.6.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยเชิงทดลอง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการวิจัยเชิงทดลองยิ่งขึ้น จึงขอกล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญในการวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งมี 4 ชนิดดังนี้

2.6.3.1 ตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (Independent variable) เป็นตัวแปรที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นเพื่อที่จะทำการทดลองว่าเป็น “สาเหตุ” หรือไม่ ตัวแปรอิสระนี้บางทีเรียกว่า ตัวแปรการทดลอง (Experimental Variable) หรือตัวแปรจัดกระทำ นิยมใช้สัญลักษณ์ X

2.6.3.2 ตัวแปรตาม (Dependent variable) เป็นตัวแปรที่ต้องการทราบว่าเป็น “ผล” ที่เกิดจาก “สาเหตุ” หรือไม่ นิยมใช้สัญลักษณ์ Y

2.6.3.3 ตัวแปรเชื่อมโยง (Intervening variable) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวแปรสอดแทรกเกิดขึ้นจากกระบวนการทางจิตวิทยาาระหว่างดำเนินการทดลอง จึงไม่สามารถควบคุมตัวแปรชนิดนี้ได้และมีผลต่อพฤติกรรมที่แสดงออกมาด้วย จากการที่ตัวแปรนี้เกิดขึ้นระหว่างตัวแปร

อิสระและตัวแปรตาม จึงอาจเรียกว่า ตัวแปรภายใน ก็ได้ เช่น ความโกรธ ความวิตกกังวล การปรับตัว การจูงใจ เป็นต้น

2.6.3.4 ตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรภายนอก (Extraneous variable) เป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นและอาจมีอิทธิพลต่อผลการทดลองโดยที่ผู้วิจัยไม่ต้องการให้เกิดขึ้นหรือไม่ต้องการทราบ ตัวแปรชนิดนี้นักวิจัยสามารถกำหนดวิธีการควบคุมได้ จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวแปรควบคุม (Control variable) ตัวแปร แทรกซ้อนอาจเกิดขึ้นได้จากแหล่งต่าง ๆ กัน ดังนี้

1) จากกลุ่มตัวอย่างหรือกลุ่มประชากร กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทำให้เกิดเป็นตัวแปรแทรกซ้อนได้มากมาย เช่น อายุ ความรู้พื้นฐาน ระดับการศึกษา เชื้อชาติ บุคลิกภาพ สติปัญญา ความถนัดสภาพของครอบครัว ความสนใจ เจตคติ เป็นต้น

2) จากวิธีดำเนินการทดลองและการทดสอบในการวิจัยเชิงทดลองวิธีดำเนินการทดลองและการทดสอบก็อาจมีตัวแปรแทรกซ้อนเกิดขึ้นด้วย เช่น ความผิดพลาดในวิธีดำเนินการคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ เวลาที่ใช้ทดสอบ ความลำเอียง ความคลาดเคลื่อนของเวลาที่ใช้ในการทดลอง

3) จากแหล่งภายนอก สิ่งแวดล้อมก็มีส่วนทำให้เกิดตัวแปรแทรกซ้อนในการวิจัยเชิงทดลองได้เหมือนกัน เช่น บรรยากาศขณะทดลอง เสียงรบกวน สถานที่ที่ไม่เหมาะสม ฯลฯ แต่ตัวแปรแทรกซ้อนเหล่านี้ผู้ทำการวิจัยสามารถควบคุมได้

2.6.4 การควบคุมตัวแปรแทรกซ้อน ได้กล่าวมาแล้วว่า ในการวิจัยเชิงทดลองนั้นย่อมมีตัวแปรแทรกซ้อนเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งผู้วิจัยจะต้องควบคุมตัวแปรชนิดนี้ให้หมดไป เพื่อจะได้ทราบว่าตัวแปรตามเป็นผลมาจากตัวแปรอิสระอย่างแท้จริง การควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนนิยมใช้หลักการควบคุมที่เรียกว่า Max-Min-Con Principle ดังต่อไปนี้

2.6.4.1 เพื่อความแปรปรวนที่เป็นระบบให้มากที่สุด (Maximized systematic variance) เป็นการควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนโดยการเพิ่มความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม หรือความแปรปรวนเนื่องมาจากการทดลองให้สูงสุด ซึ่งทำได้โดยการกำหนดวิธีการทดลองให้กับกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมให้แตกต่างกันและเป็นอิสระซึ่งกันและกันและ ตลอดจนควบคุมเวลาและสภาวะของการทดลองให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถจัดกระทำกับตัวแปรอิสระให้ส่งผลต่อตัวแปรตามมากที่สุด

2.6.4.2 ลดความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Minimized error variance) เป็นการควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนโดยการทำให้ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดหรือเป็นศูนย์ ซึ่งความคลาดเคลื่อน (Error) แบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

1) ความคลาดเคลื่อนอย่างมีระบบ (Systematic error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่มีผลต่อกลุ่มตัวอย่างทั้งกลุ่มอย่างเท่าเทียมกัน เช่น ความบกพร่องของเครื่องมือวัด การจับเวลาทดสอบผิดพลาด เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยสามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนนี้ได้ กล่าวคือ ถ้าทราบว่าเครื่องมือวัดมีความบกพร่องก็แก้ความคลาดเคลื่อนได้โดยการสร้างเครื่องมือวัดให้มีความเที่ยงตรงและความเชื่อมั่นสูง ตลอดจนให้มีความเป็นปรนัย และมีประสิทธิภาพสูงด้วย

2) ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดกับกลุ่มตัวอย่างบางส่วน ทำให้เกิดความไม่เท่ากันของโอกาสในการเกิดขึ้นของตัวแปรแทรกซ้อน เช่น ความเหนื่อย ความประมาทเดินเลื้อ การเดาของผู้ถูกทดลอง ความสนใจ อารมณ์ สุขภาพร่างกาย ฯลฯ ความคลาดเคลื่อนชนิดนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้กฎการแจกแจงปกติ (Normal distribution law) กำหนดค่าสถิติเพื่อจัดกระทำกับความคลาดเคลื่อนนี้เลย แต่ถ้าไป posttest หลังจากนั้นอีก 1 เดือน อาจจะได้ผลลัพธ์ที่แท้จริงจากการจัดกระทำ (Treatment)

2.7 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การพัฒนาโปรตีนไฮโดรไลสได้จากเชื้อเปลือกไข่ [1]

คุณารต พิภูล, วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษร และสายพิน ทานัชมาสตร์ ศึกษาสภาวะในการแยกเชื้อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่แล้วนำมาหาวิธีไฮโดรไลซ์ พบว่าการแยกเชื้อทำโดยแช่เปลือกไข่ในสารละลายกรดอะซิติก 0.5 M (โมลาริตี) ที่อุณหภูมิ 28 °C เป็นเวลา 72 h เชื้อที่ได้มีโปรตีนสูงถึง 41.90 % โครงสร้างระดับจุลภาคของเชื้อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แสงเลเซอร์แบบส่องกราด ซึ่งสารละลายดังกล่าวไม่ได้ทำลายเชื้อเปลือกไข่ทำการย่อยสลายเชื้อเปลือกไข่ 1.5 กรัมด้วย 10 % สารละลายกรดอะซิติก 80 ml เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ไม่พบชั้นเชื้อเปลือกไข่เหลืออยู่และสารละลายมีความใส ดำรงสารละลายไฮโดรไลส (ย่อยที่ 120 °C : Cys, M, NR) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบอนุภาคขนาดเล็ก โปร่งใสแขวนลอยอยู่ในสารละลายอนุภาค มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.75, 0.69 และ 0.80 μm ตามลำดับ ไฮโดรไลส ประกอบด้วยเปปไทด์ขนาด 6.5 กิโลดัลตัน แสดงว่าการใช้กรดอะซิติกร่วมกับความร้อนที่ 120 °C เป็นวิธีการหนึ่งในการผลิตโปรตีนไฮโดรไลสได้จากเชื้อเปลือกไข่

2.7.2 การแยกเชื้อเปลือกไข่ด้วยเทคนิคการแต่งแร่ [2]

ฉิรเจต ไตรอด ศึกษาการแยกเชื้อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่เหลือทิ้ง ด้วยเทคนิคการแต่งแร่ โดยใช้เครื่องลอยแร่ในการแยกเชื้อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่ ในส่วนของเปลือกไข่ที่แยกได้นำไปบดต่อด้วยเครื่องบดแอทริซันมิลล์ หลังจากนั้นนำเปลือกไข่ที่บดได้ไปวิเคราะห์หา

คุณสมบัติต่างๆ เพื่อใช้ในการเตรียมเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอาหารเสริมแคลเซียมและอาหาร กุ้ง พบว่าขนาดที่ได้จากเครื่องบดแอททริชันมิลล์ในสภาวะที่เหมาะสม จะให้ผลการบดอยู่ในช่วง 5-8 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดที่นำไปใช้ในอาหารเสริม การวิเคราะห์หาชนิดขององค์ประกอบในเปลือกไข่ ด้วยเครื่อง XRD พบว่าเป็นสารประกอบแคลไซต์และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF พบส่วนของเปลือกไข่ ประกอบไปด้วย CaO 53.86 % SiO₂ 0.52 % MgO 0.85 % ซึ่งส่วนประกอบนี้ใกล้เคียงกับ ส่วนประกอบของอาหารเสริมแคลเซียมที่จำหน่ายตามท้องตลาด จากนั้นนำเยื่อเปลือกไข่ไปวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง FT-IR เพื่อตรวจสอบ หมู่ฟังก์ชันของเยื่อเปลือกไข่ ซึ่งพบว่าสามารถนำมาใช้กับ อุตสาหกรรมจำพวกเครื่องหนัง หรือเครื่องสำอาง เปลือกไข่ที่แยกได้น่าจะ สามารถนำไปใช้ ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้

2.7.3 การหล่ออินเสิร์ตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยอีพอกซีเรซินผสมผงอะลูมิเนียมโดยใช้ไม้ เทียมเป็นต้นแบบ [3]

ธีรพงษ์ จันทรโชค, คุณากร หอมศิริ และเสรี ยงมณี ได้ทำการศึกษาการผลิตชิ้นงาน ทางด้านกระบวนการฉีดพลาสติก มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง ทางกลุ่มจึงได้ทำการทดลอง เพื่อหาวิธีใน การสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยวัสดุอีพอกซีเรซินผสมผงอะลูมิเนียม สัดส่วนส่วนผสมระหว่างอี พอกซีเรซินกับผงอะลูมิเนียมที่เหมาะสมที่สุด วัสดุสำหรับมาสเตอร์โมเดล โดยผลการทดลองพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างอินเสิร์ต คือ อีพอกซีเรซิน 50% และผงอะลูมิเนียม 50% โดยใช้ เวลาในการแข็งตัวประมาณ 6-7 ชั่วโมง ซึ่งมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด โดยมี อุณหภูมิในการฉีดเฉลี่ยอยู่ที่ 44.2 °C ความแข็งของอินเสิร์ต 67.7 HRB และได้ค่าความเรียบผิวที่ดี ที่สุดที่ 1.26 μm สามารถฉีดชิ้นงานได้จำนวน 20 ชิ้น โดยมีพลาสติกผสมผงไม้มาสเตอร์ โมเดลซึ่งสามารถลดความเสียหายของเครื่องมือในการตัดเฉือน เวลาที่สั้นลงในการขึ้นรูป และได้ ความเรียบผิวที่ 0.92 μm

2.7.4 การศึกษาการใช้ผงแก้วจากขวดแก้วรีไซเคิลเสริมแรงในอีพอกซีเรซินสำหรับสร้าง แม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อน [4]

ศุทธิศล แสงดาว และวิทยา กาญจนเจริญนนท์ ศึกษาการขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธีการ เทอร์โมฟอร์มมิ่ง เป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์อย่าง แพร่หลาย แม่พิมพ์ชนิดนี้ส่วนใหญ่ทำจากโลหะประเภทเหล็กและอะลูมิเนียมและความจำเป็นที่ต้อง ปรับเปลี่ยนใหม่ตามความต้องการของลูกค้า และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ให้มีความทันสมัย มีแรงดึงดูด ใจ ซึ่งต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ ทำให้แม่พิมพ์ต้องเปลี่ยนตามไปด้วย ดังนั้นต้นทุนการ ผลิตก็จะเพิ่มขึ้นตาม อีกทั้งการผลิตจำนวนชิ้นงาน ในปริมาณที่น้อยก็เสี่ยงต่อการไม่คุ้มทุนในการ

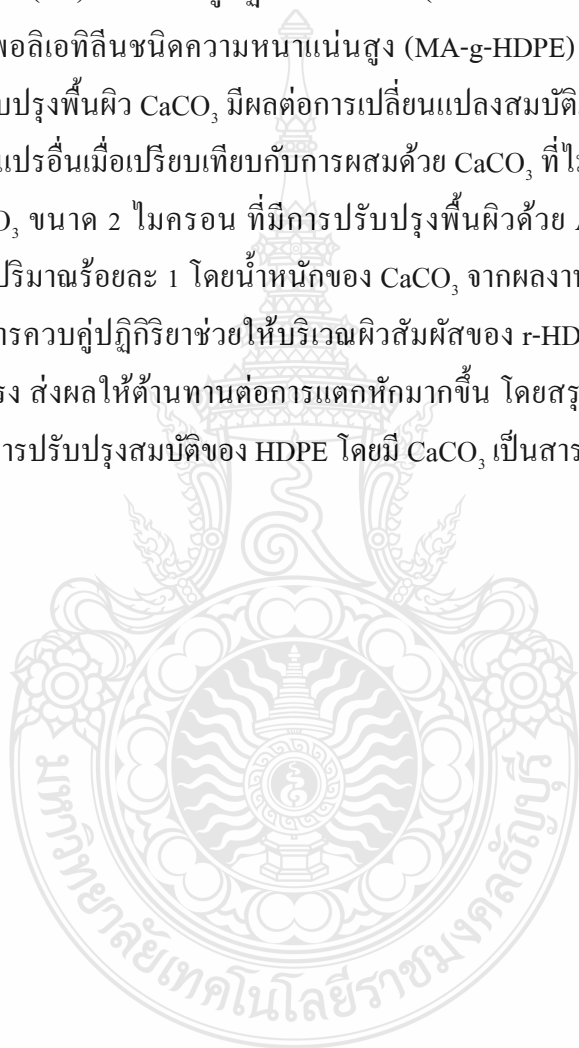
ลงทุน ในปัจจุบันแม่พิมพ์เทอร์โมฟอร์มมิ่งสามารถสร้างโดยการหล่อด้วยอีพอกซีเรซินได้ เมื่อมีวัสดุเข้าไปเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน เช่น ผงอะลูมิเนียม หรือผงแก้วเป็นต้น จะเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้นไปจากเดิม นำมาผ่านกระบวนการตกแต่งผิวสำเร็จได้ง่าย และสามารถใช้งานได้นานขึ้นดังนั้น เพื่อให้การผลิตขึ้นงาน มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง ทางกลุ่มจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาวิธีในการสร้างแม่พิมพ์เทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยการใช้ขวดแก้วที่ใช้แล้วนำมาทำความสะอาด แล้วนำมาบดจนได้เป็นผงแก้ว และนำผงแก้วมาร่อนจนได้ขนาด 200 เมช เป็นวัสดุเสริมแรง จากนั้นทำมาสเตอร์โมเดลเป็นแม่พิมพ์ในการหล่ออีพอกซีเรซินผสมผงแก้วในอัตราส่วนส่วน 50:50 60:40 และ 70:30 โดยผลการทดลองการส่อง โครงสร้างพบว่ามีการแบ่งแยกอย่างชัดเจนระหว่าง อีพอกซีเรซิน ผงแก้ว และ ฟองอากาศในแม่พิมพ์อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งการกระจายตัวของผงแก้วกับฟองอากาศนั้นมีผลต่อค่าความแข็งซึ่งแม่พิมพ์อัตราส่วน 60:40 จะมีค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ในแต่ละชั้นของความลึกจะมีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 67.51 HRB

2.7.5 การออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยใช้แม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเดิมผงอะลูมิเนียม [5]

วันเฉลิม สัตระ สุรศักดิ์ บุญลาภ และทิพากร กรมไชยกิจ ทำการออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยใช้แม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเดิมผงอะลูมิเนียมแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยทั่วไปผลิตด้วยโลหะ อะลูมิเนียม ข้อเสียของแม่พิมพ์เหล่านี้คือมีราคาสูง การขึ้นรูปทำได้ยากและใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างนาน ไม่เหมาะสมกับการผลิตขึ้นงานที่มีจำนวนน้อยเพราะจะทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาวัสดุทำแม่พิมพ์ด้วยอีพอกซีเรซินเดิมผงอะลูมิเนียมเป็นวัสดุผสม มีสมบัติคล้ายอะลูมิเนียม สามารถนำมาผ่านกระบวนการกัด กลึง และตกแต่งผิวขึ้นงานได้ง่าย สามารถหล่อแม่พิมพ์ด้วยสารประกอบอีพอกซีเรซินเดิมผงอะลูมิเนียมได้โดยใช้มาสเตอร์โมเดล เป็นขึ้นงานต้นแบบที่สร้างขึ้นให้มีขนาดใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุดใช้เวลาในการผลิตแม่พิมพ์น้อย ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าการสร้างแม่พิมพ์แบบเดิม เหมาะกับการผลิตขึ้นงาน ที่มีจำนวนไม่มากและต้องเปลี่ยนรูปลักษณะของขึ้นงานตลอดเวลา

2.7.6 สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง [6]

นิลบล เพื่อกบ่าว ศึกษาศมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ (r-HDPE) ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยการศึกษาอิทธิพลของ ปริมาณ ขนาดอนุภาค และการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยา 4 ชนิด ได้แก่กรดสเตียริก (SA) สารควบคู่ปฏิกิริยาไซเลน (AMPTES และ GPTMS) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (MA-g-HDPE) รวมทั้งอุณหภูมิ จากการทดลอง พบว่า การปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของ r-HDPE/ CaCO_3 คอมโพสิตมากกว่าตัวแปรอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีผสมด้วย CaCO_3 ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว โดยพบว่า เมื่อผสม CaCO_3 ขนาด 2 ไมครอน ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย AMPTES, MA-g-HDPE, GPTMS และ SA ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ CaCO_3 จากผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารควบคู่ปฏิกิริยาช่วยให้บริเวณผิวสัมผัสของ r-HDPE/ CaCO_3 คอมโพสิต เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ส่งผลให้ด้านทานต่อการแตกหักมากขึ้น โดยสรุปผลงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงสมบัติของ HDPE โดยมี CaCO_3 เป็นสารเติมแต่งเพื่อนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป



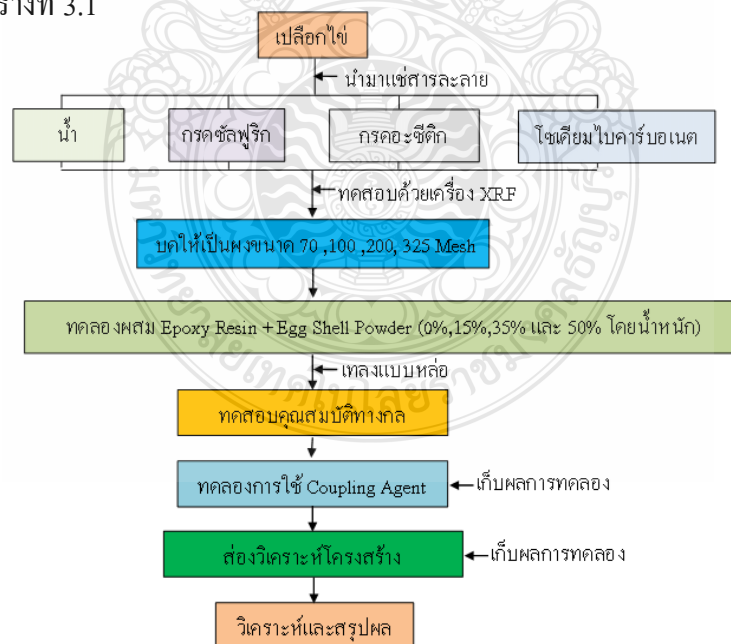
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการวิจัยศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ผสมอีพอกซีเรซิน โดยการขึ้นรูปด้วยการผสมผงเปลือกไข่ที่มีต่างขนาดกัน และมีกรรมวิธีการเตรียมผงเปลือกไข่ที่ต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ซึ่งแผนการดำเนินงานและขั้นตอนในการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยหัวข้อเรื่องการศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน ซึ่งจะใช้เปลือกไข่ไก่อจากร้านขนมเปียกผสมกับอีพอกซีเรซิน เกรดแม่พิมพ์ (EP078) มีขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมผงเปลือกไข่ ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากผงเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนของการทดสอบ และปรับปรุงสมบัติทางกล ในภาพที่ 3.1 แสดงแผนภาพการไหลของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในเรื่องนี้และแผนการดำเนินงาน ในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการ

ขั้นตอนดำเนินการ	2559												2560				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
1. คัดเลือกหัวข้อโครงการ	█ ▢																
2. ขึ้นเตรียมสอบโครงการ		█ ▢															
3. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง		█	█	█	█												
4. ทำการออกแบบแม่พิมพ์			█	█	█	█											
5. จัดทำโครงงานและทดสอบการใช้งาน								█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
6. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่ม																█	█

หมายเหตุ : แสดงแผนการดำเนินการ █
 แสดงการดำเนินงานจริง ▢

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

กระบวนการทดลองสำหรับการดำเนินงานวิจัยในเรื่อง การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอิพอกซีเรซิน ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อ 3.1 มีรายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ดังต่อไปนี้

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับขั้นตอนการเตรียมผงเปลือกไข่ไก่ ในขั้นตอนนี้มีเครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

3.2.1.1 เครื่องบดแบบ Ball Mill ใช้บดผงเปลือกไข่ไก่สำหรับการเตรียมผงเปลือกไข่ไก่เพื่อทดสอบ ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องบดแบบ Ball Mill

3.2.1.4 ชุดตะแกรงร่อนคัดแยกอนุภาค ใช้ตะแกรงสำหรับคัดแยกให้ได้ขนาดผงเปลือกไข่ตามขนาดที่ต้องการทดสอบ ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ชุดตะแกรงร่อนคัดแยกอนุภาค

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน ในขั้นตอนนี้มีเครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

3.2.2.1 อุปกรณ์กวนสารละลาย ประกอบด้วยสว่านมือที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ พร้อมใบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.4



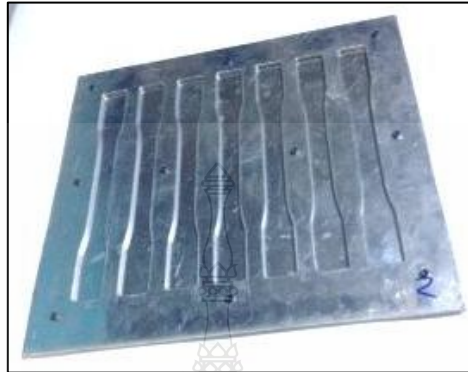
ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์กวนสารละลาย

3.2.2.2 ชุดสุญญากาศสำหรับไล่ออกอากาศ ใช้เพื่อดูดไล่ออกอากาศที่อยู่ในเนื้อวัสดุออกมา ก่อนที่วัสดุจะแข็งตัว ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ชุดสุญญากาศสำหรับไล่ออกอากาศ

3.2.2.3 แม่พิมพ์สำหรับหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แม่พิมพ์ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.2.2.4 เครื่องชั่งดิจิทัล (Digital scales) ใช้สำหรับชั่งตวงส่วนผสมในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งดิจิทัล (Digital scales)

3.2.2.5 ตู้อบ (Oven) สำหรับอบส่วนผสมต่างๆที่จะนำมาขึ้นรูปเพื่อไล่ความชื้นออก ซึ่งเป็นการช่วยลดฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ตู้อบ (Oven)

3.3 การออกแบบการทดลอง

3.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หรือ (DOE) การดำเนินงานวิจัยในเรื่องนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้ Program Minitab มาใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการออกแบบประโยชน์ที่ได้คือ ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการออกแบบได้มาก ในขณะที่ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวแปร ให้กระบวนการทดสอบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดค่าตัวแปร ประกอบด้วย อัตราส่วนผสมอีพอกซีเรซินกับเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน 4 สัดส่วนผสมคือ 0, 15, 35, และ 50% โดยน้ำหนัก และขนาดของผงบดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน 4 ขนาด คือ 75, 100, 200, และ 325 เมช สำหรับศึกษาสมบัติทางกล เพื่อหาข้อสรุปสัดส่วนการผสมของการขึ้นรูปให้ได้วัสดุทางเลือกใหม่ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยจากการออกแบบการทดลองด้วย Program Minitab เพื่อให้เหมาะสมกับรูปแบบของการทดสอบ จึงทำการกำหนดใช้รูปแบบการวิเคราะห์แบบ Multilevel Factorial Design และ

กำหนดค่าของตัวแปรอื่นตามที่กล่าวข้างต้น ลงไปในโปรแกรมเพื่อทำการออกแบบการทดลอง ดังภาพที่ 3.9 และได้รูปแบบแผนผังรวมถึงตัวแปรการทดสอบที่ A-P ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก

The screenshot shows the Minitab interface. The Session window displays the following information:

```

27/8/2016 19:09:36

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Multilevel Factorial Design

Factors:      2      Replicates:      7
Base runs:   16     Total runs:    112
Base blocks:  1     Total blocks:   1

Number of levels: 4, 4
    
```

The Worksheet1 window shows a table with 16 rows of experimental runs. The columns are labeled C1 through C6. The data is as follows:

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	อัตราส่วนอีพ็อกซ์ต่อผงเปลือกไข่	ขนาดของผงเปลือกไข่
1	1	45	1	1	1	1
2	2	14	1	1	1	2
3	3	67	1	1	1	3
4	4	29	1	1	1	4
5	5	49	1	1	2	1
6	6	8	1	1	2	2
7	7	78	1	1	2	3
8	8	25	1	1	2	4
9	9	82	1	1	3	1
10	10	43	1	1	3	2
11	11	87	1	1	3	3
12	12	106	1	1	3	4
13	13	110	1	1	4	1
14	14	30	1	1	4	2
15	15	72	1	1	4	3
16	16	89	1	1	4	4

ภาพที่ 3.9 ออกแบบการทดลองโดยใช้ Program Minitab

3.4 กระบวนการเตรียมผงบดจากเปลือกไข่

การเตรียมผงบดจากเปลือกไข่ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งของการทดสอบ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ตัวแปรหลักที่มีผลต่อการศึกษาคือ ผงบดจากเปลือกไข่ ดังนั้นในแต่ละขั้นตอนจึงต้องทำด้วยความประณีต และละเอียดอ่อน เพื่อให้ได้ผลของการวิจัยที่ดีที่สุด

3.4.1 การแยกเยื่อเปลือกไข่

เปลือกไข่จำนวนมากที่ได้จากขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานขนมเปี๊ยะ ยี่ห้อ สองเสา ในหมู่บ้านทำให้เป็นที่มาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ก่อนการทดลองต้องทำการเตรียมผงเปลือกไข่ โดย นำเปลือกไข่ ที่รวบรวมได้มาแยกเยื่อ และก่อนจะทำการแยกเยื่อนั้นประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1.1 การทำความสะอาด การเตรียมเปลือกไข่เพื่อจะนำไปแยกเยื่อนั้นก่อนอื่น ต้องนำเปลือกไข่ไก่ทั้งหมดที่เก็บมา ไปแช่น้ำไว้ 1ชม. เพื่อให้สิ่งสกปรกที่แข็งเกาะอยู่กับเปลือกไข่นิ่มลง และหลุดออกง่าย จากนั้นเปลี่ยนน้ำสะอาดเพื่อชะล้างอีก 1 ครั้ง ก่อนที่จะนำไปทำขั้นตอนการแยกเยื่อ
ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การล้างเปลือกไข่ด้วยน้ำสะอาด

3.4.1.2 หลังจากที่ทำความสะอาดเปลือกไข่ทั้งหมดแล้ว นำเปลือกไข่มาบดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อลดแรงดึงของเยื่อเปลือกไข่ ที่ติดกับส่วนที่เป็นผนัง เพื่อง่ายต่อการลอกเยื่อเปลือกไข่ออกได้
 ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 เปลือกไข่บด

3.1.4.3 ทำการทดสอบ การแยกเยื่อด้วยสารละลายทั้งหมด 6 ชนิด เพื่อหาสารละลายที่เหมาะสมในการใช้ลอกเยื่อโดยสารละลายที่ใช้ในการทดลองคือ กรดซัลฟูริก [2] กรดอะซิติก กรดซัลฟูริก โขเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำส้มควันไม้ และน้ำส้มสายชู นำสารแต่ละชนิดใส่ลงในโหล โหลละ 500 ซีซี และเติมเปลือกไข่ลงไปโหลละ 200 กรัม ดังตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.12

ตารางที่ 3.2 การทดสอบแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่

สารทดสอบ	ปริมาณ	
	สาร (ซีซี)	เปลือกไข่ (กรัม)
1. น้ำเปล่า	500	200
2. น้ำส้มสายชู เข้มข้น 8 %		

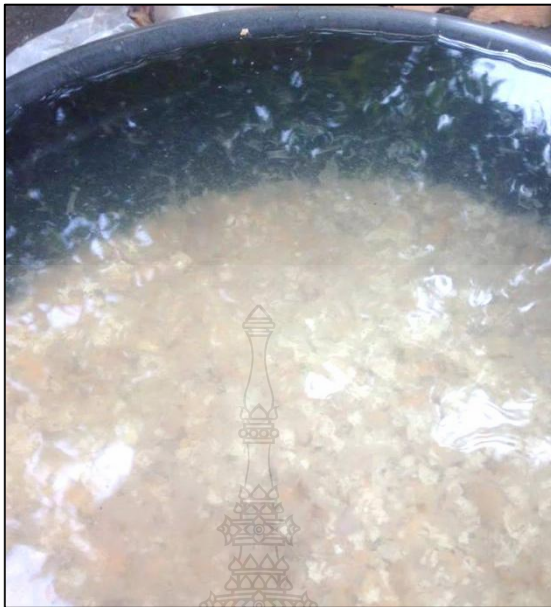
ตารางที่ 3.2 การทดสอบแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่

สารทดสอบ	ปริมาณ	
	สาร (ซีซี)	เปลือกไข่ (กรัม)
3. กรดอะซิติก เข้มข้น 12 mol	500	200
4. กรดซัลฟูริก เจือจาง 6 mol		
5. น้ำส้มควันไม้		
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 25 %		



ภาพที่ 3.12 การแยกเยื่อด้วยสารละลาย

3.1.4.4 เมื่อเยื่อเปลือกไข่เริ่มหลุดร่อน แต่ก็ยังติดอยู่กับเปลือกไข่ จึงนำเปลือกไข่มาแยกเยื่ออีกครั้ง โดยใช้เทคนิคการแตงแร่หรือการลอยแร่นั่นเอง เช่นเดียวกันกับเปลือกไข่ ที่นำเทคนิคมาใช้คือเยื่อเปลือกไข่ที่มีลักษณะเบาเกาะอยู่กับเปลือกไข่ แต่เมื่อใช้สารในกระบวนการแยกเยื่อแล้ว เมื่อกวานเปลือกไข่ในน้ำเบา ๆ ก็จะสามารถทำให้เยื่อลอยออกตามน้ำล้นได้โดยง่าย ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 การแยกเยื่อเปลือกไข่ออก

3.1.4.5 นำเปลือกไข่ว่านกระบวนการแยกเยื่อแล้ว ไปล้างทำความสะอาดแล้วตากแดดให้แห้ง ก่อนจะอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศา ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 เตรียมเปลือกไข่ให้แห้ง

3.1.4.6 จากการทดลองแยกเชื้อด้วยสารละลายดังกล่าวนี้มีสาร 4 ชนิด จะสามารถแยกเชื้อออกได้ตามต้องการ แล้วจึงนำเปลือกไข่แต่ละชนิดมาทำการตรวจสอบส่วนผสมของเปลือกไข่ด้วยเครื่อง XRF (X-ray fluorescence) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนต ที่อยู่ที่เปลือกไข่ ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การทดสอบด้วยเครื่อง XRF (X-ray fluorescence)

3.4.2 การเตรียมผงบดเปลือกไข่

หลังจากที่ได้เปลือกไข่ ที่ผ่านการแยกเชื้ออย่างสมบูรณ์แล้ว จึงมาถึงขั้นตอนเปลี่ยนขยะเปลือกไข่ให้เป็นตัวแปรที่สำคัญในการทดสอบ โดยขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมผงเปลือกไข่ สำหรับทดสอบในเรื่องของขนาดอนุภาค (Mesh Size) ของผงเปลือกไข่ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลนั้นๆอย่างไร ดังนั้นจึงต้องทำการเตรียมผงบดเปลือกไข่ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.2.1 บดผงเปลือกไข่ทำการบดเปลือกไข่ได้ด้วยเครื่องบดแบบ Ball Mill ดังภาพที่ 3.2 เลือกใช้โหมดการบดแบบแห้ง บดครั้งละ 20 นาที โดยเครื่องบดนี้มีกระบอกให้ใส่ผงเปลือกไข่ได้ที่ละ 0.5 ลิตร และใช้ขนาดลูกบอล เซรามิกขนาด 20 มิลลิเมตร ในการกลิ้งบดผงเปลือกไข่ให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กตามที่ต้องการ ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 ลักษณะการทำงานของเครื่องบดแบบ Ball Mill

3.4.2.2 การแยกผงเปลือกไข่ ในขณะที่ทำการบดผงเปลือกไข่นั้น ต้องทำการแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าคัดแยกอนุภาคด้วยตะแกรงร่อน (Sieve shaker) ดังภาพที่ 3.3 โดยขนาดเมช ที่ต้องการในการทดสอบนี้คือ 75, 100, 200, 325 เมช หรือเท่ากับ 0.21, 0.149, 0.074, 0.044 มิลลิเมตร จึงต้องทำการวางซ้อนตะแกรง (Sieve Test) ทั้งหมด 5 ชั้น เพื่อเขย่าให้ผงเปลือกไข่ที่ผ่านการบดมาแล้วนั้น แยกตัวออกตามขนาดตะแกรงที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 ตะแกรง (Sieve Test)

3.5 กระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน

การหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบจากผงบดเปลือกไข่ไก่ที่เป็นเศษเหลือใช้จากการทำขนมเปียกผสมกับอีพอกซีเรซินเกรดแม่พิมพ์ (EP-078) มีการออกแบบเปลือกไข่ขนาดของผงบด และกำหนดสัดส่วนการผสมดังที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อ 3.3 โดยในการหล่อขึ้นรูปอีพอกซีเรซินต้องมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ Epoxy resin (A) และ Hardener (B) นำไปสู่กระบวนการหล่อขึ้นรูปมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 เริ่มจากการชั่งตวงส่วนผสม 3 ตัว คือ ผงเปลือกไข่ อีพอกซีเรซิน A และ อีพอกซี B ตามอัตราส่วน ที่คำนวณไว้ในแต่ละ Condition ที่ทำการออกแบบการทดลองไว้ข้างต้น ตัวอย่างการ ตวงผงเปลือกไข่ 125.318 กรัม กับอีพอกซีเรซินชนิด A 195.496 กรัม และ อีพอกซีเรซินชนิด B 55.14 กรัม ดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ตวงสารแต่ละชนิด

3.5.2 เมื่อตวงส่วนผสมแล้วผสมผงเปลือกไข่กับอีพอกซีเรซินชนิด A ดังภาพที่ 3.19 ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยอุปกรณ์ในภาพที่ 3.4 โดยใช้เวลา 10 นาที



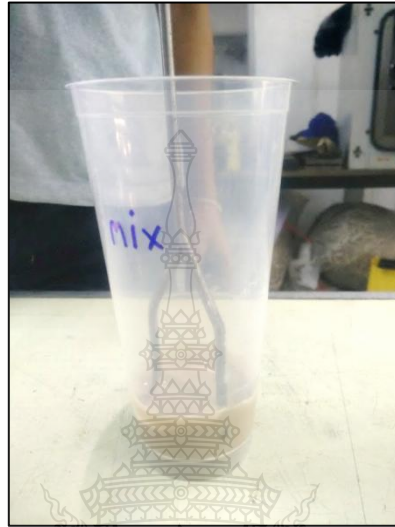
ภาพที่ 3.19 ผสมผงเปลือกไข่กับอีพอกซีเรซินชนิด A

3.5.3 ใช้ชุดสุญญากาศสำหรับดูดไล่ฟองอากาศที่อยู่ในเนื้อวัสดุออกมา เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศข้างในชิ้นงาน ซึ่งเป็นทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่อง ดังภาพที่ 3.20



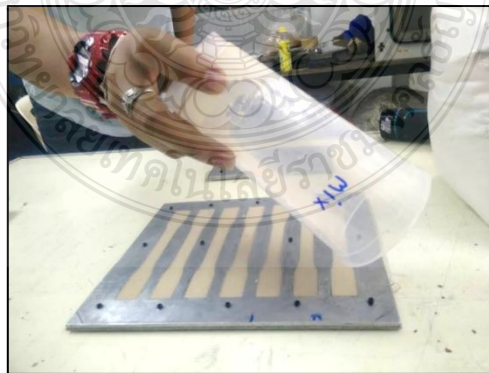
ภาพที่ 3.20 ดูดฟองอากาศในเนื้องานออก

3.5.4 หลังจากดูดฟองอากาศเสร็จแล้วผสมสารอีพอกซีเรซินชนิด B ลงไปแล้ว ใช้เครื่องกวนรอบต่ำกวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพที่ 3.21



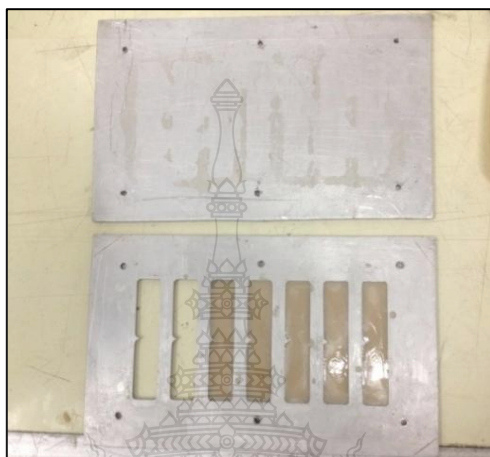
ภาพที่ 3.21 ผสมสารอีพอกซีเรซินชนิด B

3.5.5 เข้าเครื่องดูดฟองอากาศอีก 10 นาที เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศข้างในชิ้นงาน ซึ่งเป็นทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่อง แล้วค่อย ๆ เทลงส่วนผสมทั้งหมดลงเบ้าหล่อชิ้นงานดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 เทสารที่ผสมลงเบ้าหล่อชิ้นงาน

3.5.6 จากนั้นร่อนจนส่วนผสมที่ตกลงเข้าหล่อชิ้นงานแห้งและแข็ง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึง คลายสกรูถอดแบบและดันปลดชิ้นงานออก ดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 ร่อนชิ้นงานแข็งและปลดชิ้นงานออกจากแบบ

3.5.7 ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ให้ครบทุกตัวแปรที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ ตั้งแต่ Condition A จนถึง Condition P โดยจะแสดงข้อมูลการคำนวณอัตราส่วนผสมไว้อยู่ที่ ภาคผนวก ค

3.6 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล

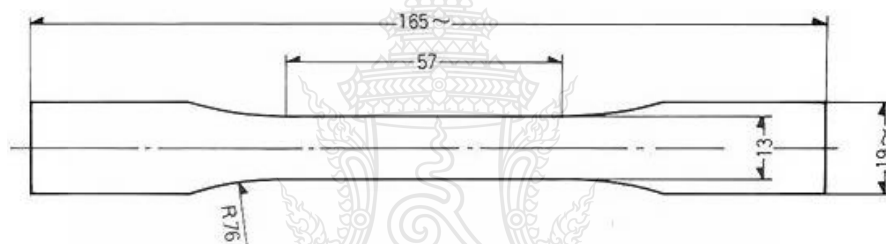
เมื่อได้ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบ จากผงเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซินเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดมาจะเป็นขั้นตอนของการทดสอบสมบัติทางกล จึงต้องจัดเตรียมชิ้นงาน ก่อนเข้าเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลในแต่ละมาตรฐานนั้น จะต้องมีการเตรียมขนาดชิ้นงานทดสอบให้ถูกต้อง ดังต่อไปนี้

3.6.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เป็นการทดสอบหาค่าความทนทานต่อการรับแรงดึง ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยจะต้องทำการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ และใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) ดังภาพที่ 3.24-3.24



ภาพที่ 3.24 เครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 3.25 แสดงขนาดมาตรฐานชิ้นทดสอบที่นำไปทดสอบความแรงดึง (หน่วย : มิลลิเมตร)



ภาพที่ 3.26 ชิ้นงานเตรียมทดสอบแรงดึง

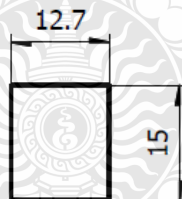
3.6.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบหาค่าความแข็งเป็นการหาค่าความสามารถในการทนต่อแรงกด (Vickers Hardness) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D785 โดยในการทดสอบจะทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness Testing Machine) ดังภาพที่ 3.27 – 3.29

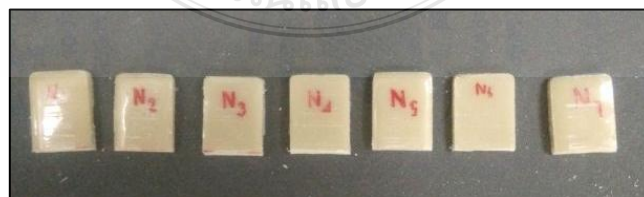


ภาพที่ 3.27 เครื่องทดสอบความแข็ง

การทดสอบนี้ใช้วิธีการตัดชิ้นทดสอบแบบเดียวกับการตัดชิ้นทดสอบแรงดึง โดยชิ้นทดสอบมีขนาด 12.7 x 15 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.28 แสดงขนาดมาตรฐานชิ้นทดสอบที่นำไปทดสอบความแข็งแรง (หน่วย : มิลลิเมตร)



ภาพที่ 3.29 ชิ้นงานเตรียมทดสอบความแข็ง

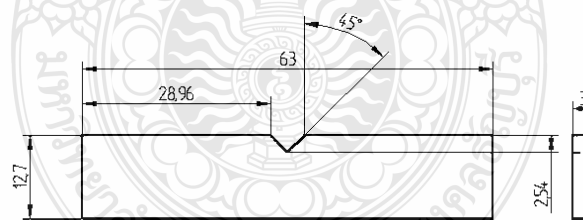
3.6.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

การหาค่าความแข็งแรงของการกระแทกเป็นการทดสอบความสามารถทนต่อการรับแรงกระแทกโดยฉับพลัน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยการทดสอบจะทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี้ ดังภาพที่ 3.30 – 3.32



ภาพที่ 3.30 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี้

การทดสอบนี้ใช้วิธีการตัดชิ้นทดสอบแบบเดียวกับการตัดชิ้นทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็งแรง โดยชิ้นทดสอบมีขนาด 12.7 x 63 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3.31 แสดงขนาดมาตรฐานชิ้นทดสอบที่นำไปทดสอบแรงกระแทก (หน่วย : มิลลิเมตร)



ภาพที่ 3.32 ชิ้นงานเตรียมทดสอบแรงกระแทก

3.7 การปรับปรุงสมบัติทางกลของการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน

3.7.1 หลังจากที่ได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลบางประการของวัสดุ จากการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซินแล้ว จะเลือกชนิดของวัสดุผสมที่มีสมบัติทางกลดีที่สุดมาทำการปรับปรุงสมบัติทางกลของการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน โดยการใช้สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มอันตรกิริยา (เกิดการเชื่อมโยง) ระหว่างผงบดเปลือกไข่กับอีพอกซีเรซิน โดยเลือกใช้ สาร Stearic KH550 และ KH560 ในการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

กวนให้สารละลายกระจายทั่วผงเปลือกไข่ด้วย สเตียร์เนอร์ จะใช้ อัตราส่วน CaCO_3 อนุภาค จำนวน 2.0 กรัม ต่อ Cupping 2.0 กรัม โดยเติมสารละลายเอทานอล 95% จำนวน 100 มล. ลงไปด้วย ผสมกันโดยการกวนด้วย stirrer (แม่เหล็ก) ใช้อุณหภูมิ ที่ 60°C 8 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.33



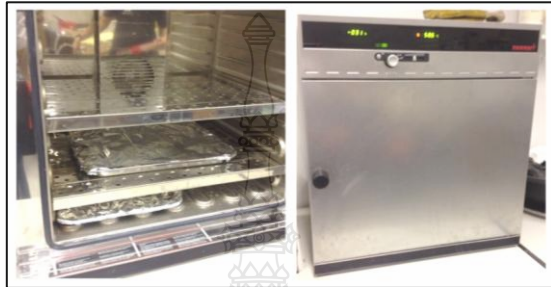
ภาพที่ 3.33 การใช้ Stirrer ในการกวนสาร

3.7.2 การกรองสาร หลังจากที่ผ่านมากระบวนการกวนสารแล้ว ก็จะนำเปลือกไข่และสารทั้งหมดมาผ่านกระบวนการกรองสาร โดยใช้ชุด Vacuum ในการดูดไล่สารอื่นออกจากพื้นผิวของเปลือกไข่ ดังภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.34 การกรองสาร

3.7.3 การอบเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Coupling Agent เรียบร้อยแล้ว ผงเปลือกไข่ที่ได้จะเปียก ทำให้ผงเปลือกไข่เกิดความชื้น ยังไม่สามารถนำมาทดสอบได้ จึงต้องนำมาทำการอบให้แห้งเสียก่อน โดยนำมาใส่ถาดผืนกด้วยฟอยล์ ก่อนอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.35



ภาพที่ 3.35 การอบแห้ง

3.7.4 หลังจากี่ผ่านกระบวนการการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเป็นเวลา 8 ชั่วโมงแล้ว ทำการแกะฟอยล์ที่เราห่อไว้ก่อนทำการอบออก จะได้ผงเปลือกไข่ที่แห้งสนิท ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนจะนำไปขึ้นรูปทดสอบเพื่อทดสอบอีกครั้ง ดังภาพที่ 3.36



ภาพที่ 3.36 ผงเปลือกไข่หลังจากผ่านการอบแห้ง

3.8 การเตรียมแม่พิมพ์ทดสอบการหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน

หลังจากที่กระบวนการ ในการปรับปรุงของวัสดุได้ส่วนผสมที่ลงตัวที่สุดแล้ว จึงขยายผล เพื่อทดลองหล่อขึ้นรูปในลักษณะการใช้งานจริง หล่อขึ้นรูปแม่พิมพ์อัดกลีบดอกไม้ โดยทำการเตรียม บล็อกแม่พิมพ์ใช้วัสดุซิลิโคนทำแบบหล่อขึ้นรูป เพราะเป็นวัสดุอ่อนที่สามารถถอดแบบได้ง่าย และ พื้นผิวลื่นสามารถถอดแบบได้ดี ดังภาพที่ 3.37 โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.8.1 เตรียมบล็อกแม่พิมพ์



ภาพที่ 3.37 บล็อกแม่พิมพ์

3.8.2 นำบล็อกแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น มาทาวาสลินเพื่อง่ายต่อการถอดชิ้นแบบและอีพอกซีเรซิน ผสมเปลือกลงไปออกจากกัน



ภาพที่ 3.38 ทาวาสลินที่แม่พิมพ์

3.8.3 ซังสารแต่ละชนิด ทั้งหมด 3 ชนิด คือ อีพอกซี A อีพอกซี B และผงเปลือกไข่ โดยใช้ เครื่องชั่งดิจิตอล



ภาพที่ 3.39 ผสมสารที่ต้องการหล่อแม่พิมพ์

3.8.4 เมื่อส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันแล้วก็จะเทลงในบล็อกที่เตรียมไว้ โดยค่อย ๆ เทเพื่อไม่ให้เกิด ฟองอากาศภายในแม่พิมพ์อีพอกซีเรซินผสมเปลือกไข่



ภาพที่ 3.40 หล่อแม่พิมพ์

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์เป็นการแสดงผลของการทดลองการศึกษากระบวนการปรับสภาพผงเปลือกไข่สำหรับเป็นวัสดุเติมในอิพอกซีเรซิน จากการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยผลของการทดลองจะแบ่งออกเป็น ผลการเตรียมผงบดจากเปลือกไข่ ผลค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Test) และผลค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

4.1 ผลการเตรียมผงบดจากเปลือกไข่

4.1.1 ผลการทดสอบหาสารแยกเชื้อออกจากเปลือกไข่ (Remove Membrane)

ก่อนการทดลองได้นั้น ขยะเปลือกไข่เหลือทิ้ง ที่รวบรวมได้นั้นต้องทำการแยกเชื้อออกจากเปลือกไข่ด้วยสารละลายเสียก่อน โดยในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบ (Pre-test) การแยกเชื้อด้วยสารละลายทั้งหมด 6 ชนิด ได้ผลดังนี้

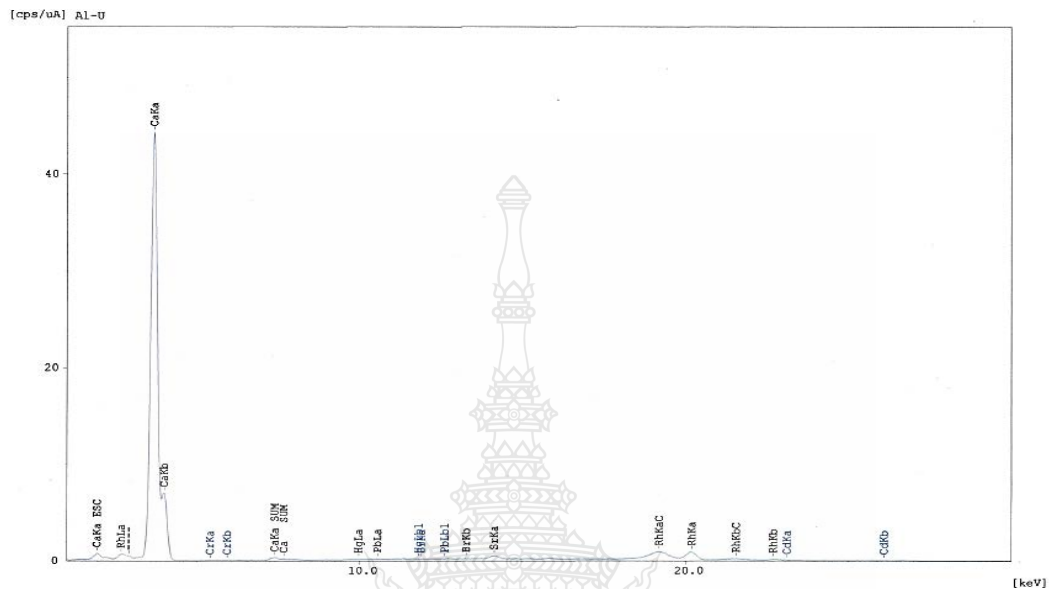
ตารางที่ 4.1 การทดสอบแยกเชื้อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่

สารทดสอบ	ผลการแยกเชื้อ		
	การแยกเชื้อ	ใช้เวลา	เปลือกไข่ที่ได้
1. น้ำเปล่า	ไม่สามารถแยกได้	-	-
2. น้ำส้มสายชู เข้มข้น 8 %	แยกได้	6 ชั่วโมง (ต้ม)	125 กรัม
3. กรดอะซิติก เข้มข้น 12 mol	แยกได้	4 ชั่วโมง (ต้ม)	130 กรัม
4. กรดซัลฟูริก เจือจาง 6 mol	แยกได้	36 ชั่วโมง	100 กรัม
5. น้ำส้มควันไม้	ไม่สามารถแยกได้	-	-
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 25 %	แยกได้	1 ชั่วโมง	150 กรัม

หมายเหตุ (สารที่แช่เกิน 72 ชั่วโมงจะทดลองต้มที่ อุณหภูมิ 123 องศา)

จากการทดลองแยกเชื้อด้วยสารละลายดังกล่าวนี้มีสาร 4 ชนิด ที่สามารถแยกเชื้อออกได้ตามต้องการ แล้วจึงนำเปลือกไข่แต่ละชนิดมาทำการตรวจสอบ

ด้วยเครื่อง XRF X-ray fluorescence) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ที่เปลือกไข่ จากการทดสอบพบว่ามีความค่าของแคลเซียมในปริมาณสูง ดังภาพที่ 4.1

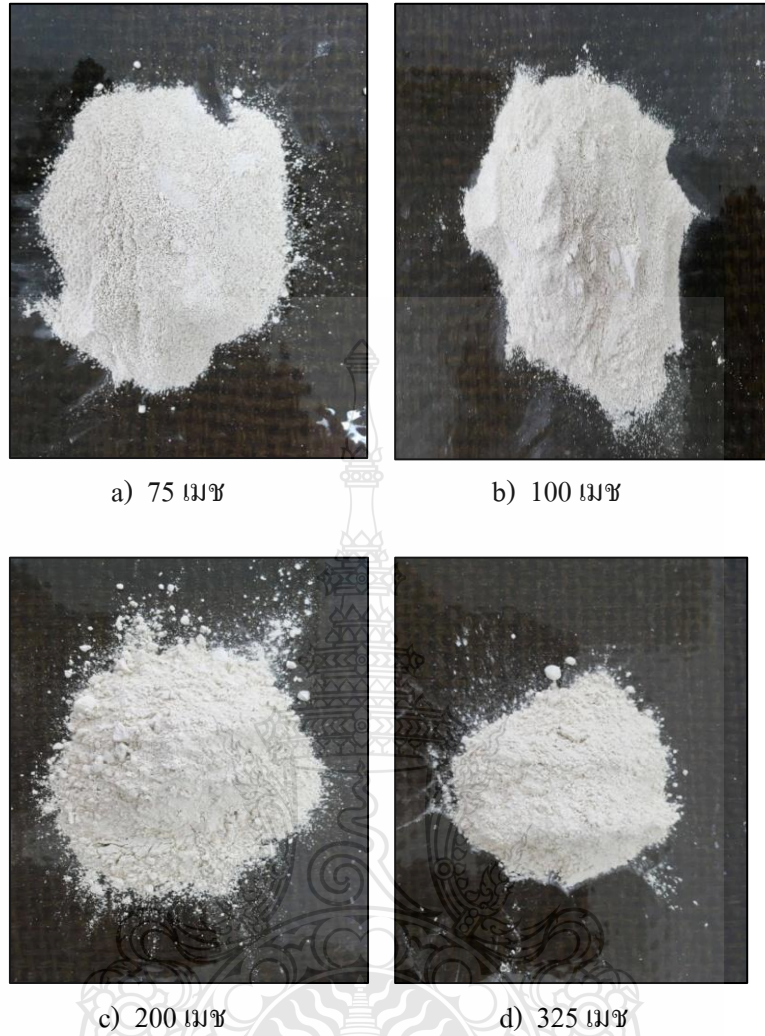


ภาพที่ 4.1 กราฟปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนต

ได้ทำการ สรุปลผล โดยจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารที่ใช้แยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ ถึงแม้ว่าจะให้ค่าของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตน้อยกว่าสารชนิดอื่น แต่เมื่อดูถึงเรื่องเวลาและปริมาณของเปลือกไข่ที่ได้หลังจากการทดสอบการแยกเยื่อของสารแต่ละตัวนั้น ทำให้ผู้ทดลอง เลือกใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟเป็นสารแยกเยื่อ เพราะใช้เวลาแยกเยื่อน้อยที่สุดได้เปลือกไข่มากที่สุด บวกกับปริมาณค่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการทดสอบนั้นก็ให้ค่าที่ไม่ได้ต่างกันมากนัก

4.1.2 ผลการเตรียมผงเปลือกไข่ทดสอบ

เปลือกไข่ที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ ต้องนำมาแยกเยื่อเปลือกไข่ออกก่อน ด้วยกระบวนการที่ได้กล่าวถึงในข้อที่ 3.4.2 และผลสำเร็จที่ได้คือ ผงบดจากเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการบดด้วยเครื่องบด (Ball mill) และผ่านการคัดแยกตามขนาดเมชที่กำหนดไว้ด้วยจากตะแกรง (Sieve) มาตรฐาน เพื่อใช้สำหรับเป็นตัวแปรในการทดสอบ ในเรื่องของขนาดเมช ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผงเปลือกไข่ที่ได้จากการบดและคัดแยกตามขนาดเมช

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน

ผลสมบัติทางกลจากการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินเติมด้วยผงบดจากเปลือกไข่เมื่อนำไปทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็งจากการหล่อขึ้นงานทดสอบให้ผลการทดสอบดังนี้ แสดงในภาพที่ 4.3 - 4.5



ภาพที่ 4.3 ชิ้นทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับการหล่อจากผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน



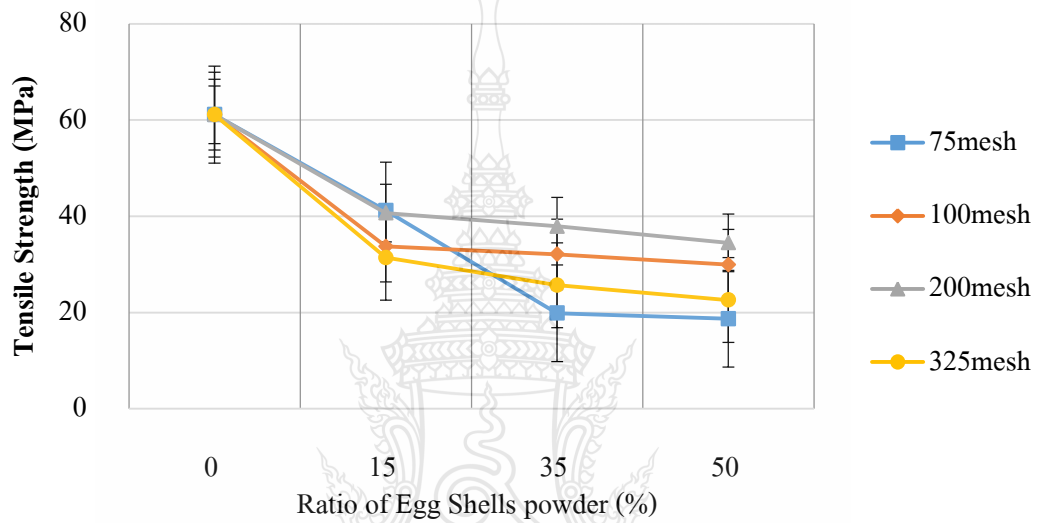
ภาพที่ 4.4 ชิ้นทดสอบค่าความต้านทานต่อการกระแทกสำหรับการหล่อจากผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน



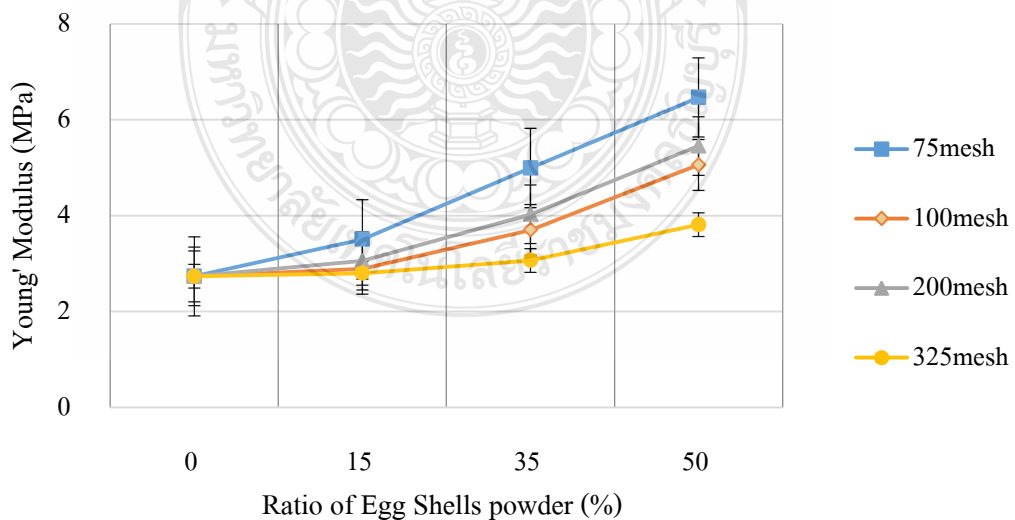
ภาพที่ 4.5 ชิ้นทดสอบค่าความแข็งสำหรับการหล่อจากผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน

4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile strength)

ผลจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของจากการทดสอบความแข็งแรงแรงดึงจะเห็นว่าถ้าผงเปลือกไข่มีขนาดใหญ่จะเกิดการตกตะกอนของผงเปลือกไข่ในชั้นงานส่งผลให้ค่า Tensile ต่ำลง ในขณะที่เดียวกัน ยิ่งใส่ผงเปลือกไข่มากขึ้นจะทำให้ค่า Tensile ลดลงอีกด้วย ถ้าผงเปลือกไข่เล็กลงการกระจายตัวของผงเปลือกไข่ก็ยิ่งดีขึ้น จึงสรุปว่าขนาดและปริมาณของผงเปลือกไข่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Tensile และ Young modulus ดังภาพที่ 4.6 และ 4.7



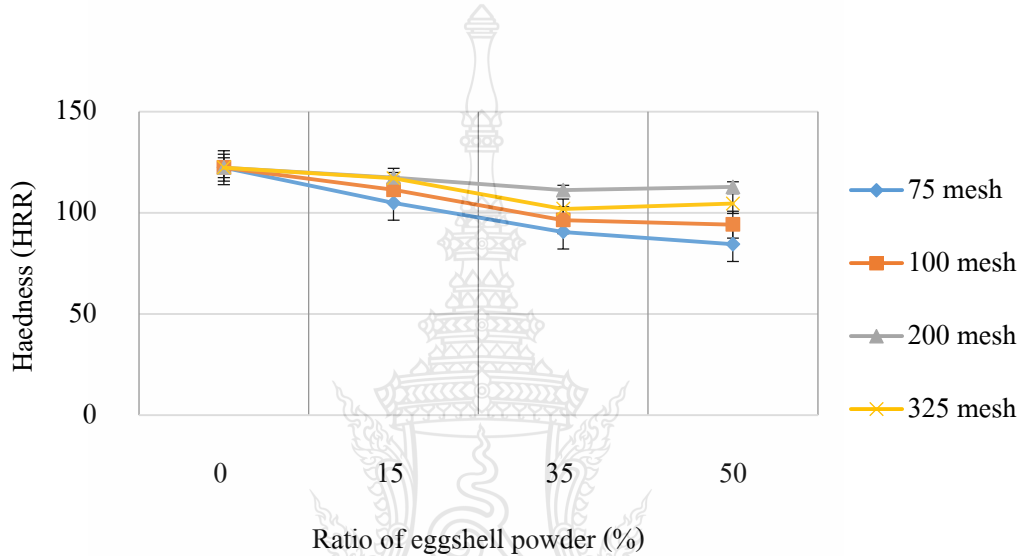
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงจากผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่า Young's Modulus จากผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน

4.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

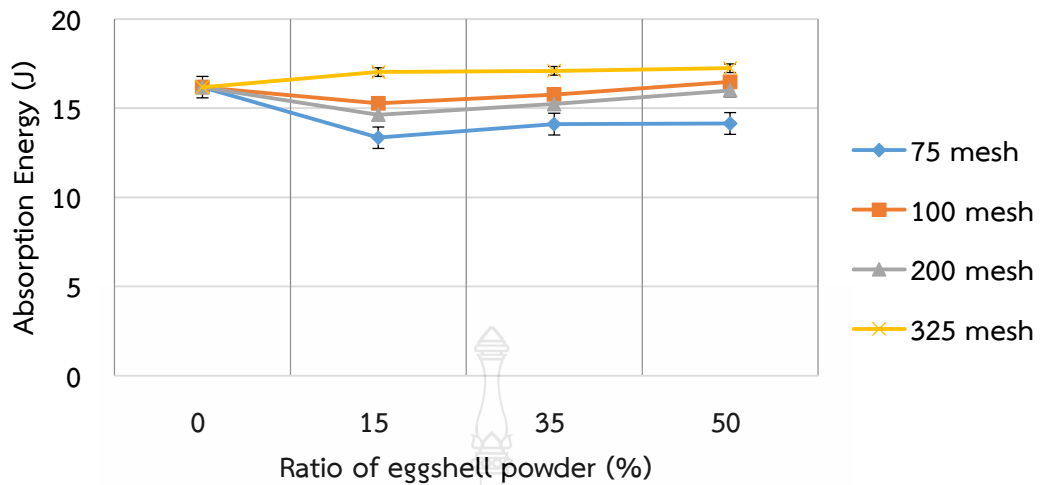
จากกราฟผลการทดสอบความแข็งแรงเมื่อนำชิ้นทดสอบมาทำการทดสอบความแข็งพบว่าเมื่อลดขนาดผงเปลือกไข่เป็นขนาด 75 100 200 325 เมช ให้ค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมผงเปลือกไข่ และยังใส่ผงเปลือกไข่มากขึ้นค่าความแข็งยิ่งลดลง ถ้าผงของเปลือกไข่ มีขนาดใหญ่จะยิ่งตกตะกอน การกระจายตัวของผงเปลือกไข่ในอีพอกซีเรซินจะกระจายได้ไม่ดี จึงสรุปว่าขนาดและปริมาณของผงเปลือกไข่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Hardness ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งจากผงเปลือกไข่เดิมในอีพอกซีเรซิน

4.2.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

จากการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก เมื่อนำชิ้นทดสอบที่ไม่ทำการ Post Cure มาทดสอบ Impact พบว่าเมื่อผสมผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช ให้ค่า Impact ต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมผงเปลือกไข่ และเมื่อลดขนาดผงเปลือกไข่เป็นขนาด 100, 200 และ 325 เมช จะให้ค่า Impact สูงขึ้นแต่สูงกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมผงเปลือกไข่เพียงเล็กน้อยเมื่อผสมผงเปลือกไข่ในขนาดที่ต่างกัน ในอัตราส่วนต่างกัน พบว่าหากใส่ผงเปลือกไข่มากค่า Impact ยิ่งสูงขึ้น และเมื่อนำชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช มาทำการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีค่า Impact สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ไม่ Post cure ยิ่งเปลือกไข่มีขนาดเล็กจะเกิดการกระจายตัวในอีพอกซีเรซินได้ดีทำให้ รับแรงกระแทกได้มากขึ้น จึงสรุปว่าขนาดและปริมาณของผงเปลือกไข่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่า Impact ดังภาพที่ 4.9



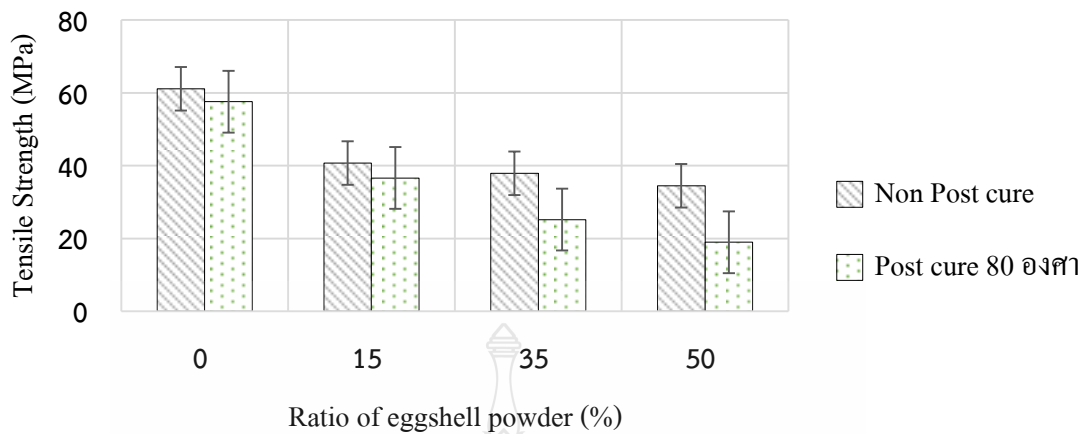
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจากผงเปลือกไข่เต็มในอีพอกซีเรซิน

การทดสอบสมบัติทางกลบางประการของชิ้นทดสอบวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินเต็มด้วย ผงบดจากเปลือกไข่พบว่าชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช มีสมบัติดีแต่ยังดีไม่เทียบเท่ากับชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผสมผงเปลือกไข่

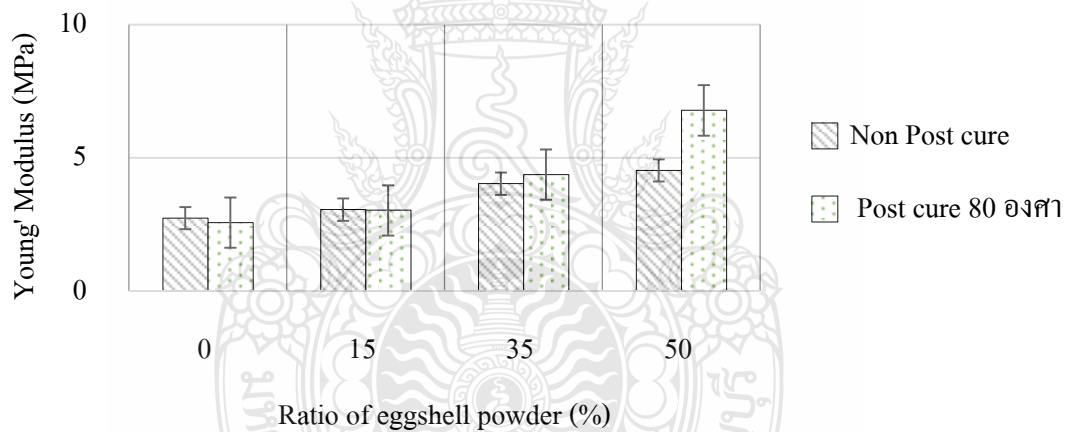
4.3 ผลกระทบของกระบวนการให้ความร้อน (Post cure)

จากการสืบค้นข้อมูลพบว่า กระบวนการ Post Cure ระดับอุณหภูมิต่ำ ๆ ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาหนึ่งจะสามารถช่วยให้ความแข็งแรงของอีพอกซีเรซินเพิ่มขึ้นได้ จึงได้ทดลองทำการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

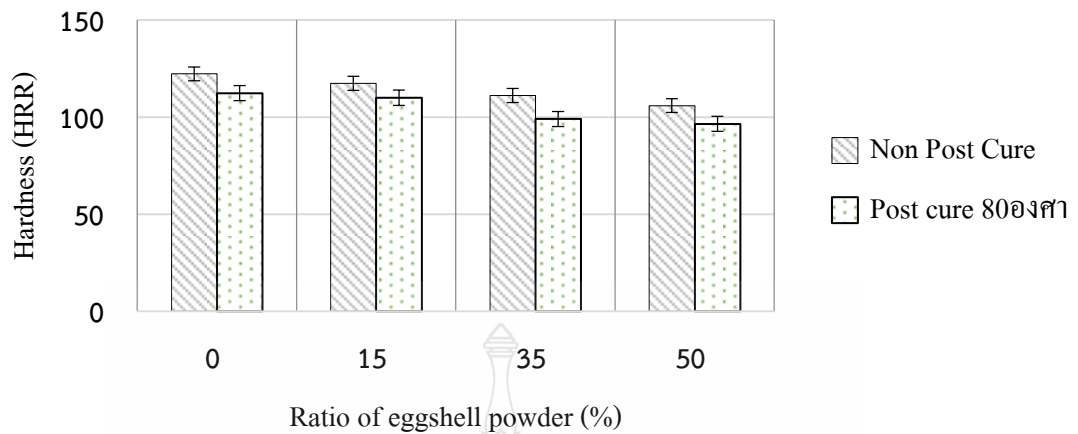
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการ ดังที่ได้แสดงผลในข้อที่ 4.2 ทำให้ในหัวข้อนี้เรามาทำการทดสอบที่ผสมเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.10 - 4.13



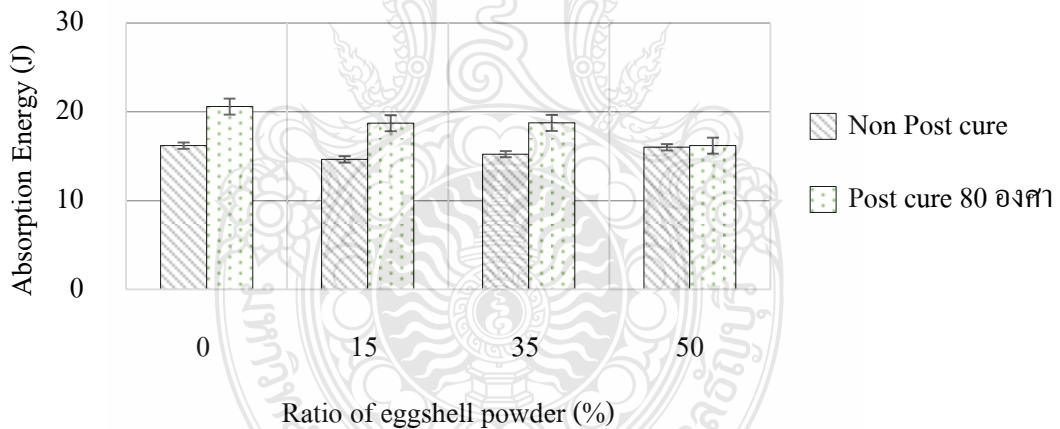
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นงานทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงค่า Young's Modulus ระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งระหว่างชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ใช้แรงกด 60 Kg. HRR)

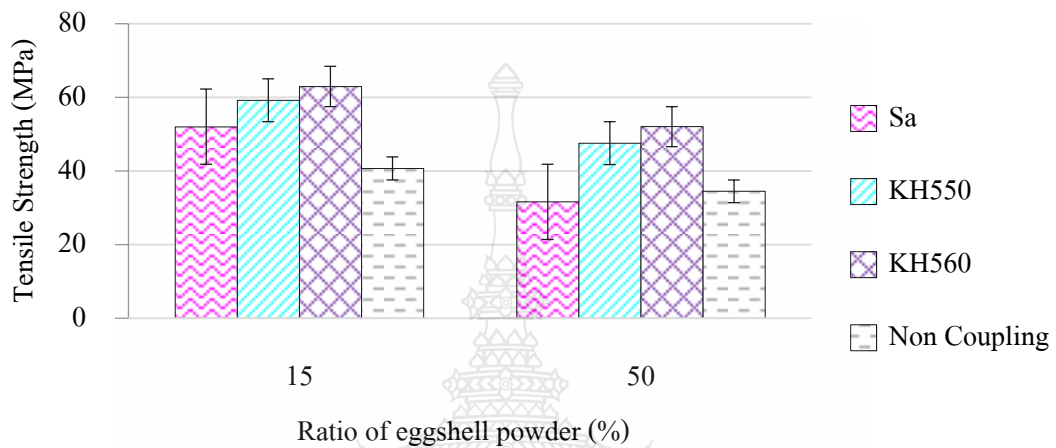


ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกระหว่างชั้นงานที่ไม่ได้ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชั้นงานที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

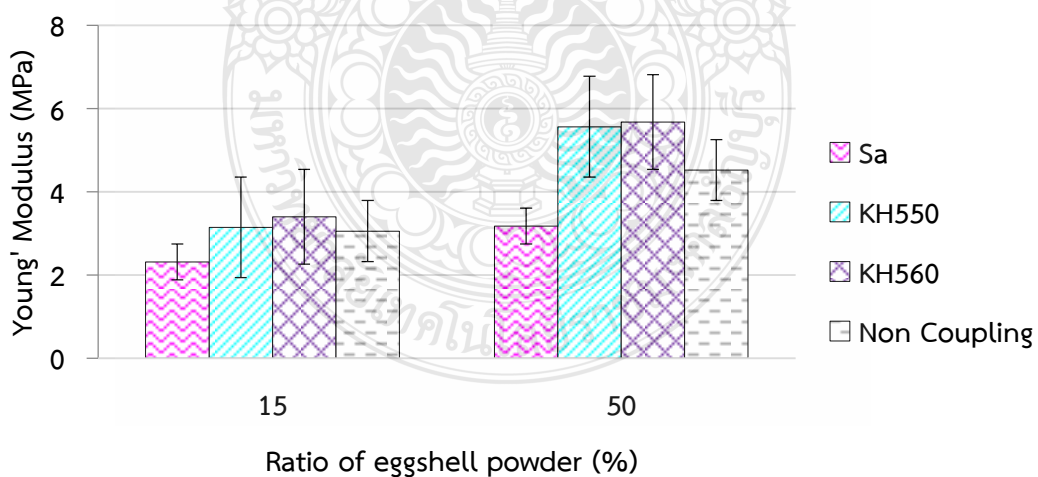
4.4 ผลการปรับปรุงสมบัติทางกลของการใช้ผงเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน

ผลการทดสอบสมบัติของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช หลังจะทำการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าชั้นทดสอบที่ดีที่สุดคือชั้นทดสอบ ที่

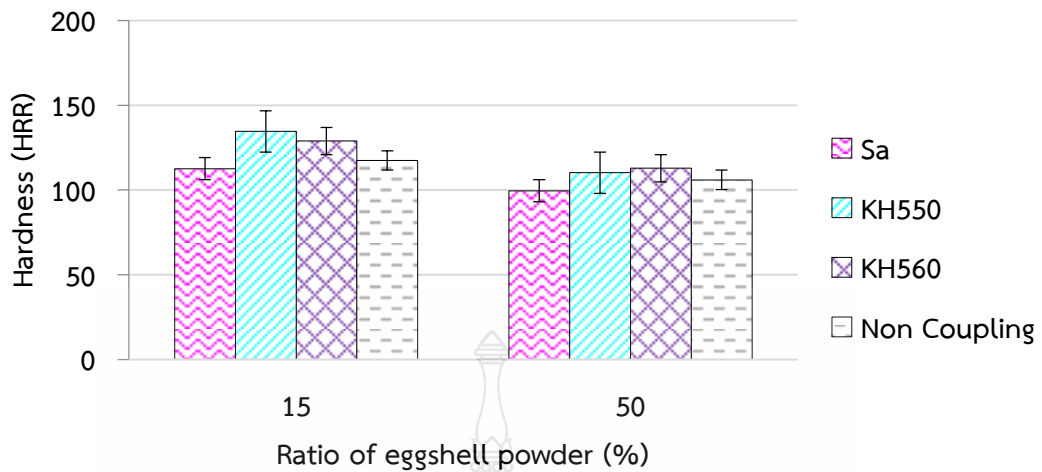
ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ผสมร้อยละ 15 และร้อยละ 35 ตามลำดับ จึงนำขึ้นทดสอบ ที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ผสมร้อยละ 15 และร้อยละ 35 ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ไปทำการปรับสภาพผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent และทำการทดสอบขึ้นทดสอบอีกครั้ง ดังภาพที่ 4.14 - 4.17



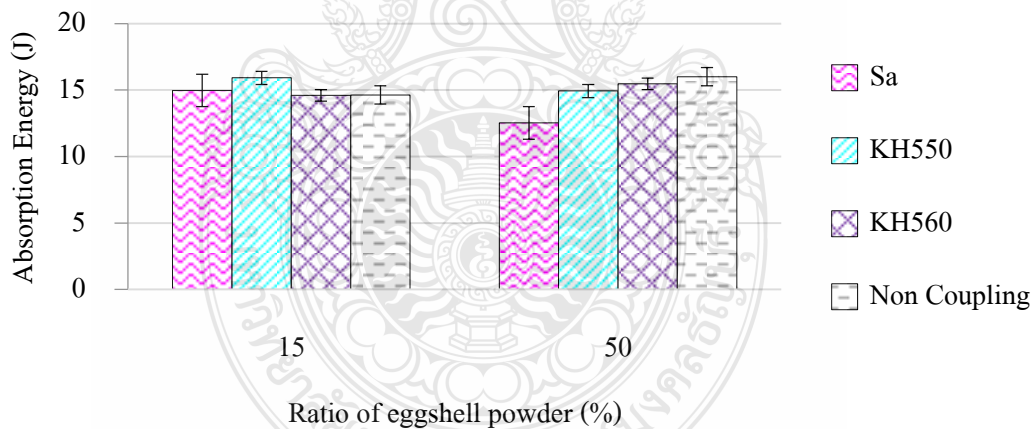
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานแรงดึงระหว่างขึ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และขึ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงค่ายังโมดูลัสระหว่างขึ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และขึ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent



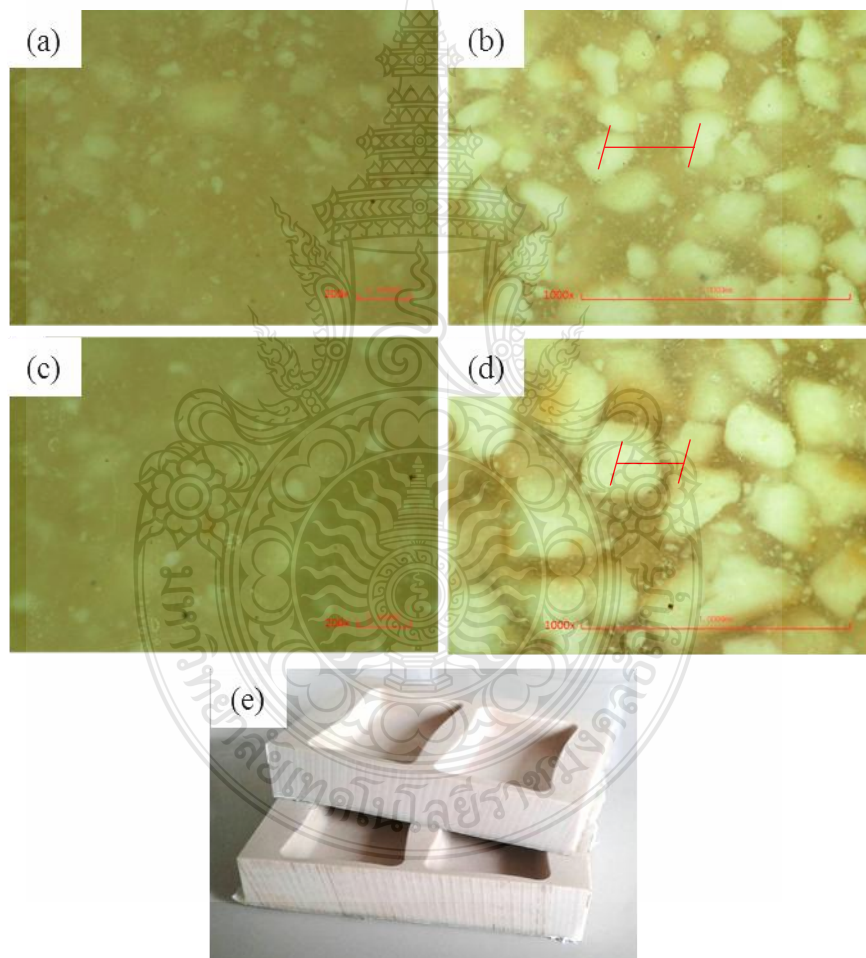
ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent (ใช้แรงกด 60Kg. HRR)



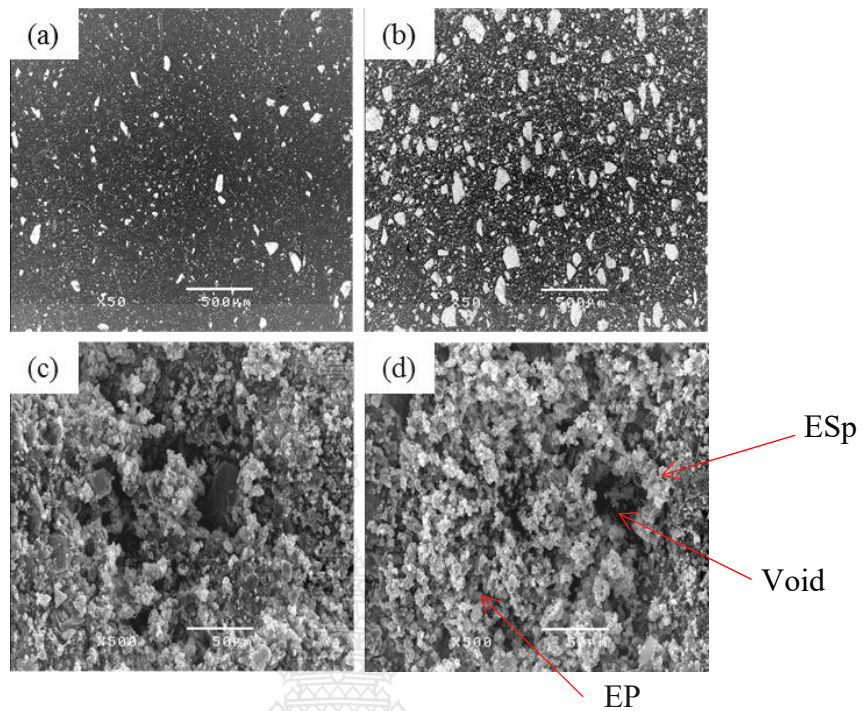
ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการกระแทกระหว่างชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชิ้นทดสอบ ที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent

4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเปลือกไข่ในเมตริกซ์ของคอมโพสิต อีพอกซีเรซิน แสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และ SEM จากภาพที่ 4.18 และ 4.19 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตอีพอกซีเรซินที่ปริมาณผสมผงเปลือกไข่ 15 % และ 50 % พบว่าที่ปริมาณผงเปลือกไข่ 15% พบการกระจายตัวของผงเปลือกไข่ห่าง ๆ ในพอลิเมอร์ ทำให้สารตัวเนื้อเมตริกซ์ สามารถจับยึดตัว Reinforce หรือผงเปลือกไข่ได้ดี ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเหนียว และเมื่อเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่มากขึ้น ผงเปลือกไข่กระจายตัวเต็มพื้นที่ ซึ่งมีความหนาแน่นของผงเปลือกไข่มากทำให้สารตัวเมตริกซ์ไม่สามารถจับยึดตัว Reinforce ได้อย่างเต็มที่ ส่งผลทำให้วัสดุมีการแตกหักแบบเปราะ



ภาพที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่กำลังขยาย 200 และ 1000 เท่า ที่ (a - b) ผสมผงเปลือกไข่ 15% (c - d) ผสมผงเปลือกไข่ 50% และ (e) ชิ้นงานที่ฝาส่อง



ภาพที่ 4.19 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณพื้นผิวของวัสดุที่กำลังขยาย 50 เท่า Mode back skater ที่ (a) ผสมผงเปลือกไข่ 15 % (b) ผสมผงเปลือกไข่ 50 % และในด้าน Cross Section ของวัสดุที่กำลังขยาย 500 เท่า Mode Secondary (c) ผสมผงเปลือกไข่ 50 % ที่ใช้ผงเปลือกไข่ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว และ (d) ผสมผงเปลือกไข่ 50% ที่ใช้ผงเปลือกไข่ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

4.5 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ

จากผลการทดสอบเชิงกลจะพบว่าค่าการทดสอบแรงดึง การทดสอบค่าความแข็ง และการทดสอบแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อขนาดของผงบดจากเปลือกไข่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น หากเดิมผงบดเปลือกไข่ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นค่าการทดสอบก็จะลดลงตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันพบว่า การทดสอบค่ายังมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดและอัตราส่วนของผงบดเปลือกไข่ ทำให้เห็นว่าขนาดและอัตราส่วนมีผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน

ดังนั้นเพื่อให้ข้อมูลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้วิธีการ (Factorial Design) กำหนดค่า Degrees of freedom ให้มีขนาด 3 อัตราส่วน 2 เพื่อเป็นการยืนยันผลของทุกการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการมีลักษณะการแจกแจงของข้อมูลผลการทดสอบ

4.5.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบแรงดึง

การวิเคราะห์ผลของข้อมูลการทดสอบแรงดึง แสดงดังตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่า ความแปรปรวนของการทดสอบสมบัติเชิงกลความต้านทานแรงดึงของแผ่นวัสดุผสมอีพอกซีเรซินเติมผงบดเปลือกไข่ไก่ได้ค่า P เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่า $P \leq 0.05$ ตามสมมติฐานจะสามารถสรุปได้ว่า ขนาดและอัตราส่วนของผงเปลือกไข่ มีผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงกล ความต้านทานแรงดึงที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean Squares	F ₀	P-Value
ขนาด	3	1359.97	453.32	20.11	0.000
อัตราส่วน	2	742.24	371.12	16.47	0.000
ขนาด*อัตราส่วน	6	1851.22	308.54	13.69	0.000
Error	72	1622.67	22.54	-	-
Total	83	5576.10	-	-	-

4.5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบยั่งมอดูลัส

การวิเคราะห์ผลของข้อมูลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นแสดงดังตารางที่ 4.3 จากตารางพบว่าความแปรปรวนของการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นของแผ่นวัสดุผสม อีพอกซีเรซินเติมผงบดเปลือกไข่ไก่ได้ค่า P เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่า $P \leq 0.05$ ตามสมมติฐาน จะสามารถสรุปได้ว่าขนาดและอัตราส่วนของผงเปลือกไข่ มีผลต่อการทดสอบสภาพความยืดหยุ่น ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นผงเปลือกไข่เติมในอีพอกซีเรซิน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean Squares	F ₀	P-Value
ขนาด	3	35,192,158	11,730,719	48.06	0.000
อัตราส่วน	2	51,501,234	25,750,617	105.51	0.000
ขนาด*อัตราส่วน	6	10,643,432	1,773,904	7.27	0.000
Error	72	17,572,583	244064		
Total	83	114909399			

4.5.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบแรงกระแทก

การวิเคราะห์ผลของข้อมูลการทดสอบแรงกระแทกแสดงดังตารางที่ 4.4 จากตารางพบว่าความแปรปรวนของการทดสอบแรงกระแทกของแผ่นวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซิน เติมผงเปลือกไข่ไก่ได้ค่า $P_{\text{ขนาด}}$ เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่า $P \leq 0.05$ ตามสมมติฐาน แต่ค่า $P_{\text{อัตราส่วน}}$ เท่ากับ 0.017 ซึ่งมีค่า $P \leq 0.05$ จะสามารถสรุปได้ว่าขนาดและอัตราส่วนของผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพ็อกซีเรซินมีผลต่อการทดสอบแรงกระแทกที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่เติมในอีพ็อกซีเรซิน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean Squares	F_0	P-Value
ขนาด	3	114.825	38.275	29.36	0.000
อัตราส่วน	2	11.259	5.629	4.32	0.017
ขนาด*อัตราส่วน	6	3.478	0.580	0.44	0.085
Error	72	93.855	1.304	-	-
Total	83	223.418	-	-	-

4.5.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบความแข็ง

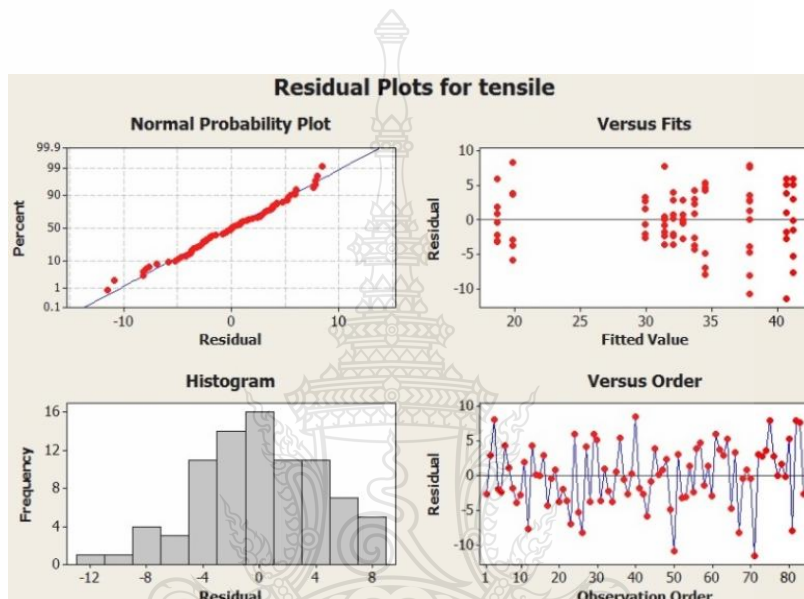
การวิเคราะห์ผลของข้อมูลการทดสอบแรงกระแทกแสดงดังตารางที่ 4.5 จากตารางพบว่าความแปรปรวนของการทดสอบความแข็งของแผ่นวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซินเติมผงเปลือกไข่ไก่ได้ค่า P เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่า $P \leq 0.05$ ตามสมมติฐาน จะสามารถสรุปได้ว่าขนาด และอัตราส่วนของผงเปลือกไข่ มีผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงกลของการทดสอบความแข็งที่ความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความแข็งผงเปลือกไข่เติมในอีพ็อกซีเรซิน

Source of Variation	Degree of freedom	Sum of squares	Mean Squares	F_0	P-Value
ขนาด	3	4333.29	1444.43	223.30	0.000
อัตราส่วน	2	2225.42	1112.71	172.02	0.000
ขนาด*อัตราส่วน	6	727.06	121.18	18.73	0.000
Error	72	465.73	6.47		
Total	83	7751.50			

4.5.5 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึง

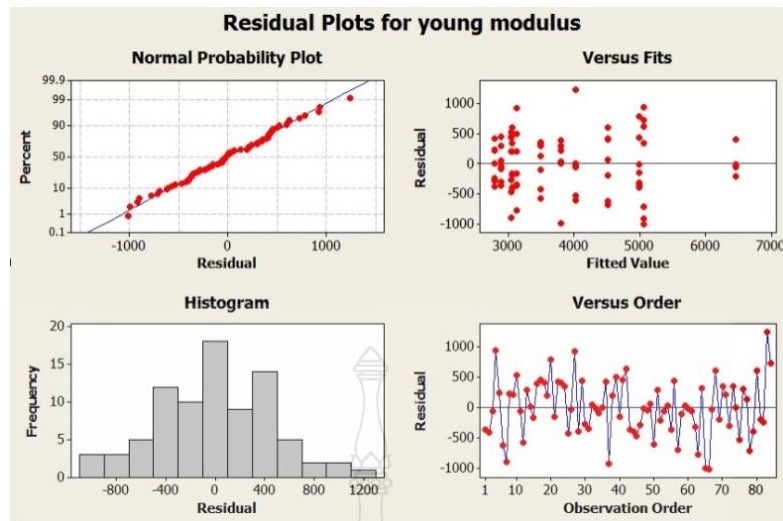
จากลักษณะของกราฟที่แสดงดังภาพที่ 4.21 จะพบว่ากราฟซ้ายบนและซ้ายล่าง คือ กราฟแสดงค่าการแจกแจงของสถิติในที่นี่เป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal) จากกราฟซ้ายบนหาก จุด สีแดงใกล้เส้นสีน้ำเงินมากเท่าไรแสดงว่าผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อย และกราฟขวามบน คือกราฟแสดงค่าความแปรปรวนหากจุดสีแดงกระจายตัวได้ดังกราฟ แสดงว่ากราฟนี้มีค่า ความแปรปรวนค่อนข้างเท่ากัน



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึง

4.5.6 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่ายังโมดูลัส

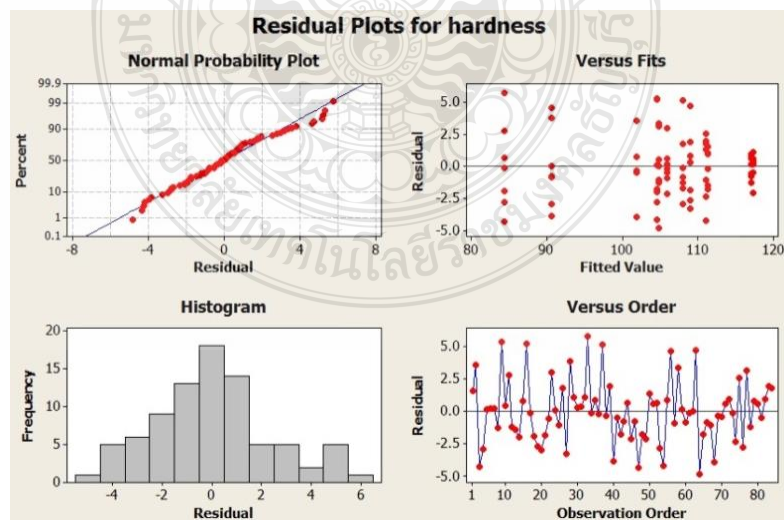
จากลักษณะของกราฟที่แสดงดังภาพที่ 4.22 จะพบว่ากราฟซ้ายบนและซ้ายล่างคือ กราฟแสดงค่าการแจกแจงของสถิติในที่นี่เป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal) จากกราฟซ้ายบนหาก จุด สีแดงใกล้เส้นสีน้ำเงินมากเท่าไรแสดงว่าผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อย และกราฟขวามบน คือกราฟแสดงค่าความแปรปรวนหากจุดสีแดงกระจายตัวได้ดังกราฟ แสดงว่ากราฟนี้มีค่าความแปรปรวนค่อนข้างเท่ากัน



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่ายัง โมดูลัส

4.5.7 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็ง

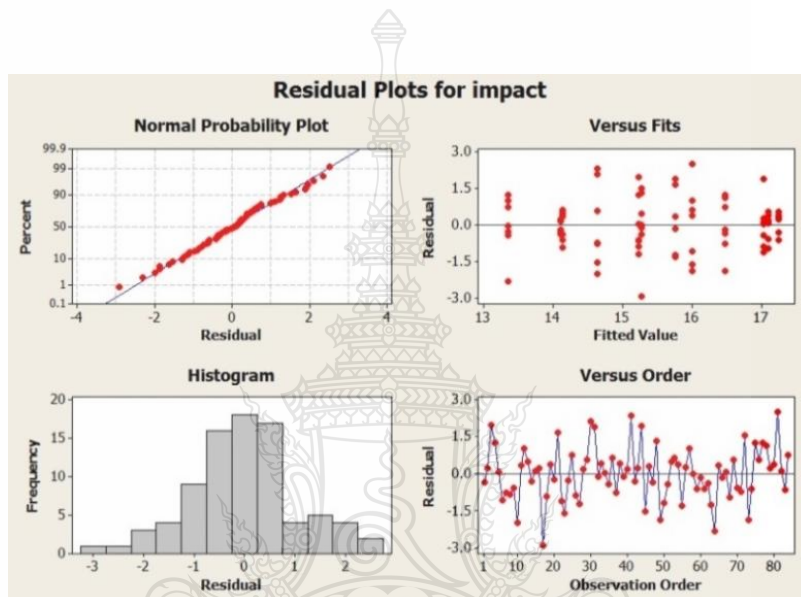
จากลักษณะของกราฟที่แสดงดังภาพที่ 4.22 จะพบว่า ที่กราฟซ้ายบนและซ้ายล่างคือ กราฟแสดงค่าการแจกแจงของสถิติในทีนี่เป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal) จากกราฟซ้ายบนหาก จุด สีแดงใกล้เส้นสีน้ำเงินมากเท่าไรแสดงว่าผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อย และกราฟขวามบน คือกราฟแสดงค่าความแปรปรวนหากจุดสีแดงกระจายตัวได้ดังกราฟ แสดงว่ากราฟนี้มีค่า ความแปรปรวนค่อนข้างเท่ากัน



ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็ง

4.5.8 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงดึง

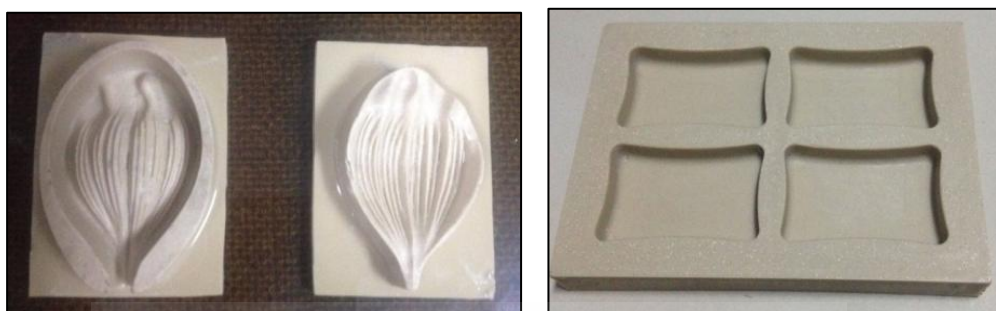
จากลักษณะของกราฟที่แสดงดังภาพที่ 4.23 จะพบว่า กราฟซ้ายบนและซ้ายล่างคือ กราฟแสดงค่าการแจกแจงของสถิติในที่นี่เป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal) จากกราฟซ้ายบนหาก จุด สีแดงใกล้เคียงเส้นสีน้ำเงินมากเท่าไรจะแสดงว่าผลการทดลองมีความผิดพลาดน้อยและกราฟขวามือ คือกราฟแสดงค่าความแปรปรวนหากจุดสีแดงกระจายตัวได้ดังกราฟ แสดงว่ากราฟนี้มีค่า ความแปรปรวนค่อนข้างเท่ากัน



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก

4.6 ผลสำเร็จของการขึ้นรูปแม่พิมพ์

ภายหลังจากการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการและทำการปรับสภาพผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent แล้ว คณะผู้จัดทำได้ทำการหล่อขึ้นรูปโดยเลือกสูตรที่มีผลการทดสอบที่ดี มาทำการขึ้นรูปโดยเลือกสูตรที่ใช้ผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการปรับสภาพของ ผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent ได้ผลสำเร็จ ดังในภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ผลสำเร็จของการขึ้นรูปแม่พิมพ์

ผลจากการใช้งานแม่พิมพ์เปลือกไข่ที่ได้จากการทดสอบอัดก๊อปปี้ดอกไม้ประดิษฐ์ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์เสริมรายได้ย้อนกลับให้ชุมชน ได้ใช้ประโยชน์ อย่างคุ้มค่า ดังในภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 ผลงานอัดก๊อปปี้ดอกไม้ประดิษฐ์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์การศึกษาการใช้ผงบดเปลือกไข่ผสมในอีพอกซีเรซิน ได้ดำเนินการตามแผนที่กำหนดสำเร็จลุล่วง การดำเนินงานครั้งนี้ได้เกิดปัญหาหลายประการและได้ทำการปรับปรุงแก้ไขจนสำเร็จในที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาอุปสรรคจากการดำเนินงานวิทยานิพนธ์นี้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 สรุป

5.1.1 ผลการเตรียมผงบดจากเปลือกไข่

การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน ได้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ จากการขึ้นรูปชิ้นงานจากเปลือกไข่ไก่ ที่ได้ผ่านกระบวนการแยกเชื้อด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 30 นาที สามารถแยกเชื้อเปลือกไข่ออกได้ และในเปลือกไข่ที่ได้นั้น ยังมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูง พอที่จะนำไปสู่ขั้นตอนการบดและคัดแยกขนาดผงอนุภาคตามขนาดเมช ที่ต้องการขึ้นรูปชิ้นงานได้

5.1.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการของเปลือกไข่

จากการทดลองพบว่าวัสดุ จะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งสูงสุดเมื่ออัตราส่วนผสมผงเปลือกไข่ 15 % ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดคือผสมผงเปลือกไข่ที่ 50 % ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะปริมาณอีพอกซีเรซินที่มากกว่าในตัวแปรนั้น ๆ ทำให้เนื้อของวัสดุสามารถยึดเหนี่ยวระหว่างกันได้ดี ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงดึง วัสดุจะสามารถกระจายแรงไปยังส่วนต่าง ๆ ของเนื้อวัสดุได้ดีกว่านั่นเอง นอกจากนี้ขนาดของผงเปลือกไข่ที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการตกตะกอนในชิ้นงาน ส่วนผงเปลือกไข่ที่มีขนาดเล็กเกินไปจะลอยขึ้นด้านบนผิวงาน ส่งผลให้ค่าสมบัติของวัสดุนั้นต่ำลง จากงานวิจัยนี้พบว่าเปลือกไข่ที่ขนาด ที่ 200 เมช หรือประมาณ 0.074 มิลลิเมตร เป็นขนาดผงเปลือกไข่ที่เหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูป ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ และคณะ ได้ทำการศึกษาถึงการนำ พลาสติก HDPE มาผสมกับผงเปลือกไข่ทำให้มอดูลัสของยังก์ ความต้านทานแรงดึง ณ จุดขาดความแข็ง และ HDT เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ การยึดตัว ณ จุดขาด ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก และ ความต้านทานแรงกระแทก ลดลงตามปริมาณผงเปลือกไข่ที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 การปรับปรุงสมบัติทางกล

สมบัติทางกลของผงเปลือกไข่ไก่ที่ผสมในอีพอกซีเรซินนั้น ก่อนการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุพบว่า ผงเปลือกไข่นำมาผสมในอีพอกซีเรซินยังไม่สามารถยึดเกาะกันได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุ ยังคงอ่อนขี้างต่ำ แต่เมื่อผงเปลือกไข่ ถูกปรับสภาพพื้นผิวด้วย Coupling Agent ทำให้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุดีขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะผงเปลือกไข่ที่เป็นสารตัวเติม นั้น ได้เปลี่ยนสภาพพื้นผิวมาทำหน้าที่เป็น Reinforcement อย่างเต็มที่ ทำให้สารตัวเนื้อ หรือ Matrix จับตัวกันได้ดีช่วยลดช่องว่างในเนื้อวัสดุให้ดีขึ้น โดยจะเห็นได้ว่า Silane KH560 และ KH550 จะมีผลทำให้ค่าสมบัติทางกลดีขึ้นตามลำดับ ส่วน Stearic นั้น โดยรวมไม่สามารถทำให้สมบัติทางกลดีขึ้นมากนัก

5.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยสองปัจจัยคือ ในเรื่องของขนาดและอัตราส่วนของผงเปลือกไข่ ผลจากการวิเคราะห์การทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งได้ค่า P เท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่า $P \leq 0.05$ ตามสมมติฐาน จะสามารถสรุปได้ว่าปริมาณสัดส่วนผสมของผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซินมีผลต่อการทดสอบแรงดึงและความแข็งที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบแรงกระแทกได้ค่า $P_{\text{ขนาด}}$ เท่ากับ 0.000 ค่า $P_{\text{อัตราส่วน}}$ เท่ากับ 0.017 จะสามารถสรุปได้ว่าขนาดของผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซินมีผลต่อการทดสอบแรงแตก แต่อัตราส่วนของผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซินไม่มีผลต่อการทดสอบแรงกระแทก ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 การหล่อแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน

เมื่อทำการหล่อบล็อกแม่พิมพ์จากผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซินแล้ว นำสารอีพอกซี A อีพอกซี B และผงเปลือกไข่นำมาชั่งตวงตามอัตราส่วนแล้วทำการขึ้นรูปแม่พิมพ์และทิ้งให้แม่พิมพ์อีพอกซีเรซินผสมเปลือกไข่ โดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง จึงถอดออกจากแบบมาสเตอร์โมเดลจะได้แม่พิมพ์จากผงเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซินที่มีน้ำหนักเบาว่าแม่พิมพ์จากเหล็ก ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

5.2.1 ปัญหาด้านการออกแบบแม่พิมพ์ ที่ไม่ได้คำนึงถึงในเรื่องการปลดชิ้นงานมากนัก ทำให้การปลดชิ้นงานไม่สะดวกเท่าที่ควร

5.2.2 ปัญหาในขั้นตอนการเตรียมเปลือกไข่ เนื่องจากการรวบเปลือกไข่ที่ได้มาจากหลายที่ นั้น บางที่ถูกทิ้งปะปนมากับขยะซึ่งทำให้เสียเวลาในการคัดแยก

5.2.3 ปัญหาฟองอากาศในขณะการหล่อแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานออกมาไม่สมบูรณ์

5.2.4 ปัญหาในขั้นตอนการเตรียมผงเปลือกไข่ เนื่องจากเครื่องบด Ball Mill ที่ใช้บดผงเปลือกไข่นั้น ไม่สามารถบดเปลือกไข่ได้ที่ครั้งละมากๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์การใช้ผงเปลือกไข่เป็นวัสดุเสริมแรงในอีพอกซีเรซินสำหรับขึ้นรูป ได้ค่าในการทดสอบที่ออกมาค่อนข้างแตกต่างกันจึงมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้เพื่อเป็นการปรับปรุงให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5.3.1 สามารถใช้ยางซิลิโคนมาช่วยในการสร้างแบบหล่อเพื่อให้การปลดชิ้นงานได้ง่ายกว่าการทำแบบหล่อด้วยโลหะ

5.3.2 หาวิธีควบคุมฟองอากาศ เนื่องจากฟองอากาศมีผลทำให้คุณสมบัติของแม่พิมพ์เปลี่ยนแปลง

5.3.2 ต้องควบคุมการตกตะกอนให้ได้หากจะใช้ผงเมซที่มีขนาดใหญ่ เพราะการตกตะกอนมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของวัสดุ

บรรณานุกรม

- คณุนารถ พิภูล, วรณวิบูลย์ กาญจนกฤษร และสายพิณ ทานัฒมาสัย. (2557). การพัฒนาโปรตีนไฮโดรไลเสตจากเยื่อเปลือกไข่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).
- ถิรเจต โตรอด. (2552). การแยกเยื่อเปลือกไข่ด้วยเทคนิคการแต่งแร่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- ธีรพงษ์ จันทร์โชค, คุณากร หอมศิริ, เสรี ช่างมณี. (2552). การหล่ออินเลอร์แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยอีพอกซีเรซินผสมผงอะลูมิเนียมโดยใช้ไม้เทียมเป็นต้นแบบ. (วิทยานิพนธ์ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114, อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย)
- สุทธิศล แสงดาว, วิทยา กาญจนเจริญนนท์. (2558). การศึกษาการใช้ผงแก้วจากขวดแก้วรีไซเคิลเสริมแรงในอีพอกซีเรซินสำหรับสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อน. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- วันเฉลิม สัตตระ, สุรศักดิ์ บุญลาภ, ทิพากร กรมไชยกิจ. (2553). การออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยใช้แม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเติมผงอะลูมิเนียม. (ปริญญาานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- นิลบล เพื่อกบัวขาว, (2550). สมบัติเชิงกลและสถานะวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง. (วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ).
- [M. S. Sreekala, et al. *Composite Science and Technology*. 61 (2001). 1175-1188.
- สารพอลิเมอร์และการใช้ประโยชน์. สืบค้นจาก [http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM103\(50\)/CM103-13\(50\).pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM103(50)/CM103-13(50).pdf).
- บริษัท เรืองรัตน์ อินเตอร์ พลาสติก จำกัด. เทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting). สืบค้นจาก <http://www.ruengrat.com/>
- วิชัย คำรงโกภักดิ์. (2555). เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์.” วิทยาศาสตร์ประยุกต์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุวรรณ. (2559). **โครงสร้างเปลือกไข่**, สืบค้นจาก <http://elearning.nsr.u.ac.th>.

อีพอกซีเรซิน Epoxy resins (2016). สืบค้นจาก http://www.kru-aor.com/Chem_Tips/epoxy.html/

สมบัติทางกลของวัสดุผสม (2016). สืบค้นจาก <http://www.sci.buu.ac.th/>

ทรงพล วิเศษฐ์วัฒนา(2556). **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สืบค้นจาก

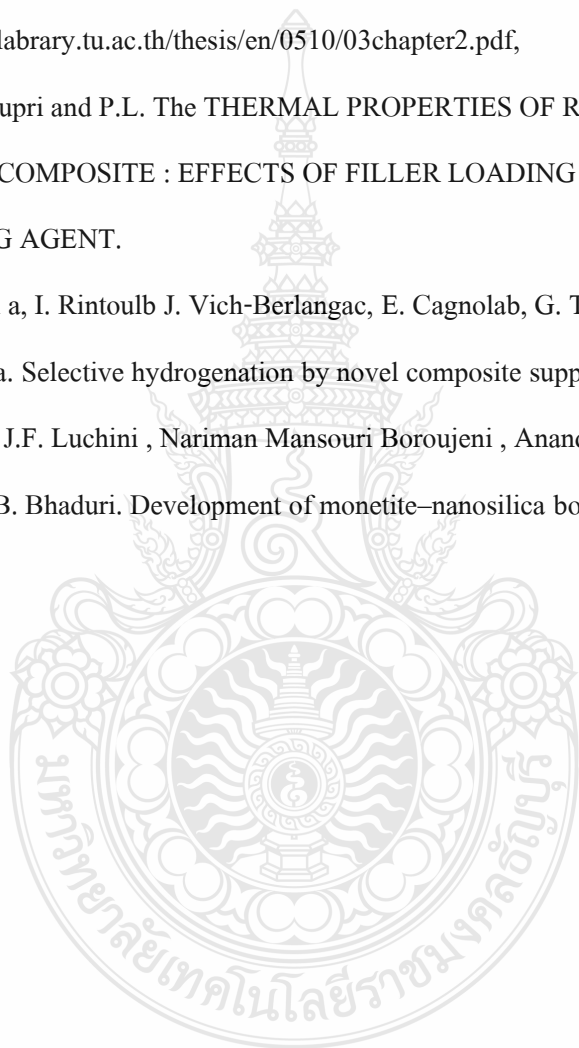
<http://digi.labratory.tu.ac.th/thesis/en/0510/03chapter2.pdf>,

R.N. Farahana,A.G. Supri and P.L. The THERMAL PROPERTIES OF RHDPE/EVA/ EGGSHELL
POWDER COMPOSITE : EFFECTS OF FILLER LOADING AND PVC-MA
COUPLING AGENT.

J.M. Badanoa,C. Betti a, I. Rintoulb J. Vich-Berlangac, E. Cagnolab, G. Torresb, C. Veraa,J. Yoria,
M. Quiroga. Selective hydrogenation by novel composite supported Pdegg-shell catalysts

Huan Zhou , Timothy J.F. Luchini , Nariman Mansouri Boroujeni , Anand K. Agarwal ,Vijay K.

Goel , Sarit B. Bhaduri. Development of monetite–nanosilica bone cement: A preliminary
study





ภาคผนวก ก

แสดงตารางผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก1 ตารางแผนผังออกแบบการทดสอบสมบัติเชิงกล

แผนผังออกแบบการทดลอง				
อัตราส่วนอิพ็อกซีต่อผง เปลือกไข่	ขนาดของผงเปลือกไข่ (Mesh)			
	75	100	200	325
100% : 0%	A1 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
	A2 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
	A3 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
	A4 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
	A5 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
	A6 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
	A7 (ไม่ผสมเปลือกไข่)	-	-	-
85% : 15%	B1	F1	J1	N1
	B2	F2	J2	N2
	B3	F3	J3	N3
	B4	F4	J4	N4
	B5	F5	J5	N5
	B6	F6	J6	N6
	B7	F7	J7	N7
65% : 35%	C1	G1	K1	O1
	C2	G2	K2	O2
	C3	G3	K3	O3
	C4	G4	K4	O4
	C5	G5	K5	O5
	C6	G6	K6	O6
	C7	G7	K7	O7
50% : 50%	D1	H1	L1	P1
	D2	H2	L2	P2
	D3	H3	L3	P3
	D4	H4	L4	P4
	D5	H5	L5	P5
	D6	H6	L6	P6
	D7	H7	L7	P7

ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Strength)

ตารางที่ ก2 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	59.2	59.6	66.3	60.0	64.8	58.4	59.6
15	46.4	44.3	47.2	41.1	39.8	35.9	33.6
35	16.1	14.0	28.3	23.6	16.1	17.0	23.7
50	19.6	15.5	15.7	16.5	24.7	18.33	20.67

ตารางที่ ก3 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	59.2	59.6	66.3	60.0	64.8	58.4	59.6
15	31.1	38.0	36.8	34.6	29.5	36.1	30.0
35	29.7	32.9	30.0	28.4	35.0	32.3	36.2
50	31.6	29.3	33.3	27.4	32.7	28.0	27.3

ตารางที่ ก4 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	59.2	59.6	66.3	60.0	64.8	58.4	59.6
15	41.8	37.9	46.7	38.9	44.6	45.9	29.1
35	41.5	27.0	45.8	29.7	45.6	29.7	45.9
50	27.6	29.6	38.7	39.3	26.6	39.8	40.0

ตารางที่ ก5 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	59.2	59.6	66.3	60.0	64.8	58.4	59.6
15	27.9	29.6	31.5	29.1	30.6	39.3	32.0
35	25.9	26.7	26.4	25.4	25.7	24.6	25.1
50	22.6	21.3	23.2	23.9	21.8	23.0	22.3

ตารางที่ ก6 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ที่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	31.3	57.7	73.7	52.3	59.1	78.4	51.6
15	31.9	35.8	44.4	16.3	59.5	32.4	35.9
35	28.9	16.4	23.9	35.1	7.7	29.9	35.1
50	13.0	23.5	23.5	18.6	23.5	7.3	23.5

ตารางที่ ก7 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย สเตียริก เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	47.0	57.2	48.6	62.9	51.4	48.4	48.6
50	29.6	29.6	23.9	33.5	45.7	29.8	29.6

ตารางที่ ก8 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH550 เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	56.91	62.10	53.98	71.91	53.61	55.38	60.91
50	45.90	51.57	50.54	45.79	40.36	52.59	46.41

ตารางที่ ก9 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH560 เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	75.50	72.10	64.24	53.70	55.03	72.02	48.23
50	42.25	42.95	60.49	53.97	54.12	55.73	54.89

ตารางที่ ก10 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	2554.6	2703.1	3414.9	3225.4	2128.5	2606.2	2503.1
15	3818.8	3799.9	3860.3	3636.5	3400.0	3081.8	2931.3
35	5781.8	4630.4	4839.8	4678.0	4600.4	4979.8	5435.7
50	6450.7	6250.5	6411.6	6450.7	6411.6	6873.4	6411.6

ตารางที่ ก11 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	2554.6	2703.1	3414.9	3225.4	2128.5	2606.2	2503.1
15	2526.7	3186.6	2590.4	2943.7	3341.6	2844.9	2803.7
35	2771.7	3331.9	2971.7	2786.3	2354.8	3632.4	4056.4
50	4345.3	4143.1	4045.3	5788.9	5403.6	5999.2	5688.9

ตารางที่ ก12 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	2554.6	2703.1	3414.9	3225.4	2128.5	2606.2	2503.1
15	2160.1	3581.4	3501.3	3514.4	2591.3	2780.3	3270.5
35	4034.7	3420.7	3496.4	3998.1	5270.8	3998.1	3971.6
50	4937.1	4590.4	3901.8	3831.8	4332.0	5126.1	4943.4

ตารางที่ ก13 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นของเปลือกไข่ขนาด 325 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	2554.6	2703.1	3414.9	3225.4	2128.5	2606.2	2503.1
15	3221.1	3025.7	2514.2	3040.0	2410.4	2562.0	2797.9
35	2904.7	2668.8	3415.6	3673.6	2658.7	2870.5	3265.1
50	4113.9	3841.5	2818.9	4029.4	3822.7	3841.5	4204.0

ตารางที่ ก14 ผลการทดสอบสภาพความยืดหยุ่นของเปลือกไข่ขนาด 200 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน
Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	2525.1	2418.7	2753.0	2487.5	2287.8	2924.5	2566.5
15	2821.5	2997.3	3165.2	3040.8	3416.4	2800.6	2939.2
35	4776.8	4238.5	4190.9	4516.5	4467.6	3874.8	4516.5
50	7614.3	6629.4	6629.4	5980.0	6629.4	7342.2	6629.4

ตารางที่ ก15 ผลการทดสอบแรงดึงของเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย สเตียริก เป็น
Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	1889.0	2263.4	2487.9	2929.2	1697.2	2440.9	2487.9
50	3167.6	3183.7	3714.6	2847.5	3047.5	3121.3	3167.6

ตารางที่ ก16 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH550 เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	2961.60	3259.02	3322.60	3497.98	2866.61	3622.58	2480.30
50	5287.82	4497.98	5203.91	5223.51	5651.32	4306.66	3775.29

ตารางที่ ก17 ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH560 เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Young's Modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	3514.68	2981.68	3344.23	4197.64	3213.44	3226.51	3312.48
50	7037.51	10297.03	4146.94	4362.47	4260.48	5028.09	4604.55

การทดสอบแรงกระแทก (Impact Strength)

ตารางที่ ก18 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	13.7	17.5	16.8	16.0	15.3	16.9	17.1
15	11.0	12.9	13.0	14.6	13.3	14.1	14.4
35	13.9	14.3	14.3	13.7	14.3	14.0	14.4
50	13.8	14.6	14.8	14.5	13.5	13.2	14.5

ตารางที่ ก19 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	13.7	17.5	16.8	16.0	15.3	16.9	17.1
15	14.9	15.8	16.8	15.2	12.4	16.6	15.3
35	14.5	16.1	17.4	17.7	14.5	15.6	14.5
50	17.6	15.7	16.3	17.2	14.6	17.7	16.2

ตารางที่ ก20 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	13.7	17.5	16.8	16.0	15.3	16.9	17.1
15	13.9	12.7	15.2	17.0	13.1	16.7	13.9
35	14.6	14.0	16.5	15.3	14.6	14.4	17.2
50	14.4	14.1	14.9	17.0	18.5	16.4	16.7

ตารางที่ ก21 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	13.7	17.5	16.8	16.0	15.3	16.9	17.1
15	15.9	16.2	17.3	17.1	18.9	17.1	16.6
35	17.2	17.3	16.5	16.1	17.3	17.6	17.5
50	17.8	17.6	17.6	16.7	17.5	17.0	16.6

ตารางที่ ก22 ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน
Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	37.2	34.7	36.4	35.9	35.3	34.6	34.9
15	19.4	18.6	16.9	18.2	19.4	18.1	20.3
35	18.7	19.3	19.5	18.3	17.7	19.5	18.4
50	17.5	16.3	17.6	14.1	16.2	14.1	17.5

ตารางที่ ก23 ผลการทดสอบแรงดิ่งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย สเตียริก เป็น
Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	13.672	16.443	15.393	13.672	18.038	12.124	15.393
50	14.1	10.5	11.7	10.9	13.2	14.3	13.1

ตารางที่ ก24 ผลการทดสอบแรงดิ่งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH550
เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	17.452	17.243	15.685	13.547	15.142	18.034	14.354
50	11.891	14.601	15.616	13.653	16.535	14.759	17.484

ตารางที่ ก25 ผลการทดสอบแรงดิ่งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH560
เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Impact Strength (J/m)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	14.870	15.106	17.061	14.393	13.297	14.327	13.111
50	15.714	13.659	15.288	13.458	15.635	15.237	19.271

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ตารางที่ ก26 ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	122.1	123.6	122.5	121.6	122.2	121.8	122.3
15	100.0	105.4	104.9	108.0	108.2	103.8	103.6
35	87.6	89.8	86.7	90.6	94.4	89.7	95.2
50	80.1	85.1	81.6	90.2	84.3	82.5	87.2

ตารางที่ ก27 ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	122.1	123.6	122.5	121.6	122.2	121.8	122.3
15	112.9	109.9	112.3	112.4	111.2	109.6	111.2
35	97.8	96.3	95.1	96.3	94.7	97.9	96.7
50	94.8	93.2	94.2	93.8	94.9	93.1	95.3

ตารางที่ ก28 ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	122.1	123.6	122.5	121.6	122.2	121.8	122.3
15	117.6	117.8	118.5	116.9	115.3	117.7	118
35	108.8	112.5	113.7	110.1	113.1	112.9	106.9
50	111.9	113.8	113.1	114	113.4	112.5	110.7

ตารางที่ ก29 ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	122.1	123.6	122.5	121.6	122.2	121.8	122.3
15	116.5	115.8	116.3	117.2	117.7	118.0	117.9
35	102.7	102.7	101.5	98.0	105.5	101.6	101.6
50	101.8	100.4	102.8	109.9	109.8	102.6	104.7

ตารางที่ ก30 ผลการทดสอบความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน

Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	112.9	110.0	107.0	109.4	114.7	116.0	116.5
15	100.9	115.1	98.3	117.1	112.0	110.7	116.1
35	87.4	95.9	103.8	100.8	100.6	99.6	105.2
50	83.8	99.6	97.8	97.1	97.4	94.6	105.4

ตารางที่ ก31 ผลการทดสอบแรงค้ำผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชที่มีการปรับปรุงผิวด้วย สเตียริกเป็น

Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

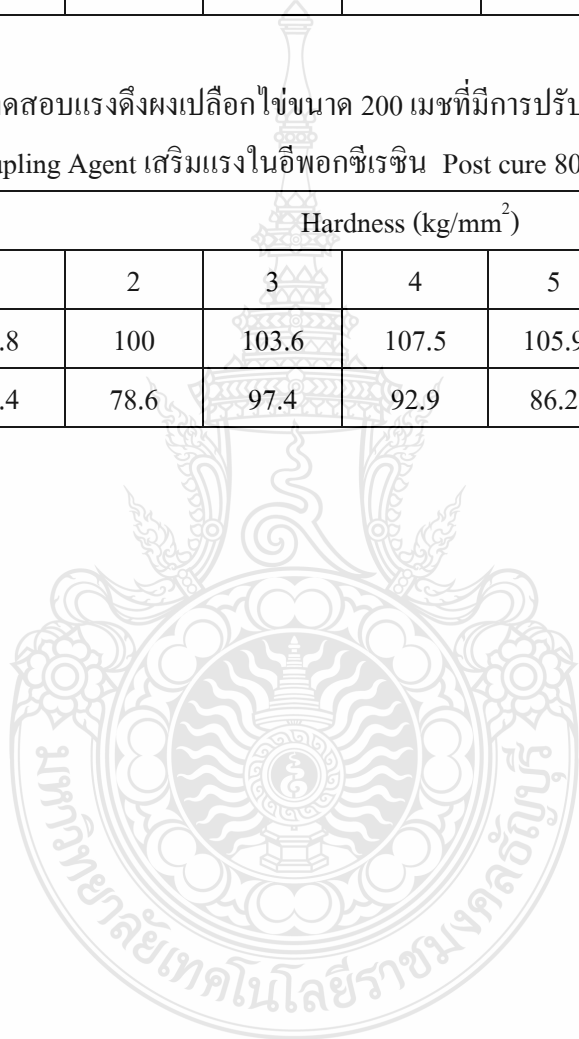
% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	109.1	112.7	113.6	114.3	112.3	112.2	113.9
50	100.6	97.6	95.4	101	106.6	98.3	97.4

ตารางที่ ก32 ผลการทดสอบแรงดิ่งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH550 เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	98.9	103.7	110.7	115.1	112.9	116.3	108
50	64	65.2	64.7	85.5	89.6	57.7	80.7

ตารางที่ ก33 ผลการทดสอบแรงดิ่งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Silane KH560 เป็น Coupling Agent เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

% Eggshell	Hardness (kg/mm ²)						
	1	2	3	4	5	6	7
15	95.8	100	103.6	107.5	105.9	99.9	113.2
50	81.4	78.6	97.4	92.9	86.2	84.9	91.9



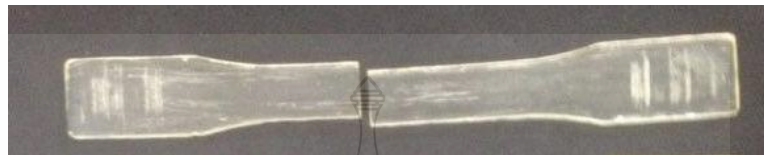
ภาคผนวก ข

ภาพแสดงขั้นตอนสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล



ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Strength)

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข1 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมผงเปลือกไข่

ผลการทดสอบแรงดึงของผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข2 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช

ผลการทดสอบแรงดึงของผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข3 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช

ผลการทดสอบแรงดึงของผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข4 การทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช

ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข5 ชั้นการทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช

ผลการทดสอบแรงดึงของผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซินที่ผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ ข6 การทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมชผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ผลการทดสอบแรงดึงผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยกรดสเตียริก เสริมแรงในอีพอกซีเรซินและผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

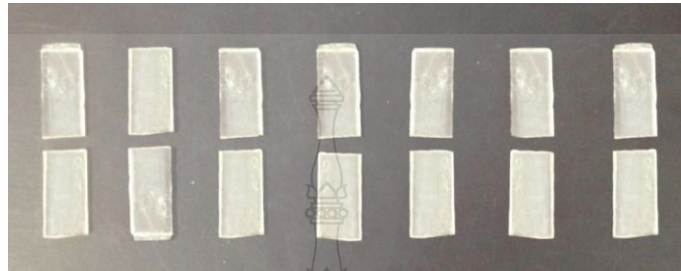


ภาพที่ ข7 การทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิว

ด้วยกรดสเตียริกผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การทดสอบแรงกระแทก (Impact Strength)

ผลการทดสอบแรงกระแทกของอีพอกซีเรซิน



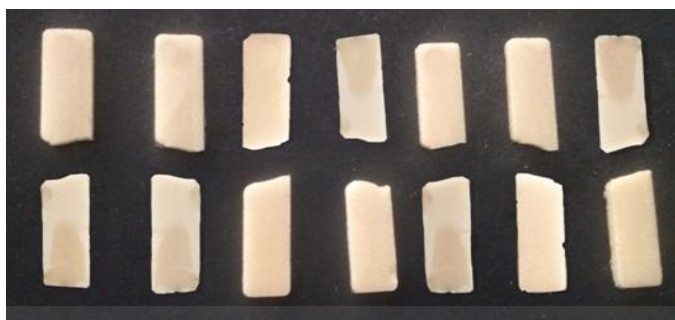
ภาพที่ ข8 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมผงเปลือกไข่

ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข9 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช

ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข10 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช

ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



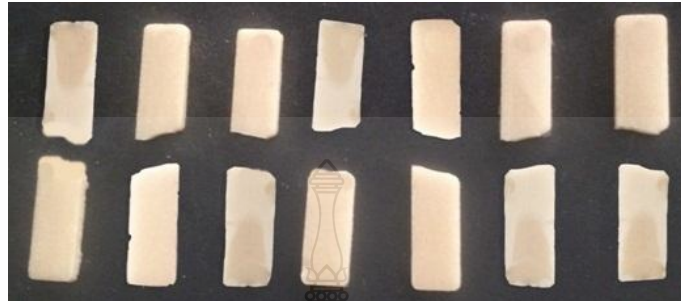
ภาพที่ ข11 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช

ผลการทดสอบแรงกระแทกผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



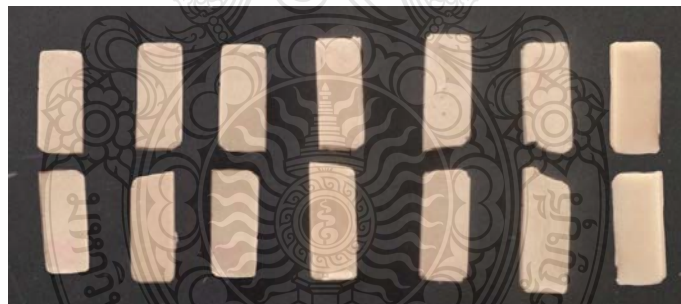
ภาพที่ ข12 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 325 เมช

ผลการทดสอบแรงกระแทกของแผ่นฟงเปลือกไขขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน Post - cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ ข13 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมฟงเปลือกไขขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

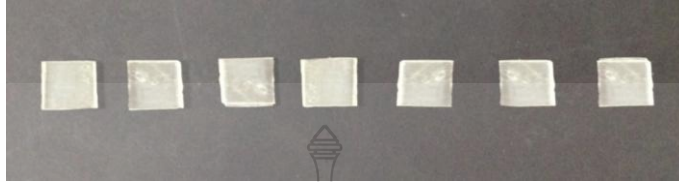
ผลการทดสอบแรงกระแทกของแผ่นฟงเปลือกไขขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยกรดสเดียริกเสริมแรงในอีพอกซีเรซินและผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ ข14 การทดสอบแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมฟงเปลือกไขขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยกรดสเดียริกผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ผลการทดสอบความแข็งของอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข15 การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบที่ไม่ผสมเปลือกไข่

ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข16 การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 75 เมช

ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข17 การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 100 เมช

ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



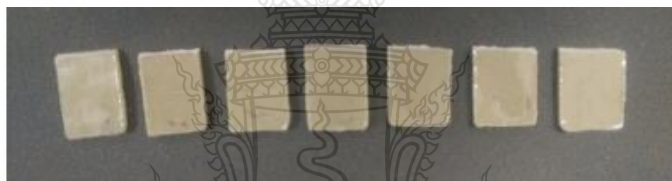
ภาพที่ ข18 การทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช

ผลการทดสอบแรงความแข็งผงเปลือกไข่นกนางแอตขนาด 325 เมช เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน



ภาพที่ ข19 การทดสอบความแข็งของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่นกนางแอตขนาด 325 เมช

ผลการทดสอบความแข็งผงเปลือกไข่นกนางแอตขนาด 200 เมชเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน ที่ผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง



ภาพที่ ข20 การทดสอบความแข็งของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่นกนางแอตขนาด 200 เมชที่ผ่านการ Post-cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ผลการทดสอบความแข็งผงเปลือกไข่นกนางแอตขนาด 200 เมชที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก เสริมแรงในอีพอกซีเรซินและผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพที่ ข21 การทดสอบความแข็งของชั้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่นกนางแอตขนาด 200 เมช ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกและผ่านการ Post cure 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ภาคผนวก ค

แสดงการคำนวณอัตราส่วนผสมในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ



ค1. การคำนวณอัตราส่วนผสมในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของแม่พิมพ์ (Tensile)

- คำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุ Composite

$$\rho(\text{Egg Shells}) = 1 \quad \text{g/cm}^3$$

$$\rho(\text{Epoxy}) = 1.08 \quad \text{g/cm}^3$$

สูตรคำนวณความหนาแน่นเฉลี่ย

$$\rho \text{ เฉลี่ย} = f_i \rho_i$$

$$f(\text{Egg Shells}) = \frac{50/1}{(50/1)+(50/1.08)} \times 1$$

$$= 0.753$$

$$f(\text{Epoxy}) = \frac{50/1.08}{(50/1)+(50/1.08)} \times 1.08$$

$$= 0.247$$

$$\rho \text{ เฉลี่ย} = 0.753 + 0.247$$

$$= 1.042 \text{ g/cm}^3$$

คำนวณปริมาตรหล่อของแม่พิมพ์ (Tensile)

$$\text{ปริมาตรของแม่พิมพ์} = 1.9 \times 17 \times 0.33 = 10.611 \text{ cm}^3$$

- คำนวณอัตราส่วนระหว่างอีพอกซีเรซิน : ผงเปลือกไข่

$$\text{ชุดที่ 1 Epoxy : Eggshells} = 85 : 15$$

$$\text{Eggshells -powder 15\% ของปริมาตร} = 15\% \times 74.613 = 11.19 \text{ cm}^3$$

$$\text{น้ำหนัก} = 11.19 \times 1.042 = 11.65 \text{ g}$$

$$\text{เพื่อ +5\%} = (0.05 \times 11.65) + 11.65$$

$$= 12.23 \text{ g}$$

$$\text{Epoxy A : Epoxy B} = 78 : 22$$

$$\text{Epoxy 85\% ของปริมาตร} = 85\% \times 74.613 = 63.42 \text{ cm}^3$$

$$\text{Epoxy A ปริมาตร} = 78\% \times 63.42 = 49.46 \text{ cm}^3$$

$$\text{น้ำหนัก} = 49.46 \times 1.042 = 51.53 \text{ g}$$

$$\text{เพื่อ +5\%} = (0.05 \times 51.53) + 51.53$$

$$= 54.10 \text{ g}$$

$$\text{Epoxy B ปริมาตร} = 22\% \times 63.42 = 13.95 \text{ cm}^3$$

$$\text{น้ำหนัก} = 13.95 \times 1.042 = 14.53 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \text{เนื้อ +5\%} &= (0.05 \times 14.53) + 14.53 \\ &= 15.25 \text{ g} \\ \text{Eggshells -powder} &= 12.23 \text{ g} \\ \text{Epoxy A} &= 54.10 \text{ g} \\ \text{Epoxy B} &= 15.25 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชุดที่ 2 Epoxy : Eggshells} &= 65 : 35 \\ \text{Eggshells -powder 35\% ของปริมาตร} &= 35\% \times 74.613 = 26.11 \text{ cm}^3 \\ \text{น้ำหนัก} &= 26.11 \times 1.042 = 27.211 \text{ g} \\ \text{เนื้อ +5\%} &= (0.05 \times 27.211) + 27.211 \\ &= 28.57 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Epoxy A : Epoxy B} &= 78 : 22 \\ \text{Epoxy 65\% ของปริมาตร} &= 65\% \times 74.613 = 48.49 \text{ cm}^3 \\ \text{Epoxy A ปริมาตร} &= 78\% \times 48.49 = 37.82 \text{ cm}^3 \\ \text{น้ำหนัก} &= 37.82 \times 1.042 = 39.41 \text{ g} \\ \text{เนื้อ +5\%} &= (0.05 \times 39.41) + 39.41 \\ &= 41.38 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Epoxy B ปริมาตร} &= 22\% \times 48.49 = 10.66 \text{ cm}^3 \\ \text{น้ำหนัก} &= 10.66 \times 1.042 = 11.11 \text{ g} \\ \text{เนื้อ +5\%} &= (0.05 \times 11.11) + 11.11 \\ &= 11.65 \text{ g} \\ \text{Eggshells -powder} &= 28.57 \text{ g} \\ \text{Epoxy A} &= 41.38 \text{ g} \\ \text{Epoxy B} &= 11.65 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ชุดที่ 3 Epoxy : Eggshells} &= 50 : 50 \\ \text{Eggshells -powder 50\% ของปริมาตร} &= 50\% \times 74.613 = 37.30 \text{ cm}^3 \\ \text{น้ำหนัก} &= 37.30 \times 1.042 = 38.87 \text{ g} \\ \text{เนื้อ +5\%} &= (0.05 \times 38.87) + 38.87 \end{aligned}$$

$$= 40.81 \text{ g}$$

Epoxy A : Epoxy B 78 : 22

$$\text{Epoxy 50\% ของปริมาตร} = 50\% \times 74.613 = 37.30 \text{ cm}^3$$

$$\text{Epoxy A ปริมาตร} = 78\% \times 37.30 = 29.09 \text{ cm}^3$$

$$\text{น้ำหนัก} = 29.09 \times 1.042 = 30.31 \text{ g}$$

$$\text{เพิ่ม +5\%} = (0.05 \times 30.31) + 30.31$$

$$= 31.82 \text{ g}$$

$$\text{Epoxy B ปริมาตร} = 22\% \times 37.30 = 8.20 \text{ cm}^3$$

$$\text{น้ำหนัก} = 8.20 \times 1.042 = 8.54 \text{ g}$$

$$\text{เพิ่ม +5\%} = (0.05 \times 8.54) + 8.54$$

$$= 8.96$$

$$\text{Eggshells -powder} = 40.81 \text{ g}$$

$$\text{Epoxy A} = 31.82 \text{ g}$$

$$\text{Epoxy B} = 8.96 \text{ g}$$

ค2. การคำนวณอัตราส่วนผสมในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของแม่พิมพ์ (Impact)

- คำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุ Composite

$$\rho(\text{Egg Shells}) = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho(\text{Epoxy}) = 1.08 \text{ g/cm}^3$$

สูตรคำนวณความหนาแน่นเฉลี่ย

$$\rho \text{ เฉลี่ย} = f(\rho_i)$$

$$f(\text{Egg Shells}) = \frac{50/1}{(50/1)+(50/1.08)} \times 1$$

$$= 0.753$$

$$f(\text{Epoxy}) = \frac{50/1.08}{(50/1)+(50/1.08)} \times 1.08$$

$$= 0.753$$

$$\rho \text{ เฉลี่ย} = 0.521 + 0.521$$

$$= 1.042 \text{ g/cm}^3$$

คำนวณปริมาตรหล่อของแม่พิมพ์ (Impact)

$$\text{ปริมาตรของแม่พิมพ์} = 1.27 \times 6.35 \times 0.33 = 18.629 \text{ g/cm}^3$$

● กำหนดอัตราส่วนระหว่างอีพอกซีเรซิน : ผงเปลือกไข่

ชุดที่ 1 Epoxy : Eggshells = 85 : 15
 Eggshells - powder 15% ของปริมาตร = 15% x 18.629 = 2.79 cm³
 น้ำหนัก = 11.19 x 1.042 = 2.91 g
 ฝุ่น +5% = (0.05 x 2.91) + 2.91
 = 3.05 g

Epoxy A : Epoxy B 78 : 22
 Epoxy 85% ของปริมาตร = 85% x 18.629 = 15.83 cm³
 Epoxy A ปริมาตร = 78% x 15.83 = 12.35 cm³
 น้ำหนัก = 12.35 x 1.042 = 12.86 g
 ฝุ่น +5% = (0.05 x 12.86) + 12.86
 = 13.50 g

Epoxy B ปริมาตร = 22% x 18.629 = 4.09 cm³
 น้ำหนัก = 4.09 x 1.042 = 4.27 g
 ฝุ่น +5% = (0.05 x 4.27) + 4.27
 = 4.48 g

Eggshells - powder = 3.05 g
 Epoxy A = 13.50 g
 Epoxy B = 4.48 g

ชุดที่ 2 Epoxy : Eggshells = 65 : 35
 Eggshells - powder 35% ของปริมาตร = 35% x 18.629 = 6.52 cm³
 น้ำหนัก = 6.52 x 1.042 = 6.79 g
 ฝุ่น +5% = (0.05 x 6.79) + 6.79
 = 7.12 g

Epoxy A : Epoxy B 78 : 22
 Epoxy 65% ของปริมาตร = 65% x 18.629 = 12.10 cm³
 Epoxy A ปริมาตร = 78% x 12.10 = 9.44 cm³

	น้ำหนัก	= 9.44 x 1.042	= 9.82 g
	เนื้อ +5%	= (0.05 x 9.82) + 9.82	
			= 10.31g
Epoxy B	ปริมาตร	= 22% x 18.629	= 4.09 cm ³
	น้ำหนัก	= 4.09 x 1.042	= 4.27 g
	เนื้อ +5%	= (0.05 x 4.27) + 4.27	
			= 4.26 g
	Eggshells -powder		= 28.57 g
	Epoxy A		= 10.36 g
	Epoxy B		= 4.26 g
ชุดที่ 3 Epoxy : Eggshells = 50 : 50			
	Eggshells -powder 50% ของปริมาตร	= 50% x 18.629	= 9.31 cm ³
	น้ำหนัก	= 9.31 x 1.042	= 9.70 g
	เนื้อ +5%	= (0.05 x 9.70) + 9.70	
			= 10.18 g
Epoxy A : Epoxy B		78 : 22	
	Epoxy 50% ของปริมาตร	= 50% x 18.629	= 9.31 cm ³
Epoxy A	ปริมาตร	= 78% x 9.31	= 7.26 cm ³
	น้ำหนัก	= 7.26 x 1.042	= 7.57 g
	เนื้อ +5%	= (0.05 x 7.57) + 7.57	
			= 7.94 g
Epoxy B	ปริมาตร	= 22% x 9.31	= 2.04 cm ³
	น้ำหนัก	= 2.04 x 1.042	= 2.13 g
	เนื้อ +5%	= (0.05 x 2.13) + 2.13	
			= 2.23
	Eggshells -powder		= 10.18 g
	Epoxy A		= 7.94 g
	Epoxy B		= 2.23 g



ภาคผนวก ง
ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่



NATIONAL AND INTERNATIONAL SRIPATUM UNIVERSITY CONFERENCE 2017

การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 12 ประจำปี 2560

เรื่อง ผลงานวิจัยและนวัตกรรมสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน

14 December 2017

Sripatum University, Bangkok

SPU
SRIPATUM
UNIVERSITY



NATIONAL AND
INTERNATIONAL
SRIPATUM
UNIVERSITY
CONFERENCE
2017

การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 12 ประจำปี 2560
เรื่อง ผลงานวิจัยและนวัตกรรมสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน
(Research and Innovations for Sustainable Development)

วันพฤหัสบดีที่ 14 ธันวาคม 2560

ณ ห้อง Auditorium ชั้น 14 อาคาร 40 ปี มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รวบรวมโดย
คณะกรรมการพิจารณาผลงาน
การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ประจำปี 2560
ออกแบบปกโดย สำนักงานประชาสัมพันธ์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
จัดรูปเล่มโดย โรงพิมพ์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

- บทความทุกเรื่อง ได้รับการตรวจสอบทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิ แต่ข้อความและเนื้อหาและบทความที่ตีพิมพ์เป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนและผู้ตีพิมพ์ ไม่ใช้ความคิดเห็นและคำวิจารณ์ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม
- การคัดลอกอ้างอิงต้องดำเนินการตามการปฏิบัติในหมู่นักวิชาการทั่วไป และสอดคล้องกับกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

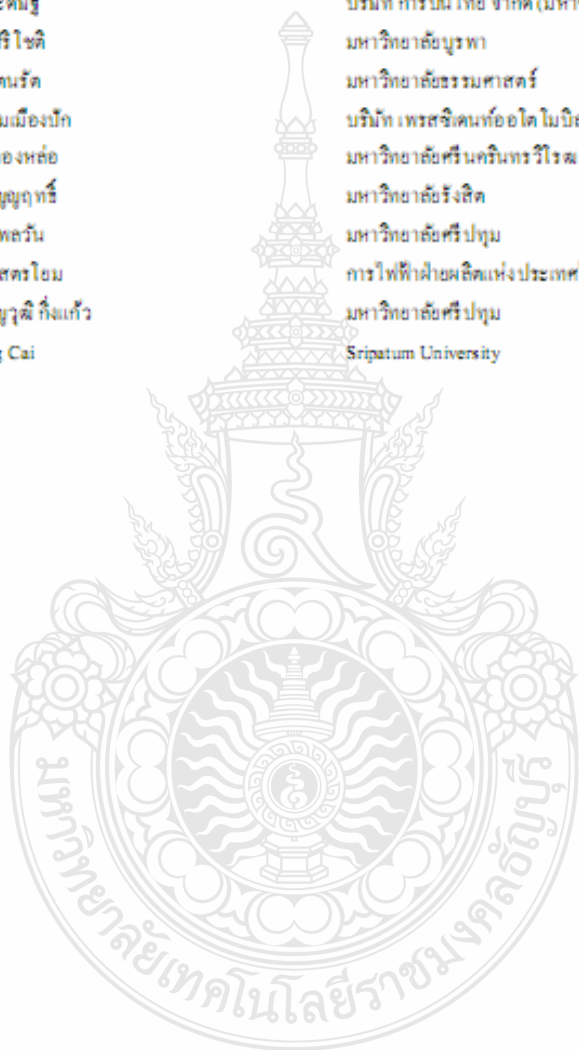
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 12 ประจำปี 2560

ศาสตราจารย์พิเศษ ดร.จำเริญ จวงตระกูล	Far East University, South Korea
ศาสตราจารย์ ดร.จำนงค์ อัครวัฒนสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.สันศักดิ์ ศรีอนันต์ทิพบุณย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา แก้วเทพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติ ชยะกุลศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐี ตะกอง	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
รองศาสตราจารย์ ดร.จิรศักดิ์ อินทรทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ พ.ต.อ.หญิง ดร.ทิพย์มัทพร เกมโสมภ	วิทยาลัยพยาบาลตำรวจ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัญญา วสุศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ วุฒิชัยรอง	มหาวิทยาลัยรังสิต
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญศรี พรหมมาพันธุ์	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
รองศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เขียวกุล	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะกร หวังมหาพร	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กองเจริญ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมบุษ อภิบุญ โยภาส	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.โยชิน แสงรังสี	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชนิกุล ภิญโญภานุวัฒน์	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิ่งเศษ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีณัฐวรรณนิจธิดา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรีย์ คณะประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพร ชินะวัฒน์	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
รองศาสตราจารย์ จรินทร์ เทควาณิช	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
รองศาสตราจารย์ โฉม ใส ศักดิ์วีระพงษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ชินฉัตรค์ แจ้งจันทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นิตยา เงินประเสริฐศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นิภา ศรีโพธิ์โรจน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ รุ่งฤดี แผลงพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ สถาพร ซาคาอุม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ เอกษิตา เสริมทอง	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา มีศิลปวิภักดิ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลวรา สุวรรณพิมพ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา ชัยรัตนวรรณ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา วงษ์ดีคนแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิศ คาราวงษ์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณกุล ชรณี นิตินุยาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐรุจิ อัครว โกวาทวงศ์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภทพทธี บัญญัติ วัฒนาวงศ์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนนรรณ แสงสุวรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรีณี มณีศรี	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ อังสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประณต บุญไชยอภิสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ สิทธิชัยวัฒน์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พระระพีพัฒน์ ภาสบุตร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์ระวี โรจน์รุ่งสัจย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูลพงศ์ สุขสว่าง	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งรัศมี บุญดาว	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรัตน์ ปัดประกร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ วงศ์โคดมวังศิริเจริญ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ไทยมา	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไล สีมถาวรเนนดี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรงค์ ชัยพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ์ สัมสมบุญชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ พ่วงแสงสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ฤกษ์สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ สาระพัด	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริ นธร สีนจีนดวงค์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภัทตรา สุทธิสุภา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภัทตรา เกษมพงศ์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภณ เจริญ	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิภา ปรีชญพญาธี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรา ศิริศรีรัตน์	มหาวิทยาลัยอีสต์สมิธัญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุพงษ์ อธิวงษา	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศม์เดช วาณิชชินชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชนภณ สมพงษ์	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ณกุล ปิ่นโต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรีเมษฐ์ บุญญาเหล็ก	มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
ดร.ชาติ วรกุลพิพัฒน์	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ดร.ทวี ชันทชัยชนะ	มหาวิทยาลัยสยาม
ดร.นาวัน มีะกรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.บุญญาดา นาสมบูรณ์
ดร.บุณทิพงษ์ คุ้มโศภาท
ดร.ภาสวรรณ สุเนตรารักษ์
ดร.มงคล อัครศิลป์กฤทธิ
ดร.วิชณี จันทร์เกษม
ดร.ธงชัย ชีระดิษฐ์
ดร.ธีรภัค ศรีศิริโชติ
ดร.เนกมน รัตนรัตน์
ดร.วรากร แซ่มณีองบัก
ดร.วิชชุกร ทองหล่อ
ดร.ศุภกร บุญญฤทธิ์
ดร.สุวิทย์ฉาย พลวัน
ดร.อาทิตย์ ใสศรีโฮม
อาจารย์สุชาวุฒิ กิ่งแก้ว
Dr.Yuanfeng Cai

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สำนักงานอธิการบดีศูนย์คหิสัมพันธ์หลาย 1
มหาวิทยาลัยอิมพีคัล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
กระทรวงสาธารณสุข
บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
บริษัท เทคซิเคนทออลโต โมบิล จำกัด
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย
มหาวิทยาลัยศรี ปทุม
Sripatum University



ห้องที่ 3 : 11-12A01 (วิทยาศาสตร์)
 ประธาน : ผศ.ดร. สมเกียรติ ทรายสวัสดิ์
 เลขานุการ : อ. จักรพันธ์ กัณฑ์หา

เวลา	ชื่อบทความ	ผู้นำเสนอ
10.45-11.00 น.	กายวิภาคศาสตร์เชิงปริมาณเปรียบเทียบกันข้อคอกปาล์มผลิตน้ำตาลและปาล์มไม่ผลิตน้ำตาลในประเทศไทย	ปณัญญ์ สมใจอ้าย และ อรุณทัย จำปีทอง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11.00-11.15 น.	การศึกษาคุณสมบัติของมาตรวัดความฉลาดทางสุขภาพจิต (The Mental Health Literacy Scale) ฉบับภาษาไทย	รังสิภรณ์ ศรีเพ็ญ กอบหทัย สิทธิธนฤกษ์ และ สุชีรา ภัทรายุทธวรรณ คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล
11.15-11.30 น.	การปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุผสมอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยผงบดจากเปลือกไข่	อินทรี ศรีสุข อนินท์ มีมนต์ และ ศิริชัย ต่อสกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
11.30-11.45 น.	การใช้ริงเทียมแบบกลองเพื่อเพิ่มความหลากหลายชนิดและความชุกชุมของนกในพื้นที่ป่าชายเลน บริเวณศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดจันทบุรี	จตุรรัตน์ แดงไทย และ รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
11.45-12.00 น.	การสังเคราะห์ไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟลูโรจากน้ำตาลฟรุกโตสโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตบรจ	เฉลิมเกียรติ สอนเสียม อมราภรณ์ แก้วชะฎา และ อรรดศักดิ์ จารีย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รับประทานอาหารกลางวัน		
13.00-13.15 น.	การพัฒนาตำรับสบู่ก้อนจากสารสกัดสมอไทย	ชลดา จัดประกอบ และ สาวตรี วัฒนุญไพศาล วิทยาลัยการแพทย์บูรณาการ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
13.15-13.30 น.	แบบจำลองการพยากรณ์น้ำหนักสัตว์คอสอดิเกียโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	จุฬาวลี มณีเลิศ สนธยา อินแปง พรวนา รัตนชูโชค สมรวิ อร่ามกุล และประธาน คำจิบะ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

การปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุผสมอีพอกซีเสริมแรงด้วยผงบดจากเปลือกไข่
Improvement in mechanical properties of epoxy composite
reinforced with powder from egg shell

อินทรีย์ ศรีสุข

นักศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: insee.s@en.rmutt.ac.th

ดร.อนันท์ มีมนต์

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: anin.m@en.rmutt.ac.th

ผศ. ดร.ศิริชัย ต่อดุล

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: srichai.to@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลบางประการของวัสดุผสมอีพอกซีเสริมแรงด้วยผงบดจากเปลือกไข่ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ขนาดของผงบดจากเปลือกไข่ 75, 100, 200, 325 เมช และศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนของผงเปลือกไข่ที่ใช้ผสมกับอีพอกซีเรซิน 15, 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าผงบดเปลือกไข่ขนาด 200 เมช แสดงสมบัติทางกลที่ดีที่สุด การผสมผงบดเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ส่วนผสม 15 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งแรงดึง 62.97 เมกะปาสกาล และมีค่าความแข็ง 134.57 HRR ในขณะที่ผสมผงบดเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ส่วนผสม 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด 16.00 จูล ดังนั้นผงบดจากเปลือกไข่ขนาด 200 เมช มีความน่าสนใจนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลโดยการใช้สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่ให้เกิดการเชื่อมโยงหรือที่เรียกว่าสารคู่ควมใจเช่น KH560, KH550 และกรดสตีริก จากการทดลองพบว่าสารคู่ควมใจเช่น KH560 และ KH550 สามารถเพิ่มความแข็งแรงดึงและมอดูลัสให้กับวัสดุผสมอีพอกซีเสริมแรงด้วยผงบดจากเปลือกไข่ซึ่งทำให้มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย

คำสำคัญ: ผงเปลือกไข่, อีพอกซีเสริมแรงด้วยผงบดจากเปลือกไข่, การปรับปรุงสมบัติวัสดุผสมอีพอกซี, สารคู่ควบไซเลน, วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยผงบดเปลือกไข่

ABSTRACT

This research aims to study factors affecting some mechanical properties of epoxy composite reinforced with powder from egg shell. The factors of this study were egg shell powder size of 75, 100, 200, 325 meshes and the ratio of egg shell powder with 15, 35 and 50 percent by weight. From mechanical testing, it was found that epoxy composite reinforced with egg shell powder size of 200 mesh showed the best mechanical properties. Epoxy composite reinforced egg shell powder size of 200 mesh with mixing ratio of 15 percent had tensile strength 62.97 MPa and hardness 134.57 HRR. Meanwhile, the ratio of egg shell powder size 200 mesh with mixing ratio of 50 percent showed maximum absorb energy 16.00 J. Therefore egg shell powder of 200 mesh was interested to improvement mechanical properties by using silane coupling agent KH560, KH550 and stearic acid. From the experiment, silane coupling agent KH560 and KH550 could increase tensile strength and modulus of epoxy composite reinforced with egg shell powder that were suitable for various applications.

KEYWORDS: Egg Shells Powder, Epoxy reinforced with powder from egg shell, Improvement of epoxy composite, Silane coupling agent, Epoxy composite reinforced egg shell powder,

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาวิจัย

ในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมอาหารขนาดกลางและขนาดย่อมหลายแห่งใช้ “ไข่” เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไม่ว่าจะเป็นอาหารคาวและขนมหวาน จากข้อมูล (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์) ได้แสดงข้อมูลปี 2560 พบว่ามีปริมาณการบริโภคไข่ไก่ถึง 15,868 ล้านฟอง จึงทำให้มีเปลือกไข่จำนวนมาก ถูกทิ้งเป็นขยะ เกิดเป็นแก๊สไข่เน่าเกิดเป็นแมลงวัน จึงมีหลากหลายความพยายามที่จะนำเปลือกไข่เหลือทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์ เช่นการนำเปลือกไข่มาซักผ้า การนำเปลือกไข่มาใส่หมุด รวมถึงการนำเปลือกไข่มาใส่แมลง (วิจัย คาร์บอนกัมมันต์, เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์) แต่ก็ยังมีเหลือเป็นขยะอีกมาก

ในเปลือกไข่ไก่มีองค์ประกอบย่อย 2 ส่วนหลักคือ เยื่อหุ้มเปลือกไข่ (Membrane) และเปลือกไข่ (Egg Shells) ในเปลือกไข่ไก่นั้นมีองค์ประกอบ CaCO_3 อยู่ถึง 99.0% ซึ่งจะพบว่าส่วนประกอบหลักของเปลือกไข่ คือ CaCO_3 , หรือที่รู้จักกันคือแคลเซียมคาร์บอเนต จากการศึกษาข้อมูลพบว่ามีการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติม (Filler) เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกและกระดาษ (วิลลิกซ์ สู่ตะพันธ์, การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกไข่ไก่)

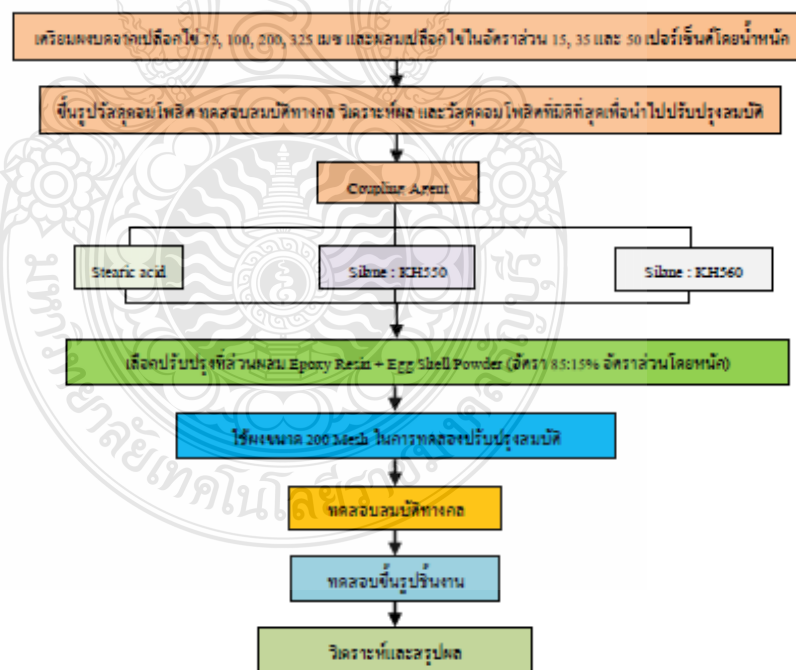
จากการศึกษาพบว่ามีงานวิจัยการเติมผงอูมิเยียม (อนิก กู้จ่างงค์, กระบวนการทำแม่พิมพ์รวดเร็วด้วย อีพอกซีเรซินสำหรับงานฉีดพลาสติก) และการเติมผงบดจากเศษแก้ว (สุทธิศล แสงดาว และวิทยา กาญจนเจริญ นนท์, การศึกษาการใช้ผงแก้วจากขวดแก้วรีไซเคิลเสริมแรงในอีพอกซีเรซิน) ลงไปในเรซินสำหรับสำหรับขึ้นรูป วัสดุ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำเปลือกไข่ไก่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ จะเป็นการใช้ ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกไข่ไก่ได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาด และปริมาณของผงบดจากเปลือกไข่เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน
- (2) ปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุผสมอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยผงบดจากเปลือกไข่

3. กรอบแนวคิดในการวิจัย

ก่อนจะทำการทดลองนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมอีพอกซีเรซินเสริมแรง ด้วยผงบดจากเปลือกไข่ พบว่าผลของอัตราส่วนผสมและผลของขนาดผงเปลือกไข่ต่างมีผลต่อสมบัติทางกลของ วัสดุแต่ยังพบว่าสมบัติของวัสดุยังไม่ดี จึงต้องมีการทดลองเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลบางประการของวัสดุ โดยทำการคัดเลือกตัวแปรที่นำมาปรับปรุงสมบัติดังกล่าวกรอบแนวคิดในการวิจัยแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมผงเปลือกไข่

การทดลองแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากส่วนของเปลือกไข่ ได้กำหนดวิธีการแยกเปลือกไข่ออกเป็น 5 รูปแบบ โดยใช้สารละลายแต่ละชนิด 0.5 ลิตร และเปลือกไข่ 200 กรัม พบว่าน้ำเปล่า และน้ำส้มควันไม้ ไม่สามารถแยกเยื่อเปลือกไข่ได้ ในขณะที่ น้ำส้มสายชู กรดอะซิติก กรดซัลฟูริก และโซดาไฟสามารถแยกเยื่อเปลือกไข่ได้ แต่จะพบว่าแต่ละวิธีในการแยกเยื่อนั้นถึงแม้จะสามารถลอกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่ได้ แต่ใช้เวลาในการแยกเยื่อและปริมาณเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่

สารทดสอบ	ผลการแยกเยื่อ	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณเปลือกไข่ที่ได้ (กรัม)
1. น้ำเปล่า	ไม่สามารถแยกได้	-	-
2. น้ำส้มสายชู เข้มข้น 8%	แยกได้	6	125 กรัม
3. กรดอะซิติก เข้มข้น 12 mol	แยกได้	4	130 กรัม
4. กรดซัลฟูริก เข้มข้น 6 mol	แยกได้	36	100 กรัม
5. น้ำส้มควันไม้	ไม่สามารถแยกได้	-	-
6. โซดาไฟ เข้มข้น 25%	แยกได้	1	150 กรัม

ทำการตรวจสอบเปลือกไข่ที่ผ่านการแยกเยื่อแต่ละชนิด ด้วยเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในเปลือกไข่ จากการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่ามีค่าของแคลเซียมเป็นปริมาณสูง และได้ทำการ สรุปลผล โดยจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารที่ใช้แยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ ถึงแม้ว่าจะให้ค่าของปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตน้อยกว่าสารชนิดอื่น แต่เมื่อดูถึงเรื่องเวลาและปริมาณของเปลือกไข่ที่ได้หลังจากการทดสอบการแยกเยื่อของสารแต่ละตัวนั้น ทำให้ผู้ทดลองเลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟเป็นสารแยกเยื่อ เพราะใช้เวลาแยกเยื่อน้อยที่สุดได้เปลือกไข่มากที่สุด และปริมาณค่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการทดสอบนั้นก็มีค่าที่ไม่ได้ต่างกันมากนัก สอดคล้องกับผลงานบทความของ (วิจัยดำรงโลกทัศน์, เทศโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์) ที่กล่าวถึงปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่มากในเปลือกไข่

จากนั้นนำเปลือกไข่ลอกเยื่อหมดแล้วมาบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์ และทำการคัดแยกขนาดผงเปลือกไข่ด้วย ตะแกรง Mesh ให้ได้ขนาด 75 100 200 325 mesh ลักษณะของผงบดจากเปลือกไข่ที่ผ่านการลอกเยื่อแล้ว ดังภาพที่ 3

4.2 การปรับปรุงพื้นผิวของผงเปลือกไข่

สารที่ช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ ทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมระหว่างทั้งสองโมเลกุลไว้ โดยส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยากับฟิลเลอร์และอีกส่วนของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดการรวมตัว หรือทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดีเมื่อพื้นผิวฟิลเลอร์ได้รับการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบปฏิกิริยาจะช่วยลดแรงดึงผิวของวัสดุ (นิลบล เมื่อกบัวขาว, สมบัติ

เชิงกลและฐานฐานวิทยาของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง)

4.2.1 การออกแบบการทดลอง จากการศึกษาพบว่ามีการใช้ Coupling Agent กลุ่ม Staeric และ Silane (KH550) มาใช้ปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนต (Hanifi Binici. Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement sand and egg shells) ในงานวิจัยนี้จึงใช้ Stearic และ Silane (KH550) และ (KH560) มาทำการทดลองกับผงเปลือกไข่ โดยใช้วิธีการเริ่มจากกวนสารละลายกระจายทั่วผงเปลือกไข่ด้วย Stürer ใช้ อัตราส่วน $CaCO_3$ อนุภาค จำนวน 2.0 กรัม ต่อ Coupling 2.0 กรัม โดยเติมสารละลายเอทานอล 95% จำนวน 100 มล. ลงไปด้วย หมวนกั้นโดยการกวนด้วย Stürer (แม่เหล็ก) ใช้อุณหภูมิที่ $60^{\circ}C$ นาน 8 ชั่วโมง หลังจากที่ผ่านมากระบวนการกวนสารแล้ว ก็จะนำเปลือกไข่และสารทั้งหมดมาผ่านกระบวนการกรองสาร โดยใช้ชุดสุญญากาศในการดูดไล่สารอื่นออกจากพื้นผิวของเปลือกไข่ ดังภาพที่ 4

4.2.2 การอบแห้ง ทำได้โดยนำเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Coupling เรียบร้อยแล้ว นำมาใส่ถาดคั่นเค้กด้วยฟอยล์ ก่อนอบที่แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์ XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy) ของเปลือกไข่



ภาพที่ 3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ



ภาพที่ 4 การกวนสารและการกรองสาร



ภาพที่ 5 ผงเปลือกไข่อบแห้ง

4.3 การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีผสมผงเปลือกไข่สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกล

ในส่วนของการทดลอง จะเริ่มจากการเปิดแม่พิมพ์ที่ผ่านการออกแบบอ้างอิงมาตรฐาน ASTM Standard ทำความสะอาดด้วยสารอะซิโตนและทำการประกอบแม่พิมพ์ ก่อนจะพ่นด้วยซิลิโคนสเปรย์ให้เป็นฟิล์มบางๆ เพื่อช่วยในการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ที่ระดับเพื่อความสะดวกของแม่พิมพ์และเพื่อให้ง่ายต่อการเตรียมการหล่อ อีพอกซีเรซิน เป็นตามที่ออกแบบแผนการทดลองด้วยโปรแกรมไว้ด้วย DOE โดยแต่ละเงื่อนไขของการทดสอบนั้น จะใช้ตัวอักษร A-P เป็นตัวแปร (วรากร พงษ์เมฆา การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากผงกะลาและฟิวรัวกับอีพอกซีเรซิน)

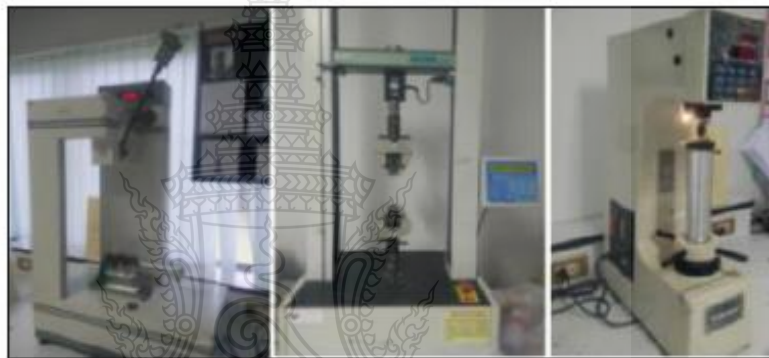
4.3.1 ชั่งตวงส่วนผสม ผงและส่วนด้วยตาชั่งดิจิทัล ให้ได้ปริมาณตามที่คำนวณไว้ จะได้ส่วนผสมทั้งหมด 3 ตัว คือ อีพอกซีเรซิน ฮาร์ดเค็นเนอร์ และผงเปลือกไข่ โดยทุกชุดจะเริ่มจากการผสม ฮาร์ดเค็นเนอร์กับผงเปลือกไข่ก่อน (ผงเปลือกไข่บดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศา เพื่อป้องกันฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นที่ชิ้นงาน) ผสมผงเปลือกไข่กับอีพอกซีเรซินชนิด A คนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเวลา 10 นาที

4.3.2 กวนสาร ค่อยๆ กวนให้เข้ากันช้าๆ ก่อนจะนำไปเข้าสู่สุญญากาศ เพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำ อีพอกซีเรซินที่ตวงไว้มาเติมผสมลงไปภายหลัง จากนั้นก็ทำการกวนให้เข้ากันอีกครั้งด้วยเครื่องกวนที่รอบต่ำ เป็นเวลา 20 นาที และจึงนำไปเข้าสู่สุญญากาศอีกครั้ง เป็นเวลา 15 นาที เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศหรือรูพรุนที่ชิ้นงานนั่นเอง หลังจากผสมสารอีพอกซีเรซินชนิด B ลงไปแล้ว ใช้เครื่องกวนรอบต่ำกวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และนำเข้าเครื่องสุญญากาศ 10 นาที

4.3.3 เทลอมเมอร์ นำส่วนผสมทั้งหมดที่ได้เตรียมไว้เข้ากันดีแล้วนำมาเทลงแม่พิมพ์ รอนจนชิ้นงานแข็งตัวที่เวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงทำการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยขั้นแรกต้องทำการคลายสกรูออกทั้งหมด และแยกแม่พิมพ์ทั้งสองฝั่งออกจากกัน แล้วค่อยๆ ปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ก็จะได้อุปกรณ์ที่พร้อมจะนำไปทำการทดสอบสมบัติต่อไป

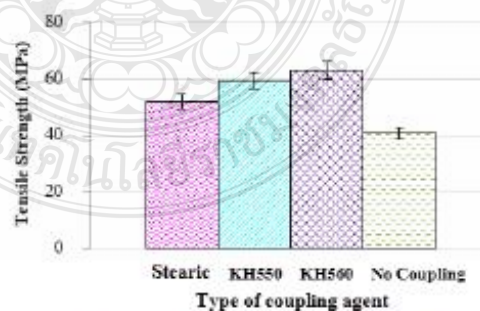
4.4 ผลการทดสอบ

เมื่อได้ชิ้นงาน ที่ผ่านกระบวนการหล่อจากแม่พิมพ์ที่ได้ขึ้นรูปตามมาตรฐานการทดสอบแล้ว จึงนำชิ้นงานชิ้นงานที่ได้นั้นมาทำการทดสอบ โดยการทดสอบดังกล่าว ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ห้องทดสอบของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ดังภาพที่ 6

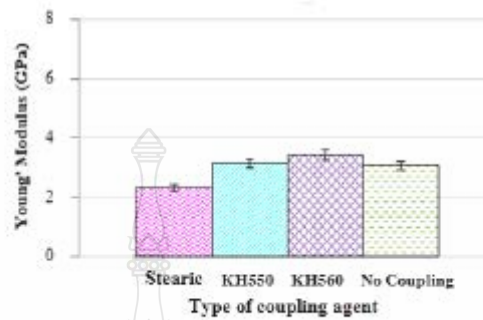


ภาพที่ 6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ผลการทดสอบค่าสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุ (ASTM D638) การทดลองภายใต้รูปแบบตัวแปร ที่ได้ทำการออกแบบไว้จะ ได้ผลการทดลอง 2 ตัวคือผลการทดสอบค่า Tensile Strength และ ค่า Young's Modulus รายละเอียด ดังภาพที่ 7 และ 8

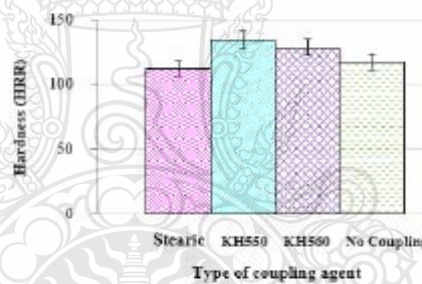


ภาพที่ 7 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช สัดส่วนการผสม 15% ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent



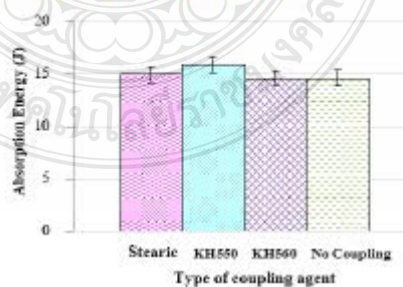
ภาพที่ 8 แสดงค่า Young's Modulus ของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ส่วนผสม 15% ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent

ผลทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ (ASTM D785) การทดลองภายใต้รูปแบบตัวแปร ที่ได้ทำการออกแบบไว้ จะได้ผลการทดลองรายละเอียด ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ส่วนผสม 15% ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent (ใช้แรงกด 60Kg. HRR)

ผลทดสอบค่าสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุ (ASTM D256) การทดลองภายใต้รูปแบบตัวแปร ที่ได้ทำการออกแบบไว้ จะได้ผลการทดลองรายละเอียด ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ผสมผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ส่วนผสม 15% ที่ผ่านการปรับสภาพของผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent

4.5 ผลสำเร็จจากการทดสอบการขึ้นรูป

ภายหลังจากการทดสอบสมบัติเชิงกลบางประการและทำการปรับสภาพผงเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent แล้วผู้จัดทำได้ทำการหล่อขึ้นรูปจากผลการทดสอบที่ดีมาขึ้นรูปโดยเลือกใช้ผงเปลือกไข่ขนาด 200 เมช ที่ผ่านการ Post cure เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการปรับสภาพผิวเปลือกไข่ด้วย Coupling Agent ดังภาพที่ 11 ซึ่งเป็นแม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming mold)



ภาพที่ 11 ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบขึ้นรูปเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองมุ่งเน้นปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุผสมอิพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยผงเปลือกไข่ โดยใช้ Coupling Agent เป็นองค์ประกอบหลักในการปรับสภาพพื้นผิวผงเปลือกไข่ขนาดอนุภาค ซึ่งซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

(1) จากการทดลองพบว่าวัสดุจะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งสูงสุดเมื่ออัตราส่วนผสมผงเปลือกไข่ 15 % ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดคือผสมผงเปลือกไข่ที่ 50% ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะปริมาณอิพอกซีเรซินที่มากกว่าในตัวอย่างอื่น ๆ ทำให้เนื้อของวัสดุสามารถยึดเหนี่ยวระหว่างกันได้ดี ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงดึง วัสดุจะสามารถกระจายแรงไปยังส่วนต่างๆ ของเนื้อวัสดุได้ดีกว่านั่นเองและมีผลโดยตรงกับขนาดของผงเปลือกไข่ผงเปลือกไข่มีขนาดใหญ่จะเกิดการตกตะกอนในชิ้นงาน ส่วนผงเปลือกไข่ที่มีขนาดเล็กเกินไปจะลอยขึ้นด้านบนผิวงาน ส่งผลให้ค่าสมบัติของวัสดุนั้นต่ำลง ซึ่งไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ (Hanifi Binici, et al Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement sand and egg shells.)

(2) สมบัติทางกลดีขึ้น เมื่อผงเปลือกไข่ ถูกปรับสภาพพื้นผิวด้วย Coupling Agent ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะผงเปลือกไข่ที่เป็นสารตัวเดิมนั้น ได้เปลี่ยนสภาพพื้นผิวมาทำหน้าที่เป็น Reinforcement อย่างเต็มที่ ทำให้สารตัวเนื้อหรือ Matrix จับตัวกันได้ดีมากขึ้น โดยจะเห็นได้ว่า Silane KH560 และ KH550 จะมีผลทำให้ค่าสมบัติทางกลดีขึ้นตามลำดับ ส่วน Stearic นั้น โดยรวมไม่สามารถทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น

(3) ผงเปลือกไข่และอิพอกซีเรซินสามารถนำมาผสมในอัตราส่วนตามที่ทดลองไว้ข้างต้น จะทำให้ขึ้นรูปชิ้นงานสมบูรณ์และมีสมบัติทางกลที่ดีได้

6. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะการนำไปใช้งาน การใช้ส่วนผสมควรรวเลือกใช้ขนาดของผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เล็กเกินไปจะทำให้ส่วนผสมลอยขึ้นด้านบนทำให้สมบัติของวัสดุต่ำลง จากการทดสอบพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เป็นสารตัวเดิมนั้นควรตรวจสอบหรือปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคถึงความเข้ากันก่อนการนำวัสดุเพื่อใช้เสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตอื่น สำหรับข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป ผู้วิจัยสามารถใช้ยางซิลิโคนมาช่วยในการสร้างแบบหล่อเพื่อให้การปลดชิ้นงานได้ง่ายกว่าการทำแบบหล่อด้วยโลหะ และหาวิธีควบคุมฟองอากาศ เนื่องจากฟองอากาศเป็นสาเหตุหลักๆที่ทำให้ค่าสมบัติของวัสดุต่ำลงเพราะมีเกิดการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และอาจารย์ทุกท่านในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้คำปรึกษาในการศึกษาค้นคว้า และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลอง

8. เอกสารอ้างอิง

- สถานการณสินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2560 สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
- วิจัย ดำรงโลกทัศน์. (2555). เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรอาหารและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์.
- วิลลक्षण สุตะพันธ์. (2554). การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเปลือกไข่ไก่. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เอนก กู้จ่านงค์. (2550). กระบวนการทำแม่พิมพ์รวดเร็วด้วยอีพอกซีเรซินสำหรับงานผลิตพลาสติก. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- สุทธิศล แสงดาว และวิทยา กาญจนเจริญนท์. (2558). การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่เสริมแรงในอีพอกซีเรซิน. ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- นิลุบล เทือกบัวขาว. (2550). สมบัติเชิงกลและสถานะวิทยาของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Hongwei He A, et al (2012) has Compressive properties of nano-calcium carbonate/epoxy and its fibre composites.
- วรากร พงษ์เมษา. (2556). การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากผงกะลาและฟัววกับอีพอกซีเรซิน. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Hanifi Binici , et al (2015) has Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement sand and egg shells.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล	นายอินทรีย์ ศรีสุข
วัน เดือน ปี เกิด	23 กุมภาพันธ์ 2532
ที่อยู่ปัจจุบัน	55/2 หมู่ 9 ตำบลบึงชำอ้อ อำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานี 12170
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ.2555
ประวัติการทำงาน (ถ้ามี)	
พ.ศ. 2553 - 2556	ตำแหน่งช่างเทคนิคแผนกแมชชีน บริษัทศิษย์เทคโนโลยี จำกัด
พ.ศ. 2556 - ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกรแผนกผลิตแม่พิมพ์ บริษัทไดวา คาเซอิ ไทยแลนด์ จำกัด
โทรศัพท์	082-234-6663
อีเมล	insee.s@rmutt.ac.th

